



**UN PRIMER CURSO
EN GRAVEDAD CUÁNTICA DE LAZOS**

Rodolfo Gambini y Jorge Pullin

EDITORIAL REVERTÉ

Un primer curso en
gravedad cuántica de lazos

Rodolfo Gambini y Jorge Pullin



EDITORIAL
REVERTÉ

Título de la obra original:

A First Course in Loop Quantum Gravity, First Edition

© R. Gambini y J. Pullin 2011

Edición original en inglés publicada en 2011 por Oxford University Press

Esta traducción está publicada con permiso de Oxford University Press

Para esta traducción D.R. © Reverté Ediciones S.A. de C.V.

Río Pánuco 141, Col. Cuauhtémoc,

Del. Cuauhtémoc, C.P. 06500 México D.F.

Edición en e-book:

© Editorial Reverté. S.A., 2012

ISBN: 978-84-291-9324-4

Edición en papel:

© Editorial Reverté. S.A., 2021

ISBN México: 978-607-7815-08-2

ISBN España: 978-84-291-4385-0

Diseño de cubierta: Jesús Caba

Traducción: Rodolfo Gambini y Jorge Pullin

Corrección de estilo: Michel Torres

Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción, total o parcial, de este libro ni el almacenamiento en un sistema informático, ni la transmisión de cualquier forma o cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia, registro u otros medios sin el permiso previo y por escrito de los titulares del copyright.

Prefacio

La gravedad cuántica de lazos (en inglés *loop quantum gravity*) ha emergido como una posible avenida hacia la cuantización de la relatividad general. Si revisamos los 50 trabajos más citados de todos los tiempos en el repositorio de pre-publicaciones arXiv.org:gr-qc (que incluye toda la gravedad, no sólo gravedad cuántica), de acuerdo con la base de datos SPIRES en SLAC en su última edición (2006) encontraremos que 13 trabajos son sobre gravedad cuántica de lazos. Si bien es un campo de investigación más pequeño que la teoría de cuerdas (en inglés *string theory*), el otro principal enfoque hacia la gravedad cuántica, el número de investigadores trabajando en gravedad cuántica de lazos es significativo. Hasta el momento actual tanto la teoría de cuerdas como la gravedad cuántica de lazos son paradigmas incompletos y como consecuencia han surgido controversias acerca de cual es el enfoque más promisorio. Discutiremos algunas de ellas en este libro.

Mucha gente, incluyendo obviamente estudiantes de la licenciatura de física, está interesada en aprender acerca de gravedad cuántica de lazos. Existen excelentes libros de texto recientes por Rovelli (2007) y Thiemann (2008) para quienes quieran estudiar el tema en profundidad, aproximadamente al nivel de un estudiante avanzado del doctorado en física. Este tipo de tratado es sin embargo inadecuado para estudiantes de grado y para quienes buscan obtener un mínimo entendimiento del tema en un lapso corto de tiempo y sin la profundidad requerida de alguien que quiera conducir investigación en el tema. Una complicación extra es que estos tratamientos a nivel de estudiantes graduados tienen como pre-requisito el saber relatividad general. Esto se convierte en una barrera para muchos lectores. Si bien los recientes libros de Hartle (2003) y Schutz (2009) posibilitan la introducción de la relatividad general a nivel de la licenciatura, la mayor parte de los estudiantes de grado tienen programas de estudio que ponen relatividad general al final de sus carreras (si es que el curso se ofrece), lo cual hace

difícil que tal curso sea un pre-requisito. Algo que no se aprecia a veces es que los estudiantes de grado, sobre todo hacia el final de sus carreras, son individuos ocupados. La mayoría está tomando varios cursos, quizá conduciendo investigación para una tesis de licenciatura, preparándose para los *graduate record examinations* (GRE) para entrar a universidades del extranjero y postulándose a dichas instituciones, incluso agregando a todo esto la necesidad de trabajar. El tiempo disponible para un curso específico es muy limitado.

En estas notas intentaremos introducir la gravedad cuántica de lazos sin suponer conocimiento previo de relatividad general. El único material previo que requeriremos es conocimiento de la teoría electromagnética de Maxwell, un conocimiento mínimo de mecánica lagrangiana y hamiltoniana, relatividad especial y mecánica cuántica. Esto inevitablemente implicará que vamos a tomar muchos atajos en la cobertura de la gravedad cuántica de lazos, pero este será el precio a pagar para introducir el tema de modo que sea accesible a estudiantes de grado en los confines de un curso de un semestre de tres horas de clase a la semana. Algunos estudiantes de grado y otros lectores quizá sientan alguna decepción al no recibir más detalles y terminar con una imagen más completa, pero creemos que la mayoría dará la bienvenida a un libro que es corto y rápido como introducción a un tema que de otro modo aparece como intimidante. Algunos expertos quizá piensen que estamos defraudando a los lectores por sobresimplificar varios temas con el fin de ser expeditivos. Trataremos de tener cuidado de avisar a los lectores cuando estamos sobresimplificando. Dado que estamos sólo introduciendo a los lectores a los temas, siendo deliberadamente superficiales y sin intentar una discusión profunda, no vale la pena tampoco el tratar de ser exhaustivos y discutir todos los temas en detalle. Libros voluminosos tienden a ser intimidantes al lector y creemos que seremos de utilidad a un público más amplio con un libro compacto.

La organización de este libro es la siguiente: en el capítulo 1 discutiremos por qué hay que cuantizar la gravedad. El capítulo 2 hará un repaso de la teoría electromagnética de Maxwell y en particular su formulación relativista. El capítulo 3 introducirá algunos elementos mínimos de relatividad general. El capítulo 4 tratará la formulación hamiltoniana de sistemas mecánicos y campos, incluyendo vínculos. El capítulo 5 discutirá las teorías de Yang–Mills. El capítulo 6 tratará mecánica cuántica y algunos elementos de teoría cuántica de campos. El capítulo 7 discutirá las nuevas variables

de Ashtekar para la relatividad general. El capítulo 8 desarrollará la representación de lazos de la relatividad general. El capítulo 9 presenta la cosmología cuántica como una aplicación. El capítulo 10 discute varias aplicaciones incluyendo la entropía de agujeros negros, el vínculo maestro y las discretizaciones uniformes, espumas de espín, posibles firmas experimentales y el problema del tiempo. El libro termina con un capítulo sobre las controversias que rodean al tema.

Agradecimientos

Nos hemos beneficiado enormemente de comentarios sobre un borrador de la versión inglesa de este libro que nos enviaron varios investigadores, muchos de los cuales obviamente invirtieron bastante tiempo en tratar de ayudarnos: Fernando Barbero, Martin Bojowald, Steve Carlip, Jonathan Engle, Kristina Giesel, Sabine Hossenfelder, Gaurav Khanna, Kirill Krasnov, Daniele Oriti, Saeed Rastgoo, Carlo Rovelli, Parampreet Singh, Madhavan Varadarajan y Richard Woodard. A ellos le ofrecemos nuestra mayor gratitud. Este trabajo fue apoyado en parte por el Programa de Física Gravitatoria de la National Science Foundation de EEUU, el Foundational Questions Institute (fqxi.org), el Horace Hearne Jr. Institute for Theoretical Physics, CCT-LSU, PDT (Uruguay) y la John Templeton Foundation. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan los puntos de vista de la John Templeton Foundation.

A Gabriela y Martha.

Índice general

1. ¿Por qué cuantizar la gravedad?	13
2. Relatividad especial	21
2.1. Espacio y espacio-tiempo	22
2.2. Mecánica relativista	28
2.3. La teoría de Maxwell	32
3. Relatividad general	37
3.1. Introducción	37
3.2. Coordenadas generales y vectores	39
3.3. Curvatura	44
3.4. Ecuaciones de Einstein	47
3.5. Difeomorfismos	52
3.6. La descomposición $3 + 1$	55
3.7. Tríadas	58
4. Mecánica hamiltoniana	63
4.1. Mecánica usual en forma hamiltoniana	63
4.2. Vínculos	64
4.3. Teorías de campos	68
4.4. Sistemas totalmente vinculados	74
5. Teorías de Yang–Mills	79
5.1. Arena cinemática y dinámica	79
5.2. Holonomías	83
6. Teoría cuántica	89
6.1. Cuantización	89

6.2. Elementos de teoría de campos	94
6.3. Teorías de campos interactuantes	99
6.4. Renormalizabilidad	105
7. Las nuevas variables de Ashtekar	111
7.1. Gravedad canónica	111
7.2. Teoría clásica	112
7.3. Acoplamiento de materia	118
7.4. Cuantización	119
8. Representación de lazos	125
8.1. Redes de espín	125
8.2. Operadores geométricos	132
8.3. El vínculo hamiltoniano	139
9. Cosmología cuántica de lazos	147
9.1. La teoría clásica	147
9.2. Cuantización tradicional de Wheeler-deWitt	150
9.3. Cosmología cuántica de lazos	151
9.4. El vínculo hamiltoniano	153
9.5. La teoría semiclásica	154
10. Otros resultados	159
10.1. Entropía de agujeros negros	159
10.1.1. Termodinámica de agujeros negros	159
10.1.2. La radiación de Hawking	163
10.1.3. Entropía de agujeros negros en gravedad cuántica de lazos	167
10.2. Vínculo maestro	170
10.2.1. El programa del vínculo maestro	170
10.2.2. Discretizaciones uniformes	173
10.3. Espumas de espín	175
10.3.1. Integrales de camino en mecánica cuántica	175
10.3.2. Integrales de camino en relatividad general y espumas de espín	178
10.4. ¿Posibles efectos observacionales?	182

10.4.1. Gravedad cuántica y el tiempo de llegada de los rayos de explosiones de rayos gama	183
10.4.2. Limitaciones en la medida de tiempos y longitudes	187
10.5. El problema del tiempo	189
10.5.1. Constantes del movimiento que evolucionan	190
10.5.2. La interpretación de probabilidades condicionales	191
10.5.3. Probabilidades condicionales con constantes del mo- vimiento que evolucionan	192
11. Temas abiertos y controversias	195
Bibliografía	201

Capítulo 1

¿Por qué cuantizar la gravedad?

En nuestro entendimiento actual, existen cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza: las electromagnéticas, las débiles, las fuertes y la gravedad. Todo el mundo conoce el electromagnetismo. Las interacciones débiles juegan un rol en el decaimiento de los núcleos, mientras que las fuertes son las que unen a las partículas que constituyen los núcleos. Las reglas de la mecánica cuántica han sido aplicadas al electromagnetismo y las interacciones débiles y fuertes. Es natural aplicar dichas reglas a esas interacciones dado que juegan un rol en la dinámica de átomos y núcleos y se sabe que en esas escalas la mecánica clásica no da predicciones correctas. Las reglas de la mecánica cuántica no han sido aplicadas en forma satisfactoria a la gravedad hasta el día de hoy. La gravedad cuántica de lazos es un intento de lograr ese objetivo, pero es una teoría incompleta.

Antes de continuar debemos clarificar que de ahora en más la “gravedad” estará descrita no por la teoría de Newton que uno aprende en cursos elementales, sino por la teoría de la relatividad general de Einstein. Numerosas verificaciones experimentales de gran precisión confirman las predicciones de la relatividad general (Will 2005). En dicha descripción, la gravedad no es realmente una “interacción” sino una deformación del espacio-tiempo. El mismo no es más plano y por ende los objetos no se mueven naturalmente en líneas rectas en el espacio-tiempo. Esto da cuenta de lo que uno normalmente llama “fuerza” gravitatoria, la cual no existe como tal. En lenguaje cotidiano reinterpretemos el espacio-tiempo curvo alrededor nuestro como

si generara una fuerza gravitatoria.

Como discutiremos en este libro, el hecho de que la gravedad no es una fuerza sino una deformación del espacio-tiempo hará su cuantización más difícil. Las técnicas usuales de teoría cuántica de campos suponen que uno trabaja con un espacio-tiempo dado, aun cuando el objetivo final sea crear una matriz S que suponga que el espacio-tiempo es plano asintóticamente en el pasado y futuro. Pero en la gravedad el espacio-tiempo es un campo y por ende el objeto a ser cuantizado sin la presencia de un espacio-tiempo de fondo. La carencia de una estructura de fondo se traduce técnicamente en lo que se llama una teoría naturalmente invariante bajo difeomorfismos¹ de los puntos del espacio-tiempo, dado que no hay nada que distinga a un punto de otro. Hay poca experiencia en la aplicación de técnicas de teoría cuántica de campos a teorías invariantes bajo difeomorfismos, excepto en el caso de ciertas teorías topológicas sin grados de libertad locales. En adición a esto, la gravedad no es una fuerza importante en el dominio microscópico, donde uno espera que los efectos cuánticos sean dominantes. Para entender esto, considérese el cociente entre la fuerza gravitacional y electromagnética digamos, entre un protón y un electrón; la gravedad es 10^{-40} veces más débil. Esta es la causa principal de que aún hoy no tenemos un solo experimento que requiera gravedad cuántica para su explicación. Es quizá la primera vez en la historia de la física que uno está tratando de construir una teoría sin guía experimental. Si la gravedad es difícil de cuantizar y los efectos cuánticos se supone que son pequeños en los dominios donde es importante, ¿para qué preocuparnos de cuantizarla? Esta no es una pregunta vacua: se ha tratado de cuantizar la gravedad desde los años 30. Si en casi ochenta años no hemos tenido éxito, ¿por que seguir insistiendo?

Para empezar, aun cuando no haya requerimiento de situaciones experimentales accesibles donde uno necesite cuantizar la gravedad para su descripción, hay muchos procesos físicos que uno puede imaginar que requieren una teoría cuántica de la gravedad para explicarlos. Un simple ejemplo es la colisión de dos partículas a energías lo suficientemente altas para que la gravedad sea relevante. Otro ejemplo que discutiremos más adelante en el libro es el de un agujero negro que se evapora vía radiación de Hawking hasta que su masa se vuelve comparable a la masa de Planck (2×10^{-5} g).

¹Un difeomorfismo es un mapa que asigna a cada punto del espacio-tiempo otro punto y es diferenciable. Esencialmente “mueve los puntos del espacio-tiempo”, como veremos más adelante.

También otro punto que cubriremos más tarde en el libro: ¿qué pasa con el universo cerca del *big bang*? Además está el asunto de la claridad conceptual y la unidad en física que sugiere que cuantizar tres de las cuatro interacciones fundamentales dejando a la gravedad clásica es insatisfactorio. Es de hacer notar que el punto de vista de unificación de teorías (o más precisamente unificación de paradigmas subyacentes a teorías) ha sido muy exitoso históricamente. Por ejemplo, poner a la mecánica de Newton en el mismo pie de igualdad con la electrodinámica de Maxwell condujo a la relatividad especial. Incorporar la gravedad en este paradigma fue lo que motivó a la relatividad general. Incorporar la relatividad especial en la mecánica cuántica llevó a la teoría cuántica de campos. Similarmente, unificar el electromagnetismo y las interacciones débiles condujo a la primer teoría satisfactoria de esas interacciones. En todos los casos poner las teorías en pie de igualdad ha llevado a la predicción de nueva física, con implicaciones dramáticas. Por ejemplo, incorporar la gravedad, una fuerza aparentemente débil, en la relatividad especial condujo a las nociones de agujeros negros y del *big bang*. La teoría cuántica de campos llevó a la noción de partículas y antipartículas que se crean constantemente a partir del vacío.

Además, como no tenemos una teoría completa de la gravedad cuántica, es difícil argumentar con precisión que no existen consecuencias experimentales de la potencial teoría completa. Ciertamente existen fenómenos no explicados relacionados a la gravedad en el universo. Por ejemplo, los fenómenos asociados con la energía oscura y la materia oscura en cosmología, los que —algunos conjeturan— pueden requerir una modificación de la teoría de la gravedad. Si la teoría cuántica de la gravedad tiene que ver con esto está aún por verse.

Pero si ignoramos consideraciones teóricas, ¿existe una necesidad práctica de cuantizar la gravedad? Como argumentamos antes, no existen experimentos que conozcamos requieran de la gravedad cuántica para ser explicados. No existe una respuesta conclusiva a este punto, pero puede argumentarse que aparece como difícil que se pueda tener una teoría consistente de la gravedad clásica interactuando con campos cuánticos. Uno rápidamente se mete en problemas con el principio de incertidumbre. Eppley y Hannah (1977) y Page y Geikler (1981) han propuesto experimentos pensados que ilustran este punto (ver sin embargo a Mattingly (2006) para una evaluación crítica). Por ejemplo, consideremos un objeto cuántico en un estado con una

incertidumbre muy pequeña en la cantidad de movimiento y por ende una gran incertidumbre en su posición. Medimos su posición con gran precisión usando un paquete de ondas gravitatorias de perfil muy agudo. Esto requerirá una superposición de ondas que involucrará ondas gravitatorias de muy alta frecuencia, que a pesar de ello, en gravedad clásica pueden tener una cantidad de movimiento arbitrariamente pequeña. A través de la medición de la posición con gran precisión, la incertidumbre en la cantidad de movimiento de golpe se ha transformado en muy grande. Habremos producido potencialmente un gran cambio del momento del sistema total, lo que sugiere que se podría violar la conservación de la cantidad de movimiento.

Estos experimentos no son prueba conclusiva, dado que no pueden hacerse en la práctica (el ejemplo de más arriba tiene la dificultad de que las ondas gravitatorias son muy difíciles de producir y detectar). Carlip (2008) ha argumentado que para acoplar consistentemente un campo gravitatorio clásico a un sistema cuántico se requerirán modificaciones no lineales de la mecánica cuántica que podrían ser verificadas experimentalmente en el futuro.

Además de esto, los dos paradigmas principales de la física, la relatividad general y las teorías cuánticas de campos, tienen problemas en sí mismos. En relatividad general poderosos teoremas matemáticos demostraron en los años 60 y 70 que bajo condiciones genéricas, los espacio-tiempos desarrollan singularidades. Ejemplos de tales singularidades son la gran explosión (en inglés *big bang*) que creemos está presente en el origen del universo y las singularidades que aparecen en el interior de los agujeros negros. Una singularidad genéricamente está asociada con una divergencia de cantidades que indican que la teoría ha sido llevada más allá de su dominio de aplicabilidad. Cerca de las singularidades uno suele encontrar densidades de energía que no son compatibles con un tratamiento puramente clásico. La expectativa es entonces que una teoría que unifique la teoría cuántica de campos y la relatividad general pueda entregar una nueva perspectiva, y a lo mejor eliminar las singularidades completamente.

Similarmente, la teoría cuántica de campos tiene el problema de que muchos operadores no son funciones sino lo que matemáticamente se conoce como distribuciones, como la delta de Dirac. Cuando uno estudia interacciones tiene que considerar productos de estos operadores y tales productos no están bien definidos. Algunas de las divergencias en teoría cuántica de campos pueden ser eliminadas redefiniendo las constantes de acoplamiento

a través de un procedimiento llamado renormalización, y se pueden usar las teorías resultantes para hacer predicciones físicas. A pesar de esto, como teorías matemáticas, las teorías cuánticas de campo están bastante mal definidas y deben ser tratadas usando series perturbativas que no son realmente convergentes (lo que técnicamente se conoce como series asintóticas). Las singularidades en teoría cuántica de campos aparecen debido a la naturaleza distribucional de los campos y operadores. Es claro que si uno cambia la naturaleza del espacio-tiempo, el carácter distribucional de los campos puede cambiar. Esto puede abrir la posibilidad de eliminar las singularidades de las teorías cuánticas de campos.

Resumiendo los últimos dos puntos: los paradigmas actuales para la gravedad y para las teorías de campo están incompletos e incluyen singularidades. Aparece la clara posibilidad de que unificando estos paradigmas las singularidades puedan ser eliminadas. Adoptaremos el punto de vista de que la estética, los experimentos pensados mencionados, la atractiva posibilidad de que la unificación resuelva los problemas de los paradigmas aislados de la gravedad y la teoría cuántica de campos, son suficiente motivación para decir que es necesario cuantizar la gravedad.

La discusión previa también resalta algunos de los problemas abiertos del campo que la gente está tratando de atacar en investigaciones actuales. ¿Hay una singularidad en el *big bang* o evolucionó nuestro universo de un universo previo? De ser así, ¿quedan resabios de información provenientes del universo previo? Tal modificación potencial del *big bang*, ¿es capaz de influenciar el resto de la evolución cosmológica, en particular cómo se desarrolló la inflación, la nucleosíntesis y la formación de estructura en el universo? ¿Qué pasa dentro de un agujero negro cuando la curvatura se vuelve grande? ¿Se conecta uno con otra región del espacio-tiempo? Sabemos ahora que los agujeros negros radían como cuerpos negros y eventualmente se evaporan. ¿Cómo se describe tal evaporación en detalle? Dado que el producto final de la evaporación es radiación térmica pura sin ninguna característica distintiva, ¿qué pasó con toda la información de la materia que creó el agujero negro? ¿Existen consecuencias fenomenológicas de cuantizar la gravedad que puedan ser observadas? Tocaremos todos estos tópicos en el capítulo sobre aplicaciones hacia el final del libro.

Discutamos brevemente la historia del campo. No intentaremos una historia detallada aquí, simplemente algunos antecedentes de fondo. Un buen tratamiento conciso de la historia de la gravedad cuántica está dado por

Rovelli (2002). Si bien uno puede encontrar referencias a la cuantización de la gravedad en trabajos de Einstein en 1916 y luego Rosenfeld y Bronstein escribieron en los años 30 los primeros trabajos detallados sobre el tema, intentos significativos de cuantizar la gravedad comenzaron a principios de la década de los 60, cuando aparecieron tres distintas líneas de ataque. Una era la cuantización canónica, que es la que seguiremos en líneas generales en este libro, dado que es la que más se parece a los tratamientos de mecánica cuántica de libros de texto para estudiantes de grado con los que los lectores pueden tener familiaridad. En este enfoque uno tiene que dividir el espacio-tiempo en espacio y tiempo y, como veremos, eso causará complicaciones. Tomó bastante tiempo entender como formular en forma hamiltoniana teorías como la que describe la gravedad. Daremos una idea en este libro del origen de estas dificultades. Otro enfoque fue estudiar la teoría perturbativamente, suponiendo que el espacio-tiempo es plano con pequeñas perturbaciones. Esta clase de enfoque perturbativo funcionó bien para el electromagnetismo y las interacciones débiles y fuertes (en este último caso al menos en ciertos regímenes particulares). En la gravedad este enfoque encontró dificultades. En los casos del electromagnetismo y las interacciones débiles y fuertes uno puede formular la teoría de modo que la constante de acoplamiento no tiene dimensiones (en electromagnetismo, por ejemplo, es la constante de estructura fina). En la gravedad eso no es posible. Tener una constante de acoplamiento con dimensiones implica que si uno hace desarrollos en serie en potencias de la constante de acoplamiento como en teoría de perturbaciones, debe agregar potencias extra de la cantidad de movimiento para mantener las expresiones con una dimensionalidad uniforme. Las potencias extras de la cantidad de movimiento hacen que las integrales que resultan en el desarrollo perturbativo diverjan. Es posible corregir las divergencias modificando la acción, pero ello requiere un número infinito de modificaciones para resolver todas las divergencias que aparecen. El tener que especificar un número infinito de términos a mano implica que la teoría no tiene poder predictivo. Este problema es conocido como no-renormalizabilidad. Stelle (1977) mostró que uno puede resolver el problema agregando términos de orden más alto en la acción, pero la teoría de gravedad resultante tiene propiedades no-físicas. Un buen resumen del enfoque perturbativo está dado por Woodard (2009). Presentaremos una discusión altamente simplificada del problema en este libro. El tercer enfoque que se intentó es el conocido como la integral de camino de Feynman.

Este enfoque requiere sumar amplitudes de probabilidad sobre todas las trayectorias clásicas, lo que en el caso de la gravedad quiere decir sumar sobre todos los espacio-tiempos posibles. Esto ha probado ser formidablemente difícil. Notablemente, técnicas de gravedad cuántica de lazos están probando ser útiles para definir la integral de camino de manera rigurosa, lo que constituye un enfoque llamado *espumas de espín*. Lo cubriremos sólo muy brevemente en este libro.

Al mismo tiempo que estos enfoques encontraban dificultades, algunos investigadores seguían una línea paralela de pensamiento, aquella de la unificación de las interacciones en una única teoría. Una motivación para esto es la dada por las interacciones débiles: resulta que uno no puede cuantizar las interacciones débiles por sí solas, su cuantización sólo es posible cuando se las integra en una teoría que las unifica con el electromagnetismo. ¿Podría ser similar la situación en la gravedad? ¿Podría ser que integrando la gravedad con las otras interacciones ayude con su cuantización? Este punto de vista tiende a ser preferido por investigadores con trayectoria de físicos de partículas elementales. A través de los años ha llevado a una serie de teorías que intentan unificar la gravedad con las otras interacciones y a la vez proveer una teoría cuántica de la gravedad. Los distintos intentos incluyen las llamadas teorías de Kaluza–Klein, supergravedad y más recientemente, la teoría de cuerdas y la teoría M. No intentaremos discutir estos intentos aquí, pero puede consultarse el libro de texto sobre teoría de cuerdas recientemente presentado por Zwiebach (2009) a nivel de la licenciatura.

Además de los intentos descritos arriba, existen otras ideas que son estudiadas por grupos más pequeños de investigadores. Estas incluyen las triangulaciones dinámicas causales, los conjuntos causales, los modelos de matrices, el cálculo de Regge, twistores, geometrías no-conmutativas y el escenario de seguridad asintótica. No discutiremos estas ideas en este libro, pero recomendamos la introducción dada en el libro de Smolin (2002).

A mediados de los 80, Ashtekar notó que podía reescribir las ecuaciones de la gravedad en términos de variables que hacían a la teoría parecida a las teorías de física de partículas. Esto alentó esperanzas de que las técnicas de la física de partículas se pudieran importar a la cuantización de la gravedad. El enfoque resultante para la cuantización de la gravedad es conocido como gravedad cuántica de lazos y es el enfoque que seguiremos en este libro. Es un intento de entender la cuantización de la gravedad por sí misma, sin unificarla con las otras interacciones.