

Reseña

Herederero de la serie *Cosmos* que condujera Carl Sagan, Neil deGrasse Tyson es uno de los divulgadores de la ciencia más conocidos de hoy en día. Los lectores asiduos de sus ensayos mensuales en la revista *Natural History* han reconocido desde hace tiempo el talento de Tyson para guiarlos a través de los misterios del cosmos con gran claridad.

Más de cuarenta de los ensayos favoritos del autor se reúnen en *Muerte por agujeros negros* para explorar una miríada de temas cósmicos: lo que sería estar dentro de un agujero negro; los orígenes del universo, los esfuerzos mal logrados de la industria cinematográfica por reproducir fielmente los cielos nocturnos, entre muchos más.

Tyson es un maestro natural que simplifica las complejidades de la astrofísica mientras comparte su fascinación por nuestro universo.

« [Tyson] abarca un gran rango de temas... con gran sentido del humor, humildad y, lo más importante, humanidad.» *Entertainment Weekly*

Índice

[Prefacio](#)

[Agradecimientos](#)

[Prólogo](#)

1. [La naturaleza del conocimiento](#)
2. [El conocimiento de la naturaleza](#)
3. [Métodos y normas de la naturaleza](#)
4. [El significado de la vida](#)
5. [Cuando se enoja el universo](#)
6. [Ciencia y cultura](#)
- 7: [Ciencia y Dios](#)

[Bibliografía](#)

[Autor](#)

Sospecho que el universo no es solamente más extraño de lo que suponemos, sino mucho más de lo que podemos suponer.

J. B. S. HALDANE,

Mundos posibles (1927)

Prefacio

Veo el universo no como un conjunto de objetos, teorías y fenómenos, sino como actores en un vasto escenario que representan una historia llena de recovecos. Así que cuando escribimos acerca del cosmos, parece natural que llevemos a los lectores tras bambalinas para que aprecien de cerca los decorados, cómo se escribió el drama y adónde se dirige la trama. Mi propósito ha sido siempre tratar de explicar cómo funciona el universo, lo que es más difícil que meramente exponer datos. A veces, cuando la historia del cosmos lo amerita, se puede esbozar una sonrisa o fruncir el ceño o, del mismo modo, aterrarse indeciblemente. Por lo cual concibo a *Muerte por agujeros negros* como un portal para que el lector observe aquello que nos conmueve, ilumina o aterrera del universo.

Cada capítulo fue publicado originalmente en las páginas de la revista *Natural History* con el título general de *Universe*, y abarca un periodo de 11 años, desde 1995 a 2005. *Muerte por agujeros negros* es, pues, una especie de antología de lo mejor de *Universe* e incluye

algunos de mis ensayos más leídos, editados un poco para darles cierta continuidad y para que reflejen las tendencias más recientes de la ciencia.

Así pues, ofrezco esta colección al lector como una interesante distracción de su rutina cotidiana.

NEIL DEGRASSE TYSON

NUEVA YORK, OCTUBRE DE 2006

Agradecimientos

Respecto del universo, me he especializado en estrellas, la evolución estelar y la estructura galáctica, por lo cual no podría escribir con autoridad acerca de los amplios temas de esta antología sin contar con los cuidadosos ojos de mis colegas, cuyos comentarios en torno a mis manuscritos mensuales a menudo convirtieron lo que pudo haber sido tan solo una simple idea en una idea matizada con significados provenientes de las fronteras del descubrimiento del cosmos. Para lo relativo al sistema solar, agradezco a Rick Binzel, antiguo compañero de clase en la universidad y actualmente profesor de Ciencias Planetarias del MIT; recibió muchas desesperadas llamadas telefónicas mías para preguntarle acerca de lo que yo había escrito o estaba por escribir sobre los planetas y sus ambientes.

Otros colegas que cumplieron esta función fueron los profesores de astrofísica de la Universidad de Princeton Bruce Draine, Michael Strauss y David Spergel, cuyo conocimiento en química cósmica, galaxias y cosmología me permitió profundizar mucho más en ese acervo de lugares cósmicos de lo que me hubiera sido posible. De mis colegas, entre los más cercanos a estos ensayos estuvo Robert Lupton (de Princeton), quien, educado con propiedad en Inglaterra, me parece como si supiera todo acerca de todo. En la mayoría de los textos de esta antología, la atención de Robert a todos los detalles científicos y literarios mejoraron sustancialmente mi trabajo autoral. Otro colega y generalista en atender mi trabajo fue Steven

Soter. Mis escritos estarían inconclusos de no haber pasado por su examen.

Proveniente del mundo literario, Ellen Goldensohn, mi primera editora en *Natural History*, me invitó a escribir una columna en 1995 luego de escucharme en una entrevista en National Public Radio. Acepté de inmediato, y esta tarea mensual ha sido de las cosas más emocionantes y agotadoras que he hecho. Mi actual editor, Avis Lang, ha continuado la labor que Ellen inició, asegurándose de que yo haya dicho lo que quise decir. Debo mucho a ambos por el tiempo que han dedicado a convertirme en un mejor escritor. Otros que han ayudado a mejorar o a expandir el contenido de uno o más de mis ensayos son Phillip Branford, Bobby Fogel, Ed Jenkins, Ann Rae Jonas, Betsy Lerner, Mordecai Mark Mac-Low, Steve Napear, Michael Richmond, Bruce Stutz, Frank Summers y Ryan Wyatt. Kyrie Bohin-Tinch, voluntaria de Hayden, colaboró heroicamente conmigo para organizar el universo de este libro. Y agradezco a Peter Brown, director editorial de *Natural History*, por publicar mis escritos y permitirme reproducir los ensayos que seleccioné para esta antología.

Esta página estaría incompleta sin referirme a mi deuda con Stephen Jay Gould, cuya columna de *Natural History*, «This View of Life», abarca unos 300 ensayos. Por siete años, de 1995 a 2001, nos cruzamos en la revista, y cada mes sentía su presencia. Stephen prácticamente inventó el ensayo moderno y su influjo en mí es evidente. Cada cuando debo adentrarme en la historia de la ciencia, adquiero y leo las frágiles páginas de libros centenarios, como Gould

hizo a menudo, para extraerles una rica muestra de cómo quienes nos antecieron trataron de comprender la forma en que opera el mundo natural. Su prematuro fallecimiento a los 60 años de edad, como el de Carl Sagan a los 62, dejó en el mundo de la ciencia un vacío que permanece hasta nuestros días.

Prólogo

El inicio de la ciencia

El éxito con que las leyes físicas conocidas explican el mundo que nos rodea ha engendrado algunas actitudes petulantes y lapidarias respecto del estado del conocimiento humano, en especial cuando se percibe que las lagunas en nuestro conocimiento de objetos y fenómenos son pequeñas e insignificantes. Los premios Nobel y otros científicos reconocidos no son ajenos a esta postura y, en algunos casos, se han puesto en ridículo.

En un discurso que pronunció al inaugurarse el laboratorio de física Ryerson de la Universidad de Chicago en 1894, Albert A. Michelson, futuro premio Nobel, vaticinó famosamente el fin de la ciencia: «Ya los hechos y las leyes fundamentales de la ciencia han sido descubiertos, y se hayan tan bien establecidos que la posibilidad de que sean reemplazados a consecuencia de nuevos descubrimientos es enormemente remota [...] Deben buscarse nuevos descubrimientos en el sexto lugar de los decimales» (Barrow, 1988: 173).

Uno de los astrónomos más brillantes del siglo XIX, Simon Newcomb, cofundador de la Sociedad Astronómica Americana, compartió el punto de vista de Michelson en 1888, cuando señaló: «estamos acercándonos al límite de lo que podemos conocer de la astronomía» (1888: 65). Hasta el gran físico lord Kelvin, quien — como veremos en la parte 3— bautizó la escala de temperaturas absolutas con su nombre, fue abatido por su propia confianza en

1901 cuando declaró: «Hoy nada nuevo puede descubrirse en la física. Lo único que queda es medir con la mayor exactitud» (1901: 1). Tales comentarios se expresaron en una época en la cual el éter luminoso se consideraba el medio por el cual la luz se difundía por el espacio y cuando la leve diferencia entre el paso observado y pronosticado de Mercurio alrededor del Sol era un tema real y aún pendiente. Tales dilemas se consideraban nimios, que demandaban si acaso algunos ajustes menores a las leyes físicas conocidas que los regían.

Afortunadamente, uno de los fundadores de la mecánica cuántica, Max Planck, fue más lúcido que su mentor. En una conferencia de 1924, reflexionó acerca de un consejo que recibió en 1874:

Cuando empecé mis estudios físicos y busqué consejo de mi venerable maestro Phillip von Jolly [...] me representó la física como una ciencia casi enteramente madura, bastante desarrollada [...] Posiblemente, en alguno que otro recoveco pudiera hallarse alguna partícula de polvo o pequeña burbuja a ser examinada y clasificada, pero el sistema en su conjunto se erigía muy sólido, y la física teórica se acercaba visiblemente al grado de perfección del que, por ejemplo, la geometría había gozado por siglos (1996: 10).

Al inicio Planck no tenía por qué dudar de su maestro. Pero cuando los experimentos no dieron cuenta del entendimiento clásico de cómo la materia irradia energía, Planck se convirtió en un revolucionario renuente en 1900 al sugerir la existencia del

quantum, una unidad indivisible de energía que anunció una nueva era de la física. Los siguientes 30 años presentaron el descubrimiento de las teorías especial y general de la relatividad, la mecánica cuántica y el universo en expansión.

A la luz de toda esta miopía pudiera pensarse que Richard Feynman, fecundo y brillante físico, pudo haber sido más cuidadoso. En su encantador libro *El carácter de la ley física*, publicado en 1965, declaró: «Somos muy afortunados de vivir en una época en la cual aún estamos haciendo descubrimientos [...] La época en que vivimos es la época en la cual estamos descubriendo las leyes fundamentales de la naturaleza, y tal día no volverá. Es muy emocionante, es maravilloso, pero tal emoción tendrá que terminar» (Feynman, 1994: 166).

No pretendo saber cuándo llegará el fin de la ciencia o de dónde pudiera hallarse ese final, o si este existe. Lo que sé es que nuestra especie es más tonta de lo que solemos aceptar. Este límite a nuestras facultades mentales, y no necesariamente de la ciencia, me certifica que apenas estamos comenzando a comprender el universo. Asumamos por un momento que los seres humanos son la especie más inteligente de la Tierra. Si definiéramos que la *inteligencia* es la capacidad de una especie para comprender y aplicar la matemática abstracta, podemos suponer que los seres humanos constituyen la única especie inteligente.

¿Cómo puede ser que esta única especie en la historia de la vida en la Tierra cuente con la capacidad mental para comprender cómo funciona el universo? Los chimpancés no se distinguen mucho de

los humanos, pero podemos estar de acuerdo en que jamás aprenderán trigonometría, no importa cuánto sea que les enseñemos. Ahora imagínese una especie terrestre, o de cualquier planeta, tan inteligente en comparación con los humanos como estos lo son respecto de los chimpancés. ¿Cuánto del universo podrían entender?

Los aficionados al juego de gato conocen que sus reglas son lo bastante sencillas como para ganar o empatar cada partida, siempre que uno pueda saber cuál es el primer movimiento más ventajoso. Pero los niños lo juegan como si el resultado fuera distante e incognoscible. Las reglas del ajedrez son, asimismo, claras y simples, aunque el reto de anticipar los movimientos del oponente crece exponencialmente en la medida que avanza la partida. Así que los adultos —hasta los talentosos e inteligentes— son retados por el juego y lo juegan cual si el resultado fuera un misterio.

Volvámonos hacia Isaac Newton, quien encabeza mi lista de los hombres más inteligentes que han vivido. (No soy el único. En su busto, en el Trinity College en Inglaterra, la placa reza: *Qui genus humanum ingenio superávit*, que quiere decir más o menos «de todos los humanos no hay mayor intelecto»). ¿Qué observó Newton respecto del estado del conocimiento? «No sé lo que parezco en el mundo, pero creo ser como un niño que juega en la playa y que se divierte de vez en cuando al hallar una piedra más lisa o una concha más bonita de lo común, mientras que, ante mí, se extiende desconocido el vasto océano de la verdad» (Brewster, 1860: 331).

El tablero de ajedrez que es nuestro universo ha revelado algunas de sus reglas, pero gran parte del cosmos aún se comporta de manera misteriosa, como si obedeciera a reglas secretas, ocultas. Serían normas que no se hallan en el manual que hemos escrito hasta ahora.

La distinción entre el conocimiento de los objetos y los fenómenos, que operan dentro de los parámetros de las leyes físicas conocidas, y el conocimiento de las leyes físicas mismas es esencial en la concepción que la ciencia pudiera estar llegando a su fin. El descubrimiento de vida en Marte o bajo las capas heladas de la luna Europa en torno a Júpiter pudiera ser el mayor descubrimiento de la historia. Sin embargo, puede apostarse que la física y la química de sus átomos serán idénticas a la física y la química de los átomos de aquí en la Tierra. Es innecesario formular nuevas leyes.

Pero echemos un vistazo a algunos problemas aún no resueltos de las entrañas de la astrofísica moderna que exponen el alcance y la profundidad de nuestra ignorancia contemporánea, cuya solución, hasta donde sabemos, espera el descubrimiento de una nueva rama de la física.

Pese a nuestra confianza en la descripción del origen del universo a partir del *big bang*, solo podemos especular respecto de lo que yace más allá de nuestro horizonte cósmico, a 13.7 mil millones de años luz de distancia. Tan solo podemos suponer qué ocurrió antes o por qué sucedió un *big bang* en primer lugar. Algunas predicciones, provenientes de los límites de la mecánica cuántica, permiten que nuestro universo en expansión sea el resultado de una sola

fluctuación de una espuma primordial del espacio-tiempo, con innumerables fluctuaciones que abarcan incontables universos.

Poco después del *big bang*, cuando tratamos de que nuestras computadoras abarquen las cien mil galaxias del universo, se torna difícil contrastar la información procedente de la observación de los tiempos antiguos y recientes del universo. Todavía somos incapaces de describir coherentemente la formación y evolución de las grandes estructuras del universo. Al parecer no contamos con algunas piezas importantes del rompecabezas.

Por siglos las ideas de Newton en torno al movimiento y la gravedad fueron buenas, hasta que debieron modificarse por las teorías del movimiento y la gravedad de Einstein: las teorías de la relatividad. Hoy en día la relatividad es lo que predomina, así como la mecánica cuántica, la descripción de nuestro universo atómico y nuclear. Sin embargo, así como ha sido concebida, la teoría de Einstein es irreconciliable con la mecánica cuántica, pues ambas predicen fenómenos distintos en los ámbitos en que las dos pueden entrelazarse. Alguna deberá ceder. O a la teoría de Einstein le falta un elemento que le permitiría aceptar la mecánica cuántica, o viceversa.

Tal vez haya una tercera alternativa: se necesita una teoría mayor, más incluyente, que las reemplace. De hecho, se ha inventado la teoría de cuerdas con dicho propósito, a saber: reduciendo toda la materia, la energía y sus interacciones a cuerdas de energía vibratorias de altas dimensiones. En nuestras míseras dimensiones de espacio y tiempo, los diversos modos de vibración se revelarían

en la forma de diferentes fuerzas y partículas. Aun cuando esta teoría ha contado con partidarios desde hace unos 20 años, sus postulados aún no han sido comprobados experimentalmente. Ha cundido el escepticismo, aunque muchos científicos albergan esperanzas de que esto se resuelva.

Todavía desconocemos en qué circunstancias o mediante qué fuerzas la materia inanimada se convirtió en la vida que conocemos. ¿Habrá algún mecanismo o ley de autoorganización química que escape a nuestra conciencia debido a que no tenemos con qué comparar nuestra biología terrestre, por lo cual no podemos distinguir lo esencial de lo no esencial para la formación de la vida? Desde el trascendente trabajo de Edwin Hubble en los años veinte, sabemos que el universo se expande, pero apenas hemos aprendido que este se acelera debido a alguna presión anti gravitacional denominada *energía oscura*, respecto de la cual no contamos con hipótesis de trabajo.

Finalmente, no importa cuán confiados estemos de nuestras observaciones, nuestros experimentos, nuestros datos o nuestras teorías, debemos aceptar que 85% de la gravedad en el cosmos proviene de una fuente desconocida y misteriosa que aún no puede detectarse con los instrumentos que hemos desarrollado para observar el universo. Hasta donde sabemos, no está hecha de ingredientes ordinarios, como electrones, neutrones y protones, o cualquier forma de materia o energía que interactúe con ellos. Llamamos a esta sustancia fantasmagórica, ofensiva, *materia oscura*, y todavía es uno de los mayores dilemas.

¿Parece esto el fin de la ciencia? ¿Suena a que estamos dominando la situación? ¿Sería el momento de felicitarnos? A mi juicio, me parece que somos idiotas, más parecidos a nuestro primo hermano el chimpancé, tratando de aprender el teorema de Pitágoras.

Tal vez estoy siendo muy duro con el *Homo sapiens* y he llevado la analogía del chimpancé demasiado lejos. Quizá la pregunta no sea cuán inteligente sea el individuo de alguna especie sino cuán inteligente es el poder cerebral de toda la especie. Rutinariamente, por medio de conferencias, libros, otros medios y, desde luego, el internet, los humanos comparten sus descubrimientos. Si bien la selección natural impulsa la evolución darwiniana, la cultura humana se expande de manera lamarckiana, en tanto que las nuevas generaciones de humanos heredan los descubrimientos de las generaciones pasadas, de modo que el conocimiento cósmico se acumule sin límite.

Cada descubrimiento científico añade, por tanto, un escalón a la escalera del conocimiento, cuyo fin no es visible ya que estamos construyéndola en la medida en que avanzamos. Hasta donde sé, mientras construimos y subimos por esta escalera, desentrañaremos por siempre los secretos del universo, uno a uno.

Parte 1

La naturaleza del conocimiento

Los retos de conocer lo cognoscible en el universo

Contenido:

1. *Más allá de los sentidos*
2. *En la Tierra como en el cielo*
3. *Ver no es creer*
4. *La trampa de la información*
5. *Haciendo ciencia con un palo*

1. Más allá de los sentidos

Equipado con sus cinco sentidos, el hombre explora el universo que lo rodea y llama ciencia a esta aventura.

EDWIN P. HUBBLE (1889-1953),

The nature of Science

De nuestros cinco sentidos, la vista es el más especial. Nuestros ojos nos permiten registrar información proveniente no solo de una habitación sino de todo el universo. Sin la vista, la astronomía jamás habría nacido y nuestra capacidad para medir nuestro lugar en el universo sería absolutamente limitada. Piénsese en los murciélagos. Cualquier secreto que hereden de una generación a la

siguiente, podemos apostar que ninguno se basa en la apariencia del cielo nocturno.

Cuando consideramos nuestros sentidos como un conjunto de instrumentos experimentales, vemos que poseen una asombrosa agudeza y una amplia sensibilidad. Nuestros oídos pueden registrar el ensordecedor despegue del transbordador espacial, así como el zumbido de un mosco a unos centímetros de nuestra cabeza. Nuestro sentido del tacto nos permite sentir la magnitud de una bola de boliche que cae sobre nuestro pie, así como a un insecto de un miligramo que se nos arrastra por el brazo. Algunas personas disfrutan del chile habanero, en tanto que lenguas más sensibles pueden detectar sabores a un grado de partes por millón. Y nuestros ojos pueden registrar la arena brillante de una playa soleada, y estos mismos ojos pueden atisbar un cerillo recién encendido a centenares de metros dentro de un auditorio oscuro.

Pero antes de emocionarnos con nosotros mismos, advirtamos que lo que ganamos en amplitud lo perdemos en precisión: registramos los estímulos del mundo en incrementos logarítmicos en lugar de lineales. Por ejemplo, si aumenta la energía del volumen de un sonido por un factor de 10, los oídos considerarán pequeño este cambio. Si se aumenta por un factor de 2, apenas se percatarán de ello. Lo mismo puede decirse de nuestra capacidad de medir la luz. Si alguna vez usted ha visto un eclipse total de Sol, habrá notado que el disco solar debe estar cubierto al menos en 90% por la Luna antes de que alguien advierta que ha oscurecido. La escala de magnitud estelar del brillo, la bien conocida escala acústica de los

decibeles y la escala sísmica son logarítmicas, en parte debido a nuestra disposición de ver, escuchar y sentir el mundo de dicha manera.

* * * *

¿QUÉ, SI ES QUE HAY ALGO, existe más allá de nuestros sentidos?
¿Existe una manera de conocer que trascienda nuestras interrelaciones biológicas con el ambiente?

Tómese en consideración la máquina humana: buena para descifrar los elementos básicos de nuestro medio circundante —como cuando es día o noche o cuando alguna criatura está a punto de devorarnos—, pero difícilmente puede descifrar cómo funciona la naturaleza sin la ayuda de la ciencia. Si quisiéramos conocer qué hay allá, se necesitan detectores mucho más poderosos que aquellos con los que estamos dotados desde que nacemos. En todos los casos, la labor del aparato científico es trascender la extensión y la profundidad de nuestros sentidos.

Algunas personas se ufanan de que poseen un sexto sentido, asegurando que por medio de este son capaces de conocer o ver cosas que otros no pueden. Los adivinos, los videntes y los místicos encabezan la lista de quienes aseveran poseer poderes misteriosos. Así, fascinan a otros, en especial editores y productores de televisión. El discutible campo de la parapsicología se basa en la expectativa de que algunas personas poseen semejantes talentos. A mi juicio, el principal misterio estriba en por qué tantos videntes prefieren trabajar contestando teléfonos en lugar de enriquecerse

locamente como agentes de bolsa en Wall Street. Y jamás se ha visto un titular que diga: «Vidente gana la lotería».

Muy aparte de este misterio, los constantes fracasos de los experimentos controlados, doble-ciego, para apoyar las afirmaciones de la parapsicología sugieren que se trata de un sinsentido en lugar de un sexto sentido.

Por otro lado, la ciencia moderna emplea decenas de sentidos. Y los científicos no afirman que estos sean la expresión de poderes especiales, tan solo *hardware* especial. Al final, por supuesto, el hardware convierte la información procedente de estos sentidos adicionales en simples cuadros, gráficos, diagramas o imágenes que nuestros sentidos corporales pueden interpretar. En la serie original de *Viaje a las estrellas*, la tripulación que se tele transportaba de su nave espacial a algún planeta desconocido siempre llevaba consigo un *tricorder*, un dispositivo portátil que podía analizar las propiedades básicas de lo que hallaran, vivo o inanimado. Al colocarse el *tricorder* encima de algún objeto, este dejaba escapar un leve sonido «espacial» que era interpretado por el usuario.

Supóngase que una masa de alguna sustancia desconocida se estacionara ante nosotros. Sin la ayuda de un instrumento de diagnóstico como un *tricorder*, estaríamos en ascuas para conocer la composición química o nuclear de la masa y no sabríamos si cuenta con un campo electromagnético o si emite rayos gama, rayos X, rayos ultravioleta, microondas u ondas de radio. Tampoco determinaríamos su estructura celular o cristalina. Si la masa se hallara en el espacio sideral, apareciendo como un punto de luz en

el firmamento, nuestros cinco sentidos no nos permitirían estimar su distancia, velocidad a través del espacio o su grado de rotación. Tampoco podríamos ver el espectro de colores que compone la luz que emite ni sabríamos si la luz está polarizada.

Sin el hardware para respaldar nuestro análisis y sin un deseo especial de hincarle el diente al asunto, de lo único que podemos informar a la nave es «capitán, es una masa». Debo disculparme con Edwin P. Hubble, pero la cita que abre este capítulo, aunque conmovedora y poética, debió ser: «Equipados con nuestros cinco sentidos, además de telescopios, microscopios, espectrómetros de masa, sismógrafos, magnetómetros, aceleradores de partículas y detectores del espectro electromagnético, exploramos el universo que nos rodea y llamamos ciencia a esta aventura».

Piénsese en cuán rico parecería el mundo y cuán fácil sería comprender la naturaleza del universo si naciéramos con ojos de alta precisión y visión ajustable. Si por ejemplo aumenta la percepción de la parte del espectro que corresponde a las ondas de radio, el día se oscurecería como la noche. Si se cuadrículara el cielo, se vería brillante junto con famosas fuentes de ondas de radio, tales como el centro de la Vía Láctea, detrás de algunas de las estrellas principales de la constelación de Sagitario. Si se sintonizaran las microondas, todo el cosmos resplandecería con los restos del universo antiguo, un muro de luz que nació 380 000 años después del *big bang*; en cambio, si se sintonizara para detectar rayos X, de inmediato se observarían agujeros negros con la materia que revuelve a su alrededor; si se sintonizan los rayos gama, se

verían titánicas explosiones dispersas a lo ancho del universo a una tasa de una diaria. Podría verse el efecto de la explosión en la materia circundante a medida que se calienta y refulge en otras bandas de luz.

Si naciéramos con detectores magnéticos, la brújula jamás habría sido inventada, porque no la necesitaríamos. Sintonice tan solo cualquiera de las líneas magnéticas de la Tierra y la dirección del polo norte magnético aparecerá en el horizonte como la Tierra de Oz más allá del horizonte. Si tuviéramos analizadores de espectro en nuestras retinas, no tendríamos que preocuparnos de qué respiramos; solo veríamos el registro y sabríamos si el aire contiene suficiente oxígeno para sostener la vida humana. Y habríamos sabido hace miles de años que las estrellas y las nebulosas de la Vía Láctea contienen los mismos elementos que se hallan en la Tierra.

Y si naciéramos con grandes ojos y contáramos con detectores del efecto Doppler, habríamos advertido de inmediato, incluso cuando éramos trogloditas, que el universo se expande y que las galaxias más distantes se están alejando de nosotros. Si nuestros ojos tuvieran la resolución de microscopios de alta precisión, nadie hubiera achacado la plaga y otras enfermedades a la furia divina. Las bacterias y los virus que nos enferman estarían a plena vista mientras invaden nuestra comida o se insertan en las heridas abiertas de nuestra piel. Con experimentos muy sencillos, podríamos discernir fácilmente cuáles de dichos insectos son malos y cuáles son buenos. Y, por supuesto, las infecciones posoperatorias habrían sido identificadas y atendidas muchos siglos antes.

Si pudiéramos detectar las partículas de alta energía, descubriríamos las sustancias radioactivas a gran distancia. Los contadores Geiger no serían necesarios. Incluso podríamos ver el gas radón filtrarse de nuestros sótanos y no tendríamos que pagar a nadie para que nos lo diga.

* * * *

LA AFINACIÓN DE NUESTROS sentidos desde el nacimiento y a lo largo de la infancia nos permitiría como adultos justipreciar acontecimientos y fenómenos de nuestras vidas en busca de su sentido. El problema estriba en que muy pocos descubrimientos científicos de la centuria pasada provinieron de la aplicación directa de nuestros cinco sentidos. Dimanaron, en cambio, de la aplicación directa de hardware y matemáticas, que trascienden los sentidos. Este sencillo hecho es responsable de que para una persona ordinaria la relatividad, la física de partículas y la teoría de cuerdas de 10 dimensiones sean incomprensibles. Agréguese a la lista los agujeros negros, los agujeros de gusano y el *big bang*. En realidad, estas ideas tampoco tienen sentido para los científicos, o al menos no hasta que hayamos explorado el universo por mucho tiempo, con todos los sentidos tecnológicamente disponibles. Lo que emerge con el tiempo es un nivel mayor y un nuevo *sentido común* que le permite al científico pensar creativamente y juzgar un mundo desconocido del átomo o al medio alucinante del ultra espacio. El físico alemán Max Planck hizo una observación semejante acerca del descubrimiento de la mecánica cuántica: «La física moderna nos impresiona, en particular con la verdad de la vieja doctrina que nos

enseña que hay realidades que existen aparte de nuestras percepciones sensoriales, y que hay problemas y conflictos en los cuales dichas realidades son de mayor valor para nosotros que los tesoros más ricos del mundo de la experiencia» (1991: 107).

Nuestros cinco sentidos incluso estorban para responder sensatamente a preguntas metafóricas estúpidas como «si un árbol cae en el bosque y nadie lo oye caer, ¿hace algún sonido?». Mi mejor respuesta es « ¿cómo sabes que cayó?». Pero esto solo hace enojar a la gente, así que les ofrezco una boba analogía: «P: si usted no puede olfatear el monóxido de carbono, ¿cómo sabe que está ahí? R: muriéndote». En tiempos modernos, si la única medida de lo que se halla en el mundo es que sea percibido por los cinco sentidos, entonces nos espera una vida muy precaria.

Descubrir nuevas formas de saber siempre ha abierto nuevas ventanas al universo que estimulan nuestra creciente lista de sentidos no biológicos. Cada cuando esto sucede, un nuevo grado de majestad y complejidad en el universo se nos muestra como si evolucionáramos como seres suprasensibles, siempre más allá de los sentidos.

2. En la tierra como en el cielo

Hasta que Isaac Newton expuso la ley de gravitación universal, difícilmente se podía concluir que las leyes de la física eran las mismas tanto en la Tierra como en el universo. En la Tierra sucedían cosas terrestres y en el cielo ocurrían cosas celestes. En efecto, según algunos eruditos de ese entonces, el firmamento era

incognoscible para nuestras débiles y mortales mentes. Como se comentará con más detalle en la parte 7, cuando Newton franqueó esta barrera filosófica al volver todo movimiento comprensible y predecible, algunos teólogos lo criticaron por no reservar nada al Creador. Newton había concebido que la fuerza de gravedad que arranca las manzanas maduras de las ramas también guía proyectiles en sus trayectorias curvilíneas y dirige la Luna en su órbita alrededor de la Tierra. La ley de la gravedad de Newton conduce, asimismo, a los planetas, asteroides y cometas en sus órbitas en torno al Sol y mantiene a centenas de millares de millones de estrellas orbitando por la Vía Láctea.

Esta universalidad de las leyes físicas es lo que más impulsa el descubrimiento científico. Y la gravedad fue solamente el principio. Imagínense la emoción que embargó a los astrónomos del siglo XIX cuando los prismas de laboratorio, que fragmentan los rayos de luz para producir el espectro de colores, se dirigieron por vez primera hacia el Sol. Los espectros no eran tan solo hermosos, sino que además contenían una enorme cantidad de información acerca de objetos luminosos, incluyendo su temperatura y composición. Los elementos químicos se revelaron a través de los singulares patrones de sus bandas de luz y oscuridad que atraviesan el espectro. Para el deleite y asombro de la gente las huellas químicas del Sol eran idénticas a las que se apreciaban en el laboratorio. El prisma dejaba de ser un instrumento exclusivo de los químicos; mostraba que, no obstante que el Sol y la Tierra diferían en masa, tamaño, temperatura, localización y apariencia, ambos se componían de lo

mismo: hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, calcio, hierro y demás. Pero más importante que la lista de ingredientes fue reconocer que las leyes de la física que se aplicaban a la formación de las huellas espectrales del Sol eran las mismas que operaban en la Tierra a casi 241 millones de kilómetros de distancia.

Tan fértil era este concepto de *universalidad* que se aplicó exitosamente al revés. El análisis del espectro solar reveló la huella de un elemento sin equivalente en la Tierra. Al pertenecer al Sol se le dio un nombre derivado de la palabra griega *helios* (sol), que mucho más tarde fue descubierto en el laboratorio. Así, el helio se convirtió en el primer y único elemento de la tabla periódica descubierto fuera de la Tierra.

* * * *

ESTÁ BIEN, LAS LEYES de la física actúan en el sistema solar, pero ¿también en el resto de la galaxia?, ¿en el resto del universo?, ¿a través del tiempo? Paso a paso, las leyes fueron sometidas a prueba. Las estrellas cercanas revelaron que contenían sustancias químicas semejantes. Distantes estrellas binarias, unidas en órbitas comunes, parecen saber todo acerca de las leyes de gravitación de Newton, y lo mismo sucede con las galaxias binarias.

Y al igual que los sedimentos estratificados del geólogo, conforme miramos a la distancia, observamos lo distante en el tiempo. Los espectros de los objetos más lejanos del universo muestran las mismas huellas químicas que vemos dondequiera en el universo. Ciertamente, los elementos pesados eran en el pasado menos abundantes porque están hechos principalmente de generaciones

subsiguientes de estrellas destruidas. Pero permanecen intactas las leyes de la física que describen el proceso atómico y molecular que crearon tales huellas espectrales.

Desde luego, no todas las cosas y fenómenos en el cosmos tienen sus semejantes en la Tierra. Seguramente, jamás hemos atravesado una nube de plasma que refulge a un millón de grados centígrados y tal vez nunca nos hemos topado con un agujero negro en la calle. Lo que importa es la universalidad de las leyes físicas que los describen. Cuando se dirigió el análisis espectral por primera vez a la luz que emiten las nebulosas interestelares, apareció un elemento que al parecer no tenía equivalente en la Tierra. Pero la tabla periódica de elementos carece de casilleros vacíos; cuando el helio fue descubierto había varios. Por tanto, los astrofísicos inventaron el término *nebulium* como marcador de posición hasta que se pudiera saber bien qué estaba sucediendo. Resulta que en el espacio las nebulosas gaseosas están tan enrarecidas que los átomos se desplazan por largas distancias sin colisionar entre sí. En tales condiciones los electrones pueden hacer cosas que jamás se ven en los laboratorios terrestres. *Nebulium* es simplemente la huella del oxígeno ordinario que hace cosas extraordinarias.

La universalidad de las leyes físicas nos dice que si llegáramos a la superficie de otro planeta que tuviera una pujante civilización extraterrestre, esta civilización estaría sujeta a las mismas leyes que hemos descubierto y probado en la Tierra, inclusive si no compartiéramos creencias sociales y políticas. Además, si se quisiera hablar con los extraterrestres, puede estarse seguro de que

no hablarían inglés, francés ni chino mandarín, menos aún se comprendería si agitar las manos o la cabeza —si es que la tuvieran— se entendería como una declaración de guerra o un gesto de paz. Lo mejor que pudiera hacerse es buscar una forma de comunicación por medio del lenguaje de la ciencia.

Un intento de este orden ha sido el que en la década de 1970 se llevó a cabo en las naves espaciales Pioneer 10 y 11, y las Voyager 1 y 2, las únicas capaces de vencer la atracción gravitacional del sistema solar. La Pioneer carga una placa dorada que presenta en pictogramas el croquis de nuestro sistema solar, nuestra ubicación en la Vía Láctea y la estructura de un átomo de hidrógeno. La Voyager lleva algo más complejo: sonidos diversos de la Madre Tierra, entre ellos el latido del corazón humano, «cantos» de ballenas y selecciones musicales que abarcan desde las obras de Beethoven hasta las de Chuck Berry. Si bien esto humanizaba el mensaje, quizá no sea claro que los oídos extraterrestres puedan entender lo que están oyendo, siempre que tuvieran oídos en primer lugar. Mi parodia favorita de este gesto es una sátira en el programa *Saturday Night Live* emitido poco después del lanzamiento de la Voyager en la cual la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (National Aeronautics and Space Administration, o NASA) recibe un mensaje de respuesta de los extraterrestres que han hallado la nave. Simplemente reza: «Manden más Chuck Berry».

* * * *

COMO VEREMOS CON DETALLE en la parte 3, la ciencia se desarrolla no solo merced a la universalidad de las leyes físicas, sino

también en la existencia y persistencia de las constantes físicas. La constante de la gravitación, que muchos científicos denominan *Gran G*, dota a la ecuación de la gravedad newtoniana de una medida de cuán fuerte sería esta fuerza, y por eones se han buscado implícitamente sus variaciones posibles. Si se calculara, se podría determinar que la luminosidad de una estrella depende mucho de la gran *G*. En otras palabras, si la gran *G* hubiera sido un poco distinta en el pasado, entonces la liberación de energía solar habría sido más variable de lo que indican los registros biológicos, climatológicos o geológicos. De hecho, no se conocen constantes dependientes del tiempo o el espacio; estas son más bien absolutamente constantes.

Así es nuestro universo.

Entre todas las constantes, la velocidad de la luz es con certeza la más famosa. Independientemente de cuán rápido uno se traslade, jamás podrá superarse a un rayo de luz. ¿Por qué? Jamás se ha llevado a cabo un experimento que haya descubierto algún objeto que haya alcanzado la velocidad de la luz. Las leyes de la física, bien contrastadas y probadas, lo explican y predicen. Estos planteamientos parecen estrechos. Es cierto que algunas de las declaraciones científicas más penosas han subestimado el ingenio de inventores e ingenieros: «Jamás volaremos», «volar nunca será comercialmente viable», «jamás viajaremos más rápido que el sonido», «nunca dividiremos el átomo», «jamás iremos a la Luna», se ha escuchado. Lo que tienen en común estas afirmaciones es que ninguna ley física lo ha impedido.

El enunciado «jamás viajaremos más rápido que la luz» es una predicción cualitativamente distinta. Se deriva de principios básicos e históricos. No cabe duda de ello. En las vías de viaje interestelar, las señales de tránsito de seguro dirán:

*La velocidad de la luz
no es tan solo una buena idea.
Es la ley.*

Lo bueno de las leyes de la física es que no exigen policías que las hagan cumplir, aunque tuve una playera que decía estridentemente: «Obedece la gravedad».

Muchos fenómenos naturales reflejan la interacción de muchas leyes físicas que operan al mismo tiempo. A menudo esto complica el análisis y, en la mayoría de los casos, requiere supercomputadoras que calculen cosas y sigan importantes parámetros. Cuando el cometa Shoemaker-Levy 9 se estrelló contra la atmósfera gaseosa de Júpiter, en 1994, el modelo informático de lo que iba a acontecer combinaba las leyes de mecánica de flujo, la termodinámica, la cinemática y la gravitación. El clima y el estado del tiempo representan ejemplos relevantes de fenómenos complicados (y difíciles de predecir). Pero las leyes básicas que los rigen aún están en vigor. La gran mancha roja de Júpiter, un poderoso anticiclón que ha estado activo durante al menos 350 años, es impulsado por procesos físicos idénticos a los que generan tormentas en la Tierra y dondequiera en el sistema solar.

* * * *

LAS LEYES DE CONSERVACIÓN, según las cuales alguna cantidad medida permanece *inmutable*, representan verdades universales de otra categoría. Las tres más importantes son la conservación de la masa y la energía, la conservación del momento lineal y el angular y la conservación de la carga eléctrica. Dichas leyes son evidentes en la Tierra y dondequiera que hemos examinado en el universo, desde el dominio de las partículas físicas hasta la estructura a gran escala del universo.

No obstante esta vanagloria, no todo es perfecto en el paraíso. Como he señalado, no podemos ver, tocar o probar la fuente de 85% de la gravedad del universo. Esta misteriosa materia oscura, que no habría sido descubierta a no ser por su atracción gravitacional, pudiera estar compuesta de partículas exóticas que aún no hemos descubierto o identificado. Sin embargo, un pequeño grupo de astrofísicos no están convencidos y han sugerido que la materia oscura no existe; es cuestión de tan solo reformar la ley de la gravedad de Newton; agréguese unos pocos componentes a las ecuaciones y todo estará bien.

Quizás un día aprenderemos que la gravitación newtoniana exige reformas. Eso sería bueno. Ha sucedido antes. En 1916 Albert Einstein publicó su teoría de la relatividad general, la cual reformulaba los principios de la gravedad de una forma que se aplicaban a objetos de masa extremadamente grande, reino desconocido para Newton, y que su ley de la gravitación no explicaba. ¿La lección? Nuestra confianza abarca las condiciones en

las cuales una ley ha sido probada y verificada. Cuanto mayor es este rango mayor es el poder de la ley para describir el cosmos. Para la gravedad terrestre, la ley de Newton es adecuada; para los agujeros negros y la gran estructura del universo, necesitamos la relatividad general. Cada una rige a la perfección en su propio ámbito dondequiera que se encuentre en el universo.

* * * *

PARA EL CIENTÍFICO, LA universalidad de las leyes físicas convierte al cosmos en un lugar maravillosamente simple. En comparación, la naturaleza humana, dominio del psicólogo, es infinitamente más compleja. En Estados Unidos, las juntas de educación eligen las materias escolares por voto conforme a caprichos sociales y políticos o filosofías religiosas. En todo el mundo diversos sistemas de creencias conducen a diferencias políticas, que no siempre se solucionan pacíficamente. Y algunas personas hablan de eliminar los para buses. Lo extraordinario de las leyes físicas es que se aplican dondequiera, no importa si se cree en ellas o no. Fuera de las leyes físicas, todo es mera opinión.

No es que los científicos no discutan. Lo hacen. Cuando lo hacemos, empero, usualmente expresamos opiniones acerca de cómo interpretamos la información en los límites de nuestro saber. Cada vez que se invoca una ley física en la discusión, el debate es de seguro breve: no, la idea de una máquina de movimiento perpetuo es imposible, pues infringe las leyes de la termodinámica; no, no se puede construir una máquina del tiempo que permita regresar a asesinar a la propia madre antes de que uno nazca, pues viola las

leyes de la causalidad. Y sin transgredir las leyes de momento, es imposible levitar espontáneamente sobre el suelo, se esté o no en posición de loto. Aun cuando, en principio, se puede hacer esta gracia mediante el fuerte y sostenido impulso de una flatulencia.

En algunos casos, el conocimiento de las leyes físicas puede brindar la confianza para confrontar a personas ariscas. Hace unos pocos años tomaba un chocolate caliente en una pastelería de Pasadena, California. Lo había ordenado con crema batida, claro. Cuando me lo entregaron, vi que no la tenía. Luego de indicarle al mesero que a mi chocolate le faltaba la crema batida, me aseguró que no podía verlo porque se había hundido al fondo del vaso. En vista de que la crema batida tiene muy baja densidad y flota en todos los líquidos que los humanos beben, le ofrecí dos posibles explicaciones: o a alguien se le olvidó agregar la crema batida o las leyes de gravitación universal eran distintas en ese restaurante. Sin estar convencido, trajo un poco de crema batida para hacer la prueba. Al cabo de bambolearse una o dos veces, la crema se mantuvo a flote. ¿Qué mejor prueba de la universalidad de las leyes físicas?

3. Ver no es creer

Gran parte del universo parece de una forma, pero en realidad es de otra; tanto es así que a veces me pregunto si no será un complot para abochornar a los astrofísicos. Abundan los ejemplos de tales niñerías cósmicas.

En tiempos modernos damos por sentado que vivimos en un planeta esférico, pero por miles de años a los pensadores les parecían claras

las evidencias de que la Tierra era plana. Solo hay que mirar alrededor. Sin imágenes de satélite, es difícil convencerse de que la Tierra no lo es, incluso si se asoma uno por la ventanilla de un avión. Lo que es cierto en la Tierra es cierto en todas las superficies planas en la geometría no euclidiana: en una superficie curva una región lo bastante pequeña es indistinguible de un plano. Hace mucho tiempo, cuando las personas no viajaban lejos de sus pueblos natales, una Tierra plana apoyaba la visión ególatra de que el país propio ocupaba el centro exacto de la superficie terrestre y que todos los puntos en el horizonte (el límite de su mundo) equidistaban de uno. Como uno podría esperar, casi todos los mapas de la Tierra plana representan en su centro a la civilización que elabora el mapa.

Ahora mire hacia arriba. Sin telescopio, no se puede apreciar cuán lejos están las estrellas. Están en su lugar, inmóviles, ascendiendo y descendiendo como si estuvieran pegadas dentro de un cuenco bocabajo. Entonces, ¿por qué no asumir que todas las estrellas están a la misma distancia de la Tierra sin importar cuán lejos estén?

Pero estas no se hallan igual de lejos. Y, desde luego, no existe el cuenco. Concedamos que las estrellas están dispersas aquí y allá en el espacio. Pero ¿cuán aquí y cuán allá? A simple vista, las estrellas más lejanas son más de 100 veces más brillantes que las más tenues, por lo que estas están obviamente 100 veces más lejos de la Tierra, ¿o no?

Pues no.

Tal argumento asume temerariamente que todas las estrellas son igualmente luminosas, por lo que las más cercanas son más brillantes que las más lejanas. Sin embargo, las estrellas tienen un enorme espectro de luminosidad, con 10 órdenes de magnitud, 10 a la décima potencia. Así pues, las estrellas más brillantes no son necesariamente las más cercanas a la Tierra. En efecto, la mayoría de las estrellas que se ven en el firmamento nocturno son de la variedad más luminosa y se hallan extraordinariamente lejos.

Si la mayoría de las estrellas que vemos son muy luminosas, de seguro son comunes en toda la galaxia.

No, de nuevo.

Las estrellas de alta luminosidad son las más escasas. En cualquier volumen de espacio, son superadas en número por las de baja luminosidad en una tasa de mil a uno. La prodigiosa descarga de energía de las estrellas de alta luminosidad es lo que permite verlas a través del inmenso espacio.

Supóngase que dos estrellas emiten luz a la misma magnitud (o sea, cuentan con la misma luminosidad), pero una está 100 veces más lejos de nosotros que la otra. Podríamos esperar que fuese una centésima parte de luminosa. No. Ello sería demasiado fácil. El hecho es que la intensidad de la luz aminora en proporción al cuadrado de la distancia. Así, en tal caso, una estrella lejana se ve diez mil veces (100^2) más tenue que una cercana. El efecto de esta *ley del cuadrado inverso* es puramente geométrico. Cuando la luz estelar se difunde en todas direcciones, se diluye en la creciente esfera de espacio a través del cual se desplaza. La superficie de esta

esfera crece en proporción al cuadrado de su radio (pudiera recordarse la fórmula: $\text{área} = 4\pi r^2$), lo que reduce la intensidad de la luz en la misma proporción.

* * * *

ESTÁ BIEN: LAS ESTRELLAS no están a la misma distancia de nosotros, no son igualmente luminosas y las que vemos constituyen una muestra poco representativa, pero de seguro están inmóviles en el espacio. Por milenios, comprensiblemente, la gente pensaba que los astros estaban fijos, concepto que se evidencia en fuentes tan influyentes como la Biblia («Y [Dios] los puso en el firmamento de los cielos» [Génesis 1, 17]) y el *Almagesto* de Claudio Ptolomeo, publicado en 150 d. C., en el cual arguye persuasivamente en favor de la inmovilidad.

En suma, si se permite que los cuerpos celestiales se muevan individualmente, entonces sus distancias, medidas desde la Tierra, deben variar, y lo mismo los tamaños, brillantez y distancias relativas entre las estrellas año con año. Pero dichas variaciones no son evidentes. ¿Por qué? Es que usted no las ha observado el tiempo suficiente. Edmond Halley (descubridor del cometa) fue el primero en percatarse de que los astros se mueven. En 1718 comparó las posiciones astrales *modernas* con aquellas en los mapas del astrónomo griego Hiparco del siglo II a. C. Halley confiaba en la precisión de estos mapas, pero se ayudó, asimismo, con más de 18 siglos de observaciones para comparar las posiciones astrales antiguas y modernas. Pronto advirtió que el astro Arcturus no se encontraba donde antes estaba; este, en efecto, se había

movido, pero no lo suficiente como para ser visto sin la ayuda de un telescopio en el tiempo de una vida humana.

Entre los objetos del firmamento, siete no están quietos; parecen deambular en el cielo estrellado, y por ello los griegos los llamaba *planetes* o «ambulantes». Usted los conoce: los nombres de los días de la semana se deben a ellos: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter, Saturno, el Sol y la Luna. Desde la antigüedad, se consideraba que estos caminantes estaban más cerca de la Tierra que las estrellas, pero revolvían en torno a la Tierra situada en el centro de todo.

Aristarco de Samos fue el primero que propuso un universo heliocéntrico en el siglo III a. C., pero entonces era obvio para cualquiera que prestase atención que, independientemente de los complicados movimientos de los planetas, estos y los astros en el fondo circulaban alrededor de la Tierra. Si la Tierra se moviera, de seguro lo sentiríamos. Los argumentos más comunes de ese entonces eran:

- Si la Tierra rota en torno a un eje o se mueve en el espacio, ¿cómo es que las nubes en el cielo y las aves en vuelo no se quedan atrás? (Ello no ocurre).
- Si uno salta verticalmente, ¿cómo es que no se cae en un lugar muy distinto, ya que la Tierra se mueve debajo de los pies? (Ello no ocurre).
- Y si la Tierra se mueve alrededor del Sol, ¿cómo es que el ángulo en el cual vemos a las estrellas no cambia de manera constante alterando visiblemente sus posiciones en el cielo? (Ello no ocurre; al menos no visiblemente).

Las evidencias de los críticos eran abrumadoras. Para los primeros dos argumentos, el trabajo de Galileo demostró que cuando se está en el aire, usted y la atmósfera y todo lo demás se mueve en consonancia con la rotación de la Tierra. Por la misma razón, si se salta en el pasillo de un aeroplano en vuelo, uno no es lanzado hacia atrás hasta la cola. El tercer argumento no tiene nada malo, salvo que las estrellas están tan lejos que se necesita un telescopio muy poderoso para observar los cambios estacionales; tal efecto no podía medirse hasta que, en 1838, lo hizo el astrónomo alemán Friedrich Wilhelm Bessel.

El universo geocéntrico fue el pilar del *Almagesto* de Ptolomeo y la idea preocupó a la conciencia científica, cultural y religiosa hasta la publicación de *Revolutionibus* en 1543, en el cual Nicolás Copérnico colocó al Sol en el lugar de la Tierra en el centro del universo conocido. Temeroso de que esta obra herética sacudiera el orden establecido, Andreas Osiander, teólogo protestante que supervisó la impresión, redactó un prólogo anónimo y no autorizado en el cual solicita:

No cabe duda de que ciertos hombres ilustrados, ahora que la novedad de la hipótesis de esta obra ha sido ampliamente difundida —que establece que la Tierra se mueve y, en efecto, el Sol está inmóvil en medio del universo—, estarán extremadamente estupefactos [...] [Mas no es] necesario que estas hipótesis sean ciertas, ni siquiera probables, puesto que

es suficiente con que meramente produzcan cálculos que concuerden con las observaciones (1999: 22).

Al propio Copérnico le preocupaba el problema que estaba por ocasionar. En la dedicatoria del libro, al papa Pablo III, señaló: «Me doy cuenta, Santo Padre, de que apenas algunas personas se percaten de que, en estos libros que he escrito acerca de las revoluciones de las esferas del universo, atribuyo algunos movimientos al globo terráqueo, de inmediato clamarán para abuchear hasta obligarme a bajar del escenario» (1999: 23).

Pero apenas el óptico Hans Lippershey había inventado el telescopio en 1608, Galileo, empleando uno que él mismo había armado, vio las fases de Venus, así como a cuatro lunas que orbitaban a Júpiter y no a la Tierra. Estas y otras observaciones fueron los clavos en el ataúd del geocentrismo, con lo cual el heliocentrismo de Copérnico se volvió un concepto crecientemente atractivo. Una vez que la Tierra dejó de ocupar un lugar especial en el cosmos, la revolución copernicana, basada en el principio de que no somos especiales, había comenzado oficialmente.

* * * *

AHORA QUE LA TIERRA SE HALLABA en órbita solar, igual que sus hermanos planetarios, ¿dónde colocar al Sol? ¿En el centro del universo? De ninguna manera. Nadie caería en esa trampa, pues infringiría el recién creado principio copernicano. Pero mejor investigar para estar bien seguros.

Si el sistema solar estuviera en el centro del universo, entonces no importa dónde mirásemos, en el cielo veríamos aproximadamente el mismo número de estrellas. Pero si el sistema solar estuviera en el borde, tal vez observaríamos una gran concentración de astros en una dirección: la del centro del universo.

Para 1785, tras haber contado estrellas y calculado rudimentariamente sus distancias, el astrónomo inglés *sir* William Herschel concluyó que el sistema solar yacía en el centro del cosmos. Poco después de un siglo, el astrónomo holandés Jacobus Cornelius Kapteyn —empleando los mejores métodos en boga para calcular distancias— intentó verificar de una vez por todas la localización del sistema solar en la galaxia. Vistos a través de un telescopio, la franja de luz llamada la Vía Láctea se convierte en una densa concentración de estrellas. Estimaciones cuidadosas de sus distancias y posiciones arrojan el mismo número de astros en cualquier dirección a lo largo de la franja; por encima o por debajo de la franja, la concentración se reduce simétricamente; no importa adonde se mire en el cielo, el número es el mismo en cualquier dirección, a una distancia de 180 grados. Kapteyn dedicó 20 años a su mapa celestial, el cual, sin duda, mostraba que el sistema solar está ubicado en 1% del centro del universo. No estábamos en el centro exacto, pero sí lo bastante cerca como para reclamar nuestro justo lugar en el espacio.

Pero siguió la crueldad cósmica.

Pocos sabían entonces, incluyendo a Kapteyn, que la mayoría de las líneas de observación a la Vía Láctea no llevan a los confines del

universo. La Vía Láctea es rica en grandes nubes de gas y polvo que absorben la luz que emiten los objetos que se encuentran detrás. Cuando miramos hacia la Vía Láctea, más del 99% de todas las estrellas que debieran ser visibles están ocultas por nubes de gas dentro de la propia galaxia. Pensar que la Tierra estaba cerca del centro de la Vía Láctea (el universo entonces conocido) era igual que internarse en un enorme bosque y, al cabo de unos 12 pasos, asegurar que se ha llegado al centro simplemente porque a dondequiera que se mira se ve el mismo número de árboles.

Para 1920, antes de que se comprendiera el problema de la absorción de luz, Harlow Shapley, quien sería director del observatorio de Harvard College, estudió la distribución espacial de los conjuntos globulares de la Vía Láctea. Estos son altas concentraciones de millones de astros que pueden observarse en las regiones superiores e inferiores de la vía Láctea, donde se absorbe la menor cantidad de luz. Shapley pensó que aquellos formidables grupos le permitirían hallar el lugar exacto del centro del universo, un lugar donde, después de todo, seguramente se hallaría la mayor concentración de masa y la mayor gravedad. Los datos de Shapley mostraron que el sistema solar está muy lejos del centro de los conjuntos globulares, por lo que no está cerca del centro del universo conocido. ¿Dónde se encuentra ese lugar especial que Shapley había encontrado? A 60 000 años luz, en aproximadamente la misma dirección, aunque mucho más lejos que las estrellas de la constelación de Sagitario.

Las distancias de Shapley eran demasiado grandes por un factor mayor a 2, pero tuvo razón respecto del centro del sistema de conjuntos globulares, pues coincide con lo que más tarde fue descubierto como la fuente más poderosa de ondas de radio en el cielo nocturno (pues a las ondas no las atenúan el gas ni el polvo). Finalmente, los astrofísicos identificaron la fuente de las emisiones de radio más intensas en el centro exacto de la Vía Láctea, pero después de uno o dos episodios más de hechos increíbles.

De nueva cuenta, había triunfado el principio copernicano. El sistema solar no es el centro del universo conocido, sino que está en los suburbios más distantes. Para los egos más sensibles, eso podría estar bien: de seguro el vasto sistema de astros y nebulosas al cual pertenecemos consiste en todo el universo, de seguro estamos donde las cosas ocurren.

Pues no.

En el cielo nocturno, la mayoría de las nebulosas se asemejan a universos insulares, como propusieron con clarividencia, entre otros, el filósofo sueco Emanuel Swedenborg, su colega alemán Immanuel Kant y el astrónomo inglés Thomas Wright, en cuya *Nueva hipótesis del universo* (1750), por ejemplo, especuló en torno a la infinitud del espacio, repleto de sistemas solares similares a los de nuestra Vía Láctea:

Podemos concluir [...] que así como la Creación visible debiera estar llena de sistemas siderales y mundos planetarios [...] la interminable inmensidad es un pleno ilimitado de creaciones semejante al universo conocido [...] El que muy probablemente

este sea el caso se evidencia en algún grado por los muchos puntos nubosos, apenas observables para nosotros, muy distantes de nuestras regiones astrales, en aquellos espacios visiblemente luminosos, donde ninguna estrella o cuerpo particular puede distinguirse; aquellos pudieran seguramente ser la Creación externa, la cual rodea el ya conocido, demasiado remoto que ni nuestros telescopios pueden alcanzar (p. 177).

Los «puntos nubosos» de Wright eran, en efecto, colecciones de centenares de miles de millones de astros muy distantes y solo visibles en los márgenes de la Vía Láctea. El resto de las nebulosas resultan ser nubes de gas relativamente pequeñas y cercanas que se sitúan principalmente dentro de la franja de la Vía Láctea.

Que la Vía Láctea sea tan solo una en multitudes de galaxias que componen el universo fue uno de los descubrimientos más importantes en la historia de la ciencia, incluso si nos hace sentir pequeños. El responsable del mismo fue el astrónomo Edwin Hubble, en cuyo honor se nombró el telescopio espacial. La evidencia provino de una placa fotográfica tomada la noche del 5 de octubre de 1923. El instrumento responsable fue el telescopio de 2.54 metros de diámetro del observatorio de Mount Wilson, a la sazón el más poderoso. El objeto responsable fue la nebulosa de Andrómeda, una de las más grandes en el cielo nocturno.

En Andrómeda, Hubble descubrió un tipo de astro muy luminoso que ya era conocido entre los astrónomos merced a algunos estudios de estrellas más cercanas. Las distancias a las más

cercanas ya eran conocidas, y su brillantez variaba tan solo en razón de su distancia. Al aplicar la ley de cuadrado inverso al brillo de la luz estelar, Hubble estimó la distancia a la estrella en Andrómeda, la que situaba la nebulosa muy lejos de cualquier astro conocido en nuestro sistema estelar. En realidad, Andrómeda era una galaxia dentro de la cual podían distinguirse miles de millones de estrellas, todas a más de dos millones de años luz de distancia. Así pues, no solamente no estamos en el centro de todas las cosas, sino que, de la noche a la mañana, nuestra Vía Láctea, el último rasero de nuestra autoestima, se había achicado hasta convertirse en una mancha insignificante en un universo de miles de millones de manchas, mucho más inmenso de lo que se había imaginado.

* * * *

AUN CUANDO LA VÍA LÁCTEA ha resultado ser una de innúmeras galaxias, ¿podemos seguir en el centro del universo? Unos seis años después de que nos hubo degradado, Hubble examinó los datos disponibles acerca de los movimientos de las galaxias. Concluyó que casi todas ellas se retiran de la Vía Láctea a velocidades directamente proporcionales a sus distancias de nuestra galaxia.

Finalmente, estábamos en medio de algo grande: el universo se expande, y somos su centro.

No, no volveríamos a ser engañados. Solo porque parece que estamos en el centro del cosmos no significa que lo estemos. De hecho, había una teoría del universo desde que Albert Einstein publicó su texto sobre la relatividad general en 1916, la moderna teoría de la gravedad. En el universo de Einstein el tejido del tiempo

y el espacio se deforma ante la presencia de la masa. Esta deformación, y el movimiento de los objetos en respuesta a ella, es lo que interpretamos como fuerza de gravedad. Aplicada al cosmos, la relatividad general permite que se expanda el espacio del universo, llevando consigo a sus galaxias componentes.

Una consecuencia extraordinaria de esta nueva realidad es que a todos sus observadores en cada galaxia el universo les parece como si se expandiera alrededor suyo. Es la mayor ilusión de prepotencia, en la cual la naturaleza no solo engaña a los humanos en la Tierra, sino a todas las formas vivientes que hayan existido en el tiempo y el espacio.

De seguro, sin embargo, existe un solo cosmos: este donde vivimos felizmente engañados. A la fecha, los cosmólogos no tienen evidencia de que haya más de un universo. Pero si estiramos varias leyes de la física a sus extremos (o más allá), se podría describir el nacimiento diminuto, denso y ardiente del universo como una efervescente espuma de espacio-tiempo enredado, propensa a variaciones cuánticas, cualquiera de las cuales podría engendrar un universo propio. En este cosmos nudoso bien podríamos ocupar tan solo un universo en un *multiverso*, que abarcara innumerables universos que aparecen y desaparecen. La idea nos relegaría a una parte del todo más nimia de lo que solemos pensar. ¿Qué habría pensado el papa Pablo III?

* * * *

PERSISTE NUESTRO DILEMA, pero a una escala cada vez mayor. Hubble resumió la problemática en su obra *Realm of the Nebulae* [*El*

dominio de las nebulosas], de 1936, aunque estas palabras se aplicarían a todas las fases de nuestra confusión:

Así, las exploraciones del espacio concluyen en la incertidumbre [...] Conocemos nuestro vecindario más cercano de manera íntima. A medida que nos alejamos, nuestro conocimiento se desvanece con rapidez. Poco a poco, llegaremos a los sombríos confines: los límites de nuestros telescopios. Allá, medimos sombras y buscamos entre fantasmales yerros de mediciones en pos de referencias apenas más importantes (p. 201).

¿Qué podemos aprender de este viaje de la mente? Que los humanos son los amos emocionalmente frágiles, perennemente ingenuos, irremediablemente ignorantes de una mancha insignificanamente diminuta en el cosmos.

Que tenga un buen día.

4. La trampa de la información

La mayoría de la gente asume que cuanto mayor información posea acerca de algo, mejor lo comprenderá. Hasta cierto punto esto es cierto. Si desde cualquier punto de una habitación viéramos esta página, deduciríamos que está en un libro, pero probablemente no se leerían las palabras. Si se acerca lo suficiente, se podría leer el capítulo. Si se arrima la nariz a la página, la comprensión de la lectura no mejora. Se podría ver con más detalle, pero a expensas de información esencial: palabras, oraciones, párrafos completos. El

viejo cuento de los ciegos y el elefante concluye de la misma forma: si uno se para a pocos centímetros de distancia y se fija en las proyecciones puntiagudas o en la larga trompa, en los rugosos pilares o en la cuerda colgante terminada en una borla —que conviene no jalar—, de ninguna forma puede tenerse una idea del animal en su conjunto.

Uno de los retos de la investigación científica es saber cuándo tomar distancia, y cuánta, y en qué momento aproximarse. En algunos contextos, el acercamiento brinda claridad; en otros, conduce a la simplificación exagerada. A veces muchas complicaciones apuntan a una verdadera complejidad y a veces tan solo satura el panorama. Si se desea conocer las propiedades de una estructura molecular en varios estados de presión y temperatura, por ejemplo, sería irrelevante y de plano engañoso observar lo que las moléculas hacen individualmente. Como veremos en la parte 3, una sola partícula no puede tener una temperatura, por cuanto el concepto de temperatura se refiere al movimiento promedio de todas las moléculas en el grupo. En bioquímica, en contraste, esto no se comprende a menos que se observe cómo una molécula interactúa con otras.

Así pues, ¿cuándo una medición, una observación o sencillamente un mapa cuentan con los detalles en la cantidad correcta?

* * * *

EN 1967, BENOIT B. MANDELBROT —matemático del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM en Yorktown Heights, Nueva York, y de la Universidad de Yale— formuló una pregunta en

la revista *Science*: ¿Cuán larga es la costa de Gran Bretaña? Una pregunta muy simple, como puede verse. Pero la respuesta es más profunda de lo que pudiera imaginarse.

Por siglos, exploradores y cartógrafos han levantado mapas de los litorales costeros. Los dibujos más antiguos representaban los continentes con linderos rudimentarios y graciosos; en cambio, los actuales mapas de alta resolución elaborados mediante imágenes de satélite son sumamente precisos. Para comenzar a responder la pregunta de Mandelbrot, empero, es necesario un atlas mundial y una madeja de hilo. Desenrólese el hilo a lo largo del perímetro de Gran Bretaña, desde Dunnet Head hasta Lizard Point, sin olvidar todas las bahías y hondonadas, luego extienda el cordel, compare su longitud a la escala de un mapa y, ¡voilà!, ha medido la costa de la isla.

Si desease verificar su trabajo, necesitaría un mapa del Servicio Cartográfico a una escala de, digamos, 2.5 cm a un kilómetro en lugar de un mapa que muestra a toda la isla británica en un mismo plano. Ahora hay ensenadas, litorales y promontorios que deben trazarse con el cordel; las variaciones son pequeñas, pero son muchas. Se encontrará que la costa es más larga en el mapa que en el atlas.

Por tanto, ¿cuál medición es la correcta? Seguramente, la que se basa en el mapa más detallado. Aun así, se pudo haber elegido un mapa con mayor detalle: uno que represente cada peñasco de cada acantilado. Pero los cartógrafos usualmente ignoran las rocas a menos que sean del tamaño del peñón de Gibraltar. Por ello, creo

que se debe recorrer a pie por la costa británica para medirla con exactitud, y hay que portar un cordel muy largo para extenderlo por cada resquicio. De todos modos, se dejarán algunos pedruscos, aparte de los riachuelos que fluyen por entre la arena.

¿Y esto dónde acaba? Cada vez que se la mide, la costa se vuelve más y más larga. Si se toman en cuenta los linderos de moléculas, átomos, partículas subatómicas, ¿será la costa infinitamente larga? No exactamente. Mandelbrot diría *indefinible*. Tal vez, a fin de reconsiderar el problema, se necesitaría una ayuda de otra dimensión. Quizás el concepto de longitud unidimensional no es adecuado para medir litorales costeros complicados.

El ejercicio mental de Mandelbrot entraña un nuevo campo sintético de las matemáticas basado en dimensiones fraccionales —o fractales (del vocablo latino *fractus*, «roto») — en lugar de la primera, segunda y tercera dimensiones de la clásica geometría euclidiana. Los conceptos ordinarios de dimensión, argüía Mandelbrot, eran demasiado simplistas para caracterizar la complejidad de los litorales costeros. Resulta que los fractales son ideales para describir patrones *auto semejantes*, que aparentan ser similares en diferentes escalas. Buenos ejemplos del mundo natural son el brócoli, el helecho y los copos de nieve, pero solo algunas estructuras generadas por computadora, que pueden repetirse indefinidamente, son capaces de producir el fractal ideal, en el cual la forma de un macro objeto está compuesta de versiones más pequeñas de la misma figura o patrón, las cuales, a su vez, están

compuestas de versiones miniatura de la misma cosa, y así sucesivamente.

Sin embargo, a medida que se desciende al fractal puro, aun cuando se multipliquen sus componentes, no se obtiene información nueva, porque al patrón siempre parece ser el mismo. En contraste, si se examina el cuerpo humano con mayor profundidad, finalmente se hallará una célula, estructura enormemente compleja dotada de distintos atributos y que se rige con reglas distintas a las de los niveles macro del cuerpo. Adentrarse en la célula entraña revelar un nuevo universo de información.

* * * *

¿Y QUÉ TAL LA TIERRA misma? Una de las representaciones más antiguas del mundo, conservada en una tabla de arcilla babilonia de 2 600 años de antigüedad, lo figura como un disco rodeado por océanos. El hecho es que, cuando uno se pone en pie en medio de una amplia planicie (el valle de los ríos Tigris y Éufrates, por ejemplo) y otea en cada dirección, la Tierra parece un disco plano.

Al advertir que el concepto de una Tierra plana conllevaba algunos problemas, los antiguos griegos, incluyendo pensadores como Pitágoras y Heródoto, consideraron la posibilidad de que la Tierra fuese una esfera. En el siglo IV a. C., Aristóteles —el gran sistematizador del conocimiento— resumió diversos argumentos que apoyaban dicho punto de vista, uno de los cuales se basaba en los eclipses lunares. De vez en cuando la Luna, en su órbita alrededor de la Tierra, intercepta la sombra cónica que la Tierra proyecta en el

espacio. A lo largo de varias décadas de tales espectáculos, como vio Aristóteles, la sombra terrestre en la Luna era siempre circular. Para que ello fuese cierto, la Tierra tenía que ser una esfera, porque solo las esferas proyectan sombras circulares en todas las fuentes de luz, desde todos los ángulos y en cualquier tiempo. Si la Tierra fuese un disco plano, la sombra a veces sería un ovalo, y en algunos momentos, cuando el borde de la Tierra mira al Sol, la sombra sería una línea delgada. Solo cuando la Tierra se hallara frente al Sol, la sombra que proyectaría la forma de círculo.

Dada la fuerza de ese argumento, se pensaría que los cartógrafos habrían trazado un modelo esférico de la Tierra en cuestión de pocos siglos. Pues no. El globo terráqueo más antiguo se remonta a 1490-1492, en vísperas de los viajes europeos de descubrimiento y colonización.

* * * *

ASÍ PUES, LA TIERRA es una esfera. Pero los detalles siempre son problemáticos. En sus *Principia*, de 1687, Newton propuso que, dado que los objetos giratorios se impulsan hacia adelante a medida que giran, nuestro planeta (y otros asimismo) se aplanarán en los polos y se expandirán en el ecuador, forma conocida como esferoide *oblato* o achatado. A fin de contrastar la hipótesis de Newton, 50 años después, la Academia de Ciencias de París envió a matemáticos en dos expediciones, una al círculo polar ártico y otra al ecuador, con el propósito de medir la extensión de un grado de latitud de la superficie de la Tierra a lo largo de la misma línea de longitud. El grado era levemente más extenso en el círculo polar

ártico, lo cual solo podía ser cierto si la Tierra fuese un poco chata. Newton tenía razón.

Cuanto más rápido gire un planeta, mayor debiera ser su protuberancia ecuatorial. Un solo día en el planeta más grande del sistema solar, Júpiter, que gira raudamente, dura 10 horas terrestres; Júpiter es 7% más ancho en el ecuador que en sus polos. Nuestro más pequeño planeta, con sus días de 24 horas, es tan solo 0.3% más anchuroso: 43 km en un diámetro de poco menos de 12 875 km. Es casi nada. Una consecuencia fascinante de este leve achatamiento es que si uno se para a nivel del mar en el ecuador, se estará lo más lejos posible del centro de la Tierra que en ninguna otra parte de ella. Y si se quiere hacer las cosas bien, escálese el monte Chimborazo en el Ecuador central, cerca del paralelo 0. Su cúspide se halla a 6.4 km de altitud sobre el nivel del mar, pero lo más importante es que yace a 2.14 km más lejos del centro de la Tierra que la cima del monte Everest.

LOS SATÉLITES HAN COMPLICADO mucho las cosas. En 1958 el Vanguard I informó que al sur del ecuador la protuberancia terrestre era más prominente que en el norte. Y no solo eso: el nivel del mar en el polo sur está más cerca del centro de la Tierra que el nivel del mar en el polo norte. Es decir, el planeta es una pera.

Otra complicación es el desconcertante hecho de que la Tierra no es rígida, pues su superficie sube y baja a diario conforme los océanos inundan las plataformas continentales, atraídas por la Luna y, a menor grado, por el Sol. Las mareas distorsionan las aguas del mundo, lo cual vuelve su superficie ovalada. Es un fenómeno bien

conocido. Pero las mareas también estiran la Tierra y el radio ecuatorial fluctúa diaria y mensualmente, de consuno con las mareas oceánicas y las fases de la Luna.

Así que la Tierra tiene la forma de una pera, de un esferoide oblato y de un *hula-hula*.

¿Jamás acabarán los cambios? Tal vez no. Adelantémonos a 2002. Una misión espacial germano-estadounidense denominada GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*, o Experimento de Clima y Recuperación de Gravedad) colocó un par de satélites para mapear el geoide de la Tierra, es decir la forma que esta tendría si el nivel del mar no fuera afectado por las corrientes oceánicas, las mareas o el clima, una superficie hipotética, pues, en la cual la fuerza de gravedad es perpendicular a cada punto mapeado. Así, el geoide es la representación perfecta de lo horizontal, y da cuenta de todas las variaciones en la forma y la densidad de la materia sub superficial de la Tierra. Los carpinteros, los topógrafos y los ingenieros hidráulicos no podrán sino obedecer.

* * * *

LAS ÓRBITAS SON OTRA CATEGORÍA de formas problemáticas. No son unidimensionales ni meramente bi o tridimensionales. Las órbitas son multidimensionales, se despliegan en tiempo y espacio. Aristóteles propuso que la Tierra, el Sol y las estrellas estaban fijos en el espacio junto a esferas cristalinas. Eran las esferas las que giraban y sus órbitas trazaban, por supuesto, círculos perfectos. Para Aristóteles y acaso todos los antiguos, la Tierra descansaba en el centro de esta actividad.

Nicolás Copérnico no estuvo de acuerdo. En su obra maestra de 1543, *De Revolutionibus*, colocó el Sol en el medio del cosmos. No obstante, Copérnico mantuvo que las órbitas eran perfectas sin percatarse de su discrepancia con la realidad. Medio siglo más tarde, Johannes Kepler corrigió esto con sus tres leyes del movimiento planetario, las primeras ecuaciones predictivas en la historia de la ciencia, en la cual demostró que las órbitas no eran círculos sino óvalos de estiramiento variable.

Apenas hemos empezado.

Considérese el sistema de la Tierra y la Luna. Ambos cuerpos orbitan alrededor de su centro de masa común, su baricentro, el cual se halla a aproximadamente 1 609 km bajo el punto de la superficie terrestre más cercano a la Luna en cualquier momento. Así, en lugar de los planetas mismos, en realidad sus baricentros planeta-luna trazan las órbitas elípticas keplerianas alrededor del Sol. Entonces, ¿cuál es la trayectoria terrestre? Una serie de círculos, 13 al año, una por cada ciclo de fases lunares, enrolladas en una elipse.

Mientras tanto, no solamente la Luna y la Tierra se jalen entre sí, sino también los demás planetas (y sus lunas). Todos se jalen entre sí. Como puede sospecharse, es un lío bastante complicado y se describirá con más detalle en la parte 3. Además, cada cuando el sistema tierra-luna viaja en torno al Sol, la orientación de la elipse cambia levemente, aparte de que la Luna se aleja en espiral de la Tierra a un ritmo de 2.5 o 5 cm al año y que en el sistema solar algunas órbitas son caóticas.

En suma, este *ballet* del sistema solar, coreografiado por las fuerzas de gravedad, es un espectáculo que solo una computadora puede conocer y amar. Hemos progresado mucho desde que eran cuerpos solitarios y aislados que trazaban círculos puros en el espacio.

* * * *

EL CURSO DE UNA DISCIPLINA científica se forma de diversas maneras, según si las teorías se basan en los datos, o viceversa. Una teoría indica qué buscar, y uno lo encuentra o no. Si se halla, se pasa a la siguiente pregunta abierta. Si se carece de teoría, pero se poseen instrumentos de medición, se puede recolectar mucha información y esperar a que emerjan las relaciones. Pero hasta que no se da con un panorama general, se está andando a tientas en la oscuridad.

No obstante, sería un error declarar que Copérnico estaba equivocado porque sus órbitas tenían la forma equivocada. Su concepto más profundo, que los planetas orbitan al Sol, era lo que más importaba. En adelante, los astrofísicos han estado refinando el modelo observando cada vez más cerca. Copérnico no habría estado en el parque correcto, pero seguramente estaba en la ciudad correcta. Por tanto, acaso la pregunta sea: ¿cuándo uno se acerca y cuándo uno da un paso atrás?

AHORA IMAGÍNESE QUE ronda por un bulevar en un fresco día de otoño. A una cuadra un caballero canoso lleva un traje azul. Difícilmente, podrá ver su pulsera enjorada en su mano izquierda. Si acelera el paso y se aproxima a 9 metros de él, podría notar que porta un anillo, mas no verá la piedra carmesí o los diseños en la

superficie. Acérquese más con una lupa y, si él no llama a la policía, usted sabrá el nombre de la escuela, el grado académico que alcanzó, el año en que se recibió y tal vez el emblema de su escuela. En tal caso, habrá asumido correctamente que un vistazo más de cerca le dirá mucho más.

A continuación, imagínese que observa una pintura francesa de estilo puntillista del siglo XIX. Si se para a 3 metros de distancia, usted apreciaría hombres con chistera, damas con largas faldas y poliones, niños, mascotas y agua rutilante. De cerca, en cambio, vería decenas de miles de puntos, rayas y manchas de color. Con la nariz contra el lienzo se podrá apreciar la complejidad y el carácter obsesivo de la técnica, pero solo de lejos la pintura mostrará la representación de una escena. Es lo opuesto a la experiencia del hombre del anillo en el bulevar: cuanto más cerca se observe la obra maestra puntillista más detalles se desintegran, y mejor haberse mantenido lejos.

¿De qué manera capturar mejor la forma como la naturaleza se nos revela? En verdad que de las dos maneras. Casi cada vez que los científicos observan detenidamente un fenómeno o a algún habitante del cosmos, animal, vegetal o astro, deben evaluar si el panorama general —el que se obtiene cuando uno se retira un poco— es más o menos útil que el acercamiento. Pero hay una tercera manera, híbrida de ambas, en la cual el acercamiento proporciona más información, pero la información adicional lo deja a uno más que estupefacto. El afán de replegarse es fuerte, pero también lo es la urgencia de acercarse. Para cada hipótesis que se

confirma con datos más detallados, otras 10 deberán modificarse o descartarse por cuanto no corresponden al modelo. Y podrán transcurrir años o décadas antes de que se formule media decena de nuevos descubrimientos con base en dicha información. Por ejemplo, los múltiples anillos y bucles de Saturno.

* * * *

LA TIERRA ES UN LUGAR FASCINANTE donde vivir y trabajar. Pero antes de que Galileo mirase por primera vez a través de su telescopio en 1609, nadie era consciente de ni entendía la superficie, composición o clima de ninguna parte del cosmos. En 1610 Galileo advirtió algo extraño en Saturno, por cuanto la resolución de su telescopio era deficiente, empero, el planeta se le apareció como si tuviera dos acompañantes, uno a la izquierda y otro a la derecha. Galileo formuló su observación en un anagrama: *smaismrmilmepoetaleumibunenugttauiras*, planteado para asegurar que nadie pudiera robarle el crédito de su radical y hasta entonces inédito descubrimiento. Descifrado y traducido del latín, el anagrama se lee: «he observado que el planeta más alto tiene tres cuerpos». Con el transcurso de los años, Galileo siguió examinando a los acompañantes de Saturno. En un momento le parecían como orejas; en otro, estos desaparecían por completo.

En 1656 el físico holandés Christiaan Huygens observó a Saturno con un telescopio de mayor resolución que el de Galileo, hecho especialmente para examinar ese planeta. Así que fue el primero en interpretar que los acompañantes en forma de oreja eran un simple anillo plano. Como Galileo había logrado medio siglo antes, Huygens

escribió su hallazgo, revolucionario, pero aún preliminar, en forma de anagrama. En tres años, en su libro *Systema Saturnium*, Huygens publicó su propuesta.

Veinte años después Giovanni Cassini, director del Observatorio de París, señaló que había dos anillos separados por una brecha ahora llamada la división de Cassini. Y casi dos siglos después, el físico escocés James Clerk Maxwell ganó un prestigioso galardón por demostrar que los anillos de Saturno no eran sólidos, sino que estaban hechos de numerosas partículas pequeñas en sus propias órbitas.

A finales del siglo XX, los observadores habían identificado siete anillos, bautizados de la A a la G. No solamente ello, sino que los anillos resultaron hechos de miles de bandas y bucles.

Y así quedó la *teoría de las orejas* de Saturno.

* * * *

SE LLEVARON A CABO MUCHOS vuelos por Saturno en el siglo XX: Pioneer 11 en 1979, Voyager I en 1980 y Voyager II en 1981. Aquellas inspecciones relativamente cercanas, arrojaron evidencias de que el sistema de anillos es más complejo y misterioso de lo que se había imaginado. En primer lugar, las partículas de algunos anillos se agrupan en franjas angostas por las hoy llamadas *lunas pastoras*: diminutos satélites que orbitan cerca y dentro de los anillos. Las fuerzas gravitacionales de las lunas pastoras jalan las partículas de los anillos en distintas direcciones, lo que sostiene numerosas brechas entre los anillos.

Las ondas de densidad, las resonancias orbitales y otras rarezas de la gravitación en sistemas de múltiples partículas producen rasgos pasajeros dentro y entre los anillos. «Rayos» fantasmales y móviles en el anillo B, por ejemplo, observados por las sondas Voyager y que se las considera causadas por el campo magnético del planeta, han desaparecido misteriosamente en las observaciones más cercanas de la nave Cassini.

¿De qué estarían hechos los anillos de Saturno? Hielo en su mayoría, aunque hay polvo en la mezcla, cuya composición química es semejante a la de una de las lunas mayores del planeta. La cosmoquímica del ambiente sugiere que en Saturno bien pudo haber muchas de esas lunas. Las que se fueron sin permiso habrían orbitado excesivamente cerca del gigantesco planeta y fueron destruidas por la fuerza de sus mareas.

Por demás, Saturno no es el único planeta con un sistema de anillos. Vistos de cerca, Júpiter, Urano y Neptuno —el resto de los cuatro gigantes de gas de nuestro sistema solar— muestran que contienen sus propios sistemas de anillos. Los anillos jupiterianos, uranios y neptunianos no fueron descubiertos sino hasta finales de 1970 e inicios de 1980 porque, a diferencia de los majestuosos anillos saturninos, están compuestos de sustancias oscuras y opacas como rocas y granos de polvo.

EL ESPACIO CERCANO A UN planeta puede ser muy peligroso si no se es un objeto denso y rígido. Como veremos en la parte 2, muchos cometas y algunos asteroides, por ejemplo, se asemejan a montones

de escombros y oscilan peligrosamente cerca de planetas. La distancia mágica dentro de la cual la fuerza gravitacional de un planeta excede a la gravedad que mantiene unidos a tales vagabundos se denomina *límite de Roche*, descubierto por el astrónomo decimonónico francés Édouard-Albert Roche. Si uno se interna en dicho límite, será destruido; y los pedazos se dispersarán en sus respectivas órbitas y, finalmente, se formarán en un anillo plano, ancho y circular.

Recientemente, recibí algunas preocupantes noticias acerca de Saturno de parte de un colega que estudia los sistemas anulares. Advirtió con tristeza que las órbitas de sus partículas constituyentes eran inestables, por lo que las partículas desaparecerán en un abrir y cerrar de ojos astrofísico: cien millones de años más o menos. ¡Mi planeta favorito, privado de lo que lo vuelve mi planeta favorito! Resulta que por fortuna la constante y esencialmente interminable agregación de partículas interplanetarias e interlunares pudiera volver a llenar los anillos. El sistema de anillos, como la piel de nuestro rostro, pudiera sobrevivir, aun cuando sus partículas componentes no lo hagan.

Hay otras noticias que han llegado a la Tierra por medio de Cassini y sus imágenes cercanas de los anillos de Saturno. ¿Qué clase de noticias? «Alucinantes» y «sorprendentes», para citar a Carolyn C. Porco, líder del equipo de imagen de la misión y especialista en anillos planetarios en el Instituto de Ciencias Espaciales en Boulder, Colorado. Aquí y allá en dichos anillos se aprecian rasgos inesperados o inexplicables, hasta el momento: bucles fileteados con

bordes extremadamente afilados, partículas que se fusionan en masas, el prístino congelamiento de los anillos A y Ben comparación con la suciedad de la división de Cassini entre ellos. Toda esta información mantendrá a Porco y sus colegas muy ocupados por muchos años, tal vez mientras recuerdan con melancolía una vista más clara y simple desde lo lejos.

5. Haciendo ciencia con un palo

Durante uno o dos siglos diversas combinaciones de alta tecnología y de inteligencia han impulsado el descubrimiento del cosmos. Pero supóngase que se careciera de tecnología, que lo único que se tiene en el patio es un palo. ¿Qué se puede aprender? Mucho.

Con paciencia y mediciones cuidadosas, usted y su palo pueden arrojar una increíble cantidad de información acerca de su lugar en el cosmos. No importa de qué esté hecho el palo, y no importa su color, tan solo debe ser recto. Clávelo firmemente en el suelo donde usted pueda ver claramente el horizonte. En vista de que su tecnología es muy rudimentaria, tendría que usar una roca para clavar el palo. Asegúrese de que el palo no sea blando y esté derecho.

Su laboratorio cavernario ya está listo.

En una mañana clara, observe la extensión de la sombra que proyecta el palo a medida que el Sol se levanta, atraviesa el cielo y se pone. La sombra al principio será larga, se acortará hasta que el Sol llegue a su punto más alto en el cielo y, por último, se alargará hasta el anochecer. Recolectar información para este experimento es

casi tan emocionante como mirar la manecilla de un reloj, pero en virtud de que usted no tiene tecnología, habrá muy poco que lo distraiga. Observe que cuando la sombra es más corta, ya ha pasado mediodía. En ese momento, llamado *mediodía local*, la sombra apunta al norte o al sur, según el lugar en que se encuentre en relación con el ecuador.

Usted ha hecho un reloj de sol rudimentario. Y si desea parecer un erudito, puede llamar gnomon al palo (yo prefiero llamarlo palo). Observe que en el hemisferio norte, donde comenzó la civilización, la sombra del palo se moverá conforme las manecillas del reloj alrededor de la base del palo a medida que el Sol se desplaza por el cielo. En efecto, por ello es que se dice que las manecillas del reloj se mueven en ese sentido, en primer lugar.

Si usted es lo bastante paciente, y el cielo no tiene nubes, como para repetir el experimento 365 veces seguidas, advertirá que el Sol no sale diariamente en el mismo lugar en el horizonte. Y dos días al año al amanecer la sombra del palo apunta exactamente en la dirección contraria a la sombra en el anochecer. Cuando eso ocurre, el Sol sale en el este y se pone en el oeste, y la luz solar en el día dura tanto como la noche. Tales días son los equinoccios (del latín que significa «noches iguales») de primavera y otoño. En los otros días del año el Sol sale y se pone en otros puntos del horizonte. Así que la persona que haya inventado el adagio «el Sol siempre sale en el este y se pone en el oeste» simplemente jamás prestó atención a lo que sucede en el cielo.

Si usted se encuentra en el hemisferio norte mientras observa los puntos donde el Sol sale y se pone, verá que tales puntos aparecen al norte de la línea del oriente y el poniente después del equinoccio de primavera, luego se detiene para finalmente aparecer al sur por un momento. En cuanto vuelven a cruzar dicha línea, la aparición al sur se refrena, se detiene y vuelve a aparecer al norte. El ciclo se repite anualmente.

Mientras tanto, la trayectoria del Sol está cambiando. Durante el solsticio (del latín que significa «sol inmóvil») de verano, el Sol sale y se pone en su punto más septentrional en el horizonte, trazando una alta parábola en el cielo, lo cual convierte ese día en el más largo del año y por ello la sombra que proyecta el palo será más corta al mediodía. Cuando el Sol sale y se pone en su punto más meridional, su trayectoria celeste es la más baja, por lo cual se proyecta la sombra más larga al mediodía. De modo que ¿cómo no llamar ese día sino solsticio de invierno?

Para 60% de la superficie terrestre y aproximadamente 75% de sus habitantes, el Sol jamás se halla directamente encima. Para el resto del planeta, en una amplia franja de 5 150 km alrededor del ecuador, el Sol asciende al cenit tan solo dos días al año (está bien, solo uno si se halla uno en el trópico de Cáncer o el de Capricornio). Apuesto que la misma persona que afirmaba saber dónde sale y se pone el Sol en el horizonte también inventó el adagio «el Sol se posa directamente arriba al mediodía».

Hasta ahora, con mucha paciencia y un palo, usted ha identificado los puntos cardinales y los cuatro días que marcan las estaciones.

Ahora deberá inventar alguna forma de medir el intervalo entre el mediodía local de un día y el del siguiente. Un buen cronómetro sería de ayuda, aunque un par de relojes de arena pudieran servir. Cualquiera pudiera ayudar a determinar con gran exactitud cuánto le toma al Sol dar su vuelta alrededor de la Tierra: el día solar. Promediándolo en todo el año, tal intervalo es igual a 24 horas exactamente. Aunque esto no incluye el segundo que de vez en cuando se le agrega para compensar el refreno de la rotación terrestre debido al arrastre gravitacional de la Luna sobre los océanos.

De regreso a usted y su palo. No hemos terminado. Marque una línea de observación desde la punta del palo hacia un punto en el cielo, y utilice su confiable reloj para asentar el momento en que pase una estrella de una constelación conocida. Entonces, vuélvalo a usar para registrar cuánto tarda la estrella en alinearse al palo durante una noche. Ese intervalo, el día sideral, dura 23 horas, 56 minutos y 4 segundos. Esta discrepancia de casi 4 minutos entre los días sideral y solar obliga al Sol a migrar entre los patrones de estrellas lejanas, lo cual crea la impresión de que el Sol visita a los demás astros en sus respectivas constelaciones a lo largo del año.

Desde luego, las estrellas no pueden verse durante el día, solo el Sol. Pero las visibles a lo largo del horizonte justo antes del anochecer o poco después del amanecer enmarcan la posición del Sol en el cielo, y un observador agudo con buena memoria para los patrones estelares puede reconocer los que se hallan detrás del Sol.

Usando de nuevo su reloj, con el palo en el suelo puede usted intentar algo distinto. Por todo un año, cada día, marque dónde la extremidad de la sombra cae al mediodía como lo indica su reloj. Resulta que cada día estará marcado en un lugar distinto y, para finales del año, se habrá trazado una figura de 8, conocida como *analema*.

¿Por qué? La Tierra se inclina sobre su eje 23.5 grados del plano del sistema solar, inclinación que no solamente produce las consabidas estaciones y la amplia traslación diaria del Sol a través del cielo, sino que también es la principal causa de la figura de 8 que surge cuando el Sol se desplaza de ida y vuelta a lo largo del ecuador celeste durante el año. Además, la órbita terrestre alrededor del Sol no es un círculo perfecto. Según las leyes del movimiento planetario de Kepler, la velocidad orbital debe variar, aumentando a medida que nos acercamos al Sol y refrenándose cuando nos alejamos. Debido a que el ritmo de la rotación terrestre se mantiene constante, algo debe suceder: el Sol no alcanza su punto más alto en el cielo al «mediodía cronológico». Aun cuando la variación diaria es lenta, el Sol se retrasa hasta 14 minutos en ciertos días, a veces se adelanta hasta 16 minutos. En solo cuatro días al año, correspondientes a los puntos más altos, bajos e intermedios de la figura de 8, el tiempo en el reloj está conforme al tiempo solar. Por consiguiente, esos días caen cerca del 15 de abril (no porque sea el fin de año fiscal de Estados Unidos), el 14 de junio (sin relación con el de la Bandera en ese país), el 2 de septiembre (tampoco con su Día del Trabajo) y el 25 de diciembre (nada que ver con la Navidad).

A continuación, clónese a usted mismo y su palo y mande a su doble al sur, a un punto previamente elegido al otro lado del horizonte, con el acuerdo de que ambos medirán las respectivas sombras de sus palos a la misma hora del mismo día. Si las sombras son del mismo largo, usted vive ya en una Tierra plana o supergigante; si estas son de diversa longitud, puede usarse la geometría básica para calcular la circunferencia de la Tierra.

Eratóstenes de Cirene (276-194 a. C.), astrónomo y matemático, hizo tal cosa. Comparó las longitudes de las sombras al mediodía en dos ciudades egipcias: Siene (hoy Asuán) y Alejandría, a una distancia de cinco mil estadios (que él sobredimensionó). El cálculo de Eratóstenes estaba dentro de un margen de 15% del valor correcto. En efecto, la palabra *geometría* proviene del griego y significa «medida de la Tierra».

Aunque hasta el momento usted se ha ocupado con palos y piedras, el siguiente experimento le tomará solo un minuto. Clave su palo en el suelo en un ángulo no vertical de modo que asemeje un típico palo en el barro. Átese una piedra al final de un cordel y cuélguelo de la punta del palo, con lo cual se obtiene un péndulo. Mida el largo del cordel y luego dé un golpecito para que el péndulo empiece a oscilar. Cuente las veces que la piedra se mece en 60 segundos.

El número, usted hallará, depende en muy poco de la amplitud del arco del péndulo y nada de la masa de la piedra, lo único que importa es la longitud del cordel y en qué planeta uno se encuentre. Con base en una ecuación relativamente simple, se puede deducir la aceleración de la gravedad en la superficie de la Tierra, la cual es

directamente proporcional a su peso corporal. En la Luna, con un sexto de la gravedad terrestre, el mismo péndulo se moverá más lentamente trazando menos oscilaciones por minuto.

No hay mejor manera de tomarle el pulso a un planeta.

* * * *

HASTA AHORA SU PALO no le ha servido para probar que la Tierra rota, solo que el Sol y las estrellas nocturnas giran a intervalos regulares y predecibles. Para el siguiente experimento, se necesita un palo de 10 metros de largo y, nuevamente, hay que clavarlo inclinado en el suelo. Átele una piedra pesada en la punta de un cordel y déjelo colgar de la punta. Ahora, como la última vez, pónganlo en movimiento. El largo y fino cordel y la pesada piedra permitirán al péndulo oscilar sin detenerse por horas y horas.

Si se observa con cuidado la dirección en la que el péndulo oscila, y si se es extremadamente paciente, se percatará de que el plano de su oscilación rota lentamente. El lugar más pedagógicamente útil para llevar a cabo este experimento es el polo norte geográfico (o su equivalente, el polo sur). En los polos el plano de oscilación del péndulo gira por completo en 24 horas, una medida simple de la dirección y velocidad rotatoria de la Tierra debajo del péndulo. En cuanto a las demás posiciones de la Tierra, salvo a lo largo del ecuador, el plano aún gira, pero más y más lentamente a medida que uno se desplaza de los polos hacia el ecuador. Allí el plano del péndulo no se mueve. Este experimento no solamente demuestra que la Tierra, no el Sol, se mueve, sino que con la ayuda de un poco de trigonometría puede replantearse la pregunta y emplear el tiempo

necesario para que una vuelta del plano del péndulo determine su latitud geográfica en nuestro planeta.

El primero en hacerlo fue Jean-Bernard-León Foucault, físico francés quien llevó a cabo el último de los experimentos de laboratorio realmente baratos. En 1851 invitó a sus colegas a «ver girar la Tierra» en el Panteón de París. Hoy el péndulo de Foucault oscila en todos los museos de ciencia y tecnología del mundo.

En vista de todo lo que se puede aprender de un simple palo clavado en el suelo, ¿qué podemos pensar de los observatorios primitivos más famosos del mundo? De Europa a Asia, África y América Latina, un estudio de las culturas antiguas arroja innumerables monumentos pétreos que sirvieron como rudimentarios centros astronómicos, aunque muy posiblemente también sirvieron como lugares de culto o encerraban un significado cultural profundo.

En la mañana del solsticio de verano en Stonehenge, por ejemplo, muchas de las estelas en sus círculos concéntricos se alinean precisamente al amanecer, algunas se alinean con los puntos extremos en que la Luna sale y se pone. Edificado en aproximadamente 3.100 a. C., y modificado en los siguientes dos milenios, Stonehenge incorpora enormes monolitos extraídos de canteras de la planicie de Salisbury en el sur de Inglaterra. Ocho pilares más o menos, cada uno de varias toneladas, provinieron de los montes Preseli a 386 km aproximadamente. Las llamadas *rocas de sarsen*, cada una de 50 toneladas, provinieron de Marlborough Downs, a 32 km de ahí.

Mucho se ha escrito acerca del significado de Stonehenge. Los historiadores y los observadores casuales se impresionan por el conocimiento astronómico de estos pueblos antiguos, así como por su capacidad para transportar tales materiales por grandes distancias; algunos observadores fantasiosos se impresionan tanto que atribuyen esto a la intervención de extraterrestres.

Es un misterio que las civilizaciones antiguas que edificaron el sitio no hayan empleado rocas más cercanas. Pero la capacidad y el conocimiento que se observan en Stonehenge no son misteriosos. Las fases principales de la construcción se llevaron a cabo en unos pocos siglos. Tal vez la planeación inicial habría tomado otro siglo. En medio milenio puede construirse lo que sea, sin importar de cuán lejos provengan los ladrillos. Además, la astronomía encarnada en Stonehenge no es fundamentalmente más compleja que la que se puede descubrir con un palo en el suelo.

Tal vez estos observatorios antiguos impresionan perennemente a los modernos por cuanto estos no tienen idea de cómo se mueven el Sol, la Luna y las estrellas. Estamos demasiado ocupados viendo la televisión para que nos importe mirar al cielo. Para nosotros una simple alineación de rocas basada en patrones cósmicos parece una hazaña einsteiniana, pero una civilización realmente misteriosa sería aquella que no se refiriera, ya sea cultural o arquitectónicamente, al cielo.

Parte 2

El conocimiento de la naturaleza

Los retos de descubrir el contenido del cosmos

Contenido:

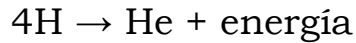
6. *Viaje desde el centro del Sol*
7. *Desfile de planetas*
8. *Vagabundos del sistema solar*
9. *Los cinco puntos de Lagrange*
10. *La materia de la antimateria*

6. Viaje desde el centro del sol

En nuestras vidas diarias, no es común que nos detengamos a pensar acerca del viaje de un rayo de luz desde el centro del Sol, donde se produce, hasta la superficie de la Tierra, donde en una arenosa playa se estrellaría contra el trasero de una persona. Lo fácil es su travesía de 500 segundos a la velocidad de la luz del Sol a la Tierra, a través del vacío del espacio interplanetario. Lo difícil es la aventura de un millón de años para pasar del centro a la superficie del Sol.

En los centros de las estrellas —que arden a diez millones de grados Kelvin mínimo, aunque la temperatura del Sol esté a quince millones de grados Kelvin—, los núcleos de hidrógeno, privados desde hace mucho de sus solitarios electrones, alcanzan velocidades que les permiten vencer su repulsión natural y chocar entre sí. Se crea energía de la materia conforme se forman por fusión

termonuclear núcleos de helio (He) a partir de cuatro núcleos de hidrógeno (H). Omitiendo los pasos intermedios, el Sol simplemente dice:



Y se hizo la luz

Cada cierto tiempo se crea un núcleo de helio, se forman partículas de luz llamadas *fotones*. Tienen tanta fuerza como para convertirse en rayos gama, la más poderosa forma de luz que conocemos. Creados mientras corren a la velocidad de la luz (300.000 km por segundo), los fotones de rayos gama inopinadamente comienzan su viaje desde el Sol.

Un fotón en inercia siempre se mueve en línea recta, pero si algo se interpone en su camino, se difumina o se absorbe y reemite. Cada destino puede desembocar en que el fotón salga en una dirección distinta con una energía distinta. Dada la densidad de la materia del Sol, el viaje promedio de un fotón dura menos de 30 mil millonésimas de segundo (un treintavo de nanosegundo), lo suficiente como para que viaje un centímetro antes de interactuar con un electrón libre o un átomo.

Con cada interacción, el nuevo camino puede continuar hacia afuera, a los lados e incluso hacia atrás. ¿Cómo, entonces, un fotón andariego logra abandonar el Sol? La clave reside en lo que podría sucederle a una persona borracha que da pasos al azar rumbo a una farola. Curiosamente, es muy posible que el borracho no vuelva al poste; si sus pasos fuesen realmente azarosos, poco a poco aumentaría la distancia desde la farola.

Si bien no puede predecirse cuán lejos de la farola se encontraría un borracho en particular, se puede predecir confiablemente la distancia promedio si, para un experimento, se convenciera a buen número de borrachos de que caminaran. La información mostraría que, en promedio, la distancia entre la farola aumenta en proporción a la raíz cuadrada del total de pasos dados. Por ejemplo, si cada persona diera 100 pasos al azar, la distancia promedio desde la farola sería de apenas 10 pasos; si se dieran 900, la distancia promedio habría aumentado a tan solo 30 pasos. Si cada pisada tuviera un tamaño de un centímetro, un fotón debe ejecutar casi cinco sextillones (10^{21}) de pasos para «ambular al azar» los setenta mil millones de centímetros entre el centro del Sol y la superficie. La distancia lineal total transitada abarcaría unos cinco mil años luz. A la velocidad de la luz, un fotón podría, naturalmente, tardar cinco mil años para cubrir la distancia. Pero al estimarse con base en un modelo más realista del perfil del Sol — que tome en cuenta, por ejemplo, que como el 90% de la masa solar reside en la mitad de su radio ya que el Sol, por ser gaseoso, se comprime bajo su propio peso— y agregando el tiempo de viaje perdido durante la parada entre la absorción de fotones y la reemisión, el viaje en su totalidad se demoraría un millón de años. En cambio, si el fotón tuviera un camino libre del centro a la superficie del Sol, su viaje le tomaría unos 2.3 segundos.

No fue sino hasta inicios de los años veinte cuando tuvimos alguna idea de que un fotón pudiera encontrar mayor resistencia para salir del Sol. Corresponde al excéntrico astrofísico *sir* Arthur Stanley

Eddington el honor de conferir al estudio de la estructura estelar los fundamentos en física para resolver el problema. En 1926 escribió *The Internal Constitution of the Stars* [La constitución interna de las estrellas], que publicó inmediatamente después del descubrimiento de una nueva rama de la física llamada *mecánica cuántica*, pero casi 12 años antes de que descubriera que la fusión termonuclear era oficialmente la fuente de energía del Sol. En sus comentarios ingeniosos del capítulo introductorio, Eddington capta correctamente parte del espíritu, si no el detalle, del atormentado viaje de una onda de éter (o fotón):

El interior de una estrella es un tumulto de átomos, electrones y ondas de éter. Tenemos que pedir la ayuda de los descubrimientos más recientes en la física atómica para seguir los intrínquilis de la danza [...] Trate de imaginar el alboroto. Átomos despeinados irrumpen a 80 km por segundo con tan solo los harapos de sus abigarradas capas de electrones producto de la pelea. Los electrones perdidos corren 100 veces más rápido en pos de sus lugares de descanso. ¡Cuidado! Mil arrimos le ocurren a un electrón en [unas diez mil millonésimas] de segundo [...] Entonces [...] el electrón es atrapado y agregado al átomo, y su carrera libre termina. Pero solo por un instante. Apenas el átomo se arregla el cinturón cuando un cuanto de ondas de éter se estrella contra él. Con un gran estallido, el electrón se lanza a nuevas aventuras (p. 19).

El entusiasmo de Eddington por sus sujetos sigue a medida que identifica las ondas de éter como el único componente del Sol:

A medida que vemos la escena nos preguntamos si este sería el elegante drama de la evolución estelar. Más se asemeja a una alegre escena de un espectáculo musical. La astracanada comedia de la física atómica no es muy considerada con nuestros ideales estéticos [...] Los átomos y electrones, pese a su prisa, nunca llegan a ninguna parte; solo cambian de lugar. Las ondas de éter son lo único que en verdad logra algo; aunque aparentemente se lanzan en todas direcciones sin ton ni son, pese a sí mismos logran avanzar lentamente (pp. 19-20).

En la periferia del Sol, que equivale a un cuarto de su radio, la energía se mueve principalmente por medio de convección turbulenta, que es un proceso parecido al que se aprecia en una sopa hirviendo (o cualquier cosa hirviendo). Grumos de masa de material incandescente ascienden mientras descienden otros de material más frío. Nuestros laboriosos fotones desconocen que su grumo residencial puede descender decenas de miles de kilómetros dentro del Sol, retrocediendo miles de años de azaroso ambular. Desde luego, también puede suceder lo contrario: la convección puede llevar velozmente a miles de fotones a la superficie e incrementar sus oportunidades de escapar.

Pero el relato del viaje de los rayos gama no ha concluido. Desde el centro del Sol, a quince millones de grados Kelvin, a su superficie de seis mil grados Kelvin, la temperatura se reduce a una tasa

promedio de casi una centésima de grado por metro. Para cada absorción y reemisión, los fotones de rayos gama de alta energía tienden a generar muchos fotones de baja energía a expensas de sí mismos. Tales actos altruistas se perpetúan a lo largo del espectro de luz, de rayos gama a rayos X a rayos ultravioleta a luz visible y de ahí a infrarrojos. La energía de un solo fotón de rayos gama es suficiente para engendrar mil fotones de rayos X, cada uno de los cuales procreará mil fotones de luz visible. En otras palabras, un solo haz de rayos gama puede fácilmente derivar más de un millón de fotones de luz visible y rayos infrarrojos para cuando la caminata termine en la superficie del Sol.

Solamente uno de cada quinientos millones de fotones que emergen del Sol se dirige a la Tierra. Sé que puede parecer nimio, pero dada nuestra distancia y nuestro tamaño, es la cantidad justa para la Tierra. El resto de los fotones se marcha a otro lado.

La «superficie» gaseosa del Sol se define, por demás, por la capa en la cual nuestros fotones andariegos dan el último paso antes de escapar al espacio interplanetario. Únicamente desde esa capa la luz puede alcanzar al ojo humano sin obstáculos, lo cual permite estimar las dimensiones solares. En general, la luz de mayor longitud de onda emerge de las capas más profundas del Sol que la de las de onda más corta. Por ejemplo, el diámetro del Sol es un poco menor cuando se lo mide usando rayos infrarrojos que al hacerlo con luz visible. Independientemente de lo que digan los libros de texto, sus valores del diámetro del Sol asumen típicamente que se buscan las dimensiones calculadas con luz visible.

No toda la energía de nuestros fecundos rayos gama se convierte en fotones de baja energía. Parte de dicha energía proviene de la convección turbulenta de gran magnitud, la cual a su vez impulsa a las ondas de presión que circundan al Sol como lo haría un cascabel. Mediciones continuas, cuidadosas y exactas del espectro solar revelan pequeñas oscilaciones que pueden interpretarse del mismo modo que los geosismólogos interpretan las ondas sonoras que generan los sismos. El patrón de vibración del Sol es extraordinariamente complejo por cuanto muchos modos oscilatorios operan de manera simultánea. El mayor reto para los helio sismólogos reside en descomponer las oscilaciones en sus partes básicas y de ahí deducir el tamaño y la estructura de los rasgos internos que las ocasionan. Si usted gritara en un piano abierto se podría «analizar» su voz. Las ondas sonoras que emanan de las cuerdas vocales provocarían vibraciones en las cuerdas del piano, las cuales tienen la misma composición de frecuencias que componen la voz humana.

El GONG (otro lindo acrónimo de Global Oscillation Network Group, o Grupo Global de Red de Oscilación [*Global Oscillation Network Group*]), es un proyecto coordinado para estudiar las oscilaciones solares. Observatorios solares especialmente equipados a lo largo de todos los husos horarios (Hawái, California, Chile, las Islas Canarias, India y Australia) monitorearon las oscilaciones solares. Sus resultados largamente esperados respaldaron las nociones en boga de la estructura estelar; en particular, que la energía se mueve por medio de fotones andariegos que vienen de las capas interiores

del Sol y luego mediante convección turbulenta en sus capas exteriores. Sí, algunos descubrimientos son grandiosos porque confirman lo que ya se sospechaba.

Es mejor que las aventuras heroicas a través del Sol las tengan los fotones y no alguna otra forma de energía o materia. Si cualquiera de nosotros hiciera ese mismo viaje, seríamos, por supuesto, aplastados, vaporizados y privados de todos nuestros electrones. Aparte de estos contratiempos, me imagino que uno puede vender boletos para semejante travesía. Pero en lo que a mí respecta, me conformo con conocer el relato. Cuando tomo un baño de Sol, lo hago respetando el viaje de todos los fotones que chocan con mi cuerpo sin importar dónde.

7. Desfile de planetas

En el estudio del cosmos no hay mejor historia que la de los intentos seculares para comprender a los planetas, viajeros errantes en el firmamento estrellado. De los ocho objetos de nuestro sistema solar que indudablemente son planetas, cinco son observables a simple vista y eran conocidos por los trogloditas y los antiguos. Cada uno de ellos —Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno— fue dotado de la personalidad del dios por el cual había sido nombrado. Por ejemplo, Mercurio, el cual se mueve más velozmente contra el trasfondo de estrellas, se llamó así por el mensajero romano de los dioses, un sujeto representado con alas aerodinámicamente inútiles en sus botines o su casco. Y Marte, el único de los viajeros errantes clásicos (la palabra *planete* en griego

significa «errante») de color rojo, fue bautizado en honor al dios romano de la guerra y la violencia. La Tierra, naturalmente, se observa a simple vista. Solo hay que mirar el suelo, pero *terra firma* no se consideraba parte de la pandilla de planetas hasta que, en 1543, Nicolás Copérnico propuso su modelo heliocéntrico del universo.

Para quien observe sin un telescopio, los planetas eran y son tan solo puntos de luz que se mueven por el cielo. No fue sino hasta el siglo XVII, con la proliferación de telescopios, los astrónomos descubrieron que los planetas eran mundos. Hasta el siglo XX los planetas fueron examinados de cerca con sondas espaciales. Y hasta el siglo XXI posiblemente serán visitados por personas.

La humanidad tuvo su primer encuentro telescópico con los viajeros celestiales en el invierno de 1609-1610. Luego de recibir noticias de un invento holandés de 1608, Galileo Galilei fabricó un excelente telescopio que él mismo había diseñado, a través del cual vio los planetas como orbes, tal vez como otros mundos. Uno de ellos, el brillante Venus, se mostraba en fases como las de la Luna: Venus en creciente, Venus gibosa, Venus llena. Otro planeta, Júpiter, tiene lunas propias y Galileo descubrió las cuatro más grandes: Ganimedes, Calisto, Ío y Europa, todas llamadas así por diversos personajes de la vida de la contraparte griega de Júpiter, Zeus.

La manera más sencilla de explicar las fases de Venus, así como algunas características de su movimiento en el cielo, era formular que los planetas se desplazan alrededor del Sol, no de la Tierra. En

efecto, las observaciones de Galileo apoyaban fuertemente la idea del universo como Copérnico la formuló.

Las lunas de Júpiter obligaron a conocer más el universo copernicano: aunque el telescopio de Galileo no podía enfocar las lunas como para observar algo más que simples puntos de luz, nadie había visto un cuerpo celeste circundar a ninguno otro, salvo la Tierra. Implicaba una observación simple y clara del cosmos, pero la Iglesia católica y el «sentido común» la desaprobaban. Con su telescopio, Galileo descubrió una contradicción del dogma de que la Tierra ocupaba el centro del cosmos, en torno a la cual todos los objetos revolvían. Galileo publicó sus hallazgos en una breve pero trascendental obra titulada *El mensajero de las estrellas*.

* * * *

APENAS SE ACEPTÓ EL sistema copernicano, la estructura de los cielos pudo llamarse un sistema solar, y la Tierra pudo ocupar su lugar correcto entre los demás seis planetas conocidos. Nadie imaginó que habría más de seis, ni siquiera el astrónomo inglés *sir* William Herschel, quien descubrió el séptimo en 1781.

En realidad, el crédito de haber visto al séptimo le corresponde al astrónomo inglés John Flamsteed, el primer astrónomo real. Pero en 1690, cuando Flamsteed lo halló, no lo vio moverse, por lo que supuso que era otra estrella y la nombró 34 Tauri. Cuando Herschel vio la «estrella» de Flamsteed a la deriva contra las estrellas, anunció que era un cometa, asumiendo que no podía ser un planeta. Después de todo, los cometas se mueven y son descubribles. Herschel pensaba llamarlo *Georgium Sidus* [Estrella de Jorge] por su

benefactor, el rey Jorge III de Inglaterra. Si la comunidad científica hubiera respetado sus deseos, la alineación planetaria sería Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno y Jorge. En un golpe a la zalamería, el planeta fue bautizado Urano conforme al orden clásico de los nombres de sus coetáneos, aunque algunos astrónomos franceses y estadounidenses lo llamaron el *planeta de Herschel* hasta 1850, muchos años después de que se descubrió el octavo planeta, Neptuno.

Con el tiempo, los telescopios se volvieron más grandes y precisos, pero la capacidad de ver con detalle no mejoró mucho. Ya que todos los telescopios de cualquier tamaño apuntaban a los planetas a través de la turbulenta atmósfera terrestre, las mejores imágenes eran un poco borrosas. Pero ello no impidió a algunos intrépidos observadores descubrir fenómenos como la Gran Mancha Roja de Júpiter, los anillos de Saturno, las capas de hielo polares de Marte y decenas de lunas planetarias. Aun así, nuestro conocimiento de los planetas era escaso, y donde yace la ignorancia también yacen las fronteras del descubrimiento y la imaginación.

* * * *

TÓMESE EN CUENTA EL CASO del empresario y astrónomo estadounidense, muy imaginativo y rico, Percival Lowell, cuyos esfuerzos comenzaron a finales del siglo XIX e inicios del siglo XX. Su nombre se ha ligado por siempre a los «canales» de Marte, los «rayos» de Venus, la búsqueda del planeta X, y, desde luego, al Observatorio Lowell en Flagstaff, Arizona. Como muchos investigadores de todo el mundo, Lowell retomó la propuesta del

astrónomo italiano de finales del siglo XIX Giovanni Schiaparelli, de que las líneas en la superficie marciana eran *canali*.

La palabra significaba «cauces», pero Lowell prefirió traducirla como *canales* porque pensaba que las marcas se asemejaban a los de las grandes obras terrestres. Se desató la imaginación de Lowell, que se dedicó a observar y mapear la extensa red acuática del Planeta Rojo, de seguro (eso creía con fervor) construida por la avanzada civilización marciana. Creía que sus ciudades, al haber agotado sus fuentes locales de agua, habían tenido que construir canales para transportarla de las capas de hielo polares a las zonas ecuatoriales. La historia era interesante y generó muchos textos impresionantes. Asimismo, a Lowell le fascinaba Venus, cuyas nubes perennes y muy reflejantes lo convierten en uno de los objetos más brillantes del firmamento. Venus orbita relativamente cerca del Sol, por lo que apenas el Sol se pone, o cuando este sale, se ve a Venus gloriosamente en el cielo. Y porque el cielo crepuscular suele ser muy colorido, no faltan las llamadas de emergencia que denuncian luminosos ovnis en el horizonte.

Lowell imaginó que Venus contaba con una red de rayos inmensos (más *canali*) que dimanaban de un centro. Los que vio permanecen en el misterio. De hecho, nadie podría confirmar lo que vio en Marte o en Venus, lo cual no molestó a otros astrónomos debido a que todos sabían que su observatorio montañoso era uno de los mejores del mundo. Por tanto, si no se veía la actividad marciana tal como la observaba Lowell, era porque el telescopio y el monte no eran tan buenos como el suyo.

Por supuesto, incluso después de que mejoraron los telescopios, nadie pudo replicar los descubrimientos de Lowell. Y el episodio por el cual se lo recuerda actualmente implicó que el afán de creer menoscabó la necesidad de obtener información responsable y precisa. Y curiosamente, hasta el siglo XXI nadie pudo explicarse qué sucedía realmente en el Observatorio Lowell.

Un optometrista de Saint Paul, Minnesota, llamado Sherman Schultz, respondió por carta a un artículo publicado en la edición de julio de 2002 de la revista *Sky and Telescope*. Schultz señaló que el equipo óptico que Lowell prefería para observar la superficie venusina era muy parecido al aparato con el cual los optómetras examinan el interior del ojo de los pacientes. Tras solicitar un par de segundas opiniones, el autor aseguró que lo que Lowell había visto en Venus era en realidad la red de sombras que sus vasos sanguíneos oculares proyectaban en su retina. Cuando se compara el diagrama de los rayos de Lowell, es claro que coincide perfectamente con un diagrama del ojo humano. Y cuando se combina el hecho infortunado de que Lowell sufría de hipertensión, lo cual se observa claramente en los vasos sanguíneos de los ojos, con su deseo de creer, no sorprende que pobló a Venus y a Marte con innumerables habitantes inteligentes y tecnológicamente capaces.

De todos modos, a Lowell le fue un poco mejor en su búsqueda del planeta X, el cual se suponía que se hallaba allende Neptuno. El planeta X no existe, como el astrónomo E. Myles Standish hijo demostró a mediados de la década de 1990. Pero durante un tiempo

Plutón —descubierto en el Observatorio Lowell en febrero de 1930, 13 años después de la muerte de Lowell— sirvió como una aproximación. A semanas del gran anuncio del observatorio, sin embargo, algunos astrónomos comenzaron a debatir si este debía clasificarse como el noveno planeta. En virtud de nuestra decisión, en el Rose Center for Earth and Space, de presentar a Plutón como un cometa, me introduje inopinadamente en el debate, y puedo asegurar que este no ha terminado. Asteroide, planetoide, planetasimal, gran planetasimal, cometa gigante, objeto del Cinturón de Kuiper, objeto transneptuniano, bola de nieve de metano, sabueso tonto del ratón Miguelito, cualquier cosa menos el noveno planeta, como discutimos los críticos. Plutón es demasiado pequeño, demasiado ligero, demasiado helado, demasiado excéntrico en su órbita, demasiado rebelde. Y, por demás, decimos lo mismo en relación con los recientes contendientes principales, incluyendo tres o cuatro objetos descubiertos más allá de Plutón, que le rivalizan en tamaño y comportamiento.

* * * *

AVANZAN EL TIEMPO Y LA tecnología. Llegan los años cincuenta, cuando las observaciones de ondas radiales y las mejoras a la fotografía revelaron hechos fascinantes sobre los planetas. Para los años sesenta, se habían enviado a personas y robots para que les tomaran fotos. Y con cada hecho y fotografía nueva, se elevaba un poco más el velo de la ignorancia.

Venus, llamado así en honor a la diosa de la belleza y el amor, tiene una atmósfera densa y casi opaca compuesta mayormente de

bióxido de carbono con una presión atmosférica de casi 100 veces la presión a nivel del mar en la Tierra. Peor aún, la temperatura del aire en la superficie se acerca a los 482 grados Celsius. En Venus se puede cocinar una pizza de *pepperoni* que mida 40 cm de diámetro en siete segundos con solo ponerla al aire. (Sí, hice el cálculo). Tales condiciones extremas plantean grandes retos a la exploración espacial, porque prácticamente todo lo imaginable que se envíe a ese planeta será vaporizado, derretido o aplastado. Habría que ser a prueba de calor o muy veloz al recoger información de la superficie de este desierto.

Por demás, no es casual que Venus sea un planeta ardiente. Sufre de un efecto invernadero descontrolado, ocasionado por el bióxido de carbono en la atmósfera, el cual atrapa la energía infrarroja. Por tanto, aun cuando las nubes reflejan la mayoría de la luz visible del Sol, las rocas y el suelo absorben lo poco que llega a la superficie. Este terreno luego vuelve a irradiar la luz visible en forma de luz infrarroja, la cual se acumula en el aire, y, finalmente, crea —y sustenta— un inmenso horno para pizza.

Aparte, si hubiera formas de vida en Venus, los llamaríamos *venusinos*, así como llamaríamos a los de Marte marcianos. Pero, de acuerdo con la regla de los genitivos latinos, ser «de Venus» lo convierte a uno en venéreo. Desafortunadamente, los médicos adoptaron dicha palabra antes que los astrónomos. No los culpo. Las enfermedades venéreas anteceden a la astronomía, la cual sería la segunda profesión más antigua.

Cada día el resto del sistema solar se vuelve más familiar. La primera nave en sobrevolar Marte fue la Mariner 4 en 1965 y envió los primeros acercamientos del Planeta Rojo. No obstante las locuras de Lowell, antes de 1965 nadie sabía cómo era la superficie marciana, aparte de que era rojiza, tenía casquetes polares y mostraba áreas claras y oscuras. Nadie sabía que tenía montañas o un sistema de cañones mucho más grande, profundo y largo que el Gran Cañón. Nadie sabía que contenía volcanes inmensamente más grandes que el mayor de la Tierra, el Mauna Kea en Hawái, incluso si se midiera desde el fondo del mar.

Tampoco faltan evidencias de que alguna vez agua líquida fluyó por la superficie marciana: el planeta tiene arroyos secos tan largos como el Amazonas con redes de tributarios secos, deltas secos y planicies secas. Los vehículos de exploración de Marte que avanzan por su espacio rocoso y polvoriento confirmaron la presencia de minerales que solo se forman ante la presencia de agua. Sí, hay señales de agua dondequiera, pero nada que beber.

Algo malo sucedió en Venus y Marte. ¿Podría entonces pasar lo mismo en la Tierra? Nuestra especie gira manivelas ambientales sin preocuparse por las consecuencias que ello tendrá a largo plazo. ¿Pero quién habría hecho estas preguntas antes de que el estudio de Marte y Venus, nuestros cercanos vecinos, nos hubiera obligado a hacerlo?

* * * *

PARA EXAMINAR MÁS DE cerca los planetas más distantes se necesitan sondas espaciales. Las primeras en abandonar el sistema

solar fueron Pioneer 10, lanzada en 1972, y su gemela, Pioneer 11, lanzada en 1973. Ambas sobrevolaron Júpiter dos años más tarde. Pronto estarán a más de 16 000 millones de kilómetros de la Tierra, más del doble de la distancia a Plutón.

Sin embargo, cuando fueron lanzadas, las Pioneer 10 y 11 no contaban con la energía suficiente para ir más allá de Júpiter. ¿Cómo lograr que una nave viaje más lejos de lo que le permitiría su fuente de energía? Pues se apunta, se encienden los cohetes y luego se deja volar a su destino, impulsada por las fuerzas gravitacionales que despliega todo en el sistema solar. Y por cuanto los astrofísicos mapean trayectorias con precisión, las sondas pueden ganar energía merced a varias maniobras de impulso que roban energía orbital de los planetas que visitan. Los dinamizadores orbitales tanto han mejorado en su capacidad de obtener asistencia gravitatoria que causarían envidia a más de un campeón de *pool*.

Ambas sondas enviaron mejores imágenes de Júpiter y Saturno que las que podrían tomarse desde la Tierra. Pero las gemelas Voyager 1 y 2, lanzadas en 1977 y equipadas con un paquete de experimentos y aparatos científicos, convirtieron a los demás planetas en íconos, y llevaron al sistema solar a las salas de toda una generación de ciudadanos del mundo. Una de las ventajas de dichos viajes fue la revelación de que las lunas de los planetas exteriores eran muy diferentes entre sí, y eran tan fascinantes como los planetas mismos. De ahí que esos satélites planetarios pasaron de ser aburridos puntos de luz a mundos que ameritan nuestra atención y afecto.

En este momento, la sonda orbital Cassini sigue alrededor de Saturno: examina el planeta, su increíble sistema de anillos y sus muchas lunas. Tras haber llegado a las cercanías de Saturno, luego de una asistencia gravitatoria de «cuatro cojines», Cassini desplegó exitosamente una sonda llamada Huygens, diseñada por la Agencia Espacial Europea y nombrada en honor de Christiaan Huygens, el astrónomo holandés que por primera vez vio los anillos de Saturno. La sonda descendió a la atmósfera del mayor satélite saturnino, Titán, la única luna en el sistema solar que tiene atmósfera. Su composición química, rica en moléculas orgánicas, sería análoga a la que posiblemente hubo en la Tierra prebiótica. Ya la NASA planea otras complejas misiones para explorar Júpiter y sus más de 70 lunas.

* * * *

EN 1584, EL MONJE y filósofo italiano Giordano Bruno, en su libro *Sobre el infinito universo y los mundos*, propuso la existencia de «innumerables soles» y «tierras innumerables [que] giran alrededor de estos soles». Y aseguró que con base en la premisa de un creador glorioso y omnipotente, dichas tierras tenían habitantes vivientes. Por ello y otras blasfemias, la Iglesia católica hizo quemar vivo a Bruno. Aun así, Bruno no fue el primero ni el último en formular alguna variante de estas ideas. Entre sus predecesores se encuentran desde el filósofo griego Demócrito (siglo V a. C.) hasta el cardenal Nicolás de Cusa (siglo XV). Sus descendientes abarcan a Immanuel Kant (siglo XVIII) y al novelista Honoré de Balzac (siglo

XIX). Bruno tuvo la mala suerte de nacer en una época en la cual los pensamientos se castigaban con la muerte.

Durante el siglo XX, los astrónomos pensaron que la vida podía existir en otros planetas, como en la Tierra, solo si estos orbitaban dentro de una zona habitable, una franja de espacio ni muy cerca ni muy lejos de una estrella, pues el agua se evaporaría o se congelaría. Sin duda, la vida como la conocemos requiere agua líquida, pero todo el mundo asumía que también la vida necesita luz estelar como fuente de energía.

Luego vino el descubrimiento de que Ío y Europa, lunas de Júpiter, entre otros cuerpos del sistema solar exterior, son calentadas por fuentes energéticas que no son el Sol. Ío es el lugar más activo volcánicamente del sistema solar, que regurgita gases sulfurosos a su atmósfera y derrama lava por doquier. Es casi seguro que debajo de su helada corteza, Europa cuenta con un profundo océano de agua líquida de más de mil millones de años de antigüedad. En ambos lugares, las mareas de Júpiter sobre las lunas sólidas envían energía a su interior, que derrite el hielo y crea ambientes que podrían sostener vida sin energía solar.

Incluso aquí, en la Tierra, nuevos tipos de organismos, llamados colectivamente *extremófilos*, viven en condiciones imposibles para los seres humanos. El concepto de una zona habitable implicaba un sesgo inicial en favor de que la temperatura ambiente era la correcta para la vida. Pero algunos organismos gustan de las calderas y consideran que la temperatura ambiente terrestre es hostil. Para ellos nosotros somos extremófilos. Muchos lugares de la Tierra, que

solían considerarse invivibles, son habitados por semejantes criaturas: el fondo del Valle de la Muerte, las fumarolas en el fondo del océano y los tiraderos nucleares, por citar algunos.

Con el conocimiento de que la vida puede aparecer en lugares más diversos de lo que se imaginaba, los astrobiólogos han expandido el concepto otrora restringido de la zona habitable. Hoy sabemos que semejante zona debe abarcar la recién descubierta tozudez de la vida microbiana, así como la variedad de fuentes energéticas que la mantienen. Y, como Bruno y otros sospecharon, la alineación de planetas exosolares confirmados sigue creciendo aceleradamente. El número hoy asciende a más de 150, todos descubiertos en la década reciente.

Nuevamente, resucitamos la idea de que la vida puede estar dondequiera, igual que nuestros ancestros habían imaginado. Pero hoy lo ideamos sin que el peligro de ser inmolados, sabiendo que la vida es tozuda y que la zona habitable puede ser tan grande como el universo entero.

8. Vagabundos del sistema solar

Por siglos el inventario de nuestro vecindario celestial era muy estable. Abarcaba al Sol, las estrellas, los planetas, un puñado de lunas planetarias y los cometas. Aun la suma de un planeta o dos a la lista no cambió la organización del sistema.

Pero la víspera de Año Nuevo de 1801 surgió una nueva categoría: los *asteroides*, así llamados un año más tarde por un astrónomo inglés, *sir* John Herschel, hijo de *sir* William, descubridor de Urano.

En los siguientes 200 años el álbum familiar del sistema solar se llenó de información, fotografías e historias de los asteroides, a medida que los astrónomos hallaban a muchos de estos vagabundos, identificaban sus regiones, investigaban sus componentes, medían sus tamaños, trazaban sus formas, calculaban sus órbitas y los visitaban con sondas. Algunos investigadores incluso sugirieron que los asteroides eran parientes de los cometas y hasta de las lunas planetarias. Y a la fecha algunos astrofísicos e ingenieros están urdiendo métodos para desviar aquellos muy grandes que pudieran hacernos una visita inesperada.

PARA COMPRENDER LOS OBJETOS pequeños de nuestro sistema solar, primero uno debe buscar en los grandes, en específico en los planetas. Un hecho curioso acerca de los planetas se encuentra en una regla matemática muy simple de un astrónomo prusiano llamado Johann Daniel Titius en 1766. Pocos años después, su colega Johann Elert Bode, sin mencionar a Titius, anunció dicha regla y hasta nuestros días a menudo se la conoce como la Ley de Titius-Bode, e incluso —sin aludir al primero— como la Ley de Bode. Su útil y elegante fórmula arrojó muy buenos estimados de las distancias entre los planetas y el Sol, al menos para los entonces conocidos: Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno. En 1781 la popularidad de la ley de Titius-Bode condujo al descubrimiento de Neptuno, el octavo planeta. Impresionante. Por tanto, o la ley fue una coincidencia o entraña algún hecho fundamental de cómo se forman los sistemas solares.

Sin embargo, no es así de perfecto.

Problema número 1: hay que hacer una pequeña trampa para calcular la distancia correcta de Mercurio, insertando un cero donde la fórmula requiere un 1.5. Problema número 2: Neptuno, el octavo planeta, está más lejos de lo que la fórmula predijo, y orbita más o menos donde debiera estar el noveno planeta. Problema número 3: Plutón, el cual algunos consideran el noveno planeta¹, se sale de la escala aritmética, como todo en el espacio.

La ley, asimismo, colocaría un planeta en órbita en el espacio entre Marte y Júpiter, a cerca de 2.8 unidades astronómicas² del Sol. Alentados por el descubrimiento de Urano a una distancia aproximada determinada por la ley Titius-Bode, a los astrónomos de finales del siglo XVIII les pareció buena idea estimar la zona en cerca de 2.8 UA. Y, claro, en la víspera de Año Nuevo de 1801, el astrónomo italiano Giuseppe Piazzi, fundador del observatorio de Palermo, descubrió algo allí. A continuación, desapareció detrás del resplandor del Sol; pero exactamente un año más tarde, con la ayuda de los brillantes cálculos del matemático alemán Carl Friedrich Gauss, el nuevo objeto fue redescubierto en otra parte del cielo. Todo el mundo estaba emocionado: una victoria para las matemáticas y para los telescopios había llevado al descubrimiento de un nuevo planeta. Piazzi mismo lo llamó *Ceres* (como en cereal)

¹ En nuestra exposición en el Rose Center for Earth and Space en la ciudad de Nueva York, pensamos en presentar al helado Plutón como uno de los «Reyes de los cometas», un título informativo que este preferiría en lugar del «planeta más diminuto».

² Una unidad astronómica, abreviada UA, es la distancia promedio entre la Tierra y el Sol.

en honor a la diosa romana de la agricultura, siguiendo la tradición de llamar a los planetas según los antiguos dioses romanos.

Pero cuando los astrónomos examinaron esto con más cuidado y calcularon la órbita, la distancia y el brillo de Ceres, hallaron que el nuevo «planeta» era muy pequeño. En pocos años se encontraron tres nuevos mini planetas —Pallas, Juno y Vesta— en la misma zona. Tomó algunas décadas, pero finalmente el vocablo *asteroide* (cuerpos «parecidos a astros», literalmente), ideado por Herschel, se impuso, por cuanto —a diferencia de los planetas, que se mostraban ante los telescopios en forma de discos— los nuevos objetos no se podían distinguir de las estrellas excepto por su movimiento. Observaciones posteriores revelaron múltiples asteroides y para finales del siglo XIX se habían descubierto 464 alrededor de una franja de terreno celeste a 2.8UA. Y debido a que la franja era una banda relativamente plana y no se desparramaba alrededor del Sol, como abejas en torno a un panal, a la zona se la conoció como el *Cinturón de asteroides*.

En la actualidad se ha catalogado a decenas de miles de asteroides y centenas se descubren cada año. En conjunto, según algunos estimados, más de un millón abarcan 800 metros a lo largo de la franja. Hasta donde se sabe, si bien las deidades romanas llevaban vidas sociales un tanto complicadas, no tenían diez mil amigos, y por ello hace mucho que los astrónomos han renunciado a la fuente clásica de nombres. Por lo mismo, los asteroides pueden llamarse como actores, pintores, filósofos, dramaturgos, ciudades, países, dinosaurios, flores, estaciones y demás miscelánea; hasta personas

comunes y corrientes han bautizado asteroides: Harriet, Jo-Anne y Ralph tienen cada quien los suyos: se llaman 1744 Harriet, 2316 Jo-Anne y 5051 Ralph (el número indica la secuencia en que se estableció la órbita de cada asteroide). David H. Levy, astrónomo aficionado canadiense, santo patrón de los cazadores de cometas, pero que ha descubierto muchos asteroides, tuvo la amabilidad de designar uno con mi nombre, 13123 Tyson, poco después de que se inauguró el Rose Center for Earth and Space, que costó 240 millones de dólares, con el propósito de aterrizar el conocimiento del universo. En verdad que me conmovió mucho el gesto de David y rápidamente aprendí, a partir de la trayectoria orbital de 13123 Tyson, que viaja entre las demás, en el cinturón principal de asteroides, y no se atraviesa en la órbita terrestre ni pone en peligro la vida en nuestro planeta. Es bueno saber estas cosas.

TAN SOLO CERES, EL mayor de los asteroides, de unos 933 km de diámetro, es esférico. Los demás son fragmentos más pequeños y rugosos en forma de huesos o papas. Curiosamente, solo Ceres representa una cuarta parte de toda la masa asteroidea. Y si se añaden las masas de los demás asteroides visibles, más todos los más pequeños cuya existencia puede extrapolarse de la información, no reúne la masa de un planeta; apenas alcanza 5% de la masa de la Luna. Por tanto, la predicción de Titius-Bode de que un planeta en pleno derecho se hallaba a 2.8 UA resultó un poco exagerada.

Muchos asteroides se componen de rocas, aunque algunos son totalmente de metal y algunos tienen una mezcla de ambos; la mayoría se encuentra en lo que a menudo se llama el *cinturón principal*, una zona entre Marte y Júpiter. Usualmente, se describe a los asteroides como cuerpos hechos de materiales desechados en los albores del sistema solar que no pudieron ingresar en un planeta. Pero dicha explicación es incompleta, en el mejor de los casos, y no da cuenta del hecho de que algunos asteroides están constituidos solo de metal. Para comprender lo que sucede, hay que comprender cómo se formaron los objetos más grandes del sistema solar.

Los planetas se fusionaron desde una nube de gas y polvo enriquecida con los restos dispersos de estrellas que contenían numerosos elementos. La nube colapsó y formó un *protoplaneta*, una masa sólida que arde a medida que acumula más y más material. Dos cosas ocurren con los protoplanetas más grandes: uno, la masa asume la forma de una esfera; dos, su calor interno lo mantiene fundido el tiempo suficiente para que el material pesado —principalmente hierro, con algo de níquel, mezclado con otros metales, como cobalto, oro y uranio— se hunda en el centro de la masa en crecimiento, mientras que los minerales más ligeros y comunes (hidrógeno, carbono, oxígeno y silicio) flotan hacia la superficie. Los geólogos (que no temen a las palabras kilométricas) han denominado a este proceso *diferenciación*. Así, el núcleo de un planeta diferenciado —como la Tierra, Marte y Venus— es de metal; su manto y corteza se componen principalmente de roca y ocupan mayor volumen que el núcleo.

Una vez que se ha enfriado, si un planeta se destruye, por ejemplo, al chocar con algún planeta vecino, los fragmentos de ambos seguirán orbitando al Sol en más o menos la misma trayectoria que los objetos originales. La mayoría de dichos fragmentos serán rocosos, porque provienen de las capas exteriores, densas y rocosas, de los dos objetos diferenciados, y una pequeña fracción será puramente metálica. Y en efecto, esto es lo que se ha observado en los verdaderos asteroides. Además, un trozo de hierro no podría formarse en medio del espacio interestelar, porque los átomos de hierro estarían dispersos por las nubes de gas que formaron los planetas, y están compuestas principalmente de hidrógeno y helio. Para concentrar los átomos de hierro hay que diferenciar primero un cuerpo líquido.

PERO ¿CÓMO SABEN LOS ASTRÓNOMOS del sistema solar que la mayoría de los asteroides del cinturón principal son rocosos? O ¿cómo puede saberse cualquier cosa? El principal indicador es la capacidad de un asteroide de reflejar la luz, su albedo. Los asteroides no emiten luz propia, solo absorben y reflejan los rayos solares. ¿Sabemos si 1744 Harriet refleja o absorbe luz infrarroja? ¿Y la luz visible, ultravioleta? Materiales distintos absorben y reflejan las diversas bandas de luz de manera distinta. Si está familiarizado con el espectro de la luz solar (como los astrofísicos) y se observa cuidadosamente el espectro de luz solar de un asteroide (como hacen los astrofísicos), entonces se puede apreciar cómo la luz solar ha sido alterada, y de esta manera es posible identificar los

materiales que componen la superficie del asteroide. Y del material, puede saberse cuánta luz se refleja. Con base en ello y en la distancia, puede calcularse el tamaño del asteroide. Básicamente, se trata de estimar cuánto brilla el asteroide en el cielo; puede ser sombrío y grande o muy reflejante y pequeño, o algo intermedio, y si no se conoce la composición, no puede responderse la pregunta con solo apreciar el brillo.

Al principio este método de análisis espectral condujo a una clasificación tripartita simplificada de asteroides de tipo C, ricos en carbonos; asteroides tipo S, ricos en silicio, y de tipo M, ricos en metales. Pero mediciones de mayor precisión han derivado en una sopa de letras de decenas de clases, cada una referida a un rasgo importante de la composición del asteroide y a varios cuerpos de donde provendría, en lugar de un solo planeta madre estallado en pedazos.

Si se conociera la composición de un asteroide, entonces de seguro se conocería su densidad. Curiosamente, algunas mediciones de los tamaños de los asteroides y sus masas arrojan densidades menores a las de la piedra. Una explicación lógica es que dichos asteroides no eran sólidos. ¿Habría algo más en la mezcla? ¿Hielo, tal vez? Es poco probable. El Cinturón de asteroides está tan cerca del Sol que cualquier tipo de hielo (agua, amoníaco, bióxido de carbono), los cuales son todos de una densidad menor que la piedra, se habría evaporado hace mucho tiempo debido al calor solar. Acaso en el espacio vacío se halla todo eso mezclado, rocas y escombros moviéndose en tándem.

La primera evidencia observacional de tal hipótesis se vio en imágenes del asteroide Ida, de 56 km de largo, fotografiado por la sonda Galileo durante un sobrevuelo el 28 de agosto de 1993. Medio año después se halló una pequeña mancha a 97 km del centro de ese asteroide, que se descubrió que era ¡una luna en forma de pedrusco de poco más de un kilómetro y medio de largo! Bautizada Dáctilo, es el primer satélite que se ha visto orbitando un asteroide. ¿Son los satélites algo raro? Si un asteroide puede tener un satélite en torno suyo, ¿podría tener a su vez dos o 10 o 100? En otras palabras, ¿puede ser que algunos de los asteroides sean montones de piedras?

La respuesta es un sí contundente. Algunos astrofísicos dirían incluso que probablemente estas *pilas de escombros*, como se las denomina oficialmente (los astrofísicos de nuevo han preferido ir al meollo que recurrir a la prolijidad polisilábica), son comunes. Uno de los ejemplos más extremos sería Psique, que mide unos 240 km de diámetro y es reflejante, lo que sugiere que su superficie es metálica. Conforme a estimados de su densidad total, empero, su interior pudiera estar vacío en un 70 por ciento.

* * * *

CUANDO SE ESTUDIAN OBJETOS que se hallan en lugares distantes del cinturón principal de asteroides, pronto se está lidiando con el resto de los vagabundos del sistema solar: los asteroides asesinos, cometas y numerosas lunas planetarias. Los cometas son las bolas de nieve del cosmos. Usualmente, no pasan del par de kilómetros de diámetro; consisten de una mezcla

congelada de gases, agua, polvo y partículas. En efecto, simplemente serían asteroides con una capa de hielo que jamás se evaporó. La pregunta de si llamar a un fragmento asteroide o cometa nos remite a dónde se formó o dónde ha estado. Antes de que Newton publicara su *Principia* en 1687, en el cual formuló las leyes de la gravitación, nadie tenía idea de que los cometas vivían y viajaban entre los planetas, entrando y saliendo del sistema solar en órbitas muy alargadas. Los fragmentos helados que se formaban en los confines más lejanos del sistema solar, ya fuese en el Cinturón de Kuiper o más allá, siempre se hallan cubiertos de hielo y, si emprenden un viaje hacia al Sol, mostrarán una enrarecida pero muy visible estela de vapor de agua y otros gases volátiles cuando den la vuelta por la órbita de Júpiter. Finalmente, al cabo de varias visitas al sistema solar interno (centenas e incluso miles) el cometa podría perder toda su cubierta de hielo y acabaría como una mera roca. De hecho, algunos asteroides —si no todos— cuyas órbitas atraviesan la órbita terrestre serían cometas *gastados*, de los cuales solo quedan los rocosos núcleos como espectros.

Luego tenemos los meteoritos, objetos voladores cósmicos que caen en la Tierra. El hecho es que, como los asteroides, en su mayoría los meteoritos están hechos de roca y de vez en cuando de metal, lo cual sugiere que se originan en el Cinturón de asteroides. Para los geólogos planetarios, que han estudiado el creciente número de asteroides conocidos, es claro que no todas las órbitas provienen del cinturón principal de asteroides.

Como Hollywood tanto gusta de avisarnos, algún día un asteroide o cometa podría chocar con la Tierra; si bien dicha posibilidad no se volvió real hasta que, en 1963, el astro geólogo Eugene M. Shoemaker demostró de manera concluyente que el enorme cráter de Barringer, cerca de Winslow, Arizona, podría haberse debido a un impacto de meteorito, y no al vulcanismo o a algún tipo de fuerza geológica terrestre.

Como veremos en la parte 6, el descubrimiento de Shoemaker incitó una nueva ola de curiosidad acerca de la intersección de la órbita terrestre con la de los asteroides. En los años noventa, las agencias espaciales comenzaron a rastrear objetos cercanos a la Tierra: cometas y asteroides cuyas órbitas, como cortésmente lo plantea la NASA, «les permiten entrar en el vecindario de la Tierra».

* * * *

EL PLANETA JÚPITER DESEMPEÑA un poderoso papel en las vidas de los asteroides y sus parientes más distantes. Un acto de equilibrista gravitacional entre Júpiter y el Sol ha recolectado a familias de asteroides a 60 grados delante y detrás la órbita de Júpiter, formando un triángulo equilátero con este planeta y el Sol. Si se calcula la geometría, se coloca a los asteroides a 5.2 UA de ambos. Estos cuerpos atrapados son conocidos como asteroides troyanos y ocupan formalmente lo que se denomina los puntos de Lagrange en el espacio. Como veremos en el capítulo siguiente, dichas regiones actúan como rayos de atracción que retienen a los asteroides que van a la deriva.

Asimismo, Júpiter desvía a muchos cometas que se dirigen a la Tierra. La mayoría de ellos habitan en el Cinturón de Kuiper desde la órbita de Plutón y se extienden mucho más allá. Pero cualquier cometa lo bastante audaz como para acercarse a Júpiter será arrojado en una nueva dirección. De no ser por este planeta, como guardián del foso, la Tierra habría sido bombardeada por cometas con mucha mayor frecuencia. De hecho, la Nube de Oort —la cual es una vasta población de cometas en los confines exteriores del sistema solar y fue llamada así en honor del astrónomo danés Jan Oort, quien propuso su existencia por vez primera— se considera ampliamente conformada por cometas del Cinturón de Kuiper que Júpiter ha desviado por doquier. En efecto, las órbitas de los cometas de la Nube de Oort se extienden hasta la mitad de la distancia que hay hasta las estrellas más cercanas. ¿Y qué tal con las lunas planetarias? Algunas, como Fobos y Deimos, las pequeñas lunas en forma de papa de Marte, parecen asteroides capturados. Pero Júpiter posee muchas lunas heladas. ¿Debiéramos clasificarlas como cometas? Y una de las lunas de Plutón, Caronte, no es mucho más pequeña que el propio Plutón. Entretanto, ambas son heladas. Así que tal vez debieran considerarse un cometa doble, estoy seguro de que a Plutón no le importaría.

LAS NAVES ESPACIALES HAN explorado decenas de cometas y asteroides. El primero fue la nave robótica, de tamaño de un coche, *NEAR Shoemaker* (NEAR es un astuto acrónimo en inglés que significa *Near Earth Asteroid Rendezvous*, o Encuentro de Asteroide Cercano a la Tierra), el cual visitó al cercano asteroide Eros, no por

casualidad justo antes del 14 de febrero de 2001. Se posó en la superficie a justamente 6 km por hora y, con sus instrumentos intactos, inesperadamente siguió mandando información por dos semanas, lo cual permitió a los geólogos planetarios confirmar que este asteroide de 34 km de largo es un objeto indiferenciado y consolidado en lugar de un montón de escombros.

Hubo otras misiones ambiciosas, como la del Stardust, el cual sobrevoló por la coma o nube de polvo que rodea el núcleo de un cometa, de modo de que capturara el enjambre de pequeñas partículas en su rejilla recolectora. La finalidad de la misión era sencillamente averiguar acerca de los distintos tipos de polvo espacial que existen y recoger las partículas sin dañarlas. Para lograrlo, la NASA utilizó una sustancia loca y maravillosa llamada *aerogel*, lo más cercano a un fantasma que se haya inventado. Es una maraña seca de silicio, semejante a una esponja, compuesta en un 99.8% por aire. Cuando una partícula se impacta con ella a una velocidad hipersónica, la partícula penetra en el recogedor y gradualmente se detiene, intacta. Si se tratara de detener el mismo grano de polvo con una manopla de cátcher o con cualquier otra cosa, el polvo a alta velocidad se estrellaría contra la superficie y se vaporizaría al detenerse abruptamente.

La Agencia Espacial Europea también está explorando cometas y asteroides. En una misión de 12 años, la nave Rosetta explorará un solo cometa durante dos años para reunir la mayor cantidad de información que nunca antes, y luego avanzar hacia un par de asteroides del cinturón principal.

Cada uno de estos encuentros vagabundos busca reunir información muy específica que nos hable sobre la formación y evolución del sistema solar, de los cuerpos que lo habitan, de la posibilidad de que las moléculas orgánicas se trasladaran a la Tierra durante algún impacto o del tamaño, la forma y la solidez de los objetos cercanos a la Tierra. Y como siempre, la comprensión no proviene de lo bien que se describe un objeto sino de qué modo ese objeto se relaciona con el *corpus* más grande de conocimiento adquirido y su mudable frontera. Para el sistema solar dicha frontera es la búsqueda de otros sistemas solares. Lo que los científicos desean hacer luego es comparar en qué se parece el nuestro a los de los planetas y los vagabundos exosolares. Solamente así sabremos si nuestra vida es normal o si vivimos en una familia solar disfuncional.

9. Los cinco puntos de Lagrange

La primera nave espacial en abandonar la órbita terrestre fue la Apollo 8. Este logro aún es uno de los más extraordinarios, aunque poco reconocidos, del siglo XX. Cuando llegó el momento, los astronautas se desprendieron de la tercera y última etapa de su poderoso cohete Saturno V, con lo cual se lanzó el módulo de comando y a sus tres tripulantes a una velocidad de 11 km por segundo. La mitad de la energía para alcanzar la Luna se utilizó tan solo para poner la nave en órbita terrestre.

Luego de la tercera etapa ya no era necesario usar los motores, salvo a mitad del trayecto si fuera preciso ajustar la trayectoria para

no errar por completo el encuentro con la Luna. Durante el 90% de su viaje de casi 400 000 km, el módulo de comando se desaceleraba poco a poco a medida que la gravedad seguía atrayéndolo cada vez más débilmente. Mientras que los astronautas se aproximaban a la Luna, la gravedad de esta se fortalecía. Por tanto, debía existir un punto en la ruta donde las fuerzas gravitacionales opuestas se equilibraban con exactitud. Cuando el módulo de comando cruzaba ese punto en el espacio, su velocidad aumentaba nuevamente a medida que aceleraba rumbo a la Luna.

Si la gravedad fuese la única fuerza a tomar en cuenta, entonces este punto sería el único en el sistema Tierra-Luna donde las fuerzas opuestas se cancelan mutuamente. Pero la Tierra y la Luna, asimismo, orbitan el centro de gravedad común, el cual reside a 1.600 km, más o menos, debajo de la superficie terrestre, a lo largo de una línea imaginaria que conecta los centros de la Tierra y la Luna. Cuando ciertos objetos se mueven en círculos de cualquier tamaño y a cualquier velocidad, crean una nueva fuerza que los empuja hacia afuera del centro de rotación. El cuerpo humano siente esta fuerza centrífuga cuando en un auto se da un viraje brusco o cuando se sobrevive a uno de los juegos que giran en un parque de diversiones. Un ejemplo clásico de estos viajes nauseabundos es pararse en el borde de un enorme cilindro, recargando la espalda contra el muro perimetral. Conforme el gran cilindro acelera cada vez más, se siente una fuerza que empuja hacia el muro con mayor fuerza cada vez. A velocidades muy altas, uno apenas puede moverse. En ese momento el operador retira el

piso y el cilindro gira a los lados y bocabajo. En mi infancia, cuando me montaba en ellos la fuerza eran tan grande que apenas podía mover mis dedos, por estar pegados al muro, igual que el resto de mi cuerpo.

Si con semejante viaje a uno se le revolviere el estómago y moviera la cabeza a un lado, el vómito volaría en tangente. O quedaría pegado al muro. Peor aún, si uno no volteara la cabeza, el vómito no saldría de la boca debido a las extremas fuerzas centrífugas que actúan en dirección opuesta. (Pensándolo bien, ya no he visto esta atracción, y me pregunto si ha sido prohibida).

Las fuerzas centrífugas surgen a consecuencia de la tendencia de un objeto a viajar en línea recta luego de ser puesto en movimiento, y por ello no son realmente fuerzas. Pero pueden medirse como si lo fuesen. Cuando se hace, como lo hizo el brillante matemático francés del siglo XVIII Joseph-Louis Lagrange (1736-1813), se descubren puntos en el sistema rotatorio Tierra-Luna donde la gravedad de la Tierra, de la Luna y las fuerzas centrífugas del sistema rotatorio se equilibran. Estos son conocidos como *puntos de Lagrange*, y son cinco.

El primer punto (llamado afectuosamente L1) yace entre la Tierra y la Luna, poco más cerca de la primera que el punto de equilibrio gravitatorio puro. Cualquier objeto que se coloque ahí orbitará el centro de gravedad Tierra-Luna con la misma periodicidad mensual que la Luna y parecerá fijo en el espacio a lo largo de la línea Tierra-Luna. Aunque las fuerzas se cancelen allí, este primer punto de Lagrange es de un precario equilibrio. Si un objeto se mueve a los

lados en cualquier dirección, el efecto combinado de las tres fuerzas lo regresará a su posición anterior. Pero si el objeto se desplaza hacia la Tierra o se aleja de ella, aunque sea un poco, caerá irreversiblemente hacia la Tierra o la Luna, como una canica en una loma empinada a punto de rodar hacia un lado u otro.

El segundo y el tercer punto de Lagrange (L2 y L3) se encuentran, asimismo, en la línea Tierra-Luna, pero esta vez L2 reside más allá de la Luna, mientras que L3 está lejos de la Tierra en la dirección opuesta. De nuevo, las tres fuerzas —la gravedad terrestre, la lunar y la fuerza centrífuga del sistema rotatorio— se cancelan de manera concertada. Y nuevamente un objeto colocado en cualquier punto puede orbitar el centro de gravedad Tierra-Luna con la misma periodicidad mensual de la Luna.

Los picos gravitacionales que L2 y L3 representan son mucho más amplios que los de L1. Así, si uno se dirige hacia la Tierra o la Luna, tan solo un poco de combustible bastará para encaminarlo para allá.

Si bien L1, L2 y L3 son lugares espaciales respetables, el premio al mejor punto de Lagrange le corresponde a L4 y L5, uno de los cuales yace a la izquierda de la línea central Tierra-Luna mientras que el otro se halla a la derecha, cada uno de los cuales representa el vértice de un triángulo equilátero en el cual la Tierra y la Luna sirven como los otros vértices.

En L4 y L5, como en los otros tres hermanos, las fuerzas se equilibran. Pero a diferencia de los otros puntos, cuyo equilibrio es inestable, el de L4 y L5 es estable; independientemente de en qué

dirección se dirija uno, las fuerzas le impedirán alejarse como si se encontrara en un valle rodeado de montañas.

Para cada uno de los puntos de Lagrange, si su objeto no se ubica exactamente donde las fuerzas se cancelan, su posición oscilará en torno al punto de equilibrio en senderos llamados *libraciones*. (No confundir con los puntos particulares en la superficie terrestre donde la mente oscila, pero por libraciones ingeridas). Estas libraciones equivalen al balanceo de una pelota que ha descendido por una loma con demasiada fuerza.

Más que una curiosidad orbital, L4 y L5 representan los puntos donde pudieran fundarse colonias espaciales. Lo que se necesita es transportar al área materias primas e insumos (extraídos no solo de la Tierra sino tal vez de la Luna o un asteroide), dejarlos ahí sin peligro de que se vayan a la deriva y regresar más tarde con más vituallas. Después de que todas las materias primas se hayan reunido en este ambiente de gravedad cero, se puede construir una enorme estación espacial, de decenas de kilómetros de superficie, sin que los materiales sufran desgaste. Y entonces al hacer rotar la estación, las fuerzas centrífugas inducidas simularían la gravedad para sus centenas o miles de habitantes. En agosto de 1975, Keith y Carolyn Henson, entusiastas del espacio, fundaron la Sociedad L5 precisamente con dicha finalidad, aunque se le recuerda mejor por su coincidencia con las ideas de Gerard K. O'Neill, profesor de física de Princeton y visionario espacial, quien propuso la colonización del espacio en sus obras, como su clásico *Ciudades del espacio*, de 1976. La Sociedad L5 fue fundada con base en un principio rector:

«disolver la sociedad en una reunión multitudinaria en L5», aparentemente adentro de un hábitat espacial, por lo cual se declararía la misión cumplida. En abril de 1987, la Sociedad L5 se fusionó con el Instituto Nacional del Espacio para formar la Sociedad Nacional del Espacio, la cual aún sigue activa.

La idea de colocar una enorme estructura en puntos de libración ya había aparecido en la novela *Naufragio en el mar selenita*, de Arthur C. Clarke en 1961. Clarke conocía bien las órbitas especiales. En 1945 fue el primero en calcular, en un memorándum mecanografiado de cuatro páginas, la localización por encima de la superficie terrestre donde el periodo de un satélite coincide exactamente con el periodo de rotación terrestre de 24 horas. Un satélite con dicha órbita parecería revolotear sobre la superficie de la Tierra y serviría como una estación repetidora para las radiocomunicaciones internacionales. Hoy, centenas de satélites de telecomunicaciones lo hacen.

¿Dónde se encuentra ese lugar mágico? No en la baja órbita terrestre. Sus habitantes, como el telescopio espacial Hubble y la Estación Espacial Internacional, tardan cerca de 90 minutos en circunvolar la Tierra. Mientras tanto, a los objetos a la distancia de la Luna les tomaría un mes más o menos. Lógicamente, debe existir una distancia intermedia donde pueda mantenerse una órbita de 24 horas. Ese lugar se encuentra a unos 35.888 km sobre la superficie de la Tierra.

* * * *

EN REALIDAD, EL SISTEMA ROTATORIO Tierra-Luna no es único. Existe otra serie de cinco puntos de Lagrange en el sistema Tierra-Sol, cuyo punto L2 se ha convertido en el favorito de los satélites astrofísicos. Sus puntos orbitan el centro de gravedad Tierra-Sol una vez al año. A 1.609.344 km de la Tierra, en dirección opuesta a la del Sol, en L2 un telescopio obtiene 24 horas de visión continua del cielo nocturno por cuanto la Tierra ya es un punto diminuto en el espacio. Por el contrario, desde la órbita baja de la Tierra, donde se halla el telescopio Hubble, la Tierra está tan cerca y es tan grande que bloquea la mitad del campo de visión. En 2002 la Wilkinson Microwave Anisotropy Probe [Sonda Wilkinson de Anisotropía por Microondas], llamada así por el ya desaparecido físico de Princeton David Wilkinson, colaborador del proyecto, alcanzó el punto L2 del sistema Tierra-Sol, donde por varios años se ha afanado para conseguir información sobre el trasfondo de microondas cósmicas, la omnipresente firma del mismo *big bang*. La cima del punto L2 del sistema Tierra-Sol es incluso más amplia y plana que el punto L2 del sistema Tierra-Luna. Ahorrando un 10% de su combustible, esta sonda espacial cuenta con suficiente energía para mantenerse en este punto de equilibrio inestable por casi un siglo.

El telescopio James Webb, llamado así en honor del ex jefe de la NASA de la década de 1970, será el sucesor del Hubble. Habitará y trabajará en el punto L2 del sistema Tierra-Sol. Incluso después quedaría mucho espacio, miles de kilómetros cuadrados, para que lo ocupen más satélites.

Otro satélite de la NASA, el Génesis, libra alrededor del punto L1 del sistema Tierra-Sol, a un millón y medio de kilómetros hacia el Sol. Durante dos años y medio, Génesis miraba al Sol y recolectó materia solar prístina, incluyendo partículas atómicas y moleculares del viento solar. El material luego fue enviado a la Tierra por un medio de recuperación en el aire sobre los cielos de Utah y su contenido fue examinado, como las muestras de la misión Stardust, la cual coleccionó polvo de cometas. Génesis proporcionará una ventana a los contenidos de la nebulosa original del sistema solar de la cual se formaron el Sol y los planetas. Luego de abandonar el punto L1, la muestra rodeó el punto L2 y corrigió su trayectoria antes de regresar a la Tierra.

En virtud de que L4 y L5 son puntos estables, se podría suponer que la basura espacial se acumularía allí, lo cual lo convertiría en un lugar peligroso de transitar. De hecho, Lagrange predijo que los restos espaciales se hallarían en L4 y L5, debido al gravitacionalmente poderoso sistema Sol-Júpiter. Un siglo más tarde, en 1905, fue descubierto el primero de la familia de asteroides troyanos. Ahora sabemos que en los puntos L4 y L5 del sistema Sol-Júpiter, miles de asteroides siguen a Júpiter alrededor del Sol en periodos similares a los de Júpiter. Comportándose como si fuesen objeto de rayas de atracción, dichos asteroides están eternamente atados por fuerzas gravitacionales y centrífugas al sistema Sol-Júpiter. Desde luego, esperamos que se acumule basura espacial en los puntos L4 y L5 del sistema Tierra-Sol, así

como en el Tierra-Luna. Así sucede. Pero no tanto como en el encuentro entre el Sol y Júpiter.

Un importante beneficio secundario es que las trayectorias interplanetarias que inician en los puntos de Lagrange requieren muy poco combustible para alcanzar otros puntos e incluso otros planetas. A diferencia de un lanzamiento desde un planeta, en el cual todo el combustible se usa para librar la superficie, un lanzamiento desde un punto de Lagrange asemejaría la botadura de un buque que deja el dique seco que sería gentilmente soltado con un mínimo de combustible. En tiempos modernos, en lugar de pensar en colonias autosuficientes de personas y granjas, podríamos pensar en puntos de Lagrange como puertas al resto del sistema solar. Desde los puntos del sistema Tierra-Sol se estaría a medio camino de Marte; no en distancia o tiempo sino en cuanto al importantísimo consumo de combustible.

En una versión de nuestro futuro espacial, hay que imaginar estaciones de reabastecimiento de combustible en cada punto de Lagrange en el sistema solar, donde los viajeros llenarán los tanques de sus cohetes espaciales cuando vayan a visitar a amigos y parientes en otros planetas. Este modelo de viaje, aun cuando futurista, no es totalmente descabellado. Véase que, sin estaciones de reabastecimiento en todo Estados Unidos, su automóvil requeriría cantidades de combustible iguales a las de un Saturno V para trasladarse de costa a costa: la mayoría de la masa del vehículo sería combustible, usado principalmente para transportar

el combustible aun sin consumirse. Así no viajamos en la Tierra. Tal vez ya es hora de dejar de viajar así en el espacio.

10. La materia de la antimateria

Voto por que la física de partículas es la disciplina con la jerga más cómica en las ciencias físicas. ¿Dónde más puede un bosón de vector neutro intercambiarse con un muon negativo y un muon neutrino? O ¿qué tal que un gluón se intercambie entre un cuark extraño y uno encantado? Junto a estas partículas aparentemente innumerables con nombres peculiares, hay un universo paralelo de antipartículas que se conocen colectivamente como *antimateria*. Pese a su ubicuidad en la ciencia ficción, la antimateria es claramente fáctica. Y sí, tiende a aniquilarse al entrar en contacto con la materia ordinaria.

El universo manifiesta un romance especial entre antipartículas y partículas. Pueden nacer de la energía pura y morir (aniquilarse) cuando su masa combinada se reconvierte en energía. En 1932 el físico estadounidense Carl David Anderson descubrió el antielectrón, contraparte de carga positiva del electrón (de carga negativa). Desde entonces, en los aceleradores de partículas de todo el mundo se fabrican antipartículas de todo orden, aunque solo recientemente se han reunido en átomos completos. Un grupo internacional que encabezaba Walter Oelert del Instituto de Investigación en Física Nuclear de Jülich, Alemania, ha creado átomos uniendo un antielectrón con un antiprotón; de ellos resulta el anti hidrógeno. Estos antiátomos fueron creados en el acelerador

de partículas del Centro Europeo de Investigación Nuclear (conocido por sus siglas en francés CERN) en Ginebra, Suiza, donde muchos aportes se han hecho a la física de partículas.

El método es sencillo: crear un conjunto de antielectrones y de anti protones, juntarlos a una temperatura adecuada y esperar a que se combinen para formar átomos. En la primera ronda de experimentos, el equipo de Oelert produjo nueve átomos de anti hidrógeno. Pero en un mundo dominado por la materia ordinaria, la vida como antimateria puede ser precaria. El anti hidrógeno sobrevivió por menos de 40 nanosegundos (cuarenta mil millonésimas de un segundo) antes de aniquilarse contra los átomos ordinarios.

El descubrimiento del antielectrón fue uno de los grandes triunfos de la física teórica, ya que su existencia había sido anticipada por el físico británico Paul A. M. Dirac. En su ecuación de la energía de un electrón, Dirac advirtió que había dos series de soluciones: una positiva y otra negativa. La solución positiva daba cuenta de las propiedades observadas del electrón ordinario, pero la negativa al inicio desafiaba toda interpretación, pues no tenía correspondencia obvia con el mundo real.

Las ecuaciones con dos soluciones no son inusuales. Uno de los ejemplos más simples es la respuesta a la pregunta ¿cuál número se repite a sí mismo hasta dar nueve?, ¿es 3 o -3? Por supuesto, ambas respuestas son correctas, porque $3 \times 3 = 9$ y $-3 \times -3 = 9$. Las ecuaciones no garantizan, empero, que sus soluciones se correspondan con hechos del mundo real; pero si un modelo

matemático de un fenómeno físico es correcto, entonces manipular sus ecuaciones puede ser tan útil (y más fácil) que manipular el universo entero. Como en el caso de Dirac y la antimateria, esto suele llevar a predicciones verificables, y si estas no pueden verificarse, entonces habría que descartar la teoría. Independientemente del resultado físico, un modelo matemático asegura que las conclusiones posibles sean lógicas e internamente consistentes.

LA TEORÍA CUÁNTICA, TAMBIÉN conocida como *física cuántica*, fue desarrollada en la década de 1920 y es un campo subordinado de la física que describe la materia a escala de las partículas atómicas y subatómicas. Empleando las nuevas reglas cuánticas, Dirac formuló que en ocasiones un electrón fantasma del «otro lado» podría aparecer en este mundo en la forma de un electrón ordinario, dejando un agujero en el mar de la energía negativa. Tal agujero, sugería Dirac, podría revelarse a sí mismo experimentalmente como un antielectrón o lo que se ha llamado un *positrón*.

Las partículas subatómicas contienen muchas características medibles. Si una propiedad particular puede tener un valor opuesto, la antipartícula contendrá el valor opuesto, pero será de todos modos idéntica. El ejemplo más obvio es la carga eléctrica: el positrón se asemeja al electrón salvo en que el positrón tiene una carga positiva, en tanto que el electrón la tiene negativa. De forma parecida, el antiprotón es la antipartícula del protón.

Créalo o no, el neutrón sin carga tiene su antipartícula, llamada — como es de suponerse— el antineutrón, que está dotado de una carga cero opuesta a la del neutrón ordinario. Esta magia aritmética se deriva de la tripleta de partículas cargadas fraccionalmente (cuarks) que componen los neutrones. Estos cuarks tienen cargas de $-1/3$, $-1/3$, $+2/3$ en tanto que las del antineutrón tienen $1/3$, $1/3$, $-2/3$. Cada conjunto de tres agrega una carga neta de cero, si bien —como puede verse— los componentes correspondientes tienen cargas opuestas.

La antimateria parecer emerger de la nada. Si un par de rayos gama tiene energía lo suficientemente alta, pueden interactuar y transformarse espontáneamente en un par electrón-positrón, lo cual convierte un conjunto de energía en un poco de materia como la descrita en la famosa ecuación de Albert Einstein de 1905:

$$E = mc^2$$

Esta se lee llanamente:

$$\textit{Energía} = (\textit{masa}) \times (\textit{velocidad de la luz})^2$$

Esto a su vez se lee más llanamente:

$$\textit{Energía} = (\textit{masa}) \times (\textit{una enorme cifra})$$

En el lenguaje de la interpretación original de Dirac, el rayo gama echó a puntapiés al electrón del dominio de las energías negativas para así crear un electrón ordinario y un agujero de electrón. También lo contrario es posible. Si chocan una partícula y una antipartícula, se aniquilarán rellenando el agujero y emitiendo rayos

gama; esta es la radiación que uno debe evitar. ¿Cómo probarlo? Solo recuérdese el personaje de *Hulk* que se convirtió en un monstruo grande, verde y feo.

Si de algún modo se logra hacer una masa de antipartículas caseras, de inmediato se tendría un problema de almacenamiento, porque las antipartículas aniquilarían cualquier saco o bolsa convencional (de plástico o papel) donde se las desee meter. Una solución más astuta es atrapar las antipartículas cargadas dentro de un fuerte campo magnético, donde serían repelidas por los muros magnéticos. Con este campo magnético encerrado en un vacío, las antipartículas estarían a salvo de aniquilarse al chocar con la materia ordinaria. Este equivalente magnético de una botella es, asimismo, una bolsa idónea para cargar materias hostiles, como los gases brillantes de cien millones de grados de los experimentos de fusión nuclear (controlada). El verdadero problema de almacenamiento aflora cuando se han creado antiátomos enteros (y por ello eléctricamente neutros), por cuanto no rebotan normalmente de un muro magnético. Sería mejor mantener separados los positrones y antiprotones hasta que sea absolutamente necesario.

PARA GENERAR ANTIMATERIA se necesita al menos tanta energía como la que se recoge cuando se aniquila para volverse energía de nuevo. A menos que se tenga un tanque de combustible lleno desde el inicio, los motores de antimateria absorberán lentamente la energía de su nave espacial. No sé si conocían esto los que idearon

la serie de televisión de *Viaje a las estrellas*, pero creo recordar que el capitán Kirk siempre estaba demandando «más potencia» de los motores de materia-antimateria, y Scotty siempre le respondía que «los motores no pueden soportarlo».

Si bien no hay motivo para esperar que sea distinto, las propiedades del anti hidrógeno no parecen ser distintas a la del hidrógeno ordinario. Habría que revisar el comportamiento del positrón en compañía de un antiprotón; ¿obedece a las leyes de la teoría cuántica?, y la fuerza gravitatoria del antiátomo ¿muestra anti gravedad en vez de gravedad ordinaria? A escala atómica, la fuerza de gravedad entre partículas es inconmensurablemente pequeña. Las acciones están dominadas por fuerzas atómicas y nucleares, las cuales son muchísimo más poderosas que la gravedad. Lo que se necesita son los antiátomos suficientes para hacer objetos ordinarios de modo que sus propiedades generales sean medidas y comparadas con la materia ordinaria. Si un conjunto de bolas de billar (y desde luego la mesa de billar y sus tacos) se hicieran de antimateria, ¿acaso un juego de *antipool* sería idéntico a uno de *pool*? ¿Una anti bola de ocho caería a la Tierra a un ritmo idéntico a una bola ordinaria de ocho? ¿Los anti planetas orbitarían una anti estrella idénticamente a como lo hace un planeta ordinario?

Estoy convencido filosóficamente de que las propiedades generales de la antimateria se probarán idénticas a las de la materia ordinaria: gravedad normal, colisiones normales, luz normal, maniobras normales, etcétera. Infortunadamente, esto significa que una antigalaxia en trayectoria de colisión con la Vía Láctea se vería

similar a una galaxia ordinaria hasta que fuera demasiado tarde para hacer algo al respecto. Pero este tenebroso destino no puede ser común en el universo, ya que, por ejemplo, si una anti estrella se aniquilara con una estrella ordinaria, la conversión de materia en rayos gama sería veloz y total. Dos astros con masas similares a las del Sol (como 10^{57} partículas) serían tan luminosos que el sistema en colisión temporalmente produciría una energía vastamente superior a la de todos los astros de cien millones de galaxias. No existe evidencia de que algo así haya sucedido alguna vez. Así, hasta donde se puede juzgar, el universo está dominado por la materia ordinaria, es decir, en un viaje intergaláctico ser aniquilado no constituiría un peligro.

Aun así, el universo sigue siendo un lugar perturbadoramente desequilibrado: cuando fue creado, cada antipartícula siempre está acompañada de su opuesto, si bien las ordinarias parecen estar perfectamente felices sin sus antipartículas. ¿Habrá focos de antimateria que expliquen este desequilibrio? ¿Fue infringida la ley de la física (o estará otra desconocida en vigor) durante la formación del universo que por siempre inclinó la balanza en favor de la materia? Jamás sabremos las respuestas, pero en el ínterin, si un extraterrestre aterriza en nuestra casa y extiende su extremidad en señal de saludo, antes de responderle amistosamente, láncele una pelota. Si la extremidad estalla, entonces el extraterrestre está hecho de antimateria; de lo contrario, proceda a ponerlo en contacto con el líder de los humanos.

Parte 3

Métodos y normas de la naturaleza

De cómo la naturaleza se presenta ante la mente pensante

Contenido:

11. *La importancia de la constancia*
12. *Límites de velocidad*
13. *Intensidad balística*
14. *Ser denso*
15. *Sobre el arcoíris*
16. *Ventanas cósmicas*
17. *Los colores del cosmos*
18. *Plasma cósmico*
19. *Hielo y fuego*

11. La importancia de la constancia

Si se menciona la palabra *constante*, los oyentes pueden pensar que se refiere a la fidelidad conyugal o la estabilidad financiera, o tal vez declararán que el cambio es lo único constante en la vida. Sin embargo, el universo tiene sus propias constantes en forma de cantidades invariables que reaparecen interminablemente en la naturaleza y en las matemáticas, y cuyos valores numéricos exactos son de gran importancia para el desarrollo de la ciencia. Algunas de estas constantes son físicas, arraigadas en mediciones reales. Otras, aunque iluminan el funcionamiento del universo, son puramente numéricas, pues provienen de las matemáticas mismas.

Algunas constantes son locales y limitadas, o aplicables tan solo a un contexto, un objeto o un subgrupo; otras son fundamentales y universales, relevantes al espacio, tiempo, materia o energía dondequiera, por las cuales los investigadores pueden comprender y predecir el pasado, el presente y el futuro del universo. Los científicos solo conocen algunas constantes fundamentales. Las tres principales de la lista son la velocidad de la luz en el vacío, la constante gravitacional de Newton y la constante de Planck, fundamento de la física cuántica y clave del notorio principio de incertidumbre de Heisenberg. Otras constantes universales abarcan la carga y la masa de cada una de las partículas subatómicas.

Dondequiera que aparece un patrón de causa y efecto en el universo, probablemente es porque en ello actúa una constante. Pero para medir causa y efecto se debe evaluar qué es y qué no es variable, y debe asegurarse de que una simple correlación, aunque sea tentadora, no sea confundida por una causa. En la década de 1990, creció la población de cigüeñas de Alemania junto con la tasa de natalidad de ese país. ¿Será que las cigüeñas estaban entregando más bebés? No lo creo.

Pero una vez que es seguro que existe una constante, y su valor ha sido medido, pueden hacerse predicciones sobre lugares, cosas y fenómenos que aún no han sido descubiertos ni pensados.

* * * *

JOHANNES KEPLER, MATEMÁTICO y místico ocasional alemán, fue el descubridor de la primera cantidad física inmutable en el universo. En 1618, al cabo de una década de tonterías místicas,

Kepler planteó que si se cuadra el tiempo que tarda un planeta en dar la vuelta al Sol, dicha cantidad es siempre proporcional al cubo de la distancia promedio del planeta respecto del Sol. Por consiguiente, esta sorprendente relación vale para todos los planetas de nuestro sistema solar, y para cada galaxia en órbita alrededor del centro de su galaxia, y cada galaxia en órbita en torno de su cúmulo galáctico. Como se puede sospechar, empero, Kepler no sabía que operaba una constante: la constante gravitacional de Newton se asomaba por entre las fórmulas de Kepler, pero no sería revelada sino 70 años después.

Tal vez la primera constante que se aprende en la escuela es π , una entidad matemática denotada desde inicios del siglo XVIII por la letra griega π . π es sencillamente el radio de la circunferencia de un círculo en relación con su diámetro; es decir, es el múltiplo si se desea avanzar del diámetro de un círculo hasta su circunferencia. Asimismo, π aparece en una plétora de lugares populares y peculiares, entre ellos las áreas de círculos y elipses, los volúmenes de algunos sólidos, los movimientos pendulares, las vibraciones de las cuerdas y el análisis de los circuitos eléctricos.

Al no ser un número entero, π tiene una sucesión ilimitada de dígitos decimales que no se repiten; cuando se secciona para incluir a todos los números arábigos, π tiene esta apariencia: 3.14159265358979323846264338327950.

No importa dónde y cuándo se viva, la nacionalidad, edad y gustos artísticos, la religión o si se es demócrata o republicano, si se calcula el valor de π , tendrá el mismo resultado dondequiera en el

universo. Constantes como π disfrutaban un grado de internacionalidad del que carecen, han carecido y carecerán los asuntos humanos, por lo cual, si algún día nos podemos comunicar con extraterrestres, será en lenguaje matemático, la *lingua franca* del cosmos.

Así pues, se dice que π es un número *irracional*. No se puede representar el valor exacto de π como una fracción de dos números enteros, tales como $2/3$ o $18/11$. Pero los antiguos matemáticos, quienes desconocían por completo la existencia de los números irracionales, tan solo podían representarlo como $25/8$ (los babilonios, *circa* 2000 a. C.) o $256/81$ (los egipcios, *circa* 1650 a. C.). Entonces, como por 250 a. C., el matemático griego Arquímedes, tras un laborioso ejercicio geométrico, obtuvo no una fracción sino dos, $223/71$ y $22/7$. Arquímedes se percató de que el valor exacto de π , descubrimiento que él mismo jamás se adjudicó, yacía entre ambas fracciones.

Dado el estado de la ciencia de entonces, en la Biblia se aprecia un estimado muy pobre de π , en un pasaje que describe el decorado del Templo de Salomón: «un mar de fundición, de 10 codos del uno al otro lado, redondo, [...] ceñíalo en derredor un cordón de treinta codos» (1 Reyes 7:23); es decir, el diámetro era de 10 unidades y la circunferencia de 30, lo cual sería cierto si π fuera igual a 3. Tres mil años después, en 1897, la cámara baja de la Legislatura Estatal de Indiana aprobó una iniciativa de ley que declaraba que, en el estado, «el radio del diámetro y la circunferencia será de cinco cuartos a cuatro», o sea, 3.2 exactamente.

Aparte de estos legisladores, los más grandes matemáticos —como Mohamed Ibn Musa al-Jwarizmi, el iraquí del siglo IX cuyo nombre pervive en la palabra *algoritmo*, y hasta Newton— se afanaron en ampliar la precisión de π . La introducción de las computadoras electrónicas, desde luego, favoreció al máximo dicho ejercicio. A inicios del siglo XXI el número de dígitos de π sobrepasó un millón de billones, mucho más que cualquier aplicación física salvo el estudio (por gente- π) que analiza si la secuencia de numerales alguna vez dejará de verse aleatoria.

* * * *

DE MUCHA MAYOR IMPORTANCIA que el aporte de Newton al cálculo de π son sus tres leyes universales del movimiento y su ley de la gravitación universal. Estas cuatro fueron presentadas por vez primera en su obra maestra, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* [Principios matemáticos de la filosofía natural], o *Principia*, publicada en 1687.

Antes, los científicos (que estudiaban lo que entonces se llamaba *mecánica* y luego *física*) simplemente describían lo que habían visto y esperaban que la próxima vez ello ocurriera de la misma forma. Pero armados con las leyes del movimiento, podían describir las relaciones entre fuerza, masa y aceleración en cualesquiera condiciones. La predictibilidad había entrado a las ciencias y a la vida.

A diferencia de su primera y tercera leyes, la segunda ley del movimiento es una ecuación:

$$F = ma$$

Si se traduce, se tiene que la fuerza neta (F) que se aplica a un objeto de una masa determinada (m) resultará en la aceleración (a) de dicho objeto. En términos más sencillos, a mayor fuerza mayor aceleración. Y cambia de manera coordinada: si se duplica la fuerza en un objeto, se duplica su aceleración. La masa sirve como constante de la ecuación, de modo que se puede calcular exactamente cuánta aceleración se puede esperar de una fuerza determinada.

Pero ¿y si la masa no es constante? Si se lanza un cohete, su masa se reducirá continuamente hasta que se vacíen sus tanques de combustible. Y ahora, solo por divertirnos, supóngase que la masa cambia, aunque no se agregue o sustraiga material al objeto; es lo que ocurre en la teoría de la relatividad especial de Einstein. En el universo newtoniano, cada objeto tiene una masa que siempre será suya. En contraste, en el universo relativo einsteiniano, los objetos tienen una masa *en reposo* inmutable (la misma *masa* de las ecuaciones de Newton) a la cual se le suma masa conforme a la velocidad del objeto. Lo que sucede en el universo de Einstein es que a medida que se acelera un objeto, aumenta su resistencia a la aceleración, lo cual se muestra como un aumento en su masa en la ecuación. Newton no podía conocer estos efectos *relativos*, porque solo se vuelven significativos a velocidades comparables a la velocidad de la luz. Para Einstein, significaban otra constante: la velocidad de la luz, tema que amerita su propio ensayo.

IGUAL QUE OTRAS LEYES físicas, las del movimiento de Newton son simples y llanas. Su ley de la gravitación universal es algo más complicada. Declara que la fuerza de la atracción gravitatoria entre dos objetos, ya sea una bala de cañón en el aire y la Tierra, ya la Luna y la Tierra, o dos átomos, o dos galaxias, solo depende de las dos masas y la distancia entre ambas. Con mayor exactitud, la fuerza de la gravedad es directamente proporcional a la masa de un objeto por la masa del otro, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ambos. Dichas proporciones indican cómo funciona la naturaleza: si la fuerza de la atracción gravitacional entre dos cuerpos es a cierta distancia de una determinada fuerza F , se reduce a un cuarto ($1/4$) de F al doble de la distancia, y si esta se triplica, a un noveno ($1/9$) de F .

Pero en sí misma dicha información no basta para estimar los valores exactos de estas fuerzas. Para ello la relación demanda una constante, en este caso, el término llamado constante gravitacional G , o —como dicen los más familiarizados con la ecuación— la *Gran G*.

Reconocer la correspondencia entre la distancia y la masa fue uno de los descubrimientos más brillantes de Newton, pero él no podía medir el valor de G , pues para ello habría tenido que saber todo lo demás en dicha ecuación, y dejar a G completamente determinada. En tiempos de Newton, sin embargo, no se podía conocer toda la ecuación. Aun cuando se podía medir fácilmente la masa de dos balas de cañón y su distancia entre sí, su mutua fuerza de

gravitación sería tan pequeña que ningún aparato podría haberla medido. Se podía medir la fuerza de gravedad entre la Tierra y una bala de cañón, pero era imposible medir la masa de la Tierra. Fue hasta 1798, a más de un siglo de los *Principia*, que el químico y físico Henry Cavendish desarrolló una medida confiable de G .

Para ello, Cavendish empleó un aparato cuya parte fundamental era un cascabel hecho con dos bolas de plomo de 5 cm de diámetro, suspendido en su centro por un delgado alambre vertical, por lo que el aparato podía oscilar. Cavendish lo metió a su vez en un estuche cerrado al vacío, y colocó afuera otras dos bolas de plomo de 30 cm de diámetro. La atracción gravitacional de las bolas que estaban afuera agitaría el cascabel y torcerían el alambre del cual este pendía. El mejor valor de Cavendish para G era apenas exacto para cuatro lugares decimales al final de una larga línea de ceros. En unidades de metros cúbicos por kilogramo por segundo al cuadrado, el valor era 0.00000000006754.

Diseñar el aparato no fue fácil. La gravedad es una fuerza tan débil que prácticamente cualquier cosa, inclusive las corrientes de aire dentro de un estuche de laboratorio, puede cubrir la presencia de la gravedad en el experimento. A finales del siglo XIX, el físico húngaro Loránd Eötvös, mediante un nuevo aparato, similar al de Cavendish, afinó ligeramente la medición de G . Este experimento es todavía tan difícil que G ha adquirido tan solo unos pocos espacios decimales. Los experimentos más recientes llevados a cabo por Jens H. Gundlach y Stephen M. Merkowitz de la Universidad de Washington en Seattle, quienes rediseñaron el experimento, derivan

el valor de 0.000000000066742. Es muy débil: como señalaron Gundlach y Merkowitz, la fuerza gravitacional que midieron equivale al peso de una bacteria.

Una vez que se conoce G , pueden derivarse toda clase de cosas, tales como la masa de la Tierra, que era la meta final de Cavendish. El mejor valor de Gundlach y Merkowitz fue de aproximadamente 5.9722×10^{24} kilogramos, muy cerca del valor moderno.

* * * *

MUCHAS DE LAS CONSTANTES FÍSICAS descubiertas en el pasado se vinculan con fuerzas que influyen a partículas subatómicas, un reino gobernado más por la probabilidad que por la precisión. La constante más importante fue anunciada en 1900 por el físico alemán Max Planck. La Constante de Planck, representada por la letra h , fue el descubrimiento fundador de la mecánica cuántica, pero Planck la descubrió al investigar lo que suena tedioso: la relación entre la temperatura de un objeto y el espectro de energía que emite.

La temperatura de un objeto mide directamente la energía cinética promedio de sus hiperactivos átomos o moléculas. Desde luego, dentro de este rango algunas partículas se mueven muy rápido mientras que otras lo hacen más lentamente. Toda esta actividad emite un mar de luz que se extiende sobre el espectro de energías, justo como las partículas que las emiten. Cuando una temperatura se eleva lo suficiente, el objeto empieza a resplandecer. En tiempos de Planck, uno de los retos en la física era explicar el espectro entero de esta luz, en particular las bandas de mayor energía.

La deducción de Planck fue que se podía dar cuenta de la totalidad del espectro en una sola ecuación solamente si se asumía que la energía misma se volvía cuántica o se dividía en minúsculas unidades que no podían subdividirse: los cuanta.

Apenas Planck introdujo h a su ecuación para estimar el espectro de energía, su constante comenzó a aparecer por doquier. Un buen lugar para encontrarse con h es en la descripción y comprensión cuántica de la luz. A mayor frecuencia de la luz mayor la energía; los rayos gama, la banda con mayores frecuencias, son sumamente hostiles a la vida, mientras que las ondas de radio, la de menor frecuencia, atraviesa los cuerpos sin dañarlos. La radiación de alta frecuencia puede dañar a una persona por cuanto lleva más energía. ¿Cuánta? En proporción directa a la frecuencia. ¿Qué revela la proporcionalidad? La Constante de Planck, h . si se piensa que G es una constante minúscula de la proporcionalidad, véase el mejor valor actual de h (en kilogramos al cuadrado por segundo): 0.000000000000000000000000000000000066260693.

Una de las formas más provocadoras y asombrosas en que h aparece en la naturaleza surge del llamado *principio de incertidumbre*, elaborado por primera vez en 1927 por el físico alemán Werner Heisenberg. Este principio plantea los términos de un intercambio cósmico inexorable: para diversas pares de atributos físicos, variables y fundamentales, como ubicación y velocidad, energía y tiempo, es imposible medir exactamente dichas cantidades. En otras palabras, si se reduce la indeterminación de un miembro del par (ubicación, por ejemplo), habrá que aceptar una

aproximación más flexible de su compañero (velocidad). Y es h la que limita la precisión que se puede lograr. El intercambio no es muy práctico si se miden cosas de la vida cotidiana, pero cuando se trata de dimensiones atómicas, h asoma su cabecita por doquier.

* * * *

PUEDE PARECER MUY CONTRADICTORIO, o aun perverso, pero en décadas recientes los científicos han buscado evidencias de que las constantes no son eternas. En 1938 el físico inglés Paul A. M. Dirac propuso que el valor de nada menos que la constante G de Newton pudiera reducirse en proporción a la edad del universo. En la actualidad se ha desarrollado una industria de físicos que desesperadamente buscan constantes variables. Algunos buscan un cambio en el tiempo; otros los efectos del cambio en la ubicación; otros más exploran cómo las ecuaciones operan en espacios antes desconocidos. Tarde o temprano, darán con resultados. Así que hay que estar atentos: las noticias sobre la inconstancia pertenecen al futuro.

12. Límites de velocidad

Aparte del transbordador espacial y de Superman, pocas cosas viajan más rápido que una bala. Pero nada se mueve más rápido que la luz en un vacío. Nada. Sin embargo, por más rápido que la luz se mueva, su velocidad no es infinita. Ya que la luz tiene una velocidad, los astrofísicos saben que mirar al espacio es lo mismo que mirar hacia atrás en el tiempo, y haciendo un buen cálculo de

la velocidad de la luz, podemos hacer un estimado razonable de la edad del universo.

Estos conceptos no son exclusivamente cósmicos. Ciertamente que cuando se enciende un foco no hay que esperar mucho a que la luz llegue al piso. En alguna mañana, mientras se toma el desayuno y se desea pensar en algo, quizá pudiera ponderarse que uno ve a los niños al otro lado de la mesa no como son, sino como fueron hace apenas tres nanosegundos. No parece mucho, pero si envía a los niños a la cercana galaxia de Andrómeda, para el momento en que los vea revolviendo su cereal, habrán envejecido unos dos millones de años.

Restándole sus lugares decimales, la velocidad de la luz a través del vacío del espacio es de 299 792 km por segundo, una cantidad que tomó siglos de trabajo duro para medir con tal exactitud. Mucho antes de que los métodos e instrumentos de la ciencia madurasen, empero, los filósofos habían reflexionado acerca de la naturaleza de la luz: ¿es la luz una propiedad del ojo que la percibe o una emanación de un objeto? ¿Es un cúmulo de partículas o una onda? ¿Viaja o simplemente aparece? Si viaja, ¿cuán rápido y cuán lejos?

* * * *

A MEDIADOS DEL SIGLO V a. C. el filósofo, poeta y científico vanguardista Empédocles de Acragas se preguntó si la luz viajaba a una velocidad mensurable. Pero el mundo tuvo que esperar a que Galileo, campeón de la obtención empírica del conocimiento, iluminara esta duda mediante un experimento.

Describió los pasos en su libro *Diálogos sobre dos nuevas ciencias*, publicado en 1638. En la penumbra, dos personas, cada una sosteniendo una linterna cuya luz pueda ser cubierta y descubierta, se paran, lejos, una frente a la otra. La primera persona proyecta un haz de luz con su linterna. Apenas la otra persona ve la luz, proyecta su propia linterna. Como llevó a cabo el experimento solo una vez, a una distancia menor a 1.6 km, Galileo escribió:

No he podido asegurar si la aparición de la luz opuesta fue instantánea o no; pero si no es instantánea, lo es extraordinariamente rápido, diría que fue repentina (p. 43).

En efecto, el razonamiento de Galileo era válido, pero estaba demasiado cerca de su asistente como para tomarle el tiempo del rayo de luz, en particular con los inexactos relojes de entonces.

Pocas décadas más tarde, el astrónomo danés Ole Rømer redujo la especulación al observar la órbita de Ío, la luna más cercana a Júpiter. Desde enero de 1610, cuando Galileo y su telescopio novedoso vieron por primera vez los cuatro satélites más brillantes de ese planeta gigante, los astrónomos han estado siguiéndolas a medida que lo rodeaban. Años de observación habían mostrado que, en cuanto a Ío, la duración promedio de una órbita —un intervalo fácil de cronometrar desde que la luna desaparece detrás de Júpiter hasta que re emerge— era de tan solo 42.5 horas. Lo que Rømer descubrió fue que cuando la Tierra estaba más cerca de Júpiter, Ío desaparecía unos 11 minutos antes de lo esperado, y cuando la

Tierra estaba más lejos de Júpiter, Ío se eclipsaba unos 11 minutos más tarde.

Rømer razonó que el comportamiento orbital de Ío no era influido por la posición de la Tierra respecto de Júpiter, sino que estas variaciones inesperadas se debían a la velocidad de la luz. El rango de 22 minutos debía corresponder al tiempo que le tomaba a la luz viajar a través del diámetro de la órbita terrestre. Por dicha asunción, Rømer derivó una velocidad de la luz de aproximadamente 210 000 km por segundo, lo cual representaba un acercamiento de 30% a la respuesta correcta, nada malo para un primer estimado, y mucho más exacto que la expresión «si no repentino...» de Galileo.

James Bradley, tercer astrónomo real de Gran Bretaña, resolvió las demás dudas respecto a la finitud de la velocidad de la luz. En 1725 observó sistemáticamente la estrella Gamma Draconis y se percató de que su posición en el firmamento cambiaba estacionalmente. Le tomó tres años de estudio, pero finalmente atribuyó el cambio a la combinación de movimiento orbital continuo de la Tierra y la velocidad finita de la luz. Así, Bradley descubrió lo que actualmente se conoce como la *aberración de la luz estelar*.

Imagínese esta analogía: es un día lluvioso y usted se encuentra en un automóvil en una avenida donde el tránsito va a vuelta de rueda. Como está aburrido, abre la ventanilla para recolectar gotas de lluvia con un tubo de ensayo. Si no sopla el viento, las gotas caen verticalmente; para recolectar mucha agua deberá sostener el tubo

en posición vertical; así las gotas entran al tubo por la apertura y caen directamente al fondo.

Finalmente, el tránsito se despeja y usted ya puede acelerar de nuevo. Con base en su experiencia usted sabe que las gotas dejarán un trazo diagonal en las ventanillas de su coche. Así, para capturar las gotas de lluvia eficientemente, debe inclinar el tubo de ensayo en un ángulo que coincida con la trayectoria de las gotas de lluvia en la ventanilla. A mayor velocidad del auto mayor el ángulo.

En esta analogía, la Tierra es el auto en movimiento, el telescopio es el tubo de ensayo y la luz estelar —porque no se mueve instantáneamente— puede asimilarse a la lluvia. Para atrapar la luz de un astro, hay que ajustar el ángulo del telescopio, apuntarlo a un punto levemente distinto a la posición precisa de la estrella en el firmamento. La observación de Bradley pudiera ser un poco esotérica, pero fue el primero en confirmar, mediante una medición directa en lugar de una inferencia, dos importantes ideas astronómicas: la luz tiene una velocidad finita y la Tierra orbita alrededor del Sol. Mejoró, asimismo, la precisión del cálculo de la velocidad de la luz: 300.947 km por segundo.

* * * *

A FINALES DEL SIGLO XIX, los físicos sabían que la luz, como el sonido, se propaga en ondas y pensaban que si las ondas de sonido necesitaban un medio (como el aire) para vibrar, las ondas de luz también. ¿Cómo se podría desplazar una onda por el vacío del espacio? Este medio mítico se denominó *éter luminífero*, y el físico

Albert A. Michelson junto con el químico Edward W. Morley se dieron a la tarea de detectarlo.

Michelson había inventado un aparato llamado interferómetro, la primera de cuyas versiones divide el rayo de luz enviando ambas partes en ángulos rectos; cada una se refleja en un espejo regresando al divisor de haz, el cual los recombina a fin de analizarlos. La exactitud del interferómetro le permite al experimentador llevar a cabo mediciones muy precisas de cualquier diferencia en las velocidades de dos haces de luz: el aparato perfeccionado para detectar el éter. Michelson y Morley pensaban que si alineaban un rayo en la dirección del movimiento de la Tierra y el otro en dirección transversa, la velocidad del primero se combinaría con el movimiento terrestre mediante el éter en tanto que el segundo se mantendría intacto.

Y... M&M dieron con un resultado nulo. Avanzar en direcciones distintas no afectaba la velocidad de la luz; los rayos retornaron al divisor de haz en exactamente el mismo tiempo. El movimiento de la Tierra a través del éter simplemente no incidía en la velocidad mensurable de la luz. Un resultado penoso. Si el éter debía permitir la transmisión de la luz y no podía ser detectado, ello acaso se debía a que no existe. La luz se propaga a sí misma: no se precisaba de medio ni magia para mover un rayo de luz en el vacío. Así pues, con una presteza igual a la velocidad de la luz, el éter luminífero fue al cementerio de las ideas científicas desacreditadas.

Y gracias a este ingenio, Michelson refinó aún más el valor de la velocidad de la luz: 299 982 km por segundo.

* * * *

A INICIOS DE 1905, las investigaciones en torno al comportamiento de la luz se volvieron tenebrosas. En ese año Einstein publicó la teoría de la relatividad especial, en la cual llevó el resultado nulo de M&M a un nivel audaz. Declaró que la velocidad de la luz en el espacio vacío es una constante universal, independiente de la velocidad de la fuente de luz o de la persona que lleva a cabo la medición. ¿Y si Einstein tenía la razón? En efecto, si uno viaja en una nave espacial a la mitad de la velocidad de la luz y proyecta un rayo hacia delante de la nave, cualquiera tendrá el resultado de 299 792 km por segundo; no solo eso, incluso si se proyecta el rayo hacia atrás, arriba o a los lados de la nave, la medición sería la misma.

Extraño.

Según el sentido común, si se dispara una bala desde la parte delantera de un tren en movimiento, la velocidad inicial de la bala sería su velocidad *más* la del tren. Y si se dispara la bala hacia detrás del tren sería su velocidad *menos* la del tren. Y ello es cierto para todas las balas, pero —de acuerdo con Einstein— ello no se aplica a la luz.

Desde luego que Einstein tuvo la razón y las implicaciones son tremendas. Si todo el mundo, dondequiera y cuandoquiera, puede calcular la misma velocidad para un haz de luz desde una nave espacial imaginaria, muchas cosas deben suceder. Primero, como la velocidad de la nave aumenta, la longitud de todo —usted, sus instrumentos de medición, su nave— se acorta en la dirección del

movimiento, como puede verse. Además, su propio tiempo se reduce lo suficiente como para que si intenta medirlo con una vara más corta, de seguro será engañado con el mismo valor constante para la velocidad de la luz. Así pues, tenemos aquí un complot cósmico de primer orden.

* * * *

LA MEJORA EN LOS MEDIOS de medición agregó lugares decimales a la velocidad de la luz. En efecto, los físicos se volvieron tan duchos en el juego que finalmente tuvieron que dejarlo. Las unidades de velocidad siempre combinan las unidades de longitud y tiempo, por ejemplo, 80 kilómetros por hora u 800 metros por segundo. Cuando Einstein empezó a trabajar en su teoría de la relatividad especial, la definición de *segundo* era perfecta, pero las definiciones de metro eran torpes. Para 1791 se definía el metro como una diez millonésima parte de la distancia del polo norte al ecuador por el meridiano que pasa en medio de París. Y al cabo de diversos esfuerzos, en 1889 se redefinió el metro como la longitud de una barra prototipo de una aleación de platino e iridio guardado en la Dirección Internacional de Pesos y Medidas en Sèvres, Francia, y medida a una temperatura a la cual se derrite el hielo. En 1960 volvió a cambiar la base para definir el metro y la exactitud amentó aún más: 1.650 763.73 longitudes de onda en un vacío de luz emitidas por el isotopo de kriptón-86 en una transición ininterrumpida de energía atómica de $2p_{10}$ a $5d_5$. Es obvio, si se examina bien. Finalmente, se volvió claro que la velocidad de la luz podía medirse con mayor exactitud que la longitud del metro. Así

que en 1983 la Conferencia General de Pesas y Medidas decidió medir, y no definir, la velocidad de la luz en su valor más reciente: 299 792 458 metros por segundo; en otras palabras, la definición del metro se introducía en unidades de la velocidad de la luz, lo cual convertía al metro en exactamente $1/299\,792\,458$ de la distancia que la luz viaja por el vacío en un segundo. Así pues, mañana quienquiera que mida la velocidad de la luz, incluso con mayor precisión que usando el valor de 1983, estará ajustando la longitud del metro y no la velocidad de la luz misma.

No hay que preocuparse. Cualquier ajuste a la velocidad de la luz será tan pequeño que no se observará en una regla escolar. Si usted es un europeo promedio, sigue midiendo un poco menos de 1.80 m, y si es un estadounidense, su camioneta seguirá gastando el mismo combustible por kilómetro.

* * * *

LA VELOCIDAD DE LA LUZ pudiera ser astrofísicamente sagrada, pero no es inmutable. En todas las sustancias transparentes (agua, aire, vidrio y especialmente diamantes), la luz viaja más lentamente que en un vacío.

Pero la velocidad de la luz en un vacío es una constante, y para que una cantidad lo sea realmente debe mantenerse inmutable, no importa cómo, cuándo ni por qué se mide. La policía de vialidad lumínica no se toma nada por sentado, empero, y en los últimos lustros han buscado evidencias de cambio en los 13.7 mil millones de años transcurridos desde el *big bang*. En particular, han estado midiendo la constante de estructura fina, que es la combinación de

la velocidad de la luz en un vacío y diversas constantes físicas, como la de Planck, π y la carga de electrón.

Esta constante derivada es la medida de los pequeños cambios en los niveles de energía del átomo que afectan los espectros de los astros y las galaxias. En vista de que el universo es una gran máquina del tiempo, donde uno puede ver el pasado distante al observar objetos lejanos, cualquier cambio en el valor de la constante de estructura fina se revelará a la postre en las observaciones del cosmos. Por buenos motivos los físicos no esperan que varíen la constante de Planck o la carga de un electrón, y π seguramente mantendrá su valor, lo cual significa que, si ello ocurre, la culpa será de la velocidad de la luz.

Una de las maneras mediante las cuales los astrofísicos calculan la edad del universo supone que la velocidad de la luz siempre ha sido la misma, por lo cual una variación en ella en el universo no es algo insignificante. Pero para enero de 2006 los parámetros de la constante de estructura fina en tiempo y espacio aún no habían cambiado.

13. Intensidad balística

En casi todos los deportes que implican pelotas, estas actúan con intensidad balística. Ya sea que se juegue beisbol, cricket, futbol, golf, *lacrosse*, futbol americano, tenis o el polo acuático, la pelota es lanzada, golpeada o pateada, y por un breve tiempo vuela por el aire antes de regresar a la Tierra.

La resistencia del aire afecta la trayectoria de estas pelotas, pero independientemente de lo que las ponga en movimiento o de dónde caigan, esta es descrita en una sencilla ecuación que se halla en los *Principia* de Newton. Muchos años después de su publicación, Newton interpretó sus descubrimientos para los lectores conocedores del latín en *El sistema del mundo*, que incluía una descripción de lo que ocurriría si se arrojaban piedras horizontalmente a velocidades cada vez mayores. Newton primero señala lo obvio: las piedras caerían a Tierra más lejos del punto de lanzamiento, y finalmente pasarían el horizonte. Luego razona que si la velocidad fuera lo suficientemente grande, la piedra recorrería la circunferencia de la Tierra, sin jamás caer, regresando, en cambio, a quien la arrojó. Si uno se agachara, el objeto seguiría su trayectoria por siempre en lo que comúnmente se llama una órbita. Nada puede ser más balístico que eso.

La velocidad necesaria para obtener una baja órbita terrestre (conocida afectuosamente por sus siglas en inglés LEO, por *Low Earth Orbit*) es de poco menos de 29.000 km por hora de lado, lo cual implica un viaje de hora y media de duración. Si el Sputnik 1, el primer satélite artificial o Yuri Gagarin, el primer humano en sobrevolar la atmósfera, no hubieran alcanzado esa velocidad tras ser lanzados al espacio, habría regresado a la superficie terrestre antes de haber terminado una sola vuelta.

Asimismo, Newton mostró que la gravedad que ejerce cualquier objeto esférico actúa como si toda su masa se concentrara en su centro. De hecho, cualquier cosa que dos personas se lancen entre

sí en la superficie de la Tierra se halla a su vez en órbita, salvo si la trayectoria intersecara el suelo. Lo mismo vale para la travesía orbital de 15 minutos de Alan B. Shepard en la nave Freedom 7 en 1961, que para un tiro de golf de Tiger Woods, un *home run* de Alex Rodríguez o una pelota lanzada por un niño: todos han ejecutado lo que sensatamente puede llamarse una trayectoria suborbital. De no estar la superficie terrestre en medio, estos objetos trazarían órbitas perfectas, aunque alargadas, alrededor del centro de la Tierra. Y aun cuando la ley de la gravedad no distingue entre tales trayectorias, la NASA las tiene bien tipificadas. El viaje de Shepard estuvo mayormente libre de resistencia del aire, porque alcanzó una altitud donde apenas hay una atmósfera. Por ello solamente, los medios de comunicación estadounidenses se refirieron a él como el primer viajero espacial estadounidense.

* * * *

LAS TRAYECTORIAS SUBORBITALES son las preferidas para los misiles balísticos. Como una granada de mano que traza un arco hacia su blanco tras ser arrojada, un misil «vuela» solamente bajo los efectos de la gravedad después de ser puesto en marcha. Estas armas de destrucción masiva viajan hipersónicamente, lo bastante rápido como para recorrer la circunferencia de la Tierra en 45 minutos antes de caer a la superficie a miles de kilómetros por hora. Si un misil es lo suficientemente pesado, puede ser más dañino por solo caer del cielo que por la explosión de la ojiva convencional que porta en su punta.

El primer misil fue el cohete V-2, diseñado por un equipo de científicos alemanes liderados por Wernher von Braun, y empleado por los nazis durante la Segunda Guerra Mundial, principalmente contra Inglaterra. En virtud de haber sido el primer objeto en ser lanzado a la atmósfera terrestre, la V-2 —con forma puntiaguda y sus aletas (la *V* significa *Vergeltungswaffen* o arma de venganza)— inspiró a una generación entera de ilustraciones de naves espaciales. Tras rendirse a las fuerzas aliadas, Von Braun fue llevado a Estados Unidos, donde en 1958 dirigió el lanzamiento del Explorer 1, el primer satélite estadounidense. Poco después, fue transferido a la recién fundada Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (*National Aeronautics and Space Administration*, o NASA), donde desarrolló el cohete Saturno V, el más poderoso jamás creado, que hizo posible cumplir el sueño americano de explorar la Luna.

Al igual que los centenares de satélites que la orbitan, la Tierra gira en torno al Sol. En su obra maestra *De Revolutionibus*, Nicolás Copérnico colocó al Sol en el centro del universo y aseguró que la Tierra y los cinco planetas conocidos (Mercurio Venus, Marte, Júpiter y Saturno) ejecutaban giros circulares perfectos a su alrededor. Copérnico ignoraba que un círculo es una forma muy extraña para una órbita y no describe el paso de ningún planeta en nuestro sistema solar. La forma real fue deducida por el matemático y astrónomo alemán Johannes Kepler, quien publicó sus cálculos en 1609. La primera de sus leyes del movimiento planetario establece que los planetas giran alrededor del Sol en elipses, que no

es sino un círculo aplanado, y el grado de achatamiento es indicado por una cantidad numérica llamada excentricidad, que se abrevia e . Si e es igual a 0, se tiene un círculo perfecto. A medida que e aumenta de 0 a 1, la elipse se vuelve más y más alargada.

Desde luego, a mayor excentricidad mayor la posibilidad de cruzarse en la órbita de otro. Los cometas que provienen de otros sistemas solares trazan órbitas sumamente excéntricas, mientras que las de la Tierra y Venus son casi circulares, con muy poca excentricidad. El «planeta» más excéntrico es Plutón, y claramente cada vez que revuelve alrededor del Sol, se atraviesa en la órbita de Neptuno actuando sospechosamente como un cometa.

* * * *

EL EJEMPLO MÁS EXTREMO de una órbita alargada es el famoso caso del agujero por el que se llega a China. Al contrario de lo esperado, China no se encuentra en el lado opuesto de Estados Unidos. Un camino recto que conecte los dos puntos opuestos del planeta debe pasar por el centro de la Tierra. ¿Qué se halla al otro lado de Estados Unidos? El océano Índico. Para evitar emerger bajo tres kilómetros de agua, debemos aprender un poco de geografía y excavar desde Shelby, Montana, a través del centro de la Tierra, hasta las aisladas islas Kerguelen. Ahora viene la parte divertida. ¡Vamos! Ahora aceleramos de manera continua en una caída libre hasta alcanzar el centro de la Tierra —donde uno se vaporiza en el feroz calor del núcleo de hierro. Pero ignoremos esta complicación. Se pasa del centro, donde la fuerza de gravedad es cero, y se desacelera constantemente hasta alcanzar el otro lado, para cuando

la velocidad será de cero. Pero si no lo detiene un kergueliano, volverá a caer al agujero y repetirá el viaje interminablemente. Además de que esto puede volver celoso a un saltarín de *bungee*, se habrá llevado a cabo una verdadera órbita que habrá tomado como una hora y media, como la del transbordador espacial.

Algunas órbitas son tan excéntricas que jamás se dan la vuelta. A una excentricidad de exactamente 1, se obtiene una parábola, y para aquellas mayores de 1, la órbita traza una hipérbola. Para imaginar tales formas, apunte una linterna a una pared cercana. El cono de luz dibujará un círculo de luz. Ahora, hay que dirigir gradualmente el haz de luz hacia arriba y el círculo se distorsiona para formar elipses cada vez más excéntricas. Cuando el cono se apunta hacia arriba, la luz en la pared asume la forma exacta de una parábola. Si se inclina el haz un poco más, se forma una hipérbola. (Ahora habrá algo distinto que hacer cuando se vaya de campamento). Cualquier objeto con una trayectoria parabólica o hiperbólica se mueve tan rápidamente que jamás retornará. Si los astrofísicos descubrieran un cometa con semejante órbita, sabremos que emergió de las profundidades del espacio interestelar y se halla en un viaje único a través del sistema solar interior.

* * * *

LA GRAVEDAD NEWTONIANA DESCRIBE la fuerza de atracción entre cualesquiera dos objetos en el universo, independientemente de dónde se encuentren, de qué estén hechos o cuán grandes o pequeños pudieran ser. Por ejemplo, puede utilizarse la ley de Newton para estimar el comportamiento pasado y futuro del sistema

Tierra-Luna. Pero si se añade un tercer objeto, una tercera fuente de gravedad, los movimientos del sistema se complican severamente. Más conocido generalmente como el *problema de los tres cuerpos*, este *ménage à trois* arroja diversas trayectorias y, para rastrearlas, se necesita forzosamente una computadora.

Algunas soluciones astutas a este problema merecen ser tomadas en consideración. En un caso, llamado el *problema de tres cuerpos restringido*, se simplifican las cosas al asumir que el tercer cuerpo tiene tan poca masa en comparación con la de los otros dos que su presencia puede ignorarse en las ecuaciones. De tal modo, se pueden seguir los movimientos de los tres objetos del sistema. Y no es engaño. Se observan muchos casos como este en el universo. Tomemos por ejemplo al Sol, Júpiter y una de sus pequeñas lunas. Asimismo, toda una familia de rocas se desplaza en órbitas estables alrededor del Sol, a 800 millones de kilómetros, adelante y detrás de Júpiter; estos son los asteroides troyanos, de los cuales hablamos en la parte 2, cada uno de los cuales se hallan fijados (como bajo el poder de un rayo de atracción de ciencia ficción) a la gravedad de Júpiter y el Sol.

Recientemente se descubrió otro caso especial de un sistema de tres cuerpos. Imagínese a tres cuerpos de masa idéntica y que se persiguen en tándem trazando una figura de 8 en el espacio. A diferencia de las pistas de automóviles de carrera donde el público ve cómo los coches se estrellan entre sí en los cruces entre los dos óvalos, esta configuración protege mejor a sus participantes. Las fuerzas de gravedad exigen que el sistema siempre equilibre los

puntos de intersección y, al contrario del complicado problema de los tres cuerpos, todos los movimientos ocurren en un mismo plano. Ahora bien, este caso especial es tan extraño e infrecuente que posiblemente no se observe en los cien mil millones de estrellas de nuestra galaxia, y en el universo tal vez se observen solo algunos ejemplos, lo cual significa que la órbita en figura de ocho es astrofísicamente una irrelevante curiosidad matemática.

Aparte de uno o dos casos bien portados, la interacción gravitacional entre tres o más objetos finalmente descarrila sus trayectorias. Para ver cómo sucede esto se puede simular en una computadora las leyes del movimiento y de la gravedad de Newton introduciendo en el cálculo diversos objetos conforme a la fuerza de atracción entre ellos. Hay que recalcular repetidamente todas las fuerzas. Este ejercicio no es tan solo académico. Todo el sistema solar representa un enorme problema multicorporal, con sus asteroides, lunas, planetas y el Sol en un estado de perenne y mutua atracción. A Newton le preocupaba mucho este problema, el cual no podía resolver con pluma y papel. Como temía que todo el sistema solar fuera inestable y que finalmente colapsara con los planetas estrellándose contra el Sol y siendo lanzados hacia el espacio interestelar, postuló —como veremos en la última parte— que Dios podría intervenir de vez en cuando para corregir las cosas. Más de un siglo después, Pierre-Simon Laplace presentó una solución al problema multicorporal del sistema solar en su obra *Tratado de la mecánica celeste*, para lo cual desarrolló una nueva forma de matemáticas que llamó la *teoría de la perturbación*. El

análisis comienza asumiendo que hay una sola fuente mayor de gravedad y las demás fuerzas son, en cambio, menores, aunque persistentes; exactamente la misma situación en nuestro sistema solar. Laplace luego demostró analíticamente que el sistema solar era estable y que no se necesitaba formular nuevas leyes de la física.

¿O sí? Como veremos en la parte 6, el análisis moderno muestra que, en escalas temporales de centenas de millones de años, periodos más largos que los considerados por Laplace, las órbitas planetarias son caóticas. Situación que deja a Mercurio en peligro de caer hacia el Sol y a Plutón de ser lanzado fuera del sistema solar. Peor aún, el sistema solar podría haber nacido con decenas de planetas, la mayoría de los cuales se perdieron en el espacio interestelar. Y todo comenzó con los simples círculos de Copérnico.

* * * *

CADA VEZ QUE SE APLICA la balística, se está en caída libre. Todas las piedras de Newton caen hacia la Tierra, como la que logró ponerse en órbita, pero la superficie de nuestro planeta se curvó al mismo ritmo en que caía a consecuencia del extraordinario movimiento lateral de la piedra. La Estación Espacial Internacional también está cayendo hacia la Tierra, lo mismo la Luna. Y, como las piedras de Newton, todas sostienen un movimiento lateral prodigioso que les impide chocar contra el suelo. Para tales objetos —lo mismo que para el transbordador espacial, los vaivenes de los astronautas que caminan por el espacio y los demás instrumentos

en órbita baja—, un viaje alrededor del mundo dura como 90 minutos.

Sin embargo, cuanto más alto se está, más larga es la órbita. Como ya se señaló, a 35.888 km de altitud, el periodo orbital es idéntico al de la rotación de la Tierra. Los satélites que se lanzan a dicha ubicación son geoestacionarios, ya que revolotean sobre un solo punto de nuestro planeta, lo cual permite una comunicación rápida y sostenida entre los continentes. A mayor altitud, a 386.242 km, se encuentra la Luna, la cual completa una órbita en 27.3 días.

Un rasgo fascinante de la caída libre es el estado persistente de ingravidez a bordo de una nave en esa trayectoria. En caída libre, usted y todo cuanto le rodea caen exactamente al mismo ritmo. Una báscula que se hallara entre sus pies y el piso también estaría en caída libre. Como nada la presiona indicará el número 0. Por ello y no por otra razón es que los astronautas no pesan en el espacio.

Pero en cuanto la nave se acelera o empieza a rotar u opone resistencia a la atmósfera terrestre, el estado de caída libre termina, y los astronautas vuelven a tener cierto peso. Cualquier aficionado a la ciencia ficción sabe que si se rota en una nave espacial a una velocidad justa o se acelera al mismo ritmo que un objeto cae a la Tierra, uno pesará lo mismo que en la báscula de su médico. Por lo que los ingenieros astronáuticos podrían diseñar una nave espacial para simular la gravedad terrestre durante esos aburridos y largos viajes espaciales.

Otra sagaz aplicación de la mecánica orbital de Newton es el efecto de resortera. A menudo las agencias espaciales lanzan sondas sin la

energía suficiente para alcanzar sus destinos planetarios. Así pues, los ingenieros orbitales las orientan a lo largo de trayectorias audaces que giran cerca de una enorme fuente móvil de gravedad, como Júpiter. Al caer hacia ese planeta en la misma dirección en que se desplaza, una sonda puede robarle un poco de energía durante el vuelo, y luego lanzarse al espacio impulsada como pelota de jai alai. Si los planetas están bien alineados, la sonda puede hacer el mismo truco cuando pase por Saturno, Urano o Neptuno, tomando energía en cada encuentro cercano. Y no son pequeños impulsos, son grandes impulsos. Un solo lanzamiento a Júpiter puede duplicar la velocidad de la sonda a lo largo del sistema solar. Las estrellas más veloces de la galaxia, las que brindan su significado coloquial a la expresión *intensidad balística* son los astros que pasan por el agujero negro supermasivo en el centro de la Vía Láctea. Un descenso a ese agujero (o a cualquier otro) puede acelerar una estrella a velocidades cercanas a las de la luz. Ningún otro objeto tiene el poder de hacer esto. Si la trayectoria de un astro oscila levemente hacia el borde del agujero, podrá evitar ser engullida, pero su velocidad se incrementará considerablemente. Imaginemos a centenas y algunos miles de estrellas enfrascadas en esta frenética actividad. Los astrofísicos consideran dicha gimnasia estelar —detectable en la mayoría de los centros galácticos— como prueba concluyente de la existencia de los agujeros negros.

El objeto visible más lejano que puede verse a simple vista es la hermosa galaxia de Andrómeda, que es la galaxia espiral más cercana a nosotros. Es una buena noticia. La mala noticia es que la

información disponible sugiere que esa galaxia está en curso de colisión con la nuestra. A medida que nos abracemos más estrechamente, nos convertiremos en una ruina de estrellas y nubes de gas. Solo habrá que esperar unos 6 o 7 mil millones de años.

En todo caso, probablemente se podrán vender lugares para presenciar el encuentro entre el agujero negro supermasivo de Andrómeda y el nuestro, cuando galaxias enteras se comporten con intensidad balística.

14. Ser denso

Cuando estudiaba el quinto año de primaria, un compañero de clases muy travieso me preguntó: « ¿qué pesa más, una tonelada de plumas o una tonelada de plomo?». Desde luego, no me tomó el pelo, pero entonces yo no comprendía cuán útil sería para mí comprender críticamente el papel que desempeña la densidad en la vida y el universo. Una forma muy común de estimar la densidad es, por supuesto, calcular el radio de la masa de un objeto en relación con su volumen. Pero existen otros tipos de densidad, tales como la resistencia del cerebro de algunos sujetos a la impartición de sentido común o al número de personas por kilómetro cuadrado que habitan una exótica isla llamada Manhattan.

En nuestro universo la gama de densidades mensurables es enormemente grande. Las mayores densidades se hallan en los púlsares, donde los neutrones están tan pegados entre sí que una pizca pudiera pesar lo que cincuenta millones de elefantes. Y cuando un conejo se desvanece en el aire en un acto de

prestidigitación, nadie puede decir que el aire contiene 10 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 (diez septillones) de átomos por metro cúbico. La mejor cámara de vacío puede comprimir esta proporción hasta 10 000 000 000 (diez mil millones) de átomos por metro cúbico. El espacio interplanetario contiene cerca de 10 000 000 (diez millones) de átomos por metro cúbico, en tanto que en el espacio interestelar esto se reduce a 500 000 átomos por metro cúbico. El premio a la nada le corresponde, empero, al espacio intergaláctico donde con dificultad pueden hallarse unos cuantos átomos por cada 10 metros cúbicos.

Así pues, la gama de densidades en el universo abarca 44 potencias de 10. Si solo se clasificaran los objetos cósmicos por densidad, los rasgos más importantes se revelarían con increíble claridad. Por ejemplo, los objetos densos y compactos —como los agujeros negros, los púlsares y las estrellas enanas blancas— contienen una gran fuerza de gravedad en sus superficies y acumulan materia en una vorágine. Otro ejemplo proviene de las propiedades del gas interestelar. Dondequiera que observemos en la Vía Láctea y en otras galaxias, las nubes de gas más densas generan astros nuevos. Nuestro conocimiento más minucioso del proceso de formación de estrellas es aún incompleto, pero comprensiblemente casi todas las teorías de la formación estelar abarcan referencias explícitas a la cambiante densidad de los gases a medida que las nubes colapsan para formar estrellas.

* * * *

A MENUDO, EN LA ASTROFÍSICA, en especial en lo relativo a las ciencias planetarias, puede inferirse la composición general de un asteroide o una luna con simplemente conocer la densidad. ¿Cómo? Muchos elementos comunes en el sistema solar tienen densidades que son distintas entre sí. Si se emplea la densidad del agua líquida como unidad de medición, el agua congelada, el amoníaco, el metano y el bióxido de carbono (ingredientes comunes a todos los cometas) tendrían una densidad de menos de 1; los materiales rocosos, comunes en los planetas interiores y los asteroides, tendrían densidades de entre 2 y 5; el hierro, el níquel y muchos otros metales comunes en los núcleos de los planetas, así como en los asteroides, tendrían densidades superiores a 8. Normalmente, se interpreta que los objetos con densidades promedio de rango intermedio contienen una mezcla de estos componentes. En la Tierra la medición es más fácil: la velocidad de las ondas sonoras que luego de un sismo atraviesan el interior del planeta desde el núcleo a la superficie permiten colegir la densidad. La mejor información sísmica arroja una densidad de aproximadamente 12, que se reduce a 3 en la corteza exterior. Al promediarse, la densidad de toda la Tierra es de aproximadamente 5.5.

Densidad, masa y volumen (tamaño) se reúnen en la ecuación de densidad, de modo que si se mide o se infiere cualquiera de dos cantidades, puede calcularse la tercera. La masa y la órbita del planeta que gira alrededor de la estrella 51 Pegaso, semejante al Sol y observable a simple vista, ha sido calculada gracias a esta

información. El subsiguiente supuesto de si el planeta es gaseoso (probablemente) o rocoso (improbable) permite estimar su tamaño. Frecuentemente, cuando se considera que una sustancia es más pesada que otra, se deja implícito que se refiere más bien a la densidad y no al peso. Por ejemplo, el enunciado, simple pero técnicamente ambiguo, de que «el plomo pesa más que las plumas» puede comprenderse fácilmente más como un tema de densidad que de peso. Pero tal comprensión implícita falla en algunos casos notables. La crema para batir es más ligera (menos densa) que la leche descremada, y todos los barcos, inclusive el Queen Mary 2 de 150 000 toneladas, son más ligeros que el agua. Si estos enunciados fuesen falsos, entonces la crema y los transatlánticos se hundirían en el líquido sobre el cual flotan.

* * * *

OTRAS MINUCIAS DE LA DENSIDAD.

Bajo el influjo de la gravedad, el aire caliente no se eleva sencillamente por estar caliente, sino porque es menos denso que el aire circundante. Se podría decir, asimismo, que el aire frío y denso se hunde, lo cual es necesario para que suceda la convección en el universo.

El agua sólida (conocida como hielo) es menos densa que el agua líquida. Si fuera al contrario, en el invierno los grandes lagos y ríos se congelarían por completo, del fondo a la superficie, lo cual mataría a todos los peces. Lo que protege a los peces es la capa flotante —menos densa— de hielo, que aísla las aguas más cálidas del frío aire invernal.

Hablando de peces muertos, cuando se hallan bocarriba en su pecera es porque, desde luego, momentáneamente son menos densos que sus coetáneos vivos.

A diferencia de los demás planetas conocidos, la densidad promedio de Saturno es menor a la del agua. En otras palabras, una cucharada de Saturno flotaría en una tina de baño. Sabiendo esto, en vez de un patito siempre he querido un Saturno de hule.

Si se alimenta un agujero negro, su *horizonte de sucesos* (ese límite después del cual es imposible que la luz se escape) crece en proporción directa a su masa, lo cual quiere decir que a medida que aumenta la masa del agujero, la densidad promedio dentro del horizonte en realidad disminuye. Entretanto, según sabemos debido a nuestras ecuaciones, el contenido de material del agujero negro se ha comprimido en un solo punto de densidad casi infinita en su centro.

Y tenemos el misterio más grande de todos: cómo una lata cerrada de refresco de dieta puede flotar en el agua mientras una regular se hunde.

* * * *

SI SE DUPLICARA EL NÚMERO de canicas en una caja, su densidad sería, desde luego, la misma por cuanto la masa y el volumen serían el doble, lo cual en conjunto no tiene un efecto neto en la densidad. Pero en el universo hay objetos cuya densidad en relación a su masa y volumen arrojan resultados inusitados. Si la caja citada tuviera un fondo suave y mullido de plumas de ganso y uno duplicara el número de plumas, entonces algunas de las

situadas en el fondo se habrán aplanado. Se habría, pues, duplicado la masa, pero no el volumen, y se tendría un aumento neto en la densidad. Todo lo que es esponjoso —o sea, que es influido por su propio peso— se comportará de este modo. Nuestra atmósfera no es la excepción: la mitad de sus moléculas se encuentran apretujadas a 5 km sobre la superficie terrestre. Para los astrofísicos, la atmósfera de la Tierra es mala influencia para la calidad de los datos, y por ello para los astrofísicos es mejor investigar en la cúspide de las montañas para dejar abajo lo más posible de la atmósfera.

La atmósfera terrestre termina donde se fusiona de manera indistinguible con el gas de muy baja densidad del espacio interplanetario. Normalmente, esta fusión se presenta a miles de kilómetros de la superficie terrestre. Tómese en consideración que el transbordador espacial, el telescopio Hubble y los satélites que orbitan a unas centenas de kilómetros de la superficie tarde o temprano caerían por el efecto de resistencia del aire remanente si no recibieran impulsos periódicos. Sin embargo, cuando se incrementa la actividad solar (cada 11 años), la atmósfera superior recibe una mayor dosis de radiación solar por lo cual se calienta y se expande. En este periodo la atmósfera puede expandirse unos 1 500 kilómetros más en el espacio, lo cual deteriora las órbitas satelitales más rápido que de costumbre.

* * * *

ANTES DE LA APARICIÓN DE LOS vacíos de laboratorio, el aire era lo más parecido a la nada que uno pudiera imaginar. Junto a la

Tierra, el fuego y el agua, el aire era uno de los cuatro elementos aristotélicos que componían el mundo conocido. En realidad, hay un quinto elemento conocido como la quintaesencia. Sobrenatural, aunque más ligero que el aire y más etéreo que el fuego, se creía que la quintaesencia enrarecida constituía el firmamento. Qué pintoresco.

No tenemos que mirar al cielo para hallar ambientes enrarecidos. Será suficiente con mirar nuestra atmósfera superior. A nivel del mar el aire pesa unos kilogramos por centímetro cuadrado. Si se cortara un trozo de atmósfera de un centímetro cuadrado de miles de kilómetros de altitud, pesaría 1 kg. En comparación, una columna de agua de 6.5 centímetros cuadrados solo debe medir 10 m para pesar 1 kg. En la cima de las montañas y en los aviones en vuelo, una columna de aire es más corta y debe pesar menos. En la cúspide del Mauna Kea, a 4 300 m de altitud, en Hawái, donde se hallan algunos de los telescopios más poderosos del mundo, la presión atmosférica disminuye a casi 0.7 kg por centímetro cuadrado. Mientras hacen sus observaciones, los astrofísicos respiran intermitentemente con tanques de oxígeno para mantener su agilidad intelectual.

Por arriba de los 160 km, donde no hay astrofísicos conocidos, el aire está tan enrarecido que las moléculas de gas se mueven durante tiempo antes de chocar entre sí. Si entre tales colisiones las moléculas fueran impactadas por una partícula, se excitarían temporalmente y emitirían un espectro muy especial de colores antes del próximo choque. Cuando estas partículas son las que

componen el viento solar, como protones y electrones, las emisiones son las cortinas de luz ondulante que se conocen como *auroras*. Cuando el espectro de luz auroral fue medido por primera vez, no podía replicarse en el laboratorio. La identidad de las refulgentes moléculas se mantuvo desconocida hasta que se aprendió que eran de nitrógeno y oxígeno, excitadas pero ordinarias. A nivel del mar, sus veloces colisiones entre sí absorben el exceso de energía mucho antes de que puedan emitir su propia luz.

La atmósfera superior de la Tierra no es la única que produce luces misteriosas. Desde hace mucho, los rasgos espectrales de la corona del Sol inquietan a los astrofísicos. Lugar extremadamente enrarecido, la corona es esa bella y feroz región del Sol que puede verse en los eclipses totales. La nueva característica le fue asignada a un elemento desconocido llamado *coronium*. Fue hasta que se aprendió que la corona solar se calienta a millones de grados cuando se comprendió que el elemento misterioso era hierro altamente ionizado, un estado antes desconocido en el cual la mayoría de los electrones externos flotan en el gas.

El término *enrarecido* se reserva normalmente a los gases, pero me tomaré la libertad de aplicarlo al afamado Cinturón de asteroides. Con base en las películas y otras descripciones, pudiera pensarse que es un lugar muy peligroso, donde se vive bajo la amenaza permanente de chocar con peñones del tamaño de casas. ¿Cuál sería la receta del Cinturón de asteroides? Tómese un 2.5% de la masa de la Luna (en sí misma 1/81 de la masa terrestre), pulverícela en miles de trozos, pero asegúrese de que tres cuartos de

su masa se hallen en solo cuatro asteroides. Entonces espárzalos en una franja de 160 millones de kilómetros de ancho que abarque una órbita de 2500 millones de kilómetros alrededor del Sol.

* * * *

TENUES Y ENRARECIDAS COMO son, las colas de los cometas representan un incremento en densidad por un factor de 1 000 respecto de las condiciones ambientales en el espacio interplanetario. Al reflejar la luz solar y reemitir energía absorbida por el Sol, la cola de un cometa posee una enorme visibilidad pese a su inexistencia. Se considera a Fred Whipple, del Centro de Astrofísica Harvard-Smithsonian, el padre de nuestra concepción actual de los cometas. A la cola del cometa él la ha descrito como lo más que jamás se haya hecho con lo menos. En efecto, si el volumen de una cola de ochenta millones de kilómetros se comprimiera a la densidad del aire ordinario, todo el gas llenaría un cubo de casi un kilómetro. Cuando el cianógeno (CN), un gas astronómicamente común, aunque mortífero, fue descubierto en los cometas, y cuando luego se anunció que la Tierra pasaría a través de la cola del cometa Halley durante su periplo de 1910 por el sistema solar interno, la gente más crédula compró píldoras anti cometa a charlatanes farmacéuticos.

El núcleo del Sol, donde se genera toda la energía termonuclear, no es un lugar para hallar material de baja densidad. Pero el núcleo comprende apenas 1% del volumen del Sol. La densidad promedio del Sol es tan solo un cuarto de la de la Tierra y apenas 40% mayor que la del agua. En otras palabras, una cucharada del Sol se

hundiría en una tina de baño, pero demoraría en hacerlo. Aun así, en cinco mil millones de años el núcleo del Sol habrá convertido casi todo su hidrógeno en helio, y en poco tiempo empezará a convertirlo en carbono. Mientras tanto, la luminosidad del Sol aumentará mil veces en tanto que su temperatura en la superficie se reducirá a la mitad de la actual. Según las leyes de la física, la única forma en la que un objeto puede incrementar su luminosidad al tiempo que se enfría es creciendo. Como veremos en la parte 5, el Sol finalmente se expandirá hasta convertirse en una bulbosa bola de gas enrarecido que abarcará la órbita terrestre, a la vez que la densidad disminuirá a menos de una diez mil millonésima de su valor actual. Desde luego, los océanos y la atmósfera de la Tierra se habrán evaporado y toda la vida aquí se habrá vaporizado, pero ello no debe ocuparnos en este momento. La atmósfera exterior del Sol, aunque enrarecida, impedirá el movimiento de la Tierra en su órbita y la obligará a hundirse en una vorágine que terminará en una muerte termonuclear.

* * * *

MÁS ALLÁ DE NUESTRO SISTEMA solar se encuentra el espacio interestelar. Los humanos han enviado cuatro naves espaciales con la velocidad suficiente para aventurarse por esos lares: las Pioneer 10 y 11, y las Voyager 1 y 2; la más veloz de ellas, la Voyager 2, llegará a la estrella más cercana al Sol en aproximadamente 25 000 años.

Sí, el espacio interestelar está vacío. Pero como la increíble visibilidad de las enrarecidas colas de los cometas en el espacio

interplanetario, las nubes de gas, son entre cien y mil veces la densidad ambiente, pueden mostrarse en presencia de astros cercanos. De nueva cuenta, cuando la luz de estas luminosas nebulosas fue analizada por vez primera, sus espectros revelaron patrones inusuales. El elemento hipotético *nebulium* fue propuesto como referencia de nuestra ignorancia. A finales del siglo XIX, en verdad que no había lugar en la tabla periódica para el *nebulium*. A medida que mejoraban las técnicas de laboratorio, y las características espectrales se identificaban ordinariamente con elementos ya conocidos, se empezó a sospechar, y luego se confirmó, que el *nebulium* no era sino oxígeno ordinario en un estado extraordinario. ¿Cuál estado? Los átomos habían perdido dos electrones y aun así vivían en el vacío casi perfecto del espacio interestelar.

Cuando se abandona la galaxia, se deja atrás casi todo el gas, el polvo, los astros, los planetas y sus desechos. Se entra a un vacío cósmico inimaginable. Así de vacío: un cubo de espacio intergaláctico, de 200.000 kilómetros en cada lado, contiene cerca del mismo número de átomos que el aire que llena el volumen de un refrigerador. Allá, el cosmos no solamente ama el vacío, está hecho de él.

Aun así, un vacío absoluto y perfecto es inalcanzable o imposible. Como hemos visto en el capítulo 2, uno de los vaticinios más extraños de la mecánica cuántica es que un vacío real en el espacio contiene un mar de partículas *virtuales* que continuamente aparecen y desaparecen junto con sus versiones de antimateria. Su

virtualidad proviene de vidas tan cortas que su existencia no puede ser medida. Conocidas más comúnmente como *energía de vacío*, pueden actuar como una presión de anti gravedad que al final llevará al universo a expandirse a velocidades exponenciales, lo cual enrarecerá el espacio intergaláctico.

¿Qué habrá más allá?

Entre quienes pensamos en metafísica, algunos concebimos la hipótesis de que fuera del universo, donde ya no hay espacio, no hay nada. Podríamos llamar a este hipotético lugar de densidad cero, la *nada-nada*, salvo que allí ciertamente encontraremos montones de conejos por rescatar.

15. Sobre el arcoíris

Cada vez que los caricaturistas retratan a los biólogos, los químicos o a los ingenieros, estos, típicamente, llevan batas blancas con plumas y lápices que se asoman de sus bolsillos. Los astrofísicos usan muchas plumas y lápices, aunque jamás usan batas a menos que construyan algo que lanzar al espacio. Nuestro principal laboratorio es el cosmos y, a menos que se tenga mala suerte y uno sea golpeado por un meteorito, no está en riesgo de que se quemé o se maltrate la ropa por los líquidos cáusticos que se derraman del cielo. Ahí yace el reto. ¿Cómo estudiar algo que no ensucia la ropa? ¿Cómo los astrofísicos conocen el universo o su contenido si todo lo que puede estudiarse se encuentra a años luz de distancia? Por fortuna, la luz que emana de una estrella revela mucho más que su posición en el cielo o cuán brillante es. Los átomos de los objetos

que brillan llevan vidas muy ajetreadas. Sus pequeños electrones absorben y emiten luz continuamente. Y si el ambiente es lo suficientemente caliente, los átomos chocarán entre sí liberando electrones y difuminando luz. En total, los átomos dejan su huella digital en la luz que se estudia, la cual de manera especial indica cuáles elementos y moléculas químicas son las responsables.

En 1666 Isaac Newton proyectó luz blanca sobre un prisma para producir el muy conocido espectro de siete colores: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, índigo y violeta, el cual él nombró personalmente. (Pueden hoy llamarse Roy G. Biv por las iniciales de los colores en inglés). Ya otros habían jugado con prismas. Sin embargo, lo que Newton hizo a continuación no tenía precedente. Pasó el espectro emergente de colores por un segundo prisma y recuperó la luz blanca, lo cual demostró la extraordinaria propiedad de la luz que no puede ser reproducida en la paleta de un pintor. Estos mismos colores, al mezclarse, producirían un color similar a una mancha de lodo. Igualmente, Newton intentó dispersar los colores mismos, pero descubrió que eran puros. Y pese a sus siete nombres, los colores espectrales cambian suavemente y de manera continua, de uno al otro. El ojo humano no puede hacer lo que los prismas, así que otra ventana al universo yacía oculta ante nosotros.

* * * *

UNA INSPECCIÓN CUIDADOSA del espectro solar, empleando técnicas de observación y aparatos de precisión óptica de los cuales Newton no disponía, revelan no solamente a Roy G. Biv, sino

también segmentos angostos dentro del espectro donde no hay colores. Estas «líneas» a través de la luz fueron descubiertas en 1802 por el químico inglés William Hyde Wollaston, quien sugirió ingenua, aunque sensatamente, que había linderos naturales entre los colores. Discusiones e interpretaciones más completas se derivaron de los esfuerzos del físico y oculista alemán Joseph von Fraunhofer (1787–1826), quien dedicó su carrera profesional al análisis cuantitativo del espectro y a la elaboración de aparatos ópticos para ello. Fraunhofer es referido a menudo como el padre de la espectroscopia moderna, pero yo diría que también es el padre de la astrofísica. Entre 1814 y 1817 filtró la luz de algunas flamas a través de un prisma y descubrió que el patrón de líneas se asemejaba al del espectro solar, el cual, a su vez, se parecía al de los espectros de diversas estrellas, incluyendo Capella, una de las más brillantes del firmamento nocturno.

Para mediados del siglo XIX, los químicos Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen (el mismo que inventó el mechero Bunsen tan presente en los laboratorios de química) se dedicaban a filtrar la luz de diversas sustancias a través de un prisma. Mapearon los patrones de los elementos conocidos y descubrieron varios nuevos, entre ellos el rubidio y el cesio. Cada uno de ellos dejaba su propio patrón de líneas, su propia marca, en el espectro estudiado. Tan fértil era esta labor que el segundo elemento más abundante del universo, el helio, fue descubierto en el espectro del Sol antes de descubrirse en la Tierra. El nombre de *elemento* carga consigo esta historia: *helios*, el Sol.

* * * *

NO HUBO UNA EXPLICACIÓN detallada y exacta de cómo los átomos y sus electrones formaban líneas espectrales sino hasta la era de la física cuántica, medio siglo después, pero el salto conceptual ya se había dado. Así como las ecuaciones gravitatorias de Newton habían vinculado el reino de la física experimental con el sistema solar, Fraunhofer ligó el reino de la química experimental con el cosmos. Todo estaba listo para identificar, por vez primera, qué elementos químicos componían el universo, y bajo qué condiciones de temperatura y presión sus patrones se presentaban al espectroscopista.

Entre las declaraciones más obtusas hechas por filósofos de sillón, tenemos esta de 1835 proveniente del *Curso de filosofía positiva* de Auguste Comte (1798–1857):

Respecto del tema de las estrellas, todas aquellas investigaciones que, en última instancia, no pueden reducirse a simples observaciones [...] son imposibles para nosotros [...] Jamás podremos estudiar la composición química [...] me parece que cualquier noción sobre la verdadera temperatura media de las estrellas nos estará siempre negada (p. 16).

Declaraciones de esta índole provocan temor de publicar cualquier cosa. Apenas siete años más tarde, en 1842 el físico austriaco Christian Doppler propuso lo que se llamó el *efecto Doppler*, que es el cambio en la frecuencia de una onda emitida por un objeto en movimiento. Se puede pensar del objeto móvil como que estira sus

ondas tras de sí (reduciendo su frecuencia), mientras comprime las que tiene delante (aumentando su frecuencia). Cuanto más rápido se mueve el objeto mayor la luz que se comprime enfrente y se extiende detrás. Esta simple relación entre la velocidad y la frecuencia tiene profundas implicaciones. Si se sabe qué frecuencia se emitió, pero se mide para obtener un valor disímil, la diferencia entre ambas indica directamente la velocidad del objeto que se aleja o se aproxima. En un texto de 1842, Doppler adivinó:

Casi puede aceptarse a ciencia cierta que esto [el efecto Doppler] en un futuro no muy distante ofrecerá a los astrónomos un medio útil para determinar los movimientos [...] de aquellas estrellas que [...] hasta este momento apenas se podía esperar que pudieran medirse (Schwippell, 1992: 46–54).

La idea es válida para las ondas sonoras, para las ondas lumínicas y, en efecto, para las ondas de cualquier origen. (Apuesto a que Doppler se hubiera sorprendido de saber que su descubrimiento se usaría en las pistolas de radar de microondas con las que hoy los policías sustraen dinero a los automovilistas sorprendidos conduciendo a exceso de velocidad). Para 1845, Doppler llevaba a cabo experimentos con músicos que interpretaban melodías en vagones de tren, mientras que personas con oídos perfectos apuntaban las notas que escuchaban a medida que el tren se aproximaba y se alejaba.

* * * *

A FINALES DEL SIGLO XIX, GRACIAS a los espectrógrafos y al nuevo medio de la fotografía, renació un nuevo campo de la astronomía con el nombre de *astrofísica*. Una de las publicaciones más importantes en mi disciplina, el *Astrophysical Journal*, fue fundado en 1895, y hasta 1962 se titulaba *An International Review of Spectroscopy and Astronomical Physics*. Incluso hoy en día casi cada artículo que reporte observaciones del universo presenta un análisis del espectro o está muy influido por datos espectroscópicos que otros han obtenido.

Generar el espectro de un objeto exige mucha más luz que la necesaria para tomar una fotografía, así que los telescopios más grandes del mundo, como el Keck de 10 metros de diámetro, en Hawái, se destinan principalmente a obtener espectros. De hecho, de no ser por nuestra capacidad de analizar espectros, casi nada se sabría acerca de lo que ocurre en el universo. Los educadores astrofísicos afrontan un reto pedagógico de primer orden. Los investigadores astrofísicos deducen casi todo el conocimiento acerca de la estructura, la formación y la evolución de las cosas del universo mediante el estudio del espectro. Pero dicho análisis dista por varios niveles de inferencia de las cosas que se estudian. Las metáforas y las analogías ayudan al vincular una idea compleja y algo abstracta con otra más sencilla y tangible. El biólogo podría describir la forma de la molécula del ADN como dos bobinas conectadas en sus dos extremos de la misma forma como se ligan los peldaños de una escalera. Puedo imaginarme dos bobinas, puedo imaginarme los peldaños de una escalera, así que puedo

imaginarme la forma de la molécula. Cada parte de la descripción se asienta sobre un nivel de inferencia distante de la molécula misma. Y se combinan muy bien para formar una imagen tangible en nuestras mentes. Sin importar cuán fácil o difícil sea el tema, se puede hablar ahora de la *ciencia de la molécula*.

Pero explicar cómo se conoce la velocidad de una estrella que se aleja demanda cinco niveles de abstracción:

- Nivel 0: Estrella.
- Nivel 1: Imagen de una estrella.
- Nivel 2: La luz de la imagen de una estrella.
- Nivel 3: Espectro de la luz de la imagen de una estrella.
- Nivel 4: Patrones de líneas que enlazan el espectro de la luz desde la imagen de una estrella.
- Nivel 5: Cambios en los patrones de líneas en el espectro desde la luz de la imagen de la estrella.

Del nivel 0 al 1 es el paso trivial que se da cada que se toma una foto con una cámara, pero para el momento en que la explicación ha llegado al nivel 5, ya el público está confundido o dormido. Es por ello que el público apenas ha escuchado acerca del papel del espectro en el descubrimiento cósmico; está demasiado lejos de los objetos mismos como para explicarse fácil o eficientemente.

Para diseñar exposiciones en los museos de historia natural, o en cualquier lugar que deba mostrar objetos reales, se suelen buscar objetos físicos, rocas, huesos, fósiles, restos y demás, para mostrarlos en vitrinas, pues son especímenes de nivel 0 que exigen

poca o ninguna inversión cognoscitiva antes de explicar qué son. Sin embargo, para una exposición de astrofísica, cualquier intento de mostrar astros o cuásares vaporizaría el museo. La mayoría de estas exposiciones se conciben, por tanto, en el nivel 1, es decir, consisten en fotografías, algunas de ellas impresionantes y hermosas. El telescopio más extraordinario de los tiempos modernos, el Hubble, es bien conocido por sus bellas imágenes de alta resolución de objetos del universo. El problema reside en que apenas se visita una de esas exposiciones uno se regodea en la belleza del universo sin captar una sola idea de cómo este funciona. Para realmente conocer al universo hay que adentrarse en los niveles 3, 4 y 5.

Si bien del Hubble se ha generado mucha buena ciencia, jamás se sabrá por los medios de comunicación que nuestro conocimiento cósmico aún emana del análisis de los espectros y no de observar imágenes bonitas. Me gustaría que la gente se impresionara, no con la exposición a los niveles 0 y 1, sino del nivel 5, el cual demanda una mayor inversión intelectual por parte del estudiante, pero asimismo (y tal vez de manera espacial) de parte del maestro.

* * * *

UNA COSA ES VER UNA IMAGEN hermosa, tomada con luz visible, de una nebulosa de nuestra Vía Láctea, y otra conocerla por medio de su espectro de ondas radiales que en sus capas de nubes alberga estrellas nuevas con masas muy altas. Esta nube de gas es una incubadora estelar que regenera la luz del universo. Una cosa es conocer de vez en cuando que las estrellas de alta masa estallan.

Las fotografías pueden mostrar esto. Pero los espectros de rayos X y de luz visible de estas estrellas moribundas revelan una serie de elementos pesados que enriquecen la galaxia y se pueden rastrear directamente a los elementos constitutivos de la vida en la Tierra. No solamente vivimos entre los astros, estos viven entre nosotros.

Una cosa es mirar un cartel de una bonita galaxia espiral, pero otra es saber por los cambios Doppler en sus rasgos espectrales que la galaxia está rotando a 200 kilómetros por segundo, de lo cual se puede inferir la existencia de cien mil millones de estrellas que aplican la ley de la gravedad newtoniana. Y, por demás, la galaxia se aleja a un décimo de la velocidad de la luz como parte de la expansión del universo.

Una cosa es mirar hacia las estrellas cercanas cuya luminosidad y temperatura se asemejan a la del Sol, pero muy otra es emplear mediciones Doppler hipersensibles de los movimientos de las estrellas a fin de inferir la presencia de planetas en órbitas alrededor de ellas. A la fecha, el catálogo crece a más de 200 planetas, aparte de los que ya se conocen en el sistema solar.

Una cosa es observar la luz de un cuásar en el confín del universo, pero otra analizar su espectro y deducir la estructura del universo invisible que yace en el paso de luz del cuásar a medida que nubes de gas y otros obstáculos absorben parte de su espectro. Por fortuna, no obstante los magneto-dinámicos que se hallan entre nosotros, la estructura atómica cambia levemente bajo la influencia de un campo magnético. Estos cambios se manifiestan en un patrón

espectral ligeramente alterado ocasionado por estos átomos magnetizados.

Armados con la versión relativista (que debemos a Einstein) de la fórmula de Doppler, se deduce el ritmo de expansión del universo entero a partir de los espectros de innumerables galaxias cercanas y distantes, y de ahí se deduce la edad y el destino del universo.

Se puede argumentar convincentemente que sabemos más del universo que lo que el biólogo marino sabe acerca del fondo del mar o el geólogo del centro de la Tierra. Muy lejos de ser meros observadores de estrellas, los modernos astrofísicos están armados hasta los dientes con los instrumentos y las técnicas de la espectrografía, lo cual permite tener los pies bien plantados en la Tierra y, al mismo tiempo, tocar las estrellas (sin quemarse los dedos) y sostener que las conocemos como nunca antes.

16. Ventanas cósmicas

Como se señaló en el capítulo 1, a menudo el ojo humano es considerado uno de los órganos más impresionantes del cuerpo. Su capacidad para enfocar, para ajustarse al nivel de la luz y para distinguir colores figuran en la lista de sus características más llamativas. Pero cuando uno se percató de las franjas de luz que son invisibles al ojo humano, entonces hay que declarar que los humanos somos prácticamente ciegos. ¿Cuán impresionante es nuestro oído? Los murciélagos vuelan en círculos en torno a nosotros con una sensibilidad al tono que se extiende por encima de la nuestra, por mucho. Y si nuestro sentido del olfato fuera tan

bueno como el de un perro, Fernando —que no Firuláis— estaría en el aeropuerto buscando bienes de contrabando.

La historia del descubrimiento humano se caracteriza por el deseo desmedido de expandir los sentidos más allá de sus límites intrínsecos, deseo que nos abre nuevas ventanas al universo. Por ejemplo, a inicios de la década de 1960, a partir de las misiones soviéticas y estadounidenses a la Luna y los planetas, las sondas robóticas han sido (y son) el principal medio de exploración espacial. Los robots espaciales presentan varias ventajas con respecto de los astronautas: lanzarlos al espacio es más barato, pues pueden ser diseñados para llevar a cabo experimentos de muy alta precisión sin la interferencia de un engorroso traje presurizado y no están vivos, en el sentido tradicional del vocablo, por lo cual no pueden morir en un accidente espacial. Pero hasta que las computadoras puedan sustituir la curiosidad y la deducción humanas, y puedan sintetizar información y reconocer un descubrimiento fortuito (y tal vez uno que no lo sea), los robots seguirán siendo instrumentos diseñados para descubrir lo que esperamos que encuentren.

Desafortunadamente, las preguntas profundas acerca de la naturaleza pueden estar al acecho entre aquellas que todavía quedan por formularse.

El mejoramiento más importante de nuestros débiles sentidos ha sido la expansión de nuestra visión hacia las franjas invisibles de lo que se conoce como el espectro electromagnético. A finales del siglo XIX, el físico alemán Heinrich Hertz llevó a cabo experimentos que ayudaron a unificar conceptualmente lo que antes se consideraba

formas de radiación sin relación entre sí. Descubrió que las ondas radiales, infrarrojas, de luz visible y ultravioleta eran primas en una familia de luz y que sencillamente se distinguían en energía. La totalidad del espectro, incluyendo las partes descubiertas a partir del trabajo de Hertz, se extiende desde lo que llamamos ondas de radio, de baja energía, hasta las microondas, rayos infrarrojos, luz visible (que consta de los siete colores del arcoíris), rayos X y rayos gamma, todas de alta energía.

Con su visión de rayos X, Superman no goza de mucha ventaja sobre los científicos de nuestros días. Sí, es más fuerte que el astrofísico promedio, pero los astrofísicos pueden «ver» cualquier parte del espectro electromagnético. De no contar con esta visión expandida, seríamos no solo ciegos sino ignorantes, pues la existencia de muchos fenómenos astrofísicos se revela a través de ciertas ventanas y no de otras.

* * * *

LO QUE SIGUE ES UN vistazo selectivo por cada ventana al universo, empezando con las ondas radiales, que requieren detectores muy distintos a los que tenemos en la retina humana.

En 1932 Karl Jansky, un empleado de los laboratorios Bell, armado con una antena de radio, «vio» por vez primera señales de radio que emanaban de algún lugar que no era la Tierra; había descubierto el centro de la Vía Láctea. Su señal de radio fue lo bastante intensa que si el ojo humano fuera sensible tan solo a las ondas radiales, el centro de la galaxia sería una de los puntos más brillantes del cielo.

Con algunos aparatos electrónicos inteligentemente diseñados, se pueden transmitir señales de radio especialmente cifradas que luego pueden transformarse en sonido. Este ingenioso aparato se conoce como radio. Así que, gracias a que se expande el sentido de la vista, se ha, en efecto, extendido el sentido del oído. Cualquier fuente de ondas sonoras, o prácticamente cualquier fuente de energía, puede ser canalizada para que vibre en el cono de una bocina, aunque muchos periodistas no comprendan este simple hecho. Por ejemplo, cuando se descubrió una transmisión de radio desde Saturno, le fue fácil a los astrónomos conectar un receptor de radio equipado con una bocina. La señal de ondas radiales luego fue convertida en ondas sonoras audibles, de modo que un periodista reportó los «sonidos» que provenían de Saturno y que la vida en ese planeta quería decirnos algo.

Con detectores de radio más elaborados y refinados que el de Karl Jansky, se explora no solamente la Vía Láctea sino todo el universo. Como testamento de nuestro sesgo de ver para creer, las primeras detecciones de señales de radio se consideraban poco confiables hasta ser verificadas mediante observaciones con un telescopio convencional. Por fortuna, la mayoría de los tipos de objetos que emiten señales de radio transmiten, asimismo, algo de luz visible, por lo cual no siempre era necesaria la fe ciega. Con el paso del tiempo, los radiotelescopios produjeron muchos descubrimientos, como los misteriosos cuásares (vocablo que significa «emisor de radio cuasi estelar»), uno de los objetos más lejanos del universo conocido.

Las galaxias ricas en gas emiten ondas de radio gracias a que contienen una abundancia de átomos de hidrógeno (casi 90% de los átomos en el universo es hidrógeno). Gracias al despliegue de radiotelescopios electrónicamente conectados se puede generar imágenes de gran resolución del contenido gasífero de una galaxia que revelan los complejos rasgos del hidrógeno, como manchas, agujeros, molinetes y filamentos. De muchas formas, la tarea de mapear galaxias no se distingue de la que desempeñaron los cartógrafos de los siglos XV y XVI, cuyos dibujos de los continentes, aunque distorsionados, representaban un noble esfuerzo humano para describir mundos fuera de su alcance físico.

* * * *

SI EL OJO HUMANO FUERA sensible a las microondas, entonces esta ventana del espectro permitiría ver la señal emitida por la pistola de radar del policía de caminos oculto en los arbustos. Y las estaciones repetidoras de microondas refulgirían de luz. Sin embargo, hay que destacar que el interior de un horno de microondas no se vería distinto porque la red engastada en la portezuela del horno refleja las microondas de vuelta a la cavidad a fin de impedir que estas escapen. De lo contrario, el cuerpo vítreo de sus ojos se cocería junto con su comida.

Fue hasta finales de los años sesenta que los telescopios de microondas se usaron para estudiar el universo. Permiten escudriñar las frías y densas nubes de gas interestelar que colapsan para formar estrellas y planetas. En estas nubes los elementos pesados se reúnen para formar moléculas complejas cuya firma en

la parte del microondas del espectro es inconfundible, por cuanto se juntan con moléculas idénticas a las que existen en la Tierra.

Algunas moléculas cósmicas se encuentran en cualquier hogar:

- NH_3 (amoníaco)
- H_2O (agua)
- Algunas son mortales:
- CO (monóxido de carbono)
- HCN (cianuro de hidrógeno)
- Algunas recuerdan a los hospitales:
- H_2CO (formaldehído)
- $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (alcohol etílico)
- Y otras recuerdan cualquier otra cosa:
- N_2H^+ (monohidruro ionizado de dinitrógeno)
- CHC_3CN (cianodiacetileno)

Se conocen casi 130 moléculas, incluyendo la *glicina*, que es un aminoácido con el cual se componen las proteínas y, por tanto, la vida como la conocemos.

Sin duda, el descubrimiento astrofísico más grande fue posible gracias a un telescopio de microondas. El calor remanente del *big bang* se ha enfriado hasta una temperatura de aproximadamente 3 grados en la escala de temperatura absoluta. (Como se explicará luego en este capítulo, la escala de temperatura absoluta establece razonablemente la temperatura más fría posible en 0 grados, de modo que no hay temperaturas negativas. El cero absoluto corresponde a -273 grados Celsius en tanto que 310 grados absolutos corresponde a la temperatura ambiente en la Tierra.) En

1965 este remanente del *big bang* fue medido fortuitamente en los Laboratorios Bell, lo que granjeó el Premio Nobel a los físicos Arno Penzias y Robert Wilson. Este remanente se manifestó en un océano omnipresente y omnidireccional de luz dominado por microondas. Este descubrimiento fue, tal vez, el colmo de la buena suerte. Penzias y Wilson deseaban hallar fuentes terrestres que interferían con las comunicaciones por microondas, pero lo que descubrieron fue evidencia convincente de la teoría del *big bang* del origen de universo, lo que resultó lo mismo que pescar una ballena azul cuando se buscaba un piscardito.

* * * *

SI AVANZAMOS A LO LARGO del espectro electromagnético nos toparemos con la luz infrarroja. Invisible a los humanos es, empero, familiar a los fanáticos de la comida rápida, cuyas papas a la francesa, gracias a las lámparas de luz infrarroja, se mantienen calientes durante horas. Estas lámparas, asimismo, emiten luz visible, pero su ingrediente activo son muchos fotones de luz infrarroja invisible que la comida absorbe de inmediato. Si la retina humana fuera sensible a los rayos infrarrojos, entonces en las casas sería común ver en las noches, con las luces apagadas, todos los objetos que mantuvieran una temperatura mayor que la del ambiente, como la plancha (siempre que esté encendida), el metal que rodea al piloto de la estufa de gas, las tuberías de agua caliente y la piel expuesta de cualquier ser humano que aparezca en escena. Claramente, esta imagen no es tan iluminadora como la que se vería con luz visible, pero puede imaginarse uno o dos usos creativos

para tal visión, tales como inspeccionar la casa en invierno para detectar dónde se fuga el calor por las persianas o el techo.

Cuando era niño, supe que durante la noche, con las luces apagadas, la visión infrarroja podía revelarme monstruos que se ocultaban en el armario de mi recámara solo si estos eran de sangre caliente. Todo el mundo sabe que el típico monstruo es un reptil de sangre fría. La visión infrarroja, por ello, impediría ver uno de ellos, ya que este se mezclaría con los muros y la puerta.

En el universo, la ventana infrarroja es más útil para investigar las densas nubes que contiene incubadoras estelares. Frecuentemente, los nuevos astros están cubiertos de remanentes de gas y polvo. Dichas nubes absorben la mayor parte de la luz visible de sus estrellas y las vuelven a irradiar como luz infrarroja, lo cual inhabilita nuestra ventana de luz visible. Si bien la luz visible es absorbida por las nubes de polvo interestelar, la luz infrarroja se mueve con una mínima atenuación, lo cual es muy valioso en los estudios de nuestra Vía Láctea, porque ahí el oscurecimiento de la luz visible de las estrellas de la galaxia es mayor. En cambio, las imágenes satelitales con luz infrarroja de la superficie terrestre revelan, entre otras cosas, el paso de las cálidas corrientes oceánicas, tales como las del Atlántico Norte, que se revuelve en torno a las Islas Británicas (las cuales se hallan más al norte que el estado estadounidense de Maine) e impiden que se conviertan en un centro de esquí.

La energía emitida por el Sol, cuya temperatura en la superficie es de 6 000 grados absolutos, abarca mucha luz infrarroja, pero

aumenta en la parte visible del espectro, al igual que la sensibilidad de la retina humana, la cual —por si no lo ha pensado— es la razón por la cual nuestra visión es tan útil durante el día. De lo contrario, podríamos quejarnos de que desperdiciamos parte de esa sensibilidad. Normalmente, no consideramos que la luz visible sea aguda, pero esta atraviesa limpiamente el aire y el vidrio. Sin embargo, la luz ultravioleta es absorbida por el vidrio ordinario, por lo que las ventanas de ese material nos parecerían como de ladrillo si nuestros ojos fueran sensibles solo a la luz ultravioleta.

Los astros que son unas tres o cuatro veces más calientes que el Sol son productores prodigiosos de luz ultravioleta. Afortunadamente, en la parte visible del espectro son tan brillantes que descubrirlos no ha dependido del uso de telescopios ultravioletas. La capa de ozono de nuestra atmósfera absorbe la mayor parte de los rayos ultravioletas, los rayos X y los rayos gamma que caen sobre ella, por lo que las estrellas más calientes pudieran ser analizadas detalladamente desde la órbita terrestre o más allá. Estas ventanas de alta energía en el espectro, por tanto, representan subdisciplinas relativamente jóvenes de la astrofísica.

COMO SI SE HUBIERA QUERIDO anunciar un nuevo siglo de visión ampliada, el primer Premio Nobel de Física le fue otorgado al físico alemán Wilhelm C. Röntgen en 1901 por su descubrimiento de los rayos X. Estos y los rayos ultravioletas pueden revelar la presencia de uno de los objetos más exóticos del universo: los agujeros negros, los cuales no emiten luz, pues su gravedad es tan fuerte que la luz no puede escapar, así que su existencia debe inferirse con base en

la energía que emite la materia que pudiera venir de una estrella colindante. La escena se asemeja mucho al agua que gira en un excusado. Con temperaturas que ascienden a 20 veces la de Sol, los rayos X y ultravioleta son la fuente de energía predominante que el material libera justo antes de descender hacia el agujero negro. El acto de descubrir no exige que se comprenda, de antemano o después, lo que se ha descubierto. Esto sucedió con la radiación de fondo de microondas y ahora ocurre con los brotes de rayos gamma. Como veremos en la parte 6, la ventana de rayos gamma ha revelado misteriosos brotes de estos rayos de alta energía dispersos por el cielo. Su descubrimiento fue posible gracias al uso de telescopios espaciales de rayos gamma, si bien su origen y causa aún se desconocen.

Si se expande el concepto de visión para abarcar la detección de partículas subatómicas, entonces se puede recurrir a los neutrinos. Como vimos en el capítulo 2, el evasivo neutrino es una partícula subatómica que se forma cuando un protón se transforma en un neutrón ordinario y un positrón, que es un electrón de antimateria. Tan extraño como parece, en el núcleo del Sol esto ocurre cien billones de billones de billones de veces (10^{38}) por segundo. Entonces, los neutrinos salen directamente del Sol como si jamás hubieran estado ahí. Un telescopio de neutrinos permitiría una visión directa del núcleo del Sol y su actual fusión termonuclear, que ninguna banda del espectro electromagnético puede revelar. Pero los neutrinos son extraordinariamente difíciles de capturar porque apenas interactúan con la materia. Por ello, un telescopio de

neutrinos efectivo y eficiente es un sueño, si no es que algo imposible.

La detección de las ondas gravitacionales, otra ventana imprecisa del universo, pudiera revelar catástrofes cósmicas. Pero a la fecha estas ondas, predichas por la teoría de la relatividad general de Einstein en 1916 como pequeñas ondas en la tela del espacio y el tiempo, jamás han sido detectadas en fuente alguna. Físicos del Instituto Tecnológico de California están desarrollando un detector de ondas de gravedad que se compone de un tubo de evacuación en forma de L de 4 km de largo que albergaría rayos láser. Si una onda gravitacional pasara por ahí, la longitud del trayecto de la luz de una extremidad diferiría temporalmente de la de la otra extremidad. Este experimento se llama LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*, u Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser), y será lo bastante sensible como para detectar ondas gravitacionales de astros en colisión a cien millones de años luz. Puede imaginarse un momento futuro en el cual acontecimientos gravitatorios, como colisiones, explosiones y estrellas que se colapsan, serán observados de manera rutinaria. En efecto, algún día podremos abrir esta ventana de par en par para observar más allá del muro opaco de la radiación de fondo de microondas hacia el inicio mismo del tiempo³.

17. Los colores del cosmos

³ Las ondas gravitacionales fueron detectadas poco después, a principios de 2016 [N. de E.]

En el firmamento nocturno de la Tierra, tan solo unos pocos objetos son lo bastante brillantes como para activar los conos sensibles al color de nuestros ojos. Marte, el Planeta Rojo, puede hacerlo, lo mismo la estrella supergigante azul Rigel (la rodilla derecha de Orión), así como la supergigante roja Betelgeuse (su axila izquierda). Pero aparte de estos atractivos, el menú es muy limitado. A simple vista el espacio es un lugar oscuro e incoloro.

Solo por medio de un telescopio se pueden ver los verdaderos colores del universo. Los objetos brillantes, como los astros, vienen en tres colores: rojo, blanco y azul, un hecho cósmico que habría alegrado a los padres de la patria estadounidense. Las nubes de gas interestelar asumen prácticamente todos los colores, dependiendo de los elementos químicos presentes y según cómo se las fotografía, mientras que el color de una estrella corresponde directamente a la temperatura de su superficie. Las estrellas frías son rojas; las templadas, blancas; las azules, cálidas, lo mismo que las ardientes. ¿Qué tal los lugares muy calientes, como el centro del Sol con sus quince millones de grados? Azul. Para un astrofísico, los alimentos al rojo y los amantes al rojo vivo no están tan calientes. Así de simple.

¿O sí?

Un complot de ley astrofísica y fisiología humana impiden la existencia de estrellas verdes. ¿Y qué tal estrellas amarillas? Algunos textos de astronomía, muchas historias de ciencia ficción y casi todos en la calle pertenecen al movimiento de «el Sol es amarillo». Sin embargo, los fotógrafos profesionales jurarían que el

Sol es azul; el color de la película de «luz diurna» está ajustado sobre la base de que la fuente de luz (el Sol, presuntamente) se inclina al azul. Los antiguos cubos de flash azules trataban de simular la luz azul del Sol para tomas de interior cuando se usaba película de luz diurna. Los artistas de galería discutirían, por el contrario, que el Sol es de un blanco puro, lo que les ofrece la imagen más exacta de la gama de sus pinturas.

Sin duda el Sol adquiere una pátina amarilla o anaranjada cerca del polvoriento horizonte terrestre a la alborada y el crepúsculo. Pero al mediodía, cuando la dispersión atmosférica es mínima, no aparece el color amarillo. En efecto, las fuentes de luz que son verdaderamente amarillas hacen que las cosas blancas se vean amarillas. Así que si el Sol fuera amarillo puro, entonces la nieve se vería amarilla, independientemente de que se halle o no cerca de los hidrantes⁴.

* * * *

PARA UN ASTROFÍSICO, UN objeto «frío» es el que tiene una temperatura de entre 1.000 y 4.000 grados Kelvin en la superficie, y se describen generalmente como *rojos*. Aun así, la temperatura de un filamento de un foco incandescente de alta potencia raramente sobrepasa los 3.000 grados Kelvin (el tungsteno se derrite a los 3.680 grados) y se ve muy blanco. Debajo de los 1.000 grados, los objetos se vuelven mucho menos luminosos en la parte visible del espectro. Los orbes cósmicos con estas temperaturas son estrellas

⁴ En Estados Unidos es común que los perros orinen en los hidrantes y de ahí que la nieve se vea amarilla [N. del T.]

fallidas. Los llamamos *enanas cafés* aun cuando no lo sean y apenas emitan luz.

Ya que estamos hablando de colores, los agujeros negros no son en realidad negros. Estos se evaporan muy lentamente emitiendo pequeñas cantidades de luz desde el borde de su horizonte de sucesos en un proceso descrito por primera vez por el físico Stephen Hawking. Conforme la masa del agujero negro puede emitir cualquier forma de luz; cuanto más pequeños sean más velozmente se evaporan, concluyendo sus vidas en un torrente de energía rica en rayos gamma y luz visible.

* * * *

LAS IMÁGENES CIENTÍFICAS modernas que se ven en la televisión, las revistas y los libros a menudo usan una paleta de colores falsos. Los meteorólogos de la televisión han ido más lejos, representado aguaceros con un color y lloviznas con otro. Cuando los astrofísicos crean imágenes de objetos cósmicos, por lo general asignan una secuencia de colores arbitraria al rango de brillantez. La parte más brillante sería roja, y azul la más tenue. Así, los colores que se pueden ver no guardan relación con las secuencias de colores reales del objeto. Igual que en la meteorología, algunas de estas imágenes tienen secuencias de colores que se relacionan con otros atributos, tales como la composición química o la temperatura del objeto. Y no es inusual ver una imagen de una galaxia espiral que ha sido coloreada para su rotación: las partes más cercanas al lector están en tonos de azul, mientras que las más lejanas en tonos de rojo. En

ese caso, los colores asignados evocan los cambios Doppler en rojo y azul, muy reconocibles, que revelan el movimiento de un objeto.

Para el mapa del famoso fondo de microondas cósmico, algunas áreas son más calientes que el promedio. Y, como debe ser el caso, algunas áreas son más frías que el promedio. El rango abarca una cienmilésima de un grado. ¿Cómo demostrar este hecho? Haciendo que lo caliente sea azul y lo frío rojo, o viceversa. En todo caso, en la imagen una minúscula fluctuación en la temperatura se muestra como una diferencia obvia.

A veces, el público ve una imagen a todo color de un objeto cósmico fotografiado con luz invisible, como la infrarroja u ondas de radio. En la mayoría de los casos, se asignan tres colores —usualmente rojo, verde y azul (RGB por sus siglas en inglés) — a las tres regiones en la franja. De este ejercicio, puede formarse una imagen a todo color como si naciéramos con la capacidad de ver colores hasta en las partes invisibles del espectro.

En fin, en el habla ordinaria colores comunes pueden significar cosas muy distintas para los científicos como para cualquier grupo de personas. Cuando los astrofísicos desean habar sin ambages cuentan con los métodos y los instrumentos para cuantificar el color emitido o reflejado por un objeto, haciendo caso omiso de las preferencias de los ilustradores o el difícil tema de la percepción humana del color. Pero estos métodos no son idóneos para el público, pues implican un espectro logarítmico del flujo que emite un objeto como ha sido medido por diversos filtros en un sistema bien definido y corregido por el perfil de sensibilidad del detector.

(¿Ve? Le dije que no son idóneos para el público). Cuando disminuye ese espectro, por ejemplo, el objeto se vuelve técnicamente azul, no obstante su color.

* * * *

LAS VICISITUDES DE LA PERCEPCIÓN humana del color acabaron con el rico astrónomo y fanático marciano Percival Lowell. Durante finales del siglo XIX e inicios del XX, llevó a cabo dibujos detallados de la superficie de Marte. Para ello se necesita un aire seco y constante que reduzca el emborronamiento de la luz del planeta en su camino al ojo humano. En el aire árido de Arizona, en la cumbre de Mars Hill, Lowell fundó en 1894 el laboratorio que lleva su nombre. A cualquier ampliación de imagen, la superficie oxidada de Marte, rica en hierro, se ve roja. Pero Lowell, asimismo, registró grandes manchas verdes en los cruces de lo que describió e ilustró como canales artificiales, presumiblemente construidos por marcianos urgidos de distribuir agua desde los casquetes polares a sus ciudades, aldeas y campos de cultivo.

No nos ocupemos aquí del voyerismo alienígena de Lowell. Mejor examinemos sus canales y las manchas verdes de vegetación. Inconscientemente, Percival cayó víctima de dos ilusiones ópticas bien conocidas. En primer lugar, en casi todas las circunstancias, el cerebro intenta crear un orden visual donde este no existe. Las constelaciones en el firmamento son excelentes ejemplos, el resultado de personas somnolientas e imaginativas que imponen orden a un grupo aleatorio de estrellas. Igualmente, el cerebro de

Lowell interpretó las características inconexas de la superficie y la atmósfera de Marte como patrones a gran escala.

La segunda ilusión es que el gris, cuando se observa cerca el amarillo-rojo, se aprecia como verde-azul, un efecto que fue señalado por vez primera por el químico francés M. E. Chevreul en 1839. Marte muestra una superficie rojo opaco con regiones gris-café. El color verde-azul proviene de un efecto fisiológico en el cual a simple vista un área de color neutro rodeada de amarillo-anaranjado aparece como verde-azulado. Otro efecto fisiológico peculiar, pero menos penoso, es que el cerebro tiende a equilibrar el color de la iluminación en la cual el sujeto se halla. Por ejemplo, bajo la cubierta de árboles de una jungla, donde casi toda la luz que llega al suelo se ha filtrado a través de las hojas, un trozo de papel blanco debe verse color verde. Pero no. El cerebro la vuelve color blanco, pese a las condiciones lumínicas. En un ejemplo más común, si se camina de noche por una ventana y se mira a la gente que ve la televisión, cuando el aparato proporciona la única fuente de luz se verá que las paredes adquieren un suave tono azulado. Pero los cerebros de las personas inmersas en la luz ajustan el color y no ven las paredes salvo de color blanco. Esta compensación fisiológica podría impedirles a los residentes de nuestra primera colonia en Marte advertir el color rojo que predomina en sus paisajes. En efecto, las primeras imágenes que la sonda Viking envió a la Tierra en 1976, aunque eran pálidas, fueron coloreadas de rojo intenso para cumplir las expectativas visuales de la prensa.

* * * *

A MEDIADOS DEL SIGLO XX, el cielo nocturno fue fotografiado sistemáticamente desde un lugar a las afueras de San Diego, California. Esta importante base de datos, conocida como Palomar Observatory Sky Survey (o Encuesta Celeste del Observatorio de Palomar), sirvió como base de observaciones metódicas del cosmos para toda una generación. Los investigadores cósmicos fotografiaron el cielo dos veces usando exposiciones idénticas en dos tipos de película Kodak en blanco y negro, una ultrasensible a la luz azul y la otra ultrasensible a la roja. (En efecto, la Corporación Kodak tenía una división que se dedicaba a desarrollar productos fotográficos cada vez más avanzados para los astrónomos, cuyas necesidades colectivas resultaron muy demandantes para la rama de investigación y desarrollo tecnológico de la empresa.) Si un objeto celeste le resultaba interesante, de seguro examinará las imágenes en rojo y azul pensando que indican mejor la calidad de la luz emitida. Por ejemplo, los objetos extremadamente rojos son brillantes en la imagen roja, pero apenas visibles en la azul. La información de esta índole influyó en los siguientes programas para observar el objeto en cuestión.

Aunque de tamaño más bien modesto en comparación con los telescopios terrestres más grandes, el Telescopio Espacial Hubble de 239 cm ha tomado imágenes espectaculares del cosmos, las más memorables de las cuales forman parte de la serie de Hubble Heritage y asegurarán su legado en los corazones y el pensamiento de la gente. La forma como los astrofísicos hacen las imágenes asombrará a la mayoría de las personas. En primer lugar, se usa la

misma tecnología digital CCD de las cámaras comerciales, salvo que los astrofísicos empezaron a usarla 10 años antes, y los detectores son de mucha mejor calidad. En segundo lugar, se filtra la luz de muchas formas antes de que esta se tope con el CCD. Para una foto ordinaria, se obtienen tres imágenes sucesivas del objeto, visto a través de filtros de banda ancha rojo, verde y azul. Pese a sus nombres, estos filtros juntos abarcan todo el espectro visible. Después, se combinan las tres imágenes con un programa de cómputo del mismo modo en que el cerebro humano combina en la retina las señales provenientes de los conos sensibles a los colores rojo, verde y azul. Esto genera una imagen a color que se asemeja enormemente a lo que se vería si el iris en los ojos tuviera un diámetro de 239 cm.

Supóngase, sin embargo, que un objeto estuviera emitiendo luz a una longitud de onda específica debido a las propiedades cuánticas de sus átomos y moléculas. Si supiéramos esto por adelantado, y usáramos filtros dirigidos a estas emisiones, estrecharíamos nuestra sensibilidad a tan solo estas frecuencias, en vez de los colores RVA. ¿El resultado? Las características se destacan en la imagen, revelando una estructura y una textura que de otra manera jamás se apreciarían. En nuestro patio trasero cósmico se encuentra un buen ejemplo. Confieso que jamás he visto la mancha roja de Júpiter a través de un telescopio. Si bien a veces es más pálida, la mejor forma de verla es mediante un filtro que aísla las longitudes de onda de la luz que provienen de las moléculas en las nubes de gas.

En la galaxia, el oxígeno emite un color verde puro cuando se halla cerca de regiones de formación de estrellas, en medio del gas enrarecido del medio interestelar. (Este fue el elemento misterioso *nebulium*, ya descrito). Si se ve a través de un filtro, la firma del oxígeno se presenta ante un detector que no tiene que lidiar con la luz verde que podría ocupar la escena. Los brillantes verdes que afloran en muchas imágenes del Hubble proceden directamente de las emisiones nocturnas del oxígeno. Si se filtran otras especies atómicas y moleculares, las imágenes a color se vuelven un examen químico del cosmos. El Hubble puede hacer esto tan bien que su galería de célebres imágenes se asemeja poco a las clásicas imágenes RGB de los mismos objetos tomadas por otros que han tratado de simular la respuesta del ojo humano ante el color.

El debate se ha enfrascado en torno a si estas imágenes del Hubble contienen colores «verdaderos». Algo es cierto: no tienen colores «falsos». Son los colores que emiten los objetos y fenómenos astrofísicos. Los puristas insisten que se presta un mal servicio al público al no mostrar los colores cósmicos como los percibiría el ojo humano. Yo sostengo, empero, que si su retina pudiera sintonizar la luz de banda angosta, veríamos lo mismo que ve el Hubble. Sostengo incluso que mi *si...* anterior, no es menos forzado que el *si...* de «si sus ojos tuvieran el tamaño de enormes telescopios...». La pregunta sigue siendo que si se combina la luz visible de todos los objetos luminosos del universo, ¿de qué color sería? Dicho más sencillamente: ¿de qué color es el universo? Afortunadamente, algunas personas con nada mejor que hacer han calculado la

respuesta a esta pregunta. Tras un informe erróneo de que el universo es color aguamarina y turquesa pálido, Karl Glazebrook e Ivan Baldry de la Universidad Johns Hopkins corrigieron estos estimados y determinaron que el universo es realmente de un tono de beige o tal vez *latte* cósmico. Las revelaciones cósmicas de Glazebrook y Baldry provinieron de una investigación sobre la luz visible de más de doscientas mil galaxias, que abarcaban un volumen enorme y representativo del universo.

En el siglo XIX, el astrónomo *sir* John Herschel inventó la fotografía a color. Para la frecuente confusión, pero deleite ocasional, del público, los astrofísicos han seguido modificando el proceso desde entonces, y seguirán haciéndolo.

18. Plasma cósmico

Son pocos los casos en que el vocabulario de un médico se empalma con el de un astrofísico. El cráneo humano tiene dos «órbitas» que forman las cavidades redondas donde van los ojos; su plexo «solar» se encuentra en el centro del pecho; y sus ojos, desde luego, tienen «lentes»; pero nuestro cuerpo no tiene cuásares ni galaxias. Las órbitas y los lentes en el uso médico y astrofísico se asemejan mucho. Sin embargo, el término *plasma* es común a ambas disciplinas, aunque no signifique lo mismo. Una transfusión de plasma sanguíneo puede salvar una vida, pero un encuentro breve con una refulgente masa de plasma astrofísica de un millón de grados de temperatura le dejaría convertido en humo.

El plasma astrofísico asombra por su ubicuidad, si bien apenas se habla de ello en los libros de texto o en la prensa popular. En la literatura de divulgación, el plasma es considerado frecuentemente el cuarto estado de la materia debido a la gama de propiedades que lo distinguen de los sólidos, líquidos y gases. Un plasma contiene átomos y moléculas que se mueven libremente, como el gas, pero este puede conducir electricidad, así como puede ligarse a los campos magnéticos que lo atraviesan. La mayoría de los átomos dentro del plasma han sido privados de sus electrones de una forma u otra. Y la combinación de alta temperatura y baja densidad es tal que solo de vez en cuando los electrones se recombinan con sus átomos portadores originales. En su conjunto, el plasma permanece eléctricamente neutro, porque el total de electrones es igual al de protones. Pero, adentro, el plasma bulle con corrientes eléctricas y campos magnéticos que, de muchas formas, no se comporta como el gas ideal como hemos aprendido en la clase de química de la preparatoria.

* * * *

LOS EFECTOS DE LOS CAMPOS eléctricos y magnéticos en la materia casi siempre empalidecen los de la gravedad. La fuerza de atracción eléctrica entre un protón y un electrón es 10 a la 40 potencia más fuerte que su atracción gravitacional. Tan fuertes son las fuerzas electromagnéticas que el imán de un niño puede levantar fácilmente un clip de una mesa pese a la formidable gravedad de la Tierra. ¿Un ejemplo más interesante? Si se pudieran liberar a todos los electrones de un milímetro cúbico de átomos en

la nariz del transbordador espacial, y se los colocara en la base de la plataforma de lanzamiento, las fuerzas de atracción inhibirían el despegue. Se pondrían en marcha todos los motores y el trasbordador no se movería. Y si los astronautas de Apollo hubieran traído a la Tierra todos los electrones que cupieran en un dedal de polvo lunar (dejando en la Luna los átomos de donde provinieron), su fuerza de atracción sería superior a la de la gravedad entre la Tierra y a Luna en su órbita.

Los plasmas más conspicuos en la Tierra son el fuego, el rayo, la cauda de una estrella fugaz, y, por supuesto, la descarga eléctrica que uno recibe cuando deambula con sus calcetines de lana sobre una alfombra y luego toca un picaporte. Las descargas eléctricas son columnas sinuosas de electrones que se mueven abruptamente a través del aire cuando muchos de ellos se reúnen en un mismo lugar. Cada hora, merced a todas las tormentas, la Tierra es golpeada por miles de rayos. La columna de aire de un centímetro de ancho por la cual un relámpago viaja se convierte en plasma en una fracción de segundo a medida que resplandece tras haberse calentado a millones de grados por estos electrones.

Una estrella fugaz es una diminuta partícula de detrito interplanetario que se desplaza tan velozmente que se quema en el aire, descendiendo a la Tierra como polvo cósmico. Casi lo mismo le sucede a una nave espacial que reingresa a la atmósfera. En vista de que la tripulación no quiere aterrizar a una velocidad orbital de 29.000 km por hora (unos ocho kilómetros por segundo), la energía cinética debe irse a alguna parte: durante el reingreso, se convierte

en calor en el borde de la nave y es dispersada por los escudos de calor. Así, a diferencia de una estrella fugaz, los astronautas no descienden a la Tierra en forma de polvo, cuando por varios minutos el calor es tan intenso que cada molécula que rodea la nave se ioniza, cubriendo a los astronautas con una barrera temporal de plasma que ninguna señal de comunicación puede penetrar. Este es el famoso periodo de suspensión o silencio, durante el cual la cápsula es una bola brillante y el centro de control desconoce la suerte de la tripulación. A medida que la nave disminuye su velocidad a través de la atmósfera, aquella se enfría, el aire se vuelve más denso y el estado de plasma no puede sostenerse. Los electrones regresan a sus átomos y se restablece la comunicación con la nave.

* * * *

AUNQUE SON EXTREMADAMENTE raros en la Tierra, los plasmas comprenden más de 99.99% de la materia visible del cosmos. Esto incluye todas las estrellas y nubes de gas que brillan. Casi todas las bellas fotos que tomó el telescopio Hubble de las nebulosas en nuestra galaxia muestran coloridas nubes de gas en formas de plasma. Para algunos, su forma y densidad se encuentran muy influidas por la presencia de campos magnéticos de fuentes cercanas. El plasma puede inmovilizar un campo magnético o, en cambio, moldearlo a placer. Este maridaje del plasma y el campo magnético es una característica muy importante del ciclo de 11 años de actividad del Sol. El gas cercano al ecuador solar rota ligeramente más rápido que el gas que se halla cerca de los polos.

Esta diferencia representa una mala noticia para la complejidad del astro. Con el campo magnético inmovilizado en su plasma, este se estira y retuerce. Las manchas, protuberancias, erupciones y demás marcas solares van y vienen a medida que el formidable campo magnético se abre paso a través de la superficie solar, llevándose plasma consigo.

Debido a este enredo, el Sol lanza al espacio hasta un millón de toneladas de partículas cargadas por segundo, que incluyen protones, electrones y núcleos de helio. A este flujo de partículas, a veces una borrasca, a veces un céfiro, se lo conoce como *viento solar*. Este celeberrimo plasma es responsable de que las colas de los cometas apunten en dirección opuesta al Sol, sin importar si el cometa va o viene. Al chocar con las moléculas de la atmósfera terrestre cerca de nuestros polos magnéticos, el viento solar es, asimismo, causante directo de las auroras (boreales y australes), no solamente en la Tierra sino en todos los planetas con atmósferas y fuertes campos magnéticos. Dependiendo de la temperatura del plasma y su mezcla de especies atómicas o moleculares, algunos electrones libres se recombinarán con átomos hambrientos y se derramará el gran caudal de energía que llevan. En el camino, los electrones emiten luz de longitudes de onda predeterminadas. Las auroras deben mucho de sus bellos colores a dichas travesuras electrónicas, del mismo modo que los tubos de neón, las lámparas fluorescentes, así como las esferas de plasma que se venden al lado de las lámparas de lava en las tiendas de regalos.

En estos días, los observatorios satelitales nos brindan una capacidad sin precedente para monitorear al Sol e informar sobre el viento solar como si fuera parte del informe diario del tiempo. Mi primera entrevista televisada para un noticiero nocturno se debió a un reporte de plasma que el Sol había expulsado rumbo a la Tierra. Todo el mundo, o al menos los reporteros, estaban aterrorizados por la horrible suerte que le esperaba a la civilización. Le dije al auditorio que no se preocupara, pues estamos protegidos por el campo magnético, y los invité a aprovechar la ocasión para visitar el norte y que vieran las auroras que el viento solar causaría.

LA CORONA ENRARECIDA DEL Sol, visible durante los eclipses solares en la forma de una refulgente aureola en torno a la silueta de la Luna, es plasma a cinco millones de grados conformando el anillo exterior de la atmósfera solar. Con temperaturas tan altas, la corona es la principal fuente de rayos X solares, pero ellos no son visibles al ojo humano. Si se usara solamente luz visible, la brillantez de la superficie del Sol sería inmensamente mayor a la de la corona, y se perdería en el resplandor.

Hay toda una capa de la atmósfera terrestre donde los electrones han sido expulsados de sus átomos huésped por el viento solar, creando un cobertor de plasma que llamamos *ionósfera*. Esta capa refleja algunas frecuencias de ondas radiales, incluyendo las de las de amplitud modulada de la radio. Dada esta propiedad de la ionósfera, las señales de AM pueden extenderse por centenares de kilómetros, en tanto que las de onda corta pueden sobrepasar el

horizonte por miles de kilómetros. Las señales de frecuencia modulada y las de la televisión abierta, sin embargo, son de frecuencias mucho más altas y atraviesan el espacio a la velocidad de la luz. Cualquier civilización extraterrestre sabría todo acerca de nuestros programas de televisión (lo cual sería malísimo), escucharía toda nuestra música por FM (lo cual acaso sería buenísimo), pero no se enteraría de la politiquería de los programas de discusión por AM (mejor así).

La mayoría de los plasmas no son amigables a la materia orgánica. La persona con el trabajo más peligroso en la serie de *Viaje a las estrellas* era la que tenía que investigar las brillantes aglomeraciones de plasma en los planetas desconocidos que visitaban. (Creo recordar que esta persona siempre portaba una playera roja). Cada cuando este tripulante se topaba con una masa de plasma, se vaporizaba; habiendo nacido en el siglo XXV, pudiera pensarse que desde hace mucho que estos viajeros espaciales habrían aprendido a tratar el plasma con respeto (o a no vestirse de rojo). Nosotros, en el siglo XXI, tratamos al plasma con respeto y no hemos ido a ninguna parte.

* * * *

EN EL CENTRO DE NUESTROS reactores de fusión termonuclear, donde los plasmas son observados a distancia segura, se intenta unir núcleos de hidrógeno a altas velocidades y convertirlos en núcleos de helio, más pesado. Así, se libera energía que podría suministrar electricidad a toda la sociedad. El problema reside en que no se ha podido obtener más energía que la que se invierte en el

reactor. Para que se desarrollen tales velocidades de colisión, el grupo de átomos de hidrógeno debe elevarse a decenas de millones de grados. Aquí no puede haber electrones agregados. A tales temperaturas estos han sido privados de sus átomos de hidrógeno, y por ello andan libres. ¿Cómo sostener una refulgente masa de plasma de hidrógeno a un millón de grados? ¿Dónde meterla? Ni siquiera un recipiente de *tupperware* a prueba de microondas podría contenerlo. Lo que se necesita es una botella que no se derrita, vaporice o descomponga. Como vimos brevemente en el capítulo 2, podemos aprovechar la relación entre el plasma y el campo magnético y diseñar una especie de botella cuyas paredes fuesen campos magnéticos tan intensos que el plasma no pudiera atravesarlos. La rentabilidad económica de un reactor de fusión exitoso dependería en parte de esta botella magnética y de nuestra comprensión de cómo el plasma interactúa con ella.

Entre las formas más exóticas de la materia jamás creadas está el recién aislado plasma de cuark-gluón, creado por los físicos en los Laboratorios Nacionales Brookhaven, una instalación con un acelerador de partículas en Long Island, Nueva York. En lugar de estar lleno de átomos sin electrones, el plasma de cuark-gluón consiste en una mezcla de los componentes más básicos de la naturaleza: los cuarks, cargados fraccionalmente, y los gluones, que habitualmente los unen para volverlos protones y neutrones. Esta forma inusitada de plasma se asemeja bastante al estado de todo el universo una fracción de segundo después del *big bang*, momento en que todo el universo observable cabía en la esfera de 27 m del

Rose Center for Earth and Space. En efecto, de una forma u otra, cada 16 cm cúbicos del universo estaban en estado de plasma hasta que pasaron cerca de cuatrocientos mil años.

Hasta entonces, el universo se había enfriado de billones a unos cuantos miles de grados. Mientras tanto, la luz se dispersaba por los electrones libres de nuestro universo lleno de plasma, estado que asemeja lo que le sucede a la luz cuando atraviesa el vidrio esmerilado o el interior del Sol. La luz no puede viajar a través ellos sin diseminarse, por lo cual se vuelve translúcida en lugar de transparente. Debajo de unos miles de grados, el universo se enfrió lo suficiente como para que cada electrón en el cosmos se combinara con un núcleo atómico, creando así átomos enteros de hidrógeno y helio.

Apenas cada electrón halló un hogar, el estado generalizado de plasma terminó. Y así permanecería por centenas de millones de años, al menos hasta que nacieron los cuásares, alrededor de sus agujeros negros que cenan remolinos de gas. Justo antes de que caiga el gas libera luz ultravioleta ionizada que viaja a través del universo, echando a electrones de sus átomos. Hasta el nacimiento de los cuásares, el universo había disfrutado del único lapso en el cual el plasma era inexistente. Se lo llama la *edad oscura* y se considera el tiempo en que la gravedad estaba silenciosa e invisible, formando la materia en bolas de plasma que se convirtieron en la primera generación de estrellas.

19. Hielo y fuego

En 1948, cuando Cole Porter compuso *Too damn hot* [Demasiado caliente] para su obra musical de Broadway, *Kiss Me, Kate*, la temperatura de la que se lamentaba acaso no superaba los treinta y tantos grados. No tiene nada de malo tomar la letra de Porter como fuente válida en cuanto a la temperatura límite para hacer el amor a gusto. Combine esto con lo que una ducha fría hace a los impulsos eróticos de la mayoría de las personas y se obtendrá una apreciación muy buena de la estrecha zona de confort de un cuerpo humano desnudo: más o menos 17 grados Celsius, estimando la temperatura ambiente a la mitad.

El universo es otra historia. ¿Qué tal una temperatura de 100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 grados? Esto es cien quintillones de grados. También representa la temperatura del universo a una fracción de segundo del *big bang*, momento en que toda la energía, la materia y el espacio, que se convertirían en planetas, petunias y físicos de partículas, eran una bola de plasma de cuark-gluón en incandescente crecimiento. Nada de lo que se llamaría una *cosa* podía existir hasta que el cosmos se enfriara más de un millar de millones de veces.

Como han decretado las leyes de la termodinámica, un segundo después del *big bang* la bola de fuego se había enfriado a diez mil millones de grados y crecido de algo más pequeño que un átomo a un coloso cósmico mil veces más grande que nuestro sistema solar. Para cuando dieron los tres minutos, la temperatura del universo era de un cálido mil millones de grados, era difícil formar siquiera el más pequeño núcleo del átomo más simple. La expansión es

condición indispensable para el enfriamiento, por lo que ambos han proseguido sin cesar desde entonces.

Hoy en día la temperatura del universo es de 2.73 grados Kelvin. Salvo la referida a la libido humana, las temperaturas mencionadas hasta ahora están en grados Kelvin. El grado Kelvin, conocido como *el Kelvin*, fue concebido como el mismo intervalo que el grado Celsius (centígrado), pero la escala de Kelvin no tiene números negativos. Cero es cero. De hecho, para que no haya duda, el cero en la escala de Kelvin se denomina cero absoluto.

El ingeniero y físico escocés William Thomson, luego mejor conocido como lord Kelvin, desarrolló la idea de la temperatura más fría posible en 1848. Experimentos de laboratorio aún no logran esto. En principio, esto es imposible, aunque se ha estado sumamente cerca de lograrlo. La incontestablemente fría temperatura de 0.0000000005 K (o 500 picokelvins, como dirían los expertos en métrica) fue alcanzada ingeniosamente en 2003 en el laboratorio de Wolfgang Ketterle, físico del MIT.

Fuera del laboratorio, empero, los fenómenos cósmicos abarcan una extensa gama de temperaturas. Entre los lugares más calientes del universo se tiene al núcleo de una estrella azul supergigante en el momento de su colapso. Justo antes de explotar como una supernova, creando un calentamiento drástico en torno suyo, su temperatura alcanza los cien mil millones de grados. Compárese esto con el núcleo del Sol: a 15 millones de grados Kelvin (K).

Las superficies son mucho más frías. La piel de una supergigante azul es bastante caliente, a unos 25.000 K, lo bastante como para,

desde luego, brillar de color azul. Nuestro Sol registra 6.000 K, lo bastante caliente como para volverse blanco, y derretir y vaporizar cualquier elemento de la tabla periódica. La superficie de Venus está a 740 K, lo bastante caliente para freír los aparatos electrónicos con que funcionan las sondas espaciales.

Muy por debajo de la escala es el punto de congelación del agua, 273.15 K, que parece bastante cálido en comparación con la temperatura de 60 K de Neptuno, a casi 4 828 millones de kilómetros del Sol. Aún más frío es Tritón, una de sus lunas. Su superficie de helado nitrógeno se sume en 40 K, lo cual la vuelve el lugar más frío en el sistema solar, aparte de Plutón.

¿Dónde quedan los seres de la Tierra? La temperatura corporal promedio de un humano (tradicionalmente de 37 grados C) apenas rebasa los 310 grados en la escala de Kelvin. Las temperaturas registradas oficialmente en la Tierra abarcan de un máximo de 331 K (58 C, en Al 'Aziziyah, Libia, en 1922) en verano a 184 K (-89 C, en Base Vostok, Antártica, en 1983) en invierno. Pero la gente no puede sobrevivir por sí misma en tales extremos; sufrimos hipertermia en el Sahara si no nos guarecemos del calor, e hipotermia en el Ártico si no nos vestimos con muchas capas de ropa o comemos carretadas de comida. Entretanto, los microorganismos extremófilos terrestres, tanto los termófilos (amantes del calor) como los psicrófilos (amantes del frío), se adaptan diversamente a temperaturas que nos freirían o congelarían. Se ha descubierto levadura viable de tres millones de años de edad, sin ropa que la cubra, en el permafrost de Siberia.

Una especie de bacteria en el permafrost de Alaska por 32 000 años despertó y comenzó a nadar apenas se derritió el hielo. Y en este momento, varias especies de arqueos y bacterias viven sus vidas en lodo ardiente, aguas termales y volcanes submarinos.

Incluso organismos complejos pueden sobrevivir en circunstancias igualmente asombrosas. Al ser provocados, diminutos invertebrados —llamados *tardígrados*— pueden suspender sus metabolismos; en tal estado, pueden sobrevivir por días enteros a temperaturas de 424 K (151 grados C) por varios minutos, y de 73 K (–200 grados C), lo cual los vuelven lo bastante resistentes como para sobrellevar un naufragio en Neptuno. Así que la próxima vez que se necesiten viajeros espaciales que tengan «lo que hace falta» se debería pensar en levadura y tardígrados, y dejar en la Tierra a los astronautas, los cosmonautas y los taikonautas⁵.

COMÚNMENTE SE CONFUNDE temperatura con calor. El calor es la suma de la energía de los movimientos de las moléculas de cualquier sustancia. Así, en cualquier mezcla la gama de energías es muy vasta: algunas moléculas se mueven muy rápidamente, otras más despacio. Simplemente, la temperatura mide su energía promedio. Por ejemplo, una taza de café recién hecho puede tener una temperatura mayor que una alberca caliente, pero toda el agua en esta última contiene mucho más calor que una taza de café. Si se derramara un café de 94 grados C en una alberca de 38 grados, el agua no se calentará a 66 grados, y si bien dos personas en una cama representan una fuente del doble de valor que una sola

⁵ Como se llaman los astronautas chinos.

persona, las temperaturas promedio de ambos cuerpos, 36.6 y 36.6 grados, normalmente no alcanzan la de un horno de 73.2 grados C. En los siglos XVII y XVIII los científicos ligaban el calor con la combustión. Y ellos entendían la combustión como el resultado de cuando el flogisto —una hipotética sustancia, semejante a la Tierra, que se caracterizaba tan solo por su combustibilidad— era removido de un objeto. Si se quema un tronco en un hogar, el aire se lleva el flogisto, y el tronco desflogistizado se revela como una pila de cenizas.

A finales del siglo XVIII, el químico francés Antoine-Laurent Lavoisier había sustituido la teoría del flogisto con la teoría calórica. Este clasificó el calor, que llamó *calórico*, como uno de los elementos químicos, y sostuvo que era un fluido invisible, insípido, inodoro y ligero que pasaba de un objeto a otro mediante la combustión o la fricción. El concepto de *calor* no fue bien comprendido sino hasta el siglo XIX, en el auge de la Revolución Industrial, cuando un concepto más amplio de energía cobró forma dentro de una nueva disciplina de la física llamada la *termodinámica*.

* * * *

AUNQUE, COMO IDEA CIENTÍFICA, el calor planteaba muchos retos a las mentes brillantes, por milenios, científicos y no científicos han intuido el concepto de temperatura. Las cosas calientes tienen alta temperatura y las frías la tiene baja. Los termómetros confirman esa conexión.

Aun cuando a menudo se le atribuye a Galileo la invención del termómetro, su versión más antigua fue obra de Herón de

Alejandro en el siglo I a. C. Incluso, en su libro *Pneumatica*, describe un *termoscopio*, aparato que mostraba el cambio en el volumen de gas a medida que se calentaba o enfriaba. Como muchos otros textos antiguos, *Pneumatica* fue traducido al latín durante el Renacimiento. Galileo lo leyó en 1594 y, como hizo cuando supo del recién inventado telescopio, de inmediato construyó un termoscopio mejor, como muchos de sus contemporáneos. Para un termómetro, la escala es crucial. Existe una curiosa tradición, que empezó a inicios del siglo XVIII, de calibrar las unidades de temperatura de tal manera que a fenómenos comunes se les asigne números fraccionales con muchos divisores. Isaac Newton propuso una escala de cero (para la nieve que se derrite) al 12 (el cuerpo humano); 12, por supuesto, es divisible equitativamente por 2, 3, 4 y 6. El astrónomo danés Ole Rømer propuso a su vez una escala de 0 a 60 (60 es divisible por 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20 y 30). En su escala, cero era la temperatura más baja que podía obtener de una mezcla de hielo, sal y agua; 60 era el punto de ebullición del agua. En 1724 un fabricante de instrumentos alemán llamado Daniel Gabriel Fahrenheit (quien desarrolló el termómetro de mercurio en 1714) inventó una escala más precisa al dividir cada grado de Rømer en cuatro partes iguales. En la nueva escala el agua hervía a 240 grados y se congelaba a 30, mientras que la temperatura corporal era de aproximadamente 90 grados; esto fue ajustado posteriormente, el rango de cero a la temperatura corporal se fijó en 96 grados, otro ganador en el departamento de la división (pues sus

divisores son 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32 y 48). El punto de congelación del agua es de 32 grados. Ajustes ulteriores dejaron a los fanáticos de la escala de Fahrenheit con una temperatura corporal que no es un número redondo y un punto de ebullición de 212 grados.

Transitando un camino diferente, en 1742 el astrónomo sueco Anders Celsius propuso la escala de centígrados, basado en decimales, para medir la temperatura; en ella, fijaba el punto de congelación en 100 y el de ebullición en 0. No fue la primera ni la última vez que un astrónomo urdiera una escala al revés. Alguien, posiblemente aquel que fabricó los termómetros de Celsius, le hizo al mundo un favor e invirtió la escala. Al parecer el número 0 invalidaba la capacidad de comprensión de algunas personas. Estando en casa de mis padres al norte de la ciudad de Nueva York, hace unos 20 años, durante unas vacaciones de invierno, sintonicé el radio para escuchar música clásica. Una frígida masa de aire canadiense avanzaba desde el nordeste, y el locutor, entre movimientos de la *Música Acuática* de Georg Friedrich Händel, informaba continuamente acerca del descenso de la temperatura: «Cinco grados Fahrenheit, cuatro grados, tres grados. Si esto sigue así ¡no habrá más temperatura!».

En parte para evitar tales ejemplos de falta de conocimientos matemáticos, la comunidad científica internacional usa la escala de Kelvin, la cual coloca al cero en el lugar correcto: el fondo absoluto de la escala. Cualquier otra ubicación es arbitraria y se presta a dudas y chistoretos aritméticos.

Muchos de los predecesores de Kelvin, al medir el volumen decreciente del gas a medida que se enfriaba, habían establecido -273.15 grados Celsius (-459.67 grados F) como la temperatura en la cual las moléculas de cualquier sustancia contenían la menor cantidad de energía. Otros experimentos mostraron que -273.15 C es la temperatura en la cual un gas, sometido a una presión constante, descendería a un volumen de 0. En vista de que no existe un gas con volumen cero, -273.15 C se convirtió en el inalcanzable nivel inferior de la escala de Kelvin. ¿Qué mejor término para denominarlo que *cero absoluto*?

EN SU CONJUNTO, EL UNIVERSO se comporta como un gas. Si se lo obliga a expandirse, se enfría. Cuando este tenía apenas medio millón de años de edad, la temperatura cósmica era de aproximadamente 3 000 K. Hoy es de menos de 3 K. Expandiéndose inexorablemente hacia su fin térmico, el universo actual es mil veces más grande y mil veces más frío que el universo en su infancia.

En la Tierra, lo normal es tomar la temperatura introduciendo un termómetro en el orificio de alguna criatura o que este toque un objeto de una manera lo menos invasora posible. Esta forma de contacto directo permite que las moléculas en movimiento dentro del termómetro adquieran el mismo nivel de energía que las moléculas del objeto. Cuando un termómetro yace inmóvil en el aire en lugar de llevar a cabo su trabajo en un pollo rostizado, la velocidad promedio de las moléculas de aire que chocan indica al termómetro qué temperatura registrar.

Hablando de aire, en un momento y lugar determinados, la temperatura del aire a pleno Sol es en esencia la misma que la temperatura del aire debajo de un árbol. Lo que la sombra hace es escudarlo a uno de la energía radiante del Sol, la cual pasa casi toda sin ser absorbida por la atmósfera y cae sobre su piel, lo cual hace que uno se sienta más caliente que el aire. Pero en el espacio, como no hay aire no hay moléculas en movimiento que provoquen un registro en un termómetro. De ahí que la pregunta « ¿cuál es la temperatura del espacio?» no tenga un significado obvio. Como nada lo toca, el termómetro solo puede registrar la energía radiante de la luz, desde todas sus fuentes, que caen sobre él.

En el lado alumbrado de la Luna sin aire, un termómetro registraría 400 K (127 grados C). Si uno se coloca debajo de un peñasco o viajara a la parte oscura de la Luna, el termómetro marcaría al instante 40 K (-234 grados C). Para sobrevivir un día lunar sin un traje espacial que controle la temperatura, tan solo para mantener una temperatura corporal cómoda, se tendrían que dar maromas para alternadamente calentar y enfriar todo el cuerpo.

* * * *

CUANDO HACE MUCHO FRÍO y se desea absorber la mayor cantidad de energía radiante, mejor lucir ropa oscura que reflejante. Lo mismo vale para un termómetro. En vez de discutir cómo vestirse en el espacio, hay que asumir que el termómetro puede hacerse perfectamente absorbente. Si se lo coloca en medio de la nada, como a mitad de camino entre la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda, lejos de todas las fuentes obvias de radiación, el termómetro

indicaría 2.73 K, la temperatura de fondo, actual, del universo. En este momento los cosmólogos sostienen que el universo se expandirá por siempre. Para cuando el cosmos duplique su tamaño, su temperatura se habrá reducido a la mitad. Para cuando se vuelva a duplicar, la temperatura disminuirá a la mitad de nueva cuenta. Al cabo de un billón de años, el gas remanente se habrá gastado en estrellas y todas ellas habrán agotado su combustible termonuclear. Mientras tanto, la temperatura del universo seguirá descendiendo hasta alcanzar el cero absoluto.

Parte 4

El significado de la vida

Los retos y laureles de saber cómo llegamos aquí

Contenido:

- 20. *Volverás al polvo*
- 21. *Forjado en las estrellas*
- 22. *Que vengan las nubes*
- 23. *Ricitos de Oro y los tres planetas*
- 24. *Agua, agua*
- 25. *Espacio vital*
- 26. *Vida en el universo*
- 27. *Nuestra burbuja de radiofrecuencia*

20. Volverás al polvo

Un vistazo a la Vía Láctea a simple vista revela una nubosa banda de luz y manchas oscuras que se extiende a lo largo del horizonte. Con la ayuda de unos binoculares o un telescopio común y corriente, las áreas oscuras y aburridas de la Vía Láctea cobran forma como... áreas oscuras y aburridas, pero las brillantes se muestran como innumerables estrellas y nebulosas.

En un pequeño libro titulado *El mensajero de las estrellas*, publicado en Venecia en 1610, Galileo describió el firmamento como lo vio a través de su telescopio, incluyendo la primera descripción de las manchas luminosas de la Vía Láctea. Refiriéndose a su nuevo

instrumento como *catalejo*, estaba tan emocionado que apenas podía contenerse:

La Vía Láctea misma, con la ayuda de mi catalejo, puede observarse tan bien que todas las discusiones que por generaciones han irritado a los filósofos son deshechas por la certeza visible, y nos libera de argumentos verbosos. Pues la galaxia no es sino un conglomerado de innumerables estrellas distribuidas en conjuntos. A cualquier región a la cual se dirija el catalejo, de inmediato se presenta una inmensa cantidad de estrellas, algunas de las cuales parecen muy grandes y conspicuas, pero la multitud de las pequeñas es realmente inconmensurable (Van Helden, 1989: 62).

De seguro en la «inmensa cantidad de estrellas» se encuentra la fiesta. ¿Por qué interesarse en el área oscura donde no hay estrellas? Probablemente son agujeros cósmicos al infinito y más allá.

Pasarían tres siglos hasta que alguien descubriera que estas manchas negras son densas nubes de gas y polvo, que oscurecen los campos estelares más distantes a la vez que albergan incubadoras de estrellas. Siguiendo al astrónomo estadounidense George Cary Comstock, quien se preguntaba por qué las lejanas estrellas se veían más tenues de lo que la distancia sola pudiera indicar, fue hasta 1909 cuando el astrónomo holandés Cornelius Kapteyn (1851–1922) hallaría al culpable. En dos artículos de investigación, titulados ambos «Sobre la absorción de la luz en el

espacio», Kapteyn sometió evidencia de que las nubes, el recién descubierto *medio interestelar*, no solamente difuminan la luz de los astros, sino que también lo hacen de manera tan desigual a lo largo de todo el espectro de colores estelares que atenúan la luz azul mucho más que la roja. Esta absorción hace que los distantes astros de la Vía Láctea se vean, en promedio, más rojos que los más cercanos.

El hidrógeno y el helio ordinarios, principales componentes de las nubes de gas cósmico, no enrojecen la luz, pero las moléculas más grandes sí, especialmente los que contienen los elementos carbono y silicio. Y cuando las moléculas son demasiado grandes como para llamarse moléculas, las llamamos polvo.

* * * *

LA MAYORÍA DE LA GENTE conoce bien el polvo casero, aunque pocos saben que en una casa cerrada este consiste mayormente de células humanas muertas (además de caspa de mamíferos, si se tuviera). La última vez que revisé, el polvo cósmico en el medio interestelar no contenía la epidermis de nadie, pero posee un enorme conjunto de moléculas complejas que emiten principalmente las partes infrarrojas y de microondas del espectro. Los telescopios de microondas no fueron parte de la caja de herramientas hasta los años sesenta; los telescopios infrarrojos, hasta los setenta. Así pues, la verdadera riqueza química de la sustancia entre las estrellas era desconocida hasta entonces. En las décadas siguientes, emergió una fascinante y compleja imagen del nacimiento de las estrellas.

No todas las nubes de gas en la Vía Láctea pueden formar estrellas. Con mucha frecuencia, la nube no sabe qué hacer. En realidad, los astrofísicos son los confundidos. Se sabe que la nube desea colapsarse bajo su propio peso para formar una o más estrellas. Pero, dentro de la nube, la rotación y el movimiento turbulento la alejan de ese destino. También la presión ordinaria del gas, del tipo que se aprende en una clase de química de preparatoria. Los campos magnéticos galácticos, asimismo, impiden el colapso: penetran la nube y se pegan a cualquier partícula libre restringiendo las formas en que las nubes responden a su propia gravedad. Lo preocupante es que si no supiéramos que las estrellas existen, la investigación ofrecería mucha evidencia de por qué las estrellas no pueden formarse.

Como los cien miles de millones de astros de la Vía Láctea, las nubes de gas orbitan el centro de la galaxia. Los astros son motitas (de escasos segundos luz de diámetro) en el vasto océano del espacio y se pasan entre sí como buques en la noche. Las nubes de gas, por otra parte, son enormes; por lo general abarcan centenas de años luz y contienen una masa equivalente a la de un millón de soles. Ya que estas nubes ambulan por la galaxia, a menudo chocan entre sí y se entrelazan. A veces, dependiendo de sus velocidades relativas y de sus ángulos de impacto, las nubes se adhieren entre sí como malvaviscos calientes; en otras ocasiones, para colmo, se destrozan entre sí.

Si una nube se enfría a una temperatura lo suficientemente baja (menos de 100 grados sobre el cero absoluto), sus átomos se

golpearán y pegarán en lugar de evadirse entre sí, como lo harían si la temperatura fuera mayor. Esta transición química acarrea consecuencias para todos. Las partículas en crecimiento —que ahora contienen decenas de átomos— empiezan a batear la luz visible de un lado a otro, atenuando la luz de las estrellas que se hallan al fondo. Para cuando las partículas se conviertan en granos de polvo, contendrán más de diez mil millones de átomos. Con ese tamaño ya no desperdiga la luz visible de los astros: la absorben y luego vuelven a irradiar la energía como rayos infrarrojos, que son parte del espectro que escapa libremente de la nube. Pero el acto de absorber la luz visible empuja la nube en dirección opuesta a la de la fuente de luz. Ahora la nube se empareja con la luz estelar. Las fuerzas que vuelven más densa a la nube tarde o temprano pudieran conducir a su colapso gravitacional, y ello a su vez pudiera conducir al nacimiento de una estrella. Así que nos hallamos ante una situación extraña: para crear una estrella con un núcleo a diez millones de grados K, lo suficiente para que ocurra una fusión termonuclear, debe haber condiciones para que la nube esté lo más fría posible.

En este momento en la vida de una nube, los astrofísicos solo pueden especular sobre qué sucede después. Los teóricos y los modelistas de computadora enfrentan numerosos problemas de parámetro a la hora de registrar todas las leyes físicas y químicas conocidas en sus computadoras antes de pensar siquiera en rastrear el comportamiento dinámico de nubes enormes y masivas bajo influencias internas y externas. Otra objeción es que la nube

original es miles de millones de veces más ancha y mil quintillones de veces menos densa que la estrella que se trata de crear, y lo que importa en una escala bien pudiera no serlo en otra.

* * * *

NO OBSTANTE, UNA COSA que se puede asegurar es que en las regiones más profundas, oscuras y densas de una nube interestelar, con temperaturas de 10 grados sobre cero absoluto, colapsan nubes de gas sin resistencia, convirtiendo su energía gravitacional en calor. En cada región, la temperatura —que pronto se convertirá en el núcleo de una estrella recién nacida— aumenta velozmente, deshaciendo todos los granos de polvo en las inmediaciones. Finalmente, el gas que se colapsa alcanza los diez millones de grados. En esta temperatura mágica, los protones (que son solo átomos de hidrógeno desnudos) se mueven lo bastante rápido como para superar su rechazo, y se unen influidos por una fuerza nuclear de corto alcance (llamada precisamente *fuerte fuerza nuclear*). Esta fusión termonuclear crea helio, cuya masa es menos que la suma de sus partes. La masa perdida ha sido convertida en carretadas de energía, como fueron descritas por la famosa ecuación de Einstein: $E = mc^2$, en la que E es energía, m es masa y c es la velocidad de la luz. A medida que sale el calor, el gas se torna más luminoso y la energía que antes era la masa ahora sale. Y aunque la región de gas caliente aún yace resguardada dentro de una gran nube, se puede anunciar a la Vía Láctea que ha nacido una estrella.

Sabemos que las estrellas provienen que una amplia gama de masas, de un décimo a casi 100 veces la del Sol. Por motivos

todavía desconocidos, nuestra gran nube de gas contiene una multitud de espacios fríos, que se forman al mismo tiempo y cada uno puede engendrar una estrella. Por cada astro masivo que nace, hay mil de masa más pequeña, pero solo 1% de todo el gas en la nube original participa en el nacimiento de la estrella, y ello representa un reto clásico: descubrir cómo y por qué la cola sacude al perro.

* * * *

ES FÁCIL DETERMINAR EL LÍMITE inferior de la masa en el fondo. Debajo de un décimo de la masa del Sol, el foco de gas no tiene la suficiente energía gravitacional para elevar la temperatura a los diez millones de grados necesarios. Así no nace una estrella. Lo que se obtiene es, en cambio, una enana café. Sin fuente de energía propia, solo se vuelve cada vez más tenue, descargando el poco calor que puede generar a partir de su colapso original. Las capas gaseosas exteriores de una enana café son tan frías que muchas de sus moléculas que normalmente son destruidas en las atmósferas de astros más calientes permanecen con vida. Con una luminosidad tan débil, una enana café es sumamente difícil de detectar, por lo cual demanda métodos similares a los usados para detectar planetas. En efecto, solo en años recientes se han descubierto suficientes enanas cafés para clasificarlas en más de una sola categoría. Por el contrario, el límite superior de la masa es fácil de determinar. Arriba de 100 veces la masa del Sol, la estrella es tan brillante que cualquier masa adicional que quisiera unirse al astro en cuestión es expulsada por la intensa presión del polvo estelar

dentro de la nube de gas. Aquí el emparejamiento de la luz estelar con el polvo es irreversible. Tan poderosos son los efectos de esta presión de la radiación que la luminosidad de un puñado de estrellas de gran masa puede dispersar casi toda la masa de la nube original, lo cual genera decenas si no centenas de nuevas estrellas, hermanas realmente, para que toda la galaxia las vea.

La Gran Nebulosa de Orión, situada justo debajo del Cinturón de Orión, en la mitad de su espada, es una incubadora estelar de ese tipo. Dentro de la nebulosa, miles de astros se forman de una enorme aglomeración. Cuatro de las más grandes forman el Trapecio de Orión y se enfrasan en la evacuación de un gran agujero en medio de la nube donde se forman. Claramente, se observan nuevas estrellas en las imágenes de la región tomadas desde el telescopio Hubble, cada niño envuelto en un disco protoplanetario hecho de polvo y otras moléculas tomadas de la nube original. Y dentro de cada disco, se forma un sistema solar.

Por un largo periodo, las estrellas recién nacidas no molestan a nadie. Pero con el tiempo, de las largas y constantes perturbaciones gravitacionales de las enormes nubes transeúntes, se deshace el grupo y sus miembros se dispersan por el montón de estrellas en la galaxia. Los astros de poca masa prácticamente viven por siempre, dado lo eficiente de su consumo de combustible. Las estrellas de masa intermedia, como el Sol, se convierten en gigantes rojas tarde o temprano, expandiéndose 100 veces a medida que mueren; sus capas exteriores de gas se conectan tan tenuemente con el astro que se lanzan a la deriva en el espacio, exponiendo el combustible

nuclear que por diez mil millones de años les diera vida. El gas que regresa al espacio es recogido por nubes que pasan, solo para participar en la formación de nuevas estrellas.

Pese a la rareza de las estrellas gigantes, estas poseen todas las cartas evolucionarias. Son las más luminosas (un millón de veces que el Sol) y, en consecuencia, sus vidas son más breves (solo algunos millones de años). Y, como se verá, estas estrellas fabrican decenas de nuevos elementos pesados, uno tras otro, empezando con el hidrógeno, seguido del helio, el carbono, el nitrógeno, el oxígeno y demás, hasta llegar al hierro en sus núcleos. Mueren espectacularmente en explosiones de supernova, formando aún más elementos e iluminando por un tiempo breve toda la galaxia circundante. La energía explosiva esparce los nuevos elementos por toda la galaxia, interrumpiendo su distribución de gas y enriqueciendo las nubes cercanas con la materia prima para hacer su propio polvo. Las ondas de choque de la supernova se desplazan supersónicamente a través de la nube comprimiendo el gas y el polvo, y posiblemente creando los focos muy densos que son necesarios para hacer nuevas estrellas en primer lugar.

Como veremos en el capítulo que sigue, el principal aporte de la supernova al cosmos es polinizar a las nubes con los elementos pesados que forman planetas y protistas y personas, de modo que, de nuevo, bien dotada con los nutrientes químicos de la generación estelar que la antecedió, nacerá una nueva estrella.

21. Forjado en las estrellas

No todos los descubrimientos científicos son obra de investigadores solitarios y antisociales, ni se acompañan con grandes titulares y libros de divulgación. Algunos implican a muchas personas, tardan muchas décadas, exigen ecuaciones matemáticas muy complicadas y difícilmente pueden resumirse en la prensa. Pasan casi inadvertidos para el público.

Mi voto por el descubrimiento menos apreciado del siglo XX corresponde a que las *supernovas* —los últimos estertores explosivos de estrellas de alta masa en agonía— son la principal fuente de origen y relativa mezcla de los elementos pesados del universo. Este inesperado descubrimiento se dio a conocer en forma de un largo artículo publicado en 1957 en *Reviews of Modern Physics*, con el título «Síntesis de los elementos en las estrellas», por E. Margaret Burbidge, Geoffrey R. Burbidge, William Fowler y Fred Hoyle, en el cual construyeron un marco teórico y computacional que interpretaba con frescura 40 años de conversaciones sobre temas como las fuentes de la energía estelar y la transmutación de elementos.

La química nuclear cósmica es complicada. Lo era en 1957 y lo es todavía. Entre las preguntas relevantes están: ¿Cómo se comportan los diversos elementos de la famosa tabla periódica cuando son sometidos a diversas temperaturas y presiones? ¿Se fusionan o se dividen? ¿Cuán fácilmente esto sucede? ¿Este proceso absorbe o libera energía?

La tabla periódica es, desde luego, mucho más que una misteriosa gráfica de aproximadamente un centenar de casilleros llenos de

símbolos crípticos. Es una secuencia de cada elemento conocido ordenado por el número de protones en sus núcleos. Los más ligeros son el hidrógeno, con un protón, y el helio, con dos; en las condiciones de temperatura, densidad y presión adecuadas, puede usarse el hidrógeno y el helio para sintetizar todos los demás elementos de la tabla periódica.

En la química nuclear un problema persistente es calcular una muestra representativa de colisiones de sección transversal, las cuales son simplemente mediciones de cuánto debe acercarse una partícula a otra antes de interactuar de manera significativa con ella. Estas muestras son fáciles de calcular en objetos como mezcladoras de cemento o casas que son transportadas sobre un camión de plataforma, pero pudiera representar un reto para las partículas subatómicas. Una comprensión a detalle de esto permite predecir el comportamiento de una reacción nuclear, pero a veces pequeñas imprecisiones en las tablas de muestras de colisión de sección transversal pueden llevar a conclusiones muy erróneas. El problema se asemeja mucho a lo que sucedería si se trata de navegar por el sistema del metro de una ciudad usando el plano de otra.

Aparte de esto, por algún tiempo los científicos han sospechado que si existiera algún extraño proceso nuclear en el universo, un buen lugar para hallarlo sería el centro de las estrellas. En particular, en 1920 el astrofísico teórico *sir* Arthur Eddington publicó un artículo intitulado «The Internal Constitution of the Stars», donde arguyó que el laboratorio Cavendish de Inglaterra, el centro de investigación

atómica y nuclear más importante de entonces, no podía ser el único lugar donde se pudiera transformar elementos en otros:

«Pero ¿es posible admitir que dicha transmutación está sucediendo? Es difícil de sostener, pero aún lo es más de refutar. Y lo que es posible en el laboratorio Cavendish podría no ser muy difícil en el Sol. Me parece que se sospecha en general que los astros son el crisol donde los átomos más ligeros, que abundan en las nebulosas, se convierten en elementos más complejos» (p. 18).

El artículo de Eddington antecede por varios años al descubrimiento de la mecánica cuántica, sin el cual el conocimiento de la física de los átomos y los núcleos era endeble, en el mejor de los casos. Con extraordinario acierto, Eddington comenzó a formular el supuesto para obtener energía estelar por medio de la fusión termonuclear del hidrógeno al helio y más allá:

No tenemos que atarnos a la formación del helio del hidrógeno como la única reacción que supla la energía [de una estrella], aunque parecería que las futuras etapas para acumular a los elementos implican mucha menos liberación y a veces incluso absorción de energía. La posición pudiera resumirse en estos términos: los átomos de todos los elementos están hechos de hidrógeno unidos entre sí, y presumiblemente alguna vez se formaron de hidrógeno; el interior de una estrella pareciera ser un lugar como cualquier otro para que sucediera la evolución (p. 18).

Un modelo de transmutación de los elementos debía poder explicar la mezcla observada de elementos en la Tierra y dondequiera en el universo. Pero primeramente era necesario un mecanismo. Para 1931 se desarrolló la mecánica cuántica (aun cuando el neutrón no había sido descubierto) y el astrofísico Robert d'Escourt Atkinson publicó un amplio artículo que resumió como «síntesis de la teoría de la energía estelar y del origen de los elementos [...] en la cual los diversos elementos químicos se conforman paso a paso de los más ligeros en los interiores estelares, por la incorporación sucesiva de protones y electrones uno a la vez» (p. 250).

Al mismo tiempo, el químico nuclear William D. Harkins publicó un artículo en el cual señalaba que «los elementos de poco peso atómico son más abundantes que los de alto peso atómico, y, en promedio, los elementos de números atómicos pares abundan 10 veces más que los números impares de valor similar» (Lang y Gingerich, 1979: 374). Harkins conjeturó que la relativa abundancia de elementos dependía de procesos nucleares y no de procesos químicos convencionales y que los elementos pesados debieron sintetizarse de los ligeros.

A detalle, el mecanismo de la fusión nuclear en las estrellas explicaría, en última instancia, la presencia cósmica de muchos elementos, en especial aquellos que se obtienen cuando se agregan núcleos de dos protones de helio al otro elemento. Constituyen los elementos abundantes con «números atómicos pares» a los que Harkin se refiere. Pero la existencia y mezcla relativa de muchos

otros elementos siguió sin explicación. Así que tendría que haber otra forma en que los elementos se juntan.

El neutrón, descubierto en 1932 por el físico británico James Chadwick mientras trabajaba en el laboratorio Cavendish, desempeña un papel fundamental en la fusión nuclear que Eddington no pudo imaginar. Para reunir protones se requiere mucho trabajo, pues estos se repelen entre sí. Deben ser acercados suficientemente (a menudo mediante altas temperaturas, presiones y densidades) para que la fuerza nuclear «fuerte» de corto alcance se sobreponga a su repulsión y los una. Sin embargo, el neutrón sin carga no repele a partícula alguna, de modo que puede ir hacia algún núcleo y unirse a las otras partículas unidas. Este paso aún no ha creado otro elemento; al añadir un neutrón simplemente se forma un *isótopo* del original. Pero para algunos elementos, el neutrón recién capturado es inestable y se convierte espontáneamente en un protón (que permanece en el núcleo) y un electrón (que escapa de inmediato). Al igual que los guerreros griegos que lograron traspasar las murallas de Troya ocultos dentro de un caballo de madera, los protones pueden escurrirse efectivamente dentro de un núcleo disfrazado de neutrón.

Si el flujo ambiental de los neutrones es alto, entonces el núcleo de un átomo puede absorber muchos seguidos para crear un conjunto de elementos que se identifican con el proceso y difieren en diversos elementos que resultan de neutrones que son capturados lentamente.

Al proceso se lo conoce como *captura de neutrones* y es responsable de crear muchos elementos que, de otra forma, no son formados por la fusión termonuclear tradicional. Los elementos restantes en la naturaleza pueden formarse de diversos modos, incluso estrellando luz (rayos gamma) de alta energía dentro del núcleo de átomos pesados, que luego se deshacen en átomos más pequeños.

ARRIESGÁNDOME A SIMPLIFICAR demasiado el ciclo vital de una estrella de alta masa, basta con reconocer que un astro tiene la función de hacer y soltar energía, lo cual permite sostener la estrella contra la gravedad. Sin ello, la enorme bola de gas simplemente colapsaría bajo su propio peso. El núcleo de un astro, luego de haber convertido su hidrógeno en helio, fusionará el helio en carbono, y sucesivamente en oxígeno, en neón y, finalmente, hierro. Fusionar esta secuencia de elementos cada vez más pesados requiere temperaturas cada vez más altas para que el núcleo pueda vencer su repulsión natural. Por fortuna, esto ocurre de manera natural, ya que al final de cada etapa intermedia, la energía de la estrella se apaga temporalmente, sus regiones internas se colapsan, aumenta la temperatura e inicia la fusión. Pero hay un problema: la fusión del hierro absorbe energía en lugar de liberarla. Esto es muy malo para la estrella porque ya no puede sostenerse a sí misma contra su gravedad. De inmediato, el astro colapsa sin oponer resistencia, lo cual fuerza a la temperatura a ascender tan velozmente que sigue una titánica explosión que destruye a la estrella por completo. Durante el estallido, la luminosidad del astro

puede elevarse más de mil millones de veces. Se las llama *supernovas*, aunque siempre he pensado que es más adecuado el término *súper-dúper-novas*.

En el trascurso de una explosión de una supernova, la disponibilidad de neutrones, protones y energía permite la creación de elementos de diversas maneras. Al combinar 1) los muy confiables principios de la mecánica cuántica, 2) la física de las explosiones, 3) las muestras de colisión de sección transversal más reciente, 4) los diversos procesos en los cuales los elementos pueden transmutarse entre sí y 5) los principios básicos de la teoría de la evolución estelar, Burbidge, Burbidge, Fowler y Hoyle implicaron decisivamente las explosiones de supernovas como la fuente principal de todos los elementos más pesados que el hidrógeno y el helio en el universo.

Con las supernovas como las culpables, pudieron resolver otro problema gratis: cuando se forjan elementos más pesados que el hidrógeno y el helio adentro de las estrellas, no le hace bien al resto del universo a menos que estos elementos sean lanzados al espacio interestelar y puedan usarse para hacer planetas y personas. Sí, somos polvo de estrellas.

No pretendo insinuar que todas nuestras interrogantes químicas cósmicas han sido resueltas. Un misterio implica al tecnecio, que fue el primer elemento en ser sintetizado en un laboratorio, en 1937. (Su nombre, como otros vocablos que emplean el prefijo *tech*, se derivan de la palabra griega *technetos*, que significa «artificial»). Dicho elemento aún no ha sido descubierto en estado natural en la

Tierra, pero ha sido hallado en la atmósfera de un puñado de gigantes rojas en nuestra galaxia. Esto no sería alarmante a no ser por el hecho de que el tecnecio tiene una vida media de apenas dos millones de años, que es mucho más breve que la edad y la esperanza de vida de los astros donde se ha encontrado. En otras palabras, la estrella no pudo haber nacido con esta sustancia, pues de haber sido así, la estrella ya se habría agotado. Además, no existe mecanismo alguno para crear tecnecio en el núcleo de una estrella y hacerlo salir a la superficie para ser observado, lo cual ha llevado a teorías exóticas aún no aceptadas plenamente por la comunidad astrofísica.

Las gigantes rojas con propiedades químicas peculiares son poco comunes, pero lo bastante como para que un grupo de astrofísicos (en su mayoría espectroscopistas) se especialicen en el tema. De hecho, mis intereses profesionales se entrelazan lo suficiente como para recibir regularmente el *Boletín de Estrellas Gigantes Rojas Químicamente Peculiares*, que no se vende en los quioscos. Suele contener noticias de conferencias y sobre investigaciones en curso. Para el científico interesado, estos misterios químicos en curso no son menos atractivos que los temas ligados a los agujeros negros, los cuásares y el nacimiento del universo, pero apenas puede leerse sobre ellos. ¿Por qué? Porque de nuevo los medios han predeterminado que no es merecedor de cobertura noticiosa, especialmente por tratarse de algo tan poco interesante como el origen cósmico de cada elemento de nuestro cuerpo.

22. Que vengan las nubes

A partir del nacimiento del universo, durante los primeros 400 milenios el espacio era un caldo hirviente de núcleos atómicos desnudos en carrera loca sin electrones propios. Las reacciones químicas más simples estaban en el futuro distante, y faltaban diez mil millones de años para que la vida naciera en la Tierra.

De los núcleos creados por el *big bang*, 90% estaba formado por hidrógeno, y la mayor parte del resto era helio; una ínfima fracción era litio; el inicio de los elementos más simples. No fue sino hasta que la temperatura ambiente descendió de los billones a unos 3.000 K cuando los núcleos pudieron capturar electrones. De tal modo, se convirtieron en átomos en toda regla, y la química se volvió posible. A medida que el universo crecía y se enfriaba, los átomos se reunieron en estructuras cada vez más grandes: nubes de gas en las cuales las moléculas más antiguas —hidrógeno (H_2) e hidrato de litio (LiH) — se formaron de los elementos más antiguos del universo. Tales nubes de gas engendraron las primeras estrellas, cuyas masas eran cerca de 100 veces la de nuestro Sol. Y en el núcleo de cada estrella ardía un horno termonuclear donde se cocían elementos químicos más pesados que los primeros tres.

Cuando aquellas primeras estrellas titánicas agotaron sus combustibles, estallaron en pedazos y regaron sus entrañas por todo el cosmos. Con la energía de las explosiones se formaron elementos más pesados. Nubes de gas, ricas en átomos, capaces de una ambiciosa química, se aglomeraron en el espacio.

Y mucho después siguieron las galaxias, principales organizadores de la materia visible del universo, y dentro de ellas, nubes de gas enriquecidas con los desechos de aquellas estrellas tempranas. Pronto esas galaxias albergarán a generaciones consecutivas de astros prohiendo generaciones de enriquecimiento químico, manantiales de los elementos de la tabla periódica.

Sin este drama épico, la vida en la Tierra, o en cualquier otro lugar, sería imposible. La química de la vida —la química en sí misma— exige que los elementos formen moléculas. El problema es que las moléculas no se hacen ni pueden sobrevivir en hornos termonucleares ni explosiones estelares, sino que necesitan un ambiente más frío y calmado. Entonces, ¿cómo el universo se volvió el lugar tan rico en moléculas en que hoy vivimos?

* * * *

POR UN MOMENTO, volvamos a la fábrica de elementos en las profundidades de una masiva estrella de primera generación.

Como hemos visto, en el núcleo, a temperaturas de más de diez millones de grados, los veloces núcleos de hidrógeno (protones solos) se estrellan aleatoriamente entre sí. Este evento provoca una serie de reacciones nucleares que, al final, producen helio y mucha energía. En tanto que la estrella está «encendida», la energía liberada por sus reacciones nucleares genera suficiente presión externa como para impedir que la inmensa masa del astro se colapse bajo su propio peso. Empero, finalmente la estrella agotará su combustible de hidrógeno. Lo que quedará será una bola de helio, que ahí yacerá sin nada que hacer. ¡Pobre helio! Para que se

fusiona con elementos más pesados le es necesaria una temperatura 10 veces mayor.

Al faltarle una fuente de energía, el núcleo colapsa, y así se calienta. Al llegar cerca de 100 millones de grados, las partículas se aceleran y los núcleos de helio finalmente se fusionan, golpeándose tan velozmente que se combinan hasta producir los elementos pesados. Cuando se fusionan, la reacción libera la suficiente energía para detener el colapso, al menos por un rato. Los núcleos de helio fusionados pasan un tiempo como productos intermedios (berilio, por ejemplo), pero tarde o temprano tres núcleos de helio se convierten en un solo núcleo de carbono. (Mucho más tarde, cuando el carbono se vuelve un átomo completo con su complemento de electrones, reina como el átomo más químicamente fructífero en la tabla periódica).

Mientras tanto, de vuelta al interior del astro, continúa la fusión. Con el tiempo, la zona caliente se queda sin helio, y deja atrás una bola de carbono rodeada de un cascarón de helio, rodeado a su vez por el resto de la estrella. Ahora, el núcleo se vuelve a colapsar. Cuando su temperatura asciende a seiscientos millones de grados aproximadamente, el carbono comienza asimismo a golpear a sus vecinos, fusionándose en elementos más pesados mediante procesos nucleares más y más complejos, al mismo tiempo que se libera la suficiente energía para impedir el colapso. La fábrica está a toda máquina, produciendo nitrógeno, oxígeno, sodio, magnesio, silicio. Seguimos avanzando por la tabla periódica hasta que llegamos al hierro, el último elemento fusionado en el núcleo de una estrella de

primera generación. Si se fusiona el hierro, o algo más pesado, la reacción absorbe energía en vez de emitirla. Pero los astros se dedican a hacer energía, así que no es bueno para una estrella tener una bola de hierro por núcleo. Sin una fuente de energía para equilibrar la fuerza inexorable de su propia gravedad, el núcleo de la estrella se colapsa velozmente. En cuestión de segundos, el colapso y el aumento concomitante en la temperatura desencadenan una monstruosa explosión: una supernova. Ahora hay suficiente energía para hacer elementos más pesados que el hierro. Como secuela del estallido, una inmensa nube de todos los elementos tanto propios como hechos por la estrella se esparcen por el vecindario estelar. Y considérese los principales ingredientes de la nube: átomos de hidrógeno, helio, oxígeno, carbono y nitrógeno. ¿Suena familiar? Salvo por el helio, el cual es químicamente inerte, dichos elementos representan los principales materiales de la vida como la conocemos. Dada la increíble variedad de moléculas que esos átomos pueden formar, consigo mismo y con otros, constituyen también materiales de la vida como *no* la conocemos.

El universo ya está listo y dispuesto para formar las primeras moléculas en el espacio y construir la siguiente generación de estrellas.

* * * *

SI LAS NUBES DE GAS deben hacer moléculas de largo aliento, tienen que contar con más que los ingredientes adecuados. También deben estar frías. En nubes que están a temperaturas mayores de unos pocos miles de grados, las partículas se mueven demasiado

rápido, y por ello las colisiones atómicas son demasiado potentes para articularse entre sí y sostener moléculas. Aun si un par de átomos lograra unirse y formar una molécula, otros átomos pronto se estrellarían contra ellos con la fuerza suficiente para separarlos. Las altas temperaturas y los impactos a alta velocidad que tan buenos fueron para la fusión, ahora son contraproducentes para la química.

Las nubes de gas viven vidas largas y felices mientras las sostienen los turbulentos movimientos de sus focos internos de gas. Ahora bien, ocasionalmente, las regiones de una nube se desaceleran lo suficiente, y se enfrían lo suficiente, para que la gravedad triunfe, lo cual ocasiona que la nube se colapse. En efecto, este proceso de formación de moléculas sirve, asimismo, para enfriar la nube: cuando dos átomos chocan y se pegan, alguna de la energía que los llevó a unirse es capturada por su recién formada unión o se emite como radiación.

El enfriamiento tiene un efecto extraordinario sobre la composición de una nube. Ahora los átomos chocan cual botes lentos, unidos y formando moléculas en lugar de destruirlas. Ya que el carbono se une consigo mismo fácilmente, las moléculas basadas en este elemento pueden volverse grandes y complejas. Algunos se entrelazan físicamente, como el polvo que debajo de la cama se convierte en motas. Cuando los ingredientes lo favorecen, lo mismo puede suceder con las moléculas basadas en silicio. Comoquiera, cada partícula de polvo se convierte en un lugar fecundo, con valles y fisuras donde los átomos pueden reunirse a placer y construir

más moléculas. Cuanto más baja la temperatura, mayor el tamaño y la complejidad de las moléculas.

ENTRE LOS COMPUESTOS MÁS antiguos y comunes, apenas la temperatura descendió en unos miles de grados, se encuentran muchas de las moléculas biatómicas y triatómicas, de dos y tres átomos respectivamente. Por ejemplo, el monóxido de carbono (CO) se estabiliza mucho antes de que el carbono se condense en polvo, y el hidrógeno molecular (H₂) se vuelve el principal componente de las nubes de gas en proceso de enfriarse, y adquiere la denominación de *nubes moleculares*. Entre las moléculas triatómicas que se forman a continuación están el agua (H₂O), el bióxido de carbono (CO₂), el cianuro de hidrógeno (HCN), el sulfuro de hidrógeno (H₂S) y el bióxido de azufre (SO₂). Asimismo, está la muy reactiva molécula triatómica H₃⁺, la cual siempre está lista para entregar su tercer protón a sus vecinos hambrientos para que se alimenten, provocando más encuentros químicos.

A medida que la nube se enfría, cuando alcanza una temperatura menor a los 100 K, surgen moléculas más grandes, algunas de las cuales ambulan por el garaje o la cocina: acetileno (C₂H₂), amoníaco (NH₃), formaldehído (H₂CO), metano (CH₄). En nubes aún más frías pueden hallarse los principales ingredientes de otros brebajes: anticongelante (hecho de etilenglicol), licor (alcohol etílico), perfume (benceno) y azúcar (glicolaldehído), así como ácido fórmico, cuya estructura es similar a la de los aminoácidos, las bloques de construcción de las proteínas.

El inventario actual de moléculas a la deriva entre los astros es de cerca de 130. La más grande y compleja de ellas es el antraceno ($C_{14}H_{10}$) y el pireno ($C_{16}H_{10}$), descubiertos en 2003 en la Nebulosa del Rectángulo Rojo, a aproximadamente 2 300 años luz de la Tierra, por Adolf N. Witt de la Universidad de Toledo en Ohio y sus colegas. Formado de anillos interconectados y estables de carbono, el antraceno y el pireno pertenecen a la familia de moléculas que los químicos amantes de las sílabas llaman *hidrocarbonos policíclicos aromáticos*, o Pah. Y así como las moléculas más complejas en el espacio se basan en el carbono, por supuesto los humanos también.

* * * *

LA EXISTENCIA DE LAS MOLÉCULAS en el espacio libre, que ahora se da por sentado, era mayormente desconocida a los astrofísicos hasta 1963, bastante tardíamente, dado el estado de las otras ciencias. La molécula del ADN ya ha sido descrita. La bomba atómica, la bomba de hidrógeno y los misiles balísticos ya habían sido «perfeccionados». El programa espacial *Apollo* para llevar astronautas a la Luna estaba en curso. Once elementos más pesados que el uranio habían sido creados en laboratorio.

Este déficit astrofísico fue resultado de que todavía no se abría una ventana del espectro electromagnético: las microondas. Como vimos en el capítulo 3, la luz absorbida y emitida por moléculas yace por lo general en la parte de microondas del espectro, por lo que fue hasta que aparecieron los telescopios de microondas en los años sesenta que la complejidad molecular del universo se reveló en todo su esplendor. Pronto, las turbias regiones de la Vía Láctea se

mostraron como agitadas fábricas químicas. El hidroxilo (OH) fue detectado en 1963, el amoniaco en 1968, el agua en 1969, el monóxido de carbono en 1970, el alcohol etílico en 1975, todos mezclados en un coctel gaseoso en el espacio interestelar. Para mediados de los años setenta, habían sido halladas las señales en microondas de casi 40 moléculas. Las moléculas tienen una estructura definida, pero las ligas de electrones que mantienen unidos a los átomos no son rígidas: se sacuden y contonean, se retuercen y estiran. De tal modo, las microondas poseen la gama exacta de energía para estimular esta actividad. (Así es como funcionan los hornos de microondas: un baño de microondas con la energía suficiente hace vibrar las moléculas de agua de su comida. La fricción entre tales partículas danzantes genera calor, cocinando velozmente los alimentos que están adentro).

Al igual que los átomos, cada especie de moléculas en el espacio se identifica con el singular patrón de componentes en su espectro. Dicho patrón puede compararse con los catalogados en los laboratorios terrestres; sin la información del laboratorio, a menudo complementado con cálculos teóricos, no sabríamos qué estamos viendo. Cuanto mayor es la molécula, mayor el número de vínculos que la mantienen unida, y mayor las formas como estos pueden contonearse y sacudirse, cada uno de dichos movimientos con una longitud de onda espectral característica o «color»; algunas moléculas usurpan centenares o miles de «colores» a lo largo del espectro de microondas, longitudes de ondas que absorben o emiten luz cuando sus electrones se dispersan. Y es difícil extirpar la señal

de alguna molécula de las demás, como identificar el sonido de su bebé en un cuarto de niños que gritan durante el recreo. Es difícil, pero se puede hacer. Lo que se necesita es una aguda conciencia de qué sonidos hace su niño. Ese es su modelo de laboratorio.

* * * *

YA FORMADA, UNA MOLÉCULA no necesariamente lleva una vida estable. En regiones donde nacen estrellas extremadamente candentes, la luz estelar implica copiosas cantidades de rayos ultravioleta, que son malas para las moléculas, por cuanto su intensa energía rompe los lazos entre los átomos que conforman la molécula. Por eso los rayos ultravioletas son malos para la salud humana: es siempre bueno evitar aquello que descompone las moléculas de nuestra piel. Así que hay que olvidarse de que una gigantesca nube de gas puede ser lo bastante fría como para que las moléculas se formen adentro; si el vecindario está bañado de rayos ultravioleta, sus moléculas serán calcinadas. Y cuanto mayor sea la molécula, menos puede soportar tal ataque.

Algunas nubes interestelares son tan grandes y densas, empero, que sus capas exteriores pueden proteger las interiores. Los rayos ultravioletas son detenidos en las inmediaciones del pueblo por moléculas que dan la vida con tal de proteger a sus hermanos que se encuentran adentro, lo cual retiene la química compleja de las nubes frías.

Sin embargo, tarde o temprano el carnaval molecular llega a su fin. Apenas el centro de la nube de gas, o cualquier foco de gas, se densifica y enfría, la energía promedio de las partículas de gas se

vuelve muy débil para impedir que la estructura se colapse bajo su propio peso. Esa disminución gravitacional espontánea eleva la temperatura, lo cual convierte la otrora nube de gas en un punto de calor incandescente a medida que empieza la fusión termonuclear. Y nace otra estrella.

* * * *

INEVITABLEMENTE, INEXORABLEMENTE, e inclusive podemos decir que trágicamente, los enlaces químicos, incluyendo todas las moléculas orgánicas que la nube fabricó con diligencia en su camino al estrellato, ahora se deshacen en el lacerante calor. Sin embargo, las regiones más difusas de la nube de gas se libran de este destino. Y luego se tiene el gas lo bastante cerca de la estrella para que quede atrapado por la fuerza de gravedad, pero no lo suficientemente cerca como para ser atraído por la estrella misma. Dentro de ese capullo de gas polvoriento, discos espesos de material en condensación entran en órbita segura alrededor de la estrella, dentro de los cuales moléculas viejas pueden sobrevivir y las nuevas formarse libremente.

Lo que tenemos ahora es un sistema solar en proceso, que pronto tendrá planetas y cometas ricos en moléculas. Apenas haya materia sólida, puede hacerse lo que sea. Las moléculas pueden engordar a placer. Si se libera el carbono en esas circunstancias, pueden obtenerse inclusive las composiciones químicas más complejas. ¿Cuán complejas? Tienen otro nombre: biología.

23. Ricitos de oro y los tres planetas

Erase una vez, hace unos cuatro mil millones de años, cuando casi había terminado la formación del sistema solar. Venus se había formado tan cerca del Sol que el intenso calor evaporó su probable dotación de agua. Marte, en cambio, se ubicó tan lejos que sus aguas se congelaron. Y hubo solo un planeta, la Tierra, cuya distancia era «justo la correcta» para que el agua permaneciera líquida y para que su superficie acogiera la vida. Esta región alrededor del Sol se ha llamado la zona habitable.

También a Ricitos de Oro (con fama de cuento de hadas) le gustaban las cosas «justamente correctas». Uno de los platos de sopa estaba muy caliente, y el otro, muy frío; pero la temperatura del tercero era «justo la correcta», ni muy frío ni muy caliente, así que se lo tomó. Asimismo, en la casa de los tres ositos una cama era demasiado dura, la otra era muy blanda, pero la tercera era «perfectamente mullida», así que ella se acostó en esa. Cuando los tres osos regresaron a su casa, no solo descubrieron que les faltaba una sopa, sino también a Ricitos de Oro dormida en una cama (no recuerdo cómo termina este relato, pero de haber sido uno de los tres osos, omnívoros y a la cabeza de la cadena alimenticia, me habría comido a Ricitos de Oro).

La relativa habitabilidad de Venus, la Tierra y Marte intrigaría a Ricitos de Oro, pero la verdadera historia de estos planetas es algo más complicado que tres platos de sopa. Hace cuatro mil millones de años cometas ricos en agua y asteroides ricos en minerales golpeaban las superficies de los planetas, aunque a un ritmo menor que antes. Durante este juego de billar cósmico, algunos planetas

habían inmigrado hacia las órbitas interiores, mientras que otros se habían desplazados a las exteriores. Y entre las decenas de planetas que se formaron, algunos estaban en órbitas inestables y se estrellaron contra el Sol o Júpiter; otros fueron expulsados del sistema solar. Al final, los pocos que permanecieron estaban en órbitas que eran «justo las correctas» para sobrevivir por miles de millones de años.

La Tierra se asentó en una órbita a una distancia promedio de 150 millones de kilómetros del Sol, donde se intersecta dos mil millonésimas de la energía que el Sol irradia. Si se asume que la Tierra absorbe toda la energía del Sol, entonces la temperatura promedio terrestre sería de como 280 K (10 grados C), intermedia entre las del invierno y el verano. A una presión atmosférica normal, el agua se congela a 273 K y hierve a 373 K, de modo que estamos en un lugar perfecto para que casi toda el agua terrestre se mantenga en un feliz estado líquido.

Pues... más o menos. A veces la ciencia puede dar la respuesta correcta por las razones equivocadas. En realidad, el agua absorbe solo dos tercios de la energía que recibe del Sol, el resto es reflejado al espacio por la superficie terrestre (en especial por los océanos) y por las nubes. Si la reflexividad se factorizara en las ecuaciones, entonces la temperatura promedio de la Tierra disminuiría a casi 255 K, la cual está muy por debajo del punto de congelación del agua. Algo debe estar aumentando la temperatura promedio de modo que esta sea un poco más cómoda.

Pero... un momento. Todas las teorías de la evolución estelar dicen que hace cuatro mil millones de años, cuando se formaba la vida dentro de la sopa primordial de la Tierra, el Sol era un tercio menos luminoso que hoy en día, lo cual significa que la Tierra se estaba congelando.

Tal vez en el pasado distante, la Tierra estaba más cerca del Sol. Pero al cabo de un periodo de fuerte bombardeo, ningún mecanismo conocido pudo cambiar una órbita estable en el sistema solar. Tal vez el efecto invernadero era antes más fuerte. No se sabe con certeza. Lo que sí se sabe es que las zonas habitables, como fueron concebidas originalmente, son de importancia periférica respecto de la posibilidad de vida en un planeta.

La famosa ecuación de Drake, invocada en la búsqueda de inteligencia extraterrestre, proporciona un estimado sencillo del número de civilizaciones que se podrían esperar en la Vía Láctea. Cuando el astrónomo estadounidense Frank Drake concibió dicha ecuación en los años sesenta, el concepto de zona habitable se limitaba a la idea de que podía haber vida en algunos planetas que estuvieran justo a la «correcta» distancia de sus estrellas anfitrionas. Una versión de la ecuación reza: «Empiece con el número de astros en la galaxia (centenas de miles de millones); multiplíquelos por la fracción de estrellas con planetas; multiplique el resto por los planetas en la zona habitable; multiplique el resto por la fracción de planetas con vida evolucionada; multiplique el resto por aquellos planetas con vida inteligente; multiplique el resto por la fracción que haya desarrollado tecnología para poderse

comunicar con el espacio interestelar; finalmente, al introducir un ritmo de formación de estrellas y la esperanza de vida de una civilización tecnológicamente viable, se obtiene un número de civilizaciones avanzadas que en este momento están esperando nuestra llamada telefónica».

Las estrellas pequeñas, frías, de tenue luminosidad, viven por centenas de millares de millones y posiblemente billones de años, lo cual daría suficientemente tiempo a los planetas para que se pueda desarrollar vida en ellos, pero sus zonas habitables se hallan muy cerca de la estrella anfitriona. Un planeta que se forma ahí pronto queda atrapado por el acoplamiento de marea y siempre muestra la misma cara hacia la estrella (como la Luna siempre lo hace ante la Tierra), lo cual crea un tremendo desequilibrio en el calentamiento del planeta; así, toda el agua del lado cercano a la estrella se evaporaría, mientras que la del lado oscuro se congelaría. Si Ricitos de Oro viviera ahí, la encontraríamos comiendo sopa al mismo tiempo que da vueltas en círculos, como pollo rostizado, en el límite entre el día eterno y la noche eterna. Otro problema con las zonas habitables en torno a estas longevas estrellas es que son extremadamente estrechas; un planeta en una órbita aleatoria difícilmente se hallaría en una órbita que es justo la «correcta».

Por el contrario, las estrellas grandes, calientes y luminosas poseen enormes zonas habitables donde se pueden hallar planetas. Infortunadamente, dichos astros son poco numerosos y viven durante unos pocos millones de años antes de estallar, por lo que sus planetas representan candidatos poco viables en la búsqueda de

vida extraterrestre, a menos que ocurriera alguna evolución muy veloz. Pero los animales que pueden hacer cálculo avanzado probablemente no saldrían primero de la baba primordial.

Se podría concebir la ecuación de Drake como matemáticas de Ricitos de Oro, un método para explorar las posibilidades de conseguir cosas buenas, es decir, en condiciones ideales. Pero tal como ha sido concebida, la ecuación se equivoca con Marte, el cual se halla en la zona habitable del Sol. Este planeta muestra numerosos arroyos, deltas y planicies aluviales secos, que constituyen evidencia palpable de la presencia de agua en el pasado marciano.

¿Y qué tal Venus, el planeta hermano de la Tierra? Está muy dentro de la zona habitable del Sol. Completamente cubierto de nubes, este planeta tiene la mayor reflexividad en el sistema solar. No hay una obvia razón por la cual Venus no debiera ser un lugar muy cómodo. Pero sufre de un monstruoso efecto invernadero. Su densa atmósfera de bióxido de carbono atrapa casi el 100% de la poca radiación que le llega a la superficie. A 750 K (482 grados C), Venus es el planeta más caliente del sistema solar, aunque orbita a casi el doble de la distancia entre Mercurio y el Sol.

Si la Tierra ha sostenido la evolución continua de la vida a lo largo de miles de millones de años tormentosos y dramáticos, entonces tal vez la vida misma proporciona un mecanismo de retroalimentación que conserva el agua líquida. Esto fue planteado por los biólogos James Lovelock y Lynn Margulis en los años setenta con el nombre de la *hipótesis Gaia*. Esta idea influyente, aunque controvertida,

exige que la mezcla de especies en la Tierra en cualquier momento actúe como un organismo colectivo que de manera continua (pero inadvertida) sintonice la composición atmosférica y el clima de la Tierra para promover la presencia de la vida, y, por consiguiente, la de agua líquida. Me intriga la idea. Se ha vuelto muy popular dentro del movimiento *New Age*, pero me parece que algunos marcianos o venusinos muertos plantearon lo mismo acerca de sus planetas hace mil millones de años.

* * * *

EL CONCEPTO DE UNA ZONA habitable, cuando se amplía, requiere simplemente una fuente de energía que licúe el agua. Una de las lunas de Júpiter, la helada Europa, es calentada por las fuerzas de marea del campo gravitacional del gran planeta. Como una pelota de ráquetbol que se calienta por los golpes que recibe, Europa experimenta la tensión de que Júpiter jale un lado de la luna más que el otro. ¿La consecuencia? Las evidencias observacionales y teóricas sugieren que bajo la superficie de hielo de un kilómetro de grosor yace un mar de agua líquida, posiblemente de aguanieve. Dada la fecundidad de la vida bajo los océanos terrestres, Europa es el lugar más atractivo para la vida extraterrestre en el sistema solar.

Otro descubrimiento reciente para nuestro concepto de una zona habitable son los extremófilos recién clasificados, los cuales son formas de vida que viven en condiciones climáticas extremas. Si hubiera biólogos entre los extremófilos, seguramente se clasificarían como normales y cualquier forma de vida que viviera a temperatura

ambiente se consideraría un extremófila. Entre ellos se hallan los termófilos, que aman el calor; habitan en las dorsales centro-oceánicas, donde el agua presurizada, calentada más allá de su punto de ebullición, escapa de debajo de la corteza terrestre hacia la fría cuenca oceánica. Las condiciones no difieren de las de una olla de presión, donde la presión es suplida por un poderoso recipiente con una tapa y el agua se calienta más que el punto de ebullición normal sin que esta hierva efectivamente.

En el frío suelo oceánico, los minerales disueltos salen disparados de los respiraderos de agua caliente y forman porosas chimeneas de hasta 12 pisos de altura, cálidos en la corteza y fríos en los bordes, donde entran en contacto con el agua del océano. A lo largo de este rango de temperatura viven incontables formas de vida que jamás han visto el Sol, y ni falta que les hace. Estas resistentes especies viven de la energía geotérmica, la cual es una combinación del calor remanente del proceso de formación de la Tierra y del calor que continuamente sale de la corteza terrestre debido al desgaste radioactivo de los inestables isótopos de elementos químicos familiares, tales como el aluminio 26, que dura millones de años, y el potasio 40, que dura miles de millones de años.

En el suelo oceánico se encuentra lo que pudiera ser el ecosistema más estable en la Tierra. ¿Y si un gigantesco asteroide se estrellara contra la Tierra y destruyera toda la vida en la superficie? Los termófilos oceánicos de seguro continuarían con sus vidas intactos. Incluso podrían evolucionar para repoblar la Tierra tras cada episodio de extinción. ¿Y si el Sol fuese desplazado misteriosamente

del centro del sistema solar y la Tierra saliera de órbita quedando a la deriva en el espacio? De seguro los termófilos no se inmutarían. Pero en cinco mil millones de años el Sol se convertirá en una gigante roja a medida que se expanda para engullir a todo el sistema solar interior. Entretanto, los océanos terrestres se evaporarán, lo mismo que la Tierra misma. Eso sí que sería grave.

Si los termófilos están tan extendidos en la Tierra, queda una pregunta profunda: ¿habría vida en las profundidades de aquellos planetas expulsados del sistema solar durante su formación? Estos embalses geotérmicos pueden durar miles de millones de años. ¿Qué tal los incontables planetas que han sido expulsados de los demás sistemas solares? ¿Puede el espacio interestelar estar lleno de vida formada y que haya evolucionado dentro de esos planetas vagabundos? Lejos de ser una pulcra región alrededor de un astro, que recibe tan solo la cantidad adecuada de luz solar, la zona habitable se halla en verdad dondequiera. Así que la casita de los tres osos estaba, tal vez, no en un lugar especial entre los cuentos de hadas. La casa de quien sea, hasta la de los tres cochinitos, podría contener un plato de sopa a una temperatura perfecta. Hemos aprendido que la fracción correspondiente de la ecuación de Drake, la que representa la existencia de un planeta dentro de una zona habitable, pudiera ser tan grande como el 100 por ciento.

Cuán esperanzador es este cuento de hadas. La vida, en lugar de ser algo raro y precioso, pudiera ser tan común como los planetas mismos.

Y las bacterias termofilicas vivieron por siempre, como unos cinco mil millones de años.

24. Agua, agua

A partir de las imágenes de algunos lugares secos y repelentes en el sistema solar, podría pensarse que el agua, aunque abundante en la Tierra, es rara en la galaxia. Pero de todas las moléculas con tres átomos, las del agua son las más abundantes. Y en el escalafón de la abundancia de elementos cósmicos, sus componentes —el hidrógeno y el oxígeno— figuran en los lugares uno y tres. Así que en lugar de preguntar por qué en algunos lugares hay agua, podemos aprender más preguntando por qué no la hay en todos lados.

Empezando en el sistema solar, si se buscara un lugar sin agua ni aire para visitar, es fácil dar con la Luna. El agua se evapora velozmente en sus días de dos semanas de duración a 93 grados C y su presión atmosférica cercana a cero. Durante una noche de dos semanas la temperatura puede descender a 250 grados bajo cero, una condición que congela lo que sea.

Para viajar a la Luna, los astronautas del *Apollo* llevaron consigo todo el aire y el agua que necesitaban para la ida y el regreso, pero las misiones del futuro distante pudieran no requerir agua ni productos semejantes. Evidencias de la sonda orbital lunar *Clementine* permiten sostener que allá pudiera haber lagos congelados en el fondo de los profundos cráteres cerca de los polos norte y sur de la Luna. Si se asume que la Luna sufre un número

promedio anual de impactos debido a los detritos interplanetarios, entonces la mezcla de objetos que impactan debieran incluir cometas ricos en agua. ¿Cuán grandes? El sistema solar contiene muchos cometas que al derretirse podrían formar un charco del tamaño del lago Erie.

Aun cuando no se podría esperar que un lago recién formado sobreviviera muchos calurosos días lunares a 200 grados, cualquier cometa que chocase y se evaporara regaría algunas de sus moléculas de agua en el fondo de los profundos cráteres cercanos a los polos. Dichas moléculas se hundirían en el suelo lunar donde permanecerían por siempre por cuanto dichos lugares son los únicos donde «el Sol no brilla». (Si se piensa que la Luna tiene un lado oscuro perpetuo, entonces se ha sido engañado por varias fuentes, entre las cuales se encuentra el álbum de Pink Floyd, *Dark Side of the Moon*, de 1973).

Como bien saben los habitantes ávidos de Sol del Ártico y la Antártida, el Sol jamás se eleva en lo alto en ningún momento del día o del año. Imagínese vivir en el fondo de un cráter cuyo borde se halla más alto que el nivel más alto que el Sol haya alcanzado. En semejante cráter lunar, donde no hay aire que disperse la luz solar para que proyecte sombras, se viviría en la penumbra eterna.

* * * *

AUNQUE EN EL CONGELADOR el hielo se evapore (tan solo hay que ver los cubitos en la charola al cabo de unas vacaciones), en el fondo aquellos cráteres son tan fríos que la evaporación es imposible. Sin duda, si estableciéramos un puesto de avanzada en

la Luna, sería bueno que se ubicara cerca de tales cráteres. Aparte de las obvias ventajas de contar con hielo que derretir, filtrar y beber, se puede, asimismo, separar el hidrógeno del oxígeno. Se puede usar el hidrógeno y parte del oxígeno como ingredientes activos para combustible para cohetes y puede conservarse el resto para respirarlo. Y en los ratos de ocio entre las misiones espaciales, siempre se puede ir a patinar en el lago congelado creado con el agua extraída.

A sabiendas de que la Luna ha sido golpeada por diversos objetos, como muestran sus cráteres, entonces pudiera esperarse que también la Tierra ha sido golpeada. Dado el mayor tamaño y gravedad de nuestro planeta, pudiera incluso esperarse que hubiera sido golpeada mucho más. Lo ha sido: desde su nacimiento hasta nuestros días. En el principio, la Tierra no surgió del vacío interestelar como una masa esférica ya formada. Creció de la misma nube de gas protosolar en condensación de donde salieron los demás planetas y el Sol. La Tierra siguió creciendo, acumulando partículas sólidas por medio de incesantes impactos con asteroides ricos en minerales y cometas ricos en agua. ¿Cuán incesantes? En un principio el ritmo de impactos pudo haber sido tan alto como para dotar al planeta de sus océanos. Pero el tema aún es incierto y controvertido. Al compararse con el agua de los océanos terrestres, el agua de los cometas que se ha observado hoy en día es anómalamente rica en *deuterio*, una forma de hidrógeno que contiene un neutrón adicional en su núcleo. Si los océanos fueron producto de impactos de cometas, entonces los cometas que se

impactaron en la Tierra durante el inicio de la formación de sistema solar debieron haber tenido una composición química algo diferente. Y justo cuando se pensaba que no había moros en la costa, un estudio reciente acerca del nivel de agua en la atmósfera superior de la Tierra sugiere que nuestro planeta recibe regularmente impactos de trozos de hielo del tamaño de casas. Estas bolas de nieve interplanetarias se evaporan de inmediato al chocar con el aire, pero contribuyen al presupuesto acuático de la Tierra. El ritmo observado ha sido constante a lo largo de los 4.6 mil millones de años de la Tierra; estas bolas de nieve también pudieran ser responsables de los océanos. Al agregarse al vapor de agua que despiden los volcanes, no faltan modos por los cuales la Tierra ha podido hacerse de agua.

Actualmente, nuestros poderosos océanos abarcan dos tercios de la superficie terrestre, pero solamente unas cinco milésimas de la masa total de la Tierra. Si bien representa una pequeña fracción del total, los océanos pesan 1.5 millones de billones de toneladas, 2% de los cuales están congelados. Si la Tierra alguna vez sufriera un efecto invernadero fuera de control (como el que sucedió en Venus), nuestra atmósfera atraparía cantidades excesivas de energía solar, la temperatura del aire aumentaría y los océanos se evaporarían velozmente en un hervor tremendo. Esto sería malo. Aparte de lo obvio: la flora y la fauna morirían, y parte de la mortalidad se debería a que la atmósfera terrestre se volvería 300 veces más masiva a medida que se densifique con vapor de agua. Seríamos aplastados.

Muchas características distinguen a Venus de los demás planetas en el sistema solar, incluyendo su atmósfera densa de bióxido de carbono con una presión atmosférica 100 veces la de la Tierra. Allí también seríamos aplastados. Pero me parece que el rasgo más peculiar de Venus son sus cráteres relativamente jóvenes y distribuidos uniformemente por la superficie. Esta característica aparentemente inocua implica una sola catástrofe planetaria que borró toda seña de los impactos anteriores. Una inundación de magnitud planetaria podría lograrlo, así como una gran actividad geológica (¿venusiológica?), tales como flujos de lava, que convirtieron toda la superficie venusina en un sueño para un automovilista estadounidense: un planeta totalmente pavimentado. Lo que haya reseteado el reloj, debió de haber concluido de manera abrupta. Pero las preguntas siguen sin responderse. Si, en efecto, hubo una inundación planetaria en Venus, ¿adónde fue a parar el agua? ¿Se hundió bajo la superficie? ¿Se habrá evaporado en la atmósfera? ¿O dicha inundación estaba compuesta de una sustancia que no era agua?

* * * *

NUESTRA FASCINACIÓN (e ignorancia) planetaria no se limita a Venus. Con sinuosos lechos, planicies aluviales, deltas ribereños, redes de tributarios y cañones, Marte fue una vez un abrevadero. La evidencia es lo suficientemente fuerte para declararlo como el único lugar, aparte de la Tierra, en haber tenido agua en abundancia. Por razones desconocidas, actualmente la superficie marciana está seca.

Cada vez que miro a Venus y Marte, veo a la Tierra y me pregunto cuán frágil puede ser nuestro abasto de agua.

Como bien sabemos, las observaciones más imaginativas de Percival Lowell lo llevaron a suponer que colonias de civilizados marcianos habían erigido una compleja red de canales para redistribuir el agua de las capas de hielo polares hacia los centros urbanos más poblados en las latitudes medias. Para explicar lo que veía, creyó que era una civilización moribunda que de alguna manera se estaba quedando sin agua. En su minucioso pero curiosamente errado tratado, titulado *Mars as the Abode of Life* [Marte como la morada de la vida], publicado en 1909, Lowell lamenta el inminente final de la civilización marciana que creyó haber avistado: «La desecación del planeta seguirá hasta que la superficie ya no pueda sostener la vida. Lenta pero seguramente el tiempo se la acabará. Cuando se haya apagado la última llama, el planeta se convertirá en un mundo muerto que deambula por el espacio, su carrera evolucionaria concluida para siempre» (p. 216).

Lowell tuvo un acierto. Si hubo una civilización (o cualquier forma de vida) que requiriera agua en la superficie marciana, entonces en algún momento desconocido en su historia, y por alguna razón desconocida, el agua de la superficie se secó, conduciendo la vida al destino que Lowell describió. El agua desaparecida de Marte bien pudiera yacer debajo del permafrost del planeta. ¿La evidencia? Con toda probabilidad, sus grandes cráteres, en lugar de los pequeños, pudieran tener depósitos de barro seco en sus bordes. Si se asume que el permafrost puede ser muy profundo, para alcanzarlo sería

necesaria una fuerte colisión. El depósito de energía de tal impacto derretiría de inmediato el hielo subyacente que se esparciría. Cráteres como estos son comunes en las latitudes polares, justo donde pudiera esperarse que la capa de permafrost estuviera más cerca de la superficie. Según algunos estimados, si toda el agua que se supone que se oculta debajo del permafrost marciano y en los polos se derritiera y se distribuyera equitativamente por el planeta, Marte tendría océanos de decenas de metros de profundidad. Una búsqueda concienzuda en pos de vida contemporánea (o de fósiles) en Marte debe incluir un plan para buscar en diversos lugares, en especial debajo de la superficie marciana.

Al pensar en dónde pudiera estar el agua líquida (y la vida, por asociación), los astrofísicos originalmente consideraron planetas que orbitaran a la justa distancia de su estrella anfitriona, es decir, lo suficiente como para que el agua estuviera en estado líquido: ni demasiado lejos ni demasiado cerca. Esta zona habitable, inspirada en Ricitos de Oro —como se ha llamado— fue un buen punto de partida. Pero no tomaba en cuenta la posibilidad de vida en lugares en los que fueran otras las fuentes de energía responsables de conservar el agua como líquido cuando, de otra manera, se habría congelado. Lo lograría un moderado efecto invernadero, lo mismo una fuente interna de energía, tal como el calor remanente del proceso de formación del planeta o la descomposición radioactiva de elementos pesados inestables, cada uno de los cuales contribuye al calor residual y la subsecuente actividad geológica de la Tierra.

Otra fuente de energía son las mareas planetarias, concepto más general que simplemente la danza entre la Luna y el océano. Como hemos visto, Ío, una luna de Júpiter, se tensa debido a sus cambiantes mareas a medida que se aproxima o se aleja del planeta durante su órbita casi circular. A una distancia del Sol que garantizaría un mundo siempre congelado, el grado de tensión de Ío lo califica como el lugar geológicamente más activo de todo el sistema solar, con todo y volcanes en erupción, fisuras en la superficie y placas tectónicas. Algunos la han comparado con la Tierra en sus años mozos, cuando nuestro planeta estaba todavía ardiendo tras su formación.

Otra fascinante luna de Júpiter es Europa, la cual también se calienta gracias a la atracción gravitacional de Júpiter. Como se ha sospechado por algún tiempo, se ha confirmado (gracias a las imágenes tomadas por la sonda *Galileo*) que Europa es un mundo cubierto por capas de denso hielo que se desplaza sobre un océano de aguanieve o agua líquida. ¡Un océano de agua! Imagínese ir allá a pescar en el hielo. En efecto, ingenieros y científicos del Jet Propulsion Laboratory están considerando una misión en la cual una sonda desciende, encuentra (o corta o derrite) un agujero en el hielo y suelta una cámara sumergible para echar un vistazo. En virtud de que los océanos se consideran el lugar donde surgió la vida en la Tierra, la existencia de vida en Europa es una fantasía posible.

En mi opinión, la característica más asombrosa del agua no es su bien ganada cualidad de «solvente universal» que aprendimos en la

clase de química, ni su rango de temperaturas tan inusualmente amplio durante el cual se mantiene líquida; como hemos visto, su cualidad más asombrosa es que, aun cuando la mayoría de las cosas —incluyendo el agua— se encogen y se vuelven más densas cuando se enfrían, el agua se expande cuando se enfría a menos de 4 grados Celsius, volviéndose cada vez menos densa. Cuando el agua se congela a cero grados, se vuelve menos densa que a cualquier temperatura cuando está en estado líquido, lo cual es un problema para los tubos de drenaje pero buenísimo para los peces. En el invierno, cuando el aire está helado, el agua a 4 grados se hunde al fondo y ahí permanece, mientras que una capa flotante de hielo se forma muy lentamente en la superficie, con lo que aísla el agua más cálida que se halla debajo.

Sin esta inversión de la densidad a menos de 4 grados, si la temperatura exterior descendiera por debajo del punto de congelamiento, la superficie del agua se enfriaría y se hundiría al fondo a medida que el agua más cálida emergiera. Esta convección forzada reduciría velozmente la temperatura del agua a cero grados, y congelaría la superficie. El hielo más denso y sólido se hundiría al fondo y obligaría al cuerpo de agua a congelarse de abajo arriba. En tal mundo, no habría pesca en hielo porque los peces estarían muertos, bien congelados. Y los pescadores estarían sentados en una capa de hielo que ya estaría sumergida o encima de un mar completamente congelado. No se necesitarían rompehielos para cruzar el helado Ártico, ya que dicho océano estaría enteramente congelado o las partes heladas se habrían hundido al fondo, y se

podría surcar el mar sin problema. O se podría caminar encima sin temor a caer dentro. En este mundo alterado, los cubitos de hielo y los témpanos se hundirían, y en 1912 el *Titanic* habría llegado al puerto de la ciudad de Nueva York.

La existencia de agua en la galaxia no se limita a los planetas y sus lunas. Las moléculas de agua, así como otras sustancias químicas, tales como el amoniaco, el metano y el alcohol etílico, se hallan de manera rutinaria en las frías nubes de gas interestelar. En condiciones especiales de baja temperatura y alta densidad, un grupo de moléculas de agua puede ser incitado para transformar y canalizar energía de una estrella cercana en un rayo de microondas amplificado y de alta intensidad. La física atómica de este fenómeno se asemeja mucho a lo que ocurre con la luz visible dentro de un láser, pero en este caso el acrónimo es MASER (Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation, o Amplificador de Microondas por la Emisión Estimulada de Radiación). El agua no solamente se halla dondequiera en la galaxia, sino que ocasionalmente llega en forma de rayo.

Si bien se sabe que el agua es esencial para la vida en la Tierra, solo se puede suponer que es un prerrequisito de la vida en la galaxia. Sin embargo, entre los ignaros en química, el agua es una sustancia mortífera que debe evitarse. En 1997 un estudiante de 14 años de edad, Nathan Kohner, llevó a cabo un experimento muy famoso en una feria científica en la Escuela Superior de Eagle Rock, Idaho, que ponía a prueba los sentimientos anti tecnológicos y el miedo a la química de una comunidad. Invitó a la gente a firmar una petición

para exigir un mayor control o una prohibición total del monóxido de di hidrógeno; mencionó algunas de las propiedades de esta sustancia inodora e incolora:

- Es el principal componente de la lluvia ácida.
- Tarde o temprano disuelve casi todo aquello que entra en contacto con ella.
- Puede matar a una persona si la inhala.
- En estado gaseoso puede causar quemaduras.
- Ha sido hallado en los tumores cancerosos.

Cuarenta y tres de cada 50 personas abordadas por Zohner firmaron la petición, seis estaban indecisos, y uno resultó un gran partidario del monóxido de di hidrógeno, así que se negó a firmar. Sí, 86% de los transeúntes votaron para prohibir el agua (H₂O) del medioambiente.

Tal vez eso fue lo que en verdad le pasó al agua en Marte.

25. Espacio vital

Cuando se pregunta a las personas de dónde provienen, suelen responder con el nombre de la ciudad donde nacieron, o tal vez del lugar en la superficie terrestre donde pasaron sus años formativos. Esto no tiene nada de malo. Pero una respuesta astro químicamente más rica sería: «Vengo de los restos explosivos de una multitud de astros masivos que murieron hace cinco mil millones de años».

El espacio exterior es la máxima fábrica química. La fundó el *big bang*, que dotó al universo de hidrógeno, helio y una pizca de litio:

los tres elementos más ligeros. Los astros forjaron el resto de los 92 elementos, incluyendo todo el fósforo, el carbono y el calcio de todos los seres vivos de la Tierra. ¡Cuán inútil sería este rico surtido de materias primas si se hubiera quedado guardado en las estrellas! Pero cuando estas mueren, devuelven mucha de su masa al cosmos, y esparcen nubes de gas con una cartera de átomos que enriquecen la siguiente generación de estrellas. En condiciones favorables de temperatura y presión, muchos de los átomos se unen para formar moléculas simples. Entonces, a través de rutas intrincadas y creativas, muchas de ellas crecen y se vuelven más y más complejas. Con el tiempo, en lo que de seguro son millares de millones de lugares en el universo, las moléculas complejas se unen entre sí para constituir alguna forma de vida. En al menos un resquicio cósmico, las moléculas se han vuelto tan complejas que han adquirido consciencia y la capacidad de formular y comunicar las ideas expresadas en esta página.

Sí, no solamente los humanos sino también los demás organismos en el cosmos, así como los planetas y las lunas donde habitan, no existirían de no ser por los restos de las estrellas. Por tanto, estamos hechos de detrito. Hay que superarlo. O, mejor aún, celebrarlo. ¿O acaso pensar que el universo entero vive en todos nosotros no es un pensamiento muy noble?

PARA GUIJAR UN POCO de la vida, no se necesitan ingredientes extraños. Piénsese en los cinco principales componentes del cosmos en el orden de su abundancia: hidrógeno, helio, oxígeno, carbono y

nitrógeno. Descártese el helio, químicamente inerte, el cual no gusta de hacer moléculas con nadie, y se tienen los cuatro constituyentes de la vida en la Tierra. Esperando en la fila dentro de las nubes masivas que se hallan en las estrellas de la galaxia, estos elementos empiezan a fabricar moléculas apenas la temperatura desciende a menos de 2.000 K.

Las moléculas de más de dos átomos se forman temprano: las de monóxido de carbono e hidrógeno (cuyos átomos se juntan en pares). Si se reduce aún más la temperatura, se obtienen moléculas estables de tres o cuatro átomos, tales como el agua (H_2O), bióxidos de carbono (CO_2) y amoniacó (NH_3), ingredientes simples pero fundamentales en la cocina de la vida. Si se reduce aún más la temperatura, se forman hordas de moléculas de cinco o seis átomos, y por cuanto el carbono es al mismo tiempo abundante y químicamente emprendedor, la mayoría de las moléculas lo tienen; en efecto, tres cuartas partes de las «especies» de moléculas vistas en el espacio interestelar tienen al menos un átomo de carbono.

Suena atractivo, pero el espacio puede ser un lugar peligroso para las moléculas. Si la energía de las explosiones estelares no las destruye, la luz ultravioleta de alguna estrella ultra luminosa cercana lo hará. Cuanto mayor es la molécula, menos estable será al enfrentar algún ataque. Las moléculas lo bastante afortunadas para habitar algún vecindario protegido o tranquilo podrían soportar lo suficiente como para incorporarse a los granos de polvo cósmico, y después a los asteroides, cometas, planetas y seres humanos. Aun así, si ninguna de las moléculas sobreviviera a la violencia estelar,

con muchos átomos y tiempo se pueden formar moléculas complejas, no solamente durante la formación de un planeta en particular, sino también sobre y adentro de su núbil superficie. Destacan en su corta lista de moléculas complejas la adenina (uno de los nucleótidos o *bases* que forman el ADN), la glicina (un precursor de proteínas) y el glicolaldehído (un carbohidrato). Tales ingredientes, y algunos de ese orden, son esenciales para la vida como la conocemos y no son exclusivos de la Tierra.

* * * *

PERO LAS ORGÍAS DE MOLÉCULAS orgánicas no constituyen la vida, del mismo modo que la harina, el agua, la levadura y la sal no son el pan. Aunque el salto de los ingredientes a un individuo vivo aún es un misterio, varios requisitos previos están claros. El medioambiente debe animar a las moléculas para que experimenten entre sí, así como guarecerlas de cualquier daño excesivo. Los líquidos ofrecen un ambiente muy atractivo, ya que permiten lo mismo mucho contacto como gran movilidad. Cuanto mayores sean las oportunidades químicas que brinde un medioambiente, más creativos serán sus experimentos. Otro factor crucial, brindado por las leyes de la física, es un flujo generoso de energía que genere reacciones químicas.

Dada la amplia gama de temperaturas, presiones, acidez y radiación en que la vida se desenvuelve, y a sabiendas de que el cómodo resquicio de un microbio puede representar la cámara de tortura de alguna otra criatura, los científicos no pueden por lo pronto estipular los requerimientos adicionales para la vida en otros

espacios. Como demostración de los límites de este ejercicio, tenemos un libro encantador, *Cosmotheoros*, de Christiaan Huygens, astrónomo holandés del siglo XVII, en el cual especula que las formas de vida en otros planetas deben cultivar el cáñamo, pues ¿de qué otra forma pueden navegar sus barcos por alta mar?

Tres siglos más tarde, nos contentamos con una pila de moléculas; agítense y hornéense, y en unas cuantas centenas de millones de años se pueden tener colonias de microorganismos.

* * * *

EN LA TIERRA LA VIDA ES asombrosamente fértil, eso es seguro. Pero ¿qué tal en el resto del universo? Si en algún lugar hubiera algún cuerpo celeste que fuera similar a nuestro planeta, en él bien se podrían llevar a cabo los mismos experimentos con ingredientes químicos similares, que estarían regidos por las mismas leyes físicas que se aplican en todo el universo.

Si se toma en consideración el carbono, su capacidad para ligar a otros elementos y a sí mismo le otorga una exuberancia química sin igual en la tabla periódica. El carbono fabrica más moléculas (¿qué tal diez millones?) que todos los demás elementos en conjunto. Una forma común en que los átomos pueden hacer moléculas es compartiendo uno o más de sus electrones externos acoplados como dos vagones de un tren. De esta forma, cada átomo de carbono puede unirse a uno, dos, tres o cuatro átomos, mientras que el hidrógeno solo puede unirse a uno; el oxígeno, con uno o dos, o el nitrógeno, con tres.

Al unirse entre sí, el carbono puede generar miles de combinaciones de moléculas en una larga cadena, con muchas ramas o en un anillo cerrado. Esas moléculas orgánicas complejas pueden hacer cosas que las más pequeñas solo pueden soñar. Por ejemplo, pueden llevar a cabo una actividad al inicio, y otra distinta al final; pueden retorcerse y entrelazarse con otras moléculas, creando un sinfín de características y propiedades. Tal vez la máxima molécula basada en el carbono es el ADN, una cadena de dos hebras que codifica la identidad de la vida como la conocemos.

¿Y qué hay del agua? Como factor que fomenta la vida, el agua tiene la muy útil propiedad de mantenerse líquida a lo largo de una amplia gama de temperaturas. El problema es que la mayor parte de los biólogos ven hacia la Tierra, donde el agua se mantiene líquida a 100 grados C. Pero en algunos lugares de Marte, la presión atmosférica es tan baja que el agua jamás es líquida: ¡una taza de H₂O recién vertida hierve y se congela al mismo tiempo! Aun así, pese al terrible estado actual del planeta, su atmósfera alguna vez tuvo abundante agua líquida. Si alguna vez el Planeta Rojo albergó la vida, debió ser entonces.

Por supuesto que la Tierra cuenta con una buena, y ocasionalmente mortífera, cantidad de agua en su superficie. ¿De dónde vino? Como hemos visto, los cometas son una fuente lógica: están repletos de agua (congelada) y el sistema solar alberga a miles de millones de ellos; algunos son muy grandes y se habrían estrellado regularmente contra la Tierra cuando se formaba el sistema solar. Otra fuente de agua podría ser la condensación de gases volcánicos,

fenómeno frecuente en la tierra joven. Los volcanes hacen erupción no sencillamente porque el magma está caliente, sino porque el magma ardiente y en ascenso convierte el agua subterránea en vapor, el cual luego se expande explosivamente. El vapor ya no cabe en su cámara subterránea, y por ello el volcán estalla, y lleva su H₂O a la superficie. Así pues, la presencia de agua en nuestro planeta no es algo raro.

* * * *

AUNQUE LA VIDA TERRESTRE tiene muchas manifestaciones, comparte fragmentos comunes del mismo ADN. El biólogo que solo piensa en la Tierra puede celebrar la diversidad de la vida, pero el astrobiólogo sueña con una mayor diversidad: la vida basada en ADN extraterrestre o algo totalmente distinto. Tristemente, nuestro planeta es una sola muestra biológica. Sin embargo, el astrobiólogo puede deducir las formas de vida que se alojan dondequiera en el cosmos mediante el estudio de organismos que habitan en los ambientes extremos de la Tierra.

Apenas uno los busca, puede encontrar extremófilos en prácticamente todas partes: tiraderos nucleares, géiseres llenos de ácido, ríos saturados de hierro, respiraderos que expulsan químicos desde el fondo del océano, volcanes submarinos, el permafrost, las pilas de desechos, los pozos de salinas comerciales y muchos otros lugares que no se pueden elegir para pasar la luna de miel, pero que son típicos en el resto de los planetas y lunas en el cosmos. Alguna vez los biólogos supusieron que la vida había comenzado en «algún pozo de agua cálida», para citar a Darwin ([1874] 1959: 202);

recientemente, empero, el peso de la evidencia se ha inclinado hacia el punto de vista de que los extremófilos fueron las formas más antiguas de vida terrestre.

Como veremos en el siguiente capítulo, durante los primeros 500 millones de años, el sistema solar interno semejaba a una galería de tiro. La superficie de la Tierra era pulverizada continuamente por peñones grandes y chicos que formaban cráteres. Cualquier intento de iniciar la vida hubiera sido velozmente aplastado. Hace cerca de cuatro mil millones de años, la tasa de impactos disminuyó y la superficie terrestre empezó a enfriarse, lo cual permitió que ocurrieran experimentos en química compleja y además sobrevivieran y prosperaran. Los libros de texto más viejos echan a andar sus relojes en el nacimiento del sistema solar y suelen declarar que la vida terrestre se formó en 700 u 800 millones de años. Pero ello es injusto: los experimentos químicos del planeta no habrían podido comenzar sino hasta que el bombardeo no amainara. Si restamos 600 millones de años de impactos, tenemos organismos unicelulares que emergen hace apenas 200 millones de años del caldo primigenio. Aun cuando los científicos siguen discutiendo cómo inició la vida, es claro que la naturaleza no tuvo mayor problema en crear el material.

* * * *

EN UNAS DECENAS DE AÑOS, LOS ASTROQUÍMICOS han pasado de no saber nada acerca de las moléculas en el espacio a hallar una plétora de ellas por doquier. Además, al mismo tiempo los astrofísicos han confirmado que otros planetas orbitan otras

estrellas y que cada sistema exosolar está repleto de los mismos cuatro elementos que se aprecian en nuestro hogar cósmico. Aunque nadie espera hallar vida en una estrella, incluso en uno «frío» de mil grados, la Tierra tiene mucha vida en lugares donde la temperatura registra centenares de grados. En conjunto, tales descubrimientos sugieren que es razonable concebir el universo como un sitio más familiar que extraño.

Pero ¿cuán familiar? ¿Acaso las formas de vida —basadas en carbono y aficionados al agua— se asemejarían a las de la Tierra?

Tomemos por ejemplo el silicio, uno de los 10 principales elementos en el universo. En la tabla periódica, el silicio está debajo del carbono, lo que indica que poseen una misma configuración de electrones en sus capas externas. Como el carbono, el silicio puede unir a dos, tres o cuatro átomos. En condiciones adecuadas, puede formar cadenas de moléculas. Ya que el silicio presenta oportunidades químicas parecidas a las del carbono, ¿por qué no podría la vida basarse en el silicio?

Un problema con el silicio, aparte de su escasez (hay 10 veces más carbono), es que crea fuertes vínculos. Cuando se ligan el silicio y el oxígeno, por ejemplo, no se consiguen las semillas de la química orgánica, se obtienen rocas. En la Tierra, esa química puede tener una vida muy larga. Para obtener una química amigable a los organismos, se necesitan ligas lo suficientemente fuertes como para sobrevivir a ataques moderados al medioambiente, pero no tan fuertes como para no permitir experimentos.

¿Y cuán importante es el agua líquida? ¿Es el único medio idóneo para los experimentos químicos, el único que puede movilizar nutrientes de un organismo a otro? Tal vez la vida necesita el líquido. El amoníaco es común, también el etanol; ambos resultan de los ingredientes más abundantes del universo. Al mezclarse con agua, el amoníaco desarrolla un punto de enfriamiento muy bajo (casi -73 grados C), menor que el del agua (0 grados), lo cual amplía las posibilidades de hallar vida que depende de los líquidos. O cabría otra posibilidad: en un mundo carente de una fuente de calor interno, que orbita lejos de su estrella y es muy frío, el metano, normalmente gaseoso, pudiera ser el líquido adecuado.

EN 2005 LA SONDA *Huygens* (nombrada por ya sabemos quién) de la Agencia Espacial Europea descendió sobre la luna más grande de Saturno, Titán, la cual contiene mucha química orgánica y sostiene una atmósfera 10 veces más densa que la de la Tierra. Aparte de Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, todos ellos hechos de gas, sin superficie sólida, solo cuatro objetos en nuestro sistema solar tienen atmósfera: Venus, Tierra, Marte y Titán.

Titán no era un destino de exploración accidental. Su impresionante currículum de moléculas abarca el agua, el amoníaco, el metano y el etano, así como unos compuestos llamados *hidrocarburos policíclicos aromáticos*. El agua helada está tan fría que es tan dura como el cemento. Pero una combinación de temperatura y presión del aire han licuado el metano, y las primeras imágenes que envió la sonda *Huygens* parecen mostrar arroyos, ríos y lagos de dicha sustancia. En cierta forma, la química de la superficie de Titán es

similar a la de la tierra joven, por lo cual es obvio que algunos astrobiólogos consideren a Titán como un laboratorio viviente para estudiar el pasado lejano de la Tierra. En efecto, experimentos llevados a cabo hace unos 20 años muestran que añadir agua y un poco de ácido al caldo orgánico generado por la irradiación de los gases que forman la atmósfera de Titán produce 16 aminoácidos.

Recientemente, los biólogos han aprendido que el planeta Tierra podría albergar más biomasa subterránea que la que vive en la superficie. Las investigaciones en curso acerca de los hábitos de la vida demuestran una y otra vez que esta conoce pocos límites. Antes estereotipados como científicos locos que buscaban hombrecitos verdes en planetas cercanos, hoy los investigadores que hurgan los límites de la vida son híbridos muy refinados que emplean los instrumentos de la astrofísica, de la biología y la química, así como los de la geología y la paleontología, en pos de la vida aquí, allá y acullá.

26. Vida en el universo

El descubrimiento de centenares de planetas en torno a astros fuera de nuestro sistema solar ha generado un inmenso interés en el público. Esta atención no ha sido incitada por el hallazgo de planetas exosolares, sino por la posibilidad de que alberguen vida inteligente. En todo caso, el frenesí mediático parece desproporcionado con lo que en verdad ha ocurrido. ¿Por qué? Porque los planetas no deben ser un fenómeno raro en el universo si el Sol, una estrella ordinaria, cuenta al menos con ocho de ellos.

Asimismo, los planetas recién descubiertos son todos gigantescas bolas de gas similares a Júpiter, lo que significa que ninguno de ellos tiene superficies sólidas en las que la vida pueda asentarse. Y aunque estuvieran bullendo de vida extraterrestre, las posibilidades de que dicha vida fuera inteligente son astronómicamente adversas. Por lo general, para un científico no hay paso más arriesgado que el que se da cuando se generaliza a partir de un solo ejemplo. En este momento, la vida terrestre es la única que se conoce en el universo, pero hay argumentos convincentes que sugieren que no estamos solos. De hecho, la mayoría de los astrofísicos aceptan que la vida en otra parte es posible. El planteamiento es fácil: si nuestro sistema solar no es inusual, entonces hay tantos planetas en el universo que superan la suma de todos los sonidos y palabras dichas por cada ser humano que haya vivido. Declarar que la Tierra debe de ser el único planeta con vida en el universo sería inexcusablemente presuntuoso.

Muchas generaciones de pensadores religiosos y científicos se han perdido gracias a suposiciones antropocéntricas, en tanto que otras se perdieron por ignorancia. A falta de dogmas y de datos, mejor guiarse por la noción de que no somos especiales, lo que se denomina el *principio copernicano*, así llamado por Nicolás Copérnico, desde luego, quien a mediados del siglo XVI colocó al Sol en el centro del sistema solar, lugar donde debe estar. Pese a un relato del siglo III a. C. respecto de un universo centrado en el Sol, propuesto por el filósofo griego Aristarco, el universo geocéntrico fue muy popular por 2.000 años. Codificado por las enseñanzas de

Aristóteles y Ptolomeo, y más tarde por las enseñanzas de la Iglesia católica romana, la gente aceptaba que la Tierra era el centro de todo el movimiento y el universo conocido. Este hecho era obvio. El universo no solamente se veía así, sino que así lo había hecho Dios. Aun cuando el principio copernicano no garantiza guiarnos por siempre a las verdades cósmicas, ha funcionado muy bien hasta ahora: no solo la Tierra no es el centro del sistema solar, sino que el sistema solar no es el centro de la Vía Láctea, ni la Vía Láctea es el centro del universo; es más, nuestro universo es tan solo uno de muchos que componen un multiverso. Y en caso de que usted sea una de esas personas que piensan que el borde es un lugar muy especial, no estamos en el borde de nada.

* * * *

UNA POSTURA CONTEMPORÁNEA muy sabia sería suponer que la vida en la Tierra no es inmune al principio copernicano. Ello implica preguntarse de qué manera la apariencia o la química de la vida en la Tierra pudiera brindar claves de cómo se vería la vida en alguna otra parte del universo.

No sé si los biólogos ambulan maravillados por la diversidad de la vida. Por cierto, yo lo estoy. En este planeta llamado Tierra, coexisten (entre incontables formas de vida) algas, escarabajos, esponjas, medusas, serpientes, cóndores y secoyas gigantes. Imagínese estos siete organismos vivos alineados uno contra el otro por su tamaño. A primera vista, sería difícil inferir que estas criaturas provienen del mismo universo, y menos del mismo planeta. Trátese de describir una serpiente a alguien que jamás ha

visto una: «Tienes que creerme: en la Tierra hay un animal que 1) persigue a su presa con detectores infrarrojos, 2) se traga animales completos que son cinco veces más grandes que su cabeza, 3) no tiene brazos ni piernas ni extremidades, pero 4) ¡se desliza por el suelo a una velocidad de 0.6 m por segundo!».

Dada la diversidad de la vida terrestre, podría esperarse que los extraterrestres de Hollywood fuesen igualmente diversos, pero me asombro de la falta de creatividad de la industria filmica. Con algunas notables excepciones, como los de *La mancha voraz* (1958), *2001: una odisea espacial* (1968) y *Contacto* (1997), los extraterrestres de Hollywood se ven bastante humanoides. No importa cuán feos (o lindos) sean, casi todos tienen dos ojos, dos orejas, una cabeza, un cuello, hombros, brazos, manos, dedos, un torso, dos piernas, dos pies, y pueden caminar. Desde un punto de vista anatómico estas criaturas son indistinguibles de los humanos, pero se supone que provienen de otro planeta. Si algo es seguro, es que la vida en el universo, inteligente o no, debe parecernos tan extraña como las formas terrestres. La composición química de la vida terrestre se deriva principalmente de unos cuantos ingredientes. Los elementos hidrógeno, oxígeno y carbono representan 95% de los átomos en el cuerpo humano y de toda la vida conocida. De los tres, la estructura química del carbono le permite ligarse pronta y fuertemente, y es por ello que se nos considera vida basada en carbono, y por ello es que el estudio de las moléculas que contienen carbono es conocido generalmente como *química orgánica*. Curiosamente, el estudio de la vida dondequiera

en el universo es conocido como *exobiología*, la cual es una de las pocas disciplinas que intentan prescindir de las fuentes de primera mano.

¿Es la vida químicamente especial? El principio copernicano sugiere que probablemente no lo sea. Los extraterrestres no tienen por qué parecerse a nosotros para ser similares en lo más fundamental. Considérese que los cuatro elementos más comunes en el universo son el hidrógeno, el helio, el carbono y el oxígeno. El helio es inerte. Por tanto, los tres ingredientes más abundantes y químicamente activos en el cosmos son los tres ingredientes principales de la vida en la Tierra. Por esta razón, seguramente si la vida se hallara en otros planetas estaría hecha de una mezcla similar de elementos. Por el contrario, si la vida terrestre se compusiera principalmente de, por ejemplo, molibdeno, bismuto y plutonio, entonces podríamos sospechar que somos algo especial en el universo.

Si se apela de nuevo al principio copernicano, puede suponerse que el tamaño de un organismo extraterrestre no sería ridículamente grande en comparación con la vida como la conocemos. Hay razones estructurales convincentes de por qué no puede esperarse hallar vida del tamaño del rascacielos Empire State paseándose por el planeta. Pero si ignoramos las limitaciones estructurales de la materia biológica, aparece otro límite más fundamental. Si se supone que un extraterrestre controla sus extremidades o, más en lo general, si se supone que el organismo funciona como un sistema de manera coherente, entonces su tamaño sería constreñido por su capacidad para transmitir señales en su seno a la velocidad de la

luz, la máxima velocidad en el universo. Un ejemplo un tanto extremo: si un organismo fuese tan grande como todo el sistema solar (unas 10 horas luz de diámetro) y si deseara rascarse la cabeza, este sencillo acto le tomaría unas 10 horas. Desde el punto de vista evolutivo, comportarse como un perezoso sería muy limitante para dicho organismo, pues el tiempo transcurrido desde el inicio del universo sería insuficiente para que dicha criatura pudiera evolucionar desde formas de vida más pequeñas a lo largo de muchas generaciones.

* * * *

Y ¿QUÉ TAL CON LA inteligencia? Cuando los extraterrestres de Hollywood visitan la Tierra, pudiera esperarse que son asombrosamente listos. Pero conozco a unos que se abochornarían con su estupidez. Durante un viaje en coche de cuatro horas de Boston a la ciudad de Nueva York, mientras sintonizaba alguna estación de FM, hallé un programa que —como pude determinar— trataba de extraterrestres que aterrorizaban a los terrícolas. Aparentemente, para sobrevivir necesitaban átomos de hidrógeno, por lo que descendían sobre la Tierra para beberse los océanos y extraer así el hidrógeno de todas las moléculas de H₂O.

¡Qué extraterrestres tan sonsos!

No advirtieron otros planetas en el camino a la Tierra, pues Júpiter, por ejemplo, contiene hidrógeno en una cantidad 200 veces la masa de la Tierra, y me parece que nadie jamás les dijo que 90% de todos los átomos del universo es de hidrógeno.

Y ¿qué tal esos extraterrestres que han atravesado miles de años luz de espacio interestelar, pero que se estrellan en la Tierra?

Y luego tenemos esos extraterrestres del film de 1977 *Close Encounters of the Third Kind* [*Encuentros cercanos del tercer tipo*], quienes —anticipando su llegada— transmitieron a la Tierra una misteriosa secuencia de dígitos repetidos que los expertos finalmente descifraron como un mensaje con las coordenadas de longitud y latitud de la localización del aterrizaje. Pero la longitud de la Tierra es un punto de partida totalmente arbitrario: el meridiano 0, que pasa por Greenwich, Inglaterra, por acuerdo internacional. Y tanto la longitud como la latitud se miden en unidades peculiarmente antinaturales llamadas grados, 360 de ellos alineados en círculo. Armados con este conocimiento de la cultura humana, me parece que hubiera sido más fácil para los extraterrestres aprender a hablar inglés y transmitir: «Vamos a aterrizar al lado del monumento nacional de la Torre del Diablo en Wyoming, y como venimos en platillo volador no necesitaremos las luces de pista».

El premio a la criatura más tonta de todos los tiempos corresponde al extraterrestre de la primera película de *Viaje a las estrellas*, de 1979. V-ger, como se llamaba a sí mismo (se pronunciaba *vi-ller*), era una antigua sonda espacial mecánica en misión para explorar, descubrir e informar sobre sus hallazgos. La sonda fue rescatada de las profundidades del espacio por una civilización de extraterrestres mecánicos y reconfigurada para que pudiera lograr esta misión en todo el universo. Con el tiempo, la sonda adquirió todo el

conocimiento y, así, conciencia. El *Enterprise* se topa con esta enorme y monstruosa colección de información cósmica en el momento en que el extraterrestre está buscando a su creador original, así como el significado de la vida. Las palabras labradas en el costado de la sonda original revelaban los caracteres *V* y *ger*. Poco después, el capitán Kirk descubre que la sonda era nada menos que la *Voyager 6*, lanzada por los humanos desde la Tierra a finales del siglo XX. Aparentemente, el *oya* que se encuentra en medio de la *V* y la *ger* había sido empañado y era ilegible. Muy bien. Pero siempre me he preguntado cómo *V-ger* pudo haber adquirido todo el conocimiento del universo, además de conciencia, sin jamás haber intuido que su verdadero nombre era *Voyager*.

Y mejor no hablar de la película veraniega *Día de la independencia* de 1996. No veo nada ofensivo en los extraterrestres malignos. No habría industria de ciencia ficción sin ellos. Los extraterrestres de *Día de la independencia* son realmente malos. Parecen un híbrido genérico entre una carabela portuguesa o aguamala, un tiburón martillo y un ser humano. Aunque fueron concebidos más creativamente que la mayoría de sus pares de Hollywood, sus platillos voladores estaban equipados con butacas acolchadas y descansabrazos. Qué bueno que al final los humanos ganaron. Vencemos a los extraterrestres de *Día de la Independencia* porque desde una Macintosh se carga un virus de computadora a la nave insignia (que resulta ser de un quinto de la masa de la Luna), a fin de desarmar su campo de fuerza protector. Yo no sé, pero me cuesta trabajo descargar programas de otras computadoras en especial

cuando los sistemas operativos son distintos. Hay una sola solución. Todo el sistema de defensa de la nave insignia debe haber corrido con el mismo programa de sistema de Apple que la computadora portátil que descargó el virus.

Gracias por su tolerancia; tenía que sacarme esto del pecho.

* * * *

SUPONGAMOS, NADA MÁS POR discutir, que los humanos son la única especie en la historia de la vida en la Tierra en haber desarrollado inteligencia de alto nivel. (No trato de ofender a los demás mamíferos con cerebros grandes. Si bien la mayoría de ellos no pueden con la astrofísica ni escriben poesía, mi conclusión apenas cambiaría si se incluyeran). Si la vida terrestre ofreciera una referencia de la vida en otras partes del universo, la inteligencia sería muy rara. Se estima que habría diez mil millones de especies en la historia de la vida de la Tierra. Por consiguiente, entre las formas de vida extraterrestre las posibilidades de vida inteligente serían de 1 en 10 mil millones, y mayores de que dicha vida hubiera desarrollado tecnología avanzada y un deseo de comunicarse a través de las grandes distancias del espacio interestelar.

Respecto a la posibilidad de que exista una civilización de este tipo, las ondas de radio serían el vehículo de comunicación preferido, por su capacidad de atravesar la galaxia sin impedimento del gas interestelar ni las nubes de polvo. Pero los humanos solo han comprendido el espectro electromagnético por menos de un siglo. Dicho de manera más deprimente, durante la mayor parte de la historia humana, si los extraterrestres hubieran enviado señales de

radio a los terrícolas, estos jamás habrían podido recibirlas. Es más, tal vez los extraterrestres ya lo han hecho y han llegado a la conclusión de que no hay vida inteligente en la Tierra. A lo mejor están buscando vida en otro lado. Una posibilidad más aleccionadora sería que si los extraterrestres se hubieran percatado de una especie tecnológicamente capaz que ahora habita la Tierra, de todos modos habrían llegado a esa misma conclusión.

Nuestro sesgo respecto de cómo debe ser la vida, inteligente o no, nos hace considerar que el agua líquida es un requisito esencial para la vida en cualquier parte del universo. Como se ha comentado, una órbita planetaria no debiera estar demasiado cerca de su estrella, pues la temperatura en ese caso sería demasiado alta y sus océanos se evaporarían; tampoco una órbita puede estar muy lejos, o la temperatura sería muy baja y los mares se congelarían. En otras palabras, las condiciones en el planeta deben permitir que la temperatura se mantenga en el rango de los 100 grados C en el cual el agua se mantiene líquida. Como en la escena de los tres platos de sopa de Ricitos de Oro y los tres osos, la temperatura debe ser justo la correcta. Cuando fui entrevistado acerca de este tema en un programa de radio, el anfitrión comentó: « ¡Claramente, lo que usted debiera buscar es un planeta hecho de sopa!».

Si bien la distancia de la estrella es un factor importante para la existencia de la vida como la conocemos, otros factores inciden, como por ejemplo la capacidad de un planeta para atrapar radiación estelar. Venus representa un ejemplo de este fenómeno *invernadero*. La luz solar visible que atraviesa la densa atmósfera de bióxido de

carbono es absorbida por la superficie venusina y luego irradiada en la parte infrarroja del espectro. A su vez, el espectro infrarrojo es atrapado por la atmósfera. La consecuencia desagradable es una temperatura del aire que oscila cerca de los 482 grados C, la cual es más caliente que lo esperado dada la distancia de Venus respecto del Sol. A esta temperatura el plomo se licúa rápidamente.

El descubrimiento de vida simple, no inteligente, dondequiera en el universo (o al menos evidencia de que alguna vez la hubo) sería algo más probable y, para mí, un poco menos emocionante que el descubrimiento de vida inteligente. Dos magníficos lugares para buscarla serían los arroyos secos de Marte, donde pudiera haber evidencia fósil de vida donde una vez manó el agua, y los océanos que, se cree, yacerían bajo la superficie helada de la luna de Júpiter, Europa. De nueva cuenta, la promesa de agua líquida define nuestro objetivo.

Otro requisito común para la evolución de la vida en el universo implica un planeta en una órbita estable, casi circular en torno a una sola estrella. Con sistemas estelares binarios y múltiples, que abarcan la mitad de las estrellas de la galaxia, las órbitas de los planetas tienden a ser alargadas y caóticas, lo cual provoca grandes cambios en la temperatura que podrían abatir las posibilidades de formas de vida estables. Asimismo, requerirían suficiente tiempo para que la evolución llevara su curso. Las estrellas de gran masa tienen vidas muy breves (unos pocos millones de años), por lo que una vida como la terrestre jamás podría evolucionar.

Como hemos visto, las condiciones que permiten la vida como la conocemos se puede cuantificar conforme a lo que se conoce como la *ecuación Drake*, denominada así por el astrónomo estadounidense Frank Drake. Dicha ecuación es considerada más como una idea fértil que como un enunciado riguroso de cómo funciona el universo físico. Separa la probabilidad de hallar vida en la galaxia en una serie de sencillas probabilidades que corresponden a nuestras nociones preconcebidas de las condiciones cósmicas que son adecuadas para la vida. Al final, si discute con sus colegas el valor de cada probabilidad en la ecuación, solo queda un estimado del número total de civilizaciones inteligentes y tecnológicamente capaces en la galaxia. Dependiendo de su nivel de sesgo —y su conocimiento de biología, química, mecánica celeste y astrofísica—, se puede usar para estimar por lo menos una (nosotros humanos) y hasta millones de civilizaciones en la Vía Láctea.

* * * *

SI CONSIDERAMOS LAS POSIBILIDADES de que pudiéramos ser primitivos entre las formas de vida más tecnológicamente capaces del universo —por más raras que sean—, entonces lo mejor sería mantenernos alertas por las señales que otros seres nos pudieran enviar, pues es más caro mandarlas que recibirlas. Quizás, una civilización avanzada pudiera acceder fácilmente a una fuente abundante de energía, como la de su estrella. Estas serían civilizaciones que muy posiblemente preferirían mandar señales a recibirlas. La búsqueda de inteligencia extraterrestre (*Search for Extraterrestrial Intelligence*, o SETI) ha cobrado muchas formas. Los

esfuerzos más complejos de la actualidad emplean un detector electrónico que monitorea miles de millones de señales de radio en busca de una señal que se distinga del ruido cósmico.

El descubrimiento de inteligencia extraterrestre, si es que llega a ocurrir, implicará tal cambio en la forma como el ser humano se percibe a sí mismo que sería imposible de anticipar. Yo solo espero que otra civilización no esté haciendo lo que nosotros hemos hecho, pues cuando estemos escuchando, nadie estaría recibiendo, y colectivamente llegaremos a la conclusión de que no hay vida inteligente en el universo.

27. Nuestra burbuja de radiofrecuencia

En la primera escena de la película *Contacto* (1997) la cámara virtual ejecuta un acercamiento controlado de tres minutos desde la Tierra hasta los confines más lejanos del universo. Para este viaje uno está equipado con receptores que permiten decodificar transmisiones de radio y televisión terrestres que se han escapado al espacio. Al inicio, se escucha una mezcla cacofónica de música *rock* fuerte, noticieros y estática ruidosa como si se escucharan decenas de estaciones de radio al mismo tiempo. A medida que transcurre el viaje, y se aleja uno del alcance de las transmisiones, las señales se vuelven cada vez menos discordantes y crecientemente más antiguas, ya que reportan acontecimientos históricos de la era de la radio de la civilización moderna. En medio del ruido, se escuchan *bits* de sonido al revés que abarcan las noticias del desastre del *Challenger* en enero de 1986, el alunizaje

del 20 de julio de 1969, el discurso de Martin Luther King «Tengo un sueño» del 28 de agosto de 1963, el discurso de toma de posesión del presidente Kennedy del 20 de enero de 1961, el discurso del presidente Roosevelt del 8 de diciembre de 1941 en el que solicitó la declaración de guerra a Japón y un discurso de Adolfo Hitler de 1936 durante el ascenso de la Alemania nazi. Poco a poco, la contribución humana a la señal desaparece por completo quedando tan solo un ruido de radiofrecuencia que dimana del cosmos mismo. Conmovedor, pero este rollo de referencias acústicas no debiera desplegarse como se muestra. Si de algún modo se infringieran varias leyes de la física y se viajara más rápido que una onda de radio, entonces pocas palabras serían inteligibles, pues todo se escucharía reproducido en reversa. Además, escucharía el famoso discurso del rey al pasar junto a Júpiter, lo cual implica que allá es lo más lejos que la transmisión ha podido llegar. En efecto, ese discurso rebasó a Júpiter a los 39 minutos de que lo dio.

Si se ignora este hecho, la toma sería imposible. La escena inicial de *Contacto* era poética y poderosa, pues señala indeleblemente la forma como presentamos nuestra identidad como seres civilizados ante el resto de la Vía Láctea. Esta burbuja de radiofrecuencia, como se ha llamado, se centra en la Tierra y se expande a velocidad de la luz en todas direcciones, mientras su centro se llena de nuevas transmisiones modernas. Nuestra burbuja hoy alcanza los 100 años luz en el espacio, encabezadas por las primeras señales artificiales generadas por terrícolas. En la actualidad la burbuja contiene unas mil estrellas, incluyendo Alfa Centauro (a 4.3 años

luz), el sistema estelar más cercano al Sol; Sirio (a 10 años luz), el astro más brillante del cielo nocturno, y todas las estrellas en donde se han descubiertos planetas.

* * * *

NO TODAS LAS SEÑALES de radio logran escapar de nuestra atmósfera. Las propiedades del plasma de la ionósfera, a más de 80 km de altitud, permiten reflejar las ondas de radio de menos de 20 megahercios de vuelta a la Tierra, lo cual permite a su vez que algunas formas de radiocomunicación, como las frecuencias de onda corta de los operadores de radio HAM, lleguen a miles de kilómetros de nuestro horizonte. Todas las frecuencias de AM se reflejan, asimismo, de regreso a la Tierra, lo cual se aprecia en el alcance de estas estaciones.

Si se transmitiera a una frecuencia que no corresponde a las reflejadas por la ionósfera terrestres, o si la Tierra no tuviera ionósfera, las señales de radio solo llegarían a los receptores que estuvieran en su línea de «visión». Los edificios altos brindan una gran ventaja a los transmisores de radio que se montan en sus azoteas. Si bien para una persona de 1.70 m de estatura el horizonte se halla a 5 km de distancia, el horizonte que veía King Kong mientras trepaba el *Empire State* estaba a más de 80. Tras filmar esa película clásica de 1933, se instaló una antena de transmisión. Otra antena se instalaría a 80 km, lo que permitiría que, en principio, la señal atravesara el horizonte de 80 km, lo cual extendería el alcance de la señal a 160 kilómetros.

La ionósfera no refleja las señales de FM ni las señales de televisión, un derivado del espectro de radio. Como ha sido prescrito, ambas solo pueden alcanzar al receptor más lejano que pueden ver, gracias a lo cual las ciudades relativamente cercanas pueden transmitir sus propios programas de televisión. Por ello, las transmisiones locales de televisión y la radio FM no pueden influir tanto como la radio AM, lo cual explica su preponderancia en el medio de los programas políticos. Pero el verdadero influjo de la radio FM y la televisión bien pudiera no ser terrestre. Aun cuando la mayoría de las señales se transmiten de manera horizontal respecto del suelo, algunas se disparan hacia arriba y cruzan la ionósfera rumbo al espacio. Para ellas el cielo no es el límite. Y a diferencia de las demás bandas de frecuencia del espectro electromagnético, las ondas de radio penetran muy bien las nubes de gas y el polvo del espacio interestelar, de modo que los astros tampoco son el límite.

Si se suman los factores que aportan a la fuerza de la marca de radiofrecuencia de la Tierra, tales como el número total de estaciones, su distribución en la superficie terrestre, la energía que dimana de cada una de ellas y la amplitud de banda por la cual la energía se transmite, se halla que la televisión representa el mayor flujo de señales de radio detectable desde la Tierra. La anatomía de una señal muestra una parte angosta y otra ancha; la primera es la parte que transporta imagen, que representa más de la mitad de toda la energía transmitida. De tan solo .10 hercios de amplitud, establece la localización de la estación en el cuadrante (los canales del 2 al 13), así como la existencia de la señal en primer lugar. Una

señal de baja intensidad de banda ancha, de cinco millones de hercios, rodea al transmisor en frecuencias mayores y menores y es imbuida con modulaciones que contienen toda la información de la estación.

* * * *

COMO PODRÍA SUPONERSE, Estados Unidos es el que más aporta al perfil televisivo del mundo. Si una civilización extraterrestre se pusiera a ver y escuchar, detectaría primero las fuertes señales estadounidenses. Si prestara más atención, detectaría periódicas fluctuaciones Doppler en dichas señales (alternando de frecuencias bajas a altas) cada 24 horas. Luego descubrirían que la señal se vuelve cada vez más fuerte y débil en el mismo lapso. Los extraterrestres podrían concluir que un punto fuerte de radiofrecuencia, misterioso pero natural, estaría girando; pero si estos descodificaran las modulaciones en la banda ancha circundante accederían inmediatamente a los elementos de nuestra cultura.

Las ondas electromagnéticas, que incluyen la luz visible y las ondas de radio, no exigen un medio por el cual viajar. En efecto, son las más felices viajando por el vacío del espacio. Por tanto, el famoso letrero rojo que en las estaciones anuncia que se está «en el aire» debiera rezar: «en el espacio», frase que se aplica especialmente a las frecuencias de televisión y FM que se escapan de la Tierra.

A medida que las señales se desplazan por el espacio, se debilitan, diluyéndose en el creciente volumen del espacio a través del cual viajan. Finalmente, las señales son sepultadas por el ruido de

radiofrecuencia del universo, generado por galaxias emisoras de radiofrecuencia, el fondo de microondas, las regiones radiales de la Vía Láctea donde los astros se forman y los rayos cósmicos. Dichos factores, sobre todo, limitan la posibilidad de que una civilización distante descifre nuestro modo de vida.

Para recibir una señal de televisión desde la Tierra, unos extraterrestres a 100 años luz de distancia necesitarían un receptor de radio con 15 veces la capacidad de recepción del radiotelescopio de Arecibo, que mide 300 metros de diámetro (el más grande del mundo). Si quisieran decodificar nuestra programación y, por ende, nuestra cultura, tendrían que compensar los cambios Doppler causados por la rotación terrestre y por su traslación alrededor del Sol (lo que les permitiría sintonizar una estación de televisión en particular) e incrementar su capacidad de detección por un factor de 10.000 sobre la de la señal transmitida. En términos de radiotelescopios, esto significa un disco de 400 veces el diámetro del de Arecibo, o sea uno de 30 km de ancho.

Si extraterrestres tecnológicamente capaces estuvieran, en efecto, interceptando nuestras señales (con un telescopio muy grande y sensible) y si intentaran descifrar las modulaciones, entonces los principios básicos de nuestra cultura de seguro asombrarían a sus antropólogos. A medida que observen cómo nos convertimos en un planeta que transmite ondas de radio, al principio su atención sería ocupada por los primeros episodios de la serie televisiva *Howdy Doody*; apenas aprendan a escuchar, aprenderán cómo los hombres y las mujeres interactúan entre sí en los episodios de *Honeymooners*

de Jackie Gleason y en los de Lucy y Ricky en *Yo amo a Lucy*. Luego podrían apreciar nuestra inteligencia gracias a episodios como los de *Gomer Pyle*, *Los Beverly ricos*, y luego tal vez de *Hee Haw*. Si los extraterrestres no se rinden y esperan unos pocos años más, aprenderían un poco más de las interacciones humanas de Archie Bunker en *All in the Family*, después de George Jefferson en *The Jeffersons*. Al cabo de unos pocos años más de estudio, su conocimiento se enriquecería gracias a personajes como *Seinfeld* y por supuesto la caricatura de *Los Simpson*. (Se perderían de la sabiduría del programa *Beavis and Butthead* ya que solo pudo verse [en Estados Unidos] por cable en MTV). Estos fueron los programas más exitosos de la televisión estadounidense en su momento, los cuales han sido retransmitidos generacionalmente.

Junto con nuestros bien amados programas de comedias, pueden verse 10 años de cobertura noticiosa sangrienta de la Guerra de Vietnam, las del Golfo Pérsico y demás en el resto del planeta. Al cabo de 50 años, los extraterrestres no podrían concluir más que la mayoría de los humanos son unos idiotas neuróticos, sanguinarios y disfuncionales.

* * * *

EN ESTA ERA DE TELEVISIÓN por cable, incluso las señales de transmisión que se habrían escapado de la atmósfera se envían directamente al hogar por medio de cable. Llegaría el día en que la televisión ya no sería un medio de transmisión, lo cual dejaría a nuestros extraterrestres televidentes preguntándose por qué nuestra especie se extinguió.

Para bien o mal, la televisión pudiera no ser la única señal terrestre que los extraterrestres pudieran descifrar. Cada cuando nos comunicamos con los astronautas o con nuestras sondas espaciales, todas las señales que no son interceptadas por el receptor de la nave se pierden para siempre. La eficiencia de esta comunicación mejora mucho con los métodos modernos de compresión de señales. En la era digital, todo son *bytes* por segundo. Si se desarrollara un astuto algoritmo que comprimiera una señal por un factor de 10, se podría comunicar 10 veces más eficientemente, siempre que la persona o máquina que está del otro lado supiera cómo deshacer la señal comprimida. Ejemplos modernos de tales aparatos —como los que crean grabaciones acústicas, las imágenes JPEG y las películas MPEG para su computadora— permiten transferir archivos y ampliar el espacio en su disco duro.

La única señal de radio que no puede comprimirse es la que contiene información completamente aleatoria, lo que la deja indistinguible de la estática de radiofrecuencia. De hecho, cuanto más se comprime una señal, más aleatoria se vuelve para quien la intercepta. Una señal perfectamente comprimida, en efecto, sería indistinguible de la estática para quien carezca del conocimiento y los recursos para descifrarla. ¿Esto qué significa? Si una cultura es lo bastante avanzada y eficiente, entonces sus señales (incluso sin el influjo de transmisiones por cable) pudiera desaparecer de las carreteras cósmicas de habladurías.

Desde la invención y el uso generalizado de focos eléctricos, la cultura humana ha creado también una burbuja de forma de luz visible. Nuestra marca nocturna ha cambiado lentamente de la incandescencia del tungsteno al neón de los anuncios espectaculares al sodio de los faroles de vapor de sodio de las calles. Pero, aparte de los mensajes luminosos en clave Morse que se envían desde los puentes de los barcos, ya no se suelen mandar mensajes de luz visible, por lo cual nuestra burbuja visual no es tan interesante. Además, se pierde irremisiblemente en el resplandor del Sol.

* * * *

EN LUGAR DE DEJAR QUE los extraterrestres escuchen nuestros vergonzosos programas de televisión, ¿por qué no enviarles una señal que hayamos elegido para demostrarles cuán inteligentes y pacíficos somos? Esto se hizo con las placas doradas que se hallan en los costados de cuatro sondas planetarias Pioneer 10 y 11, y Voyager 1 y 2. Cada una contenía pictogramas que transmiten la base de nuestros conocimientos científicos y nuestra ubicación en la Vía Láctea, en tanto que las de los Voyager portan, además, información acerca de la bondad de nuestra especie. A 80 000 km por hora, velocidad mayor que la velocidad de escape del sistema solar, estas naves viajan por el espacio interplanetario a toda carrera. Pero se desplazan con una lentitud ridícula en comparación con la velocidad de la luz y alcanzarán las estrellas más cercanas en unos 100.000 años. Representan nuestra burbuja de «nave espacial». No hay que esperarlos. Una mejor manera de

comunicarnos sería enviar una señal de radio de alta intensidad a algún punto denso de la galaxia, como un conjunto de estrellas. Esto se hizo por vez primera en 1976 cuando el radiotelescopio de Arecibo fue empleado como transmisor en lugar de receptor, para enviar una señal de radio a un punto en el espacio elegido de antemano. Aquel mensaje se halla a la sazón a 30 años luz de la Tierra y se dirige al espectacular cúmulo globular conocido como M13, en la constelación de Hércules. El mensaje contiene en formato digital algo de lo que se había enviado en las naves Pioneer y Voyager. Dos problemas, empero: el cúmulo globular está repleto de estrellas (casi medio millón) y está tan unido que las órbitas planetarias tienden a ser inestables debido a que las estrellas anfitrionas no pueden ejercer su atracción gravitacional sin competencias de otros astros cuando pasan cerca del centro del cúmulo. Además, este contiene una cantidad tan nimia de elementos pesados (de lo que los planetas están hechos) que, en primer lugar, los planetas serían escasos. Estos puntos científicos eran poco conocidos o comprendidos en el momento en que se envió la señal.

En todo caso, la punta de nuestra señal de radio frecuencia «intencional» (que forma un cono de radiofrecuencia en lugar de una burbuja) está a 30 años luz y, de ser interceptada, cambiaría la imagen que los extraterrestres tendrían de nosotros si se basaran en nuestros programas de televisión. Pero esto ocurrirá solo si los extraterrestres pueden de alguna manera determinar qué tipo de

señal permite discernir quiénes somos y cuál debiera ser nuestra identidad cósmica.

Parte 5

Cuando se enoja el universo

De las formas en que el universo puede matarnos

Contenido:

28. *Caos en el sistema solar*

29. *Próximos estrenos*

30. *Los finales del mundo*

31. *Motores galácticos*

32. *Colisiones*

33. *Muerte por agujero negro*

28. Caos en el sistema solar

La ciencia se distingue de casi cualquier emprendimiento humano por su capacidad de predecir hechos futuros con precisión. A menudo los periódicos brindan las fechas de las siguientes fases de la Luna o la hora del amanecer del siguiente día, pero no suelen reportar «noticias del futuro» tales como los precios al cierre del mercado de valores de Nueva York el lunes, o el accidente aéreo del martes. El público conoce intuitivamente, si no explícitamente, que la ciencia puede predecir, aunque le sorprenda que pueda también predecir que algo es impredecible. Tal es la base del caos. Y tal será la evolución futura del sistema solar.

Un sistema solar caótico, sin duda, habría inquietado al astrónomo alemán Johannes Kepler, a quien se le atribuyen las primeras leyes predictivas de la física, las cuales publicó en 1609 y 1619. Con una

fórmula que derivó empíricamente de las posiciones planetarias en el firmamento, podía predecir la distancia promedio entre cualquier planeta y el Sol simplemente mediante el cálculo de la duración del año del planeta. En los *Principia* de Isaac Newton (1687), su ley de la gravitación universal permite derivar matemáticamente todas las leyes de Kepler desde el inicio.

Pese al éxito inmediato de sus nuevas leyes de la gravedad, a Newton le preocupaba que el sistema solar se desordenara algún día. Con su característica clarividencia, señaló en el libro III de su *Óptica*, que publicó en 1730: «Los planetas se mueven de manera continua en órbitas concéntricas; salvo algunas irregularidades de poca consideración, que pudieron haber ocurrido de acciones mutuas [...] de los planetas entre sí, y pudieran aumentar, hasta que el sistema necesite una reforma» (p. 402).

Como veremos en detalle en la parte 7, Newton implicó que Dios pudiera acudir ocasionalmente para arreglar algunas cosas. El famoso matemático y dinamista Pierre-Simon Laplace no concordaba con él. En su tratado de cinco volúmenes, publicados entre 1799 y 1825, *Tratado de mecánica celeste* expresó su convencimiento de que el universo era estable y totalmente predecible. Más tarde, Laplace escribió en su *Ensayo filosófico sobre la probabilidad* (1814): « [Con] todas las fuerzas que animan a la naturaleza [...] nada [es] incierto, y tanto el futuro como el pasado estarían presentes a los ojos» (1995, cap. II: 3).

En efecto, el sistema solar parece estable si lo único que se tiene para apreciarlo es lápiz y papel, pero en la era de las

supercomputadoras, en la cual miles de millones de cálculos por segundo son rutinarios, modelos del sistema solar pueden ser examinados por centenas de millones de años. ¿Qué recibimos a cambio de nuestra profunda comprensión del universo?

Caos.

El caos se revela en la aplicación de nuestras leyes físicas en los modelos computacionales del futuro del sistema solar, pero también ha asomado su cabeza en otras disciplinas, tales como la meteorología y la ecología, y casi dondequiera que haya sistemas interactuantes complejos.

Para entender el caos tal como se aplica al sistema solar, primero hay que reconocer que la diferencia en la ubicación de dos objetos —lo cual comúnmente se conoce como *distancia*— es tan solo una de las muchas diferencias que hay que calcular. Dos objetos pueden también diferir en energía, así como en tamaño, inclinación y forma de la órbita. Por tanto, pudiera ampliarse el concepto de distancia para incluir la separación de los objetos en estas otras variables. Por ejemplo, dos objetos que en ese momento se hallan cerca uno del otro pudieran diferenciarse en la forma de la órbita. Nuestra medida modificada de la distancia nos aseveraría que ambos objetos se hallan muy separados.

Una prueba común para el caos es comenzar con dos modelos computacionales idénticos en todo excepto por algún pequeño detalle. En uno de los dos modelos del sistema solar se puede permitir que la Tierra retroceda levemente de su órbita al ser golpeado por un pequeño meteoro. Tenemos que hacer una

pregunta sencilla: a lo largo del tiempo, ¿qué sucede con la distancia entre estos dos modelos casi idénticos? La distancia pudiera mantenerse estable, oscilar e incluso diferir. Cuando dos modelos divergen exponencialmente, se debe a que las pequeñas diferencias entre ambos se acrecientan con el tiempo, lo cual frustra la capacidad de predecir el futuro. En algunos casos, un objeto puede ser expulsado del sistema solar por completo.

Esto es el sello distintivo del caos.

En la práctica, en presencia del caos es imposible predecir confiablemente el futuro distante de la evolución del sistema. Mucho de lo que se comprende sobre el caos se debe a Alexander Mijailovich Lyapunov (1857-1918), matemático e ingeniero mecánico ruso, cuya tesis doctoral de 1892, *Problema general de la estabilidad del movimiento*, es aún un clásico. (Por cierto, Lyapunov murió violentamente en el caos que siguió a la Revolución rusa).

Desde tiempos de Newton, se sabía que se pueden calcular las trayectorias exactas de dos objetos aislados en órbita mutua, tales como un sistema estelar binario. Ahí no se observan inestabilidades. Pero si se suman más objetos al carnet de baile, las órbitas se vuelven cada vez más complejas, y más y más sensibles sus condiciones iniciales. En el sistema solar tenemos el Sol, sus ocho planetas, sus más de 70 satélites, asteroides y cometas. Esto pudiera parecer muy complicado, pero la historia aún no termina. En el sistema solar las órbitas son influidas, además, por el hecho de que el Sol pierde cuatro millones de toneladas de materia por segundo debido a la fusión termonuclear de su núcleo. La materia

se convierte en energía que se escapa de la superficie solar al espacio como luz. Asimismo, el sol pierde masa a través de la expulsión continua de partículas cargadas, llamada viento solar. Y el sistema solar está sujeto a la gravedad perturbadora de las estrellas que ocasionalmente pasan en su órbita normal en torno al centro de la galaxia.

Para apreciar la actividad de un dinamista del sistema solar, considérese que las ecuaciones de movimiento permiten calcular la fuerza neta de la gravedad sobre un objeto en cualquier momento dado, de todos los objetos conocidos en el sistema solar y más allá. Una vez que se conoce la fuerza en cada objeto, se empujan (en la computadora) en la dirección correcta, pero la fuerza en cada objeto en el sistema solar es apenas diferente porque todo se ha movido. Por tanto, hay que recalcular todas las fuerzas y volverlas a empujar. Esto prosigue a lo largo de todo el simulacro, el cual en algunos casos implica billones de empujones. En el transcurso de estos cálculos, o en algunos que se les parezcan, el comportamiento del sistema solar es caótico. A intervalos de cinco millones de años para los planetas terrestres interiores (Mercurio, Venus, Tierra y Marte) y como veinte millones para los gigantes de gas exteriores (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno), distancias arbitrariamente cortas entre las condiciones iniciales divergen considerablemente. En el modelo, para los 100 a 200 millones de años, hemos perdido la capacidad de predecir las trayectorias planetarias.

Sí, esto es malo. Considérese el siguiente ejemplo. El retroceso de la Tierra cuando despega una sola sonda espacial puede influir en

nuestro futuro de tal forma que, en doscientos millones de años, la posición de la Tierra en órbita alrededor del Sol habrá cambiado en casi 60 grados. Para el futuro distante de seguro no está mal ignorar dónde se halla la Tierra en su órbita. Pero podemos tensarnos si nos percatamos de que los asteroides en una familia de órbitas pueden migrar caóticamente a otra familia. Si los asteroides pueden hacerlo y si la Tierra puede estar en un punto de su órbita que no puede predecirse, entonces hay un límite a hasta dónde puede calcularse confiablemente el riesgo de impacto de un asteroide y la extinción global subsecuente.

¿Deberíamos fabricar las sondas con materiales más ligeros? ¿Deberíamos abandonar el programa espacial? ¿Deberíamos preocuparnos por la pérdida de masa solar? ¿Deberíamos preocuparnos con miles de toneladas diarias de polvo de meteoros que la Tierra acumula a medida que avanza por los desechos del espacio interplanetario? ¿Deberíamos saltar de nuestro planeta al espacio? Ninguna de las anteriores. Los efectos a largo plazo de estas pequeñas variaciones se pierden en el caos. En unos pocos casos, la ignorancia frente al caos puede ser ventajosa.

Un escéptico pudiera preocuparse de que la aleatoriedad de un sistema complejo y dinámico en lapsos muy prolongados se deba a un error de cómputo, o algún problema en una pieza o en el programa de la computadora, pero si dicha sospecha fuera cierta, entonces los sistemas de dos objetos pudieran finalmente actuar caóticamente en un modelo de computadora. Pero no. Y si se extrajera a Urano del modelo de sistema solar y se repitieran los

cálculos de las órbitas de los gigantes de gas, entonces no habría caos. Otra prueba provendría de las simulaciones de computadora de Plutón, el cual muestra una alta excentricidad y una órbita penosamente inclinada. En realidad, Plutón muestra un caos muy bien portado, en el cual las distancias entre las condiciones iniciales conducen a trayectorias impredecibles pero limitadas. Lo más importante, sin embargo: diversos investigadores que han empleado diversas computadoras y métodos de cómputo han arrojado intervalos similares para el inicio del caos en la evolución a largo plazo del sistema solar.

Aparte de nuestro deseo egoísta de evitar extinguirnos, hay razones más amplias para estudiar el comportamiento a largo plazo del sistema solar. Con un modelo evolucionario completo, los dinamistas pueden retroceder en el tiempo para examinar la historia del sistema solar, cuando el pase de lista planetario bien pudo haber sido muy distinto al actual. Por ejemplo, algunos planetas que existieron antes del nacimiento del sistema solar (hace cinco mil millones de años) pudieran haber sido expulsados. En efecto, habrían comenzado a existir con varias decenas de planetas en vez de ocho, y que en su mayoría hayan sido despedidos hacia el espacio interplanetario.

En los últimos 400 años hemos pasado de desconocer los movimientos de los planetas a saber que no podemos saber la evolución del sistema solar en el futuro ilimitado, una agrídulce victoria en nuestra interminable pesquisa para comprender el universo.

29. Próximos estrenos

Son bien conocidos los espeluznantes vaticinios de un holocausto global ocasionado por asteroides asesinos. Ello es bueno, porque la mayor parte de lo visto, leído o escuchado es verdad.

La posibilidad de que en mi lápida o la suya diga: «muerto por un asteroide» es la misma que «muerto en un accidente aéreo». Unas 12 personas han caído víctimas de asteroides en los últimos 400 años, pero miles han muerto en accidentes en la breve historia de la aviación civil. Entonces, ¿cómo puede ser cierta esta estadística? Simple. El registro de impactos muestra que al final de un periodo de diez millones de años, cuando la suma de las víctimas de todos los accidentes de aviación haya llegado a mil millones de personas (suponiendo una tasa de muerte por accidente de 100 al año), un asteroide con la energía para matar a mil millones de personas posiblemente habrá golpeado la Tierra. Lo que confunde la interpretación es que mientras los aviones matan a pocas personas a la vez, nuestro asteroide pudiera no matar a nadie en millones de años, pero cuando impacte, se llevará consigo a centenares de millones de personas instantáneamente, y muchos otros centenares de millones adicionales en la secuela de la catástrofe climática global subsecuente.

En cambio, en los inicios del sistema solar, la tasa de impacto conjunto de un cometa y un asteroide era aterradoramente alta. Otras teorías y los modelos de la formación de planetas muestran que el gas químicamente rico se condensa para formar moléculas,

después partículas de polvo, luego rocas y hielo. Más tarde, todo se convierte en una galería de tiro. Las colisiones son el medio por el cual fuerzas químicas y gravitacionales ligan objetos chicos y grandes entre sí. Dichos objetos que casualmente hayan absorbido un poco más de masa que el promedio, tendrán una gravedad levemente superior y atraerán otros objetos. A medida que avance la absorción, la gravedad finalmente convertirá la masa informe en esferas, así nacen los planetas. Los planetas más masivos tienen la suficiente gravedad para retener sus envolturas gaseosas. Todos los planetas absorben por el resto de sus días, aunque a una tasa muy inferior que cuando se formaron.

Aun así, miles de millones (o de billones) de cometas se encuentran en el sistema solar exterior, a mil veces la órbita de Plutón, y son vulnerables a los empujones gravitacionales de los astros que pasan y las nubes interestelares que los hacen emprender sus largos viajes hacia el Sol. Las sobras del sistema solar incluyen cometas breves, de los cuales se conocen algunas decenas que se atraviesan en la órbita terrestre y miles de asteroides que hacen lo mismo.

El término *acreción* es más aburrido que «impacto destructor de especies y ecosistemas», pero desde el punto de vista de la historia del sistema solar, ambos términos significan lo mismo. No podemos estar, al mismo tiempo, felices de vivir en un planeta; felices de que nuestro planeta sea químicamente rico y de que no seamos dinosaurios, y, aun así, molestarnos con el riesgo de una catástrofe planetaria. Un poco de la energía de las colisiones de los asteroides con la Tierra se deposita en nuestra atmósfera mediante la fricción y

una estampida de ondas de choque. Los estallidos sónicos también son ondas de choque, pero son hechas por aviones que vuelan a entre una y tres veces la velocidad del sonido. El peor daño posible es que sacuda los platos de su aparador. Pero a velocidades de más de 72 mil kilómetros por hora, casi 70 veces la velocidad del sonido, las ondas de choque de una colisión promedio entre un asteroide y la Tierra pudieran ser devastadoras.

Si el asteroide o cometa fuera lo bastante grande como para sobrevivir a sus propias ondas de choque, el resto de su energía se depositaría en la Tierra en un evento explosivo que derretiría el suelo y abriría un cráter que podría medir 20 veces el diámetro del objeto original. Si muchos objetos impactaran a intervalos cortos, entonces la Tierra no tendría tiempo para enfriarse. Se infiere del prístino registro de cráteres de la Luna (nuestro vecino más cercano) que la Tierra experimentó una era de fuerte bombardeo hace entre 4.6 y 4 mil millones de años. La evidencia fósil más antigua se remonta a unos 3.8 mil millones de años atrás. Poco antes, la superficie terrestre era estéril, de modo que la formación de moléculas complejas, y por ello de la vida, fue inhibida. Pese a estas malas noticias, todos los ingredientes básicos se estaban desarrollando.

¿Cuánto le tomó a la vida emerger? Una cifra muy citada es ochocientos millones de años (4.6 mil millones - 3.8 mil millones = 800 millones). Pero para ser justos con la química orgánica, hay que sustraer primero todo el tiempo en que la Tierra era una bola ardiente, lo cual deja apenas doscientos millones para que la vida

surgiera de una rica sopa química, la cual, como todas las buenas sopas, contiene agua.

Sí, el agua que se bebe a diario le fue entregada a la Tierra en parte por cometas hace más de cuatro mil millones de años, pero no todos los desechos espaciales provienen de los inicios del sistema solar. La Tierra ha sido golpeada al menos una docena de veces por rocas lanzadas desde Marte y por incontables procedentes de la Luna. La expulsión sucede cuando los objetos albergan tanta energía que las rocas más pequeñas que se hallan cerca de la zona de impacto rebotan con la suficiente velocidad como para escapar de la atracción gravitacional del planeta. Después, las rocas ambulan balísticamente en órbita alrededor del Sol hasta que golpean algún objeto. La roca marciana más famosa es el primer meteorito hallado cerca de las colinas de Allan en la Antártida en 1984. Conocida oficialmente por su abreviatura, en clave pero sensata, de ALH-84001, este meteorito contiene evidencia atractiva, aunque circunstancial, de que en el Planeta Rojo la vida se desarrolló hace mil millones de años. Marte contiene evidencia geológica de una historia de agua corriente que abarca lechos ribereños secos, deltas de ríos y planicies aluviales. Y más recientemente los robots *Spirit* y *Opportunity* hallaron rocas y minerales que solo pudieron haberse formado en contacto con el agua.

En vista de que el agua líquida es crucial para la vida como la conocemos, la posibilidad de vida en Marte no exagera la credulidad científica. Lo divertido es que se especula si la vida surgió en Marte, fue expulsada de su superficie en calidad de los primeros

astronautas bacteriales del sistema solar y luego estos se alojaron en la Tierra para iniciar su evolución de la vida. Incluso existe una palabra para esto: *panspermia*. Tal vez, todos somos descendientes de marcianos.

Es más probable que la materia viaje de Marte a la Tierra que viceversa. Escapar de la gravedad terrestre demanda dos veces y media la energía que se necesita para salir de Marte. Además, la atmósfera terrestre es 100 veces más densa. La resistencia de aire en la Tierra (en relación con la de Marte) es formidable. En todo caso, las bacterias tendrían que ser lo bastante resistentes para sobrevivir un viaje interplanetario de millones de años antes de llegar a la Tierra. Por fortuna, en la Tierra no falta agua líquida y riqueza química, de modo que no se requieren teorías de panspermia para explicar el origen de la vida como la conocemos, incluso si aún no somos capaces de explicarla.

Irónicamente, se puede culpar (y se culpa) a los impactos por los episodios de extinción más importantes en el registro fósil. Pero ¿cuáles son los riesgos a la vida y la sociedad? A continuación se muestra un cuadro con las tasas de colisión promedio en la Tierra con el tamaño del objeto y la energía equivalente en millones de toneladas de TNT. Para referencia, incluyo una columna que compara la energía de impacto en unidades de la bomba atómica que Estados Unidos lanzó sobre la ciudad de Hiroshima en 1945. Estos datos están adaptados de una gráfica de David Morrison de la NASA (1992).

Una vez...	Diámetro del asteroide (metros)	Energía de impacto (megatonnes de tnt)	Energía de impacto (bombas atómicas)
Mes	3	0.001	0.05
Año	6	0.01	0.5
Década	15	0.2	10
Siglo	30	2	100
Milenio	100	50	2500
10.000 Años	200	1000	50 000
1.000.000 Años	2000	1 000 000	50 000 000
100.000.000 Años	10000	100.000.000	5 000 000 000

El cuadro se basa en un análisis minucioso de la historia de los cráteres en la Tierra, el registro de los cráteres no erosionados en la superficie lunar y el número conocido de asteroides y cometas cuyas órbitas se cruzan con la de la Tierra.

La información de la energía de algunos impactos famosos puede ubicarse en el cuadro. Por ejemplo, en 1908 una explosión cerca del río Tunguska, en Siberia, derribó miles de kilómetros cuadrados de árboles e incineró un territorio unos 300 kilómetros cuadrados alrededor de la zona cero. Se cree que el objeto fue un meteorito de piedra de 60 metros (como el tamaño de un edificio de 20 pisos) que estalló en el aire, por lo cual no dejó un cráter. Colisiones de esta magnitud se esperan en promedio cada 200 años. Por su parte, el cráter Chicxulub en Yucatán, México, que mide 200 kilómetros, bien pudo ser el mensaje de un asteroide de 10 kilómetros. Con una energía de impacto cinco mil millones de veces mayor que la de las bombas atómicas usadas en la Segunda Guerra Mundial, colisiones de este tipo suelen ocurrir una vez cada cien millones de años. El

cráter data de hace más de 65 millones de años y no ha sucedido otro de esta magnitud desde entonces. Coincidentemente, casi al mismo tiempo se extinguieron los *Tyrannosaurus rex* y sus amigos, por lo cual los mamíferos pudieron evolucionar hacia algo más ambicioso que las musarañas arbóreas.

Los paleontólogos y geólogos que aún rechazan el papel que han desempeñado los impactos cósmicos en las extinciones de especies terrestres deben pensar qué hacer con los depósitos de energía que la Tierra recibe del espacio. La gama de energías varía astronómicamente. En un artículo sobre el riesgo de impactos publicado en el grueso tomo de *Hazards Due to Comets and Asteroids* [Riesgos debidos a cometas y asteroides] (Gehrels, 1994), David Morrison del Centro de Investigaciones Ames de la NASA, Clark R. Chapman del Instituto de Ciencia Planetaria y Paul Slovic de la Universidad de Oregón describieron brevemente las consecuencias de los depósitos de energía inesperados en el ecosistema terrestre. Lo que sigue es una glosa de lo que se discutió.

La mayoría de los objetos que impactan en la Tierra de menos de 10 megatones de energía estallarán en la atmósfera sin dejar cráter alguno. Los pocos que sobreviven en una sola pieza suelen estar hechos de hierro. Un estallido de entre 10 y 100 megatones de un asteroide de hierro dejaría un cráter, mientras que su equivalente pétreo se desintegraría al estallar en la atmósfera. Un impacto en Tierra destruiría un área del tamaño de Washington, D. C.

Los impactos terrestres de entre mil y 10 mil megatonnes siguen produciendo cráteres; los impactos oceánicos generan grandes tsunamis. Un impacto terrestre puede destruir un área del tamaño del estado de Delaware.

En cambio, una detonación de 100.000 a 1.000 000 de megatonnes puede arrasar con el ozono; los impactos oceánicos generarían tsunamis que se sentirían en todo un hemisferio, mientras que los terrestres levantarían tanto polvo a la estratósfera que cambiaría el clima del planeta y se helarían las cosechas. Un impacto terrestre, a su vez, destruiría un área del tamaño de Francia.

Por su parte, una detonación de 10.000.000 a 100.000.000 de megatonnes acarrearía efectos climáticos prolongados y conflagración global. Un impacto terrestre destruiría un área del tamaño de Estados Unidos.

Un impacto oceánico o terrestre de 100.000.000 a 1.000.000.000 de megatonnes llevaría a la extinción masiva a una escala del impacto de Chicxulub hace 65 millones de años, cuando casi 70% de las especies terrestres perecieron súbitamente.

Por fortuna, entre los asteroides que podrían cruzarse con la Tierra podemos catalogar los que son mayores a un kilómetro, el tamaño que pudiera causar un daño global. Un sistema de alarma temprana representa un proyecto viable, como fue recomendado por el *Spaceguard Survey Report* de la NASA, y —créase o no— sigue bajo la consideración del Congreso de Estados Unidos. Desafortunadamente, los objetos menores a un kilómetro no reflejan la suficiente luz como para ser detectados y rastreados de manera

confiable. Estos pueden golpear la Tierra sin avisar o con muy poco tiempo de antelación. Lo bueno de esta noticia es que si bien cuentan con la energía suficiente para causar una catástrofe local incinerando naciones enteras, no pondrían en riesgo de extinción a la humanidad entera.

Desde luego, la Tierra no es el único planeta rocoso en riesgo de sufrir impactos. Mercurio tiene un rostro con cráteres, el cual, para un observador cualquiera, se asemeja a la Luna. Recientes investigaciones radio topográficas del nuboso Venus también muestran muchos cráteres. Y Marte, asimismo, con su geología históricamente activa, revela grandes cráteres recientes.

Con más de 300 veces la masa de la Tierra y más de 10 veces su diámetro, la capacidad de Júpiter para atraer objetos voladores no tiene parangón entre los planetas del sistema solar. En 1994, durante la semana en que se celebraba el 25 aniversario del alunizaje del *Apollo* 11, el cometa Shoemaker-Levy 9, tras deshacerse en pedazos en un encontronazo previo con este planeta, se estrelló, un pedazo a la vez, contra la atmósfera de Júpiter. Las cicatrices gaseosas podrían verse fácilmente desde la Tierra por medio de telescopios caseros. Como Júpiter rota muy rápidamente (una vez cada 10 horas), cada parte del cometa cayó en un lugar distinto a medida que giraba la atmósfera.

Y por si usted pregunta, cada parte golpeaba con una energía equivalente al impacto de Chicxulub. Así que a reserva de lo que ya se sabe acerca de Júpiter, ¡de seguro allá no quedan dinosaurios!

El registro fósil de la Tierra está lleno de especies extintas, formas de vida que han vivido más tiempo que el *Homo sapiens*. Los dinosaurios están en esta lista. ¿Cómo defendernos de tales impactos? El clamor de aquellos que no tienen una guerra atómica que librar es ¡acábenlos con ojivas nucleares! Desde luego que el paquete de energía destructiva más eficaz jamás hecho por el hombre es la energía nuclear. Un impacto directo en un asteroide pudiera quebrarlo en tantos pedazos pequeños que el peligro no sería mayor que el de una espectacular lluvia de meteoros. Nótese que en el espacio exterior, donde no hay aire, no puede haber ondas de choque, por lo cual una ojiva nuclear tendrá que atinar directamente con el asteroide a fin de destruirlo.

Otro método sería dirigir bombas de neutrones (aquellas que, como se recordará, matan personas, pero dejan los edificios intactos) de tal forma que el baño de neutrones de alta energía caliente una parte del asteroide a una temperatura tal que expulse material y este se salga de la trayectoria de colisión. Un método más gentil sería empujar al asteroide con cohetes lentos pero constantes que se coloquen, de alguna manera, a un lado del objeto. Si esto se hiciera con suficiente anticipación, solo haría falta un pequeño empujón usando combustible químico convencional. Si se catalogara cada objeto del tamaño de un kilómetro o más cuya órbita intersectara la de la Tierra, entonces una computadora podría predecir una colisión catastrófica a cientos, o miles, de órbitas en el futuro, lo cual daría a la Tierra suficiente tiempo para organizar una defensa adecuada. Pero nuestra lista de posibles objetos asesinos está

incompleta, y el caos entorpece severamente nuestra capacidad de predecir el comportamiento de objetos por millones y miles de millones de órbitas.

En este juego de la gravedad, el objeto golpeador más temible es el cometa de periodo largo, el cual por convención es aquel de más de 200 años de antigüedad. Representando un cuarto de todos los factores de riesgo para la Tierra, caen hacia el sistema solar interior tras recorrer largas distancias a velocidades de 161 000 km por hora para el momento en que llegan a la Tierra. Estos cometas desarrollan así una energía de impacto más asombrosa que la de un asteroide común y corriente. Más importante aún es que difícilmente puede ser rastreado debido a que gran parte de su órbita es muy tenue. Para el momento en que se descubra que se ha enderezado rumbo a la Tierra, se tendrá de unos meses a dos años para recabar fondos, diseñar, construir y lanzar el misil que debe interceptarlo. Por ejemplo, en 1996, el cometa Hyakutake fue descubierto apenas cuatro meses antes de su mayor acercamiento al Sol porque su órbita se había inclinado fuera del plano de nuestro sistema solar, precisamente donde nadie estaba observando. Así, se acercó a 16 millones de kilómetros de la Tierra (un rozón) y fue un espectáculo nocturno.

Y una más para el calendario: el viernes 13 de abril de 2029 un gran asteroide, lo bastante grande para llenar el *Rose Bowl*, como un huevo duro, volará tan cerca de la Tierra que estará a menos de la distancia de nuestros satélites de comunicaciones. No se le denominó Bambi sino Apofis, por el dios egipcio de la penumbra y la

muerte. Si la trayectoria de Apofis pasara dentro de un rango angosto de altitudes llamado el *ojo de la cerradura*, el influjo preciso de la gravedad terrestre garantizaría que siete años después, en 2036, dicho asteroide golpeará a la Tierra de manera directa estrellándose contra el océano Pacífico entre California y Hawái, con lo que ocasionaría un tsunami que arrasaría con la costa oeste de Norteamérica, sepultaría a Hawái, y devastaría toda la masa continental de la cuenca del Pacífico. Si Apofis no entrara por el ojo de la cerradura en 2029, por supuesto que no habría nada de qué preocuparse en 2036.

¿Debemos armar misiles de alta tecnología para que en sus silos aguarden el llamado para defender a la raza humana? Primero se necesita un inventario detallado de las órbitas de todos los objetos que pudiera arriesgar la vida en la Tierra. En el mundo el número de personas dedicadas a esta búsqueda asciende a unas decenas. ¿Con cuánta anticipación se estaría dispuesto a defender la Tierra? Si los humanos se extinguieran un día debido a una colisión catastrófica, sería la peor tragedia en la historia de la vida en el universo, no porque se careció de la capacidad mental para protegerla sino por falta de previsión. La especie dominante que nos reemplace en la Tierra pos apocalíptica se asombraría al ver nuestros esqueletos amontonados en sus museos de historia natural, porque el inteligente *Homo sapiens* no tuvo mejor suerte que los proverbialmente tontos dinosaurios.

30. Los finales del mundo

A veces pareciera como si todo el mundo tratara de decirle cuándo y cómo acabará el mundo. Algunos escenarios son más familiares que los otros. Los que los medios electrónicos discuten más a menudo abarcan epidemias rampantes, guerra nuclear, colisiones con asteroides o cometas y el deterioro ambiental. Aunque difieren entre sí, pudieran acabar con el género humano (y tal vez con otras formas de vida). En efecto, lemas y lugares comunes, como «Salvemos a la Tierra», implican un llamado implícito a salvar la vida terrestre, y no al planeta mismo. En realidad, el hecho es que los humanos no pueden matar al planeta. Este se mantendrá en órbita alrededor del Sol, junto con sus hermanos planetas, hasta mucho después de que el *Homo sapiens* se haya extinguido por la razón que sea.

De lo que casi nadie habla es de escenarios del fin del mundo que efectivamente pudieran arriesgar a nuestro templado planeta en su órbita estable en torno al Sol. Propongo estos pronósticos no porque los humanos vivirán lo suficiente como para observarlos, sino por cuanto los instrumentos de la astrofísica me permiten estimarlos. Tres que vienen a la mente son la muerte del Sol, la inminente colisión entre la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda, y la muerte del universo, de lo cual la comunidad de astrofísicos está convencida recientemente.

Modelos de computadora de la evolución estelar son afines a las tablas actuariales que indican una saludable esperanza de vida de diez mil millones de años para nuestro Sol. A una edad estimada de cinco mil millones de años, el Sol pudiera gozar de otros cinco mil

millones de años de producción energética estable. Para entonces, si no hemos hallado cómo abandonar la Tierra, aquí estaremos cuando el Sol haya agotado su reserva de combustible. Para entonces, atestiguaremos un asombroso pero mortífero episodio en la vida de una estrella.

El Sol debe su estabilidad a la fusión controlada del hidrógeno en helio en su núcleo de quince millones de grados. La gravedad que anhela colapsar a la estrella se equilibra por la presión del gas hacia afuera que la fusión sostiene. En tanto, más de 90% de los átomos del Sol son de hidrógeno, los que importan habitaban en el núcleo solar. Cuando este agote su hidrógeno, lo que quedará será una bola de átomos de helio que exigen una temperatura aún mayor que el hidrógeno para fusionarse en elementos más pesados. Con su motor temporalmente apagado, el Sol se desequilibrará. La gravedad ganará, las regiones internas del astro colapsarán y la temperatura central aumentará a cien millones de grados, lo cual desencadenará la fusión del helio en carbono.

Mientras tanto, la luminosidad del Sol crecerá astronómicamente, lo cual hará que sus capas exteriores se expandan a proporciones gigantescas, y se traguen las órbitas de Mercurio y Venus. Finalmente, el Sol ocupará todo el cielo a medida que su expansión abarque toda la órbita terrestre. La temperatura en la superficie terrestre ascenderá hasta que alcance los 3.000 grados de las capas externas enrarecidas del Sol. Nuestros océanos hervirán hasta evaporarse por completo en el espacio interplanetario. Mientras tanto, nuestra ardiente atmósfera se evaporará a su vez a medida

que la Tierra se convierta en un carbón al rojo vivo inserto en las gaseosas capas exteriores del Sol, las cuales impedirán la órbita de la Tierra obligándola a caer en picada hacia el núcleo solar, donde en el camino de descenso será vaporizada por la creciente temperatura solar hasta que nada quede. Poco después cesará la fusión nuclear del Sol, perderá su tenue cubierta gaseosa que contiene los dispersos átomos de la Tierra y expondrá su núcleo central ya muerto.

Pero no hay de qué preocuparse: mucho antes de este escenario nos habremos extinguido por alguna otra razón.

* * * *

POCO DESPUÉS DE QUE el Sol aterrorice a la Tierra, la Vía Láctea afrontará sus propios problemas. De los centenares de miles de galaxias, cuyas velocidades en relación con la Vía Láctea han sido medidas, solo unas pocas se desplazan hacia nosotros, mientras el resto se aleja a una velocidad directamente proporcional a su distancia de la Tierra. Descubierta en los años veinte por Edwin Hubble, la recesión general de las galaxias es la marca observacional de nuestro universo en expansión. La Vía Láctea y la galaxia Andrómeda de centenares de miles de millones de estrellas están lo bastante cerca como para que el universo en expansión tenga un efecto nimio en sus respectivos movimientos. Andrómeda y la Vía Láctea se están acercándose a 100 kilómetros por segundo (360 000 km por hora). Si nuestro (desconocido) movimiento lateral es pequeño, a este ritmo la distancia de 2.4 millones de años luz

que separan a ambas galaxias se reducirá a cero en siete mil millones de años.

El espacio interestelar es tan vasto que no es necesario preocuparse por que las estrellas de la galaxia de Andrómeda se estrellen accidentalmente contra el Sol. Durante el encuentro entre ambas galaxias, que sería espectacular a una distancia segura, los astros pasarán por el lado sin molestarse, pero el acontecimiento no será del todo inocuo. Algunas de las estrellas de Andrómeda pudieran acercarse tanto a nuestro sistema solar como para influir en las órbitas de los planetas y los cientos de miles de millones de cometas del sistema solar externo. Por ejemplo, los sobrevuelos estelares podrían alterar las lealtades gravitacionales. Las simulaciones de computadora muestran que los planetas pueden ser robados por un intruso en un «saqueo por sobrevuelo» o desatarse y salir despedidos por el espacio interplanetario.

En la parte 4 me referí a cuán selectiva era Ricitos de Oro con la sopa de otros. Si la Tierra fuera robada por la gravedad de otra estrella, no puede asegurarse que nuestra nueva órbita estará a la distancia adecuada para sostener el agua líquida en la superficie terrestre, condición que se considera indispensable para sostener la vida como la conocemos. Si la Tierra estuviera demasiado cerca, el agua se evaporaría, y si quedase muy lejos, esta se congelaría.

Si por algún milagro de la tecnología futura los habitantes de la Tierra pudieran prolongar la vida del Sol, estos esfuerzos serían irrelevantes cuando la Tierra sea lanzada al gélido espacio. La ausencia de una fuente cercana de energía conducirá a que la

temperatura de la Tierra caiga cientos de grados bajo cero. Nuestra adorada atmósfera de nitrógeno y oxígeno y demás gases se licuará y luego caerá a la superficie y se congelará cubriendo la Tierra como el betún de un esférico pastel. Nos congelaremos antes de morirnos de hambre. La vida que sobreviva será la de los organismos que han evolucionado para no depender de la energía solar, pero (en lo que entonces serán) débiles fuentes geotérmicas y geoquímicas, muy debajo de la superficie, en los resquicios y fisuras de la corteza terrestre. Y los humanos no estarán con ellos.

Una manera de escapar de este destino es tomar la desviación y, como las conchas y el cangrejo ermitaño, buscar otro planeta donde vivir en la galaxia.

* * * *

CON O SIN DESVIACIÓN, el destino a largo plazo del cosmos no puede posponerse o evadirse. No importa dónde uno se esconda, se es parte del universo que inexorablemente marcha hacia una suerte peculiar. La mejor evidencia recabada hasta el momento sobre la densidad espacial acerca de la materia y la energía y la tasa de expansión del universo sugieren que vamos en un viaje sin retorno: la gravedad colectiva de todo en el universo no basta para detener y revertir la expansión cósmica.

La descripción más exitosa del universo y sus orígenes combina el *big bang* con nuestra comprensión moderna de la gravedad, derivada de la teoría de la relatividad general de Einstein. Como veremos en la parte 7, el universo en sus tiempos más tempranos era una vorágine de un billón de grados de materia mezclada con

energía. Durante el periodo de expansión de 14 mil millones de años, la temperatura ambiente del universo había descendido a apenas 2.7 grados de temperatura absoluta (Kelvin). Y a medida que se expande el universo, esta temperatura seguirá alcanzando el cero.

Una temperatura tan baja no nos afecta directamente en la Tierra, ya que el Sol (normalmente) nos concede una vida cómoda. Pero a medida que cada generación de estrellas nace de las nubes de gas interestelar, menos y menos gas queda para formar una nueva generación. Este precioso gas finalmente se agotará, como ya lo ha hecho en la mitad de las galaxias. La pequeña fracción de astros con la masa más grande colapsará por entero para nunca volverse a ver. Algunas estrellas morirán estallando como supernovas. Este gas que regresa pudiera usarse por la siguiente generación, pero la mayoría de los astros, incluyendo el Sol, finalmente agotarán sus combustibles, luego de una fase de gigantesca hinchazón, y colapsarán en un globo compacto de materia que irradiará su calor remanente al frío universo.

La lista de cadáveres bien pudiera parecer familiar: agujeros negros, estrellas de neutrones (púlsares) y enanas blancas se hallan en el callejón sin salida del árbol evolutivo de los astros. Pero lo que tienen en común es un monopolio eterno del material de construcción cósmica. En otras palabras, si las estrellas se queman y no se forman nuevas para sustituirlas, entonces el universo finalmente dejará de contener estrellas vivas.

¿Y la Tierra? Dependemos del Sol para una infusión diaria de energía para sostener la vida. Si el Sol y la energía de otras estrellas fueran aisladas de nosotros, los procesos químicos y mecánicos (incluyendo la vida) terminarían. Finalmente, la energía de todo el movimiento se perderá en la fricción y el sistema alcanzará una sola temperatura uniforme. La Tierra, en un firmamento sin estrellas, yacerá desnuda ante el fondo helado del universo en expansión. La temperatura en la Tierra descenderá, del mismo modo que un pastel de manzana recién cocido se enfría en el alfeizar de una ventana. Aun así, la Tierra no está sola. En billones de años, cuando desaparezcan las estrellas y todos los procesos en cada resquicio del universo hayan terminado, todo el cosmos se habrá enfriado a una misma temperatura. Para entonces el viaje espacial no ofrecerá refugio, pues hasta el infierno se habrá helado.

Podremos declarar muerto al universo, no con estruendo sino con un gemido.

31. Motores galácticos

En todo sentido, las galaxias son objetos fenomenales. Representan la organización fundamental de la materia visible en el universo. Este contiene unos cien mil millones de ellas, y cada una alberga cientos de miles de millones de estrellas. Pueden ser espirales, elípticas o irregulares. La mayoría de ellas son fotogénicas. La mayoría, asimismo, viajan solas por el espacio, mientras otras orbitan en grupos, super grupos, familias y pares gravitacionalmente ligados.

La diversidad morfológica de las galaxias ha llevado a muchas clasificaciones que proporcionan un vocabulario conversacional para los astrofísicos. Una modalidad, la de las galaxias *activas*, emite una cantidad inusual de energía en una o más bandas de luz desde el centro de la galaxia. En el centro se encuentra el motor galáctico. Ahí se encuentra un agujero negro supermasivo.

El zoológico de las galaxias activas abarca algo semejante a una caja de sorpresas de un carnaval: galaxias con brote estelar, galaxias tipo BL Lacertae, galaxias Seyfert (tipos I y II), blazares, galaxias N, LINERS (*Low-Ionization Nuclear Emission-Line Region*, o Región Nuclear en las Líneas de Emisión a Baja Ionización), galaxias infrarrojas, galaxias de radio y, por supuesto, la realeza de las galaxias activas: los cuásares. La extraordinaria luminosidad de estas galaxias de élite proviene de la misteriosa actividad en el seno de una pequeña región sumida dentro de su núcleo.

Los cuásares, descubiertos a inicios de los años sesenta, son los más extraños. Algunos son mil veces más luminosos que nuestra Vía Láctea, pero su energía proviene de una región que cabría perfectamente dentro de los confines de las órbitas planetarias de nuestro sistema solar. Curiosamente, ninguno de ellos está cerca. El más cercano se encuentra a 1.5 mil millones de años luz; su luz ha viajado 1.5 mil millones de años hasta nosotros. Y la mayoría de los cuásares están a más de diez mil millones de años luz. Siendo tan pequeñas y estando a una gran distancia, en fotografías es difícil distinguirlas de los puntos que dejan las estrellas de nuestra Vía Láctea, por lo cual los telescopios de luz visibles son inútiles

para descubrirlos. Los cuásares más antiguos fueron, de hecho, descubiertos por medio de radiotelescopios. Como las estrellas no emiten grandes cantidades de ondas de radio, estos objetos representaban un nuevo tipo de algo disfrazado de estrella. En la tradición de los astrofísicos de llamar las cosas como se ven, estos objetos se denominaron *fuentes de radio cuasi estelares* o cuásares.

¿Qué clase de bestias son?

Nuestra capacidad de describir y comprender un fenómeno nuevo está siempre limitada por el contenido de la caja de herramientas científica y tecnológica. Una persona del siglo XVIII que, inopinadamente, fuera al siglo XX y regresara, describiría un automóvil como un coche sin caballo y un foco como un candil sin flama. Como desconoce el motor de combustión interna o la electricidad, su comprensión sería remota. Así pues, permítaseme declarar que creemos entender los principios básicos de lo que impulsa un cuásar. En lo que se conoce como el *modelo estándar*, los agujeros negros han sido considerados los motores de los cuásares y de todas las galaxias activas. Dentro de los umbrales de espacio y tiempo de un agujero negro, su horizonte de sucesos, la concentración de materia es tan grande que la velocidad necesaria para escapar es mayor a la velocidad de la luz. Como la velocidad de la luz es el límite universal, cuando se cae en un agujero negro, se cae para siempre, incluso si se está hecho de luz.

* * * *

¿CÓMO —PUDIERA PREGUNTARSE— algo que no emite luz puede emitir más luz que cualquier cosa en el universo? En las décadas de

1960 y 1970, los astrofísicos no tardaron en descubrir que las extrañas propiedades de los agujeros negros hacían contribuciones asombrosas al instrumental de los teóricos. De acuerdo con algunas leyes de la física gravitacional, conforme la materia gaseosa se precipita hacia un agujero negro, la materia debe calentarse e irradiar mucho antes de descender por el horizonte de sucesos. La energía proviene de la conversión eficiente de la energía potencial de la gravedad en calor.

Si bien no es una noción bien conocida, en nuestras vidas hemos visto cómo se convierte la energía potencial de la gravedad. Si alguna vez se ha dejado caer un plato al piso o si se ha arrojado algo por la ventana, puede entenderse el poder de la energía potencial de la gravedad. Simplemente, es energía no utilizada dotada de la distancia de un objeto desde dondequiera que impacte si cayera. Cuando los objetos caen, normalmente aumenta su velocidad, pero si algo detuviera la caída, toda la energía que el objeto ha ganado se convierte en la clase de energía que rompe o derrama cosas. Tal es la verdadera razón por la cual es más probable morir si se salta de un edificio alto que de uno bajo.

Si algo impide que un objeto adquiera velocidad, aunque siga cayendo, entonces la energía potencial convertida se revela de otra forma: usualmente como calor. Entre los buenos ejemplos, tenemos los vehículos espaciales y los meteoros cuando se calientan mientras atraviesan la atmósfera terrestre: desean acelerar, pero se los impide la resistencia del aire. En un experimento hoy famoso, en pleno siglo XIX el físico inglés James Joule creó un aparato que

agitaba una jarra de agua con palas giratorias por la acción de pesas que caían. La energía potencial de las pesas se transfería al agua, que elevaba su temperatura. Joule describió su experimento:

La pala se movía con gran trabajo en la lata de agua, de modo que las pesas (cada una equivalente a 1.8 kg) descendieron a un ritmo lento de como 0.3 m por segundo. La altura de las poleas desde el suelo era de 11 m, y consecuentemente, cuando las pesas descendieron esa distancia, tenían que rebobinarse para renovar el movimiento de las palas. Cuando esta operación ha sido repetida 16 veces, el incremento de la temperatura del agua fue acreditada mediante un termómetro muy sensible y preciso [...] Puedo, por tanto, concluir que se prueba la existencia de una relación equivalente entre el calor y las formas ordinarias de la fuerza mecánica [...] Si mi punto de vista es correcto, la temperatura del río Niágara aumentará un quinto de grado al cabo de su caída de 49 m (Shamos, 1959: 170).

El experimento de Joule se refiere, por supuesto, a las grandes cataratas del Niágara, pero si hubiera sabido de los agujeros negros habría dicho: «Si mi punto de vista es correcto, la temperatura del gas que se precipita a un agujero negro aumentará un millón de grados al cabo de su caída de 1 600 millones de kilómetros».

* * * *

COMO PODRÍA SOSPECHARSE, los agujeros negros tienen un prodigioso apetito por las estrellas que se aproximan demasiado. Una paradoja de los motores galácticos es que sus agujeros negros

deben comer para irradiar. El secreto para echar a andar el motor galáctico reside en la capacidad del agujero negro de destrozar inescrupulosa y alegremente las estrellas antes de que atraviesen el horizonte de sucesos. Las fuerzas de marea gravitacionales de un agujero negro estiran estrellas otrora esféricas de la misma forma como las fuerzas de marea gravitacionales de la Luna atraen los océanos de la Tierra para crear mareas altas y bajas. El gas que antes era parte de las estrellas (y posiblemente de nubes de gas ordinarias) no puede acelerar y caer adentro; el gas de astros ya destrozados impide la caída libre hacia el agujero. ¿El resultado? La energía potencial de la gravedad de la estrella desarrolla prodigiosos niveles de calor y radiación. Y a mayor gravedad de la meta, mayor la energía potencial de la gravedad disponible para convertir.

Ante la proliferación de vocablos para describir las galaxias excéntricas, el finado Gerard de Vaucouleurs (1983), consumado morfológico, le recordaba a la comunidad científica que un carro que ha sido deshecho no se convierte de repente que un coche de una clase distinta. Esta filosofía del coche chocado ha llevado a un modelo estándar de galaxias activas que unifica el zoológico. Este modelo cuenta con las suficientes partes móviles como para explicar la mayoría de las características básicas y observables. Por ejemplo, el gas que se precipita forma a menudo un opaco disco giratorio antes de descender a través del horizonte de sucesos. Si la salida de radiación no puede penetrar el disco de gas expulsado, entonces la radiación sale por arriba y abajo del disco para crear titánicos chorros de materia y energía. Las propiedades observadas de la

galaxia serán distintas si su chorro apunta hacia el observador o hacia los lados, o si el material expulsado se mueve con lentitud o a velocidades cercanas a la de la luz. El espesor y la composición química del disco, asimismo, influirán en su apariencia, así como en el ritmo en que se consumen las estrellas.

Alimentar un cuásar saludable requiere que su agujero negro engulla hasta 10 estrellas al año. Otras galaxias menos activas en nuestro carnaval destrozan menos estrellas al año. Muchos cuásares varían su luminosidad en escalas temporales de días e incluso horas. Permítaseme impresionar al lector con cuán extraordinario es esto. Si la parte activa de un cuásar tuviera el tamaño de la Vía Láctea (100 000 años luz de diámetro) y si se iluminara al mismo tiempo, se sabría desde el lado de la galaxia más cercano al observador, y 100.000 años después el resplandor llegaría desde el final de la galaxia; es decir, tomaría 100 000 años observar el brillo total del cuásar. Que un cuásar se alumbrara en cuestión de horas significaría que las dimensiones del motor no pueden ser mayores que unas horas luz de diámetro. ¿Cuán grande? Como del tamaño del sistema solar.

Con un análisis cuidadoso de las oscilaciones de la luz en todas las bandas, puede deducirse una estructura tridimensional rudimentaria, pero informativa, del material circundante. Por ejemplo, la luminosidad en rayos X pudiera variar en una escala temporal de horas, pero la luz roja pudiera variar en semanas. La comparación permite concluir que la parte que emite luz roja de la galaxia activa es mucho mayor que la parte que emite rayos X. Este

ejercicio puede repetirse a través de varias bandas de luz a fin de derivar una imagen asombrosamente completa del sistema.

Si en cuásares distantes la mayoría de esta acción hubiera sucedido durante los tiempos iniciales del universo, entonces ¿por qué ha dejado de ocurrir? ¿Por qué no hay cuásares locales? ¿Los cuásares muertos merodean en nuestras narices?

Hay buenas explicaciones. La más obvia es que los núcleos de las galaxias locales han agotado sus estrellas para alimentar al motor, pues han absorbido todos aquellos cuyas órbitas están demasiado cerca del agujero negro. Sin comida ya no hay prodigiosas regurgitaciones.

Un mecanismo de apagado más interesante surge de lo que sucede con las fuerzas de marea gravitacionales a medida que la masa del agujero negro (y su horizonte de sucesos) crece y crece. Como veremos más tarde, las fuerzas de marea no tienen nada que ver con la gravedad total que un objeto siente; lo que importa es la diferencia en su gravedad, la cual aumenta dramáticamente a medida que uno se aproxima al centro del objeto. Así, los agujeros negros masivos en realidad ejercen menos fuerza de marea que los más pequeños. Aquí no hay misterio. La gravedad que el Sol ejerce sobre la Tierra es mucho mayor que la de la Tierra sobre la Luna, aunque la proximidad de la Luna permite que esta influya con una fuerza de marea mayor sobre nuestro planeta, con una distancia de apenas 386.000 kilómetros.

Por tanto, es posible que un agujero negro coma tanto que su horizonte de sucesos crezca de tal manera que su fuerza de marea

ya no sea suficiente para destrozar una estrella. Cuando esto sucede, toda la energía potencial de gravedad se convierte a la velocidad del astro y este es engullido entero a medida que se precipita por el horizonte de sucesos, sin conversión a calor y radiación. Esta válvula de apagado se activa en un agujero negro mil millones de veces la masa del Sol.

Estas ideas son muy poderosas y ofrecen una rica variedad de conceptos explicativos. La imagen unificada predice que los cuásares y otras galaxias activas tan solo son capítulos iniciales en la vida del núcleo de una galaxia. Para que esto sea cierto, alguna imagen especialmente expuesta de un cuásar debiera revelar la vellosidad circundante de su galaxia. El reto observacional es similar al que enfrentan los cazadores en el sistema solar que trataban de detectar planetas ocultos en el resplandor de su estrella. El cuásar es más brillante que su galaxia circundante y se necesitan técnicas de enmascaramiento especiales para encontrar al cuásar. Desde luego, casi todas las imágenes de alta resolución de los cuásares revelan el halo galáctico. Las escasas imágenes de cuásares sin velo siguen frustrando las expectativas del modelo estándar. ¿O será que las galaxias simplemente están debajo de los límites de detección?

Asimismo, la imagen unificada predice que los cuásares finalmente se apagarán. En realidad, la imagen unificada debe predecir esto por cuanto lo requiere la ausencia de cuásares cercanos. Pero también significa que los agujeros negros en los núcleos galácticos deben ser comunes independientemente de que la galaxia tenga un

núcleo activo. En efecto, la lista de galaxias cercanas que contienen agujeros negros supermasivos latentes en sus núcleos crece cada vez más, mes tras mes, e incluye la Vía Láctea. Su existencia es revelada por las velocidades astronómicas con que las estrellas orbitan cerca (pero no demasiado) del agujero negro mismo. Los modelos científicos fértiles siempre son seductores, pero ocasionalmente hay que preguntarse si este es fértil porque atrapa alguna verdad profunda acerca del universo o porque fue elaborado con tantas variables ajustables que con él se puede explicar lo que sea. ¿Hemos sido hoy tan listos o nos falta algún instrumento que será descubierto o inventado mañana? El físico inglés Dennis Sciama conoció bien este dilema cuando señaló: «En vista de que nos parece difícil elaborar un modelo adecuado de cierto tipo, la naturaleza pudiera ser más lista que nosotros. Incluso descuida la posibilidad de que mañana podamos ser más listos de lo que somos hoy» (1971: 80).

32. Colisiones

Desde que se descubrieron los huesos de dinosaurios extintos, los científicos no han parado de ofrecer explicaciones respecto a la desaparición de estas pobres bestias. Quizás el tórrido clima desecó las fuentes de agua, dicen algunos. Tal vez los volcanes cubrieron la superficie de lava y envenenaron el aire. Acaso la órbita y el eje de la Tierra se inclinaron y provocaron una edad de hielo. Quizá muchos mamíferos antiguos se comieron demasiados huevos de dinosaurios. O tal vez los dinosaurios carnívoros se comieron a todos los

herbívoros. A lo mejor, la necesidad de obtener agua condujo a grandes migraciones en las cuales se esparcieron epidemias. Quizás el problema real haya sido una reconfiguración de las masas continentales causada por movimientos tectónicos.

Todas estas crisis tienen algo en común: los científicos que pensaron en ellas fueron bien entrenados en el arte de mirar hacia abajo.

Sin embargo, otros, entrenados en el arte de mirar hacia arriba, empezaron a establecer las conexiones entre las peculiaridades de la superficie terrestre y las visitas de los vagabundos del espacio exterior. Tal vez los impactos de meteoros generaron algunos de estos rasgos, tales como el cráter Barringer, ese famoso tazón de 1.6 km de ancho en el desierto de Arizona. En los años cincuenta el geólogo estadounidense Eugene M. Shoemaker y sus colegas descubrieron una especie de roca que se forma bajo una presión de corta duración, pero extremadamente fuerte, exactamente aquello que haría un veloz meteorito. Los geólogos finalmente acordaron que un impacto ocasionó ese tazón (ahora llamado sensatamente *cráter de meteorito*) y el descubrimiento de Shoemaker resucitó el concepto decimonónico de *catastrofismo*, la idea de que la piel de nuestro planeta puede ser cambiada por eventos destructivos breves y poderosos.

Apenas se abrieron las puertas de la especulación, la gente empezó a preguntarse si los dinosaurios habrían desaparecido debido a un ataque semejante pero mayor. Veamos al iridio: un material raro, aunque común en los meteoritos metálicos y conspicuos en una

capa de arcilla de 65 millones de años, que se halla en varios lugares en todo el mundo. Esa arcilla, que se remonta a los tiempos de la extinción de los dinosaurios, marca la escena del crimen: el fin de los cretáceos. Veamos al cráter de Chicxulub, una depresión de 200 kilómetros de ancho en el borde de la península de Yucatán, en México. También tiene 65 millones de años de edad. Las simulaciones de computadora respecto del cambio climático dejan en claro que cualquier impacto que hubiera formado dicho cráter habría arrojado a la estratósfera tanta cantidad de material de la corteza terrestre como para causar una catástrofe climática global. ¿Quién pudiera pedir más? Tenemos al perpetrador, el arma y una confesión.

Caso cerrado.

¿O tal vez no?

La investigación científica no debe detenerse solo porque aparentemente se ha hallado una explicación razonable. Algunos paleontólogos y geólogos permanecen escépticos ante la idea de que Chicxulub sea el principal responsable por la desaparición de los dinosaurios. Algunos piensan que Chicxulub pudo haber sucedido mucho antes de la extinción. Además, la Tierra estaba entonces volcánicamente muy ocupada. Más aún, otras olas de extinción han ocurrido a lo largo de la Tierra sin dejar cráteres y extraños metales cósmicos como evidencia. Y no todo lo malo que llega del espacio deja un cráter; algunos objetos explotan en el aire y jamás llegan a la superficie terrestre.

Así, aparte de los impactos, ¿qué nos espera de un cosmos inquieto? ¿Qué pudiera mandarnos el universo para destruir el patrón de la vida en la Tierra?

* * * *

MUCHOS EPISODIOS DE EXTINCIÓN masiva han puntuado la historia de los pasados 500 millones de años en la Tierra. El mayor fue ordovícico, hace 440 millones de años; el devónico, hace unos 370 millones; el pérmico, hace 250 millones; el triásico, hace 210 millones, y —por supuesto— el cretácico, hace 65 millones. Han ocurrido otros episodios menores en periodos de decenas de millones de años.

Algunos investigadores han señalado que, en promedio, un episodio importante ocurre aproximadamente cada 25 millones de años. Aquellos que suelen mirar hacia arriba prefieren los fenómenos que suceden a intervalos largos, por lo que los astrofísicos decidieron nombrar algunos asesinos.

Démosle al Sol un astro acompañante tenue y distante, como formularon algunos en la década de 1980. Declaremos que su periodo orbital es de 25 millones de años y su órbita es extremadamente alargada, de modo que pueden pasar muchos años tan lejos de la Tierra que no puede ser detectado. Este acompañante podría desconcertar la lejana reserva de cometas del Sol cada vez que atraviesa el vecindario. Legiones de cometas se zafarían de sus órbitas en el sistema solar exterior y la tasa de impactos en la superficie terrestre aumentaría enormemente.

Tal fue la génesis de Némesis, nombre que se le ha dado a esta posible estrella asesina. Los análisis subsecuentes de los episodios de extinción han convencido a la mayoría de los expertos de que el tiempo promedio entre las catástrofes han variado demasiado para implicar algo realmente periódico. Pero por algunos años esta idea fue una noticia.

La periodicidad no fue la única idea fascinante acerca de la muerte desde el espacio exterior. Otra fue las pandemias. El finado astrofísico *sir* Fred Hoyle y su colaborador Chandra Wickramasinghe, que actualmente se desempeña en la Universidad de Cardiff en Gales, reflexionaron en torno a si la Tierra pudiera pasar ocasionalmente por una nube interestelar llena de microorganismos o haber recibido polvo rico en ellos provenientes de un cometa que pasara cerca; tal encuentro pudo haber causado alguna terrible epidemia; peor aún, alguna gigantesca nube o rastro de polvo pudieron haber sido verdaderos asesinos, al llevar consigo virus capaces de infectar y destruir a numerosas especies. De los muchos retos que enfrenta esta idea, nadie sabe cómo una nube interestelar pudiera fabricar y llevar algo tan complejo como un virus.

¿Algo más? Los astrofísicos han imaginado un espectro casi interminable de tremendas catástrofes. Por ejemplo, la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda, nuestro gemelo distante a 2.4 millones de años luz, están acercándose entre sí. Como ya se comentó, en aproximadamente siete mil millones de años podrían chocar, ocasionando el equivalente cósmico de un descarrilamiento de un

tren. Las nubes de gas se estrellarían entre sí, las estrellas se lanzarían por todos lados. Si alguna estrella se acercara lo suficiente como para ejercer atracción gravitacional, nuestro planeta pudiera salir del sistema solar, dejándonos desamparados en las sombras.

Eso sería malísimo.

Dos mil millones de años antes de que ello suceda, sin embargo, el Sol habrá muerto de causas naturales, engullendo a los demás planetas —incluyendo a la Tierra—, vaporizando todo su contenido material.

Eso sería peor.

Y si un agujero negro intruso se acercara demasiado a la Tierra, se cenaría todo el planeta, primero convirtiendo la corteza en una pila de cascajo gracias a su inmensa fuerza de marea gravitacional. Los restos serían expulsados por el tejido del espacio-tiempo descendiendo como una cadena de átomos a través del horizonte de sucesos del agujero negro hasta convertirse en una singularidad.

Pero el registro geológico de la Tierra jamás menciona nada parecido a un encuentro cercano con un agujero negro, ningún derrumbe, ningún almuerzo. Y en vista de que se espera hallar un número muy escaso de agujeros negros en las cercanías del sistema solar, yo diría que hay temas de supervivencia más urgentes.

* * * *

¿Y QUÉ TAL CON MORIR FRITOS por ondas de radiación y partículas electromagnéticas lanzadas por la explosión de un astro?

La mayoría de las estrellas mueren pacíficamente, expulsando suavemente sus gases en el espacio interestelar. Pero en una de cada mil, la estrella cuya masa es mayor que siete u ocho veces la del Sol perece en una violenta explosión llamada *supernova*. Si nos halláramos a unos 30 años luz de una supernova, recibiríamos una dosis letal de *rayos cósmicos*, partículas de alta energía que se lanzan a través del espacio a casi la velocidad de la luz.

Las primeras bajas serían las moléculas de ozono. El ozono estratosférico (O_3) absorbe normalmente la dañina radiación ultravioleta del Sol. Así, la radiación convierte las moléculas de ozono en oxígeno (O) y oxígeno molecular (O_2). Los átomos de oxígeno recién liberados se combinan con los de otras moléculas de oxígeno reconstituyendo el ozono. Normalmente, los rayos ultravioletas del Sol destruyen la capa de ozono al mismo ritmo que se reproduce el nuevo ozono. Pero un ataque apabullante sobre nuestra estratosfera destruiría el ozono demasiado velozmente dejando a los humanos buscando desesperadamente un bloqueador solar.

Apenas la primera ola de rayos cósmicos destruya nuestra capa defensiva de ozono, los rayos ultravioletas del Sol avanzarán sobre la superficie terrestre, dividiendo las moléculas de oxígeno y nitrógeno. Para las aves, mamíferos y demás residentes de la superficie y el espacio aéreo terrestre ello sería terrible. Los átomos de oxígeno y nitrógeno libres se combinarían de inmediato. Un producto sería bióxido de nitrógeno, componente del smog, que oscurecería la atmósfera y ocasionaría que la temperatura se

desplomara. Tal vez empezaría una nueva era de hielo al tiempo que los rayos ultravioletas lentamente esterilizarían la superficie de la Tierra.

PERO LOS RAYOS ULTRAVIOLETAS lanzados en todas direcciones por una supernova son tan solo una picadura de mosco en comparación con los rayos gamma que arrojaría una hipernova.

Al menos una vez al día, breves estallidos de rayos gamma, la radiación de mayor energía, desatan la energía de mil supernovas dondequiera en el cosmos. Los estallidos de rayos gamma fueron descubiertos accidentalmente en la década de 1960 por los satélites de la Fuerza Aérea de Estados Unidos, lanzados con el propósito de detectar las radiaciones que emitieran las pruebas nucleares clandestinas que la Unión Soviética pudiera llevar a cabo, violando el Tratado de Prohibición Parcial de Ensayos Nucleares de 1963. Lo que los satélites hallaron fueron señales del universo mismo.

Al principio, nadie sabía qué eran los estallidos o el intervalo en que sucedían. En vez de agruparse a lo largo del plano del disco principal de astros y gas de la Vía Láctea, provenían de diversas direcciones en el firmamento; en otras palabras, de todo el cosmos. Aun así, de seguro debían de estar sucediendo cerca. Al menos dentro de aproximadamente un diámetro galáctico de la Tierra. De lo contrario, ¿cómo podría explicarse toda la energía que se registra en la Tierra?

En 1997 una observación de un telescopio orbital de rayos X italiano resolvió el debate: los estallidos de rayos gamma eran

eventos extragalácticos extremadamente distantes, que anunciaban, tal vez, la explosión de alguna estrella supermasiva y el nacimiento de un agujero negro. El telescopio había detectado el destello de rayos X de un famoso estallido, GRB 970228. Pero los rayos X se habían desplazado al rojo por el efecto Doppler. Resulta que este hecho de luz y el universo en expansión permitió a los astrofísicos determinar con exactitud su distancia. El destello de GRB 970228, que llegó a la Tierra el 28 de febrero de 1997, llegó claramente desde la mitad del universo, a miles de millones de años luz. Al año siguiente, Bohdan Paczynski, astrofísico de Princeton, acuñó el término *hipernova* para describir la fuente de tales estallidos. Personalmente, me hubiera gustado que se llamara *súper-dúper-supernova*.

Una hipernova es una supernova en 100.000 que produce un estallido de rayos gamma, que genera en un momento la misma cantidad de energía que nuestro Sol emitiría al ritmo actual en un billón de años. A reserva de que se descubra alguna nueva ley de la física, la única forma de alcanzar esta cantidad de energía es disparar la producción total de la explosión en un rayo angosto, casi de la misma forma como un haz de luz de una linterna que se concentra gracias a un espejo parabólico. Si se impulsa la energía de una supernova por un rayo angosto, todo en su paso recibiría todo el poder explosivo. Mientras tanto, todo lo que no reciba dicho rayo permanecerá intacto. Cuanto más angosto sea el rayo, más intenso el flujo de energía y menos los ocupantes cósmicos que podrán verlo.

¿Qué crea estos rayos gamma? Tómese en consideración la estrella supermasiva original. Poco antes de su muerte a consecuencia del agotamiento de su combustible, el astro expulsa sus capas exteriores. Queda oculto en un vasto caparazón nuboso, posiblemente hinchado por focos de gas remanentes de la nube que originalmente creó la estrella. Cuando esta finalmente se colapsa y estalla, libera grandes cantidades de materia y de energía. El primer ataque de materia y energía golpea los puntos débiles del caparazón de gas permitiendo que la materia y la energía subyacente penetren por el mismo punto. Los modelos de computadora de ese complicado escenario sugieren que los puntos débiles son típicamente aquellos que se hallan en los polos norte y sur del astro. Cuando se observan desde fuera del caparazón, dos poderosos haces viajan en dirección opuesta, dirigiéndose hacia los detectores de rayos gamma (cualesquiera que estos sean) que se hallan en su camino.

Adrian Melott, astrónomo de la Universidad de Kansas, y un grupo interdisciplinario afirman que la extinción ordovícica pudo haber sido causada por un encuentro directo con un estallido de rayos gamma. Un cuarto de las familias de organismos terrestres pereció. Y nadie ha hallado evidencia de un impacto de meteoro que coincida con ese evento.

* * * *

CUANDO SE ES UN MARTILLO (como dice el dicho) todos los problemas parecen clavos. Si se es un experto en meteoritos que piensa en la extinción súbita de diversas especies, se querrá decir

que ello fue debido a un impacto. Si se es un petrólogo ígneo, la culpa es de los volcanes. Si uno estudia las bionubes espaciales, ello se debió a un virus interestelar. Si se es un experto en hipernovas, hay que ver a los rayos gamma.

No importa quién tenga la razón, lo cierto es que ramas enteras del árbol de la vida pueden extinguirse casi instantáneamente.

¿Quién sobreviviría estos ataques? Es bueno ser chico. Los microorganismos tienden a sobrevivir la adversidad. Más importantemente si se vive donde el Sol no brilla, en el fondo del océano, en los resquicios de rocas enterradas, en las arcillas y suelos de granjas y bosques. La enorme biomasa subterránea sobrevive. Serán quienes hereden la Tierra una y otra vez.

33. Muerte por agujero negro

Sin duda, la forma más espectacular de morir en el espacio es caer dentro de un agujero negro. ¿Dónde más en el universo pudiera perderse la vida a manos de algo que te arranca átomo por átomo?

Los agujeros negros son regiones de espacio donde la gravedad es tan alta que el tejido del espacio y el tiempo se curva sobre sí mismo, cerrando las puertas de salida. Otra forma de ver este dilema: la velocidad que se necesita para escapar de un agujero negro es mayor que la velocidad de la luz. Como vimos en el capítulo 3, la luz viaja exactamente a 299 792 458 metros por segundo y es lo más veloz que hay en el universo. Si la luz no puede escapar, tampoco usted, y por ello es que se llaman *agujeros negros*.

Todos los objetos cuentan con velocidades de escape. La de la Tierra es apenas 11 kilómetros por segundo, por lo cual la luz escapa libremente, como lo haría cualquier cosa que volara más rápido que 11 kilómetros por segundo. Así que por favor dígame a todos los que gustan de decir «todo lo que sube tiene que bajar» que han sido mal informados.

La teoría de la relatividad general de Albert Einstein, publicada en 1916, proporciona claves para comprender la extraña estructura del espacio y el tiempo en un ambiente de alta gravedad. Investigaciones posteriores del físico estadounidense John A. Wheeler, y otros, han ayudado a formular un vocabulario, así como el instrumental matemático para describir y predecir lo que un agujero negro puede hacer a sus alrededores; por ejemplo, el límite exacto entre dónde puede escapar la luz, que separa lo que se halla en el universo de aquello que se ha perdido en un agujero negro, lo que se conoce poéticamente como el *horizonte de sucesos*. Y por convención, el tamaño de un agujero negro es el del horizonte de sucesos, que es una cantidad que puede calcularse y medirse. Mientras tanto, la masa que está adentro del horizonte de sucesos se ha reducido a un punto infinitesimal en el centro del agujero negro. Así que estos no solo son objetos mortíferos sino regiones mortíferas del espacio.

Exploremos en detalle qué hacen los agujeros negros a un cuerpo humano que se acercara demasiado.

Si uno se tropezara con un agujero negro y cayera con los pies por delante hacia el centro, a medida que se acerque la fuerza de

gravedad del agujero negro crecería astronómicamente. Es curioso, pero usted no sentiría esta fuerza, pues todo aquello que está en caída libre está ingrávido. Sin embargo, lo que se siente es algo mucho más siniestro. Mientras se cae, la fuerza de gravedad del agujero negro en sus pies, por estar más cerca del centro, se acelera más velozmente que la fuerza más débil en su cabeza. La diferencia entre ambas fuerzas se conoce oficialmente como *fuerza de marea*, la cual crece aceleradamente a medida que se aproxima al centro. En la Tierra y en la mayoría de los lugares del cosmos, esta fuerza en el cuerpo humano es tan minúscula que no se advierte. Pero en esta caída hacia el agujero negro, la fuerza de marea es lo que se siente. Si estuviéramos hechos de hule, nos podríamos estirar en respuesta, pero los humanos estamos hechos de otros materiales, como huesos, músculos y órganos. Nuestro cuerpo permanecería entero hasta que las fuerzas de marea excedieran las ligas moleculares del cuerpo. (Si la Inquisición hubiera tenido acceso a los agujeros negros, en lugar de los potros, de seguro hubiera sido el instrumento de estiramiento preferido).

Este es el momento terrible cuando el cuerpo se parte en dos segmentos. Al descender aún más, la diferencia en la gravedad empieza a crecer, y ambas partes se vuelven a romper en dos. Poco después, tales segmentos se subdividen sucesivamente, bifurcando el cuerpo en más y más partes: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, etcétera. Luego de que uno ha sido destrozado en jirones de moléculas orgánicas, las moléculas comienzan a sentir las crecientes fuerzas de marea. Finalmente, se rompen en un chorro de sus propios

átomos. Y entonces, por supuesto, los átomos se dividen dejando un desfile irreconocible de partículas que, minutos atrás, habían sido un ser humano.

Pero hay más malas noticias.

Todas las partes del cuerpo se desplazan al mismo sitio: el centro del agujero negro. Así que mientras uno es deshecho de la cabeza a los pies, será expulsado a través del tejido del espacio y el tiempo, como una crema dental que se exprime por un tubo.

A la lista de palabras que describen las maneras de morir (por ejemplo, homicidio, suicidio, electrocución, sofocación, hambre) agregamos *espaguetización*.

* * * *

A MEDIDA QUE UN AGUJERO NEGRO se alimenta, su diámetro crece en proporción directa a su masa. Si, por ejemplo, un agujero negro se comiera el triple de su masa, su diámetro crecería al triple. Por tanto, los agujeros negros pueden tener cualquier tamaño, pero no todos nos *espaguetizarán* antes de atravesar el horizonte de sucesos. Solo los «pequeños» lo hacen. ¿Por qué? Para sufrir una muerte gráfica y espectacular, lo que importa es la fuerza de marea; como regla general, la fuerza de marea solo es grande cuando el tamaño de nuestro cuerpo es grande en comparación con la distancia entre nosotros y el centro del objeto.

En un ejemplo simple pero extremo, si un hombre de 1.8 m de estatura (que no es fácil de desmembrar) cayera con los pies por delante hacia un agujero negro de 1.8 m, entonces en el horizonte de sucesos su cabeza se encontraría al doble de la distancia al

centro del agujero que sus pies. Aquí, la diferencia en la fuerza de gravedad de los pies y la cabeza sería muy grande. Pero si el agujero negro midiera 1 800 m de diámetro, entonces los pies de este individuo estarían a una décima de 1% más cerca que su cabeza, y la diferencia en la gravedad —la fuerza de marea— sería correspondientemente pequeña.

De manera equivalente, se podría hacer una simple pregunta: ¿cuán velozmente puede cambiar la fuerza de gravedad a medida que uno se aproxima a un objeto? Las ecuaciones de gravedad muestran que la gravedad cambia con mayor velocidad a medida que uno se acerca al centro de un objeto. Los agujeros negros más pequeños permiten acercarse mucho más a su centro antes de ingresar al horizonte de sucesos, por lo cual el cambio en la gravedad a distancias cortas puede ser devastador para los que caigan en ellos. Un agujero negro ordinario contiene muchas veces la masa del Sol, pero concentra todo en un horizonte de sucesos de 19 km de diámetro. Esto es lo que los astrónomos discuten en sus pláticas informales sobre este asunto. En una caída adentro de esta bestia, su cuerpo empezará a quebrarse a 161 km del centro. Otro tipo de agujero negro contiene mil millones de veces la masa del Sol y su horizonte de sucesos es de casi el tamaño de todo el sistema solar. Agujeros negros así son los que se hallan en el centro de las galaxias. Aunque su gravedad total sea monstruosa, la diferencia en gravedad de nuestra cabeza a los pies cerca de sus horizontes de sucesos es relativamente pequeña. En efecto, su fuerza de marea puede ser tan débil que uno pudiera caer dentro de su horizonte de

sucesos en una sola pieza, solo que jamás podría salir de ahí para contarlo. Y cuando finalmente uno sea deshecho, ya adentro del horizonte, nadie que esté afuera podrá verlo.

Hasta donde sé, nadie ha sido comido por un agujero negro, pero hay evidencia convincente que sugiere que los agujeros negros rutinariamente se alimentan de estrellas ambulantes y de nubes de gas. A medida que se acerca la nube al agujero, casi nunca cae de manera directa. A diferencia de una caída de coreografía, con los pies por delante, una nube de gas es arrastrada a orbitar alrededor antes de precipitarse en espiral a su destrucción. Las partes de la nube que están más cerca del agujero negro orbitarán más rápido que aquellas que se hallan más lejos. Conocido como rotación diferencial, este simple cizallamiento puede acarrear extraordinarias consecuencias astrofísicas. A medida que las capas de nubes se precipitan cada vez más cerca del horizonte, se calientan, debido a la fricción interna, hasta sobrepasar el millón de grados —más caliente que cualquier estrella conocida—. El gas brilla con luz azul a medida que se convierte en una gran fuente de energía ultravioleta y de rayos X. Lo que inició como un agujero negro aislado e invisible (que a nadie molestaba) ahora es un agujero negro invisible rodeado de una autopista gaseosa que resplandece con la radiación de alta energía.

En vista de que las estrellas son 100% bolas certificadas de gas, no son inmunes al destino que sufrió nuestra pobre nube. Si una estrella en un sistema binario se convierte en un agujero negro, este no podrá comer sino hasta finales de la vida de su acompañante,

cuando crezca para convertirse en una gigante roja. Si esta crece lo suficiente, al final será desollada a medida que el agujero negro pele y se coma a la estrella, capa por capa. Para un astro que ambulara por el vecindario, las fuerzas de marea al principio lo estirarían, si bien finalmente la rotación diferencial lo destrozará en un disco de gas muy luminoso.

Cuando un astrofísico teórico necesita una fuente de energía en un espacio diminuto para explicar algún fenómeno, los agujeros negros se vuelven la principal materia prima. Por ejemplo, como hemos visto, los lejanos y misteriosos cuásares tienen cientos o miles de veces la luminosidad de toda la Vía Láctea, pero su energía emana principalmente de un volumen que no es mayor que el de nuestro sistema solar. Sin un agujero negro supermasivo como motor central del cuásar, no tenemos una explicación alterna.

Sabemos ahora que los agujeros negros son comunes en los núcleos de las galaxias. Para algunas de ellas, una luminosidad sospechosamente alta en un volumen sospechosamente estrecho proporciona la necesaria evidencia, pero la luminosidad real depende bastante de si hubiera estrellas y gas para que el agujero negro los destroce. Otras galaxias pudieran tener uno también, pese a tener una luminosidad central ordinaria. Estos agujeros negros podrían haberse comido todas las estrellas y gas circundantes sin dejar rastro. Pero los astros cercanos al centro, en órbita cercana al agujero (aunque no tanto como para ser consumidos) se moverán de manera muy acelerada.

Tales velocidades, al combinarse con las distancias de los astros respecto del centro de la galaxia, son directamente proporcionales a la masa total contenida en sus órbitas. Con esa información, se puede calcular si la masa central atrayente es, en efecto, lo suficientemente concentrada para ser un agujero negro. Los mayores suelen tener masas de mil millones de soles, como las que se hallan en la titánica galaxia elíptica M87, la mayor del grupo de galaxias de Virgo. Al final de la lista, aunque todavía grande, se encuentra el agujero negro de 30 millones de masas solares en el centro de la galaxia de Andrómeda, nuestra vecina espacial cercana. ¿Empieza a sentir envidia del agujero negro? Es justificable: el del centro de la Vía Láctea mide apenas cuatro millones de masas solares. Pero sin importar la masa, se dedican a la muerte y la destrucción.

Parte 6

Ciencia y cultura

La inquieta interconexión entre el descubrimiento cósmico y la reacción pública

Contenido:

- 34. Lo que la gente dice*
- 35. Miedo a los números*
- 36. Lo que es estar desconcertado*
- 37. Huellas en la arena de la ciencia*
- 38. Que se haga la oscuridad*
- 39. Noches de Hollywood*

34. Lo que la gente dice

En cierta ocasión Aristóteles aseguró que los planetas se movían frente a un fondo de estrellas, y que si bien las estrellas fugaces, cometas y los eclipses representaban la variabilidad intermitente en el firmamento, las estrellas estaban siempre inmóviles y eran inmutables, y la Tierra era el centro de todo el movimiento en el universo. Desde nuestro pedestal ilustrado, 25 siglos después, nos reímos un poco ante la locura de esas ideas, pero sus declaraciones fueron la consecuencia de observaciones legítimas, aunque simples, del mundo natural.

Aristóteles hizo también otras aseveraciones: que los objetos pesados caen más velozmente que los ligeros. ¿Quién podría disputar eso? Obviamente, las rocas caen más rápido que las hojas

de los árboles. Pero Aristóteles fue más allá al declarar que los objetos pesados caen más rápido que los ligeros en proporción directa a su peso, de modo que un objeto de 5 kg caería 10 veces más velozmente que uno de medio kilogramo.

Aristóteles estaba muy errado.

Para probarlo simplemente hay que dejar caer una roca pequeña y una grande simultáneamente desde la misma altura. A diferencia de las hojas que revolotean en el aire al caer, las rocas no hallarán resistencia del aire que influya en su caída, por lo que ambas darán contra el suelo al mismo tiempo. Este experimento no requiere una beca de la Fundación Nacional de la Ciencia. Aristóteles pudo haberlo llevado a cabo, pero no lo hizo. Sus enseñanzas fueron adoptadas y convertidas en doctrinas por la Iglesia católica. Y gracias al poder e influencia de la Iglesia, la filosofía aristotélica se afianzó en el conocimiento común del mundo occidental, creído a ciegas. No solamente la gente repetía a los demás lo que no era cierto, sino que desestimaba lo que claramente ocurría pero que se suponía que no era cierto. Cuando se investiga científicamente el mundo natural, lo único peor que un creyente ciego es un observador en plena negación. En 1054 d. C., una estrella en la constelación de Tauro empezó a brillar súbitamente un millón de veces más que antes. Los astrónomos chinos escribieron al respecto, los del Medio Oriente también, los indígenas de América que vivían en lo que hoy es el sudoeste de Estados Unidos la representaron en piedra. El astro resplandeció tanto que por semanas se podía ver a plena luz del día, y, sin embargo, no hay registro de este hecho en

los anales de Europa. (La brillante estrella era en realidad una supernova que había estallado siete mil años antes, cuya luz acababa de llegar a la Tierra). Ciertamente, Europa vivía en la Edad Media, por lo cual no puede esperarse que la capacidad de investigación fuera entonces común, pero los eventos cósmicos que se «permitía» que ocurriesen eran registrados de manera rutinaria. Por ejemplo, 12 años después, en 1066, lo que se conocería más tarde como el cometa Halley había sido registrado, con todo y observadores maravillados, en parte del famoso tapiz de Bayeux, *circa* 1100. Era la excepción, en efecto. La Biblia dice que las estrellas no cambian. Aristóteles dijo que las estrellas no cambian. La Iglesia, con su autoridad sin par, declaró que las estrellas no cambian. Entonces la población cayó víctima de una alucinación colectiva más fuerte que los poderes de observación de los individuos.

Todos llevamos alguna creencia ciega, pues no podemos poner a prueba todo lo que los demás dicen. Cuando yo digo que el protón tiene una contraparte de antimateria (el antiprotón) cualquier persona necesitaría mil millones de dólares en equipo de laboratorio para verificar mi afirmación. Así que es más fácil tan solo creerme y confiar en que, al menos la mayor parte del tiempo, en lo relativo al mundo astrofísico, sé de lo que estoy hablando. Por mí está bien si usted sigue siendo escéptico. De hecho, yo aliento el escepticismo. Puede visitar el acelerador de partículas más cercano para ver la antimateria por sí mismo. Pero ¿y qué hay con todos los enunciados que no exigen aparatos complejos para comprobarse? Pudiera

pensarse que, en nuestra cultura moderna e ilustrada, el saber popular sería inmune a las falsedades fácilmente comprobables.

Pues no es así.

Tómense en cuenta las siguientes declaraciones. «La Estrella Polar es el astro más brillante en el cielo nocturno». «El Sol es una estrella amarilla». «Lo que sube tiene que bajar». «En una noche oscura pueden verse millones de estrellas a simple vista». «En el espacio no hay gravedad». «Una brújula apunta al norte». «Los días se vuelven más cortos en el invierno y más largos en verano». «Los eclipses totales son infrecuentes».

Todo lo dicho en el párrafo anterior es falso.

Muchas personas (tal vez la mayoría) creen uno o más de estos enunciados y los repiten a pesar de que se les demuestre su falsedad. Bienvenidos a mi cantaleta en contra de lo que la gente dice.

La Estrella Polar no es el astro más brillante del cielo nocturno, ni siquiera es lo bastante brillante como para figurar en la lista de los 40 objetos más brillantes del cielo. Cuando se observa al cielo del norte, tres de las siete estrellas de la Osa Mayor, incluyendo su astro puntero, brillan más que la Estrella Polar, la cual se encuentra estacionada a una distancia de tres veces el ancho de un puño. No hay excusa.

No me importa lo que alguien alguna vez le haya dicho; el Sol es blanco, no amarillo. La percepción humana del color es un tema complicado, pero si el Sol fuera amarillo, como un foco amarillo, entonces las cosas blancas, como la nieve, reflejarían esa luz y se

verían de color amarillo, una condición de la nieve que solo se aprecia cuando está cerca de los tubos hidrantes⁶[1]. ¿Qué podría conducir a la gente a pensar que el Sol es amarillo? Al mediodía, un vistazo al Sol puede dañar los ojos. Cerca del crepúsculo, sin embargo, con el Sol cerca del horizonte y donde la dispersión atmosférica de la luz azul se halla en su punto más alto, la intensidad del Sol es mucho menor. La luz azul del espectro solar, perdida en el cielo crepuscular, deja un tono amarillo anaranjado rojizo del disco solar. Cuando la gente mira a este Sol poniente, cuyo color está distorsionado, se alimenta su error.

Lo que sube no tiene que bajar. Toda clase de pelotas de golf, banderas, automóviles y restos de sondas espaciales contaminan la superficie lunar. A menos que alguien vaya a recogerlos, jamás volverán a la Tierra. Jamás. Si uno quiere subir y nunca bajar, lo que hay que hacer es viajar a una velocidad superior a 11 km por segundo. Finalmente, la gravedad terrestre lo refrenará, pero jamás logrará revertir su movimiento ni lo obligará a descender a la Tierra. A menos que sus ojos tengan pupilas del tamaño de lentes de binoculares, independientemente de sus condiciones visuales, y de su ubicación en la Tierra, no podrá observar más de 5 o 6 mil astros de los aproximadamente cien mil millones en la Vía Láctea. Inténtenlo una noche. Las cosas se ponen peores cuando hay Luna. Y si la Luna está llena, alumbrará el firmamento y no dejará ver excepto algunos cientos de las estrellas más brillantes.

⁶ Vea la nota del *capítulo 17*.

Durante el programa del *Apollo*, cuando una de sus misiones iba rumbo a la Luna, un presentador de televisión anunció el momento exacto en que «los astronautas dejaron el campo gravitatorio de la Tierra». En vista de que los astronautas iban en camino a la Luna, y en vista de que la Luna orbita la Tierra, entonces la gravedad terrestre debe llegar *al menos hasta la Luna*. En efecto, la gravedad terrestre y la de todos los objetos en el universo se extiende sin límite, aunque con fuerza decreciente. En el espacio cada punto está repleto de incontables jalones gravitacionales en dirección de todos los objetos. Lo que el locutor quiso decir era que los astronautas habían atravesado el punto en el espacio en que la fuerza de la gravedad lunar excedía a la de la Tierra. La tarea del poderoso cohete *Saturno V* era imbuir al módulo de comando con la suficiente velocidad inicial para alcanzar ese punto a partir del cual se puede acelerar pasivamente rumbo a la Luna. La gravedad está en todas partes.

Todos saben que en los imanes los polos opuestos se atraen, mientras que los similares se repelen. Pero en una brújula la aguja está diseñada para que la mitad que ha sido magnetizada como «Norte» señale al polo norte magnético de la Tierra. La única forma de que un objeto magnetizado pudiera alinearse con el polo norte magnético es si este se hallara en el polo sur magnético y viceversa. Además, no hay una ley particular del universo que requiera una alineación precisa de los polos magnéticos de un objeto con sus polos geográficos. En la Tierra ambos están separados por

aproximadamente 1300 km, lo cual vuelve la navegación por brújula un ejercicio fútil en el norte de Canadá.

En virtud de que el primer día de invierno es el «día» más corto del año, todos los días de la temporada invernal deben ser cada vez más largos. Igualmente, ya que el primer día de verano es el más largo del año, entonces cada día ulterior ha de acortarse cada vez más. Desde luego, es lo opuesto a lo que se dice y repite.

En promedio, cada dos años, en algún lugar de la superficie terrestre, la Luna pasa por completo enfrente del Sol para crear un eclipse total del Sol. Este evento es más común que los Juegos Olímpicos, pero jamás se lee una nota en los periódicos que declare «se celebrarán unos Juegos Olímpicos inauditos este año». La percibida rareza de los eclipses pudiera deberse a un hecho simple: en cualquier punto particular de la Tierra puede esperarse medio milenio antes de ver un eclipse total del Sol. Cierto, pero es un argumento débil puesto que hay lugares en la Tierra (como en medio del desierto del Sahara o cualquier región de la Antártida) donde nunca jamás se celebrarán Juegos Olímpicos.

¿Unos cuantos más? «Al mediodía el Sol se halla directamente arriba». «El sol sale por el este y se pone en el oeste». «En el equinoccio hay 12 horas de día y 12 de noche». «La Cruz del Sur es una bella constelación». Todos estos enunciados también son falsos. A ninguna hora ni día del año ni en lugar alguno en Estados Unidos el Sol está directamente encima de nuestra cabeza. Al mediodía los objetos verticales no proyectan sombra. Las únicas personas en el planeta que ven este fenómeno viven entre 23.5 grados latitud sur y

23.5 grados latitud norte, e incluso en dicha zona el Sol alcanza el punto encima de nuestra cabeza únicamente dos días al año. El concepto de *mediodía*, como la brillantez de la Estrella Polar y el color del Sol, es un delirio colectivo.

Para cada persona en la Tierra el Sol sale por el este y se pone en el oeste en solo dos días al año: el primero de la primavera y el primero del otoño; para cualquier otro día del año, y para cada persona en la Tierra, el Sol sale y se pone en algún otro punto del horizonte. En el ecuador la salida del Sol varía por 47 grados a lo largo del horizonte oriental. Desde la latitud de la ciudad de Nueva York (41 grados norte, la misma de Madrid y Pekín) el alba abarca más de 60 grados; desde la de Londres (51 grados norte) más de 80 grados, y cuando se observa desde los círculos Ártico y Antártico, el Sol puede salir al norte o al sur abarcando 180 grados.

La Luna también «sale» con el Sol en el cielo. Invirtiendo un poco más de tiempo del que suele tomar para observar el cielo (por ejemplo, en pleno día), se percatará de que la Luna es visible de día tan frecuentemente como en la noche.

El equinoccio no tiene exactamente 12 horas al día y 12 de noche. En un periódico léase las horas en que amanece y anochece, ya sea en el primer día de la primavera o del otoño. El día no se divide en dos bloques de 12 horas exactas. En ambos casos, el día gana. Dependiendo de la latitud, puede ganar de siete minutos en el ecuador hasta media hora en los círculos Ártico y Antártico. ¿A quién culpamos? La refracción de la luz solar a medida que atraviesa el espacio interplanetario rumbo a la atmósfera terrestre

permite que se forme una imagen del Sol en el horizonte muchos minutos antes de que el Sol mismo haya aparecido. De manera equivalente, el Sol real se ha puesto minutos antes del Sol que uno ve. La convención es medir la salida del sol usando el borde superior del disco solar en cuanto aparezca en el horizonte; similarmente, el crepúsculo se mide usando el borde superior del disco en cuanto se sume en el horizonte. El problema reside en que dichos «bordes superiores» son los lados opuestos del Sol, lo cual brinda una amplitud del tamaño del diámetro del sol adicional de luz al cálculo del alba y del crepúsculo.

La Cruz del Sur se gana el premio al mayor despliegue publicitario en las 88 constelaciones. Si se escucha a la gente del hemisferio sur hablar acerca de esta constelación, se escuchan las canciones que se han compuesto sobre ella, y luego se ve las banderas de Australia, Nueva Zelanda, Samoa Occidental y Papúa-Nueva Guinea, pudiera pensarse que algo nos falta en el norte. Para nada. En primer lugar, no hay que viajar al hemisferio sur para ver la Cruz del Sur. Es plenamente visible (aunque abajo en el cielo) en latitudes tan lejos al norte como Miami, Florida. Esta diminuta constelación es la más pequeña del cielo: su puño a la distancia de su brazo puede eclipsarlo completamente. Su forma tampoco es muy interesante. Si se trazara un rectángulo uniendo los puntos podría emplear cuatro estrellas. Y si se trazara una cruz podría incluir una quinta estrella en el medio para indicar el punto donde se cruzan los dos brazos. Pero la Cruz del Sur se compone de solo cuatro estrellas, de modo que parece más un papalote o caja rota.

La tradición occidental respecto de las constelaciones debe su origen y riqueza a siglos de imaginación babilonia, caldea, griega y romana. Recuérdese que estas imaginaciones fueron las que crearon las interminables vidas disfuncionales de sus dioses y diosas. Por supuesto, eran civilizaciones del hemisferio norte, lo cual quiere decir que las constelaciones del cielo meridional (muchas de las cuales fueron descubiertas en los últimos 250 años) no son muy ricas mitológicamente hablando. En el norte tenemos la Cruz del Norte, compuesta de las cinco estrellas que merece toda cruz. Es un subconjunto de una constelación mayor, el Cisne, la cual vuela a lo largo de la Vía Láctea. El Cisne es casi 12 veces más grande que la Cruz del Sur.

Cuando uno cree a pies juntillas un relato que se contrapone a toda evidencia comprobable, ello me dice que al formar un sistema de creencias la gente no valora mucho el papel de la evidencia. El porqué aún no es claro, pero ello permite a muchas personas aferrarse a ideas y nociones basadas puramente en suposiciones. Pero no todo está perdido. De vez en cuando, la gente dice cosas absolutamente ciertas. Una de mis favoritas es «adondequiera que vayas ahí estarás», y su corolario zen: «si aquí estamos, entonces allá no estamos».

35. Miedo a los números

Tal vez jamás conoceremos el diagrama de circuito de todos los senderos electroquímicos del cerebro humano. Pero lo cierto es que no estamos configurados para el pensamiento lógico. Si lo

estuviéramos, las matemáticas serían de lo más sencillo para cualquier estudiante promedio.

En este universo alterno, las matemáticas no se enseñarían, por cuanto sus fundamentos y principios serían evidentes hasta para los estudiantes menos exitosos. Pero en ninguna parte del mundo real esto es cierto. Desde luego, se puede entrenar a la mayoría de las personas para pensar lógicamente por algún tiempo, y a algunas personas para hacerlo todo el tiempo; el cerebro es un órgano maravillosamente flexible en este sentido, pero la gente apenas necesita entrenarse para expresar emociones. Nacemos llorando y nos reímos temprano en la vida.

No salimos del vientre materno contando los objetos que nos rodean. Por ejemplo, la recta numérica no está inscrita en nuestra materia gris. La gente tuvo que inventarla y hacerle agregados cuando surgieron necesidades a partir de las crecientes complejidades de la vida y la sociedad. En un mundo de objetos contables, podemos estar de acuerdo en que $2 + 3 = 5$, pero ¿a qué es igual $2 - 3$? Para responder a esta pregunta sin decir «es que no tiene significado», fue necesario inventar una nueva parte de la recta numérica: los números negativos. Prosiguiendo: todos sabemos que la mitad de 10 es 5, pero ¿cuál es la mitad de 5? Para dar significado a esta pregunta, alguien tuvo que inventar las fracciones, otra categoría en la recta. A medida que avanzaba este ascenso en el reino numérico, muchas otras clases de números fueron inventadas: imaginarios, irracionales, trascendentales y complejos, para nombrar algunas. Cada una tiene aplicaciones

específicas y a veces especiales en el mundo físico que hemos descubierto alrededor de nosotros desde los albores de la civilización.

Quienes estudian el universo han estado aquí desde el comienzo. Como miembro de la (segunda) profesión más antigua, puedo atestiguar que hemos adoptado y empleado activamente todas las partes de la recta numérica para todo tipo de análisis celestial. Asimismo, invocamos rutinariamente algunos de los números más pequeños y, por supuesto, los más grandes de cualquier profesión. Este estado mental ha incluso influido el habla común. Cuando algo es inconmensurablemente grande, como la deuda pública, no se la llama biológica o química, se la llama *astronómica*. Y así, uno pudiera discutir que los astrofísicos no temen a los números.

Con miles de años de cultura, ¿qué calificación tiene la sociedad en matemáticas? Más específicamente, ¿cómo se califican los estadounidenses, la cultura más avanzada tecnológicamente que el mundo haya visto?

Comencemos con los aviones. Quienquiera que haya inventado la configuración de asientos en Continental Airlines parece sufrir del miedo medieval al número 13. Y es que jamás he visto una fila 13 en ningún vuelo de esa empresa; las filas saltan de la 12 a la 14. ¿Y los edificios? De todos los rascacielos a lo largo de la avenida Broadway en Manhattan, 70% no tiene piso 13. Si bien no cuento con estadísticas detalladas acerca de otros lugares en Estados Unidos, puedo asegurar con base en mi experiencia que en más de 50% de los edificios el piso 14 sigue al 12. Esta tendencia se

observa en edificios viejos y nuevos. Algunos son conscientes de ello y tratan de ocultar la superstición mediante dos elevadores: uno que va del 1 al 12 y otro que empieza en el 14. En el edificio de departamentos de 22 pisos donde me crié (en el Bronx), había dos elevadores paralelos, pero en este caso uno de ellos servía a los pisos pares y el otro a los nones. Uno de los misterios de mi niñez era por qué el elevador de los pisos nones iba del 11 al 15, mientras que el de los pares, del 12 al 16. Aparentemente, en mi edificio no se podía quitar un piso non sin desarticular todo el plan de pares y nones. De ahí la evidente omisión de cualquier referencia ya sea al número 13 o al 14. Claramente, esto significaba que el edificio solo tenía 20 pisos y no 22.

En otro edificio, que albergaba un amplio mundo subterráneo, los niveles debajo del primer piso eran S, SS, E, SI y PB. Tal vez esto se hizo para dar qué pensar mientras se está parado ante el elevador haciendo nada. Estos pisos anhelaban volverse números negativos. Para no iniciados, dichas abreviaturas significan: sótano, subsótano, estacionamiento, sótano inferior y planta baja. De seguro no se usa una jerigonza semejante para nombrar a los pisos ordinarios. Imagínese un edificio donde los pisos no se llamaran 1, 2, 3, 4, 5, sino S, SS, SA, SMA, SA, A, lo cual obviamente significa superficie, sobre la superficie, superficie alta, superficie muy alta, sub azotea y azotea. En principio, no debiéramos temer a los pisos negativos; por ejemplo, el Hotel de Rhône en Ginebra, Suiza, tiene pisos -1 y -2, y el Hotel Nacional en Moscú cuenta con pisos 0 y -1.

El implícito rechazo de Estados Unidos a todo lo que sea menos de cero se manifiesta en muchas partes. Un caso leve de este síndrome se observa en muchos vendedores de automóviles entre quienes, en vez de decir que restarán 1 000 dólares al precio de su automóvil, dicen que otorgarán un reembolso de 1 000 dólares. En los reportes de contabilidad de algunas empresas el miedo a los números negativos es generalizado. Aquí la práctica común es encerrar los números negativos entre paréntesis y no mostrar el signo negativo en la hoja de cálculo. Inclusive el exitoso libro de Bret Easton Ellis de 1985 (y la película de 1987), *Menos que cero*, en el cual se narra la historia de la caída en desgracia de un grupo de adolescentes ricos en Los Ángeles, no puede concebirse con un título lógicamente equivalente: *Negativo*.

Como nos ocultamos de los números negativos, nos ocultamos asimismo de los decimales, sobre todo en Estados Unidos. En la Bolsa de valores de Nueva York solo recientemente las acciones se registran en decimales de dólares en lugar de burdas fracciones. Y aun cuando la divisa estadounidense se expresa con el sistema métrico decimal, no se concibe popularmente de esa manera. Si algo cuesta 1.50 dólares, solemos dividirlo en dos segmentos y decir «un dólar y cincuenta centavos». Este comportamiento no es fundamentalmente distinto de la forma como la gente recitaba precios en el viejo sistema británico que combinaba libras y chelines.

Cuando mi hija cumplió los 15 meses, yo disfrutaba perversamente diciéndole a la gente que ella tenía «1.25 años». Me miraban con la

cabeza inclinada con silente azoramiento, de la misma manera como miran los perros cuando escuchan un sonido agudo.

El temor a los decimales, asimismo, cunde cuando las probabilidades se comunican al público. La gente suele reportarlas en la forma de «algo a uno», lo cual tiene sentido para casi todos: las posibilidades de ganar la novena carrera de Belmont son de 28 a 1. Las posibilidades de ganar al favorito son de 2 a 1, pero para ganar al segundo más veloz es de 7 a 2. Entonces, ¿por qué no se dice «algo contra 1»? Porque si así fuera, entonces 7 a 2 se debería decir 3.5 a 1, lo cual apabullaría a todos aquellos en las pistas que no usan decimales.

Supongo que puedo vivir con decimales faltantes y pisos perdidos en edificios altos y que se nombran en vez de numerarse. Un problema más serio es la capacidad limitada de la mente humana para comprender las magnitudes relativas de los números grandes.

Contando a un ritmo de un número por segundo, le harán falta 12 días para alcanzar el millón y 32 años para contar hasta mil millones. Para contar hasta el billón toma 32 000 años, lo cual es el tiempo que ha pasado desde que dejamos de dibujar en las cavernas.

Si se extendiera de punta a punta, las cien mil millones de hamburguesas que se venden en la cadena de McDonald's abarcarían la Tierra 230 veces dejando suficiente espacio para colocar las demás en el trayecto de la Tierra a la Luna ida y vuelta.

Hasta donde sé, Bill Gates estaba valorado en cincuenta mil millones de dólares. Si el trabajador promedio recogiera al caminar

de prisa en la calle una moneda de 25 centavos, y no una de 10, entonces la cantidad equivalente que Gates ignoraría (considerando su relativa riqueza) si la viera en la calle sería de 25.000 dólares.

Para un astrofísico estos son ejercicios cerebrales banales, pero la gente normal no piensa en estas cosas. Pero ¿a qué costo? Desde 1969 se diseñaron y lanzaron sondas espaciales que han moldeado 20 años de investigación planetaria de nuestro sistema solar. Las famosas misiones *Pioneer*, *Voyager* y *Viking* fueron parte de esta era, así como la *Mars Observer*, la cual se perdió en la atmósfera marciana en 1993.

Cada una de estas naves tardó muchos años en planearse y construirse. Cada misión era ambiciosa respecto a sus objetivos científicos, y, desde luego, le costaron al contribuyente estadounidense entre 1 y 2 mil millones de dólares. Durante un cambio de administración en la década de 1990, la NASA introdujo un paradigma «más rápido, barato y mejor» para una nueva clase de naves espaciales que costaría entre 100 y 200 millones de dólares. A diferencia de las naves anteriores, estas podrían ser diseñadas rápidamente, lo cual posibilitaría emprender misiones con objetivos más precisos. Desde luego, esto quiere decir que el fracaso de una misión sería menos costoso y dañino al programa general de exploración.

En 1999, sin embargo, dos de estas misiones marcianas más económicas fracasaron, a un costo de cerca de 250 millones de dólares para los contribuyentes. Pero la reacción del público fue tan negativa como lo fue respecto de la *Mars Observer* de mil millones

de dólares. Los medios de comunicación reportaron el costo de 250 millones de dólares como un despilfarro increíble y afirmaron que algo estaba mal en la NASA. El resultado fue una investigación en el Congreso estadounidense.

Sin ánimo de defender un fracaso, 250 millones de dólares no es mucho más que el costo de la producción de la película *Mundo acuático* de Kevin Costner; era, asimismo, el costo de dos días en órbita del transbordador espacial y representa un quinto del costo de la *Mars Observer*. Sin estas comparaciones, y a reserva de que estos fracasos correspondan al paradigma «más rápido, barato y mejor», en el cual los riesgos se distribuyen entre diversas misiones, pudiera pensarse que un millón de dólares es igual a mil millones que son iguales a un billón.

Nadie anunció que una pérdida de 250 millones de dólares implica menos de un dólar por persona en Estados Unidos. Ese dinero, en forma de peniques, de seguro yace en las calles estadounidenses, llenas de personas demasiado ocupadas para recogerlos.

36. Lo que es estar desconcertado

Tal vez se trata de atraer y retener lectores; tal vez el público quiere saber acerca de aquellas raras ocasiones en que los científicos no tienen idea de algo, pero ¿por qué los escritores de temas científicos no pueden escribir un artículo sobre el universo sin describir a los astrofísicos que entrevistan como «desconcertados» por los últimos titulares científicos?

El desconcierto científico tanto asombra a los periodistas que, en lo que puede ser una primicia para la cobertura mediática de la ciencia, en agosto de 1999 *The New York Times* reportó en primera plana sobre un objeto en el universo cuyo espectro era un misterio (Wilford, 1999). Los principales astrofísicos estaban asombrados. A pesar de la gran calidad de la información (las observaciones fueron llevadas a cabo en el telescopio Keck de Hawái, en el observatorio más poderosos del mundo), el objeto no era una variedad de planeta, astro o galaxia conocidos. Imagínese si un biólogo hubiera secuenciado el genoma de una especie recién descubierta y, aun así, no pudiera clasificarlo como planta o animal. Por esta fundamental ignorancia, el artículo de 2 000 palabras no contenía análisis, conclusiones ni ciencia.

En este caso particular, el objeto fue identificado fortuitamente como una galaxia inusual, aunque ordinaria, no sin que antes millones de lectores fueran expuestos a un desfile de astrofísicos que decían «yo no sé qué es». Tal forma de reportar es muy común y tergiversa nuestro estado mental predominante. Si los escritores contaran toda la verdad, reportarían que *todos* los astrofísicos están desconcertados *todos* los días, independientemente de si sus investigaciones se hallan o no en los titulares.

Los científicos no pueden estar en la frontera de la investigación a menos que algo los desconcierte. El desconcierto impulsa el descubrimiento.

Un famoso físico del siglo XX, Richard Feynman, hizo una observación con humildad: deducir las leyes de la física es como

observar una partida de ajedrez sin conocer las reglas. Peor aún, escribió, las jugadas no pueden verse en secuencia. Solo puede atisbarse una partida en curso de vez en cuando. Con esta desventaja intelectual, la tarea es deducir las reglas del juego. Tarde o temprano se podría notar que los alfiles se mantienen en un escaque de un mismo color, que los peones no se mueven muy rápido o que la reina es temida por las demás piezas, pero ¿qué sucede al final de la partida cuando solo quedan unos pocos peones? Suponga que usted vuelve y halla que uno de los peones ha desaparecido y que, en su lugar, la reina otrora presa está en su lugar. Trate de resolverlo. La mayoría de los científicos estaría de acuerdo en que las reglas del universo, no importa a qué se asemejen, son enormemente más complejas que las reglas del ajedrez, y continúan siendo fuente de eterno desconcierto.

* * * *

SUPE RECIENTEMENTE QUE no todos los científicos están tan desconcertados como los astrofísicos. Esto podría significar que los astrofísicos son más tontos que otras estirpes de científicos, pero yo pienso que pocos lo asegurarían seriamente. Creo que el desconcierto astrofísico se deriva del tremendo tamaño y complejidad del cosmos. Así, los astrofísicos tienen más en común con los neurólogos. Cualquiera de ellos puede asegurar sin vacilar que lo que desconocen acerca de la mente humana sobrepasa por mucho lo que saben. Por ello todos los años se publican tantos libros de divulgación científica sobre el universo y la conciencia humana: nadie todavía lo sabe todo. Uno podría incluir a los

meteorólogos en el club de la ignorancia. Tanto sucede en la atmósfera terrestre que afecta el clima que es increíble que los meteorólogos puedan predecir algo de manera precisa. Los reporteros del estado del tiempo en los noticieros de la noche son los únicos en el programa con la tarea de predecir las noticias. Tratan con afán de no equivocarse, pero al final lo único que pueden hacer es cuantificar su desconcierto con enunciados como «50% de probabilidades de lluvia».

Una cosa es segura: cuanto más profundamente desconcertado se esté en la vida, más abierta está la mente a nuevas ideas. Cuento con evidencia de primera mano de esto.

Durante una emisión del programa de Charlie Rose en PBS, tuve que debatir con un conocido biólogo y evaluar las evidencias de existencia de vida extraterrestre como fue revelada en los resquicios del famoso meteorito marciano ALH84001. Este viajero interplanetario con forma y tamaño de una papa fue echado de la superficie marciana por el impacto de un meteoro enérgico, igual que un pedazo de cereal que sale despedido si se brinca en la cama. El meteorito marciano viajó por el espacio interplanetario por decenas de millones de años hasta estrellarse en la Antártida, donde estuvo enterrado en hielo durante 10 000 años, hasta que fue descubierto en 1984.

El artículo original de David McKay y sus colegas (en 1996) presentó una serie de evidencias circunstanciales. Cada punto en sí mismo pudiera atribuirse a un proceso no biogénico. Pero en conjunto, presentan un fuerte caso a favor de que alguna vez en Marte hubo

vida. Una de las evidencias más fascinantes, pero científicamente vacías, de McKay fue una simple fotografía de la roca tomada con un microscopio de alta resolución que mostraba una cosa diminuta parecida a un gusano, que medía menos de una décima del tamaño del gusano más pequeño conocido en la Tierra. Soy (y sigo siendo) entusiasta de estos hallazgos. Pero mi co-panelista biólogo era muy escéptico y discutidor. Tras recitar un par de veces el mantra de Carl Sagan que dice «las afirmaciones extraordinarias necesitan evidencia extraordinaria», dijo que la cosa parecida a un gusano no podría ser vida porque no había evidencia de un muro celular y que era mucho más pequeño que la forma de vida más pequeña de la Tierra.

¿Perdón?

La última vez que lo verifiqué, nuestra plática era acerca de la vida marciana y no de la terrestre que mi interlocutor acostumbra estudiar en su laboratorio. No podía imaginar un argumento más estrecho. ¿Era yo irresponsablemente amplio de miras? En efecto, es posible tener una mentalidad tan abierta que haya provocado que facultades mentales importantes se hayan deteriorado, como las de aquellos dispuestos a creer los reportes de platillos voladores y secuestros extraterrestres. ¿Por qué mi cerebro estaba configurado de manera tan distinta a la del biólogo? Él y yo habíamos asistido a la universidad y estudiado posgrados; nos doctoramos en nuestros respectivos campos y nos hemos dedicado a los métodos e instrumentos de la ciencia. Tal vez no debíamos irnos lejos en pos de una respuesta. Públicamente y entre ellos los biólogos con

justicia celebran la diversidad de la vida en la Tierra dimanada de la selección natural y expresada en las diferencias en el ADN entre una especie y otra. Al final del día, sin embargo, su confesión no es escuchada por nadie: ellos trabajan con una sola muestra científica: la vida en la Tierra.

* * * *

APOSTARÍA LO QUE FUERA A que la vida en otro planeta, de estar formada independientemente de la vida terrestre, sería más distinta a todas las especies de la Tierra que lo diferentes que son dos especies terrestres entre sí. Por otra parte, los objetos, esquemas de clasificación y series de datos del astrofísico provienen de todo el universo. Por esta simple razón, la nueva información impulsa al astrofísico rutinariamente a pensar de manera muy innovadora, *fuera de la caja*. Y algunas veces nuestros cuerpos son echados por completo *fuera de la caja*.

Podríamos remontarnos al pasado para obtener ejemplos, pero es innecesario. El siglo XX será más que suficiente. Y muchos de estos ejemplos ya han sido discutidos aquí:

Justo cuando creíamos que se podía pensar en un universo preciso y ufarnos de las leyes deterministas de la física clásica, Max Planck, Werner Heisenberg y otros tuvieron que descubrir la mecánica cuántica, y demostrar con ella que las escalas más pequeñas del universo eran inherentemente no deterministas, incluso cuando el resto del universo lo fuera.

Justo cuando creíamos que se podía hablar de las estrellas del cielo nocturno como el límite del cosmos conocido, Edwin Hubble

descubrió que todas las cosas peludas en el cielo eran galaxias externas, verdaderas «islas de universos» a la deriva más allá de las estrellas de la Vía Láctea.

Justo cuando pensábamos que conocíamos el tamaño y la forma de nuestro cosmos aparentemente eterno, Edwin Hubble descubrió que el universo se estaba expandiendo y que el universo galáctico se extendía más lejos de lo que los telescopios más grandes podían observar. Una consecuencia de dicho descubrimiento fue que el cosmos tenía un principio —noción inimaginable para las generaciones anteriores de científicos.

Justo cuando pensábamos que las teorías de la relatividad de Albert Einstein podían explicar toda la gravedad del universo, el astrofísico Fritz Zwicky de Caltech descubrió la materia oscura, una sustancia misteriosa que contiene 90% de toda la gravedad del universo, pero no emite luz y no interactúa con la materia ordinaria. Esto es aún un misterio. Fritz Zwicky identificaría y caracterizaría una clase de objetos en el universo llamados supernovas, astros que estallan y emiten temporalmente la energía equivalente a cientos de miles de millones de soles.

Poco después de que se comprendió cómo operan las explosiones de las supernovas, alguien descubrió estallidos de rayos gamma de los confines del universo que temporalmente brillaban más que los objetos luminosos del resto del universo juntos.

Y justo cuando nos acostumbrábamos a vivir con la ignorancia de la verdadera naturaleza de la materia oscura, dos grupos de investigación que trabajaban por separado —uno encabezado por el

astrofísico de Berkeley Saul Perlmutter, y otro dirigido por los astrofísicos Adam Reiss y Brian Schmidt— descubrieron que el universo no solo se expande, sino que se acelera. ¿Cuál es la causa? La evidencia indica que hay una misteriosa presión en el vacío de espacio que actúa en dirección contraria a la gravedad y es todavía más misteriosa que la materia oscura.

Por supuesto que estos son una muestra de los incontables y anonadantes fenómenos que han mantenido ocupados a los astrofísicos durante los últimos cien años. Podría terminar la lista aquí, pero sería un descuido no incluir el descubrimiento de las estrellas de neutrones, las cuales contienen la masa del Sol dentro de una pelota que mide apenas veinte kilómetros de diámetro. Para lograr esta densidad en casa hay que embutir 50 millones de elefantes en el volumen de un dedal.

Sin duda, mi mente está configurada de manera distinta a la de un biólogo y por ello era comprensible, si no esperado, que reaccionáramos de forma diferente a la evidencia de la vida en un meteorito marciano.

Para no dejar al lector con la impresión de que el comportamiento de los científicos no se distingue del de gallinas recién decapitadas que corren sin ton ni son por el gallinero, es necesario asegurar que el *corpus* de conocimiento sobre el cual los científicos no están desconcertados es inmenso. Forma la mayor parte del contenido de los libros de texto universitarios y comprende el consenso moderno en torno a cómo funciona el mundo. Estas ideas son tan bien

comprendidas que ya no representan temas de investigación interesantes y ya no son fuente de confusión.

Una vez fui el anfitrión y moderé un panel que discutía las teorías de todo, esos intentos ilusorios de explicar todas las fuerzas de la naturaleza por medio de un solo concepto. En la palestra había cinco distinguidos y conocidos físicos. A mitad del debate casi tuve que impedir que uno de ellos golpeará a otro. Está bien, no me importó. La lección es que si se ve a científicos enfrascados en un debate caluroso, discuten porque están desconcertados. Estos físicos discutían sobre la frontera entre los méritos y los problemas de la teoría de cuerdas, no si la Tierra orbita al Sol o si el corazón bombea sangre al cerebro o si la lluvia cae de las nubes.

37. Huellas en la arena de la ciencia

Si uno visita la tienda de regalos del Planetario Hayden en la ciudad de Nueva York, encontrará a la venta toda clase de parafernalia vinculada al espacio. Puede verse lo familiar: modelos a escala del transbordador espacial y de la Estación Espacial Internacional, imanes de refrigerador cósmicos, plumas espaciales Fisher. Pero también se encuentra cosas inusuales: helado astronauta deshidratado, juegos de Monopolio astronómico, saleros y pimenteros en forma de Saturno, sin mencionar cosas realmente extrañas como borradores en forma de telescopios Hubble, super pelotas de roca marciana y gusanos espaciales comestibles. Por supuesto, es de esperarse que un lugar como el planetario tenga cosas así, pero ocurre algo más profundo. La tienda de regalos

atestigua silenciosamente la iconografía de medio siglo de descubrimientos científicos estadounidenses.

En el siglo XX, en Estados Unidos los astrofísicos descubrieron galaxias, la expansión del universo, la naturaleza de las supernovas, los cuásares, los agujeros negros, los estallidos de rayos gamma, el origen de los elementos, el fondo de microondas cósmico y la mayoría de los planetas conocidos del sistema solar. Aun cuando los rusos llegaron a uno o dos lugares antes que los estadounidenses, estos enviaron sondas espaciales a Mercurio, Venus, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Las sondas estadounidenses han descendido en Marte y en el asteroide Eros. Y astronautas estadounidenses han caminado sobre la Luna. Hoy en día la mayoría de los estadounidenses dan todo esto por sentado, lo cual es una definición de cultura: algo que todo el mundo hace o sabe, pero que nadie advierte.

Cuando compramos en un supermercado, la mayoría de los estadounidenses no se sorprenden de hallar todo un estante lleno de cereales de desayuno saturados de azúcar, pero los extranjeros se percatan de esto de inmediato, del mismo modo que los estadounidenses observan que los supermercados tienen grandes dotaciones de pasta en Italia, y en China y Japón ofrecen una enorme variedad de arroz. El problema de no advertir la cultura propia es uno de los grandes placeres de viajar al extranjero: descubrir lo que uno no ha visto en el propio país y advertir lo que los demás no conocen acerca de ellos mismos.

La gente petulante de otros países gusta de mofarse de los estadounidenses por su corta historia y su burda cultura, en particular en comparación con los legados milenarios de Europa, África y Asia. Pero en 500 años los historiadores verán seguramente el siglo XX como el siglo de Estados Unidos, aquel en que los descubrimientos estadounidenses en ciencia y tecnología fueron los más importantes en la lista de los logros más grandes del mundo.

Obviamente, Estados Unidos no ha estado siempre a la cabeza de la ciencia. Y no hay forma de asegurar que continuará la preeminencia estadounidense. A medida que las capitales de la ciencia y la tecnología se mudan de una nación a otra, en ascenso en una era y en decadencia en la siguiente, cada cultura deja una marca en el perpetuo esfuerzo de nuestra especie por entender al universo y nuestro lugar en él. Cuando los historiadores escriban acerca de tales acontecimientos mundiales, los rastros de una nación se observan de manera importante en la línea del tiempo de la civilización.

* * * *

MUCHOS FACTORES INFLUYEN en el cómo y por qué una nación deja su marca. Uno de ellos es contar con un liderazgo fuerte, junto al acceso a recursos, pero —asimismo— debe haber algo más, algo menos tangible, pero con el poder de impulsar a una nación completa a dirigir su capital emocional, cultural e intelectual a la creación de islas de excelencia en el mundo. Aquellos que viven en tales tiempos dan por sentado lo que han creado, suponiendo ciegamente que las cosas nunca cambiarán, por lo cual dichos

logros pueden ser fácilmente abandonados. Desde el siglo VIII y durante los siguientes 400 años, mientras en Europa los fanáticos cristianos se dedicaban a degollar herejes, los califas abasíes crearon un centro intelectual que prosperó en las artes, las ciencias y la medicina para el mundo islámico en la ciudad de Bagdad. Los astrónomos y matemáticos musulmanes construyeron observatorios, diseñaron instrumentos para medir el tiempo y desarrollaron nuevos métodos de análisis y cálculo matemático. Preservaron las obras existentes de ciencia de la antigua Grecia y de todo el mundo y las tradujeron al árabe. Cooperaron con eruditos cristianos y judíos. Bagdad se convirtió en un centro de la ilustración. El árabe fue, por un tiempo, la *lingua franca* de la ciencia.

El influjo de estos aportes islámicos a la ciencia aún está vigente. Por ejemplo, tanto se popularizó la traducción árabe de la obra maestra de Ptolomeo sobre el universo geocéntrico (escrito en griego en 150 a. C.) que todavía se la conoce por su título en árabe, *Almagesto*, o «el más grande».

El matemático y astrónomo iraquí Muhammad ibn Musa al-Juarizmi nos dio los vocablos *algoritmo* (de su nombre, *al-Juarizmi*) y *álgebra* (de *al-jabr*, del título de su libro sobre el cálculo algebraico). Y el sistema de numeración más extendido en el mundo (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9), aunque de origen indio, no era común ni universal sino hasta que los matemáticos musulmanes lo usaron ampliamente. Además, los musulmanes usaron innovadoramente el cero, el cual no existía entre los números romanos o en cualquier

otro sistema. Hoy en día, con justa razón, los 10 símbolos son referidos internacionalmente como números arábigos.

* * * *

ASTROLABIOS DE LATÓN PORTÁTILES elaboradamente grabados fueron también desarrollados por los musulmanes, con base en antiguos prototipos, y se convirtieron tanto en obras de arte como instrumentos astronómicos. Un astrolabio proyecta la bóveda celeste en una superficie plana, y mediante cuadrantes rotatorios y fijos se parece a la faz elaborada y ajetreada de un reloj antiguo de pie. Permitía a los astrónomos, y a otros, medir las posiciones de la Luna y las estrellas en el cielo, gracias a lo cual podían deducir el tiempo, algo generalmente muy útil, en especial cuando es hora de rezar. El astrolabio fue tan popular e influyente como nexo terrestre con el cosmos que, a la fecha, casi dos tercios de las estrellas más brillantes del firmamento nocturno conservan sus nombres árabes. El nombre por lo general se traduce como la parte anatómica de la constelación descrita; entre las más famosas de la lista (junto con sus traducciones) están: Rigel (*Al Rijl*, «pie») y Betelgeuse (*Yad al Jauza*, «mano del grande», que en tiempos modernos se traza como la axila), ambas son las estrellas más brillantes de la constelación de Orión; Altair (*At-Ta'ir*, «el volador»), el astro más brillante de la constelación de Aquila, el águila; y la estrella variable Algol (*Al-Ghul*, «el espíritu maligno»), el segundo astro más brillante de la constelación de Perseo, que se refiere al ojo de la cabeza cortada de Medusa que Perseo sostiene en su puño. En la categoría de las menos famosas se encuentran los dos astros más resplandecientes

de la constelación de Libra, aunque entonces se las identificaba con Escorpión: Zubenelgenubi (*Az-Zuban al- Janubi*, «garra del sur») y Zebueneschamali (*Az-Zuban ash- Shamali*, «garra del norte»), el nombre astral más longevo en el firmamento.

A partir del siglo XI el influjo científico del mundo islámico dejó de ser lo que había sido en los cuatro siglos anteriores. El finado físico pakistaní Abdus Salam, el primer musulmán en ganar un Premio Nobel, se lamentó:

Sin duda, de todas las civilizaciones del planeta, en las tierras del islam es donde la ciencia es lo más débil. Los peligros de esta debilidad no pueden exagerarse, ya que la supervivencia honorable de una sociedad depende directamente de su fuerza en ciencia y tecnología, en las condiciones de la era presente (Hassan y Lui, 1984: 231).

MUCHAS OTRAS naciones han vivido periodos de fertilidad científica. Piénsese en Gran Bretaña y la base del sistema de longitud terrestre. El primer meridiano es la línea que separa al este geográfico del oeste en el globo terráqueo. Definido como 0 grados de longitud, biseca la base de un telescopio en un observatorio en Greenwich, distrito londinense en la margen sur del río Támesis. La línea no atraviesa Nueva York, Moscú ni Pekín. Greenwich fue seleccionado en 1884 por un consorcio internacional de expertos en longitud que se reunió especialmente en Washington, D. C.

Para finales del siglo XIX, los astrónomos del Observatorio Real de Greenwich —fundado en 1675 con sede, desde luego, en

Greenwich— había reunido y catalogado un siglo de investigación sobre la ubicación exacta de miles de estrellas. Los astrónomos de Greenwich emplearon un telescopio ordinario, aunque especialmente diseñado, que solo se podía mover a lo largo del arco meridional que conecta el norte y el sur a través del cenit del observador. Al no rastrear los movimientos generales de este a oeste de las estrellas, simplemente pasan mientras la Tierra gira sobre su eje. Conocido formalmente como instrumento de tránsito, ese telescopio permite marcar el momento exacto en que un astro atraviesa el campo de visión del observador. ¿Por qué? La longitud de una estrella es el momento en un reloj sideral en que esta atraviesa el meridiano; hoy se calibran los relojes con relojes atómicos, pero hubo una vez en que no había un reloj más exacto que la misma Tierra giratoria. Y no había manera más confiable de registrar esta rotación que el paso lento de los astros en el cielo. Y nadie medía mejor las posiciones de las estrellas que los astrónomos del Observatorio Real de Greenwich.

Durante el siglo XVII, Gran Bretaña perdió muchos barcos en el mar a consecuencia del desconocimiento preciso de la longitud. En un desastre particularmente trágico en 1707 la flota británica, bajo el mando del vicealmirante *sir* Cloudesley Shovell, encalló en las islas Sorlingas, al oeste de Cornwall, que cobró cuatro buques y la vida de 2.000 hombres. De inmediato, Inglaterra estableció una Junta de Longitud, la cual ofreció un premio económico, 20.000 libras, al primero que diseñara un cronómetro que pudiera funcionar en el océano. Tal reloj sería de gran importancia en las empresas

militares y mercantiles. Sincronizado al tiempo de Greenwich, el cronómetro podía determinar la longitud de un barco con gran precisión. Tan solo hay que restar la hora local (que se estima por medio de la posición observada del Sol o las estrellas) de la hora del cronómetro; la diferencia entre ambas es una medida directa de la longitud del observador al este u oeste del primer meridiano.

En 1735 el reto de la Junta de Longitud fue superado por un reloj portátil diseñado y fabricado por un mecánico inglés, John Harrison. Declarado tan valioso como tener a una persona de guardia en la proa, el cronómetro de Harrison reforzó el significado de la palabra *guardia*⁷.

Debido al firme apoyo inglés a los estudios en medición astronómica y náutica, se ubicó el primer meridiano en Greenwich. Este decreto colocó fortuitamente la línea de fecha internacional (a 180 grados del primer meridiano) en medio de la nada, al otro lado del globo en el océano Pacífico. Así, ningún país estaría dividido por dos días.

Debido al firme apoyo inglés a los estudios en medición astronómica y náutica, se ubicó el primer meridiano en Greenwich. Este decreto colocó fortuitamente la línea de fecha internacional (a 180 grados del primer meridiano) en medio de la nada, al otro lado del globo en el océano Pacífico. Así, ningún país estaría dividido por dos días.

* * * *

SI LOS INGLESES DEJARON su marca indeleble en las coordenadas espaciales del globo, nuestro sistema básico de

⁷ En inglés *watch* significa lo mismo *reloj* que *guardia*, palabras que no son sinónimos en español. [N. del T.]

coordenadas temporales, un calendario solar, es el resultado de una inversión en ciencia llevada a cabo por la Iglesia católica romana, incentivada no por el descubrimiento cósmico sino por la necesidad de establecer una fecha para la Pascua a inicios de la primavera. Fue una necesidad tan importante que el papa Gregorio XIII estableció el Observatorio del Vaticano, donde eruditos sacerdotes jesuitas observaban y medían el paso del tiempo con una exactitud sin precedente. Por decreto, la fecha de la Pascua había sido determinada el primer domingo de la primera Luna llena luego del equinoccio de primavera (lo cual evita que los jueves, viernes y domingo santos caigan en algún día especial en cualquier otro calendario lunar). Dicha regla vale siempre que el primer día de la primavera caiga en marzo, donde pertenece. Pero el calendario juliano, de la Roma de Julio César, era tan inexacto que para el siglo XVI había acumulado 10 días adicionales, con lo cual la primavera comenzaba el 1 de abril y no el 21 de marzo. El día bisiesto, rasgo fundamental del calendario juliano, había sobre corregido esto lentamente, posponiendo la Pascua cada vez más en el año.

En 1582, cuando todos los estudios y análisis habían terminado, el papa Gregorio eliminó estos 10 días del calendario juliano y decretó que el día posterior al 4 de octubre sería 15 de octubre. La Iglesia hizo otro ajuste: en adelante, por cada año secular no divisible entre 400, un día bisiesto sería omitido, lo cual resuelve la sobre corrección del día bisiesto.

Este nuevo calendario gregoriano fue refinado aún más en el siglo XX para volverlo más preciso, por lo cual su calendario de pared será confiable por los próximos milenios. Nadie ha llevado el tiempo con tanta precisión. Estados enemigos de la Iglesia católica (como la Inglaterra protestante y su progenie rebelde, las colonias norteamericanas) tardaron mucho en adoptar este cambio, pero finalmente todo el mundo civilizado, incluyendo aquellas culturas que dependían tradicionalmente de los calendarios lunares, adoptaron el calendario gregoriano para la política, el comercio y los asuntos internacionales.

DESDE EL INICIO DE LA REVOLUCIÓN Industrial las aportaciones europeas a la ciencia y la tecnología se han enraizado de tal forma en la cultura occidental que costaría un esfuerzo adicional percatarse de ellas. La revolución representó un descubrimiento en nuestra comprensión de la energía y permitió a los ingenieros soñar con maneras de convertirla de un modo a otro. Al final, la revolución industrial sustituyó el poder humano por el poder mecánico, con lo que incrementó radicalmente la productividad de naciones y la subsecuente distribución de la riqueza en el mundo.

El lenguaje de la energía es rico en nombres de científicos que aportaron a este esfuerzo. James Watt, el ingeniero escocés que perfeccionó la máquina de vapor en 1765, tiene el apodo mejor conocido fuera de los círculos de la ingeniería y la ciencia. Su apellido o su monograma pueden verse en todos los focos. El vatiaje (*wattage*) de estos mide su consumo de energía, la cual se

correlaciona con su brillantez. Watt trabajó en las máquinas de vapor desde que estudiaba en la Universidad de Glasgow, Escocia, que entonces era uno de los centros de innovación ingenieril más fértiles del mundo.

El físico inglés Michael Faraday descubrió la inducción electromagnética en 1831, la cual hizo posible el primer motor eléctrico. El *farad*, medida de la capacidad de un dispositivo para almacenar carga eléctrica, con probabilidad no hace justicia a sus contribuciones a la ciencia.

El físico alemán Heinrich Hertz descubrió las ondas electromagnéticas en 1888, lo cual hizo posible la comunicación por radio; su nombre pervive como la unidad de frecuencia, así como sus derivados métricos *kilohercios*, *megahercios* y *gigahercios*.

Del físico italiano Alessandro Volta tenemos el *voltio*, unidad de potencial eléctrico. Del físico francés André-Marie Ampère, tenemos la unidad de corriente eléctrica llamada el *amperio*, o *amp*. Del físico británico James Prescott Joule, tenemos el *joule*, una unidad de energía. Y la lista sigue y sigue.

A excepción de Benjamin Franklin y sus incansables experimentos con la electricidad, Estados Unidos, como nación, vio desde lejos cómo se desarrollaba este capítulo fértil en la historia de los logros humanos, más preocupado por ganar su independencia de Inglaterra y explotar las economías de escala del trabajo esclavo. Hoy en día lo mejor que los estadounidenses pudieron hacer fue rendir un homenaje en la serie de televisión de *Viaje a las estrellas*: Escocia fue la Tierra natal de la Revolución Industrial y del

ingeniero jefe de la nave *Enterprise*. ¿Su nombre? Scotty, por supuesto⁸.

A finales del siglo XVIII, la Revolución Industrial estaba en su apogeo, pero también la Revolución francesa. Los franceses aprovecharon la ocasión para sacudir más que a la realeza; introdujeron el sistema métrico decimal para estandarizar un mundo de medidas incompatibles, que obstaculizaban lo mismo a la ciencia que el comercio. En mediciones de la forma terrestre, los miembros de la Academia Francesa de Ciencias dirigieron al mundo y determinaron con orgullo que el planeta era un esferoide oblato. Sobre esta base, definieron al metro como una diez millonésima de la distancia desde el polo norte hasta el ecuador, pasando por — ¿dónde más?— París. Esta medida de longitud fue estandarizada como la separación entre dos marcas grabadas en una barra especial elaborada con una aleación de platino e iridio. Los franceses inventaron otras normas decimales que (salvo por el tiempo decimal y los ángulos decimales) fueron adoptadas por todas las naciones civilizadas, excepto Estados Unidos, Liberia, al oeste de África, y la inestable nación tropical de Myanmar. Los artefactos originales de este esfuerzo en medición están conservados en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (ubicada, desde luego, cerca de París).

* * * *

DESDE FINALES DE LOS AÑOS TREINTA, Estados Unidos se convirtió en un centro de actividad en física nuclear. Mucha de la

⁸ *Scotty* alude al gentilicio de escocés en inglés: *scottish*. [N. del T.]

actividad intelectual se derivó del éxodo de científicos de la Alemania nazi, pero el capital financiero provino de Washington, empeñado en derrotar a Hitler en la carrera por desarrollar la bomba atómica. El esfuerzo coordinado para producirla se conoce como el Proyecto Manhattan, debido a que en sus inicios gran parte fue llevado a cabo en Manhattan, en los laboratorios Pupin de la Universidad de Columbia.

En tiempo de paz, la inversión bélica previa tuvo amplias repercusiones para la comunidad de físicos nucleares. Desde los años treinta hasta los ochenta, los aceleradores estadounidenses eran los más grandes y productivos del mundo. Estas pistas de carreras de la física representan ventanas para comprender la estructura y el comportamiento fundamentales de la materia. Crean rayos de partículas subatómicas, las aceleran hasta casi la velocidad de la luz mediante un campo eléctrico astutamente configurado y las estrellan contra otras partículas, lo que las divide en minúsculos fragmentos. Al observar los fragmentos, los científicos han encontrado evidencias de nuevas partículas e incluso nuevas leyes de la física.

Los laboratorios estadounidenses de física nuclear son justamente famosos; inclusive quienes no entienden de física reconocerán los principales: Los Álamos; Lawrence Livermore; Brookhaven; Lawrence Berkeley; Fermi Labs y Oak Ridge. En estos lugares los físicos descubrieron nuevas partículas, aislaron nuevos elementos, desarrollaron un nuevo modelo teórico para la física de partículas y ganaron premios Nobel por hacerlo.

La huella estadounidense en esa época de la física se haya impresa para siempre en la parte pesada de la tabla periódica. El elemento número 95 es el americio; el número 97 es el berkelio; el número 98 es californio; el número 103 es el lawrencio, llamado así por Ernest O. Lawrence, físico estadounidense que inventó el primer acelerador de partículas; y el número 106 es el seaborgio, por Glenn T. Seaborg, físico estadounidense quien —en el laboratorio de la Universidad de California, en Berkeley— descubrió 10 elementos nuevos más pesados que el uranio.

* * * *

LOS ACELERADORES MÁS GRANDES alcanzan las más altas energías e investigan la frontera —que retrocede a gran velocidad— entre lo que se conoce y lo que se desconoce del universo. La teoría cosmológica de la *big bang* afirma que antes el universo era una pequeñísima y muy caliente sopa de partículas subatómicas. Con un supercolisionador de partículas, los físicos podrían simular los momentos más antiguos del cosmos. En los años ochenta, cuando los físicos estadounidenses propusieron semejante acelerador (que al final llamaron el *Super Conducting Super Collider*), el Congreso estaba dispuesto a financiarlo y el Departamento de Energía estadounidense a supervisarlos. Elaboraron los planos e iniciaron su construcción, excavaron un túnel circular de 80 km (el tamaño de la vía periférica de Washington D. C.) cerca de Texas. Los físicos estaban entusiasmados con la idea de ver más allá de la siguiente frontera cósmica. Pero en 1993, cuando el costo iba a superar el presupuesto, el Congreso, que había sido limitado económicamente,

canceló los 11 mil millones de dólares para el proyecto. Quizá nunca se les ocurrió a los políticos estadounidenses que por cancelar el proyecto, perdieron la primicia para Estados Unidos en la física experimental.

Quien aprovechó la situación fue Europa al construir el acelerador más grande del mundo y reclamó para sí el panorama de conocimiento cósmico. Conocido como el Gran Colisionador de Hadrones, este acelerador será administrado por el Centro Europeo de Física de Partículas (mejor conocido por su acrónimo, CERN, que ya no refleja en su nombre). Aunque algunos físicos estadounidenses son colaboradores, como nación Estados Unidos verá su esfuerzo desde lejos, de la misma manera como muchos países lo han hecho con nosotros anteriormente.

38. Que se haga la oscuridad

La astrofísica impera como la más sobrecogedora de las disciplinas científicas. A diario la asombrosa amplitud y profundidad del universo desinfla nuestros egos y estamos perennemente a merced de fuerzas descontroladas. Una simple tarde nublada, que no suele detener ninguna otra actividad humana, impide observar con un telescopio cuyo funcionamiento puede costar 20.000 dólares por noche sin importar el clima. Somos observadores pasivos del cosmos, que obtenemos información cuándo, dónde y cómo la naturaleza se revela ante nosotros. Conocer el cosmos exige ventanas inmaculadas al universo, pero el avance de lo que llamamos civilización y la ubicuidad de la tecnología moderna se

contraponen a esta misión. A menos que se haga algo al respecto, pronto estaremos inmersos en un fondo de luz que ocultará todo acceso a los confines del descubrimiento cósmico.

La fuente más obvia y predominante de astro contaminación son los faroles callejeros. Con demasiada frecuencia, pueden verse desde las ventanillas de los aviones en vuelos nocturnos, lo cual significa que estos faroles alumbran no solo las calles sino al resto del universo. Los faros descubiertos, los que carecen de cubierta que dirija la luz hacia abajo, son los culpables de este fenómeno. Las municipalidades que emplean estas farolas mal diseñadas acaban gastando más en focos de alto vatiaje porque la mitad de los focos apuntan hacia arriba. Esta luz desperdiciada, dirigida hacia el cielo nocturno, ha inutilizado gran parte del territorio mundial para la investigación astronómica. En el simposio «Preserving the Astronomical Sky» [Preservando el cielo astronómico], celebrado en 1999, los participantes lamentaron con justeza la pérdida de cielos oscuros en todo el mundo. Un artículo reportó que la iluminación ineficiente le costaba a Viena 720.000 dólares al año; a Londres, 2.9 millones; a Washington, D. C., 4.2 millones, y a la ciudad de Nueva York, 13.6 millones (Sullivan y Cohen, 1999: 363–368). Véase que Londres, con una población semejante a la de Nueva York, es más eficiente en su ineficiencia casi por un factor de 5.

El dilema del astrofisico no es que la luz se escape al espacio, sino que la atmósfera inferior sostiene una mezcla de vapor de agua, polvo y contaminantes que rebotan algunos de los fotones de vuelta a la Tierra, dejando el cielo brillando con la marca de la vida

nocturna urbana. A medida que las ciudades se vuelven cada vez más radiantes, los objetos tenues del cosmos se vuelven cada vez menos visibles, lo cual impide el acceso de los ciudadanos al universo. Es difícil exagerar la magnitud de este efecto. Fácil es ver que un haz de una lámpara halógena se dirige a un muro en un comedor oscuro, pero si se enciende gradualmente la luz del plafón, se verá cómo el haz se vuelve cada vez más difícil de ver. Bajo cielos contaminados, objetos borrosos —tales como cometas, nebulosas y galaxias— se vuelven difíciles o imposibles de detectar. Jamás en mi vida he visto la Vía Láctea desde los límites de la ciudad de Nueva York, y nací y me crié allí. Si se observa el cielo nocturno desde la plaza de la muy iluminada Times Square se podrá ver si acaso una decena de estrellas en comparación con las miles que se podían observar cuando Peter Stuyvesant transitaba por el pueblo. No es en balde que los pueblos antiguos compartían una gran tradición celeste, mientras que los modernos no conocemos el cielo nocturno que hemos reemplazado por una cultura de televisión nocturna.

A lo largo del siglo XX la expansión de ciudades alumbradas por electricidad creó una niebla tecnológica que obligaba a los astrónomos a mudar sus observatorios montañoses en las afueras de las ciudades a lugares remotos, tales como las islas Canarias, los Andes chilenos y el volcán Mauna Kea en Hawái. Una notable excepción es el observatorio nacional de Kitt en Arizona. En lugar de escapar de la luminosa ciudad de Tucson, a 80 km del observatorio, los astrónomos prefirieron quedarse y luchar. La batalla fue más fácil de ganar de lo que pudiera pensarse; fue cuestión de convencer

a la gente de su selección de que el alumbrado público había sido un desperdicio de dinero. En final, la ciudad y los astrónomos obtuvieron lámparas eficientes y un cielo oscuro, respectivamente. La ordenanza Núm. 8210 del Código de Alumbrado Público del Condado de Tucson/Pima hace que el alcalde, el jefe de policía y el alcaide parezcan astrónomos al momento que el código fue puesto en vigor. La parte 1 refiere el propósito de esta ordenanza:

El propósito de este código es reglamentar el alumbrado público de tal manera que su utilización no interfiera con la observación astronómica. Es la intención de este código propiciar, mediante la reglamentación de los tipos, clases, construcción, instalación y uso de los dispositivos de iluminación eléctrica, prácticas de iluminación y sistemas que conserven energía sin reducir la seguridad, la utilidad y la productividad, al tiempo que incrementar el disfrute nocturno de la propiedad dentro de la jurisdicción.

Y al cabo de otras 13 secciones de reglas estrictas sobre qué puede emplearse para la iluminación nocturna, se llega a la mejor parte: la parte 15: «Será una infracción civil la violación de cualquiera de las provisiones de este código. Todos y cada uno de los días en que persista la infracción será considerado un delito aparte.»

Como puede verse, al arrojar luz sobre el telescopio de un astrónomo uno puede convertir a un ciudadano pacífico en un Rambo. ¿Piensa que bromeo?

La IDA (International Dark-Sky Association, o Asociación Internacional del Cielo Oscuro) lucha en todo el mundo contra las luces que apuntan al cielo. Con un lema que recuerda al que se lee en las patrullas de la policía de Los Ángeles; este reza: «Conservar y proteger el medioambiente nocturno y nuestro legado de cielos oscuros por medio de alumbrado público de calidad». Y, como la policía, el IDA persigue a los infractores.

Lo sé. Se me fueron encima. No había pasado una semana desde la inauguración del Rose Center for Earth and Space, cuando recibí una carta en la cual el director ejecutivo de IDA me regañaba por las luminarias, que apuntan al cielo y están insertas en el pavimento frente a la entrada. Fuimos justamente acusados: la plaza contaba con 40 lámparas (de muy poco vatiaje) que ayudaban a delinear e iluminar la entrada del centro que forma un arco de granito; dichas luces eran en parte funcionales y en parte decorativas. El punto de la carta no era achacar las malas condiciones visuales de toda la ciudad de Nueva York a estas lamparitas, sino responsabilizar al Planetario Hayden de poner un buen ejemplo al resto del mundo. Me apena decir que las luces ahí siguen.

Pero no todo lo malo es artificial. Una Luna llena es tan brillante que reduce el número de estrellas visibles a simple vista de millares a solo cientos. En efecto, la Luna llena resplandece 100.000 veces más que las estrellas más brillantes. Y la física de los ángulos de reflexión dota a la Luna llena de más de 10 veces la brillantez de la media Luna. Este resplandor reduce, asimismo, el número de meteoros que pueden verse durante una lluvia de meteoros (aunque

las nubes son peores) dondequiera que se halle el observador. Así que jamás le desee una Luna llena a un astrónomo que se dirige a un telescopio grande. Es cierto que la fuerza de marea de la Luna crea pozas de marea y otros hábitats dinámicos que contribuyeron a la transición de vida marina a terrestre, y finalmente posibilitaron que los humanos vivieran. Aparte de este detalle, la mayoría de los astrónomos observacionales, en especial los cosmólogos, estaría feliz si la Luna no existiera.

Hace unos años recibí una llamada telefónica de un ejecutivo en mercadotecnia que deseaba iluminar la Luna con el logotipo de su empresa. Deseaba saber cómo hacerlo. Luego de colgar el aparato, le volví a hablar y con cortesía le expliqué por qué era una mala idea. Otros ejecutivos me preguntaron cómo colocar en órbita *banners* luminosos de un kilómetro de largo, semejante a la escritura aérea o los aviones que arrastran anuncios que se ven en los eventos deportivos o sobre el océano en una playa atestada. Siempre amenazo con llamar a la policía lumínica.

El insidioso nexo entre la vida moderna y la contaminación lumínica se extiende a otras partes del espectro electromagnético. Está en riesgo la ventana de ondas de radio del astrónomo al cosmos, incluyendo las microondas. Actualmente estamos ahogados en señales de una enorme cantidad de aparatos emisores de ondas de radio, como celulares, controles remotos, llaves electrónicas para abrir y cerrar vehículos, estaciones repetidoras de microondas, transmisores de radio y televisión, comunicadores portátiles, radares de control de velocidad, sistemas de posicionamiento

globales y redes de comunicación satelital. La ventana de ondas de radio al universo yace velada en esta niebla tecnológica. Y las pocas bandas claras que quedan dentro del espectro radioeléctrico se vuelven cada vez más estrechas a medida que los enseres de la vida tecnológica atrapan cada vez más territorio de radiofrecuencia. La detección y el estudio de objetos celestes extremadamente distantes peligran como nunca.

En los últimos 50 años los radioastrónomos han descubierto cosas extraordinarias, entre ellas púlsares, cuásares, moléculas en el espacio y el fondo cósmico de microondas, primera evidencia en apoyo de la teoría del *big bang*; pero hasta una conversación inalámbrica puede ahogar tales señales de radiofrecuencia distantes: los modernos radiotelescopios son tan sensibles que una llamada de celular entre dos astronautas en la Luna pudiera representar uno de los puntos más brillantes en el cielo en términos de radiofrecuencia. Y si los marcianos usaran celulares, nuestros radiotelescopios más poderosos fácilmente los atraparían.

La Comisión Federal de Comunicaciones ha estado atenta a las demandas fuertes y a menudo contrapuestas de varios segmentos de la sociedad sobre el espectro radioeléctrico. La *Spectrum Policy Task Force* (Fuerza Operativa de Política del Espectro) de la FCC revisa las políticas que gobiernan el uso del espectro electromagnético, con la finalidad de mejorar su eficiencia y flexibilidad.

El presidente de la FCC, Michael K. Powell, dijo a *The Washington Post* (19 de junio de 2002) que deseaba que la filosofía de la FCC

pasara de una de «comando y control» a una «orientada al mercado». La comisión, asimismo, revisará cómo asigna las bandas del espectro radioeléctrico, si una pudiera interferir con otra.

Por su parte, la Sociedad Astronómica Americana, organización profesional de los astrofísicos de Estados Unidos, ha pedido a sus miembros que, con el mismo celo que los de la IDA —postura que apoyo— intenten convencer a los legisladores y políticos de que designen frecuencias de radio especiales para los astrónomos. Tomando del vocabulario y los conceptos del irreprimible movimiento verde, dichas bandas deben ser consideradas como un *bosque electromagnético* o un *parque nacional electromagnético*. A fin de eliminar interferencia, las áreas geográficas que rodean los observatorios protegidos deben mantenerse despejadas de señales de radiofrecuencia humanas de cualquier orden.

El problema más difícil pudiera ser que cuanto más lejos se halla un objeto de la Vía Láctea más larga es la longitud de onda y menor la frecuencia de sus señales de radiofrecuencia. Este fenómeno, que es un efecto Doppler cosmológico, es la marca principal de nuestro universo en expansión. Así que es imposible aislar un solo rango de las «astro» frecuencias y asegurar que todo el cosmos, desde las galaxias más cercanas hasta el confín del universo observable, pueda ser servido a través de esta ventana. La lucha continúa.

Hoy en día, el mejor lugar para construir telescopios para explorar todo el espectro electromagnético es la Luna. Pero no el lado que apunta a la Tierra. Colocar un telescopio ahí sería mucho peor que desde la superficie terrestre. Cuando se observa desde el lado

proximal de la Luna, la Tierra se ve 13 veces más grande y brilla 50 veces más que la Luna cuando se ve desde nuestro planeta. Y la Tierra nunca se pone. Como es de esperarse, las señales de parloteo de la civilización, asimismo, constituyen los objetos más brillantes en el cielo de radiofrecuencia. El cielo del astrónomo es, en cambio, el lado oscuro de la Luna, donde la Tierra nunca sale y permanece por siempre hundida en el horizonte.

Sin una vista de la Tierra, los telescopios construidos en la Luna apuntarían a cualquier dirección sin el riesgo de contaminación de las emanaciones electromagnéticas de la Tierra. No solo eso, pues la noche en la Luna dura casi una quincena de días terrestres, que permitirían a los astrónomos observar objetos en el cielo durante días enteros, mucho más de lo que podrían hacer en la Tierra. Y por cuanto no hay atmósfera Lunar, las observaciones desde la superficie serían tan buenas como las que del cosmos se hacen desde la órbita terrestre. El Telescopio Espacial Hubble perdería la reputación de la que hoy goza. Además, sin una atmósfera que disperse la luz solar, el cielo diurno de la Luna es casi tan negro como su noche, de modo que las estrellas favoritas de todos andarían en el cielo justo junto al disco solar. No hay un lugar más libre de contaminación.

Pensándolo bien, me retracto de mis insensibles comentarios sobre la Luna. Después de todo, tal vez nuestro vecino en el espacio llegue a ser el mejor amigo del astrónomo.

39. Noches de Hollywood

Pocas cosas son más molestas para un cinéfilo que ver una película en compañía de amigos hipercultos que no resisten la tentación de comentar que el libro era mejor, cómo los personajes estaban más desarrollados y cómo la historia estaba concebida con mayor profundidad. En mi opinión, debieran quedarse en casa y dejarnos disfrutar de la película. Para mí, es puramente una cuestión de economía: ver la película es más barato y más rápido que comprar y leer el libro en el cual esta se basa. Con esta actitud antiintelectual, debiera mantenerme mudo cada vez que observo transgresiones a la ciencia en alguna historia y escenario. Pero no. Ocasionalmente puedo ser tan molesto como los ratones de biblioteca. A lo largo de los años, he observado errores especialmente atroces en los intentos de Hollywood de mostrar o abordar el cosmos, y ya no puedo abstenerme de comentar al respecto.

A propósito, mi lista no consiste de pifias [*bloopers*]. Una pifia es un error que los productores o editores de continuidad no captan, pero que normalmente descubren y corrigen. Los *astro-errores* a los que me refiero fueron introducidos deliberadamente e indican una profunda falta de atención a detalles fáciles de revisar. Asimismo, diría que ninguno de estos escritores, productores o directores ha tomado un curso básico de astronomía en la universidad.

Empecemos desde el final de la lista.

Al final de la película de Disney *El abismo negro*, de 1977, en la lista de muchas personas de las 10 peores películas (incluso en la mía), una nave parecida a las de H. G. Wells pierde el control de sus motores y cae en un agujero negro. ¿Qué más pudiera pedir un

experto en efectos especiales? Veamos cuán bien lo hizo. ¿La nave fue deshecha por las crecientes fuerzas de marea gravitacionales, lo que un verdadero agujero negro le haría? No. ¿Se intentó retratar la demora de tiempo predicha por Einstein, en la cual el universo en torno a la nave evoluciona velozmente por miles de millones de años mientras los tripulantes apenas envejecen unos segundos? No. La escena retrató el disco de acreción de gas en torno al agujero. Bien. Los agujeros negros hacen eso con el gas que se precipita hacia ellos. Pero ¿esos chorros de materia y energía salen a ambos lados del disco de acrecimiento? No. ¿Y la nave viaja a través del agujero negro y sale en otra época u otra parte del universo u otro universo? No. En lugar de capturar dichas ideas cinematográficamente fértiles y científicamente informadas, los guionistas mostraron las entrañas del agujero negro como una caverna oscura con estalagmitas y estalactitas como si fueran en un paseo por el sótano de las Cavernas de Carlsbad. Algunos podrían pensar que estas escenas expresan la licencia poética o artística del director, por lo cual él puede inventar un imaginario cósmico sin relación con el universo real. Pero dado lo bobas que eran las escenas, expresarían muy posiblemente su ignorancia científica. Imagínese que existiera la «licencia científica», mediante la cual un científico decidiera ignorar algunos fundamentos de la expresión artística. Supóngase que así los científicos pudieran dibujar a una mujer con tres senos, siete dedos en cada pie y una oreja a mitad de la cara. En un ejemplo menos extremo, supóngase que los científicos dibujaran a la gente con una rodilla doblada al revés o con huesos inusualmente largos.

Si esto no inicia un nuevo movimiento artístico, como los rostros que pintaba Picasso muy semejantes a platijas, entonces los artistas de seguro nos mandarían de regreso a la escuela a tomar clases de anatomía básica.

¿Fue licencia o ignorancia lo que llevó al pintor de una obra exhibida en el Museo del Louvre a mostrar un callejón rodeado de árboles erguidos, cada uno con una sombra que apunta al centro de un círculo? ¿Qué, el artista no se percató de que todas las sombras proyectadas por el Sol sobre objetos verticales son paralelas? ¿Fue licencia o ignorancia lo que ha llevado a que todas la lunas hayan sido pintadas en fase de media Luna o Luna llena? Por medio mes la fase lunar ni es una ni otra. ¿Los artistas pintan lo que ven o lo que desean ver? Cuando en 1987 Francis Ford Coppola⁹ filmó *La sombra del testigo*, su director de fotografía llamó a mi oficina para preguntarme cuál era el mejor momento y lugar para filmar una Luna llena sobre Manhattan. Le aconsejé que mejor retratara un cuarto creciente o la Luna gibosa, pero no estuvo de acuerdo; él solo quería una Luna llena.

Aunque despotriquee, sin duda las contribuciones creativas de los artistas serían más pobres sin licencia artística. Por ejemplo, no habría habido impresionismo o cubismo. Pero lo que distingue a la buena licencia artística de la mala es si el artista conoce toda la información relevante antes de emprender su labor creativa o no.

⁹ Aquí el autor se equivoca, pues la película citada no es de Ford Coppola sino de Ridley Scott. [N. del T.]

Tal vez Mark Twain lo expresó mejor: «Aprende bien los datos, luego puedes tergiversarlos como gustes (1899, vol. 2, cap. XXXVII).»

En la taquillera película *Titanic* de 1997, el productor y director James Cameron no solo invirtió mucho en efectos especiales, sino que recreó los lujosos interiores del buque; desde las lámparas de pared hasta la porcelana y la platería, ningún detalle fue demasiado pequeño para atraer la atención del señor Cameron, quien se cuidó de referenciar artefactos recientemente rescatados del naufragio, a más de 3 km en el fondo del océano. Además, investigó con cuidado la historia de la moda y de las costumbres sociales para asegurarse de que sus personajes se vestían y comportaban de acuerdo con la sociedad de 1912. Consciente de que el buque había sido diseñado con tres de cuatro chimeneas conectadas a las máquinas, Cameron mostró que el humo salía de tres chimeneas. Del viaje inaugural de Southampton a la ciudad de Nueva York, se sabe la fecha y la hora del hundimiento, así como la longitud y la latitud donde se hundió, y Cameron lo muestra a su vez. Con tal atención al detalle, se pensaría que Cameron pudo haber advertido cuáles estrellas y constelaciones estaban visibles esa noche.

Pues no.

En la película las estrellas en el firmamento no corresponden a ninguna constelación en el cielo real. Peor aún, cuando la heroína canturrea flotando sobre un pedazo de madera en las heladas aguas del Atlántico norte, ella mira hacia arriba hacia una visión de un firmamento hollywoodense, donde las estrellas a la derecha son idénticas a las de la izquierda. ¿Cuán holgazán se puede ser? Una

representación fidedigna no hubiera requerido un arreglo mayor del presupuesto de la película.

Lo que es extraño es que nadie hubiera sabido si Cameron retrató la porcelana y platería de manera correcta, mientras que por 50 dólares se puede comprar uno o 10 programas de cómputo que puede mostrar el cielo nocturno a cualquier hora del día, cualquier día del año y del milenio, y desde cualquier punto de la Tierra.

En una ocasión, sin embargo, Cameron ejerció la licencia artística de manera encomiable. Luego de que el *Titanic* se hunde, se ve a muchas personas (vivas y muertas) flotando en el agua. Por supuesto, en aquella noche sin Luna en medio del océano, apenas se vería la mano frente a la cara. Cameron tuvo que iluminar para que el público pudiera seguir la historia. La luz era suave y sensata, sin las obvias sombras que indican una fuente de luz embarazosa (e inexistente).

Esta historia tiene en realidad un final feliz. Como muchos saben, James Cameron es un explorador moderno que valora la iniciativa científica. Su expedición submarina al *Titanic* fue una de las muchas que emprendió, y ha formado parte del Consejo Asesor de la NASA. Recientemente, cuando fue galardonado en Nueva York por su espíritu aventurero, fui invitado a cenar con los editores y el propio Cameron. No había mejor ocasión para comentarle su error con el cielo de *Titanic*. Así que luego de quejarme por 10 minutos, me dijo: «La película ha ganado más de mil millones de dólares en todo el mundo. ¡Imagínese cuánto más habría ganado si le hubiera atinado al cielo!».

Jamás me han callado de manera tan cortés y al mismo tiempo tan completa. Regresé sumisamente a seguir tomando mi aperitivo, un poco apenado por haber abordado el tema. Dos meses después, recibí una llamada telefónica en mi oficina del planetario. Era el experto en visualización por computadora del equipo de posproducción de James Cameron, quien me dijo que para la reedición de la película *Titanic*, en una colección especial, iban a restaurar algunas escenas y me preguntó si yo contaba con una imagen exacta del firmamento nocturno que ellos pudieran emplear para esta edición. De inmediato, generé la imagen correcta del cielo desde cualquier dirección hacia la cual Kate Winslet y Leonardo DiCaprio pudieran mirar mientras se hundía la nave.

LA ÚNICA VEZ que me he molestado en escribir una carta para quejarme de un error cósmico fue después de que vi la comedia romántica *L. A. Story*, de 1991, escrita y producida por Steve Martin. En esta película, Martin emplea la Luna para medir el tiempo por medio de las fases desde creciente a Luna llena. De este hecho no se hace gran cosa. La Luna solo está ahí en el cielo de noche a noche. Aplaudo el esfuerzo de Martin de implicar al universo en su historia, pero esta Luna de Hollywood crece en la dirección equivocada. Vista desde cualquier lugar al norte del ecuador (Los Ángeles, por ejemplo), la superficie iluminada de la Luna crece de derecha a izquierda.

Cuando la Luna está en cuarto creciente, puede hallarse al Sol a 20 o 30 grados a su derecha. A medida que la Luna orbita la Tierra, el

ángulo entre esta y el Sol crece, lo cual permite que se ilumine más y más de su superficie visible hasta alcanzar el 100% de iluminación frontal de 180 grados. (Esta configuración mensual entre la Tierra y la Luna se conoce como *sizigia*, que suele arrojar una Luna llena y de vez en cuando un eclipse lunar).

La Luna de Steve Martin crecía de izquierda a derecha: al revés. Mi carta al señor Martin fue cortés y respetuosa, escrita asumiendo que él deseaba conocer la verdad cósmica. Jamás me contestó, caray, pero entonces yo solo era un alumno de posgrado sin un membrete que llamara la atención.

Incluso la épica película de pilotos de prueba *Elegidos para la gloria* tenía muchas equivocaciones. Mi transgresión favorita fue cuando Chuck Yeager, primer hombre en volar a la velocidad del sonido, asciende a 129.000 km e impone otro récord de altitud y velocidad. Ignorando que la escena ocurre en el desierto de Mojave en California, donde son raras las nubes, conforme Yeager se eleva por el aire, se ve pasar cúmulos blancos y esponjosos. Este error de seguro irritaría a los meteorólogos, pues en la atmósfera real de la Tierra dichas nubes jamás se hallarían a 32.000 km.

Sin dichos apoyos visuales supongo que el público no tendría una idea visceral de cuán rápido iba el avión. Por ello comprendo el motivo, pero el director de la película, Philip Kaufman, tenía otras alternativas. A grandes altitudes hay otros tipos de nubes, tales como cirros y especialmente las nubes mesosféricas polares. En algún punto en la vida uno tiene que descubrir que existen.

La película de 1997, *Contacto*, inspirada en la novela homónima de Carl Sagan, publicada en 1983, contiene una vergonzosa «astropifia». (Vi la película y no había leído el libro, pero todos los que lo han hecho dicen que, por supuesto, es mejor que la película). *Contacto* explora lo que sucedería si los humanos hallaran vida inteligente en la galaxia y establecieran contacto con ella. La heroica astrofísica y cazadora de extraterrestres es la actriz Jodie Foster, quien dice una línea fundamental que contiene una información matemáticamente imposible. Justo cuando se enamora del ex sacerdote Matthew McConaughey, sentados con el radiotelescopio más grande del mundo detrás, ella dice con pasión: «Si hay 400 mil millones de estrellas en la galaxia y tan solo una en un millón tuviera planetas, y solo una en un millón tuviera vida, y solo una en un millón tuviera vida inteligente, eso aún deja millones de planetas por explorar». Error. De acuerdo con estos cálculos, esto deja .0000004 planetas con vida inteligente, la cual es una cifra algo menor que «millones». Sin lugar a dudas, «uno en un millón» suena mejor en la pantalla que «uno en diez», pero no se pueden falsear las matemáticas.

El parlamento de Foster no fue una expresión arbitraria de matemáticas, fue un reconocimiento explícito de la famosa ecuación de Drake, llamada así por el astrónomo Frank Drake, que fuera el primero en calcular la posibilidad de hallar vida en la galaxia con base en una secuencia de factores, empezando con el número total de estrellas en la galaxia. Por ello, era una de las escenas más importantes de la película. ¿A quién culpar? No a los guionistas si

bien sus palabras se recitaron fielmente. Culpo a Jodie. Como la actriz principal, ella conforma la última línea de defensa contra los errores que se asoman en las líneas que dice, así que ella carga con la responsabilidad, y no solo eso, pues, según sé, es egresada de la Universidad de Yale. De seguro que allá enseñan aritmética.

En los años setenta y ochenta, la popular telenovela *As the World Turns* mostraba el alba al inicio y el crepúsculo al final, lo cual, dado el título del programa, era un gesto cinematográfico adecuado. Desafortunadamente, su alba era el crepúsculo filmado al revés. Nadie se tomó el tiempo para darse cuenta de que para cada día del año en el hemisferio norte el Sol se mueve a un ángulo arriba y a la derecha del punto en el horizonte donde se eleva. Al final del día, desciende a lo largo del cielo a un ángulo abajo y la derecha. En la telenovela amanecía con el Sol moviéndose a la izquierda a medida que se alza. Obviamente habían conseguido un pie de película que mostraba un anochecer y lo corrieron al revés para la presentación del programa. Los productores estaban muy soñolientos para filmar el alba o esta se filmó en el hemisferio sur, luego de lo cual el equipo de filmación corrió al hemisferio norte a filmar el crepúsculo. Si hubieran llamado a su astrofísico local, este les hubiera recomendado que si lo que querían era ahorrar dinero, mostraran el anochecer en un espejo antes de proyectarlo al revés. Esto hubiera resuelto todo.

Desde luego, el «astro analfabetismo» imperdonable se extiende más allá de la televisión, el cine y las pinturas en el Louvre. El famoso plafón tachonado de estrellas en la estación Grand Central de Nueva

York se alza sobre incontables pasajeros. No me podría quejar si los diseñadores originales no hubieran pretendido retratar un cielo genuino. Pero este lienzo de poco más de una hectárea contiene, entre sus cientos de estrellas, una decena de constelaciones reales, cada una de ellas dibujada en su esplendor clásico, con la Vía Láctea justo donde debía hallarse. Aparte de su color verdoso, que asemeja mucho el de una tienda de enseres Sears de los años cincuenta, el cielo está al revés. Sí, al revés. Según parece, esta era una práctica común durante el Renacimiento, tiempo en que los fabricantes de globos hacían esferas celestes. Pero, en tales casos, el observador se hallaba en un lugar mítico, «fuera» del cielo, mirando hacia abajo, con la Tierra ocupando el centro del globo. Este argumento funciona en esferas más pequeñas, pero no para plafones de 40 metros. Y en su revés, por razones que no comprendo, las estrellas de la constelación de Orión están adelante, con Betelgeuse y Rigel orientadas de manera correcta.

La astrofísica de seguro no es la única ciencia pisoteada por artistas mal informados. Probablemente, los naturalistas se han quejado más que los astrofísicos. Puedo escucharlos: «es el canto de ballena equivocado para la ballena que aparece en la película»; «esas plantas no son nativas de esa región»; «esas formaciones de rocas no tienen relación alguna con ese territorio»; «los sonidos de esos gansos no son de la especie que vuela en esa localidad»; «nos quieren hacer creer que es a mediados del invierno, pero ese arce aún tiene hojas». En mi próxima vida planeo abrir una escuela de ciencia artística donde la gente creativa podrá aprender sobre el mundo natural. Al

recibirse podrán tergiversar la naturaleza solo en la forma informada que sirva a sus necesidades artísticas. Al correr los créditos finales, el director, el productor, el director de escena, el de fotografía y quienquiera que se haya recibido, podrá referir su membresía a la SCIPAL, Sociedad para la Infusión Creíble de Licencia Poética y Artística.

Parte 7

Ciencia y Dios

Cuando chocan los modos de conocer

Contenido:

40. *En el principio*

41. *Guerras santas*

42. *El perímetro de la ignorancia*

40. En el principio¹⁰

La física describe el comportamiento de la materia, la energía, el espacio y el tiempo, y su interrelación en el universo. Según lo que los científicos han podido determinar, todos los fenómenos biológicos y químicos están regidos por lo que esos cuatro personajes en nuestro drama cósmico se hacen entre sí. Y así todo lo fundamental y familiar para los terrícolas parte de las leyes de la física.

En el caso de todas las áreas de la investigación científica, pero especialmente en la física, la frontera del descubrimiento yace en los extremos de la medición. En los extremos de la materia, tales como las inmediaciones de un agujero negro, la gravedad distorsiona el continuo de espacio-tiempo circundante. En los extremos de la energía, se sostiene una fusión termonuclear en los núcleos de diez millones de grados de las estrellas. Y en cada extremo imaginable,

¹⁰ Este ensayo ganó el *Science Writing Award* de 2005 del Instituto Americano de Física.

vemos las condiciones increíblemente calientes y densas que prevalecieron en los primeros momentos del universo.

La vida diaria, como puede reportarse con alegría, carece por completo de física extrema. En una mañana normal, uno se levanta de la cama, pasea por la casa, come algo, sale por la puerta delantera. Y al final de la jornada, sus seres queridos esperan que uno regrese entero y se vea igual que cuando se marchó. Pero imagínese llegar a su oficina, entrar a una sala de conferencias demasiado calurosa para una importante junta de las 10 de la mañana y de repente perder todos sus electrones o, peor aún, que cada átomo se vaya volando por su lado. O suponga que se encuentra en su oficina tratando de trabajar a la luz de su lámpara de escritorio y alguien enciende la lámpara del techo, lo que hace que su cuerpo rebote de una pared a la otra hasta salir despedido por la ventana. O que usted fuera a una pelea de sumo después de trabajar y viera a dos sujetos esféricos chocar, desaparecer y luego espontáneamente convertirse en dos haces de luz.

Si se apreciaran esas escenas a diario, la física moderna no se vería tan extraña, el conocimiento de sus fundamentos procedería de nuestra experiencia vital y probablemente nuestros seres amados jamás nos dejarían trabajar. Sin embargo, en los primeros minutos del universo eso ocurría todo el tiempo. Para visualizarlo y entenderlo, solo hay que establecer una nueva forma de sentido común, una intuición especial de cómo se aplican las leyes físicas de temperaturas, densidades y presiones extremas.

Se entra así al mundo de $E = mc^2$.

Albert Einstein publicó por vez primera una versión de esta famosa ecuación en 1905 en un trascendente artículo de investigación intitulado «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento». Mejor conocido como *teoría de la relatividad especial*, los conceptos presentados ahí cambiaron para siempre nuestras nociones del espacio y el tiempo. Einstein, entonces de 26 años de edad, luego explicó mejor esta ecuación en otro texto, asombrosamente breve, que publicó en ese mismo año: «¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía?». Para ahorrar al lector el esfuerzo de leer el artículo original, diseñar un experimento y probar la teoría, la respuesta es «sí». Como Einstein escribió: «Si un cuerpo expende energía E en forma de radiación, su masa disminuye por E/c^2 [...] La masa de un cuerpo es una medida de su contenido de energía; si la energía cambia por E , la masa cambia en el mismo sentido» (1952: 71).

Inseguro de la verdad de su enunciado, luego sugirió: «No es imposible que en cuerpos cuyo contenido de energía sea variable en alto grado (por ejemplo, con sales de radio), la teoría pudiera ser puesta a prueba exitosamente» (1952: 71).

Ahí está: la receta algebraica universal para convertir la materia en energía, o viceversa. En aquellas oraciones simples, Einstein inopinadamente dio a los astrofísicos un instrumento de cómputo, $E = mc^2$, para comprender al universo desde el momento actual hasta las fracciones infinitesimales de un segundo después de su nacimiento.

La forma de energía más conocida es el *fotón*, una partícula de luz sin masa e irreductible. Vivimos bañados en fotones: desde los del Sol, la Luna y las estrellas hasta la estufa, el candelabro y la lámpara nocturna. Entonces, ¿por qué no experimentar $E = mc^2$ todos los días? La energía de los fotones de la luz visible es mucho menor que la de las partículas subatómicas menos masivas. Esos fotones no pueden convertirse en otra cosa, por lo cual viven felices y tranquilos. ¿Quiere usted ver algo de acción? Observe fotones de rayos gamma que poseen verdadera energía, al menos 20.000 veces más que la de los fotones de luz visible. Pronto se enfermaría y moriría de cáncer, pero antes de ello vería aparecer pares de electrones, uno de materia y el otro de antimateria —uno de los dúos dinámicos en el universo de las partículas—, donde los fotones estuvieron una vez. Conforme se observa, verá, asimismo, pares de electrones de materia y antimateria chocar y aniquilarse entre sí, para crear fotones de rayos gamma de nueva cuenta. Si se incrementa la energía de la luz por un factor de 2.000, tendremos rayos gamma con la energía para convertir a la gente susceptible en monstruos como *Hulk*, pero los pares de tales fotones tienen la energía suficiente para crear espontáneamente neutrones más masivos, protones y sus parejas de antimateria.

Los fotones de alta energía no andan en cualquier lugar. Pero el lugar no tiene por qué ser imaginario. Para los rayos gamma estará bien casi cualquier medio más caliente que unos cuantos miles de millones de grados.

El significado cosmológico de las partículas y los focos de energía transformándose entre sí es inmenso. Actualmente, la temperatura de nuestro universo en expansión, de acuerdo con las mediciones de los baños de luz de microondas que impregna todo el espacio, es de apenas 2.73 K. Igual que los fotones de luz visible, los de microondas son demasiado fríos para esperar convertirse en partículas mediante $E = mc^2$; de hecho, no hay partículas conocidas en las cuales puedan convertirse espontáneamente. Sin embargo, ayer el universo era un poco más pequeño y un poco más caliente. Un día antes, era más chico y aún más caliente. Retrase su reloj a, digamos, 13.7 mil millones de años, y se hallará en la sopa primigenia del *big bang*, cuando la temperatura del cosmos era lo bastante alta como para ser astrofísicamente interesante.

La forma como el tiempo, el espacio, la materia y la energía se comportaban a medida que se expandía y se enfriaba el universo desde su inicio es una de las grandes historias jamás contadas. Pero para explicar qué sucedió en ese crisol cósmico, hay que encontrar cómo fusionar las cuatro fuerzas de la naturaleza y cómo reconciliar dos ramas incompatibles de la física: la mecánica cuántica (la ciencia de lo pequeño) y la relatividad general (la ciencia de lo grande).

A mediados del siglo XX, estimulados por el exitoso casamiento de la mecánica cuántica y el electromagnetismo, los físicos emprendieron una carrera para mezclar la mecánica cuántica y la relatividad general en una teoría de la gravedad cuántica. Aunque todavía no se ha llegado a la meta, se sabe con exactitud dónde

están los obstáculos más altos: durante la *era de Planck*; la fase de entre 10^{-43} segundos (diez millones de billones de billones de billonésimas de segundo) después del principio, y antes de que el universo creciera a entre 10^{-35} metros (cien mil millones de billones de billonésimas de metro) de ancho. El físico alemán Max Planck, en cuyo honor se ha nombrado a estas cantidades inimaginablemente pequeñas, introdujo la idea de la energía *cuantizada* en 1900 y se le atribuye generalmente la paternidad de la mecánica cuántica.

Empero, no hay de qué preocuparse. El choque entre la gravedad y la mecánica cuántica no plantea un problema práctico para el universo contemporáneo. Los astrofísicos aplican los principios y fundamentos de la relatividad general y la mecánica cuántica a problemas muy distintos. Pero en el principio, durante la era de Planck, lo grande era chico, y debió acontecer una especie de matrimonio con escopeta entre ambos. Pero los votos intercambiados en dicha ceremonia siguen siendo un secreto para los científicos, y así ninguna ley (conocida) de la física describe de manera confiable el comportamiento del universo durante aquel breve interregno.

Sin embargo, al final de la era de Planck, la gravedad se soltó de las otras fuerzas todavía unidas, por lo cual obtuvo la identidad independiente que las teorías actuales describen tan bien. Conforme el universo envejecía de 10^{-35} segundos, se siguió expandiendo y enfriando, y lo que quedaba de las fuerzas unidas se dividió entre la fuerza electro-débil y la fuerza nuclear fuerte. Y luego la fuerza electro-débil se subdividió entre la fuerza electromagnética y la

fuerza nuclear débil, de manera que reveló las cuatro fuerzas básicas que conocemos y amamos; con la fuerza débil controlando el desgaste radioactivo y la fuerte uniendo los núcleos, la fuerza electromagnética ligando moléculas y la gravedad vinculando a la materia de volumen. Para entonces, el universo ya tenía una edad de apenas una billonésima de segundo. Aun así, sus fuerzas metamorfoseadas y los demás episodios críticos ya habían imbuido al universo con propiedades fundamentales, cada una de ellas merecedoras de su propio libro.

Mientras el universo vivía su primer billonésimo de segundo, el rejuego de la materia y la energía era incesante. Poco antes, durante y después de que la fuerza electro-débil y la fuerza nuclear fuerte se separaran, el universo era un océano bullicioso de cuarks, leptones y sus hermanos de antimateria, junto con *bosones*, partículas que permiten sus interacciones. Se considera que ninguna de estas familias de partículas es divisible en algo más pequeño o más básico. Aun cuando son fundamentales, cada una tiene sus diversas especies. El fotón ordinario de luz visible es un miembro de la familia de los bosones. Los leptones, que son mejor conocidos para aquellos que no son físicos, son los electrones y quizás el neutrino; y los cuarks más familiares son... bueno no hay cuarks familiares. A cada especie se le ha dado un nombre abstracto sin finalidad filológica, filosófica o pedagógica, salvo para distinguirlos entre sí: arriba y abajo, extraño y encanto, cima y fondo.

A propósito, los bosones se llaman así por el científico indio Satyendranath Bose. El vocablo *leptón* proviene del griego *leptos*,

que significa «luz» y «pequeño». Cuark, empero, tiene un origen literario y más imaginativo. El físico Murray Gell-Mann, quien en 1964 propuso la existencia de los cuarks y que para entonces creyó que la familia de los cuarks solo tenía tres miembros, sacó el nombre de una línea típicamente oscura de *Finnegans Wake* de James Joyce: «¡Tres cuarks para Muster Mark!». Algo tienen los cuarks a su favor: todos sus nombres son sencillos, lo que los químicos, los biólogos y los geólogos son incapaces de lograr cuando bautizan sus objetos.

Los cuarks son bestias estrafalarias. A diferencia de los protones, cada uno con una carga eléctrica de +1, y electrones, con una carga de -1, los cuarks tienen cargas fraccionales que se dan en tercias. Y jamás se puede capturar un cuark solo; siempre están aferrados a los cuarks más cercanos. De hecho, la fuerza que los mantiene juntos se fortalece en la medida que se los separa, como si estuvieran unidos por una banda elástica subnuclear. Si se separan los cuarks, la banda se rompe y la energía almacenada llama a $E = mc^2$ para crear un nuevo cuark en cada extremo, y de vuelta al principio.

Pero durante la era de cuark-leptón el universo era tan denso que la separación promedio entre cuarks libres rivalizaba con la de los cuarks unidos. Bajo tales condiciones, el vínculo entre los cuarks adyacentes no se podía establecer de manera segura y se movían libremente entre sí, pese a estar unidos colectivamente. El descubrimiento de este estado de la materia, especie de sopa de

cuarks, fue reportado por vez primera en 2002 por un equipo de físicos en los laboratorios nacionales Brookhaven.

Una fuerte evidencia teórica sugiere que en los albores más tempranos del universo, quizá durante una de las divisiones de fuerzas, algo dotó al universo de una asombrosa asimetría, en la cual las partículas de materia apenas superaban en número a las de antimateria por mil millones y uno a mil millones. Aquella ínfima diferencia en población apenas se notaba en medio de un estado de continua creación, aniquilación y recreación de cuarks y anticuarks, electrones y antielectrones (mejor conocidos como *positrones*), neutrinos y antineutrinos. El sobrante tenía amplias oportunidades para hallar con quién aniquilarse, como todos los demás.

Pero no por mucho tiempo. Conforme el cosmos seguía expandiéndose y enfriándose, llegó a tener el tamaño del sistema solar, con su temperatura abatiéndose a menos de un billón de grados Kelvin.

Una millonésima de segundo había transcurrido desde el inicio.

Este universo ardiente ya no era ya lo bastante caliente o denso para cocer cuarks, por lo que encontraron otros compañeros de baile para crear otra familia de partículas pesadas llamadas *hadrones* (del griego *hadros*, que significa «espeso»). Aquella transición del cuark al hadrón pronto condujo al surgimiento de protones y neutrones, así como de otras partículas pesadas menos conocidas, compuestas todas de diversas combinaciones de especies de cuarks. Esta leve asimetría materia y antimateria que aflige a la

sopa de cuarks y leptones pasó a caracterizar a los hadrones, pero con consecuencias extraordinarias.

A medida que el universo se enfriaba, se reducía la cantidad de energía disponible para la creación espontánea de partículas básicas. Durante la era del hadrón los fotones ambientales ya no podían invocar a $E = mc^2$ para fabricar parejas de cuarks-anticuarks. No solo eso, sino que los fotones que emergieron de las aniquilaciones restantes perdieron energía en el universo en expansión y se redujo a menos del límite requerido para crear parejas de hadrón-antihadrón. Por cada mil millones de aniquilaciones, que dejaban mil millones de fotones en el camino, sobrevivía un solo hadrón. Dichos solitarios serán los que al final se divertirán más que nadie: serán fuentes de galaxias, astros, planetas y personas.

Sin el desequilibrio de mil millones y uno a mil millones entre la materia y la antimateria, toda la masa en el universo se habría aniquilado, dejando un cosmos hecho de fotones y *nada más*, el máximo escenario de «que se haga la luz».

Ahora ya ha pasado un segundo.

El universo ha crecido a un diámetro de pocos años luz, como la distancia del Sol hasta las estrellas más cercanas. A mil millones de grados, todavía es muy caliente, y aun puede cocer electrones, los cuales —junto con sus positrones— siguen emergiendo y desapareciendo, pero en un universo en expansión y en proceso de enfriamiento, sus días (en realidad segundos) están contados. Lo que era cierto para los hadrones lo es también para los electrones:

al final solo sobrevive un electrón en mil millones; el resto es aniquilado junto con sus hermanos de antimateria, los positrones, en un mar de fotones.

Hasta ahora, un electrón por cada protón ha sido creado gracias al congelamiento. A medida que se enfría el cosmos, al caer la temperatura a menos de diez millones de grados, los protones se fusionan entre sí, así como con neutrones, para formar núcleos atómicos y crear un universo donde 90% de estos núcleos es de hidrógeno y 10% es de helio, así como retazos de deuterio, tritio y litio.

Han pasado dos minutos desde el principio.

Poco sucederá por los siguientes 380.000 años en nuestra sopa de partículas. A lo largo de estos milenios la temperatura aún es alta, lo suficiente como para que los electrones se paseen libres entre los fotones, golpeándolos por doquier.

Pero esta libertad termina abruptamente cuando la temperatura del universo cae a menos de 3.000 K (como la mitad de la temperatura de la superficie del Sol), y todos los electrones se combinan con núcleos libres. Este matrimonio deja un baño de fotones de luz visible, culminando la formación de partículas y átomos en el universo primigenio.

Conforme el universo se sigue expandiendo, sus fotones pierden energía y pasan de ser luz visible a infrarroja y a microondas.

Como comentaremos con mayor detalle, adondequiera que observa el astrofísico se halla la indeleble huella digital de los fotones de microondas de 2.73 grados, cuyo patrón en el cielo retiene el

recuerdo de la distribución de la materia justo antes de que se formaran los átomos. De aquí se puede deducir la edad y la forma del universo. Y aun cuando los átomos ahora forman parte de la vida diaria, la ecuación de Einstein todavía tiene mucho que hacer: en los aceleradores de partículas, donde las parejas de materia y antimateria se crean rutinariamente en campos de energía; en el núcleo del Sol, donde 4.4 millones de toneladas de materia se convierten en energía cada segundo; y en los núcleos de las demás estrellas.

Asimismo, se las ingenia para ocuparse cerca de los agujeros negros, justo afuera de sus horizontes de sucesos, donde las parejas de partículas y antipartículas pueden de pronto comenzar a existir a expensas de la formidable atracción gravitacional del agujero negro. Stephen Hawking describió ese proceso por vez primera en 1975, al mostrar que por medio de este mecanismo la masa de un agujero negro puede evaporarse lentamente; en otras palabras, los agujeros negros no son del todo negros. Actualmente, a este fenómeno se lo llama *radiación de Hawking* y es un recordatorio de la perenne fertilidad de $E = mc^2$.

Pero ¿qué ocurrió antes de todo esto? ¿Qué sucedió antes del comienzo?

Los astrofísicos no tienen idea. O más bien nuestra idea más creativa no tiene fundamento en la ciencia experimental. Aun así, ciertos religiosos tienden a asegurar, con un poco de vanidad, que *algo* debió iniciarlo todo: una fuerza más grande que todas las

demás, una fuente de la cual todo proviene. Un primer motor. En su mente ese algo es, desde luego, Dios.

Pero ¿y si el universo siempre ha estado ahí, en un estado o condición aún por identificar, un multiverso, por ejemplo? O ¿si el universo, como sus partículas, tan solo aparecieron súbitamente de la nada?

Respuestas como esta por lo general no satisfacen a nadie. Sin embargo, nos recuerdan que la ignorancia es el estado mental natural de un investigador en una frontera siempre cambiante. La gente que cree ignorar nada jamás ha buscado ni se ha topado con el límite entre lo conocido y lo desconocido en el cosmos. Y allí reside una fascinante dicotomía. «El universo siempre fue» no se reconoce como respuesta legítima a la pregunta ¿qué hubo en el principio? Pero para los religiosos la respuesta es «Dios siempre fue»; es la contestación obvia y consoladora a la pregunta ¿qué hubo antes de Dios?

No importa quién sea uno, el estar buscando dónde y cómo empezaron las cosas tiende a inducir una especie de fervor emocional, como si conocer el principio implicara alguna forma de comunidad con, o tal vez dominio sobre, todo lo que vino después. Así que lo que es cierto acerca de la vida no es menos cierto para el universo: saber de dónde proviene uno no es menos importante que saber adónde uno se dirige.

41. Guerras santas

En casi todas las conferencias públicas que he dado acerca del universo, he tratado de reservar tiempo suficiente para contestar preguntas. La sucesión de temas es predecible. Primero, las preguntas se relacionan directamente con la conferencia, luego se derivan hacia temas astrofísicos sensuales, como los agujeros negros, los cuásares y el *big bang*. Si me queda tiempo para responder todas las preguntas, y si el lugar de la conferencia es en Estados Unidos, la discusión tarde o temprano llega hasta Dios. Las preguntas suelen ser ¿los científicos creen en Dios? y ¿usted cree en Dios? o ¿el estudio de la astrofísica lo vuelve más o menos religioso? Los editores han aprendido que hay mucho dinero invertido en Dios, en especial cuando el autor es un científico y el título del libro abarca una yuxtaposición de temas científicos y religiosos. Los más exitosos han sido *God and the Astronomers* [Dios y los astrónomos] de Robert Jastrow, *La partícula divina: si el universo es la respuesta, ¿cuál es la pregunta?*, de Leon M. Lederman, *La cosmología moderna y su relación con Dios y La resurrección de los muertos* de Frank J. Tipler, y las dos obras de Paul Davies, *Dios y la nueva física* y *La mente de Dios*. Estos autores son físicos o astrofísicos reconocidos, y si bien ninguno de estos libros es estrictamente religioso, alientan al lector a meter a Dios en la conversación sobre la astrofísica. Incluso el finado Stephen Jay Gould, un perro de combate darwiniano y agnóstico devoto se unió al desfile con su obra *Ciencia versus religión, un falso conflicto*. El éxito financiero de esas publicaciones indica que se gana un poco más entre el público estadounidense si se es un científico que habla abiertamente sobre Dios.

Tras la publicación de *La física de la inmortalidad*, que discutía si las leyes de la física permiten a la persona y a su alma existir después de que se han marchado de este mundo, la gira editorial de Tipler incluyó varias conferencias bien pagadas dirigidas a grupos religiosos protestantes. Esta lucrativa sub industria ha florecido en años recientes debido a los esfuerzos de *sir* John Templeton, millonario fundador del fondo de inversiones Templeton, a fin de armonizar y conciliar la ciencia y la religión. Además de patrocinar talleres y conferencias sobre el asunto, la Fundación Templeton busca a populares científicos afines a la religión para concederles un premio anual cuyo monto excede el del premio Nobel.

Que no haya duda: actualmente la práctica de la ciencia y la religión nada tienen en común. Como fue bien documentado en la obra decimonónica *A History of the Warfare of Science with Theology in Christendom* [Historia de la guerra entre la ciencia y la teología en el cristianismo] del historiador y expresidente de la Universidad de Cornell Andrew D. White, la historia muestra una relación larga y combativa entre la religión y la ciencia que dependía de quién controlara la sociedad del momento. Los resultados científicos se basan en la verificación experimental, mientras que los postulados religiosos se basan en la fe. Ambas son formas irreconciliables de conocer, las cuales aseguran un eterno debate cuando ambos campos se encuentran; aunque, al igual que en las negociaciones para liberar rehenes, lo mejor es mantener conversando a ambas partes.

El cisma no resultó a falta de esfuerzos por conciliar a ambos grupos. Grandes científicos, desde Claudio Ptolomeo en el siglo II hasta Isaac Newton en el siglo XVII, empeñaron sus formidables intelectos con la finalidad de deducir la naturaleza del universo de entre los enunciados y filosofías de los escritos religiosos. En efecto, a la hora de su muerte, Newton había escrito más palabras sobre Dios y la religión que sobre las leyes de la física, incluyendo esfuerzos inútiles de emplear la cronología bíblica para comprender y predecir acontecimientos del mundo natural. Si alguno de estos esfuerzos hubiera sido exitoso, la ciencia y la religión hoy serían indistintos.

El argumento es sencillo. Aún desconozco una predicción exitosa del mundo físico que haya sido inferida o extrapolada del contenido de algún documento religioso. En efecto, puedo decir algo más fuerte. Cada vez que alguien ha tratado de hacer una predicción exacta acerca del mundo físico con base en documentos religiosos se ha equivocado rotundamente. Con predicción me refiero a un enunciado preciso acerca del comportamiento de objetos o fenómenos del mundo natural, registrado antes de que el acontecimiento haya sucedido. Cuando un modelo predice algo después de que sucedió, lo que hace se llama *posdicción*. Las posdicciones constituyen el cimiento de la mayoría de los mitos de creación y, desde luego, de *Los cuentos de así fue* de Rudyard Kipling, donde se explican fenómenos cotidianos con lo que ya se sabe. Sin embargo, en la ciencia, 100 pos dicciones apenas valen una sola predicción exitosa.

* * * *

ENCABEZA LA LISTA DE PREDICCIONES religiosas los perpetuos asertos de cuándo se acabará el mundo, ninguno de los cuales se ha probado como cierto. Un ejercicio inocuo, pero otras profecías y afirmaciones han detenido o retrogradado el progreso de la ciencia. Un ejemplo señero fue el juicio de Galileo (que considero el juicio del milenio), en el cual mostró que el universo era fundamentalmente distinto de como lo describían las ideas dominantes de la Iglesia católica. En descargo de la Inquisición, empero, desde el punto de vista observacional, el universo geocéntrico tiene mucho sentido. Con su conjunto de epiciclos para explicar los movimientos peculiares de los planetas ante el fondo de estrellas, el vetusto modelo geocéntrico no se contraponía a ninguna observación conocida. Esto fue cierto mucho después de que Copérnico introdujera el modelo heliocéntrico del universo un siglo antes. El modelo geocéntrico, asimismo, correspondía a las enseñanzas de la Iglesia católica y las interpretaciones predominantes de la Biblia, en las que la Tierra fue creada antes que el Sol y la Luna, tal como se describe en los primeros versículos del Génesis. Si usted ha sido creado primero, entonces usted es el centro de todo movimiento. ¿Qué más? Además, el Sol y la Luna eran descritos como esferas lisas. ¿Qué otra cosa podría crear una deidad perfecta y omnisciente?

Todo esto cambió, por supuesto, con la invención del telescopio y las observaciones de Galileo de los cielos. El nuevo aparato visual reveló aspectos del cosmos que se contraponían a las concepciones

populares de un universo geocéntrico immaculado y divino: la superficie lunar era rocosa y agreste, la del Sol tenía manchas móviles; Júpiter tenía lunas que viajaban en torno suyo y no de la Tierra, y Venus tenía fases como la Luna. Por sus radicales descubrimientos, que sacudieron la cristiandad, y por farolero, Galileo fue sometido a juicio, hallado culpable de herejía y condenado a prisión domicilia. Fue un castigo leve si se toma en cuenta lo que sucedió al monje Giordano Bruno. Pocas décadas antes, Bruno había sido condenado por herejía y quemado vivo, por sugerir que la Tierra pudiera no ser el único lugar donde hubiera vida.

No pretendo sugerir que ciertos científicos capaces, que siguieron el método científico, no se han equivocado. Claro que sí. La mayoría de las afirmaciones científicas son descartadas debido principalmente a información escasa o incompleta y, ocasionalmente, a errores. Pero el método científico, que permite emprender expediciones a callejones sin salida intelectuales, también promueve ideas, modelos y teorías productivas espectacularmente correctas. Ninguna empresa en la historia del pensamiento humano ha sido tan exitosa en descifrar los procedimientos del universo.

Ocasionalmente, a la ciencia se la acusa de ser una disciplina terca e intolerante. A menudo la gente piensa así cuando ve a los científicos descalificar la astrología, lo paranormal, las apariciones de Pie Grande y otras áreas de interés humano que rutinariamente no pasan los exámenes de doble ciego o carecen de evidencia confiable. Pero no hay que ofenderse. Los científicos tratan las

afirmaciones ordinarias de las revistas de investigaciones profesionales con este mismo nivel de escepticismo. Los estándares son idénticos. Véase lo sucedido cuando en una conferencia de prensa los químicos B. Stanley Pons y Martin Fleischmann de la Universidad de Utah afirmaron que habían creado fusión nuclear «fría» en su laboratorio. De inmediato, los científicos actuaron con escepticismo. A los pocos días del anuncio, era claro que nadie podía repetir los resultados de Pons y Fleischmann. Su trabajo fue sumariamente descartado. Otras historias similares suceden a diario (menos las conferencias de prensa) por cada afirmación científica. Las únicas que se conocen tienden a ser las que pudieran afectar la economía.

* * * *

CON TALES GRADOS DE ESCEPTICISMO, sorprende a algunos que los científicos obtengan mayores recompensas y elogios cuando, de hecho, descubren errores en los paradigmas establecidos. Dichas recompensas también se otorgan a quienes crean nuevas formas de comprender al universo. Casi todos los científicos más famosos, elija al que guste, han sido encomiados en sus vidas. El camino al éxito en semejante carrera profesional es antitética al de cualquier otra actividad humana, en especial la religión.

Con esto no se dice que en el mundo no haya científicos religiosos. En un reciente estudio acerca de las creencias religiosas entre profesionales de la ciencia y las matemáticas (Larson y Witham, 1998), 65% de los matemáticos (la tasa más alta) se declaró religioso, así como 22% de los físicos y de los astrónomos (la

proporción más baja). El promedio nacional entre todos los científicos es de 40%, y se ha mantenido sin cambios desde hace 100 años. Como referencia, cerca de 90% de los estadounidenses afirma ser religioso (una de las tasas más altas de entre las sociedades occidentales), por lo cual o los laicos son quienes se sienten atraídos a la ciencia o esta vuelve a las personas menos religiosas.

Pero ¿y esos científicos que son religiosos? Los investigadores más exitosos no obtienen sus conocimientos científicos de sus creencias religiosas. Por otra parte, actualmente los métodos de la ciencia contribuyen poco o nada a la ética, la inspiración, la moral, la belleza, el amor, el odio o la estética. Estos son elementos vitales de la vida civilizada y en ellos casi todas las religiones se centran. Ello significa que para muchos científicos no hay un conflicto de intereses.

Como pronto veremos, cuando los científicos hablan acerca de Dios suelen invocarlo en los confines del conocimiento donde debemos ser más humildes y donde nuestro sentido del asombro es mayor. ¿Acaso podemos cansarnos del asombro?

En el siglo XIII Alfonso X el Sabio, rey de España, quien aparte era un académico reconocido, fue frustrado por la complejidad de los epiciclos ptolemaicos del universo geocéntrico. Menos humilde que otros, Alfonso musitó: «De haber estado en la creación, hubiera aconsejado cómo ordenar mejor el universo» (Carlyle, 2004, libro II, cap.VII).

Totalmente de acuerdo con las frustraciones del rey Alfonso con el universo, Albert Einstein escribió a un colega suyo: «Si Dios creó al mundo, su principal preocupación no era facilitarnos su comprensión» (1954). Cuando Einstein no podían entender cómo o por qué un universo determinista requeriría los formalismos probabilísticos de la mecánica cuántica, caviló que «es difícil echar un vistazo a las cartas de Dios, pero que Él pueda jugar a los dados con el mundo [...] es algo que ni por un momento puedo creer» (Frank, 2002: 208). Cuando se le mostró a Einstein un resultado experimental que, de ser correcto, hubiera descartado su nueva teoría de la gravedad, Einstein comentó: «El Señor es sutil, mas no malicioso» (Frank, 2002: 285). El físico danés Niels Bohr, contemporáneo de Einstein, tanto había oído comentarios de Einstein sobre Dios que declaró que ¡este debiera dejar de decirle a Dios qué hacer! (Gleick, 1999).

Hoy, de vez en cuando se escucha a un astrofísico (tal vez 1 en 100) invocar públicamente a Dios al preguntársele de dónde provienen nuestras leyes de la física o qué había antes del *big bang*. Como puede anticiparse, dichas preguntas constituyen la frontera moderna del descubrimiento cósmico y, a la fecha, trascienden las respuestas que la información y las teorías pueden proporcionar. Algunas ideas prometedoras, como la cosmología inflacionaria y la teoría de cuerdas, están vigentes. Estas podrían facilitar las respuestas al final, desplazando la frontera del asombro.

Mi punto de vista personal es enteramente pragmático y en parte se asemeja al de Galileo, a quien se le atribuye haber dicho durante el

juicio que «la Biblia dice cómo ir al cielo no cómo el cielo va» (Drake, 1957: 186). En una carta a la gran duquesa de Toscana, fechada en 1615 Galileo apuntó: «en mi mente Dios escribió dos libros. El primero fue la Biblia, en el cual los hombres pueden hallar las respuestas a sus preguntas sobre valores y la moral. El segundo libro de Dios es el libro de la naturaleza, que permite a los hombres usar la observación y la experimentación para responder nuestras propias preguntas acerca del universo» (Drake, 1957: 173).

Sencillamente creo en lo que funciona. Y lo que funciona es el sano escepticismo encarnado en el método científico. Créame que si la Biblia fuese una rica fuente de entendimiento y de respuestas científicas, estaríamos leyéndola a diario para obtener descubrimientos cósmicos. Pero mi vocabulario de inspiración científica se traslapa fuertemente con el de los entusiastas de la religión. A mí, como a otros, me sobrecoge la presencia de los objetos y los fenómenos del universo. Y me conmuevo de admiración con su esplendor. Pero lo hago a sabiendas y aceptando que si yo propusiera un Dios que agracie nuestro valle de lo desconocido, llegará el día en que, fortalecido con los avances de la ciencia, dicho valle no existirá nunca más.

42. El perímetro de la ignorancia

Al escribir sobre los siglos pasados, muchos científicos se sienten obligados a poetizar los misterios cósmicos y la obra de Dios. Tal vez esto no debiera sorprendernos: la mayoría de los científicos del pasado y el presente se identifican como personas espiritualmente

devotas. Pero una lectura cuidadosa de libros antiguos, en particular de aquellos referidos al universo, muestra que los autores invocan a la divinidad solo cuando llegan a los límites de su propia comprensión. Apelan a un poder superior solo cuando observan el océano de su propia ignorancia. Claman a Dios solo desde el borde precario y solitario de su incomprensión. Sin embargo, cuando están seguros de su explicación, Dios apenas figura.

Empecemos desde arriba. Isaac Newton fue uno de los intelectos más grandes que el mundo haya visto. Sus leyes del movimiento y su ley de la gravitación universal, concebidas a mediados del siglo XVII, representan fenómenos cósmicos que habían eludido a los filósofos por milenios. Mediante dichas leyes, se puede entender la atracción gravitacional de los cuerpos en un sistema, y así comprender las órbitas.

Las leyes de la gravedad de Newton permiten calcular la fuerza de atracción entre dos objetos. Si se introduce un tercer objeto, entonces cada uno atraerá a los otros dos, y las órbitas que trazan se volverán más difíciles de computar. Si se agrega otro objeto y otro y otro, pronto se tiene todos los planetas del sistema solar. La Tierra y el Sol se atraen entre sí, pero Júpiter también atrae a la Tierra, lo mismo Saturno y Marte, al tiempo que Júpiter a Saturno, y este a Marte, y así sucesivamente.

Newton temía que este jaloneo volviera inestables las órbitas del sistema solar. Sus ecuaciones indican que hace mucho tiempo los planetas debieron caer hacia el Sol o escapado al espacio, y privado al Sol de planetas. Aun así, el sistema solar, así como el cosmos,

parecían ser el modelo del orden y la duración. De tal manera, Newton, en su obra maestra *Principia*, concluye que Dios debe de intervenir de vez en cuando para corregir las cosas:

Los seis planetas primarios revuelven en torno al Sol en círculos concéntricos con el Sol, y con movimientos dirigidos hacia las mismas partes, y casi en el mismo plano [...] Pero no debe pensarse que causas meramente mecánicas den origen a tantos movimientos regulares [...] El más bello sistema del Sol, los planetas y los cometas solo deben provenir del consejo y el dominio de un Ser poderoso e inteligente ([1726] 1992: 544).

En los *Principia*, Newton distingue entre hipótesis y filosofía experimental, y declara: «las hipótesis, ya sean físicas o metafísicas, ya sean cualidades ocultas o mecánicas, no tienen lugar en la filosofía experimental» (p. 547). Lo que quiere es información «que se infiera del fenómeno»; pero en su ausencia, en el límite entre lo que podía explicar y aquello que solo podía aceptar, las causas que podía identificar y las que no, Newton invocaba a Dios:

Eterno e Infinito, Omnipotente y Omnisciente [...] gobierna todas las cosas y sabe todas las que son o las que pueden hacerse [...] Solo lo conocemos por sus muy sabios y excelentes inventos de cosas y de causas finales; lo admiramos por sus perfecciones, pero lo veneramos y adoramos por su dominio (p. 545).

Un siglo más tarde, el astrónomo y matemático francés Pierre-Simon Laplace enfrentó el dilema de las órbitas inestables de

Newton. En vez de considerar la misteriosa estabilidad del sistema solar como la enigmática obra de Dios, Laplace la declaró reto científico. En su obra maestra *Tratado de la mecánica celeste*, cuyo primer volumen salió a la luz en 1799, Laplace demostró que el sistema solar es estable por más tiempo que el que Newton podía predecir. Para ello, Laplace introdujo un nuevo tipo de matemática llamada *teoría de la perturbación*, la cual le permitía examinar los efectos acumulados de muchas fuerzas pequeñas. Según una anécdota muy repetida pero acaso adornada, cuando Laplace regaló un ejemplar de su *Tratado* a su amigo, versado en la física, Napoleón Bonaparte, este le preguntó qué papel desempeñaba Dios en la construcción y regulación de los cielos: «Sire —contestó Laplace—, no necesité esa hipótesis» (De Morgan, 1872).

* * * *

SIN EMBARGO, APARTE DE NEWTON, muchos científicos habían invocado a Dios o a los dioses cuando su comprensión se diluía en ignorancia. Véase al astrónomo alejandrino del siglo II d. C., Ptolomeo. Armado con una descripción, pero falto de un verdadero entendimiento de qué hacían los planetas en el firmamento, no pudo contener su fervor religioso y en su *Almagesto* anotó al margen: «Sé que soy mortal por naturaleza y efímero, pero cuando deseo trazar los paseos de los cuerpos celestes ya no piso la Tierra: me levanto en presencia del mismo Zeus y me tomo un trago de ambrosía».

O tómese en cuenta al astrónomo holandés del siglo XVII, Christiaan Huygens, entre cuyos aportes está el reloj de péndulo y

haber descubierto los anillos de Saturno. En su encantador libro titulado *The Celestial Worlds Discover'd* [Los mundos celestes descubiertos], publicado póstumamente en 1698, la mayor parte del primer capítulo celebra lo que entonces se sabía de las órbitas, formas y tamaños de los planetas, así como su brillantez relativa y aparente naturaleza rocosa. El libro incluye tablas que ilustran la estructura del sistema solar. Dios está ausente de esta discusión, pese a que apenas un siglo antes, previo a los logros de Newton, las órbitas planetarias eran misterios supremos.

The Celestial Worlds Discover'd también está lleno de especulaciones sobre la vida en el sistema solar, y es aquí donde Huygens plantea preguntas que no puede responder. Menciona los enigmas biológicos de su tiempo, tales como el origen de la complejidad de la vida. Y, desde luego, ya que la física del siglo XVII estaba más avanzada que la biología del siglo XVII, solo en este tema Huygens invoca la mano de Dios: «Supongo que ningún cuerpo puede negar que hay mucho de invento, de milagro, en la producción y el crecimiento de las plantas y los animales que en los saltos de los cuerpos inanimados [...] ya que el dedo de Dios y la sabiduría de la Divina Providencia se manifiesta más claramente en ellos que lo otro» (p. 20).

Hoy en día los filósofos seculares llaman esa clase de invocación divina «el Dios de las lagunas», muy útil ya que nunca faltan lagunas en el conocimiento de la gente.

* * * *

TAN CREYENTES COMO FUERON Newton, Huygens y otros científicos del pasado, también eran empíricos. No evadían las conclusiones a que la evidencia les obligaba a arribar, y cuando sus descubrimientos chocaron con los preceptos de la fe, defendieron sus descubrimientos. Ello no significa que fuera fácil: enfrentaron una oposición feroz, como Galileo, quien tuvo que defender su evidencia telescópica contra objeciones formidables provenientes de la Biblia y el «sentido común».

Galileo distinguía claramente entre el papel de la religión y el de la ciencia. Para él la religión era para el servicio a Dios y para la salvación de las almas, mientras que la ciencia era la fuente de observaciones exactas y verdades demostradas. En su carta, fechada en 1615, a la gran duquesa Cristina de Toscana, no deja dudas acerca de su postura en torno a la palabra literal de la Santas Escrituras:

Al leer la Biblia, si uno siempre se confinara al sentido gramatical, uno caería en el error [...]

Nada físico [...] que pudiera ser demostrado, debe ser cuestionado (y menos aún condenado) con base en el testimonio de pasajes bíblicos cuyo significado es distinto al de sus palabras [...]

Así, no me siento obligado a creer que el mismo Dios que nos ha dado los sentidos, razón e intelecto haya tenido la intención de que no los usáramos (Venturi, 1818: 222).

La excepción entre los científicos, Galileo, consideraba lo desconocido como un lugar para explorar en lugar de un misterio eterno controlado por la mano de Dios.

Mientras la esfera celeste se considerase generalmente del dominio de la divinidad y que los meros mortales no podían explicar su funcionamiento, simplemente probaba la sabiduría y el poder de Dios. Pero desde el inicio del siglo XVI, las obras de Copérnico, Kepler, Galileo y Newton —sin dejar de mencionar a Maxwell, Heisenberg, Einstein, todos aquellos que descubrieron las leyes fundamentales de la física— proporcionaron explicaciones para una creciente gama de fenómenos. Poco a poco, el universo estaba siendo sometido a los métodos y los instrumentos de la ciencia y se convertía en un lugar cognoscible.

* * * *

ENTONCES, EN LO QUE IMPLICÓ una asombrosa pero inesperada inversión filosófica, diversos eruditos y clérigos comenzaron a declarar que las leyes de la física probaban la sabiduría y el poder de Dios.

Un tema muy popular en los siglos XVII y XVIII era el de un universo que operaba como un reloj exacto: un mecanismo ordenado, racional, predecible, fabricado y operado por Dios y sus leyes físicas. Con los antiguos telescopios, que dependían de la luz visible, no se podía dudar de la imagen de un universo ordenado. La Luna giraba alrededor de la Tierra, así como los demás planetas giraban en torno a sus ejes y del Sol. Los astros brillaban. Las nebulosas flotaban libremente en el espacio.

No fue sino hasta el siglo XIX cuando se evidenció que la luz visible es tan solo una banda del amplio espectro de la radiación electromagnética, la banda que los humanos pueden ver. La luz

infrarroja fue descubierta en 1800; la ultravioleta, en 1801; las ondas de radio, en 1888; los rayos X, en 1895, y los rayos gamma, en 1900. Década por década del siglo XX, se introdujeron telescopios novedosos, dotados de detectores que podían «ver» aquellas partes otrora invisibles del espectro electromagnético. Y los astrofísicos comenzaron a desenmascarar el verdadero carácter del universo.

Resulta que algunos cuerpos celestes arrojan más luz en la banda invisible que en la visible. Y la luz invisible que ven los nuevos telescopios muestra que el cosmos está rodeado de caos: monstruosos estallidos de rayos gamma, mortíferos púlsares, campos gravitacionales que aplastan la materia, agujeros negros que engullen a sus vecinos estelares, astros recién nacidos que se encienden dentro de focos de gas que colapsan. Y a medida que crecieron y mejoraron nuestros telescopios ópticos, surgió más caos: galaxias que chocan y se canibalizan entre sí, explosiones de estrellas supermasivas, órbitas planetarias y estelares caóticas. Como se ha señalado, nuestro vecindario cósmico, el sistema solar interior, ha resultado ser una galería de tiro, lleno de asteroides ambulantes y cometas que de vez en cuando chocan con planetas. En ocasiones han incluso arrasado con las masas de flora y fauna de la Tierra. La evidencia señala que no ocupamos un universo ordenado sino un zoológico destructivo, violento y hostil.

Desde luego, la Tierra también puede ser mala para la salud humana. En la Tierra, un oso grizzly puede atacarlo y en el océano uno puede ser comido por un tiburón. Una nevada puede congelar;

los desiertos, deshidratar; los terremotos, enterrar; los volcanes, incinerar; los virus, infectar; los parásitos, chupar los fluidos vitales; el cáncer, apoderarse del cuerpo; las enfermedades congénitas, provocar una muerte temprana. E incluso si se tiene la buena suerte de ser sano, una plaga de langostas puede devorar las cosechas; un tsunami, arrastrar a su familia, o un huracán, destruir su comunidad.

* * * *

ASÍ QUE EL UNIVERSO NOS quiere matar, pero como en el pasado, ignoremos por lo pronto dicha complicación.

Muchas preguntas, acaso incontables, yacen en la vanguardia de la ciencia. En algunos casos, por décadas o siglos, las respuestas eluden a las mejores mentes de nuestra especie. Y actualmente en Estados Unidos ha estado resurgiendo la noción de que una inteligencia superior es la única respuesta a todos los enigmas. Esta versión actual de Dios de las lagunas tiene un nuevo nombre: *diseño inteligente*. El término sugiere que una entidad dotada de capacidad mental mayor que la de la mente humana creó o permitió todas las cosas del mundo físico que no podemos explicar mediante el método científico.

Una hipótesis interesante.

Pero ¿por qué confinarnos a las cosas demasiado maravillosas o complicadas de comprender, cuya existencia y atributos luego atribuimos a una super inteligencia? Mejor ¿por qué no reunir las cosas cuyo diseño es tan torpe, impráctico o inútil que reflejan la ausencia de inteligencia?

Tomemos la forma humana. Comemos, bebemos y respiramos a través del mismo agujero en la cabeza y, pese a la epónima maniobra de Henry J. Heimlich, el atragantamiento es la cuarta causa principal de «muerte por herida no intencional» en Estados Unidos. Y el ahogamiento es la quinta causa. El agua cubre casi tres cuartos de la superficie terrestre, pero somos criaturas terrestres, y si se sumerge la cabeza por unos minutos, uno muere.

O veamos nuestra colección de partes corporales inútiles. ¿Para qué sirve la uña del dedo meñique del pie? ¿Y el apéndice, que deja de funcionar en la niñez y que solo sirve como fuente de una apendicitis? También las partes útiles pueden ser problemáticas. Me gustan mis rodillas, pero no están bien protegidas de posibles golpes. En estos tiempos se pueden reemplazar quirúrgicamente si dan problemas. Y en cuanto a nuestra columna vertebral, tomará tiempo antes de que se logre que ya no duela.

¿Y los asesinos silenciosos? La hipertensión, el cáncer de colon y la diabetes matan a decenas de miles de personas en Estados Unidos, pero es imposible saber si se sufre de esas dolencias hasta que lo determina el forense. ¿No sería maravilloso si se nos instalaran biodetectores que nos alertaran de tales peligros mucho tiempo antes? Hasta los autos baratos tienen calibradores del motor.

¿Y qué tal el comediante que configuró la región entre nuestras piernas, un complejo de entretenimiento construido en torno al sistema de drenaje?

A menudo se considera al ojo como una maravilla de ingeniería biológica. Para el astrofísico, empero, es solo un detector mediocre.

Mejor hubiera sido uno más sensible para las cosas oscuras que yacen en el cielo y para las cosas invisibles en el espectro. Veríamos atardeceres más hermosos si pudiéramos ver las luces ultravioletas e infrarrojas. Cuán útil sería que de un vistazo pudiéramos detectar todas las fuentes de microondas en el medioambiente o saber cuáles transmisores de radio están activos. Cuán útil sería poder detectar los radares policiacos en la noche.

Piénsese cuán fácil sería navegar en una ciudad desconocida si pudiéramos, como las aves, siempre saber dónde está el norte por tener magnetita en nuestras cabezas, cuánto mejor estaríamos si tuviéramos branquias tanto como pulmones, cuán productivos si tuviéramos seis brazos en vez de dos, y si tuviéramos ocho, podríamos manejar un auto mientras hablamos por un celular, cambiamos una estación de radio, nos maquillamos, bebemos y nos rascamos la oreja al mismo tiempo.

El diseño estúpido podría crear un movimiento social propio. No sería una precondition de la naturaleza, pero es evidente. Aun así, la gente prefiere pensar que nuestros cuerpos, mentes e incluso nuestro universo representan la cumbre de la forma y la razón. Tal vez sea un poderoso antidepresivo, pero no es ciencia; no lo es, nunca lo ha sido ni jamás lo será.

* * * *

OTRA PRÁCTICA QUE NO ES científica es acoger la ignorancia. Y, sin embargo, esto es esencial para la filosofía del diseño inteligente: no sé qué es, no sé cómo funciona, es demasiado complicado para

entenderlo, es demasiado complicado para que cualquiera lo comprenda, por lo que debe ser la obra de una inteligencia superior. ¿Qué se hace con esta forma de razonar? ¿Se cede la solución del problema a alguien más listo que uno, alguien que ni siquiera es humano? ¿Se dice a los alumnos que solo respondan aquellas preguntas con soluciones fáciles?

Pudiera haber un límite para lo que la mente humana puede comprender acerca del universo. Pero sería arrogante decir que si yo no puedo resolver un problema, nadie más puede. ¿Supóngase que Galileo y Laplace hubieran pensado así? ¿Y si Newton no? Habría resuelto el problema de Laplace 100 años antes, lo cual hubiera hecho posible a Laplace cruzar la siguiente frontera de la ignorancia.

La ciencia es la filosofía del descubrimiento. El diseño inteligente es una filosofía de la ignorancia. No se puede elaborar un programa de descubrimiento suponiendo que nadie es lo bastante listo como para resolver un problema. Hubo una vez en que la gente identificaba al dios Neptuno como la causa de las tormentas marinas. Hoy en día llamamos a dichas tormentas huracanes. Sabemos cuándo y dónde comienzan, qué los impulsa, qué mitiga su poder destructor. Y quien haya estudiado el calentamiento global puede decir qué los empeora. Las únicas personas que aún consideran a los huracanes «actos de Dios» son aquellas que redactan pólizas de seguros.

* * * *

NEGAR O BORRAR LA RICA HISTORIA de los científicos y demás pensadores que han invocado a la divinidad en su trabajo sería intelectualmente deshonesto. De seguro hay un lugar idóneo para el diseño inteligente en el paisaje académico. ¿Qué tal en la historia de la religión? ¿Qué tal en filosofía o psicología? Al único lugar donde no pertenece es el aula de ciencias.

Si usted no se convence con argumentos científicos, considere las consecuencias financieras. Si se permite que el diseño inteligente entre en los textos científicos, en las salas de conferencia y los laboratorios, entonces el costo para la frontera del descubrimiento científico, la que impulsa las economías del futuro, sería incalculable. No quiero que a los estudiantes que pudieran hacer el siguiente gran descubrimiento en energía renovable o en los viajes espaciales se les enseñe que todo cuanto no entiendan fue construido por una divinidad y que está, por tanto, fuera de su capacidad intelectual. El día en que eso ocurra, los estadounidenses se sentarán asombrados ante lo que no comprenden, mientras vemos cómo el resto del mundo avanza con audacia adonde ningún otro mortal ha ido antes.

Bibliografía

- Aristóteles. 1943. *On Man in the Universe*. Nueva York: Walter J. Black.
- Aronson, A., y T. Ludlam, eds. 2005. *Hunting the Quark Gluon Plasma: Results from the First 3 Years at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)*. Upton, Nueva York: Brookhaven National Laboratory. Formal Report: BNL- 73847.
- Atkinson, R. 1931. «Atomic Synthesis and Stellar Energy». *Astrophysical Journal* 73: 250-295.
- Aveni, Anthony. 1989. *Empires of Time*. Nueva York: Basic Books.
- Baldry, K., y K. Glazebrook. 2002. «The 2dF Galaxy Redshift Survey: Constraints on Cosmic Star- Formation History from the Cosmic Spectrum». *Astrophysical Journal* 569: 582.
- Barrow, John D. 1988. *The World within the World*. Oxford: Clarendon Press.
- [Biblia, pasajes] *The Holy Bible*. 1611. King James, traductor.
- Brewster, David. 1860. *Memoirs of the Life, Writings, and Discoveries of Sir Isaac Newton*, vol. 2. Edinburgh: Edmonston.
- [Bruno, Giordano] Dorothea Waley Singer. 1950. *Giordano Bruno* (contiene *On the Infinite Universe and Worlds* [1584]). Nueva York: Henry Schuman.
- Burbidge, E. M.; Geoffrey. R. Burbidge; William Fowler, y Fred Hoyle. 1957. «The Synthesis of the Elements in Stars». *Reviews of Modern Physics* 29: 15.

- Carlyle, Thomas. 2004. *History of Frederick the Great* [1858]. Kila, MT: Kessinger Publishing.
- [Central Bureau for Astronomical Telegrams] Brian Marsden, ed. 1998. Cambridge, MA: Center for Astrophysics, March 11, 1998.
- Chaucer, Geoffrey. 1964. «Prologue». *The Canterbury Tales* [1387]. Nueva York: Modern Library.
- Clarke, Arthur C. 1961. *A Fall of Moondust*. Nueva York: Harcourt.
- Clerke, Agnes M. 1890. *The System of the Stars*. Londres: Longmans, Green, & Co.
- Comte, Augusto. 1842. *Cours de la Philosophie Positive*, vol. 2. París: Bailliere. —. 1853. *The Positive Philosophy of Auguste Comte*, Londres: J. Chapman.
- Copérnico, Nicolás. 1617. *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (Latín), 3era ed. Amsterdam: Wilhelmus Iansonius.—. 1999. *On the Revolutions of the Heavenly Sphere* (inglés). Norwalk, CT: Easton Press.
- Darwin, Charles. 1959. *Letter to J. D. Hooker*, febrero 8, 1874. *The Life and Letters of Charles Darwin*. Nueva York: Basic Books.—. 2004. *The Origin of Species*. Edison, NJ: Castle Books.
- De Morgan, A. 1872. *Budget of Paradoxes*. Londres: Longmans Green & Co.
- De Vaucouleurs, Gerard. 1983. Comunicación personal.

- Doppler, Christian. 1843. *On the Coloured Light of the Double Stars and Certain Other Stars of the Heavens*. Ponencia presentada en Royal Bohemian Society, mayo 25, 1842. *Abhandlungen der KöniglichBöhmischen Gesellschaft der Wissenschaften*, Praga, 2: 465.
- Eddington, sir Arthur Stanley. 1920. *Nature* 106:14.—. 1926. *The Internal Constitution of the Stars*. Oxford, UK: Oxford Press.
- Einstein, Albert. 1952. *The Principle of Relativity* [1923]. Nueva York: Dover Publications.—. 1954. *Letter to David Bohm*. febrero 10. Einstein Archive 8-041.
- [Einstein, Albert] James Gleick. 1999. «*Einstein*», *Time*, diciembre 31.
- [Einstein, Albert] Phillipp Frank. 2002. *Einstein, His Life and Times* [1947]. George Rosen, traductor. Nueva York: Da Capo Press.
- Faraday, Michael. 1855. *Experimental Researches in Electricity*. Londres: Taylor.
- Ferguson, James. 1757. *Astronomy Explained on Sir Isaac Newton's Principles*, 2da ed. Londres: Globe.
- Feynman, Richard. 1968. «What Is Science». *The Physics Teacher* 7, N°. 6: 313–20.—. 1994. *The Character of Physical Law*. Nueva York: The Modern Library.
- Forbes, George. 1909. *History of Astronomy*. Londres: Watts & Co.

- Fraunhofer, Joseph von. 1898. *Prismatic and Diffraction Spectra*. J. S. Ames, traductor. Nueva York: Harper & Brothers.
- [Frost, Robert] Edward Connery Lathem, ed. 1969. *The Poetry of Robert Frost: The Collected Poems, Complete and Unabridged*. Nueva York: Henry Holt and Co.
- Galen. 1916. *On the Natural Faculties* [c. 180]. J. Brock. Cambridge, MA, traductor: Harvard University Press.
- [Galileo, Galilei] Stillman Drake. 1957. *Discoveries and Opinions of Galileo*. Nueva York: Doubleday Anchor Books.
- Galileo, Galilei. 1744. *Opera*. Padova: Nella Stamperia.—. 1954. *Dialogues Concerning Two New Sciences*. Nueva York: Dover Publications.—. 1989. *Sidereus Nucius* [1610]. Chicago: University of Chicago Press.
- Gehrels, Tom, ed. 1994. *Hazards Due to Comets and Asteroids*. Tucson: University of Arizona Press.
- Gillet, J. A. y W. J. Rolfe. 1882. *The Heavens Above*. Nueva York: Potter Ainsworth & Co.
- Gregory, Richard. 1923. *The Vault of Heaven*. Londres: Methuen & Co.
- [Harrison, John] Dava Sobel. 2005. *Longitude*. Nueva York: Walker & Co.
- Hassan, Z. y Lui, eds. 1984. *Ideas and Realities: Selected Essays of Abdus Salaam*. Hackensack, NJ: World Scientific.
- Herón de Alejandría. *Pneumatica* [c. 60].

- Hertz, Heinrich. 1900. *Electric Waves*. Londres: Macmillan and Co.
- Hubble Heritage Team. Hubble Heritage Images. <http://heritage.stsci.edu>.
- Hubble, Edwin P. 1936. *Realm of the Nebulae*. New Haven, CT: Yale University Press.—. 1954. *The Nature of Science*. San Marino, CA: Huntington Library.
- Huygens, Christiaan. 1659. *Systema Saturnium* (Latín). Hagae-Comitis: Adriani Vlacq.—. 1698. [*Cosmotheoros*,] *The Celestial Worlds Discover'd* (inglés). Londres: Timothy Childe.
- Impey, Chris, y William K. Hartmann. 2000. *The Universe Revealed*. Nueva York: Brooks Cole.
- Johnson, David. 1991. V-1, V-2: *Hitler's Vengeance on London*. Londres: Scarborough House.
- Kant, Immanuel. 1969. *Universal Natural History and Theory of the Heavens* [1755]. Ann Arbor: University of Michigan.
- Kapteyn, J. C. 1909. «On the Absorption of Light in Space. Contribuci the Mt. Wilson Solar Observatory», N°. 42, *Astrophysical Journal* (offprint), Chicago: University of Chicago Press.
- Kelvin, Lord. 1901, «Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light». *London Philosophical Magazine and Journal of Science* 2, 6th Series, p. 1. Newcastle, UK: Literary and Philosophical Society.—. 1904. *Baltimore Lectures*. Cambridge, UK: C. J. Clay and Sons.

- Kepler, Johannes. 1992. *Astronomia Nova* [1609]. W. H. Donahue, traductor. Cambridge, UK: Cambridge University Press.—. 1997. *The Harmonies of the World*[1619]. Juliet Field, traductor. Philadelphia: American Philosophical Society.
- Lang, K. R., y O. Gingerich, eds. 1979. *A Source Book in Astronomy & Astrophysics*. Cambridge: Harvard University Press.
- Laplace, Pierre-Simon. 1995. *Philosophical Essays on Probability* [1814]. Nueva York: Springer Verlag.
- Larson, Edward J., y Larry Witham. 1998. «Leading Scientists Still Reject God». *Nature* 394: 313.
- Lewis, John L. 1997. *Physics & Chemistry of the Solar System*. Burlington, MA: Academic Press.
- Loomis, Elias. 1860. *An Introduction to Practical Astronomy*. Nueva York: Harper & Brothers.
- Lowell, Percival. 1895. *Mars*. Cambridge, MA: Riverside Press.—. 1906. *Mars and Its Canals*. Nueva York: Macmillan and Co.—. 1909. *Mars as the Abode of Life*. Nueva York: Macmillan and Co.—. 1909. *The Evolution of Worlds*. Nueva York: Macmillan and Co.
- Lyapunov, A. M. 1892. *The General Problem of the Stability of Motion*. Tesis doctoral, University of Moscow.
- Mandelbrot, Benoit. 1977. *Fractals: Form, Chance, and Dimension*. Nueva York: W. H. Freeman & Co.
- Maxwell, James Clerk. 1873. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford, UK: Oxford University Press.

- McKay, D. S., *et al.* 1996. «Search for Past Life on Mars». *Science* 273, N°. 5277.
- Michelson, Albert A. 1894. *Speech delivered at the dedication of the Ryerson Physics Lab*, University of Chicago.
- Michelson, Albert A., y Edward W. Morley. 1887. «On the Relative Motion of Earth and the Luminiferous Aether». *London Philosophical Magazine and Journal of Science* 24, 5th Series. Newcastle, UK: Literary and Philosophical Society.
- Morrison, David. 1992. «The Spaceguard Survey: Protecting the Earth from Cosmic Impacts». *Mercury* 21, N°. 3: 103.
- Nasr, Seyyed Hossein. 1976. *Islamic Science: An Illustrated Study*. Kent: World of Islam Festival Publishing Co.
- Newcomb, Simon. 1888. *Sidereal Messenger* 7: 65.— 1903. *The Reminiscences of an Astronomer*. Boston: Houghton Mifflin Co.
- [Newton, Isaac] David Brewster. 1855. *Memoirs of the Life, Writings, and Discoveries of Sir Isaac Newton*. Londres: T. Constable and Co.
- Newton, Isaac. 1706. *Optice* (Latín), 2da ed. Londres: Sam Smith & Benjamin Walford.— 1726. *Principia Mathematica*(Latín), 3rd ed. Londres: William & John Innys.— 1728. *Chronologies*. Londres: Pater- noster Row.— 1730. *Optiks*, 4th ed. Londres: Westend of St. Pauls.— 1733. *The Propheies of Daniel*. Londres: Pater- noster Row.— 1958. *Papers and Letters on Natural Philosophy*. Bernard Cohen, editor. Cambridge, MA: Harvard University Press.— 1962. *Principia Vol. II: The System of the World* [1687]. Berkeley:

- University of California Press.—. 1992. *Principia Mathematica*(inglés) [1729]. Norwalk, CT: Easton Press.
- Norris, Christopher. 1991. *Deconstruction: Theory & Practice*. Nueva York: Routledge.
 - O'Neill, Gerard K. 1976. *The High Frontier: Human Colonies in Space*. Nueva York: William Morrow & Co.
 - Planck, Max. 1931. *The Universe in the Light of Modern Physics*. Londres: Allen & Unwin Ltd.—. 1950. *A Scientific Autobiography* (inglés). Londres: Williams & Norgate, Ltd.
 - [Planck, Max] 1996. Citado por Friedrich Katscher en «The Endless Frontier». *Scientific American*, febrero, p. 10.
 - Ptolomeo, Claudio. 1551. *Almagest* [c. 150]. Basilea, Basel.
 - Salaam, Abdus. 1987. *The Future of Science in Islamic Countries*. Discurso ante la Quinta Conferencia islámica en Kuwait, [http://www.alislam.org/library/salam- 2](http://www.alislam.org/library/salam-2).
 - Schwippell, J. 1992. «Christian Doppler y la Royal Bohemian Society of Sciences». *The Phenomenon of Doppler*. Praga.
 - Sciama, Dennis. 1971. *Modern Cosmology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
 - Shamos, Morris H., ed. 1959. *Great Experiments in Physics*. Nueva York: Dover.
 - Shapley, Harlow, y Heber D. Curtis. 1921. *The Scale of the Universe*. Washington, D. C.: National Academy of Sciences.
 - Sullivan, W. T. III, y B. J. Cohen, eds. 1999. *Preserving the Astronomical Sky*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific.

- Taylor, Jane. 1925. *Prose and Poetry*. Londres: H. Milford.
- Tipler, Frank J. 1997. *The Physics of Immortality*. Nueva York: Anchor.
- Tucson City Council. 1994. «Tucson/Pima County Outdoor Lighting Code». *Ordinance N°. 8210*. Tucson, AZ: International Dark Sky Association.
- [Twain, Mark] Kipling, Rudyard. 1899. *An Interview with Mark Twain. From Sea to Sea*. Nueva York: Doubleday & McClure Company.
- Twain, Mark. 1935. *Mark Twain's Notebook*.
- van Helden, Albert, traductor. 1989. *Sidereus Nuncius*. Chicago: University of Chicago Press.
- Venturi, C. G., ed. 1818. *Memoire e Lettere*, vol. 1. Modena: G. Vincenzi.
- von Braun, Werner. 1971. *Space Frontier*[1963]. Nueva York: Holt, Rinehart and Winston.
- Wells, David A., ed. 1852. *Annual of Scientific Discovery*. Boston: Gould and Lincoln.
- White, Andrew Dickerson. 1993. *A History of the Warfare of Science with Theology in Christendom* [1896]. Buffalo, NY: Prometheus Books.
- Wilford, J. N. 1999. «Rarely Bested Astronomers Are Stumped by a Tiny Light». *The New York Times*, agosto 17.
- Wright, Thomas. 1750. *An Original Theory of the Universe*. Londres: H. Chapelle.

Autor

Neil deGrasse Tyson (Bronx, 5 de octubre de 1958) es un astrofísico, escritor y divulgador científico estadounidense. Actualmente es director del Planetario Hayden en el Centro Rose para la Tierra y el Espacio, investigador asociado en el Departamento de Astrofísica del Museo Estadounidense de Historia Natural. Desde el año 2006 es el presentador del programa de televisión de corte educativo científico *NOVA Science NOW* del canal público de Boston WGBH, miembro de PBS, y que ha sido un invitado frecuente en *The Daily Show*, *The Colbert Report*, *Real Time with Bill Maher* y *Jeopardy!*



La investigación de Tyson se ha enfocado en observaciones de formación y evolución estelar así como en cosmología y astronomía galáctica. Ha trabajado en numerosas instituciones, incluyendo la *Universidad de Maryland*, la *Universidad de Princeton* y el *Museo Americano de Historia Natural*.

Ha escrito numerosos libros populares de astronomía. En 1995 comenzó a escribir la columna «Universo» para la revista *Natural History*. En una columna de esta revista, en 2002, acuñó el término «Manhattanhenge» para describir los dos días al año en los cuales el sol al atardecer se alinea con el cruce de las calles del trazado urbano de Manhattan, permitiendo que el sol se vea a lo largo de calles laterales sin obstrucciones. La columna de Tyson también

influyó su trabajo como profesor, con las lecturas en *The Great Courses*.

Tyson fue escogido para ser el anfitrión de la secuela del programa de televisión *Cosmos: Un viaje personal*, escrita y presentada originalmente por Carl Sagan. El programa, titulado *Cosmos: A Space-Time Odyssey*, fue estrenado el 9 de marzo de 2014.