
El problema de la cuantización de la interacción gravitatoria.

TEORÍA GENERAL DE LA RELATIVIDAD

Iyán Méndez Veiga y Víctor Rodríguez Bouza
Facultad de Ciencias, Universidad de Oviedo
1 de diciembre de 2015

Índice

1. Introducción. ¿Por qué es necesaria la cuantización de la gravedad?	1
1.1. Aproximación histórica.	1
1.2. La necesidad de la gravedad cuántica.	3
2. Gravedad cuántica covariante.	5
3. Aproximaciones canónicas.	6
3.1. <i>Quantum Geometrodynamics</i>	6
3.2. Gravedad cuántica de bucles (<i>Loop Quantum Gravity</i>).	6
4. Teoría de cuerdas.	6
5. Teorías de campo efectistas.	6
6. Otras aproximaciones.	6
7. Conclusiones y perspectivas de futuro.	6
8. Bibliografía	6

Resumen

La fuerza gravitatoria es una de las cuatro interacciones que gobiernan el universo. Durante todo el siglo XX, los modelos de la misma han recibido un empujón gracias a la teoría de la relatividad general de Albert Einstein, pero diversos problemas han aflorado a finales de la centuria. En tal situación, la cuantización de la gravedad se hace necesaria. En este trabajo explicamos los motivos por los que los investigadores de finales de siglo se ven obligados a tal esfuerzo. A continuación, explicamos la esencia de las principales alternativas que están en estudio para resolver el problema: *Loop Quantum Gravity*, teoría de cuerdas, o aproximaciones covariantes entre otras. Finalmente exponemos las últimas novedades en el campo, unas conclusiones de más de medio siglo cuantizando la gravedad y las perspectivas futuras.

1. Introducción. ¿Por qué es necesaria la cuantización de la gravedad?

1.1. Aproximación histórica.

Para los antiguos astrónomos, el cielo estrellado escondía misterios que les apasionaban. ¿Por qué el Sol, que tanto calor nos da, y permite a nuestros cultivos florecer, aparece al amanecer y se esfuma al atardecer? ¿Qué son las estrellas? ¿Luces «pegadas» sobre una esfera perfecta, como diría Aristóteles? ¿O algo más? ¿Hay gente acaso viviendo en las estrellas? ¿Podemos ir a la Luna? Obviamente, la bóveda celeste era una fuente casi inagotable de inspiración: origen de multitud de leyendas y narraciones mitológicas.

Uno de los procesos que ya intrigaba en la antigüedad eran los movimientos de cuerpos como Marte u otros, que eran *erráticos* (¡el que menos!). Como es bien sabido, la evolución de la investigación en estos campos derivó en distintas concepciones de distribución de los astros en el cosmos. Aristóteles, Ptolomeo y otros ofrecieron sus propuestas respecto al por qué de estos movimientos. Sería más adelante, durante la Revolución Científica del Renacimiento cuando el modelo heliocéntrico de Aristarco rescatado por Copérnico se asentara firmemente, sobre todo en el siglo XVII. **Kepler** fue el primero que dio un análisis físico (en el sentido que hoy lo consideraríamos) sobre el movimiento de los cuerpos del Sistema Solar. Sin embargo, la humanidad tuvo que esperar algunos años más para que llegara la primera concepción científica (en el sentido actual) sobre la fuerza que origina tales desplazamientos: **la gravedad**.

Sir Isaac Newton ofreció en el siglo XVII un modelo matemático de lo que bautizó como fuerza gravitatoria, basado en su cálculo de fluxiones (cálculo diferencial) y la idea mejorada del movimiento galileano. Ésta interpretación es considerada como la proposición de Newton para los modelos sobre gravedad en la «concepción clásica de la física». Es esencialmente lo que hoy en día se entiende por **gravedad newtoniana**.

Éste modelo de fuerza gravitatoria permitió entender esta interacción tanto en cuerpos diminutos, como en planetas y estrellas muy masivas. Habilitó la posibilidad de avance del estudio de la mecánica celeste, interpretando las leyes de Kepler como particularizaciones de su modelo y cosechando numerosos éxitos experimentales. Un ejemplo es el descubrimiento de Neptuno, que se hizo tras haberse hallado perturbaciones en el período de la órbita de Urano. Entonces, Urbain Le Verrier predijo la existencia de un nuevo planeta, empleando la teoría de Newton. Tal cuerpo afectaría a la órbita de Urano y permitiría explicar tales órbitas. Su colega Gottfried Galle descubriría más tarde a Neptuno tal y como Le Verrier había dicho.

Pero no sería la única órbita que se escapara a las predicciones iniciales de la gravedad newtoniana. El propio Le Verrier descubrió que, pese incluso contando con la acción del resto de planetas (además del Sol) sobre el planeta Mercurio, había extraños resultados experimentales en su órbita que no cuajaban con las predicciones newtonianas, concretamente, su precesión en el perihelio. En un alarde de innovación, Le Verrier, basándose en que la teoría de Newton era correcta, propuso en 1859 la hipótesis de un nuevo planeta entre Mercurio y el Sol: Vulcano. Sin embargo, éste nunca se descubrió.

Albert Einstein trabajaba en una oficina de patentes en Berna (Suiza) cuando postuló su teoría de la relatividad especial. Debido a su trabajo monótono y repetitivo, podía abstraerse en el mismo y hacer experimentos mentales físicos para probar sus ideas. Cuando se dedicó a hacer compatible la teoría de la relatividad especial con la gravedad newtoniana se dio cuenta de numerosas problemáticas que lo forzaron a desarrollar un nuevo marco en los comienzos del siglo XX para la interacción gravitatoria. Un marco no cuántico, pero que sí incluyera la relatividad especial y la gravedad clásica. Dicho modelo acabaría llevando el nombre de **teoría de la relatividad general**.¹

¹Cabe decir que antes de que Einstein presentara su artículo, Hilbert llegó a dar con una ley de gravitación completamente igual a la del primero de forma independiente. La publicación el 25 de noviembre de 1915 en la

Como teoría científica que se precie, debía poder ponerse a prueba, y así fue. Una de las comprobaciones de su utilidad está en que con este modelo es posible interpretar el extraño fenómeno de la órbita de Mercurio, por ejemplo. Otras pruebas de la teoría, como la observación de estrellas tras el Sol durante un eclipse, confirmaron su validez.

Las ecuaciones de Einstein (como se conoce a las principales relaciones de éste modelo) son una herramienta muy potente para entender el funcionamiento general del cosmos. Y muy liosa, también. Einstein fue, obviamente, el primero que se lanzó al empeño de resolverlas, buscando un **modelo adecuado** de la realidad que nos rodea surgido de ellas.

El resultado al que llegó fue una solución en la que aplicó el conocimiento (muy limitado para nosotros) que en 1916 se tenía del universo cercano: supuso que el universo estaba repleto de masa distribuida de forma uniforme. Dadas esas hipótesis, llegó al extraño resultado de que tal universo debería empezar eventualmente un proceso de evolución, de cambio, de modo que en un determinado momento, el universo no siguiera siendo estático a escala macrocósmica. Esta posibilidad fue despreciada por Einstein, quien derrotado por su intuición física y sus ideas preconcebidas **introdujo una constante en las ecuaciones** cuyo único fin era contrarrestar los efectos de la masa sola en el universo. De este modo, se podía tener un universo estable, en un equilibrio entre las fuerzas de la masa del mismo y lo que las contrarrestaba la constante. Dicho valor recibió el nombre de **constante cosmológica** y es uno de los pilares hoy en día de la cosmología moderna. Pero, ¿qué es la cosmología en esencia? La cosmología, en su acepción científica, es una disciplina dependiente de la física que estudia el origen, evolución y destino del universo en su totalidad empleando modelos físicos para tal fin. Será durante el siglo XX cuando recibirá su impulso principal, gracias a la teoría de la relatividad general.

En los años siguientes numerosos modelos surgieron a raíz de las conocidas como ecuaciones de Einstein: el modelo De Sitter, el de Lemaître, el de Friedmann, etcétera. Las pruebas experimentales acabaron demostrando, a través del corrimiento al rojo (o *redshift*) que **el universo no es estático y que se encuentra en expansión** gracias a Hubble, Ryle y otros que rebatieron las tesis estacionarias de Hoyle y compañía.

A lo largo de lo que quedaba del siglo XX, los estudios sobre relatividad general aumentaron, tratando temas muy diversos: el Big Bang y la evolución hasta nuestros días, búsqueda de otras pruebas experimentales (como ondas gravitacionales), temas relacionados con materia oscura o energía oscura o incluso surgieron algunos problemas que apuntarían a una posible cuantización de la teoría para solventarlos (empresa que hoy en día sigue). Podríamos estar discutiendo durante muchos párrafos todo ésto, pero ese no es el fin de este texto.

En 1947, y justo al acabar la carrera, Bryce DeWitt tuvo la oportunidad de conocer a Wolfgang Pauli, aprovechando la ocasión para decirle que estaba trabajando en la cuantización del campo gravitatorio. A DeWitt le resultaba incomprensible que las dos teorías científicas más revolucionarias del siglo XX (la física cuántica y la relatividad general) no tuvieran ninguna relación entre sí. Pauli, sin embargo, no estaba de acuerdo con que DeWitt empleara su tiempo en ello: «ese problemas al que apuntas es muy importante, pero para resolverlo se necesitará a alguien realmente listo»². Sin menoscabo de la inteligencia o de la capacidad de DeWitt, el tiempo ha demostrado lo acertado que estaba Pauli en tal ocasión.

Los primeros pasos hacia tal hipotético encuentro entre Einstein y la mecánica cuántica los daría Paul Dirac. Sería él, quien junto a otros como Klein-Gordon propiciaran el advenimiento de la teoría cuántica de campos (*Quantum Field Theory* o QFT) gracias a la ecuación de Dirac. Ésto posibilitó (además de otras importantes contribuciones) reencontrar las nuevas teorías sobre partículas con

Academia Prusiana de Ciencias por parte de Einstein de sus resultados generó una situación incómoda entre ambos. Sin embargo, Hilbert acabó aceptando lo sucedido, y cedió todo el protagonismo a Einstein en su obra maestra. En el futuro, Einstein y Hilbert se considerarían el uno al otro como colegas científicos, sin recuerdo de esos «nubarrones» ([1, p. 49-50]).

²[1, p. 230].

la relatividad especial de Einstein, acercándolas a la relatividad general un poco más.

Quiere ser la historia irónica, y el hecho es que a Dirac las nuevas teorías de física de partículas que acabarían dando el hoy famoso modelo estándar (*Standard Model*, SM) no le gustaban ni un pelo. Pese a agregar a las fuerzas débil y fuerte, y ofrecer predicciones que se mostrarían certeras, lo que incordiaba a Dirac era la «suciedad formal» que tenía la teoría en forma de renormalizaciones. Dirac era un hombre que apreciaba lo matemático, las relaciones, la realidad que subyacía a los experimentos mundanos de laboratorio

En los últimos años de su vida, Dirac acabó aislado de la comunidad científica por su negativa a aceptar los logros de la física cuántica. No cesó de instigar a sus compañeros a buscar una teoría más general que no necesitara de las *abyectas* renormalizaciones. Tampoco le sorprendió nada que DeWitt, eventualmente hallara problemas de renormalización en su cuantización de la gravedad. Dirac creía que para unificar ambos mundos sería necesaria una comprensión más profunda de la teoría cuántica.

DeWitt, mientras, se dedicó a intentar cuantizar el gravitón, que sería la partícula que «transportaría» (mediaría) la interacción gravitatoria: empresa más ardua de las que nunca imaginara, y que ya habían intentado otros como Matvei Bronstein, el propio Paul Dirac, Richard Feynmann, Wolfgang Pauli o Werner Heisenberg. Los esfuerzos que él y otros a la par como Dennis Sciama en Óxford, Stanley Deser en Boston o Abdus Salam en Paquistán estaban llevando a cabo se pusieron en común en 1974, cuando se realizó un simposio sobre gravedad cuántica en la Universidad de Óxford.

Aunque la comunidad científica vivía una relativa euforia (el ya existente CERN no paraba de confirmar los resultados que el modelo estándar de física de partículas predecía), según fueron pasando los ponentes ese clima de éxtasis se fue esfumando. Según Wolfgang Pauli, se podía escuchar cómo los organizadores del evento murmuraban inquietos: «lo que Dios ha separado, que no lo una el hombre»³.

La gravedad cuántica parecía estar en un callejón de salida y la reconciliación de la fuerza gravitatoria con las otras tres parecía imposible, y el simposio de Óxford fue la viva imagen de ello... en su *inmensa* mayoría. El evento habría significado la viva imagen de la derrota de no ser por la conferencia que diera el científico de la Universidad de Cambridge Stephen Hawking. Sería éste quien mostrara un vínculo entre la gravedad de Einstein y la física cuántica a través de un modelo de los agujeros negros.

Lo que se descubrió en resumen en las postrimerías del siglo XX fueron una serie de problemas que aparecían con la relatividad general cuando se las aplicaba a algunos casos *extremos*. Un ejemplo de éstos casos podría ser mismamente el agujero negro. De este modo sería que la comunidad científica vería como necesaria la cuantización de la gravedad como solución a bastantes de ellos. También existen alternativas *clásicas* de relatividad general, que intentan bordear problemas como la materia oscura o la energía oscura. Ejemplos de ellas son las MOND o TeVeS, pero no son objeto de estudio de este texto.

En este momento, resulta más adecuado para los fines del trabajo abandonar la perspectiva histórica y abordar los problemas de la relatividad general y la necesidad de la cuantización desde un punto de vista más *aislado*. Veámoslo.

1.2. La necesidad de la gravedad cuántica.

Como vimos en el epígrafe anterior, un conjunto de problemáticas y motivos empezaron a surgir a finales del siglo pasado que apuntaban a la necesidad de una teoría cuántica de la gravedad. En este apartado veremos cuáles han sido los principales argumentos que han sido esgrimidos hasta la actualidad para ello.

³[1, p. 242].

Complejidad formal. Como dijimos en el subapartado histórico, uno de los principales motivos para la búsqueda de una teoría *superior* (entendiendo por ello que contenga a ambas) a la teoría de la relatividad general y la mecánica cuántica es la «complejidad formal». Por ésto entendemos que la existencia de dos teorías con una confirmación experimental tan reafirmada como la gravedad de Einstein y la física cuántica y de aplicación al universo entero incita a pensar en su posible vínculo. Sería algo parecido a la motivación de DeWitt.

Pero no es necesario quedarnos con esa idea tan abstracta del motivo: es muy sencillo encontrar experimentos mentales, como los usados normalmente en mecánica cuántica, para ver un posible vínculo. Veamos un ejemplo postulado por Feynman en la conferencia de Chapel Hill de 1957.

Imaginemos una suerte de experimento de Stern-Gerlach en el que conseguimos eventualmente dos partículas en un estado de superposición de espín $+1/2$ y $-1/2$. Hagamos ahora pasar esas dos partículas por dos contadores (algo que las partículas puedan accionar), de modo que uno de ellos esté conectado a una bola de dimensiones macroscópicas que se mueva al activarlos. En tal caso, la superposición de las partículas será transferida a la bola, que podrá estar en dos posiciones distintas a la vez... pero esto quiere decir que el *campo gravitatorio está en una superposición* también. Si hacemos que el campo de esa bola afecte a otras mayores o más distantes, para comprender la interacción gravitatoria de éstas deberemos seguir la cadena de fuerzas e interpretar en última instancia de un modo mecano-cuántico el campo gravitatorio.⁴

Unificación. Las teorías de unificación de las interpretaciones de las fuerzas han resultado muy útiles en física de partículas, llevando a resultados experimentales muy contrastables. Haciendo la extensión, parecería lógico pensar que podría llegar a conocerse una teoría más general que incluyera las cuatro interacciones fundamentales, y tal modelo necesitaría de la cuantización del campo gravitatorio.

Existencia de singularidades. En el electromagnetismo clásico se suelen dar singularidades (es decir, puntos donde los campos o determinadas funciones *no existen*) que han sido resueltas en la electrodinámica cuántica. Cabría esperar que las singularidades de la teoría de la relatividad general (Big Bang, agujeros negros...) se pudieran resolver en una teoría cuántica de la gravedad.

El problema del tiempo. Aunque tanto la gravedad de Einstein como las teorías cuánticas ofrecen resultados experimentales veraces, poseen una concepción de tiempo completamente distinta. En la mecánica cuántica, el tiempo se considera absoluto algo que con la incorporación de la rel. especial cambió: en teoría cuántica de campos es el espacio tiempo. Sin embargo, ninguna de las dos tiene en cuenta las dilataciones temporales debidas al cambio del espaciotiempo por la masa-energía. Obviamente, ambas interpretaciones no pueden ser ciertas a la vez, y se hace necesaria una interpretación más general que esclarezca la problemática.

Incomplejidad del modelo estándar.

Existencia de resultados semiclásicos.

El problema de la pérdida de información.

⁴Cabe resaltar que una comprobación experimental de estos «juegos mentales» no existe, pero sirven para expandir el campo de conocimiento y buscar una teoría más «completa». Así es en parte cómo avanza la ciencia.

2. Gravedad cuántica covariante.

3. Aproximaciones canónicas.

3.1. *Quantum Geometrodynamics*.

3.2. Gravedad cuántica de bucles (*Loop Quantum Gravity*).

4. Teoría de cuerdas.

5. Teorías de campo efectistas.

6. Otras aproximaciones.

7. Conclusiones y perspectivas de futuro.

8. Bibliografía

- [1] P. G. Ferrerira, *La teoría perfecta - Un siglo de figuras geniales y de pugnas por la teoría general de la relatividad*. No. 978-84-339-6378-9 in Colección Argumentos, Barcelona: EDITORIAL ANAGRAMA S.A., 1ª ed., febrero 2015.
- [2] C. Kiefer, "Conceptual problems in quantum gravity and quantum cosmology," *ISRN Mathematical Physics*, p. 17, 2013.