

Las partículas y el cosmos



Antonio Tausiet



Las partículas y el cosmos

Antonio Tausiet

Imagen de portada: *El universo observable*, Pablo Carlos Budassi



Los libros prohibidos

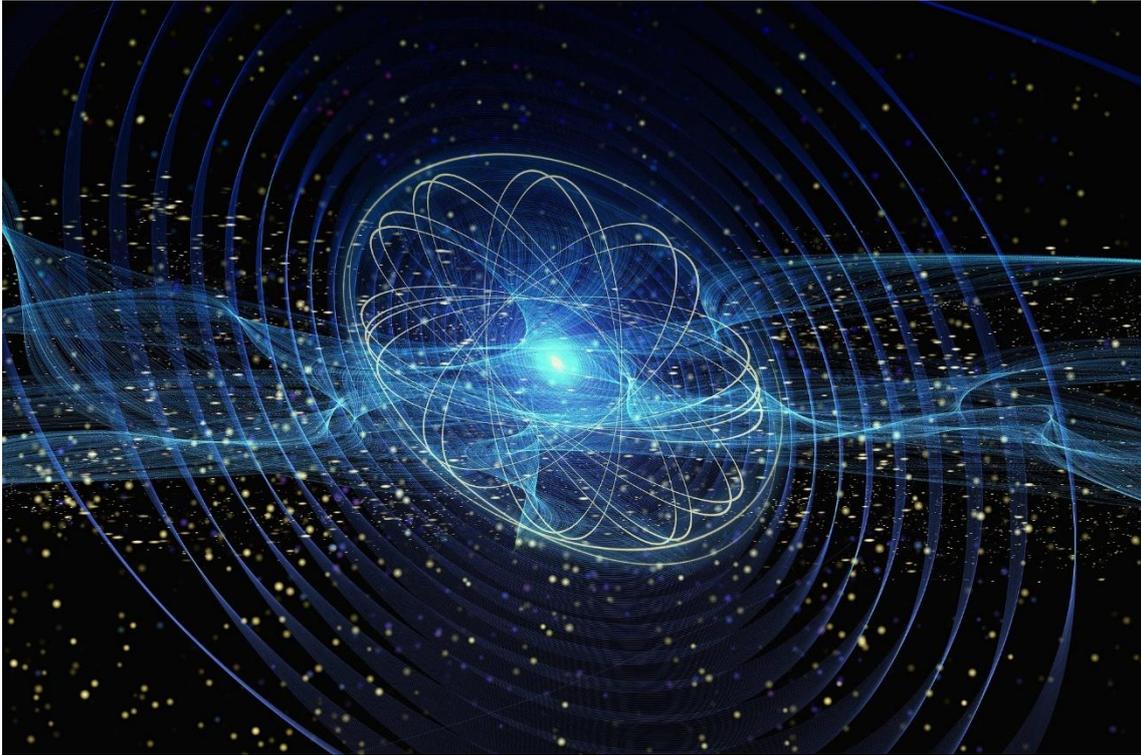
Editorial *Los libros prohibidos*

Primera edición. Zaragoza, España, 2022

Índice

	Pág.
<u>Introducción</u>	1
<u>1. Física</u>	3
<u>1.1. Ramas</u>	4
<u>1.2. Conceptos</u>	6
<u>1. Entropía</u>	6
<u>2. Información</u>	7
<u>3. Masa y energía</u>	8
<u>4. Ondas y radiación</u>	9
<u>5. Espacio-tiempo y gravedad</u>	10
<u>1.3. Leyes</u>	13
<u>2. Física de partículas</u>	15
<u>2.1. Clasificación de las partículas</u>	17
<u>2.2. Interacciones o fuerzas fundamentales</u>	19
<u>2.3. Conceptos de mecánica cuántica</u>	21
<u>1. Dualidad onda-partícula</u>	21
<u>2. Superposición cuántica</u>	21
<u>3. Efecto túnel</u>	22
<u>4. Principio de incertidumbre</u>	22
<u>5. Entrelazamiento cuántico</u>	23
<u>6. Primera revolución cuántica (siglo XX). Electrónica</u>	23
<u>7. Segunda revolución cuántica (siglo XXI). Informática</u>	24
<u>8. Supremacía cuántica</u>	24
<u>9. Teleportación cuántica</u>	24
<u>3. Cosmología</u>	26
<u>3.1. El universo y los astros</u>	27
<u>3.2. Clasificación de los astros</u>	28
<u>3.3. Agujeros negros y modelos cosmológicos</u>	30
<u>3.4. Sagitario A*</u>	32
<u>3.5. Energía de fusión</u>	33
<u>4. Ingenios y genios</u>	34
<u>4.1. Ingenios. Grandes máquinas</u>	34
<u>1. Aceleradores y detectores</u>	34
<u>2. Observatorios y telescopios</u>	40
<u>3. Reactores de investigación</u>	46
<u>4.2. Genios. Grandes científicos</u>	53
<u>5. La teoría Tausiet</u>	55
<u>5.1. Introducción</u>	55
<u>5.2. Desarrollo</u>	56
<u>5.3. Conclusiones</u>	56

Introducción



El conjunto de conocimientos acerca de lo que nos constituye y nos rodea es objeto de estudio por parte de la comunidad científica, que suele agruparse en departamentos de física cuántica y astrofísica en las universidades. El salto de esos conocimientos a la sociedad se provee mediante la divulgación (propagación de información al vulgo), y sus responsables son los propios científicos y los escritores y periodistas.

La popularización de la **física de partículas** y de la **cosmología**, que son las dos formas del ser humano de mirarse al espejo (hacia dentro y hacia fuera) es un fenómeno contemporáneo que ha ido haciéndose sitio en la curiosidad de la gente, a medida que mejoraban las condiciones sociales en los países ricos y la religión daba paso a la ciencia. El otro gran bloque de la información científica, del que no nos ocupamos aquí, se estudia en la biología y lo llamamos **evolución** humana, un proceso que se suele retrotraer hasta el origen de la vida; es la relación de nuestra naturaleza con el tiempo.

Nuestra relación con el espacio es el objeto del conjunto de informaciones que ponen en común los mundos de lo más pequeño y de lo más grande: **Las partículas y el cosmos**. La ciencia es una herramienta poderosa que nos ayuda a acercarnos a la verdad, y por ello todas sus ramas están relacionadas. La mecánica cuántica nos habla de las cosas pequeñísimas, y la astrofísica de las gigantescas, y todos nos asombramos de los parecidos entre ellas, como la forma circular de las galaxias y de los átomos: en ambos casos se producen perturbaciones y distorsiones aún sin explicar por completo.

Quizás estamos en un lugar intermedio en el espacio, en el que la física es **una sola** y nuestra posición antropocéntrica la divide respecto a nuestro tamaño. Algunas investigaciones demuestran que hay razón para plantearse eso: la evolución de los anillos de polvo y gas que rodean las estrellas responde a la ecuación de Schrödinger en la que se basa la mecánica cuántica, que por lo tanto rige también procesos astrofísicos (2018, Batyguin). Otro ejemplo es

la similitud entre las redes de galaxias y las de nuestras neuronas (2020, Vazza y Feletti). Por no hablar de la existencia de tantas cosas esféricas de distintos tamaños, como los electrones, los planetas o las estrellas.

Más allá de similitudes, el hecho incontestable es que lo más grande está constituido por lo más pequeño: las galaxias están hechas de átomos. Lo pequeño y lo grande, las dos cuestiones antagónicas que trata este texto, están tan relacionadas que forman un conjunto indivisible, y de ello se ocupan los científicos que intentan dar con la teoría del todo.

Este resumen ha sido redactado para ordenar por escrito la información más relevante acerca de lo que ocupa y afecta al espacio físico. He procurado condensarla de modo que cualquier lector ajeno a estos mundos pueda comprender su contenido, en la línea de la divulgación científica más alejada posible de lo que los anglosajones llaman despectivamente ciencia pop, que traspasa la barrera de la pseudociencia.

Comienzo aclarando cosas de la física en general, para pasar al intrincado mundo de las partículas. Después me adentro en la cosmología, y termino con una selección de máquinas y científicos relevantes. Mi particular modo de ver el mundo, que concilia la búsqueda de la verdad con la creación artística, me obliga a añadir un último capítulo de inspiración humorística, la **teoría Tausiet** (la propuesta unificadora definitiva). El lector es muy dueño de saltárselo o de acompañarme en mi juego.

1. Física



Repaso a las disciplinas, los conceptos y las leyes de la física. En la búsqueda para desentrañar la realidad, los seres humanos (al menos los más capaces, muchos de ellos verdaderos genios) han ordenado las conclusiones de su sabiduría en categorías, que son la base de los contenidos de este texto.

Pero no hay que perder de vista que, al ahondar en la esencia de lo que consideramos real, nos acercamos cada vez más al límite de la comprensión. Cuando en cualquier disciplina física definimos conceptos a los que atribuimos leyes generales, sólo estamos reflejando lo que conseguimos percibir. Todo lo que abarca el género humano con su inteligencia está relacionado con nosotros, y hay una frontera marcada por los sentidos. La tecnología afina esa reducción, y la filosofía contribuye elucubrando.

1.1. Ramas



Empecemos por el principio, ordenando los nombres de las disciplinas físicas de las que estamos hablando y centrándonos en ellas, desde la definición de ciencia hasta la cosmología, pasando por la mecánica cuántica. Si bien algunas palabras se utilizan con frecuencia indistintamente (física/mecánica, astronomía/cosmología), definen conceptos diferenciados.

La **ciencia** es el sistema que organiza y construye el conocimiento mediante deducción, investigación y observación experimental. Las ciencias formales son conjuntos sistemáticos de conocimientos, obtenidos mediante deducción (matemáticas, lógica). Las ciencias humanas y sociales se ocupan de lo abstracto y el comportamiento mediante investigación (filosofía, filología, historia, psicología, antropología, sociología, geografía) y las **ciencias naturales** estudian la naturaleza. Sus ramas son: física, química, astronomía, geología y biología. Aquí nos ocupamos de la primera y la tercera.

1. Física: ciencia natural que estudia la materia y sus conceptos relacionados: movimiento (mecánica), fuerza (electromagnetismo) y energía (termodinámica), todo ello para los objetos grandes; para las partículas existe su propia rama. La física teórica explica los fenómenos mediante las matemáticas. La física aplicada la interrelaciona con otras disciplinas.

1.1. Mecánica: rama de la física que estudia el movimiento de los cuerpos, impulsados por fuerzas.

1.1.1. Mecánica clásica: rama de la física que estudia el movimiento de los cuerpos macroscópicos.

1.1.2. Mecánica vectorial: rama de la mecánica clásica que estudia el movimiento de los objetos a velocidades no cercanas a la de la luz. Se rige por las leyes de Newton (primera unificación de la física).

1.1.3. Mecánica relativista: rama de la mecánica que unifica la mecánica clásica y el electromagnetismo. Está formulada en la teoría de la relatividad de Einstein: la relatividad especial se refiere a un espacio-tiempo no curvado y la relatividad general al espacio-tiempo curvado.

1.2. Electromagnetismo: rama de la física que estudia la fuerza de interacción electromagnética. El vocablo también define el fenómeno físico asociado.

1.2.1. Electrodinámica clásica: rama del electromagnetismo que unifica la electricidad y el magnetismo. Se rige por las ecuaciones de Maxwell (segunda unificación de la física).

1.3. Termodinámica: rama de la física que estudia la energía.

1.4. **Física de partículas** o cuántica: rama de la física que estudia los componentes elementales de la materia y las interacciones entre ellos. La teoría cuántica de campos reúne la física relativista con la física cuántica, excepto en el caso de la gravedad.

1.4.1. Mecánica cuántica: rama de la física de partículas que estudia su movimiento. Está basada en la ecuación de Schrödinger, que ofrece resultados probabilísticos.

1.4.2. Electrodinámica cuántica: teoría cuántica del campo electromagnético.

1.4.3. Cromodinámica cuántica: teoría cuántica del campo nuclear fuerte.

1.4.4. Flavordinámica cuántica: teoría cuántica del campo nuclear débil.

1.4.5. Modelo electrodébil: teoría cuántica unificada de los campos electromagnético y nuclear débil.

1.4.6. Termodinámica cuántica: estudia las relaciones entre la termodinámica y la mecánica cuántica.

1.4.7. Gravedad cuántica: intenta unificar la física relativista con la cuántica.

2. Astronomía: ciencia natural que estudia los objetos del universo (astros) y los fenómenos ligados a ellos. La astrofísica es la física aplicada a la astronomía.

2.1. **Cosmología**: rama de la astronomía que estudia el universo en su conjunto.

1.2. Conceptos

Una vez organizadas las ramas del árbol de la ciencia, añado unos comentarios sobre algunos de los conceptos que utiliza la física. Las cosas funcionan según unos parámetros que no estamos acostumbrados a manejar. Eso es lo que hace aún más interesante detenernos en ellos. Pero por muy extraños que puedan llegar a parecernos, debemos tener siempre en cuenta que todos los conceptos son antropomórficos; esto es, que siempre se definen desde un punto de vista humano. Algo que deja claro este principio es que para explicarlos introducimos la palabra observador.

1. Entropía



Hay una regla fundamental de la física que dice que las cosas, con el tiempo, se desordenan. Es el segundo principio de la termodinámica, como veremos. La **entropía** es la tendencia natural a la pérdida del orden, y su medida indica el grado de desorden, distribución aleatoria o incertidumbre. En termodinámica, mide el grado de organización de un sistema, describiendo el carácter irreversible de su evolución en el tiempo. Es el caso de un objeto caliente que al entrar en contacto con otro frío le traspa su energía hasta equilibrarla, sin posibilidad de volver al orden anterior.

El origen del término y su aplicación práctica surgieron al observar que hay una parte de energía aplicada a los motores que no es utilizable para realizar el trabajo mecánico. Esa proporción se llamó entropía, y sirvió para asentar científicamente que existen tanto la energía disponible, que puede ser transformada en trabajo, como la no disponible. El motivo es que el calor, a medida que fluye, conlleva entropía, que se libera en el entorno como calor residual. El valor total de la entropía en el sistema (motor+alrededores) aumenta, y lo hace más cuanto menos eficiente es el motor.

La entropía puede crearse, pero no destruirse, debido a su irreversibilidad. Por eso, cada vez es mayor. Para poder medir la entropía en un sistema físico, se considera que es nula en una temperatura de cero absoluto (inalcanzable), en la que las moléculas estarían quietas.

La entropía se produce porque, entre todas las posibilidades de algo al moverse durante un tiempo en el espacio, la de que recupere su orden inicial sólo es una. El concepto de entropía es muy amplio, y salta de su origen en la física para proporcionar interesantes consideraciones. En un experimento físico, la entropía mide el desorden de las partículas al moverse, esto es, su libertad: de ello se puede deducir que libertad es lo contrario de orden. La flecha del tiempo es

3. Masa y energía



La materia es todo aquello que posee masa y volumen, y por lo tanto ocupa un espacio. La **masa** es la cantidad de materia de un cuerpo y se refiere a su capacidad de resistencia al movimiento cuando es influido por una fuerza. Se mide en kilogramos. La fuerza es aquello que mueve o deforma un cuerpo, y la presión es la fuerza aplicada a un área. No es lo mismo masa que peso: el **peso** es la fuerza que actúa sobre un cuerpo debido a la gravedad. La masa es constante; el peso no: en la Luna, las cosas de la misma masa pesan menos porque hay menos gravedad. El peso se mide en newtons.

La **energía** es la capacidad de los cuerpos para realizar un trabajo. El **trabajo** es la transferencia de energía de un objeto a otro, que depende de la fuerza aplicada y origina el movimiento o cambio de posición. El desplazamiento es la distancia (longitud entre dos puntos) entre la posición inicial y la final. Todo cuerpo en reposo con masa tiene una energía intrínseca asociada. Al moverse, los cuerpos producen energía, según la célebre fórmula $E=mc^2$ (1905, Einstein), donde E es la energía, m la masa y c la velocidad de la luz. Así que, más allá de la definición de la mecánica clásica, la masa es la energía en reposo.

La **potencia** es el ritmo al que se gasta la energía; más concretamente, la cantidad de trabajo en el tiempo, y se mide en vatios: un vatio es un julio por segundo. Un julio mide la cantidad de energía o de calor: es el trabajo necesario para producir un vatio durante un segundo. Una caloría son 4,1868 julios. Este galimatías indica que, a más potencia, más rapidez de transmisión de energía: por ejemplo, se usará más electricidad y el recibo será más caro.

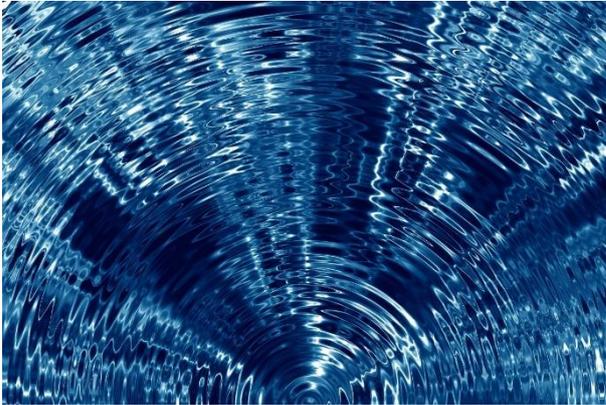
El **calor** es la energía en tránsito. Es decir, que define una transferencia, no una propiedad. El calor es el trabajo que produce diferencia de temperatura, medida en grados, al pasar la energía de los cuerpos calientes a los fríos. Entonces se dice que la energía se ha transferido en forma de calor. Al aplicar energía a un cuerpo, sus partículas se mueven más rápido, transfiriéndose la energía entre sí, y se calienta.

La **electricidad** es una forma de energía que se refiere a los fenómenos relacionados con las cargas eléctricas y su flujo. Forma parte del electromagnetismo y se manifiesta en la corriente eléctrica, cuya intensidad se mide en amperios.

Lo que da la masa a las partículas que conforman las cosas es el campo de Higgs, compuesto por bosones de Higgs. Además, el universo se está expandiendo cada vez más rápidamente, contra la fuerza de la gravedad, gracias a la **energía oscura**, que es el 68,3 por ciento de todo lo que hay (masa+energía).

Las cuatro fuerzas o **interacciones** fundamentales, transportadas por sus correspondientes partículas, son el modo que tiene la naturaleza para realizar la transferencia de energía en el seno de la topología del espacio-tiempo. La propagación de la energía se llama **radiación**. Un rayo es la trayectoria de la radiación.

4. Ondas y radiación



Una **onda** es la propagación de una propiedad física, como la densidad, la presión o los campos, perturbando el espacio. Las ondas implican un transporte de energía y de información desde una fuente hasta un receptor, sin transporte de materia. El espacio perturbado puede estar ocupado por materia (madera, agua, aire) o no (vacío). El **sonido** es el resultado de la propagación de ondas mecánicas (audibles o no) a través de un medio (fluido o sólido) que provocan vibración en un cuerpo.

La **frecuencia** es el número de repeticiones (ciclos) de cualquier evento periódico, y se mide en hercios (ciclos por segundo). En el caso de las ondas, la distancia entre sus perturbaciones periódicas se denomina longitud de onda. El tono de las ondas de sonido depende de su frecuencia. Si las vibraciones son más frecuentes, es agudo o alto; si lo son menos, es grave o bajo.

Las ondas sonoras y el resto de las ondas mecánicas no se propagan en el vacío; las ondas electromagnéticas sí. Las ondas gravitatorias deforman el espacio-tiempo. La forma de propagación de las ondas mecánicas es la transmisión de la **oscilación** de las partículas entre sí. La de las electromagnéticas y gravitatorias se realiza mediante el transporte que proveen los bosones, como el fotón, y viajan a la velocidad de la luz.

Las **ondas cerebrales** son patrones rítmicos de actividad eléctrica que produce el sistema nervioso animal. Las neuronas son las células que procesan la información, mediante conexiones (sinapsis) químicas y eléctricas (1888, Cajal). La corriente eléctrica cerebral se mide mediante la electroencefalografía. El sistema nervioso actúa en forma de ondas eléctricas, que también estimulan los latidos del corazón, medidos en la electrocardiografía.

La **radiación electromagnética** es la transportada por los fotones en forma de ondas. Su distribución energética se denomina espectro electromagnético, y se ordena por la **longitud de onda**. A mayor longitud de onda, menos energía transportada. La palabra luz, en sentido amplio, es sinónimo de radiación electromagnética, aunque se usa para las longitudes de onda medias, y sobre todo para la luz visible. Veamos los seis tipos de ondas, ordenadas de mayor a menor longitud de onda.

En el espectro de radiofrecuencia (el de mayor longitud de onda), las **ondas de radio** son las más largas, y se utilizan en radiocomunicación (radio, televisión, radar y telefonía móvil), en radioastronomía y en resonancia magnética. Las **microondas** son las de menor longitud de onda en este espectro, y se usan en los hornos de microondas.

La **radiación o luz infrarroja** es emitida por los cuerpos a temperatura ambiente en forma de calor. Los rayos infrarrojos se usan en mandos a distancia y dispositivos de visión nocturna.

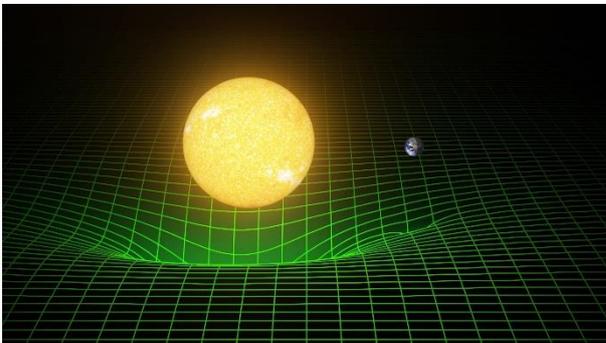
El espectro visible por el ojo humano se denomina **luz visible**, o simplemente luz. El ojo humano es capaz de distinguir la longitud de onda de la luz, apreciando sus rangos en forma de color, desde las ondas más largas (rojo) hasta las más cortas (violeta).

La **radiación o luz ultravioleta** es el siguiente rango de luz, y se usa en esterilización y lámparas de luz negra. La luz solar es un 50 % infrarroja, 40% visible y 10 % ultravioleta.

La **radiación ionizante** (capaz de cargar eléctricamente) puede darse en los **rayos X**, que se producen mediante la desaceleración de los electrones y se utilizan en las radiografías; y en los **rayos gamma**, que se producen en la desintegración del núcleo del átomo.

Además de los rayos X y los gamma, que cierran la lista de la radiación electromagnética, hay otros tipos de radiaciones ionizantes o de alta energía. Como en el caso de la radiación gamma, las radiaciones **alfa** y **beta** son fruto de la desintegración del núcleo, que produce radiación nuclear o **radiactividad**. Otro tipo de radiación ionizante es la **radiación cósmica**, procedente de las extinciones de estrellas de otras galaxias.

5. Espacio-tiempo y gravedad



El **espacio** es el lugar donde se encuentran los objetos, por lo que está definido por la relación entre estos. El espacio vacío es el lugar donde no hay objetos: los objetos (su presencia y su ausencia) son los que definen al espacio. Un **objeto** o cuerpo es un conjunto de materia que ocupa un lugar en el espacio; su extensión en las tres dimensiones se denomina volumen y se mide en metros cúbicos. Los cuerpos pueden encontrarse en distintos estados de agregación de la materia, que dependen de la energía: sólido, líquido, gas o plasma. Para los líquidos, un decímetro cúbico es igual a un litro.

El **tiempo** es la magnitud física que mide la duración y separación de eventos. Los eventos son los que definen al tiempo, y su intervalo se mide en segundos. Un **evento**, suceso o acontecimiento es cualquier cosa que ocurre en un espacio y un tiempo. Cuando se describe un suceso, se señala su ubicación (posición en el espacio: dónde) y su hora (cuándo, en el tiempo), además de su duración (cuánto tiempo).

Los acontecimientos pueden discurrir hacia delante y hacia atrás en el espacio, pero en el tiempo sólo suceden hacia delante: lo sucedido es pasado y lo que sucederá, futuro; ya hemos visto el papel que juega la entropía en el asunto. En la experiencia cotidiana, cuantos menos eventos diferentes, más despacio pasa el tiempo (aburrimiento), y viceversa (interés). Cuando, por el efecto de la expansión acelerada del universo, todo esté muy lejos entre sí, no habrá eventos: no habrá tiempo.

En física, un evento es un punto definido por cuatro coordenadas: las de las tres dimensiones del espacio y la del tiempo. Otra aportación de Einstein en 1905: el continuo **espacio-tiempo**: el espacio y el tiempo forman un todo. Como veremos, en 1915 añadió la gravedad, y conformó una teoría comprobada en la que la materia curva el espacio-tiempo y el espacio-tiempo mueve a la materia. El tiempo es relativo: depende del movimiento y del lugar que ocupa un observador. En el primer caso difiere según la velocidad entre dos observadores; en el segundo, la diferencia se debe a la gravedad.

La **velocidad** es la medida del movimiento (cambio de posición de un objeto con respecto al tiempo). Si el objeto va lento, tarda mucho, y si va rápido, tarda poco. El tiempo que necesita la luz para recorrer una distancia siempre es el mismo, para todos los observadores. Esto sucede aunque la luz surja desde un objeto con su propia velocidad.

Cuanto más lejano está un objeto, más clara está la correspondencia entre el espacio y el tiempo. Por ejemplo, una estrella que está muy lejos, está separada de nosotros por ambos conceptos. Y cuando se dibuja el universo circular con nuestro sistema solar en el centro, los límites más lejanos son los del Big Bang.

La **gravedad** o interacción gravitatoria es la fuerza que atrae los objetos entre sí. Se da porque el espacio-tiempo es flexible y se curva ante la presencia de los objetos: por eso los cuerpos celestes orbitan. Otro efecto que produce la gravedad es que los grandes cuerpos celestes sean esféricos, puesto que los comprime por igual hacia su centro. La relatividad general predijo que la gravedad, como el resto de interacciones, tenía una velocidad propia igual que la de la luz. Una vez más, Einstein tenía razón: en 2017, el estudio de las recién descubiertas ondas gravitatorias lo confirmó.

Pero detengámonos en el concepto de **órbita**. En nuestra experiencia cotidiana, los objetos no giran sin cesar en torno a otros, sin caerse. La órbita está producida por la gravedad, y determinada por la masa de los objetos y la distancia entre sí. Pero, ¿por qué la Luna no se cae a la Tierra? Porque su velocidad al entrar en órbita era la suficiente para mantenerse girando, sin más energía que la que proviene de la gravedad del objeto mayor, que mantiene su velocidad constante. Un objeto en órbita, si cambia de velocidad, o abandona la masa que le atrae, o cae en ella. Para ello, debe modificar su masa.

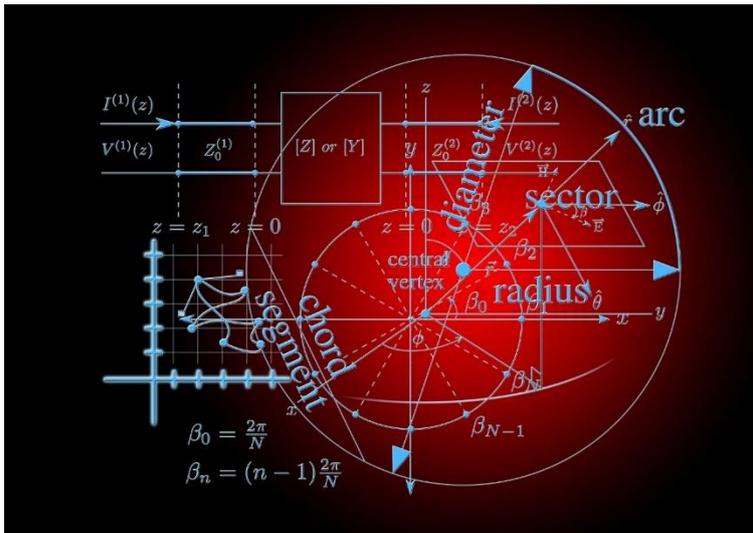
En la mecánica clásica (objetos moviéndose de modo habitual), a mayor masa menor velocidad; en la mecánica relativista (objetos moviéndose muy rápido), la masa aumenta con la velocidad, puesto que con su propia velocidad, los objetos ofrecen mayor resistencia al movimiento externo. Volviendo a la órbita: para dejar de dar vueltas sin cesar, la Luna necesitaría disminuir su masa (iría más lenta y caería) o aumentar su masa (iría más rápido y saldría de la órbita). El curioso caso de los objetos girando sin caerse es una cuestión de **equilibrio** entre la ley de la inercia (que veremos luego) y la de la gravedad.

Al poner en común los conceptos de tiempo y gravedad se obtienen conclusiones muy curiosas, como el teórico **viaje en el tiempo**. Si orbitásemos durante unas horas en torno a un agujero

negro, que ejerce mucha gravedad, el tiempo pasaría mucho más lento. Al volver a la Tierra, habrían pasado muchos años; sería un viaje al futuro. Viajar al pasado ya es más complicado. Si existiesen los agujeros de gusano, que fueron supuestos partiendo de la relatividad, éstos unirían espacios y tiempos distintos. Pero no solemos ver viajeros procedentes del futuro por aquí. Muchos físicos dicen que viajar al futuro es posible, pero al pasado no.

También se puede teorizar que la gravedad está causada por el espacio-tiempo, dando la vuelta al concepto. Más concretamente, por la tasa de flujo del tiempo. Según el físico estadounidense Kip Thorne (Premio Nobel 2017), los objetos se dirigen al punto donde su durabilidad es mayor: el lugar del espacio-tiempo en el que el tiempo pasa más despacio.

1.3. Leyes



Una ley física es un principio basado en la evidencia empírica, aplicable a un conjunto de fenómenos físicos. Se complementa con una teoría matemática que la formula de modo abstracto.

En primer lugar, hay un conjunto de leyes clásicas que se refieren a los objetos macroscópicos. Veamos algunas de ellas.

La **mecánica clásica** (1687, Newton) incluye la ley de gravitación universal o de la gravedad, que establece la fuerza con la que se atraen dos cuerpos por el hecho de tener masa; y las tres leyes del movimiento: ley de la inercia (un objeto en movimiento no se detiene si no se aplica una fuerza sobre él); ley de la dinámica (la fuerza es la causa de la variación de movimiento); y principio de acción y reacción (a cada acción se opone otra igual, de sentido contrario).

Las **leyes de la termodinámica** se ocupan del calor. El principio cero (1931, Fowler) afirma que dos cuerpos en contacto con distinta temperatura intercambian calor hasta que sus temperaturas se igualan. El primer principio (1824, Carnot) es que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma. El segundo (1850, Clausius), que la entropía se incrementa con el tiempo, de lo que se deduce que el intercambio de calor es irreversible. Y el tercero (1912, Nernst), que la entropía de un sistema tiende a cero cuando su temperatura tiende al cero absoluto (-273 °C).

Las leyes precursoras del **electromagnetismo** fueron unificadas en una sola teoría (1865, Maxwell). Entre ellas, la ley de Ampère (1831), la ley de Faraday (1831) y la ley de Lenz (1835), que relacionan un campo magnético con la corriente eléctrica que lo causa. Así se sentaron las bases del comportamiento de la electricidad y del magnetismo: las cargas eléctricas diferentes se atraen y las iguales se repelen, de modo similar a los polos magnéticos opuestos.

La **teoría de la relatividad** de Albert Einstein incluye la relatividad especial (1905) y la relatividad general (1915). La relatividad fue formulada para resolver la incompatibilidad entre la mecánica clásica de Newton y el electromagnetismo, y su enunciado básico supone que la localización en el tiempo y en el espacio de los sucesos físicos es relativa respecto al movimiento del observador. La **relatividad especial** estudia el movimiento sin contemplar la gravedad. Relaciona masa y energía e introduce el espacio-tiempo, como hemos visto. La **relatividad general** añade

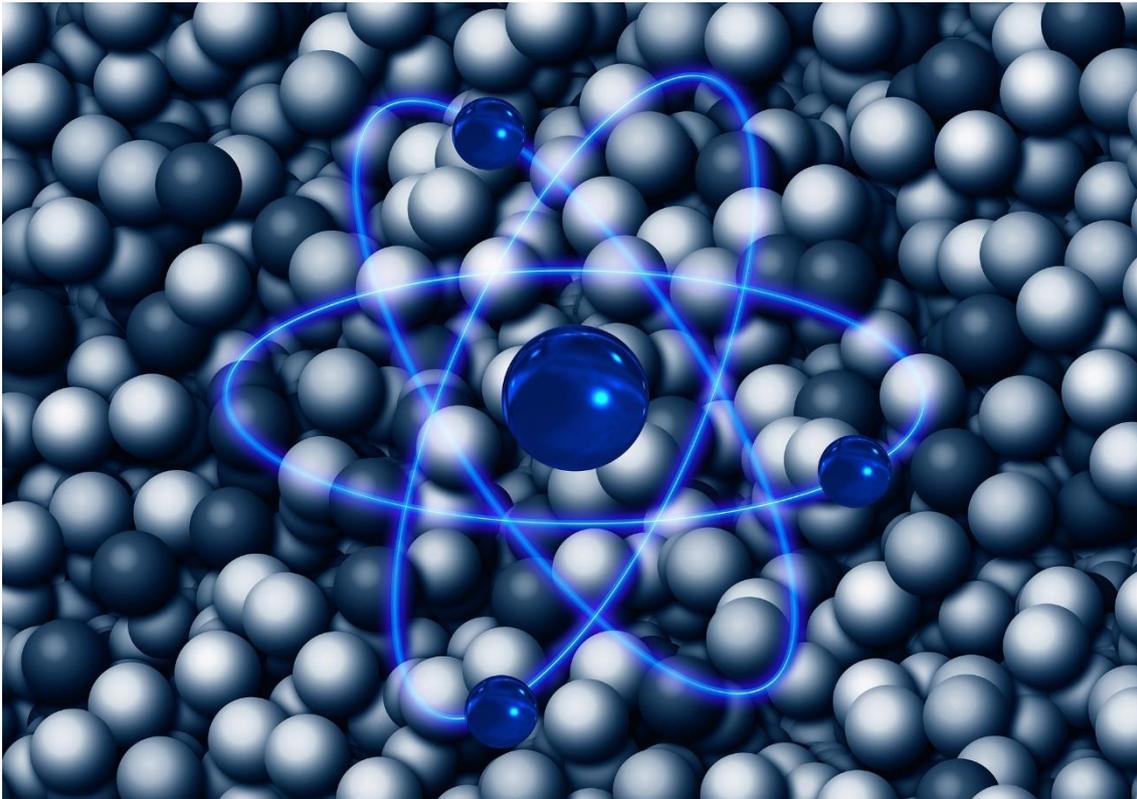
la gravedad a la relatividad especial, reemplazando la ley de la gravedad de Newton. Establece que la gravedad es una deformación en la geometría del espacio-tiempo, que afecta tanto a la masa como a la energía.

Si nos adentramos en la materia, las leyes físicas confirmadas que rigen dentro de los átomos son todavía más extrañas. La **mecánica cuántica** se ocupa de ellas, y lo más inquietante de todo es que nos hablan no sólo de lo que ocurre a escala infinitesimal, sino de la realidad en general.

Las partículas se rigen por **probabilidad**, no por certeza. Están en un determinado lugar o no, según un supuesto azar, como veremos. Y se puede predecir su comportamiento mediante leyes físicas, que funcionan: toda la electrónica se basa en la física de partículas.

Einstein nunca estuvo de acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica: creía en la certidumbre y pensaba que la física de partículas no estaría completa mientras no pudiera predecir todos los lugares donde estuvieran las partículas.

2. Física de partículas



La física de partículas estudia los componentes elementales de la materia y la interacción entre ellos. La **teoría cuántica de campos** es el lenguaje que aplica a la física de partículas los principios de la mecánica cuántica (1900, Planck; 1925, Heisenberg, Born, Schrödinger). Explica tanto la mecánica cuántica como la relatividad especial (1905, Einstein). Es el caso de la ecuación de Dirac (1928), que describe las partículas elementales.

Su principal aportación es el **modelo estándar** (1973), la teoría más sofisticada sobre la naturaleza en la historia de la humanidad, probado experimentalmente. Incorpora los descubrimientos desde los años sesenta del siglo XX hasta nuestros días sobre las partículas y sus relaciones. Clasifica las partículas en fermiones (materia ordinaria: leptones y cuarks) y bosones (portadores de las interacciones entre fermiones).

La confirmación de la existencia del bosón de Higgs en 2012 constituyó el cierre del último eslabón del modelo estándar. Sin embargo, no es la teoría completa de la física de partículas: porque no explica la materia oscura (aunque podría ser la de los agujeros negros primordiales, como veremos); porque no ha sido posible combinarlo con la **gravedad** de la relatividad general (1915, Einstein); y porque no resuelve el enigma de la preeminencia de la materia sobre la antimateria (aunque se sospecha que los neutrinos primordiales son los causantes).

El modelo estándar ignora la gravedad en los objetos microscópicos porque su interacción es despreciable, debido al minúsculo valor de su masa. Y la relatividad general ignora la longitud de onda de los objetos macroscópicos porque su vibración es despreciable, debido al gran valor de su masa. Por otro lado, las interacciones entre objetos son las que les confieren sus propiedades: la mecánica cuántica muestra que la realidad está tejida por relaciones.

Las **partículas** que conforman la materia pueden ser elementales (que no están formadas por otras) o compuestas. Además, pueden comportarse también como ondas (1927, Thomson y Davison). Tienen dos propiedades intrínsecas: la **carga** eléctrica, que concreta su capacidad de atraerse o repelerse, y el **espín** (1921, Stern y Gerlach), que se refiere a su valor fijo de rotación sobre sí mismas.

El espín es un fenómeno cuántico, y por lo tanto no comparable a la experiencia cotidiana. Así, una partícula de espín 1, como el fotón, necesita girar 360° para volver a su estado inicial, como los objetos macroscópicos; pero una partícula de espín 2 tendría que girar sólo 180° . Si el espín es $\frac{1}{2}$, como el del electrón, debe girar dos veces: 720° . Todas las partículas que tienen el mismo nombre son exactamente iguales e intercambiables. Se relacionan entre sí mediante las **interacciones** o fuerzas fundamentales.

Los **átomos** (1911, Rutherford) se componen de un núcleo con protones y neutrones, alrededor del cual orbitan electrones. El espacio entre el núcleo y los electrones es muy grande, así que los objetos están, sobre todo, compuestos de espacio vacío. Una **molécula** es una agrupación de átomos; un **elemento** es una agrupación de átomos del mismo tipo. Una **sustancia** es una composición material fija, que puede ser simple (formada por un elemento) o compuesta: un **compuesto** (formado por varios elementos).

Un **campo** es una extensión física en la que se distribuyen partículas en el espacio que generan las interacciones. Puede ser electromagnético, nuclear fuerte, nuclear débil, gravitatorio o de Higgs. Desde un punto de vista cuántico, todas las partículas son estados posibles de un determinado campo: el resultado de su medición está sujeto a la probabilidad.

El **vacío** es un campo sin partículas. Casi todo es materia, pero también existe la **antimateria**. Cada partícula tiene su correspondiente antipartícula, con carga eléctrica contraria. En el vacío se producen las fluctuaciones cuánticas, que consisten en la creación fugaz de partículas-antipartículas que se desintegran entre sí, devolviendo la energía prestada para su formación.

La teoría más aceptada que amplía el modelo estándar es la **supersimetría** (SUSY). Es la base matemática de la teoría de la gran unificación y de la teoría de las supercuerdas, que veremos después. Supone que todas las partículas y antipartículas conocidas tienen otra relacionada o supercompañero, con un espín $\frac{1}{2}$ mayor. Los supercompañeros de los fermiones son bosones, y viceversa. El compañero bosónico de un fermión se nombra con una "s" delante; y al compañero fermiónico de un bosón se le añade el sufijo "ino". Así, el supercompañero del electrón (fermión) es el selectrón (bosón). Y el del fotón (bosón) es el fotino (fermión).

Al combinarse un fotino con un higgsino y un zino (supercompañero del bosón Z), se formaría un neutralino, que sería una especie de neutrino con mucha más masa. El neutralino es el más importante de los tipos propuestos de partículas masivas de interacción débil (WIMP) que formarían la materia oscura. Cuando un detector busca materia oscura, está buscando WIMPs.

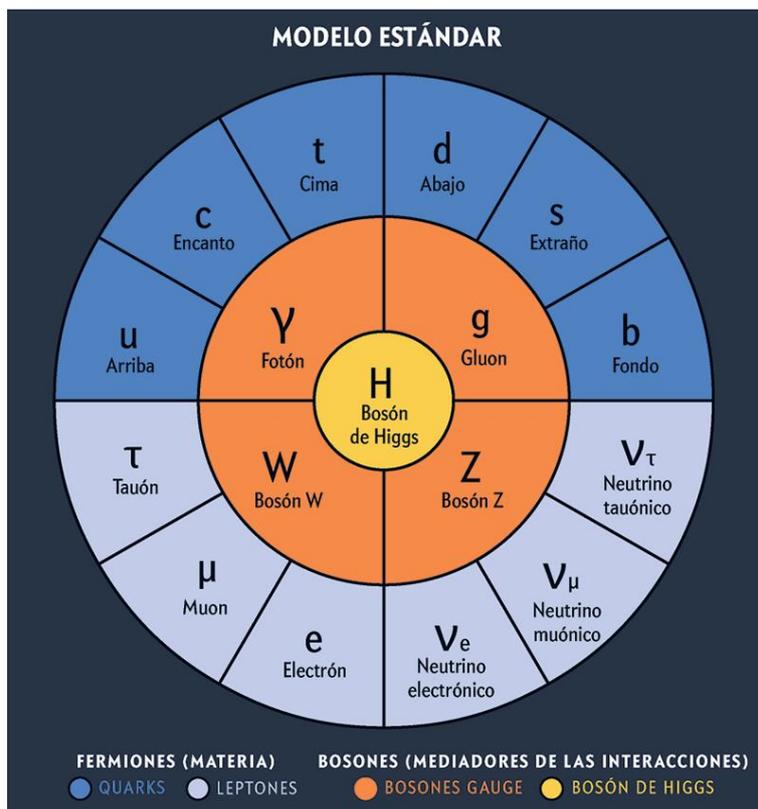
La supersimetría no incluye la constante cosmológica (λ), que mide la energía producida en el vacío cuántico, propuesta como la energía oscura que provoca la expansión acelerada del universo. Ello lleva a algunos físicos teóricos a postular el **multiverso**, donde nuestro universo no cumpliría la supersimetría, pero otros sí. La mayoría de la comunidad científica no aprueba el multiverso.

Hay un aspecto a tener muy en cuenta respecto a los ingenios que nos hacen descubrir nuevas partículas antes teóricas, y que los físicos experimentales dan por supuesto: en todas esas

pruebas suelen chocarse partículas para conseguir expulsar otras. Ello constituye un proceso inverso al del inicio del universo, en cuya sopa primigenia las partículas viajaban libres, antes de agruparse en las que forman la materia.

A continuación, ofrezco un listado de las partículas y otro de sus interacciones.

2.1. Clasificación de las partículas



Hay dos tipos de partículas elementales: el fermión y el bosón.

1. Fermión: partícula de materia. Uno de los dos grupos de partículas elementales, con el bosón. Tienen espín semi entero. Hay dos tipos: leptones y cuarks, que juntos forman la materia ordinaria o bariónica (0,1 y 99,9 % respectivamente).

1.1. Leptón: fermión que no experimenta la interacción nuclear fuerte. Forma la materia no bariónica. Tienen espín $\frac{1}{2}$. Hay seis tipos: por un lado, con carga eléctrica, el electrón, el muon y el tauón; por otro lado, sin carga eléctrica, el neutrino asociado a cada uno de los tres anteriores.

1.1.1. Electrón (1897, Thomson): leptón con carga eléctrica negativa (-1) y muy poca masa, que orbita alrededor del núcleo del átomo, conectado con él al emitir fotones. Su antipartícula es el positrón (1932, Anderson).

1.1.2. Muon (1936, Anderson): raro leptón con carga eléctrica negativa y 200 veces la masa del electrón.

1.1.3. Tauón (1975, Perl): raro leptón con carga eléctrica negativa y 3.500 veces la masa del electrón.

1.1.4. Neutrino: leptón que no tiene carga, pero sí energía y muy poca masa: un millón de veces menor que la del electrón. Es afectado por la interacción nuclear débil. Escapa del núcleo en sus desintegraciones y atraviesa la materia ordinaria sin apenas perturbarla (*partícula fantasma*). Las raras veces que interactúa con la materia, genera su correspondiente leptón cargado. La oscilación del neutrino consiste en que puede cambiar de tipo mientras se propaga, de lo que se deriva que tiene masa. Se ha propuesto que es el causante de que haya más materia que antimateria.

1.1.4.1. Neutrino electrónico (1956, Cowan y Reines): leptón asociado al electrón. Se libera en la desintegración beta.

1.1.4.2. Neutrino muónico (1962, Lederman, Schwartz y Steinberger): leptón asociado al muon. Se libera al desintegrarse los piones en muones y neutrinos muónicos.

1.1.4.3. Neutrino tauónico (2000, Grupo Donut): leptón asociado al tauón.

1.2. Cuark (1974, Richter y Ting): fermión que forma hadrones al experimentar la interacción nuclear fuerte. También interactúa con las otras tres fuerzas fundamentales, siendo la única partícula que lo hace con las cuatro. Hay seis tipos, según su carga eléctrica (y otros parámetros). Los más comunes son arriba (+2/3) y abajo (-1/3), que cambian entre sí mediante la interacción nuclear débil y forman los protones y los neutrones; y los menos comunes son encanto (+2/3), extraño (-1/3), cima (+2/3) y fondo (-1/3).

1.2.1. Hadrón: partícula compuesta por cuarks unidos por la interacción nuclear fuerte.

1.2.1.1. Barión: hadrón formado por tres cuarks. Los más conocidos son los protones y los neutrones, dos estados cuánticos de la misma partícula, llamada nucleón, que cambia mediante la desintegración beta (1934, Joliot-Curie), radiactividad producida por la interacción nuclear débil.

1.2.1.1.1. Protón (1886, Golden): barión con carga eléctrica positiva (+1), que forma el núcleo del átomo con el neutrón. Se compone de dos cuarks arriba y un cuark abajo. Un protón puede transformarse en un neutrón, emitiendo un positrón y un neutrino. La cantidad de protones (número atómico) determina de qué elemento químico es el átomo.

1.2.1.1.2. Neutrón (1932, Chadwick): barión con carga eléctrica neutra (0). Se compone de un cuark arriba y dos cuarks abajo. Un neutrón puede transformarse en un protón, emitiendo un electrón y un antineutrino. En la fisión nuclear (división del núcleo) se liberan neutrones.

1.2.1.2. Mesón: hadrón formado por un cuark y un anticuark. Entre ellos están el pión y el kaón.

1.2.1.2.1 Pion (1947, Powell): mesón que mantiene unidos a los protones y neutrones en el interior del núcleo atómico mediante interacción nuclear fuerte residual, venciendo la repulsión electromagnética de los protones y consiguiendo que los neutrones se unan entre sí y con los protones. Su desintegración libera muones y neutrinos muónicos.

1.2.1.2.2. Kaón: mesón que se caracteriza por tener un cuark o anticuark extraño.

1.2.1.3. Pentacuark (2015, LHC): hadrón formado por cuatro cuarks y un anticuark.

2. Bosón: partícula de fuerza o intercambio. Uno de los dos grupos de partículas elementales, con el fermión. Tienen espín entero. Los fotones y los gluones no tienen masa, ni carga eléctrica, por lo que su antipartícula es exactamente igual. Es el portador de las interacciones fundamentales.

2.1 Fotón (1905, Einstein): portador de la interacción electromagnética. Tiene espín 1. Es el responsable de que se formen las moléculas, al relacionar átomos cuando intercambian electrones.

2.2. Gluon (1979, DESY): portador de la interacción nuclear fuerte fundamental, que mantiene unidos los cuarks que forman los nucleones, constituyendo la materia. Tiene espín 1.

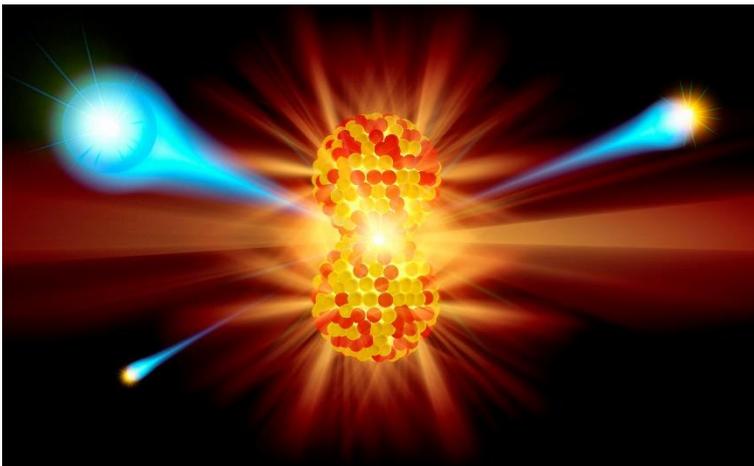
2.3. Bosones W y Z (1983, Rubbia y van der Meer): portadores de la interacción nuclear débil, que tienen masa. Hay tres tipos: W^+ , su antipartícula W^- y Z (sin carga). Tienen espín 1.

2.4 Gravitón: portador de la gravedad, que se manifiesta en forma de ondas gravitatorias (2016, LIGO). Su espín sería 2. Todavía es teórico y se cree que no tiene masa, pero si la tuviese explicaría la energía oscura.

2.5 Bosón de Higgs (2012, LHC): responsable de la existencia de la masa, al dificultar el movimiento de los electrones. Tiene carga y espín cero. Cuando se creó el universo, todas las partículas elementales carecían de masa y volaban diseminadas. El bosón de Higgs provocó que las partículas adquirieran masa. Se unieron para formar los átomos, y con ellos toda la materia conocida. Sin él, nada tendría masa, todo se movería a la velocidad de la luz y el tiempo estaría permanentemente detenido, lo que no daría lugar a la existencia compleja.

2.6. Axión: bosón hipotético, con espín cero, sin carga y con muy poca masa. Es una de las partículas no descubiertas que explicaría la materia oscura. Podría convertirse en fotón y viceversa.

2.2. Interacciones o fuerzas fundamentales



Hay cuatro interacciones o fuerzas fundamentales *oficiales*. El modelo estándar contempla tres: electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil. La cuarta es la gravedad, y aún podemos hablar de dos más.

1. Interacción electromagnética o electromagnetismo: atrae a los electrones al núcleo del átomo y a los átomos entre sí para formar las moléculas; su propiedad es la carga eléctrica y su partícula de intercambio es el fotón. Su propagación se denomina radiación electromagnética.

La polarización magnética de los metales y la corriente eléctrica son procesos físicos que generan campos electromagnéticos. Los átomos tienen carga neutra (protones positivos más electrones negativos). Cuando pierden electrones, la carga total es positiva; cuando los ganan, negativa. Las cargas de signo distinto se atraen; las del mismo, se repelen. Las cargas en movimiento generan campos magnéticos. Así, los propios electrones al moverse generan magnetismo; y al pasar de un átomo a otro, la corriente eléctrica.

2. Interacción nuclear fuerte: mantiene unido al núcleo. La fundamental une los cuarks. La residual une los protones y neutrones; si logran escapar de ella se produce la desintegración alfa. Su partícula de intercambio es el gluón. La teoría que describe sus procesos de interacción se denomina cromodinámica cuántica.

3. Interacción nuclear débil: afecta a todos los fermiones y es responsable de su desintegración radiactiva, en particular de la desintegración beta, iniciadora de la fusión nuclear: el proceso de unión de núcleos que ocurre en las estrellas y que también impulsa a los neutrinos fuera del núcleo. Sus partículas de intercambio son los bosones W y Z.

El modelo electrodébil es una teoría del modelo estándar que unifica la interacción nuclear débil y el electromagnetismo. A su vez, la interacción electrodébil se incluye en la teoría de la gran unificación (GUT), que la unifica con la interacción nuclear fuerte de la cromodinámica cuántica y demuestra que las tres fuerzas eran la misma al iniciarse el universo, manifestándose de modo distinto al bajar la temperatura.

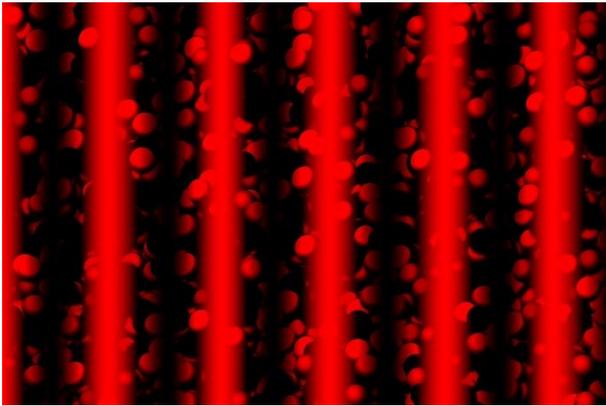
4. Interacción gravitatoria o gravedad: distorsiona el espacio-tiempo. Su partícula de intercambio es el gravitón.

La gravedad está estudiada en la relatividad general (donde hay masa o energía el espacio se distorsiona) y no fue considerada en el modelo estándar de la física de partículas, porque resulta una magnitud despreciable en el mundo microscópico. Pero sin la gravedad, no está completo el modelo (teoría del todo).

5. Interacción de Higgs: tampoco es una de las tres fuerzas fundamentales del modelo estándar, que sí la considera como *mecanismo*. Como hemos visto, se produce entre el campo de Higgs y las partículas, dotándolas de masa.

6. Energía oscura: interacción cuyo campo ocupa todo el espacio ejerciendo una presión negativa que actúa al revés que la gravedad. Es la responsable teórica de la aceleración en la expansión del universo. Sería otra fuerza fundamental.

2.3. Conceptos de mecánica cuántica



El mundo microscópico o de los objetos pequeños obedece a leyes diferentes a las que rigen en el mundo de los objetos grandes. Las partículas subatómicas se comportan de modo aparentemente ilógico, según la física convencional y la experiencia cotidiana: por ejemplo, pueden estar a la vez en dos lugares distintos. Sin embargo, la tecnología avanza siguiendo esos hallazgos, que demuestran ser ciertos al hacer que funcionen los ingenios basados en ellos.

Veamos algunos de los conceptos asociados a la **mecánica cuántica**: por un lado, dualidad onda-partícula, efecto túnel, superposición, incertidumbre y entrelazamiento; por otro, electrónica, informática, supremacía y teleportación cuánticas.

1. Dualidad onda-partícula

El físico alemán Max Planck (Premio Nobel 1918) estudió por qué los objetos cambian de color al calentarse y confirmó que la luz se comporta como una onda. Estableció en 1900 la constante de Planck o **cuanto** de acción: al poner en común la energía y el tiempo en un proceso físico, sólo se dan valores múltiplos de esa constante. Así sentó las bases teóricas de la mecánica cuántica.

El físico alemán Albert Einstein (Premio Nobel 1921) recogió el guante en 1910 y vio que la luz se puede comportar como una onda, pero también como una partícula, a trozos, a “cuantos”: **fotones** cuya radiación ocupa lugares concretos.

En 1913, el físico danés Niels Bohr (Premio Nobel 1922) explicó las propiedades de los átomos mediante la mecánica cuántica: los electrones giran en torno al núcleo sólo en ciertas órbitas concretas. Cuando pasan de una a otra hacia dentro, emiten un fotón. Para hacerlo hacia fuera, absorben un fotón. En 1924, el físico francés Louis de Broglie (Premio Nobel 1929) propuso que los electrones orbitan porque se comportan también como ondas, estableciendo la **dualidad onda-partícula**. El físico austriaco Erwin Schrödinger (Premio Nobel 1933 con Paul Dirac) sentó en 1926 las bases matemáticas de la mecánica cuántica, unificando el comportamiento onda-partícula.

2. Superposición cuántica

El experimento de la **doble ranura**, diseñado en 1801 por el físico inglés Thomas Young, demostró el comportamiento de la luz como onda. En 1961 se utilizó con electrones para comprobar la dualidad onda-partícula. Un haz de electrones choca contra una pantalla que tiene dos ranuras paralelas, y después contra otra pantalla. Cuando la luz está encendida, los

electrones chocan contra la segunda pantalla como lo haría cualquier objeto (partícula). Pero si se apaga la luz, el patrón de choque es distinto, comportándose como ondas. No sabemos dónde está la partícula al atravesar las ranuras.

Es decir: cuando observamos, el comportamiento es distinto a cuando no lo hacemos. Entre otras cosas, porque para observar hay que iluminar, es decir, lanzar fotones. Los fotones hacen que los electrones se comporten como partículas. Cuando la luz está apagada, los electrones no tienen una posición definida, sino que están a la vez en varias. Eso es la **superposición cuántica**.

Una derivación de la superposición es la física **poscausal**. Dos eventos cuánticos pueden suceder en un orden causal indefinido en el que las afirmaciones “A causa B” y “B causa A” son ciertas al mismo tiempo. En 2017, Giulia Rubino, de la Universidad de Bristol, demostró experimentalmente la existencia del **conmutador** cuántico, lo cual lleva a replantearse la flecha del tiempo a escalas subatómicas.

3. Efecto túnel

El físico ruso George Gamow describió la desintegración alfa de los núcleos atómicos en 1928, producida por su nuevo descubrimiento: el **efecto túnel**. Cuando una partícula atraviesa una barrera de energía mayor que la energía cinética de la propia partícula, se produce el efecto túnel, violando los principios de la mecánica clásica. Esta rareza se causa gracias a la dualidad onda-partícula: para poder atravesar un túnel cuántico, las partículas se comportan como ondas.

El efecto túnel se ha observado en electrones atravesando un campo eléctrico, en átomos atrapados en campos magnéticos y en partículas que entran o salen de los núcleos atómicos (desintegración).

Las enzimas de las células logran aumentar la velocidad de las reacciones químicas gracias al efecto túnel, acelerando las transformaciones en el crecimiento de los seres vivos. Y los microscopios de efecto túnel (1981) consiguen mostrar imágenes de superficies a nivel atómico aprovechando este fenómeno cuántico.

4. Principio de incertidumbre

El físico alemán Werner Heisenberg (Premio Nobel 1932) formuló en 1927 el **principio de incertidumbre**. La física clásica supone que se puede determinar tanto la posición como la velocidad de las partículas. Sin embargo, los objetos cuánticos son y hacen varias cosas al mismo tiempo, existen a la vez en todos sus posibles estados teóricos. Cuando los medimos, interactuamos con ellos y sólo obtenemos uno de esos estados (**problema de la medida**).

No es posible atribuir una trayectoria a una partícula. Sólo podemos decir que hay una determinada **probabilidad** de que esa partícula esté en un lugar en un momento dado. El principio de incertidumbre, comprobado experimentalmente, es inherente a las partículas subatómicas y se refiere a su comportamiento, no a la imposibilidad de medirlo.

El **gato de Schrödinger** (1935), es un planteamiento metafórico. En este experimento teórico, el animal permanece en una caja donde se le administrará o no un veneno según el comportamiento aleatorio de un átomo radiactivo. Mientras no abramos la caja, el gato está a la vez vivo y muerto. Esta paradoja fue creada para criticar el principio de incertidumbre, pero lo ilustra bien, así como el de la superposición cuántica y el problema de la medida.

5. Entrelazamiento cuántico

El estado cuántico es la formulación matemática de la información de la que disponemos sobre un sistema físico cuántico. Esta información es siempre probabilística.

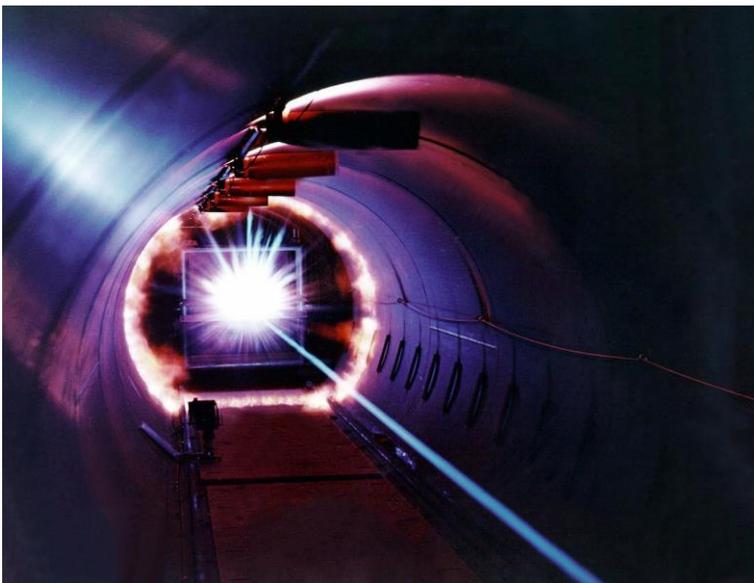
Según los cálculos matemáticos, cuando dos partículas están entrelazadas, formando un sistema único en el que ninguna de ellas tiene un estado cuántico propio, si se separan, al medir una se confiere un estado cuántico concreto a las dos. Einstein dijo en 1935 que eso era imposible (paradoja Einstein-Podolsky-Rosen), porque contradice la teoría de la relatividad: el estado de la segunda partícula tenía que haber existido con anterioridad, así que en la mecánica cuántica algo faltaba.

Schrödinger puso nombre al fenómeno: **entrelazamiento**, que además con el paso de los años fue comprobándose, sin recurrir a la lógica de la física clásica que predecía que faltaba algo. En 1964, el físico irlandés John Bell demostró con su teorema de la **desigualdad** que no existe una explicación lógica para el entrelazamiento. Así, la controversia podría resolverse haciendo un experimento.

Uno de los que lo realizó fue el físico francés Alain Aspect, en 1983. Produjo pares de fotones lanzados en direcciones opuestas. Interactuó con uno de ellos y comprobó que se comportaban como un único objeto. Se creó una “inquietante acción a distancia”, según la frase de Einstein, que supera el límite de la velocidad de la luz.

Así pues, la teoría cuántica está de acuerdo con su observación experimental. “Dios no juega a los dados”, fue la metáfora de Einstein en 1926 en el debate sobre el azar subatómico. Sin embargo, “sí que juega”: a cualquier distancia y sin conexión física, dos partículas comparten información. La mecánica cuántica define teórica y prácticamente hechos **contraintuitivos** pero reales.

6. Primera revolución cuántica (siglo XX). Electrónica



El rayo **láser** (1960) es una aplicación práctica de la mecánica cuántica: al hacer interactuar a electrones con fotones se consigue un haz de luz concentrado en una sola longitud de onda. El procedimiento es la emisión estimulada (**electrónica cuántica**): se aplica energía a los átomos,

haciendo que los electrones salten a órbitas exteriores; los átomos liberan energía en forma de luz al volver a su estado estable.

Otras aplicaciones de la primera revolución cuántica fueron los transistores, los microprocesadores y la resonancia magnética. Todas ellas aprovechan el salto cuántico de los electrones.

7. Segunda revolución cuántica (siglo XXI). Informática

La **información** está siempre en un elemento físico: se transmite mediante gestos, sonido, escritura, datos informáticos... La superposición y el entrelazamiento son susceptibles de controlarse: la física cuántica proporciona un nuevo mecanismo para procesar y comunicar información: la **informática cuántica**.

La información clásica tiene como unidad fundamental el **bit**, que significa que un sistema físico puede tener dos estados: está encendido o apagado, cargado o descargado, o aquí o allí. En términos matemáticos, un cero o un uno. La información cuántica tiene como unidad fundamental el bit cuántico o **cúbit**. Los cúbits pueden ser cero y uno al mismo tiempo. Esto hace que la informática cuántica sea superior a la clásica, porque el estado cuántico de la memoria de un ordenador cuántico contiene mucha más información.

Un ordenador cuántico puede simular la mecánica cuántica, para manipular los átomos reales y crear nueva tecnología, nueva medicina, etc. También puede proveer mediante sensores avanzados la detección de elementos químicos dañinos (mercurio, plomo) y objetos enterrados. Y además es capaz de decodificar claves encriptadas de satélites, bancos, etc., aunque mediante **criptografía** cuántica también se pueden crear nuevas claves encriptadas desencriptables. El ordenador debe estar completamente aislado, porque un sistema cuántico deja de serlo cuando vierte información sobre sí mismo (**decoherencia** cuántica). Así, hay que evitar que interactúe con el polvo, los campos magnéticos, las radiaciones de fondo, etc.

8. Supremacía cuántica

El momento en que los ordenadores cuánticos logran resultados que los clásicos no pueden es llamado **supremacía cuántica**, y fue anunciada por la compañía Google en 2019. A partir de 2020, la Universidad china fue incrementando los niveles de computación cuántica, colocándose a la vanguardia. En 2021, el anuncio corrió por cuenta de IBM. Mientras tanto, Estados Unidos, Canadá, Israel, Alemania y España están avanzando en 2022 en la fabricación de sus propios ordenadores cuánticos.

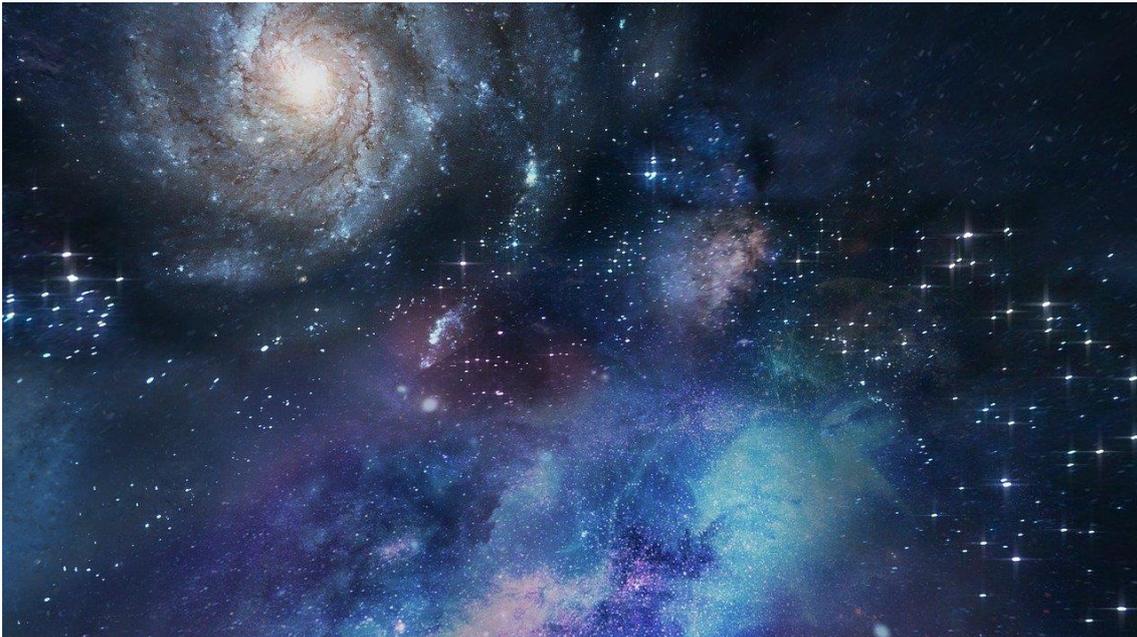
Una vez alcanzada la supremacía, el problema es retrasar la decoherencia para mantener el estado cuántico de los ordenadores el mayor tiempo posible. Una mejora en ese sentido es la implantación de los **cútrits**, que añaden un tercer estado a los cúbits.

9. Teleportación cuántica

La **teleportación cuántica** no traslada materia de un punto a otro, sino información cuántica. Utiliza el entrelazamiento de dos fotones para transmitir información entre ellos. El equipo del físico austríaco Anton Zeilinger la experimentó en 2004 bajo el Danubio en Viena: dos fotones entrelazados fueron separados 600 metros. El segundo se entrelazó con un tercero, cuyas propiedades se transfirieron al primero.

Esto tiene aplicaciones en los satélites, estableciendo la comunicación cuántica a escala mundial: en 2017 se logró la teleportación cuántica de fotones desde el desierto de Gobi (China) hasta un satélite situado a 1.200 km. Fue un primer paso para la implantación del **internet cuántico** y quizás también servirá para transportar la energía en el futuro.

3. Cosmología



La palabra **cosmos** proviene del griego y significa universo ordenado. La cosmología es la rama de la **astronomía** que estudia el universo en su conjunto, tratando de su estructura a gran escala y de su dinámica. Formula teorías acerca del origen, la evolución y el destino del universo. Sus leyes son descritas en la astrofísica.

La cosmología contemporánea se debe, como tantas otras cosas en la física, a Albert Einstein, que con sus *Consideraciones cosmológicas en la teoría general de la relatividad* (1917) sentó las bases del actual modelo comprobado y ampliamente aceptado del origen del universo, su estructura a gran escala y su expansión acelerada: el modelo Lambda-CDM (Lambda-Cold Dark Matter, Materia Oscura Fría) o **teoría del Big Bang**.

Por otro lado, la cosmología se ocupa de las grandes estructuras del universo, como las galaxias y sus cúmulos, así como de los objetos más distantes y energéticos, como los cuásares (energía expulsada de los agujeros negros) y las supernovas (explosiones de estrellas).

La teoría física que explica el mundo macroscópico o de los objetos grandes es la llamada **física clásica** o relatividad general, que incluye la experiencia a escala humana de la gravedad, estudiada por Newton: las cosas se caen al suelo siguiendo unas leyes matemáticas concretas. La relatividad general añade una serie de descubrimientos acerca del comportamiento de las estrellas y los planetas, que explican la gravedad como una curvatura del espacio-tiempo.

Todos los experimentos realizados tras las formulaciones de Einstein confirman sus predicciones, como el límite de velocidad universal (la de la luz y el resto de las ondas electromagnéticas en el vacío: 299.792 km/s), o el carácter relativo del paso del tiempo, que varía según distintos parámetros, como la citada gravedad o la velocidad.

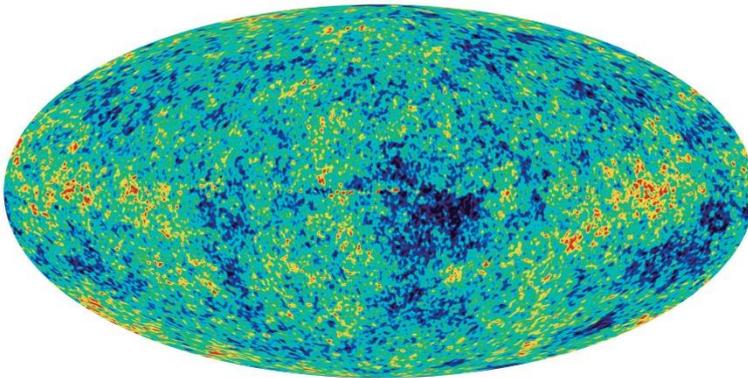
Si se llega a formular una **teoría del todo** o de la unificación, será posible conciliar la física clásica y la cuántica, y la relatividad general formará parte de la mecánica cuántica, del mismo modo que la ley de la gravedad forma parte de la relatividad general.

Esta no lograda teoría del todo podría ser el resultado de comprobar las distintas formulaciones que intentan explicar el funcionamiento del universo, desde lo más grande a lo más pequeño. Los intentos de acercarse a esa conciliación incluyen la teoría de cuerdas, la gravedad cuántica de bucles o la cosmología cíclica conforme.

Mientras tanto, la explicación de los fenómenos que no comprendemos al cien por cien, como el Big Bang, el interior de los agujeros negros, el entrelazamiento cuántico, etc., seguirá pendiente. Pero tenemos que tener claro que, unificada o no, la física sólo es una: “lo que sucede”. Es decir, que las reacciones que ocurren en las estrellas son las mismas que las que describe la mecánica cuántica, porque todo está compuesto de lo mismo.

Esa es la razón por la que, aunque todo este texto está compuesto de lo pequeño y lo grande, su primer capítulo hable de las dos cosas, y una vez que llegamos a éste, que trata de lo grande, no dejemos de perder de vista lo pequeño. Al fin y al cabo, y siempre desde nuestra posición intermedia, lo pequeño es lo que gobierna lo grande mediante sus leyes físicas.

3.1. El universo y los astros



Cuando hablamos del cosmos o del universo, nos referimos a la totalidad de las cosas que existen. Pero en cosmología sólo podemos abarcar el llamado **universo observable**, que es el que logramos deducir de la información que nos ofrecen las observaciones astronómicas.

Un año luz es la distancia que puede recorrer la luz en un año: aproximadamente nueve billones y medio de km. Cuando nació el universo observable, hace 13.700 millones de años, comenzó a expandirse aceleradamente. Por eso su diámetro no es el doble de 13.700 millones de años luz (27.400), sino mucho más, 93.000 millones de años luz, o lo que es lo mismo: 880.000 trillones de km.

El universo se compone de materia y energía. La materia ordinaria o bariónica, con su correspondiente energía ordinaria asociada, es el 4,9 %; la materia oscura es el 26,8 % (total de materia, 31,7 %, de la cual el 80 % es oscura). La energía oscura es el 68,3 % restante (sumado al 31,7 % de materia, da un total de 100).

Hay unos 100.000 millones de **galaxias**, agrupaciones de estrellas con sus astros asociados (planetas, satélites, asteroides) que giran alrededor de un agujero negro. Nuestra galaxia es la Vía Láctea y contiene 400.000 millones de estrellas, entre ellas el Sol. Las estrellas de la Vía Láctea que son observables sin instrumentos dibujan figuras en el cielo nocturno a las que llamamos **constelaciones**, que están situadas en un espacio figurado al que llamamos esfera celeste: el universo observable a simple vista.

Las constelaciones han servido para medir el tiempo y orientarse. Además, la **astrología** creía ver en la esfera celeste eventos relacionados con los sucesos en la Tierra. La circunferencia figurada que dibuja el Sol alrededor de la Tierra, o eclíptica, fue dividida en 12 partes de 30 grados. Cada una de esas partes es un signo del **zodiaco**, cuyos nombres responden a las constelaciones más importantes que se observan en ellos. Según en qué signo del zodiaco vemos colocado al sol al transcurrir un año, se subdivide éste en 12 meses astrológicos, que dan lugar al horóscopo, un método de predicción arbitrario que relaciona el momento del nacimiento con la personalidad.

Según la teoría del **Big Bang** (gran estallido), el universo se generó en un punto y se expandió, constituyendo la **sopa primigenia**, una mezcla densa y muy caliente compuesta de cuarks, gluones y electrones (plasma cuark-gluon). Una centésima de segundo después, se formaron los protones y los neutrones. Los primeros fotones que escaparon de la sopa primigenia fueron los que transportaban las microondas del Big Bang, tan solo 380.000 años después del nacimiento del universo. Esa **radiación de fondo de microondas** subsiste y se detectó en 1965. Parte de ella (1%) produce el chisporroteo de los televisores sin sintonizar.

Los dos elementos más comunes del universo son el hidrógeno (75%) y el helio (23%), como demostró la astrofísica británica Cecilia Payne en 1925. En el proceso de fusión nuclear de las estrellas el hidrógeno se transforma en helio.

A continuación, ofrezco un listado de los **astros** u objetos astronómicos que pueblan el universo observable.

3.2. Clasificación de los astros



Un objeto astronómico o astro es una entidad física significativa que puede ser tanto un cuerpo celeste individual como una agrupación. Añado ejemplos desde nuestra óptica terrícola: la luna, el sol, la Vía láctea, etc. Veamos de los más grandes a los más pequeños.

Filamento: complejo de supercúmulos que forma parte de la estructura en forma de esponja (o de red de neuronas) que constituye todo el universo observable. Ejemplo: Piscis-Cetus.

Supercúmulo: conjunto de cúmulos, grupos y galaxias. Ejemplo: Laniakea.

Cúmulo: conjunto de entre 50 y 1.000 galaxias.

Grupo: conjunto de menos de 50 galaxias. Ejemplo: el Grupo Local.

Galaxia: conjunto de estrellas, nubes de gas, planetas y polvo cósmico reunido en torno a un agujero negro. Se reúnen en grupos, cúmulos y supercúmulos. Ejemplo: la Vía Láctea.

Nebulosa: región constituida por gases y polvo cósmico de la que nacen las estrellas o fruto de la acumulación de restos de su extinción. Este nombre se dio también a las galaxias que no alcanzaban a verse nítidamente.

Brazo: fragmento curvo de las galaxias espirales. Ejemplo: brazo de Orión.

Estrella: esferoide luminoso de plasma. Cuando se agota su energía, estalla (la explosión se denomina supernova) y produce los llamados restos estelares. Ejemplo: el Sol.

Estrella de neutrones: resto estelar en forma de estrella compacta producida al agotarse la energía de una estrella de más de 10 masas solares. Al girar emiten una radiación llamada **púlsar**.

Enana blanca: resto estelar en forma de estrella compacta producida al agotarse la energía de una estrella pequeña, como el Sol.

Agujero negro: resto estelar no luminoso cuya concentración de masa atrae a su interior toda la materia y energía que se le acerca. Las galaxias orbitan alrededor de su agujero negro central. Su entorno circular emite al girar una radiación llamada **cuásar**, que produce la luz más brillante del universo y llega a la Tierra en forma de rayos cósmicos. Ejemplo: Sagitario A*.

Disco circunestelar: anillo de polvo, gas y objetos rocosos o de hielo que rodea las estrellas. Ejemplos: el cinturón de asteroides (entre las órbitas de Marte y Júpiter) y el cinturón de Kuiper (más allá de Neptuno).

Sistema planetario: conjunto de una o varias estrellas con astros orbitando, como planetas y otros cuerpos menores. Ejemplo: el sistema solar.

Planeta: astro que orbita una estrella, con masa suficiente para ser esférico pero no para causar fusión nuclear. No comparte su trayectoria con otros objetos comparables. Los del sistema solar son: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

Satélite: astro que orbita un planeta. Ejemplo: la Luna.

Anillo planetario: anillo de polvo que rodea los planetas. Ejemplo: los anillos de Saturno.

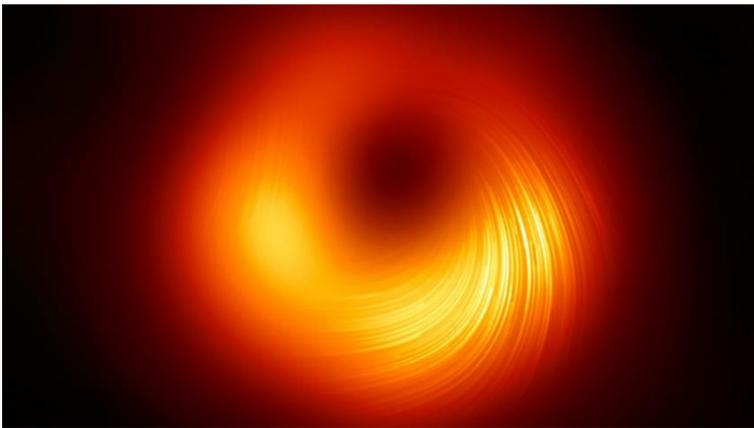
Planeta enano: astro que orbita una estrella, compartiendo su trayectoria con otros objetos comparables. Ejemplos: Plutón, Haumea y Makemake, en el cinturón de Kuiper.

Asteroide: astro rocoso más pequeño que un planeta pero mayor que un meteoroides. Ejemplo: el que chocó con la Tierra hace 66 millones de años, provocando la extinción masiva del Cretácico.

Cometa: astro de polvo, hielo y gas que orbita una estrella. Cuando se acerca a ella, muestra un rastro: la cola del cometa. Ejemplo: el cometa Halley, el único observable a simple vista desde la Tierra.

Meteoroide: astro menor de 50 m de diámetro, procedente de un asteroide o un cometa. Cuando entra en contacto con la atmósfera de un planeta, se vaporiza. Su rastro luminoso se denomina meteoro o **estrella fugaz**. Si sobreviven fragmentos que caen a la superficie del planeta, se denominan **meteoritos**. Esta palabra, por extensión, define a cualquier cuerpo celeste que llega a la superficie de un planeta.

3.3. Agujeros negros y modelos cosmológicos



Un **agujero negro** es una región del espacio formada por una gran masa, que genera un campo gravitatorio muy elevado. El límite de su superficie esférica se llama horizonte de sucesos, que una vez atravesado no deja escapar nada. Las galaxias orbitan alrededor de los agujeros negros.

Se cree que la formación de un agujero negro se produce al extinguirse la energía de una estrella, lo que deja libre a la gravedad para comprimirla. Pero también se conjeturan los agujeros negros primordiales, que serían los generados tras el Big Bang, debido a la extrema densidad del universo en esos momentos, y conformarían la materia oscura (1974, Hawking). El 80 por ciento de la materia del universo es **materia oscura**. Existe porque produce gravedad, pero no se ve porque no emite radiación. Es la responsable de buena parte de la rotación de las galaxias y de la estructura de filamentos que compone el universo a gran escala.

Los agujeros negros entrañan un fenómeno físico similar a la creación del universo, pero a la inversa. Según Hawking, el Big Bang y el centro de los agujeros negros suponen el mismo fenómeno. Debido a la gravedad extrema de los agujeros negros, la relatividad general los dota de una profundidad infinita, por lo cual no se puede aplicar y tampoco se puede calcular el momento del inicio del universo inmediatamente anterior al Big Bang. La relatividad general no es la teoría del todo, entre otras cosas porque no resuelve el origen del universo. Hay que combinarla con la mecánica cuántica. Al hacerlo matemáticamente es cuando se obtiene como resultado infinito, lo cual indica que esa combinación no es correcta.

Como sabemos, ambas teorías funcionan en sus respectivos campos: el mundo macroscópico y el microscópico. Pero juntas generan el **problema del infinito**. Este problema, considerado como la obtención de un resultado sin sentido físico en una fórmula matemática, pasó después a tratarse como un recordatorio de nuestra limitación práctica: no conocemos qué ocurre a distancias más pequeñas de las que podemos observar.

Uno de los intentos teóricos para resolver el problema del infinito es la **teoría de cuerdas** (1974, Scherk y Schwarz) y su sucesora de las supercuerdas, que considera las partículas como filamentos en forma de aros vibrantes, como pequeñas gomas elásticas. Esta teoría pretende incorporar la relatividad general al modelo estándar, aunque no está comprobada. Cuando se consiga la unificación, la relatividad general será un caso concreto de la teoría cuántica, igual que Einstein da cabida a Newton. La base matemática de la teoría de las supercuerdas es la supersimetría, como hemos visto al hablar de física de partículas.

Como las supercuerdas tienen forma, al chocar no ofrecen una distancia cero, puesto que hay partes de ellas que no están en contacto. Al no tener que dividir por cero, no se obtiene infinito. Pero para formular la teoría de las supercuerdas se necesitan hasta once dimensiones, siete más que el espacio-tiempo conocido de cuatro dimensiones. Una dimensión es una dirección en la que pueden moverse las cosas. Según las supercuerdas, las dimensiones adicionales están presentes en el mundo microscópico.

En el centro de los agujeros negros, de densidad infinita, las partículas están comprimidas, y debería ser imposible que hubiera movimiento. Sin embargo, se produce energía, según la **radiación Hawking** (1974), que se genera cuando aparecen los pares de partícula-antipartícula en el horizonte de sucesos. Puede ocurrir que uno de los dos elementos sea engullido y el otro escape. La energía que usa para ello proviene de la masa del agujero negro, que si no gana masa por otros medios, acabará desapareciendo.

Para resolver el enigma de la existencia de energía dentro de los agujeros negros, se actualizó la teoría de las supercuerdas: las partículas elementales ya no eran cuerdas individuales, sino branas (membranas) formadas por muchas cuerdas, como un tejido. Una vez Polchinski formuló esto en 1998, se calculó la energía dentro de los agujeros negros, considerando que las branas la generan moviéndose en las dimensiones adicionales.

La radiación Hawking está relacionada con la paradoja de la **pérdida de la información**, que sugiere que la información física se pierde para siempre en un agujero negro. El motivo es que allí dentro, los estados físicos distintos se convierten en el mismo estado; al emitirse la radiación Hawking, ésta no contendría información. Recordemos que, sin embargo, la mecánica cuántica afirma que la información no se pierde. En 2004, el propio Hawking se contradijo y afirmó que la información podía escapar, debido a las perturbaciones cuánticas del horizonte de sucesos.

Antes y una vez más, las supercuerdas también entraron en acción. El físico holandés Gerard 't Hooft (Premio Nobel 1999) postuló en 1993 que la entropía de un agujero negro es directamente proporcional al área de la superficie de su horizonte de sucesos. Ello daría lugar a que la masa ocupe área y no volumen, por lo que el universo sería interpretable como un **holograma** con la estructura de la información inscrita en sus fronteras bidimensionales.

En física cuántica se puede definir un agujero negro como una acumulación muy densa de información. Y teniendo en cuenta que la entropía se puede considerar la misma magnitud que la información, pero de signo contrario, los agujeros negros son también una acumulación muy densa de entropía, porque en su interior, como queda dicho, todos los estados son el mismo. Mientras, la **teoría M** (1995, Witten), intenta conciliar todas las teorías de las supercuerdas para constituirse, una vez más, en la teoría del todo.

La principal competidora de la teoría de las supercuerdas es la **gravedad cuántica de bucles** (1986, Ashtekar), que no propone dimensiones adicionales y supone que a escalas muy pequeñas el espacio-tiempo está formado por una red de lazos entrelazados en una especie de

espuma dividida en trozos indivisibles. Esto supone que la geometría del espacio sería similar a la división en cuantos de la mecánica cuántica, y propone que el Big Bang es un momento del **Big Bounce** (gran rebote).

La **cosmología cíclica conforme** (2001, Penrose) es un modelo cosmológico que también propone un universo cíclico. En él, el tiempo sería infinito, pero el espacio no. Se basa en el hecho de que la entropía no se deduce de las leyes fundamentales de la física y supone que en la sopa primigenia las partículas mostraban una gran uniformidad. Ello le da pie a postular que el universo es una sucesión infinita de eones (grandes divisiones del tiempo). Actualmente estaríamos en uno de esos bloques de tiempo, que consideramos el único universo. Todo hay que decirlo: hay un consenso casi unánime en el mundo científico que rechaza esta teoría.

3.4. Sagitario A*



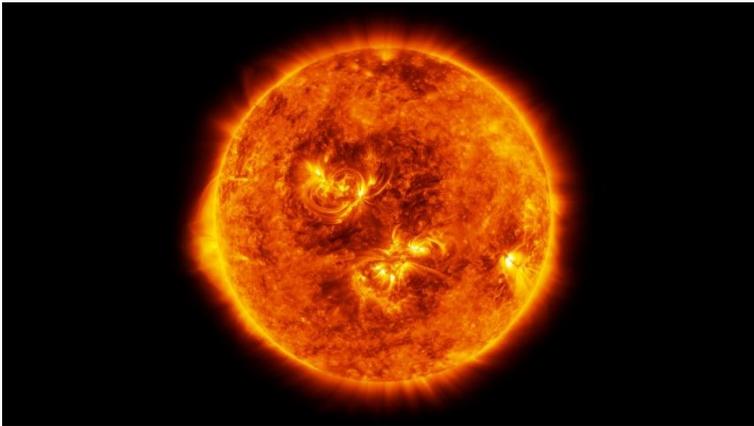
Aunque hace dos décadas no teníamos la certeza de que un agujero negro supermasivo se encontrara en el centro de la Vía Láctea, las observaciones astronómicas lo han confirmado. Se llama **Sagitario A***, pesa cuatro millones de masas solares y es el responsable de la existencia y la forma de la Vía Láctea, nuestra galaxia espiral.

Los **cuásares** son los objetos más luminosos del universo: núcleos galácticos producidos alrededor de los agujeros negros supermasivos. La atracción gravitatoria de los voraces agujeros negros acumula en su entorno gran cantidad de objetos estelares. En el eje de rotación de los cuásares se generan chorros de plasma, con la materia que escapa del agujero negro.

La zona de la galaxia en la que se encuentra el sistema solar fue atravesada por el chorro de plasma de Sagitario A*, produciendo las condiciones de estabilidad que necesita la vida para propagarse.

Al principio no existía nada. Tras el Big Bang apareció la luz, y el azar “vio que la luz era buena” (Génesis, 1:4). Un agujero negro no sólo creó nuestra galaxia; también propició nuestra existencia. Actualmente, Sagitario A* está en reposo, y sólo se alimenta de asteroides. “Al séptimo día, descansó” (Génesis, 2:2). Otros dioses negros están ahora mismo trabajando en sus galaxias.

3.5. Energía de fusión



Como hemos visto, la **fusión** nuclear es la que se produce al unir elementos de los núcleos de los átomos, generando energía atómica o nuclear. El proceso sucede en las estrellas (nucleosíntesis estelar), y por lo tanto también en el Sol. Por eso, los reactores que lo consiguen son llamados “sol artificial”.

Una **estrella** es una inmensa masa de gas compuesta de átomos (sobre todo de hidrógeno) en cuyos núcleos, debido a la intensa atracción gravitatoria, se producen las altas presiones y temperaturas necesarias para que, al aproximarse los átomos, tras una primera intervención de la interacción nuclear débil, entre en juego la interacción nuclear fuerte, haciendo que se fusionen, dando lugar a átomos más pesados, como los del helio.

Esto sucede en un estado de la materia llamado **plasma** (el más abundante del universo), que es similar al gas, pero que contiene **iones**: partículas cargadas eléctricamente al ganar o perder electrones, lo que los hace estar cargados negativamente (aniones) o positivamente (cationes).

La fusión genera energía, parte de la cual acaba en forma de fotones. La gran presión necesaria no es susceptible de crear en la Tierra; no así la gran energía, que se logra incrementando la **temperatura**. Tomando los isótopos del hidrógeno llamados deuterio y tritio, los calentamos y conseguimos iones que forman un plasma, susceptible de controlar por medio de campos magnéticos, creados por metales que hay que mantener muy fríos para que ejerzan de superconductores. El horno central debe estar muy caliente; las bobinas superconductoras que lo rodean, muy frías.

Aún no se ha logrado que la energía necesaria para crear la fusión sea inferior a la generada, pero se producen continuos avances. Este tipo de energía nuclear sería la utilizada universalmente, al considerarse ilimitada y sin residuos permanentes, al contrario de la actual, llamada de fisión.

4. Ingenios y genios

Para llegar a conformar una base tan compleja y demostrada como la expuesta en este texto, han sido necesarios los aportes de numerosos experimentos y de incontables científicos, que hoy siguen en la brecha. Estos son los más relevantes.

4.1. Ingenios. Grandes máquinas

Los avances en física de partículas y cosmología se han dado en las últimas décadas gracias a los artefactos de las grandes instalaciones científicas casi siempre promovidas por los Estados y siempre financiadas por ellos, reunidas en organizaciones que esperan lograr nuevas tecnologías de vanguardia, más que avanzar en el conocimiento. Bienvenidas sean, en cualquier caso.

1. Aceleradores y detectores

Un *acelerador* o colisionador de partículas es un gran dispositivo que usa campos magnéticos para acelerar partículas subatómicas y hacerlas chocar entre sí. También existen otros grandes detectores de partículas y ondas.



Consejo Europeo para la Investigación Nuclear (CERN). Es el laboratorio de física de partículas más grande del mundo. Fue fundado en Meyrin, Suiza, en 1954. En 1984 descubrió los **bosones W y Z**. En 1990 se inventó allí la red de acceso a archivos de internet (World Wide Web). En 2008 inauguró el **Gran Colisionador de Hadrones (LHC)**, el mayor acelerador de partículas del mundo y la máquina más grande construida, que en 2012 detectó el **bosón de Higgs**.



Laboratorio Nacional Fermi (Fermilab). Laboratorio de física de partículas situado en Illinois, Estados Unidos, fundado en 1974. En 1977 descubrió el **cuark fondo**. En 1983 inauguró el **Tevatrón**, el segundo mayor acelerador de partículas del mundo, cerrado en 2011, donde en 1995 se descubrió el **cuark cima** y en 2000 el **neutrino tauónico**, la última partícula fundamental observada.



Laboratorio Nacional de Brookhaven (BNL). Laboratorio de física de partículas en Nueva York, Estados Unidos, fundado en 1947. En 1962 descubrió el **neutrino muónico**. En 1974, junto con el SLAC, hallaron el **cuark encanto**. En 2000 inauguró el **Colisionador de Iones Pesados Relativistas (RHIC)**, el único colisionador de hadrones actual, junto con el LHC. Allí se logró en 2010 condensar **plasma cuark-gluon**.



Laboratorio del Acelerador Lineal de Standford (SLAC). Laboratorio de física de partículas en California, Estados Unidos, fundado en 1962. Desde 1966 cuenta con un acelerador lineal principal, el más largo del mundo hasta que en 2017 fue superado por el XFEL. En 1974, junto con el BNL, hallaron el **cuark encanto**, y en 1975, el **tauón**.



Sincrotrón Alemán de Electrones (DESY). Laboratorio de física de partículas en Hamburgo, Alemania, fundado en 1959. Cuenta con la instalación de láser **XFEL** (3,4 km, 2017) y varios aceleradores de partículas como **PETRA** (1978), donde en 1979 se detectó el **gluon**.



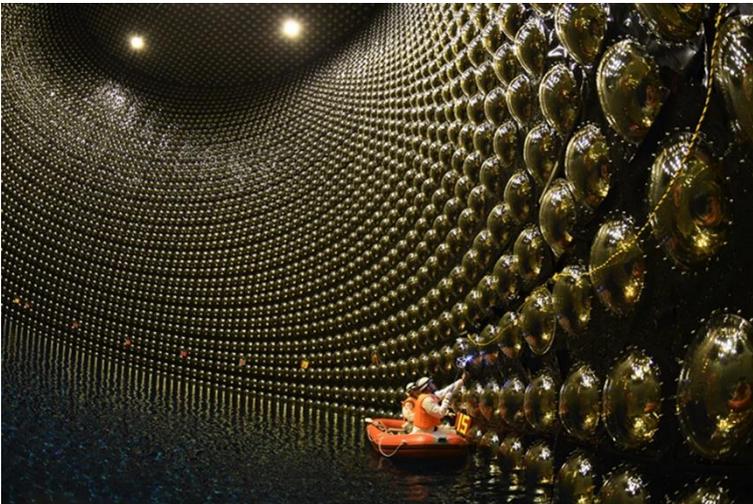
Laboratorio Europeo de Radiación Sincrotrón (ESRF). Laboratorio de física de partículas en Grenoble, Francia, inaugurado en 1994. Cuenta con su acelerador de electrones, que estudia los rayos X para aplicarlos en diversas ramas científicas.



Observatorios de Ondas Gravitatorias por Interferometría Láser (LIGO). Consta de dos observatorios con grandes brazos en forma de L en Estados Unidos, uno en Luisiana y otro en Washington, que comenzaron a funcionar en 2002. En 2006 detectaron las ondas gravitatorias.



Interferómetro Virgo. Detector de ondas gravitatorias en forma de L construido en Cascina, Italia, en 2003. Colabora con LIGO.



Observatorio Kamioka. Laboratorio subterráneo fundado en Hida, Japón, en 1983. Estudia los neutrinos y las ondas gravitatorias. Aloja el detector de neutrinos **Super-Kamiokande** (1996), un depósito de 50.000 toneladas de agua. Se está construyendo otro, el Hyper-Kamiokande, que tendrá un millón de toneladas de agua y entrará en funcionamiento en 2027. También aloja el detector de ondas gravitatorias **KAGRA** (2020), que colabora con LIGO y Virgo.



Laboratorio Nacional del Gran Sasso (LNGS). Laboratorio subterráneo situado entre L'Aquila y Teramo, Italia, desde 1989. Participa con el CERN en la detección de neutrinos. Con sus tres grandes salas abovedadas, es el observatorio subterráneo más grande del mundo.



Laboratorio Subterráneo de China Jinping (CJPL). Inaugurado en Sichuan en 2010, compite en mayor profundidad (2.400 m) con el SNOLAB. Estudia la materia oscura y los neutrinos. Cuando esté completada su segunda fase, prevista para 2024, será el más grande del mundo.



SNOLAB. Laboratorio subterráneo en Ontario, Canadá, ampliación inaugurada en 2011 del Observatorio de Neutrinos de Sudbury (SNO, 1999-2006), donde se descubrió la oscilación del neutrino. Estudia los neutrinos y la materia oscura.

2. Observatorios y telescopios

Los observatorios astronómicos son lugares desde los que se investigan los cuerpos celestes. Constan de uno o varios telescopios, que pueden ser ópticos (con lentes y espejos) o radiotelescopios (con antenas parabólicas).



Observatorio Europeo Austral (ESO). Organización astronómica europea con sede en Garching, Alemania, creada en 1962, que desarrolla telescopios en Chile, en tres observatorios. El Observatorio de La Silla, con 18 telescopios, estudia rayos cósmicos y planetas extrasolares. El Observatorio Paranal incluye el **Very Large Telescope (VLT)**, una suma de cuatro telescopios ópticos que forman el instrumento óptico más grande del mundo. Y el **Gran Conjunto Milimétrico de Atacama ALMA (2013)**, el mayor proyecto astronómico del mundo, formado por un grupo de 66 radiotelescopios. El ESO prevé tener construido también el Telescopio Extremadamente Grande (ELT) en 2025, que será el telescopio óptico más grande del mundo.



Observatorio Norte Europeo (ENO). Conjunto de dos observatorios situados en las islas Canarias, España, desde los que se descubrieron varios **agujeros negros**. El Observatorio del Teide (1954) cuenta con varios telescopios que estudian el Sol y la radiación de fondo de microondas. El Observatorio del Roque de los Muchachos (1985), también con varios telescopios, incluye el **Gran Telescopio Canarias** (2008), el mayor telescopio óptico del mundo.



Observatorio McDonald. Fue fundado en Texas, Estados Unidos, en 1933. Incluye el telescopio óptico **Hobby-Eberly** (1996), uno de los mayores del mundo.



Observatorios de Mauna Kea. Conjunto de observatorios fundado en 1956 en Hawái, Estados Unidos. Incluye el Observatorio W. M. Keck, con los telescopios ópticos **Keck I y Keck II**, unos de los mayores del mundo, desde los que se dedujo que el objeto del centro de la Vía Láctea era un agujero negro.



Observatorio Astronómico Sudafricano (SAAO). Fundado en Sutherland, Sudáfrica, en 1972. Incluye el **Gran Telescopio Sudafricano SALT** (2005), uno de los mayores telescopios ópticos del mundo.



Bell Labs. Instituto de investigación de comunicaciones fundado por la empresa AT&T en Nueva Jersey, Estados Unidos, en 1925. Alberga la **Antena de Bocina Holmdel** (1959), un radiotelescopio desde el que se descubrió la radiación de fondo de microondas en 1965.



Observatorio Astrofísico Especial de la Academia de Ciencias de Rusia (SAO RAS). Fundado en Karacháyev-Cherkesia, Rusia, en 1966. Alberga el Gran Telescopio Altacimutal **BTA-6** (1975), telescopio óptico que fue el más grande del mundo hasta 1993, y el Radiotelescopio de la Academia de Ciencias **RATAN-600** (1977), el de mayor diámetro, sucediendo en ello al de Arecibo (Puerto Rico, 1963-2020).



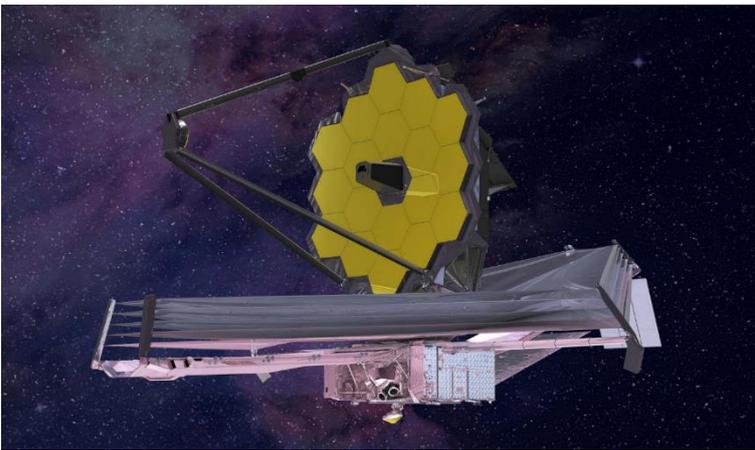
Telescopio esférico de 500 m de apertura (FAST). Radiotelescopio que entró en funcionamiento en Guizhou, China, en 2016. Segundo más grande del mundo, tras el RATAN-600.



Gran Telescopio Milimétrico (LMT). Radiotelescopio inaugurado en Puebla, México, en 2010. Estudia las estructuras del universo. Participó en el proyecto para lograr la primera imagen de un agujero negro, en 2019.



Telescopio espacial Hubble (HST). Telescopio óptico puesto en órbita en 1990. En 1994 confirmó la existencia de los agujeros negros. Ha ofrecido numerosas imágenes del universo imposibles de obtener desde la Tierra.



Telescopio espacial James Webb (JWST). Telescopio óptico puesto en órbita en 2021 para reemplazar al Hubble, que llegará a proporcionar los datos más lejanos jamás obtenidos.



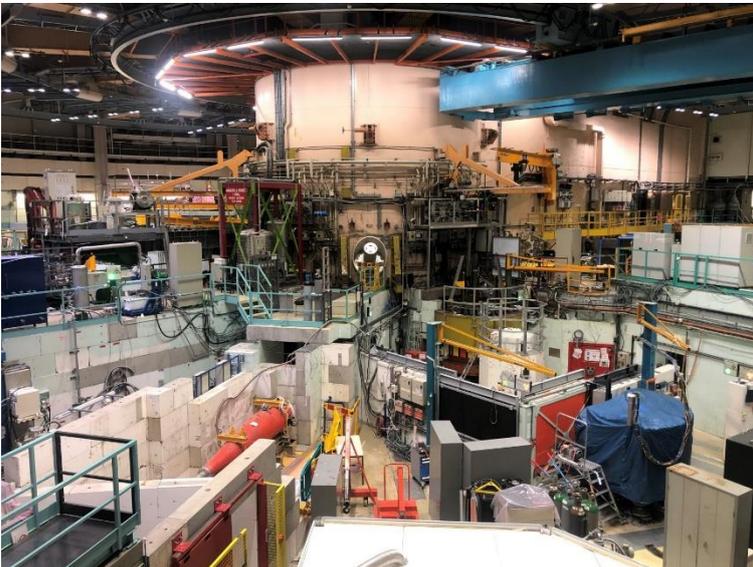
Estación Espacial Internacional (ISS). Observatorio y laboratorio de investigación puesto en órbita en 1998. Estudia fenómenos en condiciones de baja gravedad. Es el objeto artificial más grande que hay en el espacio.

3. Reactores de investigación

Los reactores nucleares que se utilizan para fines de investigación pueden ser de fisión, que generan neutrones con el uranio como combustible, o de fusión, uniendo deuterio y tritio.

3.1. Reactores de fisión

Los reactores de fisión más grandes y numerosos son los que producen energía nuclear en las centrales nucleares. Los de investigación son más pequeños y hay más de 200 repartidos por el mundo. Nombro solamente dos, el más potente y el más longevo.



Instituto Laue-Langevin (ILL). Gestiona un reactor nuclear en Grenoble, Francia, desde 1967. Es la fuente de neutrones más intensa del mundo.



National Research Universal (NRU). Reactor que empezó a funcionar en Ontario (Canadá) en 1957 y cerró en 2018. Era el reactor nuclear más antiguo del mundo.

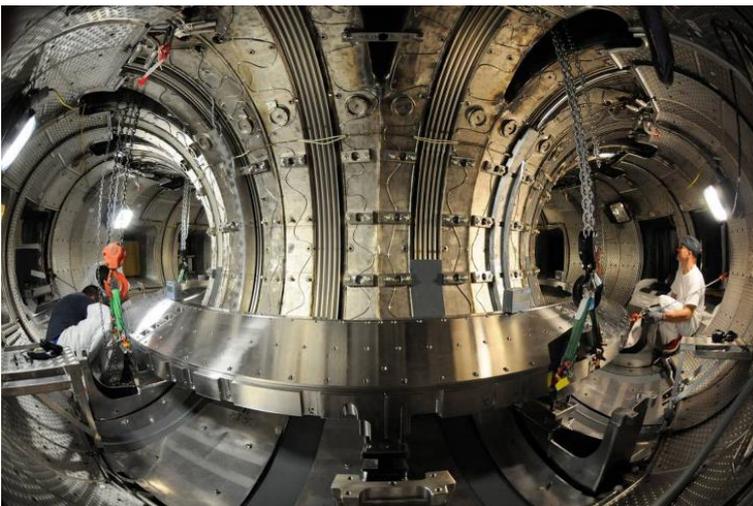
3.2. Reactores de fusión

Ya he puesto de manifiesto la gran importancia de la persecución de la energía de fusión. Son muchos los experimentos que se están desarrollando para conseguirla. A continuación, ofrezco un listado de reactores de fusión experimentales, ordenados por su tipología y acompañados de imágenes de sus aspectos impresionantes.

3.2.1. Confinamiento magnético

Un contenedor magnético retiene el plasma creado en su interior, formado por los núcleos a fusionar. Es el método más antiguo.

3.2.1.1. **Tokamak.** Toroide (rosquilla) con confinamiento por campo magnético generado por electroimanes. La fusión calienta agua que genera energía.



Reactor Nuclear Experimental Internacional (ITER). Consorcio de la Unión Europea, Suiza, Reino Unido, China, India, Japón, Corea del Sur, Rusia y Estados Unidos. Cadarache, Francia, 2007. Combustible: deuterio/tritio. Horizonte: 2025.

Reactores chinos



-Reactor **EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) HT-7U** (sucesor del HT-7, 1994). Instituto de Ciencias Físicas. Hefei, Anhui, China, 2006. Banco de pruebas para ITER y CFETR.



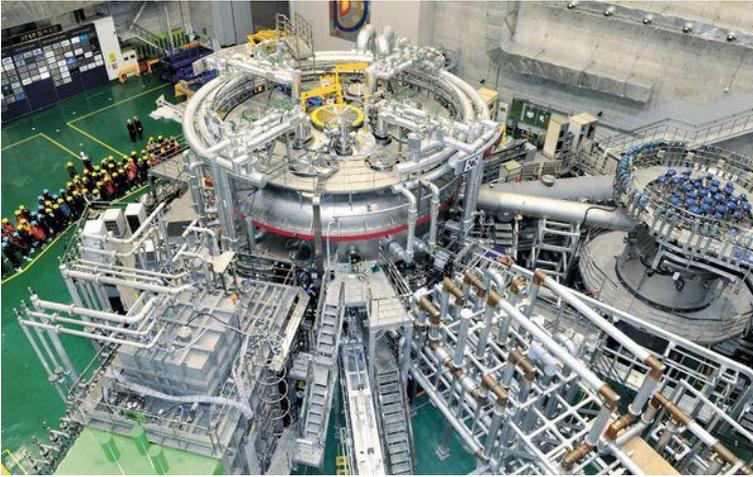
-Reactor **HL-2M** (sucesor del HL-2A). Instituto de Física del Suroeste. Chengdu, Sichuan, China, 2019. Banco de pruebas para ITER y CFETR.



-**Reactor J-TEXT**. Universidad de Ciencia y Tecnología de Huazhong. Wuhan, Hubei, China, 2004.
Banco de pruebas para ITER y CFETR.



-**Reactor CFETR**. Reactor de prueba en proyecto. Instituto de Ciencias Físicas. Hefei, Anhui, China.



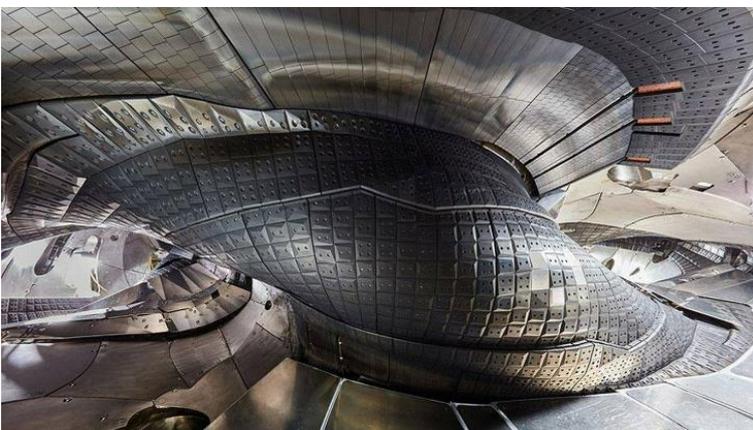
Reactor KSTAR. Instituto coreano de energía de fusión. Daejeon, Corea del Sur, 2007. Banco de pruebas para ITER. Combustible: hidrógeno/deuterio. Horizonte: 2025.

3.2.1.2. **Tokamak esférico.** Reduce al mínimo el agujero central del toroide y rodea las paredes de metal líquido.

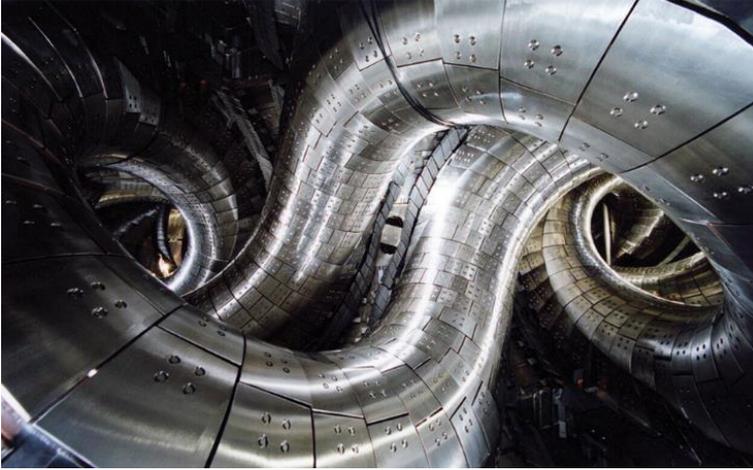


Reactor en proyecto. General Fusion. Burnaby, Canadá, 2002. Construcción prevista en Culham, Reino Unido, 2025. Horizonte: 2030.

3.2.1.3. **Estelarador** o estelarizador. Toroide retorcido.



Reactor Wendelstein 7-X. Instituto Max Plank de Física del plasma. Greifswald, Alemania, 2015. Combustible: hidrógeno.



Gran Dispositivo Helicoidal. Instituto Nacional de Ciencia de la Fusión. Toki, Japón, 1998. Combustible: hidrógeno.

3.2.2. Confinamiento inercial

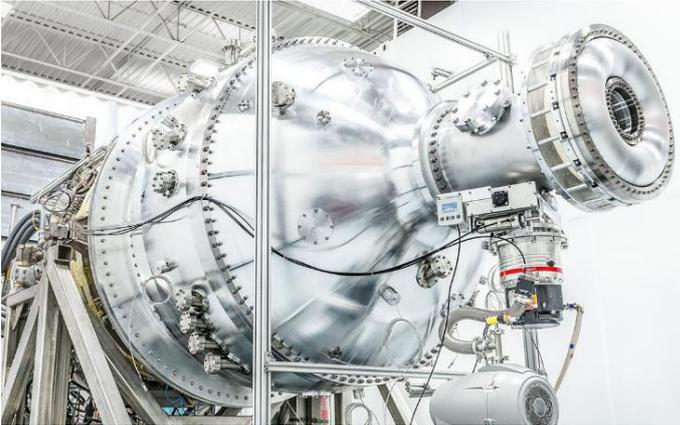
El contenedor retiene el plasma mediante campos magnéticos opuestos (pinzamiento) o haces de rayos láser.

3.2.2.1. **Z-Pinch.** Confinamiento inercial por campo magnético sin bobinas generado por electricidad.



Reactor Fuze. Zap Energy. Seattle, Washington, 2017. Combustible: deuterio/tritio. Horizonte: 2026.

3.2.2.2. **Acelerador de Plasmoides Inductivo.** Confinamiento magnético e inercial por láser. Fusión por pulsos: energía directa.



Reactor Trenta. Helion Energy. Everett, Washington, 2013. Combustible: deuterio/helio-3. Horizonte: 2024.



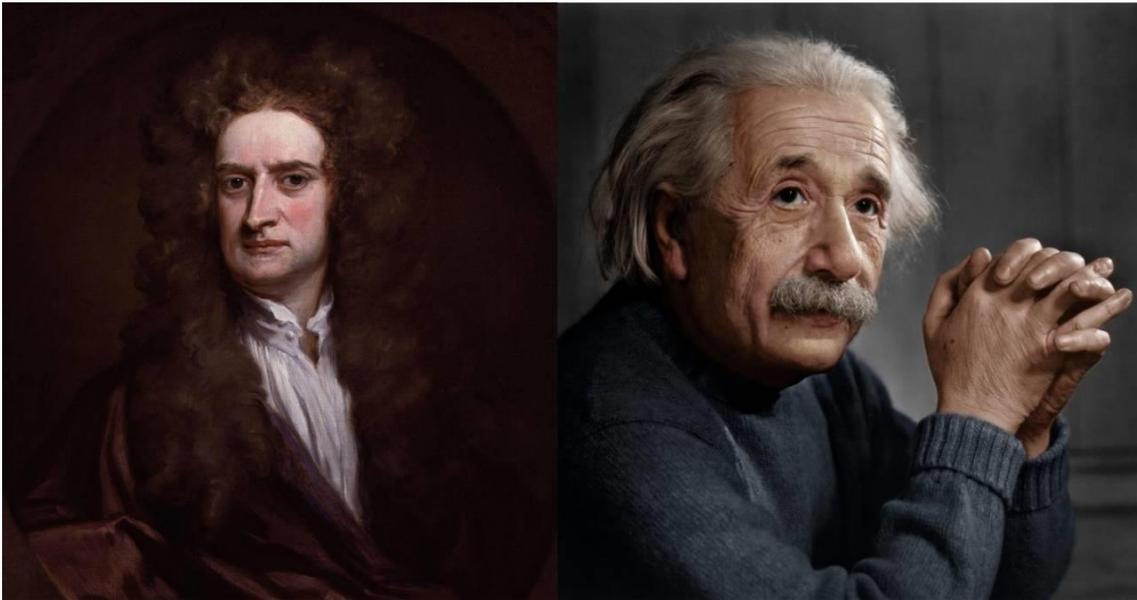
Instalación Nacional de Ignición (NIF). Laboratorio Nacional Lawrence Livermore. Livermore, California, 2002. Instalación nuclear militar. Combustible: hidrógeno/deuterio.



Láser Megajulio (LMJ). Centro de estudios científicos y técnicos de Aquitania. Le Barp, Francia, 2014. Instalación nuclear militar. Combustible: deuterio/tritio.

Además, la empresa australiana **HB11 Energy** anunció en 2022 que habían conseguido fusión de confinamiento inercial por láser más eficiente, usando el láser LFEX de la Universidad de Osaka, Japón. Combustible: hidrógeno/boro.

4.2. Genios. Grandes científicos



A lo largo de la historia, personas muy relevantes han contribuido con sus cerebros a hacer realidad el progreso humano. El campo de la física incluye a teóricos y experimentadores que han logrado grandes descubrimientos acerca de la materia y el universo. Estos son algunos de ellos.

Arquímedes de Siracusa (siglo III a. de la E.). Físico griego que formuló su célebre principio sobre el empuje hidrostático y sentó las bases de la aplicación del método científico de **Aristóteles**. Se le atribuye la expresión ¡Eureka! (¡Lo he encontrado!).

Nicolás **Copérnico** (1473-1543). Astrónomo polaco fundador de la astronomía por ser el desarrollador del heliocentrismo postulado por **Aristarco** de Samos, que sustituye al geocentrismo de **Ptolomeo**.

Galileo Galilei (1564-1642). Astrónomo italiano, continuador de la revolución de Copérnico. Utilizó el telescopio para demostrar el heliocentrismo de Copérnico.

Johannes **Kepler** (1571-1630). Astrónomo alemán que formuló las leyes del movimiento de los planetas, siguiendo las observaciones de Tycho **Brahe**.

Isaac **Newton** (1642-1727). Físico inglés que estableció la mecánica clásica, con la ley de la gravedad y las del movimiento. Con ello sentó las bases teóricas de la física. También descubrió que el espectro era inherente a la luz.

James Clerk **Maxwell** (1831-1879). Físico escocés que formuló las leyes del electromagnetismo, basándose en estudios pioneros de Michael **Faraday** (1791-1867). Estas leyes se consideran la segunda gran unificación de la física, tras la de Newton.

Henri **Becquerel** (1852-1908). Físico francés descubridor de la radiactividad en 1896. Este proceso fue estudiado después por Ernest **Rutherford** (1871-1937), Marie **Curie** (1867-1934) y su esposo Pierre Curie (1859-1906).

Max **Planck** (1858-1947). Físico alemán descubridor del cuanto de acción o constante de Planck. También enunció la ley de Planck, sobre la radiación electromagnética. Ambos son los cimientos

de la mecánica cuántica. Basado en su trabajo, Louis **de Broglie** (1892-1987) formuló la dualidad onda-partícula.

Albert **Einstein** (1879-1955). Físico alemán, autor de la teoría de la relatividad, punto de partida de toda la física moderna. Hizo enormes aportaciones, tanto a la física de partículas como a la cosmología.

Georges **Lemaître** (1894-1966). Astrónomo y sacerdote belga que demostró la expansión del universo en 1927, si bien Edwin **Hubble** (1889-1953) también es conocido por hacerlo en 1929. Además, Lemaître propuso por primera vez la teoría del Big Bang, en 1930.

Werner **Heisenberg** (1901-1976). Físico alemán que formuló en 1927 el principio de incertidumbre. Concretó matemáticamente la mecánica cuántica. Compañeros y seguidores suyos fueron Max **Born** (1882-1970), Niels **Bohr** (1885-1962), Erwin **Schrödinger** (1887-1961), Enrico **Fermi** (1901-1954) o Paul **Dirac** (1902-1984).

Claude **Shannon** (1916-2001). Matemático estadounidense que en 1948 fundó la teoría de la información. En 1937 ya había propuesto aplicar el álgebra en los circuitos digitales.

Peter **Higgs** (1929). Físico británico que predijo en 1964 la existencia del bosón de Higgs. Esta partícula, descubierta en 2012, había sido propuesta también por otros físicos.

Roger **Penrose** (1931). Físico y cosmólogo británico experto en mecánica cuántica y agujeros negros, cuya formación demostró en 1965. En 2001 propuso la cosmología cíclica conforme.

Kip **Thorne** (1940). Físico y cosmólogo estadounidense experto en relatividad general, agujeros negros y ondas gravitatorias, a cuyo descubrimiento contribuyó en 2016.

Stephen **Hawking** (1942-2018). Físico y cosmólogo británico que estudió los agujeros negros con Roger Penrose y formuló la radiación Hawking en 1974. Fue también conocido como divulgador.

5. La teoría Tausiet



Reflexiones humorísticas sin ninguna base científica, como juego para darle vueltas a los curiosos enigmas de la física.

5.1. Introducción

La **teoría Tausiet** (también expresada como Tau-7 o τ_7 por sus símbolos griegos) es la desarrollada en 2020 por Antonio Tausiet (Zaragoza, España, 1967) para dar explicación a los fenómenos subatómicos estudiados por la física cuántica que escapan a la comprensión racional. Constituye un nuevo hito en la historia de la ciencia, tras la importante detección del bosón de Higgs en 2012 y de las ondas gravitatorias en 2016.

Como hemos visto, el comportamiento de las partículas subatómicas responde a unas leyes distintas a las de la física clásica, que estudia el proceder de los objetos a escala humana. Así, Einstein instituyó que nada puede ir más rápido que la luz, y que el tiempo es relativo y varía según distintos parámetros.

Cuando los científicos estudian los átomos y su interior, se encuentran con sucesos aparentemente ilógicos: las partículas se pueden encontrar a la vez en dos lugares distintos (superposición cuántica), y además, si están entrelazadas, no importa la distancia a la que se encuentren para que, si una cambia su estado, la otra lo haga también (entrelazamiento cuántico). De hecho, esto ya tiene aplicaciones, como por ejemplo los ordenadores cuánticos, rapidísimos.

Rapidez: esa es la clave de la teoría Tausiet, una teoría del todo que predice que **la velocidad de la luz se supera a escalas subatómicas**. Es decir, que las partículas se mueven tan deprisa que nos parece que efectúan sus cambios de modo instantáneo. Esto sirve tanto para la superposición como para el entrelazamiento.

5.2. Desarrollo

Del mismo modo que, a escala humana, consideramos al universo observable una extensión infinita, cuando ya sabemos que su anchura es de 93.000 millones de años luz, podemos hacernos una idea racional de la aparente velocidad infinita de las partículas.

Todos los intentos anteriores de unificar la física han fracasado, como la teoría de cuerdas, que afirmaba que las partículas subatómicas no eran puntos sino filamentos, para explicar así que pudieran ser a la vez ondas. Si aplicamos la teoría Tausiet, no necesitamos cuerdas: cuando las partículas se mueven muy rápido, dibujan ondas, es decir, transportan energía sin que haya un transporte aparente de materia, debido a la alta velocidad del proceso. Es **la propuesta unificadora definitiva**.

Otro aspecto importante de la teoría Tausiet es que postula que todas las partículas elementales son la misma, puesto que lo que genera su clasificación es su comportamiento. Es decir, que el rápido movimiento de las partículas las hace actuar de diferentes maneras, obteniendo distintas masas, energías, cargas, etc.

La primera alusión a la teoría Tausiet apareció en un artículo crítico de diciembre de 2020 (*La nueva teoría del todo... a cien*), donde su autor afirmaba: “en el mundo subatómico las cosas transcurren con su normalidad ultrarrápida”. En febrero de 2021, la agencia Europa Press difundió la noticia *Un límite de velocidad también se aplica en el mundo cuántico*, de título engañoso, por cuanto la investigación a la que se refiere sólo confirma la de los soviéticos Mandelstam y Tamm en 1945: la velocidad cuántica depende de la energía.

Otra aparente refutación de la teoría Tausiet se daría en los estudios para establecer el límite de velocidad en la computación cuántica. Pero sus conclusiones sólo se refieren a la rapidez con la que podrán operar los ordenadores cuánticos, limitados a la velocidad de la luz, ya que los componentes macroscópicos de estos artefactos responden a la física clásica.

Cuando la teoría Tausiet se vea confirmada por las matemáticas, campo al que son susceptibles de trasladar todos los fenómenos, la humanidad contará con las fórmulas definitivas que expliquen íntegramente la realidad. Mientras, es necesario continuar con la divulgación de lo ya conocido, para evitar las consabidas desviaciones mitológicas del saber. El comportamiento depende del conocimiento, y los avances científicos, tanto tecnológicos como biológicos y su combinación (transhumanismo), facilitan el deseado progreso.

5.3. Conclusiones

Pero añadamos otras dos aportaciones a nuestro marco teórico, para acabar de rematarlo: la rapidez de la inflación cósmica y la agudeza visual de los felinos.



Por un lado, existen tesis anteriores acerca de que la velocidad de la luz sí fue superada en el momento de la inflación cósmica, los primeros instantes del universo. Como explica el colombiano Daniel Manrique Castaño en su artículo de 2012 *La velocidad de la luz: una constante que se opaca en el principio del universo*, “después de un principio inimaginablemente caliente, el universo comenzó a descender de temperatura en los primeros microsegundos”, lo que produjo “la expansión desbocada del universo”. En este mismo texto se aporta la cita del cosmólogo portugués João Magueijo, quien afirma: “La velocidad de la luz sigue siendo la velocidad límite, sólo que este límite puede variar de una carretera a otra”, en su libro *Más rápido que la velocidad de la luz* (2006).

Esta afirmación solivianta a parte de la comunidad científica, y el propio Magueijo, creador de la teoría de la velocidad variable de la luz (VSL, por sus siglas en inglés), se acerca a la teoría Tausiet, aunque se centra en el momento del nacimiento del universo, aportando algunas ideas añadidas acerca de la gravedad cuántica, mientras que yo intuyo que la velocidad en el mundo subatómico puede ser extraordinariamente mayor que la de la luz, constituyendo mi elegante propuesta de teoría del todo.

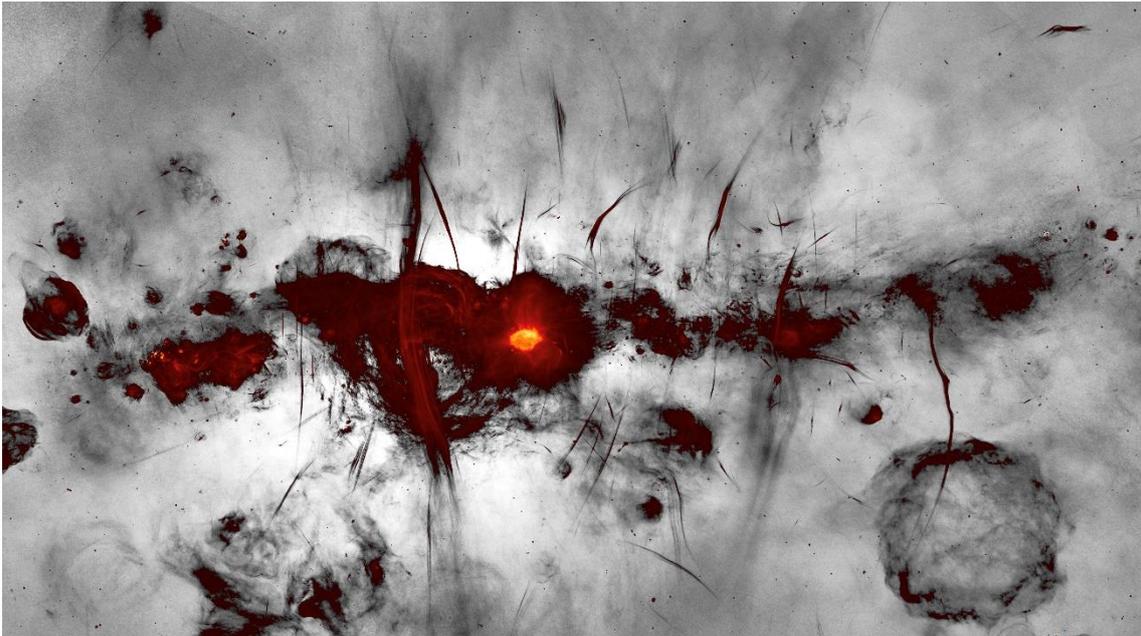
Por otro lado, la constatación de que los instrumentos actuales para medir el mundo cuántico son manifiestamente insuficientes, y la certeza de que avanzarán en precisión en el futuro, nos lleva a confiar en que, al igual que las matemáticas confirmarán la teoría Tausiet, también lo hará la ciencia experimental, del mismo modo que el ojo humano es mucho más rudimentario que el ojo del gato.

Y aquí llegamos a la segunda constatación, que planteamos como juego teórico. Como es sabido, el físico austríaco Erwin Schrödinger propuso en 1935 el experimento mental de meter en una caja a un gato hipotético: mientras está encerrado, el felino está a la vez vivo y muerto, como sucede en la superposición cuántica con determinadas partículas subatómicas, mientras no se observen. Ya queda dicho que, según la teoría Tausiet, esto sucede por la velocidad del elemento y la lentitud de la medición. La solución es contratar al gato de Schrödinger.

Esta idea, siempre en el campo de lo especulativo, es la nueva aportación a lo que, sin duda, va a ser un salto de gigante, a partir de una sugerencia de Alicia Fernández, introductora de la idea de añadir un gato a la teoría Tausiet. Ya en 1801, el científico inglés Thomas Young realizó su pionero experimento de la doble ranura, que acabó desembocando en la demostración de la dualidad onda-partícula.

Basta con extraer al gato de la caja de Schrödinger (en su modalidad de gato vivo), e introducirlo en la caja con rendijas de Young, para que observe con detenimiento las evoluciones de los fotones o de los electrones. La aguda visión gatuna seguirá fielmente a estas partículas, y las conclusiones del felino serán las mismas que las de la teoría Tausiet, acabando de una vez por todas con la creencia en supuestas superposiciones.

El día en que el Premio Nobel de física sea entregado a Antonio Tausiet, una vez confirmada la innovadora teoría que lleva su nombre, las retransmisiones del evento mostrarán sentada en primera fila a Fernández, con el gato de Schrödinger vivo en su regazo, en una emocionante imagen que dará la vuelta al mundo para constatar las importantes aportaciones de la dama y el felino a esta investigación definitiva.



Este texto se redactó en 2022, año en que desde el Observatorio Radioastronómico de Sudáfrica fue tomada esta bella fotografía de la Vía Láctea vista de lado, con nuestro agujero negro Sagitario A en el centro.*

Las partículas y el cosmos ordena la información más relevante acerca de lo que ocupa y afecta al espacio físico. Está condensado de modo que cualquier lector ajeno a estos mundos pueda comprender su contenido, en la línea de la divulgación científica más alejada posible de lo que los anglosajones llaman despectivamente ciencia pop, que traspasa la barrera de la pseudociencia.

Comienza aclarando cosas de la física en general, para pasar al intrincado mundo de las partículas. Después se adentra en la cosmología, y termina con una selección de máquinas y científicos relevantes. El particular modo del autor de ver el mundo, que concilia la búsqueda de la verdad con la creación artística, le obliga a añadir un último capítulo de inspiración humorística, la teoría Tausiet (la propuesta unificadora definitiva). El lector es muy dueño de saltárselo o de acompañarle en su juego.

Antonio Tausiet (Zaragoza, 1967) es un escritor y cineasta centrado en la cultura popular, con numerosos artículos, libros y audiovisuales a sus espaldas. De 2013 a 2016 fue vicepresidente de la Academia del Cine Aragonés. Es corresponsable del proyecto de recopilación de imágenes Gran Archivo Zaragoza Antigua (GAZA), junto a José María Ballestín (2014-actualidad).



Los libros prohibidos