



RIDAA
Repositorio Institucional
Digital de Acceso Abierto de la
Universidad Nacional de Quilmes



Universidad
Nacional
de Quilmes

Okon, Elias

El principio de equivalencia en gravedad cuántica



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Argentina.
Atribución - No Comercial - Sin Obra Derivada 2.5
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/>

Documento descargado de RIDAA-UNQ Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes de la Universidad Nacional de Quilmes

Cita recomendada:

Okon, E. (2013). *El principio de equivalencia en gravedad cuántica*. *Metatheoria*, 3(2), 65-80. Disponible en RIDAA-UNQ Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes <http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/2423>

Puede encontrar éste y otros documentos en: <https://ridaa.unq.edu.ar>

El principio de equivalencia en gravedad cuántica*

The Equivalence Principle in Quantum Gravity

Elias Okon†

Resumen

La mecánica cuántica y la relatividad general entran en conflicto en diferentes aspectos. Mientras que existen varios programas que buscan construir una teoría de gravedad cuántica que resuelva estos choques, muchas preguntas fundamentales continúan abiertas. Una alternativa para encontrar respuestas es buscar propiedades generales que guíen y acoten la construcción de teorías de gravedad cuántica. Este artículo se enfoca en el principio de equivalencia de la relatividad general y utiliza el análisis de su validez en contextos cuánticos realizado en Okon y Callender (2011) para evaluar la viabilidad de dicho principio como elemento conductor hacia la gravedad cuántica. En particular, se muestra que aquellas versiones del principio estrictamente válidas en relatividad general son compatibles con lo cuántico, de donde se sigue que el principio de equivalencia continúa disponible para la construcción de la gravedad cuántica.

Palabras clave: principio de equivalencia - gravedad cuántica - relatividad general - mecánica cuántica

Abstract

Quantum mechanics and general relativity are in conflict in many respects. While there are numerous programs that seek to construct a theory of quantum gravity to resolve this tension, many fundamental questions remain open. An alternative to find answers is to look for general properties to guide and delimit the construction of theories of quantum gravity. This work focuses on the *equivalence principle* of general relativity and relies upon an analysis on its validity in quantum contexts developed in Okon and Callender (2011) in order to assess its viability as a regulator in the construction of theories of quantum gravity. In particular, it shows that such versions of the principle which are strictly valid in general relativity are compatible with the quantum, from where it follows that the equivalence principle remains available for the construction of quantum gravity.

Keywords: equivalence principle - quantum gravity - general relativity - quantum mechanics

* Recibido: 4 de Septiembre de 2012. Aceptado en versión revisada: 20 de Diciembre de 2012.

† Instituto de Investigaciones Filosóficas, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Maestro Mario de la Cueva s/n, C. U., Coyoacán, México, D.F. Para contactar al autor, por favor escriba a: eokon@filosoficas.unam.mx.

Metatheoria 3(2)(2013): 65-80. ISSN 1853-2322.

© Editorial de la Universidad Nacional de Tres de Febrero. Publicado en la República Argentina.

1. Introducción

La mecánica cuántica y la relatividad general, desarrolladas a principios del siglo XX, proporcionan una descripción increíblemente precisa del mundo físico desde escalas subatómicas hasta escalas astronómicas. Sin embargo, debido a un marcado conflicto entre sus fundamentos, estas dos teorías en conjunto no parecen construir una imagen de la naturaleza global y coherente. En consecuencia, ha surgido en la física el programa de gravedad cuántica, que intenta formular una teoría que congele estas bases fundacionales distintas.

Hoy en día existen varias propuestas concretas, como la teoría de supercuerdas o la gravedad cuántica de lazos, que buscan construir una teoría de gravedad cuántica. No obstante, continúan abiertas varias preguntas centrales al programa de gravedad cuántica. Como resultado, existe un sector de dicha comunidad que piensa que, a la par del desarrollo de estas propuestas, será sumamente útil examinar, desde una perspectiva general, qué elementos característicos podemos esperar que guíen y acoten la construcción de teorías de gravedad cuántica. Es decir, considerar la existencia y naturaleza de posibles principios de gravedad cuántica, pues se piensa difícil concebir avances en gravedad cuántica sin principios de este tipo en operación. En resumen, la intención de dicha postura, y de este texto en particular, es alcanzar una mayor claridad sobre las bases de la investigación en gravedad cuántica, de manera de que los resultados obtenidos sean aplicables a un amplio rango, sino es que no a todos, los acercamientos al problema.

Existen en la literatura de la física varias propuestas para candidato a principio de gravedad cuántica: independencia de fondo, longitud mínima, dualidad, etc. Sin embargo, estas propuestas no han sido estudiadas de manera sistemática y, en muchas ocasiones, han sido simplemente asumidas sin que tengamos un entendimiento claro sobre ellas. Una alternativa natural, con el fin de realizar una búsqueda sistemática de candidatos, es estudiar los principios básicos de la mecánica cuántica y la relatividad general, concentrándose en las áreas donde estos son compatibles. Motivaciones similares llevaron a Okon y Callender (2011) a realizar un análisis de compatibilidad entre la mecánica cuántica y el principio de equivalencia de la relatividad general, donde se evalúa si el principio de equivalencia se satisface en la mecánica cuántica o no. Es decir, si el principio (o al menos su esencia) es válido al examinarse desde una perspectiva cuántica. El objetivo de Okon y Callender (2011) es clarificar cierta confusión, presente en la literatura de la física, con respecto a si existen conflictos entre lo cuántico y el principio de equivalencia o no. Para esto, muestran que existen distintas versiones no-equivalentes del principio de equivalencia y que, mientras algunas de ellas son compatibles con la mecánica cuántica, otras no lo son.

El objetivo de este trabajo es mostrar, a su vez, que no todas las versiones del principio de equivalencia consideradas en Okon y Callender (2011) son estrictamente compatibles con la relatividad general, pero que todas aquellas que sí lo son, son también compatibles con la mecánica cuántica. Es decir, que todas aquellas versiones del principio de equivalencia que genuinamente forman parte de la relatividad general son perfectamente válidas también en contextos cuánticos.

ticos. Estas, por supuesto, son excelentes noticias, pues nos indican que el principio de equivalencia, que ha jugado un papel fundamental en la construcción de teorías a lo largo de la historia de la física, sigue a nuestra disposición en el intento por formular una teoría cuántica de la gravedad. Es decir, nos señalan que el principio de equivalencia es un sólido candidato a principio de gravedad cuántica.

Este artículo está estructurado de la siguiente manera. En la sección 2 planteamos al detalle el problema de gravedad cuántica, mencionamos algunos de sus principales problemas conceptuales y revisamos rápidamente el interés que estos han suscitado en la filosofía de la física de los últimos años. En la sección 3 revisamos el análisis presentado en Okon y Callender (2011) con respecto a la compatibilidad entre la mecánica cuántica y el principio de equivalencia y valoramos al detalle las características de las diferentes versiones del principio consideradas en dicho texto. En particular, nos enfocamos en evaluar la validez de dichas versiones en el contexto de la relatividad general y exploramos las consecuencias de nuestro análisis para la investigación en gravedad cuántica. Finalmente, en la sección 4 presentamos las conclusiones.

2. Gravedad cuántica

Nuestro entendimiento del mundo físico se amplió enormemente a lo largo del siglo pasado. Las herramientas teóricas de la mecánica cuántica y la relatividad general nos han permitido entender y hacer predicciones sobre situaciones físicas que van desde el reino atómico y subatómico hasta fenómenos que ocurren a escalas de galaxias, cúmulos de galaxias e incluso más allá, a escalas de la estructura del mismo universo entero. Dado que la interacción gravitacional es sumamente débil en comparación con el resto de interacciones físicas, la relatividad general es prácticamente irrelevante a escalas pequeñas y su reino usual de aplicación es el de escalas astronómicas. El rango de aplicación de la mecánica cuántica, en contraste, consiste principalmente en escalas atómicas y subatómicas.

La diferencia en dominios de aplicación para estas teorías ha dado lugar a un enorme poder predictivo de la física contemporánea pues aminora en gran medida las posibles inconsistencias empíricas entre ellas. A pesar de esto, existe amplia evidencia de que la relatividad general y la mecánica cuántica no son compatibles. Al intentar combinarlas para obtener resultados en situaciones donde tanto los fenómenos cuánticos como los gravitacionales deben ser tomados en cuenta (sistemas muy pequeños y muy masivos, por ejemplo), dan lugar a respuestas sin sentido, comúnmente en la forma de infinitos. Por lo tanto, en dichas circunstancias no contamos con herramientas teóricas sólidas para describir o predecir los resultados.

Una manera intuitiva de entender esto es recordando por un lado que, según la relatividad general, la curvatura del espaciotiempo está determinada por la distribución de materia presente. Por el otro lado, el principio de incertidumbre cuántico señala que el confinamiento de materia cuántica en regiones peque-

ñas implica incertidumbre en su velocidad y, por lo tanto, en su energía y momento. El resultado de todo esto es una fuerte e impredecible distorsión del espaciotiempo circundante. De esta forma, la noción de una geometría espacial *suave*, supuesto central de la relatividad general, es destruida por incertidumbres en el mundo cuántico a escalas pequeñas.

De manera más formal, el conflicto se puede entender observando que la relatividad general asume que la fuente de la gravitación, es decir, la materia que curva al espaciotiempo, es clásica. Sin embargo, sabemos que la descripción cuántica de la materia es más adecuada que la clásica. ¿Es posible, entonces, construir una teoría de la gravitación que tome en cuenta el carácter cuántico de la materia? Este es el problema de gravedad cuántica (Rovelli 2007), que ha resistido todo intento de solución por más de 70 años. Es importante notar que conflictos análogos han surgido a lo largo de la historia de la física moderna, por ejemplo con el campo electromagnético, y que estos han sido resueltos satisfactoriamente. Sin embargo, los métodos utilizados en casos anteriores, en particular el proceso formal de cuantización de una teoría, no parecen funcionar, al menos no de manera simple y directa, en el caso gravitacional.

Desde el punto de vista conceptual, la situación para la gravedad cuántica no es muy alentadora. Incluso al considerar por separado la relatividad general y la mecánica cuántica –y a pesar del gran éxito empírico de ambas–, resulta difícil entender y caracterizar sus principios fundamentales. Como ejemplo de esto tenemos los problemas de interpretación en mecánica cuántica (Dickson 2007) o el debate sobre el significado de la covariancia general en relatividad general (Norton 1993). La situación para la gravedad cuántica es todavía peor pues estos problemas se ven enormemente exacerbados al intentar combinar estas teorías en un esquema unificador. Como resultado, surgen grandes conflictos conceptuales como el de la conexión entre la invariancia bajo difeomorfismos y las observables (Rovelli 2002), el problema del tiempo en gravedad cuántica (Isham 1994, Kuchar 1992), la cuestión de las condiciones iniciales para la función de onda del universo (Hawking & Hartle 1983) o la paradoja de la pérdida de información (Hawking 1976). Desde el punto de vista experimental, la situación para la gravedad cuántica tampoco es muy prometedora pues prácticamente no existen pistas de situaciones donde se reconozca la presencia simultánea de efectos cuánticos y gravitacionales.

A pesar de que la gravedad cuántica ha sido objeto de investigación en la física por más de ocho décadas, el interés en ella por parte de los filósofos es relativamente reciente. Dado que la teoría de gravedad cuántica todavía no es una teoría física bien formada, el reto que enfrentan los filósofos al estudiarla es muy distinto al de tratar con teorías establecidas como la mecánica de Newton, la relatividad general o la mecánica cuántica. Si bien esta situación puede ser delicada, presenta una inmejorable oportunidad para los filósofos con el fin de contribuir positivamente en su edificación.

El proyecto de construir la teoría de gravedad cuántica genera preguntas filosóficas sumamente complicadas, siendo las de corte ontológico las que han pro-

ducido mayor interés por parte de los filósofos. En esta dirección, resaltan discusiones sobre el estatus del tiempo en dicha teoría, sobre la ontología asociada al *espaciotiempo cuántico* o sobre las consecuencias de la gravedad cuántica con respecto a interpretaciones del formalismo cuántico. Por otra parte, se discuten también cuestiones epistemológicas o metodológicas como si existe o no una necesidad de cuantizar el campo gravitacional. Este trabajo, sin embargo, intenta realizar un trabajo filosófico ligeramente distinto, promoviendo la aclaración de una base conceptual sobre la cual se pueda edificar la teoría de gravedad cuántica.

En la actualidad existen varios acercamientos al problema de gravedad cuántica con distinto número de seguidores y con diferentes grados de éxito. Los programas que atraen a la mayor cantidad de investigadores son el de supercuerdas y el de gravedad cuántica de lazos. El primero propone sustituir a las partículas fundamentales puntuales por objetos extendidos unidimensionales llamados cuerdas y el segundo intenta realizar un proceso de cuantización a la relatividad general. Otros programas interesantes son el de triangulaciones causales dinámicas, el de conjuntos causales y el de geometría no-conmutativa. Todos estos proyectos incluyen ideas altamente especulativas como dimensiones espaciales extra, multiversos, discretización del espaciotiempo a escalas pequeñas o postulación de entidades fundamentales pre-geométricas a partir de las cuales emerge el espaciotiempo.

El punto de vista defendido por este trabajo es que, paralelo al desarrollo de estas propuestas, puede resultar útil dar un paso atrás y estudiar, de manera global, propiedades y características genéricas que puedan fungir como conductores o principios guía de la investigación en gravedad cuántica. Con este propósito en mente, es natural revisar principios fundamentales, ya sea de la mecánica cuántica o de la relatividad general, en busca de alguno con potencial para sobrevivir la conjunción de ambas teorías. En este sentido, el principio de equivalencia parece un excelente candidato pues: i) constituye la base de la descripción geométrica de la gravedad sugerida por la relatividad general, ii) no es, al menos de manera explícita, incompatible con la mecánica cuántica y iii) ha jugado un papel fundamental en la historia de la física con respecto a la construcción de nuevas teorías. Evaluemos entonces su viabilidad como principio de gravedad cuántica.

3. Principio de equivalencia y mecánica cuántica

Motivada en parte por el razonamiento anterior, ha surgido recientemente en la física una literatura que busca violaciones cuánticas al principio de equivalencia. El problema es que por cada artículo que afirma dicha violación existe uno que la niega. Sin embargo, es bien sabido que abundan complicaciones conceptuales en torno al principio de equivalencia y que existen casi tantas versiones de este como autores que escriben sobre él. En consecuencia, Okon y Callender (2011) intentan resolver la ambigüedad entre los diferentes análisis mostrando que distintos principios de equivalencia, muchos de ellos lógicos y empíricamente no-equivalentes entre sí, están siendo invocados. El propósito de este ensayo

es realizar un análisis sobre aquellas versiones del principio de equivalencia respetadas tanto por el formalismo cuántico como por la relatividad general. Esto con el fin de examinar las oportunidades de supervivencia (de al menos algunas versiones) del principio de equivalencia, en el ámbito de una teoría cuántica de la gravedad.

El principio de equivalencia, uno de los principios de la física mejor probados experimentalmente (ver Schlamminger *et al.* 2008), forma la base empírica detrás de la descripción geométrica de la gravitación propuesta por la relatividad general. La historia del principio de equivalencia comienza con la universalidad de la caída libre, desarrollada por Galileo a finales del siglo XVI. Más adelante, la mecánica newtoniana incorpora esta idea a través de la igualdad entre las masas gravitacional e inercial, relegándola así a un estatus más bien circunstancial. Sin embargo, años más tarde, en las manos de Einstein, la idea retomó un papel central al transformarse en la base física de su teoría de la gravitación.

Einstein notó que el hecho de que todos los cuerpos caen con la misma aceleración en un campo gravitacional externo implica que un observador en caída libre no percibe la aceleración de otros cuerpos cayendo junto con él. Por lo tanto, los movimientos mecánicos de dichos cuerpos se comportan como en la ausencia de gravedad. A raíz de todo esto, Einstein postuló que en dichas circunstancias, no solo las leyes mecánicas sino que todas las leyes físicas deben comportarse como en la ausencia de gravedad. Esta generalización le permitió proporcionar una descripción de la gravedad en términos de propiedades geométricas del espaciotiempo al proponer que la materia y la energía curvan al espaciotiempo y que la gravedad es el resultado de dicha curvatura. Es decir, la materia determina la geometría del espaciotiempo y la geometría del espaciotiempo establece las posibles trayectorias gravitacionales de los cuerpos sobre este. En consecuencia, los objetos no sienten fuerzas gravitacionales (estas no existen en relatividad general) sino que sus trayectorias se ven afectadas por la geometría no trivial (i.e. no plana) del espaciotiempo donde viajan. Por lo tanto, desde el punto de vista de la relatividad general, el principio de equivalencia no es considerado una característica circunstancial del campo gravitacional sino parte de los fundamentos mismos de la física.

A pesar de la importancia del papel que jugó el principio de equivalencia en la construcción de la relatividad general, no existe una formulación canónica de dicho principio. En consecuencia, la literatura contiene una larga lista de enunciados del principio, lógica y empíricamente no-equivalentes. Sin embargo, Okon y Callender (2011) proponen que todos estos principios pueden ser clasificados en cuatro categorías que representan las diferentes ideas básicas en juego. Sostiene, por lo tanto, que prácticamente todos los enunciados del principio en la literatura encuentran lugar en dicha clasificación (ver por ejemplo las notas al pie 3, 5, 6 y 7). Los cuatro grupos que presentan corresponden a proposiciones sobre i) universalidad de la caída libre, ii) equivalencia entre campos gravitacionales homogéneos y movimiento uniformemente acelerado, iii) universalidad del comportamiento de sistemas físicos en regiones *pequeñas* del espaciotiempo y

iv) estipulación de estructura de relatividad especial para las leyes físicas en cada punto del espaciotiempo.

Existen, por supuesto, varias interconexiones entre estas diferentes clases. En particular, ii) consiste en una generalización de i) ya que aplica a todo tipo de sistemas y no solo a sistemas mecánicos. iii) y iv) son a su vez generalizaciones de iii) en el sentido de que consideran situaciones tanto con campos gravitacionales homogéneos (como lo hace ii)) como con campos gravitacionales inhomogéneos. En cualquier caso, un claro reconocimiento de sus diferencias es esencial para realizar un análisis de la posibilidad de considerar el principio de equivalencia como principio guía de gravedad cuántica. La estrategia que seguiremos será la siguiente: tomaremos uno a uno los enunciados representativos de las cuatro categorías de principios de equivalencia propuestas en Okon y Callender (2011), realizaremos un análisis minucioso del papel de cada uno de estos en el contexto de la relatividad general y examinaremos algunos detalles del análisis realizado en dicho texto con respecto a su validez en mecánica cuántica. Comencemos el análisis.

3.1. Universalidad de la caída libre

La primera categoría de principios de equivalencia considerada en Okon y Callender (2011) es la universalidad de la caída libre, la cual surge a partir de los famosos experimentos de Galileo en los que se deja en caída libre a cuerpos de distintas masas. Como es bien sabido, al notar que los cuerpos caen aproximadamente de la misma manera, Galileo postuló que, en ausencia de fricción, la igualdad sería exacta. En consecuencia, propuso el siguiente enunciado:

(PE1) Todos los cuerpos de prueba caen en un campo gravitacional con la misma aceleración, independientemente de su masa o composición interna.

PE1 es válido de manera exacta en mecánica newtoniana. Sin embargo, en relatividad general, la situación es más complicada y quizás un poco sorprendente pues, en dicho contexto, PE1 no se satisface de manera exacta. Para ver esto, notamos, por un lado, que en el contexto de relatividad general, PE1 se traduce en lo que se conoce como el *principio geodésico*. Es decir, en el hecho de que las trayectorias de las partículas de prueba libres coinciden con las geodésicas (i.e., generalizaciones de *líneas rectas* en espacios curvos) del espaciotiempo de fondo. Por el otro lado, recordamos un hecho poco reconocido: el principio geodésico es estrictamente válido únicamente para partículas puntuales y muy ligeras (Geroch & Jang 1975). Ahora bien, según PE1 todos los cuerpos de prueba caen con la misma aceleración, *independientemente de su masa o composición interna*. Sin embargo, dado el hecho de que las partículas clásicas puntuales (las únicas que satisfacen el principio geodésico) no pueden tener ningún tipo de estructura interna (excepto su masa) deducimos que, en relatividad general, PE1 no se satisface independientemente de la estructura interna sino que únicamente para partículas sin tal cosa como estructura interna. Por lo tanto, nos vemos obligados a concluir que PE1 no es estrictamente válido en relatividad general, por lo que no puede ser considerado un principio fundamental en dicha teoría.

De cualquier manera, resulta interesante repasar el análisis realizado en Okon y Callender (2011) en cuanto a la condición de PE1 en un entorno cuántico. De entrada se señala que existen problemas para interpretar PE1 en dicho contexto pero se sostiene que, incluso si esto pudiera lograrse, el principal problema radica en que los objetos cuánticos no satisfacen ni siquiera la esencia de PE1. Es decir, no presentan un comportamiento en campos gravitacionales independiente de estructura y masa. Para ver esto, consideran partículas cuánticas en un campo gravitacional uniforme y recuerdan que el teorema de Ehrenfest implica que el promedio para el tiempo de caída de dichas partículas es igual a lo que se espera clásicamente. Sin embargo, recuerdan también que las fluctuaciones sobre dicho promedio son proporcionales a Viola y Onofrio (2004) y Ali *et al.* (2006), mostrando así la no-universalidad (o dependencia en la masa) de la caída libre cuántica. Por lo tanto, PE1 no es válido en mecánica cuántica, pero tampoco lo es en relatividad general. Parece entonces difícil mantenerlo como principio guía en gravedad cuántica. Pasemos entonces al segundo grupo de ideas relacionadas con el principio de equivalencia que proponen Okon y Callender: el llamado principio de equivalencia de Einstein.

3.2. Principio de equivalencia de Einstein

En mecánica newtoniana, la independencia de la masa descrita en PE1 implica que fenómenos mecánicos se comportan de igual manera en dos situaciones muy distintas: marcos de referencia en reposo con campos gravitacionales constantes y marcos uniformemente acelerados con ausencia total de gravedad. Para ver esto notamos que la segunda ley de Newton, aplicada a un grupo de partículas de masas m_j en un marco de referencia sin campos gravitacionales externos, está dada por (con F_{ij} la fuerza neta de la partícula j sobre la i). Ahora, para encontrar la descripción de este mismo sistema, pero visto desde un marco de referencia uniformemente acelerado, realizamos el cambio de coordenadas y $t = t'$. Esto nos lleva a que es exactamente la ecuación del mismo sistema de partículas pero en un campo gravitacional uniforme, de magnitud a . Por lo tanto, si nos concentramos únicamente en experimentos mecánicos, no podremos distinguir si estamos, por ejemplo, en un laboratorio en la Tierra o en una nave acelerando en el espacio exterior (siempre y cuando, por supuesto, la nave tenga la aceleración adecuada y no miremos por la ventana). A partir de esta observación, Einstein decidió postular que esta equivalencia entre campos gravitacionales homogéneos y marcos uniformemente acelerados debe ser válida para todo tipo de fenómenos y situaciones y no solo para sistemas mecánicos (ver Norton 1985). Formuló entonces su principio de equivalencia:

(PE2) Un estado de reposo en un campo gravitacional homogéneo es físicamente indistinguible de un estado de aceleración uniforme en un espacio libre de gravedad.

Esta idea, que Einstein después llamo “el pensamiento más feliz de su vida,” fue la semilla que lo llevó, años más tarde, a construir la relatividad general. Note-

mos, sin embargo que, debido a que solo involucra campos gravitacionales uniformes (con la misma magnitud y dirección en todos lados), no puede ser considerada, sin ciertas modificaciones que discutiremos más adelante, un principio fundamental en relatividad general. De cualquier manera, dado el hecho de que este enunciado atañe a la totalidad de las leyes físicas, y no solo, como PE1, al comportamiento mecánico de sistemas muy especiales (i.e., partículas de prueba libres), PE2 debe ser considerado un principio mucho más general. Es por esto que el análisis de su validez en sistemas cuánticos resulta provechoso.

Para mostrar que sistemas cuánticos sí satisfacen el principio de equivalencia de Einstein, procedemos de manera análoga a como lo hicimos para el caso newtoniano. Comenzamos con la ecuación de Schrödinger para una partícula libre

$$i\hbar \frac{d\psi}{dt'} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla'^2 \psi$$

y buscamos su descripción desde un marco de referencia acelerado. Para esto, realizamos el cambio de coordenadas

$$z = z' + \frac{1}{2}at'^2$$

lo que nos lleva a

$$i\hbar \frac{d\psi'}{dt} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 - maz \right) \psi'$$

con $\psi' = e^{i\alpha(z,t)}\psi$ (ver Greenberger & Overhauser 1979). Puesto que esta es exactamente la ecuación de Schrödinger para una partícula en un campo gravitacional homogéneo de magnitud a , obtenemos el resultado deseado. Es decir, obtenemos descripciones idénticas para sistemas cuánticos ya sea en campos gravitacionales o acelerados.

Concluimos, sin embargo, que, a pesar de que PE2 es válido en mecánica cuántica, la restricción a campos gravitacionales homogéneos significa que no puede ser considerado un principio fundamental de relatividad general y, por lo tanto, tampoco de gravedad cuántica. ¿Puede entonces extenderse PE2 a situaciones más generales que incluyan tanto campos homogéneos como inhomogéneos? Okon y Callender (2011) consideran dos opciones en este sentido; analicémoslas.

3.3. Campos gravitacionales inhomogéneos

La primera observación importante, con el fin de generalizar PE2 a situaciones que incluyan campos inhomogéneos, consiste en recordar que la relatividad general asume que el espaciotiempo es una variedad diferencial. Lo anterior indica que, a escalas suficientemente pequeñas, el espacio se asemeja más y más a un espacio euclidiano. Esto implica, por ejemplo, que resulte sumamente complicado notar que, a pesar de que el campo gravitacional de la tierra es inhomogé-

neo, este apunta en direcciones distintas en los dos extremos de la habitación en la que me encuentro. En consecuencia, surge la estrategia de intentar *homogeneizar* campos inhomogéneos concentrándose en regiones pequeñas. El plan es que quizás al restringir el principio a dichas regiones uno puede recrear situaciones indistinguibles a las que considera PE2 y de esta forma obtener un enunciado que sea válido para espaciotiempos curvos en general.

La segunda observación consiste en señalar que PE2 implica que, en caída libre, los campos gravitacionales *desaparecen*. Para ver esto, notemos que, de la misma manera en que PE2 indica que podemos simular campos gravitacionales al considerar marcos de referencia acelerados, el principio nos permite cancelar los efectos de la gravedad al considerar marcos de referencia en caída libre en un campo gravitacional. En otras palabras, las mediciones realizadas desde un marco en caída libre en un campo gravitacional homogéneo son indistinguibles de las realizadas en un marco en reposo en la ausencia de gravedad.

La estrategia que se utiliza para formalizar el concepto de región pequeña, y para usarlo en la formulación del principio de equivalencia, consiste en hacerlo en términos de limitantes en la precisión de medición. Volviendo al ejemplo del campo gravitacional dentro de mi habitación, la idea es que con aparatos de medición imprecisos es imposible detectar diferencias en las direcciones del campo en diferentes puntos. Es decir, a pesar de que el campo es inhomogéneo, somos incapaces de notarlo y, en consecuencia, el campo resulta homogéneo de manera efectiva. En más detalle, el plan consiste en encontrar, para cada aparato de medición localizado en algún lugar del espaciotiempo, la región para la cual el campo aparece homogéneo. De esta forma, es posible enunciar el principio de manera que solo atañe a experimentos realizados dentro de dicha región. Combinando esto con la posibilidad de cancelar campos gravitacionales en caída libre, llegamos a la idea de demandar que los resultados de todos los experimentos realizados dentro de las regiones homogeneizadas, con los aparatos de medición en caída libre, no dependan ni del punto donde se realicen ni de la velocidad con la caen los aparatos. Se formula por lo tanto:

(PE3) Para cada aparato experimental con cierta limitación de precisión, y para cada punto del espaciotiempo, existe un vecindario de dicho evento tal que el resultado de cualquier medición dentro de la región, con el aparato en caída libre, es independiente del evento y de la velocidad del aparato.

Nuestras (in)capacidades epistémicas nos ayudan a *homogeneizar* campos inhomogéneos, permitiéndonos extender PE2. Notemos, sin embargo, que este elemento epistémico no deja a PE3 vacío, ya que implica el hecho altamente no trivial de que, dado un límite de precisión y una escala local de curvatura, siempre es posible encontrar una región en la que se cumple, es decir, donde el comportamiento de un sistema en caída libre se vuelve universal. De esta manera, logramos finalmente conseguir una formulación del principio de equivalencia completamente general, que puede ser considerada fundamental con respecto a relatividad general.

¿Qué hay de la validez de este principio en un entorno cuántico? A pesar de su no-trivialidad y carácter fundamental, PE3 no da señales de conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica. Esto es porque las limitantes de precisión protegen a PE3 de violaciones cuánticas. El asunto es que, para toda situación cuántica que confronte el principio de equivalencia, existen dos opciones:

- (i) El sistema cuántico cabe en la región permitida por PE3, en cuyo caso estamos de vuelta en PE2 pues el campo se ve efectivamente homogéneo.
- (ii) El sistema cuántico no cabe en la región permitida por PE3 y este queda mudo.

En cualquier caso, resulta que la mecánica cuántica no viola PE3.

En conclusión, la lectura del principio de equivalencia en términos de limitantes de precisión y tamaño garantiza la compatibilidad entre sistemas cuánticos y el principio de equivalencia. El principio de equivalencia, entendido como PE3, sobrevive entonces tanto al escrutinio cuántico como al relativista.

Okon y Callender mencionan también otra opción para generalizar PE2 a situaciones con campos gravitacional inhomogéneos, que consiste en imponer restricciones sobre la forma de las leyes físicas con el fin de evitar que estas, consideradas en un solo punto, manifiesten efectos gravitacionales. Esto implica que en un punto estas se reducen a las leyes válidas en relatividad especial. Con esto en mente, se formula el principio de equivalencia como una estipulación sobre la forma de las leyes físicas y, en particular, sobre la manera en que la materia interactúa, o se acopla, con el campo gravitacional:

- (PE4) Todos los campos no-gravitacionales se acoplan a un solo campo gravitacional y en cada punto del espaciotiempo es posible encontrar una transformación de coordenadas tal que las variables del campo gravitacional pueden ser eliminadas de las ecuaciones de campo de la materia.

PE4 consta de dos aseveraciones, universalidad y acople mínimo. La universalidad insiste en que todos los campos de materia, al acoplarse a un solo campo métrico, perciban exactamente la misma geometría del espaciotiempo. Acoplamiento mínimo es la parte que especifica que las leyes de la física en relatividad general deben reducirse, punto a punto y en coordenadas que corresponden a caída libre, a las de una situación con ausencia total de campos gravitacionales (como en relatividad especial). La intuición detrás de PE4 es que todos los campos no-gravitacionales *sienten* el mismo campo gravitacional, pero lo hacen de una manera débil, de forma que en cada punto del espaciotiempo es posible encontrar transformaciones de coordenadas de tal manera que los efectos de la gravitación desaparecen (ya que el tensor de Riemann, que describe a la curvatura, no aparece en las leyes).

Antes de evaluar a PE4 en entornos cuánticos y relativistas, resulta provechoso analizar la relación entre este y PE3. Como ya mencionamos, mientras que PE3 refiere a resultados experimentales, PE4 involucra la forma de las leyes fisi-

cas. Por lo tanto, no pueden ser estrictamente equivalentes entre sí. Sin embargo, existe una sólida conexión entre ellos. Por un lado, al considerar situaciones con aparatos de medición con precisión absoluta, la región permitida por PE3 se reduce a un solo punto. De manera que, para que PE3 sea válido para aparatos de precisión arbitraria, es suficiente con que las leyes que describen los experimentos sean tales que no dependan de manera puntual en la curvatura local. Es decir, es suficiente con que dichas leyes satisfagan PE4. Por el otro lado, si tenemos experimentos que cumplen con PE3, entonces necesariamente pueden ser descritos por leyes que satisfacen PE4. En consecuencia, PE4 también debe ser considerado fundamental en relatividad general.

En cuanto a la validez de PE4 en un contexto cuántico, es fácil ver que, a pesar de que este describe características profundas de nuestras teorías clásicas, no da lugar a conflictos cuánticos. El asunto es que PE4 es compatible con lo cuántico por estipulación (nótese que refiere únicamente a la forma de las ecuaciones de la física pero permanece mudo con respecto a cuestiones empíricas). El principio demanda que todos los campos cuánticos sientan el mismo campo gravitacional pero que tengan ecuaciones dinámicas que no hagan referencia esencial al tensor de Riemann. Bueno, esto es verdad en mecánica cuántica y no es ningún accidente. La métrica es percibida por todos los campos cuánticos y por supuesto ninguno de los campos cuánticos evoluciona como función del tensor de Riemann. Por lo tanto, el proyecto de buscar violaciones cuánticas a PE4 termina al momento de enunciar el propio principio.

Pudiera pensarse que el hecho de que PE4 se satisface en el mundo cuántico por estipulación le resta peso al resultado de compatibilidad. Sin embargo, este no es el caso, ya que el elemento realmente importante radica en el hecho de que las leyes de la mecánica cuántica que son compatibles con PE4 gozan de un éxito empírico sin precedentes. En conclusión, PE4, al igual que PE3, es válido tanto para la relatividad general como para la mecánica cuántica, por lo que se presenta también como candidato a principio conductor en gravedad cuántica.

4. Conclusiones

En este trabajo defendimos una postura que propone evaluar, de manera global y sistemática, propiedades y características genéricas que puedan fungir como principios guía en la elaboración de teorías de gravedad cuántica. Nos enfocamos en particular en el principio de equivalencia de relatividad general y exploramos la viabilidad de utilizarlo como elemento conductor en dicha empresa. Con este fin, realizamos un análisis detallado sobre su validez tanto en contextos cuánticos como relativistas.

Los resultados del análisis son los siguientes: el principio de equivalencia, entendido como PE1, es inválido tanto en mecánica cuántica como en relatividad general. PE1 no es, por lo tanto, relevante en gravedad cuántica. Interpretado como PE2, el principio no presenta conflicto con lo cuántico. Sin embargo, dado que solo considera campos gravitacionales uniformes, no es adecuado para

ser considerado un principio central de la relatividad y, mucho menos, de la gravedad cuántica. Las versiones refinadas PE3 y PE4, en cambio, proporcionan mejores resultados pues son tanto estrictamente válidas en relatividad general como perfectamente compatibles con la mecánica cuántica.

Concluimos entonces, por un lado, que no todos los principios de equivalencia que aparecen en la literatura son válidos de manera estricta en el contexto de la relatividad general. En particular, la universalidad de la caída libre y el principio de equivalencia de Einstein no pueden ser considerados principios fundamentales de dicha teoría. Sin embargo, por el otro lado, encontramos que, si bien la mecánica cuántica entra en conflicto con algunas versiones del principio de equivalencia, dicha teoría es perfectamente compatible con aquellas versiones que sí son parte de la relatividad general.

En cuanto al programa de gravedad cuántica, el hecho de que las versiones del principio de equivalencia que son válidas en relatividad general también lo son en mecánica cuántica, resulta una excelente noticia. Nos indica que dicho principio puede ser visto como elemento conductor en el desarrollo de teorías cuánticas de la gravedad. No olvidemos que un entendimiento claro del significado físico del principio de equivalencia permitió a Einstein construir su teoría de la relatividad general. De la misma manera, dos siglos y medio antes, Newton utilizó el mismo principio para formular las bases generales de su dinámica. Bien puede ser, entonces, que el principio de equivalencia contenga también la clave para resolver el problema de gravedad cuántica.

Antes de concluir, quisiera considerar una opción que de entrada parece poner en entredicho el análisis realizado. Esta es la posibilidad de que el principio de equivalencia sea un fenómeno emergente, es decir, que a pesar de ser válido en relatividad general, no tenga una contraparte fundamental a nivel de gravedad cuántica. En dicho caso, sería difícil pensar en el principio de equivalencia como guía para investigación futura en gravedad cuántica, pues sería un error asumir que este será válido en dicho contexto. Sin embargo, sabemos que teorías nuevas no surgen por medio de una deducción lógica basada en teorías viejas. A menudo, en la historia de la física, se han obtenido pistas importantes hacia una teoría futura, a partir de una reflexión sobre ya sea simetrías o correlaciones inexplicadas es teorías viejas.

Me gustaría cerrar con algunos comentarios sobre la metodología general que guía esta investigación. En los últimos años ha aumentado el reconocimiento de que filósofos de la física y físicos trabajando en gravedad cuántica consideran de hecho los mismos problemas y, más aun, que sus diferentes métodos y habilidades se complementan para contestar preguntas fundamentales. Dada la complejidad conceptual de la problemática involucrada, la precisión del pensamiento filosófico y su capacidad de clarificar premisas conceptuales parecen herramientas adecuadas para ayudar a la física a salir de su confusión. La falta de experimentos relevantes en gravedad cuántica ha producido cierto estado de desbalance en el medio, causando la reapertura del debate sobre el significado y la naturaleza de conceptos básicos como el tiempo, el espacio, la materia o la causa-

lidad. Esta conducta autoreflexiva, pienso, puede ser muy prometedora. La efectividad de la actitud, muchas veces pragmática, adoptada por los físicos la mayor parte del siglo pasado, es innegable. Resultó, de no ser por la gravedad, en una descripción completa y extremadamente precisa del mundo a nivel fundamental. Sin embargo, es posible que dicha actitud no sea productiva en la construcción de una descripción fundamental de la gravedad a nivel cuántico. A través de un énfasis excesivo en aspectos técnicos, en detrimento de un análisis cuidadoso de asuntos conceptuales, los físicos no han logrado concretar la unión consistente de los reinos gravitacionales y cuánticos. Discusiones filosóficas relevantes, por ejemplo, sobre la naturaleza del espacio y el tiempo, pueden resultar cruciales para la elaboración de una teoría de gravedad cuántica; después de todo, muchos de los avances importantes en la física son inseparables de exploraciones filosóficas sobre conceptos fundamentales.

Bibliografía

- Ahluwalia, D. V. (2000), "Principle of Equivalence and Wave-Particle Duality in Quantum Gravity", en Breton, N., Pimentel, O. y J. Socorro (eds.), *Memorias del III Taller de la DGFM-SMF- Aspectos de Gravitación y Física-Matemática*, <http://arxiv.org/pdf/gr-qc/0009033v1.pdf>.
- Aldrovandi, R., Pereira, J. G. y K. H. Vu (2006), "Gravity and the Quantum: Are they Reconcilable?", *AIP Conference Proceedings* 810: 217-228.
- Ali, M. M., Majumdar, A. S., Home, D. y A. K. Pan (2006), "On the Quantum Analogue of Galileo's Leaning Tower Experiment", *Classical and Quantum Gravity* 23: 6493-6502.
- Anandan, J. S. (1997), "Classical and Quantum Physical Geometry", *Boston Studies in the Philosophy of Science* 194: 31-52.
- Anderson, J. L. (ed.) (1967), *Principles of Relativity Physics*, New York: Academic Press.
- Bertotti, B. y L. P. Grishchuk (1990), "The Strong Equivalence Principle", *Classical and Quantum Gravity* 7: 1733-1745.
- Brown, H. R. (1997), "On the Role of Special Relativity in General Relativity", *International Studies in Philosophy of Science* 11(1): 67-81.
- Brown, H. R. (2009), "The Behaviour of Rods and Clocks in General Relativity, and the Meaning of the Metric Field", <http://arxiv.org/pdf/0911.4440v1.pdf>.
- Callender, C. y N. Huggett (eds.) (2001), *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in Quantum Gravity*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Camacho, A. (1999), "On a Quantum Equivalence Principle", *Modern Physics Letters A* 14: 275-288.
- Camacho, A. y A. Camacho-Guardian (2008), "Quantal Definition of the Weak Equivalence Principle", <http://arxiv.org/pdf/0811.0378v1.pdf>.
- Ciufolini, I. y J. A. Wheeler (1995), *Gravitation and Inertia*, Princeton: Princeton University Press.

- Dickson, M. (2007), "Non-relativistic Quantum Mechanics", en Butterfield, J. y J. Earman (eds.), *Handbook of the Philosophy of Science. Philosophy of Physics*, Elsevier.
- Einstein, A. (1916), "Über Friedrich Kottlers Abhandlung 'Über Einstein's Äquivalenzhypothese und die Gravitation'", *Annalen der Physik* 51: 639-642.
- Geroch, R. y P. Jang (1975), "Motion of a Body in General Relativity", *Journal of Mathematical Physics* 16: 65-67.
- Ghins, M. y T. Budden (2001), "The Principle of Equivalence", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 32(1): 33-51.
- Greenberger, D. M. y A. Overhauser (1979). "Coherence Effects in Neutron Diffraction and Gravity Experiments", *Reviews of Modern Physics* 51(1): 43-78.
- Hawking, S. W. (1976), "Breakdown of Predictability in Gravitational Collapse", *Physical Review D* 14: 2460.
- Hawking, S. W. y J. B. Hartle (1983), "Wavefunction of the Universe", *Physical Review D* 28: 2960-2975.
- Hessling, H. (1994), "On the Quantum Equivalence Principle", *Nuclear Physics B* 415: 243-261.
- Holland, P. R. (ed.) (1993), *The Quantum Theory of Motion*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Isham, C. J. (1994), "Canonical Quantum Gravity and the Question of Time", en Ehlers, J. y H. Friedrich (eds.), *Canonical Quantum Gravity: From Classical to Quantum, volume Lecture Notes in Physics*, Vol. 434, Berlin: Springer, pp. 150-169.
- Kleinert, H. (1991), "Quantum Equivalence Principle for Path Integrals in Spaces with Curvature and Torsion", en Kaiser, H. J. (ed.), *Proceedings of the XXV International Symposium Ahrenshoop on Theory of Elementary Particles*, <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/9511020v1.pdf>.
- Kuchar, K. (1992), "Time and Interpretations of Quantum Gravity", en Kunsatter, J., Vincent, D. y J. Williams (eds.), *Proceedings of the 4th Canadian Conference on General Relativity and Relativistic Astrophysics*, Singapore: World Scientific, pp. 211-314.
- Lammerzahl, C. (1996), "On the Equivalence Principle in Quantum Theory", *General Relativity and Gravitation* 28: 1043.
- Misner, C. W., Thorne, K. S., y J. A. Wheeler (1973), *Gravitation*, San Francisco: W. H. Freeman.
- Norton, J. D. (1985), "What was Einstein's Principle of Equivalence?", *Studies in History and Philosophy of Science* 16: 203-246.
- Norton, J. D. (1993), "General Covariance and the Foundations of General Relativity: Eight Decades of Dispute", *Report on Progress in Physics* 56: 791-858.
- Ohanian, H. C. (1977), "What is the Principle of Equivalence?", *American Journal Physics* 45(10): 903-909.
- Okon, E. y C. Callender (2011), "Does Quantum Mechanics Clash with the Equivalence Principle—And Does it Matter?", *European Journal of Philosophy of Science* 1: 133-145.
- Piazza, F. (2009), "Modifying Gravity in the Infra-Red by Imposing an 'Ultra-Strong' Equivalence Principle", *International Journal of Modern Physics D* 18: 2181, <http://arxiv.org/pdf/0904.4299v2.pdf>.

- Rickles, D. (2008), "Quantum Gravity: A Primer for Philosophers", en Rickles, D. (ed.), *The Ashgate Companion to Contemporary Philosophy of Physics*, Aldershot, England: Ashgate, pp. 262-382.
- Rickles, D., French, S. y J. T. Saatsi (eds.) (2006), *The Structural Foundations of Quantum Gravity*, Oxford: Clarendon Press.
- Rindler, W. (1977), *Essential Relativity: Special, General, and Cosmological*, 2da. Edición, Springer-Verlag.
- Rovelli, C. (1997), "Halfway Through the Woods: Contemporary Research on Space and Time", en Earman, J. y J. D. Norton (eds.), *The Cosmos of Science*, Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, pp. 180-223.
- Rovelli, C. (2002), "Partial Observables", *Physical Review D* 65:124013.
- Rovelli, C. (2007), "Quantum Gravity", en Butterfield, J. y J. Earman (eds), *Handbook of the Philosophy of Physics*, Amsterdam: North Holland.
- Schlaminger, S., Choi, K. Y., Wagner, T. A., Gundlach, J. H. y E. G. Adelberger, "Test of the Equivalence Principle Using a Rotating Torsion Balance" *Physical Review Letters* 100: 041101.
- Thorne, K. S., Lee, D. L. y A. P. Lightman (1973), "Foundations for a Theory of Gravitation Theories", *Physical Review D* 7(12): 3563-3578.
- Viola, L. y R. Onofrio (2004), "Testing the Equivalence Principle Through Freely Falling Quantum Objects", *Physical Review D* 55(2): 455-462.
- Wald, R. (1984), *General Relativity*, Chicago: The University of Chicago Press.
- Weinberg, S. (ed.) (1972), *Gravitation and Cosmology*, New York: Wiley.
- Weinstein, S. y D. Rickles (2011), "Quantum Gravity", en Zalta, E. N. (ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/quantum-gravity/>.
- Will, C. M. (1993), *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, Cambridge: Cambridge University Press.