

# Relatividad

Las teorías de la Relatividad Especial y la Relatividad General, fueron formuladas por Einstein en 1905 y 1915 respectivamente y son dos teorías fundamentales de la Física moderna.

El contenido conceptual auténticamente revolucionario de ambas teorías, el carácter antiintuitivo (“paradójico”) y casi esotérico de algunas de sus predicciones (como los agujeros negros o el *Big Bang*), el impacto social de ciertas de sus aplicaciones, como la bomba atómica, y la personalidad de su autor (y de algunos de los más destacados investigadores en este campo como Hawking) las han dotado de un cierto aura de misterio entre el gran público. En cuanto a los filósofos, ¿cómo no interesarse por teorías que hacen del espacio y del tiempo (las “formas *a priori* del conocimiento” de Kant) y del propio Universo objetos físicos cuyo origen y evolución está determinado por leyes matemáticas? La impresión que estas teorías hicieron en los miembros del Círculo de Viena o cómo llevaron al operacionalismo de Bridgman o a las ideas de Popper sobre la metodología de la ciencia son bien conocidas [Sán].

Para empezar, es bueno tener una definición simple de ambas teorías.

La Relatividad Especial es la teoría que juega en la Física actual el papel que la Mecánica Clásica de Newton jugaba en el siglo XIX, y relaciona los conceptos de tipo espacio-temporal de la Física: posición, velocidad, aceleración, masa, fuerza... Cuando las velocidades de los objetos son pequeñas (comparadas con la de la luz), las predicciones de la Relatividad Especial coinciden cuantitativamente con las de la Mecánica Clásica, pero se apartan de éstas cuando estas velocidades se aproximan a la de la luz.

La Relatividad General es la teoría que reemplaza a la Gravitación Universal de Newton con una descripción radicalmente nueva de la interacción gravitatoria que, en cierto sentido que explicaremos más adelante, generaliza la Relatividad Especial. Cuando los campos gravitatorios son pequeños y las velocidades son pequeñas (siempre comparadas con la de la luz) las predicciones de la Relatividad General coinciden cuantitativamente con la de la Gravitación Universal.

Se puede decir, pues, que la Relatividad Especial reemplaza a la Mecánica Clásica cuando las velocidades se acercan a la de la luz. También la Mecánica Cuántica reemplaza a la Mecánica Clásica, pero sólo cuando las distancias y los tamaños de los objetos son muy pequeños, siempre a pequeñas velocidades. Está claro que cuando tenemos objetos muy pequeños moviéndose a velocidades próximas a la de la luz, algo habitual en el mundo subatómico, ambas teorías han de ser combinadas. (Las regiones en las que estas teorías son válidas o relevantes están representadas en la Figura 1.)

El resultado de combinar la Relatividad Especial y la Mecánica Cuántica son las Teorías Cuánticas de Campos Relativistas que describen a las partículas ele-

mentales y sus interacciones *fuerte* y *electrodébil*. La interacción fuerte mantiene unidos a los constituyentes de núcleo atómico (y a los constituyentes de los constituyentes, los *quarks*) y sólo actúa a estas escalas microscópicas. La interacción electrodébil es una única interacción que se manifiesta de dos maneras distintas: como interacción nuclear débil, responsable de la desintegración de ciertos núcleos atómicos y que sólo actúa a escalas microscópicas y como interacción electromagnética (con sus dos facetas eléctrica y magnética) que actúa a escalas microscópicas y macroscópicas entre objetos cargados. La descripción unificada de estas interacciones es uno de los grandes logros de la Física Teórica del siglo XX.

Las Teorías Cuánticas de Campos Relativistas describen, pues, la propagación de la luz, su absorción y su emisión por la materia, la estructura de los átomos, las interacciones entre ellos para formar moléculas, cristales, líquidos, la estructura de los núcleos atómicos y su formación (fusión y fisión), la propagación de los electrones por medios materiales... Todos estos fenómenos fundamentales para la vida son descritas con una precisión incomparable por la combinación de la Mecánica Cuántica y la Relatividad Especial.

Hay una tercera interacción fundamental que experimentamos a diario: la gravedad. Ésta actúa entre todos los objetos y a grandes distancias pero es tan débil que sólo se percibe cuando alguno de ellos tiene una masa muy grande. Es la interacción que gobierna el Universo, pero a escala microscópica (atómica, nuclear) es irrelevante y, hoy por hoy, de efectos indetectables, aunque podría ser la fuerza dominante a escalas mucho más pequeñas, del orden de la *longitud de Planck*  $1,7 \times 10^{-33}$  cm, como representamos en la Figura 1

Es natural intentar describir la gravedad como las demás interacciones, con una Teoría Cuántica de Campos Relativista. El primer paso, como en los demás casos, sería construir una Teoría de Campos Relativistas Clásica (no Cuántica) para *cuantizarla* posteriormente, y aquí se encuentra el primer problema, porque no es posible construir tal teoría sin encontrar graves problemas de inconsistencia que sólo se superan en la Teoría de la Relatividad General de Einstein, que, a pesar de su nombre, no es una teoría relativista (en el sentido especial) y tiene una interpretación radicalmente distinta<sup>1</sup>.

El segundo problema es la cuantización de la Teoría de la Relatividad General. Esta cuantización es, desde el punto de vista práctico, innecesaria, pues no se conoce ningún efecto cuántico de la gravedad, conceptualmente poco clara (lo que ha dado lugar a muchas propuestas, como veremos) y técnicamente difícil o quizá imposible. Y sin embargo, la búsqueda de una Teoría Cuántica de la Gravitación es, desde el punto de vista de los principios fundamentales de la Física de hoy, ineludible, pues éstos requieren su existencia y una demostración de que no

---

<sup>1</sup>Aunque éste es el orden lógico, ciertamente no es el cronológico.

existe podría hacer tambalearse estos mismos principios.

En este artículo vamos a hacer una muy breve introducción a las Teorías de la Relatividad Especial y General, su desarrollo y a su enorme impacto en la Ciencia moderna y en nuestra visión del mundo, para discutir, al final, las distintas propuestas que se han hecho para ir más allá de las actuales fronteras de nuestro conocimiento.

Existen muchos libros de divulgación sobre la relatividad en los que el lector podrá satisfacer la curiosidad que esperamos causarle. Son particularmente recomendables los de Russell [Rus], Gamow [Gam] y Bondi [Bon]. Los aspectos históricos están tratados, por ejemplo, en el libro de Sánchez Ron [Sán]. Sobre Einstein hay una extensa literatura, de la que se puede destacar el libro de Pais [Pai82]. El libro de Weinberg [Wein] es un clásico de la divulgación científica sobre el *Big Bang* que admite muchos niveles de lectura. Finalmente, recomendamos la lectura del libro de Thorne [Tho], que incluye la interesante historia del desarrollo concepto de agujero negro en paralelo al desarrollo de las armas atómicas.

## 1. Antecedentes

La base de la Física del siglo XIX es la Mecánica Clásica de Newton cuyas leyes son válidas para cualquier observador que esté en reposo con respecto al espacio absoluto, cuya existencia (como la de un tiempo absoluto) se asume.

Las leyes de Newton resultan ser también válidas para cualquier observador que se mueva con respecto a este espacio absoluto a una velocidad constante (Principio de Relatividad de Galileo), lo cual impide, en la práctica, determinar por procedimientos mecánicos qué observadores están en reposo absoluto. Por ejemplo, no se podría determinar por medios ópticos si la teoría corpuscular de la luz (una teoría mecánica en la que se propone que la luz está formada por corpúsculos materiales que se mueven obedeciendo esas leyes) fuese válida. En términos más precisos (y modernos) diríamos que las leyes de Newton son invariantes bajo las *transformaciones de Galileo* que relacionan lo que ve un observador en reposo con lo que ve uno que se mueve a velocidad constante en el espacio-tiempo absoluto de Newton.

Sin embargo, no estaba claro que el Principio de Relatividad de Galileo fuese válido para otros fenómenos físicos.

A finales del siglo XIX la Física consiguió uno de sus mayores éxitos: la unificación por Maxwell de la electricidad y el magnetismo en una sola entidad que ahora conocemos como campo electromagnético gobernada por un pequeño número de leyes expresadas en las ecuaciones de Maxwell, suplementadas por la ecuación de Lorentz. Se demostró además que la luz es una onda electromagnética

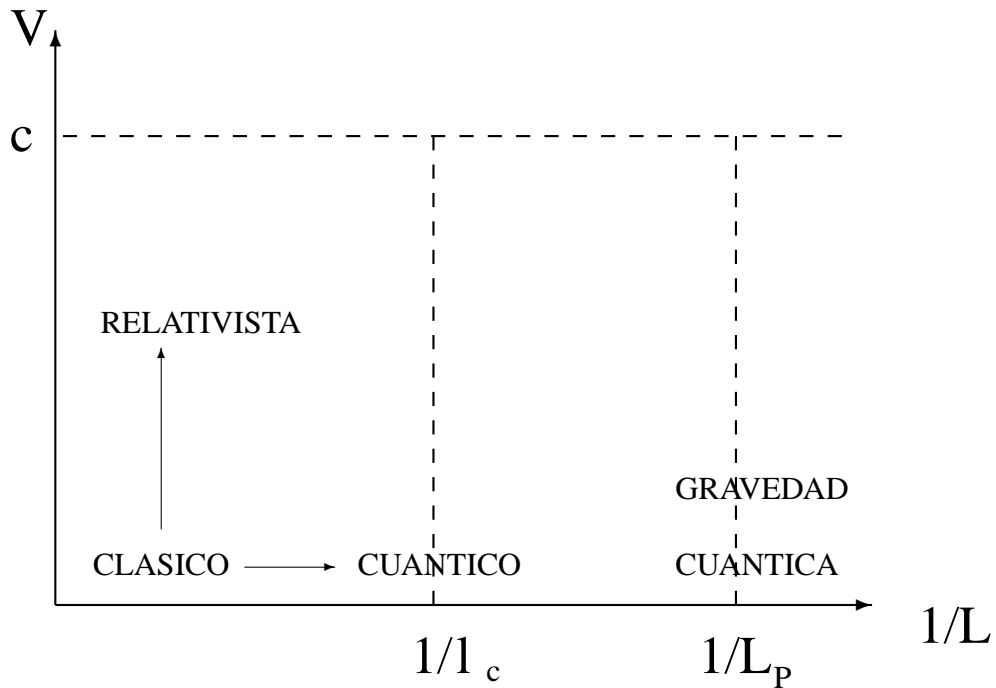


Figura 1: La Naturaleza es relativista y es cuántica, pero la descripción clásica de un sistema físico de masa  $m$  puede ser válida para velocidades que son pequeñas comparadas con las de la luz  $c$  y distancias  $L$  grandes comparadas con la *longitud de onda Compton*  $\lambda_c = h/mc$  asociada a dicho sistema. Esa región de validez de la Física Clásica es la que está próxima al origen de coordenadas en esta gráfica de velocidades e inverso de distancias. Al aumentar la velocidad (desplazarnos hacia arriba en la gráfica), la descripción clásica deja de ser aproximadamente válida y hay que utilizar la relativista. A distancias más pequeñas hay que utilizar la descripción cuántica y a distancias pequeñas y grandes velocidades, hay que utilizar las Teorías Cuánticas de Campos Relativistas. Los efectos de la Gravitación Cuántica deberían de empezar a ser importantes a distancias del orden de la *longitud de Planck*  $L_P$ .

como las descubiertas por Hertz, y las leyes de la Óptica se reducen a las de Maxwell y Lorentz, zanjándose el largo debate entre las teorías corpusculares y ondulatorias de la luz.

El precio pagado fue, sin embargo, muy alto: hubo que imaginar la existencia de una sustancia, el *éter*, que servía de medio de propagación a las ondas luminosas y cuya perturbación en presencia de cargas o corrientes eléctricas está gobernada por las leyes de Maxwell. Las propiedades de elasticidad, viscosidad, etc. de esta sustancia hipotética que ocuparía todo el espacio fueron muy

debatidas<sup>2</sup>, pero había acuerdo en que el éter existía y era, en definitiva, el medio que define el espacio absoluto de Newton y que las leyes de la Física (en particular las de Maxwell) son válidas para observadores en reposo con respecto al éter/espacio absoluto y es natural que cambien para observadores que se mueven con respecto a él.

Esto concuerda con la falta de invariancia de las leyes de Maxwell del Electromagnetismo bajo las transformaciones de Galileo (a diferencia de las leyes de la Mecánica de Newton), pero tiene una importante consecuencia (entre muchas otras) que debería ser posible comprobar experimentalmente: dos observadores, uno en reposo y otro en movimiento deberían hallar valores distintos para la velocidad de la luz.

Merece la pena detenerse en este punto y explicarlo con un ejemplo que nos permita apreciar el problema y la solución que Einstein le dio. Imaginemos un coche desplazándose por la carretera que se comportase como la luz propagándose por el éter e imaginemos que la velocidad de este coche/luz fuese de 100 km/h. Imaginemos también a dos observadores con relojes sincronizados con el tiempo absoluto que podemos asociar al reloj del ayuntamiento de un pueblo cercano. Uno de ellos está sentado en la carretera y el otro desplazándose en una moto a 50 km/h en la misma dirección que el coche/luz. Los tres coinciden cuando los relojes de los dos observadores se ponen en marcha y, una hora después, medida por cualquiera de los dos observadores (o por el reloj del ayuntamiento), el motorista se encuentra a 50 km del observador que está sentado y el coche/luz se encuentra a 100 km del observador sentado y a 50 km del motorista. La velocidad del coche/luz con respecto al observador sentado en la carretera/éter ha sido de 100 km/h y, con respecto al motorista, de 50 km/h. Si el motorista se moviese en la dirección opuesta, al cabo de una hora, estaría a 150 km del coche/luz y la velocidad de éste con respecto al otro sería de 150 km/h.

La Tierra se mueve alrededor del Sol y es difícil concebir que no esté en movimiento con respecto al éter. La velocidad de un rayo de luz, medida en la Tierra (representada en el ejemplo anterior por el motorista), debe de depender, pues, de la dirección del rayo de luz: si el rayo de luz y la Tierra se mueven en la misma dirección con respecto al éter, deberíamos de observar una velocidad algo menor, y si se moviesen en direcciones opuestas, algo mayor.

Michelson y Morley intentaron repetidas veces detectar esta diferencia de velocidades con un instrumento de enorme precisión, pero sin ningún éxito, dejando aún más claro el problema del éter.

---

<sup>2</sup>Por ejemplo, Young lo imagina inmóvil e impregnando los cuerpos materiales con distintas densidades; Fresnel supone que es arrastrado por los cuerpos en movimiento y Stokes que está en reposo pero que se comporta como un fluido, capas del cual se mueven arrastradas por los cuerpos que se mueven en su seno. El problema del éter está discutido en [Poi].

## 2. La Relatividad Especial

La respuesta que Einstein dio a este problema es tan simple como profunda: Einstein rechaza la existencia del éter como medio de propagación del campo electromagnético que simplemente se propaga en el vacío<sup>3</sup>, donde no hay ningún sistema de referencia privilegiado que distinga observadores en reposo y en movimiento sino tan sólo “observadores inerciales” para los cuales todas las leyes de la Física toman la misma forma y que se mueven unos con respecto a otros con velocidades constantes (como de hecho ocurre en la Mecánica Clásica). Este es el Principio de Relatividad (Especial) que generaliza el de Galileo que había sido propuesto poco antes por Poincaré.

Einstein acepta además la conclusión lógica más simple de las observaciones hechas hasta entonces<sup>4</sup>: la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores inerciales para los cuales, por lo tanto, deben de ser válidas las mismas ecuaciones de Maxwell. Esto tiene dos importantes consecuencias:

1. Como las ecuaciones de Maxwell no son invariantes bajo las transformaciones de Galileo que relacionaban las medidas de observadores inerciales en el espacio-tiempo absoluto de Newton, hay que utilizar otras transformaciones que resultan ser las que Lorentz había encontrado poco antes y que mezclan medidas de posición y tiempo de los observadores, a diferencia de las de Galileo, en las cuales el tiempo era siempre el mismo para todos.
2. Las leyes de Newton eran invariantes bajo las transformaciones de Galileo, pero no lo son bajo las de Lorentz. Por lo tanto hay que modificar las leyes de Newton (que no las de Maxwell). También, como Poincaré fue el primero en observar, habrá que modificar la Gravitación Universal de Newton.

La necesidad de transformar los tiempos de los observadores es una consecuencia del ejemplo del coche/luz visto con los ojos de Einstein: para empezar, no hay carretera (éter/espacio absoluto) ni reloj del ayuntamiento del pueblo cercano (tiempo absoluto) sino tan sólo un observador con moto (M) y otro sin ella (O) que ponen sus relojes en hora cuando se cruzan en el mismo punto ellos dos y coche/luz (L). Al cabo de una hora del reloj de O, L debe de estar a 100 km y M a 50 (Figura 2). Pero también, al cabo de una hora del reloj de M, éste debe de observar que L, está a 100 km, pues L se mueve a 100 km/h con respecto a cualquier observador inercial y O a 50 (Figura 3).

Estas dos observaciones, consecuencia de aceptar que la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores, se pueden reconciliar admitiendo que

---

<sup>3</sup>El vacío es, según sabemos hoy, un ente con propiedades nada triviales que, por ejemplo, determinan las masas de las partículas, lo que le aproxima, paradójicamente, al éter.

<sup>4</sup>No está claro que conociese en concreto los experimentos de Michelson y Morley.



Figura 2: **1** Al cabo de una hora, medida por su reloj, O ve al motorista M a 50 km y al coche/luz L 50 km más allá (a un total de 100 km).

no hay un único tiempo absoluto, sino que hay un tiempo y una definición de simultaneidad asociados a cada observador. Así, para O, la llegada de M y L a los 50 y 100 km de distancia son sucesos simultáneos que se producen cuando ha pasado una hora de su reloj. Para M, estos dos sucesos se producirían, de acuerdo con las transformaciones de Lorentz a los 52 y a los 35 minutos de su reloj, respectivamente (y además corresponderían a distancias distintas medidas con respecto a M). Un tercer observador inercial podría incluso ver estos sucesos en un orden temporal opuesto<sup>5</sup>. Otros efectos son los muy conocidos de dilatación de los tiempos y contracción de longitudes.



Figura 3: **2** Al cabo de una hora, medida por su reloj, el motorista M ve a O a 50 km y al coche luz a 100 km en la dirección opuesta.

La “mezcla” de las coordenadas espaciales y temporales de los sucesos por las transformaciones de Lorentz lleva a la idea de considerarlas como las coordenadas de un espacio (-tiempo) de cuatro dimensiones, el *espacio de Minkowski*, equipado con una medida de intervalos espacio-temporales (la *métrica de Minkowski*) que es invariante bajo las transformaciones de Lorentz, aunque la parte espacial o la parte temporal de dichos intervalos no lo sean por separado. La estructura causal de la Relatividad Especial está contenida en la métrica de Minkowski.

Por otro lado, de la modificación de las leyes de Newton de la Mecánica, se deduce la equivalencia de masa y energía expresada en la célebre fórmula  $E =$

<sup>5</sup>Entre estos sucesos no puede haber una relación causa-efecto. En los casos en los que puede haberla, que son aquellos en los que se podría enviar una señal que viajase a velocidad menor a la de la luz de uno al otro, el orden temporal es siempre el mismo para todos los observadores, aunque los intervalos temporales sean distintos. El Principio de Causalidad es preservado por la Relatividad siempre y cuando no haya observadores moviéndose a velocidades superiores a la de la luz.

$mc^2$  que abre las puertas a la energía nuclear y además, entre otras, el incremento de la masa inerte de una partícula con su velocidad, la imposibilidad de acelerar una partícula hasta que alcance la velocidad de la luz, que resulta ser máxima.

## 2.1. Relatividad Especial y Mecánica Cuántica

Como estamos viendo, el requisito de invariancia bajo ciertas transformaciones (*simetría*) pasa a jugar un papel primordial en la Relatividad Especial como consecuencia del trabajo de Lorentz y Poincaré. A partir de este momento, los principios de simetría pasan a tener un papel crucial en la Física.

Por un lado, los trabajos de Noether relacionan las simetrías con las cantidades conservadas, explicando por qué la energía o el momento se conservan: por la invariancia de la Física bajo las transformaciones de Poincaré (que incluyen las de Lorentz).

Por otro lado, el formalismo de la Mecánica Cuántica incorpora de forma natural las simetrías. De los trabajos de Wigner se deduce que todas las partículas cuánticas y relativistas están caracterizadas por su masa y su espín, una nueva magnitud de índole puramente relativista.

La combinación de la Mecánica Cuántica y la Relatividad Especial tiene muchas más consecuencias: la posibilidad de creación y destrucción de partículas, la necesidad de utilizar campos cuánticos en vez de funciones de onda, el uso crucial de las *simetrías gauge* en la cuantización de los campos etc. No podemos extendernos aquí mucho más sobre este tema, pero el lector interesado puede consultar el excelente libro de Pais [Pai86].

## 3. La Relatividad General

Como hemos dicho, Poincaré fue el primero en intentar construir una teoría relativista de la gravitación a semejanza de la teoría de Maxwell del electromagnetismo, como el Principio de Relatividad Especial exigía y a su intento siguieron otros (Nordström, Einstein y Fokker). Sorprendentemente, esta línea de trabajo se interrumpe con la aparición de la Teoría de la Relatividad General en 1915, que no puede considerarse como una teoría relativista (especial) de la gravitación, sino que va mucho más allá. La belleza de esta teoría y la autoridad de su creador detuvieron completamente la búsqueda de una Teoría Relativista del Campo Gravitatorio a la que sólo hubo algunas contribuciones esporádicas hasta los años 60, como veremos.

El primer hito en el camino que llevó a la Relatividad General fue la formulación por Einstein en 1907 (influenciado aquí por Mach) del Principio de Equiv-



alencia<sup>6</sup> que establece la igualdad entre la masa inerte que aparece en las leyes de Newton de la Mecánica y ahora en la Relatividad Especial y la masa gravitacional que es fuente del campo gravitatorio. Esta igualdad ya fue observada por Galileo al dejar caer distintos objetos desde la Torre de Pisa y ver que lo hacían aproximadamente igual, independientemente de su masa y su composición y comprobada con enorme precisión por Eötvös en 1910 y se pone de manifiesto en el famoso *gedankenexperiment* del cohete: un observador encerrado en un cohete espacial sería incapaz de distinguir si está en reposo en la superficie de la Tierra y sometido a su campo gravitacional que actúa sobre su masa gravitatoria o moviéndose con aceleración  $g$  en el espacio sometido a las “fuerzas de inercia” que “actúan” sobre su masa inerte. En ambos casos, todos los objetos del cohete sienten una aceleración igual,  $g$ , independientemente de su masa y composición.

Einstein extrajo varias consecuencias de este *experimento mental*:

1. Para empezar, como un observador en un cohete que acelera vería curvarse los rayos de luz, el campo gravitacional debe de curvar los rayos de luz<sup>7</sup>. En 1911 Einstein se dio cuenta de que este efecto podía observarse en eclipses totales de sol pero hasta la expedición de Eddington y Dyson de 1919 la observación no pudo realizarse.
2. La gravitación es una propiedad del espacio-tiempo en el que se mueven los cuerpos. Esto explica que todos se muevan de la misma manera. Por otro lado, la distribución de la masa (energía) de la materia presente debe de ser responsable de esta propiedad y, a la vez, esta propiedad debe de poder simularse por un sistema acelerado como un cohete.

Einstein tardó mucho en dar este gran salto conceptual. Iniciado por el matemático Grossman en la geometría de Riemann, emprendió la construcción de una teoría en el que la medida de los intervalos del espacio-tiempo (que en ausencia de campo gravitatorio era la métrica de Minkowski) fuese la variable que determinase el campo gravitatorio. El espacio-tiempo debía de tener una métrica variable y ser, en otras palabras *curvo* (de Riemann). La geometría del espacio-tiempo es lo que percibimos como gravitación

Por otro lado, la teoría debía de ser válida para observadores acelerados, y no sólo para los inerciales de la Relatividad Especial, a la que trasciende. De ahí el adjetivo de “General” de la teoría resultante, que resulta ser invariante bajo todas

---

<sup>6</sup>En la actualidad se distingue entre tres Principios de Equivalencia: débil, medio-fuerte y fuerte. El originalmente formulado por Einstein el débil, pero la Relatividad General que construyó satisface el fuerte.

<sup>7</sup>Las teorías de Nordström, consistentes por lo demás, no predecían este hecho, y por ello Einstein las descartó. También daban una predicción errónea para la precesión del perihelio de Mercurio, una anomalía que la teoría de Newton no podía explicar.

las transformaciones de coordenadas (no sólo las transformaciones de Lorentz), de acuerdo con el Principio de Covariancia General.

Una vez identificada la variable que representa el campo gravitatorio (la métrica del espacio-tiempo) hay que encontrar las ecuaciones que determinan su valor. Estas fueron propuestas por Einstein (casi al unísono con Hilbert) en 1915, tras dudas de las que salió optando por un campo gravitatorio en el que todo (incluyendo al propio campo gravitatorio) es afectado de la misma forma por el campo gravitatorio, lo que equivale al Principio de Equivalencia fuerte.

La Teoría de la Relatividad General (TGR) hace un gran número de predicciones, unas comprobadas experimentalmente, y otras (por ejemplo, la existencia de ondas gravitacionales similares a las electromagnéticas) aguardando la tecnología que las pondrá a prueba. Ante la imposibilidad de describir en detalle la TGR y sus predicciones, vamos a señalar algunas de sus características más interesantes:

1. En la TGR, el campo gravitatorio (que tiene energía) produce más campo gravitatorio, como cualquier otro tipo de energía, de acuerdo con el Principio de Equivalencia Fuerte. Por lo tanto es *no-lineal* (o *no-Abeliano*), como las interacciones nucleares fuertes y débiles que se encontrarían mucho más tarde. Esto es una fuente de complejidad y de riqueza en la teoría. Por ejemplo, puede haber campos gravitatorios automantenidos, en ausencia total de materia.

2. La solución completa de las ecuaciones de Einstein de la TGR implica el conocimiento de la distribución de materia (energía) y del campo gravitatorio (métrica) en todo lugar y todo tiempo.

Dado que la gravitación es la única interacción importante a escalas astronómicas, la TGR permite el estudio del Universo (espacio-tiempo y materia en todo lugar y todo tiempo), convirtiendo a la Cosmología en una ciencia.

3. La estructura causal, contenida en la métrica, es distinta para cada solución. Esto da lugar a varias nuevas e interesantes posibilidades, como la existencia de

- a) *Horizontes de sucesos*, superficies que separan dos regiones, interior y exterior, entre las cuales las relaciones causales son unidireccionales: observadores, señales, información puede pasar del exterior al interior pero nunca al revés. El interior es lo que se conoce como *agujero negro*.

- b) Curvas temporales cerradas, un observador que se moviera a lo largo de las cuales volvería a un tiempo anterior<sup>8</sup> (“máquinas del tiempo”). Estas curvas pueden estar asociadas a *Agujeros de gusano*. Las soluciones de las ecuaciones de Einstein en que aparecen estas curvas temporales cerradas están asociadas normalmente a energía con propiedades exóticas, pero la simple posibilidad de que existan excita la imaginación y exige un estudio muy serio (véase, por ejemplo, [Tho, Gott]).

### 3.1. Cosmología relativista

En 1917 Einstein propuso el estudio del Universo como un todo usando las ecuaciones de la TGR y asumiendo el Principio Cosmológico (la homogeneidad e isotropía aproximada del Universo a gran escala), que no es sino el principio copernicano llevado al extremo: el hombre no ocupa ningún lugar especial en el Universo y además el Universo es igual en todas las direcciones.

Einstein creía que el Universo se encontraba además en un estado estacionario, pero sus ecuaciones únicamente admitían soluciones que describen un Universo que se expande o se contrae. Hubble no demostraría hasta 1929 que el Universo está en expansión y en aquél momento Einstein optó por modificar sus propias ecuaciones añadiendo el término de la *constante cosmológica* de forma que admitiesen soluciones cosmológicas estacionarias (Universo de Einstein). De hecho, reaccionó muy desfavorablemente al hallazgo de De Sitter de la primera solución que describe un Universo (¡vacío!) en expansión, seguida por los modelos de Friedmann (1922) y Lemaître (1924) aunque al final hubo de rendirse a la evidencia y rechazó el término cosmológico.

Sin embargo, una vez que el genio sale de la botella, es difícil volver a meterlo dentro: si el término cosmológico es compatible con el Principio de Covariancia General, (de hecho es el único término adicional que lo es), ahora hay que explicar por qué no debería de introducirse o por qué su valor (como demuestran los experimentos) es extremadamente pequeño o cero. La controversia sobre el valor teórico y la naturaleza de este término (que podría estar asociado a la *energía del vacío*) dura hasta nuestros días en que parece haber datos que indican que nada menos que el 70 % de la energía del Universo en el presente es exactamente del tipo que estaría asociado al término cosmológico.

El siguiente gran paso fue dado por Gamow en 1946 al proponer que el Universo, que ahora se expande, en el pasado se componía fundamentalmente de radiación y había sido mucho más denso y caliente. Sus colaboradores, Alpher y Herman predijeron en 1948 que, de ser cierto este modelo (llamado de *Big*

---

<sup>8</sup>No deja de ser curioso que una solución que descubre un Universo con curvas temporales cerradas fuese descubierta por el propio Gödel.

*Bang* por su detractor Hoyle, quien era partidario de modelos estacionarios del Universo, como Milne y Bondi y, originalmente, Einstein), debería de haber una radiación electromagnética residual de aquella época, pero muy enfriada por la expansión del Universo. Dieciséis años más tarde, Penzias y Wilson hallaron accidentalmente esta radiación confirmando al Big Bang como modelo cosmológico estándar, aunque hay muchas pequeñas variantes sobre el mismo, como los modelos inflacionarios (Guth 1981, Linde 1982) en los que el Universo atraviesa una fase de expansión exponencialmente rápida.

El modelo cosmológico completo describe desde la formación de las partículas que constituyen los núcleos atómicos a partir de la “sopa primordial” de radiación, y la posterior formación de los propios núcleos y los átomos, hasta la formación de las galaxias, pero quizá para nosotros, los datos más interesantes sean los relacionados con el origen del Universo, con su forma (geometría) actual y con su futuro.

En cuanto al origen del Universo, poco (nada más bien) puede decirse con certeza, salvo que hubo una fase de extraordinaria densidad y temperatura en el pasado. Penrose y, después, Hawking, demostraron que la TGR predecía que en el instante inicial el Universo estaba concentrado en un punto singular sin pasado. En realidad esta predicción pone de relieve los límites de la TGR que probablemente deja de ser válida bastante antes de llegar a ese punto singular puesto que las energías puestas en juego requerirían una Teoría Cuántica de la Gravitación. De hecho, la inclusión de otros campos (inspirada, por ejemplo, en las Teorías de Cuerdas) aparte del gravitatorio invalida los teoremas de Penrose y Hawking y permite la existencia de soluciones que describen Universos que se contraen hasta alcanzar la fase de muy alta densidad y temperatura que sabemos que hubo (pero sin singularidad) y vuelve a expandirse (“modelos de pre-Big Bang”).

Teorías como las de Vilenkin, en las que el Universo se crea a sí mismo desde “la nada” plantean serios problemas filosóficos. Teorías de muchos Universos, como la inflación caótica de Linde, proponen que no sólo no ocupamos un lugar particular en el Universo sino que nuestro Universo es uno de tantos.

En cuanto al presente, sabemos que el Universo se expande y hay indicios de que esta expansión sería acelerada, de forma que en el futuro no habría contracción y colapso. Esto depende críticamente de la cantidad de energía que hay en el Universo, por lo que se ha trabajado mucho en medir la cantidad de materia (estrellas, Galaxias, materia intergaláctica...) que hay en el Universo. Los datos parecen indicar que aproximadamente sólo un 5 % de la materia del Universo está en forma visible, que hay un 25 % de *materia oscura* que no vemos y un sorprendente 70 % de *energía oscura* del tipo que iría asociado a una constante cosmológica o a un tipo de energía que no conocemos (llamada en algunos modelos *quintaesencia*) abriendo un amplio terreno para la investigación y la especulación y reencarnando, de otra guisa, al antiguo éter.

### 3.2. Los agujeros negros

Schwarzschild obtuvo en 1916 soluciones de las ecuaciones de Einstein que describirían el campo gravitatorio exterior e interior de una estrella. Así se inició el estudio de la estructura interna de las estrellas en las que la materia que las forma está unida por la gravitación y sostenida en general por la energía proveniente de las reacciones nucleares que tienen lugar en su seno.

En largo proceso que duró 50 años, con contribuciones notables de Chandrasekhar, Oppenheimer, Wheeler y otros, se llegó a la conclusión de que ciertas estrellas, al agotar su energía nuclear, no podrían mantenerse contra su propio “peso” y sufrirían un *colapso gravitacional*, reduciendo su tamaño de forma indefinida e imparable. El campo gravitacional exterior está siempre descrito por la métrica de Schwarzschild, la cual tiene una superficie singular<sup>9</sup> esférica cuyo radio es el radio de Schwarzschild. Las estrellas ordinarias tienen un radio superior al de Schwarzschild y por ello esta singularidad no cuenta para ellas, por lo que esta singularidad era normalmente ignorada.

Sin embargo, aquellas estrellas que sufren un colapso gravitacional llegan a tener un radio menor y la superficie singular de Schwarzschild pasa a estar en el exterior. La posibilidad de que esto pasase jamás había sido negada por muchos físicos. La singularidad no podía ser ignorada por más tiempo. Los trabajos de Finkelstein, Kruskal, Szekeres y otros demostraron que la “singularidad de Schwarzschild” era en realidad un horizonte de sucesos que podía ser atravesado desde el exterior pero del interior del cual nada ni nadie podía salir. El colapso gravitacional de una estrella da lugar, pues, a un agujero negro.

El misterio que rodea a lo que pasa dentro del agujero negro (que se puede describir con las ecuaciones de Einstein, pero jamás observar sin entrar en él) es otra fuente de especulación tanto como de seria investigación pues plantea importantes problemas teóricos, sobre todo al considerar el aspecto cuántico de nuestro Universo, que ya casi habíamos olvidado en nuestra discusión.

### 3.3. ¿Gravitación Cuántica?

La Naturaleza es relativista y es cuántica. ¿Es posible combinar la Relatividad General con la Mecánica Cuántica?

Ésta ha sido, para muchos, la pregunta más importante de la Física Teórica de las últimas décadas y plantea muchos problemas técnicos y conceptuales pues, intuitivamente, tal teoría incorporaría los aspectos de incertidumbre, de creación y destrucción de partículas a la propia geometría del espacio-tiempo.

Uno de las líneas en las que más se ha trabajado consiste en buscar una Teoría de Campos Relativistas (en el sentido de la Relatividad Especial) de la Grav-

---

<sup>9</sup>Aquí se entendía por singular aquel punto en el que la métrica no estaba bien definida.

itación, a imagen y semejanza de las teorías que describen las demás interacciones fundamentales. Como dijimos, la búsqueda de la teoría relativista clásica fue suspendida por la irrupción de la Relatividad General, pero hubo interesantes contribuciones en los años 40 como las de Fierz, Pauli y Birkhoff que estudiaban una teoría basada en un campo cuya partícula asociada (al cuantizar la teoría tendría espín 2 y es lo que hoy día llamaríamos *gravitón*). En los años 50 Gupta y Kraichnan se dieron cuenta de que, para ser consistente, los gravitones de esta teoría tenían que actuar sobre los gravitones como sobre el resto de la materia, lo que es equivalente al Principio de Equivalencia fuerte. Más aún: al tener en cuenta estas nuevas interacciones (un número infinito de ellas, en realidad), ¡ la teoría relativista especial se transforma en la Relatividad General!

Esta observación abre la puerta a la cuantización aproximada<sup>10</sup> de la Relatividad General como una teoría relativista especial más (Feynman y DeWitt, años 60). Sin embargo, como 't Hooft y Veltman demostraron en los años 70, esta teoría cuántica no es consistente.

Sin embargo, el trabajo en esta línea, basada en el gravitón como intermediario de la interacción gravitatoria cuántica, ha seguido en la forma de Teorías de Supergravedad y de Supercuerdas. Estas últimas son las más prometedoras, pues no son manifiestamente inconsistentes y contienen, además de gravitones, partículas de otros espines como las que actúan de intermediarias en las demás interacciones o forman la materia, lo que podría dar una descripción unificada de todas las interacciones, lo que a veces se llama una *Teoría de Todo*.

Una línea de investigación más modesta ha consistido en el estudio qué les pasa a los campos cuánticos cuando evolucionan en un espacio-tiempo curvo fijo (y no cuántico). Hawking demostró que en el espacio-tiempo de un agujero negro, los efectos cuánticos generan una radiación que parece provenir del mismo, a pesar de que hemos dicho que nada puede salir del agujero negro atravesando el horizonte de eventos hacia el exterior. Es, sin embargo, una radiación térmica, que parece no contener ninguna información sobre el interior, sobre la materia que formó el agujero negro o que ha sido absorbida por el mismo<sup>11</sup>.

El descubrimiento de la radiación de Hawking plantea numerosas preguntas: en un sistema cuántico ordinario, toda la información es, en principio, recuperable (*unitariedad*). ¿Son los agujeros negros sistemas cuánticos ordinarios o realmente la información se queda almacenada para siempre en el interior? Por otro lado, la radiación de Hawking significa una pérdida de masa continua que podría llevar a la desaparición completa del agujero negro. Si la información estaba en el interior, ¿qué es de ella cuando desaparece el agujero negro?

---

<sup>10</sup>Otra opción es intentar una cuantización *no perturbativa*. Este camino ha sido propuesto por Hawking (*Gravitación Euclídea*) y por Ashtekar (variables de Ashtekar y cuantización de lazos).

<sup>11</sup>Es posible asignar a un agujero negro la llamada *entropía de Bekenstein y Hawking*, que está relacionada con la información acumulada.

Ante este problema la opinión está dividida en tres bandos mayoritarios: el de los que piensan que la información se pierde para siempre, liderada por Hawking, el de los que piensan que la información está saliendo de hecho poco a poco en la radiación de Hawking (de forma que estamos ante un sistema cuántico ordinario) pero esto no se ve en los cálculos de Hawking porque son aproximados, liderado por 't Hooft y Susskind y otros teóricos de cuerdas, y un tercer bando muy minoritario que piensa que en realidad los agujeros negros no podrían evaporarse completamente sino que dejarían un remanente en el que toda la información quedaría almacenada para siempre.

En realidad, los cálculos de Hawking son aproximados pues nunca se tiene en cuenta que la emisión de radiación cuántica cambia el espacio-tiempo y cualquier intento serio de responder estas preguntas pasa por cuantizar también la gravitación, el propio espacio-tiempo, y no tan sólo los demás campos definidos en él. Los modelos de cuerdas han sido capaces de dar respuestas parciales satisfactorias que inclinan la balanza del lado de 't Hooft, pero la respuesta definitiva está aún esperando a ser encontrada.

## Referencias

- [Bon] H. Bondi, *Relativity and Common Sense, A New Approach to Einstein*, Dover, New York, (1980).
- [Gam] G. Gamow, *Biografía de la Física*, Alianza, Madrid (1980).
- [Gott] J.R. Gott, *Time Travel in Einstein's Universe: The Physical Possibilities of Travel Through Time*, Houghton Mifflin Co. (2001) .
- [Pai82] A. Pais, *Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press (1982).
- [Pai86] A. Pais, *Inward Bound. Of Matter and Forces in the Physical World*, Oxford University Press (1986).
- [Poi] H. Poincaré, *Ciencias e hipótesis*, Espasa-Calpe, Madrid (2002).
- [Rus] B. Russell, *ABC of Relativity*, 5<sup>a</sup> ed. revisada, Routledge 2001.
- [Sán] J.M. Sánchez Ron, *El origen y desarrollo de la relatividad*, Alianza, Madrid 1983.
- [Tho] K.S. Thorne, *Agujeros negros y tiempo curvo*, Crítica, Madrid 2001.

[Wein] S. Weinberg, *Los Tres Primeros Minutos del Universo*, Alianza Editorial,  
Madrid (1999)