

# CIENCIA, y el "azar relativo"



Coordinadores:  
Inés Pellón González  
Quintín Garrido Garrido

## Reseña

¿Otro libro de divulgación? ¿Otro libro de cuántica? ¿Otro libro de relatividad? Estas, y otras, preguntas han sido las que me han hecho cuándo comentaba a conocidos y amigos la "penúltima idea peregrina" que se me había ocurrido. Pero sobre todo me decían: ¿Otro libro sobre Einstein?

Os tengo que confesar que en, y para, este libro he sido egoísta, he planteado el libro que, como amante de la divulgación científica, de la Física en particular, me gustaría leer. Y para ello intentar poder contar con un plantel de la mejor ciencia española.

Que mejor que estos años de centenario de los Nobel a Albert Einstein y a Niels Bohr para leer algo sobre ellos, de la física derivada de sus teorías y sobre todo de intentar saber hacia dónde han ido a parar sus famosos, "azarosos y relativos", desencuentros.

## Índice

### Presentación

1. [Introducción](#): La Ciencia en los comienzos del siglo XX. (Inés Pellón González)
2. [Albert Einstein: el genio de la cuarta dimensión](#). (M<sup>a</sup> Ángela del Castillo Alarcos)
3. [Niels Bohr y el nacimiento de la Mecánica Cuántica](#). (Marisa Pons y Lourdes Domínguez)
4. [El descubrimiento de la aceleración del Universo](#). (Pilar Ruiz Lapuente)
5. [La tensa estimación del ritmo de expansión \(del Universo\)](#). (Ruth Lazkoz)
6. [Estrellas de neutrones: objetos densos y fríos en las antípodas de nuestra estrella solar](#). (María Ángeles Pérez García)
7. [Agujeros negros](#). (Ana Alonso Serrano)
8. [Ondas gravitatorias y simulaciones numéricas como laboratorios computacionales](#). (Isabel Cordero Carrión)
9. [Astronomía multi—mensajero y el papel de los rayos gamma para búsqueda de materia oscura](#). (Judit Pérez Romero)
10. [Hacia una teoría de la Gravedad Cuántica](#). (Teresa Bautista Solans)
11. [El mundo cuántico de los materiales](#). (Leni Bascones)
12. [De la paradoja EPR a las tecnologías cuánticas](#). (Esperanza López Manzanares)
13. [Punto—Cero de Energía y efecto Casimir](#). (Inés Cavero)

Peláez)

14. [Un azar masivo y temporal](#). (Veronika Chobanova)
15. [Mecánica Cuántica "Scan": la Inercia Cuántica destruye la Superposición de Estados](#). (Beatriz Gato Rivera)
16. [Superposición de Estados y el fenómeno de las oscilaciones de partículas](#). (Mariam Tórtola Baixauli)
17. [Cosmología Cuántica](#). (Mercedes Martín Benito)
18. [Una cuestión "nuclear"](#). (Isabel del Río Luna)



## Presentación y agradecimientos

¿Otro libro de divulgación? ¿Otro libro de cuántica? ¿Otro libro de relatividad? Estas, y otras, preguntas han sido las que me han hecho cuándo comentaba a conocidos y amigos la "penúltima idea peregrina" que se me había ocurrido. Pero sobre todo me decían: ¿Otro libro sobre Einstein?

Os tengo que confesar que en, y para, este libro he sido egoísta, he planteado el libro que, como amante de la divulgación científica, de la Física en particular, me gustaría leer. Y para ello intentar poder contar con un plantel de la mejor ciencia española.

Que mejor que estos años de centenario de los Nobel a Albert Einstein y a Niels Bohr para leer algo sobre ellos, de la física derivada de sus teorías y sobre todo de intentar saber hacia dónde han ido a parar sus famosos, "azarosos y relativos", desencuentros.

Tengo que agradecer a Inés Pellón que me animara y ayudara con este proyecto. En origen fue a ella a quien le comenté la idea para que la llevara a cabo. En el intento de darle un poco más de valor añadido al proyecto la dije que podría ser con todas las autoras chicas. *"Chicas hablando de dos genios (chicos) y de cosas que se creía que eran de chicos"*. Su respuesta fue que le parecía una magnífica idea pero que me animara, y atreviera, a desarrollarla yo. Ella me ayudaría a llevarla a cabo y compartiría también las labores de coordinación.

Dicho y, gracias a un maravilloso grupo de grandes científicas, hecho.

Tengo que agradecer la participación a todas las autoras que pese a una gran cantidad de "zancadillas", cosas de pandemia, han conseguido mantenerse firmes y en pie y sacar adelante este proyecto. También a todas las que por diversos motivos no han podido participar pero que sus palabras de aliento y apoyo han sido de gran ayuda en muchos momentos.

En la versión para la lectura on—line hemos incorporado la posibilidad de escuchar algo de música, una distinta para cada capítulo. Tengo que agradecer a todos los músicos que permiten que sus obras se puedan disfrutar y compartir de manera Commons. En especial quiero mencionar, y agradecer, a Alexandre, Carlos y Bert por la elaboración, participación, cesión de su música para este proyecto.

Permitid que exprese un agradecimiento especial a Pablo Garrido por su creatividad y su actitud siempre positiva ante la multitud de portadas realizadas hasta conseguir dar con las adecuadas, en mi opinión, para este proyecto. Y no puedo dejar de destacar su paciencia infinita a la hora de aguantar los intentos de explicaciones por mi parte de las distintas temáticas de los capítulos según los íbamos teniendo.

Todos los que participamos en este libro, al igual que en los anteriores de la colección "CIENCIA, y...", lo hacemos de manera altruista consiguiendo con ello que el resultado pueda ser de lectura on—line y descarga, en pdf, gratuita.

No me he podido resistir a incorporar al final mi pequeña lista de "lecturas recomendadas". Permitid que os señale aquí

*INCERTIDUMBRE de David Lindley* un libro que me ha acompañado durante "unas complicadas noches de verano". Gracias Mamá por permitir que aquel "chaval un poco callejero" hiciera sus *importantes experimentos* (electrólisis, pólvora, caída libre de cuerpos, etc. ) en casa, en un pequeño baño cual extraordinario *Laboratorio Cavendish* de Arganzuela.

Espero que disfrutéis con la lectura de este CIENCIA, y el "azar relativo" tanto como yo y no dejéis nunca de dar rienda suelta a vuestra curiosidad e imaginación.

Permitid que acabe estas líneas con algo que me ronda en la cabeza y que tal vez a vosotros os ocurra lo mismo después de la lectura de este libro.

*¿Pero "Dios" juega a los dados o no?*

Madrid, Marzo—2022.

[Quintín Garrido.](#)



## Introducción

### La Ciencia en los comienzos del siglo XX.

Desde tiempo inmemorial, la capacidad del ser humano para analizar su entorno mediante la realización de observaciones sistemáticas le ha permitido obtener un conocimiento empírico sobre el medio que le rodea, adaptarse a él, conseguir sobrevivir y además intentar encontrar una explicación a los fenómenos que ha sido capaz de observar. En el siglo XVIII, el estudio de dichos fenómenos se denominó "filosofía natural", y a quienes lo practicaban "filósofos naturales", hasta que el polímata inglés William Whewell (1794–1866) acuñó el término "científico"<sup>1</sup>. Gracias a él, los sustantivos "científico" y "ciencia" se aceptaron y generalizaron, siendo sus principales características la falsabilidad, la reproducibilidad y la repetitividad de los resultados, que tienen que poder ser comprobados para permitir el establecimiento de una hipótesis. Ésta a su vez tiene que poder ser analizada y modificada a la luz de nuevas experimentaciones para que el conocimiento avance.

El siglo XVIII había finalizado con un acontecimiento que marcó la transición entre la Edad Moderna y la Contemporánea: la Revolución Francesa. Poco a poco, las monarquías absolutas que

---

<sup>1</sup> Este término se publicó por primera vez en una revisión anónima que hizo Whewell de la obra de Mary Somerville "On the Connexion of the Physical Sciences" en la revista *Quarterly Review* (1834). ROSS, Sydney (1962) "Scientific: The history of a word". *Annals of Science*, 18 (2): 65–85. Ver también <https://plato.stanford.edu/entries/whewell/>, visitada el 18/10/2021.

habían dominado Europa desde la Edad Media fueron desapareciendo hasta llegar a los estados—nación liberales característicos de nuestros días. En este momento la ciencia aplicada a la industria desbancó a las formas manuales de producción, llevando al mundo a un nuevo sistema económico y social, generado sobre todo por las dos revoluciones industriales que se produjeron entre 1750 y 1914. Este caldo de cultivo propició que el principio del siglo XX contemplara una profunda convulsión en la sociedad: se iniciaron las principales corrientes filosóficas de pensamiento contemporáneas, en el arte comenzó un proceso de vanguardia que se cimentó en movimientos como el impresionismo, en arquitectura triunfó el modernismo, y se produjeron importantes adelantos científicos y tecnológicos que transformaron el mundo y empezaron a conformar el estilo de vida que hoy conocemos.

Por ejemplo, en medicina y biología se descubrió el motivo de la sepsis puerperal y que los microorganismos eran los causantes las enfermedades infecciosas (Snow, Pasteur, Koch y Lister), se generalizaron la anestesia (Morton, 1846) y las técnicas de vacunación, Darwin publicó *El origen de las especies* (1859), se descubrieron las leyes de la herencia genética (Mendel, 1861), se inventó el termómetro clínico (Clifford Allbutt, 1866), Freud planteó la teoría psicoanalítica (hacia 1896), se sintetizó la aspirina (Hoffmann, 1899) y el médico español Fidel Pagés Miravé (1886—1923) realizó una serie de experimentos que le llevaron a idear la anestesia epidural (1). Enseguida aparecieron nuevos fármacos, se elaboró la anestesia sintética (Einhorn, 1904) y se realizó la primera

transfusión directa de sangre (Crile, 1905). Paulov estudió el reflejo condicionado (premio Nobel en 1904), Santiago Ramón y Cajal descubrió las neuronas (premio Nobel en 1906), y Fleming obtuvo la penicilina en 1928. Gracias a todo ello, la edad de mortalidad se retrasó considerablemente, pero sobre todo se consiguió una mayor calidad de vida.

La química avanzó de forma espectacular cuando Mendeleev y Meyer establecieron la clasificación periódica de los elementos (en 1869 y 1870), aparecieron materiales nuevos como los plásticos (Schoebein, 1845), los disolventes, los anticongelantes y los derivados del petróleo. Se inventó el rayón (Little, Walter y Mark, 1902), el celofán (Brandenburger, 1908), la baquelita (Baekeland, 1909), la gasolina sintética (Bergius, 1913) y los primeros detergentes artificiales (Alemania, 1916).

Las matemáticas del siglo XIX contemplaron el desarrollo de las geometrías no euclidianas, la teoría de números, la geometría de grupos y el álgebra en general, el análisis con variables complejas, la lógica matemática y la teoría de conjuntos entre otros avances que hicieron que, al finalizar el siglo, esta disciplina adquiriese una enorme importancia, tanto en sí misma como aplicada a otras ramas de la ciencia: el estudio del calor, la electricidad, el magnetismo, la mecánica de fluidos, la resistencia de materiales y la elasticidad, o la cinética química.

Además, fueron muchos los avances tecnológicos que se produjeron durante el siglo XIX: la locomotora, la fotografía, el telégrafo, la máquina de escribir, el vehículo eléctrico, el teléfono, la lámpara

incandescente, el dirigible, la rotativa, la dinamita, el fonógrafo, el fonógrafo (que permitía la transmisión de sonido por medio de una emisión de luz), la pastilla de jabón, la Coca—Cola, el gramófono, el generador eléctrico, el avión, el sistema de transferencia eléctrica, la luminaria fluorescente, el cinematógrafo, la radio, el vitascopio y el radiocontrol. Edison descubrió el denominado "Efecto Edison" en 1883 (el paso de electricidad desde un filamento a una placa metálica dentro de un globo que contiene una lámpara incandescente) a partir de los experimentos realizados en 1873 por Guthrie e Hittorf (1869—1883), Goldstein (1885) y Elster y Geitel (1882—1889). Edison descubrió también que la corriente emitida por el filamento caliente se incrementaba rápidamente al aumentar el voltaje y presentó una aplicación para un dispositivo regulador de voltaje usando este efecto el 15 de noviembre de 1883, proponiendo que a través del aparato podría pasar la cantidad de corriente suficiente como para operar un telégrafo sonoro.

Con todo este bagaje, el siglo XX comenzó con una idea innovadora: la fabricación de un automóvil mediante una cadena de montaje en la fábrica del industrial Ransom Olds. Esta concepción fue adaptada por Henry Ford para el sistema de producción en cadena de su Modelo T, gracias a lo cual consiguió un precio asequible y una producción masiva que permitió que las clases medias pudieran acceder a un automóvil, un lujo impensable hasta entonces. Y cuando los hermanos Wright realizaron el primer vuelo en un avión tripulado (el 17 de diciembre de 1903), cambió de forma radical el concepto de viajar tal y como se entendía hasta ese

momento.

En un mundo en el que no existía internet, ni teléfonos, ni televisión, el interés general por las novedades producidas en la ciencia, la tecnología, el diseño y el arte fueron enormes, a pesar de las dificultades que existían para su divulgación. Para intentar llegar a todo el público, Francia comenzó a realizar exposiciones industriales nacionales con las que promover la mejora de su agricultura y su tecnología a partir de 1791. En particular, la feria celebrada en París en 1844 fue tan relevante que resultó imitada por otros países europeos, incluidos Gran Bretaña e Irlanda. Pronto se decidió internacionalizarlas, y la primera *Exposición Universal* tuvo lugar en el Palacio de Cristal en Hyde Park (Londres, 1851) (2), con el título "Gran Exposición de los Trabajos de la Industria de Todas las Naciones", que fue el precedente de las ferias internacionales celebradas posteriormente con carácter bienal. En ellas se pueden distinguir tres épocas: La era de la industrialización (1851 a 1931), la era del intercambio cultural (1933 a 1986), y la era de las marcas—nación (1988—hoy).

Durante el siglo XIX y principios del XX, la celebración de cada feria estaba rodeada de una enorme expectación, y París fue nombrada en 1900 "capital de la modernidad" por haber brillado de forma espectacular en las exposiciones de 1889 y 1900. Como indicador se puede citar que contó con una participación internacional de 42 países y 25 colonias, y que su coste total fue de 119. 225. 707 francos (<http://jdpecon.com/expo/wfparis1900.html>, visitada el 27/12/2021).



*Figura 1. Palacio de la electricidad y espectáculo de agua de la Exposición Universal de 1900 (París). A la izquierda de la fuente se encuentra el edificio dedicado a las Industrias Químicas, y a la derecha, el edificio que exhibía las novedades relacionadas con las Industrias Mecánicas. También se ven dos de los cuatro quioscos de música que se construyeron. Fuente: Fotografía coloreada a partir del original en blanco y negro archivado en la Biblioteca del Congreso de los Estados Unidos (Washington, LC—DIG—ppmsc—05239:<http://hdl.loc.gov/loc.pnp/ppmsc.05239>, visitada el 29/12/2021.*

Inaugurada el 14 abril (fiesta nacional de la República francesa),

duró 212 días, y al ser clausurada el 12 noviembre de 1900, se habían contabilizado 50. 860. 801 participantes entre público, personal, expositores y delegados internacionales. Para acceder a ella se restauró y modernizó la estación de Orsay, y las partes más visitadas fueron *La Porte Monumentale (o la Salamandre)*, *Le Grand Palais* y *Le Petit Palais*, y *Le Palais de l'électricité* (ver figura 1).

Del mismo modo causaron conmoción los cortometrajes con sonido grabado por primera vez que habían realizado los hermanos Lumière, y la presencia de una calle móvil con dos velocidades en movimiento (antecedente de nuestras escaleras mecánicas).

Pero, sobre todo, se consideró espectacular el *Palais de l'optique*, ubicado en un edificio diseñado por Georges Leroux. Dentro de él se construyó un globo eléctrico que asemejaba a la luna (figura 2), así como el telescopio más grande construido hasta esa fecha (figura 3). Estas referencias a la óptica sirven para indicar que la Física de 1900 partía de las ideas de Newton y su ley de la gravitación universal, así como de la investigación sobre la naturaleza de la energía y la luz. John Dalton había formulado la teoría atómica de la materia en 1803, Oersted relacionó la electricidad con el magnetismo en 1820 y Faraday corroboró sus resultados, descubriendo la inducción electromagnética.



Figura 2. Cartel anunciador del Palacio de la Óptica de la Exposición Universal de París (1900). Fuente:

<https://www.tendencias.com/lujo/el-paris-de-1900-en-una-exposicion-en-el-petit-palais>, visitada el 29/12/2021.

A finales del siglo XIX Crookes descubrió los rayos catódicos,



Thomson el electrón (en 1901), Roentgen los rayos X, y en 1903 obtuvieron el Premio Nobel de Física, por "los extraordinarios servicios rendidos en sus investigaciones conjuntas sobre los fenómenos de radiación", Pierre y Marie Curie<sup>2</sup>, junto con Henri Becquerel. En 1900 Planck formuló las principales ideas de la teoría cuántica al afirmar que la energía no se transmite de forma continua sino en paquetes denominados "cuantos", concepción que se desarrolló gracias al trabajo de físicos como Bohr, de Broglie, Schrödinger, Sommerfeld, Pauli, Heisenberg y Dirac.

En 1911 Rutherford demostró la existencia de espacios vacíos en el átomo y formuló una nueva estructura para él, imaginándolo como el Sistema Solar. Esta idea sirvió para que Bohr estableciese en 1913 un nuevo modelo atómico en el que los electrones se distribuían en niveles de energía separados por un cuanto de distancia, y para que Sommerfeld se imaginara al átomo con un núcleo central y los electrones en órbita elíptica alrededor de él.

En 1919 se descubrieron el protón y el núcleo atómico, y en 1932 Chadwick evidenció la existencia del neutrón.

Poco a poco se fueron sentando las bases de la mecánica cuántica, y cuando Heisenberg formuló en 1927 el principio de incertidumbre, el átomo se concibió como un núcleo y una serie de electrones

---

<sup>2</sup>Maria Salomea Sklodovska—Curie (Varsovia, 1867—Passy, 1934) fue una física y química polaca nacionalizada francesa. Pionera en el campo de la radiactividad, fue la primera persona en recibir dos premios Nobel en distintas especialidades: Física (en 1903, junto con su marido Pierre y con Henri Becquerel) y Química (en 1911, en solitario). Fue la primera mujer en ser profesora en la Universidad de París y la primera en recibir sepultura con honores en el Panteón de París por méritos propios en 1995.

orbitando a su alrededor en una especie de nubes de carga (3).

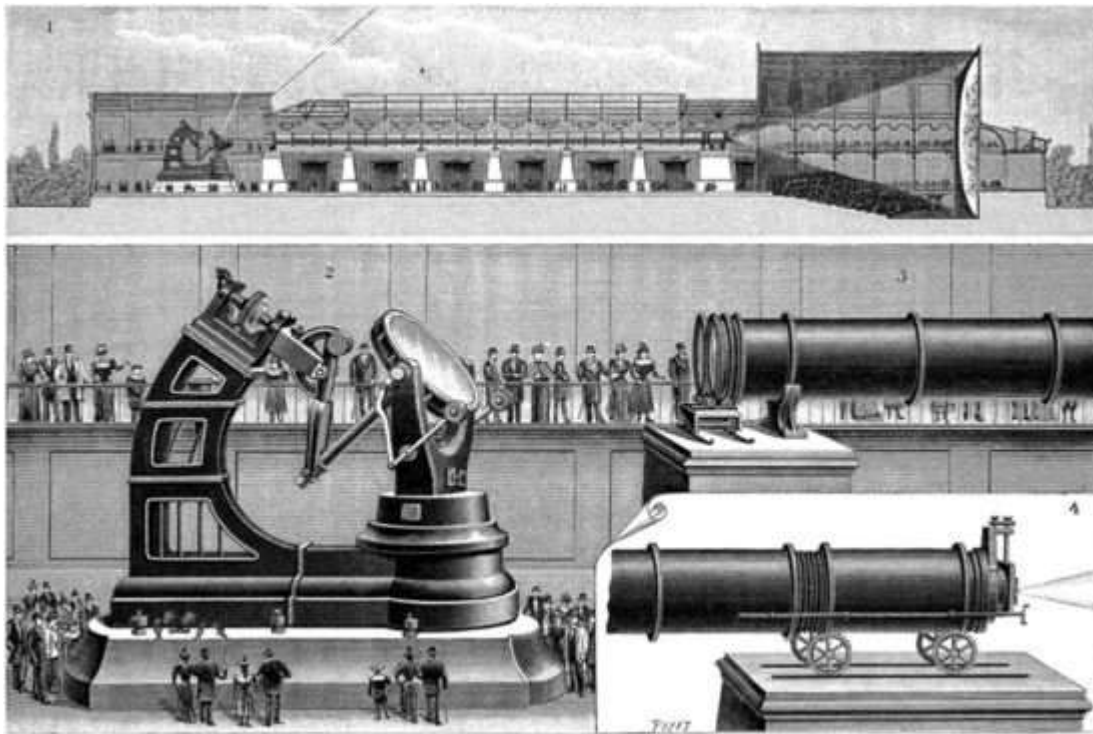


Fig. 3. — Détails de la grande lunette. — 1. Yae d'ensemble. — 2. La subrota. — 3. La lunette. — 4. L'oculaire.

Figura 3. Imagen del telescopio gigante de la Exposición Universal de París (1900). Fuente:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Great\\_Paris\\_Exhibition\\_Telescope\\_of\\_1900](https://en.wikipedia.org/wiki/Great_Paris_Exhibition_Telescope_of_1900), visitada el 11/12/2021.

De forma paralela, Albert Einstein enunció la teoría especial (1905) y la teoría general de la relatividad (1916), originándose así dos concepciones que parecen incompatibles: la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. La primera se puede aplicar sin problemas para explicar los fenómenos que ocurren a nivel macroscópico, pero no sirve para describir el comportamiento de las partículas subatómicas. Asimismo, la mecánica cuántica funciona bien en el

mundo subatómico, pero no sirve en las grandes magnitudes (4).

Mientras tanto, Europa entraba en una época convulsa con la creación en 1907 de la denominada *Triple Entente* entre Gran Bretaña, Francia y Rusia, para oponerse al auge científico y tecnológico que estaba alcanzando Alemania. Estos países se enzarzaron en una espiral de violencia que llevó al estallido de la Primera Guerra Mundial en 1914, mientras finalizaba la época victoriana y comenzaba a despuntar el sistema capitalista norteamericano. De forma paralela, la Revolución Rusa dio paso a otra futura superpotencia mundial, la Unión Soviética. En 1918 finalizó la Primera Guerra Mundial mientras se producía una pandemia de gripe que causó el fallecimiento de cincuenta millones de personas. Comienzan los "felices años veinte", que, en realidad, no fueron tan felices, pero que contemplaron el despegue de la física como no se había visto hasta ese momento, y que en este libro queda reflejada de forma magistral por sus autoras.

#### Bibliografía:

(1) DE LA MATA PAGÉS, Ramiro (2010) "Fidel Pagés: descubridor de la anestesia epidural". *Dendra Médica. Revista de Humanidades*, 2010, 9(1):104—109.

(2) ANÓNIMO (1900) "En la Exposición Universal de París de 1900". *Mar y Tierra. Número extraordinario (32)*, 08 de septiembre de 1900, p. 499.

(3) TRABULSE, Elías (2021), *La ciencia en el siglo XIX*.

[http://www.librosmaravillosos.com/la\\_ciencia\\_en\\_el\\_Siglo\\_XIX/](http://www.librosmaravillosos.com/la_ciencia_en_el_Siglo_XIX/),

visitada el 30/12/2021.

(4) TURMERO, Pablo (2021), *La ciencia en el siglo XX*.

<https://www.monografias.com/trabajos104/ciencia-siglo-xx/ciencia-siglo-xx.shtml>, visitada el 30/12/2021.

[Inés Pellón González](#).

Doctora en Ciencia Químicas.

Profesora del Dpto. de Ingeniería Química y del Medio Ambiente.  
Universidad del País Vasco /Euskal Herriko Unibertsitatea(UPV—  
EHU).



*Centenario de los Nobel (2021—2022). Albert Einstein Premio Nobel de Física del año 1921 y Niels Bohr Premio Nobel de Física del año 1922.*

## Capítulo 2

### Albert Einstein: el genio de la cuarta dimensión.

Albert Einstein es un personaje en la historia de la humanidad que dejó su impronta en la ciencia contemporánea. Mucho se ha escrito sobre su vida y andadura científica. Walter Isaacson es un periodista y biógrafo estadounidense del que puede decirse que es el biógrafo más acertado en escribir sobre la vida de Einstein, porque escribió bajo un prisma medio entre la ciencia, la innovación y el saber popular. Isaacson, con gran rigor científico, la reconstruyó paso a paso, descifrando minuciosamente información obtenida de la colección de los documentos sobre Einstein, con más de 1500 cartas privadas, para sustentar su narrativa biográfica en el libro denominado, "*Einstein, su vida y su universo*". Las muchas cartas escritas por el físico de su puño y letra y las muchas recibidas, han servido y todavía sirven para descifrar una biografía llena de episodios fascinantes, sobre este inminente científico del que podría decirse, pieza única en la humanidad.

Desde estas líneas escritas por mí, intentaré aclarar aspectos de la vida y de su ciencia apoyándome en hechos contrastados plausibles de veracidad.

Albert Einstein alemán de origen judío, nacido en Ulm en 1879 un 14 de marzo en el seno de una familia judía, fue y seguramente es y será, el científico más popular del mundo por su revolución en la ciencia, por la "*Teoría de la Relatividad*". Pero vivió en una época en que la ciencia todavía no despertaba a las conclusiones de

iconoclastas, por tanto, sumido en constantes discusiones, vivió una época de escepticismos e interrogantes, que no dieron fiabilidad a sus teorías hasta mucho después, de ahí que los académicos suecos en 1921, le dieran el Nobel de Física por la ley del efecto fotoeléctrico y no por su fórmula de la relatividad. Y aun así una verdadera explicación completa del efecto fotoeléctrico solamente pudo elaborarse muchos años después.

Einstein llegó a vivir los inicios de la revolución de los medios de comunicación en la radio, en el cine, en la televisión... lo que le significó una gran fama, que le dio a conocer mundialmente haciendo de él, un personaje público. El científico jamás se negó a esa fama y publicidad, y a titulares de prensa que le llevaron a que la gente le pidiera incluso autógrafos. Paralelo a su fama discurrió la industria de la cultura y él no dejó de ser un punto de mira, que en parte le beneficiaría. Incluso su atuendo de trajes amplios y pelo desaliñado, le proporcionó una marca distinguible, que le enmarcaba como un científico ensimismado en su trabajo y poco preocupado de su aseo personal. De fama es, que decidió no llevar calcetines, por la molestia que estos le ocasionaban al agujerarse, debido a los dedos gordos de sus pies, o la felicidad que le daba montar en bicicleta, o fumar su humeante pipa que le tachaba de fumador empedernido envuelto siempre, en una enorme nube de humo. Se jactaba de comer muchos carbohidratos, dormir 10 horas diarias y caminar mucho, hasta 5 kilómetros caminaba yendo y viniendo desde su casa a la Universidad de Princeton porque decía, que había muchas evidencias de que los espaguetis, dormir y

caminar mejoraban la memoria, la creatividad y la solución de problemas. Todas estas características, llegaron a definir al estereotipo del hombre de ciencia. Al igual que su comportamiento a veces irreverente, rompiendo muchísimas veces las reglas establecidas y, sobre todo, por ir a contracorriente. Son conocidas las veces que rechazó dar importantes conferencias en universidades de prestigio, como por ejemplo en Harvard o sacarle la lengua a un fotógrafo, rompiendo la tradición de las típicas y solemnes fotografías de personajes ilustres. Se consideraba sobre todo demócrata y en su libro "Mis ideas y opiniones", apostilló que se respetara a cada hombre como individuo, y que no se convirtiera a ninguno de ellos en ídolo, y en cuanto al dinero consideraba, que solo apelaba al egoísmo e invitaba irresistiblemente al abuso.

Pero la realidad es que Einstein, con sus extravagancias, sus experimentos mentales y situaciones hipotéticas recreadas con gran agudeza y esfuerzo de imaginación, casi imposibles de reproducir, se convirtió en un icono de la física teórica, explicando la complejidad de sus teorías tan cuestionadas por otros físicos experimentales. Einstein fue tan refutado y discutido, que incluso en los albores de su muerte, él se planteó rechazar algunas de sus hipótesis para ser recordado con más seriedad. Einstein fue un científico que se salió de los cánones establecidos en la ciencia, en propio beneficio o no, su popularidad sirvió como influencia para causas como el sionismo o el pacifismo, admitiendo cambios en sus propias creencias. Era hombre pragmático, pero a pesar de su rotundo rechazo al belicismo, llegó a firmar la carta en la que se



alertaba al gobierno de los Estados Unidos, de desarrollar la bomba atómica, como avance a la que pudieran construir los científicos alemanes, y como arma para conseguir las democracias. La bomba atómica es un dispositivo que obtiene una gran cantidad de energía explosiva por medio de reacciones nucleares, su funcionamiento se basa en una reacción nuclear en cadena sostenida, produciendo una enorme nube con forma de hongo cuando se detona a poca altitud sobre la corteza terrestre. Mucho sentiría Einstein haber sido artífice y responsable del proyecto Manhattan, cuando los americanos lanzaron en Japón durante la Segunda Guerra Mundial, esa terrible bomba en Hiroshima y Nagasaki un 6 y un 9 de agosto de 1945, provocando una catástrofe de magnitud incalculable. El físico escribiría siete años después, en una revista japonesa llamada "*Kaizo*", que el principal motivo de alertar a los americanos, fue su miedo a que fueran los alemanes quienes se adelantarán a la fabricación de la bomba. "*Cometí un gran error en mi vida*", se lamentó Albert Einstein pocos meses antes de morir.

Comenzando con su época infantil, en el último cuarto del siglo XIX, cuando Albert apenas contaba tres años sus padres, Hermann un comerciante de novedades electrotécnicas de su época y Pauline un ama de casa, pensaron que su hijo sufría un retraso intelectual anormal, pues apenas hasta entonces balbuceaba palabras y no habló con fluidez hasta los 9 años. Era reservado, vergonzoso e introvertido, no le gustaba juntarse con sus compañeros de clase y al principio no fue un brillante alumno, e increíblemente cierto, sus profesores llegaron a decir de él, que no llegaría a nada en la vida.

Pero hay que tener en cuenta que entonces el sistema escolar se fundamentaba en la memorización y la autoridad de los profesores, y todo alumno que pudiera crear tensiones por tener ideas contrarias y manifestarlas, se convertía en un alumno no deseado. Albert nunca disfrutó estudiando humanidades, pese a que en aquella época eran las asignaturas primordiales por excelencia. Le costaba memorizar, por eso decían de él que tenía "*memoria de colador*", aunque él llegó a decir cuando una vez en una entrevista se lo recordaron: "*Para que memorizar si se puede consultar*". Tenía faltas ortográficas y le costaba leer, fue por ese extraño comportamiento en la escritura y en la lectura, que llegó a decirse que pudiera padecer dislexia, aunque esta conjetura parte de la actualidad dado que, en esa época esta anomalía no se contemplaba. Pero en las asignaturas de ciencias, Einstein sí fue brillante, desbancando las primeras hipótesis de los biógrafos que lo tildaban de nefasto. La matemática como tal no constaba como asignatura, pero sí en otras ramas de la ciencia la tenían en cuenta, ahí es donde Einstein destacó y mucho. Se dice, que el interés por la ciencia se le despertó siendo muy pequeño, cuando su padre le enseñó una sencilla brújula de bolsillo que le fascinó enormemente. Pero el mismo Einstein confesó que gracias a su tío Jakob que le introdujo en el álgebra, y a otro de sus tíos que le incentivó en su adolescencia proporcionándole libros de ciencia, fue que llegó a interesarse por ella.

Los padres de Einstein, tras una mala administración en los negocios, se encontraron con dificultades financieras y tuvieron que

mudarse a Pavía en Italia, cerca de Milán. Einstein estudiaría en una escuela de habla alemana, y en 1899 toda la familia se mudó a Suiza donde estudió en la Escuela Cantonal. Albert solo tuvo una hermana y esta era menor que él nacida en 1881, llamada Maja que traducido significa María, tuvieron siempre un vínculo muy estrecho, incluso ella en febrero de 1939 emigró junto a su hermano a Estados Unidos y vivieron en la misma ciudad. Cuando Maja enfermó tras un ataque cerebral en 1946 y quedó postrada en cama al contraer arteriosclerosis, él con su compañía la arropó en su convalecencia, y dijo sobre su hermana: *"En sus últimos años le he leído todas las noches, los mejores libros de literatura antigua y nueva"*. Maja falleció el 25 de junio de 1951, cuatro años antes que su hermano.

Cuando la familia se asentó en Aarau Suiza, Albert comenzó sus estudios secundarios y el cambio fue notorio, ya que allí se estudiaba francés, y él no estaba preparado en ese idioma, de ahí que necesitara realizar dos veces los exámenes de accesos al Instituto Politécnico Federal de Zúrich, pero en toda su etapa escolar no dejó, incluso por aquel entonces, de ser brillante.

Entre sus habilidades estuvo la de tocar el violín, influido por su madre que poseía buenas dotes para la música, y era pianista. Con apenas siete años Einstein, ya tocaba el violín a pesar de no saber contar casi las notas musicales, también tocaba el piano, pero el violín fue su mayor compañía de por vida, tuvo varios violines y a todos los llamó con el apodo afectivo de *"lina"*. Sus compositores preferidos fueron Mozart, Bach, Schubert, Vivaldi, Corelli y

Scarlatti, dejando fuera de sus preferencias al afamado Beethoven, por considerarlo demasiado dramático. De las muchas frases escritas por Einstein, la referente a la música daba a conocer el placer que esta le proporcionaba:

*"Siempre pienso en música y la música llena mis sueños de día. Puedo ver mi vida en términos de música y de ella saco gran parte de mi alegría".*

Además de la música, una de sus mayores pasiones fue la navegación, hasta el extremo de que pasaba cientos de horas surcando las aguas en solitario, a bordo de los diferentes barcos que tuvo a lo largo de su vida.



*Figura 1 Einstein navegando. Dominio Público.*

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ETH-BIB-Einstein,\\_Albert\\_\(1879-1955\)\\_als\\_Segler\\_an\\_der\\_Pinne-Portrait-Portr\\_03124.tif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ETH-BIB-Einstein,_Albert_(1879-1955)_als_Segler_an_der_Pinne-Portrait-Portr_03124.tif)

A los 18 años aprendió a navegar descubriendo su afición a la vela. Su barco más querido fue el llamado "Tümmler" un precioso velero de siete metros de eslora construido en los astilleros Berkhoiz de Gärsch con los planos del arquitecto naval Adolf Harms, de este barco Einstein decía:

*"Podía dar veinte metros cuadrados de velas al viento, y acercarme a la costa hasta lugares donde solo había cuarenta*

*centímetros de agua de profundidad, gracias a su quilla abatible".*

Además, este velero iba equipado con un motor de dos cilindros que, según él, sonaba como una máquina de coser. Este barco fue un regalo de sus amigos al cumplir los cincuenta años, pero solo pudo disfrutarlo cuatro años, hasta que los nazis se lo confiscaron por su condición de judío, llegó a decir que su barco fue de los objetos más preciados que tuvo que dejar en Alemania. En Estados Unidos se compró un velero de casi cinco metros, al que le puso el nombre hebreo de "Tineff". Este y otros barcos proporcionaron muchas anécdotas en sus singladuras marineras, donde personajes como Madame Curie fueron sus pasajeros. A ella la llevó a navegar por el lago Lemán de Suiza, y a punto de tener un percance Curie confesó que no sabía nadar, pero por increíble que parezca, Einstein tampoco aprendió a nadar nunca, y en más de una ocasión estuvo a punto de morir ahogado, teniendo la suerte de ser auxiliado. Durante toda su vida no dejó de repetir que él practicaba el deporte de la vela, porque era con el que debía hacer menos esfuerzo en comparación con el enorme placer que obtenía. Y anecdótico es, que gracias a su teoría de la relatividad hoy existe para la navegación el GPS, ya que su excepcional trabajo describía como se mueven los objetos y como afectan las fuerzas que actúan sobre ellos, obviamente este invento sucedió años después de su fallecimiento. Unos cuantos físicos y matemáticos lograron establecer los complicados parámetros, para que, con una precisión de metros, se

podrían ubicar en que parte del mundo se encontraban los barcos. En 1896 a los 16 años, Einstein obtuvo el título de Bachiller y acto seguido renunció a su ciudadanía alemana para evitar hacer el servicio militar, convirtiéndose así en un apátrida, fue por lo que solicitaría nacionalizarse suizo, para evitar complicaciones. De la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, se graduó en 1900 como diplomado profesor de matemáticas y de física, y en 1901 a sus veintidós años, conseguiría la solicitada ciudadanía suiza. Mucho más tarde a los sesenta y un años en 1940 agregaría a la suiza, la nacionalidad estadounidense.

Cuando Adolf Hitler llegó al poder como canciller en enero de 1933, Einstein ya había dejado Alemania, porque comenzó a ser atacado abiertamente, no tanto así por sus trabajos en la ciencia sino más bien, por su condición judía. El diario nazi "Völkische Beobachter" le atacó escribiendo:

*"El ejemplo más importante de la peligrosa influencia de los círculos judíos en el estudio de la naturaleza, ha sido proveído por el señor Einstein, con sus matemáticamente toscas teorías que consisten en algo de conocimiento antiguo y unas adiciones arbitrarias".*

Él se marchó en 1932, para asentarse en Estados Unidos donde trabajaría como profesor en el Institute for Advanced Study de Princeton y ya no regresaría nunca más para vivir en Europa, aunque a partir de ese momento viajó por todo el mundo para dar sus magistrales conferencias.

Continuando con su época de juventud, Einstein nada más acabar sus estudios, no pudo ejercer en la Universidad como era su deseo, por lo que ejerció como tutor en Winterthur, Schaffhausen y Berna. Su compañero y amigo Marcel Grossmann le consiguió su primer empleo fijo en la Oficina Federal de la Propiedad Intelectual de Berna, una oficina de patentes donde trabajaría hasta 1909. Durante ese tiempo Einstein llegó a confesar que, dado que el trabajo no revestía complicación y era sencillo, le daba suficientemente tiempo para pensar y meditar sobre sus teorías. Antes de conseguir el trabajo de patentes, Einstein en 1901 en Berna, para mantenerse económicamente, decidió fundar una academia con la finalidad de dar clases particulares de matemáticas. Esta se llamó Academia Olimpia y nunca funcionó como tal, y quedó reducida a las reuniones periódicas de tres amigos y ocasionalmente alguno más, para discutir de filosofía y física. Este grupo estaba compuesto por Einstein, Maurice Solovine filósofo rumano y el matemático Conrad Habicht. Este grupo y su interés por estas ciencias, desempeñó un papel muy importante en el desarrollo intelectual de Einstein. A pesar de la breve existencia de la Academia, porque Solovine y Habicht se marcharon de Suiza, el efecto fue duradero, ya que los tres amigos permanecieron en contacto a lo largo de sus vidas.

Ya titulado y siendo todavía muy joven publicó su primer trabajo científico en 1901, el cual trataba sobre la atracción capilar, y en 1902 y 1903 publicó dos interesantes trabajos sobre los fundamentos estadísticos de la termodinámica, corroborando



mediante experimentación que la temperatura de un cuerpo se debe a la agitación de sus moléculas. Y en 1905 fue cuando a pesar de ser un joven físico desconocido, publicó su teoría de la relatividad especial, incorporando nuevos conceptos a los fenómenos estudiados con anterioridad por Henri Poincaré y Hendrik Lorentz. De ahí parte con excelencia, escribir la ecuación de la física más conocida a nivel mundial, la equivalencia de la masa con la energía,  $E = mc^2$ . Ese mismo año, sentaría las bases de la física estadística y de la mecánica cuántica. A él le debemos que asentara las bases de la cosmología y los misterios del átomo, siendo sin duda esos avances y descubrimientos, los que cambiaron la historia de la ciencia en muchos aspectos.

El año 1905 fue crucial para Einstein, el bien llamado "*annus mirabilis*" o año milagroso, fue cuando consiguió finalizar su doctorado con la tesis titulada "*una nueva determinación de las dimensiones moleculares*" y escribió cuatro artículos de gran importancia y muy fundamentales sobre la física de pequeña y de gran escala, explicando el movimiento browniano, el efecto fotoeléctrico, el desarrollo de la relatividad especial y la equivalencia de la masa—energía.

En el artículo titulado "*un punto de vista heurístico sobre la producción y transformación de luz*", Einstein dio una explicación completa del efecto fotoeléctrico como pilar básico para la mecánica cuántica, dado que se proponía la idea del "*quanto*", ahora llamado fotón. El artículo sobre el movimiento browniano titulado "*el movimiento requerido por la teoría cinética molecular del calor de*

*pequeñas partículas suspendidas en un líquido estacionario*" estaba estrechamente relacionado con el trabajo sobre la teoría molecular, tratándose de mecánica estadística muy elaborada sobre el movimiento térmico de los átomos individuales que forman un fluido. Las explicaciones de Einstein proporcionaron una evidencia experimental sobre la existencia real de los átomos. Antes de este trabajo efectuado por Einstein, los átomos ya se consideraban un concepto útil en física y química. La teoría atómica, la mecánica estadística desarrollada, los radios de los núcleos y la constante de Avogadro, como el número de partículas constituyentes de una sustancia, es decir, átomos o moléculas, todo esto ya era conocido, pero Einstein consiguió descifrar el movimiento atómico, con un método sencillo para contar átomos mirando a través de un microscopio ordinario.

Respecto a la teoría de la relatividad general (1915), presentó la ley de la gravedad, que desbancaba la hasta entonces vigente de Isaac Newton. La gravedad paso de ser una fuerza a distancia a una consecuencia de la curvatura del espacio—tiempo. Eso proporcionó las bases para el estudio de la cosmología y permitieron comprender las características esenciales del Universo. Siendo el principio fundamental de la teoría, el denominado principio de equivalencia.

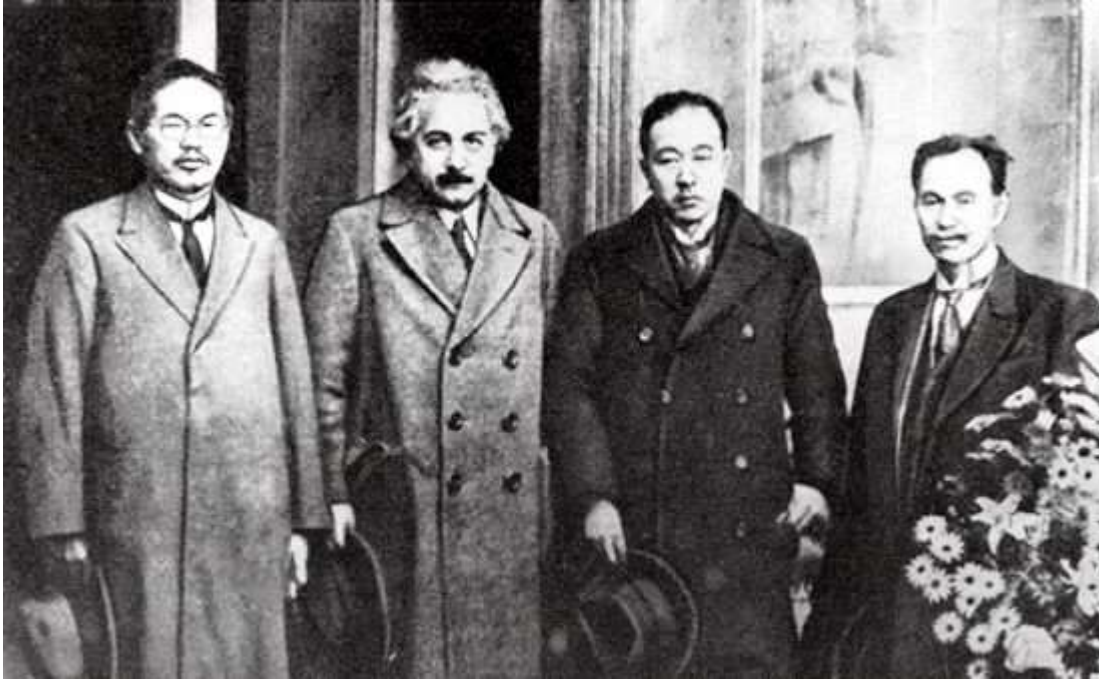
Sus últimos años de vida, los dedicó con ahínco a trabajar para integrar en una misma teoría las cuatro Fuerzas Fundamentales, pero no lo consiguió, y hoy esta tarea todavía es inconclusa. La idea del Universo de Einstein revelaba que Tiempo, Espacio, Masa, Energía y Luz son una misma cosa, pero mientras los primeros

cuatro elementos son elásticos, mutables, impredecibles y caprichosos, lo único que se mantiene constante es la velocidad de la luz. El 29 de mayo de 1919 en la isla de Príncipe en África occidental, el científico Arthur Eddington fue capaz de medir, durante la observación de un eclipse total de Sol, la desviación de la luz de una estrella al pasar cerca del Sol, corroborando una de las predicciones de la relatividad general. Este hecho aumentó en gran medida la fama de Einstein, al ser considerado un paso revolucionario dentro de la física.

Tras el experimento del eclipse hubo un llamamiento científico para darle a Einstein un premio Nobel de Física, recibiendo sesenta y dos nominaciones para su Teoría de la Relatividad, pero nadie en la academia sueca la entendió, incluso muchos la llegaron a juzgar de inútil e imposible de demostrar. Un miembro del jurado Allvar Gullstrand, Nobel de Física en 1911 por sus estudios en la óptica ocular, personaje sin mayores estudios dado que era autodidacta, fue uno de los jurados en contra llegando a decir, que las razones para el rechazo era que su trabajo sobre la Relatividad no era suficientemente útil para la raza humana. Por lo que la teoría la tacharon de dogma de fe, más que de una hipótesis científica. La academia pospuso su decisión casi un año, por lo que el 1921 se quedó sin asignar el premio.

Einstein en realidad ganó el Nobel de Física de 1921 pero lo recibió un año después en diciembre de 1922 y encima, no lo ganó por su Teoría de la Relatividad, si no por sus logros en otros campos y por un descubrimiento más simple, el del Efecto Fotoeléctrico, que

consiste en la emisión de electrones por un material al incidir sobre él una radiación electromagnética, como la luz visible o ultravioleta y a veces otros tipos de interacción entre luz y materia.



*Figura 2 Foto de la visita de Albert Einstein a la Universidad de Tohoku en 1922. De izquierda a derecha: Kotaro Honda, Albert Einstein, Keiichi Aichi, Sirouta Kusukabe. Dominio Público.*

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kotaro\\_Honda,\\_Albert\\_Einstein,Keiichi\\_Aichi,Sirouta\\_Kusukabe.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kotaro_Honda,_Albert_Einstein,Keiichi_Aichi,Sirouta_Kusukabe.jpg)

El Efecto Fotoeléctrico fue descubierto y descrito por Heinrich Hertz en 1887, al observar que el arco que salta entre dos electrodos conectados a alta tensión, alcanza mayores distancias cuando se iluminan con luz ultravioleta que, cuando permanece en la oscuridad, pero fue Einstein quien dio la explicación teórica a este

descubrimiento con su revolucionario artículo ya comentado "*Heurística de la generación y conversión de la luz*". En 1923 Robert Andrews Millikan también recibiría un premio Nobel al demostrar que Einstein tenía razón en sus conclusiones. Einstein no llegó a recibir el premio directamente, él solo lo aceptó, y fue el embajador alemán en Suecia quien lo recogió por él, porque en ese periodo de tiempo, Einstein estaba en Japón, dando conferencias y deslumbrando a los auditorios, a pesar del concepto que él tenía sobre chinos y japoneses, a los que criticó e insultó en más de una ocasión con sus opiniones, al considerarlos una raza demasiado peculiar por sus comportamientos bien diferentes y alejados de la sociedad de hombres europeos. Aunque en su diario de viajes reconocería que la cultura japonesa merecía un especial respeto y alabó la calma del alma japonesa, sus habitantes le parecieron cálidos y con sentido del humor, llegó a compararlos con los italianos, y a él le atraía mucho Italia de la que admiraba su arquitectura y el arte. Japón le produjo una sensación muy especial, que nunca había vivido en ninguna otra parte. Le fascinaron sus templos, viviendas, jardines y la belleza de los paisajes que encontraba unido todo, en armonía con la naturaleza. Aunque Einstein discrepaba entre sus pronunciamientos públicos y lo que luego escribía en sus diarios. Humanitario, tolerante y progresista, todo lo contrario, se expresaba en sus anotaciones llenas de prejuicios, y estereotipos. Si bien cambió de opinión respecto a los japoneses, no lo hizo respecto a los chinos con los que convivió escasos días y su opinión fue demasiado superficial, ya que

los siguió calificando de trabajadores, pero obtusos. Aunque de la cultura oriental opinó que las personas eran humildes, todos vivían en armonía y poseían un enraizado autocontrol, bien diferente a los occidentales que los tachó de creerse superiores, insensibles y materialistas.

Einstein trabajó como docente en Alemania, Suiza y Estados Unidos, bien como profesor o bien como catedrático. Era un maestro innato al que le gustaba que sus alumnos le hicieran muchas preguntas, pero era desordenado y desorganizado en cuanto a impartir sus clases o conferencias. Cuando explicaba sus experiencias y teorías, le gustaba dar muchos ejemplos, para así hacer más inteligible los conceptos que pudieran parecer confusos. Uno de los ejemplos famoso es: que un ser humano capaz de viajar a una velocidad próxima a la de la luz, podría a su regreso a nuestro planeta Tierra, ser más joven que su hijo. En la teoría de la relatividad, las velocidades no se suman o se restan simplemente, porque hay que tener en cuenta como se mide el tiempo en un sistema de referencia dado. El tiempo no transcurre igual para observadores distintos. En la suposición de que un tren pasa a nuestro lado a 20 kilómetros por hora y que un niño tira una pelota dentro del tren, también a 20 kilómetros por hora en la dirección del movimiento del tren, para el niño la pelota se mueve a 20 kilómetros por hora, pero para nosotros el movimiento del tren y el de la pelota se suman, de modo que la pelota se moverá a la velocidad de 40 kilómetros por hora. Incluso cambiaría si se cruzara con un observador que fuera en otro tren en dirección contraria, por tanto,

dependerá del observador particular la variación de la medida de un observador con relación a otro. Así Einstein podía explicar su teoría relatividad, pero aseguraba que esa teoría no funcionaba con la luz. En principio podría suponerse que la luz se propaga o bien a favor o bien en contra del movimiento terrestre, en el primer caso parecería viajar más rápido, sin embargo, la velocidad de la luz nunca varia sea cual sea la naturaleza del movimiento de la fuente que la emite. Para ello, midió cuidadosamente su demostración, la luz medida en el vacío siempre resulta el mismo valor 299. 793 kilómetros por segundo, en cualquier circunstancia.

Los famosos Congresos Solvay, promocionados por una empresa química belga cuyo mecenas era Ernest Solvay químico industrial, fueron desde 1911 reuniones cada tres años, de los más grandes y afamados científicos de la época, que permitirían importantes avances en la química y la física. En el quinto congreso entre el 24 y el 29 de octubre de 1927 se juntaron en Bruselas 29 congresistas, a cuál más titán dentro de la ciencia, de los cuales hasta 17 congresistas tenían ya o llegarían a tener el premio Nobel. Entre ellos y con un duelo que quedó marcado para la historia, estaba Albert Einstein y el danés Niels Bohr, que tras un debate que no solo se sucedió en la sala de conferencias del Instituto de Fisiología que los albergaba, sino que trascendió al propio Hotel Metropole donde se alojaban, llegaron a decirse: "*Dios no juega a los dados*" a lo que Bohr apostilló: "*Einstein deja de decirle a Dios lo que debe hacer*". Ambos regresaron sin haberse convencido el uno al otro, y la polémica continuaría, porque Einstein y Bohr mantuvieron su

debate de por vida.



*Figura 3. Albert Einstein en la Facultad de Ciencias de la Universidad Central (Madrid). De izquierda a derecha, de pie: Luis Lozano Rey, José M<sup>a</sup>. Plans Freire, José Madrid Moreno, Eduardo Lozano Ponce de León, Ignacio González Martí, Julio Palacios Martínez, Ángel del Campo Cerdán y Honorato de Castro Bonel. Sentados: Miguel Vegas y Puebla Collado, José Rodríguez Carracido (Rector de la Universidad Central), Albert Einstein, Luis Octavio de Toledo Zulueta (Decano de la Facultad de Ciencias) y Blas Cabrera y Felipe (Presidente de la Sociedad Española de Física y Química). Dominio Público.*

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert\\_Einstein\\_en\\_Facultad\\_de\\_Ciencias\\_de\\_la\\_Universidad\\_Central.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert_Einstein_en_Facultad_de_Ciencias_de_la_Universidad_Central.jpg)



Albert tuvo muchos y buenos amigos a lo largo de su existencia, por citar algunos, estaban sus colegas de los encuentros Solvay, que coincidieron en varios y con los que mantuvo buena amistad, Planck, Curie, Poincaré, Schrödinger, Pauli... y entre ellos cabe destacar que conoció y apadrinó a un científico español, el físico canario Blas Cabrera y Felipe, el cual ayudó a validar las teorías cuánticas del magnetismo.

Michele Besso fue una amistad de juventud que duró toda la vida, coincidieron en 1896 en el Instituto donde ambos estudiaban, y mantuvieron siempre correspondencia cuando no podían estar juntos, tal fue la coincidencia entre Einstein y Besso, que incluso fallecieron en el mismo año. En esa misma época, tras terminar sus estudios, con el filósofo rumano Maurice Solovine y el matemático Conrad Habicht componentes de la Academia Olimpia, guardaría amistad por siempre. Hubo dos amigos con los que trabajó estrechamente, Marcel Grossmann matemático y geómetra y Otto Stern, este último llegó a obtener el Premio Nobel en 1943, ambos colaboraron con Einstein en el desarrollo de la Teoría de la Relatividad, llamando al tiempo matemático "cuarta dimensión". Otros amigos en su larga lista, fueron el astrónomo del Observatorio de Greenwich Frank Wastson Dyson, el cual comprobó la teoría de la relatividad general acerca del efecto de la gravedad sobre la luz, gracias a sus resultados durante el Eclipse solar de 1919 desde Brasil, y su compañero en expediciones, el también astrónomo inglés, Arthur Stanley Eddington, ya mencionado, y que ayudó a entender la teoría de la relatividad en el mismo eclipse, pero

observado desde África. Einstein, hasta que no hubo finalizado la Primera Guerra Mundial, no se conocería con ambos personalmente, porque por aquel entonces Inglaterra consideraba a lo proveniente de Alemania, una ciencia enemiga. Otto Juliusburger era psiquiatra, y también alemán de origen judío como él, puede considerarse uno de sus amigos más íntimos, Otto también consiguió escapar en el último momento a Estados Unidos con su familia, ambos vivieron de cerca la persecución nazi. Einstein en sus muchos viajes por el mundo dando conferencias y con sus magistrales clases como profesor, también conoció personas y personajes ilustres, con los que guardaría siempre una buena relación de amistad, aún en la distancia. Einstein vivió dos guerras mundiales. En 1913, justo antes de la primera, fue elegido miembro de la Academia Prusiana de Ciencias por lo que estableció su residencia en Berlín, allí pasó dieciséis años de su vida, y el emperador Guillermo le invitó a dirigir la sección de Física del Instituto de Física Káiser Wilhelm. Pero en esos años el odio a los judíos alcanzó niveles muy elevados, incluso varios físicos notables como los premios Nobel Johannes Stark y Philipp Lenard intentaron descalificar sus teorías, por ser ellos antisemitas, y todo aquel que enseñaba la teoría de la relatividad de Einstein como lo hiciera Werner Heisenberg, fueron vetados en la docencia. En 1932 antes de que estallara la Segunda Guerra Mundial, se marchó a Estados Unidos, no soportaba el resentimiento y la persecución de esa camarilla nazi contra los judíos, la prueba de que se tocaba fondo no solo fue el holocausto, sino todo lo que le rodeaba como el

atentado cultural, quemando miles de libros como espectáculo de su poder. En 1939, antes de la segunda, Einstein en América decidió ejercer su influencia participando en cuestiones políticas que pudieran afectar al mundo. Fue entonces cuando redactó la célebre carta al presidente de Estados Unidos Franklin D. Roosevelt, para promover el proyecto atómico y evitar que los nazis enemigos de la humanidad lo hicieran antes, pero el uso nefasto que hicieron los americanos de la bomba de neutrones, afectó mucho a Einstein, que en parte se sintió culpable y se arrepintió mucho de su decisión.

Otra faceta de Einstein fue la de inventor, aunque no se dedicó a ello de forma continua, el haber trabajado unos años en la oficina de patentes tuvo sus frutos, y cuando conoció a un joven llamado Leo Szilárd graduado en la Universidad de Berlín y especializado en termodinámica, la ciencia que describe el calor, ambos se afanaron por patentar un electrodoméstico, la nevera. En esa época no eran muy comunes y si bien una nevera enfría gracias a usar un fluido refrigerante para absorber el calor de adentro y soltarlo para afuera, en realidad es un fluido que se contrae y se expande, al circular por un circuito de tuberías. En las primeras neveras se usaban gases tóxicos como el dióxido de sulfuro o el amoníaco y los aparatos, estaban compuestos de muchas partes movibles por donde estos gases se escapaban. Einstein y Szilárd pensaron en inventar un refrigerador, sin tantas partes movibles que lo hiciera más seguro, para ello idearon una bomba de compresión que sustituía a la parte del ciclo que condensaba y evaporaba el refrigerante. La bomba

funcionaba usando un campo electromagnético que movía un metal líquido, el mercurio, el cual funcionaba a modo de pistón para comprimir el gas, aunque esto provocaba mucho ruido y era altamente contaminante aún y así, en 1927 la firma Electrolux les compró la patente por mucho dinero y poco a poco fueron solucionando problemas y mejorando el artilugio que, por ese entonces, no necesitaba electricidad para funcionar. Los laboratorios AEG también utilizaron la patente de Einstein—Szilárd, pero cuando llegó la Gran Depresión de 1929, tanto el gobierno como el comercio, sufrieron un gran caos y desestabilidad, que impulsó a la elección del Nacional Sindicalismo de Adolf Hitler, y dio al traste con compañías tan importantes como la AEG, la cual se vio obligada a cerrar sus investigaciones. Einstein y Szilárd una vez exiliados de Alemania, no volvieron a retomar la mejora de su invento.

Durante su vida Einstein publicó artículos en revistas, capítulos en libros y libros completos. La mayor parte de su trabajo científico fueron artículos escritos y publicados en revistas, un total de 272 artículos de los cuales muchos de ellos, estuvieron escritos como coautor y escribió libros con repetidas ediciones y traducidos en varios idiomas entre ellos, en 1916 "Mi teoría de la Relatividad Especial y General", en 1934 "Mi visión del Mundo" y "Ensayo y Ciencia", en 1950 "Mis últimos años" y en 1954 "Mis ideas y opiniones". Llevaba con él siempre un diario donde anotaba sus ideas, ocurrencias, pensamientos y escribió sus muchas impresiones en diarios de viajes. Pero además de escribir, Einstein

sacaba tiempo para leer y una de sus obras preferidas fue Don Quijote de la Mancha de Miguel de Cervantes, una obra universal de la literatura de caballería, de la que Einstein decía que le servía para relajarse. Otro libro preferido y debido seguramente a su visión filosófica de la vida, fue la "Ética" de Baruch Spinoza escrito en latín, libro que intenta demostrar un sistema filosófico plenamente coherente, y que se esfuerza por ofrecer una imagen objetiva de la realidad, y por comprender el significado de una vida ética. Otro libro filosófico que tuvo gran influencia en Einstein fue el "Tratado de la naturaleza humana" de David Hume donde se trata la teoría del conocimiento, la psicología de los sentimientos y la moral. La novela de Fyodor Dostoievski, "Los hermanos Karamazov" relacionada con la fe, la duda, el juicio y la razón, con una trama que giraba sobre el parricidio, estaba dentro de sus lecturas preferidas, porque era un drama espiritual de luchas morales. Y finalmente nombrar a Goethe, donde la mayor parte de la biblioteca de Einstein tenía libros suyos, incluso tenía un busto del autor y decía de él, que era uno de los hombres más inteligentes y sabios de todos los tiempos.

Respecto a sus ideas religiosas, no fue hasta 1954 que escribiría abiertamente de ellas en el libro "Albert Einstein: Su lado humano" editado por Helen Dukas y Banesh Hoffman. Manipuladas hasta entonces sus creencias, quiso desmentir: "por supuesto era una mentira lo que se ha leído acerca de mis convicciones religiosas; una mentira que es repetida sistemáticamente. No creo en un Dios personal y no lo he negado nunca, sino que lo he expresado

claramente. Si hay algo en mí que pueda ser llamado religioso es la ilimitada admiración por la estructura del mundo, hasta donde nuestra ciencia puede revelarla... No creo en la inmortalidad del individuo, y considero que la ética es de interés exclusivamente humano, sin ninguna autoridad sobrehumana sobre él".

Einstein pasó sus últimas décadas intentando unificar las fuerzas de la naturaleza en una sola teoría, vinculando todas las fuerzas en una sola ecuación maestra, en una sola fórmula todos los conceptos de relatividad y mecánica cuántica, pero fue su sueño incumplido. El hombre que fue capaz con su fórmula de curvar el espacio—tiempo, dejó esta tarea inconclusa y lo es aún a día de hoy. Él llegaría a expresar que después de 50 años de dedicación, no comprendía la naturaleza cuántica de la luz.

Einstein no era partidario de la física cuántica que le generaba dudas de difícil respuesta, dado que afectaban a partículas demasiado pequeñas, en ello Einstein y Bohr mantuvieron sus largos debates. Einstein aseguraba que, si se conocen todas las variables de un sistema, y sin que haya influencias externas, se puede conocer el comportamiento de cualquier partícula, extrapolándolo desde un átomo a todo un planeta. Explicaba este comportamiento en su teoría de realismo local, que implicaba que, si algo cambia en una partícula, es porque algo en su entorno lo ha hecho. Daba el ejemplo de que si una mesa se mueve es porque alguien se ha acercado y la ha tocado. La física cuántica postulaba que esto no ocurría en partículas muy pequeñas, Einstein no estaba de acuerdo, pero Niels Bohr lo defendía porque decía que las

partículas son impredecibles, aun cuando se conozcan todas las variables. Posteriormente en 1964 el científico John Bell resolvería la cuestión diseñando un algoritmo para poder demostrar la física cuántica y el fenómeno del entrelazamiento. Para ello sugirió separar dos partículas a miles de kilómetros y comprobar que sus estados eran capaces de influirse pese a la distancia y de forma simultánea. El experimento salió bien, aceptando que las partículas pequeñas pueden ser modificadas, aunque se encuentren separadas por el fenómeno de entrelazado de la física cuántica, sin necesidad de que haya algo en su entorno que las haga mutar.

El 18 de abril de 1955 Einstein fallecía a los 76 años de edad en el hospital de Princeton Medical Center, en el municipio de Plainsboro en Nueva Jersey, de un aneurisma aórtico abdominal del cual años antes en 1948 fue operado, pero esta vez se negó a una segunda operación y expresó "quiero irme cuando quiera. Es de mal gusto prolongar artificialmente la vida. He hecho mi parte, es hora de irse. Yo lo haré con elegancia". Por expresa decisión del físico, este no fue enterrado, él quiso tener un funeral modesto y eligió ser incinerado y que sus cenizas se esparcieran por un río cercano, el Delaware, para evitar que hubiera una tumba que pudiera convertirse en un lugar de peregrinación y veneración. Pero sin su consentimiento, su cerebro no se incineró y se conservó para el estudio de la ciencia, este hecho fue controvertido y se hizo público en 1978. La decisión la tomó el patólogo Thomas Harvey tras efectuarle la autopsia, él fue el artífice de tal suceso llegando a deducirse tras un estudio minucioso, que el hemisferio izquierdo del cerebro de Einstein, el

cual está relacionado con las matemáticas, era más grande de lo normal, y había una proporción anormal de neuronas y glía, y la cisura de Silvio que es un surco que se localiza en los laterales del cerebro, en el de Einstein, estaba truncada. Al parecer la anatomía era muy extraordinaria ya que la mayoría de las personas tienen tres giros frontales, y el cerebro de Einstein tenía cuatro situados en el lóbulo frontal medio, incluso los lóbulos eran distintos a la normalidad y cabe decir, que se llegó a cuestionar que Einstein naciera así, con esas características cerebrales anómalas, y que estas se llegaron a producir en su cerebro, tras una vida dedicada a ejercitar su mente con pensamientos muy complejos. James Gallagher editor de "Salud" de la BBC comentó:

*"Para llegar a estas deducciones de separar causa y efecto, sería necesario investigar y comparar con muchos otros cerebros de personajes excepcionales".*

La vida familiar de Einstein paralela a sus descubrimientos, comenzó en plena juventud. Mileva Marić Ruzic fue la primera esposa de Einstein, una matemática serbia de familia acomodada y de carácter poco sociable, con una cojera ostensible debido a una artritis congénita. Ambos se conocieron al estudiar en el mismo Instituto y en 1901 mientras ella preparaba el examen de licenciatura y las investigaciones de su tesis doctoral, se quedó embarazada de Albert y esto le supuso la expulsión justo antes de leer su tesis doctoral, porque en esa época el estudio y la maternidad, además ilegítima por soltería, no se contemplaba.



Mileva dio a luz en enero de 1902 una hija a la que llamaron "Lieserl" de la que no hay constancia de su paradero, dado que desapareció poco después de su nacimiento, bien porque falleciera de la enfermedad de la escarlatina, bien porque fuera dada en adopción. Un secreto bien guardado sin desvelar. Más tarde, en 1903 ambos se casarían con la oposición de los padres de Einstein, yéndose a vivir a Berna, desde ese momento realizarían conjuntamente las investigaciones hasta el punto de que Mileva escribiría: "Hace poco hemos terminado un trabajo muy importante que hará mundialmente famoso a mi marido" y tiempo después escribiría a su amiga Helene Savic:

*"Ahora él es el mejor de los físicos y le rinden muchos honores. Con toda esta fama, tiene poco tiempo para su esposa".*

Mileva no solo ayudó en las investigaciones a Einstein, cosa que él mismo admitiría, que sin su ayuda no hubiera llegado a conseguir completar la teoría de la relatividad, sino que también lo hizo con su profesor Philipp Eduard Anton von Lenard, pionero en el estudio del efecto fotoeléctrico. En 1897 Mileva estudió un semestre en Heidelberg (Alemania), y con su profesor trabajaron en el estudio sobre la teoría de números, el cálculo diferencial e integral, las funciones elípticas, la teoría del calor y la electrodinámica, a Lenard en 1905 le fue concedido el Nobel de Física por sus investigaciones sobre los rayos catódicos y el descubrimiento de sus muchas propiedades.



*Figura 4. Mileva Maric y Albert Einstein. Dominio Público.*

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert\\_Einstein\\_and\\_his\\_wife\\_Mileva\\_Maric.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert_Einstein_and_his_wife_Mileva_Maric.jpg)

Albert y Mileva tuvieron dos hijos varones, el mayor nació el 1904 y le llamaron Hans Albert y el pequeño nació en 1909 y le llamaron Eduard. El hijo mayor estudió Ingeniería Civil en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, se graduó en 1926 y en 1936, obtuvo el título de doctor en Ciencias Técnicas. Hans emigró a instancias de su padre a Estados Unidos en 1938 durante la Segunda Guerra Mundial, pero allí vivieron muy alejados uno de otro, dado que Hans Albert se encontraba en la costa oeste y Einstein en la costa este. En su relación a pesar de que en varias ocasiones tuvieron desafortunados encuentros, Einstein estuvo muy orgulloso del

devenir de su primogénito y entre sus palabras aseguraba: "Mi Albert se ha convertido en un hombre capaz e íntegro". Hans Albert desarrolló conocimientos teóricos y métodos prácticos, que ayudaron a sentar las bases para comprender como el agua que fluye en los ríos, transporta los sedimentos, desentrañando con ello su complejidad. Fue muy útil en la construcción de la "poderosa estructura", que mantiene bajo control el imponente río Mississippi. Hans falleció de un infarto a los 69 años en 1973 y en 1988, la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE) creó el premio "Hans Albert Einstein Award" para reconocer las contribuciones en ese campo.

Hans Albert trabajó a su llegada a Estados Unidos, en la Estación Experimental Agrícola de Carolina del Sur, y posteriormente en el Departamento de Agricultura. Después se dedicaría por entero a la enseñanza de la ingeniería hidráulica en la Universidad de California, Berkeley. Se dijo de él que:

*"Poseía la rara combinación de un científico investigador altamente competente, un magnífico ingeniero en ejercicio y un excelente maestro".*

Se dedicó a asesorar a países en todo el mundo, sobre cómo solucionar problemas críticos de sedimentación. Einstein siendo ya muy mayor, aseguraría que su hijo: "había heredado la característica principal de su propio carácter, la capacidad de elevarse por encima de la mera existencia, dedicándose persistentemente a lo mejor de su capacidad para lograr una meta

impersonal". Como si ambos coincidieran en una misma frontera científica.

Hans contrajo matrimonio en dos ocasiones, el segundo con la bioquímica y neurocientífica Elizabeth Roboz en 1959 tras el fallecimiento de su primera esposa la filóloga Frieda Knecht con quien se casó en 1927, a pesar de tener el desacuerdo de Einstein y de Mileva porque ella era nueve años mayor que él, aunque finalmente fue aceptada, y de esta unión tuvieron tres hijos Bernhard Caesar, Evelyn que era adoptada y no tuvo descendencia, y Klaus Martín que falleció de difteria con apenas cumplidos los 6 años. Bernhard por tanto, fue el único hijo natural de Hans Albert, y tuvo cinco hijos es decir, que Einstein con su único nieto, tuvo cinco bisnietos, Thomas Martín, Paul Michael, Teddy, Myra y Charles Quincy, todos vivos a día de hoy y descendientes directos del eminente físico. Bernhard, el nieto de Einstein fue físico como él y se especializó en tecnología de tubos de electrones, específicamente en tubos de amplificación de luz para la visión nocturna. Y sus hijos, los bisnietos de Einstein son Thomas médico anesthesiólogo en California, Paul compositor y violinista en el sur de Francia, Teddy dueño de varios almacenes en los Ángeles, Myra es música y vive en Israel y Charles que vive en Suiza y trabaja en un gran hospital. Todos ellos y a pesar de su consanguinidad con Einstein, por ahora ninguno ha heredado su genialidad. Tal vez sus tataranietos o hasta llegar a una séptima generación, según las leyes de Mendel, nos deparen sus descendientes, alguna genial sorpresa.

Eduard el hijo menor de Einstein a quien llamaban con el apelativo de "Tete", estudió Medicina, soñaba con ser psiquiatra y estaba muy interesado en las teorías de Sigmund Freud, pero a los apenas cumplidos 20 años se le diagnosticó una grave enfermedad mental, esquizofrenia con brotes psicóticos y ataques violentos. Einstein quedó profundamente afectado llegando a escribir: "la enfermedad ha atacado al más refinado de mis hijos, al que realmente consideraba de mi propia naturaleza, a él precisamente le ha sobrevenido una enfermedad incurable", pero Einstein dejó Alemania y viajó a América para asentarse para siempre, y a pesar de mantener correspondencia intensa con su hijo, ya nunca volvieron a verse, porque a Eduard no se le permitió emigrar a Estados Unidos por ser un paciente con trastorno mental. Las cartas que se intercambiaron fueron profundas y extensas, una correspondencia entre padre e hijo con un muy alto nivel intelectual, hasta el punto de escribirse profundas reflexiones y duras críticas mutuas por posiciones encontradas. Einstein disfrutaba mucho de las cartas que su hijo le enviaba, no solo por las dotes que tenía este para la escritura, sino por la profundidad de las mismas. Famosa es la frase de Einstein que escribió a su hijo: "la vida es como andar en bicicleta. Para mantener el equilibrio, debes seguir moviéndote". Pero a pesar de que Einstein no descuidó jamás a su hijo, la lejanía y la enfermedad que este padecía bajo tratamientos aplicando electrochoques, motivo su agravamiento hasta tal punto, que hicieron que Eduard acabara incluso odiando a su padre.

La convivencia con Mileva comenzó a fracasar y Einstein le impuso una dura lista de condiciones para seguir viviendo juntos bajo un mismo techo. A los 39 años Albert el 14 de febrero de 1919, se divorció de Mileva después de dieciséis años de matrimonio y tres hijos en común, Einstein no tuvo más hijos que los de Mileva y apenas unos meses después de su divorcio, el 2 de junio de ese mismo año se casó con su prima Elsa Einstein apellidada Löwenthal, que era el apellido de su primer marido con quien tuvo dos hijas. Con Elsa, aún casado con Mileva, Einstein mantuvo un apasionado romance. Ambos se fueron a Estados Unidos con las hijas de Elsa, formando así una nueva familia. Este segundo matrimonio duró hasta que Elsa falleció en Princeton el 20 de diciembre de 1936. En el divorcio con Mileva, lo que peor llevó Einstein fue separarse de sus hijos, ya que él se quedó en Berlín y Mileva regresó a Suiza. Einstein admitiría haber sido mucho mejor padre que esposo y su hijo mayor Hans reveló que: "Cuando mi madre estaba ocupada en la casa, mi padre dejaba de lado su trabajo y nos cuidaba durante horas, nos balanceaba en sus rodillas, nos contaba historias, y a menudo tocaba el violín en un esfuerzo de mantenernos quietos". Pero también reconoció que ser hijo del hombre que cambió la percepción del Universo tuvo sus complejidades, Hans decía: "A veces es difícil tener un padre tan importante, porque uno se siente muy insignificante" y cuando le preguntaban que se sentía por ser hijo de un científico tan famoso, respondió: "Habría sido desesperante, si no hubiera aprendido a reírme de la molestia desde mi infancia, pero es un orgullo tener a

un ser tan extraordinario".

Quien realmente lo pasó peor en la separación de Einstein y Mileva, fue Eduard el hijo pequeño, por su frágil salud desde que nació tanto así, que Einstein llegó a decir de su hijo: "El estado de mi pequeño me deprime sobremanera". Mientras Einstein estuvo en Europa, nunca se olvidó de sus hijos, los visitaba asiduamente, los llevaba de vacaciones y de mayores los llevó con él a Berlín y Hans, le siguió a Estados Unidos, y como a Eduard no le dejaron emigrar, fue entonces Mileva quien le cuidó y eso le llevó a ella, a sufrir graves crisis nerviosas y varias embolias hasta provocarle la muerte en 1948. Eduard al faltar su madre, fue internado en un Centro Psiquiátrico de Zúrich y Einstein contrató a un cuidador especializado para que estuviera pendiente de él, hasta que Eduard tras un accidente cerebrovascular falleció en 1965 a los cincuenta y cinco años, diez años después de que falleciera su padre.

Cuando a Einstein le concedieron el premio Nobel en 1921 entregó la dotación económica a Mileva, dado que constaba una cláusula en el divorcio donde se comprometía a ceder el dinero en caso de serle concedido el premio Nobel, pero no quedó nunca aclarado si esto fue, por los muchos aportes que Mileva le ayudó en sus investigaciones o por utilizar ese dinero para sufragar los gastos del cuidado del hijo enfermo.

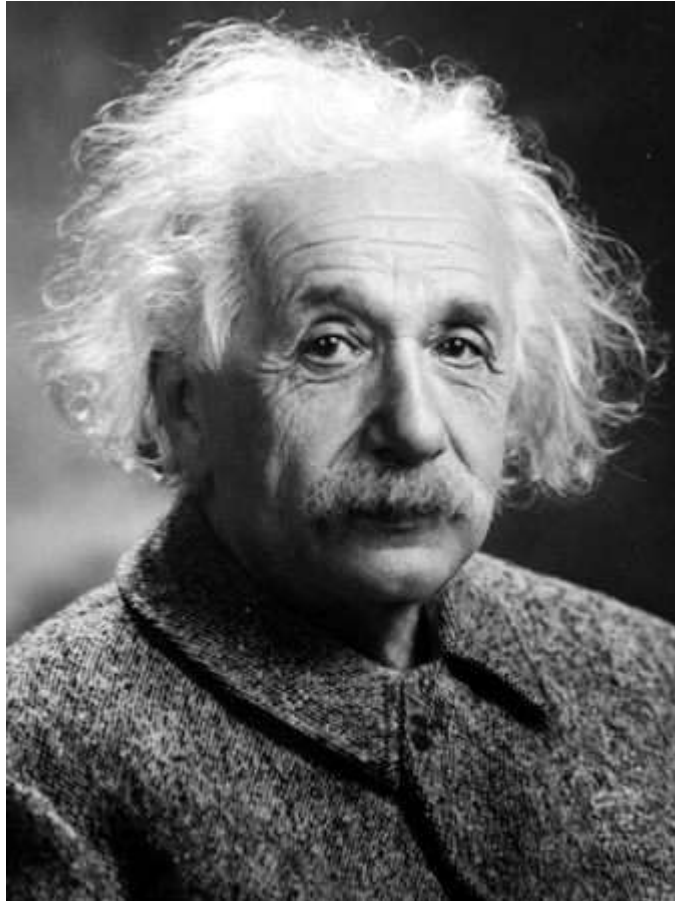
Durante los matrimonios Einstein fue probadamente infiel, eran conocidos sus escauceos mujeriegos a pesar de que su incondicional secretaria, Helen Dukas intentaba hacerlos pasar inadvertidos. Llegó a escribirse de ellos que, en sus relaciones amorosas, prefería

tener contacto con mujeres poco refinadas. Tuvo también varias amantes, hasta seis conocidas entre sus aventuras, como la joven austriaca Margaret Lebach, la rica viuda judía berlinesa Toni Mendel y Margarite Konenkova una espía soviética. Incluso se vio atraído por su hijastra Lise, hija de Elsa su segunda esposa. Desde muy joven demostró una especial afición a tener compañía femenina, su éxito entre ellas le acompañaba, pero fue a partir de los cuarenta años y tras su fama mundial al convertirse en una estrella mediática, que se dejó llevar y querer por las muchas mujeres que buscaron su compañía. El concepto que él tenía del amor, era una falta de compromiso total, no quiso nunca que los lazos afectivos se interpusieran entre él y la experimentación de la física. Llegaría a decir: "el matrimonio es un intento fracasado de hacer algo duradero de un incidente" o "el matrimonio es la esclavitud con vestimenta cultural" o incluso "seguramente el matrimonio fue inventado por un cerdo antipático"... entonces ¿por qué se casó por segunda vez?, la respuesta es que Einstein necesitaba sentirse cuidado y arropado dentro de una familia, que le proporcionara tranquilidad y paz para desarrollar su trabajo, y con Elsa lo consiguió, ya que ella le cuidó sin condiciones y además aceptó su situación, permitiéndole sus muchos devaneos. Elsa falleció cuando Einstein tenía 57 años, lo que significó quedarse solo casi durante 19 años.

Muchas mujeres llenarían su vida, pero el amor le acompañó en su última andadura de la mano de una bibliotecaria Johanna Fontova, una bella mujer de Praga, 22 años menor que él. Disfrutaron juntos



de la compañía mutua y ella fue la conexión con el viejo mundo. Vivian en casas separadas, pero le acompañaba en su tiempo libre, navegaron por el lago Carnegie de Princeton, leyeron juntos a esos autores que a ambos agradaban, Einstein le escribía poemas y le dibujaba pequeñas caricaturas, y de esa relación que a ojos de todos era de pura amistad, Einstein quiso garantizar económicamente el futuro de Johanna cuando él faltara, así que le dejó su "teoría general y uniforme del campo", para que vendiera esos documentos, cosa que Johanna hizo años después. Ella escribió un su diario donde recogió todas esas vivencias con Einstein, que le llenaron de alegría y ganas de vivir, pero cuando él faltó, Johanna insegura e inestable, amargó su carácter hasta su fallecimiento en 1981.



*Figura 5 Albert Einstein. Dominio Público.*

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert\\_Einstein\\_Head.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert_Einstein_Head.jpg)

De Einstein nos queda un legado que aún está y estará vigente por siglos, un legado de discusión y una "cuarta dimensión" por resolver. Una figura inimitable tildado de sabio loco, a quién le llegaban cientos de cartas diarias que él respondía, porque se veía obligado por creerse un imán para todos los locos del mundo. Hombre sencillo, despierto y muy agudo en los hechos políticos, que le alejaban de ese concepto de locura. Espíritu libre y rebelde, hombre de humor hasta sus últimos días, amante de la música durante toda su vida, y cuando en su decrepitud ya no pudo tocar

el violín, se pasó al piano donde siguió improvisando notas musicales. Queredor de los suyos, le tocó vivir en una época de prejuicios donde el tan mal llevado hoy en día, machismo y racismo eran entonces valores adheridos a la creencia común de la época, y a pesar de que Einstein era un hombre progresista y tolerante, no fue capaz de ver más allá en su comportamiento social. Quedémonos pues, con que el tiempo no es absoluto, sino que depende del movimiento relativo. El espacio—tiempo es la identidad geométrica de cuatro dimensiones de las que tres son espaciales y una temporal, de acuerdo con la teoría de la relatividad, donde se desarrollan todos los sucesos de nuestro Universo. Un Universo que le perteneció en su entendimiento y lo ofreció al mundo. Un hombre al que le molestaba enormemente el culto a su persona, por eso quiso estar presente, pero tan solo, en nuestros recuerdos. Así es y así cabe recordar, al genio de los genios.

#### Bibliografía:

- (1) Isaacson, W. *Einstein: El hombre, el genio y la teoría de la relatividad*. (Anaya Ediciones).
- (2) Isaacson, W. *Einstein: Su vida y su Universo*. (Debate).
- (3) Bodanis, D. *E=mc<sup>2</sup>: La biografía de la ecuación más famosa del mundo*. (Amat).
- (4) Alcalde, J. y Pang, M. *Einstein: El genio de la luz*. (Vagueta).
- (5) Manso, J. *Albert Einstein (Mini Biografías): El gran pensador*. (Susaeta).
- (6) Retazos de artículos publicados en internet.

[M.Ángela del Castillo Alarcos.](#)

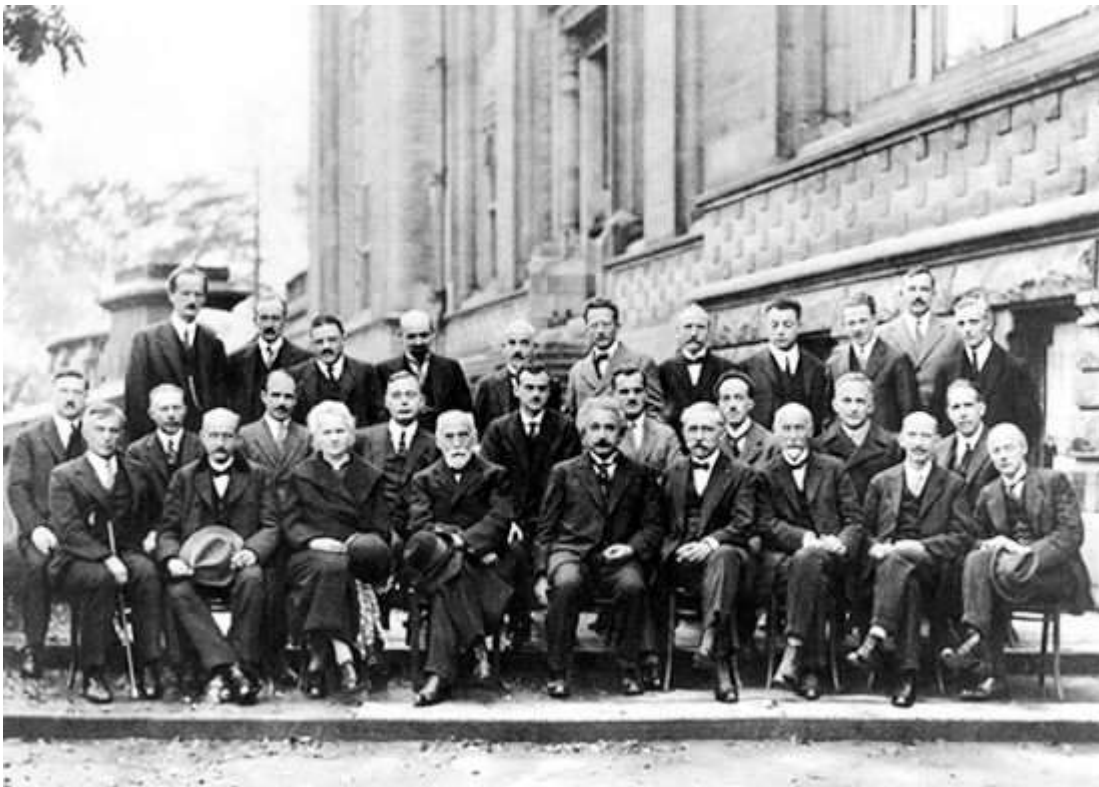
Doctora en Geografía.

Directora de la Escuela de Ciencias Cosmofísica.

### Capítulo 3

#### Niels Bohr y el nacimiento de la Mecánica Cuántica.

La 5ª conferencia Solvay sobre "*Electrones y Fotones*", que tuvo lugar en Bruselas en octubre de 1927, es probablemente la conferencia de Física más famosa de la historia.



*Figura 1. Fotografía tomada en el 5º Congreso Solvay sobre teoría cuántica celebrado en 1927. De la fila de atrás hacia el frente, de izquierda a derecha: Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrödinger, Jules—Émile Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph Howard Fowler, Léon Brillouin, Peter Debye, Martin Knudsen, William*

*Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr, Irving Langmuir, Max Planck, Marie Skłodowska Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles—Eugène Guye, Charles Thomson Rees Wilson, Owen Willans Richardson.*

En ella participaron 29 científicos, de los que 17 ganarían el Premio Nobel en algún momento de su vida. Algunos lo habían recibido ya, como Marie Curie (2), Albert Einstein, Erwin Schrödinger, ... y Niels Bohr, que había obtenido su Premio Nobel en 1922 por "los trabajos sobre los átomos y su radiación" de los que hablaremos más tarde. El nombre de dicha conferencia se debe al mecenazgo del industrial y químico belga Ernest Solvay, que dedicó parte de su fortuna a difundir el desarrollo de la física y de la química. Estas conferencias no han perdido el prestigio con el que arrancaron, y se siguen celebrando cada tres años.

Cuando se celebró la 5ª edición, habían pasado 27 años desde la presentación del *cuanto* de energía por parte de Max Planck, años de ebullición en los que se fraguaron los fundamentos de la Mecánica Cuántica. En la primera conferencia Solvay, celebrada en 1911 en Bruselas, se había debatido el descubrimiento de los cuantos, base de toda la teoría que se elaboraría a lo largo de esos años.

A finales del siglo XIX y principios del XX se tenía la creencia colectiva de que en Física todo era conocido y entendido. La Mecánica Clásica (MC) de Newton estaba más que probada y aceptada, las leyes de Maxwell del Electromagnetismo cerraban la

comprensión de los campos eléctrico y magnético, ... ¿O no?

Ciertos experimentos que se estaban llevando a cabo refutaban dicha creencia, puesto que no podían comprenderse los resultados obtenidos en el laboratorio con las teorías con que se contaba en aquel momento.

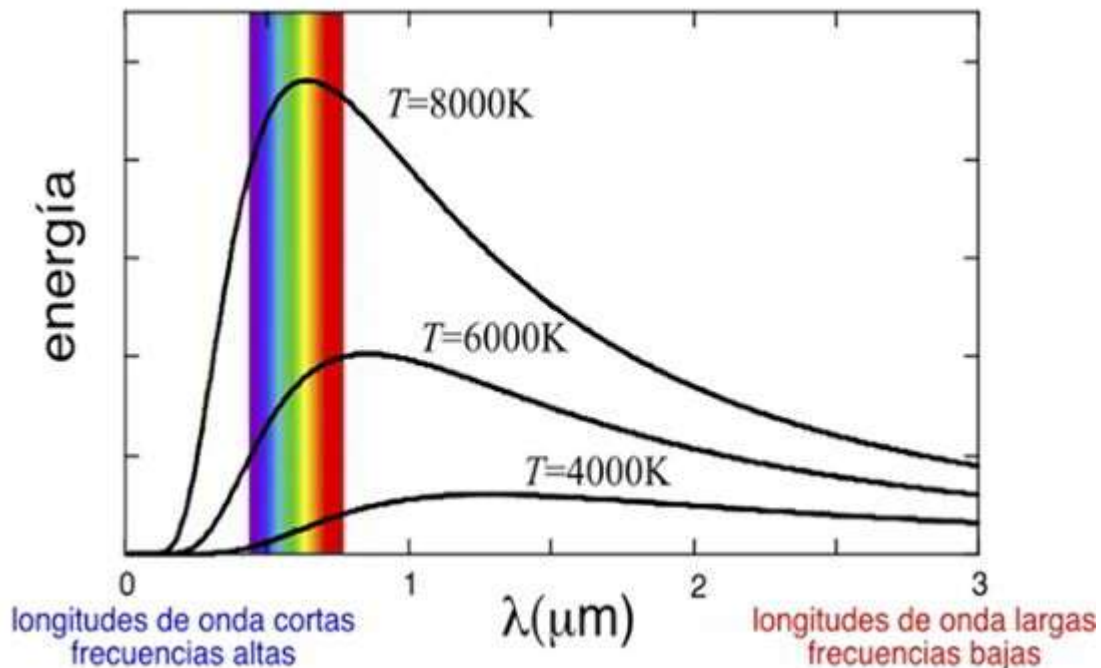


Figura 2 Energía emitida por un cuerpo negro en función de la longitud de onda  $\lambda$ , para diferentes temperaturas.

Quizá de entre estos experimentos, el más relevante sea el que analiza el espectro de energía de la radiación térmica de un cuerpo negro, un espectro no explicable con el electromagnetismo conocido. La radiación de cuerpo negro es la radiación emitida por un cuerpo que está en equilibrio termodinámico con su entorno. El cuerpo negro absorbe toda la radiación que incide sobre él. Esta energía

produce oscilaciones en las partículas cargadas que causan emisión de radiación electromagnética.

Podemos pensar, como propuso Kirchhoff, en una caja con un pequeño agujero para simular un cuerpo negro, como perfecto absorbente. La radiación que entre por el pequeño orificio, rebotará, será absorbida y reemitida por las paredes, pero difícilmente saldrá de la caja. Si pensamos en la caja como un horno a una cierta temperatura, la radiación emitida a través del agujero puede ser considerada como un emisor perfecto, del que obtendríamos el espectro mostrado en la Figura 2.

Aunque no se trate exactamente de un cuerpo negro, sabemos que el color de la luz emitida, por ejemplo, por una barra de hierro a medida que la calentamos, cambia con su temperatura, empezando con el color habitual a temperatura ambiente, siguiendo con color rojo, azul, hasta blanco (todos los colores). Es decir, sabemos por experiencia que la frecuencia emitida depende de la temperatura.

Lo que la Física Clásica no podía explicar era la forma de la función obtenida, con máximos en diferentes frecuencias (longitudes de onda) de luz según la temperatura del cuerpo, decayendo de forma asimétrica para frecuencias superiores e inferiores. Además, y esto es muy importante, los perfiles dependían solo de la temperatura, no del material emisor. Según la Mecánica Clásica, todas las frecuencias de vibración deberían tener la misma energía (principio de equipartición de la energía), de forma que, al no tener la frecuencia un límite superior, no habría límite en la energía emitida por las cargas oscilantes, y la energía emitida a frecuencias altas se



prolongaría hasta el infinito. Sin embargo, el espectro de radiación mostraba una figura del tipo que aparece en la Figura 2, con la energía emitida tendiendo a cero para frecuencias altas y bajas.

La propuesta que resolvía el problema fue presentada por Planck en lo que él mismo describió como un "acto de desesperación". Para poder explicar la radiación de un cuerpo negro debía asumir la cuantización de la energía, algo a lo que actualmente estamos acostumbrados pero que rompía completamente con la concepción del mundo en aquel momento.

### Planck y la cuantización de la Energía. Inicio de la Mecánica Cuántica.

El 14 de diciembre de 1900 Max Planck presentó la ley de distribución de la radiación del cuerpo negro en la German Physical Society en Berlín, lo que supuso la presentación en sociedad del concepto de cuanto de energía. Este momento ha pasado a ser considerado el del inicio de la Mecánica Cuántica. Con más de cien años de distancia en el tiempo, podría parecer un momento estelar, glorioso, pero lo cierto es que no fue así. La propuesta de Planck recibió muy poca atención, principalmente porque la radiación de cuerpo negro no era un tema central de interés en ese momento, y durante cinco años permaneció más bien a la sombra, esperando que se tomara en serio su solución del problema: el espectro de energía en función de la frecuencia y de la temperatura para el emisor y receptor máximo, el cuerpo más negro que el negro, no seguía las leyes que la física clásica esperaba.

Previamente a la propuesta de Planck, la ley de Stefan (1879) obtenida experimentalmente, había relacionado la potencia emitida por unidad de superficie, es decir la intensidad emitida por un cuerpo negro, con la temperatura  $P \propto T^4$ . Posteriormente Boltzmann derivó esta relación de forma teórica, aplicando termodinámica clásica y las ecuaciones de Maxwell a una caja con radiación electromagnética.

El siguiente descubrimiento importante fue la ley de Wien, llamada ley del desplazamiento, que relacionaba la frecuencia de la radiación máxima, de mayor intensidad, con la temperatura,  $f_{\max} \propto T$ . A medida que aumentamos la temperatura, la frecuencia a la que la intensidad es máxima se desplaza hacia frecuencias más altas. Wien obtuvo esta ley siguiendo el razonamiento teórico utilizado por Boltzmann para demostrar la ley de Stefan. La ley de Wien describía exactamente lo que ocurre con la barra de hierro a medida que vamos aumentando su temperatura, algo conocido a través de la experiencia. Esta ley fue catalogada por Rayleigh como una conjetura, pero funcionaba porque respondía muy bien a los resultados experimentales de la radiación del cuerpo negro.

El reto de Planck era buscar el fundamento físico de la ley de Wien, y resolver el problema que se presentaba para frecuencias altas, para las que parecía no ser válido el principio de equipartición de energía. Este principio establece que, para un sistema en equilibrio térmico, cada modo debía tener la misma energía  $k_B T$ , siendo  $k_B$  la constante de Boltzmann y  $T$  la temperatura, lo cual se cumplía para bajas frecuencias, pero fallaba para frecuencias elevadas. Rayleigh

utilizó este principio para repartir la energía entre las diferentes frecuencias radiadas presentes en la cavidad. Esta ley predecía una energía infinita en la región ultravioleta del espectro, pero no se correspondía con la realidad, la energía para los modos de altas frecuencias decrece de forma exponencial, tal como vemos en la Figura 2. Es decir, algo crucial estaba fallando en la descripción de la emisión. Este desacuerdo se conoce como *catástrofe ultravioleta*.

Entre el 19 de octubre de 1900 y el 14 de diciembre del mismo año Planck vivió "el más extenuante trabajo de mi vida", que lo llevó a cambiar el rumbo de su pensamiento y a obtener el primer análisis teórico válido. Fue a buscar la explicación en el modelo de la interacción de la radiación con los dipolos oscilantes, el modelo más simple. Igualando la emisión y la absorción de un oscilador en equilibrio, y dejando de lado el principio de equipartición de la energía, eligió la aproximación termodinámica de la relación entre la energía y la entropía del oscilador (en lugar de la que hay entre energía y temperatura).

El punto más importante de su análisis se encontraba en que podía reproducir los datos experimentales si consideraba que los dipolos no emitían radiación de forma continua, como predice la Física Clásica, sino que las partículas solo pudieran emitir y absorber energía en "sacos" o "trozos" llamados "cuantos" de cantidad  $hf$ , para un oscilador de frecuencia  $f$ .

$$\rho(f, T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1}$$

Con esta consideración, que cambiaba completamente lo conocido hasta entonces, Planck calculó la densidad de energía radiada en función de la frecuencia y la temperatura que mostraba un acuerdo perfecto con los resultados experimentales. Era el avance más importante de la Física en mucho tiempo, pero, como sucede con las vanguardias en el conocimiento, muy pocas personas prestaron atención a la propuesta radical de absorción y emisión de radiación en cuantos de energía.

Einstein asumió que la fórmula de Planck era correcta ya que reproducía los resultados experimentales, pero se dio cuenta de que el análisis realizado para llegar a ella tenía algunos puntos controvertidos. Einstein partió de la ley de Wien para encontrar su fórmula para la distribución de la energía radiada. Partió de un horno, como Planck, pero a diferencia del planteamiento de éste, lo llenó de partículas. A medida que sube la temperatura todas las partículas cargadas, las de las paredes y las del interior, van cambiando las frecuencias emitidas. Llegados al equilibrio térmico, las paredes y el interior se encuentran a la misma temperatura  $T$ . A través de la 1ª ley de la Termodinámica, la de la conservación de la energía, podemos relacionar la entropía con la energía, la temperatura y el volumen. Llegó a una fórmula igual a la de la entropía de un gas compuesto de átomos, es decir, la radiación de

un cuerpo negro se comportaba como si estuviera compuesta de "sacos" de energía en forma de partículas. Einstein había descubierto el cuanto de luz sin necesidad de usar la fórmula de Planck. Planck había cuantizado la emisión y absorción mientras que Einstein cuantizó la propia radiación electromagnética.

Hacia 1905 la teoría propuesta por Planck empezó a alcanzar la magnitud que llegaría a tener. La idea fue tan revolucionaria que en palabras de Einstein "fue como si se abriera la tierra, sin fundamentos firmes sobre los que construir". En este proceso se encontró con un desacuerdo experimental en la ley de distribución de Wien que creaba problemas a su modelo: para longitudes de onda muy grandes la energía era proporcional a  $T$ . Por ello Planck preparó la discusión de una nueva distribución que ahora se llama la ley de distribución de Planck. Él era reacio a admitir la probabilidad en la realidad física, más aún a renunciar al principio de equipartición de la energía. Sin embargo, admitió la relación entre entropía y probabilidad, y creó el concepto que iba a cambiar profundamente, en su raíz, la estructura de la física teórica. Iba a determinar de forma clara la relación entre la energía de un oscilador de frecuencia  $f$  y la entropía  $S$ . La energía, en vez de poder adquirir una secuencia continua de valores, hasta su límite tendente a cero, a lo que no había renunciado el propio Boltzmann, era proporcional a la frecuencia. Pero precisamente que la entropía, así como la energía, dependiera de la frecuencia del oscilador le llevó a ajustar la energía,  $E = hf$  donde  $h$  era una constante universal. Experimentalmente obtuvo que  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  J. s.

Este era el cuanto de acción, la constante universal que resumía el absoluto que le había espoleado unos años antes.

### De Planck a Bohr.

Los últimos años del siglo XIX y primeros del XX fueron años en los que la Física sufrió una auténtica revolución: en 1895 Wilhelm Roentgen descubrió los rayos X. Un año después, Becquerel la radiactividad. En 1897 J. J. Thomson anunció la existencia del electrón y demostró que su tamaño era unas mil veces menor que el átomo de hidrógeno. En 1903, Pierre y Marie Curie recibieron el Premio Nobel por descubrir el radio, en 1909 H. A. Lorentz publicó su modelo electrónico de conductividad a través de los materiales.

El cambio de paradigma, de la Física Clásica a conceptos que terminarían por dar forma a la Mecánica Cuántica, se sucedía con rapidez. En 1900 Max Planck descubrió el cuanto de acción y en 1905 Einstein extendió ese descubrimiento y publicó la teoría de la relatividad especial y el efecto fotoeléctrico, inexplicable desde la perspectiva clásica.

Bohr tenía 15 años cuando en 1900 Planck presentó su idea de cuanto de energía. Nacido en Copenhague, Bohr vivió en el seno de una familia acomodada, en un ambiente con ricas relaciones intelectuales.



*Figura 3. Niels Bohr (ilustración cedida por Guillermo Roa)*

En 1903 ingresó en la Universidad de Copenhague para estudiar Física y ya en 1907, antes de terminar su master, recibió la Medalla de Oro de la Real Academia Danesa por un trabajo sobre la tensión superficial del agua. En 1911 se doctoró por la misma universidad (la única de Dinamarca) y escogió Cambridge como destino para continuar su formación, con la esperanza de colaborar con Sir J. J. Thomson que había sido galardonado con el Premio Nobel en 1907 por el descubrimiento del electrón. En cuanto llegó a Cambridge entregó un ejemplar de su Tesis a Thomson, pero nunca consiguió que éste se interesara por su trabajo. El mismo Bohr reconocía que

sus dificultades de expresarse en inglés podrían haber causado esta falta de acercamiento entre ambos.

En esos años, uno de los debates más importantes que estaban teniendo lugar era sobre la existencia de átomos como constituyentes de la materia, y el de la propia estructura del átomo. En 1903 Thomson había presentado su modelo "plum cake" en el que los átomos estarían formados por una bola sin masa de carga positiva, y las cargas negativas (los electrones ya se habían descubierto) estarían incrustadas en esta bola formando anillos concéntricos. La masa estaría determinada por los electrones, de forma que se necesitaban muchos electrones por átomo para justificar la masa de los elementos.

Los experimentos de Rutherford realizados bombardeando láminas muy finas de oro con partículas alfa, demostraron que ese modelo era erróneo ya que, según los resultados, la mayor parte de las partículas atravesaban las láminas sin desviarse, es decir, en la mayor parte de las láminas no había nada. Otras partículas se desviaban ligeramente y algunas de forma significativa. A partir de estos experimentos de *scattering*, Rutherford supo que el modelo de Thomson era erróneo y que los electrones no podían ser los responsables de que las partículas alfa sufrieran desviaciones. Las desviaciones dependían de lo cerca que las partículas alfa pasaran del núcleo atómico.

En 1911 Rutherford presentó su modelo atómico, en el que se introducía la idea del núcleo ocupando una parte muy pequeña del átomo (unas  $10^5$  veces más pequeño que el átomo) y los electrones



situados alrededor del núcleo. El núcleo concentraba prácticamente toda la masa del átomo, estando el espacio ocupado por el átomo mayoritariamente vacío. Usando ese modelo atómico fue capaz de reproducir con precisión los resultados obtenidos en los experimentos descritos anteriormente.

Este modelo presentaba varios problemas fundamentales: si los electrones estuvieran quietos, serían atraídos por el núcleo, y si por el contrario estuvieran en movimiento alrededor del núcleo como planetas, según la teoría de Maxwell del electromagnetismo ya conocida, emitirían radiación constantemente, perdiendo energía, describiendo órbitas cada vez más pequeñas y cayendo definitivamente al núcleo.

Desencantado con la inexistente relación con Thomson, en 1912 Bohr se trasladó a la Universidad de Manchester, donde Rutherford, al que había conocido en una visita anterior, dirigía el departamento de Física. Allí empezó a interesarse por la estructura del átomo y por intentar descifrar qué distingue a un elemento de la tabla periódica de otro. Se dio cuenta de que el concepto importante era la carga nuclear (número de protones) y no el peso atómico (número de protones + neutrones). De hecho, fue el primero en hablar de número atómico.

Bohr comprendió que el modelo de Rutherford tenía inconvenientes insalvables. Se dio cuenta de que era necesario relacionar este modelo con el cuanto de acción para poder explicar la estabilidad de la materia y las propiedades químicas de los elementos que constituyen el sistema periódico. Además, para entonces se sabía

que la materia y la radiación se relacionan mediante intercambio de paquetes de energía. Se sabía que los átomos de cada materia emitían luz (energía) de unos determinados colores y no de otros. Cada elemento tenía su huella dactilar de forma que analizando su espectro de emisión se distinguía del resto. Por increíble e incomprensible que pareciera la propuesta de Planck, allí estaba la explicación de cómo interactuaban materia y radiación.

El modelo atómico de Bohr.

En 1912, Bohr escribió a su hermano explicándole sus descubrimientos, pidiéndole que no hablara de ello con nadie puesto que todavía no los había publicado. Tardaría todavía un año en publicar los 3 artículos en los que exponía su modelo atómico "*On the constitution of atoms and molecules*" en los que introducía la idea revolucionaria del cuanto para explicarlo. Fue la primera teoría coherente sobre la constitución del átomo. El modelo de Bohr se resume habitualmente en tres postulados:

- En el primero, basándose en el modelo de Rutherford, describe el átomo con el núcleo en el centro y los electrones orbitando a su alrededor, debido a la atracción electrostática, análogo al sistema solar. Prácticamente toda la masa del átomo se encuentra en el núcleo. El problema de este sistema es el hecho de que las partículas cargadas emiten radiación cuando sufren alguna aceleración (centrípeta en este caso) de forma que el átomo no sería estable.

- En el segundo postulado, Bohr resolvió el problema de la estabilidad de las órbitas utilizando un concepto nuevo: las órbitas estacionarias o estados estacionarios. En estas órbitas los electrones no emiten radiación a pesar de estar constantemente acelerados, en contradicción con el electromagnetismo clásico. Las órbitas estacionarias están determinadas por el momento angular,  $L$ . El momento angular y su principio de conservación es una de las magnitudes fundamentales en Física. Un objeto en movimiento tiene momento lineal, producto de su masa por su velocidad, y tiene momento angular con respecto a cualquier punto del espacio. En este caso, hablamos de momento angular de los electrones con respecto al núcleo. En el modelo de Bohr, los electrones ocupan órbitas en las que el momento angular es igual a un número entero de veces la constante de Planck  $L = nh/2\pi$ .
- Finalmente, describe el salto entre órbitas de los electrones. Los átomos emiten y absorben energía no de forma continua, sino que lo hacen cuando los electrones saltan de una órbita estacionaria a otra emitiendo (si van de más a menos energía) o absorbiendo (de menos a más) energía  $E = hf$ , siendo  $f$  la frecuencia de la radiación intercambiada. Los átomos tendrían, en principio, a sus electrones en órbitas estacionarias. Si son perturbados, por ejemplo, con colisiones o con luz, los electrones pueden saltar de una órbita estacionaria a otra, se producen lo que llamamos "saltos cuánticos".

El modelo de Bohr introdujo la idea de discontinuidad e indeterminación, conceptos alejados de la Física Clásica. Los electrones no podían ocupar cualquier punto alrededor del núcleo. Al cambiar de órbita, entre una y otra, se encontraban en un espacio indeterminado. Además, no se podía determinar el momento en que se iban a producir estos saltos.

El modelo fue mejorado y superado por teorías posteriores, introduciendo el concepto de spin, por ejemplo, y el principio de exclusión de Pauli, pero en el momento de su publicación fue realmente revolucionario y dio buenos resultados en la descripción de elementos básicos. La imagen del átomo como un pequeño sistema solar ha sido sustituida por un átomo con electrones imposibles de visualizar. Sin embargo, la cuantización del momento angular y la descripción de los saltos entre órbitas han sobrevivido. El de Bohr fue el primer intento coherente para dar una explicación a lo observado en los experimentos y reproduce con precisión los resultados obtenidos con el átomo de hidrógeno, aunque presenta problemas cuando se intenta aplicar a átomos con más electrones.

La interpretación de Copenhague: complementariedad, medida y colapso de la función de onda.

En 1917 se creó el Instituto de Física Teórica asociado a la Universidad de Copenhague. Del trabajo realizado en los años posteriores a su creación, relacionado con la interpretación de la Mecánica Cuántica, surgió la que hoy conocemos como

interpretación de Copenhague. Puede considerarse como la interpretación estándar de la Mecánica Cuántica, y se denomina así debido a la contribución especialmente importante de Bohr, en colaboración principalmente con Heisenberg, y Max Born.

Heisenberg presentó su formulación matricial de la Mecánica Cuántica en Berlín en 1926, frente a físicos tan importantes como Einstein y Planck. En esta visita tuvo ocasión de discutir con Einstein sobre su teoría y los problemas sobre la posibilidad de observar las trayectorias de los electrones. En esa conversación, Heisenberg le expresó sus dudas sobre su futuro, ya que tenía diferentes ofertas de trabajo, y Einstein le recomendó que fuera a trabajar a Copenhague como asistente de Bohr.

Una vez en Copenhague, Heisenberg se integró completamente en la vida del Instituto de Física y pasaba mucho tiempo con Bohr, discutiendo esencialmente sobre la interpretación de la Mecánica Cuántica. Después de la visita de Schrödinger a Copenhague, ese mismo año, Bohr y Heisenberg se centraron por completo en lo que llegó a ser su máxima preocupación: la interpretación física del formalismo matemático de la mecánica cuántica. Su mayor desasosiego provenía de la interpretación de la dualidad onda—corpúsculo. Tal como Einstein escribió a Ehrenfest, "¡por un lado las ondas, por otro los cuantos! La realidad de ambos es firme como una roca".

En física clásica un objeto puede ser una onda o una partícula, pero no ambas cosas. Heisenberg utilizó partículas y Schrödinger, ondas, para describir sus versiones de la Mecánica Cuántica. Tal como dijo

Heisenberg, nadie podía responder a la pregunta de qué era un electrón, si una partícula o una onda. Bohr y Heisenberg intentaron responder a esa pregunta desde diferentes perspectivas. En realidad, Bohr y Heisenberg no coincidían totalmente en la interpretación del formalismo matemático de la Mecánica Cuántica y, de hecho, ellos no usaron el término "interpretación de Copenhague" hasta mucho más adelante.

La defensa por parte de Bohr del modelo atómico en el que el átomo está representado por estados estacionarios, descritos adecuadamente por las funciones de onda de Schrödinger, establecía una barrera con la visión de Heisenberg y su interpretación de los átomos como partículas. Heisenberg estaba completamente convencido con la versión partícula, los saltos cuánticos y la discontinuidad. No quería dar opción a la versión ondulatoria del formalismo de Schrödinger. Bohr, sin embargo, estaba abierto a analizar los dos aspectos. Mientras Heisenberg basaba su razonamiento en las matemáticas, Bohr se inclinaba a tratar de entender la física que había detrás de las matemáticas. Creía que, de alguna forma, ambas descripciones debían estar presentes para la correcta interpretación.

### Complementariedad.

En septiembre de 1927, justo un mes antes de la famosa 5ª conferencia de Solvay, los físicos más eminentes del momento se reunieron en Como (Italia), ciudad en la que había nacido y muerto Volta, para conmemorar el centenario de su muerte. Allí formuló

Bohr por vez primera su interpretación de la física cuántica como parte de un sistema más amplio y general que denominó «filosofía de la complementariedad». En su presentación abordó el dilema de la dualidad onda—corpúsculo desde un punto de vista filosófico.

El principio de complementariedad está fuertemente ligado al principio de incertidumbre de Heisenberg. Su objetivo principal es la explicación de fenómenos aparentemente contradictorios, como la dualidad onda—corpúsculo, bajo la mirada de la mecánica cuántica. Según Bohr, en correspondencia con Heisenberg, el principio de incertidumbre era fruto del principio de complementariedad, más profundo. Esta interpretación fue aceptada por la mayoría de científicos de la época salvo algunos influyentes colegas, como Einstein, Schrödinger y Dirac. De ahí nació una de las polémicas intelectuales más importantes que haya mantenido la humanidad y que tuvo como contendientes principales a Einstein de un lado y a Bohr del otro.

Estaban en desacuerdo en cuestiones tan importantes como la causalidad, el significado de realidad física, la localidad y el carácter completo o incompleto de las descripciones cuánticas. Después de casi un siglo, el debate Einstein—Bohr sigue siendo vital para conocer la interpretación y la filosofía de la física cuántica. Las conversaciones entre ambos sobre este tema fueron publicadas en un artículo en 1949 "Las discusiones con Einstein sobre Problemas epistemológicos en Física Atómica" en lo que se considera la explicación más completa por parte de Bohr sobre la complementariedad. Bohr nunca llegó a convencer a Einstein sobre

esta interpretación de la Mecánica Cuántica.

Según el principio de complementariedad, dos magnitudes complementarias no pueden medirse simultáneamente con precisión absoluta, de forma que cuanto más precisa sea la medida en una magnitud, más imprecisa será la medida en la magnitud complementaria. Siguiendo con la dualidad onda—corpúsculo, una de las discusiones más importantes entre Bohr y Einstein trataba sobre la naturaleza de la luz. En el libro "La evolución de la Física" Einstein y Leopold Infeld escribían: "¿qué es la luz? ¿Una lluvia de fotones? Parece que no puede formarse una descripción consistente de la luz escogiendo solo uno de los dos lenguajes. Parece que a veces debemos usar una teoría y otras veces la otra. Estamos frente a un nuevo problema. Tenemos dos visiones de la realidad contradictorias, por separado no explican el fenómeno de la luz, pero juntas sí lo explican".

Heisenberg se centró en la trayectoria de electrones en una cámara, preguntándose si podíamos saber la posición y la velocidad de un electrón simultáneamente. El resultado es conocido: la Mecánica Cuántica pone restricciones a lo que podemos medir y conocer. Mediante su principio de incertidumbre descubrió que la Mecánica Cuántica prohíbe la determinación exacta de la posición y el momento de una partícula. Es posible medir de forma exacta dónde se encuentra el electrón o su velocidad, pero no ambas cosas simultáneamente. Esto significa que en las medidas de magnitudes atómicas tenemos un límite, y ese límite es precisamente el cuanto de acción,  $h$ :  $\Delta x \Delta p \geq h/2\pi$  y  $\Delta E \Delta t \geq h/2\pi$ , es decir no se pueden



medir dos magnitudes complementarias con infinita precisión. En el caso del experimento de la doble rendija, esto implica que no podemos diseñar ningún equipo que nos permita saber por qué rendija pasan las partículas sin destruir la interferencia.

El cuanto de acción es un límite que impone la propia naturaleza. Publicado en 1927, Bohr se dio cuenta de que el principio de incertidumbre no era sino la extensión del principio de complementariedad a magnitudes conjugadas como posición-momento, y energía - tiempo. No se trata de un error en la medida que pueda ser subsanado mediante instrumentos más precisos, sino un límite fundamental no superable. Además, las ecuaciones de Planck  $E = hf$  y de de Broglie  $p = h/\lambda$ , incluían propiedades asociadas con partículas ( $E, p$ ) que se relacionan con magnitudes ondulatorias ( $f, \lambda$ ) mostrando la naturaleza dual en la descripción de la luz y de partículas subatómicas.

Colapso función de onda. El problema de la medida.

El problema de la medida es un aspecto decisivo en cuanto a la consistencia de la Mecánica Cuántica. La definición del estado de un sistema exige la eliminación de toda perturbación externa. El hecho de observar, o de medir, es una perturbación externa, por lo que es imposible definir el sistema de manera inequívoca. Según la Física Clásica, si conocemos el estado inicial de un sistema (posición y momento) y las fuerzas que actúan, podemos saber el estado posterior. La observación del sistema no altera su comportamiento, y si lo altera, es posible saber cómo, de forma que

siempre es posible conocer el estado del sistema en instantes posteriores. Podemos decir que la descripción de un sistema físico, según la Física Clásica, es objetiva. En el caso de la Mecánica Cuántica, es imposible predecir el resultado de una medida. Solo podemos predecir la probabilidad de encontrar este resultado. Esta es una diferencia crucial entre la Física Clásica y la Mecánica Cuántica. No es un problema técnico, no podemos ir más allá de la probabilidad de obtener un resultado.

La discusión sobre la medida está relacionada con las dos formas en que un estado evoluciona en el tiempo: de forma determinista, según la ecuación de Schrödinger si no se efectúa ninguna medida, y de forma indeterminista, en lo que se conoce como "colapso de la función de onda" que ocurre cuando se efectúa la medida. Las partículas se encuentran en una superposición de estados hasta que se realiza una medida de alguna propiedad de la partícula. En cuanto se realiza la medida, la función de onda *colapsa* y se encontrará en uno de los estados estacionarios del sistema. Heisenberg describió el colapso como acausal, incierto e indeterminado, dependiente de la elección del experimentalista sobre qué medir.

Toda la información de un sistema se encuentra en la función de onda que evoluciona según la ecuación de Schrödinger. Max Born propuso una interpretación de la función de onda en la que el módulo cuadrado de esta función representaba la probabilidad de obtener una medida concreta, por ejemplo, encontrar la partícula en una posición determinada. Se llamó interpretación estadística

puesto que implica que los resultados de los experimentos son puramente información estadística. "La teoría nos da probabilidades, los experimentos, estadísticas." Los experimentos realizados muchas veces nos dan evidencia estadística de las probabilidades predichas por la teoría. No podemos describir nada de las trayectorias de partículas individuales o de la posición de las partículas previamente a hacer la medida. De hecho, una partícula puede estar en dos lugares a la vez, como en el caso del experimento de la doble rendija, pasando por las dos a la vez.

Esta interpretación plantea muchos interrogantes: ¿este colapso ocurre solo cuando observamos el sistema? ¿existen los objetos, aunque no los estemos observando? Einstein creía en la existencia de una realidad objetiva, en contra de la opinión de Bohr y Heisenberg. La Física Clásica asume que el mundo es independiente de la observación. En Mecánica Cuántica, defendía Heisenberg, el resultado de un experimento depende de lo que escojamos medir. Es decir, los fotones y los electrones pueden parecer ondas o partículas dependiendo de lo que queramos medir, no "son" ni una cosa ni otra.

Estas dos distintas descripciones de cualquier estado (la de Schrödinger o la del colapso) parecen implicar una contradicción en la Mecánica Cuántica. En palabras de Heisenberg: "La interpretación de Copenhague empieza con una paradoja. Todos los experimentos, sean de la vida diaria o de la física atómica, tienen que ser descritos con conceptos de la física clásica. Estos representan el lenguaje mediante el que describimos la

configuración de nuestros experimentos y determinamos los resultados. No podemos reemplazarlos con otros conceptos. De todos modos, la aplicabilidad de estos conceptos es limitada debido a las relaciones de incertidumbre".

Para Bohr, la complementariedad podía explicar la paradoja de la naturaleza onda—corpúsculo de la luz y las partículas subatómicas. Son propiedades complementarias del mismo fenómeno, necesarias para la correcta descripción de la realidad cuántica. La limitación a esta descripción se encuentra en el hecho que el observador no puede medir/observar las dos propiedades a la vez, no hay experimentos que muestren a la vez el carácter corpuscular y ondulatorio simultáneamente. De alguna forma argumentaba la compatibilidad entre la descripción ondulatoria de la Mecánica Cuántica de Schrödinger con la idea de estados estacionarios discretos de los átomos (que corresponden a armónicos en la propagación ondulatoria), es decir, la formulación ondulatoria de las partículas resolvía los problemas de la estructura atómica y la interacción radiación—materia. Se podría añadir que en el modelo atómico de Bohr se encuentra la dualidad onda—partícula, al seleccionar los estados estacionarios los armónicos de la función de onda.

Todas las contribuciones de Bohr y otros iniciadores de la Mecánica Cuántica nos muestran que la explicación del mundo subatómico es muy distinta de lo que nos ofrece la Física Clásica. No sabemos por qué el mundo es como es, pero sí sabemos aplicar los principios de la Mecánica Cuántica y dar explicación a lo que observamos.

Estamos frente a una de las grandes figuras de la Física de todos los tiempos. Sus aportaciones siguen vigentes en su mayor parte, y son fundamentales para explicar el nacimiento de la Mecánica Cuántica.

### Bibliografía:

- (1) *"Quantum: Einstein, Bohr and the great debate about the nature of reality"*, Manjit Kumar, Icon Books Ltd (2009).
- (2) Kumar, Manjit. Quantum, Icon Books Ltd. Kindle Edition.
- (3) *"Quantum dialogue: the making of a revolution"*, Mara Beller, University of Chicago Press (1999).
- (4) *"Niels Bohr, la teoría atómica y la descripción de la naturaleza"*, Niels Bohr, Alianza Editorial (1988).
- (5) *"How physics confronts reality: Einstein was correct but Bohr won the game"*, Roger G. Newton, Singapore: World Scientific (2009).
- (6) *"Einstein, Bohr and the quantum dilemma: from quantum theory to quantum information"*. Andrew Whitaker. Cambridge University Press (2006).

[Marisa Pons](#) y [Lourdes Dominguez](#).

Doctoras en Física.

Departamento de Física Aplicada.

Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea.

## El azar Relativo



*Figura 1. Fotografía tomada en el 1º Congreso Solvay celebrado en 1911, "La Radiación y los Cuantos". De pie, de izquierda a derecha: Robert Goldschmidt, Max Planck, Heinrich Rubens, Arnold Sommerfeld, Frederick Lindemann, Maurice de Broglie, Martin Knudsen, Friedrich Hasenöhrl, Georges Hostelet, Edouard Herzen, James Hopwood Jeans, Ernest Rutherford, Heike Kamerlingh Onnes, Albert Einstein, Paul Langevin. Sentados, de Izda. a dcha.: Walther Nernst, Marcel Brillouin, Ernest Solvay, Hendrik Antoon Lorentz, Emil Warburg, Jean Perrin, Wilhelm Wien, Marie Curie, Henri Poincaré.*

[Proceedings 1911](#)

## Capítulo 4

### El descubrimiento de la aceleración del Universo.

#### *Breve apunte en el diario cósmico.*

En los años veinte, el descubrimiento de la expansión del Universo era un debate crucial en el establecimiento del modelo del *Big Bang* que más tarde sería confirmado con otras pruebas. En los años noventa, la discusión sobre el ritmo de expansión en el momento actual, también conocido como  $H_0$  (siendo  $H(t)$  el parámetro de expansión del Universo), era un debate con puntos de vista opuestos y agitadas discusiones en congresos. Son años cuyo recuerdo nunca deja de traerme una sonrisa al revivir en la memoria las divertidas contiendas dialécticas entre los partidarios de un valor y otro, los ataques a degüello entre eminencias científicas. Algo que, para una estudiante que entraba en el campo, suponía un acicate más para examinar la cuestión por cuenta propia aportando un método distinto.

Hoy, hay que decir que el tema del valor de  $H_0$  está todavía en discusión. Pero no hablaremos aquí de  $H_0$ , sino de  $H(t)$ , el parámetro de expansión del Universo. Este, según las ecuaciones de Einstein para un Universo homogéneo en todas las direcciones, debe reflejar un frenado por la acción de la materia. Igual que una piedra lanzada desde la tierra cae por la atracción gravitatoria que ejerce nuestro planeta sobre ella, el Universo debería tender a "caer sobre sí mismo por su propio peso", es decir, la materia que lo contiene debe llevar al frenado de su expansión. (De hecho, el parámetro de

expansión no es más que la variación del factor de escala del Universo, en unidades del factor de escala ( $H(t) = da(t)/dt/a$ ), siendo  $a$  el factor de escala, una medida que nos da idea de cómo va aumentando en tamaño una región del cosmos).

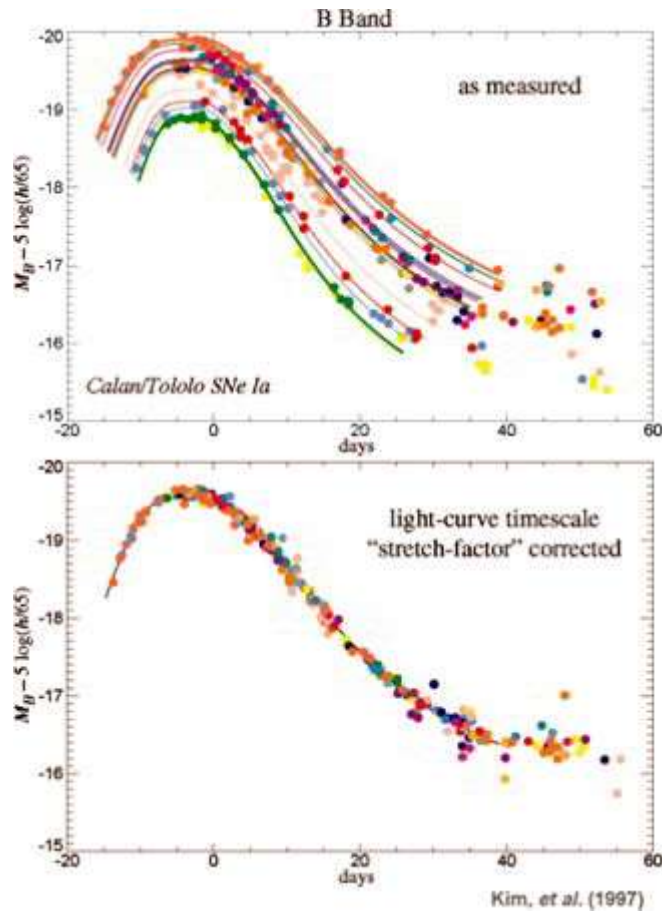


Figura 1. Brillo en el máximo versus ritmo de declive de las SNe Ia, tal como es usado por el Supernova Cosmology Project.

En realidad, y así ha acontecido, medir la variación de  $H(t)$ , valor que conecta varias épocas evolucionando en el tiempo, es más fácil que medir  $H_0$ , para lo que se necesita mediciones en valor absoluto, esto es, sin relación a otro tiempo. Los investigadores embarcados



en la misión de determinar el valor de la evolución de la expansión de Universo, necesitamos solo buenos indicadores cosmológicos de distancia que tengan una luminosidad constante o calibrable a lo largo de la historia del mismo.

Si bien la determinación de la expansión del Universo fue posible gracias al descubrimiento de la relación periodo—luminosidad de las Cefeidas por Henrietta Leavitt, para la determinación de si esta expansión se frenaba o no (esta última opción no estaba en nuestra mente a principios de los noventa) fue necesario utilizar las supernovas de tipo Ia, supernovas termonucleares (también abreviadas como SNe Ia). Las Cefeidas son indicadores demasiado débiles, solo observables a distancias en el Universo de algunos millones de años—luz. Para esta medición del frenado, necesitamos un indicador más potente y capaz de llegar a medir distancias de miles de millones de años—luz. Lo encontramos en estas supernovas, pero solo una vez calibrada la relación brillo con ritmo de declive del mismo después del máximo: las supernovas de tipo Ia más brillantes declinan en su luminosidad más lentamente que las menos brillantes, las cuales trazan un declive en luminosidad más rápido.

Los estudios de las supernovas realizados en Calán/Tololo a mediados de los noventa permitieron perfeccionar la relación pico del brillo—ritmo de declive de la curva de luz. La correlación era conocida desde los setenta, pero no había sido cuantificada. En 1993, Mark Phillips presentó su expresión analítica entre el brillo y el declive del mismo. Esta fue verificada con una treintena de

supernovas por Mario Hamuy y sus colaboradores de Calán/Tololo. El estudio fue crucial para abordar la determinación del ritmo de desaceleración del Universo y la hizo posible.



*Figura 2 Mi director de tesis Leon B, Lucy. El 12 de mayo de 2000 se le entregó la medalla de oro de la Royal Astronomical Society por sus contribuciones a la Astrofísica.*

<https://academic.oup.com/astrogeo/article/41/4/4.7/196431>.

Desde agosto del 1992, me encontraba investigando como *postdoc* en Harvard utilizando las SNe Ia para determinar la nucleosíntesis y distancias. ¿Cómo había llegado allí? Los astros se habían alineado para que hiciera mi tesis con Leon Lucy, del *European Southern Observatory*, en Garching, Alemania. En mi tesis, desarrollé un

código que permitía determinar las distancias cósmicas a las supernovas y lo había publicado en el *Astrophysical Journal*(1) con una apreciación muy positiva del árbitro de la revista. Con mi método podría calcular  $H_0$ . Presentada mi tesis, recibí una carta manuscrita de varias páginas, de Gustav Tammann, con comentarios que me entusiasmaron, y también una dedicatoria enviándome sus saludos de Gerard de Vaucouleurs. Gustav Tammann y Gerard de Vaucouleurs eran cosmólogos de primera línea, con ideas opuestas sobre el valor de  $H_0$ . Mientras que Tammann era partidario de un valor de  $H_0$  bajo, de Vaucouleurs estaba en el espectro opuesto de valores para  $H_0$ .

Después de unos meses a la espera de una oferta postdoctoral, mi primer trabajo fue en el *Institut d'Astrophysique* de Paris, en el grupo de astrofísica de rayos  $\gamma$ . Sin duda mi director de tesis Leon Lucy había escrito muy buenas cartas de recomendación. En Paris, siguiendo con mi línea de interés, había intentado otro método de determinación de distancias en el ámbito de la radiación  $\gamma$  de las supernovas. Parecería que mi siguiente contrato iba a ser en Saclay, pero, en julio de 1992, me llegó una oferta de Robert (Bob) Kirshner para que me incorporara a su grupo en Harvard. Allí también se dedicaban a determinar distancias cósmicas, pero utilizando las supernovas de colapso gravitatorio. Sin dudarlo acepté entusiasmada; solo pregunté si tendría cubierto un seguro médico (nunca había viajado a Norteamérica, y en Europa son conocidas las quejas de turistas que han tenido algún percance). Me permití estar en la celebración de la maratón en los Juegos Olímpicos de

Barcelona y, apremiada desde el otro lado el Atlántico, llegué a mediados de agosto a Nueva York y desde ahí a Boston.



*Figura 3 Un joven Saul Perlmutter (con 34 años) presenta su primera supernova a alto  $z$  en el congreso de distancias cosmológicas en Aspen. Foto en lo alto del teleférico (1993).*

En aquel tiempo, en 1992, Brian Schmidt estaba acabando su tesis con Bob Kirshner sobre la determinación de distancias con supernovas de colapso gravitatorio. Yo me dediqué a modificar mi código para incluir una descripción más realista (dejando que la densidad variase a lo largo del material eyectado) de las SNe Ia y a aplicarlo a las observaciones. En 1993, en un congreso organizado en Aspen, Saul Perlmutter, del *Lawrence Berkeley National*

*Laboratory*, presentó los primeros resultados del descubrimiento de una supernova a una distancia ya capaz de abordar la medida de la desaceleración del Universo. Se trataba de la supernova SN 1992bi, descubierta con el telescopio *Isaac Newton* en el observatorio del Roque de los Muchachos, en La Palma. El hallazgo había sido confirmado con un espectro observado en el telescopio *William Herschel*, del mismo observatorio. El telescopio *Isaac Newton* contaba con una cámara con un mosaico de detectores CCD (*Charge—Coupled Device*). (En nuestros móviles, nuestras cámaras usan estos detectores). Anteriormente a la introducción de los CCD, las cámaras astronómicas usaban placas fotográficas y los procesos transitorios en el cielo nocturno no se podían automatizar con la rapidez y precisión requeridas para muchos proyectos. Saul Perlmutter había empezado ese proyecto a finales de los ochenta. Cuando se otorgó el premio Nobel a los investigadores principales del descubrimiento en Estocolmo, a juicio de muchos (incluyéndome a mí), él fue quien dio el discurso más completo y generoso. Mostró las dificultades inherentes al proyecto, cómo se fueron superando, realizó la labor del equipo, mostrando el factor humano por medio de nuestros rostros proyectados en la pantalla (ver Figura 7) y mencionando nuestras reuniones de trabajo antes de la presentación del descubrimiento. Se puede ver ese discurso en las referencias de la bibliografía (2, 3).

Y es que efectivamente, con anterioridad a los años noventa, ya en 1968 Charles Thomas Kowal había intentado determinar por varios métodos la desaceleración de la expansión del Universo, al hilo de lo

que ya había anticipado Allan Sandage en 1961 (4):

*"el futuro de la cosmología observacional, por lo menos en las siguientes tres décadas, será el de la búsqueda de dos parámetros: la constante de Hubble y el parámetro de desaceleración del Universo".*

Una previsión certera. Pero esto no era posible mientras las supernovas (termonucleares o de tipo Ia) no fueran suficientemente comprendidas como para ser utilizadas como indicadores de distancia y de que se contara con cámaras con detectores digitales CCD en los telescopios. A partir de mediados de los noventa se instalarían esos detectores en todos los telescopios profesionales del mundo. Y en 1997, se produjo un vuelco sustancial en nuestras posibilidades de observar a distancias cada vez mayores: contaríamos con el telescopio espacial *Hubble*. Detectaríamos supernovas claves para determinar la evolución de la expansión del Universo.

Volviendo a mi apunte personal, en 1993 no se había formado aún el llamado *High—Z Supernova Search Team* o, abreviado, *HZT*. Pero, en nuestro pasillo del *Harvard—Smithsonian Center for Astrophysics*, un joven Adam Riess había empezado su tesis con Bob Kirshner, muy cerca del despacho de Brian y un poco más alejado del mío. Su idea era parametrizar la variación en la relación brillo—declive de la curva de luz de las SNe Ia con un método de mínimos cuadrados que tuviera en cuenta toda la curva de luz de las supernovas y la extinción de su luminosidad por polvo,

principalmente en la galaxia huésped.



*Figura 4 Fiesta del 60 cumpleaños de Bob Kirshner en el Institute for Theoretical Physics de Santa Barbara (2009). Conjunto de estudiantes y postdocs que trabajamos con él en algún momento. En el centro Bob Kirshner, de izquierda a derecha: Bob Fesen, Bruno Leibundgut, Pilar Ruiz—Lapuente, Pete Challis, Maryam Modjaz, Peter Garnavich, Stéphane Blondin, Armin Rest, Kaisey Mandel, Brian Schmidt, Tom Matheson, Ryan Foley, Saurabh Jha. Adam Riess no pudo estar en la foto. Bob Kirshner obtuvo el premio Wolf en Física en 2015 por (cita) "crear el grupo, el medio ambiente y las instrucciones que permitieron a sus estudiantes de posgrado y becarios postdoctorales descubrir la aceleración de la expansión del Universo".*

Ya en 1994, Brian, que había estado como *postdoc* después de la presentación de su tesis, se mudó a vivir a Australia con su mujer y yo regresé a Barcelona para incorporarme a la Universidad. Añoré mi tiempo de Harvard, donde aprendí mucho. Me di cuenta de la importancia del aspecto observacional y de que algo tan simple como una parametrización de la relación brillo—declive de luminosidad de las supernovas podía ser más necesario que un código sofisticado de transporte de radiación en supernovas.

En Barcelona tuve la intuición de que hacía falta organizar un encuentro internacional sobre supernovas. Y así se hizo, en Aiguablava (Begur), un sitio recogido donde los participantes tenían forzosamente que estar en interacción, tal como lo demandaban los financiadores del que fue el *NATOAdvanced Study Institute* sobre supernovas termonucleares. Allí se juntaron por primera vez los integrantes del *Supernova Cosmology Project* y los del *High—Z Supernova Search Team*, que se había formado a finales de 1994. Son históricas las presentaciones que se hicieron ahí y que están recogidas en un volumen de 890 páginas. Ambas colaboraciones discutieron juntas por primera vez.

No tardaría mucho en unirme a una de ellas: el *Supernova Cosmology Project*. Esto parecía natural, ya que ya había observado para Saul Perlmutter en La Palma, de modo informal, en tiempo dedicado a un programa de supernovas en distintas fases, cuando él aún no había publicado su primer éxito con la supernova de 1992. Por otra parte, el *Supernova Cosmology Project* había logrado su



primera supernova lejana en el *Isaac Newton Telescope* de la Palmy ese era un nodo importante para la colaboración. El *High—Z SupernovaSearch Team (High Z Team)*, con miembros de Harvard, Chile y ESO, prefirió operar primordialmente en Chile en sus comienzos y más tarde también en Hawái y, por supuesto, con el *Hubble Space Telescope*. El año 1995 sería decisivo y el 1997 muy importante y discutido.

En el año 1997 se juntaron toda una serie de evidencias que no cuadraban con un Universo que estaba frenando su expansión. ¿Quién estaba más cerca de lograr encontrar la evidencia de la aceleración del Universo? Aquí quisiera aportar el testimonio de lo que ocurría en el otoño de 1997, pues lo viví durante una estancia de tres meses en California, donde estuve en el *Institute for Theoretical Physics* de Santa Barbara, en un programa dedicado a la física de las supernovas, organizado por Adam Burrows, y también de visita en el *Berkeley National Laboratory*, sede principal del *Supernova Cosmology Project*.

En Santa Barbara, había algunos miembros del *High Z Team*, en particular Bob Kirshner. Con los resultados que tenían por aquel septiembre de 1997 y que fueron mencionados informalmente en las sesiones de la tarde, por el momento, no encontraban sentido a lo hallado: las pocas (cuatro) supernovas a alto  $z$  apuntaban a una densidad de materia del Universo negativa ( $\Omega_m < 0$ ). Peter Garnavich encabezaría un artículo enviado el 13 de octubre de 1997 en el que concluía, con esa muestra pequeña de supernovas, que  $\Omega_m$  era igual a  $-0.1 \pm 0.5$  si la constante cosmológica era nula (5). Eso

también sería mencionado en el discurso del premio Nobel que dio Adam Riess en Estocolmo. Por supuesto, había un prejuicio teórico de que o bien la constante cosmológica era muy grande o bien era cero. Por aquel entonces, se asumía que era cero. Sin embargo, algo más al norte de Santa Barbara, en Berkeley, Gerson Goldhaber, independientemente, había encontrado un resultado similar al de Garnavich con muchas supernovas lejanas, y se había planteado qué pasaría si el Universo fuera plano (densidad de materia—energía  $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ ). Contando con la constante cosmológica, los datos sí tenían sentido y la densidad de materia era un 30% del total. Gerson relata en su memoria (6) cómo nos presentó a los miembros del *Supernova Cosmology Project* dos histogramas de los datos que parecían indicar que  $\Lambda$  podía tener un valor no nulo. Saul corroboró la conclusión con un programa de software hecho por él. En aquella ocasión había viajado en un autobús de la compañía *Greyhound* desde Santa Barbara a Berkeley y luego me había acercado a San Diego a saludar a unos amigos. Si tenemos en cuenta que con estos amigos crucé a Tijuana, el viaje de ida y vuelta me instruyó sobre el paisaje y gentes de California (especialmente de las que viajan arriba y abajo hacia la frontera en la *Greyhound*). Fueron muchas horas, pero muy interesantes.

El resultado de Gerson necesitaba un examen más detallado y no mencioné nada en Santa Barbara. Según cuenta Gerson, él dio una conferencia sobre ello en el *Institute for Theoretical Physics* de Santa Barbara el 14 de diciembre de 1997, a la que no pude asistir pues ya estaba de vuelta en Europa. Aunque Bob Kirshner juzga que

Gerson no acabó de mostrar la evidencia de que  $\Lambda$  era positiva, así lo interpretaron otros oyentes en varios círculos. Saul Perlmutter dio también conferencias en la Universidad de California en San Diego y en Santa Cruz con el resultado y hubo gran entusiasmo. La cuestión planeaba, pero es cierto que era importante detenerse en los errores sistemáticos (los debidos al método). Nadie quería filtrar un resultado como ese a la ligera. Ya a comienzos de 1998, Adam Riess había llegado a la misma conclusión, según cuenta en su conferencia del premio Nobel. El *Supernova Cosmology Project* tendríamos una reunión de trabajo intensivo en París, antes de enviar el artículo definitivo, lo cual ocurrió en septiembre de 1998. Pero nuestra comunicación del hallazgo de los resultados fue en el póster presentado en la reunión de la *American Astronomical Society* en enero de 1998. Aunque la prensa habló de que debido a que la densidad de materia era baja el destino final del Universo era expandirse indefinidamente, solo el periodista James Glanz captó que había evidencia de una fuerza repulsiva. Algo que intentó confirmar con Alex Filippenko. En un congreso en la Universidad de California en Los Angeles en febrero de 1998, Saul Perlmutter, Gerson Goldhaber y Alex Filippenko confirmaron la presencia de  $\Lambda$ . Las dos colaboraciones, el *Supernova Cosmology Project* liderada por Saul (7) y el *High-Z Supernova Search Team*, cuyo portavoz era Brian Schmidt y el primer autor del trabajo Adam Riess (8), habían dado por lo tanto sus resultados en 1998. Ante la sorpresa de todos, el Universo no frenaba su expansión debido a su contenido de materia—energía, tal como se hubiera esperado, sino que aceleraba

su expansión debido a una componente de efecto opuesto a la gravedad, una especie de repulsión antigravitatoria a la que se conoce hoy como energía oscura.

La energía oscura es hoy uno de los temas de investigación más relevantes en cosmología. Comprende un 69% de lo que contiene el cosmos. Su naturaleza está aún por determinar. Dentro del *Supernova Cosmology Project* la seguimos investigando con proyectos que cada vez obtienen con mayor precisión la llamada  $w$  o coeficiente de la ecuación de estado de la energía oscura, que parece muy cercano a  $-1$ . Este coeficiente  $w$  es la razón entre su presión  $p$  y la densidad  $\rho$  ( $p = w\rho$ ). Si fuera justamente  $-1$ , se trataría de la constante cosmológica, un término que Einstein introdujo y luego eliminó de sus ecuaciones de la Relatividad General.

El descubrimiento de la aceleración del Universo y, por tanto, de la energía oscura, está considerado fundamental para nuestra comprensión del cosmos. Si bien hoy el *High-Z Supernova Search Team* y nuevos científicos se han integrado en varias colaboraciones con distintas denominaciones que intentan determinar la naturaleza de la energía oscura, ver el artículo de Bob Kirshner (9), el *Supernova Cosmology Project* sigue activo como tal, ampliado y operando desde diferentes puntos. Ahora, desde la Palma, no utilizamos el *Isaac Newton Telescope* o el *William Hershell Telescope* sino el *Gran Telescopio de Canarias*, de 10.4 metros de diámetro. Desde él funciona el programa del nodo de la Palma, que dirijo y al que se presta mucho apoyo, especialmente desde la dirección de operaciones del telescopio. Esta tarea está coordinada con

compañeros del *Supernova Cosmology Project*, que observan principalmente en el telescopio *Keck*, en el *Subaru*, en el *Gemini* de Hawái, el *Very Large Telescope* en Chile y telescopios menores en diámetro como el *Anglo Australian Telescope*.

Más de veinte años después del descubrimiento de la aceleración de la expansión del Universo, la naturaleza de la energía oscura se mantiene en discusión. Son miles las supernovas de tipo Ia a distintos corrimientos al rojo ("redshifts") (lo que corresponde a distintas edades en la expansión del Universo) las que han reducido las incertidumbres sobre el valor de la ecuación de estado de la energía oscura. Estamos en un punto en el que si este valor es  $-1$ , lo que equivale a la constante cosmológica o energía del vacío, ello se verá pronto.

Dentro del *Supernova Cosmology Project*, vamos a publicar próximamente los resultados del análisis de miles de supernovas de tipo Ia, la llamada muestra *Union 3*, pues es la muestra número 3 (en realidad la cuarta porque ha habido una primera muestra *Union*, una segunda y una 2. 1), desde que se publicaron los resultados iniciales que dieron lugar al descubrimiento de la aceleración del Universo y a otros posteriores que reafirmaban esas conclusiones. Como proyectos que van a nutrir esta muestra *Union 3*, destaca el proyecto *See Change*, que ha ido observando supernovas de tipo Ia en cúmulos de galaxias muy alejados.

Desde noviembre de 2016 funciona el programa llamado *SUSHI* (SUbaru utilizando la Hyper—Suprime Camera (*HSC*) y el HST para seguimiento en el Infrarrojo), en el telescopio Subaru, que está

proveyendo cientos de supernovas a alta distancia al diagrama de Hubble.



*Figura 5. Izquierda: ejemplos de SNe Ia descubiertas con la Hyper Suprime Camera en el telescopio Subaru, dentro del mencionado programa SUSHI. Cada línea contiene: imagen de referencia (izquierda), nueva imagen (medio) y diferencia (derecha). Las supernovas así encontradas están a muy alto corrimiento al rojo. Derecha: diagrama de Hubble del Subaru Suprime Project con la Hyper Suprime Camera (programa SUSHI) con SNe Ia superpuestas a las de la base de datos Union 2. 1 del SCP (puntos azules). Nuestra muestra llenará el rango  $z > 1$  de forma efectiva.*

Este diagrama muestra cómo evoluciona el brillo de las supernovas

frente a la época del Universo desde la que recibimos la luz: la época del Universo está cuantificada por  $z$ , el "redshift" o corrimiento al rojo, que es una medida de cuánto ha cambiado el factor de escala entre que explotó la supernova y el momento actual en que recibimos su luz.

Por otra parte, la misión *Nancy Grace Roman Space Telescope* se prepara para dar el asalto final a la determinación de lo que es la energía oscura. Desde el espacio se podrán alcanzar, en el infrarrojo, supernovas a muy largas distancias viniendo de un tiempo en que la escala de Universo era mucho menor que la actual. Su recogida de datos será del orden de decenas de miles de supernovas, pero mucho más lejanas. Tratará de discriminar a un nivel de precisión muy elevado si estamos en un Universo donde la energía oscura es la constante cosmológica o no. En este último caso podrá vislumbrarse de qué se trata.

Hay que decir que no solo las supernovas de tipo Ia se proponen descubrir lo que hay detrás de la energía oscura. También hay otros métodos como la utilización de las lentes gravitatorias y las oscilaciones acústicas de bariones. Por la limitación de espacio no explicaremos aquí cómo funcionan, pero damos bibliografía para su consulta (10). Estos dan por el momento resultados concordantes con los de las supernovas. Si bien, tal cual dice Bob Kirshner en su expresión literal (11): "la concordancia de estos varios métodos no significa que deban apoyarse uno en el otro cual soporte, como si fueran un trío de beodos. Por el contrario, los que utilizan cada propuesta necesitan evaluar sus debilidades presentes y trabajar

para remediarlas".

Hoy en día podemos decir que la energía oscura constituye el 69% de la materia—energía del Universo.

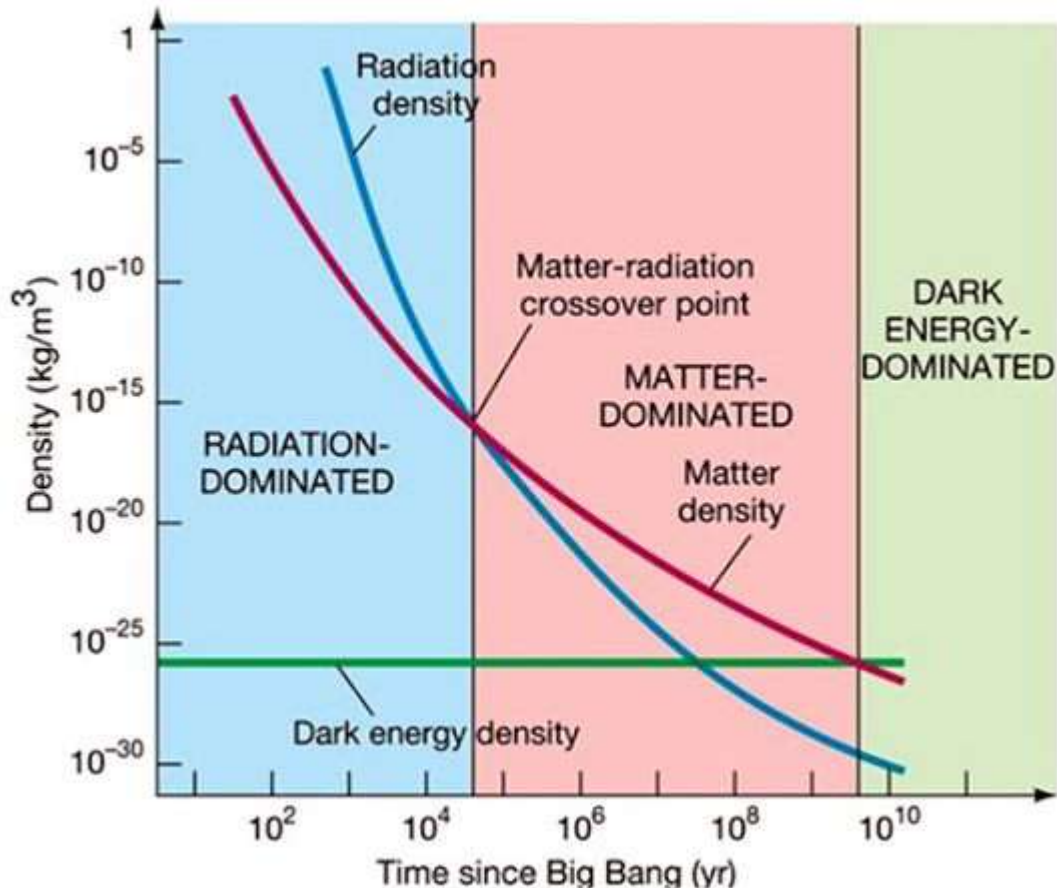


Figura 6. Las tres épocas de evolución del Universo: la del dominio de la radiación, la del dominio de la materia y la actual de dominio de la energía oscura.

Es ahora la componente dominante en la evolución de la densidad de energía—materia del cosmos. El Universo ha pasado por diferentes etapas donde el dominio de cada componente del mismo ha ido variando. Comenzamos en una era dominada por la



radiación, para continuar con una época de dominio de la materia, que ocurrió unos 60, 000 años después del *Big Bang*, y hace ya 5000 millones de años, nos encontramos en la era del dominio de la energía oscura. Esto puede verse en el gráfico que se adjunta, ver también (10).

Si la energía oscura es la constante cosmológica, nuestro Universo será infinito en el tiempo y se irá agrandando indefinidamente a la vez que se hace más frío y con una densidad muy tenue. No habrá estrellas que se formen e iluminen el cosmos, no habrá una luz que brille para otros. En este caso nos abocaremos a una muerte térmica.

Pero si la energía oscura es diferente de la constante cosmológica, pudiera ser una manifestación de la gravedad que difiere a nivel cosmológico de la Einsteniana, lo que conocemos como "gravedad modificada", o bien ser un elemento más en la composición del cosmos no identificado todavía, quizás el final sea distinto.

Por supuesto que es una investigación apasionante. Y la cantidad de instrumentación dedicada a determinar la naturaleza de la energía oscura es enorme y eso hace que este campo precise y ofrezca muchas oportunidades a los jóvenes cosmólogos.

Barcelona, a 20 de enero de 2022.

Agradecimientos.

A estas alturas de mi vida, nada sería igual de no haber participado en este descubrimiento tan extraordinario. En primer lugar, debo mi reconocimiento a mi director de tesis, Leon B. Lucy, al que siempre

estaré inmensamente agradecida, ya que, sin su apoyo, mi investigación no hubiera cuajado hacia el camino de determinar el parámetro de Hubble a lo largo del tiempo. También fue una oportunidad extraordinaria el que Bob Kirshner me invitara a Harvard. Observando las prioridades en investigación que él conducía aprendí mucho. Y ¿qué decir del camino apasionante que dio con la energía oscura en compañía de Saul Perlmutter y el *Supernova Cosmology Project*?



*Figura 7 Nobel Lecture de Saul Perlmutter, el 8 de diciembre de 2011, en el Aula Magna de Stockholm (2, 3). Reconocimiento a la labor del equipo, nuestros rostros proyectados en la pantalla.*

Ellos han sido y siguen siendo brillantes colaboradores en este estudio tan apasionante. Así mismo agradezco mucho a Nao Suzuki el haberme embarcado en el proyecto *SUSHI*.

Mis gracias van a la Universidad de Barcelona, al Instituto de Física Fundamental del CSIC y al Instituto de Ciencias del Cosmos por su gran apoyo y respaldo al proyecto. Y sin duda, a los comités que asignan tiempos para este proyecto en La Palma y al director de operaciones del *Grantecan*, Antonio Cabrera Lavers. Por último, quiero felicitar a mis estudiantes que examinan qué puede ser la energía oscura contrastando ideas teóricas con observaciones. Ellos son el futuro y no hay nada mejor que ver despegar sus brillantes carreras pues son las nuevas generaciones que nos iluminarán de forma definitiva sobre la naturaleza de la energía oscura causante de la aceleración del cosmos.

#### Bibliografía:

(1) Ruiz—Lapuente, P. & Lucy, L. B. (1992). *Nebular spectra of Type Ia Supernovae as probes for extragalactic distances, reddening and nucleosynthesis*. *Astrophysical Journal*, 400, 127 (artículo de tesis, ver también(12)).

(2) Perlmutter, S. (2011): <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2011/perlmutter/lecture/>

(3) Perlmutter, S. (2012). *Nobel Lecture: Measuring the acceleration of the cosmic expansion using supernovae*. *Rev. Mod. Phys.* 84, 1127—1148:

<https://journals.aps.org/rmp/pdf/10.1103/RevModPhys.84.1127>

(4) Sandage, A. (1961). *The ability of the 200—inch telescope to discriminate between selected world models*, *Astrophysical Journal*, 133, 355.

(5) Garnavich, P. M. , Kirshner, R. P. , et al. (1998). *Constraints on cosmological models from Hubble Space Telescope Observations of high—z supernovae*. *Astrophysical Journal*, 439, L53—L57.

(6) Goldhaber G. (2009). *The acceleration of the expansion of the Universe: A brief early history of the Supernova Cosmology Project (SCP) in Sources and detection of dark matter and dark energy in the Universe: Proceedings of the 8th UCLA Symposium*. *AIP Conference Proceedings*, 1166, 53—72.

(7) Perlmutter, S. , et al. (the *Supernova Cosmology Project*). (1999). *Measurements of Omega and Lambda from 42 high—redshift supernovae*. *Astrophysical Journal*, 517, 565—586.

(8) Riess, A. G. (the *High—Z Supernova Search Team*). (1998). *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*. *Astronomical Journal*, 116, 3, 1009—1038.

(9) Kirshner, R. P. 2010. *Foundations of supernova cosmology*, in *Dark energy: Observational and Theoretical Approaches*, ed. Pilar Ruiz—Lapuente (Cambridge: Cambridge University Press), 151—176.

(10) Ruiz—Lapuente, Pilar (2019). *La aceleración del Universo*. ed. La Catarata.

(11) Kirshner, R. P. 2010. *Foundations of supernova cosmology*, in

*Dark energy: Observational and Theoretical Approaches*, ed. Pilar Ruiz—Lapuente (Cambridge: Cambridge University Press), 164.

(12) Ruiz—Lapuente, P. (1996). *The Hubble constant from  $^{56}\text{Co}$  powered nebular candles*, *Astrophysical Journal*, 465, L83—86.

[Pilar Ruiz Lapuente](#).

Doctora en Astrofísica.

Profesora de investigación en el Instituto de Física Fundamental (IFF—CSIC), Profesora visitante en el ICCUB.

## Capítulo 5

### La tensa estimación del ritmo de expansión (del Universo).

Arranco este capítulo alertando de que nuestro dedicado coordinador (Quintín Garrido) no conoce aún el tamaño de mi falta de pudor y de que yo aspiraba a titular este capítulo algo así como "tensión en el universo: ni sexual ni tampoco resuelta". Sería esa una manera de encauzar el relato con una pequeña broma hacia su contenido fundamental, la cuestión de que existe una fuerte tensión en la interpretación de los datos cosmológicos que obtienen diferentes equipos de investigación respecto al ritmo de expansión del Universo.

Es como si el Cosmos nos tomara a chirigota planteándonos serios enigmas a través los datos que provienen de las observaciones, que es la manera en que nos habla de sí mismo. Y si ya nos cuesta hacernos una mínima idea de lo que significa que se encuentre en expansión, más dura de tragar se nos hace la presencia de una discrepancia en la medida de esa expansión, es decir, una tensión en ese valor, ya que unas medidas apuntan hacia un lado y otras hacia otro. Y, además, en términos estadísticos el desencuentro es muy marcado, lo que indica la gravedad del problema. Resumiendo, y anticipando, un puzle que se traduce en que grupos de científicos de lo más granado llevan en pugna ya unos cuantos añitos porque no se ponen de acuerdo en dicho resultado.

Pero, retomando el poco serio tono del arranque, quiero pedir permiso al coordinador para imaginar una conversación entre él y

yo. Advierto de que es una pura licencia literaria. En mi trastornada cabeza de cosmóloga despeinada nuestro diálogo sería algo como lo que sigue, con nuestro coordinador tomando la iniciativa de la charla.

—He visto el título que me propones, estimada colaboradora, pero quizá hayas creído que este libro es una pieza en esa conocida nueva red social de dudoso gusto y quieres aprovecharte de mi confianza para contar cosas inapropiadas.

—Te equivocas, voy hablar de una tensión de naturaleza no sexual, pero el chiste encajaba bien. Además, estimo que este libro está orientado a edades donde ya las palabras que empiezan por s y contienen x no les son ajenas, y con cierta gracia se pueden usar para trufar un relato científico de cierto humor.

—Bien, me presto al juego. Ya sabes que yo me siento como Brian May, el eterno aspirante a doctor en cosmología.

—Pues por eso te quería proponer este tema, para que puedas contar algo asequible a toda esa gente que confía con buen tino en que tus proyectos acaban siendo realidades muy sólidas.

—Ya, pero me das pánico, que en mi dilatada experiencia me ha tocado sufrir de lo lindo para haceros entender a los investigadores que debéis prescindir de conceptos arcanos cuando queréis acercar la física a la audiencia.

—Tranquilo, confía en mí, de verdad, que creo que voy a ser capaz de contar de manera muy sencilla que el universo se está expandiendo cada vez más rápido, pero no se sabe cuánto porque las estimaciones de los experimentos más importantes están

alejadas unas de otras. En concreto me refiero a los valores que dan Planck y Hubble.

Llegados a este punto de la precedente farsa el lector puede ya haberse involucrado tanto en el cuento que piense que esta colaboradora está haciendo al coordinador escoger entre un eminente físico con bigote (Planck) y otro sin él (Hubble). ¿Se quedaría nuestro prócer con el segundo por una mera cuestión estética o porque quizá le suene ese nombre en relación con la expansión del universo? Quizá toca ya salir de esta ruta de la broma con poco contacto con la ciencia.

No es tanto el objetivo ahora de hablar de personas, sino de sendos instrumentos que nos han permitido acceder a notabilísimo conocimiento sobre el Universo. Esos dos laboratorios (en el amplio sentido de la palabra) llamados respectivamente Planck y Hubble no son sino unos muy sofisticados satélites artificiales, sí de esos que orbitan en torno a la Tierra y que siempre son protagonistas en el examen de física de las pruebas de acceso a la universidad, que si a qué velocidad gira, que si cuánto tarda en dar una vuelta entera ...

Sospecho que tras leer este párrafo al coordinador le entre el miedo de que yo vaya a perder el hilo de nuevo. Pero no, voy a lo que importa y procedo a explicar (si bien siguiendo numerosos vericuetos) por qué hay un satélite al que no se llama tal, sino telescopio espacial (que también lo es), por qué se denomina Hubble y por qué es relevante en esta historia.

Imagino que alguno de los lectores se habrá calentado en alguna ocasión con una fogata. Cuando se está cerquita de ella ese foco rojo



casi quemar, y a medida que nos alejamos lo sentimos cada vez menos. Traigo a colación este ejemplo porque se asemeja mucho a una estrella emitiendo luz de frecuencia fundamentalmente infrarroja que no vemos, solo sentimos su calor. Por supuesto también emite un poquito de luz roja, naranja y amarilla, que es la que la vemos. De hecho, las cantidades de esas frecuencias que emitirán esas fuentes las describe la ley de Planck, pero no toca hablar de él en este momento, aunque sirve como buen anticipo.

Retornemos a la idea principal. Toda la energía que transportan los fotones o partículas de luz que escapan de la hoguera (o de la estrella a la que representa) se va repartiendo a cada instante en la superficie de una esfera más y más grande, la esfera que forman todos los fotones que han sido emitidos en un mismo instante y que cada vez se encuentran más lejos de la fuente original. Es decir, en la esfera que hace de avanzadilla, por así decirlo, tenemos el mismo número de partículas que las que comenzaron el viaje, pero mucho más repartidas (al ir creciendo el tamaño de dicha esfera) y eso es básicamente el motivo por el cual al alejarnos sentimos menos el calorcito, a cada centímetro de nuestra piel llegan menos fotones. Quizá en este momento el lector considere conveniente retirarse un momento a tomar un vaso de agua, porque los procesos cerebrales también necesitan hidratación.

La analogía de la fuente de calor que nos conforta menos cuanto más lejos nos encontremos de ella plantea en términos muy simplistas la manera en que más o menos se mide la distancia a la que está un objeto astronómico luminoso. Siguiendo con el símil, si

tomamos dos lámparas del mismo modelo y las colocamos a diferentes distancias y medimos cuanto nos calientan, podremos comparar cuan alejados estamos de ellas. Pero en astronomía no tenemos lámparas, sino estrellas, y su luz es muchísimo más energética, es fundamentalmente visible.

Confío en que los lectores sigan con el interés intacto en este punto, y que sobre todo no hayan caído en el desánimo; en caso contrario apelo a contactar al resto de colaboradoras para que discretamente les faciliten referencias quizá más claras y contundentes que este texto mío tan irreverente. Y aprovecho la ocasión para agradecer al coordinador hacerme sentir que yo soy Dumbo y que él simplemente me ha dado la plumita.

Seguramente ya habrá surgido la pregunta de qué tiene que ver la expansión del universo con la distancia a objetos que nos envían su energía. Y, si no es el caso, sepa el estimado coordinador que estoy poniendo todo mi esfuerzo de guiar el relato para llegar a ese punto.

Le pido ahora que imagine un panettone, de esos que de un tiempo a esta parte están ocupando en épocas navideñas publicaciones de todos los bloggers, instagramers, twitterers, influencers, y *whateverers* que nos podamos imaginar. La masa inicialmente cruda contiene pasas con cierta separación entre sí (al menos en la receta original). Pero al hornearla para que nos dé el sabroso bollo final, la masa en la que están colocadas las pasas crece, haciendo que se separen unas de otras y todas de todas, si bien las pasas no cambian de tamaño.

Si ahora piensa mi coordinador que las pasas son las galaxias y la

masa es el espacio—tiempo verá que las posiciones con respecto a su posición inicial en la masa no han cambiado, las que han mutado han sido las distancias relativas entre unas pasas y otras.



Figura 1. Pannetone. Fotografía de Vicky Ng en [Unsplash](#).

Y si con la paciencia que le caracteriza mi acompañante va midiendo la distancia entre las pasas durante el proceso de horneado podrá ver como se expande su *pannetoneverso* (o universo representado por un pannetone).

Es en este momento cuando me asalta el temor de que un colaborador de mi coordinador y mío propio me acuse de ser mala

repostera por haber instado a abrir el horno antes del fin del proceso. Y la reprimenda sería justificada, así que como el resultado no va a depender mucho de ello, autorizo a que se realice la medida solo al final, para que no sufran los lectores más preocupados de que salga bien el pannelone que de aprender física. El proceso de medida entonces nos arrojaría el dato de cuanto se han separado las pasas/galaxias, y en cuanto tiempo de horneado/expansión ha tenido lugar esa separación.

Es ahora cuando aprovechando que el cerebro de mi coordinador haya recibido su buen alimento en forma de azúcar que trataré de volverle un poco (más) tarumba (aún). El motivo no es otro que ahora conviene aclarar que los astrofísicos en realidad no usan un cronómetro cósmico, sino una especie de cuentakilómetros. Así que, en honor a las clases de física general que ojalá tomen esas personas a las que consigamos inspirar con estos textos, vamos con el típico problema académico.

Si la velocidad de un coche se mide en km/hora y sabemos que de Bilbao a Andorra hay unos 400 km, y Google Maps nos dice que tardaremos en recorrerlos unas cuatro horas (descontando las paradas técnicas), entonces simplemente nada más que dividiendo la distancia entre tiempo obtendremos una razonable media de 100 km/h, que deberíamos ir viendo en nuestro cuentakilómetros durante el trayecto.

Eso básicamente hacen los astrónomos, como quien se saca un conejo de la chistera, cosa a la que estarán seguramente acostumbrados aquellos lectores que hayan tomado alguna que otra

lección de física en su vida. Pero, ¿cómo miden la velocidad a la que se separa de nosotros una galaxia o una estrella que en ella habite? Pues lo hacen usando una versión sofisticada del efecto Doppler: igual que el ruido de la sirena de una ambulancia se hace más grave cuando se aleja, la luz de las estrellas al alejarse se vuelve un poco más roja (o menos azul). La sorpresa que llegó hace casi cien años con uso certero de esos datos fue que cuanto más lejos se encuentra una estrella de nosotros más rápido se alejará, lo cual conduce a concluir que el universo se encuentra en expansión.

El autor de tamaña hazaña fue el archifamoso Edwin Hubble, asistido por el hoy reconocido Milton Humason. Curiosamente, el hecho de que a día de hoy se acredite al colaborador afroamericano de Hubble y lo chocante que se nos hacen actualmente los numerosos retratos del famoso astrónomo fumando en pipa nos darían material para disertar horas y horas sobre importantes cambios en nuestra sociedad sobre los que toca ahora pasar de soslayo para ir a las preguntas importantes: ¿cuál es el ritmo de expansión del universo?, ¿qué le ocurre a la velocidad si la distancia se multiplica por dos o por tres o por cuatro?

La cantidad que relaciona la velocidad de alejamiento (o recesión) y la distancia lleva el nombre de constante de Hubble (como quizá no podía ser de otra manera) [1], y de acuerdo con la ultimísima estimación de su valor por el equipo liderado Adam Riess (ganador del premio Nobel) se tendría que una estrella que se encuentra a 1 megaparsec de nosotros se está alejando a 73 km/s, y una que esté al doble de distancia se alejará al 146 km/s [2]. Aprovecho este

momento (no cumbre) en mi relato para apuntar la curiosidad de que un año—luz es a un parsec aproximadamente lo que un pie es a un metro, por si a alguien le resulta de utilidad esa regla mnemotécnica.

Por esta regla de tres, quizá mi versátil e inquieto coordinador adoptando una pose de James Bond con la mano en la mandíbula me sugiera que ha tenido un instante "ajá" y me diga que entonces una galaxia que se encuentre a 3 megaparsec se alejará entonces a 219 km/s. En todo esto habría que hacer un par de sutiles correcciones, porque en el espacio—tiempo curvo nada es exactamente lo que parece, maldito Einstein. Pero volviendo al esquema a grandes rasgos, lo curioso es que ... a medida que miras más lejos o más profundo en el universo se ve que ese ritmo ha ido creciendo con el tiempo, es decir, que el ritmo no era tan rápido tiempo atrás, y aún menos rápido tiempo y tiempo atrás. Es decir, el universo se encuentra en expansión acelerada. Más adelante arrojaré unos numeritos para dar una idea de cuál ha sido el cambio, pero para ponerlos en contexto hace falta algo más de pedagogía.

Confío, no obstante, en que las líneas precedentes hayan asentado la idea de que el juego radica en medir distancias por un lado [3] y velocidades por otro. Ya hemos hecho algún apunte muy superficial de la manera en que se hace esto, pero, como quien gira en espiral hacia el ojo de un torbellino, vamos dando vueltas que nos ayudan a profundizar.

El mencionado Edwin Hubble, a quienes algunos se refieren como el

marinero de las nebulosas realizó (junto con su compañera) un formidable trabajo en esta línea. Consistió en primer lugar en identificar dos docenas (de cierto tipo) de estrellas variables [4], y en segundo lugar en estimar su distancia y velocidad de recesión. Al representar esas dos magnitudes físicas encontró esa relación lineal a la que me he referido antes, que dice que la distancia y la velocidad crecen en la misma proporción.

Para medir la velocidad de recesión, Hubble se subió a los hombros del gigante Newton, y se valió de la poderosa técnica llamada espectroscopía, que es básicamente una lectura detallada de los sofisticados arco iris [5] que producen las galaxias, las estrellas, las nubes que él llamaba nebulosas porque eran galaxias que él veía borrosas, etc, etc, etc. Pero claro, la poesía da lo que da, y las palabras bonitas sin contenido no enseñan física.

Entrando en honduras, cuando un haz de luz blanca entra en contacto con la materia se producen fenómenos de absorción y emisión de las distintas longitudes de onda que componen dicha luz. Exactamente a la manera en que le sucede al prisma que usaba Newton. Los distintos astros (estrellas, galaxias) producen patrones característicos y propios, a la manera de huellas dactilares, que sirven para hacer clasificaciones. Básicamente tendremos una sucesión de franjas de distintos colores y anchuras. Si comparamos dos espectros y vemos que el patrón de anchuras se repite, pero los colores aparecen un poco alterados, por ejemplo, con los amarillos tornándose naranjas y los naranjas tornándose rojos, habremos detectado un corrimiento al rojo [6], es decir, un aumento de la

longitud y una disminución de la frecuencia, y el objeto con más poderío del rojo se estará alejando a mayor velocidad.



*Figura 2. Escalera. Fotografía de Cesar Cid en [Unsplash](#).*

Pero no conviene olvidar que el trabajo de Hubble tenía una segunda componente, que consistía en adivinar la distancia a la que se encontraban esas estrellas variables, de tipo cefeida protagonistas de ese pasado que nos suena remoto y del mucho más cercano, en relación con la tensión de la que hablaba en el arranque.

La tortuosa cuestión de las medidas en astronomía se basa en una



cruda realidad, y es que es prácticamente imposible hacer medidas directas. Medir la distancia a una estrella no es como medir la longitud de un lado de tu mesa de comedor cuando quieres comprar un mantel *cuqui* para taparla. En astrofísica y cosmología casi (casi) siempre hay que recurrir a modelos físicos. Más en concreto, los usamos para construir la escalera cósmica de distancias, una concatenación de métodos que nos permite calcular distancias a objetos lejanos basándonos en las de objetos intermedios, que a su vez se apoyan en las de objetos cercanos.

En la base de la escalera se sitúa el paralaje, que es esa técnica trivial a la que podemos dar un primer mordisco de una manera muy simple. Bastaría con situar un dedo frente a nuestra nariz y un poco alejado, guiñar sucesivamente el ojo izquierdo y el derecho, y observar cómo cambia la posición relativa del dedo respecto al fondo. Perfeccionamientos al nivel de los más sofisticados recursos del conocimiento humano ponen esa herramienta tan elemental al servicio de la astronomía, usando recursos más valiosos como el Sol, cúmulos de galaxias, la propia espectroscopía, etc.... (conviene recurrir con frecuencia al etc. para ocultar la ignorancia propia). Y es una manera muy potente de medir distancias porque no tiene en cuenta en absoluto la física que caracteriza al astro en cuestión.

Pues bien, a pesar de lo anterior, precisamente el poder recurrir a modelos físicos fue lo que permitió a los pioneros de la cosmología escalar peldaños en esa escalera cósmica de las distancias. Y, en concreto, en los niveles más bajos se encontrarían las estrellas variables a las que recurrió Hubble. Para esbozar la manera en que

se usan podemos volver a recordar que la luz que nos llega de dos objetos luminosos físicamente idénticos depende de su posición. La cuestión es cómo concluir esa equivalencia o en su defecto poder cuantificar su diferencia (en un planteamiento de punto gordo, lógicamente). Es decir, queremos (o más bien nos conviene) estimar la luminosidad intrínseca de un tipo de estrellas, en este caso las llamadas cefeidas. Y cuando decimos intrínseca nos referimos a la esencial, a la que no depende de los pormenores.

La historieta que sigue está muy alineada con la moda de la economía de KMO, porque tiene como actores secundarios a dos galaxias enanas, muy cerquita de la nuestra (la Vía Láctea), y que son comparativamente más ricas en gas, lo cual sugiere que hacemos bien en llamarlas nubes. Ellas son la Pequeña y la Gran Nube de Magallanes, y llevan el nombre de quien primero las divisó (en su famoso viaje), aunque fuera el inmenso John Herschel el pionero que se puso en serio a estudiarlas. En ese exótico lugar del universo se encuentran las casi 50 estrellas de tipo cefeida que identificó la icónica astrónoma Henrietta Leavitt [7]. Avezadamente ella concluyó que dichas estrellas se encontrarían prácticamente a la misma distancia de nosotros y, por tanto, los cambios en luminosidad aparente serían causados por luminosidad intrínseca. Este sería pues el primer paso para poder comparar la situación física de las distintas cefeidas que ella observaba. A grandes rasgos cuanto más luminosa es una cefeida más lentas son sus pulsaciones, es decir crecerá el intervalo de tiempo que transcurre entre los instantes en los que la luminosidad alcanza el máximo y el

mínimo. Conviene apuntar que esta matemática relación no es lineal, sino que viene mediada por esa función llamada logaritmo que generalmente causa sudores con su sola mención.

La otra pieza clave llegó cuando Ejnar Hertzsprung (el astrónomo de apellido bien conocido para los estudiantes de astrofísica) estimó por paralaje la distancia a esas cefeidas, casi cerrando el círculo, es decir, proporcionando los elementos para que después llegara Hubble y diera el golpe maestro confrontando distancias y velocidades de recesión. Pero digo que casi se cerró el círculo porque el diablo está en los detalles, y pequeños errores pueden ser causantes de una gran incertidumbre en la medida. Como por ejemplo el hecho de que la clasificación hubo de afinarse muy temprano (históricamente) teniendo en cuenta que hay dos tipos de cefeidas, nuevas y viejas. A partir de ahí fue un no parar de incorporar más y más parámetros físicos a la relación entre periodo y luminosidad para aumentar lo más posible la precisión en la estimación de la luminosidad y consecuentemente la velocidad de recesión de dichas estrellas.

Y dando un salto temporal lo suficientemente grande como para cubrir varias décadas nos encontramos con el mítico telescopio Hubble y sus hallazgos, un portentoso instrumento que lo mismo vale para un roto que para un descosido. Y es que, aparte de proporcionarnos datos sin parangón para calcular la constante que lleva su nombre, también ha realizado visitas anuales a los planetas gigantes del sistema solar con el objetivo de explorar sus atmósferas.

Volviendo a la cuestión de la escalera, el equipo de Adam Riess [8] ha conseguido con apenas tres peldaños determinar que el valor de la constante de Hubble ( $H_0$ ) es de 73 km/s/Mpc con una incertidumbre de tan solo 1/km/s/Mpc. Esto quiere decir que hay menos de 1 posibilidad entre 1 millón de que una fluctuación aleatoria dentro del ruido de fondo nos dé un valor de 67 km/s/Mpc. ¿Y por qué nos preocupa ese valor concreto y no otro? Pues simple y llanamente porque es la estimación que arroja el otro gran contendiente, el satélite Planck [9]. Este otro actor de la física de la expansión del universo es un explorador del cosmos más primitivo, lo que es equivalente a decir que se vale de las señales que nos llegan de los confines más remotos.

Ese satélite proporciona datos exquisitos del fondo cósmico de radiación de microondas [10], en concreto de las pequeñas fluctuaciones de un baño de radiación térmica que obedece la ley precisamente enunciada por Max Planck y que podemos detectar orientando una antena en cualquier dirección del espacio, y cuando digo antena, puedo hacerlo incluso con la de la televisión de casa, aunque vaya a recoger una imagen cochambrosa que no me sirva para hacer física. Así que volvamos al portentoso satélite Planck y veamos qué nos cuenta respecto a la constante de Hubble.

En el universo primitivo, dominado por materia y radiación, la pugna entre ambas dejaría atrás un patrón único en la energía de los fotones que se liberaron de participar en el campeonato de billar que suponía chocar una y otra vez con los átomos, esos fotones que una vez finalizada su esclavitud llegaron a nosotros apenas sin

obstáculos, tan solo acaso pasar rozando alguna galaxia que otra y desviarse un poco por la atracción gravitatoria. En ese universo primitivo, la materia atraería más materia, calentándola por el aumento de densidad y contribuyendo a más radiación, que con su presión característica actuaría precisamente en el sentido contrario, diluyendo esa densidad. Explorando coincidencias o discrepancias en distintos puntos de la esfera celeste a razón de sus distancias (medidas en ángulos) se puede construir una curva sinuosa que mágicamente nos informa entre otras cosas del ritmo de expansión del universo actual. No voy a entrar, no obstante, en las características de esa curva porque corro el peligro de pillarme los dedos, y pillármelos tan fuerte que me lleven al cuarto de socorro, y no es plan con lo mal que está ahora la atención primaria.

Esa física de la radiación de fondo que he explicado de forma tan burda nos informa de la cantidad de materia (sobre todo en sus formas más abundantes) en el universo primitivo, y nos proporciona esa información a través de unos fotones que viajan durante billones de años hasta llegar a nosotros, a través de un universo que no ha estado quieto, sino expandiéndose. Para atar esos dos cabos, lo de antes y lo de ahora recurrimos a las ecuaciones de Einstein, que nos dirían cómo habría sido esa evolución de acuerdo con ese contenido, es decir, esa fuente de curvatura espacio—temporal. O más bien, estamos haciendo una extrapolación fortísima, al menos en el plano de las distancias y los tiempos. Por otro lado, medidas independientes y complementarias nos dicen que la medida de las proporciones de materia que arrojan esos datos son exquisitas. El

problema es que las medidas de cantidad de materia y de ritmo de expansión están muy atadas la una a la otra, así como al resto de piezas que necesitamos para reconstruir el puzzle, un pequeño error en una se propaga en los otros, como el famoso efecto mariposa. Es por eso que hay que tratar con cautela la estimación del valor de la expansión que se obtiene de esos datos.

Pero los problemas que acarrea la incertidumbre no son ajenos a las medidas locales, a las que hemos dicho que se hacen con las cefeidas. En realidad, es algo inevitable en cualquier medida física. Para entenderlo con una pequeña analogía podemos pararnos a pensar en la manera en que mediríamos la alfombra de nuestro salón—comedor. ¿Usaríamos una cinta métrica o iríamos palmo a palmo? La experiencia nos dice que justamente es el primer método el más certero, porque parece obvio que hay que atinar mucho al desplazar la mano para colocarla justo donde estaba el final de la mano en la medida previa.

Es por eso fundamental asentarnos muy bien en cada peldaño de la escalera cósmica de distancias antes de atacar el siguiente, lo que se traduce en que, a ser posible, es conveniente estimar por varios métodos independientes las distancias a los objetos astronómicos que conforman cada peldaño. En el primero tenemos tres solistas y un coro. A saber, el coro serían las cefeidas de la mismita Vía Láctea, y los solistas la Gran Nube de Magallanes, Andrómeda, y la galaxia NGC 4258, Distintas técnicas se van combinando para ajustar en la medida de lo posible y sin contaminaciones cruzadas las distancias a esos objetos, o más bien las cefeidas que en ellos se

hallen. Aparte de usar la técnica de periodo—luminosidad también se usan paralajes casi al estilo clásico, medidos con otro bonito telescopio satelital (GAIA) u alternativas menos usuales, como explotar espectroscópicamente la presencia de un máser [11, 12] (la versión microondas de un láser) en esa galaxia antes referida y que aún no tiene un nombre bonito. El segundo escalón incluye datos de explosiones de supernovas, fenómenos raros y transitorios con una luminosidad que asciende y desciende de forma muy determinada y que fueron claves en mostrar la expansión acelerada del universo. Precisamente la disminución de la incertidumbre viene del aumento de objetos en este tramo. El tercer escalón solo incluye supernovas, que también ejercen su influencia en cierta medida, porque es un rango suficientemente lejano para que ya los efectos de la teoría de la relatividad, o de la curvatura del espacio—tiempo vayan notándose.

A nivel teórico somos muchos los que nos devanamos los sesos jugueteando con las ecuaciones de esa teoría a la que me acabo de referir, y que nos pone de nuevo en contacto con la idea de que para estimar bien el valor de  $H_0$  tenemos que conocer la composición del universo. Si pensamos en la materia y la energía oscuras, sus componentes dominantes como los nutrientes de ese universo que ha crecido, podemos hacer una analogía muy básica, que es aquella de la importancia de la alimentación en el desarrollo de nuestros niños y niñas. Dicen los que saben que la escasez o la mala calidad de los alimentos tiene un impacto negativo en su crecimiento y parece por ello entonces obvio que las alteraciones en el suministro

de energía y materia oscuras en el universo han influido en la diferencia entre la separación entre sus galaxias entre diferentes épocas, o sea, la medida del cambio de estatura de nuestra criatura a lo largo de su crecimiento.

Resumiendo una vez más, y entendiendo que "esta gente sabe lo que se trae entre manos", parecería que la pugna entre los datos de Planck y los de Hubble es como elegir entre Lionel Messi y Cristiano Ronaldo, argumentos a favor de uno y de otro. Pero igual que no faltan candidatos al trono del fútbol mundial, que si los Haaland, los Mbappé, los Donnaruma, también encontramos en cosmología posibles reemplazos. En realidad, en este caso tenemos una alternativa conciliadora [13], por así decirlo, los recientes datos de la puntita de la rama de las gigantes rojas, es decir, el conjunto de las estrellas más brillantes dentro de esa caracterización (gigantes y rojas). El dato que sugieren cae entre los dos extremos,  $69.6 \pm 2.5$  km/s/Mpc, y se puede argumentar que se debe en parte a que la física de esas estrellas se conoce con más precisión, recordemos la dependencia del modelo subyacente. Hay quien insiste en errores sistemáticos en el tratamiento numérico [14], hay quien apela con deliberada ambigüedad a que haya física inexplorada, y hay quien sufre en silencio viendo el modelo que la gente de Hubble usa para adentrarse en la zona einsteniana. Hay también quien usa otro tipo de estudios astrofísicos completamente distintos, por ejemplo las lentes gravitacionales, para acabar ofreciendo apoyo a un bando u otro.

Claramente, esta contienda en torno al valor de la expansión del



universo no se va a resolver en dos tardes tontas, aunque espero que robe la denominación de "debate del siglo" a aquel que aconteció entre Zizek y Peterson. Y anhele también que uno de los que más contribuya a disipar el misterio sea el singular telescopio espacial James Webb, con sus excelentes capacidades infrarrojas, el cual en el momento de escribir estas líneas no hace más que un telediario de noche que llegó a su definitivo hogar, el punto de Lagrange L2. Y desde ese punto privilegiado del universo desde nuestra visión antropocéntrica nos llenará de conocimiento sin precedentes no solo a través de las incógnitas más traicioneras del universo a gran escala, sino quizá de otras filosóficamente más relevantes, ¿hay algún lugar en el Universo susceptible de acoger vidas que se hagan este tipo de preguntas o quizá otras de otro calibre?

#### Referencias:

- [1] <https://www.emis.de/journals/LRG/Articles/lrr-2015-2/articlese4.html>
- [2] <https://elpais.com/ciencia/2020-12-17/el-universo-puede-expandirse-a-mayor-velocidad-que-la-de-la-luz.html>
- [3] <https://kids.frontiersin.org/articles/10.3389/frm.2019.00142>
- [4] <https://courses.lumenlearning.com/astronomy/chapter/variable-stars-one-key-to-cosmic-distances/>
- [5] <https://hubblesite.org/contents/articles/spectroscopy-reading-the-rainbow>

[6] [http://astro.wku.edu/astr106/Hubble\\_intro.html](http://astro.wku.edu/astr106/Hubble_intro.html)

[7]

[https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/variable\\_cepheids.html](https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/variable_cepheids.html)

[8] <https://inspirehep.net/literature/1986964>

[9] <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2020/09/aa33910-18/aa33910-18.html>

[10] <https://briankoberlein.com/blog/three-peaks-big-bang/>

[11] <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/m/Masers>

[12] <https://einstein.stanford.edu/content/faqs/maser.html>

[13] <https://arxiv.org/abs/2002.01550>

[14] <https://francis.naukas.com/2022/01/10/el-problema-de-la-constante-de-hubble-se-refuerza/>

[Ruth Lazkoz.](#)

Doctora en Física.

Profesora Titular, Euskal Herriko Unibertsitatea / Universidad del

País Vasco.

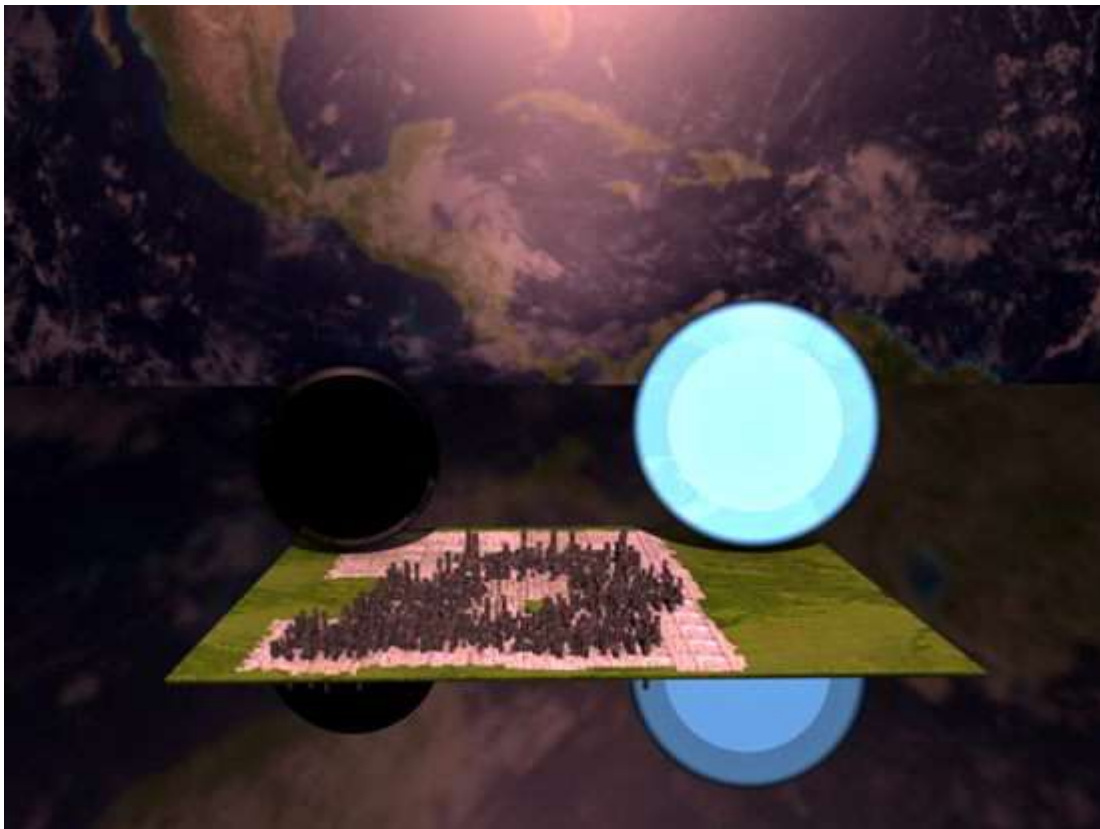


*Fotografía tomada en el 2º Congreso Solvay celebrado en 1913, "La Estructura de la Materia". De pie, de izda. a dcha.: Friedrich Hasenöhrl, Jules—Émile Verschaffelt, James Hopwood Jeans, William Lawrence Bragg, Max von Laue, Heinrich Rubens, Marie Curie, Robert Goldschmidt, Arnold Sommerfeld, Edouard Herzen, Albert Einstein, Frederick Lindemann, Maurice de Broglie, William Jackson Pope, Eduard Grüneisen, Martin Knudsen, Georges Hostelet, Paul Langevin. Sentados, de Izda. a dcha.: Walther Nernst, Ernest Rutherford, Wilhelm Wien, Joseph John Thomson, Emil Warburg, Hendrik Antoon Lorentz, Léon Brillouin, W. Barlow, Heike Kamerlingh Onnes, R. W. Wood, G. Gouy, Pierre—Ernest Weiss. [Proceedings 1913](#)*

## Capítulo 6

### Estrellas de neutrones: objetos densos y fríos en las antípodas de nuestra estrella solar.

De manera frecuente nos sobrecogemos al pararnos a pensar en la magnitud de las distancias y cantidad de materia presente en los objetos y estructuras que existen en el Cosmos. Esto sucede porque es habitual compararlas con las humanas.



*Figura 1 Ilustración del tamaño relativo de una estrella de neutrones (derecha) y un agujero negro (izquierda). Crédito: Anynobody, CC BY—SA 3.0, via Wikimedia Commons*

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/29/Earbhnsctit>

[y.png](#)

Así, reconocemos que la altura de un edificio es típicamente de decenas de metros, o la masa de un coche ronda los 2000 kg, por ejemplo. Imaginemos ahora y por un momento un objeto estelar con las dimensiones de un área metropolitana de una ciudad grande, digamos con un radio de unos 12 km, como la distancia entre la Puerta del Sol en Madrid y Getafe y con una masa cercana a dos veces la masa solar ( $4 \cdot 10^{30}$  kg). Ciertamente la densidad de tal objeto sería gigantesca, mucho mayor que la del interior del núcleo atómico, dicho en otras palabras, sería como la resultante de condensar la Tierra a una esfera de 40 m de radio. Dejemos ya de imaginar: este tipo de objetos existen en nuestro Universo y las fuerzas necesarias para formarlos son las fuerzas gravitatorias, las mismas que mantienen unido nuestro Sistema Solar.

Hasta el momento se han detectado experimentalmente varios cientos de ellas vagando de forma aislada o bien formando binarias con una estrella acompañante. Su origen también es conocido, aparecen al final de la estela evolutiva de estrellas progenitoras muy masivas, cuya masa es superior a unas 8 veces la masa solar. A través de una serie de reacciones nucleares que van formando elementos cada vez más pesados en el interior de estos objetos la energía liberada es capaz de soportar la presión de colapso gravitatorio. Sin embargo, llega un momento, cuando se forma Níquel, en que esto ya no es posible y la estrella empieza a "neutronizarse" formando una materia cuyo contenido no son

núcleos (como ocurre en el sol) sino una sopa de hadrones (principalmente neutrones y en menor medida protones) inmersos en un baño de electrones.



*Figura 2 Petrógrafo anasazi en Canal del Chaco, Arizona, EEUU.*

*Crédito: Alex Marentes, CC BY—SA 2. 0, via Wikimedia Commons, [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/ba/Anasazi\\_Supernova\\_Petrographs.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/ba/Anasazi_Supernova_Petrographs.jpg)*

El evento que lleva a esta formación de la estrella de neutrones libera grandes cantidades de energía que podemos detectar en la Tierra a través de los subproductos de estas reacciones: radiación electromagnética, neutrinos e incluso ondas gravitatorias como sirenas cósmicas que nos alertan si esto ocurre en nuestra galaxia o

incluso más lejos. Esto ya pasó en febrero de 1987 cuando tuvo lugar la explosión de Supernova SN1987A, la cual fue ampliamente estudiada y sirvió para entender el mecanismo interno de formación mejor que nunca antes en la historia de la Física.

Ya en las tribus anasazi en lo que hoy es Arizona, en Norteamérica pudieron observaren julio de 1054 en el firmamento y a simple vista el fulgor de estos eventos explosivos y plasmarlo en petrógrafos. En otro continente, en China en julio del citado año de 1054, el astrólogo de la corte Yang Wei—te anunció la llegada de una nueva estrella al emperador:

*"...humildemente observé que una estrella huésped había aparecido; encima de dicha estrella había un débil halo, de color amarillo..."*.

De igual manera, hoy en día seguimos con avidez y tecnología avanzada los que tienen lugar en la región del Universo que poblamos.

Su estructura se basa en capas concéntricas que van desde las de mayor densidad en el centro, hasta las de densidad menor en el exterior. De modo científico la región interior, de unos 11 km de radio se conoce como núcleo o core, mientras que la exterior, de grosor aproximado de 1 km, constituye la corteza [1]. En el núcleo la materia es una sopa similar a un líquido nuclear ultradenso y permeado por campos electromagnéticos mientras que en la corteza la materia forma estructuras de tipo no homogéneo, con cavidades, filamentos, lascas, que se conocen genéricamente como "pasta

nuclear". El porqué de este nombre hay que buscarlo en las similitudes con las formas de "spaghetti" y "lasagna" que nos son familiares. Resultan, curiosas y llamativas las licencias que se permiten los científicos al acuñar ciertas denominaciones.

Lo fascinante de estos objetos es que las cuatro interacciones fundamentales conocidas: gravitatoria, fuerte, débil y electromagnética actúan en el interior de estos objetos para dotarlos de unas características únicas y peculiares. Algunos de ellos, los púlsares, poseen rotación y emiten luz en la dirección de un eje diametral que está levemente desalineado con el de rotación. Constituyen una suerte de faros cósmicos que podemos detectar en la Tierra con una precisión asombrosa, con irregularidades de 1 parte en  $10^7$  en su periodo. Puedes escuchar por ejemplo la señal de periodo 0. 7 segundos (haciéndola audible para nuestro oído) del púlsar PSR B0329+54 de unos 5. 5 millones de años obtenida con el telescopio Lovell en Jodrell Bank en [http://www.jb.man.ac.uk/~pulsar/Education/Sounds/0329\\_seq.mp4](http://www.jb.man.ac.uk/~pulsar/Education/Sounds/0329_seq.mp4).

El descubrimiento del primer pulsar ocurrió de forma fortuita. La estudiante de doctorado Jocelyn Bell Burnell, bajo la supervisión de A. Hewish, estaba a cargo del telescopio en el Mullard Radio Astronomy Observatory, a las afueras de Cambridge, Reino Unido, y del análisis de datos, encontró una señal de un objeto que parecía tener una periodicidad de 1. 3 segundos y emitía en una frecuencia de onda de radio bastante específica. No concordaba con la señal esperada de los quásares que buscaban con esta técnica. Incluso



durante algún tiempo tuvieron que considerar que podría ser una señal alienígena de tipo artificial y por eso la etiquetaron como LGM1, es decir Little Green Men 1, traducido como hombrecillos verdes 1. Su origen natural quedó de manifiesto con las docenas de ellos encontrados desde ese momento. Sin embargo y debido a la magnitud e importancia de dicho hallazgo, que además confirmaba la teoría de la Relatividad de Einstein, este descubrimiento recibió el Nobel en 1974 <sup>3</sup>.

Estas estrellas, que podrían ser a priori únicamente objeto de estudio como reliquias o fósiles de la evolución estelar, nos proporcionan, al contrario, una valiosa fuente de información en variados campos de la Física actual. No en vano a través de su observación y estudio estamos abriendo una ventana para poder desentrañar lo que se ha llamado la Física de las condiciones extremas, mucho más que las que ocurren en cualquiera de las colisiones en los aceleradores de partículas que existen en el Cerno Fermilab, por ejemplo. Todavía estamos lejos de poder replicar en la Tierra las condiciones del interior del núcleo de estos objetos y estudiar la materia en sus límites de altas densidades en presencia de altos campos electromagnéticos.

---

<sup>3</sup> Nota de los coordinadores ([https://es.wikipedia.org/wiki/Jocelyn\\_Bell\\_Burnell](https://es.wikipedia.org/wiki/Jocelyn_Bell_Burnell)): El artículo que anunciaba el descubrimiento de los púlsares, tenía cinco autores. El supervisor de tesis de Bell, Antony Hewish, figuraba primero, Bell segundo; Hewish recibió el Premio Nobel de 1974, junto con el astrónomo Martin Ryle. Muchos astrónomos prominentes criticaron la omisión de Bell, incluido Sir Fred Hoyle. En 1977, Jocelyn Bell Burnell restó importancia a esta controversia, diciendo: "Creo que degradaría los Premios Nobel si se otorgan a estudiantes de investigación, excepto en casos muy excepcionales, y no creo que este sea uno de ellos".

Es en este marco que cualquier indicio, directo o indirecto, de las características de la materia y campos en condiciones extremas resulta interesante. Las estrellas de neutrones ofrecen un sinfín de posibilidades. Veamos algunas de ellas en detalle.

La ecuación de estado de la materia.

¿Cómo se comporta la materia a densidades extremas? Por extremas entendemos las densidades mayores que las del interior de un núcleo atómico, en torno a  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>, como las que existen en el interior de las estrellas de neutrones. Esta simple cuestión es una de las grandes preguntas de la Física actual. Cómo se relacionan la presión y energía por unidad de volumen es importante en estos objetos y se denomina ecuación de estado. De ella dependen las dimensiones, masa y estabilidad de la materia que forma la estrella. Para describirla se usan las técnicas más punteras en Física basadas en formalismos cuánticos y relativistas con la dificultad añadida de que las densidades de la materia en el interior varían 14 órdenes de magnitud. No obstante, hoy en día se consigue una descripción aceptable que nos permite entender ciertas características básicas de estos objetos. Sin embargo, estamos lejos aún de entender con precisión cómo se comporta el interior estelar y la composición y estado de la materia a densidades de ¡hasta 2000 millones de toneladas por centímetro cúbico!

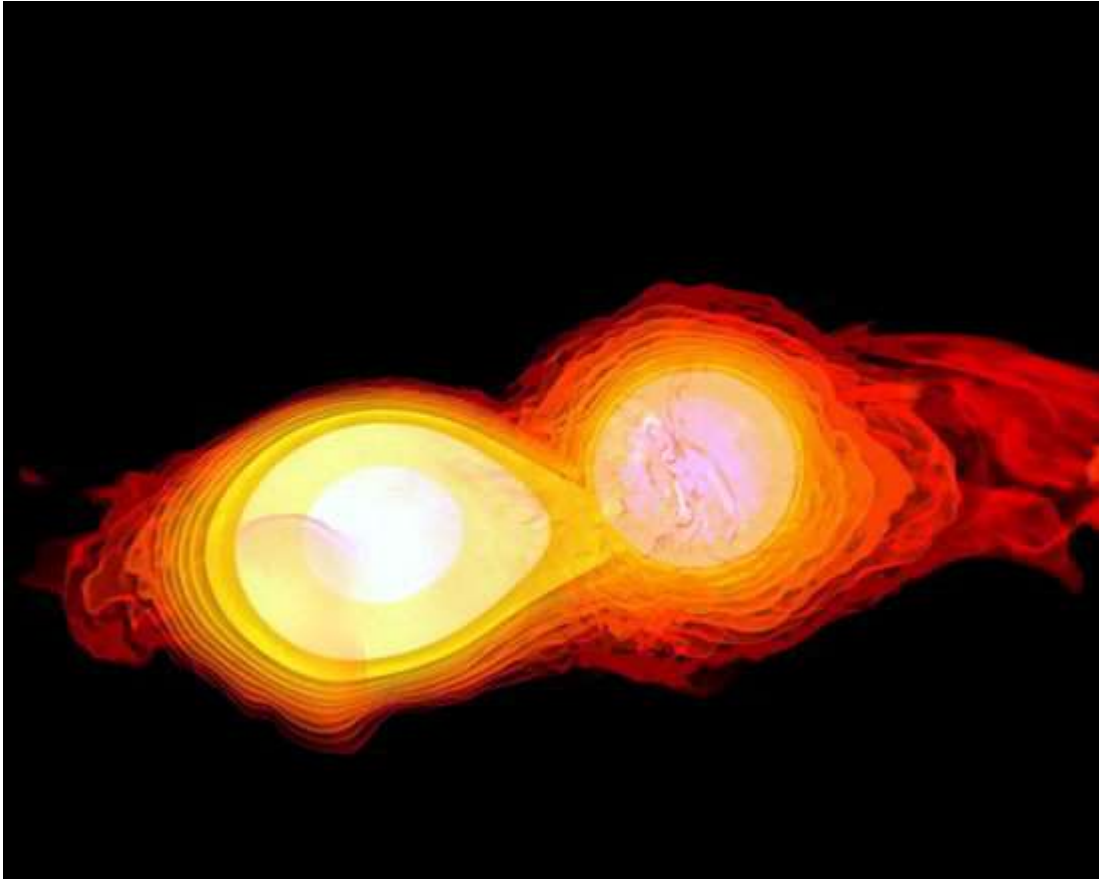
En este contexto, la posible existencia de una transición de fase de materia de neutrones y protones a otra donde los quarks que conforman éstos fueran liberados se vería reflejada a través de la

detección de una estrella de neutrones con radio mucho menor que los de las conocidas. El descubrimiento indirecto de esta posibilidad constituiría un hito científico y sería uno de los estados más extremos en los que puede existir la materia. Misiones como NICER, adosada en la Estación Espacial Internacional o satélites de rayos X [2] tratan de desentrañar esta cuestión midiendo las masas y radios de las estrellas de neutrones cada vez con mayor precisión.

De igual modo la búsqueda de estrellas de neutrones cada vez más masivas (hasta hace unos años no se había podido detectar estrellas con masas superiores a dos masas solares) constituye una prueba de que el límite máximo de masa que soporta una estrella sin colapsar no es conocido y por ende las presiones o densidades máximas que soportaría el interior de tal estrella. La materia a las densidades referidas se comporta de modo donde ya no es posible describirla de forma clásica, resolviendo un problema donde las posiciones y velocidades de las partículas se conocen de forma exacta (con precisión máxima), sino que el carácter cuántico es inseparable de su naturaleza y propiedades y ello hace que debamos usar una descripción llamada efectiva. Esto nos permite calcular las magnitudes físicas de interés y resolver las ecuaciones dinámicas de forma simplificada. Así por ejemplo el núcleo o parte interna de una estrella de neutrones está constituida en gran parte por neutrones, bariones neutros (sin carga eléctrica) con estructura de tres quarks en presencia de un mar de gluones, como si fuera un medio pegajoso. Esta similitud con una muñeca matrioska, que guarda en su interior más contenido, es la base de las teorías efectivas.

Aunque simplificada, esta visión nos sirve para entender y describir el comportamiento de este tipo de materia a la escala de distancias de varios femtómetros ( $10^{-15}$  m) pero el Modelo Estándar de Física de partículas nos dice que no es adecuado pensar en estos términos para distancias por debajo del femtómetro. Es decir, es útil a cierto nivel de detalle, pero no es la descripción adecuada por debajo de él. Aspectos adicionales de las propiedades de la materia a altas densidades son de interés en la actualidad, a partir de recientes mediciones en rayos X del enfriamiento del pulsar de Casiopea A se ha podido determinar que hay un rápido enfriamiento que parece ser una fuerte indicación de estados superfluídos de la materia de neutrones y protones (nucleones) a temperatura baja en el interior estelar. Estos estados corresponden a agrupaciones, o más técnicamente, correlaciones entre nucleones, que se comportan de un modo radicalmente diferente con respecto a su estado individual original. Resta aún en este interesante campo de medida de temperaturas en estos objetos entender el mecanismo de formación de anisotropías o por qué las regiones polares aparentan ser más cálidas que las ecuatoriales. Esto, según algunos cálculos exploratorios, podría deberse a que el transporte de calor desde el interior a las regiones exteriores de la corteza de la estrella depende de la dirección y sobre todo de la estructura de los campos magnéticos en el interior de la estrella. Recordemos que en una explosión de supernova donde se forman estos objetos colapsados el flujo de campo magnético debe conservarse y esto lleva a que la estrella de neutrones que resta tras todo el proceso tiene un valor de

campo magnético muchos órdenes de magnitud superior al de la estrella original.



*Figura 3 Ilustración de la fusión de dos estrellas de neutrones.*

*Crédito: NASA/AEI/ZIB/M. Koppitz and L. Rezzolla, Public domain,*

*via Wikimedia Commons,*

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/81/NS\\_binary\\_merger\\_simulation\\_148.tif](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/81/NS_binary_merger_simulation_148.tif)

Un baile para dos: fusión de estrellas de neutrones.

La primera detección experimental de ondas gravitatorias procedentes de la fusión de dos agujeros negros recibió el premio

Nobel de Física en 2017. Estos eventos ocurren en el Universo de forma muy poco frecuente y la señal es tan débil que atraparla ha sido todo un hito científico. De igual modo la fusión de dos estrellas de neutrones o estrella de neutrones y agujero negro involucra la formación de objetos finales hipermasivos mucho más pesados de lo que la materia es capaz de soportar sin colapsar.

Durante los estadios finales de este violento baile para dos, que dura milésimas de segundo, donde se generan intensas mareas gravitatorias ambos objetos se deforman, vibran con frecuencias cada vez mayores y con separación decreciente hasta que finalmente colapsan en uno solo cuyo destino es un agujero negro. Las características de la señal de ondas gravitatorias medida nos informan de los valores de sus masas y la ecuación de estado en el interior de éstas. He aquí otra posibilidad de volver a deducir cómo se comporta la materia a altas densidades.

No solo se emiten ondas gravitatorias en estos eventos. En otro hito científico en 2017 la detección de la onda gravitatoria GW170817 fue acompañada por radiación electromagnética en diversas bandas, incluyendo longitudes de onda visibles. La forma de la curva de luminosidad medida por telescopios terrestres durante los primeros días desde la fusión nos informa de los restos de la masa eyectada, responsable de su fulgor, opacidad de la materia y la ecuación de estado también [3]. Y no solo podemos extraer información de los límites de la materia, sino que nos permiten testear de forma alternativa la robustez de valores de parámetros en modelos cosmológicos actuales, tales como la constante de Hubble,  $H_0$ .

También se espera poder detectar otras partículas, los neutrinos, emitidas en las reacciones de decaimiento nucleares que tienen lugar en la materia involucrada en las fusiones de estrellas de neutrones. De este modo, para un mismo suceso cósmico tendremos diferentes ventanas de observación, y podremos escudriñar más en los detalles íntimos y variados procesos que tienen lugar. Es lo que recientemente se ha acuñado como física "multimensajero" donde diversos tipos de partículas nos informan sobre distintas características de un mismo evento.

Estrella de neutrones: materia luminosa y oscura.

Otro de los intereses intrínsecos de estas estrellas densas es la posibilidad de poder obtener algún indicio de la existencia de la llamada "materia oscura" que, de acuerdo a una multitud de datos experimentales de tipo cosmológico, nos indican que debe constituir la mayor fracción de materia del Universo [4]. La posibilidad de que el interior de estos objetos pudiera albergar materia oscura es objeto de estudio en la actualidad. Sin embargo, hay una dificultad añadida y es que los candidatos o partículas, llamémosles X, que podrían constituir la materia oscura no se han descubierto y buscarlos sin conocer sus propiedades es algo de una gran dificultad. ¿Es un fermión como el neutrón, es un bosón como el pión, es una partícula similar a un axión como los que se buscan en nuestra estrella solar? ¿O es quizás algo radicalmente más nuevo? De momento la respuesta está por llegar. Algunos modelos predicen que pueden existir un corazón "oscuro" en el interior de las estrellas

que en su exterior son de materia ordinaria y que dependiendo de la masa y cuál sea su interacción con la materia conocida podrían hacerla colapsar desde su interior formando un agujero negro de pequeña masa. También se buscan, como se ha mencionado, otras partículas de materia oscura a través de su decaimiento en estrellas u objetos con campos electromagnéticos intensos. Uno de estos lugares es el Sol, pero también se buscan en la magnetosfera de las estrellas de neutrones. En éstas últimas los campos magnéticos pueden ser del orden de  $10^{12}$  G y hasta 1000 veces mayor (gigantesco en comparación con los 0.5 G del campo terrestre cuya orientación marca una brújula) y catalizar que estas partículas decaigan en radiación. De este modo, cualquier pequeña variación respecto a los mecanismos de emisión de luz de estos objetos podrían ser indicios de esta nueva Física.

Pruebas de campos gravitatorios intensos.

Las estrellas de neutrones pueden constituir pruebas de precisión de la forma que adopta la fuerza gravitatoria [5]. Vamos a comentar cómo por medio de dos ejemplos. Supongamos que un púlsar emite su regular y característica señal electromagnética a medida que orbita un agujero negro. Según se acerca a él, hasta sufrir el colapso final, el pulsar sufrirá precesión y nutación (como los de una peonza cuyo eje de rotación describe un círculo y tiene cierto bamboleo) inducidos con el acoplo de la rotación del pulsar y la del movimiento en la órbita del sistema binario. Es decir, el pulsar irá emitiendo señales que se verán modificadas por efecto de la fuerte



gravedad que atrae a dicho objeto. Midiendo con precisión la rotación del pulsar se puede determinar la tasa de rotación del agujero negro central masivo en galaxias, como la nuestra. Por tanto, la medición de las señales de púlsares constituye una alternativa a los métodos actuales para la determinación de rotación de agujeros negros, tales como espectroscopía de rayos X.

En el futuro se podrá medir las frecuencias emitidas por púlsares con una precisión muy alta ( $< 100$  nanosegundos,  $1 \text{ ns} = 10^{-9}\text{s}$ ), muy sensibles a las pequeñas perturbaciones espacio—temporales de las ondas gravitatorias. Esto permitirá medir ondas gravitatorias a frecuencias de  $10^{-9}\text{Hz}$ , complementando así las observaciones a frecuencias más altas hechas con los experimentos LIGO—Virgo—Kagra( $\sim 100 \text{ Hz}$ ) y las del futuro satélite espacial LISA ( $\sim 10^{-3}\text{Hz}$ ) propuesto por la Agencia Espacial Europea. Misiones como SKA, en la Tierra, responderá preguntas cruciales acerca de la existencia, naturaleza y composición del fondo de ondas gravitatorias predicho por la teoría de la Gravedad de Einstein.

Los anteriores ejemplos constituyen solo una parte de todo el potencial que nos ofrece el estudio de las estrellas de neutrones para escudriñar los horizontes de la Física actual. Estos fascinantes objetos permanecen en nuestro Universo desde casi sus albores y continuarán después de que nuestro planeta Tierra sea engullido por el Sol en su fase de gigante roja. Mientras tanto podremos disfrutar de esta edad dorada para su estudio, aprovechando todo lo que nos tienen que ofrecer y dejando, una vez más, que nos guíen como faros en la eterna noche cósmica en la búsqueda de nuestra

propia construcción del conocimiento natural.

### Referencias:

- [1] *Neutron Stars and Pulsars*, W. Becker (Ed. ), Astrophysics and Space Science Library Series, volume 357, Springer—Verlag, Berlín, Heidelberg, 2009, doi: 10. 1007/978—3—540—76965—1
- [2] A. De Angelis, V. Tatischeff, I. A. Grenier et al. , *Science with e—ASTROGAM (A space mission for MeV—GeV gamma—ray astrophysics)*. *J. High Energy Astrophys.* 19, 1, (2018), <https://doi.org/10.1016/j.jheap.2018.07.001>
- [3] A. Bauswein, S. Goriely, H. T. Janka, *Systematics of Dynamical Mass Ejection, Nucleosynthesis, and Radioactively Powered Electromagnetic Signals from Neutron—star Mergers*, *Astrophysical Journal* 773, 78 (2013), <https://doi.org/10.1088/0004-637X/773/1/78>
- [4] G. Bertone, T. M. P. Tait, *A new era in the search for dark matter*, *Nature* 562, 51 (2018), <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0542-z>
- [5] Paul D. Lasky, *Gravitational Waves from Neutron Stars: A Review*, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 32, (2015) , e034 <https://doi.org/10.1017/pasa.2015.35>

[M.Ángeles Pérez García.](#)

Doctora en Física Teórica.

Profesora Titular, Universidad de Salamanca.

## Capítulo 7

### Agujeros negros

Vamos a hablar de los agujeros negros, esos objetos enigmáticos y misteriosos que llevan captando la atención popular desde hace mucho tiempo. Todos los hemos visto referidos en algún lado, en el cine, libros, arte... Pero, ¿sabemos realmente lo que son? ¿Cuánto sabemos de ellos y cuánto nos falta aún por descubrir? A lo largo de las siguientes páginas, intentaré dar respuesta a estas preguntas (y quizás plantear algunas nuevas) a modo de pequeña introducción a este fascinante mundo. No necesitas ningún conocimiento previo, ¡solo curiosidad!

Vamos allá, empecemos por el principio. . .

¿Qué es un agujero negro? Aproximación histórica.

La primera vez que un agujero negro como tal apareció en la literatura científica, ni siquiera tenía aún ese nombre. Aunque ya se había especulado anteriormente con la idea de estrellas negras en el marco de la gravedad newtoniana, fue la introducción de la teoría de la Relatividad General la que dio lugar, tan solo unos meses más tarde de su publicación, a un artículo de Schwarzschild en el cual exponía una solución particular de las ecuaciones de Einstein (que nos dicen cómo se relaciona la materia con el espacio—tiempo) para el exterior de cualquier distribución esférica de materia. Y aquí es cuando seguramente surge la pregunta, ¿pero aquí dónde se ve un agujero negro? Había dos hechos que llamaban la atención en esa

solución, el primero era una divergencia de las ecuaciones en el punto central de radio cero (vamos, que algunas cantidades en las ecuaciones se hacen infinitas), una *singularidad*. El segundo, una divergencia aparente en un radio igual a dos veces la masa (en unidades naturales). Esta divergencia resultó ser un artificio de las coordenadas (el sistema de referencia que escogemos), que se solucionaba mediante un cambio de coordenadas (es decir, tomando otro sistema de referencia). Este cambio permitió entonces extender la solución al interior de la distribución de materia, dando a ese radio la consideración de horizonte, el que más adelante se conoció como *horizonte de eventos*. Aún tuvo que pasar bastante tiempo para que esta solución se entendiese como el agujero negro de Schwarzschild, y no solo eso, sino que se considerase como un objeto real que puede encontrarse en el universo.

El estudio del límite de masa de estabilidad de las estrellas de tipo enana blanca por Chandrasekar y el análisis del colapso de materia por su propia gravedad de Oppenheimer, fueron dando forma a esta idea de agujeros negros. En cualquier caso, hubo que esperar a los años 60 para ver resurgir estas ideas, cuando Wheeler acuñó el nombre de *agujero negro* y la observación de estrellas de neutrones por Jocelyn Bell revivió el interés por los objetos masivos y les confirió una realidad física. Así empezó la edad de oro de los agujeros negros.

Una vez llegados a este punto, cabe preguntarse, ¿qué es entonces un agujero negro? Se podría decir que es una región del espaciotiempo (del universo) con una gravedad tan fuerte que ni

siquiera la luz puede escapar, y de esta manera, queda escondida y no puede comunicarse con el exterior. ¡De ahí su nombre! <sup>4</sup>

El hecho de que estén completamente ocultos a nosotros, observadores externos, ha hecho que hayamos tardado más de 100 años en pasar de su descubrimiento teórico a poder observarlos. ¡Veamos cómo!

Estructura de los agujeros negros.

Los agujeros negros son, como hemos visto, regiones que quedan completamente ocultas al exterior. Estas regiones están delimitadas por un horizonte de eventos que, como mencionamos, se sitúa en un radio dado por el doble de la masa de la región. El horizonte representa así el punto de no retorno, una vez cruzado ya ni tan siquiera la luz puede escapar. Para hacernos una idea de este radio, imaginemos que la Tierra pudiese colapsar a un agujero negro (¡que no es el caso!), entonces el horizonte de eventos ¡tendría tan solo 9 mm de radio!

Claro, que ir acercándose al agujero hasta ese radio no es algo que nos fuese a dejar indemnes. Imaginemos que pudiésemos construir una nave que consiguiese viajar hasta el agujero negro, y así mandar a alguien allí a echar un ojo. Eso sí, queremos que nos cuente qué le va pasando, así que queremos mantener una comunicación constante. Desde nuestro lugar de observación

---

<sup>4</sup> Cabe resaltar que, en muchos países hispanoparlantes, se les denomina hoyos negros, y que, atendiendo a las propias definiciones de la palabra, quizás sea una acepción más apropiada [1].

terrestre, a salvo de la influencia de la cercanía del agujero negro veríamos que según se acerca más a este objeto, la nave va viajando cada vez más lento (y a nuestros ojos se va haciendo más roja y tarda más y más en llegar la señal) hasta que la veríamos acercarse al horizonte para siempre, a nuestros ojos nunca lo cruzaría. Sin embargo, viajando en la nave, nuestro viajero vería todo normal y cruzaría el horizonte sin problemas. ¿Sin problemas? Bueno, no tanto, según se fuese acercando sufriría fuerzas de marea<sup>5</sup> cada vez más fuertes, llegando a experimentar un proceso llamado "espaguetificación", por el cual, la gravedad que experimenta la parte de delante de la nave, es muy diferente (y mayor) que la que experimenta la parte de atrás de la nave, así que ésta se va estirando, espaguetificándose, y deformándose según la trayectoria que lleve.

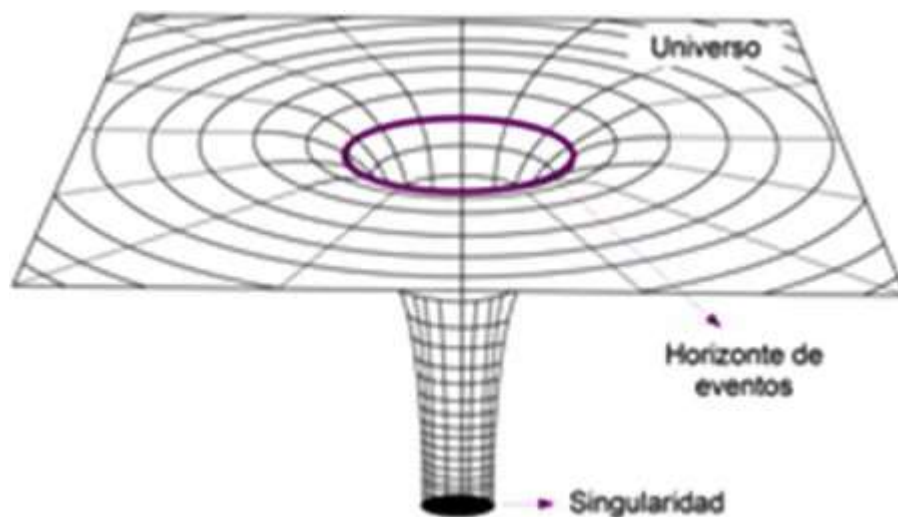
Esto es lo que pasa con la masa que se acerca a los agujeros negros, según va acercándose sufre las fuerzas de marea, se descompone y forma lo que se conoce como un disco de acreción alrededor del agujero negro. Así los agujeros negros, debido a su enorme gravedad, van absorbiendo materia que haya alrededor y esto les hace aumentar de tamaño. ¡Que nadie se asuste con esto! Esto no quiere decir que nos vaya a comer ningún agujero negro en un futuro cercano, nos pillan demasiado lejos como veremos más

---

<sup>5</sup>Las fuerzas de marea suceden cuando la fuerza gravitatoria es diferente a lo largo de un cuerpo, dando lugar así a una deformación del mismo. Y sí, ¡las mareas marinas que vemos son consecuencia de este efecto!

adelante.

¿Y qué pasa cuando cruza el horizonte? ¡Pues que el agujero negro está vacío! Está hecho solo de espaciotiempo curvo, y aunque no podamos saber muy bien que pasa ahí dentro, sí sabemos que esconden una singularidad. Una singularidad es allí donde nuestra teoría (la Relatividad General) se rompe y la densidad y las medidas de curvatura se hacen infinitas (en otros capítulos de este libro se trata el tema de la resolución de singularidades en gravedad cuántica).



*Figura 1. Estructura de un agujero negro. En este diagrama representamos el espaciotiempo (universo) en dos dimensiones y cómo se curva en las inmediaciones de un agujero negro. También podemos ver una representación del límite del agujero negro (horizonte de eventos) y la singularidad en su interior, donde ya la curvatura se hace infinita. Crédito: Ana Alonso Serrano.*

Las singularidades son un tema peliagudo en Relatividad General, pero al menos, debido a la *conjetura de censura cósmica*, parece que estamos protegidos de ellas (y menos mal), ya que se encuentran siempre escondidas detrás de horizontes<sup>6</sup>. Una vez que entremos al agujero negro, nuestro destino irremediabilmente pasa por caer en la singularidad, esta es inevitable. Además, según nos acerquemos a ella el espacio se vuelve caótico (según una conjetura denominada BKL).

En la Figura 1, vemos una representación geométrica muy simple de la estructura de un agujero negro que quizás nos ayude a visualizarlo un poco mejor.

Toda esta estructura parece muy complicada, pero desde fuera, los agujeros negros son extremadamente simples, por eso se dice que "no tienen pelo". Esto significa que no tienen muchas propiedades que los caractericen, es decir, no nos dan mucha información. Las únicas características que los determinan son la masa, y el momento angular (que mide la cantidad de movimiento de rotación) y la carga eléctrica si los tienen. Por ejemplo, si un agujero negro se formó a partir de un tipo de materia o de otra es algo que no podemos saber, para nosotros son completamente indistinguibles.

¿Cómo se produce un agujero negro? ¿Dónde los encontramos?

Uno de los mecanismos estándar de formación de un agujero negro

---

<sup>6</sup> Esto proviene de un estudio exhaustivo de las singularidades que desarrollaron Penrose y Hawking y que le valió el Nobel de Física al primero en 2020.



es su creación como resultado final del colapso de una estrella. Para que esto suceda, la masa de la estrella tiene que ser muy grande (al menos tres veces la masa de nuestro sol). Así cuando el combustible nuclear se agota, la estrella no puede compensar la presión gravitatoria y se va contrayendo hasta colapsar, dando lugar a un objeto remanente final (como enanas blancas o estrellas de neutrones de las que ya se habla en otro capítulo de este libro). Cuando la masa es tan grande que no hay forma de contener el colapso gravitatorio, el objeto final es un agujero negro.

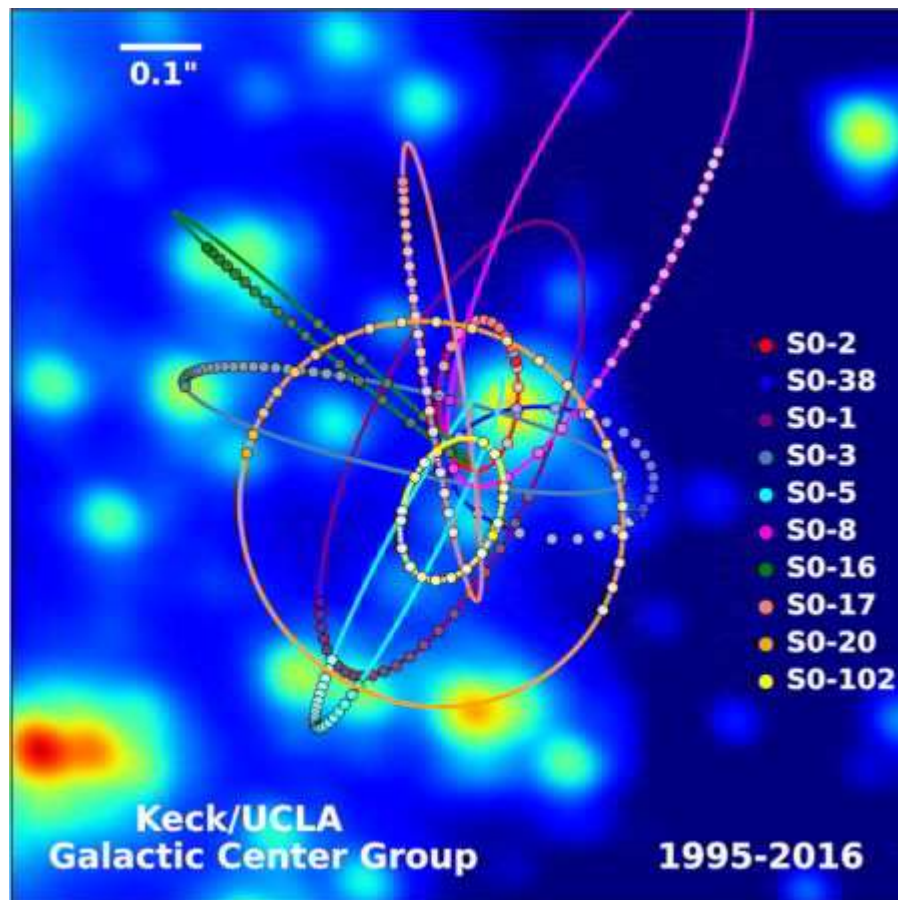
De esta manera, podemos encontrar agujeros negros estelares formados por colapso, cuyo mecanismo es muy claro y se entiende perfectamente. Pero podemos encontrar muchos otros agujeros negros cuyos procesos de formación y evolución todavía se intentan explicar utilizando distintos modelos teóricos. Por ejemplo, a día de hoy sabemos con certeza que se pueden encontrar agujeros negros supermasivos en el centro de núcleos galácticos. También sabemos que algunos agujeros negros masivos pueden provenir del choque de un sistema binario de agujeros negros que han terminado fusionándose.

Éste no es el único proceso posible de formación de agujeros negros. El colapso gravitatorio en el universo primigenio podría haber dado lugar a agujeros negros primordiales.

¿Cómo y dónde podemos observarlos?

A pesar de que los agujeros negros ya hemos visto que llevan investigándose desde los primeros años de la Relatividad General,

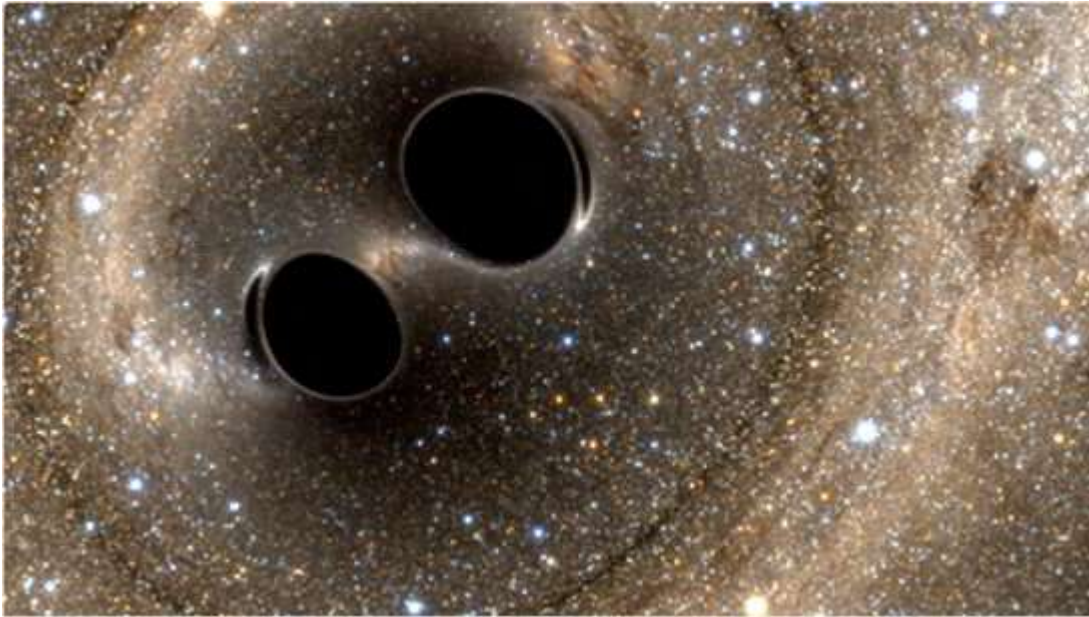
hemos tardado más de un siglo en desarrollar los métodos y los instrumentos necesarios para poder observarlos. Ha sido muy recientemente cuando, no solo se han observado, sino que se han abierto nuevas ventanas observacionales que prometen resultados interesantes en los próximos años.



*Figura 2. Órbitas de las estrellas alrededor del núcleo galáctico.*

*Crédito: [UCLA Galactic Center Group](#) – [W.M.Keck Observatory Laser Team](#). "These images/animations were created by Prof. Andrea Ghez and her research team at UCLA and are from data sets obtained with the W. M. Keck Telescopes. "*

Un descubrimiento que se llevó el Nobel de Física en 2020 [2] fue el seguimiento de la órbita de las estrellas alrededor de Sagitario A\*, que se consideraba un candidato a agujero negro.

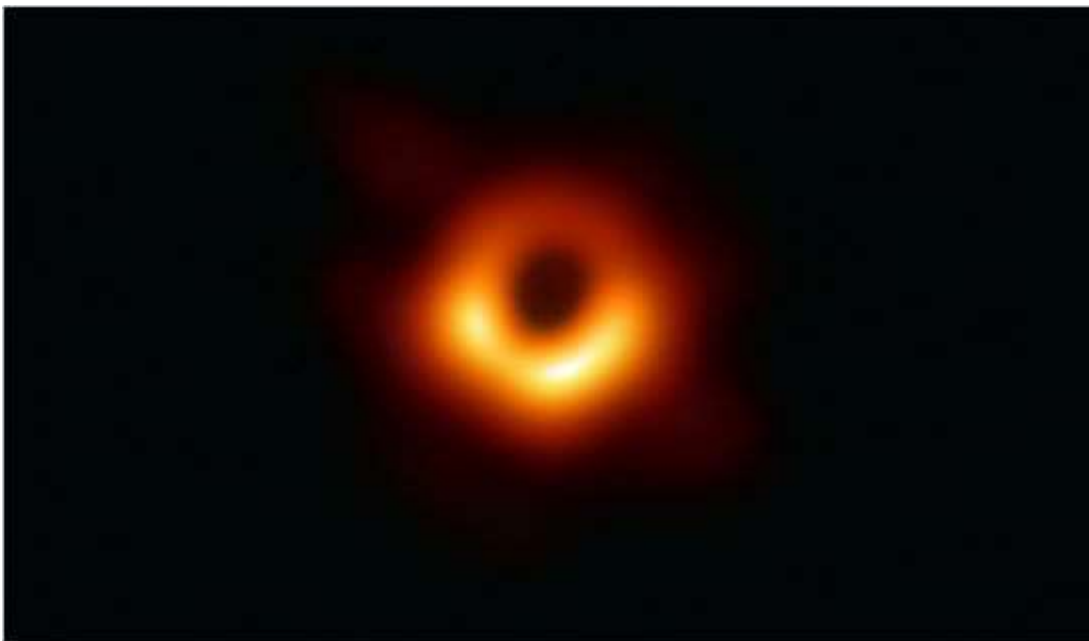


*Figura 3 Representación de una simulación de dos agujeros negros orbitando uno alrededor del otro, cada vez más cerca hasta colapsar y formar un sólo agujero negro, emitiendo ondas gravitatorias en este proceso. Crédito: SXS, the Simulating eXtreme Spacetimes (SXS) project (<http://www.black-holes.org>).*

Después de muchos años de medidas finalmente se corroboró la existencia de ese objeto compacto supermasivo y se estimó su masa, distancia, etc. Por la manera en la que rotan las estrellas y el tamaño del objeto central oscuro y compacto (más allá del límite de Chandrasekar), éste cumple todas las características que

conocemos de los agujeros negros. Así que a día de hoy la única explicación posible es que dicho objeto sea un agujero negro supermasivo en el centro de nuestra galaxia.

Otra observación viene de la coalescencia de dos agujeros negros que mencionamos anteriormente. Cuando dos objetos muy masivos orbitan uno alrededor del otro hasta colapsar y fusionarse, estos emiten ondas gravitatorias, de las que ya se habla en otro capítulo de este libro. Mediante el análisis de la señal observada, se ha podido determinar (por primera vez en 2015) la coalescencia de varios sistemas binarios de agujeros negros [3].



*Figura 4. Primera imagen de un agujero negro obtenida de las observaciones del "Event Horizon Telescope" del centro de la galaxia M87. Crédito: Event Horizon Telescope Collaboration*

Finalmente, en 2019 gracias a una gran colaboración de

instituciones científicas, se consiguió la primera imagen de un agujero negro en el núcleo de la galaxia M87, donde se ve el disco de acreción alrededor de un centro oscuro que determina la sombra del agujero negro [4].

Gracias a todas estas observaciones, y a los avances teóricos en la materia, a día de hoy sabemos de la existencia de objetos compactos que tienen las características de agujeros negros y entendemos todo lo que sucede alrededor de los mismos. Eso sí, siempre más allá del horizonte. ¿Cómo podemos entonces conocer mejor estos objetos? ¡Vayamos a por la teoría!

Hacia el estudio de los agujeros negros.

En los años 70 se empezó a estudiar la dinámica de agujeros negros. Primero se vio que el área de un agujero negro no podía decrecer en ningún proceso (al menos los físicamente razonables). Esto hizo pensar en una analogía del área con la entropía, que según la segunda ley de la termodinámica no puede decrecer. Si esto pasaba con la segunda ley, ¿hay toda una analogía con la termodinámica? Pues resulta que la dinámica de agujeros negros también seguía leyes análogas al resto de leyes de la termodinámica (la ley cero, la primera y la tercera ley). Aunque había un problema, las dimensiones de las cantidades análogas a las cantidades termodinámicas no cuadraban. En las leyes de la termodinámica tenemos la energía, la temperatura y la entropía, y en las de los agujeros negros, la masa, la gravedad de superficie y el área. Y de estas, ¡solo la masa tenía las dimensiones apropiadas! Además, si

los agujeros negros solo absorben y nada escapa, entonces ¡su temperatura tiene que ser cero! Bekenstein se dio cuenta de que introduciendo la constante de Planck (cantidad básica en mecánica cuántica), las dimensiones del área como medida de entropía cuadraban. Aun así, no pensaba que esta entropía fuese una entropía como la termodinámica.

Hagamos aquí un inciso. Usualmente la entropía se define como todos los posibles estados microscópicos (microestados) que definen un estado macroscópico (el que vemos). Sin embargo, otra de las maneras de entender la entropía de un sistema es como la falta de información sobre su configuración interna. Esto conecta con la teoría de la información establecida por Shannon. Es decir, representa toda la información que necesitamos para conocer con total precisión los microestados. Como solo tenemos acceso a los macroestados, esa información se encuentra escondida, y cuantificada por la entropía. En resumen: la entropía mide nuestra ignorancia sobre la configuración interna de un sistema. De esta manera, cuando ganamos información sobre un sistema, la entropía decrece.

Volviendo a la entropía de los agujeros negros, denominada entropía de Bekenstein, al calcularla vemos que es enorme. Es casi 20 órdenes de magnitud<sup>7</sup> mayor que la entropía del sol. Cuando

---

<sup>7</sup> Esto significa la cantidad de "ceros" que hay detrás del número, es decir, hay 20 ceros de diferencia entre una cantidad y la otra. Un ejemplo para entenderlo es que entre 20.000 y 70 hay tres órdenes de magnitud.

miramos esta entropía desde el punto de vista de la falta de información, tiene bastante sentido si recordamos lo que hemos explicado antes del carácter indistinguible de los agujeros negros y la poca información que nos proporcionan.

En este punto, ya se empezó a intentar averiguar qué pasaba con la información en un agujero negro, qué significaba su entropía y si su presencia podía violar de alguna manera la segunda ley de la termodinámica. Para entender este problema se recurrió a un recurso muy utilizado en física: los experimentos mentales (Gedankenexperiment). En ellos se imaginan escenarios teóricos y se investigan las posibles consecuencias, problemas o paradojas de la teoría. Por ejemplo, Wheeler planteó a Bekenstein el problema de qué pasaría si uno derramase una taza de té en un agujero negro. Si hiciésemos tal cosa, la entropía correspondiente a la taza de té se perdería en el agujero negro y decrecería la entropía del universo. ¿Cómo lo compensa el agujero negro? Y qué pasa si conseguimos echar a un agujero negro un sistema casi sin masa, ¿podríamos violar la segunda ley de la termodinámica? Todas estas preguntas, y muchas más, fueron (y siguen) haciendo que se desarrolle éste y otros campos de la física teórica: Planteando problemas y paradojas a modo de juegos mentales y viendo cómo se pueden solucionar o si hay cosas que todavía no entendemos de la teoría y que pueden reflejar un fallo de la misma.

Lo que a día de hoy parece que está bastante claro es que la segunda ley de la termodinámica no se viola con la introducción de agujeros negros y que éstos poseen una entropía enorme, de hecho,

la entropía máxima que puede tener una cantidad de materia (dada por el límite de Bekenstein). Ahora bien, qué significa e implica esa entropía, aún sigue siendo tema de debate científico: ¿Por qué es tan grande? ¿Por qué es proporcional al área y no al volumen? ¿Por qué es una función universal? ¿Cuáles son los microestados del agujero negro y dónde se localizan? ¿Habrá correcciones cuánticas de esta entropía? Podemos entender la entropía de Bekenstein por ejemplo como una entropía de "entrelazamiento", es decir mide la información escondida en las correlaciones cuánticas a través del horizonte<sup>8</sup>. De hecho, el papel de esta entropía es fundamental para el entendimiento de la paradoja de la información en agujeros negros, como veremos más adelante (hasta aquí, no hay ninguna paradoja). Para entender esa parte y así entender un poco mejor lo que pasa en los agujeros negros, necesitamos introducir efectos cuánticos.

Cuando la teoría cuántica entra en juego.

Tan solo un par de años después de los primeros desarrollos en termodinámica de agujeros negros, Hawking puso el broche de oro dando con la clave para solucionar el problema de las dimensiones, la temperatura y la entropía: los agujeros negros radian cuando consideramos efectos cuánticos (en particular, por un efecto de creación de partículas por fluctuaciones en el vacío) de igual manera

---

<sup>8</sup> El entrelazamiento cuántico es un fenómeno de correlación cuántica entre partículas que se trata en detalle en otros capítulos de este volumen.



que lo hace un cuerpo negro en termodinámica. Este proceso confiere una temperatura a los agujeros negros, denominada temperatura de Hawking, que es inversamente proporcional a la masa del agujero negro. Es decir, cuanto más masivo sea un agujero negro menor temperatura tendrá. Así, un agujero negro al radiar, va perdiendo masa.

De esta manera tenemos que los agujeros negros pueden crecer debido a la acreción de materia, y entonces este proceso será dominante, ya que tendrá cada vez más masa y la radiación se reducirá. O también podría disminuir debido a la radiación y así ir aumentando su temperatura y la propia radiación (aunque como veremos más adelante este proceso no es viable para los agujeros negros astrofísicos).

La existencia de radiación de Hawking hace no solo que podamos ya considerar la gravedad de superficie como una temperatura del horizonte, sino que también podamos considerar el incremento de área como una entropía. Así que la taza de té que Wheeler quería verter en el agujero negro simplemente aumenta la entropía de Bekenstein. Entonces, si hemos dicho que no se viola la segunda ley de la termodinámica, pero ahora, al existir evaporación, el área puede disminuir, ¿esto cómo se soluciona? Pues porque la entropía del resto del universo aumenta de tal manera que la entropía total crece. Esto es lo que se conoce como la segunda ley generalizada de la entropía, a la que ya se refería Bekenstein cuando se plantearon los primeros experimentos mentales que comenté anteriormente y que se cierran completamente con este nuevo ingrediente.

Volvamos a las consecuencias de la radiación de Hawking: Bajo ciertas condiciones, un agujero negro puede ir emitiendo radiación (cuántica) y evaporándose poco a poco. ¿Hasta dónde? Aquí surge uno de los problemas clave de la física de agujeros negros. Según las leyes físicas que conocemos el agujero negro continuará evaporándose hasta desaparecer. Es precisamente el hecho de que desaparezca lo que genera el problema: ¿Qué pasa entonces con la información que había desaparecido dentro? ¿Y con la singularidad? La radiación de Hawking no depende del estado inicial de la masa que colapsó para formar el agujero negro, ni de la materia que se traga el mismo. Así que la radiación que queda en el exterior, no transporta ninguna información. Mientras haya agujero negro, esto no supone ningún problema, tenemos un horizonte de eventos que nos separa del interior y una entropía que nos codifica toda la información que está escondida ahí dentro. El problema surge entonces cuando desaparece del todo, porque ya no tenemos ningún sitio donde pueda estar almacenada toda esa información y la entropía del universo debería crecer de manera tremenda para compensar la entropía del agujero negro, es decir, la información tendría que estar "escondida" en la radiación. Pero la radiación Hawking es completamente térmica, no tiene correlaciones en las que pueda codificarse esa información. Este proceso de pérdida de información no es físicamente aceptable dentro del paradigma de

evolución de la mecánica cuántica<sup>9</sup>.

Este problema se conoce como la paradoja de la información en agujeros negros, y a día de hoy continúa siendo una cuestión abierta con muchos y diferentes caminos de investigación propuestos, como veremos más adelante. Pero, ¿hay alguna certeza de todo esto? ¿Se ha observado o medido la radiación de Hawking o la evaporación de un agujero negro?

Y esto... ¿se puede medir?

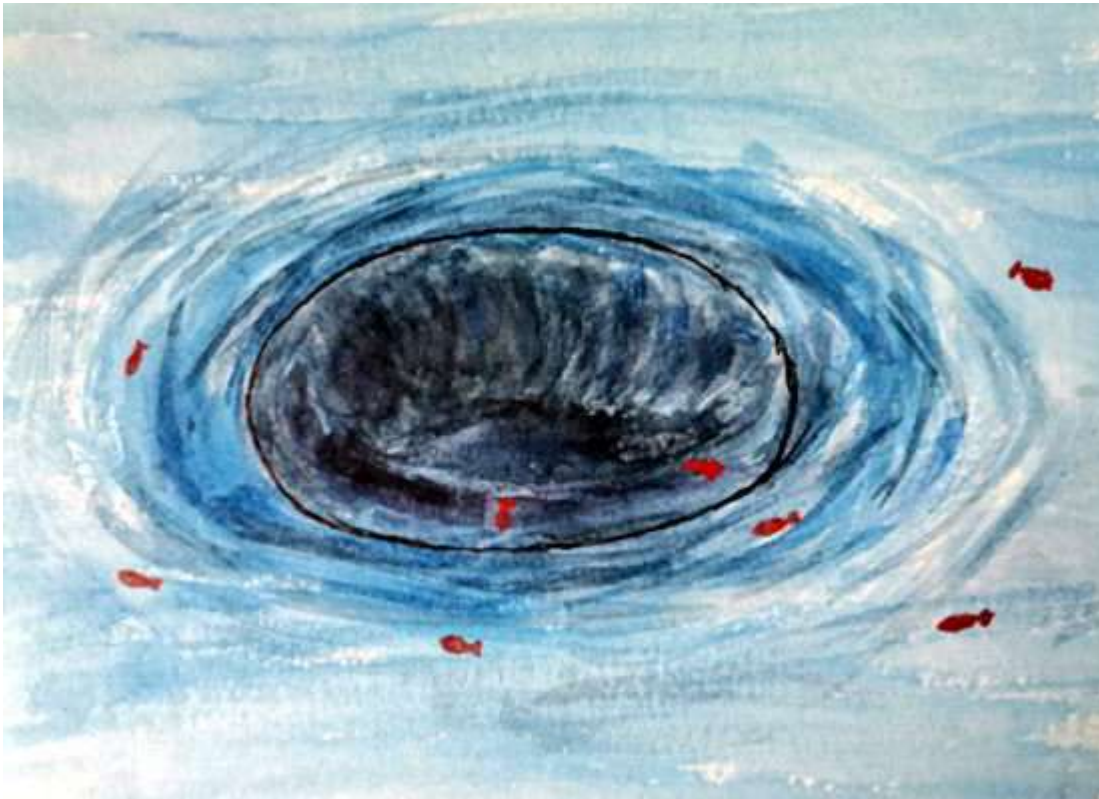
Veamos las escalas relacionadas con la evaporación de agujeros negros: La vida media de un agujero negro de la masa de nuestro sol ya es muchos órdenes de magnitud (alrededor de 50) mayor que la edad del universo. Sin embargo, un agujero negro microscópico tardaría cuestión de segundos en evaporarse. Por otro lado, la temperatura de un agujero negro sería de 0, 00000001 K, una temperatura mucho más baja que el ambiente en el universo (del orden de 2. 7 K). Con estos órdenes de magnitud parece inviable que podamos medir este proceso...

Sin embargo, tenemos una alternativa: Estudiar modelos análogos. Para estudiar algunos fenómenos de gravedad podemos crear un modelo en otro sistema físico manejable en laboratorio que nos permita reproducir las características de la gravedad que queremos

---

<sup>9</sup>Esto implicaría evolucionar de un estado inicial puro, donde la información es máxima, hasta un estado final mezcla donde la información es mínima. Este proceso conlleva una evolución "no—unitaria" algo prohibido en mecánica cuántica en un sistema cerrado.

analizar [5].



*Figura 5. En este dibujo podemos visualizar un poco mejor (aunque de manera un poco tosca y no muy rigurosa) la analogía del agujero negro relativista con el agujero acústico en agua. Imaginemos un desagüe o cascada que crea una corriente de agua. Lejos del mismo, los peces pueden nadar a su antojo en cualquier dirección, cuando estén lo suficientemente cerca, se verán arrastrados por la corriente (en esta figura se les ve yendo en círculo alrededor del pozo). Pero habrá un momento en el que la caída y el arrastre del agua sean tan fuertes que por mucho que intenten nadar para escapar de ahí, caerán irremediabilmente. Ese punto de no retorno es el análogo al horizonte de eventos (dibujado con una clara línea negra en la figura).*

*Crédito: Ana Alonso Serrano.*

Este método tiene bastantes limitaciones, ya que solo algunos procesos o características se pueden modelizar en laboratorio y, aun así, muchas veces solo dentro de un determinado rango. Por ejemplo, se han construido agujeros acústicos en agua, que reproducen ciertas características de los agujeros negros, como la existencia de un horizonte. O, análogos de agujeros negros en materia condensada (específicamente en los llamados condensados de Bose—Einstein). Estos sistemas permiten un modelo cuántico y reproducir una temperatura de Hawking del mismo orden de magnitud que la del ambiente. También existen análogos en otros sistemas ópticos.

Es en los modelos análogos de materia condensada donde recientemente se sostiene que se ha medido radiación Hawking [6] [7]. Aunque este resultado es muy prometedor, todavía existe cierta discusión al respecto. En cualquier caso, la radiación de Hawking es una predicción teórica tan sólida y bien establecida desde diferentes puntos de vista, que ahora queda tan solo encontrar la forma de medirla. Y en ese sentido, este campo promete nuevos e interesantes resultados y representa una oportunidad experimental para el estudio de agujeros negros y otros fenómenos de gravedad.

Y... ¿ahora qué?

A día de hoy existen muchos enigmas abiertos respecto a los agujeros negros y también existen nuevas ventanas de observación

que nos pueden revelar grandes avances en los años venideros. Dentro del campo puramente teórico, aún se nos escapa la escurridiza teoría subyacente de gravedad cuántica. De ésta se habla en detalle en otros capítulos de este libro, pero su formulación se espera que resolviera el problema de la singularidad y el interior del agujero negro, y con ello también el problema de la paradoja de la información.

Mientras continúa la búsqueda de esta teoría se desarrollan paralelamente estudios para intentar aclarar este problema; también a modo de encontrar indicios que nos faciliten o revelen características que tenga que cumplir la teoría final o que nos permitan discriminar entre el zoo de teorías actual<sup>10</sup>.

Dentro de las propuestas plausibles para resolver el problema de la paradoja de la información se han postulado diferentes escenarios. En lo que sigue voy a comentar brevemente algunos de ellos con el fin de hacernos una idea de las distintas líneas de investigación en curso.

El más estándar establece que debe haber información codificada en las correlaciones de la radiación de Hawking. Estas propuestas se basan en el estudio del entrelazamiento cuántico entre las partículas que caen al agujero negro y entre la radiación Hawking que emerge. El entrelazamiento se puede cuantificar mediante la

---

<sup>10</sup> Aunque esto no siempre pasa, por ejemplo, se da la característica de la universalidad de la entropía de Bekenstein. Es decir, todas las teorías candidatas de gravedad cuántica recuperan el mismo resultado y no nos permiten discernir una teoría privilegiada.

consideración de la entropía de entrelazamiento que ya comentamos, y que permite estudiar qué pasa con la información y cómo podríamos recuperarla. Los diferentes estudios en esta dirección han dado lugar a muchos avances, y también a paradojas que han traído de cabeza a los investigadores, y se puede decir que indagan en que la información se queda codificada en correlaciones cuánticas y éstas de alguna manera están presentes en la radiación emitida. De esta forma, aunque parezca que la información se ha perdido en la práctica, aún reside en el entorno permitiendo que la teoría cuadre y que exista alguna forma de recuperarla<sup>11</sup>. Una idea similar, consiste en que, aunque los agujeros negros no tengan pelo, sí que tienen "pelo cuántico", es decir, que el horizonte contiene más información cuántica que la que establece la teoría clásica, y por lo tanto, esa información impresa en el horizonte, emerge con la radiación y no se pierde en ningún momento.

Otra propuesta es que los agujeros negros no se evaporan completamente, sino que la evaporación se detiene cuando los efectos de gravedad cuántica son dominantes (porque el agujero negro se hace muy pequeño), y así el estado final lo constituye un remanente estable de tamaño de la escala de Planck<sup>12</sup> que almacena la información y nos libra de la paradoja. También se ha

---

<sup>11</sup> Algunas de las ideas más conocidas en esta dirección han sido la complementariedad del agujero negro, los muros de fuego, la teoría holográfica y, recientemente, las islas de entrelazamiento.

<sup>12</sup> La escala de Planck representa la escala en la cual el concepto de espaciotiempo dado por la relatividad general se rompe y sería la gravedad cuántica la que determinaría la física a partir de aquí.

conjeturado con que los efectos de gravedad cuántica en los estadios finales de la evaporación pueden dar lugar a que la radiación emitida sea modificada, y así toda la información almacenada en el agujero negro pueda salir con ella.

Una idea completamente diferente es que la información puede estar irremediablemente perdida y aun así no violar ninguno de los principios de la física establecida. Es decir, de alguna manera el agujero negro actúa como un sumidero que elimina la información en el universo que observamos.

Finalmente, otra idea a considerar, que se ha desarrollado en diferentes marcos, es que quizás no se formen agujeros negros en la naturaleza, sino que el proceso de colapso se "detenga" dando lugar a un objeto ultracompacto que comparte todas las características medidas de los agujeros negros, pero no ha llegado a crear un horizonte de sucesos y una singularidad (creando por ejemplo fuzzballs o las estrellas negras).

Todas estas teorías tienen avances y propuestas interesantes, pero también puntos conflictivos que no terminan de entenderse o de cuadrar completamente, por eso parece que aún queda mucho camino por delante para entender completamente los agujeros negros.

En cualquier caso, el campo de los agujeros negros ya nos ha enseñado cómo teorías establecidas de manera puramente teórica pueden tardar muchos años en llegar a comprobarse o refutarse de manera experimental u observacional, pero la física teórica ha demostrado constituir un marco de trabajo muy sólido para el



establecimiento de nuevas teorías. En los próximos años cabe esperar profundos avances teóricos y, sobre todo, las nuevas ventanas de observación prometen sorprendernos con nuevos resultados experimentales que arrojen algo más de luz a la oscuridad de los agujeros negros.

¡Esperamos expectantes!

Referencias:

- [1] José M. M. Senovilla, "*Premio Nobel de Física 2020 Hoyos negros y sus misteriosos interiores*", Revista Española de Física, Vol. 34 N 4 (2020).
- [2] Gravity Collaboration, "*Detection of orbital motions near the last stable circular orbit of the massive black hole SgrA\**", Astronomy & Astrophysics. 618 (2018) L10.
- [3] The LIGO Scientific Collaboration and the VIRGO Scientific Collaboration, "*Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*", Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 061102.
- [4] The Event Horizon Telescope Collaboration, "*First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole*", Astrophys. J. Lett. 875 (2019), L1.
- [5] Carlos Barceló, Stefano Liberati, Matt Visser, "*Analogue Gravity*", Living Rev. Rel. 8 (2005) 12.
- [6] J. Steinhauer, "*Observation of quantum Hawking radiation and its entanglement in an analogue black hole*. Nature Phys. 12, 959 (2016)".
- [7] Carlos Barceló, "*Analogue black—hole horizons*", Nature Phys. 15

(2019) 3, 210—213.

[Ana Alonso Serrano.](#)

Doctora en Física.

Investigadora postdoctoral en el Max Planck Institute for  
Gravitational Physics (Albert Einstein Institute).

## Capítulo 8

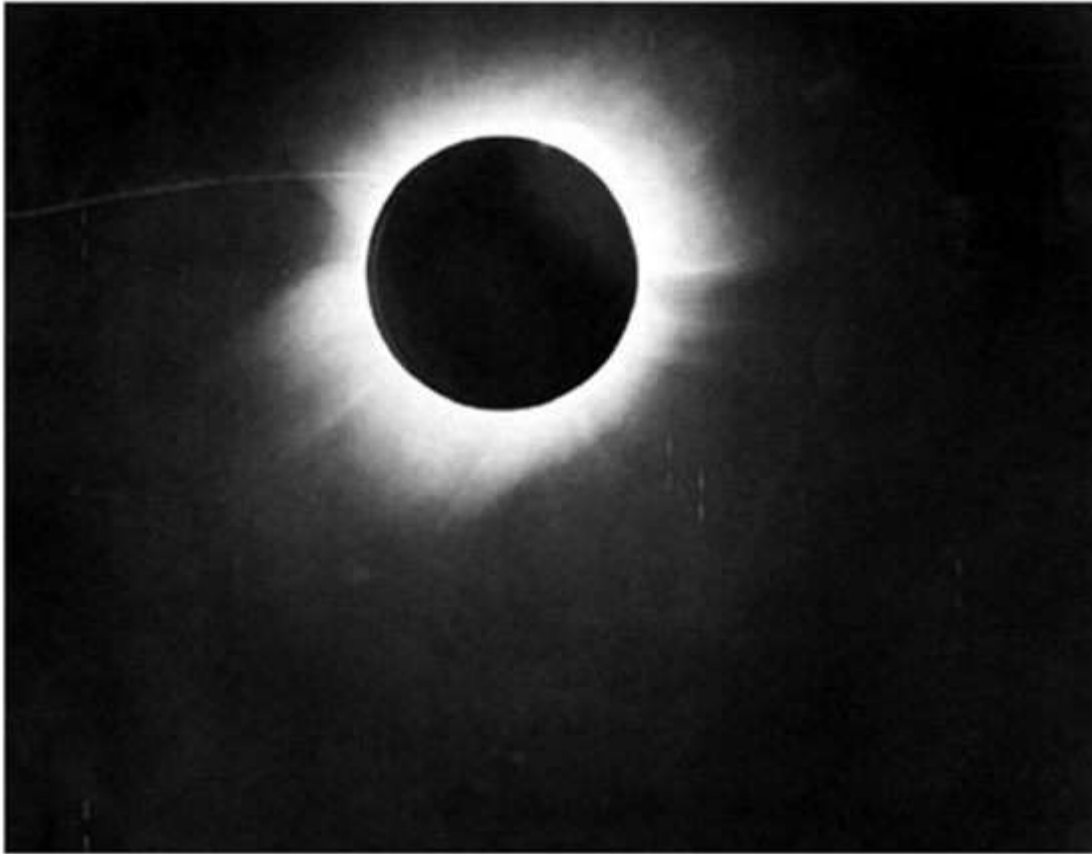
### Ondas gravitatorias y simulaciones numéricas como laboratorios computacionales.

Acababa de comenzar el siglo XX cuando en 1905 la Relatividad Especial de Einstein [1] se proponía como una nueva manera de entender el espacio—tiempo, unos espacio y tiempo que eliminaban su carácter absoluto y que desde ese momento debían entenderse de manera conjunta, como dos caras de una misma moneda. La Relatividad Especial ponía a prueba nuestra intuición, haciendo que aparecieran las famosas contracciones de distancias y dilataciones del tiempo según el observador que estuviera realizando las correspondientes medidas, y poniendo en un lugar destacado a la velocidad de la luz en el vacío. Normalmente se denota con la letra  $c$  a la velocidad de la luz en el vacío, tiene un valor aproximado de 300 mil kilómetros por segundo, y es límite superior a la velocidad a la que pueden desplazarse partículas y objetos masivos y no masivos en el universo, ya sean fotones, neutrinos o una nave espacial. . .

Esta velocidad característica no era desconocida y ya estaba presente en la formulación (relativista) de las ecuaciones del electromagnetismo de Maxwell, que habían sido propuestas en 1865 [2]. Faltaba sin embargo introducir en este espacio—tiempo la interacción gravitatoria, que no se hizo esperar demasiado.

Varios años después, en 1915, Einstein volvía a revolucionar las teorías de la Física hasta el momento, con una visión que

mantenemos hasta hoy en día del espacio—tiempo y la interpretación geométrica de la gravedad.



*Figura 1. Del informe de Sir Arthur Eddington sobre la expedición para verificar la predicción de Albert Einstein de la curvatura de la luz alrededor del sol. FW Dyson, AS Eddington y C. Davidson (1920).*

*"Una determinación de la desviación de la luz por el campo gravitacional del Sol, a partir de las observaciones realizadas en el eclipse total del 29 de mayo de 1919". Fuente:*

[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_eclipse\\_of\\_May\\_29,\\_1919](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_eclipse_of_May_29,_1919)

En la teoría de la Relatividad General [3] desaparecen las fuerzas

propuestas por Newton para explicar la gravedad, que habían regido tanto las trayectorias de las órbitas celestes como las de los proyectiles en la Tierra durante más de dos siglos. La irrupción de una nueva teoría llamada Relatividad General, que interpretaba la gravedad como una geometría, reconciliaba la órbita rebelde de Mercurio y ofrecía una predicción puesta exitosamente a prueba con el eclipse total de Sol de 1919. La imagen de la siguiente página hace referencia justamente a una observación de este eclipse total de Sol. Desde ese momento Einstein se hizo mundialmente famoso. La Relatividad General es una descripción matemática que unifica irremediablemente el dónde y el cuándo, y en donde, de manera muy resumida, la materia y la energía deforman, curvan el espacio—tiempo; esta curvatura del espacio—tiempo dictamina, al mismo tiempo, las trayectorias de los objetos que están inmersos en él.

Las sorpresas asociadas a esta nueva teoría no tardaron en hacer acto de presencia. Aparecieron dos actores inesperados que aún hoy en día son piezas clave en la investigación en gravedad y física en general: los agujeros negros y las ondas gravitacionales o gravitatorias. Los primeros, los agujeros negros, constituyen regiones en donde el espacio—tiempo está tan curvado que ni siquiera los fotones viajando a su velocidad máxima,  $c$ , la velocidad de la luz en el vacío, pueden escapar de esta región; no contamos todavía con una teoría que describa la parte más próxima al centro del interior de estas regiones de manera satisfactoria y son los laboratorios más prometedores para intentar unificar las dos

grandes teorías en la Física del siglo XX, Relatividad General y Mecánica Cuántica. Las soluciones teóricas de agujeros negros sin y con rotación se deben a Schwarzschild [4] y Kerr [5]. La solución de agujero negro sin rotación de Schwarzschild fue obtenida solo varios meses después de la aparición de las ecuaciones de la Relatividad General, pero fue vista al principio como una mera solución matemática con unas propiedades un tanto peculiares; el pobre Schwarzschild no vivió mucho más tiempo y no pudo llegar a entender la importancia de su solución y la repercusión que tendría en los años y décadas siguientes. Entre otros hechos significativos, merece la pena destacar el premio Nobel en Física en 2020 a Andrea M. Ghez, Reinhard Genzel y Roger Penrose por sus contribuciones observacionales y teóricas en el campo de los agujeros negros.

En 1916, aparece nuestro segundo actor inesperado. Einstein, tras una simplificación de las complejas ecuaciones asociadas a la Relatividad General, y considerando un espacio—tiempo sin contenido material ni energético, encontraba una solución en sus ecuaciones que contenía una estructura similar a un comportamiento ondulatorio [6]: el mismo tipo de ecuaciones que aparecen a la hora de explicar cómo se propaga una vibración del aire que identificamos como un sonido cuando hace vibrar el tímpano de nuestro oído, o a la hora de explicar las perturbaciones que se crean en la superficie de un estanque cuando arrojamos una piedra en un día soleado y sin viento. Este comportamiento fue confirmado en situaciones más generales en años posteriores, incluyendo espacios—tiempo que también contenían materia y

energía, analizando otras y otros investigadores de manera rigurosa su definición y propagación, entre los que cabe mencionar a Newman y Penrose. Estas perturbaciones o arrugas del espacio—tiempo reciben el nombre de ondas gravitatorias o gravitacionales, y, con todo merecimiento, están ahora mismo muy de moda.



*Figura 2. Esta interpretación artística hace referencia a la fusión de un sistema binario de dos agujeros negros asociada a la detección GW190521 y ha sido elaborada por el diseñador gráfico valenciano Raúl Rubio en colaboración con el grupo Virgo en Valencia.*

Las ondas gravitatorias son perturbaciones, distorsiones, no de objetos en el espacio—tiempo, sino del propio tejido espacio—

temporal. Estas ondas se generan cuando masas se aceleran rompiendo la simetría axial (la que tiene un cilindro rotando sobre su eje) y se propagan en todas direcciones. Según la Relatividad General, la velocidad a la que se propagan estas ondas gravitatorias es  $c$ , que aparece de nuevo como velocidad característica en la teoría. Además, analizando las ecuaciones con más cuidado y detalle, se puede deducir que en la Relatividad General únicamente tenemos dos formas independientes en las que el espacio—tiempo puede distorsionarse por el paso de una onda gravitatoria, las cuales reciben el nombre de polarizaciones. Si consideramos unos anillos en el plano perpendicular a la dirección de propagación de una onda gravitatoria, la distorsión de estos anillos será la ilustrada en la Figura 3, la dimensión del anillo se hace un poco más grande en una dirección mientras que se hace un poco más pequeña en la dirección perpendicular, y este efecto se va alternando entre estas dos direcciones. La diferencia entre ambas polarizaciones es una rotación de un ángulo de  $45^\circ$  (o  $\pi/2$  radianes), y normalmente se denotan por los símbolos más (+) y cruz (x). En otras teorías de gravedad alternativas a la Relatividad General pueden aparecer más polarizaciones; en total podrían existir hasta 6 polarizaciones o formas independientes en las que se distorsionaría un objeto, y encontrar algún signo de ellas supondría una evidencia de física más allá de la Relatividad General. Mencionaremos más adelante qué detecciones de ondas gravitatorias tenemos, aunque merece la pena adelantar que esta teoría ha superado todas las exigentes pruebas a las que se le ha sometido hasta el momento, incluida la



no observación de más de las dos polarizaciones predichas por la Relatividad General.

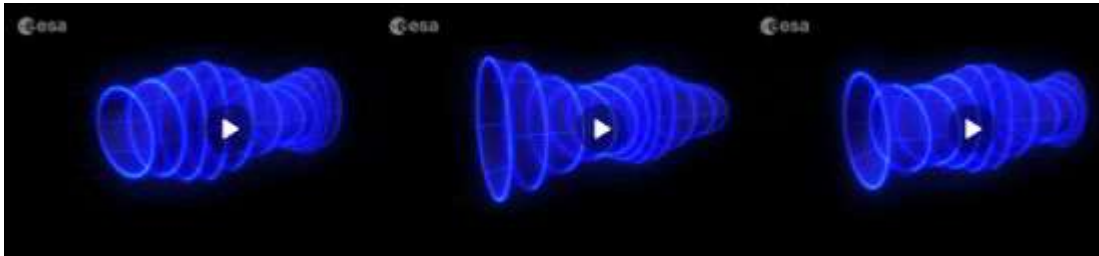


Figura 3 Ilustración representativa de las ondas gravitatorias. Crédito

ESA:

<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=R4yfGKM25VQ>

La enorme imaginación y capacidad mental de Einstein para diseñar sus experimentos mentales a la hora de reflexionar sobre su nueva teoría de la gravedad estuvo también muy presente en sus discusiones con Bohr, poniendo a prueba con ingeniosos planteamientos la consistencia de la Mecánica Cuántica, y la paciencia de Bohr, que, con bastante agudeza y trabajo, salía airoso de estas aparentes contradicciones. La ciencia no se entendería si no tuviésemos la constante necesidad de cuestionar las teorías establecidas hasta el momento, desde un punto de vista teórico y también a través de los experimentos y datos que recabamos, como herramienta fundamental para poder seguir progresando en el entendimiento de los fenómenos naturales que nos rodean, incluyendo la gravedad. De la misma forma, son ahora las recientes detecciones de ondas gravitatorias las que, por un lado, han

confirmado finalmente la última predicción de la teoría de la Relatividad General que quedaba por detectarse de manera directa, y, por otro lado, están poniendo a prueba todos los detalles de la Relatividad General, sin ningún indicio por el momento de desviación de los resultados experimentales con respecto a las predicciones teóricas.

Las ondas gravitatorias son extremadamente débiles. Algunos de los fenómenos más violentos que podemos imaginar en el universo generan unas ondas gravitatorias con una amplitud tan pequeña que el propio Einstein dudaba, no de su existencia, pero sí de la posibilidad de que algún día fuésemos capaces de llegar a detectarlas. Y es que, a un gran equipo multidisciplinar y diverso de científicos y científicas con recursos, tiempo y financiación, puede que no se le resista ningún gran reto. Hemos necesitado, eso sí, un siglo de desarrollos teóricos, computacionales y tecnológicos que desafían nuestra imaginación, y el trabajo colaborativo y continuado de miles de personas durante décadas para poder situarnos en el dulce momento que está viviendo la astronomía de ondas gravitatorias.

Antes de la detección directa de estas ondas gravitatorias, ya teníamos indicios muy fuertes de su existencia de manera indirecta. El ejemplo más famoso es quizás el púlsar (estrella de neutrones altamente magnetizada y con una rotación extremadamente rápida) PSR B1913+16, que forma parte de un sistema binario de dos objetos compactos; este púlsar fue descubierto por Hulse y Taylor en 1974, que en particular observaron con detalle cómo se iba

reduciendo el período orbital del mismo [7].

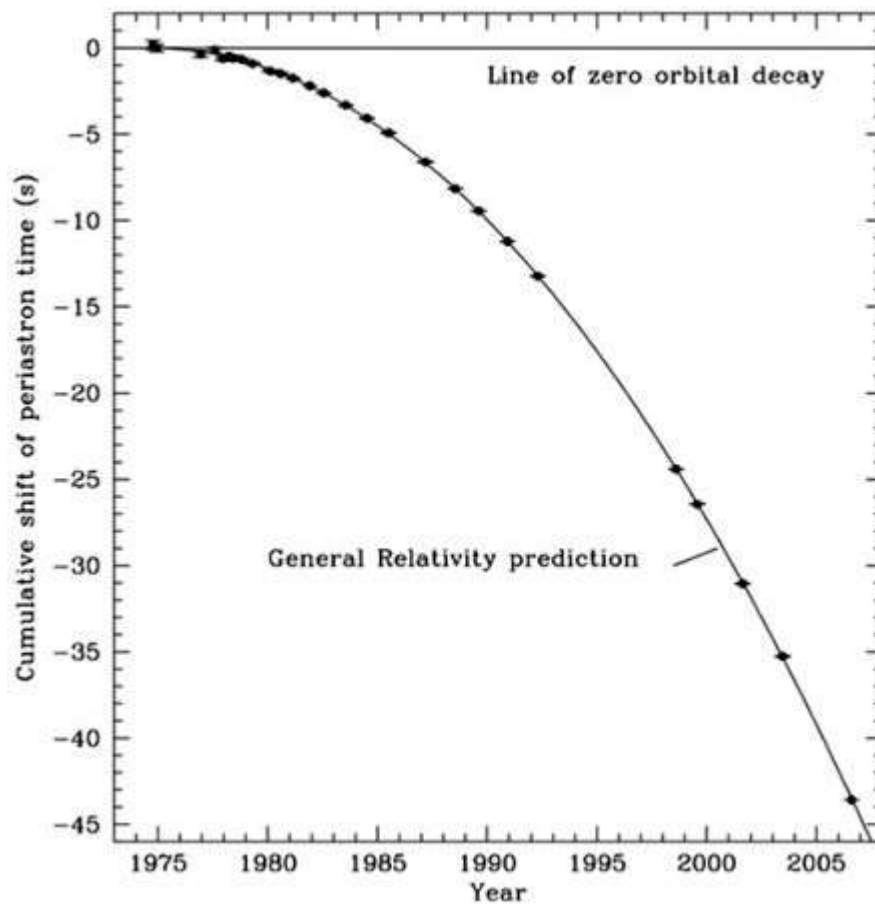


Figura 4 Solapamiento entre las observaciones y la predicción de la Relatividad General en el pulsar PSR B1913+16. Fuente: Weisberg y Taylor (2004),

<https://adsabs.harvard.edu/full/2005ASPC..328...25W>

La emisión de ondas gravitatorias hacía que el sistema fuese radiando energía y haciendo que ambos objetos girasen cada vez más próximos y más rápido. Para más detalles sobre las estrellas de neutrones, no dudéis en echar un vistazo al capítulo de María Ángeles Pérez García. Este trabajo les valió a Hulse y Taylor el

premio Nobel de Física en 1993. Mencionaremos algún premio Nobel más, pero me resulta interesante recordar que el premio Nobel que Einstein recibió no está relacionado con su increíble teoría de la Relatividad General (sino con el fenómeno del efecto fotoeléctrico).

A principios del siglo XXI, tras desarrollos producidos en diferentes direcciones, se plantea una carrera paralela en el campo de las ondas gravitatorias, con cierta intriga por ver si alguna de las dos comunidades científicas implicadas era capaz de adelantar a la otra: por un lado, el desarrollo teórico y numérico, y, por otro lado, el desarrollo experimental de los detectores.

En el lado teórico y numérico, la resolución de las ecuaciones de manera analítica solo es posible en algunos casos sencillos y se necesitaba una resolución numérica para escenarios astrofísicos más realistas como aquellos que involucran objetos compactos como los agujeros negros o las estrellas de neutrones en sistemas binarios, y que eran los primeros candidatos a generar una onda gravitatoria suficientemente intensa como para llegar a ser detectada en nuestros observatorios terrestres. Lidar con la singularidad teórica en el centro de los agujeros negros de Schwarzschild o Kerr, ingeniárselas para desarrollar y aplicar estrategias y métodos numéricos que redujeran el coste computacional tan elevado de estas simulaciones, o extraer de manera precisa la radiación gravitatoria que se generaba en estos escenarios, no eran tareas nada fáciles.

Para hacernos una idea de la complejidad de este desafío, me gustaría señalar que no fue hasta 2005, con el trabajo pionero de

Pretorius [8], seguido de otros trabajos posteriores de muchos grupos, cuando fuimos capaces de resolver numéricamente las ecuaciones de la Relatividad General en el escenario astrofísico de dos agujeros negros que giran uno alrededor del otro, cada vez más rápido y cada vez más cerca, hasta que finalmente se fusionan, y deducir la forma de la onda gravitatoria que generan en este proceso. Este escenario no incluía contenido material ya que la modelización de los agujeros negros está descrita únicamente con curvatura del espacio—tiempo, pero estas simulaciones requerían (y requieren) utilizar la capacidad de cálculo de los grandes centros de supercomputación a nivel mundial. Aún hoy en día, muchas de estas simulaciones son extremadamente costosas y también se están desarrollando otros métodos más efectivos que son validados por simulaciones numéricas precisas, de cara a generar ondas gravitatorias producidas en diferentes escenarios en los que variamos los parámetros físicos que aparecen (como las masas o las rotaciones de los dos agujeros negros que se fusionan), pero reduciendo significativamente el coste computacional.

En el lado del desarrollo experimental de los potenciales observatorios de ondas gravitatorias, se habían propuesto algunos intentos como las barras resonantes de Webber; Webber llegó a anunciar a finales de 1960 que había detectado ondas gravitatorias, pero otros grupos no fueron capaces de repetir estas detecciones y las recientes señales que estamos detectando nos indican que los experimentos de Webber no tenían la sensibilidad suficiente como para llegar a registrar una detección real. Cabe destacar no obstante

su trabajo pionero en esta área.

Las recientes detecciones han sido posible gracias a los observatorios actuales que utilizan la técnica de la interferometría óptica; en estos observatorios, de manera absolutamente simplificada, un haz de luz se divide en dos haces perpendiculares tras atravesar un divisor del haz, recorren tubos kilométricos, con un vacío mejor que el del espacio exterior, hasta llegar a unos espejos suspendidos y aislados de posibles vibraciones terrestres, se reflejan en estos espejos y vuelven a encontrarse en el punto en el que se habían separado. La longitud de los brazos es tal que, si no se produce una distorsión o cambio en la distancia de estos brazos por el paso de una onda gravitatoria, la interferencia destructiva que se produce entre los dos haces que se reencuentran hace que no se detecte luz. Si, por el contrario, una pequeña distorsión hace que uno de los brazos se haga un poco más grande y el otro un poco más pequeño, entonces la interferencia entre los dos haces que se reencuentran no es totalmente destructiva y se genera un patrón de interferencia.

A este principio básico se le suman infinidad de detalles técnicos que complican y hacen mucho más sensible al detector: cavidades de resonancia que aumentan en un par de órdenes de magnitud el recorrido efectivo de los haces de luz antes de reencontrarse, sistemas de limpieza y absorción de luz difusa para evitar interacciones con los haces, tratamiento óptico puntero para que los láseres empleados tengan propiedades óptimas, espejos que pesan decenas (y centenas en un futuro cercano) de kilos con una

geometría muy determinada que no puede desviarse más del grosor de un átomo, complejos sistemas de suspensiones de varios péndulos encadenados que sostienen a los espejos... Como ondas que son las ondas gravitatorias, tienen asociadas frecuencias. En el caso de los detectores actuales, la sensibilidad está limitada a un intervalo de frecuencias; el límite inferior de este intervalo, alrededor de unos 10Hz, se debe principalmente a la actividad sísmica, y el límite superior de este intervalo, alrededor de unos 10000 Hz, se debe principalmente a características cuánticas asociadas con los láseres. Entre estos dos valores de frecuencias podemos detectar ondas gravitatorias actualmente.

Una animación que ilustra las grandes maravillas tecnológicas que son los observatorios de ondas gravitatorias puede encontrarse en Youtube<sup>13</sup>, con subtítulos en varios idiomas incluido el castellano. Invito a todas y todos los lectores a visitar de manera presencial o virtual estos observatorios, para poder imaginar mejor la complejidad técnica y la diversidad de disciplinas involucradas en el funcionamiento de estas instalaciones. Formar parte de una gran colaboración científica es una experiencia en sí misma, y requiere de la colaboración y coordinación de muchas personas con habilidades y maneras de trabajar muy diferentes; también supone vivir de cerca grandes avances científicos y ser de las primeras personas que conoce los asombrosos descubrimientos que estamos viviendo en

---

<sup>13</sup> [https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=h\\_FbHipV3No](https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=h_FbHipV3No)

esta área científica.



*LIGO.*



*Virgo.*





*KAGRA.*

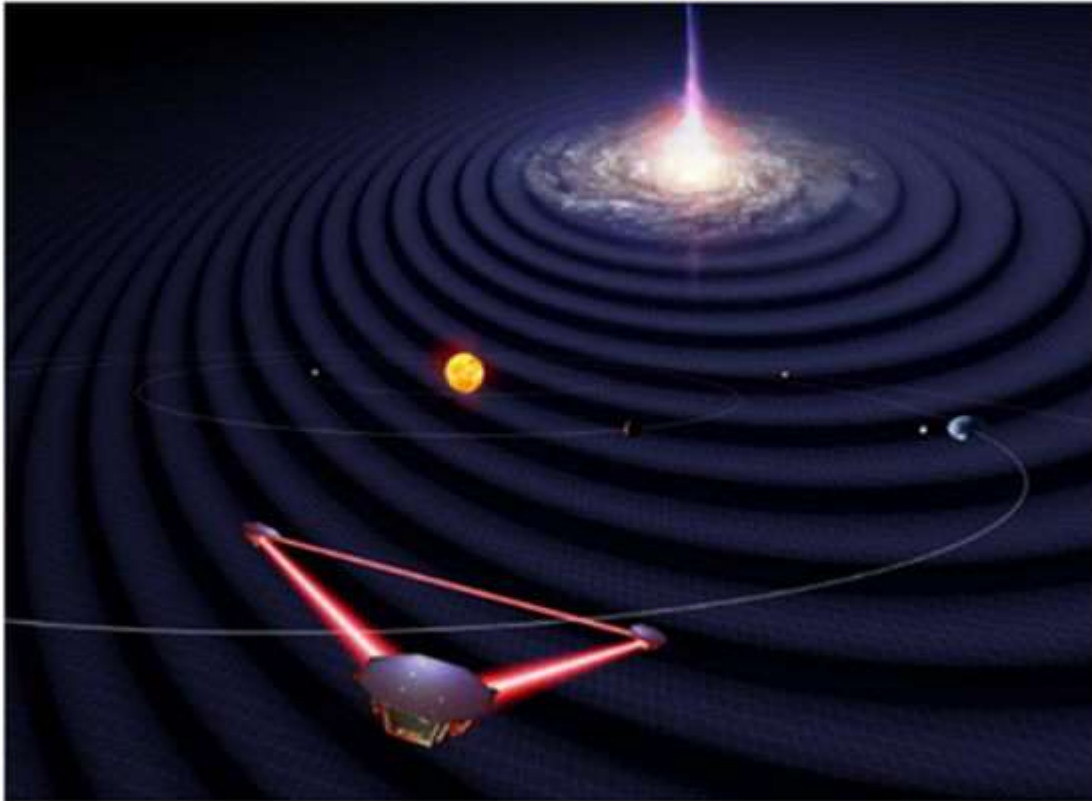
*Figura 5. Observatorios de ondas gravitatorias.*

Ahora mismo disponemos de una red global de detectores operativos formada por 4 instrumentos cuyos brazos perpendiculares tienen forma de una gran L (mayúscula). GEO600 tiene brazos de 600 metros de longitud, se utiliza para el desarrollo y prueba de tecnología que posteriormente se implementa en otros detectores más grandes, y está situado en Alemania, cerca de Hannover. Los dos observatorios LIGO<sup>14</sup> en Estados Unidos, uno en Hanford (estado de Washington) y otro en Livingston (estado de Luisiana), tienen brazos de 4 kilómetros de longitud y fueron los que detectaron en septiembre de 2015 la primera señal de onda gravitatoria [9], procedente de la fusión de un sistema binario de dos agujeros negros. El Observatorio Gravitacional Europeo (EGO) alberga el

---

<sup>14</sup>[https://www.researchgate.net/figure/This-is-the-picture-of-the-Laser-Interferometer-Gravitational-Wave-Observatory\\_fig2\\_318823781](https://www.researchgate.net/figure/This-is-the-picture-of-the-Laser-Interferometer-Gravitational-Wave-Observatory_fig2_318823781)

detector Virgo<sup>15</sup>, operativo tomando datos científicos desde el verano de 2017 y cuyo inicio de construcción es un poco posterior a los detectores americanos, tiene brazos de 3 kilómetros de longitud y está situado cerca de Pisa en Italia.



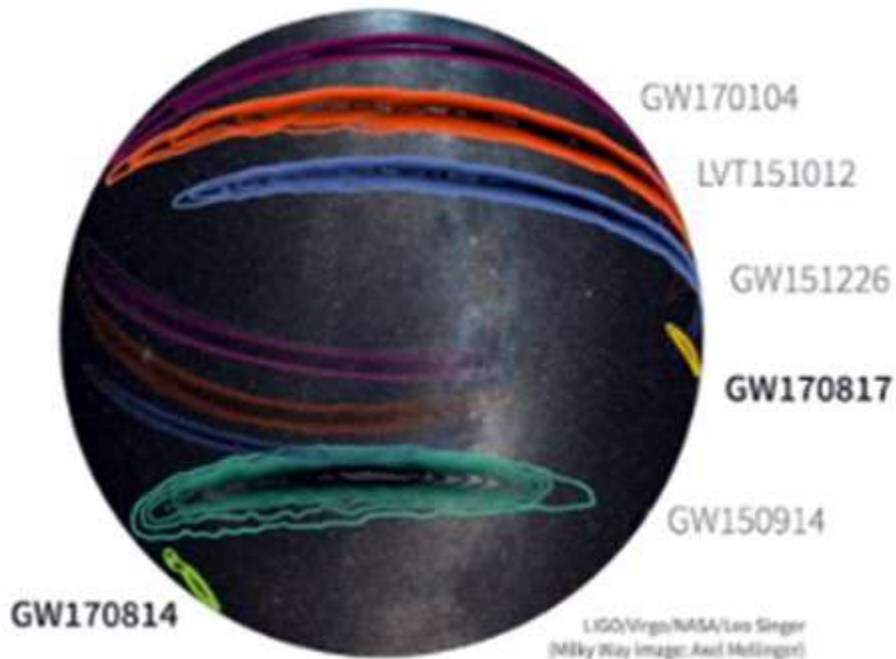
*Figura 6. Impresión artística de LISA. Crédito: University of Florida / Simon Barke, <https://www.aei.mpg.de/40458/lisa>*

A estos detectores habrá que sumar en un futuro cercano el

---

<sup>15</sup><https://www.virgo-gw.eu/>

detector KAGRA<sup>16</sup> en Japón, ya construido y en fase de puesta a punto para poder unirse a los periodos de toma de datos científicos junto a los detectores LIGO—Virgo, y el detector LIGO—India, que está dando sus primeros pasos en su fase de construcción.



*Figura 7 Pasar de los dos observatorios LIGO a la red de tres observatorios LIGO—Virgo reduce significativamente la posible localización de la señal de onda gravitacional en el cielo. Crédito: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger), <https://www.ligo.org/detections/GW170817.php>*

Además de estos detectores ya hay proyectos futuros para las

---

<sup>16</sup> [https://www.researchgate.net/figure/Left-KAGRA-suspended-input-mode-cleaner-optics-right-x-arm-beam-tube-and-tunnel\\_fig2\\_303889307](https://www.researchgate.net/figure/Left-KAGRA-suspended-input-mode-cleaner-optics-right-x-arm-beam-tube-and-tunnel_fig2_303889307)

siguientes generaciones de detectores de ondas gravitatorias: por un lado, los interferómetros ópticos Einstein Telescope y Cosmic Explorer, con brazos de 10 y 20 km de longitud, y que están diseñándose para ser construidos en Europa y Estados Unidos, respectivamente; por otro lado, el interferómetro espacial LISA, con brazos de varios millones de kilómetros, que se pretende poner en órbita terrestre alrededor del Sol detrás de la Tierra. La apasionante carrera tecnológica en la astronomía de ondas gravitatorias está por tanto garantizada, y ojalá nos esperen años de agradables sorpresas en forma de nuevas y sorprendentes detecciones.

La importancia de tener una red de detectores global con varios instrumentos radica en dos aspectos principalmente: eliminación de ruidos sistemáticos y localización precisa de la fuente. En el primer aspecto, el hecho de tener varios detectores nos facilita la tarea de eliminar posibles perturbaciones generadas por ruidos sistemáticos de uno de los detectores, pero que no deben aparecer en otros detectores situados en lugares diferentes, incluso con tecnologías ligeramente diferentes. En el segundo aspecto, el hecho de tener al menos 3 detectores y conocer los principios de la trigonometría básica permite localizar la fuente en el cielo, de la misma manera que necesitamos al menos 3 repetidores para poder determinar la localización de un dispositivo móvil conectado a la red. En el caso de más de 3 detectores la localización es todavía más precisa e incluso reduce los riesgos de que uno de los detectores en el momento de la detección no se encuentre operativo por alguna actualización puntual. En la Figura 7 se puede ver la diferencia de

las bandas asociadas a potenciales localizaciones de una fuente cuando se disponen de 2 detectores, en comparación con las regiones mucho más pequeñas con 3 detectores como en los casos de GW170814 (primera triple detección por los 3 detectores) y de GW170817 (primera fusión de dos estrellas de neutrones).

Fue clave el hecho de que, en el momento de la detección de GW170817 en agosto de 2017 [10], tanto los dos detectores LIGO como el detector Virgo estuvieran en marcha con suficiente sensibilidad; esto permitió la localización precisa de la fuente de manera muy rápida y el posterior seguimiento por parte de la comunidad astronómica mundial con más de 70 observatorios terrestres y satélites, que registraron señales procedentes de esa misma región en el cielo en las diferentes frecuencias del espectro electromagnético (rayos gamma, luz visible, emisión infrarroja, emisión ultravioleta, rayos X y ondas de radio). Esta detección supuso el inicio de la astronomía de multi—mensajeros que incluía a las ondas gravitatorias, la posibilidad por primera vez de realizar una estimación de la expansión local del universo (la famosa constante de Hubble) mediante ondas gravitatorias y la confirmación de que elementos de la tabla periódica como el oro, el uranio o el platino, se formaban en este tipo de escenarios astrofísicos. Junto con el hecho de que el carbono que forma las llamadas moléculas de la vida se forme en las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar en las estrellas, podemos decir que somos polvo de estrellas y nos gusta adornarnos con restos de fusiones de estrellas de neutrones. Una ilustración de todo el proceso puede

verse en Youtube<sup>17</sup>.

2017 fue un año mágico para la astronomía de ondas gravitatorias. El premio Nobel en Física en este año fue otorgado a los físicos Kip Thorne, Barry C. Barish y Rainer Weiss, por la detección directa de las ondas gravitatorias como pioneros de las colaboraciones LIGO—Virgo. El mismo año también recibieron el premio Princesa de Asturias a la Investigación Científico Técnica, probablemente el galardón más importante en investigación en nuestro país.

Hasta el momento tras los tres periodos de observación de los detectores LIGO—Virgo, las colaboraciones científicas LIGO—Virgo—KAGRA han publicado la detección de más de 90 eventos [11], cada uno de los cuales está asociado con la fusión de un sistema binario de dos objetos compactos que al fusionarse dan lugar a otro objeto compacto. Algunas de estas observaciones están planteando preguntas interesantes en otras áreas de la física, como los procesos al final de la vida de las estrellas y la evolución estelar, o la jerarquía de formación de agujeros negros y la existencia de agujeros negros de masa intermedia. Tenemos ya observaciones de sistemas binarios mixtos de objetos compactos, en los que un agujero negro y una estrella de neutrones se fusionan para generar otro agujero negro. Para una revisión completa de los eventos registrados hasta el momento y las implicaciones físicas y astrofísicas, recomiendo a las y los lectores de esta colección echar

---

<sup>17</sup>[https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=x\\_Akn8fUBeQ](https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=x_Akn8fUBeQ)

un vistazo al reciente artículo<sup>18</sup> "Observaciones de ondas gravitacionales por la colaboración LIGO—Virgo—KAGRA" en el boletín de invierno de 2021 de la Sociedad Española de Astronomía (SEA), firmado por varias de las personas al frente de la coordinación de grupos de investigación en España que forman parte de las colaboraciones LIGO—Virgo.

El reto que nos plantean las ondas gravitatorias no termina aquí, en realidad podríamos decir que la aventura no ha hecho más que comenzar. En el ámbito más computacional, se necesitan simulaciones más precisas y además simulaciones de escenarios astrofísicos más diversos, incluyendo algunas posibilidades especulativas como hipotéticas estrellas de bosones o materia exótica formada por otras partículas con características diferentes. A partir de estas simulaciones se pueden generar catálogos sintéticos de señales de ondas gravitatorias generadas por los diferentes escenarios. Nuestros ordenadores son los laboratorios computacionales perfectos para construir una biblioteca de señales de ondas gravitatorias, a la espera de que la naturaleza sea generosa de nuevo y nos brinde la posibilidad de detectar algunas de las señales de esta biblioteca e incluso otras señales que desafíen nuestros modelos actuales. Estos catálogos son fundamentales a la hora de apoyar o descartar algunas propuestas teóricas, dependiendo de si las implicaciones de los diferentes modelos

---

<sup>18</sup>[https://www.sea-astronomia.es/sites/default/files/bi2021\\_seaboletin\\_invierno2021.pdf](https://www.sea-astronomia.es/sites/default/files/bi2021_seaboletin_invierno2021.pdf)

aparecen en las observaciones; como ejemplo, podemos mencionar las cotas sobre la velocidad de propagación de las ondas gravitatorias extraídas a partir de la observación del sistema binario de estrellas de neutrones que descartó algunas teorías alternativas a la Relatividad General.

También son fundamentales estos catálogos a la hora de extraer estas señales de los ruidos en las que están inmersas. Si conocemos la forma de la onda gravitatoria que estamos buscando, podemos aplicar técnicas de "matched filtering" o filtro adaptado, en donde se buscan coincidencias de las señales utilizadas como plantillas y los datos en los diferentes detectores. Este método es comúnmente usado por ejemplo para desenterrar señales de fusiones de sistemas binarios de dos agujeros negros. También se pueden llevar a cabo búsquedas más generales en donde la búsqueda se centra en comprobar si un mismo patrón aparece en más de un detector y con una intensidad de señal que supera un umbral preestablecido; estas búsquedas son más costosas, pero también más generales.

Finalmente, me gustaría destacar que en los últimos años se están explorando otras técnicas de análisis de datos como el "Machine Learning" o aprendizaje automático, muy conocido en limpieza y reconocimiento de imágenes; en este caso las búsquedas requieren un entrenamiento previo costoso haciendo uso de una gran cantidad de datos que necesitan estar disponibles, pero, una vez este entrenamiento está hecho, las búsquedas de las señales son relativamente rápidas. Como muestra de la potencia de estas técnicas tanto a la hora de analizar algunos tipos de ruidos, como



los asociados a la actividad sísmica, como a la hora de extraer señales, en el análisis de los datos de los detectores, y la necesidad de colaboración multidisciplinar entre varias áreas, encontramos el proyecto G2net<sup>19</sup>, una Acción COST europea que combina éstas y otras disciplinas.

Solo falta tener un poco de paciencia, ya que esperamos que los detectores se pongan de nuevo a tomar datos científicos a finales de 2022. En tan solo unos años desde la primera detección, ya están revolucionando nuestra manera de observar y entender el universo. ¿Qué otras maravillosas sorpresas están por llegar? ¿Tendremos la suerte de contar con los neutrinos también en esta astronomía de multi—mensajeros junto con las ondas gravitatorias? ¿Podremos observar pronto una señal de onda gravitatoria generada por una explosión de supernova en nuestra galaxia?...

Os recomiendo seguir todas las noticias en las páginas web de las diferentes colaboraciones y sus correspondientes cuentas en redes sociales: Colaboración Científica LIGO, <https://ligo.org/> y @LIGO en Twitter; Colaboración Virgo, <https://www.virgo-gw.eu/> y @ego\_virgo en Twitter; Colaboración KAGRA, <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/> y @KAGRA\_PR en Twitter.

## Referencias:

[1] A. Einstein, 1905, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen

---

<sup>19</sup><https://www.g2net.eu/>

der Physik 17, 891—921.

[https://web.archive.org/web/20091229162203/http://www.prophysik.de/Phy/pdfs/ger\\_890\\_921.pdf](https://web.archive.org/web/20091229162203/http://www.prophysik.de/Phy/pdfs/ger_890_921.pdf)

[2] J. C. Maxwell, 1865, *A dynamical theory of the electromagnetic field*, Philosophical transactions of the Royal Society of London, 155.

<https://archive.org/details/dynamicaltheoryo00maxw>

[3] A. Einstein, 1915, *Die Feldgleichungen der Gravitation*, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaftern zu Berlin, 844—847.

[4] Letter from K. Schwarzschild to A. Einstein, 1915, in *The Collected Papers of Albert Einstein*, 8A, document 169.

[5] R. P. Kerr, 1963, *Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics*, Phys. Rev. Lett. 11 (5): 237—238. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.11.237>.

[6] A. Einstein, 1916, *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 688—696.

<https://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocuView?url=/permanent/echo/einstein/sitzungsberichte/BGG54UCY/index.meta>

A. Einstein, 1918, *Über Gravitationswellen*, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 154—167.

<https://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocuView?url=/permanent/echo/einstein/sitzungsberichte/W7ZU8V1E/index.meta>

[7] J. M. Weisberg, D. J. Nice and J. H. Taylor, 2010, *Timing*

*measurements of the relativistic binary pulsar PSR B1913+16*, The Astrophysical Journal, 722, 1030—1034.

<https://doi.org/10.1088/0004-637X/722/2/1030>

[8] F. Pretorius, 2005, *Evolution of Binary Black—Hole Spacetimes*, Phys. Rev. Lett. 95, 121101.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.121101>

[9] LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, 2016, *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, Phys. Rev. Lett. 116, 061102.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>

[10] LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, 2017, *GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral*, Phys. Rev. Lett. 119, 161101.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101>

[11] LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration and KAGRA Collaboration, 2021, *GWTC—3: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo during the second part of the third observing run*. [arXiv:11. 03606v2 [gr—qc]].

#### Bibliografía:

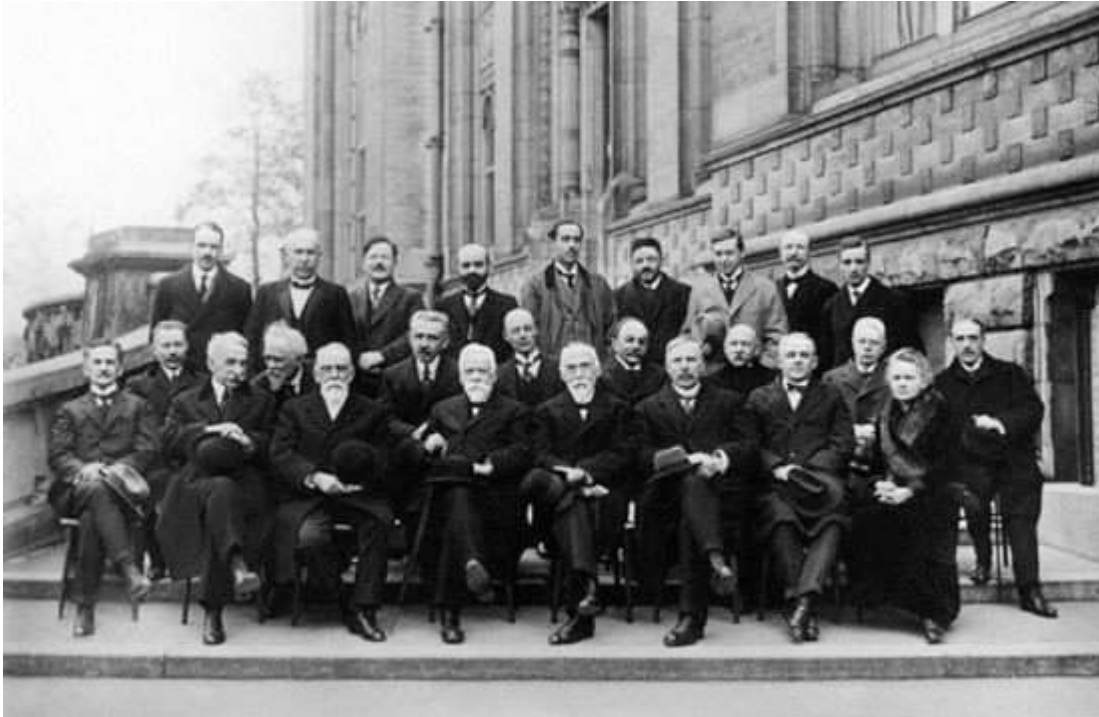
(1) Einstein online, una página web muy recomendable:

<https://www.einstein-online.info/en/>

(2) *Handbook of Gravitational Wave Astronomy*, Cosimo Bambi, Stavros Katsanevas, Konstantinos D. Kokkotas (Editors), Springer Nature Reference, Springer (2022).

[Isabel Cordero Carrión.](#)

Licenciada en Matemáticas y Doctora en Astrofísica.  
Profesora Titular de Universidad, Facultad de Matemáticas de la  
Universitat de València, España.



*Fotografía tomada en el 3° Congreso Solvay celebrado en 1921, "Átomos y Electrones". De pie, de izda. a dcha.: William Lawrence Bragg, Edmond van Aubel, Wander Johannes de Haas, Edouard Herzen, Charles Glover Barkla, Paul Ehrenfest, Karl Manne Siegbahn, Jules—Émile Verschaffelt, Léon Brillouin. Sentados, de Izda. a dcha.: Albert Abraham Michelson, Martin Knudsen, Pierre Weiss, Jean Perrin, Marcel Brillouin, Paul Langevin, Ernest Solvay, Owen Willans Richardson, Hendrik Antoon Lorentz, Joseph Larmor, Ernest Rutherford, Heike Kamerlingh Onnes, Robert Andrews Millikan, Pieter Zeeman, Marie Curie, Maurice de Broglie. [Proceedings 1921](#)*

## Capítulo 9

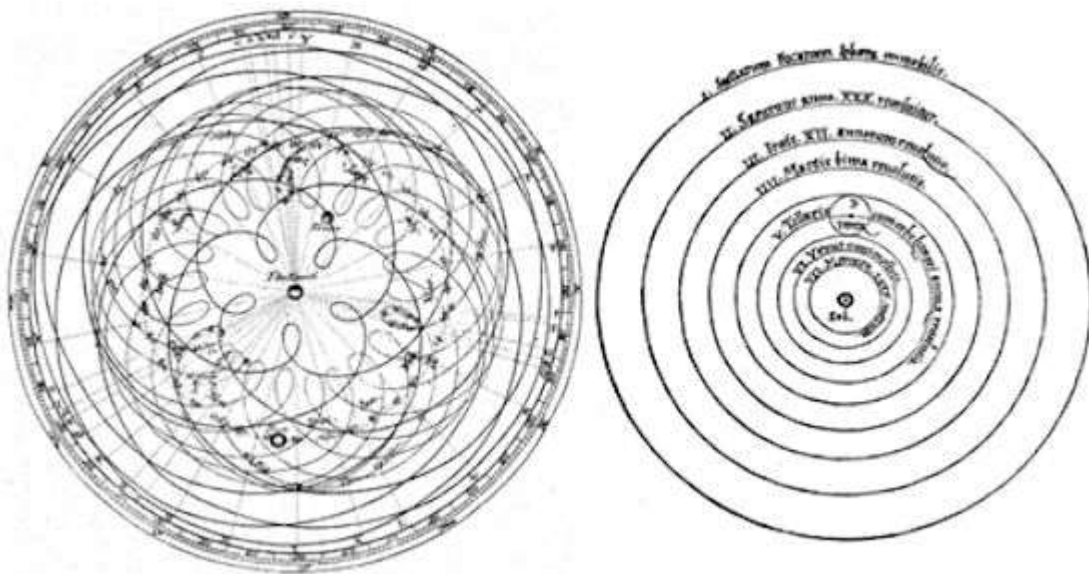
### Astronomía multi—mensajero y el papel de los rayos gamma para búsqueda de materia oscura.

Que a los seres humanos siempre nos ha fascinado levantar la cabeza hacia el cielo y tratar de entender qué es lo que ocurre por allá arriba, no le pillaré de nuevas a nadie. Llevamos milenios observando las luces brillantes que hay sobre nosotros, pero ¿y si hay algo más que no podemos ver directamente con nuestros ojos? De hecho, sabemos que lo hay. Sabemos que la luz visible es solo una pequeña parte del espectro, y que nos llega luz del Universo de muchas energías distintas. Vale genial, pero ¿y si hubiera algo más que no se pudiera ver a través de ninguna luz? Pues por suerte, del Universo no solo nos llega luz, nos llegan otra clase de partículas de un origen a veces claro y otras no tanto. Incluso el Nobel de Física de 2017 fue para la detección de ondas gravitatorias predichas por Einstein. Vaya pues sí que estamos preparados... Entonces, ¿no hay nada en el Universo que desconozcamos? Y si os digo que, con todas las observaciones y el conocimiento actuales, solo conocemos el 5% de todo el Universo...

Da igual que multi—mensajero os suene al repartidor de Amazon, que solo hayáis oído hablar de rayos gamma en referencia a Hulk o que materia oscura os suene a pura ciencia ficción. En este capítulo vamos a tratar de entender uno de los misterios más fundamentales del Universo, ¿qué es toda esa materia que no podemos ver? O igual sí...

¿Astro—qué? ¿Pero eso no es lo del horóscopo?

Astronomía, no astrología. Aunque en ambas se hable de constelaciones y planetas, rara vez oiréis a ningún astrónomo deciros que esta semana os irá bien en el amor porque Venus se alinea con Urano.



*Figura 1. A la izquierda, representación modelo geocéntrico del Sistema Solar, con un intrincado sistema de órbitas para explicar el movimiento retrógrado de los planetas en la esfera celeste. A la derecha, representación del modelo heliocentrista.*

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cassini\\_apparent.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cassini_apparent.jpg)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Copernican\\_heliocentrism\\_diagram.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Copernican_heliocentrism_diagram.jpg)

Aclarada la confusión, si de verdad queremos entender el Universo

en el que vivimos, empezar por lo que no sabemos es algo así como montar una casa sin saber lo que son los ladrillos. Así que, como cuando empieza una nueva temporada de una serie, vamos a repasar lo que sucedió en capítulos anteriores.

Encontrar el inicio del estudio de los astros es imposible, pero las primeras mediciones exactas de los periodos de la Luna o el Sol proceden de la cultura maya. Básicamente, usaron estas medidas para hacer calendarios y mapas estelares para orientarse.

Si avanzamos un poco, aparecen nombres como Hiparco, que creó el primer catálogo de estrellas, o Hipatia, que mejoró muchísimo el diseño de los astrolabios (instrumentos para determinar posiciones de las estrellas). Pero todos ellos tenían algo en común, y es que todo lo que podían observar era a través de sus ojos.

A Galileo esto no le convencía mucho, y varios siglos más tarde (1609) creó el primer sistema de lentes para observar el firmamento, el primer telescopio. Gracias a los estudios previos de Copérnico, Brahe y Kepler sobre nuestro sistema solar, Galileo encontró que todas sus observaciones solo eran compatibles con el modelo que ellos explicaban.

El siguiente *plot twist* vino de la mano de Newton. Newton aunó en sus leyes que la fuerza que hacía que las cosas se cayeran al suelo, tenía que ser la misma que mantenía a los planetas rotando alrededor del Sol, la primera gran unificación dentro de la física. Además, cambió el sistema de lentes de los telescopios por un sistema de espejos, que permitía eliminar distorsiones ópticas. Aun así, aunque fuera a través de un instrumento, el último receptor de



la luz seguía siendo el ojo humano.

Cerrando la temporada del siglo XIX, varios astrónomos detectaron "rayos invisibles" que calentaban (infrarrojos) o que provocaban reacciones químicas (ultravioletas). Estos rayos tan raros resultaron no ser otra cosa que luz que nuestros ojos no están preparados para ver. Con estos resultados, el físico Maxwell formuló el electromagnetismo, donde estos rayos se explican cómo ondas que se propagaban en el espacio y el tiempo. Cada onda se caracteriza por su energía asociada que se traduce como una frecuencia o una longitud de onda. Además, resulta que cada rango de energía es capaz de fotografiar un mismo objeto de manera distinta, qué manera de complicarse... Pero espera, ¡esto es bueno! Radiando un mismo objeto con distintas "luces" somos capaces de entender cómo funciona a distintas escalas, como un zoom de una cámara. Si nos miramos la pierna tal cual, solo veremos una pierna. Pero si miramos la pierna a través de rayos X (luz más energética que la visible), podremos ver los huesos y con suerte, que no nos hemos roto ninguno.

Entonces, ¡podemos hacer lo mismo con el Universo! Podemos construir telescopios que detecten estas distintas longitudes de onda y ver más allá de lo que nos permite el ojo; sacar "otras fotos" de lo que compone el Universo. Y eso es lo que hemos hecho.

En la actualidad tenemos telescopios de todos los tamaños y clases, desde algunos que detectan ondas de radio y microondas (como las que emiten tus aparatos de casa), hasta los que detectan rayos gamma, un billón de veces más energéticos que la luz que nuestros

ojos pueden captar.



*Figura 2 A la izquierda, el antiguo telescopio refractor de Galileo. A la derecha, tres telescopios actuales. Los espejos de MAGIC son capaces de observar la luz más energética del Universo. Detrás, el GRANTECAN (Gran Telescopio de Canarias), uno de los telescopios ópticos más grandes del mundo.*

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bertini\\_fresco\\_of\\_Galileo\\_Galilei\\_and\\_Doge\\_of\\_Venice.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bertini_fresco_of_Galileo_Galilei_and_Doge_of_Venice.jpg)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MAGIC\\_Teleskop.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MAGIC_Teleskop.png)

A pesar de que todos se llamen telescopios, son instrumentos muy distintos y mucho más complejos que los que diseñaron los primeros astrónomos. De hecho, algunos se forman uniendo las capacidades de varios telescopios en distintos lugares del mundo, como el famoso Event Horizon Telescope (EHT), responsable de la fotografía del agujero negro de la galaxia M87. Además, tenemos la suficiente tecnología para no limitarnos a ponerlos en el suelo, ¡podemos mandarlos al espacio! El telescopio Hubble lleva años

ocupando los fondos de pantalla de nuestros ordenadores con fotos realmente impresionantes (<https://hubblesite.org/>)<sup>20</sup>.

Pero sabemos que nuestra serie no termina aquí, os hemos dicho que hay más Universo desconocido que conocido. Un segundo, ¿cómo sabemos eso? ¿Cómo sabemos que todo lo que sabemos no es todo lo que se puede saber? Menudo trabalenguas. Digamos que no sois a los primeros que os pasa esto. A principios del siglo XX había un clima entre los físicos de estancamiento. Podíamos describir la luz a través del electromagnetismo, la mecánica estaba buscando aplicaciones en la vida cotidiana, con la termodinámica sabíamos cómo se comportaban de manera macroscópica los cuerpos más pequeños y las leyes de Newton seguían irrefutables. ¿Alguien sabe que pasó entonces?

Primeros datos del Universo escondido.

Si habéis dicho la física cuántica y la relatividad, habéis acertado. Si habéis dicho que fueron los resultados de estas nuevas fotos del Universo, también. Pero vamos pasito a pasito.

Entramos en el siglo XX. A estas alturas ya conocemos bien el electromagnetismo, pero alguien tuvo la brillante idea de comprobar si era compatible con la mecánica. Con lo bien que estábamos, que pensábamos que ya lo sabíamos todo. . . Pues va, y no lo son. Este descubrimiento desencadenó que unos años más tarde, Einstein

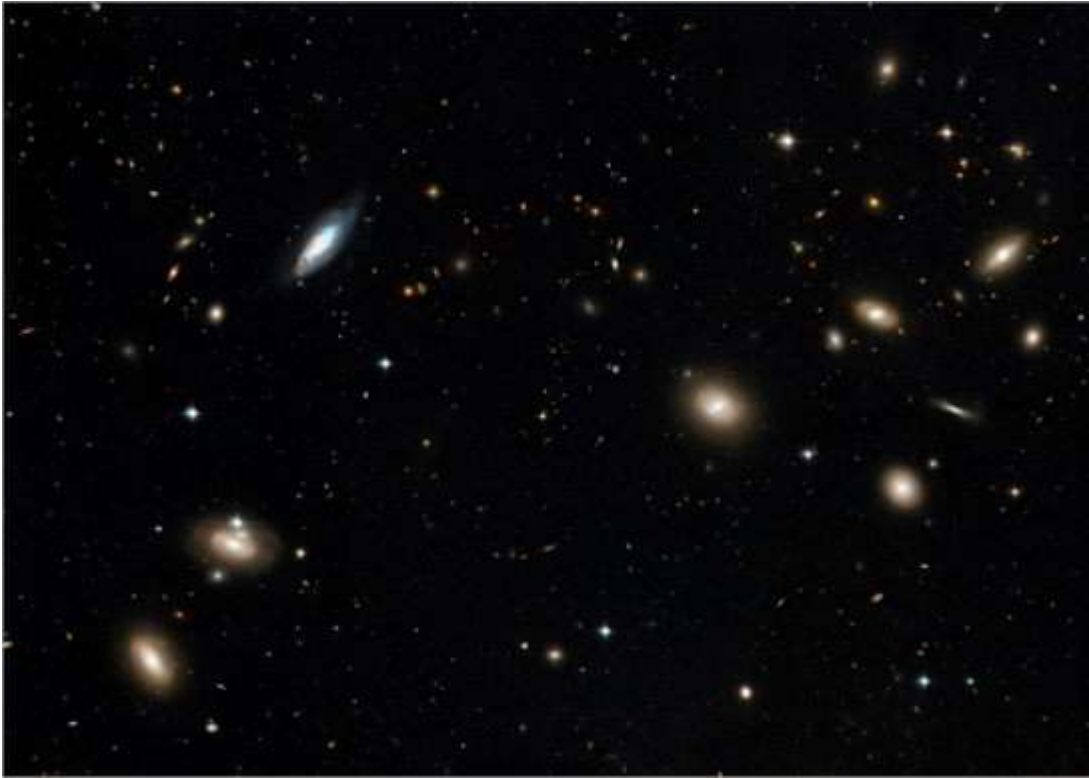
---

<sup>20</sup>Nota del coordinador: En el preciso momento de estar editando este texto se está produciendo el lanzamiento del Telescopio James Webb (<https://webbtelescope.org/>).

terminase de desarrollar la teoría de la relatividad especial, que resuelve este problema fijando que la luz siempre viaja a la misma velocidad en el vacío. Sin embargo, había algo que aún quedaba fuera de la ecuación, describir la fuerza de la gravedad, lo que hizo con la teoría de la relatividad general. En ella, la gravedad ahora es solo una consecuencia directa de cómo el espacio y el tiempo se relacionan con la materia, y a pesar de que las ecuaciones son muy complicadas, este es el mensaje que nos tenemos que llevar a casa.

La relatividad general cambió el paradigma de cómo entendíamos el Universo, y daba explicación a algunos fenómenos que con la teoría de la gravedad newtoniana no había manera. Cuando las ecuaciones estuvieron listas, un montón de matemáticos y físicos se lanzaron a intentar resolverlas, entre ellas su propio creador. Pero para ello, se necesita asumir una manera de medir distancias y tiempo. Si consideramos el Universo como un todo y ponemos en las ecuaciones de Einstein esta manera concreta de medir distancias (espaciales y temporales), ¡nos encontramos con unas ecuaciones que describen la historia y la evolución de nuestro Universo! Imaginad, de un plumazo, ser capaz de ver cómo fue el Universo primitivo y a la vez, que nos depara el futuro. Una conclusión de estos resultados fue que el Universo no era estático (que está "creciendo"), y por motivos que escapan a nuestra comprensión, esto a Einstein no le gustó ni un pelo. Así que decidió añadir un término a las ecuaciones, uno que estaba permitido matemáticamente y que, según él, permitía describir un Universo estático. Ay... Mira que a día de hoy seguimos haciendo

descubrimientos validando sus cálculos, pero cómo se equivocó con esta interpretación...



*Figura 3. Cúmulo de galaxias Coma, responsable de los primeros indicios de que había una materia escondida que no emitía luz.*

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The\\_Coma\\_Galaxy\\_Cluster\\_as\\_seen\\_by\\_Hubble\\_Heic0813a.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Coma_Galaxy_Cluster_as_seen_by_Hubble_Heic0813a.jpg)

De momento, vamos a dejar este término, que llamaremos constante cosmológica en la recámara (es una herramienta secreta).

Paralelamente a todo este desarrollo híper—matemático, los astrónomos seguían mirando al cielo y cada vez eran capaces de descubrir y ver nuevos objetos, y cómo no, se encontraban con

cosas que no tenían ni idea de qué eran. El físico Hubble midió que las galaxias que estaban más alejadas de nosotros se alejaban cada vez a mayor velocidad (esto a Einstein tampoco le gustó).

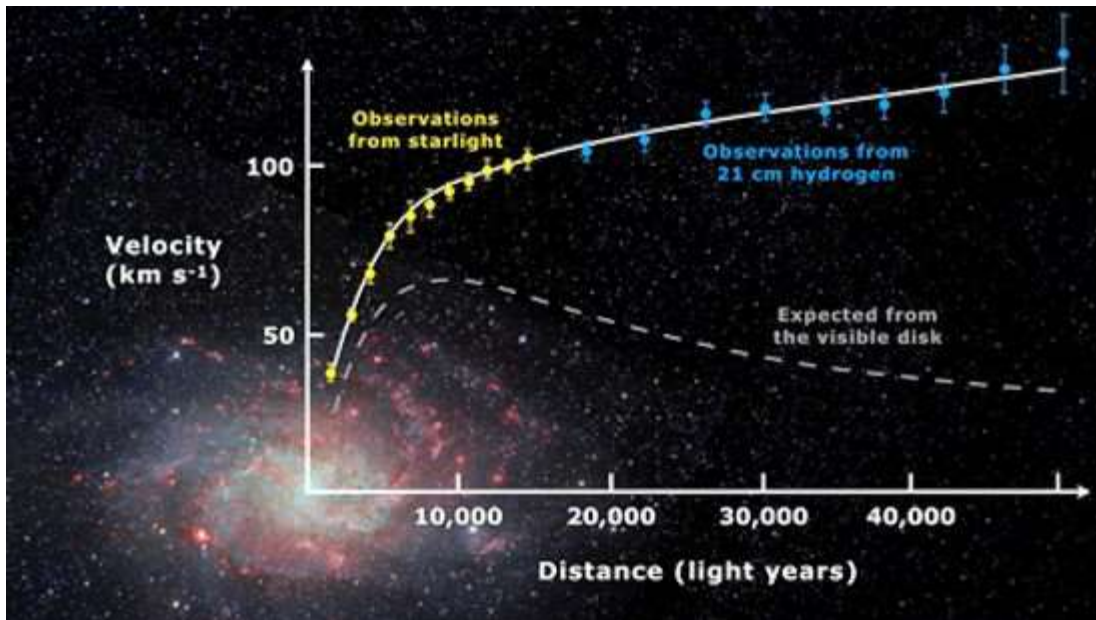


Figura 4 Curva de rotación de la galaxia Triangulum. Según la masa medida por la materia visible (la que emite luz), usando la teoría de Newton esperaríamos que las estrellas más alejadas del centro (distancia en el eje X) rotasen cada vez a más lentamente (menor velocidad, eje Y), como se ve en la línea blanca discontinua. Sin embargo, las observaciones (puntos amarillos y azules), muestran que la velocidad de las estrellas aumenta cuánto más alejadas están. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotation\\_curve\\_of\\_spiral\\_galaxy\\_Messier\\_33\\_\(Triangulum\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotation_curve_of_spiral_galaxy_Messier_33_(Triangulum).png)

Unos físicos de los famosos Laboratorios Bell tenían problemas con su antena de comunicación satélite porque medían un ruido de

fondo apuntaran a donde apuntaran. . . Y los fenómenos paranormales no terminaban aquí.

En estos momentos, era bien conocido que hay una correlación entre la masa de un objeto y los procesos que hacen que este emita luz. De hecho, es la principal manera de medir la masa de objetos celestes. En esta tesitura, el astrónomo Zwicky encontró que al cúmulo de galaxias que estaba observando, le faltaba masa. Es decir, según la gravedad newtoniana, para que el cúmulo se moviera a la velocidad que medía, tenía que haber más masa de la que se veía. A finales de los años 60, la astrónoma Vera Rubin consiguió medir con muchísima precisión la velocidad de las estrellas que había en las partes exteriores de una galaxia. Y el resultado fue medir con mucha más precisión esa masa faltante.

En un siglo, pasamos de "entenderlo todo" a saber que no sabíamos ni la mitad de lo que creíamos. Teníamos un montón de observaciones que no sabíamos cómo explicar, pero una teoría de la gravedad, casi por estrenar, que nos permite describir el Universo.

Algo que pesa y que no se ve: materia oscura.

Siento decepcionaros, pero la verdad es que a día de hoy seguimos sin saber qué es aquella masa faltante que no emite luz. Lo bueno, es que en estos casi 100 años desde los primeros indicios tenemos un poco más de información de qué es esta materia oscura. Aunque realmente sabemos más sobre lo que no puede ser.

Por sorprendente que os parezca, una de las opciones que se sigue barajando es que sigamos sin entender bien la gravedad. Una de las maravillas de la teoría de la relatividad general es que, en las

condiciones apropiadas, recupera la teoría de Newton. Sin embargo, ya hemos visto que con ella no podemos reproducir los datos de las curvas de rotaciones. Una de las maneras de interpretar esto es que hay una masa que no podemos ver, pero ¿y si lo que está mal es cómo hacemos los cálculos gravitatorios? Las teorías de gravedad modificada buscan nuevas ecuaciones, al estilo de las de Newton, que puedan corregir este efecto sin la necesidad de contemplar la existencia de una materia rara. Pero no están exentas de problemas. El principal es que estas observaciones de "materia oscura" provienen de objetos celestes de características muy distintas, es una señal universal. Esto es un problema porque estas modificaciones son distintas para cada objeto, lo cual pues puede ser, pero está lejos de estar probado científicamente.

Sin embargo, la interpretación de materia oscura cabe dentro de la relatividad general, tan bien comprobada en la actualidad. Y tampoco nos parece descabellado el hecho de que haya algo en el Universo que aún sea un desconocido. Espera, ¿has dicho que cabe dentro de la relatividad general? ¡Veo que no se os pasa ni una! Efectivamente, este término encaja perfectamente y de hecho es fundamental para explicar las observaciones a escala cosmológica.

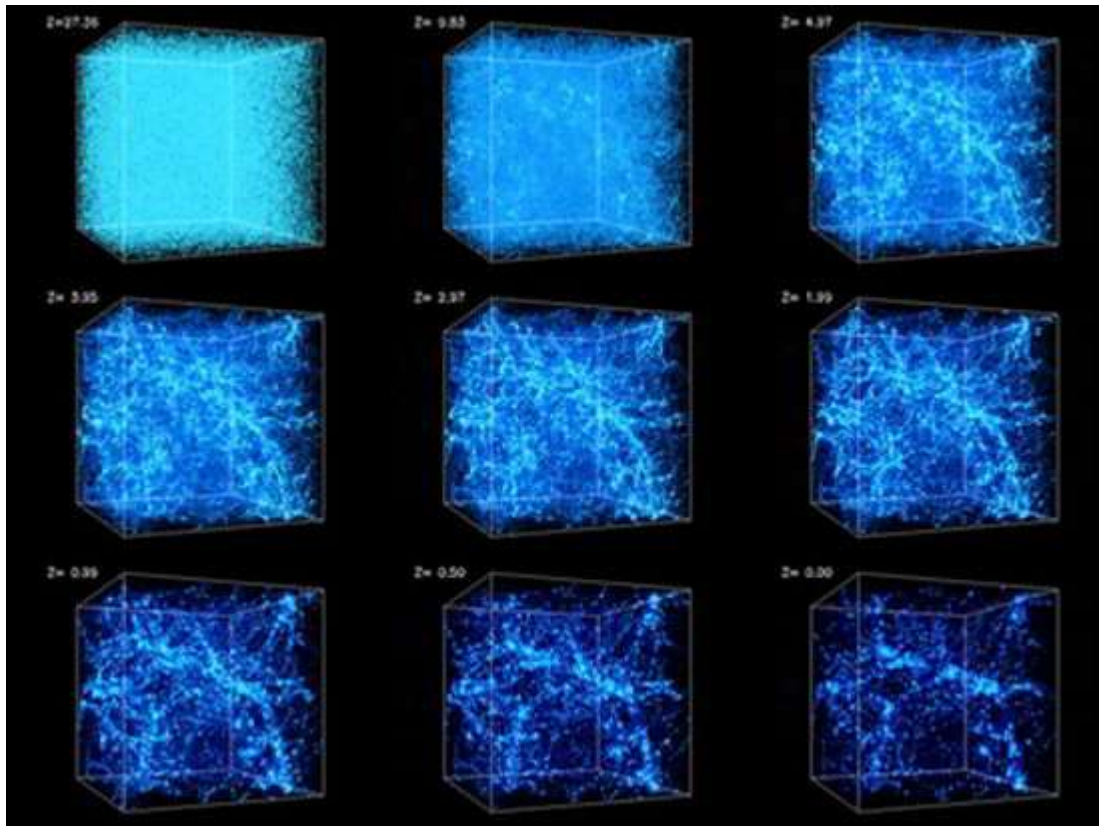
Vamos a retomar las ecuaciones de Einstein, pero estas que nos decían tanto el pasado del Universo como sus posibles futuros. Y, por capricho, vamos a dejar la constante cosmológica (llamada con la letra griega  $\Lambda$ ) que añadió Einstein a última hora. Tenemos entonces, tres términos que se relacionan entre ellos: el espacio—tiempo, la materia y esta constante rara. ¿Y dónde va la materia



oscura? Pues en el término de la materia, ¡claro! Así, obtenemos el modelo cosmológico de referencia, el mejor describiendo todas las observaciones del Universo, el modelo  $\Lambda$ CDM, y vamos a ver porqué se llama así.

Claramente la constante cosmológica  $\Lambda$  está jugando un papel importante aquí, pero no os he explicado cual y ha sido a propósito. ¿Os acordáis de aquellas observaciones raras de galaxias que se alejaban más deprisa cuanto más lejos estaban? Pues aquí viene  $\Lambda$  a salvarnos el día. Estas observaciones indican que el Universo está expandiéndose. Significa que cada vez, los objetos celestes que están a nuestro alrededor, se van a ir alejando más y más de nosotros. Pero no porque se quieran ir, sino porque el espacio entre nosotros está aumentando. ¿Espera qué? Sí, como lo lees. No es solo que nuestros vecinos se aparten, sino que lo hacen porque el espacio que hay entre nosotros crece, por eso decimos que el Universo se expande. Esto parece muy complicado, así que vamos a pensarlo en términos de algo que nos gusta a todos, los pasteles. Pensad que hemos hecho un pastelito, con virutas de chocolate por encima (¡muy importante!), y está listo para meterlo al horno. Como tenemos mucha hambre, pegamos la nariz a la puerta del horno para ver cómo se cocina. Vemos como el pastelito empieza a crecer con el calor en todas las direcciones que puede, y como las virutas de chocolate que tenía por encima, cada vez se separan más unas de otras. Pues ahora imaginad que el Universo es el pastelito y las virutas de chocolate son las galaxias, ¡y listo!

De hecho, no es solo que el Universo se expanda, sino que lo hace de manera acelerada.



*Figura 5. Simulación cosmológica con anchura de 140 millones de años luz y desde hace 13 mil millones de años. Al inicio (arriba izquierda) aún podemos apreciar la sopa de partículas. Conforme el Universo se expande, pierde temperatura, las partículas se enfrían y empieza a dominar la gravedad, formando las estructuras que podemos ver hoy.*

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Formation\\_of\\_galactic\\_clusters\\_and\\_filaments.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Formation_of_galactic_clusters_and_filaments.jpg)

Esto lo sabemos desde hace bien poco. Pero para acelerar algo,

necesitamos una energía, una fuerza... A esta energía que hace que el Universo se expanda cada vez más deprisa la llamamos energía oscura, está representada en las ecuaciones del Universo por el término  $\Lambda$  y tampoco tenemos ni idea de dónde viene o qué es. Pero esto pertenece a los capítulos sobre el Universo acelerado. De momento, ya sabemos de dónde viene la  $\Lambda$  del  $\Lambda$ CDM y porqué es necesaria, ahora vamos a por el resto de letras.

Habíamos quedado en que la materia oscura estaba incluida en el término de materia y con las observaciones podemos averiguar qué propiedades debe cumplir. Por el hecho de ser "oscura", sabemos que no interacciona casi o nada con el resto de materia del Universo, salvo a través de la fuerza gravitatoria. Esto implica que la formación de las estructuras que vemos en el Universo, galaxias (enanas y no tan enanas) y cúmulos de galaxias, tiene que estar altamente influenciada por la materia oscura, y de hecho es una de las pocas pistas que deja para encontrarla. Para explicar estas estructuras, es necesario que la materia oscura arrastrase por gravedad al resto de materia que había en el Universo. En las zonas donde más materia oscura había, más materia ordinaria se concentraba, formándose primero estructuras más pequeñas, que luego irían chocándose entre ellas, también por las fuerzas gravitatorias, hasta formar los mega cúmulos de galaxias que vemos hoy. Para que esto ocurra, la materia oscura tiene que cumplir tres propiedades:

1. Lo que ya sabemos, que se relacione poco o nada con el resto de materia, incluida la luz. Esto implica que tiene que ser también eléctricamente neutra.
2. ¡Y también que no se desintegre! Si no nos quedamos sin las estructuras...
3. Por último, tiene que ser lenta. Si la materia oscura se moviera a velocidades cercanas a las de la luz, los choques serían mucho menos eficientes formando galaxias, y por lo tanto deberíamos ver menos cantidad de las que hay.

Estas tres características se resumen en tres palabras: fría (la temperatura mide de alguna manera la velocidad de las partículas, asociando caliente a rápido y frío a lento), oscura (la poca o nula interacción con el resto de materia) y materia (porque sufre la gravedad). Si tomamos estas palabras en inglés *cold*, *dark* y *matter*, tenemos las tres letras que nos faltaban de nuestro modelo cosmológico, CDM.

Por si fuera poco, tenemos unas herramientas súper potentes con las que hemos comprobado que este modelo forma las estructuras que observamos, las simulaciones cosmológicas. Así como en física de partículas podemos hacer chocar las veces que queramos partículas (rehacer los experimentos), no podemos crear universos así como así. La única posibilidad es recrear a través de simulaciones estos "nuevos universos", y contrastarlos con la realidad. Estas simulaciones son monstruosas, se necesitan granjas

de ordenadores para poder crearlas y comprenden más de millones de años luz en distancia y más de miles de millones de años en tiempo.

El modelo  $\Lambda$ CDM no ha parado de cosechar éxitos. Con la teoría de formación de estructuras, obtenemos que la distribución de materia oscura es la que se necesita para explicar las curvas de rotación de las galaxias. Además, también concuerda con las mediciones de los cúmulos de galaxias que empezaron todo este embrollo, y esto no es todo. ¿Os acordáis de los físicos que tenían una antena para telecomunicaciones que medían siempre un ruido de fondo? Bueno pues este ruido de fondo no era otra cosa que la luz más antigua del Universo. Apodado fondo cósmico de microondas (o por sus siglas en inglés CMB), este "ruido" es una foto de cómo era el Universo la primera vez que la luz pudo viajar a través de él, y vaya si podemos obtener información de aquí. Con esta información combinada con el modelo  $\Lambda$ CDM, podemos cuantificar lo que sabemos del Universo: que solo un 5% es materia ordinaria, que casi un 25% es materia oscura y un 70% es eso que llamábamos energía oscura. Y la única que sabemos lo qué es y cómo se comporta (más que menos) es la materia ordinaria. ¡Así que tenemos trabajo para mucho rato!

Buscadores de lo invisible.

Es verdad que el modelo cosmológico  $\Lambda$ CDM funciona a las mil maravillas, pero entre las cosas que no explica, es qué es en sí la materia oscura. Sabemos que tiene que cumplir ciertas propiedades,

pero ¿puede ser una partícula? ¿Puede ser una partícula que ya exista y que solo se "esconda"? ¿Puede ser algo que no sea una partícula? Los físicos llevamos desde las primeras evidencias tratando de responder a esto, y la verdad es que opciones no nos faltan.

De las primeras cosas que hay que hacer cuando descubres algo que puede ser algo nuevo, es asegurarte de que de verdad no es algo viejo. La materia que hemos estado llamando ordinaria, es la materia que hemos estudiado en el cole. La que está compuesta de moléculas y en última instancia por átomos. Al menos, esto es lo que nos dicen en la escuela. Si seguimos haciendo zoom, podremos distinguir cosas más pequeñas aún, cosas que llamamos partículas. Dentro del átomo, conviven protones y neutrones formando un núcleo y electrones, paseándose por la parte más exterior. Si hacemos zoom en ese núcleo, podremos distinguir que los protones y los neutrones también están compuestos de otras partículas, los quarks. Aquí igual ya nos hemos perdido un poco más. El átomo se mantiene unido gracias a las fuerzas del electromagnetismo, ya que las cargas negativas de los electrones se compensan con las positivas del núcleo. Pero el núcleo no puede mantenerse estable por la fuerza electromagnética, de hecho, sería más bien lo contrario ya que en él solo hay cargas positivas y cargas neutras. Para explicar que se mantenga estable y unido, existe la fuerza nuclear fuerte (sí, porque es más fuerte que la electromagnética) actuando en los quarks. Ésta tiene un efecto un tanto curioso, ya que es más fuerte cuanto más alejadas están estas partículas, provocando que

queden confinadas dentro de los núcleos atómicos y sea imposible encontrarlas libres en la naturaleza. Pero sí que hay otras partículas compuestas por quarks libres en la naturaleza. Como veis, incluso explicar cómo funciona la materia ordinaria se vuelve más y más complicado. A estas escalas, uno ya se mueve junto con la física cuántica y además, necesitamos integrar todas estas fuerzas. De eso se ocupa el modelo estándar de física de partículas. El modelo estándar describe todas estas fuerzas y predice la existencia de todas las partículas que conocemos y sus propiedades. Así que, si hay que comprobar que la materia oscura es algo nuevo, habrá que comprobar que ninguna partícula del modelo estándar se esté camuflando con este nombre.

Revisando las propiedades que mencionábamos antes, resulta que de entrada ninguna cumple los requisitos. ¿Y la antimateria? Bueno, aunque nos suene como algo novedoso y que según las películas de los domingos por la tarde pueda destruir el Universo, la antimateria son copias de todas las partículas, pero como se verían en un espejo, así que tampoco nos sirve. Entonces... necesitamos partículas nuevas.

Decirle a un físico teórico que necesitas partículas nuevas, es como dejar a un niño en una juguetería una noche entera.



*Figura 6 Esquema de las partículas fundamentales que componen la materia ordinaria y de distintos modelos de nuevas partículas que pueden ser la materia oscura.*

<https://www.symmetrymagazine.org/article/december-2013/four-things-you-might-not-know-about-dark-matter>

Aunque sepamos algunas propiedades que tienen que cumplir estas nuevas partículas, no tenemos ni idea de qué masa pueden tener, ni exactamente qué interacciones sufre. Es como si en el DNI solo pusiera tu nombre y dónde naciste. Esto hace que haya mucha libertad para generar estas partículas, y existen modelos de todos los colores y para todos los gustos. Hay algunas con masas un cuatrillón de veces más pequeña que la de un electrón, y otras, mil millones de veces mayor. Luego tenemos la opción de que la materia



oscura no sea una sola partícula, sino que como pasa con la materia ordinaria, puede que sean varias partículas con sus respectivas nuevas interacciones y que necesitemos un nuevo modelo estándar para este sector oscuro. Y, de hecho, podemos ir incluso más allá. Podemos pensar que la materia oscura no tiene por qué ser una partícula fundamental, que puede ser un objeto más complejo y que tampoco sabemos identificar, como mini agujeros negros. Como veis, es como pasear por un zoo de posibles candidatos.

La única ventaja de tener tantas posibilidades y tan distintas, es que cada una deja unas huellas muy diferentes. Unas huellas que nosotros, como detectives, vamos a intentar seguir. A pesar de que sabemos que la materia oscura no se habla mucho con el resto de materia, aún hay un pequeño hueco para que de vez en cuando le envíe un WhatsApp para preguntarle cómo le va la vida. Según la mayoría de modelos que asumen que la materia oscura es una partícula, existen tres pistas para poder encontrarla. La primera, tratar de cocinarla nosotros. Es decir, usar los grandes colisionadores de partículas y esperar que, entre el barullo de resultados, produzcamos materia oscura. La segunda, es poner un material muy, muy denso y esperar que la materia oscura decida chocar con él. Y la última, usar mega—telescopios para recibir señales de colisiones entre las propias partículas de materia oscura. Las tres son necesarias, pero para encontrarla antes, tenemos que dividir los esfuerzos.

La opción de tratar de ver señales del choque entre materia oscura (llamado aniquilación) es muy prometedora, por el simple hecho de

que los indicios su existencia proceden del espacio exterior. Pero tenemos que saber qué señal estamos buscando y qué cosas podemos detectar.

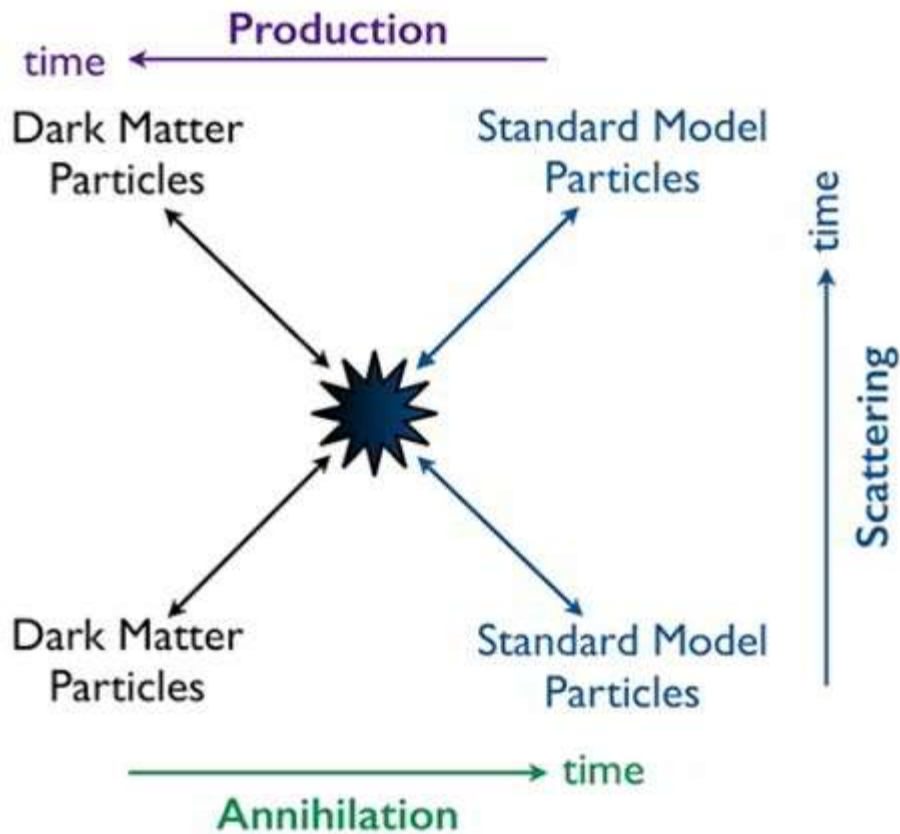


Figura 7 Posibles interacciones de la materia oscura con la materia ordinaria, que nos permiten establecer tres métodos de búsqueda complementarios: producir materia oscura haciendo chocar materia ordinaria, chocar materia oscura con materia ordinaria, o chocar materia oscura entre sí. [https://particleastro.brown.edu/dark-matter/https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crshower2\\_nasa.j](https://particleastro.brown.edu/dark-matter/https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crshower2_nasa.jpg)

[pg](#)

¡Espera, de esto ya hemos hablado! Hemos visto que podemos detectar un montón de tipos de luz que el Universo nos deja, y hay una que destaca entre las demás. La luz más energética que existe, los rayos gamma, no son muy usuales de encontrar. Solo se producen en zonas del Universo muy extremas, con explosiones muy energéticas y unas fuerzas magnéticas terribles. Además, como los fotones no tienen carga, son capaces de escapar de estos infiernos y llegar hasta nosotros apuntando directamente a la zona de donde vienen, como si fueran flechas. Pero lo mejor de todo es que, según muchos de los modelos, los rayos gamma son un producto casi directo del choque entre dos partículas de materia oscura. Es decir, que si detectamos una señal de rayos gamma, aunque sea bajita, de una zona del Universo que esperamos tenga mucha materia oscura y sin ser una zona extrema, ¡eso es materia oscura!

Esto suena genial, ¿no? Apuntamos con estos telescopios a una zona de estas características y listo.

Eso pensábamos muchos, pero la materia oscura está en modo peli y manta y que nadie me moleste. Cuando hacemos esto y no detectamos ninguna señal, descartamos algunos de los modelos que habíamos preparado. Si con esta sensibilidad aún no hemos visto esta partícula, es que esta no puede ser, y así, con todos.



*Figura 8. Representación de la luz que provocan los productos de la interacción de los rayos gamma con las partículas de la atmósfera.*

<https://www.eso.org/public/images/eso1841i/>

Además de que detectar rayos gamma tampoco es pan comido. En los telescopios terrestres, detectamos la luz que llega resultado de que los rayos gamma interaccionen con las partículas de la atmósfera. Y también nos tenemos que asegurar de su procedencia. Hay zonas del Universo donde esperamos mucha cantidad de materia oscura pero también son zonas extremas que producen rayos gamma por otros motivos, y hay que intentar distinguir la procedencia de cada uno.

¿No hay entonces una manera más fácil de ver las señales de la aniquilación de materia oscura? Fácil como quien dice fácil, no, pero si hay otras maneras. Lo primero que podemos hacer, es usar telescopios en otro rango de energías para tratar de distinguir rayos

gamma de materia oscura de rayos gamma normales. A esto se le conoce como astronomía *multiwave lenght*, o astronomía de varias longitudes de onda.

Otra cosa que podemos hacer es ver si de la aniquilación de materia oscura podemos obtener otras señales, recibir información de otros "mensajeros". Según los modelos, hay dos señales más que pueden funcionar casi tan bien como los rayos gamma. Unos son los rayos cósmicos. Estos "rayos cósmicos", aunque también se llamen rayos, no son luz, sino partículas cargadas. La señal que buscamos en este caso, es un chorro de partículas de antimateria. También son un producto casi directo del choque y, además, no abunda en el Universo. Así que una pequeña señal sería suficiente para poder distinguirlos.

Otra señal que estamos buscando son neutrinos. Los neutrinos son los primos pequeños de los electrones, pero sin carga. Esto hace que, igual que los rayos gamma, actúen como una flecha y apunten directamente a su origen. Pero ni os digo lo difícil que es detectar neutrinos. Ahora mismo, están atravesando miles de millones de ellos nuestra mano y ni nos estamos enterando.

Como colofón, en 2016 detectamos ondas gravitatorias por primera vez. A parte de suponer el Nobel para sus descubridores, las ondas gravitatorias fueron predichas por Einstein en teoría de la relatividad general y pueden resultar muy útiles en el futuro próximo para complementar las búsquedas de materia oscura. Al fin y al cabo, todas las evidencias de su existencia son a través de la gravedad...

La discusión está lejos de terminar, pero el futuro pinta brillante. Dentro de poco tendremos nuevos telescopios de rayos gamma mucho más potentes de los que jamás hemos podido construir, los colisionadores de partículas están alcanzando cada vez energías más altas y, con la entrada en el tablero de las ondas gravitatorias abrimos una nueva ventana inexplorada, otra "foto" distinta del Universo para averiguar todo lo que esconde.

[Judit Pérez Romero.](#)

Estudiante de Doctorado en Física Teórica.  
Universidad Autónoma de Madrid e Instituto de Física Teórica  
UAM/CSIC.

## Capítulo 10

### Hacia una teoría de la Gravedad Cuántica.

Albert Einstein fue el padre de la Relatividad General, la teoría que explica la atracción gravitatoria entre los grandes sistemas en nuestro universo como los planetas, las estrellas o los cúmulos galácticos. Por su lado, Niels Bohr fue uno de los padres de la mecánica cuántica, el marco teórico con que describir la física de los sistemas más pequeños conocidos, tales como los átomos o las partículas subatómicas, electrones, neutrinos o quarks. Los legados de estos dos grandes físicos del siglo XX se unen en lo que llamamos la gravedad cuántica. La gravedad cuántica surge cuando la interacción gravitatoria se vuelve importante a escalas microscópicas, o en otras palabras, es lo que resulta de combinar los principios de la mecánica cuántica con la gravedad. Aunque hemos hecho progresos en entender algunos aspectos de la gravedad cuántica, el desarrollo de una teoría que la describa física y matemáticamente sigue siendo uno de los desafíos más ambiciosos de la física teórica contemporánea.

En este capítulo vamos a tratar de explicar cuando y como se manifiesta la gravedad cuántica, empezando por situaciones donde supone tan solo pequeñas correcciones a lo predicho por la Relatividad General de Einstein, y continuando por otras donde es la única protagonista. Para terminar, nos entretendremos con una de las líneas de investigación que actualmente se están llevando a cabo con el fin de desarrollar una teoría de la gravedad cuántica.

## Pequeños efectos de la Gravedad Cuántica.

Para tomar un primer contacto con los efectos de la gravedad cuántica, nada mejor que empezar con un ejemplo. Consideremos la órbita de Mercurio alrededor del Sol, debida a la atracción gravitatoria entre ambos cuerpos. La Relatividad General nos permite calcular la forma de la órbita que observamos, así como el perihelio de esta órbita, el punto de mayor proximidad de Mercurio al Sol. Hagamos ahora un salto de lo grande a lo pequeño, y consideremos el átomo de hidrógeno, compuesto por un protón y un electrón. El protón tiene carga eléctrica positiva, y el electrón, mucho más ligero y con carga negativa, orbita a su alrededor debido a la atracción eléctrica entre ambos. Debido a que protón y electrón son partículas muy pequeñas, la dinámica resultante de su interacción eléctrica viene determinada por los principios de la mecánica cuántica. Así pues, para calcular la órbita del electrón alrededor del protón, tenemos que aplicar las leyes de la mecánica cuántica a la interacción eléctrica, o como se dice en términos técnicos, tenemos que "cuantizarla". El desarrollo de tal teoría, la llamada Electrodinámica Cuántica<sup>21</sup>, es hoy en día una teoría bien establecida con la que se han predicho muchas propiedades de

---

<sup>21</sup> La Electrodinámica Cuántica surgió de combinar la mecánica cuántica con la teoría de la Relatividad *Especial* de Einstein. Esta última, anterior a su teoría de la Relatividad *General* y que no incorpora aún los efectos de la gravedad, es la teoría que estableció la unión entre espacio y tiempo, la velocidad finita de la luz y como esta interacciona con la materia cargada eléctricamente. Esta teoría, pues, es uno de los paradigmas de la unión entre los legados de Bohr y Einstein.



átomos y moléculas confirmadas experimentalmente<sup>22</sup>.

Volvamos ahora a la órbita de Mercurio alrededor del Sol. El éxito de la cuantización de la interacción eléctrica nos lleva a preguntarnos: ¿podemos cuantizar la gravedad de la misma forma que se cuantizó la electricidad? Y en caso afirmativo, ¿podemos calcular como se corrige la órbita de Mercurio debido a los efectos cuánticos? Mucho se tardó en responder a estas preguntas, pero ahora sabemos que sí es posible. Aplicando algunas de las técnicas de cuantización conocidas a la Relatividad General, en los últimos treinta años se ha podido desarrollar la llamada *teoría cuántica efectiva de la gravedad*<sup>23</sup>. Tal y como su nombre indica, esta teoría es solo efectiva, es decir, sus predicciones son una buena aproximación a la realidad solo cuando los efectos gravitatorios cuánticos suponen pequeñas correcciones a aquello que la teoría de la Relatividad General predice. Aunque pueda parecer limitado, este es en realidad el caso de los efectos de la gravedad cuántica sobre las trayectorias y dinámicas de los grandes cuerpos astronómicos que vemos a nuestro alrededor, desde planetas, a estrellas y a galaxias. De hecho, en estos casos los efectos cuánticos son tan pequeños que las predicciones de la teoría cuántica efectiva son de las más precisas que existen<sup>24</sup>.

Usando esta teoría, a mediados de los años noventa se consiguió

---

<sup>22</sup> Para saber más acerca de esta teoría, ver [6].

<sup>23</sup> Para un artículo de revisión técnico con muchas otras referencias, ver [7].

<sup>24</sup> Asumiendo que algún día sus predicciones sean corroboradas experimentalmente.



distancia del Sol al perihelio de la órbita de Mercurio es aproximadamente de 46 millones de kilómetros, y los efectos cuánticos corrigen esta distancia en unos  $10^{-83}$  kilómetros. Para entender este número, comparémoslo con el tamaño del protón, que es de unos 0.000001 nanómetros (donde recordemos que el nanómetro equivale a  $10^{-9}$  metros). Así pues, la corrección cuántica al perihelio de Mercurio es unas  $10^{65}$  veces menor que un protón, que a su vez es unas  $10^{25}$  veces menor que el mismo perihelio. Esto equivale aproximadamente a una corrección de una parte en  $10^{90}$ . Sí, estoy de acuerdo, ¡¡es una corrección ínfima!!

Aunque asombrosa, la pequeñez de esta corrección no debería sorprendernos. Los efectos cuánticos son importantes en el mundo de lo microscópico, cuando los experimentan partículas del tamaño de moléculas, átomos, o incluso menores. Por lo contrario, objetos macroscópicos, a escalas como las que percibimos a nuestro alrededor a diario, experimentan efectos cuánticos tan pequeños en comparación a su tamaño que apenas son perceptibles. Imaginaros que tan pequeños son, pues, con los vastos sistemas de nuestro universo.

Es evidente que diseñar y llevar a cabo un experimento con la precisión necesaria para medir tal corrección es por ahora impensable. No obstante, la incertidumbre acerca de cuándo podremos observar tales efectos no debería frenar nuestro afán de entender la gravedad cuántica. En la historia de la Relatividad General hay importantes ejemplos de predicciones que, aún mucho antes de ser corroboradas observacionalmente, han impulsado el

desarrollo de la teoría. Tales ejemplos incluyen las ondas gravitatorias y los agujeros negros, predichos por la teoría de la Relatividad General en el mismo 1916, pero que no fueron directa o indirectamente observados hasta muchos años después.

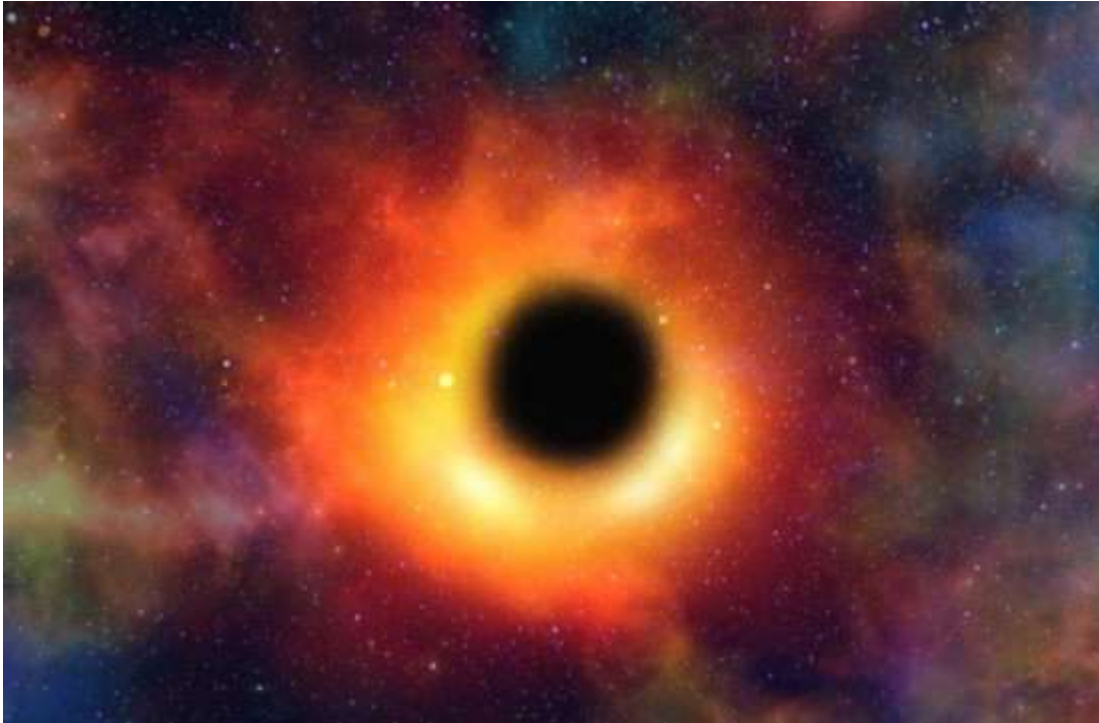
Cuando la Gravedad Cuántica se vuelve importante.

La corrección a la órbita de Mercurio alrededor del Sol es un ejemplo donde los efectos de la gravedad cuántica no cambian cualitativamente la física del sistema, este es justamente el régimen de validez de la teoría cuántica efectiva. Os estaréis ahora preguntando, ¿existen situaciones donde los efectos de la gravedad cuántica sean más que meras correcciones imperceptibles, donde los efectos de ambas, la interacción gravitatoria y la mecánica cuántica, sean igual de dominantes, de modo que supongan un cambio cualitativo o cuantitativo importante en la física del sistema? La respuesta a esta pregunta es un emocionante: ¡Sí, sí que las hay! Tales situaciones involucran algunos de los eventos y las estructuras más fascinantes de nuestro universo, tan misteriosas como reales, y que constituyen el objeto de estudio de una gran parte de la investigación actual en física teórica. Veamos algunas de ellas.

Los agujeros negros.

La primera de estas situaciones se da en el interior de los agujeros negros. Estos objetos de altísima densidad crean un campo gravitatorio tan intenso a su alrededor, que ni siquiera la luz, que se

mueve a la velocidad más alta posible físicamente, es capaz de escapar si se acerca demasiado al agujero.



*Figura 2 Representación de un agujero negro. La esfera negra corresponde al horizonte de eventos, de donde la luz no puede escapar. Cabe decir que los agujeros negros realistas no se ven exactamente así, puesto que acostumbran a estar rodeados por un disco de materia y energía que rota a su alrededor y que el agujero va acreciendo.*

De ahí que estos objetos se califiquen de "negros". La distancia máxima a la que la luz se puede acercar al agujero antes de ser engullida por este constituye el llamado horizonte de eventos, la frontera de no retorno. Imaginémoslo como una esfera alrededor del

agujero. Todo aquello que cruza el horizonte hacia el interior del agujero, queda allí atrapado, y pierde cualquier posibilidad de comunicarse con el exterior. Efectivamente, las ecuaciones de Einstein predicen que todo aquello que cruza el horizonte continúa su trayectoria hasta el centro del agujero debido a la gran atracción gravitatoria. ¿Pero y qué sucede entonces *en el centro* de un agujero negro? Un punto del tamaño más pequeño que podamos imaginarnos, ¡quizás incluso más pequeño que un electrón o un quark! pero con una acumulación de materia y energía enorme y una atracción gravitatoria increíblemente intensa. Las ecuaciones de la Relatividad General que representan al agujero negro dejan de tener sentido en este punto, y por tanto no tenemos ninguna predicción de lo que allí sucede. La física en el centro de un agujero negro viene pues completamente determinada por la gravedad cuántica.

La gravedad cuántica juega también un papel importante en el horizonte de eventos. A mediados de los años setenta, los cálculos de Stephen Hawking desvelaron algo sorprendente: estos objetos no son tan negros como pensábamos, sino que en realidad emiten radiación desde el horizonte. Pares de partículas se crean y se destruyen continuamente en el vacío presente alrededor del horizonte. De vez en cuando, una de las partículas cae dentro del agujero, mientras que la otra escapa de su succión hacia el exterior. El flujo de partículas que escapan constituye la radiación del

agujero negro<sup>25</sup>. La creación y destrucción espontánea de partículas en el vacío es un efecto puramente cuántico, por tanto, la radiación del agujero negro es un efecto de la gravedad cuántica. Aunque la radiación emitida por un agujero negro grande, como podría ser el del centro de nuestra galaxia, sería muy débil y por tanto imperceptible, el hecho de que emita radiación supone un cambio cualitativo radical. Por un lado, pasamos de un agujero que todo engulle, tal y como predice la Relatividad General, a un agujero que emite. Por el otro, nos revela algo increíble de los agujeros negros: como todo cuerpo que emite radiación el horizonte de eventos debe tener temperatura. El horizonte, que en principio corresponde a una mera frontera para la luz en el espacio vacío, resulta que no está completamente frío. Los agujeros negros tienen pues propiedades térmicas. Esto a su vez, tiene consecuencias sorprendentes para la evolución temporal de estos objetos. Una consecuencia inmediata es que los agujeros negros se evaporan: a medida que emiten radiación van perdiendo energía, y pueden por tanto terminar por evaporarse del todo y desaparecer. Esto contrasta drásticamente con el concepto de agujero negro en estado de engorde eterno que la Relatividad General establece, y por tanto su radiación, lejos de ser una pequeña corrección, cambia radicalmente el destino del agujero.

Pero quizás aún más importante, este descubrimiento tiene

---

<sup>25</sup> Para entender este punto mejor, recomendamos el libro de divulgación de Hawking [8], o para algo más técnico pero pedagógico [16]. Las fuentes originales son [9, 10].

implicaciones profundas para la estructura del horizonte de eventos y los agujeros negros en general. Según la interpretación moderna de la termodinámica, las propiedades térmicas de sistemas grandes o macroscópicos están determinadas por el comportamiento estadístico de sus constituyentes más pequeños o microscópicos. Por ejemplo, la temperatura de un gas se explica por el movimiento y vibración de las moléculas o átomos que lo componen. Así pues, el hecho que el horizonte tenga temperatura sugiere que éste no es simplemente una frontera de no retorno, sino que debería estar compuesto por algún tipo de partículas o constituyentes microscópicos, o, en otras palabras, debería tener estructura a nivel cuántico. Estos "átomos gravitatorios" serían los responsables de generar la temperatura del horizonte, tal y como sucede con un gas. Una de las variables térmicas macroscópicas que mejor encapsula información acerca de la estructura microscópica de un sistema es la llamada *entropía*. La entropía cuenta el número de configuraciones distintas en que los constituyentes microscópicos del sistema se pueden encontrar compatibles con sus propiedades macroscópicas. Por ejemplo, en el caso de un gas, su entropía está determinada por el número de todas las posibles configuraciones de posición o velocidad de los átomos que lo componen, que dan lugar a la misma temperatura, volumen o presión del gas. Actualmente se conocen varias formas de calcular la entropía de un sistema. La expresión matemática resultante depende, como es de esperar, de los parámetros macroscópicos del sistema (temperatura, volumen, etc. ) así como también de constantes físicas fundamentales



(velocidad de la luz, carga eléctrica del electrón, etc. ) según el tipo de constituyentes microscópicos que lo conformen. La *forma* en que depende de estos parámetros y constantes es crucial, pues de nuevo, esta es muy particular del tipo de constituyentes microscópicos del sistema, sus propiedades y sus interacciones. La entropía del horizonte de un agujero negro representa pues una gran fuente de información acerca de su estructura microscópica.

La entropía es también una medida de la cantidad de información, datos, almacenados en un sistema. A más datos, más entropía. Esto debería parecer lógico: para almacenar muchos libros en una biblioteca, esta requiere de una compleja estructura de salas, pasillos, librerías y estanterías. Extrapolando, la entropía del horizonte de un agujero negro debería medir la cantidad de información almacenada, es decir, los datos sobre todo aquello que atraviesa el horizonte y cae dentro del agujero negro. Podría ser incluso que una "copia de seguridad" quedara guardada en el horizonte, codificada en su microestructura, cual disco duro externo. En este caso, podríamos quizás recuperar esos datos, ¡contrariamente a aquello que pensábamos definía a los agujeros negros! Las propiedades cuánticas de los agujeros negros cambian pues por completo nuestro entendimiento de qué son estos misteriosos objetos.

Para calcular la expresión exacta de la entropía del horizonte de un agujero negro se requiere de una teoría de la gravedad que sea válida cuando los efectos cuánticos son dominantes. Desarrollar esta teoría y con ella llegar a identificar los constituyentes

gravitatorios microscópicos representaría un avance conceptual indiscutible en nuestro camino hacia comprender los agujeros negros. Podríamos entonces responder a muchas preguntas que permanecen sin respuesta. Por ejemplo, si esta microestructura es una propiedad única del horizonte, o en cambio se da también en el interior o el centro del agujero negro, o si la evaporación del agujero negro nos puede traer algún tipo de información acerca de la materia y energía que este almacenaba. Más sobre las emocionantes propiedades cuánticas de los agujeros negros lo encontraréis en el capítulo de Ana Alonso Serrano.

Los límites del universo.

El origen de nuestro universo es otro escenario donde la gravedad cuántica se vuelve importante. Hace unos 13. 800 millones de años, el universo experimentó una rapidísima y enorme expansión<sup>26</sup>. En números, esta expansión debió de durar unos  $10^{-32}$  segundos, durante los cuales el volumen del universo tuvo que aumentar en un factor mínimo de  $10^{78}$ . Para que nos hagamos una idea, esto equivaldría a aumentar el diámetro del protón a la distancia de la Tierra al Sol, ¡increíble! De ahí que esta expansión se acostumbre a considerar el nacimiento de nuestro universo. Instantes antes de que la expansión tuviera lugar, durante los primeros  $10^{-43}$

---

<sup>26</sup>Evidencia de la expansión primordial nos llega, entre otras, de la medición del fondo de microondas [11], el baño de ondas de baja frecuencia emitido poco después de esta expansión y que permea nuestro universo aún hoy en día.

segundos, el universo tendría un tamaño de unos  $10^{-38}$  kilómetros, mucho más pequeño que las partículas más pequeñas conocidas. ¡Imaginaos qué gran acumulación de energía! Nuestro universo metido en un espacio muchísimo más pequeño que un electrón. Una situación tan extrema, donde el universo toma dimensiones cuánticas, tuvo que estar gobernada por la gravedad cuántica. Esta fue por tanto la encargada de determinar los primeros instantes de nuestro universo. De qué estaba compuesto el universo en esos instantes primordiales y qué desencadenó la expansión consecuente, siguen siendo preguntas abiertas que la teoría de la gravedad cuántica deberá responder. Si queréis saber mucho más sobre este tema, os recomiendo leer el capítulo de Mercedes Martín Benito.

Volvamos ahora al presente. Hace tan solo unos veinte años descubrimos que nuestro universo ha empezado de nuevo a expandirse y de forma acelerada [18, 17]. Qué es lo que provoca esta expansión, continúa siendo un misterio. Si el universo albergara solo la materia y energía que vemos o que conocemos: planetas, estrellas, nebulosas, etc. . . , se contraería en lugar de expandirse, puesto que todo lo que conocemos se atrae gravitatoriamente. Esta atracción debería hacer colapsar todo de nuevo en un punto, ¡de vuelta al origen del universo! El hecho de que, en lugar de eso, el universo se esté expandiendo indica pues que debe de haber otra fuente de energía, completamente distinta a todo lo que conocemos. Esta misteriosa energía ha sido denominada energía oscura. Debe permear todo el universo y tener unas propiedades completamente

desconocidas, pues a diferencia de todo lo que conocemos, debe de repelerse gravitatoriamente. Para saber más sobre la expansión del universo y la energía oscura, os invito a leer los capítulos de Pilar Ruiz Lapuente, Ruth Lazkoz e Inés Caveró Peláez.

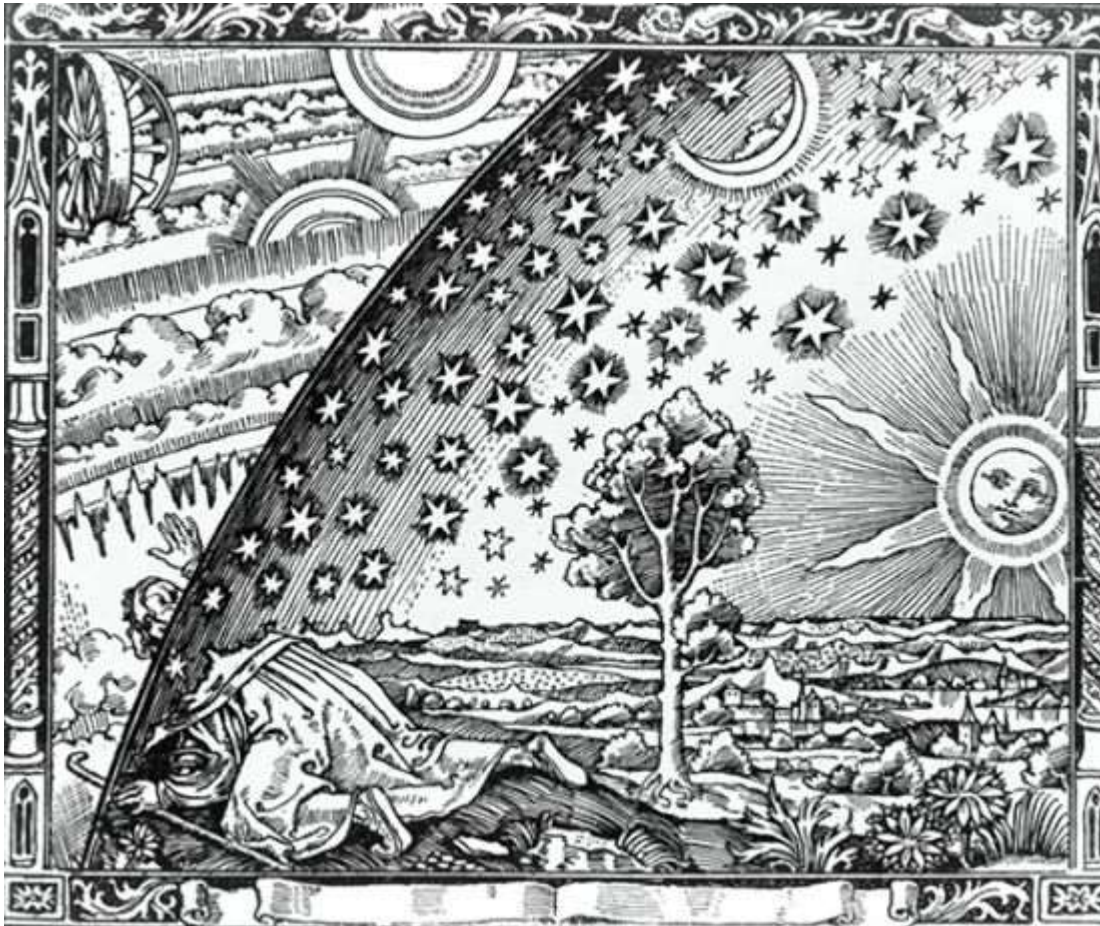
Esta expansión confiere a nuestro universo unas propiedades sorprendentes. Una de estas propiedades es la existencia del llamado *horizonte cosmológico*. Debido a la expansión, estrellas, galaxias y todo lo que vemos, se aleja de nosotros. Y no solo eso, sino que, además, cuanto más alejados están, más rápido se alejan. Una consecuencia sorprendente de ello es que hay partes del universo que nunca llegaremos a ver, pues a partir de una cierta distancia, estrellas y galaxias se alejan más rápido que la velocidad de la luz<sup>27</sup>, y por tanto la luz que emitan nunca podrá llegarnos. Así pues, nuestro universo "visible" está acotado por una vasta esfera celestial que nos rodea, el horizonte cosmológico, la frontera entre lo que vemos o llegaremos a ver y lo que no. Una vez una estrella cruza este horizonte, nunca más podremos saber de ella.

Os estaréis preguntando ¿a qué me suena a mi esto? Efectivamente, existe una asombrosa analogía entre nuestro horizonte cosmológico y el horizonte de eventos de un agujero negro. De hecho, ambos son horizontes de eventos, en el sentido que delimitan regiones del

---

<sup>27</sup> Esto puede resultar confuso: la velocidad con que se alejan estrellas y galaxias no es la de estos objetos moviéndose en el espacio, sino la de los puntos del espacio en los que se encuentran. Estos objetos en realidad están quietos en el espacio. Esta velocidad, por tanto, no está limitada por la Relatividad Especial a ser menor que la velocidad de la luz. De hecho, como mencionamos arriba, la expansión del universo se está acelerando.

espacio de donde la luz no puede escapar.



*Figura 3. Grabado en madera originario del libro de Camille Flammarion L'Atmosphere: Météorologie Populaire (1888). Una interpretación moderna de este gravado podría ser la de la esfera estrellada como el horizonte cosmológico, que acota aquello que podemos ver, y la curiosidad del caballero que por ella se asoma como nuestro afán de comprender la naturaleza cuántica de nuestro horizonte y los secretos allí guardados, tanto de nuestro universo visible como de aquello que reside más allá.*

No podemos ver el interior de un agujero negro, del mismo modo que no podemos ver el universo exterior más allá de nuestro horizonte cosmológico<sup>28</sup>.

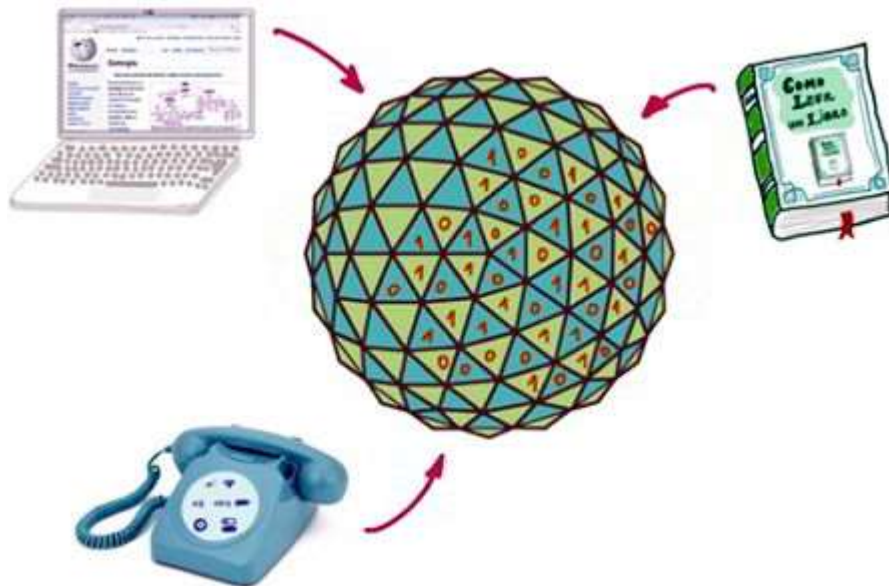
Esta analogía nos lleva a considerar una posibilidad sorprendente: que el horizonte cosmológico, al igual que el horizonte de un agujero negro, esté compuesto por "átomos gravitatorios", constituyentes a nivel microscópico, que le confieran una estructura gravitatoria cuántica. En este caso, el horizonte debería albergar entropía, que cuantificaría esta estructura microscópica o la cantidad de información almacenada. A qué información correspondería, si por ejemplo pudiera ser una copia de todos los datos de nuestro universo visible, o si pudiéramos llegar a extraer de ella información acerca de lo que existe más allá de nuestro horizonte cosmológico, son preguntas tan fascinantes como fundamentales acerca del entorno en que vivimos. Además, tal y como hemos visto con los agujeros negros y su evaporación, esto podría tener consecuencias drásticas para la evolución temporal de nuestro universo visible. La gravedad cuántica, encargada de generar y regir tal estructura gravitatoria microscópica, es por tanto una clave importante para entender el futuro de nuestro universo.

Ninguno de los escenarios descritos arriba, en que la física está determinada por la gravedad cuántica, se presta fácilmente a la

---

<sup>28</sup> Nota de los coordinadores: La imagen de Flammarion está repetida en este libro en dos capítulos de temática distinta y con las autoras a miles de kilómetros de distancia y sin contacto entre ellas. Las mantenemos, en los dos capítulos, como buena prueba de la universalidad de la Ciencia.

observación o a la adquisición de datos experimentales directos.



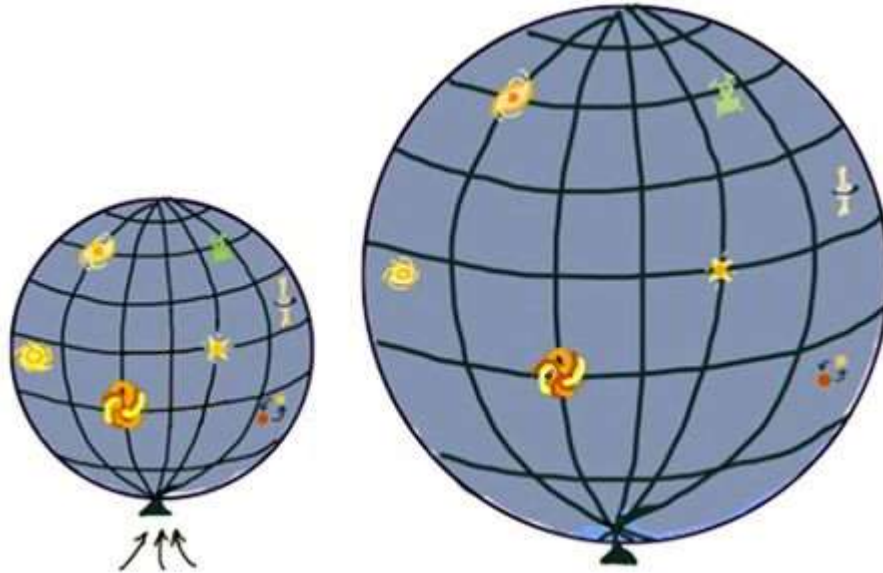
*Figura 4 ¿Podría el horizonte de eventos, cosmológico o de un agujero negro, almacenar información de aquello que lo cruza?*

Sin embargo, sabemos que han tenido y tienen un impacto tremendo en determinar el estado actual y futuro de nuestro universo y de los grandes sistemas que lo habitan. Es importante pues, que nos esforcemos en entenderlos. Su estudio a nivel teórico nos puede revelar muchos de sus secretos, además de abrirnos las puertas a nuevas avenidas observacionales de mucho más alcance.

Hacia una teoría de la Gravedad Cuántica.

Espero que os habré convencido del impacto y la importancia de la gravedad cuántica. Pasemos ahora a explicar una de las líneas de investigación que actualmente se están siguiendo para desarrollar

una teoría que la describa. Este último apartado del artículo es un poquito más técnico, así que os pido paciencia. Pero también os animo a no tirar la toalla, puesto que os esperan conceptos y conjeturas tan bellas como profundas acerca de nuestro universo.



*Figura 5. Podemos imaginar la expansión del universo como un globo hinchándose. La superficie del globo es el espaciotiempo. A medida que el globo se hincha, la distancia entre los distintos objetos en nuestro universo aumenta.*

Relatividad General: la gravedad como geometría.

Antes de ponernos a cuantizar la gravedad, debemos explicar una idea básica de la Relatividad General. El gran avance de la Relatividad General fue el de interpretar la gravedad como la curvatura del espaciotiempo. Para entender este concepto, empecemos por imaginar el espaciotiempo como el "tejido" por el



cual nos movemos y evolucionamos con el tiempo. En ausencia de masas o energía, es decir en el vacío, este tejido es plano. Pero en presencia de un objeto con masa como un planeta, el tejido se curva, como pasa si ponemos una bola pesada encima de una sábana tensada por las cuatro esquinas. Debido a esta curvatura, cualquier otro cuerpo con masa que se acerque a la bola, tenderá a "caer" hacia ella. Esto es justamente lo que percibimos como atracción gravitatoria. La luz también experimenta la atracción gravitatoria o la curvatura del espaciotiempo, de tal forma que un rayo de luz propagándose por encima de la sábana también "caería" hacia la bola. Un agujero negro genera una curvatura del espaciotiempo con forma de embudo; todo lo que se acerca demasiado a la embocadura cae dentro, y en el centro la atracción gravitatoria es tan intensa que el espaciotiempo llega a "agujerearse". En cuanto al universo a gran escala, podemos imaginarlo como un globo. Hinchar el globo soplando hace que la superficie de este crezca y la distancia entre dos puntos cualquiera aumente, exactamente igual que sucede con la expansión de nuestro universo. Según la Relatividad General pues, el espaciotiempo es dinámico, se mueve: se curva y se deforma en respuesta a la materia y a la energía que por él viajan. Así pues, podemos decir que el espaciotiempo tiene energía cinética.

Energía cinética negativa y emergencia del tiempo.

Ahora que ya hemos preparado los ingredientes, vayamos al grano. Obtener una teoría de la gravedad cuántica, que a diferencia de la

teoría cuántica *efectiva* sea válida cuando los efectos gravitatorios cuánticos son importantes, no es tarea fácil. Una de las dificultades es debida a una propiedad muy particular de la gravedad: la energía cinética del espaciotiempo puede llegar a ser negativa. Esta es una propiedad muy extraña, pues estaréis de acuerdo en que la energía cinética, que cuantifica el movimiento de las cosas, acostumbra a ser positiva. Una consecuencia indeseada de esta propiedad es que cuando intentamos cuantizar la gravedad, el espectro de energías que resulta no es compatible con las leyes de la mecánica cuántica<sup>29</sup>. Esto parece sugerir que la cuantización de la gravedad requiere un tratamiento específico que la haga compatible con los principios cuánticos.

Una posible solución a este problema consistiría en usar un lenguaje para representar la geometría del espaciotiempo que no exhiba tales energías cinéticas negativas. Sin embargo, cabe la posibilidad que este signo negativo de la energía tenga un origen conceptual fundamental, en cuyo caso sería más interesante aprender a tratarlo que evitarlo. Según la llamada *Teoría de Cuerdas*, una de las candidatas a teoría de la gravedad cuántica más famosa, el signo negativo de la energía cinética del espaciotiempo está relacionado con la distinción entre tiempo y espacio. ¿Cómo se relacionan? Dos puntos en el espacio están

---

<sup>29</sup> Para aquellos lectores que tengan nociones de mecánica cuántica, lo que sucede es que este signo negativo de la energía implica que la probabilidad asociada a las medidas cuánticas no se conserva en el tiempo.

separados por una distancia positiva, obvio. Sin embargo, en la teoría de la Relatividad de Einstein, dos eventos en el tiempo están separados por una distancia negativa. En consecuencia, si los dos puntos en el espacio también están separados en el tiempo, su distancia *espaciotemporal* es menor, pues el tiempo "resta". En la Teoría de Cuerdas, el signo negativo del tiempo corresponde al mismo signo negativo de la energía cinética del espaciotiempo. Aunque superficialmente pueda parecer obvia, esta es una relación increíblemente profunda. Una teoría de la gravedad cuántica que resuelva el problema de la energía cinética negativa podría revelarnos pues, de donde y como emerge el tiempo.

Gravedad cuántica de Liouville.

Una estrategia para abordar este problema consiste en simplificarlo considerando que el espaciotiempo tiene solo dos dimensiones, en lugar de las cuatro que experimentamos. Este correspondería a un universo con una dimensión espacial (una línea en vez de un volumen) y una de temporal. Aunque claramente tal universo es una idealización, nos ofrece un marco simplificado donde estudiar nuestro problema. Además, la teoría de la Relatividad General se puede formular sin dificultad en dos dimensiones.

¿Pero de dónde surge realmente la simplificación? Sorprendentemente, en dos dimensiones, la gravedad se vuelve muy simétrica. En concreto, exhibe *simetría conforme*. Desarrollar una idea intuitiva de qué es esta simetría y sus implicaciones en el contexto de la gravedad es un tanto complicado, así que pongamos

primero ejemplos más habituales. Pensemos en la hoja de un helecho. Si la miramos de lejos, tiene una forma más o menos triangular. Si nos acercamos, vemos que está formada por distintas ramitas, cada una de ellas con la misma forma que la hoja principal. A medida que vamos ampliando el foco, vemos que se va repitiendo el patrón. A esta repetición de la estructura de la hoja, o de forma equivalente, esta invariancia de lo que vemos bajo ampliación o alejamiento del foco, se le llama simetría de escala. En la naturaleza, hay muchos sistemas que exhiben esta simetría, como por ejemplo las ramas de los árboles o la col romanesca.

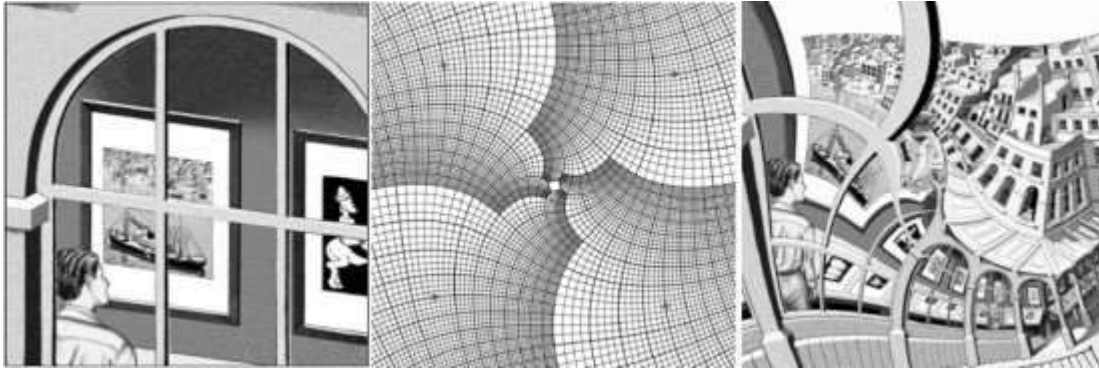


*Figura 6. Ejemplos de simetría de escala.*

Curiosamente, esta simetría también es una propiedad de la estructura microscópica de muchos materiales cuando se encuentran en condiciones muy especiales, por ejemplo, de temperatura y presión. En estos casos, además de la simetría de escala, los materiales exhiben también simetría de traslación y de rotación.

Es decir, nada cambia cuando los trasladamos o les damos vueltas. Ahora imaginemos que trasladamos, damos vueltas, o cambiamos la escala, *de manera distinta en cada punto del material*. ¡Una

transformación no precisamente sutil! Solo si el material tiene simetría conforme, se verá igual después de tal transformación<sup>30</sup>. Para haceros una mejor idea, mirad las siguientes imágenes (figuras 7 y 8):



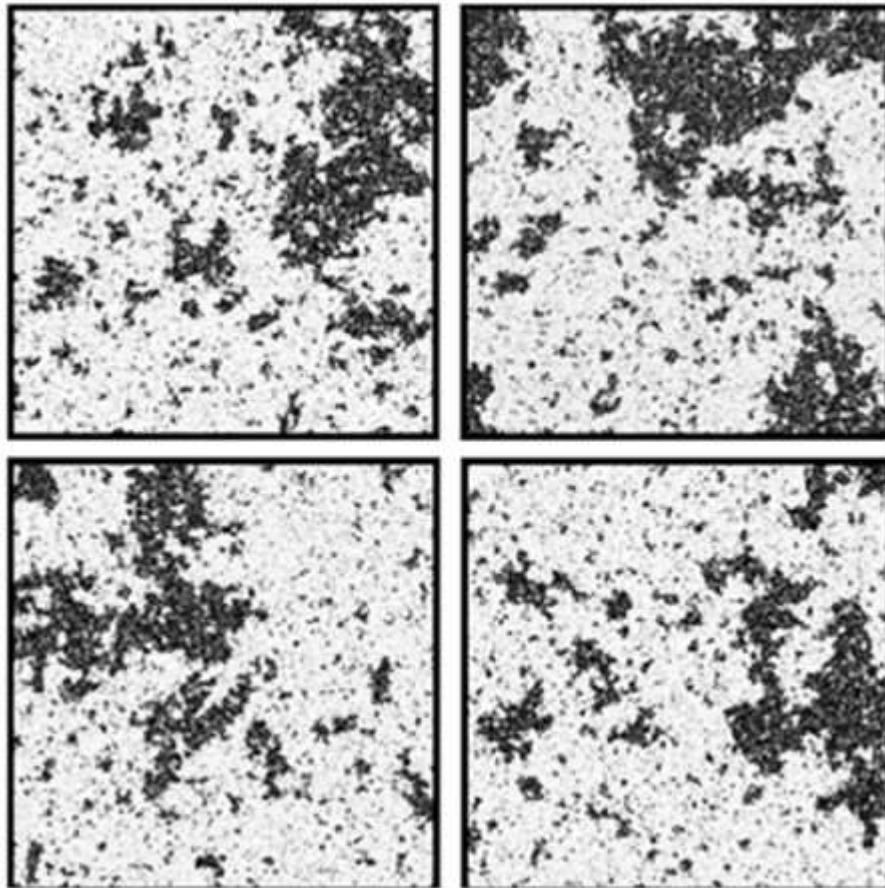
*Figura 7. Ejemplo de imagen sin simetría conforme. La tercera de estas imágenes corresponde a la famosa litografía de M. Escher "Prentententoonstelling" (1956). En 2003, los matemáticos H. Lenstra y B. de Smit analizaron esta imagen matemáticamente, y se dieron cuenta que era el resultado de una transformación conforme: resulta de dividir la imagen original (primera imagen) en una retícula, y rotar y escalar cada sub—recuadro de forma distinta tal y como se ve en la segunda imagen [14]. Imágenes obtenidas de su página web [15], y del blogpost "The warped space of M C Escher" de Michael Hogg [12].*

La simetría conforme es una propiedad increíblemente restrictiva. Los materiales o sistemas que la exhiben son tan simétricos, que su

---

<sup>30</sup> El nombre de esta simetría tiene una explicación: si cogéis cualquier imagen, la trasladáis, la rotáis o le cambiáis la escala, la *forma* de la imagen no cambia, se mantiene *conforme*.

comportamiento está muy restringido.



*Figura 8. Cuatro imágenes con simetría conforme (concretamente, simulaciones del modelo crítico de Ising en dos dimensiones). Si aplicamos la misma transformación conforme usada en la litografía de Escher a estas imágenes, el resultado (aunque no idéntico) será indistinguible. Esta invariancia de apariencia es la llamada simetría conforme. Imágenes extraídas del blog de Douglas Ashton [13].*

En otras palabras, tienen muy pocas maneras de comportarse de modo que se respete la simetría. Consecuencia de ello es que, materiales con esta simetría tienden a comportarse de la misma

forma. Por ejemplo, consideremos dos materiales completamente distintos, tanto de apariencia como de estructura molecular: el agua y un imán ferromagnético.

Cuando estos dos materiales se encuentran a la temperatura exacta (distinta para cada uno de ellos) donde adquieren simetría conforme, los parámetros que describen su comportamiento ¡se vuelven exactamente idénticos! Por ejemplo, les cuesta exactamente lo mismo calentarse o enfriarse. Y así como el agua y el imán, tantos otros materiales exhiben los mismos parámetros cuando adquieren esta simetría. Este es un ejemplo muy gráfico del impacto de la simetría conforme.

La simetría conforme la encontramos finalmente en las escalas más pequeñas conocidas. Por ejemplo, la física de los fotones, descrita por la Electrodinámica Cuántica, exhibe simetría conforme. También la Teoría de Cuerdas se fundamenta en ella. En estos contextos, es mucho más difícil visualizar los efectos de esta simetría sobre estos sistemas de partículas o de cuerdas, pero el tratamiento matemático es el mismo. La simetría conforme pues, lejos de ser una simetría rara exhibida por algunos materiales en condiciones muy particulares, es una propiedad fundamental de algunas de las interacciones que la materia experimenta, y a su vez, una gran herramienta para estudiarlas. Las teorías físicas que describen sistemas con simetría conforme se llaman teorías conformes, y constituyen un amplio campo de estudio. Estas teorías son más fáciles de resolver y desarrollar que otras teorías cuánticas, pues el elevado grado de simetría les confiere una estructura

matemática muy rígida, y por tanto más fácil de determinar.

Volvamos a la gravedad. Resulta que la Relatividad General, cuando la consideramos en dos dimensiones, se vuelve una teoría conforme. Y, además, una teoría conforme muy conocida en el campo de la física teórica que estudia materiales tales como los ferromagnéticos mencionados anteriormente, la denominada *teoría de Liouville* [2]. La gran ventaja de esta conexión es que todos los resultados que se conocen de la teoría de Liouville, así como toda la maquinaria matemática de las teorías conformes, se ponen automáticamente al servicio de la gravedad.

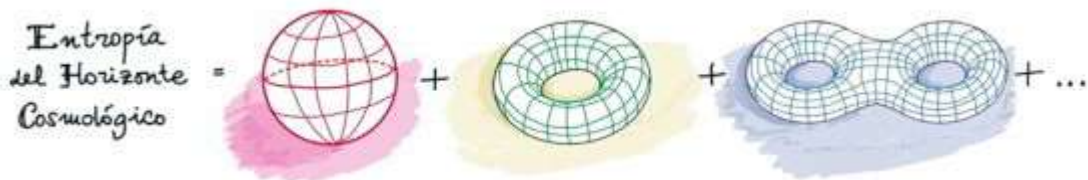
Así ha sido como, en los últimos cinco años, se ha conseguido avanzar mucho en el desarrollo de *la teoría de la gravedad cuántica de Liouville*. En concreto, se ha conseguido determinar el espectro cuántico de energías gravitacionales y demostrado que respeta los principios de la mecánica cuántica, demostrando que la energía cinética negativa no supone una incompatibilidad fundamental [3]. También se han podido calcular las denominadas *funciones de correlación*, elementos constitutivos básicos de cualquier teoría cuántica con que se determina la interacción gravitatoria entre partículas [4]. Aunque estos resultados resuelven solo uno de los obstáculos de la gravedad cuántica, suponen un avance importante en el desarrollo de una teoría completa, y van a indicar como proceder en la cuantización de la gravedad en cuatro dimensiones.

### Entropía del horizonte cosmológico.

Uno de los sucesos más recientes de la teoría de la gravedad



cuántica de Liouville ha sido el de proporcionar una de las contribuciones a la expresión matemática para la entropía del horizonte cosmológico. La gravedad cuántica de Liouville está equipada para describir un universo en expansión (en dos dimensiones), con el horizonte cosmológico correspondiente. La entropía total del horizonte en esta teoría resulta de sumar la entropía asociada a todas las geometrías compatibles con el espaciotiempo de un universo en expansión.



*Figura 9. Cada figura representa una geometría distinta del espaciotiempo dos—dimensional. La entropía del horizonte cosmológico resulta de sumar la entropía asociada a cada geometría del espaciotiempo: la del donut sin agujero (o esfera), la del donut con un agujero, la del donut con dos agujeros, ... y así hasta infinito.*

El primer término en esta suma corresponde a la contribución de la geometría de la esfera, sigue la de la geometría de un donut, después la de un donut con dos agujeros, y así sucesivamente. Cada agujero que añadimos al donut disminuye la contribución a la entropía. Con la teoría de la gravedad cuántica de Liouville, y usando la maquinaria matemática de las teorías conformes, se ha podido calcular la entropía asociada a la geometría esférica, la

contribución dominante a la entropía total [5].

La expresión resultante para esta entropía es una fórmula matemática que depende de los parámetros del universo en expansión (como la densidad de energía oscura originando la expansión) y de constantes físicas fundamentales como la constante de Newton de la gravedad, la velocidad de la luz, y la constante de Planck característica de los procesos cuánticos. Esta expresión, por tanto, engloba relatividad, gravedad y cuántica. Más importante, pero, es la dependencia exacta que la fórmula exhibe de estos parámetros y constantes, que involucra funciones matemáticas muy especiales, como los logaritmos o las llamadas funciones Gamma. Es en la complejidad de esta estructura matemática de la entropía que se esconden los secretos acerca de los constituyentes gravitatorios cuánticos del horizonte cosmológico, de la información que quizás allí se almacena, y posiblemente, del destino de nuestro universo.

#### Referencias:

- [1] J. F. Donoghue, "Leading quantum correction to the Newtonian potential, " *Phys. Rev. Lett.* , vol. 72, no. 19, pp. 2996—2999, 1994.
- [2] A. M. Polyakov, "Quantum Geometry of Bosonic Strings, " *Phys. Lett. B*, vol. 103, p. 207–210, 1981.
- [3] T. Bautista, A. Dabholkar and E. Harold, "Quantum Gravity from Timelike Liouville theory, " *JHEP*, vol. 10, p. 284, 2019.
- [4] S. Ribault and R. Santachiara, "Liouville theory with a central

charge less than one, " *JHEP*, vol. 08, p. 109, 2015.

[5] D. Anninos, T. Bautista and B. Mühlmann, "The two—sphere partition function in two—dimensional quantum gravity, " *JHEP*, vol. 09, p. 116, 2021.

[6] R. Feynman, QED: The Strange Theory of Light and Matter, vol. ISBN 9780691083889, Princeton University Press, 1985.

[7] J. F. Donoghue, "Quantum gravity as a low energy effective field theory, " *Scholarpedia*, vol. 12, no. 4, p. 32997, 2017.

[8] S. Hawking, A Brief History of Time, vol. ISBN 0553380168, Bantam Dell Publishing Group, 1988, p. 256.

[9] S. Hawking, "Particle creation by black holes, " *Communications in Mathematical Physics*, vol. 43, no. 3, pp. 199—220, 1975.

[10] S. Hawking, "Black hole explosions, " *Nature*, vol. 248, pp. 30—31, 1974.

[11] Planck Collaboration, "Planck 2018 results. I. Overview and the cosmological legacy of Planck, " *Astron. Astrophys. ,* vol. 641, no. A1, p. 56, 2020.

[12] M. Hogg, "Blog: Pondering the Universe, " [Online]. Available: <https://michaelhogguk.wordpress.com/>.

[13] D. Ashton, "Blog, " [Online]. Available: <https://blog.dougashton.net/2009/05/critical-point/>.

[14] H. Lenstra and B. d. Smit, "Artful Mathematics: The Heritage of M. C. Escher, " *Notices of the AMS*, vol. 50, no. 4, pp. 446—451, 2003.

[15] H. Lenstra and B. d. Smit. [Online]. Available: <https://escherdroste.math.leidenuniv.nl/>.

[16] R. Parentani and P. Spindel, "Hawking radiation, " *Scholarpedia*, vol. 6, no. 12, p. 6958, 2011.

[17] Supernova Cosmology Project, "Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 high redshift supernovae, " *Astrophys. J.* , vol. 517, pp. 565—586, 1999.

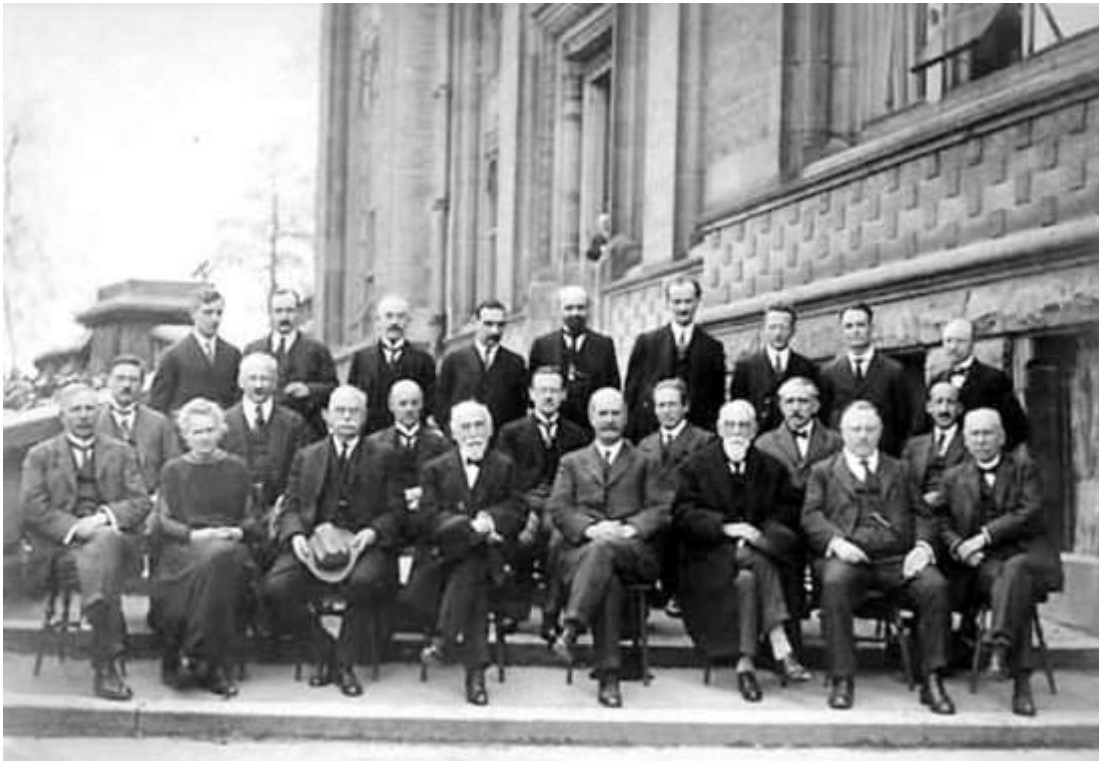
[18] Supernova Search Team, "Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant, " *Astron. J.* , vol. 116, pp. 1009—1038, 1998.

[Teresa Bautista Solans.](#)

Doctora en Física Teórica.

Postdoctoral Research Associate en King's College London.

## El Azar relativo



*Fotografía tomada en el 4º Congreso Solvay celebrado en 1924, "Conducción eléctrica de los metales". De pie, de izda. a dcha.: Léon Brillouin, Émile Henriot, Théophile de Donder, H. Bauer, Edouard Herzen, Auguste Piccard, Erwin Schrödinger, Percy W. Bridgman, Jules Émile Verschaffelt. Sentados, de Izda. a dcha.: Ernest Rutherford, Peter Debye, Marie Curie, Abram F. Ioffe, Edwin Herbert Hall, Owen Willans Richardson, Hendrik Antoon Lorentz, W. Broniewski, William Henry Bragg, Walter Rosenhain, Marcel Brillouin, Paul Langevin, Willem Hendrik Keesom, George de Hevesy, Edmond van Aubel. [Proceedings 1924](#)*

## Capítulo 11

### El mundo cuántico de los materiales.

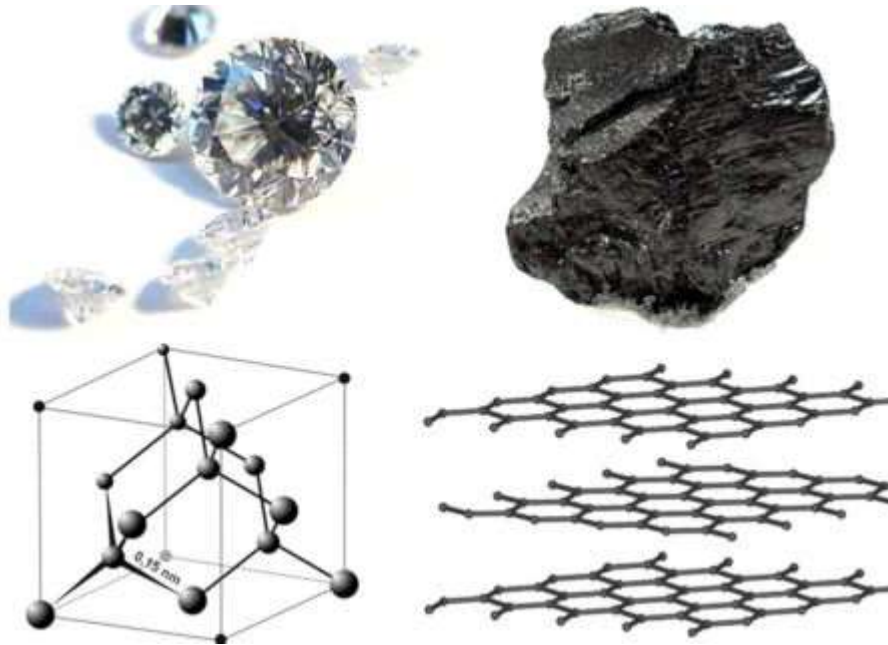
Al mencionar la física cuántica es habitual que la imaginación nos evoque fenómenos cuanto menos extraños, incluso exotéricos. Lo podemos ver escribiendo física cuántica en el buscador de nuestro navegador de internet y fijándonos en las imágenes que aparecen. Rayos de colores intensos entremezclados, espacios curvos, muchas fórmulas, y por supuesto algún que otro gato que no sabemos si está vivo o muerto. Pocas veces al pensar en física cuántica viajará nuestra imaginación a los materiales, esos materiales que podemos coger con nuestras manos, ver con nuestros ojos y utilizar en multitud de aplicaciones que hacen más fácil nuestro día a día. ¿Pensaríais en un óxido ante la palabra cuántica? Lo cierto es que la física cuántica no solo está detrás de sus propiedades, en particular de las propiedades electrónicas que son las que nos interesan en este capítulo, sino que va a ser capaz de dar lugar a fenómenos fascinantes.

Para explicar las propiedades de los óxidos y de otros materiales, además de la física cuántica va a ser crucial el papel que juegan las interacciones entre los electrones y el que haya un número macroscópico de estos. Cuando tenemos muchas partículas o seres que interactúan se producen nuevos fenómenos emergentes que no podríamos ni entender ni realizar si nos fijásemos en las partículas de forma individual. En estos casos hablamos de comportamiento colectivo. Pensemos por ejemplo en las ciudades. Los grandes

atascos a las ocho de la mañana no son el resultado de un gen humano que se activa y decide que es la hora de coger el coche, sino de una estructura social que resulta de cómo se organizan las personas y establece determinadas horas para entrar al trabajo.

El comportamiento colectivo entre los seres humanos es tan complejo que existe incluso una rama dedicada a su estudio: la sociología.

En la física tenemos muchos ejemplos de comportamiento colectivo. Los más fáciles de identificar probablemente sean las transiciones de fase, como las que sufre el agua, al enfriarse y convertirse el hielo o cuando elevamos su temperatura y se convierte en gas. En estas transiciones cambia la forma en la que se organizan las moléculas de agua reduciéndose a bajas temperaturas la energía y el desorden. La física de la materia condensada estudia las propiedades de los sistemas que surgen de la interacción de muchos cuerpos, incluidas las diferentes fases en las que estas partículas pueden organizarse (1). Estas fases no solo se refieren a las fases sólida, líquida o gas en que se organizan los átomos y que asociamos a nuestra vida cotidiana sino también a muchas otras fases, muy especialmente fases electrónicas como el magnetismo, la superconductividad, fases con modulación de carga electrónica, etc. . . Los electrones también tienen su propia sociología y es sorprendente.



*Figura 1. Dos de las posibles formas en las que se organizan los átomos de carbono en los materiales. A la izquierda el diamante, a la derecha el grafito. En el diamante los átomos se organizan en una red en tres dimensiones (abajo izquierda) mientras que en el grafito forman capas (abajo derecha). La diferente configuración de la red atómica da lugar no solo a una apariencia notablemente diferente (arriba), sino también a que otras propiedades como su comportamiento frente a la corriente eléctrica también difieran. Figura tomada de (Autor: Itub. ):*

[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Diamond\\_and\\_graphite2.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Diamond_and_graphite2.jpg)

En el interés de la física por estudiar los fenómenos complejos que surgen de la interacción entre partículas hay un antes y un después: El artículo "More is different. Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science", (traducido Más es diferente. Simetrías rotas y la naturaleza de la estructura jerárquica



de la ciencia), que escribió P. W. Anderson en 1972 y recomendando encarecidamente leer [1]. En este artículo Anderson enfatiza cómo la capacidad para reducir todo a leyes fundamentales sencillas no implica la capacidad de reconstruir el universo a partir de esas leyes, sino que a cada nivel de complejidad surgen nuevas propiedades. Con la alusión a las simetrías rotas se refiere a que es frecuente que a bajas temperaturas encontremos fases con un cierto orden cuya simetría es más reducida que la que tiene el sistema. Decimos entonces que se ha roto tal simetría. Por ejemplo, si partimos de una zona del espacio en el que cada punto es equivalente y tenemos un gas, ej. agua en fase gaseosa, las moléculas que forman ese gas ocuparán con la misma probabilidad cualquier punto del espacio. Por el contrario, a bajas temperaturas, en el hielo, las moléculas de agua ocupan determinadas posiciones. Los puntos del espacio han dejado de ser equivalentes. Decimos que se ha roto la simetría de translación. Esta simetría de translación se rompe en todos los sólidos. En particular en los sólidos cristalinos las posiciones del espacio que ocupan los átomos siguen una determinada periodicidad formando una red de átomos: la red cristalina.

Que los átomos se organicen en sólidos es consecuencia de las interacciones entre ellos y si estudiáramos cada átomo de forma individual no podríamos explicar la existencia de los materiales ni sus propiedades. Existen muchas formas posibles en las que los átomos pueden organizarse en la red, de ahí la gran riqueza de materiales que tenemos y de sus propiedades. Un ejemplo lo

encontramos en los átomos de carbono que pueden organizarse de muchas formas dando lugar a materiales con propiedades tan diferentes como son el diamante y el grafito con el que se hacen las minas de los lápices. Algunas de estas propiedades podemos explicarlas razonablemente bien con conceptos de física clásica o descripciones semiclásicas. Otras no.

Volviendo a las imágenes que nos aparecen en el navegador al escribir física cuántica hay una que se repite y sí se refiere a algo concreto. La del átomo: electrones que orbitan en torno al núcleo de protones y neutrones. Nos vienen en mente estas imágenes del átomo porque en la mayoría de los casos es el primer, y a veces el único, contacto consciente que tenemos con la física cuántica. En el instituto estudiamos el átomo de Bohr y en particular que los electrones que orbitan en torno al núcleo no pueden tener cualquier energía, sino que sus energías están cuantizadas. Aprendemos también que los electrones tienen una propiedad cuántica llamada espín, una especie de momento magnético intrínseco que solemos dibujar como una flechita que apunta en cualquier dirección, y que en el caso del electrón puede tomar solo dos valores, en adelante up y down. Esos estados electrónicos los llenamos siguiendo el principio de exclusión de Pauli que nos dice que no podemos poner más de un electrón en cada estado disponible, así que los electrones se van colocando en los estados empezando por los de menor energía.

De la misma forma que en el átomo, en un sólido los electrones no van a poder tener cualquier energía. La diferencia es que las

energías de los estados electrónicos no van a depender únicamente de la interacción dentro de un solo átomo, sino que van a sentir también la presencia de los otros átomos. En particular las energías de los electrones van a reflejar la periodicidad de la red atómica del cristal. Esta periodicidad de la red hace que los niveles de energía se agrupen en bandas: las bandas electrónicas. Las bandas electrónicas son inherentemente cuánticas y al igual que ocurre en el átomo los electrones van llenando estas bandas empezando por los estados de menor energía y siguiendo el principio de exclusión de Pauli: no puede haber dos electrones en el mismo nivel de energía.

Las bandas son el punto de partida para describir las propiedades electrónicas de los materiales. Tienen la información del tipo de átomos que forman el material, pero también de cómo se organizan en la red cristalina. Por ejemplo, las bandas del diamante y el grafito son diferentes entre sí, aunque ambos materiales estén formados por átomos de carbono. Actualmente se dispone de técnicas muy buenas para calcular las bandas electrónicas de cada material. Y la gran mayoría de las predicciones que se realizan a partir de ellas funcionan muy bien cuando las comparamos con el experimento. Solamente a partir de las bandas y conociendo la composición del material podemos saber si un material va a ser metálico o aislante. Hablamos de materiales conductores o aislantes en función de su comportamiento frente a la corriente eléctrica. Los metales, que son materiales conductores, dejan pasar la electricidad, pero presentan cierta resistencia que provoca pérdidas de energía y aumenta al

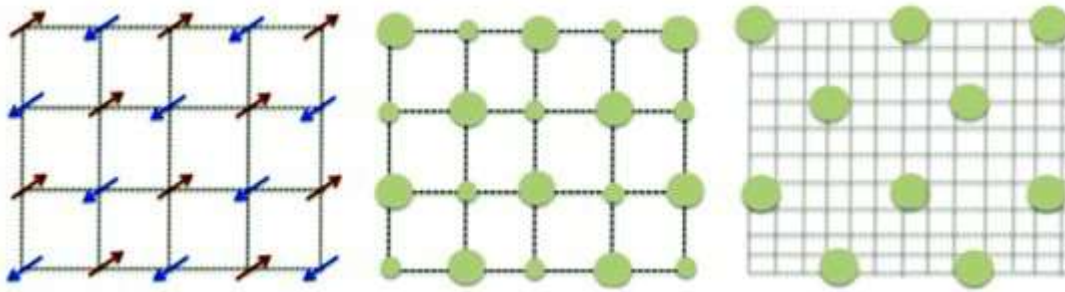
subir la temperatura. Los aislantes no dejan pasar la corriente eléctrica porque esto cuesta energía. Únicamente a temperatura finita logra pasar algo de corriente. En el ejemplo del diamante y el grafito sus bandas diferentes explican que el diamante sea aislante y el grafito conductor. También que uno sea transparente y brillante y el otro negro.

En realidad, parece casi sorprendente que las predicciones de la teoría de bandas tal y como las he contado funcionen tan bien. Hasta ahora hemos hablado de las bandas de energía y de los niveles como si simplemente los llenásemos y los electrones que hay no interaccionaran entre ellos. Sin embargo, sabemos que los electrones son partículas que tienen carga eléctrica y por tanto se repelen. Y esta repulsión debe incluirse en la descripción y tener efectos. En realidad, las bandas electrónicas incluyen en cierta forma la repulsión entre electrones en los valores de las energías que van a tener los electrones. Pero además de que haya un cierto efecto de la interacción en las energías sería esperable que los electrones tengan comportamientos colectivos, sus "atascos a las ocho de la mañana" o que se produzca algún tipo de fase electrónica ordenada como vimos que hacían los átomos y moléculas. Y de hecho así ocurre en muchos materiales. En particular esperamos que esto ocurra en aquellos materiales en los que la energía de interacción de los electrones sea comparable o mayor que su energía cinética estando esta última condicionada por cómo son las bandas de mayor energía que estén a medio ocupar.

La fase electrónica más cercana en nuestra vida cotidiana es el

ferromagnetismo. La interacción entre los electrones hace que, por debajo de una temperatura crítica, llamada temperatura de Curie, haya más electrones con espín up que con espín down (o viceversa). Aunque el protagonismo de los espines en esta fase nos pueda parecer algo un tanto abstracto este fenómeno se produce en cualquier imán, como los que ponemos en la nevera o tenemos en una brújula. Al tener más espines de un tipo el material tiene un momento magnético permanente que en las brújulas se alinea con el campo magnético de la Tierra. El ferromagnetismo es una de las posibles fases magnéticas. Otra fase magnética diferente es la fase antiferromagnética, caracterizada por alternancia de electrones con espín up y down. En las fases magnéticas se rompe la simetría de rotación del spin, aunque puede romperse alguna simetría más. Por ejemplo, en la fase antiferromagnética cambia la periodicidad espacial. Son muchos los materiales que muestran fases magnéticas, algunos son elementos químicos como el hierro que es ferromagnético incluso a temperatura ambiente o el cromo que se vuelve antiferromagnético a baja temperatura. Otros involucran varios elementos químicos y en particular es habitual encontrar magnetismo en muchos óxidos.

Las propiedades de los materiales que se encuentran en una fase magnética pueden ser especialmente sensibles a estímulos externos tales como un campo magnético.



*Figura 2 Dibujo esquemático de diferentes fases electrónicas en una red atómica en dos dimensiones con simetría cuadrada. A la izquierda fase antiferromagnética en la que se alternan los espines de los electrones. Las figuras central y derecha representan fases con modulación de carga en la que el tamaño del círculo indica la acumulación de carga electrónica. En la figura central la periodicidad de la modulación de carga es conmensurada a la de la red atómica, mientras que en la figura de la red de la derecha son redes con simetrías diferentes, la red atómica es cuadrada y la electrónica triangular. La red triangular es la que permite a los electrones estar más lejos unos de otros y la que forman en un cristal de Wigner en dos dimensiones.*

Por ejemplo, la resistencia al paso de la corriente eléctrica puede variar en función de si aplicamos un campo magnético o no. Si varía decimos que el material tiene magneto—resistencia. En algunos materiales o combinaciones de materiales, llamadas heteroestructuras, que incluyen materiales magnéticos esta magneto—resistencia puede ser especialmente grande. Hablamos entonces de magneto—resistencia gigante, como la de algunas heteroestructuras, o incluso magneto—resistencia colosal, como en

las manganitas, un óxido de manganeso. Tener propiedades muy sensibles al cambio de algunos parámetros, especialmente si estos los podemos modificar a voluntad, suele ser útil a la hora de lograr aplicaciones. La espintrónica es un área de investigación que busca controlar el grado de libertad del espín para desarrollar dispositivos nuevas funcionalidades y menor disipación tales como memorias o discos duros. Los materiales magnéticos son claves en estas nuevas tecnologías. Un ejemplo de cómo los efectos cuánticos en materiales no son solo muy interesantes, sino que pueden tener un gran impacto en nuestra sociedad.

Otro tipo de fase electrónica son las fases con modulación de carga en la que la carga electrónica adquiere una periodicidad diferente a la de la red atómica. Esta nueva periodicidad puede ser proporcional a la de la red subyacente, ejemplo: se alternan átomos con más o menos carga, o puede tener una simetría completamente diferente en la que por ejemplo los electrones formen la red que les permita estar lo más lejos posible. Esta última situación se da en los llamados cristales de Wigner que puede aparecer cuando la densidad de electrones es pequeña.

De todas las fases electrónicas la que más pasiones genera es la superconductividad (2). Los materiales superconductores conducen la electricidad sin presentar resistencia a su paso. Esto es diferente de lo que ocurre en los materiales conductores, como el cobre, que aunque permiten el paso de la corriente eléctrica sí presentan resistencia haciendo que se pierda energía en forma de calor. Aunque la resistencia disminuye al bajar la temperatura en un

metal la resistencia sigue siendo finita incluso a temperatura cero. Lo que se observó hace ya más de un siglo es que al enfriar algunos materiales la resistencia eléctrica se anulaba de forma abrupta a una temperatura crítica que dependía del material. A esa temperatura ocurre una transición de fase entre un metal y un superconductor. Los materiales superconductores lo son únicamente por debajo de esa temperatura crítica. Posteriormente se vio que además de presentar resistencia cero los superconductores tenían otra propiedad que les caracterizaba: la expulsión de los campos magnéticos.



*Figura 3 Imán levitando sobre un superconductor. El superconductor utilizado es un óxido de cobre. Se ha enfriado utilizando nitrógeno líquido. Imagen: <https://wp.icmm.csic.es/superconductividad/>*

Este efecto está detrás de uno de los fenómenos más sorprendentes de la física: la levitación superconductora, que logra que un imán se



quede levitando encima de un superconductor o viceversa. Os invito a que veáis los vídeos (3) y os sorprendáis.

Aunque nos suene desconocida la superconductividad es una propiedad que tienen muchísimos materiales, miles de ellos. Algunos tan comunes como el aluminio o el plomo. Lo que ocurre es que la temperatura a la que se produce la transición de fase es muy baja. No hay muchos materiales que superconduzcan por encima de  $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$  que es una temperatura bajísima comparada con las que experimentamos en nuestro día a día, por eso no nos resulta tan familiar como ocurría con el ferromagnetismo de los imanes. Por ejemplo, en el aluminio la temperatura crítica superconductor es de  $-272\text{ }^{\circ}\text{C}$  y en el plomo de  $-266\text{ }^{\circ}\text{C}$ . ¿Estás imaginando ya cómo levitaría tu cafetera de aluminio si fueras capaz de enfriarla lo suficiente?

En 1986 se descubrió superconductividad de alta temperatura en los cupratos, que son óxidos de cobre (4). ¡Vaya! otra vez vuelven a salir los óxidos y esta familia en particular es realmente fascinante. Decimos superconductividad de alta temperatura, aunque las máximas temperaturas críticas que se han alcanzado a presión ambiente son  $\sim -135\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En 2008 apareció la segunda familia de superconductores de alta temperatura crítica los superconductores de hierro, si bien en este caso las máximas temperaturas que se han logrado son  $\sim -200\text{ }^{\circ}\text{C}$  (tal vez algo superiores, hay discusión en un compuesto) (5). Y como la ciencia sigue avanzando muy rápido a partir de 2015 se empezaron a batir nuevos records lográndose temperaturas críticas por encima de  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  en compuestos ricos en

hidrógeno: los hidruros (6). La máxima temperatura crítica que se ha alcanzado en un hidruro es de aproximadamente 15 °C ¡temperatura ambiente!, aunque hay cierta discusión en las medidas de este superconductor descubierto en octubre de 2020 y cuya composición, que incluye azufre y carbono, no se conoce de forma exacta [3]. En los hidruros la superconductividad aparece únicamente bajo presiones muy extremas ~150—200 GPa porque los materiales que superconducen no son estables a presiones menores. Aunque las presiones sean tan altas y no podamos utilizar estos materiales en aplicaciones, desde el punto de vista fundamental ha sido muy importante demostrar que existe superconductividad a estas temperaturas.

Tener superconductividad a temperatura ambiente o no demasiado baja siempre se ha considerado todo un sueño científico y tecnológico por las múltiples aplicaciones que tiene la superconductividad. Entre ellas cables superconductores en los que no se pierde energía y que constituyen verdaderas autopistas para la corriente eléctrica o potentes imanes que pueden utilizarse para hacer motores y generadores más pequeños y ligeros o en trenes que levitan. El CERN, la gran infraestructura en la que se estudian las partículas elementales, está llena de gigantescos imanes superconductores y su existencia sería inviable si no existiera la superconductividad. A un nivel más cercano a nuestro día a día existen imanes superconductores en las máquinas de resonancia de los hospitales. Los superconductores también son los detectores más sensibles de campos magnéticos y permiten medir las señales

del cerebro a través de magnetoencefalogramas. Y gran parte de las implementaciones que se están estudiando para el futuro ordenador cuántico están basadas en superconductores. De momento tenemos que enfriar bastante los superconductores para utilizarles, pero ello no impide su uso.

Si bien la superconductividad se descubrió en 1911 no fue hasta 1957 que se tuvo una teoría de la superconductividad a nivel microscópico. La teoría BCS (por Bardeen, Cooper y Schrieffer) explicó que el estado superconductor se caracteriza por la formación de pares de electrones, llamados pares de Cooper, y que todos estos pares se comportan de forma coherente dando lugar un estado colectivo. Es habitual hacer la analogía entre la superconductividad y parejas bailando siguiendo una coreografía perfecta. Nos aparece de nuevo la idea de fenómeno cooperativo que no podríamos explicar si nos fijamos en un solo electrón, sino que necesitamos muchos de ellos. En el caso de la superconductividad resulta paradójico que se formen pares de electrones teniendo en cuenta que los electrones se repelen y formar pares lo asociamos a atracción. Necesitamos un pegamento para los electrones, también llamado mecanismo de la superconductividad. La teoría de BCS propuso un mecanismo para que esto ocurriera: la superconductividad mediada por las vibraciones de red, llamadas fonones cuando las cuantizamos. La idea es la siguiente: cuando un electrón se mueve, atrae a los iones de la red cristalina, esto genera una región de carga positiva. Como los iones son más pesados que los electrones también son más lentos y tardan en volver a su

posición inicial, aunque el electrón inicial se haya ido, y esta región de carga positiva atrae a otro electrón. De esta forma el electrón inicial y el que se acerca después sienten una atracción efectiva que da lugar a la formación de pares de electrones. Este mecanismo de la superconductividad es capaz de explicar la superconductividad de muchos materiales incluidos los hidruros de alta temperatura, pero no puede explicar la superconductividad de muchos otros compuestos entre los que se encuentran los óxidos de cobre o los superconductores de hierro. Hablamos de superconductores convencionales y no convencionales. Volveremos a esto más adelante.

La superconductividad es un fenómeno puramente cuántico. Además de muchas partículas y un mecanismo que medie la formación de pares, para que pueda producirse el estado superconductor BCS es clave que el espín de las partículas, en nuestro caso los electrones, sea semientero. Es decir que las partículas sean fermiones. Los electrones cuyo espín es  $\frac{1}{2}$  lo son. En el estado superconductor también se rompe una simetría, llamada simetría gauge y un apunte, el concepto del llamado bosón de Higgs que escuchamos frecuentemente al hablar de las partículas elementales que forman el universo surgió dentro del estudio de la superconductividad antes de ser propuesto como partícula elemental (7). Fue el mismo Anderson del "More is different" quien lo introdujo.

Aunque menos conocida que la superconductividad otra fase electrónica que no deja indiferente son los aislantes de Mott. En

cierto modo es una fase antagónica a la superconductividad. En los aislantes de Mott la repulsión entre los electrones es tan fuerte cuando están en el mismo sitio que logran que un material que esperábamos que fuese metálico se convierta en aislante. Los electrones se localizan. Y esto ocurre sin que sea necesario que se rompa ninguna simetría, aunque en muchas ocasiones se acaba rompiendo. Los aislantes de Mott son tal vez el fallo más dramático de la teoría de bandas que introducía más arriba tal y como solemos entenderlas. Este comportamiento aislante se produce solo a unas densidades electrónicas concretas que son muy características y que ayudan a identificarlo, aunque si hay ruptura de alguna simetría, como por ejemplo algún tipo de magnetismo no siempre es fácil hacerlo. A estas alturas del artículo probablemente ya no nos sorprenda leer que muchos óxidos metálicos son aislantes de Mott. De hecho, los materiales en los que más famosa se ha hecho la física de Mott son los cupratos, los óxidos de cobre superconductores de alta temperatura crítica de los que hablábamos más arriba. Resulta especialmente sorprendente que aparezca superconductividad de alta temperatura crítica, una propiedad que involucra la formación de pares de electrones, en un sistema en el que la repulsión entre electrones es tan fuerte como para hacer que un material que esperábamos que fuera metal se vuelva aislante [4]. En los cupratos pasar de un aislante de Mott a un superconductor implica únicamente sustituir una proporción muy pequeña de los átomos, con el consiguiente cambio en la densidad electrónica, que es de hecho el parámetro clave. En los

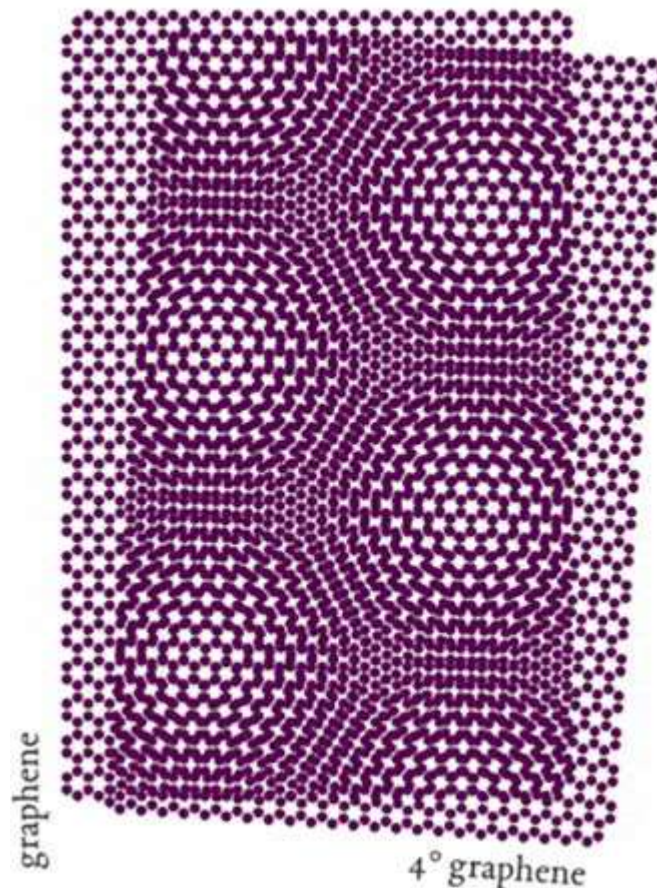
cupratos además de superconductividad y aislantes de Mott, hay antiferromagnetismo, tendencia a la modulación de carga y muchos comportamientos anómalos, como que la resistividad aumente más lentamente con la temperatura de lo esperado o que no sature a altas temperaturas. Estos comportamientos, aunque nos puedan parecer menos llamativos son muy anómalos hasta el punto de que científicamente se conocen como metales extraños. Algunos de estos comportamientos pueden estar producidos por la existencia de una transición de fase a temperatura cero (refiriéndonos al cero absoluto de temperatura en kelvin). Cuando una transición ocurre a temperatura cero decimos que es una transición de fase cuántica. Desde que se descubriera superconductividad de alta temperatura en estos compuestos en 1986 la comunidad científica ha hecho un gran esfuerzo para entenderles, pero no hay una descripción aceptada capaz de explicar todas las propiedades que presentan incluyendo la superconductividad. Se cree no obstante que la propia repulsión entre los electrones, y muy especialmente las tendencias magnéticas, está detrás de la aparición de la superconductividad. Cómo influyen el resto de comportamientos anómalos, o la cercanía del aislante de Mott en la superconductividad, 35 años después de su descubrimiento aún no lo sabemos.

Los cupratos son el paradigma de los materiales con fuertes correlaciones electrónicas, pero no son los únicos materiales que presentan multitud de fases electrónicas y comportamientos no convencionales. Otros compuestos como los superconductores de hierro, los superconductores orgánicos, materiales que contienen

átomos de tierras raras (como cerio o neodimio) u otros óxidos comparten con los cupratos algunos de sus anómalos comportamientos. Para agrupar todos los comportamientos anómalos que surgían de la repulsión electrónica en un concepto, hace unos años se acuñó el término materiales cuánticos [5]. Este término inicialmente se refería únicamente a los materiales con fuertes correlaciones electrónicas, pero más recientemente se ha generalizado para incluir a materiales en los que la topología de la función de onda del electrón juega un papel importante en las propiedades electrónicas, a los materiales de grosor atómico, llamados materiales 2D, y a otros materiales en los que la interrelación entre diferentes grados de libertad de carga, de espín, orbitales o de la red dan lugar a comportamientos complejos. En general son materiales con una gran riqueza de fenómenos y un enorme potencial para transformar nuestras vidas mediante aplicaciones tecnológicas. Materiales con muchas propiedades que surgen de la naturaleza cuántica de los electrones y de su sociología, de cómo interactúan. Propiedades que en muchos casos aún no entendemos y que constantemente nos sorprenden.

En el texto he enfatizado los óxidos metálicos porque son materiales con una riqueza de propiedades increíble y porque nos pueden resultar más cercanos. Tal vez la próxima vez que oigas la palabra física cuántica no tengas que recurrir a una imagen exotérica y pienses en un óxido, o al menos en un material. No obstante, quiero terminar el artículo mencionando una nueva familia de materiales cuánticos que está generando mucha excitación en los últimos años

y en la que las correlaciones entre electrones más que sociología están montando una verdadera orgía: las multicapas de grafeno y las heteroestructuras moiré.



*Figura 4. Bicapas de grafeno rotado en las que se aprecia el patrón de moiré que se forma. Imagen:*

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moire\\_of\\_twisted\\_bilayer\\_graphene.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moire_of_twisted_bilayer_graphene.svg)

El grafeno es un material bidimensional formado por una única capa de átomos de carbono organizados en una red hexagonal (8). Una capa como las que, una vez apiladas, forman el grafito (Figura



1). En 2004 se aisló por primera vez el grafeno. Desde entonces, además de estudiar sus propiedades se han creado multicapas con diferentes apilamientos. Las bicapas de grafeno rotadas constan de dos capas de grafeno rotadas entre sí un ángulo dado. La falta de alineamiento de los átomos en las dos capas crea una superestructura en la red conocida como moiré. Se había predicho que si este ángulo de rotación era en torno a  $1^\circ$  la energía cinética de los electrones sería muy pequeña por lo que las interacciones entre los electrones podrían jugar un papel muy importante y dar lugar a diferentes fases electrónicas. En 2018 en este sistema se observaron superconductividad y estados aislantes debidos a la correlación, recordándonos a lo que ocurre los cupratos [6, 7]. Desde entonces la fenomenología observada en este sistema y otros relacionados ha sorprendido enormemente a toda la comunidad científica (9). Fases superconductoras, aislantes, magnéticas, con modulación de carga, topológicas y de otros tipos se alternan en un único sistema tan solo aplicando potenciales eléctricos y campos magnéticos [8]. Fenomenologías similares aparecen en otras heteroestructuras relacionadas pero diferentes, fundamentalmente con patrones de moiré como las tricapas de grafeno rotado, con tres capas en vez de dos, o las bicapas rotadas de otros materiales, pero también en multicapas sin rotar ni moiré [9]. Sabemos que las interacciones juegan un papel clave en estas propiedades, pero todavía estamos intentando entender la naturaleza de sus fases electrónicas y de la superconductividad que presentan. La investigación avanza muy deprisa. Según finalizo de escribir este

capítulo aparecen dos artículos en la web en los que se anuncia que en las cuatri—capas y penta—capas de grafeno rotado también hay superconductividad [10]. No sabemos aún por qué superconducen pero lo que es seguro es que esta historia continúa y vendrá cargada de novedades interesantes.

Referencias (en su mayoría nivel avanzado):

- [1] P. W. Anderson, *Science* 177, 393 (1972)
- [2] Review sobre espintrónica. Hirorata et al, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 509, 166711 (2020)
- [3] Snider et al, *Nature* 586, 373 (2020)
- [4] Review sobre la física de los cupratos. B. Keimer, S. A. Kivelson, M. R. Norman, S. Uchida, J. Zaanen, *Nature* 518, 179 (2015)
- [5] Review sobre materiales cuánticos. B. Keimer and J. E. Moore, *Nature Physics* 13, 1045 (2017).
- [6] Cao et al, *Nature* 556, 43 (2018). *Nature* 556, 80 (2018).
- [7] Review sobre grafeno ángulo mágico. E. Y. Andrei, et al, *Nature Review Materials* 6, 201 (2021).
- [8] Xie et al, *Nature* 600, 439 (2021)
- [9] Zhou et al, *Nature* 598, 429 (2021), *ibid* 598, 434 (2021)
- [10] Zhang et al, arXiv: 2112. 09270, Min Park et al, arXiv: 2112. 10760

Bibliografía divulgativa:

- (1) So close and such a stranger. Un documental sobre la física de la materia condensada.

<https://www.youtube.com/watch?v=gUMVY-wFi-M>

(2) Superconductividad (ICMM—CSIC). Web de divulgación de la superconductividad.

<https://wp.icmm.csic.es/superconductividad/>

(3) Taller de superconductividad ICMM—CSIC:

[https://www.youtube.com/watch?v=XN\\_UOoACLq0&t=1s](https://www.youtube.com/watch?v=XN_UOoACLq0&t=1s)

y Levitación magnético superconductora:

<https://www.youtube.com/watch?v=D3rz3mVqQtQ>

(4) Perovskite type oxides. The new approach to high— $T_c$  superconductivity. Nobel Lecture awarded to Berdnorz and Muller in 1987:

<https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/bednorz-muller-lecture.pdf>

(5) La edad del hierro de la superconductividad:

<https://gefes-rsef.org/la-edad-de-hierro-de-la-superconductividad/>

(6) Superconductividad a temperaturas record en hidruros metálicos:

<https://gefes-rsef.org/superconductividad-a-temperaturas-record-en-hidruros-metalicos/>

(7) Higgs, Anderson and all that . P. W. Anderson, Nature Physics 11, 93 (2015)

(8) Graphene, the perfect atomic lattice. Premio Nobel 2010. Información para el público:

<https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/popular-physicsprize2010.pdf>

(9) Este español ha revolucionado los materiales cuánticos.

<https://www.youtube.com/watch?v=zn4B5nBAhJA>

[Leni Bascones.](#)

Doctora en Física de la Materia Condensada.  
Científica Titular, Instituto de Ciencias de Materiales de Madrid,  
ICMM—CSIC.

## Capítulo 12

### De la paradoja EPR a las tecnologías cuánticas.

Siento una enorme fascinación por el mundo cuántico. Sus aspectos difíciles de asimilar, incluso paradójicos, me atrajeron desde el primer momento y es a ellos a los que voy a dedicar este texto. Repasaré los comienzos de la teoría cuántica para mostrar la necesidad de un nuevo paradigma. Describiré cómo, en una aventura tanto teórica como experimental que llega hasta nuestros días, se ha demostrado que la Naturaleza escoge los extraños principios de la mecánica cuántica frente a otros más acordes con nuestra intuición. Y finalmente, cómo esto ha desencadenado una revolución tecnológica que promete moldear el futuro.

Esta historia comienza a finales del siglo XIX, cuando varios experimentos mostraron los límites de la comprensión de la Naturaleza que en ese momento se tenía, y cuyo conjunto de leyes se conoce como física clásica. El más emblemático de ellos fue la medición de la radiación emitida por un cuerpo negro. Es decir, un cuerpo que absorbe toda la radiación que le llega, se calienta, y emite de acuerdo a su temperatura. La teoría clásica predice una emisión creciente a altas frecuencias, que implica la radiación instantánea de toda su energía. Este resultado, no solo equivocado sino absurdo, era una clara indicación de que algo muy profundo debía ser modificado.

La teoría de Maxwell describe la radiación como una onda electromagnética, y como las ondas en un estanque, su amplitud

puede tomar cualquier valor. A mayor amplitud, mayor energía asociada a la oscilación. El primer ataque al paradigma clásico se debe a Max Planck. Planck descubrió empíricamente que la curva de radiación de un cuerpo negro se reproducía de forma exacta si solo se permitía a la amplitud tomar valores discretos, múltiplos de la frecuencia de oscilación. Estos cuantos de energía dieron nombre a la teoría que emergería del camino iniciado por Planck, la mecánica cuántica, es decir, la mecánica que gobierna los cuantos. Planck creía que su hipótesis revolucionaria no tendría verdadero significado hasta que no se entendiera su origen. Lo buscó en las propiedades de vibración de los átomos que componen el cuerpo negro, es decir, en el proceso de emisión.

La siguiente contribución fundamental es obra de Albert Einstein. De hecho, aunque varios de sus trabajos hubieran merecido ser reconocidos con el premio Nobel, solo obtuvo este galardón por la explicación del efecto fotoeléctrico. Este efecto describe la emisión de electrones cuando un haz de luz incide sobre un metal, y al igual que la radiación del cuerpo negro, sus propiedades no encajaban con las predicciones de la física clásica. En concreto, la emisión solo se producía con luz de frecuencia suficientemente alta, independientemente de su intensidad. Einstein se dio cuenta de que la solución estaba en los cuantos de energía propuestos por Planck. Bastaba con asumir que son una característica de la radiación en sí misma, teniendo por tanto entidad propia y portándose a todos los efectos como partículas elementales. Los cuantos de luz recibirían posteriormente el nombre de fotones.

La propuesta de Einstein fue tildada de radical por sus colegas, incluido Planck, y tardó varios años en ser aceptada. Dado que la radiación, fenómeno descrito a nivel clásico como una onda, se puede entender como un conjunto de fotones, es natural plantearse si la materia a nivel microscópico presentará en correspondencia aspectos ondulatorios. Louis De Broglie dedicó su tesis doctoral a esta cuestión, concluyendo que toda partícula lleva asociada una onda. Su hipótesis fue confirmada poco después mediante experimentos de difracción de electrones. Se estableció así un nuevo elemento del sorprendente mundo cuántico: la dualidad onda—corpúsculo, o que un mismo fenómeno cuántico puede manifestarse como onda y como partícula.

Estos descubrimientos dieron lugar a nuevas preguntas. ¿Cómo explicar los aspectos ondulatorios de la radiación en términos de fotones? ¿Cuál es el significado de la onda asociada a una partícula? Las respuestas se condensan en dos principios básicos. El primero de ellos se conoce como principio de superposición: si un sistema puede estar en dos estados distintos, puede encontrarse también en una superposición de ambos. Este postulado es necesario para reconciliar la naturaleza ondulatoria y corpuscular de la luz. Aunque el terreno de la mecánica cuántica es el mundo microscópico, utilizaré una imagen de la vida cotidiana para ilustrar este principio fundamental. No, no será un gato; utilizaré una taza cuyo contenido puede estar caliente o frío. Si perteneciera al mundo cuántico, la taza con su contenido podría estar *a la vez* caliente y fría.

El segundo postulado se refiere al acto de medir y asegura que no será ambiguo, que se obtendrá un resultado concreto de entre todos los posibles. En consecuencia, cuando toque mi taza cuántica la sentiré con claridad caliente o fría. Si preparo muchas tazas en el mismo estado superposición, unas veces obtendré frío y otras, calor. Soy yo al tocarla quien obliga a la taza a escoger entre las dos temperaturas, modificando su estado de caliente y frío a caliente o frío. Es decir, medir destruye la superposición. Describir el estado de la taza consiste en saber con qué probabilidad obtendré un resultado u otro. En la teoría cuántica, la incertidumbre sobre el resultado de la medida no es producto de un conocimiento incompleto, sino que tiene un carácter fundamental.

Los aspectos ondulatorios de la materia resultan tener su origen en la capacidad de superponer estados con características que, a nivel clásico, son mutuamente excluyentes. Una de ellas, quizá la más básica, es la posición que ocupa una partícula en el espacio. La onda que De Broglie concibió asociada a toda partícula representa la incertidumbre en su posición. No describe por tanto la oscilación de una magnitud física, como los campos eléctrico y magnético en el caso de la luz. La amplitud de esta onda, cuya naturaleza es antes matemática que física, determina la probabilidad de encontrar la partícula aquí y no allá.

A Einstein le parecía profundamente insatisfactorio que la naturaleza última de la realidad fuera probabilística. No estaba solo en esta opinión. Colegas tan notables como Erwin Schrödinger, científico fundamental en el desarrollo de la mecánica cuántica, y el



propio De Broglie, también la compartían. Es importante entender que la mecánica cuántica utiliza los mismos conceptos que la física clásica para describir la realidad: posición, velocidad, momento angular, etc. Por tanto, implica asumir que el conocimiento más fundamental de cantidades que a nivel clásico podemos describir con total exactitud, incluye un elemento de azar.

La ciencia está impulsada por el deseo de comprender como funciona la Naturaleza y el convencimiento de que adquirir este conocimiento es posible. La mecánica cuántica no representa un contraejemplo a estas altas expectativas, pero es innegable que no encaja en ellas de la manera que a priori deseábamos. Aceptar la interpretación probabilística significa que, aunque hayamos sido capaces de encontrar sus leyes, la naturaleza funciona de una manera radicalmente ajena a nuestra intuición. La única vía para evitar esta conclusión es que la mecánica cuántica, al igual que la física clásica, no sea más que una aproximación a la realidad. De esta forma su carácter probabilístico podría ser fruto de algún elemento que todavía no hemos descubierto. La teoría cuántica completada con este nuevo ingrediente restablecería un entendimiento de la naturaleza basado en el determinismo. Este era el punto de vista preconizado por Einstein.

Para ilustrar sus críticas, Einstein se servía a menudo de situaciones experimentales imaginadas. En sus famosos debates con Niels Bohr, uno de los principales defensores de la interpretación probabilística, Einstein proponía una situación que cuestionaba esta interpretación y Bohr utilizaba todo su ingenio en

refutarla. Estos experimentos mentales fueron una gran herramienta para profundizar en las implicaciones de la mecánica cuántica. El más conocido es quizá el del gato vivo y muerto como consecuencia de una superposición cuántica a nivel microscópico, ideado por Schrödinger con la misma intención crítica que Einstein. El más importante fue sin embargo formulado por Einstein, junto a Boris Podolski y Nathan Rosen, en un artículo que apareció en el año 1935 con título "¿Puede la descripción cuántica de la realidad física ser completa?".

Einstein y sus colegas eran conscientes de que todas las predicciones de la mecánica cuántica habían resultado correctas y que la teoría no sufría de ninguna inconsistencia lógica. Tenían por tanto que hilar muy fino para mostrar que su fundamento probabilístico la hacía incompleta. Dedicaron la primera parte de su trabajo a discutir las premisas que debe satisfacer una teoría completa de la realidad. Sin duda esta discusión contiene un prejuicio sobre cómo debe ser tal teoría, pero éste se intenta mantener en un mínimo irrenunciable. No se rechaza la presencia de principios probabilísticos, pero se asume una asimetría entre las cantidades que pueden ser predichas con certeza y aquellas que no. Denominaron elementos de realidad a cantidades cuyo valor se puede determinar sin realizar una medición, cantidades que están bien definidas sin necesidad de que exista un observador. Su premisa fundamental es que los elementos de realidad deben tener una representación explícita dentro de una teoría física completa.

Es de enorme importancia para el progreso científico pasar de la

intuición y los argumentos cualitativos, a conceptos bien definidos a nivel lógico. Esto es lo que consiguieron Einstein, Podolski y Rosen al transformar las críticas al fundamento probabilístico de la mecánica cuántica en el concepto preciso de elemento de realidad. Su trabajo, al que me referiré de hora en adelante por las iniciales de sus autores (EPR), inició una historia apasionante que concluye con la rigurosa demostración experimental de que la Naturaleza *no* satisface el criterio EPR de realismo. Sin embargo, esto no disminuye en nada el valor de su trabajo. Bien al contrario, demuestra que equivocarse siguiendo un razonamiento profundo, honesto y creativo puede ser una contribución inestimable al progreso.

Una vez definido el criterio a exigir a una teoría completa de la realidad, el segundo paso fue encontrar una situación que lo pudiera comprometer. Aquí está la segunda gran contribución EPR. Fueron capaces de identificar el fenómeno que mejor representa la ruptura entre el mundo clásico y el cuántico. Se da cuando se aplica el principio de superposición a sistemas con varias componentes y no se había reparado en sus drásticas implicaciones hasta entonces. Tanto es así que ni siquiera se le había dado un nombre propio. Fue Schrödinger quien lo denominó entrelazamiento cuántico en un comentario al trabajo de Einstein, Podolski y Rosen, aparecido el mismo año 1935.

Continuando con el ejemplo anterior, imaginad que en vez de una taza que puede estar caliente o fría, tenemos dos. Este sistema tiene cuatro estados básicos: la primera taza puede estar caliente y la

segunda también, o la primera caliente y la segunda fría, o al revés, o ambas pueden estar frías. Según la mecánica cuántica, las tazas pueden encontrarse además en una superposición cualquiera de estos cuatro estados. Esto lleva a la existencia de estados en los que no se puede referir a una parte sin hacer alusión al todo. Esta extraña característica es la que describe el entrelazamiento cuántico. Consideremos por ejemplo que superponemos los estados con ambas tazas calientes y ambas frías. Es claro que el estado de una de ellas está ligado al de la otra, y por ello no podemos describirlas individualmente. El entrelazamiento cuántico introduce una correlación en la incertidumbre sobre el estado de cada una de las partes de un sistema.

La absoluta novedad que introduce el entrelazamiento se aprecia mejor al combinarlo con el postulado de la medida en mecánica cuántica. El acto de medir destruye la superposición cuántica y fuerza al sistema a escoger entre una de las posibilidades incluidas en el estado previo a la medida. Cuando un sistema de varias componentes se encuentra en un estado entrelazado, medir en una de sus partes tiene consecuencias sobre el sistema completo. Antes de tocar una de nuestras tazas entrelazadas en un estado que superpone ambas calientes y ambas frías, no puedo saber qué resultado obtendré. Pero como sus temperaturas están correlacionadas, en el instante en que fuerzo a escoger entre caliente o frío a la primera, la segunda, sobre la que no he actuado, se ve obligada a seguir la misma elección. Y esto ocurrirá aunque mi amiga, que tiene la segunda taza, se la haya llevado a otra

habitación, al jardín, o incluso a una galaxia muy, muy lejana. Con *certeza*, si yo he encontrado mi taza caliente y ella toca la suya *inmediatamente* después, la encontrará también caliente.

Uno de los resultados experimentales más influyentes de finales del siglo XIX fue la medición de la velocidad de propagación de la luz. Sorprendentemente la velocidad resultó ser la misma con independencia del estado de movimiento del observador. Según la física clásica, las velocidades de observador y sistema se deberían sumar y dar lugar a cambios apreciables, que sin embargo no se encontraron. La búsqueda de una explicación llevó a Einstein a formular la teoría de la relatividad especial, cuyo punto central es la existencia de una velocidad máxima de propagación, que coincide precisamente con la velocidad de la luz. Esto implica una concepción totalmente nueva del espacio y el tiempo, y junto con la mecánica cuántica, es el segundo pilar de la física moderna.

La existencia de una velocidad máxima de propagación limita la posible conexión causal entre dos eventos. Si para que una señal emitida desde el primero llegue al segundo, ésta necesita propagarse a mayor velocidad que la luz, es imposible que exista una relación causa—efecto entre ellos. Este es el principio de localidad, el segundo requisito que Einstein, Podolski y Rosen exigieron a una teoría completa de la realidad.

Una consecuencia directa del principio de localidad es la ausencia de acciones inmediatas a distancia. O equivalentemente, la imposibilidad de transmitir información de forma instantánea entre dos observadores distantes. Como hemos visto, la combinación de

entrelazamiento cuántico y medida parece cuestionar esta conclusión. Sin embargo, la mecánica cuántica logra evadir el conflicto de manera sutil, que ilustraré de nuevo con las tazas. Mi amiga y yo sabemos que nuestras tazas se encuentran en el estado que superpone con igual probabilidad ambas calientes y ambas frías. Si todos los días preparamos las tazas en este mismo estado, cuando ella toque la suya obtendrá la mitad de las veces caliente y la otra mitad fría. Esto ocurrirá independientemente de que yo también haya tocado la mía, y por tanto mi amiga no podrá saber si yo he actuado o no. Es decir, aunque yo conozca el estado de su taza sin actuar sobre ella, no habrá transmisión de información entre nosotras. Einstein era consciente de que no había una contradicción en esta situación, pero le producía un profundo disgusto que manifestó denominando al entrelazamiento como "fantasmagórica acción a distancia".

Hasta ahora solo hemos considerado una propiedad observable de las tazas, su temperatura. ¿Existen otras características que podamos medir? Ciertamente sí. Podemos preguntarnos también sobre su color. ¿Es posible encontrar un estado en que la temperatura y el color de la taza estén ambos definidos con certeza? En el mundo clásico la respuesta es por supuesto afirmativa. En el cuántico solo es posible construir estados sin incertidumbre en varias de sus propiedades, cuando éstas satisfacen una cierta relación matemática de compatibilidad entre ellas. No voy a entrar a describir esta relación, pero si mencionaré que es el contenido del conocido principio de incertidumbre de Heisenberg.

Con el sencillo ejemplo de taza he ilustrado el sistema cuántico más simple, aquel cuyo estado general se puede describir como una superposición de solo dos posibilidades. *Cualquier* propiedad en este sistema tiene solo dos resultados posibles. Respecto a la temperatura, en nuestra analogía, hemos escogido caliente y frío. Respecto al color, podrían ser por ejemplo azul y amarillo. En un sistema de dos estados, la relación matemática de compatibilidad entre propiedades distintas nunca se satisface. Por lo tanto, si la taza está en el estado que con certeza resulta caliente al tocarlo, tendrá una incertidumbre en su color. Es decir, el estado caliente corresponde a una superposición entre los estados de color azul y amarillo. De la misma forma un estado donde el color es con seguridad amarillo, implica una indeterminación en la temperatura. Recordemos la definición de elemento de realidad EPR, una cantidad cuyo valor podemos predecir con certeza sin necesidad de realizar una observación. En el estado caliente de la taza, la temperatura es un elemento de realidad ya que no hay incertidumbre en su resultado. Sin embargo, es claro que en este estado el color no es un elemento de realidad. Y viceversa, intercambiando las propiedades de temperatura y color. Es decir, la mecánica cuántica no puede describir como elementos de realidad dos propiedades que no satisfagan la relación de compatibilidad. Es en este punto donde Einstein, Podolski y Rosen encontraron una paradoja.

En su argumento utilizaron un estado entrelazado de dos componentes, tazas para nosotros. Hemos descrito el estado

entrelazado en el que ambas están calientes y ambas frías. El razonamiento EPR se basa en un estado distinto, que superpone la primera taza caliente y la segunda fría, con la situación opuesta en la que la primera está fría y la segunda caliente. Este estado tiene la propiedad especial de hacer compatibles la temperatura *total* y el color *global*. Su temperatura total es con certeza cero, si definimos cero como el punto intermedio entre calor y frío. Respecto al color global, este estado resulta ser perfectamente verde. Es decir, una superposición con igual probabilidad entre azul y amarillo para la primera y segunda taza, con amarillo y azul.

Si yo toco mi taza y la encuentro caliente, sé con absoluta seguridad que la taza de mi amiga en ese mismo instante estará fría. Y lo sabré sin necesidad de actuar sobre su taza. Según la definición EPR de elemento de realidad, la temperatura de la taza de mi amiga es un elemento de realidad. Si miro mi taza y la veo amarilla, sé con certeza que la suya será azul. Por lo tanto, también el color de su taza es un elemento de realidad. De la misma forma, podría ser mi amiga la que hiciera estas consideraciones, y concluiría que la temperatura y el color de mi taza son elementos de realidad. Es decir, no solo la temperatura total cero y el color global verde son elementos de realidad en el estado especial que estamos considerando. Las propiedades *individuales* de cada taza también lo son.

Esta situación muestra la incompatibilidad entre el criterio de realismo EPR y la mecánica cuántica. De acuerdo con el primero, una teoría física completa ha de ser capaz de incluir todas las



cantidades que podemos predecir sin necesidad de medir. Por otra parte, hemos explicado cómo en un sistema cuántico con dos estados básicos no es posible describir más de una propiedad con certeza. Y sin embargo hemos encontrado un estado en el que varias propiedades de cada taza satisfacen la definición de elemento de realidad. Esto llevó a Einstein, Podolski y Rosen a concluir que la descripción de la Naturaleza provista por la mecánica cuántica es incompleta. Es importante entender correctamente esta afirmación. No implica que la mecánica cuántica sea incorrecta. Lo que se argumenta es que sus elementos probabilísticos son debidos al desconocimiento de alguna información relevante que en una teoría física completa sí tendría cabida.

La conclusión anterior tiene grandes implicaciones. Antes de aceptarla, cabe preguntarse si no es posible modificar la definición de realismo buscando su compatibilidad con la mecánica cuántica. Podríamos por ejemplo exigir que dos propiedades solo se consideren elementos de realidad si es posible predecirlas *simultáneamente*. La temperatura y el color de las tazas individuales en el estado de temperatura total cero y color global verde no satisfacen este criterio más restrictivo. Si toco mi taza, también sabré inmediatamente cuál es la temperatura de la de mi amiga. Una vez que las tazas han escogido entre caliente y frío o viceversa, la superposición inicial se destruye y el estado deja de estar entrelazado. Este nuevo estado provocado por mi acción no tiene color global verde. Aunque mire mi taza y obtenga azul, no sabré con certeza el color de la taza que no veo.

Llegamos así a otra situación sorprendente. Si toco mi taza, la temperatura de la de mi amiga será un elemento de realidad, pero no su color. Si miro mi taza, será el color y no la temperatura de la segunda taza lo que puedo predecir con certeza. Es decir, la propiedad de la segunda taza que verifica el criterio de elemento de realidad, y por lo tanto debería tener una existencia independiente de que alguien la observe o no, resulta depender de la acción que yo haya ejecutado sobre la mía. Claramente esta situación implica una tensión tanto con el principio de realismo, como con el de localidad. Desde la misma intuición que lleva a exigir el criterio de realismo a una teoría física completa, resulta difícil argumentar contra la exigencia añadida de simultaneidad. El que esta modificación lleve a una situación todavía más paradójica pone de manifiesto la profundidad del cambio conceptual que supone la mecánica cuántica. El éxito de Einstein, Podolski y Rosen fue exponer esto de forma clara y concisa, y por ello el impacto de su contribución no ha hecho más que aumentar con el paso del tiempo.

En la última frase de su trabajo, se expresa la convicción de que una teoría acorde a los principios de localidad y realismo sea posible. Esta teoría completaría la descripción cuántica con unas variables adicionales, que se conocen con el descriptivo nombre de variables ocultas. Ocultas no solo porque no las conocemos, sino porque, aunque tal teoría existiera, en principio no sería posible preparar un estado con unos valores predefinidos para ellas. De lo contrario entraríamos en conflicto con la mecánica cuántica. Por ejemplo, podríamos preparar un estado de nuestra singular taza

que no tuviera incertidumbre ni en la temperatura y ni en el color. Y no hay ninguna evidencia experimental de que en el mundo microscópico esto sea posible. Las teorías de variables ocultas asumen que estas nuevas variables tendrán un valor bien definido en cada estado que preparemos, a pesar de que *no* podamos fijarlos con nuestros dispositivos experimentales. La descripción cuántica surgiría al promediar sobre estas nuevas variables.

En realidad, las discusiones sobre la completitud de la mecánica cuántica y las teorías de variables ocultas no comenzaron con el trabajo EPR. El primer intento de una teoría de variables ocultas se atribuye a De Broglie en 1927. La dualidad onda—corpúsculo que él había propuesto asocia una onda a toda partícula. De Broglie creía que esta onda debía tener realidad física en vez de solo matemática, como promueve la interpretación estándar de la mecánica cuántica, sirviendo como primer modelo de variables ocultas. En un desarrollo opuesto y anterior también a la paradoja EPR, el gran matemático John von Neumann publicó un libro sobre los principios matemáticos de la mecánica cuántica en el que presentaba una prueba de la imposibilidad de las variables ocultas. Poco después Grete Hermann, matemática discípula de Emily Noether, descubrió una falacia en su argumentación. Por desgracia su contribución pasó mayormente inadvertida, y la prueba de von Neumann tuvo una influencia notable. Hubo que esperar largos años hasta que John Bell, otro de los protagonistas de nuestra historia, redescubriera su fallo.

A mediados del siglo pasado David Bohm, importante físico y

original pensador, retomó la búsqueda de una teoría de variables ocultas. Formuló una propuesta que hace contacto con la construcción previa de De Broglie. Contrariamente a los criterios EPR, las variables ocultas que contempla tienen un carácter *no local*. El trabajo de Bohm, junto con las dudas sobre la prueba de von Neumann, llevó a Bell a buscar una respuesta definitiva sobre la viabilidad de las variables ocultas *locales*.

En 1964, casi tres décadas después de la contribución EPR, Bell demostró que la mecánica cuántica *no* admite una teoría de variables ocultas satisfaciendo los principios de realismo y localidad. Utilizó en su prueba un sistema análogo al de nuestras tazas y un estado equivalente al que hace compatibles las propiedades de color global y temperatura total. En este estado especial resulta haber más propiedades compatibles. Por ejemplo, el tipo de contenido de la taza. Supongamos que sus dos estados básicos son café y té. En términos del contenido se cumple el mismo esquema verificado por las propiedades anteriores. Es decir, el estado de temperatura total cero y color global verde también se puede describir como una superposición entre café en la primera taza y té en la segunda, y viceversa, té en la primera y café en la segunda.

Si fuera posible completar la mecánica cuántica en el sentido que EPR plantearon, *cada* taza tendría secretamente unos valores bien definidos de temperatura, color y contenido. Estas propiedades *individuales* serían las variables ocultas de nuestro ejemplo, las cuales determinan el resultado que obtendremos al medir. Respecto

a ellas, el estado especial tendría ocho configuraciones subyacentes: calor—amarillo—café para la primera y fría—azul—té para la segunda, calor—amarillo—té para la primera y fría—azul—café para la segunda, etc. Recordemos que cuando mi amiga y yo preparamos nuestras tazas, no podemos controlar qué configuración se producirá. Pero, si las variables ocultas existen, sabemos con certeza que, dados  $N$  pares de tazas, habrá un número de ellos bien definido que corresponde a cada configuración, aunque desconozcamos su valor. Sorprendentemente, esto es suficiente para deducir relaciones entre las probabilidades de los diferentes resultados. No es necesario ningún elemento adicional proveniente del mundo cuántico. Estas relaciones toman la forma de unas famosas desigualdades, que llevan el nombre de su autor. Las desigualdades de Bell establecen lo siguiente:

$$P(p_1, r_1; p_2, r_2) \leq P(p_1, r_1; p_3, r_3) + P(p_3, r_3; p_2, r_2) ,$$

donde

$$P(p_1, r_1; p_2, r_2)$$

es la probabilidad de que yo obtenga el resultado  $r_1$  al medir la propiedad  $p_1$ , e independientemente pero al mismo tiempo, mi amiga obtenga  $r_2$  para la propiedad  $p_2$ . Por ejemplo,  $p_1$  y  $p_2$  pueden ser temperatura y contenido, y  $r_1$  y  $r_2$  los resultados frío y café.

Puesto que las desigualdades de Bell se derivan *exclusivamente* de los principios de realismo y localidad, el siguiente paso está claro. Calculemos las probabilidades  $P(p_1, r_1; p_2, r_2)$  siguiendo los

postulados de la mecánica cuántica. Dependiendo de las relaciones matemáticas entre las propiedades que escojamos medir, y para las que la imagen de las tazas es finalmente demasiado limitada, se obtiene una violación de las desigualdades de Bell. Esto implica el importantísimo resultado de que las correlaciones cuánticas son *más fuertes* de lo que una teoría de variables ocultas locales puede representar. Se excluye así definitivamente la posibilidad de completar la mecánica cuántica como Einstein, Podolski y Rosen deseaban.

¿Cuál es la relevancia *práctica* de esta conclusión? Hemos insistido en que, aunque existiera una teoría de variables ocultas, no podríamos manipular libremente los valores de sus variables. Por tanto, la respuesta parece ser que tiene escasa relevancia. Esto sin embargo no es así. Una teoría de variables ocultas acorde a los criterios EPR implicaría que la mecánica cuántica no supone el cambio radical que aparenta. Sería solamente la manifestación estadística de una teoría más fundamental que satisface los mismos principios de realismo y localidad que rigen la física clásica. El que no sea así significa que el entrelazamiento cuántico es un fenómeno *absolutamente* nuevo.

¿Podría el mundo cuántico ser compatible con otros principios ocultos? El resultado de Bell no excluye esta posibilidad. Un ejemplo es la mencionada teoría de Bohm, basada en variables ocultas no locales. Existen otras propuestas, pero todas ellas tienen en común que sustituyen el fundamento probabilista de la mecánica cuántica por unas construcciones que difícilmente se pueden

considerar más satisfactorias, más simples o más naturales. Por ello, dejaremos en este punto la discusión sobre la completitud de la mecánica cuántica, y conduciremos nuestra historia a cuestiones más aplicadas que teóricas.

A raíz del trabajo de Bell, resultó de evidente importancia la realización de test experimentales de sus desigualdades. Aunque EPR y Bell analizaron el mismo fenómeno físico, utilizaron distintas realizaciones en su argumentación. Los primeros razonaron sobre dos partículas con sus posiciones y velocidades entrelazadas, mientras que Bell consideró el entrelazamiento entre dos copias del sistema cuántico más simple, con solo dos estados básicos, y por tanto mucho más sencillo de implementar. Esto, junto con el enorme progreso de la física experimental, hizo posible que a comienzos de los años 70 aparecieran los primeros test de las desigualdades.

Es interesante describir a grandes rasgos estos experimentos. En sustitución de nuestras tazas imaginarias, se utilizaron fotones, los cuantos de luz descubiertos por Planck y Einstein. A nivel clásico, la radiación electromagnética es una onda que oscila en el plano perpendicular a su dirección de propagación. Esto implica que, fijada su frecuencia, tiene dos estados de oscilación independientes, que se denominan polarizaciones. Escogido un eje en el plano perpendicular al de propagación, las dos polarizaciones corresponden a una oscilación alineada con dicho eje o perpendicular a él. Los fotones heredan esta propiedad y respecto a ella proporcionan la realización de un sistema cuántico con dos

estados básicos. En los mencionados experimentos, una fuente emite pares de fotones entrelazados que se propagan en direcciones opuestas. Cada fotón es recibido por un observador diferente, a los que es tradicional llamar Alice y Bob. Para terminar, éstos hacen pasar su fotón por un polarizador, un instrumento capaz de distinguir entre las polarizaciones paralela y perpendicular respecto a un eje dado, cuya orientación es escogida independientemente por Alice y Bob.

En 1969, John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony y Richard Holt derivaron una forma alternativa del resultado de Bell, conocida como desigualdades CHSH por las iniciales de sus autores. En ellas no es necesario que Alice y Bob escojan entre las *mismas* tres propiedades, en la práctica, orientaciones del polarizador. Este requisito de la formulación original era difícil de implementar de manera exacta. Fueron por tanto las desigualdades de Bell en su forma CHSH las que se sometieron a prueba.

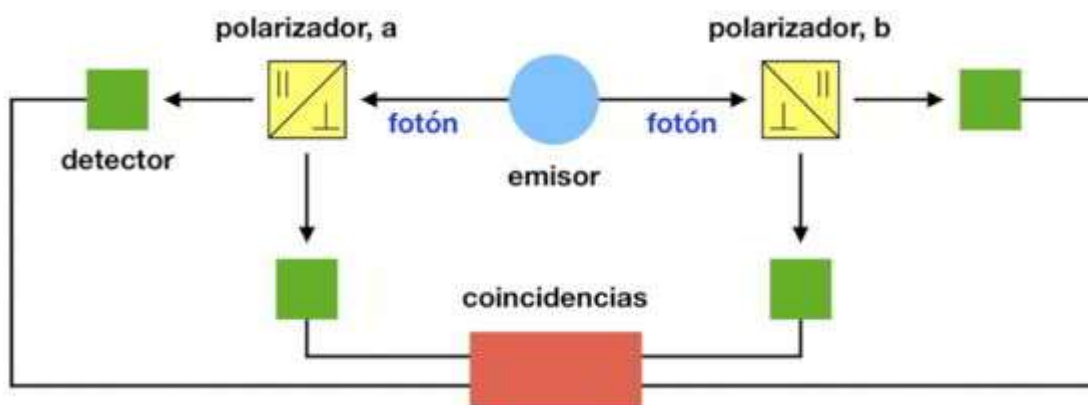
Ya en los primeros experimentos se encontró una clara violación de las predicciones basadas en los principios de localidad y realismo. A pesar de ello y debido a limitaciones tecnológicas, los resultados quedaban lejos de los valores ideales dictados por la mecánica cuántica. No fue hasta 1982 cuando un experimento mostró claro acuerdo con las predicciones cuánticas. Este experimento, liderado por Alain Aspect, marcó un hito en la capacidad de controlar y manipular el mundo cuántico.

Dadas sus implicaciones fundamentales, era necesario asegurar que ningún resquicio experimental pudiera poner en cuestión la



violación de las desigualdades de Bell.

Me refiero a circunstancias que, aunque improbables o complejas, estrictamente no se puedan excluir. Por ejemplo, si alguna información sobre la medición de Alice llegara a Bob antes de que él complete la suya, podría influir en ella. Correlaciones entre ambas mediciones consistentes con el principio de localidad podrían así pasar erróneamente por correlaciones cuánticas. Esta circunstancia se excluye separando suficientemente las localizaciones de Alice y Bob. Esto supuso un importante reto tecnológico ya que el entrelazamiento cuántico es una propiedad muy frágil, que se ve afectada fuertemente por cualquier interacción del sistema de interés con el ambiente que lo rodea. El primer experimento que cerraba el resquicio asociado con localidad se realizó en 1998, con una separación entre Alice y Bob de 400 metros.



*Figura 1. Esquema de la configuración del experimento liderado por Alain Aspect. Los ejes de los dos polarizadores están orientados en direcciones distintas, denotadas como a y b. La novedad de este experimento fue utilizar polarizadores que no bloquean la componente*

*perpendicular a su orientación. El contador de coincidencias es necesario para asegurar que los fotones detectados provienen del mismo par entrelazado.*

Otro importante resquicio de los test de Bell se encontraba en la baja eficiencia de los detectores a los que llegaban los fotones tras atravesar el polarizador. En una extraña coincidencia, podría darse que los fotones detectados violaran las desigualdades, pero éstas se restauraran sobre el conjunto completo de fotones. Claramente esta posibilidad se elimina con una mejora de los detectores. Esto se consiguió por primera vez en 2001, con un experimento que sustituía los fotones por iones atrapados en campos electromagnéticos. Hubo que esperar hasta el 2013 para que el problema asociado a la detección se cerrara también con un test de Bell basado en fotones.

En la derivación de las desigualdades de Bell, es esencial que la elección de la orientación de los polarizadores de Alice y Bob sea independiente y aleatoria. No es suficiente con garantizar que Alice no influya en Bob o viceversa. Podría darse que el propio sistema bajo estudio, y más en concreto, sus potenciales variables ocultas, tuvieran algún efecto sobre las elecciones. O dicho de otra manera, es necesario asegurar que el mecanismo de elección aleatoria no se vea influido de alguna manera por la misma física que queremos poner a prueba. Dos interesantes experimentos atacaron este sutil resquicio. En uno de ellos se reclutaron 100.000 voluntarios distribuidos por todo el globo, a los que se pidió participar en un

videojuego que incentivaba la toma de decisiones aleatorias. Los resultados del videojuego se utilizaron a tiempo real para generar elecciones en 13 experimentos distintos de las desigualdades de Bell, que se realizaron a lo largo del 30 de Noviembre del 2016. El segundo se llevó a cabo en colaboración con el observatorio astrofísico de las Islas Canarias dos años más tarde. Sus telescopios detectaron luz proveniente de dos cuásares distantes, y utilizaron la distribución aleatoria del color de la luz recibida para fijar la orientación de los polarizadores. De esta forma, situaron el mecanismo de elección varios billones de años atrás.

Se completa así la prueba rigurosa de que el entrelazamiento cuántico es un fenómeno totalmente ajeno al mundo clásico. Esto no representa sin embargo el final de nuestra historia. Más bien al contrario, es el hito fundamental que abre la puerta a una nueva era tecnológica. Me refiero a la era de las tecnologías cuánticas, cuyo recurso principal es precisamente el entrelazamiento. Como es un recurso frágil, su control y manipulación requiere un dominio técnico sin precedentes, del que los test de Bell fueron pioneros. Esta tecnología promete tener un enorme impacto en nuestra sociedad a medio y largo plazo. La mecánica cuántica ha cambiado la forma de entender la Naturaleza. Ahora puede cambiar también nuestro día a día, y por ello hablamos de una segunda revolución cuántica.

Me gustaría terminar mencionando los principales campos de aplicación de las tecnologías cuánticas, y dar una breve impresión sobre su estado de desarrollo. Uno de estos campos es la

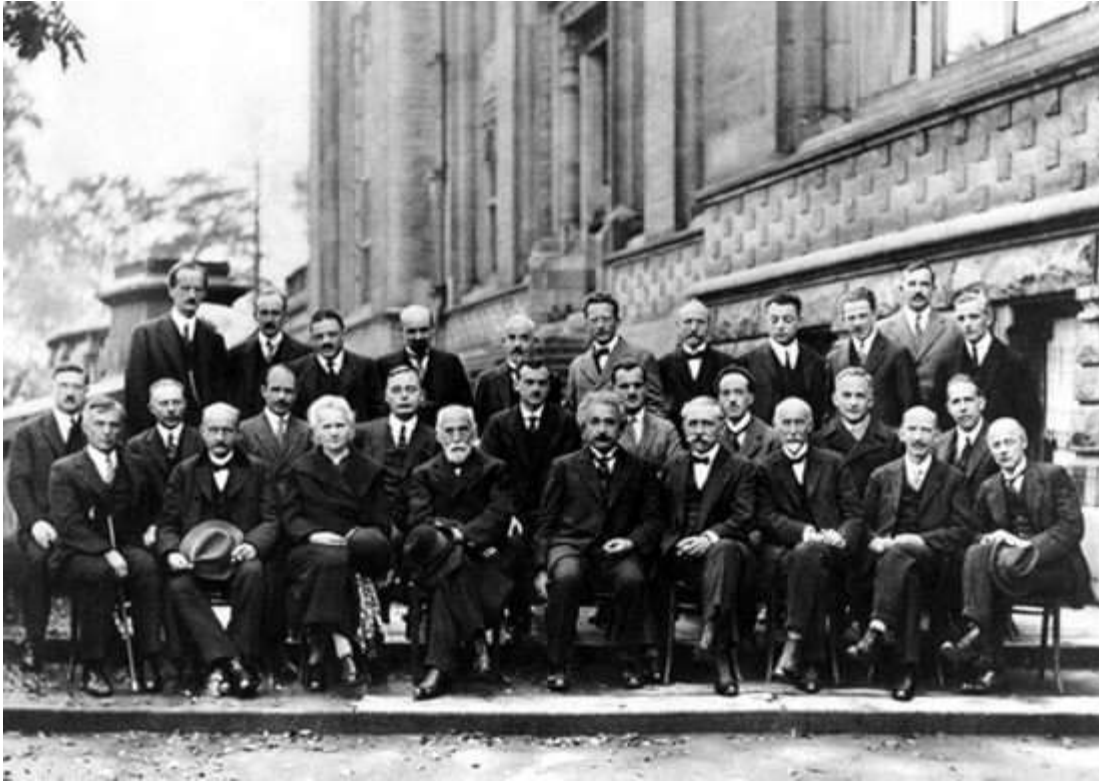
construcción de *aparatos de medida* extremadamente precisos. Según la teoría de la gravitación de Einstein, el tiempo transcurre a un ritmo ligeramente distinto dependiendo del lugar en el que nos encontremos. Utilizando un reloj cuántico, en Septiembre de 2021 se pudo medir este efecto en átomos separados por un solo milímetro de altura. Otro importantísimo terreno de aplicación son las *comunicaciones*, con la promesa de garantizar transmisiones totalmente seguras. Las comunicaciones cuánticas requieren mantener el entrelazamiento sobre grandes distancias. Actualmente el récord para fotones está en más de 1. 000 kilómetros. Y finalmente, la estrella de las tecnologías cuánticas es probablemente la *computación*. El objetivo es construir un ordenador con software basado en la lógica cuántica, capaz de resolver problemas totalmente fuera del alcance de cualquier ordenador clásico, presente o futuro. Se conoce como supremacía cuántica al reto más modesto de completar algún cálculo para el que un ordenador clásico necesitaría un tiempo incomparablemente mayor. Este reto, aunque más modesto igualmente impresionante, fue conseguido por Google en 2019 con un procesador cuántico de 53 cubits, análogos cuánticos de los bits clásicos, implementados en términos de circuitos superconductores.

El mundo se encuentra actualmente inmerso en una frenética carrera por el desarrollo de las tecnologías cuánticas. Nadie puede permitirse quedar al margen. Lograrlo es una cuestión de importancia no solo económica, sino estratégica. Porque el futuro es cuántico y ya está aquí.

[Esperanza López Manzanares.](#)

Doctora en Ciencias Físicas.

Investigadora Científica del CSIC, Instituto de Física Teórica—CSIC.

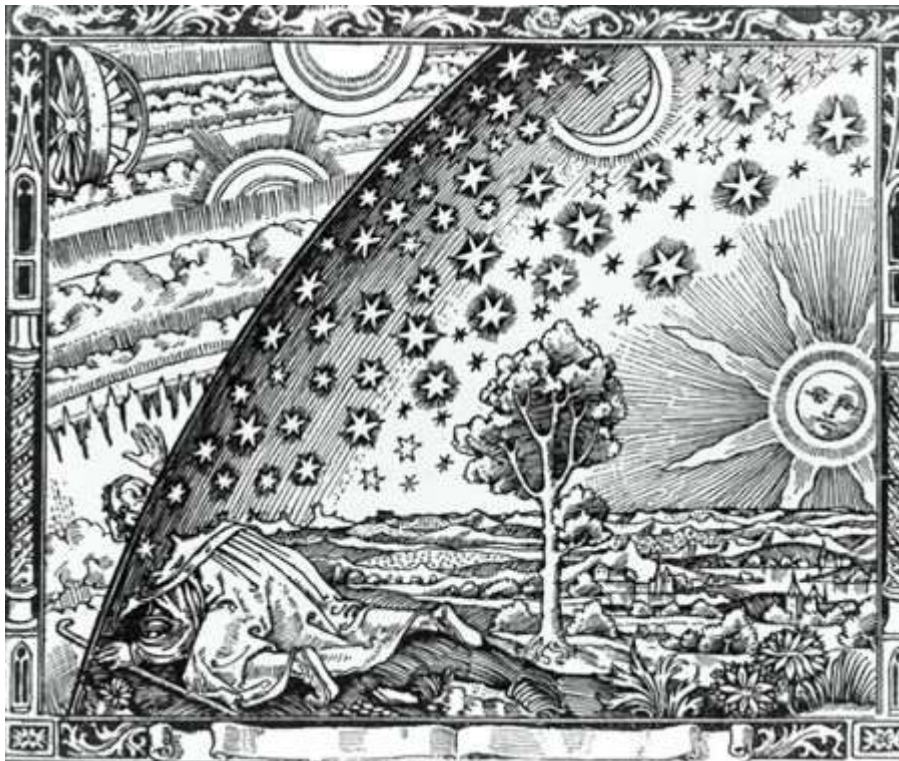


*Fotografía tomada en el 5° Congreso Solvay celebrado en 1927, "Electrones y Fotones". De la fila de atrás hacia el frente, de izquierda a derecha: Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrödinger, Jules—Émile Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph Howard Fowler, Léon Brillouin, Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr, Irving Langmuir, Max Planck, Marie Skłodowska Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles—Eugène Guye, Charles Thomson Rees Wilson, Owen Willans Richardson. [Proceedings 1927](#)*

## Capítulo 13

### Punto—Cero de Energía y el efecto Casimir.

¿A quién no le ha motivado alguna vez conocer los entresijos de nuestro universo? ¿Quién no sentiría curiosidad por saber cómo se forman los bloques que lo constituyen, qué los gobierna o cómo se comporta esta magnífica estructura desde lo más diminuto hasta lo más vasto de ella? Habitar un planeta de tamaño insignificante dentro de esta gran fábrica de la creación nos une inexorablemente a ella.



*Figura 1 El grabado Flammarion de autor desconocido. Hombre asomándose más allá de los límites del universo conocido.*

Al fin y al cabo, como dijo Carl Sagan, somos polvo de estrellas; no cabe duda que buscando en lo profundo de cada uno captamos el vínculo con ellas. Perder la conexión con la continua creación y cambio del Universo sería un suicidio. Sería como quedarse huérfano a gran escala.

El camino para conseguir tan honrosa tarea como es el entendimiento, la percepción, la unión con lo que nos rodea, tiene muchas vías y una de ellas es la ciencia. La Biología, la Química, las Matemáticas, todas ellas exploran una verdad dentro de sus campos que pretende ser inexorable. El campo que nos incumbe en este artículo es la Física y esta (entre otras cosas) busca conocer la verdad de la materia, del espacio y del tiempo, de cómo se creó el Universo, de cómo ha evolucionado hasta nuestros días y de cuál será su suerte. Algunos lo han llamado conocer la verdad absoluta, aunque, en mi modesta opinión, el horizonte de esa verdad es más vasto que el Universo mismo e implica más conocimiento del que nuestros sentidos más desarrollados están actualmente preparados para digerir. No olvidemos que cualquier revolución científica va unida a una revolución y evolución de pensamiento y, me atrevo a decir, de sentimiento y percepción de "Todo lo que ES"<sup>31</sup>.

Lo que sí deja pocas dudas es que se busca dar respuesta a una única realidad que es la que observamos y experimentamos. Uno

---

<sup>31</sup>Nota de los coordinadores: La imagen de Flammarion está repetida en este libro en dos capítulos de temática distinta y con las autoras a miles de kilómetros de distancia y sin contacto entre ellas. Las mantenemos, en los dos capítulos, como buena prueba de la universalidad de la Ciencia.



esperaría que la Física ofreciera una única explicación del Universo que abarcara desde "lo más diminuto hasta lo más vasto" de él, dando así respuesta a la pregunta con la que comenzábamos este artículo y saciando una inquietud que probablemente hayan tenido los humanos desde el origen de su existencia.



*Figura 2. Cascada. Litografía creada por M. C. Escher en 1961.  
Paradoja ¿Posible o imposible? O.... ¿tendremos que aprender a  
mirar?*

Sin embargo, explicar los cimientos de la realidad no es tarea fácil y, aunque el esfuerzo se centra en avanzar dando pasos firmes y

certeros, en la actualidad existen en la Física dos teorías fundamentales que explican una única realidad pero que, sin embargo, no encuentran su punto de convergencia. Estas dos teorías se posicionan a los dos extremos de la mecánica clásica. A pequeñas escalas tenemos la teoría cuántica y a grandes escalas se encuentra el límite cosmológico. Padres de dichas teorías son Niels Bohr representando la teoría cuántica y Albert Einstein fundador de la teoría de la relatividad.

La teoría cuántica estudia la materia y la radiación, es una física de partículas y de sus interacciones fundamentales. Deja de describir una realidad determinista como lo hace la mecánica clásica de Newton y sin embargo subyace a dicha realidad cuando se extrapola al ámbito clásico. La teoría de la relatividad describe la gravedad y el movimiento, el espacio y el tiempo como algo dinámico y cambiante, no como un espacio rígido en el que ocurren las cosas cotidianas que experimentamos como reales. Ambas teorías supusieron una revolución en la física y un cambio en el pensamiento de la sociedad del momento (como otros descubrimientos/teorías rompedoras de la época en la que se formularon). El puzle ahora está en encontrar el nexo de unión entre ambas teorías, lo que se llama teoría de unificación. Por supuesto si nos encontramos en esta búsqueda es porque hay algo fundamental que no estamos teniendo en cuenta, o estamos haciendo mal o ignorando.

De momento no existe una teoría de unificación satisfactoria por ello, los amantes de la física se encuentran divididos en dos grandes grupos que corresponden a dichas teorías fundamentales. Cualquier

avance en cualquiera de ellas supondrá un paso más hacia la Teoría de la Unificación y hacia la siguiente revolución científica y de pensamiento.

Vamos, en este artículo, a inclinar la balanza hacia la teoría cuántica y descubrir una de las maravillas de nuestro mundo. Trataremos de poner en evidencia la existencia de una danza invisible que inunda nuestro espacio, aparentemente vacío, y que tiene consecuencias apreciables. Se llama Vacío Cuántico y da lugar, entre otras cosas, al Efecto Casimir. Para "encontrar" el vacío cuántico no hay que salir a buscarlo, no hay ni siquiera que moverse de donde estamos, puesto que nos rodea. Nuestros sentidos no están preparados para percibirlo porque nosotros nos manejamos en un mundo clásico donde los efectos cuánticos quedan promediados y se equilibran de tal modo que nos pasan inadvertidos. Imagínate que vives y has vivido toda tu vida en el fondo del mar. Tu realidad ha estado siempre rodeada de agua. Ahora, en la profundidad del océano, intenta separar del resto solo una gota de agua. Es posible que, habiendo vivido siempre completamente sumergido en un mar de agua, ni siquiera te hicieras una idea de lo que quiere decir "una gota de agua". Nuestra existencia está inmersa en un mar cuántico donde las gotas de agua son fluctuaciones cuánticas que dan lugar a la danza de la que te hablaba. El hecho de que la humanidad haya sido capaz de llegar a este nivel de entendimiento acerca de cómo opera la fábrica de la creación, es en sí un logro extraordinario.

La danza del vacío.

Pero, ¿qué es eso de las fluctuaciones cuánticas?

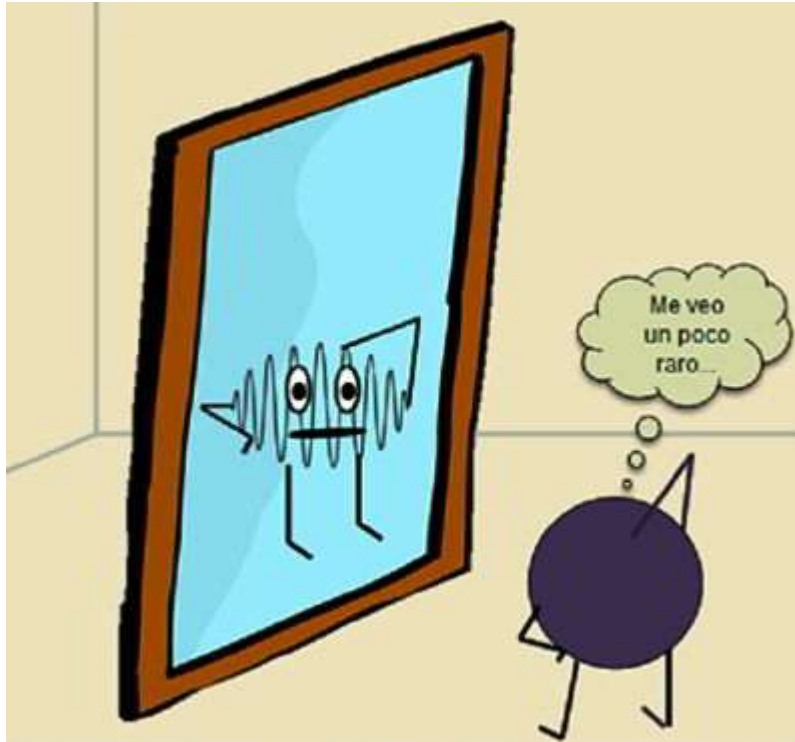
Clásicamente, uno define el vacío como un estado en el que no hay nada. Podemos imaginar una caja "vacía" que no contiene ningún tipo de partículas dentro, tampoco ningún movimiento y por lo tanto es de esperar que no haya energía en su interior. Sin embargo, contrario a lo que nos dicta la intuición, resulta ser que la mecánica cuántica predice la existencia de un vacío que está *virtualmente* lleno. Incluso después de utilizar cualquier técnica imaginable para que no quede en la caja ni el más pequeño corpúsculo, y disminuir la temperatura lo más cercana al cero absoluto que nos fuera posible, aun así, no podemos decir que la caja no tiene nada. Contiene una gran cantidad de energía y un mar de *partículas virtuales* que aparecen y desaparecen continuamente. No es un almacenaje de energía que está disponible a nuestro antojo, como el petróleo hasta que lo acabemos, sino que más bien es un sustrato de energía que solo bajo ciertas condiciones se puede utilizar; por supuesto, a cambio de pagar un precio. El trato con el diablo es que esa energía hay que devolverla en una fracción de tiempo diminuta.

Vayamos por partes. El estado de vacío que es el llamado Punto—Cero se refiere al estado cuántico en el que el sistema se encuentra en su estado de mínima energía. Clásicamente, cuando determinamos la energía de un sistema, lo que medimos en realidad es la energía de un sistema físico comparada con la energía que dicho sistema tenía en una situación distinta, en otro instante de tiempo. En el contexto de la mecánica newtoniana o clásica, la

mínima energía es una referencia que tomamos en cada caso particular y que podemos fijar igual a cero. Lo que medimos a partir de ahí son diferencias de energía entre el mínimo estado (que como hemos dicho puede estar fijado en cero) y otro que es el que nos interesa. Eso ocurre por ejemplo en el campo gravitatorio: si tenemos una partícula sobre la superficie terrestre, podemos determinar que su energía potencial en esa posición es igual a cero de tal manera que cualquier otra posición que ocupe dicha partícula por encima de la superficie terrestre hará que esta adquiera una energía potencial distinta de cero. Ahora bien, si la partícula sigue en el suelo (sobre la superficie de referencia que hemos fijado carente de energía potencial) y no está sometida a un agente externo, su energía no cambiará de forma espontánea a un valor distinto de cero.

Por supuesto esto se intenta extrapolar al mundo cuántico y entonces, por analogía, decimos que el sistema se encuentra en su estado fundamental cuando tiene la mínima energía. Lo que ocurre es que este "mínimo", el cual corresponde a la ausencia de partículas reales, corresponde a una energía infinita. El mundo clásico en el que nos movemos está diseñado de tal modo que podemos ignorar este infinito cuántico subyacente y medir solo variaciones de energía por encima de él. A pesar de eso, la actividad del vacío cuántico tiene consecuencias que se han observado a nivel macroscópico. Pero, ¿cómo explicarlo cuando los resultados parecen estar fuera de toda predicción experimental? Lo que ocurre es que, si queremos interpretar lo que pasa a nivel cuántico, la intuición

clásica queda relegada a un segundo plano y antes de hacer especulaciones newtonianas de cómo funciona el mundo cuántico, es necesario saber *bajo qué reglas viven sus habitantes*.



*Figura 3 Dualidad.*

La realidad cuántica se abrió a nuestros ojos tras un cúmulo de hechos experimentales que acontecieron allá alrededor de los umbrales del siglo XX. Todos ellos implicaban un comportamiento inusual de la radiación y/o de las partículas subatómicas que llevaron al concepto de la dualidad onda—corpúsculo. Entre estos experimentos está el efecto fotoeléctrico, la aparición de líneas espectrales del átomo de hidrógeno o, anterior a estos, la teoría de la radiación del cuerpo negro [1, 2] experimento que, según señala

Peter Miloni [3], fue uno de los acontecimientos más importantes y menos reconocidos en la evolución de nuestro entendimiento hacia dicha dualidad y por supuesto hacia el concepto del punto—cero de energía<sup>32</sup> [4].

Estos (y otros) experimentos evidenciaron algo revolucionario "lo que parecía estar pasando es que una partícula a nivel atómico podía tener propiedades de una onda". Esto no tenía sentido puesto que nuestra experiencia ordinaria nos ha hecho diferenciar claramente entre lo que es una partícula con propiedades asociadas a un objeto material y lo que es una onda que se propaga y se entiende como una vibración, algo distinto de la materia. Es decir, esos experimentos nos conducían a pensar que en unas ocasiones la partícula se comportaba como materia, pero en otras parecía ser una onda. Así apareció la dualidad onda—corpúsculo y, con ella, el primer temblor del edificio clásico—newtoniano, que entró en confusión ante la incertidumbre acerca de si un objeto era partícula o era onda.

De este modo, los experimentos de la época llevaron a la conclusión de que la luz, tratada anteriormente como una onda, tenía propiedades asociadas a pequeñas partículas o corpúsculos que más adelante se denominaron fotones. Además, se vio que la energía asociada a cada uno de los fotones era una cantidad fija, definida de acuerdo a la frecuencia, de tal manera que no se

---

<sup>32</sup>El mismo Einstein dedicó varios años al estudio de la radiación del cuerpo negro y del postulado de la energía del punto—cero introducido por Planck [5].

observaban fotones con energía igual a una fracción de dicha cantidad. Esa cantidad, que es la unidad de energía se llama "*un cuanto*". Se observa que la luz se absorbe y se emite solamente en múltiplos del cuanto de luz y no de forma continua como se pensaba.

Del mismo modo, bajo las condiciones adecuadas, se observa que una partícula tiene propiedades de onda. Eso es lo que le ocurre al electrón, por ejemplo. El experimento de la doble rendija<sup>33</sup> deja evidencia de este hecho y se convierte en uno de los experimentos más relevantes y debatidos de la mecánica cuántica.

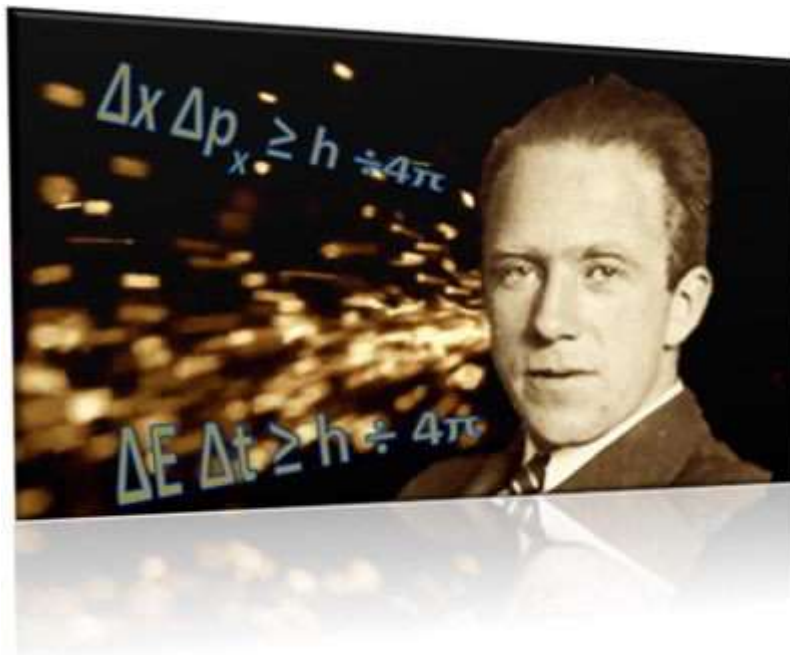
La dualidad onda—corpúsculo obligó a dar un giro a la visión clásica de la realidad cuando uno quiere estudiar la estructura básica de la materia. Es más, existe una consecuencia de este hecho que abre un mundo de nuevas posibilidades: Cuando observamos un fenómeno en el mundo macroscópico, podemos definir sus propiedades mediante parámetros dados por magnitudes físicas como energía, posición o momento. Sin embargo, en la observación de fenómenos o de acontecimientos a escala cuántica, la determinación de magnitudes físicas tiene un límite por debajo del cual estas magnitudes dejan de tener el significado absoluto que conocemos en la mecánica clásica y adquieren un carácter probabilístico informándonos sólo de la probabilidad de que un

---

<sup>33</sup>El mismo experimento que en 1801 le sirvió a Thomas Young para rebatir la teoría de Newton, (que postulaba la naturaleza corpuscular de la luz) y demostrar que la luz era una onda, sería, en el siglo XX, la que pondría de manifiesto la dualidad onda—corpúsculo [6].



cierto suceso ocurra. Así, ciertas variables como la velocidad y la posición de una partícula cuántica no se pueden determinar con una precisión arbitraria como ocurre en la mecánica clásica debido a que existe una indeterminación en la precisión con que estas dos magnitudes se pueden conocer simultáneamente. Se le llamó el principio de indeterminación de Heisenberg en honor al físico que la propuso.



*Figura 4. Werner Heisenberg nos ofrece mirar la realidad desde una nueva perspectiva.*

El principio de indeterminación, también llamado de incertidumbre, aparece cuando se intenta definir el sistema en pares de variables físicas que llamamos variables conjugadas como son la posición y el momento de la partícula o la energía y el tiempo. No es posible

determinar la posición de una partícula y a la vez su momento (producto de la masa por la velocidad) con una precisión mayor que la establecida por el principio de indeterminación de Heisenberg. Si conocemos la posición de una partícula cuántica con una gran exactitud, inevitablemente disminuimos la precisión con la que se puede determinar su momento. Lo mismo ocurre entre el tiempo y la energía.

El principio de incertidumbre de Heisenberg, que aparentemente pone de manifiesto una limitación al conocimiento de nuestro universo tal y como estamos acostumbrados es, sin embargo, la antesala de una nueva realidad. Es importante entender que la indeterminación en la medida de estas variables no es debida a que las técnicas de medición no son lo suficientemente precisas, sino que es una cualidad intrínseca de la propia naturaleza cuántica.

Por asombroso que parezca, el principio de indeterminación permite, entre otras cosas, algo imposible en la mecánica clásica como es la no—conservación de la energía. El principio de conservación de la energía se puede violar en el mundo cuántico siempre que esta energía robada se devuelva en una fracción de tiempo tan pequeña que no sobrepase la indeterminación de la medida que calculó Heisenberg. Esto, por lo tanto, provoca que en el vacío estén permitidas fluctuaciones de energía que pueden provocar la creación de partículas, que llamamos virtuales, y que se aniquilan entre sí en una fracción minúscula de tiempo. La aparición y desaparición, creación y destrucción de partículas en el vacío es una danza del mar cuántico que ante ciertas condiciones

da lugar a efectos macroscópicos observables.

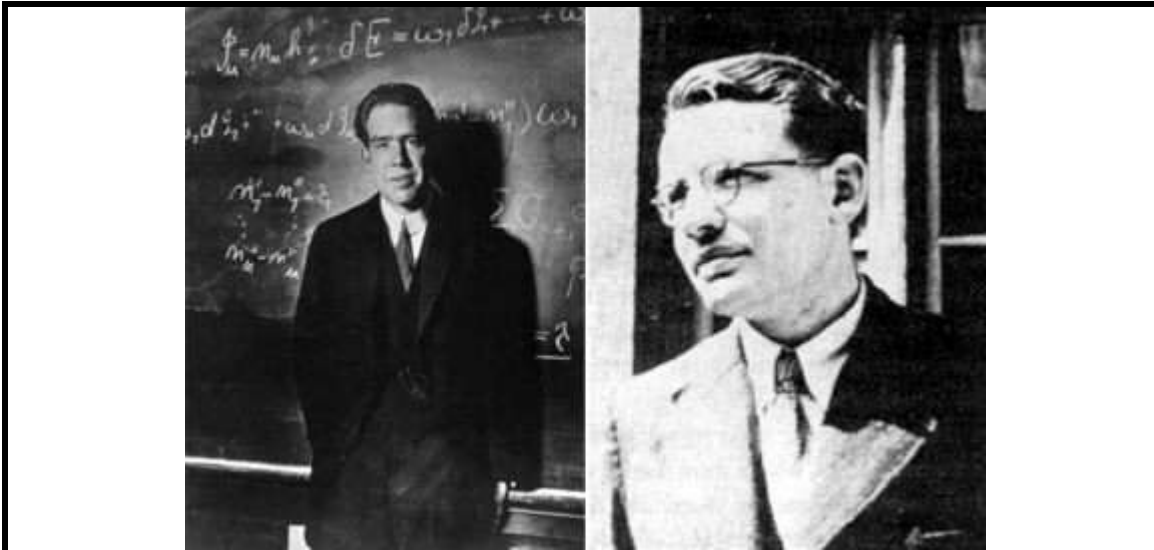
El espacio vacío corresponde al estado de mínima energía que en realidad está repleto de ondas del campo electromagnético y en principio de cualquier otro campo existente. No existen, en el concepto de vacío, partículas reales, pero está repleto de partículas virtuales.

El efecto Casimir.

Hendrik Brugt Gerhard Casimir (1909—2000) estudiando su doctorado en Leiden, visitaba con cierta frecuencia a Niels Bohr en Copenhague. En aquella época comenzó su interés por entender qué ocurría en sistemas coloidales donde teoría y experimentos no concordaban. Cuenta Casimir que Bohr le inspiró para abordar el problema desde el punto de vista del vacío cuántico<sup>34</sup>.

---

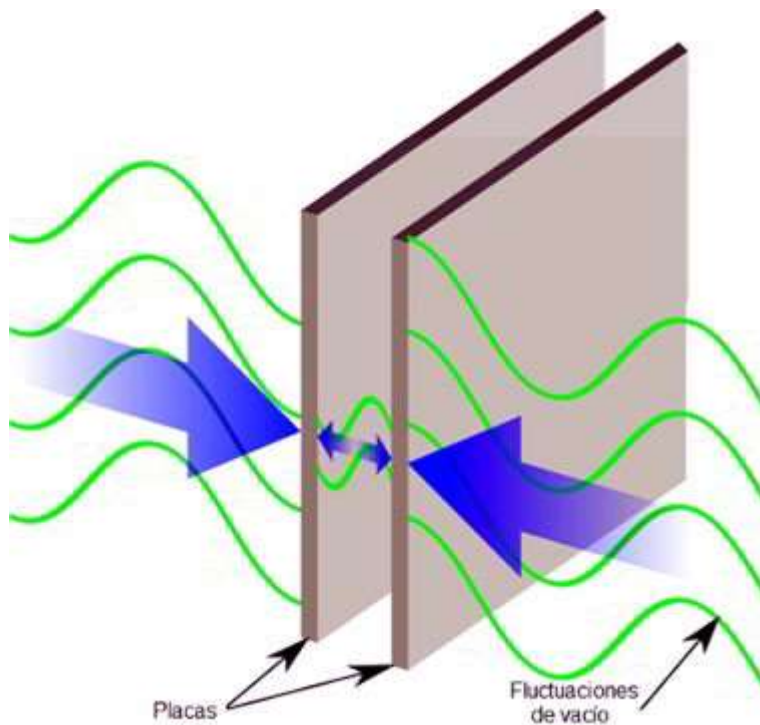
<sup>34</sup>Bohr y Casimir eran además amigos. George Gamow, también contemporáneo y amigo de ambos, cuenta alguna anécdota que ocurrió entre ellos en [7].



*Figura 5 Niels Bohr y Hendrik B. G. Casimir. Fuente: Fotos de Wikimedia Commons.*

*Esto es lo que pasó. Durante una visita a Copenhague, debió de ser en 1946 o 1947, Bohr me preguntó qué estaba haciendo y yo le expliqué acerca de nuestro trabajo con las fuerzas de van der Waals. "Eso es bonito" dijo, "es algo nuevo". Entonces le expliqué que me gustaría encontrar una derivación sencilla y elegante de mis resultados. Bohr, meditó un momento y después murmuró algo como "eso debe de tener algo que ver con el punto—cero de energía". Eso fue todo, pero en retrospectiva tengo que admitir que le debo mucho a ese comentario.*

Casimir desde luego aprovechó la idea que le dio su amigo Bohr y fue capaz de reproducir el problema que estaba investigando desde el punto de vista de las fluctuaciones cuánticas de vacío.

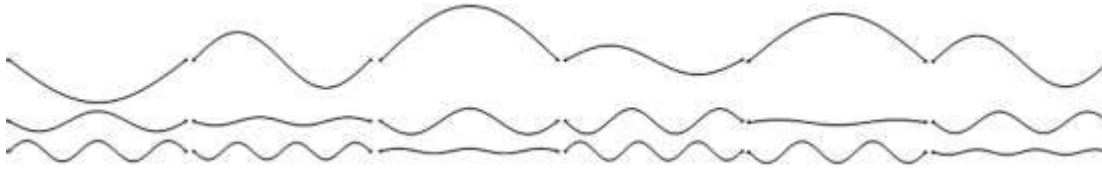


*Figura 6. Placas paralelas con modos de vibración. Entre las placas, no todas las longitudes de onda están permitidas, lo que provoca que la presión fuera y dentro de las placas sea distinta ocasionando la fuerza de Casimir. Fuente: Wikimedia Commons*

Después tuvo una idea revolucionaria: dos placas paralelas, sin ningún tipo de carga ni potencial aplicado sobre ellas, podrían verse afectadas por una fuerza proveniente de las fluctuaciones de vacío. Visto a groso modo se podría decir que lo que Casimir estaba imaginando era la locura de que dos placas neutras, sin carga, colocadas paralelamente en un lugar donde no hay nada, experimentan sin embargo una fuerza entre ellas. Casimir resultó estar en lo cierto.

De manera heurística, lo que ocurre es lo siguiente: Imaginemos un espacio abierto, sin límites. El mar de partículas virtuales y los campos electromagnéticos y/o de otra naturaleza, pueden oscilar a su antojo en ese espacio dando lugar a un infinito de energía. Coloquemos ahora, en ese espacio, dos placas paralelas perfectamente conductoras y neutras. Fuera de las placas, las ondas del campo electromagnético siguen siendo libres de existir en cualquier modo de vibración, sin embargo, el espacio confinado entre las placas limita los modos en que las ondas electromagnéticas pueden existir restringiendo la aparición de algunos de dichos modos que sin embargo sí veríamos si las placas no estuvieran. La energía total en esta nueva configuración sigue siendo infinita, pero debido a que la presencia de las placas impone condiciones en los modos de vibración permitidos no dejando que existan algunos de ellos, hace que la energía fuera de las placas sea distinta a la de dentro y por lo tanto haya una fuerza neta sobre ellas que en este caso hace que se atraigan.

Las placas están sometidas a mayor presión por la parte de fuera que la de dentro, haciendo así que se atraigan. Para observar este efecto es necesario movernos a un nivel de escala muy pequeño, puede abarcar desde unos nanómetros a algunas centenas de micrómetros. Esto hace que este efecto sea relevante en nanotecnología donde los sistemas electro—mecánicos que se utilizan están dentro de esta escala de tamaño.



*Figura 7. Imaginemos una cuerda con sus extremos libres. Esta cuerda puede vibrar de cualquier manera sin restricción alguna.*

*Supongamos ahora que sujetamos ambos extremos de la cuerda. Los únicos modos de vibración que tiene ahora la cuerda son los que están permitidos bajo la restricción de que ambos extremos permanezcan fijos, como ocurre en la simulación realizada por*

*Adjwilley - Own work, CC BY-SA 3. 0,*

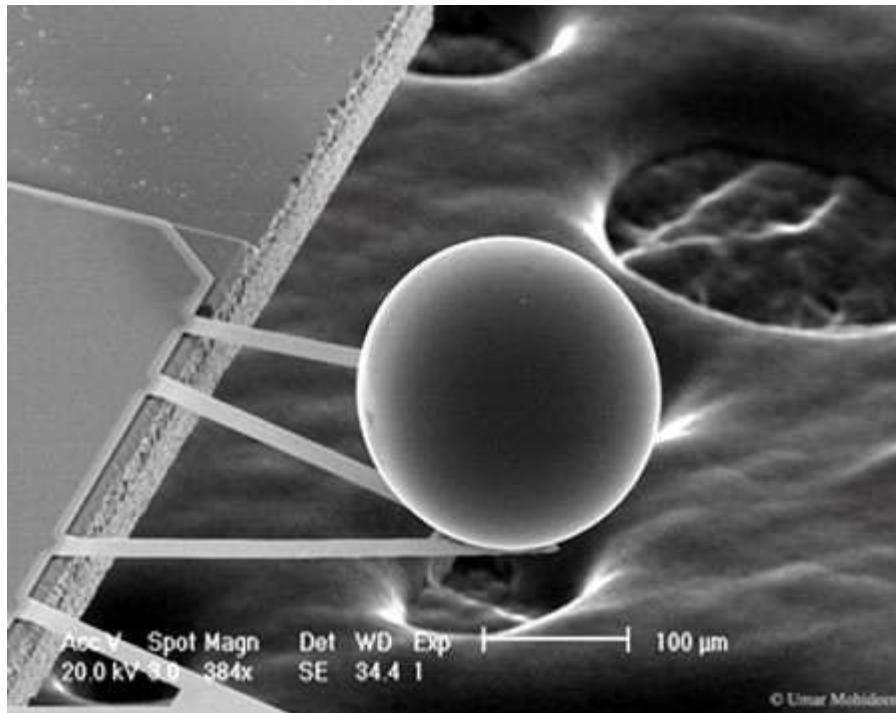
*<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26249625> Las placas conductoras limitan los modos de vibración de una manera equivalente a tener los extremos de la cuerda fijos. Por este motivo las vibraciones fuera y dentro del recinto que delimitan las placas paralelas son distintas.*

A pesar de que el efecto Casimir, así contado, parece entenderse, el resultado que producen las fluctuaciones de los campos sobre sistemas microscópicos no es predecible. Es decir, así como la energía entre dos placas da lugar a una fuerza de atracción, los materiales y la geometría "que confinan parte del espacio" juegan un papel muy importante en determinar si la fuerza resultante es de atracción, de repulsión o nula. Por ejemplo, después del cálculo de Casimir en 1948 en el que determinó que la fuerza de vacío entre dos placas era atractiva se pensó que la energía de vacío o efecto Casimir en el caso de una esfera conductora daría lugar a una

fuerza también atractiva, arreglando así algunos problemas de la época referentes a la estabilidad del electrón. Sin embargo, contrario a todas las predicciones, el cálculo detallado de la energía de vacío que realizó Boyer en 1968 dio lugar a una fuerza de repulsión. En 1981 DeRaad y Milton calcularon la energía del vacío para un cilindro conductor la cual, aunque de valor relativo más pequeño, volvió a resultar en una fuerza de atracción. El efecto que tiene la geometría sobre el resultado neto de la energía de vacío (y como consecuencia sobre la fuerza), aún no se entiende. Es decir, dada una geometría arbitraria, no se puede predecir si el efecto Casimir va a dar lugar a una fuerza de atracción, de repulsión o nula.

Como ya hemos dicho, las consecuencias conocidas que tiene la existencia del punto—cero de energía son muchas. También hemos señalado que una de las más sorprendentes es el efecto Casimir el cuál, a su vez, tiene consecuencias que son también diversas: Así como hemos hablado de atracción y repulsión, ocurre que, si la fuerza de vacío que experimentan dos objetos es una fuerza lateral, el efecto puede dar lugar a un torque que haga que los elementos que interaccionan roten entre sí. Esto se consigue modificando la geometría de los cuerpos interactuantes de manera que no sean totalmente simétricos en la dirección perpendicular a la que se quiere producir el torque. Igualmente, las propiedades ópticas de los materiales y del medio en el que están inmersos puede producir cambios en el signo de la fuerza que experimentan entre ellos.





*Figura 8. En los experimentos en los que se mide la interacción entre una esfera y una placa, se evita el problema del paralelismo. Como hemos comentado, dadas las dimensiones, la dificultad de los experimentos sigue siendo muy grande. En el experimento que se muestra en esta figura, realizado en Riverside, se utiliza un microscopio de fuerza atómica. Créditos de imagen & Copyright: [Umar Mohideen](#) (U. California at Riverside)*

En esta línea ciertas combinaciones de las constantes eléctricas y magnéticas dan lugar a efectos diferentes como que se produzca levitación debido únicamente a las fuerzas de vacío que se generan. Sin embargo, es muy complicado montar un experimento para observar y medir con exactitud el efecto Casimir. La principal dificultad es el rango de dimensiones tan pequeñas a las que la

fuerza de vacío es medible. Los primeros intentos de medir y observar experimentalmente el efecto Casimir ocurrieron diez años después de su formulación. Así en 1958, en un experimento dirigido por Sparnaay, se creyó observar que efectivamente los resultados no contradecían la existencia de una fuerza de Casimir, sin embargo, las dificultades experimentales eran tan grandes que no se pudo concluir con certeza su existencia para así hacer una comparación fiable con el resultado teórico de Casimir. Entre otras, una de las mayores dificultades experimentales era mantener las placas en posición paralela. En el rango de distancias que hemos comentado, cualquier desviación en la distancia entre las placas puede inducir errores en la medida que enmascaren el efecto que se quiere ver. Los intentos exitosos de obtener una medida sin que hubiera ninguna duda de lo que se estaba midiendo, no llegaron hasta el año 1997 cuando, bajo otro tipo de experimento en el que se solucionaba el problema del paralelismo, el grupo de Lamoroux obtuvo resultados concluyentes hasta tal punto que la desviación entre teoría y experimentos fue solo de entre un 1% y un 5%.

En general, las dificultades para realizar experimentos que puedan medir la fuerza debida a las fluctuaciones cuánticas del vacío son muchas y diversas. Además del ya citado problema del paralelismo, cualquier impureza en las placas, rugosidades del orden de las distancias consideradas o, incluso dependiendo precisamente de las distancias que entren en juego, las variaciones térmicas, pueden tener relevancia e introducir errores de medición.

En la actualidad, donde el "nano—mundo" está adquiriendo tanta

relevancia, la influencia que tiene las fuerzas derivadas de las fluctuaciones de vacío puede ser relevante. Estas fuerzas, que con frecuencia son atractivas, pueden provocar el colapso entre los elementos que constituyen el nano—dispositivo e interrumpir así su correcto funcionamiento.

Una variante del efecto Casimir es lo que se llama el efecto Casimir dinámico. En su modelo más sencillo y originalmente propuesto por Stephen Fulling y Paul Davies en 1997 consiste en dos placas paralelas pero sometidas a un cierto movimiento o vibración. La predicción de este efecto es la producción de partículas (fotones) reales.

### El efecto Casimir y la constante cosmológica.

Mucho se ha hablado de la constante cosmológica y de las distintas interpretaciones que ha tenido a lo largo de la historia. Siempre intentando cuadrar la teoría con la observación, la constante cosmológica es uno de los parámetros víctima de los prejuicios humanos. Se ha repetido una y mil veces que el propio Einstein lo consideró su mayor equivocación.



*Figura 9. Einstein con los astrónomos Edward Hubble (en el medio) y Walter Adams (a la derecha) observando la expansión del universo con el telescopio Hubble en el observatorio del Monte Wilson en California, 1931. Fuente:*

[https://i0.wp.com/www.thephysicsmill.com/blog/wp-content/uploads/discovering\\_image\\_05.jpg](https://i0.wp.com/www.thephysicsmill.com/blog/wp-content/uploads/discovering_image_05.jpg)

Sin ser tan dramáticos, podemos pensar que el análisis de la constante cosmológica ha sufrido del exceso de prudencia del investigador a la hora de hacer ciencia. Así, su interpretación ha sido de lo más diverso utilizándola para explicar tanto un comportamiento de la evolución del universo como su contrario.

Einstein, introdujo esta constante porque su creencia era el de un universo estático. El hecho de que sus ecuaciones no predijeran esto, le hizo introducir una constante que equilibrara la acción de la

gravedad y estabilizara así el universo *supuestamente* estático. Más adelante, el telescopio Hubble nos permitió observar cómo las galaxias se estaban alejando de nosotros, evidenciando así un universo en expansión<sup>35</sup>. Einstein entonces decidió descartar la constante que había introducido para estabilizar un universo que resultó no ser estable. Una vez confirmada, no sólo la expansión del universo sino también su aceleración, vuelve a tener sentido incluir la incomprendida constante cosmológica, esta vez como un término que explicara la aceleración de la expansión del universo.

Sin embargo, mucho me temo que la historia acerca de la interpretación *del origen* de la existencia de dicha constante promete ser larga. El origen de la aceleración del universo es a día de hoy desconocido y por lo tanto se puede dar rienda suelta a una especulación controlada. Se ha llamado, por este motivo, energía oscura a la energía propulsora de la aceleración del espacio—tiempo y que origina la constante cosmológica.

Una de las vías que se investigan para establecer el origen de la constante cosmológica es la energía de punto—cero de vacío. Nuestro universo es casi estático. La aceleración observada es pequeña y hace que la constante cosmológica sea también pequeña. Sin embargo, el cálculo de la densidad de energía de vacío resulta ser 120 órdenes de magnitud mayor que el valor proveniente de los datos observados. Esto es uno de los grandes problemas de la física

---

<sup>35</sup>Archivos históricos revelan que el primero en entender y probar que el universo estaba en expansión fue Georges Lemaître [8].

y una de las mayores discrepancias entre teoría y observación que ha existido en la historia de la física.

Parece plausible que la constante cosmológica tenga algo que ver con la energía del punto—cero, sin embargo, hasta ahora los esfuerzos que se han hecho en esta dirección no han dado resultados que lleven a una interpretación esperanzadora. Un modo de atacar el problema es calcular la energía de Casimir sustituyendo las placas por la curvatura del espacio—tiempo y comparando la energía resultante a la que resulta de suponer el universo plano. El carácter dinámico de la energía de vacío en espacios curvos puede ser una investigación prometedora. También se ha intentado buscar (en espacios planos y curvos) una cota máxima a partir de la cual no se tengan en cuenta las fluctuaciones del vacío cuántico. En cualquiera de los casos, un paso esencial e inevitable es lo que en física cuántica de campos se llama renormalización. Básicamente consiste en aplicar técnicas que nos permitan deshacernos de valores que son infinitos y que no aportan una medida física observable. Hasta qué punto este tipo de manipulaciones introducen interpretaciones erróneas a escala cosmológica no está del todo claro.

El hecho de que dos teorías, como la Teoría Cuántica de Campos y la de la Relatividad, que han sido tan exitosas den resultados tan dispares obliga a pensar que algo fundamental se nos está escapando. Mientras que desarrollamos y evolucionamos nuestro entendimiento acerca de la realidad del universo, no dejemos de disfrutar de lo que ya conocemos.

## Referencias:

[1] M. Alonso Y Edward F. Finn, 1986, *Física. Volumen III: Fundamentos cuánticos y estadísticos*, Wilmington, Addison—Wesley Iberoamericana, S. A.

[2] Stephen Gasiorowicz, 1974, *Quantum Physics*, John Wiley & Sons, Inc.

David Bohm, 1989, *Quantum Theory*, New York, Dover Publications Inc.

[3] Peter W. Miloni, 1994, *The Quantum Vacuum. An Introduction to Quantum Electrodynamics*, London, Academic Press

[4] Martin J. Klein, 1962 *Max Planck and the Beginnings of Quantum Theory*, Arch. Hist. Exact Sciences 1, 459

[5] Abraham Pais, 1982, *Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*, New York, Oxford University Press

[6] Mar Gulis (Colectivo del área de cultura científica del CSIC), 2015, *El experimento físico más hermoso de todos los tiempos: la doble rendija*, Ciencia para llevar: el blog del CSIC.

[7] George Gamow, 1961, *Biography of Physics*, New York, Harper & Brothers, Publishers. (Versión en español de Alianza Editorial)

[8] Emilio Elizalde, 2021, *The Hubble—Lemaître Law and the Expansion of the Universe*, The True Story of Modern Cosmology. Springer, Cham.

Emilio Elizalde, 2020, *Cosmología moderna desde sus orígenes*, Los libros de la catarata.

[Inés Cavero Peláez.](#)

Doctora en Ciencias Físicas.

Profesora, Centro universitario de la Defensa, Universidad de Zaragoza (CUD—UNIZAR).



## Capítulo 14

### Un azar masivo y temporal.

*'We have to remember that what we observe is not nature in itself but nature exposed to our method of questioning. '*

*'Debemos recordar que lo que observamos no es la naturaleza en sí misma, sino la naturaleza expuesta a nuestro método de cuestionamiento. '*

*Werner Heisenberg.*

¿Cuándo se considera una teoría demostrada? Pues, nunca realmente. Las teorías están basadas en experiencias anteriores e intentan describir observaciones experimentales. El éxito de una teoría se mide no solo por su habilidad para describir los hechos sino sobre todo por las predicciones que hace en medidas aún no realizadas. Estas predicciones pueden verse rechazadas por las medidas, lo que significa que la teoría no funciona bien. En el caso contrario, una vez una teoría ha pasado varias pruebas importantes, se puede considerar "aceptada" o "establecida", pero nunca se puede considerar demostrada de verdad.

Así sucede también con la mecánica cuántica, la teoría que describe las propiedades y el comportamiento de los sistemas físicos,

especialmente a nivel microscópico. Las predicciones de la mecánica cuántica se han verificado experimentalmente con un grado de precisión impresionante, convirtiéndola en una teoría ampliamente aceptada.

A continuación, hablaremos del mundo de las partículas subatómicas. Vamos a ver unos ejemplos de propiedades de partículas que surgen de su naturaleza cuántica. Hablaremos sobre todo de partículas que se producen en colisionadores de hadrones, como por ejemplo los protones, y de leptones, como por ejemplo los electrones.

Aquí cabe recordar cómo se producen dichas partículas, siendo Einstein el que propuso la equivalencia entre masa y energía con su famosa fórmula  $E=mc^2$ . En los colisionadores, partículas cargadas y relativamente ligeras y abundantes en nuestro entorno, como por ejemplo los electrones o los protones, se aceleran en un campo electromagnético. Estas partículas alcanzan velocidades relativistas y con ello energías cinéticas enormes. Volviendo a la fórmula de Einstein, su energía se convierte en masa en la colisión. Así se producen nuevas partículas, incluso algunas con una masa superior a la de los electrones y protones.

La sección eficaz de colisión de electrones y positrones.

Como primer ejemplo, veamos qué obtenemos en una colisión entre electrones y positrones. Ya se lo adelanto: el azar. Más concretamente, no se puede predecir con seguridad qué va a suceder en una colisión determinada. Lo que sí podemos conocer,

con una incertidumbre experimental por supuesto, es la probabilidad con la que se producirán unas partículas u otras. En la Figura 1 les muestro la sección eficaz de la colisión entre los electrones y sus antipartículas, los positrones, en función de la energía en el sistema centro de masa. La sección eficaz es una medida de la probabilidad de que se produzca un proceso específico en la interacción entre las dos partículas.

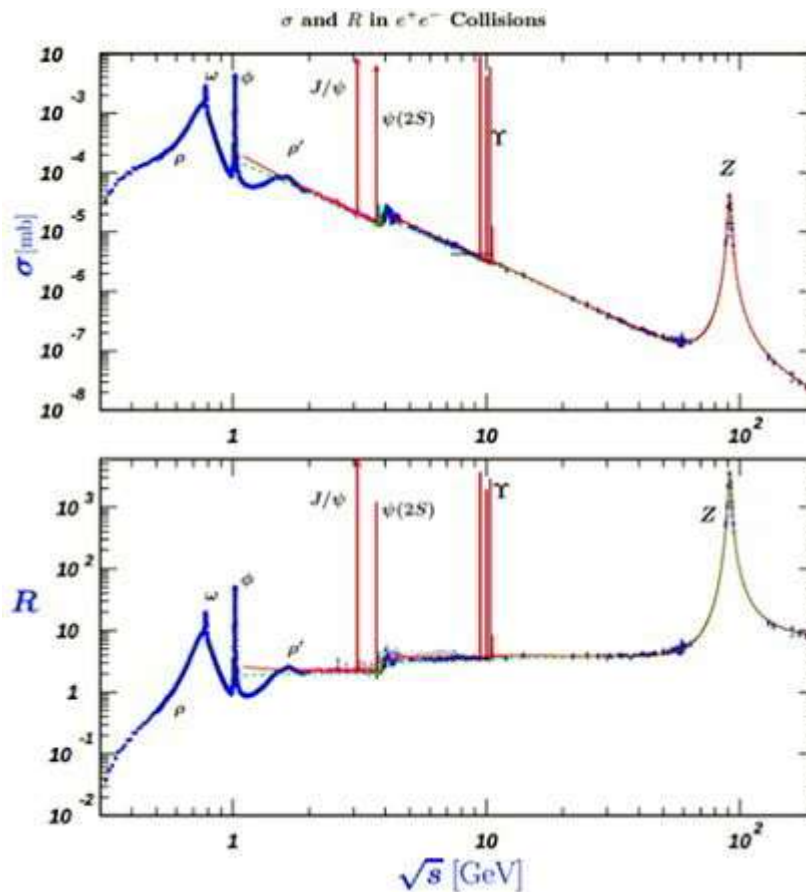


Figura 1. Histograma de colisiones entre electrones y positrones [1].

En este caso se trata de la probabilidad de producir hadrones, es decir, partículas compuestas por quarks, o el bosón Z. En una

colisión de electrones y positrones es posible producir cualquier par quark—antiquark siempre y cuando lo permita la energía de la colisión, o sea, siempre y cuando las masas de los quarks no superen dicha energía. Los quarks, por su parte, forman hadrones que se observan en el laboratorio. No se puede predecir qué se va a producir en una cierta colisión. Lo que se conoce muy bien, en el caso de electrones y positrones, es la probabilidad de crear cada tipo de par quark—antiquark. Si registramos muchas colisiones, podremos predecir en qué proporción se producirá cada tipo de partícula. Este conocimiento es muy importante por varias razones, de algunas de las cuales volveremos a hablar.

Este histograma tiene dos características principales. Primero, hay picos en ciertas energías a los que llamamos resonancias. Estas resonancias son hadrones compuestos por un quark y su correspondiente antiquark. Por ejemplo, la resonancia  $J/\psi$  contiene un quark y un antiquark encantado. Dado que la masa del  $J/\psi$  está justo por encima del doble de la masa del quark encantado, se trata de la resonancia más ligera que contiene quarks de este tipo.

La segunda característica del histograma son los "escalones" que encontramos justo después de las resonancias. En estas regiones se pueden crear dos hadrones, cada uno de los cuales contiene un quark adicional a los que se pueden producir por debajo de dicha energía y un quark más ligero. Por ejemplo, después de  $\psi(2S)$  se consiguen dos hadrones con un (anti—)quark encantado y un quark (anti—quark) arriba, abajo o extraño.

Este histograma recoge el saber de décadas de investigación desde

los años 70 y grandes cantidades de datos de varios proyectos experimentales de todo el mundo, incluyendo aceleradores como ADONE (Italia), BEPC (China), DORIS y PETRA (Alemania), CESR, PEP y SPEAR (Estados Unidos), TRISTAN (Japón) y VEPP (Rusia), por nombrar algunos. El comportamiento de las secciones eficaces en función de la energía es una prueba en favor de la teoría establecida de la física de partículas, el Modelo Estándar, y en particular de nuestro conocimiento sobre la interacción débil. Por ilustrar esto con un ejemplo, a continuación, nos centraremos en medidas asociadas al bosón Z, la última partícula que puede apreciarse en este histograma.

El número de neutrinos "ligeros".

El Modelo Estándar describe tres de las cuatro interacciones fundamentales conocidas entre las partículas elementales – la interacción fuerte, la interacción débil y la interacción electromagnética.

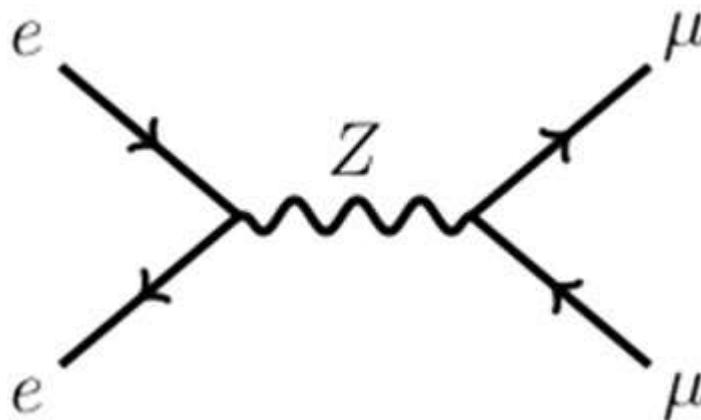
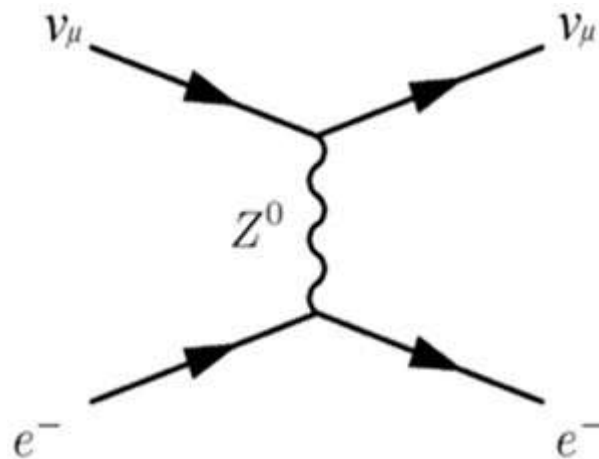


Figura 2. Bosón Z. *Quantum Diaries* [2].

El bosón Z es uno de los mediadores de la interacción débil, tal y como se muestra en el proceso ilustrado en el diagrama de Feynman de la Figura 2. En este caso, un electrón y un positrón se aniquilan para crear un bosón Z, el cual a su vez se desintegra produciendo un muon y un anti—muon. El bosón Z fue descubierto de manera indirecta en 1973 en la cámara de burbujas Gargamelle en el CERN, al observarse electrones que parecían moverse sin razón aparente. Esto se interpretó como una interacción de los electrones con neutrinos invisibles, en procesos como el mostrado en el diagrama de Feynman de la Figura 3.



*Figura 3. Diagrama de Feynman mostrando la interpretación en el descubrimiento del bosón Z [3].*

En estos dos casos, el bosón Z es una partícula virtual, lo que significa que existe durante un tiempo tan corto que no es posible observarlo y medir sus propiedades de forma directa. Pero como

hemos visto en la primera figura, se han observado bosones Z reales también en el laboratorio. Esto sucedió por primera vez en el año 1983, de nuevo en el CERN, por los experimentos UA1 y UA2 situados en el Super Proton Synchrotron. Por este descubrimiento y por el del bosón W, el cual se descubrió en el mismo lugar y también es un mediador de la interacción débil, los físicos Carlo Rubbia y Simon van der Meer recibieron el premio Nobel en el año 1984.

Las propiedades del bosón Z se midieron con una precisión impresionante en el Large Electron—Positron collider (LEP), un acelerador de electrones y positrones en el CERN. El túnel de LEP, de una circunferencia de 27 kilómetros, se sigue usando hoy en día por el acelerador de partículas más grande y de mayor energía que existe, el Large Hadron Collider (LHC). LEP era el colisionador de leptones más poderoso del mundo de su época y lo sigue siendo hasta el día de hoy. Operó entre los años 1989 y 2000 y consiguió alcanzar una energía de 209 GeV. Uno de los objetivos principales de los cuatro experimentos de LEP, llamados ALEPH, DELPHI, OPAL y L3, era la medida de las propiedades del bosón Z, como por ejemplo su masa y su anchura de desintegración.

La anchura de desintegración,  $\Gamma$ , es una propiedad relacionada con la vida media,  $\tau$ , de las partículas inestables como el bosón Z. Estas dos propiedades son inversamente proporcionales según el principio de incertidumbre energía—tiempo,

$$\Gamma = \hbar \times \lambda = \hbar / \tau.$$

La anchura se corresponde con la anchura a media altura del máximo de la curva de la sección eficaz de desintegración en función de la energía. Tener una anchura en la masa implica que una partícula no tiene una masa bien definida. Es decir, cada vez que una partícula se desintegra, la energía que emite es algo distinta e impredecible de manera exacta. Y aquí no se trata de una anchura que surge de la resolución del detector sino de una propiedad cuántica de las resonancias.

En el caso del bosón Z, la anchura nos da acceso indirecto a ciertas características muy interesantes del Modelo Estándar. En particular, al número de neutrinos ligeros, o sea, de los neutrinos más ligeros que la mitad de la masa del bosón Z.

En el Modelo Estándar hay tres generaciones de leptones cargados y, por lo tanto, uno esperaría que haya tres tipos distintos de neutrinos. El bosón Z se puede desintegrar de distintas maneras a pares de fermiones y anti—fermiones – quarks (todos menos el quark cima, que es más masivo que el Z), leptones cargados (electrones, muones, taus) y neutrinos. Si hay tres neutrinos más ligeros que el Z, uno esperaría que uno de cada cinco bosones Z se desintegre a un par neutrino anti—neutrino. Como los neutrinos no se pueden detectar directamente en los detectores de los que disponemos en los aceleradores, su número se infiere de manera indirecta. Esto equivale a medir la probabilidad de que el bosón Z se desintegre en hadrones, Figura 4.

Si hubiera menos de tres neutrinos, la probabilidad de



desintegración del bosón Z a hadrones sería más alta que la que predice el Modelo Estándar.

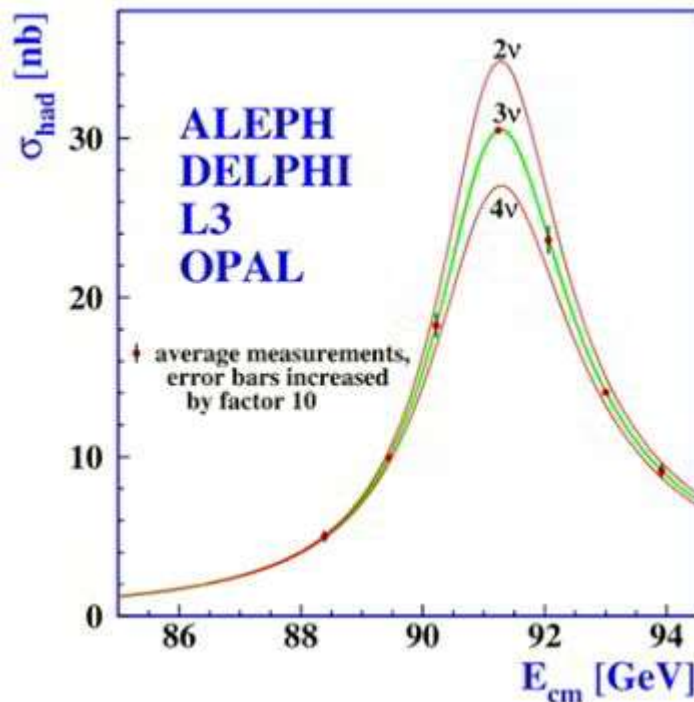


Figura 4. Probabilidad de desintegración del bosón Z en hadrones [4].

En el caso de dos neutrinos, los datos deberían coincidir con la línea roja superior. Y al revés, si hubiera más de tres neutrinos, la tasa de desintegración del bosón Z a hadrones sería más baja. En el caso de cuatro neutrinos, los datos deberían coincidir con la línea roja inferior. Los datos confirman las predicciones del Modelo Estándar y coinciden con la línea verde intermedia, la cual está de acuerdo con las observaciones de una manera impresionante.

El tiempo de desintegración.

Como ya hemos visto en la figura de las resonancias, hay partículas que tienen anchuras grandes y viven muy poco tiempo y otras que viven mucho más. Como en el caso de la masa, no se puede predecir cuánto tiempo va a vivir una partícula, pero sí cuánto vivirá cada tipo de partícula en promedio.

Hay varios aspectos que definen el tiempo de desintegración promedio. Uno de ellos es el tipo de interacción que da lugar a la desintegración. Por ejemplo, si comparamos la interacción débil y la interacción fuerte, la segunda implica tiempos de desintegración diez millones de veces más cortos. Otro factor es el espacio de fases, es decir, las posibilidades que tiene una partícula para desintegrarse. Si la diferencia entre la masa de la partícula y la suma de las masas de los productos de desintegración es grande, el estado final dispone de muchas posibilidades cinemáticas y los tiempos de desintegración se vuelven muy cortos. Por ejemplo, la partícula elemental más masiva que conocemos, el quark cima, tiene una masa tan grande que se desintegra antes de conseguir hadronizar, esto es, antes de formar hadrones con otros quarks. Gracias a ello, el quark cima nos permite estudiar un quark directamente y poner a prueba las interacciones fuerte y débil.

La física de sabor y las partículas que contienen un quark b.

El campo de la física que se dedica a estudiar los quarks y los leptones se llama física de sabor por los seis tipos (sabores) de quarks y leptones que conocemos. Es un campo muy activo hoy en día por las diversas posibilidades que presenta para acceder a física

más allá del Modelo Estándar. A continuación, nos centraremos en hadrones que contienen un quark fondo.

El quark fondo ( $b$ , de beauty o bottom en inglés) se descubrió en 1977 por Fermilab y desde entonces ha dado lugar a un campo de investigación continuo que nos ha aportado descubrimientos esenciales. En 1987, el experimento ARGUS [5] descubrió que los mesones neutros  $B^0$ , los que están compuestos por un antiquark  $b$  y un quark  $d$ , oscilan. Esto significa que los  $B^0$  se convierten en su antipartícula, el anti- $B^0$  (y al revés) conforme pasa el tiempo. Esta propiedad de los mesones neutros surge de la interacción débil, tal y como mostramos en el siguiente diagrama de Feynman para el caso del mesón  $B^0_s$ .

El mesón  $B^0_s$  es un mesón neutro muy parecido al  $B^0$  con la única diferencia de que el quark  $d$  está sustituido por un quark extraño. Los mesones  $B^0_s$  y  $B^0$  oscilan de la misma manera. Sus quarks intercambian dos bosones  $W$ , mediadores de la interacción débil, y el quark anti- $b$  se convierte en un  $b$ , mientras que el  $s$  se convierte en un anti- $s$ , obteniendo de esta manera un anti- $B^0$  a partir del  $B^0$  o un anti- $B^0_s$  a partir del  $B^0_s$ .

Hay que notar que en este caso se producen también otras partículas virtuales, como por ejemplo un par quark-antiquark cima, arriba o abajo. Por ello, midiendo estas oscilaciones se puede acceder a las propiedades de las partículas virtuales, como por ejemplo su masa.

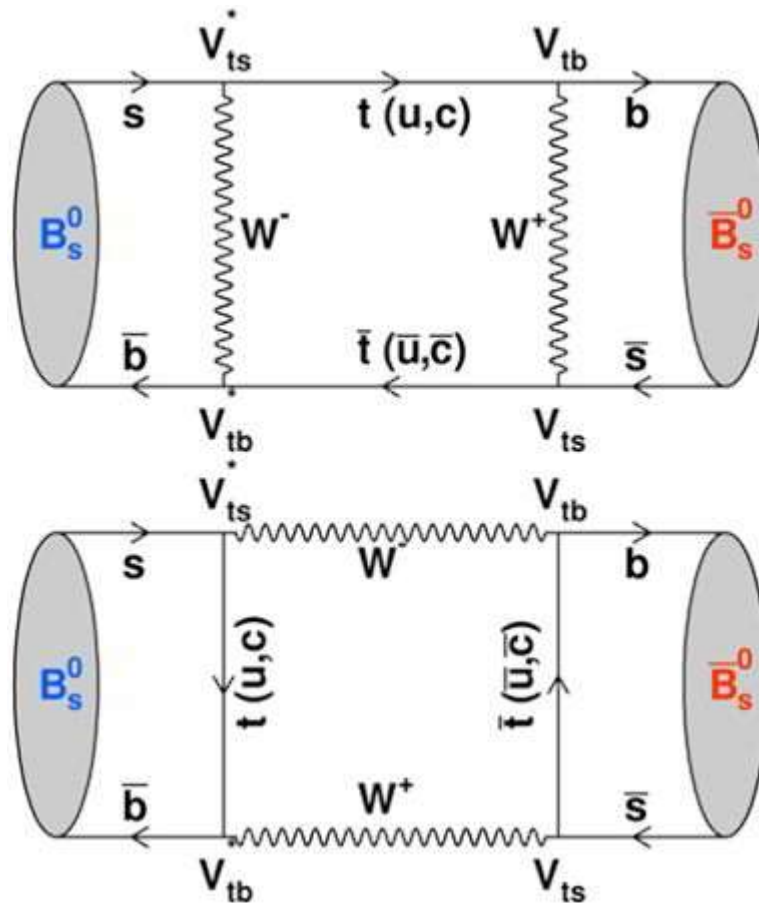


Figura 5 Diagramas de Feynman mostrando la oscilación del mesón  $B^0_s$ .

Antes de entrar en más detalle en las medidas de oscilaciones y su importancia, cabe notar que fueron justamente las oscilaciones de  $B^0$  medidas por ARGUS las que dieron los primeros indicios sobre la masa del quark más masivo, el quark cima. Para sorpresa de todos, resultó que el quark cima es mucho más masivo de lo que se esperaba. Para explicar las oscilaciones del  $B^0$ , dicho quark tenía que tener una masa de 50 GeV como mínimo. Tuvo que pasar casi una década hasta que se descubrió el quark cima en Fermilab y, efectivamente, su masa resultó ser de unos 173 GeV.

Desde este descubrimiento y hasta hoy en día las medidas relacionadas con oscilaciones de mesones B neutros siguen siendo muy relevantes. El descubrimiento de ARGUS abrió la puerta a un nuevo tipo de experimentos, las llamadas fábricas de mesones B. Dos experimentos de este tipo fueron construidos en los años 1990 en colisionadores  $e^+ e^-$ , Belle en Japón y BaBar en los Estados Unidos. Los dos estaban basados en tecnologías similares y operaban a la misma energía de colisión, 10.58 GeV, la masa de la resonancia  $Y(4S)$ .

La resonancia  $Y(4S)$  decae en un mesón y un antimésón B neutros con una probabilidad de alrededor de un 50%. Por razones cuánticas, este par está en un estado coherente. Esto significa que en todo momento los dos mesones son de sabores opuestos, B y anti-B y nunca un B y un B o un anti-B y un anti-B, hasta que uno de los dos decae. A esta propiedad, el entrelazamiento cuántico, Einstein se refería como "spooky action at a distance" (acción espeluznante a distancia). Los dos mesones están en un estado común pero no intercambian información, no interaccionan. Aun así "saben" en qué estado está el otro y conservan el estado común hasta que la onda cuántica en la que existen los dos mesones se rompe.

Los mesones B tienen una amplia gama de canales de desintegración. Entre ellos, la desintegración del mesón  $B^0$  a dos mesones más ligeros, el  $J/\psi$  y el  $K^0_S$ , tiene una gran importancia en el campo de la física de partículas. En este canal de desintegración, el Modelo Estándar predice una posible asimetría entre las tasas de

desintegración en función del tiempo de los mesones  $B^0$  y los mesones anti- $B^0$ . Esta asimetría, llamada violación de la simetría  $CP$  (de *charge—parity* en inglés, o simetría de carga paridad), representa un papel importante en cosmología. La violación  $CP$  puede explicar, por ejemplo, por qué existe más materia que antimateria en el universo.

Se puede determinar la violación  $CP$  en el canal de desintegración  $B^0 \rightarrow J/\psi K^0_S$  midiendo por separado el tiempo de desintegración de los dos tipos de mesones y por eso es importante saber cuál de los dos se ha desintegrado. En esta medida, el entrelazamiento cuántico de los mesones producidos en las fábricas de mesones  $B$  juega un papel central. El estado final  $J/\psi K^0_S$  es accesible tanto para un mesón  $B^0$  como para un anti- $B^0$  y es aquí donde entra en juego el entrelazamiento cuántico – en el momento de la desintegración se sabe que el otro mesón  $B^0$  (llamado  $B$ -tag, del inglés "tag" de etiquetaje) tiene el sabor contrario. A partir de las desintegraciones del otro mesón  $B^0$  se puede determinar su sabor y, de este modo, deducir el sabor del mesón  $B^0$  de interés, que será el opuesto en este momento.

Los tiempos de desintegración de los  $B^0$  y los anti- $B^0$  medidos por Belle se muestran en la figura.

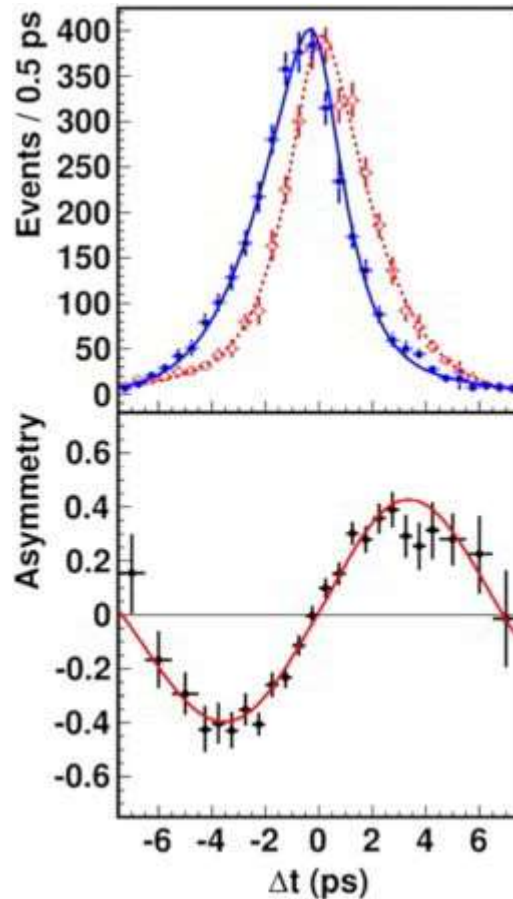


Figura 6. Tiempos de desintegración de los  $B^0$  y los  $\text{anti-}B^0$  medidos por Belle [6].

En azul puede verse el tiempo de desintegración de los  $B^0$  y en rojo el de los  $\text{anti-}B^0$ . Lo que las fábricas de mesones B miden es el tiempo  $\Delta t = t - t_{\text{tag}}$  entre la desintegración del mesón  $B^0$  de interés y el  $B_{\text{tag}}$ . Como a veces el  $B_{\text{tag}}$  decae primero y a veces decae segundo, la diferencia del tiempo  $\Delta t$  puede ser positiva o negativa. Además, el tiempo de desintegración es una función exponencial y como consecuencia de ello la distribución de  $\Delta t$  consiste de dos funciones exponenciales de espaldas y centradas en cero. La asimetría entre las dos distribuciones es muy clara. Este resultado confirma que en

el Modelo Estándar hay una diferencia entre el comportamiento de los quarks y los antiquarks. Fue esta medida, junto con la de BaBar en el mismo canal de desintegración, la que condujo al premio Nobel de Física en 2008 para Makoto Kobayashi y Toshihide Maskawa. Estos físicos japoneses predijeron la asimetría  $CP$ , la cual exige la existencia de por lo menos tres generaciones de quarks, ya en los años 1960, cuando aún se conocían solamente dos generaciones.

Además de Belle y BaBar hay también otros experimentos que se dedican a estudios de mesones B. Además de los experimentos de LEP, esto incluye tres experimentos del LHC – LHCb, ATLAS y CMS. Especialmente LHCb (de LHC Beauty) fue construido con el objetivo de realizar medidas de hadrones conteniendo un quark b o c. Siendo un experimento de colisiones de protones a una energía de múltiples TeV, el principio de funcionamiento de LHCb es muy distinto al de las fábricas de mesones B. Por un lado, los mesones B producidos en LHCb no están en pares coherentes, lo que hace más difícil la identificación del sabor del mesón B. Por otro lado, la sección eficaz de producción de mesones B es mucho más grande y con esto LHCb tiene un conjunto de datos mucho mayor que las fábricas de mesones B. Por último, los mesones B en LHCb se producen con una cantidad de movimiento muy superior, lo que significa que decaen después de recorrer una distancia significativa en el detector. Esto es importante para medidas del tiempo de desintegración por razones de la resolución del detector. El tiempo se mide a partir de la distancia entre el punto de colisión de los protones y el punto de desintegración del mesón B. Cuanto más



larga es esta distancia, más precisa es su medida.

La resolución temporal de LHCb es un orden de magnitud mejor que la de BaBar y Belle. Esto abre la posibilidad a medidas como la de las oscilaciones de los mesones  $B_s^0$ , que son un orden de magnitud más rápidas que las de los mesones  $B^0$ . No fue hasta 2006 que se observaron las oscilaciones en  $B_s^0$  por el experimento CDF II de Fermilab, Estados Unidos [7], y las medidas relacionadas con dichas oscilaciones siguen siendo muy relevantes en la actualidad.

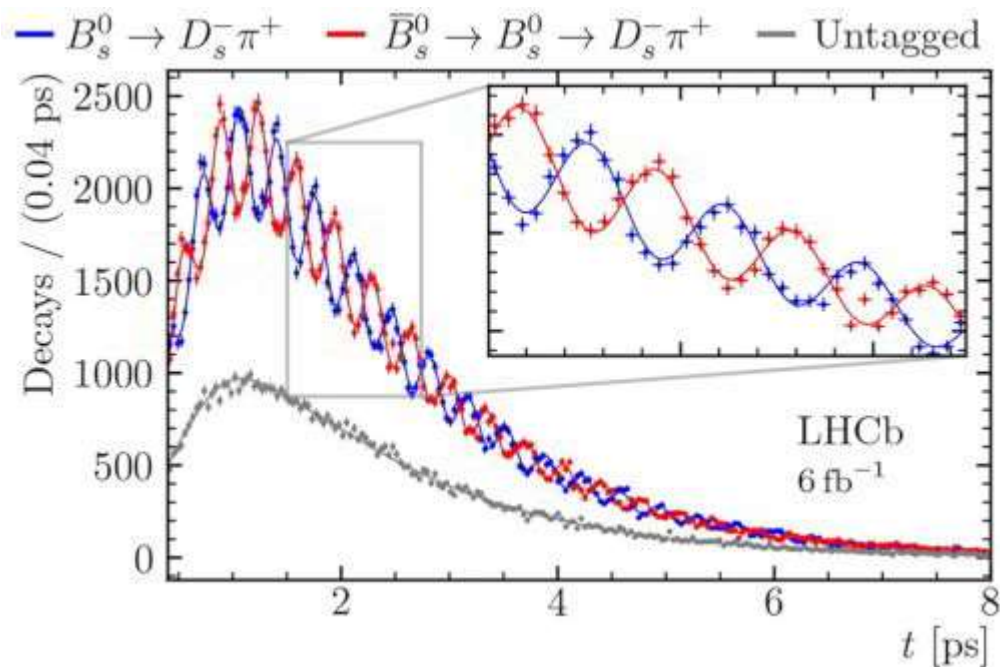


Figura 7. Distribuciones del tiempo de desintegración de  $B_s^0$  y anti- $B_s^0$  medidos por LHCb [8].

Recientemente, LHCb hizo una medida muy precisa de la oscilación del  $B_s^0$  midiendo el tiempo de desintegración del canal  $B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$  [8]. Las distribuciones del tiempo de desintegración de  $B_s^0$  y anti-

$B^0_s$  están mostradas en la Figura 7. Con el tiempo, algunos  $B^0_s$  se convierten en anti- $B^0_s$  y viceversa, y por eso la tasa de desintegración sigue una senoide. En principio, el tiempo de desintegración es una función exponencial, pero en este caso una gran parte de los mesones  $B^0_s$  de los instantes iniciales no quedan registrados debido a las grandes cantidades de fondo y las limitaciones asociadas del experimento.

De la misma manera que para las oscilaciones en  $B^0$ , estudiar las oscilaciones del mesón  $B^0_s$  provee información sobre la posible existencia de nuevas partículas. Con respecto a esto, el último ejemplo del que me gustaría hablar es la medida del canal de desintegración  $B^0_s \rightarrow J/\psi K K$ . Esta medida es uno de los objetivos principales de LHCb y el Instituto de Física de Áltas Enerxías (IGFAE) y la Universidad de Santiago de Compostela (USC) juegan un papel central en ella [9]. Como hemos visto en el caso del mesón  $B^0$ , sus oscilaciones nos mostraron la existencia de una partícula que no se conocía hasta aquel momento, el quark cima. Por la misma razón, para acceder a partículas que aún no conocemos, medimos la violación  $CP$  en  $B^0_s \rightarrow J/\psi K K$ , la cual nos da acceso al contenido de la oscilación, es decir, a las partículas que participan en la oscilación mostrada en el diagrama de Feynman.

Hay varias medidas que muestran que el Modelo Estándar es incompleto y varias teorías predicen la existencia de partículas más allá de él. Estas partículas podrían ser muy masivas y fuera del alcance del LHC. Pero podrían afectar a la oscilación de los mesones  $B$  y alterarla con respecto a las predicciones del Modelo Estándar.

Dicha desviación sería una indicación indirecta de física más allá del Modelo Estándar y por eso es muy interesante. En la última década se han medido desviaciones en ciertos canales de desintegración de los mesones B [10] y la medida de  $B^0_s \rightarrow J/\psi K K$  va a aportar información muy importante para resolverlas. En este momento todas las medidas de violación  $CP$  en  $B^0_s \rightarrow J/\psi K K$  están de acuerdo con las predicciones del Modelo Estándar, pero con más datos vamos a conseguir más precisión. Cuanto más precisa sea la medida de  $B^0_s \rightarrow J/\psi K K$ , mejor vamos a entender la naturaleza de las posibles partículas más allá del Modelo Estándar, incluyendo su masa y las fuerzas con las que interaccionan.

Estas medidas y muchas más van a aumentar en precisión en la próxima década, periodo en el que tomarán datos los descendientes de Belle y LHCb, Belle II y LHCb Upgrade. Ambos experimentos han mejorado sus detectores y van a aumentar la tasa con la que toman datos. En unos años alcanzarán una precisión sin precedentes en los canales de desintegración que he mencionado aquí, así como en muchos otros, poniendo de este modo bajo un estricto examen al Modelo Estándar y, posiblemente, haciendo descubrimientos revolucionarios.

En resumen, hemos visto unos ejemplos de procesos del campo de la física de partículas muy bien descritos por la mecánica cuántica. Esto es solo una parte muy pequeña de este campo científico. En el siglo XX nuestro conocimiento del mundo de las partículas subatómicas ha crecido de una manera enorme pero aún queda un camino emocionante e inspirador por recorrer. En este sentido, me

gustaría acabar con una frase de Einstein con la que seguramente todos estaremos de acuerdo:

"Si Dios creó el mundo, su principal preocupación ciertamente no fue facilitarnos su comprensión. "

Agradecimiento especial a: Avelino Vicente (IFIC) por la impagable ayuda en la edición de este capítulo.

Referencias:

[1] P. A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020) and 2021 update

[2] Flip Tanedo, Quantum Diaries, <https://www.quantumdiaries.org/2010/05/10/the-z-boson-and-resonances>

[3] Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Gargamelle>

[4] The ALEPH Collaboration, The DELPHI Collaboration, The L3 Collaboration, The OPAL Collaboration, The SLD Collaboration, The LEP Electroweak Working Group, The SLD Electroweak and Heavy Flavour Groups, "Precision electroweak measurements on the Z resonance", *Physics Reports, Volume 427, Issues 5–6, 2006, Pages 257—454*

[5] Albrecht, H. ; Andam, A. A. ; Binder, U. ; Böckmann, P. ; Gläser, R. ; et al. (ARGUS Collaboration) (1987). "Observation of  $B^0$ — anti—  $B^0$  mixing". *Physics Letters B. Elsevier BV. 192 (1–2): 245–252.*

[6] I. Adachi et al. , "Precise measurement of the CP violation parameter  $\sin 2\phi_1$  in  $B^0 \rightarrow (cc)K^0$  decays", *Phys. Rev. Lett. 108,*

171802 (2012)

[7] A. Abulencia et al. (CDF collaboration), "*Observation of  $B^0_s$ — $\text{anti-}B^0_s$  Oscillations*", Phys. Rev. Lett. 97:242003, 2006

[8] LHCb collaboration, "*Precise determination of the  $B^0_s$ — $\text{anti-}B^0_s$  oscillation frequency*", Nat. Phys. 18, 1—5 (2022)

[9] R. Aaij et al (LHCb collaboration), "*Updated measurement of time—dependent CP—violating observables in  $B^0_s \rightarrow J/\psi K^+K^-$  decays*"

[10] R. Aaij et al (LHCb collaboration), "Test of lepton universality in beauty—quark decays", arXiv:2103. 11769 (enviado para su publicación a Nature Physics)

[Veronika Chobanova.](#)

Doctora en Física.

Investigadora Distinguida Manuela Barreiro

Instituto Galego de Física de Áltas Enerxías, Universidade de

Santiago de Compostela (IGFAE—USC).



*Fotografía tomada en el 6° Congreso Solvay celebrado en 1930, "Magnetismo". De pie, de izda. a dcha.: Edouard Herzen, Émile Henriot, Jules Émile Verschaffelt, Charles Manneback, A. Cotton, Jacques. Errera, Otto Stern, Auguste Piccard, Walther Gerlach, Charles Galton Darwin, Paul Dirac, E. Bauer, Piotr Kapitsa, Léon Brillouin, Hendrik Anthony Kramers, Peter Debye, Wolfgang Pauli, J. Dorfman, John Hasbrouck van Vleck, Enrico Fermi, Werner Heisenberg. Sentados, de Izda. a dcha.: Théophile de Donder, Pieter Zeeman, Pierre—Ernest Weiss, Arnold Sommerfeld, Marie Curie, Paul Langevin, Albert Einstein, Owen Willans Richardson, Blas Cabrera, Niels Bohr, Wander Johannes de Haas. [Proceedings 1930](#)*

## Capítulo 15

### Mecánica Cuántica "Scan": la Inercia Cuántica destruye la Superposición de Estados.

#### Introducción.

Desde su formulación en los años veinte y treinta del siglo pasado, los fundamentos de la mecánica cuántica no han dejado de proveer una fuente inagotable de inspiración y debate, a veces intenso y apasionado. La interpretación convencional de Copenhague, aceptada ampliamente, deja sin embargo demasiadas cuestiones sin respuesta. En primer lugar, las mediciones de los sistemas cuánticos descritos por funciones de ondas  $\psi$ , o vectores de estado<sup>36</sup>, realizadas por medio de dispositivos clásicos producen el colapso de estas funciones o vectores, quedando solo uno de sus estados posibles. En otras palabras, de entre todos los estados posibles en la superposición, solo uno de ellos aparece como resultado de la medición, mientras que los otros estados "se evaporan". No está de más recordar en este punto que la superposición de estados y su consecuencia inmediata – el entrelazamiento cuántico – son los rasgos más distintivos que diferencian la mecánica cuántica de la mecánica clásica. Por otra parte, la línea divisoria entre los objetos macroscópicos clásicos y los objetos microscópicos cuánticos es totalmente desconocida (si es

---

<sup>36</sup>Las "funciones de onda" y los "vectores de estado" son dos notaciones equivalentes, en general, excepto en casos muy especiales. En este artículo usaremos la primera notación.

que existe), a pesar de que se han realizado muchos experimentos en las últimas décadas con el objeto de aproximarse a esta frontera. Estas y algunas otras cuestiones han dado lugar a toda una variedad de interpretaciones y modificaciones de la mecánica cuántica convencional a lo largo de los años.

Hace poco más de un lustro, yo propuse una tal modificación de la mecánica cuántica, coincidente en muchos aspectos con la interpretación de Copenhague, a la que denominé *Scan Quantum Mechanics* (Mecánica Cuántica Scan) [1, 2]. El presente artículo es una presentación de los aspectos principales de esta propuesta, que llamaremos SQM, por sus siglas en inglés. Lo primero que hay que decir sobre la SQM es que no modifica en absoluto el formalismo matemático convencional, que es interpretado como una descripción efectiva correcta de los sistemas cuánticos. Sin embargo, en la SQM se conjetura un mecanismo que estaría detrás de la superposición de estados, así como un criterio que permitiría dilucidar la validez de la descripción cuántica versus la descripción clásica para los sistemas físicos en general. En particular, se postula la existencia de una propiedad, llamada *inercia cuántica*  $I_q$ , que la poseerían todos los sistemas físicos, tanto clásicos como cuánticos, de manera que el comportamiento cuántico solo se manifestaría para valores de  $I_q$  por debajo de algunos valores críticos  $I_{cr}$  (un valor crítico para cada propiedad observable del sistema). En consecuencia, la inercia cuántica con sus valores críticos marcaría la línea divisoria entre el mundo clásico y el mundo cuántico.

A la luz de la SQM, las respuestas a varias cuestiones cruciales y



paradojas se revelan más intuitivas que en la interpretación de Copenhague. Esto sucede especialmente con las cuestiones relacionadas con el problema de la medida, la superposición de estados y la línea divisoria entre el mundo cuántico y el clásico, como apuntamos, pero también con las cuestiones sobre el realismo cuántico y la ausencia de entrelazamiento entre sistemas cuánticos y clásicos. Otros aspectos de la SQM menos intuitivos, aunque en consonancia con la interpretación de Copenhague, son la aleatoriedad en el resultado de las mediciones de los sistemas cuánticos y la no—localidad de los mismos, no solo en referencia al entrelazamiento de sus propiedades, sino también en referencia a sus posiciones en el espacio.

En cualquier caso, la SQM puede ponerse a prueba en los laboratorios con una variedad de experimentos, como veremos más adelante, y también podría manifestarse a través de observaciones astrofísicas como un nuevo mecanismo de radiación electromagnética no—térmica que contribuiría a la formación de estrellas de neutrones, como veremos a continuación.

La Mecánica Cuántica Scan (SQM).

*La Mecánica Cuántica Scan (SQM)* [1, 2], como ya hemos adelantado, consiste básicamente en una interpretación de la función de ondas cuántica  $\psi$  en la que la superposición de estados, en cualquier instante, no es una superposición propiamente dicha, sino solo un concepto aproximado válido para todas las aplicaciones prácticas. Su formalismo matemático es el mismo que en la mecánica cuántica

convencional, ya que no es necesario proponer ninguna modificación, aunque también introduce una nueva propiedad llamada inercia cuántica, que veremos en detalle más abajo.

Por simplicidad, vamos a considerar un sistema cuántico con solo una propiedad observable, a la que nos referiremos como "observable"  $A$ , cuyos valores posibles o permitidos son  $a_1, a_2, \dots, a_n$ . Entonces, la mecánica cuántica convencional sostiene que el sistema se encuentra en una superposición de estados representada por la función de ondas  $\psi$  tal que:

$$\psi = \sum_k c_k |a_k\rangle$$

en donde  $|a_k\rangle$  representa el estado correspondiente al valor del observable  $a_k$  y  $c_k$  es un coeficiente. Pues bien, la medición del sistema a través de algún aparato (o de otras maneras) se supone que colapsa el estado inicial en superposición, dado por  $\psi$ , dando como resultado un único estado, digamos  $|a_m\rangle$ , con el valor  $a_m$  del observable  $A$ . Además, la probabilidad de que una medición de como resultado el estado  $|a_m\rangle$  viene dada por  $|c_m|^2$ , tal como prescribe la llamada regla de Born.

La SQM difiere de la mecánica cuántica convencional en dos postulados:

Primero, los sistemas cuánticos escanean los estados de los observables descritos por la función de ondas  $\psi$  y oscilan entre

estos estados, o entre los valores de los observables<sup>37</sup>, de forma aleatoria y a muy altas velocidades, de manera que debido a falta de resolución temporal los sistemas parecen estar, en cualquier instante, en una superposición de los diferentes estados  $|a_k\rangle$  con sus diferentes valores  $a_k$  de los observables. El tiempo relativo que el sistema cuántico pasa en un estado concreto  $|a_m\rangle$  coincide con la probabilidad  $|c_m|^2$  de encontrar ese estado como resultado de una medición.

Segundo, las oscilaciones cuánticas dependen de una propiedad crucial compartida por todos los sistemas físicos, *la inercia cuántica*  $I_q$ , que aumenta cuando se añade un constituyente (es decir, cuando aumenta la masa) o cuando el sistema es perturbado por todo tipo de interacciones y energías. Si el valor de  $I_q$  está por debajo del valor crítico para el observable A,  $I_q < I_{cr}$ , entonces se producen las oscilaciones cuánticas entre los estados, o los valores de este observable, y la función de ondas  $\psi$  describe el sistema físico exactamente como en la mecánica cuántica convencional. Si, por el contrario, el valor de  $I_q$  alcanza o sobrepasa el valor crítico,  $I_q \geq I_{cr}$ , entonces el sistema no puede oscilar entre los diferentes estados, o valores del observable, por lo que las oscilaciones cuánticas se detienen y la superposición de estados desaparece dando lugar a un sistema clásico con un valor bien definido del observable A. Como

---

<sup>37</sup>Muchos expertos prefieren que no se use la expresión "oscilar entre estados" pues los estados cuánticos son en gran parte construcciones matemáticas, de ahí que se prefiera la expresión "oscilar entre los valores de los observables" que son los que se detectan experimentalmente en el laboratorio.

consecuencia, la función de ondas  $\psi$  deja de describir el sistema físico, ya que este se ha convertido en un sistema clásico.

Así pues, en la SQM el origen de la "clasicalidad"; es decir, la línea divisoria entre el comportamiento cuántico y clásico, viene descrito de manera muy sencilla por la relación  $I_q \geq I_{cr}$ . Y la función de ondas  $\psi$  no es que colapse, sino que deja de ser una buena descripción del sistema físico, sin más, pues  $\psi$  representa solo una descripción matemática del sistema carente de "sustancialidad", como en la mecánica cuántica convencional, a diferencia de lo que propugnan algunas otras interpretaciones de esta.

La generalización del segundo postulado para sistemas cuánticos con más de un observable, A, B, C, .... es directa. Obviamente, una vez que la inercia cuántica  $I_q$  alcanza los valores críticos para todos los observables, todas las superposiciones cuánticas se detienen y el sistema físico se hace clásico, con valores bien definidos de todos los observables. La situación intermedia, en la que  $I_q \geq I_{cr}$  para algunos observables, pero no para todos, da como resultado sistemas híbridos, en los que coexisten el comportamiento clásico y el cuántico. Estos sistemas híbridos deben existir, especialmente a muy bajas temperaturas y campos gravitatorios débiles, como de hecho sucede en los llamados sistemas mesoscópicos.

Una cuestión diferente es si se debería modificar la ecuación de Schrödinger, piedra angular de la mecánica cuántica convencional, para dar cuenta del efecto de la inercia cuántica sobre los sistemas. Esto no es nada obvio, porque los fenómenos mecano—cuánticos permiten vislumbrar que hay dos niveles en la realidad física: el

nivel cuántico y el nivel espacio—temporal, siendo el primero más fundamental que el segundo. La inercia cuántica sería una propiedad no—observable perteneciente al nivel cuántico, que no aparecería en la dinámica espacio—temporal de manera explícita, y cuyo único papel sería afectar la capacidad del sistema físico para oscilar, o no, entre los valores posibles de sus propiedades observables.

Las masas de las partículas, las interacciones entre ellas y muchas otras perturbaciones e interacciones provenientes del entorno (temperatura, gravitación, campos electromagnéticos, colisiones, ...), todas contribuirían al valor de la inercia cuántica  $I_q$ . Consecuentemente, si debido a esas contribuciones  $I_q$  alcanza o sobrepasa el valor crítico  $I_{cr}$ , entonces el sistema se estabiliza en un solo estado  $|a_m\rangle$  con valor  $a_m$  del observable  $A$ . Este valor sería el que observarían los aparatos de medida.

Una faceta importante de las oscilaciones cuánticas propuestas por la SQM en relación con la inercia cuántica  $I_q$  sería su posible reversibilidad; es decir, si  $I_q$  no solo podría aumentarse hasta el valor crítico  $I_{cr}$ , y más aún, sino si también podría disminuirse por debajo de  $I_{cr}$  una vez sobrepasado este valor. Esto, en principio, se lograría disminuyendo suficientemente la temperatura del sistema, o el campo electromagnético, o el gravitatorio, o por otros medios. De esta manera, las oscilaciones cuánticas, que se habían detenido, podrían reanudarse con lo que de nuevo "aparecería" la superposición de estados.

Para ayudar a la intuición, podríamos visualizar los estados

disponibles de un sistema físico ocupando los estados de mínima energía de un potencial, y todos ellos con el mismo valor de la energía. Entonces, el estado del sistema se encontraría oscilando muy rápidamente entre estos mínimos, siempre que se cumpliera que  $I_q < I_{cr}$ , como si se tratase de un tipo especial de efecto túnel. La inercia cuántica  $I_q$ , al aumentarse, elevaría las barreras de energía potencial entre los diferentes estados de mínima energía, hasta el punto en que las oscilaciones cuánticas entre ellos desaparecerían al alcanzarse el valor  $I_q \geq I_{cr}$ , quedando el sistema atrapado en un único estado de mínima energía. Y a la inversa, al disminuir  $I_q$  bajarían las barreras de energía potencial, de manera que si se llegara a un valor  $I_q < I_{cr}$ , se tendría como consecuencia la reanudación de las oscilaciones del sistema entre los distintos estados de mínima energía.

Podríamos preguntarnos si las oscilaciones cuánticas propuestas por la SQM serían aleatorias o seguirían algún patrón específico. La respuesta es que no hay ninguna razón a priori para que las oscilaciones sigan algún patrón, ya que el único requisito que deben satisfacer es que el tiempo que el sistema pasa en los diferentes estados, o valores de los observables, sea proporcional a las probabilidades dadas por la regla de Born, como vimos antes. Más aún, un patrón específico para estas oscilaciones cuánticas requeriría la existencia de las llamadas variables ocultas, que la SQM no necesita y que, además, podrían entrar en conflicto con los resultados experimentales — la violación de las desigualdades de Bell y las desigualdades de Leggett — que han logrado ya descartar

muchas interpretaciones de la mecánica cuántica. Como consecuencia, la SQM postula que las oscilaciones cuánticas entre los diferentes estados, o valores de los observables, siguen patrones aleatorios.

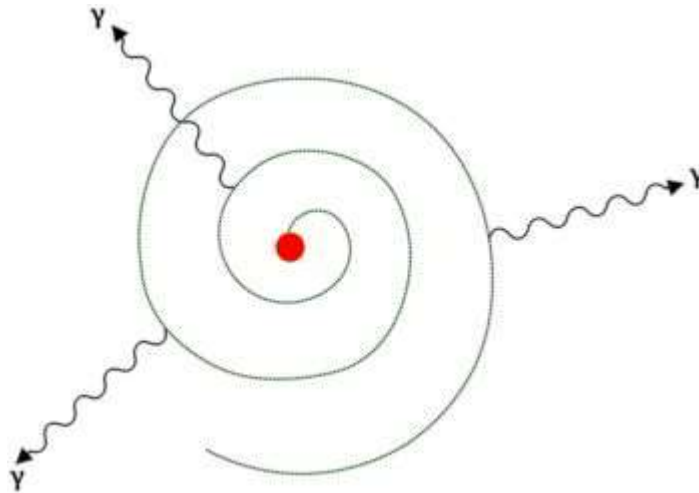
Las posiciones en el espacio se tratan de la misma manera que cualquier otro observable. Es decir, en la SQM los sistemas cuánticos oscilarían entre todas las posiciones permitidas en el espacio, sin pasar por puntos intermedios, mientras su inercia cuántica satisfaga  $I_q < I_{cr}$ , donde  $I_{cr}$  sería la inercia cuántica crítica que detendría los saltos cuánticos. Por consiguiente, en cuanto ocurriese que  $I_q \geq I_{cr}$ , los sistemas dejarían de oscilar haciendo saltos cuánticos en el espacio y seguirían trayectorias clásicas continuas, como bolitas diminutas. Los saltos cuánticos entre las posiciones del espacio son por tanto la regla en la SQM, y la posibilidad de que estos se conviertan en trayectorias continuas, siempre que  $I_q \geq I_{cr}$ , abre un abanico de posibilidades de nuevos efectos físicos. Por ejemplo, si esto le sucediera a los electrones de los átomos, entonces los electrones orbitarían el núcleo cayendo hacia este emitiendo radiación sincrotrón<sup>38</sup> de rayos gamma (Figura 1), lo cual facilitaría la captura de los electrones por los protones, que se "convertirían" en neutrones con la emisión de un neutrino, según el proceso:  $p + e^- \rightarrow n + \nu$ .

Además, si esta emisión sincrotrón de origen no—térmico, ocurriera

---

<sup>38</sup>La radiación electromagnética de tipo sincrotrón es la emitida por las partículas con carga eléctrica cuando se aceleran al seguir una trayectoria curvada.

por parte de objetos astrofísicos debido a la acción de campos gravitatorios muy intensos, entonces tendríamos otro posible mecanismo para la conversión de átomos en neutrones que tiene lugar en estrellas de neutrones y, presumiblemente, también en las regiones muy cercanas a muchos agujeros negros.



*Figura 1. Si la inercia cuántica de los electrones en un átomo alcanzase su valor crítico  $I_{cr}$ , estos dejarían de comportarse de acuerdo con la mecánica cuántica y orbitarían el núcleo trazando trayectorias continuas, por lo que caerían hacia el mismo emitiendo radiación sincrotrón de rayos gamma, lo cual facilitaría su captura por los protones, dando lugar a neutrones y radiación de neutrinos.*

Como las estrellas enanas blancas no tienen campos gravitatorios tan intensos como para producir este mecanismo, pues de lo contrario se convertirían rápidamente en estrellas de neutrones, podemos tomar la intensidad de esos campos como cota inferior para delimitar la intensidad gravitatoria crítica necesaria para



iniciarlo. Es decir, la intensidad gravitatoria crítica  $G_{cr}$  satisfecería la cota  $G_{cr} > G_{wd}$  donde  $G_{wd}$  designa la intensidad gravitatoria en la superficie de las estrellas enanas blancas (*white dwarfs*).

Ahora veamos qué dice la SQM en el caso en que la posición de una partícula venga dada por la superposición de dos o más trayectorias, como en los experimentos de interferometría, ya sea a través de una doble rendija o debido a un dispositivo que divida la trayectoria incidente en dos trayectorias. En la interpretación de Copenhague, debido a la dualidad onda—corpúsculo, la partícula sigue ambas rutas, aunque de manera muy imprecisa y ambigua, pues se encontraría en un "frente de ondas de probabilidad", hasta que es detectada, momento en el cual muestra su naturaleza corpuscular dejando un impacto en las pantallas o detectores.

En cambio, para la SQM esa partícula es un corpúsculo dotado de ciertas características ondulatorias y sigue las dos rutas oscilando continuamente y a gran velocidad entre ellas, sin pasar por las posiciones intermedias. En un experimento de doble rendija, la partícula realmente pasará a través de las dos, ya que la partícula será capaz de oscilar muchas veces entre las dos trayectorias mientras cruza las rendijas. Si se colocan detectores detrás de estas para determinar por cuál de ellas pasó la partícula, entonces esta impactará en uno solo de los detectores ya que las oscilaciones se detendrán justo después.

Debido a su relación con las probabilidades cuánticas, el tiempo pasado por los sistemas cuánticos con cada valor posible de los observables tiene que estar cuantificado en términos de una unidad

de tiempo, que llamamos *tiempo de oscilación cuántica*  $t_s$ . Para ser consistentes,  $t_s$  debe depender de la inercia cuántica  $I_q$ . La elección más sencilla es:

$$t_s = C \frac{h}{I_{cr} - I_q}, \quad I_q < I_{cr}$$

donde  $h$  es la constante de Planck y  $C$  es una constante de proporcionalidad. El régimen clásico, donde  $t_s \rightarrow \infty$ , correspondería a  $I_q \geq I_{cr}$ . Obsérvese que el valor mínimo de  $t_s$ , dado por  $t_{smin} = Ch/I_{cr}$ , se obtiene cuando  $I_q = 0$ , salvo si puede alcanzar valores negativos, posibilidad que no vamos a considerar. Obsérvese también que una superposición verdadera correspondería a  $t_s = 0$ , ya que entonces el sistema se encontraría en todos los estados permitidos a la vez, de manera simultánea, pero esto solo podría ocurrir en el límite  $I_{cr} \rightarrow \infty$ . En el espíritu de la mecánica cuántica convencional, sería tentador proponer también una cota inferior que relacione la indeterminación sobre la inercia cuántica  $\Delta I_q$  con la indeterminación sobre el tiempo de oscilación  $\Delta t_s$ , tal como:

$$\Delta I_q \Delta t_s \geq \frac{h}{4\pi}$$

Hay que notar que, si los diferentes observables tienen diferentes valores de la inercia cuántica crítica  $I_{cr}$ , estos se traducen en diferentes valores de  $t_s$ , lo cual parece de lo más natural pues, por ejemplo, las oscilaciones entre posiciones en el espacio es un proceso muy distinto a las oscilaciones entre los estados del espín, o entre las polarizaciones del fotón.

En relación al entrelazamiento cuántico, la SQM requiere que haya una sincronización exacta entre las oscilaciones de los subsistemas cuánticos involucrados. Una vez que uno de los subsistemas deje de oscilar entre los estados o valores de un observable; por ejemplo, debido a una medición, las oscilaciones se detendrán de forma instantánea para los otros subsistemas involucrados sin necesidad de ningún intercambio de señales. La razón sería que el sistema cuántico resultante del entrelazamiento actuaría como un todo, independientemente de la localización física de cada una de sus partes en el espacio. En otras palabras, la ganancia de inercia cuántica  $I_q$  por cualquiera de los subsistemas se sumaría a la cantidad total de  $I_q$  para el sistema completo. Esto produciría la "congelación" de la propiedad entrelazada para todos subsistemas involucrados, pero no para siempre porque en cuanto pudieran aligerar una cantidad suficiente de inercia cuántica, los subsistemas volverían a reanudar las oscilaciones, liberándose así de lo que podríamos denominar *atadura del entrelazamiento*. Obsérvese también que en la SQM los sistemas cuánticos no pueden entrelazarse con sistemas clásicos haciéndolos interaccionar entre sí, excepto si la inercia cuántica de los últimos está cerca del valor crítico y de alguna manera puede reducirse aún más a través del contacto con el sistema cuántico.

Experimentos para poner a prueba la SQM.

En el artículo[1] se revisaron, a la luz de la SQM, los experimentos más relevantes que se han realizado con el fin de comprobar la

validez de la mecánica cuántica convencional. Aparte de los experimentos clásicos de interferometría y entrelazamiento, también se analizó el comportamiento de la luz polarizada pasando a través de un cristal de turmalina, como describe magistralmente Paul Dirac en su libro de mecánica cuántica [3]. Este análisis provee otro ejemplo muy vistoso en donde la SQM mejora nuestra intuición sobre lo que está sucediendo realmente en este tipo de experimentos, así que vamos a dedicarle unas líneas.

Los cristales de turmalina tienen la propiedad de que dejan pasar a su través solo luz polarizada perpendicular a su eje óptico (Figura 2). Como resultado, si la luz incidente está polarizada en dirección perpendicular al eje óptico podrá pasar a lo largo del cristal, pero no podrá hacerlo si está polarizada paralela a este eje, mientras que, si está polarizada con un ángulo  $\alpha$  respecto del mismo, una fracción  $\text{sen}^2\alpha$  pasará a su través.

La descripción que ofrece la SQM acerca del paso de la luz a través de un cristal de turmalina difiere sustancialmente de la explicación que ofrece la mecánica cuántica convencional. En primer lugar, cuando un fotón – una partícula de luz – pasa a través de un cristal, su inercia cuántica  $I_q$  aumenta necesariamente a medida que va atravesándolo. El incremento exacto dependería de varios factores tales como la estructura cristalina del cristal, su composición química, su temperatura, el ángulo de incidencia del fotón y su polarización. En segundo lugar, si la polarización del fotón incidente se desdobla en una superposición de dos polarizaciones perpendiculares entre sí, entonces la SQM predice que el fotón

oscilará muy rápidamente y de manera aleatoria entre las dos polarizaciones mientras atraviesa el cristal, a la vez que se va incrementando  $I_q$  hasta alcanzar el valor crítico  $I_{cr}$ .



*Figura 2 Cristal de turmalina.*

*En ese mismo instante, las oscilaciones entre los dos estados de polarización cesan y el fotón continúa su camino en un estado de polarización bien definido. Entonces, si el fotón está polarizado en paralelo al eje óptico, el cristal absorbe el fotón y este no llega a atravesarlo, mientras que, si el fotón está polarizado en perpendicular al eje del cristal, tiene vía libre y puede atravesarlo.*

En la SQM, encontrar la línea divisoria entre el comportamiento clásico y el cuántico equivale a encontrar los valores de la inercia cuántica crítica  $I_{cr}$  para todos los observables de un sistema físico. Por este motivo, en el trabajo [1] yo propuse la realización de algunos experimentos con el fin de determinar los valores críticos  $I_{cr}$  para algunas propiedades observables, valores que se traducirían en masas críticas  $M_{cr}$ , temperaturas críticas  $T_{cr}$ , campos

electromagnéticos críticos, etc. Estos valores críticos se obtendrían de manera experimental, sin necesidad de una predicción teórica de los mismos, como ocurre con las masas de las partículas elementales en el Modelo Estándar de la física de partículas, que hasta la fecha no han podido deducirse de ningún marco teórico. Más aún, esos experimentos también podrían investigar la reversibilidad de la transición entre el comportamiento clásico y el cuántico, siempre que esto fuera posible; por ejemplo, añadiendo o sustrayendo constituyentes al sistema, y/o aumentando o disminuyendo la temperatura, entre otras posibilidades.

La contribución de las masas de los constituyentes a la inercia cuántica  $I_q$  es muy intuitiva en la SQM y es la razón principal detrás de la línea divisoria entre los sistemas físicos clásicos y cuánticos, ya que aumentando cuidadosamente el número de constituyentes de un sistema cuántico conduciría eventualmente a su transmutación en un sistema clásico cuando se alcanzase la masa crítica  $M_{cr}$ . Para ser más precisos, en igualdad de condiciones ambientales, añadir constituyentes a un sistema cuántico hasta que su inercia cuántica alcanzase o sobrepasase su valor crítico,  $I_q \geq I_{cr}$ , resultaría en el cese de los saltos cuánticos del sistema entre dos (o más) trayectorias en los experimentos de interferometría. En otras palabras, el sistema cuántico se habría convertido en un sistema clásico y en consecuencia se movería siguiendo trayectorias continuas bien definidas en vez de saltos cuánticos. Por lo tanto, en esta situación no se formarían patrones de interferencia repitiendo el experimento con un gran número de sistemas idénticos, salvo que

una o más de las condiciones ambientales cambiara, como sería una bajada de la temperatura, de tal manera que permitiese al sistema recobrar el comportamiento cuántico.

Así pues, debería ser técnicamente posible determinar, o al menos estimar, la masa crítica  $M_{cr}$  de los sistemas físicos, para un conjunto dado de condiciones ambientales, realizando experimentos de interferometría con moléculas grandes, o con nanocristales a los que los investigadores podrían añadir o sustraer átomos uno a uno. En el artículo [4] se presentan resultados de experimentos de espectrometría con moléculas orgánicas complejas y agregados moleculares inorgánicos. En el presente, las moléculas mayores para las que se ha confirmado un comportamiento cuántico se encuentran en el rango de masas de  $10^{-22}$  kg, mientras que los objetos más pequeños que sabemos que se comportan de acuerdo a la mecánica clásica tienen una masa del orden de  $10^{-9}$  kg. Esto significa que existen 12 órdenes de magnitud donde indagar en pos de la masa crítica  $M_{cr}$  (si es que existe...), lo cual implica que hay 12 órdenes de magnitud en los que podría encontrarse la línea divisoria en la que el centro de masas de un objeto se movería de acuerdo con la mecánica cuántica o, al contrario, obedeciendo las leyes de la mecánica clásica.

Aparte de las masas de los constituyentes, según la SQM las perturbaciones e interacciones provenientes del entorno también tendrían que contribuir a la inercia cuántica  $I_q$  de los sistemas físicos. Así que habría que tener en cuenta: la temperatura, las fuerzas gravitatorias, los campos electromagnéticos y las colisiones

de todo tipo. Estas perturbaciones afectarían a los diferentes observables de diferentes maneras y, además, estos tendrían diferentes valores de la inercia crítica  $I_{cr}$ . Una vez se encontrase la masa crítica  $M_{cr}$ , divisoria entre el comportamiento cuántico y el clásico para un conjunto de condiciones ambientales dadas, los siguientes experimentos de interferometría tendrían que realizarse usando sistemas físicos con masas muy cercanas a  $M_{cr}$  y variando una de las condiciones ambientales de manera muy cuidadosa.

Para comenzar, habría que hacer experimentos aumentando y disminuyendo la temperatura de los sistemas para estudiar su efecto sobre el comportamiento cuántico y clásico, y la posible reversibilidad de estos comportamientos, lo cual abriría la posibilidad de encontrar una temperatura crítica  $T_{cr}$ . Sin embargo, una complicación técnica siempre aparecería al investigar la posible existencia de una temperatura crítica  $T_{cr}$  en el laboratorio; y esta sería la dificultad para distinguir entre la influencia de la temperatura sobre la inercia cuántica, por un lado, y las fluctuaciones térmicas, por el otro, las cuales también destruyen la coherencia cuántica (el comportamiento cuántico). Hay que decir, no obstante, que aunque el ruido térmico esté en todas partes y también puedan presentarse algunos mecanismos de decoherencia, la SQM ofrece una explicación complementaria para entender de manera más completa la influencia de la temperatura sobre los sistemas físicos. En particular, por encima de una temperatura crítica  $T_{cr}$  se tendría  $I_q \geq I_{cr}$ , por lo que el sistema pasaría a ser clásico y perdería sus "habilidades" cuánticas, como realizar transiciones



de efecto túnel, y similares. Por debajo de la temperatura crítica, sin embargo, el sistema podría recobrar el comportamiento cuántico, siempre que se lo permitiesen las fluctuaciones térmicas, y con este también la capacidad de hacer dichas transiciones.

Desafortunadamente, no podemos seguir el mismo procedimiento aumentando y disminuyendo la intensidad del campo gravitatorio, a pesar de que la gravitación se lleva considerando desde los años ochenta como una posible causa del colapso de la función de ondas o de la decoherencia [5], [6], [7]. De acuerdo con la SQM, aumentando la intensidad del campo gravitatorio se produciría un incremento de la inercia cuántica  $I_q$  también, por lo cual sería posible que las oscilaciones cuánticas de un sistema se detuviesen al alcanzar el campo gravitatorio una intensidad lo suficientemente elevada. Esta posibilidad tiene implicaciones muy interesantes para los objetos astrofísicos con campos gravitatorios muy intensos, pues provee un mecanismo eficiente para la captura de electrones por los protones de los núcleos atómicos, convirtiendo estos en neutrones, como decíamos antes.

El efecto de los campos eléctricos y magnéticos sobre la inercia cuántica  $I_q$  también debería investigarse a través de experimentos de interferometría, y también podrían considerarse otros test, como el experimento de Stern—Gerlach. De hecho, muchos experimentos se han realizado y se han propuesto, en las últimas dos décadas, con el objetivo de investigar la transición del comportamiento cuántico al clásico [3], [8], [9], [10]. Aunque esos experimentos se diseñaron para probar la teoría de la decoherencia o los llamados modelos del

colapso de la función de ondas, también pueden aplicarse para probar la SQM; es decir, para determinar o estimar los valores de la inercia cuántica crítica  $I_{cr}$  a partir de una masa crítica  $M_{cr}$ , para condiciones ambientales fijas, o vía una temperatura crítica  $T_{cr}$ , o los valores críticos de otros parámetros físicos.

Una observación importante sobre los posibles efectos de la inercia cuántica  $I_q$  en los experimentos, es que en algunos de ellos solo se quiere obtener cierta información de los sistemas, pero sin apenas perturbarlos. Estas mediciones se denominan "débiles", y los experimentos que las hacen normalmente constan de una medición débil de una partícula seguida de una medición ordinaria de su posición, haciéndola chocar contra una pantalla o un detector [11]. En mi opinión, las mediciones débiles podrían perturbar un sistema cuántico mucho más de lo que piensan los investigadores debido a la inercia cuántica  $I_q$ ; por ejemplo, deteniendo los saltos cuánticos entre las posiciones disponibles, de manera que las partículas podrían continuar su camino como si fuesen bolitas diminutas, siguiendo trayectorias clásicas continuas que pueden confundirse con trayectorias bohmianas, que también son continuas.

Termino este artículo con la sugerencia de que los fenómenos físicos a muy bajas temperaturas, como la superconductividad, la superfluidez y los condensados de Bose—Einstein, así como los sistemas mesoscópicos, deberían reanalizarse a la luz de la SQM y su inercia cuántica  $I_q$ . Y lo mismo puede decirse de la radiación no—térmica emitida por las estrellas de neutrones, pues parte de ella podría ser la radiación sincrotrón que describe la SQM,

acompañando la conversión de los átomos en neutrones, contribuyendo así a la formación de estas estrellas.

#### Referencias:

- [1] Gato—Rivera B. "Scan Quantum Mechanics: Quantum Inertia Stops Superposition", arXiv: 1512.03093, 2015.
- [2] Gato—Rivera B. "Quantum Inertia Stops Superposition: Scan Quantum Mechanics", J. Phys.: Conf. Ser. 880, 012032, 2017.
- [3] Hornberger K. et al. "Colloquium: Quantum Interference of Clusters and Molecules", Rev. Mod. Phys. 84, 157, 2012.
- [4] Dirac P. A. M. *The Principles of Quantum Mechanics* (The International Series of Monographs on Physics), Oxford: Clarendon Press, 1930.
- [5] Penrose R. "On gravity's role in quantum state reduction", Gen. Rel. and Grav. 28, 581, 1996.
- [6] Singh T. P. "Possible role of gravity in collapse of the wave—function: a brief survey of some ideas", J. Phys.: Conf. Ser. 626, 012009, 2015.
- [7] Diósi L. "Gravitation and quantummechanical localization of macroobjects", Phys. Lett. A 105, 199, 1984.
- [8] Hornberger K. et al. "Collisional decoherence observed in matter wave interferometry", Phys. Rev. Lett. 90, 160401, 2003.
- [9] Bassi A. et al. "Models of wave—function collapse, underlying theories, and experimental tests", Rev. Mod. Phys 85, 471, 2013.
- [10] Bahrami M. and Bassi A. "Proposing new experiments to test the quantum—to—classical transition", J. Phys.: Conf. Ser. 626,

012006, 2015.

[11] Kocsis S. et al. "Observing the Average Trajectories of Single Photons in a Two—Slit Interferometer", Science 332, 1170, 2011.

[Beatriz Gato Rivera](#).

Doctora en Física Fundamental.

Científica Titular en el Instituto de Física Fundamental (IFF—CSIC).

## Capítulo 16

### Superposición cuántica y oscilaciones de partículas neutras.

Sin duda, una de las concepciones más popularmente ligadas a la Mecánica Cuántica tiene que ver con la incertidumbre que ésta plantea en comparación con la formulación determinista de la física clásica<sup>39</sup>. El famoso principio de indeterminación de Heisenberg nos dice que no podemos conocer con precisión arbitraria dos variables que caracterizan el movimiento de una partícula como son su momento lineal (esencialmente su velocidad) y su posición, sino que existe una relación entre las incertidumbres asociadas a ambas magnitudes. Este principio se generaliza en una limitación que se aplica a la medida de diferentes pares de magnitudes o propiedades observables de un sistema físico. Solo en algunos casos sí será posible conocer propiedades con precisión de forma simultánea. El origen de todo esto se encuentra en el problema de la medida en la Mecánica Cuántica, que establece una conexión entre el estado en el que se encuentra el sistema cuántico y lo que observamos de él. Esta relación es diferente a la existente en la física clásica y por eso nos conduce a situaciones aparentemente paradójicas, como que un sistema no tendría definida una propiedad hasta que no la medimos. Esta visión ha dado lugar a una gran confusión dado que la influencia de la medida puede llevar a pensar en la imposibilidad

---

<sup>39</sup>Aunque, en muchos aspectos, la física cuántica es tan determinista como la clásica.

de una ciencia objetiva, sin la intervención del observador. Se trata de ideas que aun hoy en día suscitan diversidad de opiniones y que, en muchos casos, la comunidad científica ha preferido evitar y centrarse en el famoso "cállate y calcula" de David Mermin, aunque atribuido erróneamente a Richard Feynman [1]. En este artículo seguiremos esta máxima de Mermin y, dejando de lado los aspectos epistemológicos de Mecánica Cuántica y sus interpretaciones, nos centraremos en una de sus consecuencias: la oscilación de partículas neutras.

Uno de los principios fundamentales de la Mecánica Cuántica consiste en la interpretación del estado de un sistema físico como superposición de estados con propiedades definidas. Si un cierto sistema puede encontrarse en diferentes estados en los que alguna o varias de sus magnitudes físicas toman un valor distinto, hasta el momento en que efectuemos una medida sobre él no podremos saber en cuál de entre todos los estados posibles se encuentra y, por lo tanto, se encontraría potencialmente en todos los estados simultáneamente. Expresado en términos probabilísticos, existirá una cierta probabilidad de que el sistema se encuentre en una de las posibles configuraciones y, en consecuencia, la medida de una de sus propiedades tendría diferentes resultados posibles, cada uno con una probabilidad asignada. De forma equivalente, podría decirse que, en el estado inicial, esta magnitud física no estaría definida, pues una observación o medida podría arrojar diferentes valores. Así, nos encontraríamos con estados de un sistema que no tendrían bien establecidas ciertas magnitudes (estarían formados

por superposiciones cuánticas de estados con valores diferentes de las mismas) pero sí podrían tener asignado un valor preciso de otro observable, lo cual nos llevaría de nuevo al principio de incertidumbre de Heisenberg, tal y como hemos descrito al inicio. Ciertas parejas de magnitudes podrían estar bien definidas simultáneamente, mientras que no sería posible para otros pares de observables, que solo podríamos medir con una cierta incertidumbre. Sin embargo, la consecuencia más interesante de la superposición sería que, bajo ciertas condiciones, las propiedades iniciales del sistema podrían cambiar (oscilar entre los diferentes valores posibles) debido únicamente a la existencia de los estados de superposición cuántica. El ejemplo más notable de esta situación es la oscilación de partículas neutras, como los kaones neutros o los neutrinos. En los dos casos se trata de resultados muy relevantes, que han llevado a establecer los fundamentos del Modelo Estándar de Física de Partículas, por un lado, y a la primera evidencia de física más allá del Modelo Estándar, por el otro.

### Oscilaciones de kaones neutros.

Los kaones son partículas formadas por dos quarks<sup>40</sup>, que son los constituyentes elementales de los que están compuestos también el protón y el neutrón, y fueron descubiertos en 1947 estudiando los rayos cósmicos [2]. Se trata de las primeras partículas conocidas

---

<sup>40</sup>Las partículas compuestas de dos quarks (en realidad una pareja quark—antiquark) reciben el nombre de mesones.

que contienen un nuevo quark, el quark  $s$ , al cual se asocia un nuevo número cuántico, la *extrañeza*. En el caso de los kaones neutros,  $K^0$  y anti- $K^0$ , el primero de ellos está formado por un quark  $d$  y un antiquark  $s$ , mientras que el segundo se compone de un antiquark  $d$  y un quark  $s$ , de forma que se trata de estados que tienen bien definido el número cuántico *extrañeza*:  $s(K^0) = +1$  y  $s(\text{anti-}K^0) = -1$ .

Los mesones  $K^0$  y anti- $K^0$  se producen en procesos mediados por la interacción fuerte, que conserva *extrañeza* y, por tanto, si las partículas iniciales no contienen quarks  $s$ , las partículas con *extrañeza* han de producirse por pares que compensen la falta de *extrañeza* del estado inicial. Las masas de  $K^0$  y anti- $K^0$ , calculadas por conservación de la energía en su proceso de producción, son iguales y del orden de 1000 veces la masa del electrón. Sabemos también que se trata de partículas inestables y que su desintegración, sin embargo, ocurre por procesos de interacción débil, que no conserva *extrañeza*<sup>41</sup>. Esto quiere decir que, a efectos de la interacción débil,  $K^0$  y anti- $K^0$  son partículas idénticas, ya que la única propiedad que las distingue es irrelevante para este tipo de procesos. Así, la interacción débil puede transformar un tipo de kaón neutro en el otro, dando lugar a la *oscilación de los kaones neutros*, representada en la Figura 1. En este diagrama,  $W$  es una de

---

<sup>41</sup>No existe otra opción, ya que se trata de las partículas extrañas más ligeras que existen y, por tanto, su desintegración no puede conservar la *extrañeza*.



las partículas mediadoras de la interacción débil y  $(u, c, t)^{42}$  son los quarks que podrían producirse en el proceso debido a la mezcla entre quarks. Esta mezcla, parametrizada a través de la matriz de Cabibbo—Kobayashi—Maskawa [3], surge como consecuencia de la discordancia entre los estados de la interacción débil y los estados con masa definida y es la responsable de todos los procesos en los que se dan transmutaciones entre las familias de quarks, como es el caso de las oscilaciones de kaones.

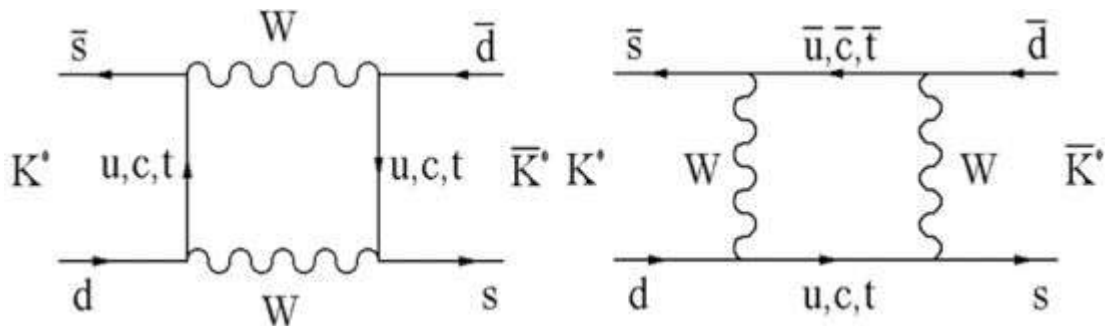


Figura 1. Diagramas de Feynman que representan las oscilaciones de kaones neutros.

De acuerdo con la Figura 1, si partimos por ejemplo de un estado inicial formado exclusivamente por  $K^0$ , al cabo de un rato algunos  $K^0$  se habrán transformado en anti- $K^0$ , de forma que nuestro sistema de kaones estará formado por una combinación de  $K^0$  y anti- $K^0$ , en la que la proporción de cada uno de ellos irá oscilando

<sup>42</sup>Nótese que la existencia del cuarto quark (*charm* o *c*), así como de la tercera generación (quarks *b* y *t*) fue propuesta antes de su descubrimiento a partir del estudio de las oscilaciones de los kaones neutros.

con el tiempo. Por tanto, los estados con energía definida (que no se transforman en otros durante su propagación) y propiedades de desintegración definidas (vida media, por ejemplo), serán diferentes a  $K^0$  y anti- $K^0$ .



*Figura 2. James W. Cronin (izquierda) y Val L. Fitch (derecha), Premio Nobel de Física de 1980 por "el descubrimiento de la violación de los principios fundamentales de simetría en la desintegración de los mesones K neutros". Fuente: [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org).*

Estos nuevos estados, a los que llamaremos  $K^0_L$  y  $K^0_S$  (más adelante veremos por qué) estarán formados por una superposición cuántica o mezcla de los iniciales. Así, vemos que la mezcla de kaones es un fenómeno puramente cuántico que, tal y como sucedía con los

quarks, aparece debido a la existencia de conjuntos de estados con ciertas propiedades bien definidas ( $K^0$  y  $\text{anti-}K^0$  por un lado y  $K^0_L$  y  $K^0_S$  por otro), que pueden utilizarse como base vectorial para describir cualquier estado de nuestro sistema. En este lenguaje, la mezcla no será más que la transformación entre las diferentes bases posibles.

Para acabar de complicar la situación, entraría en juego un tercer observable: las propiedades de transformación bajo la *simetría conjugación de carga—paridad* o simplemente *CP*. Esta simetría establece que las leyes de la física deberían ser las mismas si una partícula se intercambia con su antipartícula a la vez que se invierten sus coordenadas espaciales, y resulta crucial para intentar explicar la asimetría materia—antimateria del universo. En la desintegración de los kaones se observa que  $K^0_S$  tiene una vida media más corta (su nombre procede de *K—short*) y decae a dos piones, que es un estado con  $CP = +1$ , mientras que  $K^0_L$  tiene una vida media más larga (*K—long*) y se desintegra generalmente a tres piones que es un estado con  $CP = -1$ . Por tanto, si se deja evolucionar un haz de kaones neutros, tras un lapso de tiempo cabría esperar que estuviera formado exclusivamente por  $K^0_L$ , de mayor vida media, y que el estado final consistiera siempre en tres piones. Sin embargo, por cada 1000 desintegraciones a tres piones, se observaron también varias desintegraciones a dos piones, indicando una violación de la simetría CP en el proceso. Este resultado implica que las propiedades de transformación bajo la simetría CP no están bien definidas en ninguna de las parejas

mencionadas anteriormente, ( $K^0 - \text{anti-}K^0$ ) y ( $K^0_L - K^0_S$ ). En cambio, existiría una tercera pareja con estas propiedades bien definidas que, en lenguaje de la mecánica cuántica, diríamos son los autoestados del operador CP o estados con CP definida: ( $K^0_1 - K^0_2$ ). Esta observación, realizada en el laboratorio de Brookhaven (Estados Unidos) en 1964 [4], supuso el descubrimiento de la violación de la simetría carga—paridad en las interacciones electrodébiles, y por él recibieron el Premio Nobel de Física de 1980 los físicos estadounidenses James Cronin y Val Fitch.

La observación de Cronin, Fitch y colaboradores demostró la existencia de una violación indirecta de la simetría CP en las interacciones electrodébiles, originada por la mezcla de kaones. Posteriormente, la violación de la simetría CP ha sido observada de forma directa en la desintegración de los kaones neutros en los experimentos KTeV (Fermilab) y NA48 (CERN). Más recientemente se ha observado procesos con violación de CP en desintegraciones de otros sistemas de mesones neutros, como los mesones  $B^0$ , los mesones  $D^0$  y los mesones  $B^0_S$ . Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con la violación de la simetría paridad en las interacciones electrodébiles, que es del 100%, es decir, se viola en todos los procesos, la magnitud de la violación de la simetría CP es extremadamente pequeña. Por tanto, a pesar de que su existencia podría en principio explicar el origen de la asimetría materia—

antimateria del universo<sup>43</sup>, el valor medido experimentalmente queda varios órdenes de magnitud por debajo de la cantidad de violación de CP requerida para explicar el desequilibrio entre la materia y la antimateria observado. Así, si creemos que se llegó hasta el universo actual debido a una violación de la simetría CP, debemos ir a buscar a otro sector, como el de los neutrinos. Esto nos lleva al segundo escenario del que hablaremos en este artículo: las oscilaciones de sabor de los neutrinos.

### Oscilaciones de sabor de los neutrinos.

Los neutrinos son unas de las partículas más abundantes del universo, solo superadas por los fotones. Sin embargo, son también las partículas que más desconocemos y las que han proporcionado la primera evidencia de física más allá del Modelo Estándar. Pero vayamos poco a poco.

Los neutrinos, como su nombre indica, son partículas neutras, sin carga eléctrica, y se producen en procesos mediados por la interacción débil, como la desintegración nuclear de tipo beta o la fusión nuclear. Además, solo interaccionan con la materia a través de este tipo de procesos (son insensibles a la fuerza electromagnética y a la interacción nuclear fuerte), por lo que resulta realmente difícil detectarlos. Esto explica que su

---

<sup>43</sup>Una pequeña diferencia en el comportamiento de la materia y la antimateria en el universo primigenio podría explicar la pequeña asimetría entre ambas que dio lugar al universo dominado por la materia en el que vivimos. Esta diferencia podría ser explicada en términos de la violación de la simetría CP.

descubrimiento se hiciera esperar más de 25 años desde que Wolfgang Pauli postulara su existencia para salvar la conservación de energía en procesos de desintegración nuclear [5]. Hoy sabemos que existen tres tipos de neutrinos con propiedades de interacción bien definidas: el neutrino electrónico o  $\nu_e$ , que interacciona por procesos débiles de corriente cargada con el electrón, el neutrino muónico  $\nu_\mu$ , que lo hace con el muon, y el neutrino tau  $\nu_\tau$  que interacciona por corrientes cargadas con el leptón tau. Por otro lado, según el Modelo Estándar, los neutrinos son partículas sin masa, igual que los fotones, aunque, como veremos, los neutrinos han venido acompañados de algunas sorpresas.



*Figura 3 Vista del experimento de Homestake (izquierda) y su impulsor, Raymond Davis Jr. (derecha), Premio Nobel de Física de 2002 por "sus contribuciones pioneras a la detección de neutrinos cósmicos". Fuente: [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org).*

El neutrino electrónico fue descubierto por Frederick Reines y Clyde Cowan en 1956 en la planta nuclear de Savannah River (Georgia, Estados Unidos)<sup>44</sup>. En concreto, este primer neutrino observado (indirectamente, pues es la única forma de detectarlos) era un antineutrino electrónico. Poco tiempo después, Raymond Davis Jr. conseguía observar neutrinos electrónicos producidos en el Sol (conocidos como neutrinos solares) desde su experimento situado en las profundidades de una mina de oro en Homestake (Dakota del Sur, Estados Unidos).

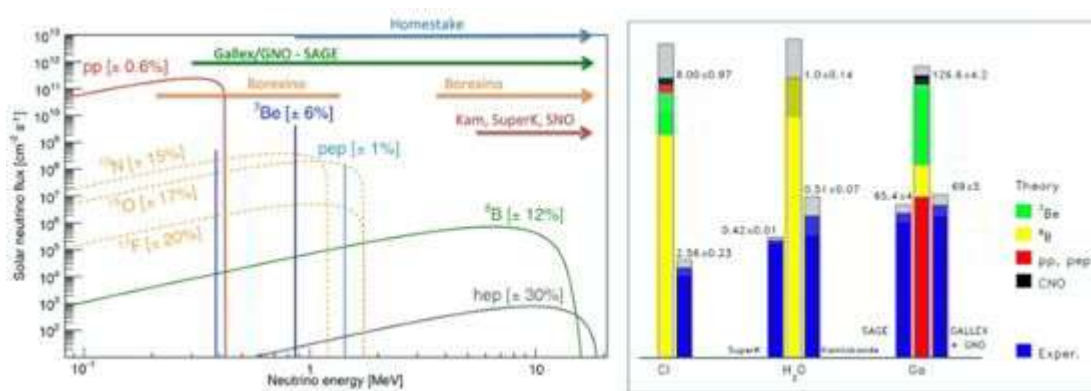


Figura 4. Izquierda: espectro de neutrinos generados en diferentes reacciones nucleares en el Sol [7]. Derecha: número de neutrinos solares observados en los experimentos Homestake, Kamiokande y Super—Kamiokande, GALLEX+GNO y SAGE (barras azules) en comparación con las predicciones teóricas del Modelo Estándar Solar [8].

<sup>44</sup>F. Reines recibió el Premio Nobel de Física en 1995 por este descubrimiento.

Este experimento fue concebido para probar la validez de los modelos estelares según los cuales el Sol (y el resto de estrellas) brillan debido a los procesos nucleares de fusión que tienen lugar en su interior, en los cuales se emite un número ingente de neutrinos, del orden de 10. 000 millones por segundo y por centímetro cuadrado.

Sin embargo, las primeras medidas del experimento Homestake, realizadas en 1968 arrojaron solo un tercio del número esperado de neutrinos. De esta forma comenzó el conocido como *problema de los neutrinos solares*. Esta discrepancia entre las predicciones teóricas y las observaciones experimentales fue atribuida en primer lugar al modelo solar, dada la complejidad del mismo. Sin embargo, este modelo, desarrollado por el astrofísico John Bahcall, fue refinándose con el tiempo y otras de sus predicciones fueron validadas de forma independiente[6]. Del mismo modo, la posible existencia de errores experimentales fue descartada cuando nuevos experimentos utilizando diferentes técnicas siguieron observando un déficit en el número de los neutrinos solares medidos en la Tierra. Así pues, tras décadas de esfuerzos teóricos y experimentales, parecía que la única solución posible era que alguna cosa estuviera ocurriendo a los neutrinos desde su producción en el Sol hasta su llegada a la Tierra. Diversas soluciones fueron propuestas, aunque la definitiva llegó como respuesta a otra anomalía, la observada en los neutrinos atmosféricos.

Los neutrinos atmosféricos se producen tras la interacción de rayos cósmicos, en su mayoría protones o núcleos ionizados de átomos



ligeros, con núcleos de nitrógeno y oxígeno de la atmósfera terrestre. Estos procesos desatan lluvias hadrónicas de partículas que generan un gran número de partículas inestables como piones o kaones que acaban desintegrándose a muones, y éstos a electrones y neutrinos, en una proporción aproximada de dos neutrinos muónicos por cada neutrino electrónico. Este flujo de partículas comenzó a estudiarse como ruido de fondo en experimentos de búsqueda de desintegración del protón, pero la discrepancia entre las predicciones teóricas y las observaciones pronto lo convirtieron en un objeto central de estudio. Y es que el número de neutrinos muónicos detectados (puntos en el panel derecho de la Figura 5) era sensiblemente menor al indicado por los cálculos teóricos (barras horizontales) y, además, dependía del ángulo de llegada de los neutrinos al detector, de forma que el déficit era más importante en el flujo de neutrinos que llegaba desde la vertical inferior del detector, es decir, desde el otro lado de la Tierra ( $\cos \Theta = -1$ ), tras haber viajado mayores distancias. Los resultados para los neutrinos electrónicos, en cambio, eran compatibles con las predicciones teóricas (panel central en la Figura 5).

Tal y como sucedió en el caso de los neutrinos solares, diferentes mecanismos fueron propuestos para explicar la desaparición de los neutrinos muónicos en el flujo atmosférico.

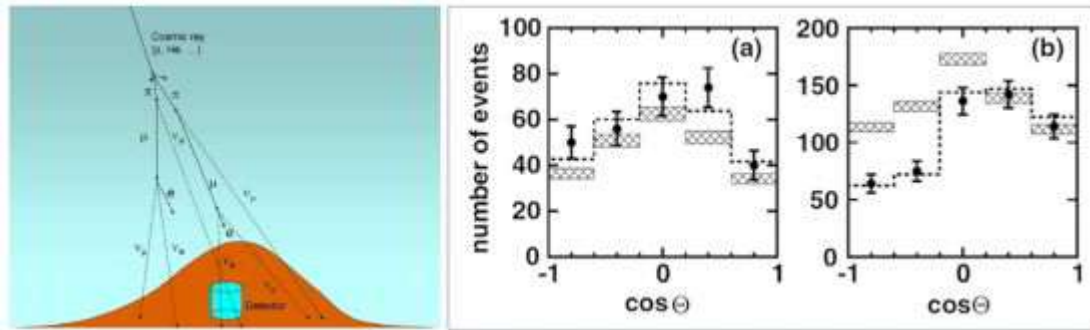


Figura 5. Producción de neutrinos por la interacción de rayos cósmicos en la atmósfera (izquierda). Resultados del experimento Super—Kamiokande (derecha): distribución de neutrinos electrónicos (a) y de neutrinos muónicos (b) en función de la dirección de llegada al detector. Fuente: [9].

Finalmente, los resultados más precisos del experimento Super—Kamiokande, en Japón, indicaron que la única solución compatible con las observaciones eran las *oscilaciones de sabor* en el canal  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ . Esta transformación explicaba por qué el número de neutrinos muónicos era menor del esperado sin afectar a las medidas de neutrinos electrónicos, explicando además el patrón de energías y distancias observado. Las implicaciones de este resultado son enormes, ya que las oscilaciones de sabor de los neutrinos pueden producirse únicamente si éstos tienen masa, en contra de lo que predice el Modelo Estándar de física de partículas. En consecuencia, las oscilaciones de neutrinos proporcionaron la primera prueba de la existencia de nueva física, poniendo de manifiesto la necesidad de extender el Modelo Estándar con la incorporación de nuevos mecanismos capaces de explicar el origen de la masa de los

neutrinos.

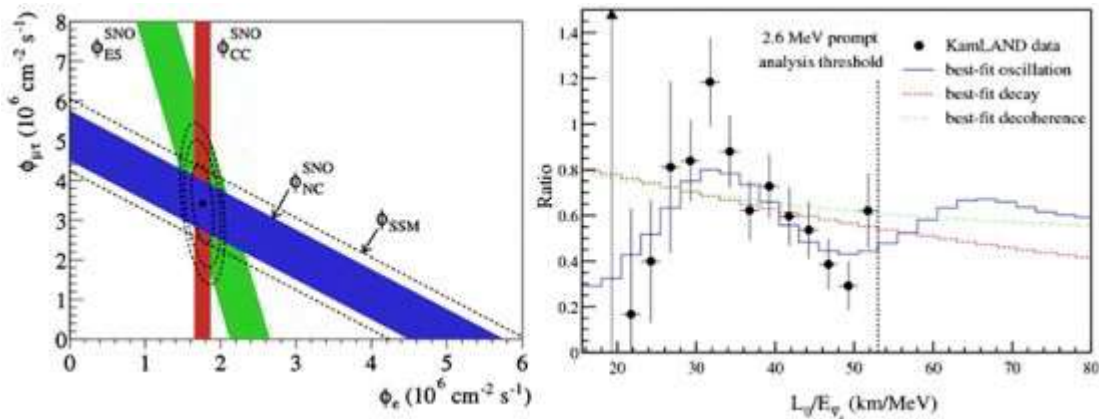


Figura 6. Izquierda: flujo de neutrinos electrónicos y de tipo muónico y tau observados en SNO, obtenidos a partir de las interacciones de corrientes cargadas (CC), corrientes neutras (NC) y de la dispersión elástica con electrones (ES, sensible a corrientes cargadas y neutras simultáneamente). Se indica también la predicción del SSM [10]. Derecha: cociente entre el número observado y el esperado de antineutrinos electrónicos en KamLAND (puntos), explicado únicamente en términos de oscilaciones de sabor (histograma azul) [11].

Tras la resolución de la anomalía de los neutrinos atmosféricos en el detector japonés Super—Kamiokande, otros dos experimentos realizaron observaciones que consiguieron explicar también el problema de los neutrinos solares. Por un lado, SNO, el Observatorio de Neutrinos de Sudbury (Ontario, Canadá) fue capaz de medir de forma separada los neutrinos electrónicos (producidos en el Sol) y del resto de sabores utilizando procesos débiles de

corrientes cargadas (sensibles solo a los  $\nu_e$ ) y de corrientes neutras (sensibles también a  $\nu_\mu$  y  $\nu_\tau$ ), demostrando que no había ningún déficit en el número de neutrinos solares que llegaban a la Tierra [10]. El detector observaba todos los neutrinos esperados teóricamente según el Modelo Estándar Solar (SSM), solo que, durante su camino hacia nosotros, algunos de los  $\nu_e$  (aproximadamente dos tercios) habían mutado a neutrinos de sabor diferente,  $\nu_\mu$  y  $\nu_\tau$  (Figura 6, panel izquierdo). Por tanto, el misterio estaba parcialmente resuelto, y digo parcialmente porque se sabía que se habían transformado, pero no cómo lo habían hecho, ya que diferentes mecanismos podían explicar satisfactoriamente la mutación. Entonces llegó el resultado del experimento de reactor KamLAND, también en Japón. Su objetivo consistía en buscar oscilaciones de antineutrinos electrónicos, pues su existencia supondría la confirmación del mecanismo de oscilación como solución al problema de los neutrinos solares. En 2002, KamLAND observó un número de anti- $\nu_e$  menor del esperado y compatible con el mecanismo de oscilaciones de sabor, y dos años después obtuvo la prueba irrefutable de las oscilaciones: una variación del número de neutrinos con la energía y la distancia recorrida que solo este mecanismo podía explicar (Fig, 6, panel derecho). De esta forma quedó también confirmada la existencia de las oscilaciones de sabor en el sector de los neutrinos solares.



*Figura 7. Takaaki Kajita (izquierda) y Arthur McDonald (derecha), galardonados con el Premio Nobel de Física de 2015 por "el descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos, que muestran que los neutrinos son partículas con masa". Fuente: [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org).*

Este resultado, junto el descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos atmosféricos sirvió para otorgar el Premio Nobel de Física de 2015 a Takaaki Kajita y Arthur McDonald, máximos responsables de los experimentos Super—Kamiokande y SNO, respectivamente. Posteriormente, el fenómeno de oscilaciones de neutrinos ha sido observado en una gran variedad de experimentos, utilizando fuentes naturales, como los neutrinos solares y atmosféricos, así como fuentes artificiales, en experimentos de

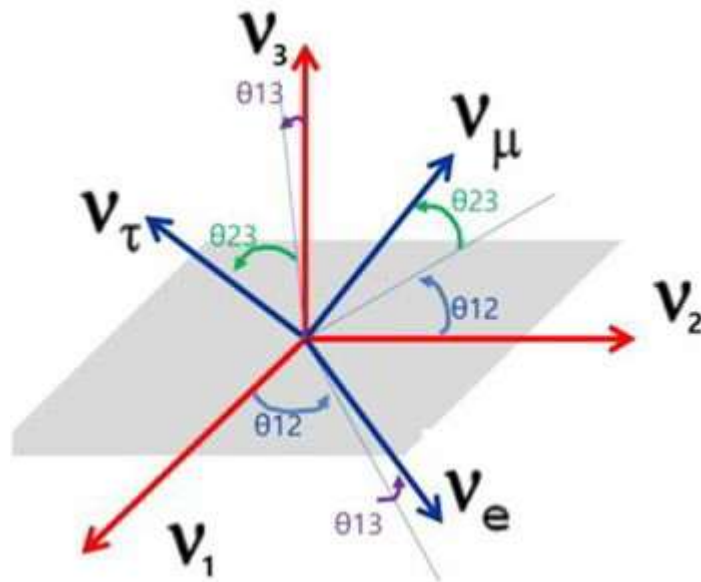
reactor y acelerador.

Pero, ¿cuál es el mecanismo por el que se producen las oscilaciones de neutrinos? Como hemos comentado anteriormente, la clave está en su masa, y en la existencia de diferentes estados con ciertas propiedades definidas y otras no, como vimos para los kaones. Si los neutrinos son partículas masivas, los estados de neutrinos con masa definida, a los que nos referiremos como  $(\nu_1, \nu_2, \nu_3)$  serán, en general, diferentes a los estados con sabor definido,  $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ . Así, tendremos nuevamente dos bases diferentes a partir de las cuales poder describir cualquier estado físico de un sistema de neutrinos. Del mismo modo, cada uno de los estados de una de las bases se podrá expresar como una mezcla o superposición cuántica de los estados de la otra base. En este caso, la mezcla entre los neutrinos se parametriza a través de la matriz de mezcla leptónica, también conocida como matriz PMNS (Pontecorvo—Maki—Nakagawa—Sakata) [3]:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

donde se ha usado notación  $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$  y  $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$  para los 3 ángulos de rotación  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$  y  $\theta_{13}$  que definen la transformación unitaria. El cuarto parámetro,  $\delta$ , es el responsable de la violación de la simetría CP en el sector de los neutrinos y, por tanto, de él depende que los neutrinos y sus antipartículas, los antineutrinos,

se comporten de forma diferente.



*Figura 8 Representación gráfica de la mezcla de neutrinos*

Los neutrinos se producen en procesos de interacción débil y, por tanto, en la producción tendremos estados con un sabor definido: electrónico, muónico o tau que, a su vez, consistirán en una combinación de los estados con masa definida ( $v_1, v_2, v_3$ ), según la matriz de mezcla de la Eq. (1). Puesto que sus masas no son exactamente iguales, la evolución de cada  $v_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) a medida que van propagándose por el espacio es ligeramente diferente, lo cual resulta en una proporción de  $v_1, v_2$  y  $v_3$  distinta a la inicial y, por tanto, un estado de sabor definido diferente. De esta forma, se habría producido una oscilación entre el neutrino inicial, con un sabor concreto  $v_\alpha$ , y el final con un sabor diferente,  $v_\beta$ . La clave de esta oscilación se encuentra en que los neutrinos tengan masa y en

que, además, estas masas sean diferentes. De hecho, la probabilidad de oscilación de los neutrinos dependerá, por un lado, de los ángulos de mezcla de la Eq. (1) y la Figura 8, y de las diferencias entre sus masas, por otro. En ciertos casos es posible simplificar el cálculo de la probabilidad de oscilación considerando solo dos familias de neutrinos, y el resultado sería el siguiente:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right), \quad (2)$$

donde  $\theta$  sería uno de los ángulos de la matriz de mezcla,  $L$  la distancia viajada por el neutrino entre su producción y su detección,  $E$  su energía, y  $\Delta m^2$  la diferencia de masas al cuadrado entre dos de los estados con masa definida:  $(m_i^2 - m_j^2)$ . Por tanto, vemos que las oscilaciones dependen de las diferencias de masas entre los neutrinos, pero no de su escala de masa absoluta, así que no pueden proporcionar información acerca de la misma. A día de hoy se ha conseguido medir con muy buena precisión el valor absoluto de las dos diferencias de masas entre los tres neutrinos, pero aún no hemos podido establecer el signo de una de ellas, de forma que los estados de masa se pueden organizar de dos formas posibles, tal y como indica la Figura 9. La primera de ellas se conoce como orden normal (NO, izquierda) y la segunda como orden inverso (IO, derecha). Los colores indican la fracción de los estados de sabor ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) contenida en los estados de masa ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ), en función de los parámetros de oscilación.



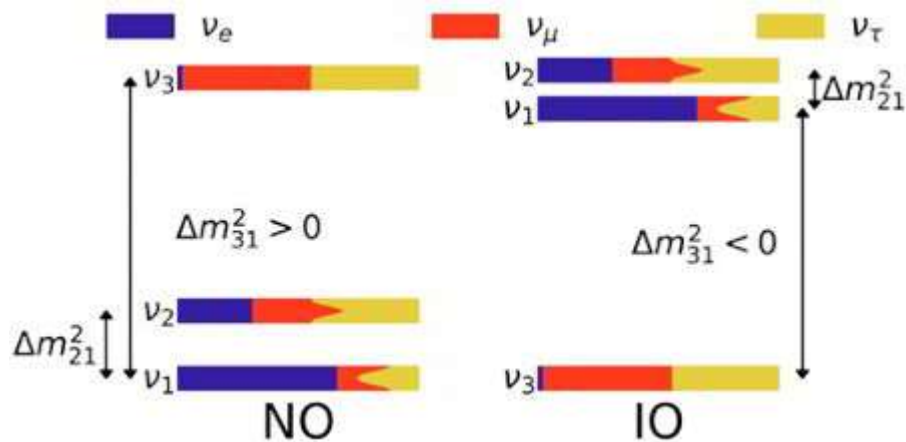


Figura 9. Espectros de masas de neutrinos posibles [12].

Utilizando los resultados de todos los experimentos de oscilaciones de neutrinos y a través de los llamados análisis globales de oscilaciones, es posible combinar toda la información disponible y explotar la complementariedad de los diferentes conjuntos de datos para obtener medidas muy precisas de la mayoría de los parámetros responsables de las oscilaciones de neutrinos. Esto nos ha permitido determinar los valores de los ángulos de mezcla  $\theta_{ij}$  y las diferencias de masas  $\Delta m_{ij}^2$  con precisiones de entre el 1 y el 5%, ver Tabla 1.

parameter	best fit $\pm 1\sigma$	$3\sigma$ range
$\Delta m_{21}^2$ [ $10^{-5}\text{eV}^2$ ]	$7.50^{+0.22}_{-0.20}$	6.94–8.14
$ \Delta m_{31}^2 $ [ $10^{-3}\text{eV}^2$ ] (NO)	$2.55^{+0.02}_{-0.03}$	2.47–2.63
$ \Delta m_{31}^2 $ [ $10^{-3}\text{eV}^2$ ] (IO)	$2.45^{+0.02}_{-0.03}$	2.37–2.53
$\sin^2\theta_{12} / 10^{-1}$	$3.18 \pm 0.16$	2.71–3.69
$\sin^2\theta_{23} / 10^{-1}$ (NO)	$5.74 \pm 0.14$	4.34–6.10
$\sin^2\theta_{23} / 10^{-1}$ (IO)	$5.78^{+0.10}_{-0.17}$	4.33–6.08
$\sin^2\theta_{13} / 10^{-2}$ (NO)	$2.200^{+0.069}_{-0.062}$	2.000–2.405
$\sin^2\theta_{13} / 10^{-2}$ (IO)	$2.225^{+0.064}_{-0.070}$	2.018–2.424
$\delta/\pi$ (NO)	$1.08^{+0.13}_{-0.12}$	0.71–1.99
$\delta/\pi$ (IO)	$1.58^{+0.15}_{-0.16}$	1.11–1.96

*Tabla 1: Determinación de los parámetros de oscilación de neutrinos a partir de un ajuste global a todos los resultados de experimentos solares, atmosféricos, de reactor y de acelerador [13].*

Las medidas de la fase de violación de CP,  $\delta$ , todavía no son tan precisas, pero se espera una mejora en el futuro cercano gracias a los experimentos de acelerador actuales T2K y NOvA y, a más largo plazo, en los futuros experimentos DUNE y Hyper—Kamiokande. Del mismo modo, nuevos resultados de estos experimentos, así como de los telescopios de neutrinos IceCube y KM3NeT permitirán establecer el orden correcto del espectro de masas de los neutrinos, de entre los dos mostrados en la Figura 9. De esta forma quedarán resueltas las incógnitas pendientes relativas al mecanismo de oscilación de los neutrinos, lo cual permitirá nuevos avances en las búsquedas de física más allá del Modelo Estándar.

Y aquí acaba este viaje que nos ha llevado desde los fundamentos de

la mecánica cuántica hasta dos grandes descubrimientos que han servido, en primer lugar, para establecer los fundamentos del Modelo Estándar de física de partículas y, unas décadas después, para ponerlo en tela de juicio e impulsar la búsqueda de nuevas teorías capaces de acomodar las masas de los neutrinos. Queda pendiente también la conexión de la violación de la simetría CP en el sector de los neutrinos con la asimetría bariónica del universo. A través del estudio de las oscilaciones de neutrinos y de antineutrinos en los experimentos actuales y de nueva generación, en unos años seremos capaces de establecer con precisión la magnitud de esta asimetría CP y aclarar si podría tratarse de un ingrediente capaz de explicar la naturaleza de nuestro universo.

#### Referencias:

- [1] N. David Mermin, [Physics Today 57,5,10 \(2004\)](#).
- [2] G. Rochester, C. Butler, [Nature 160,855-857 \(1947\)](#).
- [3] P. A. Zyla *et al.* (Particle Data Group), [Prog.Theor.Exp.Phys.083C01 \(2020\)](#).
- [4] J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, R. Turlay, [Phys.Rev.Lett.13 138-140 \(1964\)](#).
- [5] <https://www.symmetrymagazine.org/article/march-2007/neutrino-invention>
- [6] J. N. Bahcall, [Nucl.Phys.Proc.Suppl.118,77-86 \(2003\)](#), [[arXiv:astro-ph/0209080v2](#)].
- [7] G. Orebi Gann, K. Zuber, D. Bemmerer, A. Serenelli, [Ann.Rev.Nucl.Part.Sci.71,491-528 \(2021\)](#).

- [8] W. Haxton, R. Hamish Robertson, A. Serenelli, [Ann.Rev.Astron.Astrophys.51,21-61 \(2013\)](#).
- [9] T. Kajita, [Rep.Prog.Phys.69,1607 \(2006\)](#).
- [10] Q. R. Ahmad et al. (SNO Collaboration), [Phys.Rev.Lett.89,011301 \(2002\)](#).
- [11] T. Araki et al. (KamLAND Collaboration), [Phys.Rev.Lett.94,081801 \(2005\)](#).
- [12] P. De Salas, S. Gariazzo, O. Mena, C. A. Ternes, M. Tórtola, [Front.Astron.Space Sci.5,36 \(2018\)](#).
- [13] P. De Salas et al. , [JHEP 02,071 \(2021\)](#).  
[\[https://globalfit.astroparticles.es/](https://globalfit.astroparticles.es/)

[Mariam Tórtola Baixauli](#).

Doctora en Física.

Profesora Contratada Doctora en el Instituto de Física Corpuscular  
(IFIC—CSIC—UV).



*Fotografía tomada en el 7º Congreso Solvay celebrado en 1933, "Estructura del núcleo atómico". De pie, de izda. a dcha.: Émile Henriot, Jean Perrin, Jean Frédéric Joliot—Curie, Werner Heisenberg, Hendrik A. Kramers, E. Stahel, Enrico Fermi, Ernest Walton, Paul Dirac, Peter Debye, Nevill F. Mott, Blas Cabrera, George Gamow, Walther Bothe, Patrick M. Stuart Blackett, M. S. Rosenblum, Jacques Errera, Ed. Bauer, Wolfgang Pauli, Jules Émile Verschaffelt, Max Cosyns, Edouard Herzen, John Cockcroft, C. D. Ellis, Rudolf Peierls, Auguste Piccard, Ernest Lawrence, Léon Rosenfeld. Sentados, de Izda. a dcha.: Erwin Schrödinger, Irène Joliot—Curie, Niels Bohr, Abram F. Ioffe, Marie Curie, Paul Langevin, Owen Willans Richardson, Ernest Rutherford, Théophile de Donder, Maurice de Broglie, Louis de Broglie, Lise Meitner, James Chadwick. [Proceedings 1933](#)*

## Capítulo 17

### Cosmología Cuántica

En las noches despejadas, y lejos de la iluminación terrestre, tenemos el privilegio de poder presenciar una de las maravillas de la Naturaleza: el cielo estrellado. Sin embargo, estamos tan acostumbrados a verlo, que casi pudiera pasarnos desapercibido, o parecernos una mera obra de arte inanimada localizada sobre nuestros rostros. De vez en cuando conviene detenerse y pensar qué es lo que estamos viendo al observar el cielo. Nuestros ojos ven luz, la luz emitida por diferentes astros que están lejísimos de aquí. Para medir esas enormes distancias que nos separan de otras estrellas o galaxias usamos habitualmente la unidad del año—luz, y no en vano. El año—luz literalmente representa la distancia recorrida por la luz durante un año. Porque la luz viaja muy rápido, tanto que no hay ninguna fuente de información que viaje más rápido que lo que viaja la luz en los huecos vacíos del Universo, pero no lo hace infinitamente rápido. Para recorrer las distancias que nos separan de los astros que observamos en el cielo, los rayos de luz deben hacer un paciente viaje que les lleva tiempo, mucho tiempo si vienen de muy lejos.

De este modo, cuando miramos al cielo, lo que estamos viendo son fotos del pasado. Por ejemplo, la estrella Betelgeuse se nos muestra como era ella hace 642, 5 años, pues fue entonces cuando emitió la luz que hoy detectamos. Otro ejemplo representativo es el de la galaxia Andrómeda, que es el objeto visible a simple vista más

lejano de la Tierra. Andrómeda se encuentra a algo más de dos millones y medio de años—luz, lo que implica que al mirarla vemos una imagen de ella hace 2, 5 millones de años. Y así, de igual modo que "viajamos" a nuestra niñez observando fotos de cuando éramos pequeños, cuando detectamos con nuestros telescopios la luz emitida por objetos astronómicos que se sitúan más y más lejos, lo que conseguimos es "viajar" más y más al pasado del Universo. El telescopio James Webb, lanzado recientemente, representará un buen ejemplo de esto pues, si sus mecanismos no fallan, será capaz de mirar tan atrás en el tiempo que registrará el nacimiento de las primeras galaxias.

Los fotones de luz se propagan todos a la misma velocidad, pero con diferentes frecuencias, dependiendo de su energía. Así, la luz que perciben nuestros ojos la conforman fotones que vibran en una banda de frecuencias concreta del espectro electromagnético, que llamamos el espectro visible por razones obvias. Para detectar luz o radiación electromagnética a otras frecuencias disponemos de diferentes aparatos como detectores, antenas o telescopios. Esas frecuencias van desde los rayos gamma (los más energéticos) a las ondas de radio (menos energéticas), pasando por los rayos X, los rayos ultravioleta, el espectro visible, el infrarrojo y las microondas.

La señal más antigua que reciben nuestras modernas antenas es una radiación electromagnética muy particular que nos llega en una frecuencia de la banda de las microondas. Esta radiación no nos viene de una dirección concreta del cielo, como por ejemplo la luz de Betelgeuse, sino que la recibimos en todas direcciones y por ello lo

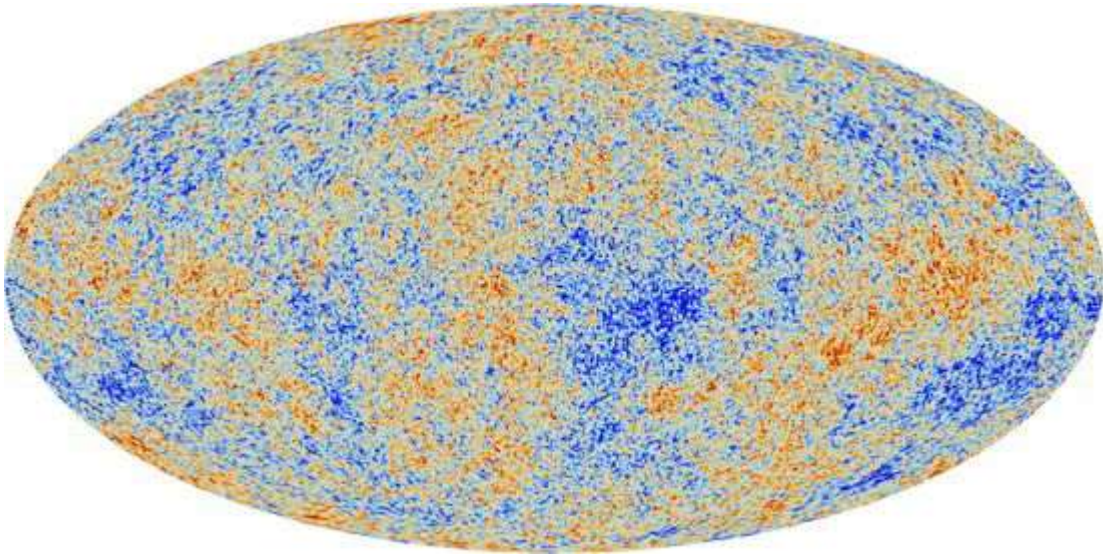
llamamos fondo cósmico de microondas, o CMB por sus siglas en inglés (Cosmic Microwave Background). El hecho de que esta radiación nos venga de todas direcciones significa que no proviene de un astro en concreto, sino que se ha emitido por igual y a la vez en todos los puntos del Universo. ¿Cómo es esto posible? Bien, resulta que el CMB está formado por fotones de luz que fueron emitidos cuando el Universo era muy joven, cuando protones y electrones se recombinaron dando lugar a átomos neutros de hidrógeno. Antes de dicha recombinación, el plasma primigenio de protones y electrones cargados eléctricamente chocaba constantemente con los fotones de luz, no permitiendo que éstos se propagaran libremente. Pero el Universo se iba expandiendo, y su temperatura iba disminuyendo, hasta que se dieron las condiciones para que los átomos neutros se formaran. Éstos son transparentes, en tanto en cuanto no chocan con los fotones. Entonces en ese momento de la recombinación, que ocurrió a la vez en todo el Universo, una gran cantidad de pululantes fotones dejaron de verse atrapados por los choques con otras partículas y pudieron emitirse libremente. Esta radiación de fondo nos llega constantemente desde aquellos rincones del Universo tan alejados de nosotros que solo ahora los fotones allí emitidos en el momento de la recombinación han conseguido alcanzarnos.

Los fotones del CMB que medimos hoy en día se estima que han viajado más de trece mil quinientos millones de años hasta llegar a La Tierra. En su largo viaje han perdido mucha energía, pero, como ya hemos indicado, afortunadamente nos llegan en frecuencias



medibles por nuestros instrumentos. Los primeros científicos que los detectaron fueron el físico Arno Penzias y el radio astrónomo Robert Wilson, hace ya más de cincuenta años [1], por lo que recibieron el premio Nobel de Física en 1978.

En las últimas décadas diferentes misiones experimentales como COBE, WMAP y Planck [2] han medido progresivamente el CMB con mayor y mayor precisión. Éste presenta un espectro muy homogéneo, es decir muy regular, en todas las direcciones del cielo, aunque si lo medimos con suficiente precisión distinguimos pequeñas diferencias o anisotropías. Esas pequeñas diferencias en las frecuencias de los fotones que forman el CMB son una fuente muy valiosa de información pues registran las irregularidades del Universo en aquellos momentos tan tempranos de la recombinación. El CMB es entonces como una huella dactilar que codifica cómo eran los pliegues del Universo temprano. Nos proporciona una fotografía muy antigua del Universo, la mejor que tenemos actualmente de sus etapas primitivas.



*Figura 1 Proyección de las anisotropías del fondo cósmico de microondas medidas por la misión Planck. Fuente:*

[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2013/03/Planck\\_CM](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2013/03/Planck_CM)

### B

La medición precisa del CMB resulta muy importante a la hora de desarrollar un buen modelo cosmológico, pues permite comparar las predicciones teóricas derivadas del modelo con datos observacionales que codifican la física del Universo temprano. Actualmente el modelo teórico más aceptado para explicar la evolución del Universo, desde sus etapas más primitivas hasta nuestros días, es el llamado modelo cosmológico estándar o modelo  $\Lambda$ -CDM. Este nombre responde al hecho de que la concordancia de las predicciones teóricas del modelo con las observaciones nos lleva a concluir que en la actualidad el contenido energético y material del Universo estaría principalmente formado por una componente de energía oscura (o constante cosmológica) denotada con la letra

griega  $\Lambda$  (lambda), y de una componente de materia oscura llamada CDM por sus siglas en inglés (cold dark matter). La primera daría cuenta de en torno a un 70% del contenido energético del Universo, y es responsable de que éste se expanda aceleradamente, mientras que la materia oscura representaría en torno al 25% y sería un tipo de materia que prácticamente no interacciona electromagnéticamente pero sí gravitacionalmente.

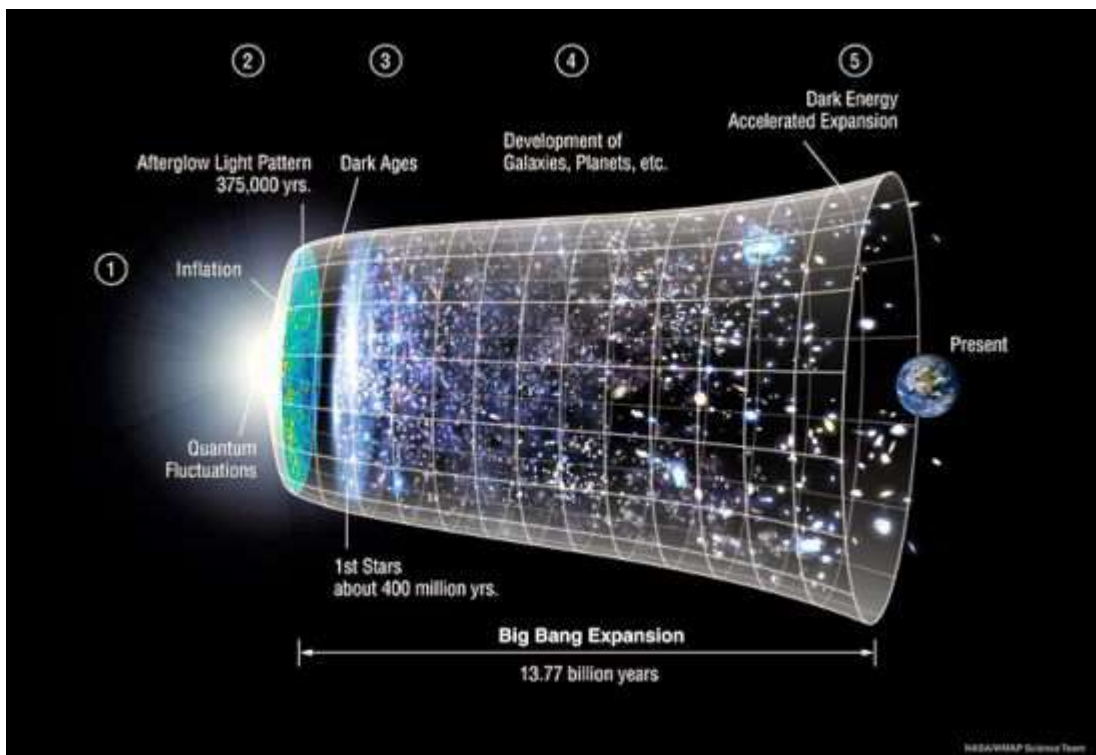


Figura 2 Evolución del Universo según el modelo  $\Lambda$ —CDM.

Fuente:

[https://lambda.gsfc.nasa.gov/education/graphic\\_history/univ\\_evol.cfm](https://lambda.gsfc.nasa.gov/education/graphic_history/univ_evol.cfm)

De este modo, según este modelo, la materia ordinaria que forma

planetas, estrellas y el resto de astros conocidos, solo representa en torno al 4% del contenido total del Universo.

Además, según el modelo cosmológico estándar, el Universo primitivo era bastante homogéneo, pero las anisotropías del CMB indican que en el momento de la recombinación existían pequeñas diferencias o fluctuaciones en las densidades de materia y radiación entre los diferentes puntos del Universo. En las zonas que presentaban densidades algo mayores la atracción gravitatoria dio lugar a la formación de estructuras, resultando tras muchísimos años en las galaxias y cúmulos de galaxias que observamos hoy en día. El modelo además hipotetiza que estas fluctuaciones de densidad macroscópicas surgieron de fluctuaciones microscópicas o cuánticas que se amplificaron durante un periodo de inflación cósmica en el que el Universo se expandió casi exponencialmente [3].

La manera en que describimos la interacción gravitacional al formular el modelo cosmológico estándar es empleando para ello la teoría más aceptada del campo gravitatorio, es decir la Relatividad General de Einstein. La Relatividad General es una teoría geométrica del campo gravitatorio, que no solo es bellísima desde el punto de vista matemático, sino que además explica de un modo rotundamente exitoso todos los fenómenos gravitatorios que observamos a nuestro alrededor. En efecto, la Relatividad General ha salido airosa en todos los test gravitatorios que se han hecho hasta la fecha [4], siendo el culmen de estos test la detección de ondas gravitatorias por los observatorios LIGO y Virgo [5]. No

obstante, pese a que desde el punto de vista experimental no le hayamos encontrado ninguna pega a esta teoría, a nivel teórico es una teoría con sus limitaciones, pues presenta regímenes singulares en los que ciertas cantidades crecen hasta valores infinitos. El modelo cosmológico estándar presenta una de tales singularidades inherentes a la Relatividad General. Si lo aplicamos para intentar entender la dinámica cosmológica antes de la inflación cósmica, nos acabamos chocando con una singularidad inicial a veces llamada Big Bang. Nos encontramos ahí con el problema de que el Universo se concentraría en un punto en el que varios observables físicos se hacen infinitos, tales como la densidad de energía de los campos materiales, o la curvatura del espaciotiempo.

El punto de vista usual a este respecto es que estaríamos estirando demasiado la Relatividad General, extrapolándola a regímenes en los que no tenemos derecho a usarla. Esta teoría es bellísima a la par que humilde, y nos indica en qué regímenes no debemos aplicarla porque ahí falla, precisamente en singularidades como la del Big Bang. Otro régimen en el que nos encontramos una de tales singularidades es en el interior de los llamados agujeros negros. Empeñarnos en aplicar la Relatividad General para describir esos regímenes nos lleva a conclusiones que físicamente no tienen significado, como que el espaciotiempo "se rompe". Si nos imaginamos el espaciotiempo como una malla elástica, en la región singular estaría tan estirada que la malla se desgarraría. No tenemos problema ninguno en visualizar una malla desgarrada porque la imaginamos rodeada de espacio, pero cuando estamos

hablando del propio espacio (o espaciotiempo) el hecho de que se rompa carece de sentido físico.

Por tanto, para poder describir y entender a nivel fundamental el interior de agujeros negros o la física del Universo primitivo antes de inflación, debemos mejorar nuestro marco teórico. La idea es formular una nueva teoría, que esté bien definida a escalas de curvatura altísima donde la Relatividad General se hace singular, pero que coincida con ésta en los regímenes que la Relatividad General explica correctamente. Uno de los planteamientos adoptados a la hora de desarrollar tal teoría es que el campo gravitatorio a nivel fundamental es de naturaleza cuántica. Ya ocurre que para el resto de las interacciones que afectan a los campos materiales, la interacción fuerte, la débil y la electromagnética, aplicamos un marco teórico llamado teoría cuántica de campos. Es precisamente a escalas de energía muy altas, como las alcanzadas en los detectores de partículas como los que alberga el CERN [6], cuando la materia nos muestra su naturaleza cuántica. O por ejemplo a las escalas a las que se produjo la hipotética inflación cósmica, de ahí que el modelo cosmológico estándar describa el contenido primigenio del Universo en términos de fluctuaciones cuánticas. Para explicar la física a esas escalas altas de energía no podemos aplicar la física clásica sino la teoría cuántica, desarrollada a lo largo del siglo XX.

Sin entrar en detalle en explicar la física cuántica, sí conviene esbozar un poco sus principales diferencias con la física clásica. En el marco de una teoría clásica, tener un conocimiento absoluto de

un sistema físico en un instante dado permite predecir con exactitud su estado en cualquier otro momento de tiempo. Sin embargo, si el sistema es de naturaleza cuántica esto no es posible. Los sistemas cuánticos pueden estar en estados que se llaman entrelazados, que presentan correlaciones muy extrañas a nuestro entendimiento clásico. La teoría cuántica que describe su comportamiento solo nos permite hacer predicciones probabilísticas sobre la evolución temporal del estado del sistema. Si pensamos en una partícula cuántica, para ella no existe la noción de trayectoria bien definida, y se verifica el llamado principio de incertidumbre de Heisenberg [7]. Este principio establece un límite fundamental a la precisión con la que podemos medir ciertas propiedades físicas. Por ejemplo, si mejoramos la precisión con la que medimos la posición de nuestra partícula cuántica, perderemos entonces conocimiento sobre su velocidad, y viceversa.

La Relatividad General, la teoría por excelencia de la interacción gravitatoria, es una teoría clásica en el sentido descrito anteriormente. Parece natural pensar que, como ocurre por ejemplo con la teoría electromagnética de Maxwell, esta teoría clásica sea una aproximación de una teoría más fundamental cuántica. La teoría clásica funciona bien a escalas de energía relativamente bajas, para las que esas correlaciones debidas al entrelazamiento cuántico se hacen insignificantes. No obstante, al explorar energías más y más altas, dichas correlaciones cuánticas comenzarían a cobrar importancia y ya no se podrían ignorar. Si esto es así también para la interacción gravitatoria, entonces necesitamos una

teoría fundamental de gravedad cuántica, subyacente a la clásica, para describir los fenómenos gravitatorios a escalas en las que el campo gravitatorio se hace arbitrariamente intenso. Un calculito muy sencillo nos da evidencia de a qué energías los efectos de gravedad cuántica serían relevantes: simplemente podemos combinar las constantes fundamentales de la naturaleza de modo que con ellas obtengamos una cantidad con dimensiones de energía. El resultado es la llamada energía de Planck, y resulta ser dos mil millones de julios. Esto es una energía ingente, trece órdenes de magnitud mayor que las mayores energías de los experimentos de partículas del CERN.

Existen diferentes propuestas para teorías de gravedad cuántica, ninguna exenta de problemas a nivel teórico, pero algunas lo suficientemente maduras como para poder analizar consecuencias físicas de las mismas. Como acabamos de argumentar, los regímenes en los que la naturaleza cuántica del campo gravitatorio cobraría importancia están muy lejos de los explorados en nuestros laboratorios, así que es complicado tener datos experimentales que poder comparar con las posibles predicciones de modelos de gravedad cuántica. Para formular estos modelos la guía principal que empleamos es la intuición física y el rigor matemático. A falta de experimentos con los que contrastar las posibles predicciones teóricas, lo menos que podemos pedirles a nuestras teorías o modelos es que estén bien planteados matemáticamente. Sin embargo, por muy bonito que sea un modelo matemático, debemos poder ser capaces de extraer consecuencias físicas de él que puedan

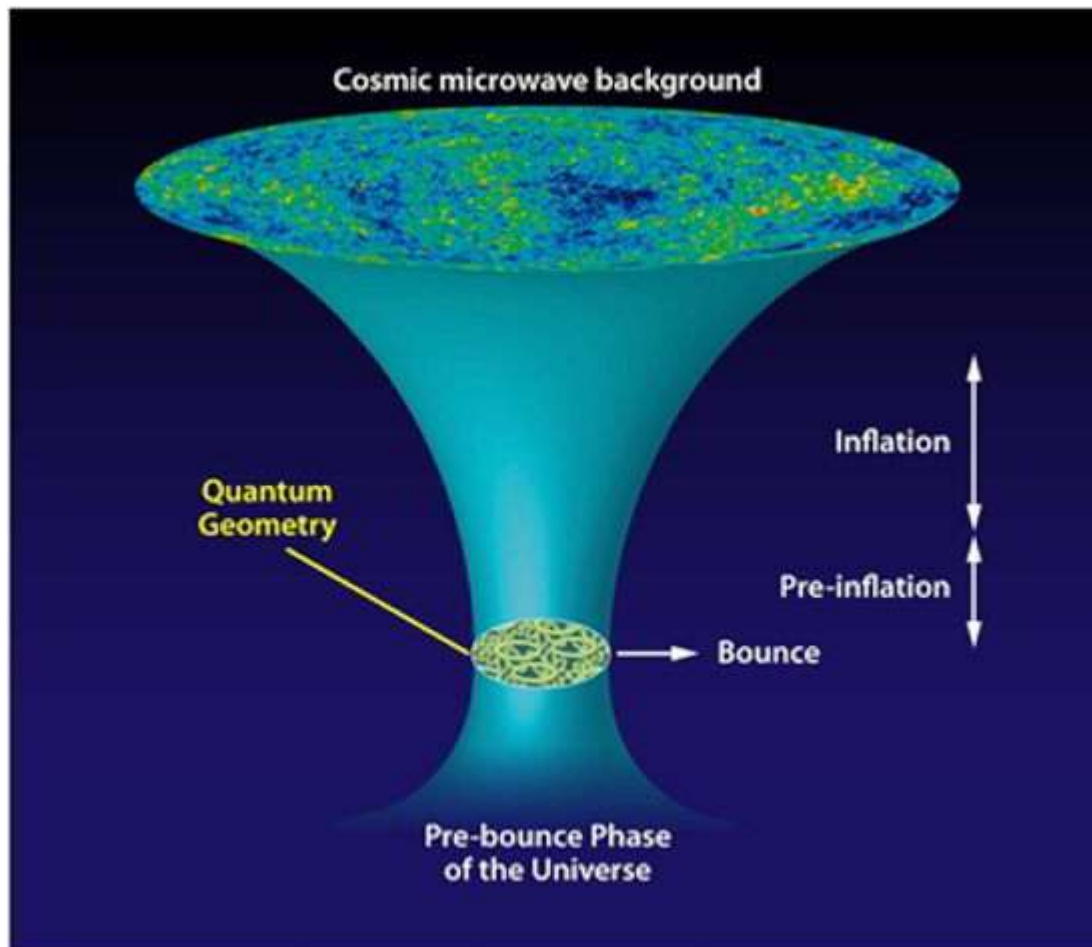


contrastarse observacional o experimentalmente, pues sino no tendremos evidencia de que tal modelo describe el comportamiento de la naturaleza. Cuando lo que intentamos describir es la naturaleza cuántica del campo gravitatorio la tarea se nos complica mucho, no solo porque es una cuestión difícil a nivel matemático, sino también por la falta de datos experimentales. Para verificar nuestras teorías debemos ingeniárnoslas para obtener datos observacionales que puedan estar afectados por efectos de gravedad cuántica y que no podamos explicar con la teoría clásica de la Relatividad General. Las ventanas observacionales más prometedoras para medir tales efectos son precisamente esos regímenes en los que la Relatividad General presenta singularidades, es decir el interior de agujeros negros y la física del Universo primitivo.

La disciplina que se centra en la física del Universo primitivo, describiéndola en el marco de una teoría cuántica de la gravedad, es la cosmología cuántica, y de ahí el título de este capítulo. Los modelos de cosmología cuántica típicamente modifican la formulación clásica incorporando de algún modo las reglas matemáticas de la mecánica cuántica con el fin de poder describir una dinámica cosmológica pre—inflacionaria bien definida matemáticamente, es decir libre de la singularidad inicial del Big Bang. Entonces la evolución del Universo de acuerdo a estas reglas cuánticas resulta en que el estado de las fluctuaciones primordiales al inicio de la inflación cósmica es diferente al asumido en el modelo cosmológico estándar, y esas diferencias dan lugar a predicciones

sobre los datos del CMB ligeramente distintas a las del modelo cosmológico estándar. De nuevo surge la importancia de medir con precisión el CMB, pues sirve como posible ventana para observar efectos de gravedad cuántica.

Como ejemplo de propuesta actual de cosmología cuántica comentemos sobre la cosmología cuántica de lazos [8]. Esta propuesta sigue las reglas de un marco teórico de gravedad cuántica llamado gravedad cuántica de lazos [9]. Una de las características de esta teoría es que a nivel fundamental cantidades geométricas como áreas o volúmenes espaciales aparecen discretizados o cuantizados. Como resultado de esta cuantización, en cosmología cuántica de lazos, la singularidad clásica del Big Bang desaparece y se ve reemplazada por un rebote que une una rama en contracción del Universo con una rama en expansión. Es decir, según este marco teórico, a escalas muy altas de energía la gravedad se hace repulsiva y el Universo rebota. Un análisis riguroso muestra que en dicha teoría la densidad de energía, o equivalentemente la curvatura espaciotemporal, está acotada alcanzando un máximo que no puede superarse, y de ahí que el colapso gravitatorio del Universo se revierta en dicho rebote. Ese valor máximo viene determinado por parámetros de gravedad cuántica de lazos, y es del orden de la escala de Planck, como sería de esperar pues es a esas escalas en las que esperamos que los efectos de gravedad cuántica sean importantes. Instantes después del rebote, cuando las densidades de energía dejan de ser planckianas, recuperamos la dinámica clásica de la Relatividad General.

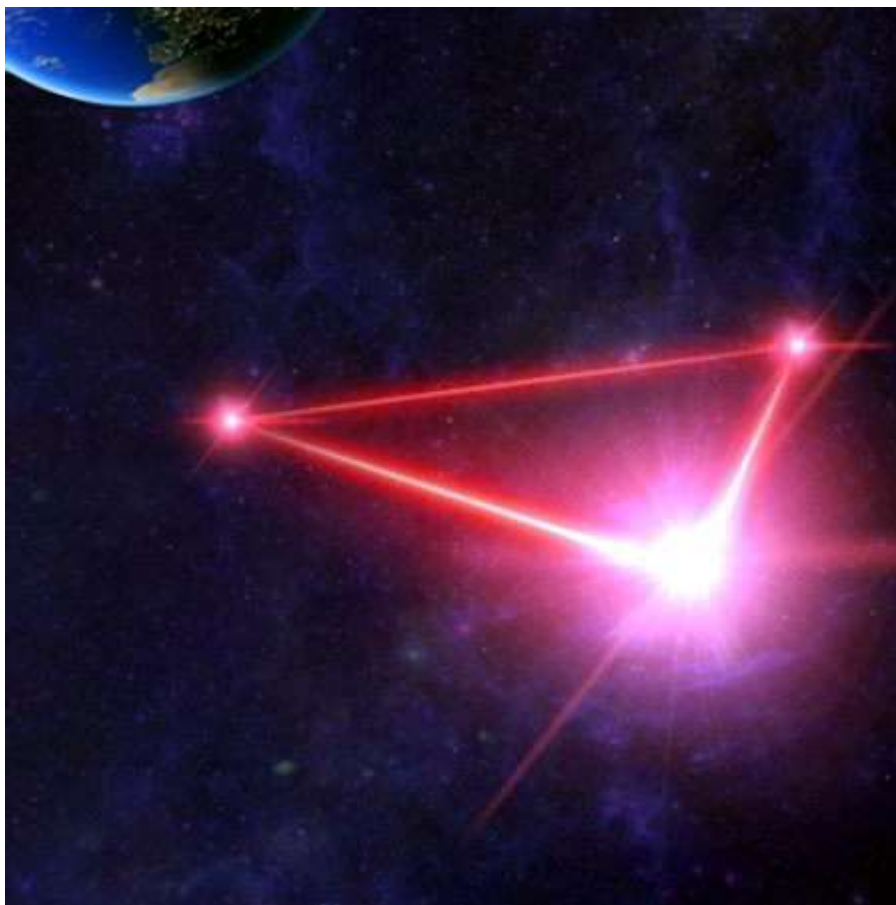


*Figura 3 Evolución del Universo en cosmología cuántica de lazos. Antes de inflación se da una etapa preinflacionaria precedida de un rebote (bounce) debido a los efectos cuánticos de la geometría.*

Fuente: <https://science.psu.edu/news/Ashtekar7-2020>

La cosmología cuántica de lazos es una de las propuestas de cosmología cuántica lo suficientemente madura como para extraer modificaciones a los espectros de las fluctuaciones primordiales y del CMB, de modo que se puedan comparar predicciones teóricas del modelo con datos observacionales. Varios grupos de

investigación están centrando su trabajo en este asunto, aunque no tenemos aún resultados claramente concluyentes que permitan evidenciar la validez de este marco teórico. Primero porque el modelo considerado en cosmología cuántica de lazos está sujeto a ambigüedades y aún se investiga en identificar criterios físicos y matemáticos que las fijen.



*Figura 4 Visión artística de la misión espacial LISA. Fuente:*

<https://www.elisascience.org>

Otras propuestas presentan una problemática similar. Por otra parte, hay un problema que afecta a las observaciones pues la

región de los datos del CMB en la que los efectos de gravedad cuántica serían esperables están sujetos a una incertidumbre estadística llamada varianza cósmica, inherente a querer medir correlaciones entre zonas del Universo separadas por distancias muy largas. Esta incertidumbre viene de que solo podemos observar el CMB desde una región, es decir la Tierra y sus inmediaciones, y por tanto no tenemos muestra estadística desde otras zonas del Universo.

Otra posible fuente de información valiosísima sobre las etapas tempranas del Universo, que nos permitiría arrojar más conclusiones sobre nuestros modelos de cosmología cuántica, sería el hipotético fondo de ondas gravitacionales primordiales. En efecto, hay modelos de inflación cósmica que, además de describir las perturbaciones primordiales de materia que dieron lugar a las anisotropías del CMB, también predicen la existencia de unas perturbaciones primordiales de tipo ondas gravitacionales. Dicho fondo, de existir, aún no se ha medido porque sería muy débil. Hay diferentes experimentos, como BICEP y el Keck Array [10], cuyo objetivo es detectarlo indirectamente a través de su efecto polarizador sobre el CMB. La polarización describe la orientación de la luz perpendicular a su dirección de propagación y aunque hay diferentes fuentes que polarizan el CMB, las hipotéticas ondas gravitacionales dejarían una señal muy distintiva que es la que se está intentando detectar. Más aún, ya se plantean experimentos de detección directa de dichas ondas gravitacionales, como la futura misión LISA, que será un espectrómetro de ondas gravitacionales

formado por tres satélites [11], y que podría detectar las frecuencias del supuesto fondo cósmico de ondas gravitacionales [12].

En definitiva, en pleno siglo XXI la Física Teórica aún se encuentra con grandes preguntas por resolver, tales como cuál es la correcta física que explica el comportamiento del espaciotiempo a nivel microscópico. Una teoría microscópica del campo gravitatorio nos ayudaría a entender mejor qué ocurre en los regímenes en los que la Relatividad General presenta singularidades, tales como el interior de agujeros negros o la física del Universo primitivo. Formular dicha teoría es una labor teóricamente ardua, y la validación de nuestros modelos se complica por la falta de experimentos que registren los supuestos efectos de gravedad cuántica. Pero pese a estas limitaciones, nuestra tecnología está tan avanzada que no es impensable imaginar que en unos años podamos hacer afirmaciones robustas en el campo de la cosmología cuántica. Seguiremos trabajando en esta apasionante rama de la ciencia con el fin de ampliar nuestros conocimientos sobre el Universo.

#### Referencias:

[1] A. A. Penzias; R. W. Wilson, 1965, *A Measurement Of Excess Antenna Temperature At 4080 Mc/s*, *Astrophysical Journal Letters*. 142: 419–421.

[2][https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Planck/Planck\\_and\\_the\\_cosmic\\_microwave\\_background](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Planck/Planck_and_the_cosmic_microwave_background)

[3] S. Tsujikawa, 2003, *Introductory review of cosmic inflation*, arXiv:0304257 [hep—ph].

- [4] C. M. Will, 2014, *The Confrontation between General Relativity and Experiment*, *Living Reviews in Relativity*, Living Reviews in Relativity volume 17, 4 (2014) [arXiv:1403. 7377[gr—qc]].
- [5] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), 2019, *Tests of General Relativity with GW170817*, *Phys. Rev. Lett.* 123, 011102.
- [6] <https://home.cern>
- [7] D. Sen, 2014, *The Uncertainty relations in quantum mechanics*, *Current Science.* 107 (2): 203–218.
- [8] I. Agulló, P. Singh, 2016, *Loop Quantum Cosmology: A brief review*, arXiv:1612. 01236.
- [9] C. Rovelli, F. Vidotto, 2015, *Covariant Loop Quantum Gravity: An Elementary Introduction to Quantum Gravity and Spinfoam Theory*, Cambridge University Press.
- [10] BICEP2/Keck and Planck Collaborations, 2015, *Joint Analysis of BICEP2/Keck Array and Planck Data*, *Phys. Rev. Lett.* 114, 10, 101301 [arXiv:1502. 00612].
- [11] <https://www.elisascience.org>
- [12] Nicola Bartolo et al, 2016, *Science with the space—based interferometer LISA. IV: probing inflation with gravitational waves*, *JCAP12(2016)026*.

[Mercedes Martín Benito.](#)

Doctora en Ciencias Físicas.

Profesora del Departamento de Física Teórica de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y miembro del Instituto IPARCOS.





## Capítulo 18

### Apéndice.

#### Una cuestión "nuclear"

*Encuentros y desencuentros en los años 30 y 40: Einstein, Bohr, Curie, Heisenberg, Fermi, Meitner, . . .*

*El 6 de agosto de 1945 el mundo entero fue testigo del lanzamiento de la bomba atómica sobre Hiroshima.*



*Figura 1. Todas las imágenes seleccionadas de Wikimedia commons.*

*La BBC radiaba la noticia e informaba de las catastróficas consecuencias del mayor proyecto de investigación científico—militar de la historia. Poco después, en 1946 la revista Time hacía recaer la paternidad de la bomba sobre Albert Einstein y su famosa ecuación  $E = mc^2$ , postulada 40 años antes, cuando ni siquiera el neutrón se había descubierto.*

*Grandes científicos de la época como Niels Bohr y Robert Oppenheimer compartirían, desde el punto de vista mediático, la paternidad y Lise Meitner sería reconocida en América como la madre de la bomba atómica. Pero la implicación de cada uno de ellos sería desigual y en algunos casos prácticamente nula. Para Einstein, pacifista convencido, su contribución tuvo una doble vertiente, una*

*científica y otra política; la segunda lo atormentaría hasta el día de su muerte.*

*No cabe duda de que su ecuación,  $E=mc^2$ , ha tenido grandes consecuencias en la historia de la humanidad y que la creación de la bomba atómica ha sido una consecuencia de la misma. Pero casi ningún descubrimiento científico es fortuito, suelen ser el fruto de una larga historia y de pequeños avances concatenados que culminan en algo superior. Así ocurrió también con el descubrimiento de la fisión nuclear, lo que, junto a una guerra mundial, fue el punto de partida de la era atómica.*

Los antecedentes: Revelando el núcleo.

Culpar a Einstein del desarrollo y uso de la bomba atómica porque su ecuación es la base teórica que la hizo posible, es lo mismo que echar la culpa a Demócrito por ser el primero en dar nombre a las unidades indivisibles de las que se creía que estaba compuesta la naturaleza, los átomos. Éstos son tan pequeños que no los podemos ver, así que hubo que esperar más de 20 siglos para poder demostrar su existencia. Fue Einstein en 1905 quien daría una formulación matemática de los mismos en el modelo del movimiento browniano. "Mi objetivo principal era encontrar hechos que garantizaran lo más posible la existencia de átomos de tamaño finito y determinado", escribió en sus Notas Autobiográficas.

Los elementos fundamentales de la naturaleza conocidos desde antiguo, a los que se les asignó un símbolo, estarían formados por diferentes átomos. Cada elemento sería una colección de átomos

idénticos indestructibles químicamente. En 1869, el menor de 17 hermanos, Dmitri Mendeleev, dispuso los 63 elementos entonces conocidos en filas según sus propiedades químicas construyendo columnas conforme aumentaba su peso atómico. De esta forma encontró que aparecía periodicidad y asumió que había huecos que debían corresponder a elementos todavía por descubrir, cuyo posterior hallazgo confirmaría el magnífico descubrimiento del sistema periódico.

La regularidad, simetría y capacidad predictiva del sistema periódico son indicios de que debe haber un modelo que explique la estructura de los distintos elementos y que contenga también esas características. Se especuló, por tanto, que los átomos podían tener estructura y estar formados por piezas más pequeñas que pueden añadirse a la estructura atómica de un elemento para obtener el siguiente. Pero la química del siglo XIX no fue capaz de abrir camino en esta línea, así que la física y sus técnicas tomarían el relevo para probarlo.

Tras una gran cantidad de ingenio y trabajo detectivesco, sin faltar una pequeña dosis de casualidad, surgieron a finales del siglo XIX y principios del XX descubrimientos cruciales para entender la estructura del átomo. En 1895 Wilhelm Konrad Röntgen hacía la primera radiografía de la historia con un descubrimiento que le sorprendió a él y al resto del mundo, una radiación desconocida a la que la llamó rayos X. Henri Becquerel decidió estudiar si los cuerpos fosforescentes emitían rayos X y en el camino, ya iniciado por la saga familiar, se topó con una nueva radiación a la que dio el

nombre de rayos de uranio, haciendo mención al material en el que los encontró.



*Figura 2. Marie Curie, Wikimedia commons.*

Esta radiación no parecía cambiar de intensidad ni de carácter a lo largo de los días. Tampoco cambiaba cuando era expuesta a la luz solar o ultravioleta. Era un fenómeno muy distinto a los rayos X ya que no necesitaba de un tubo de rayos catódicos para iniciarlo y sorprendentemente no se podían apagar. Había que explicar la espontaneidad de esta nueva radiación invisible y dar respuesta a las preguntas que suscitaba: ¿Cuál es la fuente de energía que crea

estos rayos que les permite penetrar sustancias opacas? ¿Hay otros elementos de la tabla periódica que tengan la misma propiedad? La respuesta a la primera pregunta aún tardará un tiempo en alcanzarse, pero la de la segunda pregunta la proporcionará la joven pareja formada por Pierre y Marie Curie.

Marie Curie realizó estudios sistemáticos y demostró que estos rayos no eran una propiedad característica de un solo elemento, ya que el torio y sus compuestos también los presentaban. Esto estimuló la búsqueda de otros elementos que pudieran emitir rayos similares. El torio y el uranio son los elementos con mayor masa atómica conocida por lo que apuntaba a que los elementos pesados podían tener esta cualidad. Fue una labor titánica, los procesos de separación química duraron 4 años, pero fruto de sus investigaciones descubrieron el polonio y el radio. El radio, mucho más activo que el uranio, hizo que los Curie acuñaran el término de radiactividad.

Surgió también la cuestión de la energía. Notaron que las muestras de radio se mantenían a una temperatura mayor que su entorno, llegando a producir 0, 1 kcal de energía térmica por hora incluso durante mucho tiempo. La liberación continua de energía indicaba que había que buscar cambios producidos dentro de los átomos de los elementos radiactivos y no solo en reacciones químicas entre átomos. Esto era algo revolucionario y atrevido.

Por el descubrimiento de la radiactividad natural Becquerel y Pierre y Marie Curie compartieron el Premio Nobel de química en 1903, Marie fue la primera mujer de la historia que recibía el galardón. No

solo la física se transformará con este descubrimiento, Darwin y su teoría de la evolución se verán directamente beneficiados, ya que la radiactividad natural indicaba que la Tierra era más vieja de lo que hasta entonces se había supuesto.

Una vez conocidas las propiedades del radio, el interés por ellas se disparó y numerosos científicos pasaron a estudiarlas. Los átomos apenas habían empezado a mostrar su rica vida interior. Una tras otra las letras del abecedario griego, alfa, beta, gamma, daban nombre a las nuevas y cada vez más penetrantes radiaciones según iban descubriéndose. Los campos magnéticos ayudarían a determinar carga y masa: positiva, negativa y sin carga respectivamente. Pero en lo tocante a la masa, unas serían más díscolas que otras. En 1900, Becquerel obtuvo la carga y la masa de la radiación beta, descubriendo que era precisamente el electrón descubierto por Thomson en 1897. La naturaleza de la radiación alfa fue algo más difícil, llegando a la conclusión de que podía ser una molécula de hidrógeno sin un electrón o un átomo de He sin sus dos electrones u otras posibles combinaciones. La acertada es efectivamente la del He.

Lo que quedaba claro es que estas emisiones planteaban cuestiones difícilmente compatibles con las ideas existentes de la materia y su estructura. Los átomos ya no eran indivisibles.

En 1907 Ernest Rutherford abandonaba su tierra natal, Nueva Zelanda, por Inglaterra; su maleta iba llena de proyectos, entre los que se encontraban el desentrañar los secretos de la radiación alfa y explorar el modelo atómico del físico de Cambridge J. J. Thomson.

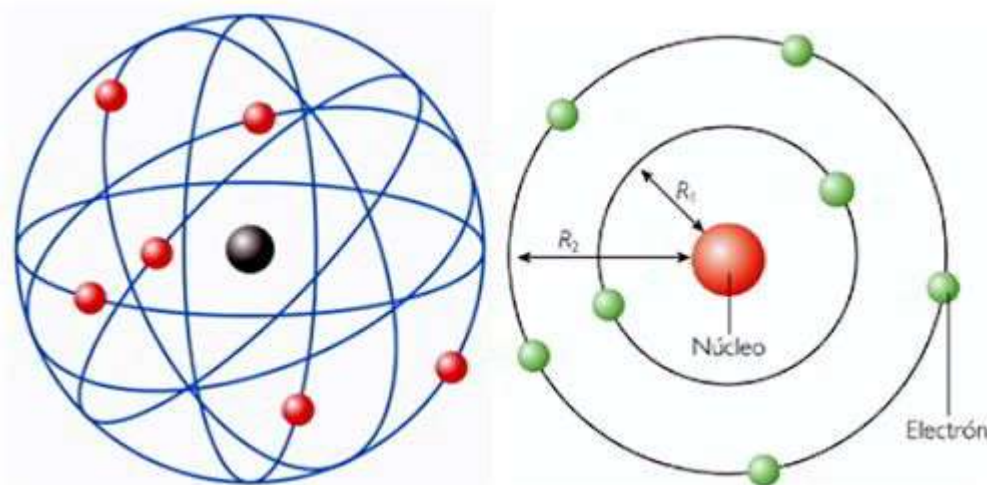
Lo que no sabía es que convertiría su famoso laboratorio de Cavendish en la cuna de colaboradores y estudiantes de postgrado que serán clave en el avance de la física: James Chadwick, Niels Bohr, Robert Oppenheimer o el químico alemán Otto Hahn, entre otros.

El estudio de la desintegración del radio también llevó al descubrimiento de que las transformaciones radiactivas terminaban siempre en un producto final estable, que algunos eslabones de la cadena emitían radiación alfa y otros de tipo beta, pero que los rayos gamma se emitían a lo largo de las series de desintegración. Algunos miembros de la serie se desintegraban rápidamente y otros necesitaban mucho tiempo. De ello se desprendía que podía haber elementos radiactivos en origen que hubieran desaparecido por tener periodos de desintegración cortos. Esto presentaba un problema grave, pues, aunque en 1910 todavía había huecos para elementos en la tabla periódica, no eran suficientes para albergar todas las nuevas sustancias que aparentemente surgían de las desintegraciones.

La clave estaba en que algunas de esas nuevas sustancias tenían propiedades químicas idénticas a las de elementos conocidos, aunque tuvieran propiedades físicas diferentes. Así que Frederick Soddy sugirió que un elemento químico puede ser una mezcla de átomos con diferente comportamiento radiactivo, con diferente masa atómica, pero con las mismas propiedades químicas. Surgía así el concepto de Isótopo (mismo lugar en la tabla periódica). La radiactividad y el concepto del isótopo fácilmente formularían

nuevas preguntas sobre la estructura última del átomo: ¿Cuáles serían sus piezas básicas?

En 1911, con sus experimentos de dispersión y su modelo atómico, Rutherford cambió radicalmente la idea del átomo, observó que éste era básicamente espacio vacío y que la mayor parte de la masa y la carga positiva estaba concentrada en un núcleo muy masivo rodeado de una nube de ligeros electrones cargados negativamente. ¿Cómo podía este sistema ser estable?



*Figura 3. Modelos atómicos de Rutherford y de Bohr. Wikimedia Commons.*

La respuesta llegará en 1913 de la mano de su joven colaborador, el físico danés Niels Bohr, quien perfecciona el modelo atómico de Rutherford incorporando las incipientes ideas sobre cuantización que habían surgido unos años antes con las investigaciones de Max Planck y Albert Einstein. Sugiere que los electrones solo pueden seguir determinadas órbitas seleccionadas. Este modelo, a caballo



entre lo clásico y lo cuántico, permitía, a pesar de sus limitaciones, explicar las líneas espectrales del más simple de los átomos, el hidrógeno. En 1922 Bohr recibió el Premio Nobel de Física por sus trabajos sobre la estructura atómica y la radiación, pero todavía no se había explicado en que consiste exactamente el núcleo.

En 1920, estudiando el átomo de hidrógeno, que contiene un solo electrón externo para compensar la carga positiva del núcleo, Rutherford acuña el nombre de protón para dicha carga positiva. Pero al extrapolar esta asunción natural al siguiente átomo, el helio, que contiene dos electrones externos que deberían compensarse con dos protones del núcleo, las masas no encajaban ya que el He es cuatro veces más masivo que el H, luego debería haber elementos con masa pero sin carga en el núcleo que complementaran a los protones.

La partícula neutra postulada por Rutherford, se descubriría por fin en 1932. La interpretación crucial la daría uno de sus colaboradores, J. Chadwick, pero en realidad fue uno más de los resultados de un trabajo coral de la ciencia: en Alemania se detectó una radiación altamente penetrante, en Francia la pareja Joliot—Curie se interesó por ella y al bombardear berilio con partículas alfa observaron una radiación neutra muy penetrante a la que Chadwick, en Gran Bretaña, reconoció como la partícula postulada por Rutherford y a la que denominó neutrón. Ambos, Chadwick y la pareja Joliot Curie, compartieron el Premio Nobel en 1934 por este descubrimiento y por su contribución al descubrimiento de la radiactividad artificial.

Cualquier átomo era una combinación de tan solo tres elementos fundamentales: protones, neutrones y electrones, lo que llevaría a una pregunta fundamental: ¿es la masa de un átomo neutro igual a la masa de los neutrones, protones y electrones que lo componen? La respuesta es, evidentemente, no. La masa atómica es siempre menor que la suma de las partículas constituyentes en estado libre. El defecto de masa antes y después de la formación de un núcleo puede parecer muy pequeña, pero la energía que le corresponde según la ecuación de Einstein es muy significativa.

En 1933 Niels Bohr perfecciona el modelo de la gota líquida, que fue propuesto por primera vez por George Gamow, quien ya había explicado el mecanismo de emisión de las partículas alfa mediante el efecto túnel. Sobre este modelo también trabajaría el físico alemán Carl Friedrich von Weizsäcker, obteniendo una fórmula semi—empírica para la energía de ligadura del núcleo. Ya se pueden explicar las desintegraciones nucleares.

Ese mismo año se celebró la séptima conferencia Solvay, que reunió a la élite de la física europea bajo el tema "La Estructura del núcleo atómico". Todas las piezas necesarias para el descubrimiento de la fisión nuclear estaban disponibles. Sin embargo, todavía pasarán cuatro años antes de su descubrimiento. Además de la casualidad, la inestabilidad política y social de Europa jugará un papel decisivo en este retraso. Adolf Hitler asumió la Cancillería del Reich en enero de 1933 y como consecuencia de sus leyes racistas un 25% de los físicos alemanes fueron expulsados de Alemania. Bohr desde Copenhague y Leo Szilárd desde Londres fueron especialmente

activos en la ubicación de científicos desplazados, encontraron ocupación para más de 2500 estudiantes antes de que estallará la Segunda Guerra Mundial. El propio Einstein, alarmado ante el auge del antisemitismo y el nazismo abandonó Alemania emigrando a Estados Unidos, donde se instaló en la Universidad de Princeton y donde su fama y popularidad acabaron de fraguar en un popular icono de la cultura moderna.

La fisión llega en forma de carta navideña y viaja a EEUU de la mano de Bohr.

El descubrimiento del neutrón hará que los bombardeos con partículas alfa pasen de moda, la nueva partícula neutra se impone como proyectil en los experimentos de los años 30. Enrico Fermi en Roma, Irene Curie y Frédéric Joliot en París, Otto Hahn y Lise Meitner en Berlín, todos seguirían la nueva tendencia.

El físico italiano Enrico Fermi y su equipo, los chicos de la vía Panisperna, bombardearon con neutrones de forma sistemática los 92 elementos de la tabla periódica hasta llegar al último, el uranio. Su objetivo era encontrar elementos más masivos que éste y que no se encuentran de forma natural en la Tierra, lo que se conoce como elementos transuránidos. Los neutrones que usan como proyectil provienen de una emisión radiactiva, lo que significa que son neutrones con altas energías, del orden de 10 MeV.

En sus experimentos de 1934, al bombardear el uranio llegan a postular la existencia del elemento número 94, el plutonio, pero han podido toparse con la fisión sin advertirlo. Al publicar sus

resultados la química alemana Ida Noddak sugiere que en esos experimentos también podrían haberse producido rupturas del núcleo. Quizás porque su informe no estaba bien argumentado y los datos de las masas nucleares no parecían encajar o, simplemente, porque en ese momento era un hecho inconcebible, el artículo de Ida fue completamente ignorado.

A pesar de esto, los aportes de Fermi serán cruciales. Siguiendo la antigua técnica de Rutherford decide interponer una lámina de parafina antes del objetivo, observando que la tasa de la reacción se incrementa. De aquí se desprende la necesidad de un moderador que no absorba neutrones pero que disminuya su energía y velocidad tras varios choques, hasta que alcancen la velocidad de las moléculas de los gases a temperatura ambiente, es decir que pasen de energías del orden del MeV al eV, lo que se denomina neutrones térmicos.

En estas condiciones la fisión debería haberse observado, pero Fermi blindó la muestra con aluminio para evitar que accedieran a ella otras radiaciones que no fueran los neutrones; con esta medida estaba impidiendo que se vieran los efectos de los productos de fisión que generalmente son emisores beta. Recibió el Premio Nobel en 1938 por sus demostraciones sobre la existencia de nuevos elementos radiactivos producidos por procesos de irradiación con neutrones y por sus descubrimientos sobre las reacciones nucleares debidas a los neutrones lentos, pero no pudo observar la fisión en ninguno de sus experimentos.

Tras recibir el premio, en cuya ceremonia se negó a hacer el saludo

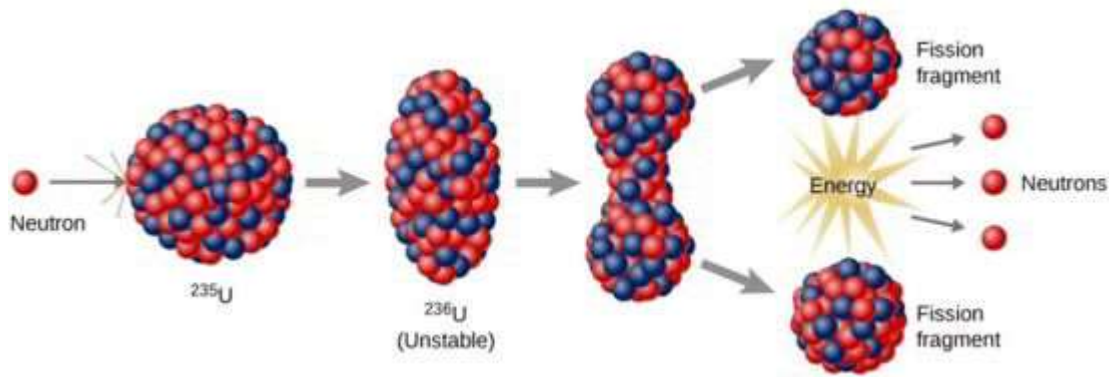
romano impuesto por Mussolini, emigró a Nueva York junto a sus hijos y su esposa Laura, judía. En enero de 1939 comenzó a trabajar en la Universidad de Columbia donde recibiría la noticia de los experimentos de Otto Hahn y Fritz Strassmann.

Otto Hahn escribía en diciembre de 1938 una larga carta destinada a su ex colaboradora, la física austriaca Lise Meitner, a la que Einstein apodaba como "la Madame Curie alemana". Meitner pasaba en Suecia las vacaciones de Navidad en compañía de su sobrino, el físico Otto R. Frisch, cuando recibió la interesante carta de Otto. Lise era uno más de los muchos científicos desplazados debido al avance del antisemitismo en Europa. En marzo 1938 cuando Hitler anexionaba Austria, pese a su larga trayectoria científica y estar bautizada, pasó a ser considerada tan solo como una judía alemana. Su vida corría peligro, por ello, en julio de ese mismo año, apenas cinco meses antes de conseguir el descubrimiento más extraordinario de su vida, escapaba a Suecia vía Dinamarca.

En su carta, Otto le consultaba si existía alguna posible explicación, de acuerdo a las leyes de la física para sus extraños resultados: al bombardear uranio con neutrones térmicos en busca de elementos transuránidos habían detectado bario, elemento muy alejado del uranio en la tabla periódica y mucho menos masivo que éste. «Quizás tú puedas sugerir una fantástica explicación» aventuraba en su carta, y estaba en lo cierto, pues por fin se descubría y aceptaba que el núcleo de uranio podía dividirse.

Lise Meitner y Otto Frisch, necesitaron de dos grandes hitos de la

física para llegar a esta conclusión: el modelo nuclear de la "gota líquida" propuesto por Bohr en 1933 y la ecuación de Einstein ( $E=mc^2$ ) postulada en 1905. Con el primero valoraron la posibilidad de que el núcleo pudiera partirse en dos mitades casi iguales, que al estar eléctricamente cargada se repelerían fuertemente y con la segunda calcularon que la energía liberada en cada escisión sería suficiente para causar un salto visible de un grano de arena, del orden de 200 millones de eV.



*Figura 4. Modelo de la gota líquida de fisión nuclear. Wikipedia commons.*

Unos días más tarde, Frisch regresaba a Copenhague, justo antes de que Niels Bohr partiera para EEUU, y en un breve encuentro le transmitió las buenas nuevas. "¡Pero qué idiotas hemos sido! ¡Es exactamente como debe ser!" exclamó Bohr entusiasmado y les animó a publicar sus resultados.

El artículo de Otto Frisch y Lise Meitner, donde se hablaba por

primera vez del proceso de "fisión" llegó a la sede de la revista *Nature*, en Londres, a mediados de enero de 1939 pero no sería publicado hasta un mes más tarde. Mientras tanto, el secreto viajaba a través del Atlántico de la mano de Niels Bohr, quien creyendo que ya estaba publicado, lo mencionaría en una conferencia de física indicando además sencillas técnicas experimentales para demostrarlo. Los físicos experimentales presentes se levantaron de entre la audiencia y aun con sus trajes de etiqueta, fueron inmediatamente a sus laboratorios a repetirlo y confirmarlo.

Dos o tres días más tarde, los periódicos nacionales informaban sobre los resultados y cuando los artículos de Frisch y Meitner y de otros físicos alemanes que lo confirmaban de forma independiente, fueron finalmente publicados, los laureles ya habían sido depositados sobre otras cabezas, en este caso la de Enrico Fermi y la Universidad de Columbia según *The Times*.

De cómo una carta puede desencadenar una reacción en cadena.

Uno de los físicos presentes en aquella conferencia fue el húngaro Leo Szilárd, un visionario que ya en 1934 concibió y patentó la noción de reacción en cadena: durante el proceso de fisión, además de los fragmentos de fisión también se liberarían neutrones que a su vez producirían una fisión en otro átomo de uranio y así sucesivamente. Si la reacción se producía lo suficientemente rápido podría causar una explosión nuclear. Cuando Szilárd supo del

descubrimiento de la fisión decidió que dicha información debía mantenerse en secreto para evitar la posibilidad de que los alemanes pudieran hacer una bomba atómica. Nadie mejor que los físicos exiliados podían entender las consecuencias del hecho de que Alemania poseyera tal arma.

Pero la censura en las publicaciones no llegaría hasta el año 1940 y para entonces los Curie—Joliot en su laboratorio de París habían confirmado la existencia de los neutrones que se sospechaba que debían existir durante el proceso de fisión publicando el 19 de marzo de 1939 en la revista *Nature* un artículo que llevaba por título "Liberación de Neutrones en una explosión nuclear de Uranio". Por otro lado, Niels Bohr y John Wheeler, mediante consideraciones teóricas, encontraron que el isótopo fisionable del Uranio era el U—235, cuya abundancia es solo de 0, 7% y en noviembre de 1939 publicaban un clásico sobre la teoría de la fisión, ese mismo mes estallaba la Segunda Guerra Mundial.

Debido a las circunstancias de la inminente guerra, los científicos de ambos lados sintieron la necesidad de informar a sus respectivos gobiernos del potencial militar de la energía nuclear. Por el lado alemán, la alerta fue una carta fechada el 24 de abril de 1939, en la cual los profesores Hartech y Groth de la Universidad de Hamburgo, informaban al responsable de la investigación en armamento del German Army Weapons Bureau, de la posibilidad del uso de la recientemente descubierta fisión nuclear como explosivo muy potente. En septiembre de 1939, los principales científicos alemanes del área nuclear recibieron sus órdenes de movilización, pero no al



frente, sino a Berlín, donde bajo los auspicios de la ordenanza militar formarían parte del llamado Club del Uranio (*Uranverein*).



*Figura 5 Einstein y Szilárd, Wikimedia commons.*

En julio de ese mismo año, Leo Szilárd y Eugene Wigner visitaron a Einstein en su casa de vacaciones de Long Island para alertarle de las posibilidades de la reacción en cadena, quien sorprendido exclamó: ¡Nunca pensé en ello! Los tres miembros de la llamada "conspiración húngara", Szilárd, Wigner y Teller, habían tenido experiencias personales directas con el régimen nazi por lo que su nivel de preocupación era cada vez mayor. Las noticias que llegaban de Europa sugerían que el expansionismo alemán, que ya había conseguido Checoslovaquia, podía llegar a anexionar Bélgica, cuyas

colonias africanas eran ricas en mineral de uranio. Szilárd recordó que su antiguo colega Albert Einstein conocía personalmente a la reina Elizabeth de Bélgica y pensó que quizás podría alertarla en su nombre.

En agosto de 1939, Szilárd y Wigner se reunían de nuevo con Einstein, pero esta vez redactarían una carta de alerta que finalmente harían llegar al presidente Roosevelt a través de uno de sus consejeros económicos, Alexander Sachs. No sería entregada hasta el mes de octubre de 1939, pero cumplió su propósito: convenció a Roosevelt de que había que actuar y diez días más tarde se formaba el comité Briggs, considerado como el germen del proyecto Manhattan.

Sin embargo, es posible que sus efectos no fueran tantos como se le atribuyen, pues Briggs, director del Bureau of Standards, en lugar de ampliar los limitados fondos de los laboratorios de las universidades, anuló muchos proyectos y durante el periodo siguiente solo hubo avances aislados fruto del esfuerzo personal más que del apoyo oficial. A Fermi y Szilárd, por ejemplo, les negaron \$100.000 para empezar a construir un reactor nuclear. A pesar de ello, consiguieron la primera reacción en cadena autosostenida en diciembre de 1942, en una pista de squash situada debajo de las gradas del estadio de fútbol de la Universidad de Chicago.

A partir de ese momento el general Leslie Groves se puso al frente del proyecto, el cual sufrió un cambio de escala en el esfuerzo por ganar la carrera a los alemanes. Todo sería posible gracias al arte de

coordinar todas las especialidades que el proyecto requería. La ciencia, la ingeniería, la industria e incluso la estructura militar se unieron en un esfuerzo conjunto sin precedentes que culminó en la creación de equipos internacionales y la consecución de objetivos en tiempo record. La dirección del proyecto y el diseño de la bomba se llevaron a cabo en el Laboratorio Nacional de los Álamos bajo la dirección de Robert Oppenheimer. La producción de plutonio en reactores y la posterior separación se realizó en Handford Site y finalmente el enriquecimiento de uranio en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge. En 1945 el Proyecto Manhattan empleaba a 130. 000 personas y había gastado lo equivalente a 20 mil millones de dólares actuales.

Albert Einstein, aunque firmo la carta que activó el programa y tuvo contactos con los grupos de investigación que precedieron al Proyecto Manhattan resolviendo alguna consulta puntual, nunca mostró interés por entrar en el proyecto. Si le hubiera interesado no habría podido participar ya que el FBI lo consideraba un "riesgo para la seguridad" por su faceta pacifista y su apoyo a causas de tinte izquierdista.

Einstein, pacifista convencido y amante de la cultura nipona, se arrepintió siempre de haber firmado aquella carta.

La investigación nuclear continúa también en Europa.

Tras su visita a EEUU en 1939, Niels Bohr regresó a Copenhague dónde, a partir de la ocupación alemana permaneció aislado. Lejos quedaban las veladas científicas en su acogedora casa de campo en

Tisvilde, donde sus visitantes disfrutaban del entorno y de la compañía de su familia, donde Werner Heisenberg había aprendido a amar a Dinamarca y Erwin Schrödinger cayó enfermo de agotamiento defendiendo su teoría ondulatoria. Lejos quedaban también las intensas discusiones en el Instituto Niels Bohr hasta encontrar la formulación correcta de su principio de complementariedad, mientras Werner peleaba con el de indeterminación. Principios que no serían aceptados por Einstein.



*Figura 6 Heisenberg y Bohr, Wikimedia common.*

En Octubre de 1941, aproximadamente año y medio después de la ocupación alemana, Bohr recibió la visita de su colega y antiguo colaborador Werner Heisenberg, quien había permanecido en Alemania y trabajaba en el programa de investigación nuclear

alemán del que llegaría a ser el líder. Los avances alemanes hasta ese momento eran muy prometedores y alarmantes: tras la ocupación de Noruega disponían de una fábrica de agua pesada, Checoslovaquia suministraba miles de toneladas de compuesto de uranio y tras la ocupación de París y la toma del laboratorio de los Joliot—Curie estaban a punto de completar un ciclotrón. Además de disponer de la industria química más importante del mundo, el programa alemán contaba con un cuerpo de físicos, químicos e ingenieros liberado de las demandas de la guerra. Unos cuarenta físicos y químicos esparcidos en nueve grupos de investigadores que se coordinaron para medir las constantes nucleares de los materiales y concentrarse en la construcción del reactor.

Los viajes de Heisenberg a los territorios ocupados formaban parte del programa de propaganda cultural alemán. Aquella tarde del 16 de septiembre, Bohr y Heisenberg mantuvieron un encuentro privado, nadie sabe exactamente de que hablaron. Es uno de los eventos más controvertidos de la historia que ha quedado inmortalizado en la obra de teatro *Copenhague (1998)* escrita por Michael Frayn. De lo que no cabe ninguna duda es que Bohr quedó muy alterado, se llevó la impresión de que Alemania estaba trabajando en una bomba atómica.

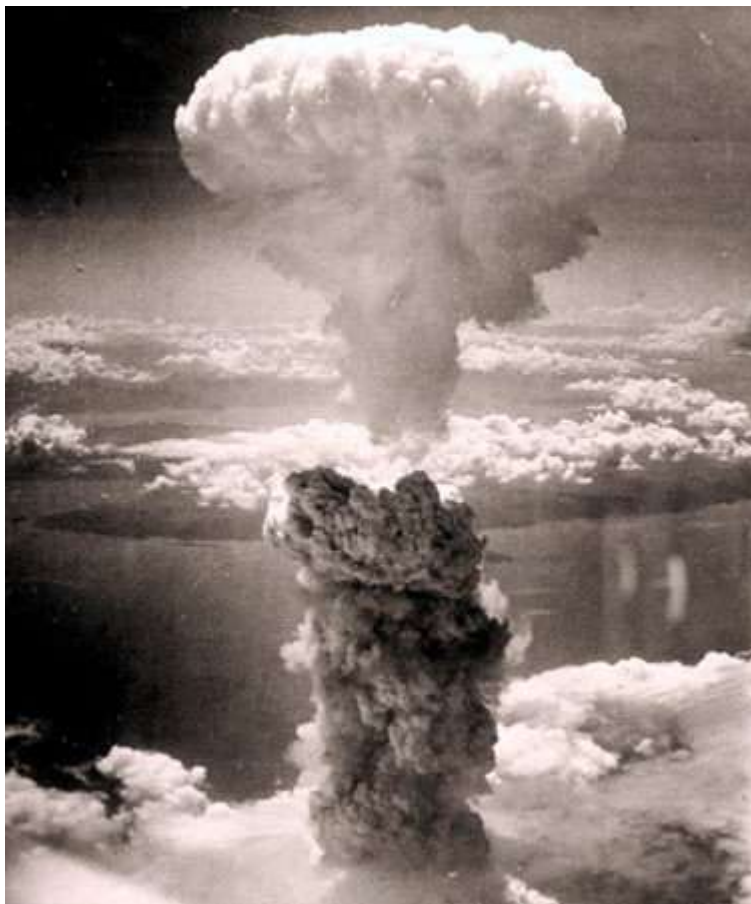
Mientras tanto, en Gran Bretaña las investigaciones científicas priorizaron el radar y la criptografía. Pero los emigrados europeos de la Alemania Nazi no podían participar directamente en estas tareas clasificadas, por lo que Otto Frisch, que había abandonado Dinamarca, y el físico alemán Rudolf Peierls desarrollaron un

método para producir una bomba atómica basándose en los trabajos teóricos de Bohr y Wheeler. Recalcularon la masa crítica de U—235 en unos pocos Kilogramos y diseñaron procedimientos para enriquecer el U—235. A raíz de sus informes se creó el comité MAUD para un modesto programa de investigación nuclear dependiente de la empresa Tube Alloys con Chadwick como jefe técnico.

Existe una curiosa historia sobre porqué este comité adoptó el nombre en clave de MAUD. Al parecer, Lise Meitner transmitió en un cable la petición de la familia Bohr de informar de su bienestar a una tal Maud Ray, Cuando el cable llegó a Gran Bretaña el comité interpretó que ese nombre era un misterioso anagrama para algo atómico y lo adoptaron.

En enero de 1943 los avances alemanes en investigación nuclear se habían frenado, con el ejército empantanado en el frente ruso los apoyos económicos al proyecto se anularon y la rivalidad entre los distintos grupos de investigación por conseguir los materiales empezaba a hacer mella. Aquel año Bohr recibió una invitación para pasar a Gran Bretaña donde su cooperación podía ser de gran ayuda, pero él consideró que su deber era seguir al frente de su instituto, pues todavía estaba convencido de la inaplicabilidad de los últimos conocimientos nucleares. Sin embargo, en noviembre de ese mismo año, la noticia de que los nazis se llevarían a todos los judíos daneses hizo que Bohr y su familia pasaran a Suecia y desde allí a Inglaterra dónde sería nombrado consultor de Tube Alloys. Fue entonces cuando reveló que Maud Ray Kent era el nombre de la

institutriz que enseñaba inglés a sus hijos.



*Figura 7 Bomba atómica. Creative commons Pixabay.*

Con el lanzamiento del proyecto Manhattan y frente a la posibilidad de que el Reino Unido quedara excluido, Churchill firmó con Roosevelt el acuerdo de Quebec, a partir del cual se desarrolló una cooperación efectiva en materia nuclear entre los dos países. Con este motivo, los científicos de Tube Alloys se trasladaron a EEUU. Bohr viajó con el equipo británico y tras una breve estancia en Washington pasó a Los Álamos donde revisó todas las fases de proyecto. Concluyó que "no necesitaban mi ayuda para hacer la

bomba" y decidió dedicarse a un problema hasta entonces no abordado: las consecuencias de la existencia de la bomba en el mundo de la posguerra.

La caja de Pandora: "Se ha ganado la guerra, pero no la paz".

"Cometí un gran error en mi vida cuando firmé la carta al presidente Roosevelt recomendándole que se fabricaran bombas atómicas" le confió Einstein a su amigo Pauling poco antes de morir, "pero había una justificación: el peligro de que los alemanes la fabricaran". "Si hubiera sabido que ese miedo no estaba justificado... no habría participado en abrir esta caja de Pandora".

Alemania nunca fabricó la bomba, los investigadores alemanes nunca obtuvieron plutonio. En 5 años de investigación, Alemania había fallado en conseguir una reacción en cadena autosostenida que permitiera la producción de plutonio en cantidad.

En 1945, con Alemania a las puertas de la derrota, Einstein volvió a escribir a Roosevelt, esta vez estaba alarmado por el hecho de que Estados Unidos acabase usando el arma. Desgraciadamente, Roosevelt murió en abril y nunca llegó a leer su carta: Harry Truman, su sucesor, la encontró cerrada en su escritorio. El 6 de agosto de 1945 la *BBC Home Service* anunciaba por radio que una bomba atómica había sido lanzada sobre la ciudad de Hiroshima.

Einstein dedicó la última década de su vida a alertar sobre los peligros de las armas nucleares y a intentar que los países resolvieran los conflictos de forma pacífica. "Se ha ganado la guerra, pero no la paz" decía en un discurso en el hotel Astoria de Nueva



York en diciembre de 1945. A pesar de ello, no creía que el secreto de la bomba debiera ser entregado a las Naciones Unidas y a la Unión Soviética, pensaba que el secreto debía ser depositado en manos de un gobierno mundial.

Para Bohr, que desde 1944 analizaba las consecuencias de la existencia de la bomba en el mundo de posguerra, era previsible una futura tensión entre Occidente y Rusia, por lo que consideraba que el único medio de evitar una carrera armamentística era tener un mundo abierto. El 26 de agosto de 1944 Roosevelt recibió a Bohr, quien quedó completamente satisfecho creyendo en la posibilidad de ser encargado de una misión exploratoria en la URSS, pero la obstinación de Churchill en no comunicarse con los rusos sería aceptada por Roosevelt en una segunda entrevista en Quebec. Bohr escribió un segundo memorándum a Roosevelt, quien murió en abril sin recibirlo. Siguió entrevistándose con políticos, pero a medida que la guerra fría se intensificaba, su voz era cada vez menos escuchada.

Antes de terminar la segunda guerra mundial, algunas de las personas encargadas de la fabricación de la bomba atómica reconocieron la importancia de redactar un informe sobre su trabajo, especialmente para exponer el enorme cambio que el descubrimiento exigiría en la política mundial. Se publicaba así el conocido "Informe Smith", probablemente el que otorgó la paternidad de la bomba a Albert Einstein al hacer gran hincapié en la importancia de su famosa fórmula. Una de las consecuencias de la publicación del Informe Smith fue la creación de la Comisión de

Energía Atómica. Otras tentativas para establecer un control internacional de las armas atómicas, como el plan Baruch, no fueron aceptadas, pero los debates que suscitaron en el mundo entero no hubieran podido producirse sin él.

Afortunadamente y tal como sucedió en el mito de Pandora, en el que tras salir de la caja todos los males se abrió por segunda vez dejando salir una maravillosa libélula llamada Esperanza, en pocos años las aplicaciones pacifistas de la fisión nuclear se desarrollarían en dos esferas generales: importantes usos médicos con la producción de radioisótopos y la de producción de energía eléctrica. Estos comienzos de uso no militar tendrían su punto de partida en la Conferencia Internacional sobre los usos pacíficos de la energía atómica mantenida en Ginebra en agosto de 1955 donde se dieron cita 1260 científicos y 800 observadores de 72 naciones para compartir más de 1200 publicaciones.

Unos meses antes, en abril de 1955, moría Albert Einstein todavía atormentado por su contribución en el desarrollo de la bomba atómica. "Es imposible anticipar cuando se aplicará la energía atómica a fines constructivos" declaraba en noviembre 1945. ¡Ojalá hubiera podido aventurar que estos nuevos usos llegarían tan pronto!

### Bibliografía:

- (1) Albert Einstein, Antoni Bosh, editor, Mis ideas y opiniones.
- (2) Otto Robert Frisch, What little I remember.
- (3) Chistopher Galfard, Blackie Books, Para entender a Einstein.

(4) Daniel R. Bes, Niels Bohr y la bomba atómica (versión escrita de la charla dada en el C. A. R. I. el 1 de septiembre de 2009.

(5) Jim Baggott, 2009 Icon books Ltd. , Atomic, the first war of physics and the secret history of the atom bomb: 1939—49.

(6) Arthur Holly Compton, The Atomic Quest: A Personal Narrative by Arthur Holly Compton.

(7) David Irving, 1967, The Virus House, Germany's Atomic Research and allied counter—measures.

(8) Richard Rhodes, Simon & Schuster Paperbacks, The making of the atomic Bomb.

[Isabel del Río Luna.](#)

Licenciada en Ciencias Físicas.

Máster en Periodismo y Comunicación Científica.

ENUSA.



*Fotografía tomada en el 8º Congreso Solvay celebrado en 1948, "Partículas elementales y sus interacciones". Por filas de atrás a delante de izda. a dcha.: En la cuarta fila: Balasse, Flamache, Grove, Goche, Demeur, Ferrera, Vanisacker, VanHove, Edward Teller, Goldschmidt, Marton, Dilworth, Ilya Prigogine, Jules Géhéniau, Henriot, Vanstyvendael. En la tercera fila: Kipfer, Pierre Victor Auger, Perrin, Serber, Léon Rosenfeld, Ferretti, Moller, Louis Leprince—Ringuet. En la segunda fila: Paul Scherrer, Stahel, Kelin, Blackett, Dee, Felix Bloch, Frisch, Rudolf Peierls, Homi Jehangir Bhabha, Robert Oppenheimer, Giuseppe Occhialini, Powell, Hendrik Casimir, Marc de Hemptinne. Sentados, de Izda. a dcha.: John Cockcroft, Marie—Antoinette Tonnelat, Erwin Schrödinger, Owen Willans Richardson, Niels Bohr, Wolfgang Pauli, William Lawrence Bragg, Lise Meitner, Paul Dirac, Hendrik Anthony Kramers, Théophile de*

*Donder, Walter Heitler, Jules Émile Verschaffelt.* [Proceedings 1948](#)

## Lecturas recomendadas por

Quintín Garrido

[\(CIENCIA,y el "azar relativo" web\)](#)

(quintingarrido@gmail.com)

- A. Hermann, Einstein. En privado, vol. ISBN 8478807144, Ediciones Temas de Hoy S A, 1997.
- D. Lindley, Incertidumbre, vol. ISBN 9788434453487, Editorial Ariel S A, 2008.
- J. M. Sánchez Ron, Historia de la física cuántica. I. El período fundacional (1860—1926), vol. ISBN 8484322491, Editorial Crítica S L, 2001.
- F. J. Yndurain, Electrones, Neutrinos y Quarks, vol. ISBN 8484328074, Editorial Crítica S L, Drakontos Bolsillo, 2006.
- J. Schwinger, El legado de Einstein, vol. ISBN 8475930549, Prensa Científica S A, 1995.
- R. P Feynman, Seis piezas fáciles, vol. ISBN 8484328465, Editorial Crítica S L, Drakontos Bolsillo, 2008.
- J. Stachel (ed. ), Einstein 1905: un año milagroso, vol. ISBN 8484322157, Editorial Crítica S L, Drakontos Clásicos, 2001.
- O. R. Frisch, De la fisión del átomo a la bomba de hidrógeno. Recuerdos de un físico nuclear, vol. ISBN 8420618950, Alianza Editorial S A, 1982.
- J. Edelstein, A. Gomberoff, Einstein para perplejos, vol. ISBN 9788499928289, Penguin Random House Grupo Editorial S A, 2018.







