

GRAVEDAD CUÁNTICA:

RELATIVIDAD GENERAL, TEORÍA CUÁNTICA Y EL DESAFÍO DE SU UNIFICACIÓN

DANIEL GÓMEZ VERGEL

Escuela de Arquitectura, Ingeniería y Diseño
UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

El objetivo de este artículo es el de presentar al lector, de forma simple y didáctica, los principios fundamentales en los que se asientan las dos mayores revoluciones conceptuales de la Física del siglo XX: la Relatividad General y la Teoría Cuántica. La Relatividad General constituye la teoría gravitatoria de Albert Einstein y explica la estructura a gran escala de nuestro universo. La Teoría Cuántica, por su parte, da cuenta de los fenómenos observados a escala atómica y nuclear. Describiremos los esfuerzos realizados por conciliar ambas teorías en un único marco conceptual, un objetivo que permanece esquivo aún en nuestros días, pero en el que los físicos trabajan incansablemente con el fin de desentrañar los secretos de los agujeros negros y del Big Bang.

PALABRAS CLAVES •

gravedad, relatividad general, teoría cuántica

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO •

Gómez Vergel, Daniel. 2021. "Gravedad Cuántica" en: UEM STEAM Essentials

INTRODUCCIÓN: SOBRE LOS OBSERVADORES INERCIALES Y NO INERCIALES

En su descripción del universo, la Física newtoniana realiza una distinción fundamental entre observadores inerciales y no inerciales. Pensemos en un observador como un investigador de la naturaleza pertrechado con un juego de reglas y relojes capaz de medir distancias y cronometrar intervalos de tiempo. Los observadores inerciales son aquellos que no están sometidos a interacción alguna con el resto del mundo y a cuyos ojos se cumple la ley de la inercia, según la cual una partícula libre --sobre la que no actúan fuerzas o sobre la que la fuerza neta es nula-- permanecerá en reposo o en movimiento rectilíneo y de velocidad constante. Un nuevo sistema de referencia que se moviera solidariamente con dicha partícula libre sería, a su vez, inercial.

En la formulación original de la Mecánica newtoniana se consideraba que los sistemas inerciales eran aquellos que carecían de aceleración respecto a las *estrellas fijas*. Se trata de una familia de observadores privilegiada, para los cuales las leyes del movimiento adoptan su forma más simple, la misma para todos ellos. Cuentan, asimismo, con un juego de ecuaciones sencillas que les permiten traducir las medidas de espacio y tiempo realizadas por cada uno de ellos. Tales reglas de traducción llevan el nombre de transformaciones de Galileo y forman parte de nuestra experiencia cotidiana. En efecto, imaginemos un vehículo que, respecto a la carretera, realice un movimiento rectilíneo de velocidad \mathbf{V} . De acuerdo con tales transformaciones, si persiguiésemos al vehículo con una velocidad \mathbf{v} , su velocidad relativa respecto a nosotros se vería reducida a $\mathbf{V} - \mathbf{v}$.

Los observadores no inerciales, por su parte, son aquellos que poseen aceleración respecto a los inerciales. La descripción del universo desde su punto de vista es más compleja, pues de desear aplicar las leyes de Newton se verán obligados a introducir fuerzas ficticias que no provienen de la interacción con ningún objeto, sino que son consecuencia directa de su estado de movimiento acelerado. Así ocurre, en efecto, en los sistemas de referencia en rotación como la Tierra, respecto a los cuales surgen fuerzas centrífugas y de Coriolis (Alonso & Finn, 1995).

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

Las sencillas reglas galileanas de adición y sustracción de velocidades entraron en crisis a finales del siglo XIX y principios del siglo XX cuando quedó de manifiesto que, si sustituyésemos al vehículo de nuestro ejemplo anterior por un rayo de luz, dichas transformaciones dejarían de verificarse. En efecto, denotemos como c a la velocidad del rayo de luz respecto al asfalto --de valor 3×10^8 metros por segundo en el vacío. Bien podríamos pensar que, de perseguir al rayo con una velocidad v , éste avanzaría respecto a nosotros con una celeridad menor $c - v$. Qué sorpresa nos aguarda al descubrir que la velocidad de la luz relativa a nosotros seguiría siendo, sin embargo, c , independientemente de lo rápido que persigamos al rayo de luz.

Este hecho, sin duda contraintuitivo en nuestra experiencia cotidiana, queda recogido en un sistema de elegantes ecuaciones en derivadas parciales que describen la totalidad de los fenómenos electromagnéticos clásicos. Nos referimos aquí a las denominadas ecuaciones de Maxwell, que controlan la evolución espacial y temporal de los campos eléctricos y magnéticos en presencia de cargas y corrientes. Los físicos se percataron pronto de que tales ecuaciones no permanecían invariantes al aplicar las transformaciones de Galileo, sino que cambiaban de forma. Ello parecía sugerir que dicho sistema de ecuaciones resultaba válido únicamente en un marco inercial privilegiado, al que llamaron éter luminífero. Dicho éter proporcionaría, además, un medio material de propagación para las ondas electromagnéticas --incluyendo la luz visible, señales de radio, etcétera-- que muchos físicos de la época consideraban necesario para su transmisión. En particular, la velocidad de la luz c medida respecto al éter sería diferente de su celeridad medida por cualquier otro observador inercial en movimiento relativo. Experimentos como el de Michelson y Morley mediante interferómetros o el de Trouton y Noble con condensadores vinieron sin embargo a demostrar que la velocidad de la luz resultaba realmente independiente del estado de movimiento del observador, sugiriendo la inexistencia del mencionado éter (French, 1968). Fue Albert Einstein quien, en 1905, proporcionó la explicación más sencilla y a la vez radical de los fenómenos

observados con su Teoría de la Relatividad Especial: las ecuaciones de Maxwell son realmente válidas en todos los sistemas inerciales y la luz --perfectamente capaz de desplazarse en el vacío sin soporte de medio material alguno-- se mueve con igual celeridad c respecto a todos ellos. El aparente cambio de forma de las ecuaciones de Maxwell al pasar de un sistema inercial a otro se debía lisa y llanamente a que las transformaciones galileanas dejan de ser válidas al tratar con velocidades comparables a la de la luz. En su lugar, debe emplearse otro conjunto de reglas de traducción, las denominadas transformaciones de Lorentz, que mantienen invariantes las ecuaciones de Maxwell y, con ellas, la velocidad de la luz.

Las consecuencias que se derivan de todo ello son profundas y trastocan la visión newtoniana del espacio y el tiempo. Consideremos dos gemelas despidiéndose en un campo de lanzamiento de naves espaciales. Una de ellas, Alexis, permanecerá en tierra a la espera de que su hermana astronauta Sara suba a la nave, despegue, ascienda a velocidad constante v hasta una altura de Δx metros, dé la vuelta y regrese con igual velocidad al punto de lanzamiento original. Supongamos que Alexis y Sara, cada una pertrechada con un reloj muy preciso, empiezan a cronometrar el viaje al iniciarse el despegue. ¿Cabe esperar que ambas hermanas cronometren el mismo tiempo de viaje y que, en su esperado reencuentro, sus relojes coincidan exactamente? La Relatividad Especial nos permite calcular el tiempo total de viaje según lo miden cada una de las hermanas. Si Alexis, en tierra, midiese un tiempo total de viaje de Δt segundos, su hermana Sara mediría un intervalo de $\sqrt{1 - v^2/c^2} \Delta t$ segundos. Si la velocidad de la nave v fuese muy pequeña en comparación con la velocidad de la luz, el coeficiente multiplicativo $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ sería muy próximo a uno y ambos tiempos serían (casi) idénticos, resultado que concuerda con nuestra tradicional visión newtoniana del mundo y su empleo de un tiempo absoluto. Sin embargo, si v no fuese despreciable frente a c , el tiempo de viaje medido por la astronauta Sara sería apreciablemente menor que el medido por su hermana. Así, por ejemplo, de alcanzarse un 90% de la velocidad de la luz, un viaje de un año medido por Alexis duraría poco más de cinco meses para la astronauta Sara.

Este efecto de dilatación temporal --comprobado experimentalmente con gran precisión mediante relojes atómicos-- da fe de la dependencia de las mediciones espacio-temporales respecto del estado de movimiento de los observadores.

RELATIVIDAD GENERAL Y COSMOLOGÍA

Una vez establecido un marco de referencia adecuado, un evento cualquiera en el universo --desde el despegue de un cohete hasta la explosión de una supernova-- queda caracterizado por cuatro coordenadas: tres espaciales (\mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{z}) --dónde ocurrió el suceso-- y una temporal \mathbf{t} --cuándo aconteció. Si multiplicamos la variable temporal \mathbf{t} por la velocidad de la luz \mathbf{c} , obtendremos una nueva coordenada con unidad de distancia. Las cuatro coordenadas (\mathbf{ct} , \mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{z}), todas ellas medibles en metros, constituyen así la posición del evento en un escenario de cuatro dimensiones que, en el contexto de la Relatividad Especial, denominamos espacio-tiempo de Minkowski. La historia completa de cualquier partícula queda registrada, de principio a fin, en dicho espacio. En efecto, pensemos por ejemplo en la Luna describiendo su trayectoria casi perfectamente circular en torno a la Tierra. Podemos visualizarla como una pequeña esfera girando periódicamente alrededor de nuestro planeta, situado en el centro. Al quedar la trayectoria confinada en un plano, bastan dos coordenadas espaciales ($\mathbf{x}(\mathbf{t})$, $\mathbf{y}(\mathbf{t})$) para describir la posición de la Luna en un instante de tiempo \mathbf{t} dado. Si añadimos ahora un eje \mathbf{ct} perpendicular al plano, de forma que elevemos progresivamente la Luna conforme avanza el tiempo, visualizaremos, no ya una circunferencia plana, sino una hélice. La evolución de una partícula cualquiera encuentra pues su representación como *línea de universo* en el espacio-tiempo de Minkowski, aunque no nos sea posible visualizarla mentalmente en el caso más general de cuatro dimensiones.

Einstein era consciente de que conciliar su Relatividad Especial con la presencia de gravedad no resultaría un problema sencillo. La ley clásica de gravitación universal de Newton, que describe la fuerza de atracción gravitatoria entre dos masas cualesquiera, asume implícitamente una acción a distancia: las masas sentirían su influjo gravitatorio instantáneamente, independientemente de la distancia que las separe. Ello entra en contradicción, sin embargo, con la velocidad finita máxima \mathbf{c} permitida por la Relatividad Especial para la transmisión de cualquier tipo de información.

El punto de partida de Einstein para su teoría gravitatoria se halla en el conocido principio de equivalencia. Consideremos una investigadora en un avión que, de forma controlada, efectúa una caída libre, de tal forma que tanto ella como los objetos libres cercanos simulen flotar ingravidos. Para tal observadora, el campo gravitatorio terrestre parecerá anularse temporalmente en el interior del aparato y, respecto a ella, regirán los principios de la Relatividad Especial --en efecto, un acelerómetro le indicará una aceleración momentáneamente nula. Tal marco minkowskiano se verá restringido, sin embargo, a una región del espacio

reducida durante un intervalo de tiempo limitado, pues en caso contrario las fuerzas de marea debidas a la geometría radial del campo gravitatorio terrestre terminarían por hacerse sentir en el sistema. Experimentos mentales similares a éste condujeron a Einstein a interpretar la gravedad, no ya como una fuerza vectorial entre masas, sino como una manifestación de la curvatura del propio espacio-tiempo. Del mismo modo que una esfera embebida en el espacio euclídeo tridimensional puede considerarse plana en una vecindad reducida de cualquiera de sus puntos, así el espacio-tiempo 4-dimensional, deformado en presencia de masa y energía, será localmente minkowskiano en torno a cualquier punto de éste. La principal enseñanza de la teoría einsteniana es, pues, que el espacio y el tiempo no constituyen un escenario estático en el que acontecen los sucesos físicos: antes bien, son entes dinámicos afectados por ellos (Wald, 1984; Carroll, 2014).

La teoría resultante, conocida bajo el nombre de Relatividad General, constituye uno de los pilares de la Física del siglo XX y es considerada uno de los mayores hitos del pensamiento. De forma notable, la teoría explica la precesión observada del perihelio de Mercurio --es decir, el lento y progresivo giro del punto más cercano al Sol de su órbita--, de apenas 43 segundos de arco por siglo y carente de justificación convincente en el marco newtoniano. Asimismo, la teoría predice la curvatura de los rayos de luz en presencia de campos gravitatorios intensos, fenómeno responsable de las bellas imágenes de lentes gravitatorias captadas por el telescopio espacial Hubble (véase la Figura 1). Entre las consecuencias más notables de la Relatividad General, confirmadas experimentalmente con enorme precisión, cabe también mencionar la emisión de ondas gravitatorias en fenómenos astrofísicos violentos --detec-

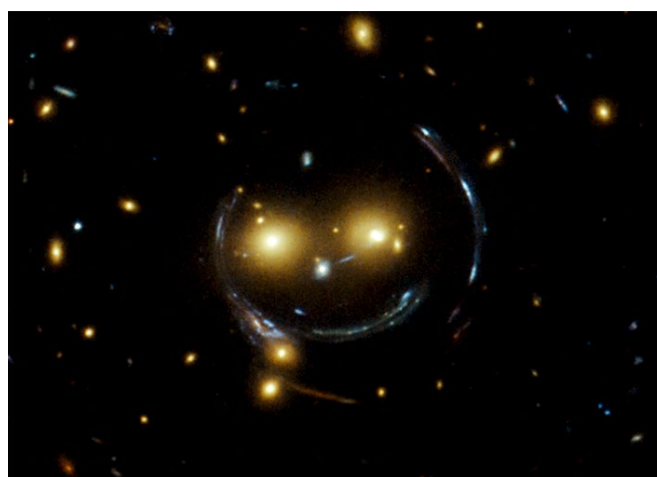


Figura 1 » Cúmulo de galaxias SDSS J1038+4849 según fue captado por el telescopio espacial NASA/ESA Hubble. Las deformaciones con forma de arco son consecuencia de un efecto de lente gravitatoria. **Credit:** NASA & ESA. **Acknowledgement:** Judy Schmidt (<https://geckzilla.com>). **Enlace a imagen original en ESA/Hubble Image:** <https://esahubble.org/images/potw1506a/> **Distribuida bajo licencia CC BY 4.0.** <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

tadas directamente por los observatorios LIGO y VIRGO e indirectamente a través de los decaimientos orbitales de púlsares como PSR B1913+16 (Weisberg & Taylor, 2005) y PSR J0737-3039 (Kramer et al., 2006)-- o la existencia de agujeros negros como el fotografiado recientemente por el proyecto Event Horizon (Goddi, 2019).

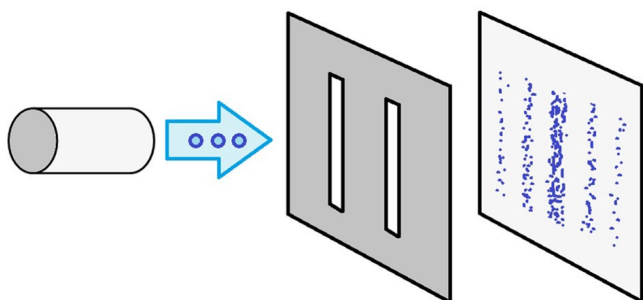
Aplicada a la estructura a gran escala del universo, la Relatividad General constituye la base de la Cosmología moderna y su teoría del Big Bang, proporcionando el marco teórico adecuado para la descripción de la expansión acelerada del universo a través del denominado modelo lambda-CDM.

TEORÍA CUÁNTICA Y MODELO ESTÁNDAR DE LA FÍSICA DE PARTÍCULAS

La naturaleza puramente ondulatoria de la luz quedó en entredicho cuando resultados experimentales relativos al espectro de emisión del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico o la dispersión Compton pusieron de manifiesto que la energía de una onda electromagnética se concentra en pequeños paquetes o *cuantos* capaces de ser emitidos u absorbidos localmente por la materia. Dichos cuantos, llamados fotones, son tanto más energéticos cuanto mayor es la frecuencia f de la radiación, según la relación $E = hf$, siendo h la constante de Planck.

Esta dualidad corpuscular y ondulatoria no afecta sólo a la luz, sino que resulta también extensible a la materia. Siguiendo el esquema del famoso experimento de la doble rendija de Young, consideremos una fuente que emita electrones --el mismo razonamiento podría ser llevado a cabo con fotones--, lanzados uno a uno contra una lámina con dos rendijas paralelas. Más allá de la lámina situaremos una placa capaz de registrar el impacto de los electrones que atraviesen dichas rendijas. Tras la emisión de los primeros electrones por parte de la fuente, registraríamos impactos

Figura 2 » Esquema del experimento de Young realizado con electrones emitidos uno a uno, en el que los impactos se acumulan en franjas de interferencia de naturaleza ondulatoria.



claramente localizados en la placa. Esto es algo que cabe esperar al trabajar con partículas. Sin embargo, algo sorprendente ocurriría al ir acumulando un número cada vez mayor de impactos: sobre la placa emergería un patrón de franjas de interferencia de naturaleza claramente ondulatoria (Tonomura, 1998; véase la Figura 2). Ello es evidencia de que los electrones poseen también características ondulatorias (Sánchez del Río, 1997).

La Mecánica Cuántica nació del intento de comprender éste y otros fenómenos del mundo microscópico inexplicables por la Física Clásica. La teoría --base de nuestro conocimiento de núcleos, átomos y moléculas-- posee un carácter esencialmente probabilístico en lo que a los procesos de medida se refiere. La función de onda de una partícula, por ejemplo, informa de la probabilidad de detectarla en una determinada región del espacio en un tiempo dado. Cualquier intento por medir con total precisión tanto la posición como la velocidad de la partícula --y, por tanto, de determinar su trayectoria en términos clásicos-- está condenado al fracaso de acuerdo con el principio de indeterminación de Heisenberg: cuanto mayor certeza tengamos sobre la posición de la partícula, mayor incertidumbre afectará a su celeridad, y viceversa (Isham, 1995).

La Teoría Cuántica de Campos es la base sobre la que se asienta el Modelo Estándar de la Física de partículas (Weinberg, 2005), que describe en sorprendente acuerdo con los resultados experimentales el modo en que operan tres de las cuatro interacciones fundamentales conocidas de la naturaleza: la interacción electromagnética entre cargas eléctricas, la interacción nuclear débil responsable del decaimiento radiactivo de los átomos y, por último, la interacción nuclear fuerte que mantiene a los nucleones (neutrones y protones) confinados en el interior de los núcleos atómicos.

La interacción entre partículas se interpreta aquí como el intercambio (emisión y absorción) de bosones de espín unidad portadores de fuerza.¹ A modo de ejemplo, consideremos dos partículas con carga eléctrica. Según el Modelo Estándar, su interacción electromagnética se producirá como consecuencia del intercambio de fotones entre las cargas, en contraste con la descripción que el Electromagnetismo clásico realizaría en términos de meros vectores de fuerza.

Dentro del Modelo Estándar, distinguimos:

» La **Teoría Electrodébil**, que unifica las fuerzas electromagnéticas y nuclear débil como expresiones de una misma interacción. Desde el punto de vista matemático,

¹ » El espín es el momento angular intrínseco de una partícula. En base a su valor, distinguimos dos tipos de partículas elementales: bosones (con espín entero) y fermiones (de espín semi-entero), estas últimas verificando el principio de exclusión de Pauli.

adopta la forma de una teoría de Yang-Mills con grupo de simetría $SU(2) \times U(1)$. El fotón, sin masa, media la fuerza electromagnética, mientras que los bosones masivos Z^0 , W^+ y W^- median la interacción débil.

» La **Cromodinámica Cuántica**, una teoría de Yang-Mills con simetría $SU(3)$, que explica la fuerza nuclear fuerte entre quarks y ocho tipos de gluones sin masa.

El modelo reconoce dos clases de partículas fermiónicas elementales de espín $1/2$ (junto a sus correspondientes antipartículas). Por un lado, tenemos los leptones, que pueden experimentar la fuerza electrodébil, pero no la fuerte. Por otro lado, tenemos los quarks, que pueden experimentar tanto la fuerza electrodébil como la interacción fuerte y que se asocian entre ellos para formar hadrones, incluyendo neutrones y protones. Se conocen tres generaciones de quarks y leptones:

	PRIMERA GENERACIÓN	SEGUNDA GENERACIÓN	TERCERA GENERACIÓN
QUARKS	u, d	c, s	t, b
LEPTONES	Electrón, neutrino electrónico	Muón, neutrino muónico	Tauón, neutrino tauónico

La materia ordinaria está formada por quarks **u** y **d** y electrones pertenecientes a la primera generación, la más ligera y estable (CERN, 2021). Así, el protón se compone de dos quarks **u** y uno **d**, mientras que el neutrón contiene dos quarks **d** y uno **u**. Las partículas cargadas de la segunda y tercera generación son producidas en entornos de alta energía y decaen rápidamente en otras más ligeras. Los leptones neutros (neutrinos) poseen una masa próxima a cero y resultan, lógicamente, muy difíciles de detectar.

EL DESAFÍO DE UNA TEORÍA CUÁNTICA DE LA GRAVEDAD

A pesar del extraordinario éxito y capacidad predictiva del Modelo Estándar de partículas, éste no está exento de dificultades que los físicos han tratado de abordar desde su formulación. En efecto, sería deseable poder explicar el origen de los grupos correspondientes a las interacciones electrodébil $SU(2) \times U(1)$ y fuerte $SU(3)$, o el porqué de la existencia de las tres generaciones de quarks y leptones recogidas en la tabla anterior (Olive et al., 2014). El modelo presenta, asimismo, diecinueve parámetros libres (incluyendo las masas de las partículas elementales o las intensidades relativas de las interacciones) que la teoría es

incapaz de predecir y cuyos valores deben ser establecidos experimentalmente. Como es natural, los físicos desearían poder justificar dichos parámetros en un nuevo marco teórico de mayor capacidad descriptiva.

De forma más señalada aún, sin duda no habrá escapado a la atención del lector el hecho de que nuestra discusión anterior omitiese por completo la interacción gravitatoria. Por supuesto, las partículas elementales interactúan entre sí también gravitatoriamente, pero este efecto puede ser sencillamente despreciado a escala microscópica al ser su intensidad insignificante frente a la de las demás fuerzas. En efecto, la manifestación de la gravedad a escala macroscópica se debe a su naturaleza siempre atractiva y acumulativa: el campo gravitatorio generado por cuerpos como nuestro planeta o el Sol es consecuencia de la contribución de las masas de cada uno de los átomos en ellos presentes. Hay regímenes, sin embargo, en los que se espera que tanto

la gravedad como la Mecánica Cuántica jueguen un papel importante. Así, una correcta unificación de ambas teorías nos permitiría comprender la verdadera naturaleza de las singularidades en la Relatividad General --regiones en las que la curvatura del espacio-tiempo se torna infinita--, algo esencial si deseamos profundizar nuestros conocimientos acerca de la física de los agujeros negros y el Big Bang.

En analogía con la descripción de las fuerzas electromagnética, nuclear débil y fuerte como resultado del intercambio de fotones, partículas Z/W y gluones, respectivamente, así también los físicos de altas energías esperan poder explicar la atracción gravitatoria entre dos masas como manifestación del intercambio de bosones mensajeros denominados gravitones. Éstos carecerían de masa de propagarse a la velocidad de la luz y poseerían, de acuerdo con la Relatividad General, espín 2 . Cualquier intento de detección directa de los gravitones se antoja, eso sí, prácticamente imposible, dada la forma extraordinariamente débil en que interactuarían con la materia. Por desgracia, los intentos de cuantización del campo gravitatorio mediante las técnicas perturbativas usuales de la Teoría Cuántica de Campos conducen ineludiblemente a resultados infinitos, dando al traste con la capacidad predictiva de la teoría. Se dice, en este contexto, que la gravedad no es *renormalizable*.

Aun cuando carezcamos en la actualidad de una teoría cuántica de la gravedad firmemente establecida, existen importantes líneas de investigación en curso –algunas con varias décadas de desarrollo– que tratan de conciliar los principios de la Teoría Cuántica y la Relatividad General. Estas líneas suelen diferir en sus planteamientos de base y/o en el alcance de sus descripciones, pero todas ellas arrojan una luz valiosa sobre la ansiada unificación. Cabría destacar:

- » **Teoría de cuerdas (String Theory):** En este marco teórico, los constituyentes básicos del universo toman la forma de cuerdas unidimensionales cuyos modos de vibración explicarían las propiedades –masa, carga, etcétera– de las partículas puntuales antes descritas, incluyendo al gravitón. Se trata de una ambiciosa línea de investigación que trata de describir las cuatro interacciones fundamentales conocidas, incluida la gravitación, en un único marco unificado (Polchinski, 1998). Las cuerdas poseerían una extensión típica del orden de la longitud de Planck, es decir, 10^{-35} metros –compárese este valor con el diámetro medio de un átomo, del orden de 10^{-10} metros. Con el fin de mantener su consistencia interna, la teoría requiere que el espacio-tiempo posea once dimensiones, seis de las cuales se encontrarían fuertemente compactificadas, dando la apariencia de poseer sólo las cuatro dimensiones a las que estamos acostumbrados (tres espaciales y una temporal).
- » **Gravedad cuántica de lazos (Loop Quantum Gravity, LQG):** Esta teoría posee un programa en cierto modo menos ambicioso que el anterior, en cuanto que no persi-

que la descripción de las cuatro interacciones conocidas en un mismo marco teórico. Su objetivo, no por ello menos relevante, es el de lograr una cuantización matemáticamente rigurosa y no-perturbativa de la Relatividad General, respetando uno de los aspectos clave de la teoría einsteniana, a saber, su invariancia bajo difeomorfismos –las leyes de la naturaleza deben ser expresadas mediante ecuaciones que adopten la misma forma independientemente del sistema de coordenadas empleado (Rovelli, 1998; Ashtekar & Pullin, 2017). LQG sugiere que el espacio pierde su carácter continuo a escala de Planck, de forma que longitudes, áreas y volúmenes se encuentran realmente discretizadas/cuantizadas.

- » **Triangulación dinámica causal (Causal Dynamical Triangulation, CDT):** Se trata de una formulación no-perturbativa de la gravedad en la que el espacio-tiempo curvo se construye a través de símlices (generalizaciones de los triángulos, pero de mayor dimensión), cada uno de los cuales puede considerarse plano (minkowskiano). Los investigadores se sirven aquí de simulaciones de Monte Carlo para analizar las implicaciones del modelo, entre las que cabe resaltar la reducción de la dimensionalidad del espacio-tiempo desde su valor clásico **4** en escala macroscópica a exacta o aproximadamente **2** en la escala de Planck. Asimismo, existen evidencias sólidas de la existencia de un límite clásico acorde con la Relatividad General, uno de los objetivos fundamentales de toda teoría cuántica de la gravedad (Loll, 2019).

CONCLUSIONES: FALSABILIDAD Y RETOS DE FUTURO

Ante la ausencia de resultados experimentales claros que nos permitan discernir la validez de unas propuestas frente a otras, y dada la imposibilidad de acceder a la escala de Planck con la tecnología actual, los físicos deben tener en cuenta otros factores en su búsqueda de una teoría cuántica de la gravedad. Entre ellos, juega sin duda un papel clave la consistencia interna de las teorías: éstas no deben conducir a absurdos lógicos o a predicciones en flagrante contradicción con la experiencia.

Asimismo, los físicos pueden comprobar si sus modelos concuerdan con resultados bien establecidos, como la ley de Bekenstein-Hawking que establece una relación entre el área del horizonte de sucesos de un agujero negro y su entropía. Tanto la Teoría de Cuerdas como LQG han sido capaces de reproducir con éxito dicha ley para distintos tipos de agu-

jeros negros mediante un conteo preciso de microestados (Strominger & Vafa, 1996; Ashtekar & Pullin, 2017).

Las teorías deben ser, asimismo, matemáticamente rigurosas. No en vano, esta área de estudio ha demostrado ser especialmente fértil en el campo de la Física Matemática, fortaleciendo los lazos entre la Física Teórica y la Matemática.

Lejos de ser mutuamente excluyentes, líneas de investigación como las mencionadas pueden resultar complementarias, facilitando las claves que conduzcan a una teoría elegante y consistente de la Gravedad Cuántica que concilie, al fin, los dos pilares de la Física moderna. Ello nos proporcionará un marco de estudio unificado con el que poder tratar de entender, entre otros aspectos fundamentales, la naturaleza última de los agujeros negros y el origen y destino de nuestro universo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- » Alonso, M. & Finn, E.J. (1995) *Física*. Addison-Wesley Iberoamericana
- » Ashtekar, A. & Pullin, J. -Editores- (2017) *Loop Quantum Gravity: The First 30 Years*. 100 Years of General Relativity - Volume 4. World Scientific
- » Carroll, S. (2014) *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. Pearson
- » CERN (2021). *The Standard Model*. <https://home.cern/science/physics/standard-model> (fuente consultada el 19 de diciembre de 2020)
- » French, A.P. (1968) *Special Relativity*. M.I.T. Introductory Physics
- » Goddi, C. et al. (2019) *First M87 Event Horizon Telescope Results and the Role of ALMA*. The Messenger 177, 25-35. [arXiv:1910.10193](https://arxiv.org/abs/1910.10193) [astro-ph.HE]
- » Greene, B. (1999) *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. W.W. Norton & Co
- » Isham, C.J. (1995) *Lectures on Quantum Theory: Mathematical and Structural Foundations*. Imperial College Press
- » Kramer, M. et al. (2006) *Strong-field tests of gravity with the double pulsar*. Annalen der Physik. 15 (1-2), 34-42. [doi:10.1002/andp.200510165](https://doi.org/10.1002/andp.200510165)
- » Loll, R. (2019) *Quantum Gravity from Causal Dynamical Triangulations: A Review*. Class. Quantum Grav. 37 013002. [arXiv:1905.08669](https://arxiv.org/abs/1905.08669) [hep-th]
- » Olive, K.A. et al. (Particle Data Group) (2014) *Review of Particle Physics*. Chin. Phys. C 38(9): 090001
- » Polchinski, J. (1998) *String Theory (Volume I: An Introduction to the Bosonic String, Volume II: Superstring Theory and Beyond)*. Cambridge University Press
- » Rovelli, C. (1998) *Loop Quantum Gravity*. Living Reviews in Relativity, volume 11:1. [arXiv:gr-qc/9710008](https://arxiv.org/abs/gr-qc/9710008)
- » Sahlmann, H. (2009) *Loop quantum gravity - A Short Review*. [arXiv:1001.4188](https://arxiv.org/abs/1001.4188) [gr-qc]
- » Sánchez del Río, C. (1997) *Física Cuántica*. Ediciones Pirámide
- » Strominger, A. & Vafa, C. (1996) *Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy*. Physics Letters B 379 (1-4), 99-104. [arXiv:hep-th/9601029](https://arxiv.org/abs/hep-th/9601029)
- » Tonomura, A. (1998) *The Quantum World Unveiled by Electron Waves*. World Scientific
- » Wald, R.M. (1984) *General Relativity*. University of Chicago Press
- » Weinberg, S. (2005) *The Quantum Theory of Fields (Volume I: Foundations, Volume II: Modern Applications, Volume III: Supersymmetry)*. Cambridge University Press
- » Weisberg, J.M & Taylor, J.H. (2005) *Relativistic Binary Pulsar B1913+16: Thirty Years of Observations and Analysis*. Binary Radio Pulsars, ASP Conference Series 328, p 25. [arXiv:astro-ph/0407149](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0407149)

BIOGRAFÍA

Daniel Gómez Vergel es Licenciado en Física por la Universidad de Sevilla y Doctor en Física Teórica por la Universidad Complutense de Madrid. Su interés por la Ciencia le ha permitido ocupar puestos de investigación en áreas de muy diversa naturaleza (Física Atómica, Gravedad Cuántica, Big Data) en centros de reconocido prestigio, colaborando con equipos experimentales y teóricos tanto en España como en el extranjero. En la actualidad, forma parte del equipo docente del Departamento de Ciencia, Computación & Tecnología de la Universidad Europea (Madrid) e imparte cursos de Física, Matemáticas y Programación enfocados a diversos Grados académicos. Es, asimismo, miembro del grupo de investigación Data Science Lab centrado en el diseño y análisis de sistemas de recomendación y de detección de emociones.

