

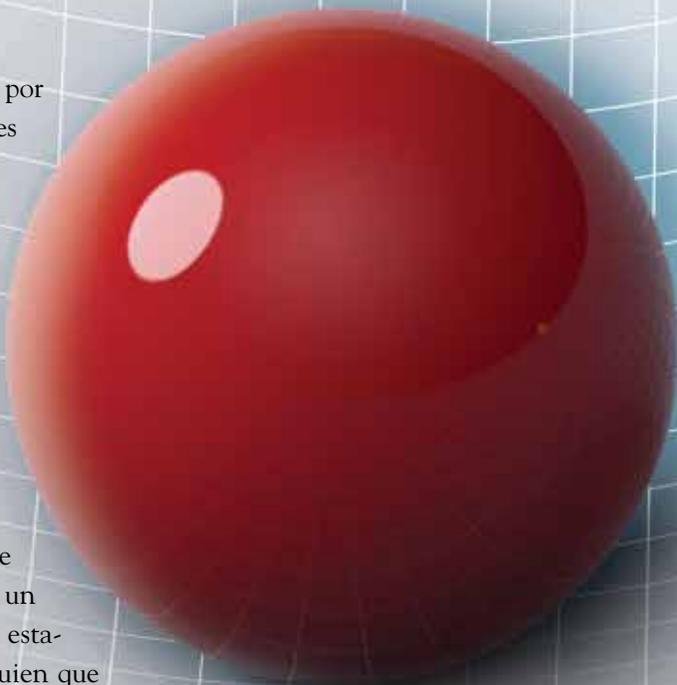
Yuri Bonder y Daniel Sudarsky

El espacio y el tiempo en el microscopio

La relatividad general, que es la teoría aceptada de la gravedad, es incompatible con la mecánica cuántica, con la que podemos describir a la materia. Esto sugiere que debe existir una teoría más fundamental. En este artículo describimos una idea para detectar algunos efectos de dicha teoría fundamental, así como el experimento que unos colegas realizaron para poner a prueba tal propuesta.

El santo grial de la física teórica

A finales del siglo XIX la física pasaba por una crisis para encontrar explicaciones sobre la gravedad. Para entender bien esta crisis, y la revolución científica con la que se resolvió, empezaremos por recordar dos conceptos. El primero es que, en general, la velocidad de un objeto depende de cómo se está moviendo la persona que la mide, o sea, el observador. Este hecho fue conocido desde antes de la formulación de las leyes de Newton en el siglo XVII y tiene un papel central en la física clásica. Es fácil pensar en situaciones cotidianas en las que esto sucede; por ejemplo, la velocidad de un tren medida por alguien que está parado en la estación es menor que la velocidad que mide alguien que va viajando en otro tren en la dirección opuesta. La segunda noción tiene que ver con las ondas y la manera en la que éstas se propagan. A finales del siglo XIX se pensaba que todas las ondas viajan sobre un medio. Por ejemplo, si tiramos una piedra a un estanque, se forma una



ola que se aleja del punto donde cayó la piedra; esta ola es una onda, y el agua es el medio en el que se propaga. Otro ejemplo es el sonido: una onda que usualmente se propaga en el aire. Pero si alguien quitara todo el aire de un cuarto y dejara caer un vaso de vidrio, el estruendo causado por la ruptura del vaso no se escucharía, pues no hay un medio en el cual el sonido pueda viajar.

Ahora sí, regresemos a la crisis que aquejaba a la física entonces. La teoría electromagnética explicaba que la luz es una onda y predecía con exactitud su velocidad de propagación, de casi 300 000 kilómetros por segundo. Sin embargo, no se entendía con respecto a qué observadores es que la velocidad de la luz adquiere tal valor.

Una posibilidad es que, como ocurre con cualquier otra onda, dicha velocidad sea la de la onda con respecto al medio en el que se propaga. En el caso de la luz, dicho medio tendría que llenar todo el Universo, pues nos llega luz desde estrellas muy lejanas y de diversas direcciones. El problema era que no se lograban detectar los efectos relacionados con la existencia de ese medio en el que –se suponía– viaja la luz. Además, no se pudieron medir las variaciones en la velocidad de la luz debidas al movimiento de la Tierra respecto a ese medio.

La crisis fue resuelta por Albert Einstein en 1905 con su teoría de la relatividad especial. Dicha teoría supone que la luz no requiere de un medio para propagarse y afirma que la velocidad de la luz tiene el mismo valor para todos los observadores, independientemente de cómo se estén moviendo (para ser más precisos, hay que limitarse a **observadores inerciales**). Este último aspecto, que va contra toda intuición, conlleva a predecir que la longitud de los objetos depende de si los mira un observador que está en reposo respecto al objeto o si el observador se mueve respecto a éste.

Algo parecido sucede



Observadores inerciales

Aquéllos para los que todas las partículas libres de fuerzas se mueven en líneas rectas y con velocidades constantes.





con los intervalos de tiempo. De hecho, en la relatividad especial, el espacio y el tiempo se combinan cuando cambia el estado de movimiento del observador, de manera análoga a como el ancho, el largo y la profundidad de un objeto se combinan al cambiar la orientación del observador. Por ejemplo, imagine-

Recuadro 1. Algunos efectos predichos por la relatividad especial

La contracción de longitudes y la dilatación de intervalos temporales son algunos de los efectos predichos por la relatividad especial. Por ejemplo: si un tren pasa frente a una estación con una velocidad de un millón de kilómetros por hora y un pasajero que está adentro mide que el tren tiene una longitud de 50 metros, entonces —de acuerdo con el fenómeno de contracción de longitudes— un guardia que esté parado en la plataforma verá que el tren tiene 0.025 milímetros menos que los 50 metros medidos por el pasajero. Por otra parte, si el pasajero dentro del tren cierra sus ojos por un segundo, para el guardia —de acuerdo con el fenómeno de dilatación de intervalos temporales—, el pasajero habrá cerrado sus ojos durante 1.000 000 5 segundos. En repetidas ocasiones este tipo de predicciones se ha probado en experimentos, por lo que la relatividad especial constituye una parte importante de la física hoy establecida.



mos que alguien mira una sandía y, desde su posición, determina que la sandía tiene un largo, un ancho y una cierta profundidad. Si el observador cambia su posición, va a medir otros valores del largo, el ancho y la profundidad de la sandía, y estas mediciones son una combinación de los valores determinados la primera vez. De la misma forma, como resulta más práctico pensar en el espacio como un todo (y no en el ancho, el alto y la profundidad como conceptos independientes), es útil sustituir a las nociones de *espacio* y *tiempo* por un ente unificado: el espacio-tiempo (véase el Recuadro 1).

Adicionalmente, la relatividad especial prohíbe que cualquier cosa viaje más rápido que la luz. Esto entra en conflicto con la teoría de la gravedad de Newton —que era la teoría vigente a principios del siglo xx—, la cual asume que los efectos gravitacionales se transmiten con velocidad infinita. Por ello, Einstein se dio a la tarea de formular una teoría de la gravedad que fuera compatible con la relatividad especial, misma que completó en 1915 y que conocemos hoy como la teoría de la relatividad general. En esta teoría, el espacio-tiempo es un ente dinámico que afecta a y puede ser afectado por la materia, y donde la gravitación es simplemente la deformación del espacio-tiempo: para ser más precisos, su *curvatura*.

Una manera usual para visualizar lo que explica la relatividad general es representando al espacio-tiempo como una sábana que está sujeta por sus extremos hasta quedar tensa. Sobre esta sábana una canica rodará siguiendo una línea recta. Sin embargo, si ponemos una bola de boliche en el centro de la sábana, ésta se curvará y la canica no podrá seguir viajando en línea recta. Más bien, si ponemos la canica a rodar con la velocidad adecuada, se quedará dando vueltas alrededor de la bola de boliche. Algo similar sucede en el espacio-tiempo: en ausencia de grandes cuerpos, los objetos viajan en líneas rectas, pero cerca de objetos que tienen mucha masa, el espacio-tiempo se curva y esto altera las trayectorias de los objetos más livianos, lo que identificamos como los efectos de la gravedad.

La relatividad general predice fenómenos que se han verificado en experimentos y por medio de observaciones astronómicas, por lo que parece ser una

teoría acertada para explicar la gravedad. Sin embargo, la mecánica cuántica es la única teoría consistente que tenemos para describir a la materia, que es la causante de la curvatura del espacio-tiempo, y esta teoría permite situaciones que no pueden tratarse en el marco de la relatividad general. Para ejemplificar este tipo de situaciones hay que tomar en cuenta que, según la mecánica cuántica, los objetos suelen tener una posición indefinida (véase el Recuadro 2); pero ¿cómo es el espacio-tiempo generado por un objeto cuya posición no está bien definida? Esta pregunta no puede ser contestada de acuerdo con la relatividad general y, por consiguiente, debe existir una nueva teoría –de antemano llamada teoría de la gravedad cuántica– que permita entender situaciones como la que acabamos de describir.

Sin duda, encontrar una teoría de la gravedad cuántica es uno de los retos más importantes de la física contemporánea. La falta de experimentos que sirvan como guía para construir dicha teoría complica aún más el panorama. Por ello, algunos físicos nos hemos dedicado a tratar de encontrar pistas experimentales sobre la naturaleza cuántica de la gravedad. El presente artículo está basado en nuestra experiencia en dicha línea de investigación.

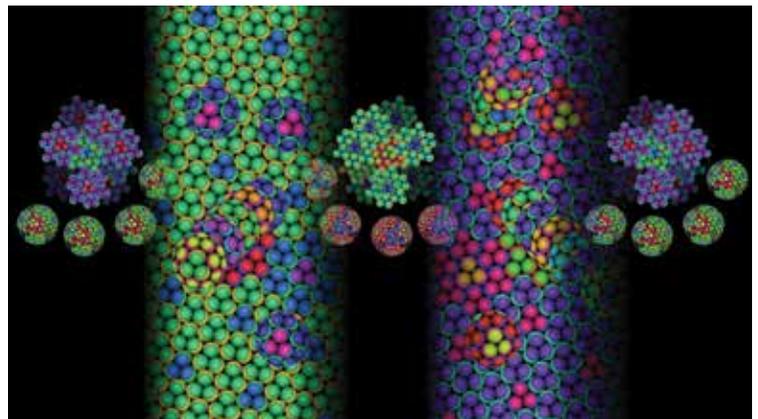
■ En busca de los efectos de la gravedad cuántica

Por mucho tiempo se creyó que era imposible encontrar los efectos asociados con la gravedad cuántica. Esto se debe a que inicialmente se estimó que tales efectos serían únicamente observables al alcanzar la llamada energía de Planck. Para entender cuál es la magnitud de la energía de Planck es útil compararla con la máxima energía alcanzada en un experimento. Para ejemplificar, el mayor acelerador de partículas que se ha construido es el Gran Colisionador de Hadrones: un aparato de 27 kilómetros de circunferencia que se encuentra en la frontera de Suiza y Francia. En dicho acelerador se alcanzan energías sorprendentes que han permitido hallazgos científicos de suma importancia; sin embargo, dichas energías son alrededor de 1 000 000 000 000 000 (mil billones) de veces menores a la energía de Planck.

Recuadro 2. Cuestiones básicas de mecánica cuántica

La mecánica cuántica describe a la materia a escalas microscópicas. Uno de los problemas que motivó su construcción es el de la estabilidad de los átomos: si se supone que los electrones giran alrededor del núcleo, terminarían juntándose con los núcleos en tiempos extremadamente pequeños, lo que impediría que la materia tome las formas que conocemos. Para solucionar este problema, la mecánica cuántica propone que el electrón, en lugar de dar vueltas alrededor del núcleo, está en una situación en la que su posición es indefinida.

Uno de los aspectos centrales de esta teoría es que los sistemas físicos no tienen los valores de sus atributos bien definidos. Este aspecto se ve reflejado en el principio de incertidumbre propuesto por Werner Heisenberg, que dice que entre más determinada es la posición de un sistema, más indeterminada será su velocidad, y viceversa.



Más aún, es posible estimar que para que un acelerador de partículas alcance la energía de Planck, tendría que ser mucho más grande que nuestro sistema solar, por lo que en la práctica es imposible llegar a dicha energía en ese tipo de experimentos.

No obstante, las expectativas de encontrar efectos asociados con la naturaleza cuántica de la gravedad cambiaron como resultado de la siguiente idea: supongamos que en la analogía de la sábana descrita arriba, comprimimos la bola de boliche sin reducir su masa (es decir, reducimos su tamaño conservando la cantidad de materia). Conforme la bola se comprime, la sábana alrededor de la bola se irá curvando más y más hasta que los hilos se separen. En esa



situación ya no es adecuado describir a la sábana como un objeto continuo, sino que hay que hacerlo con más detalle y tomar en cuenta que la sábana está compuesta de hilos. De hecho, en varias teorías que son candidatas a explicar la gravedad cuántica se predice que el espacio-tiempo a nivel microscópico, en lugar de ser un ente continuo, está formado por pequeñísimos bloques. A dichos bloques microscópicos los llamaremos *gránulos* y nos referiremos al conjunto de estos gránulos como *granularidad*.

Tomando esto en cuenta, varios grupos propusieron buscar nuevos fenómenos asociados con la naturaleza cuántica de la gravedad a través de la granularidad. Por supuesto, los efectos de la granularidad no pueden ser vistos en un microscopio, pues la escala de Planck, traducida a unidades de longitud, corresponde a 0.000 000 000 000 000 000 000 000 000 001 centímetros –que es mucho más pequeña de lo que es capaz de distinguir el mejor microscopio existente–. Sin embargo, surgieron varias ideas para detectar indirectamente la presencia de la granularidad.

La propuesta que dominó esta exploración se centró en una aparente incompatibilidad de la granularidad con la relatividad especial. La idea básica es que si el espacio-tiempo está hecho de gránulos, entonces podría determinarse si algo se está moviendo respecto a ellos. O sea, los gránulos definirían una velocidad especial que corresponde a la de un observador para el cual éstos están en reposo. El punto es que, de ser así, el comportamiento de las partículas podría depender de su velocidad respecto a los gránulos, lo cual tendría efectos muy singulares. Por ejemplo, se espera que tales efectos estén modulados por periodos de un año o un día, ya que el laboratorio donde se hacen los experimentos, al estar sobre la Tierra, se mueve respecto al sistema de los gránulos en tales periodos.

■ La esperanza se desvanece

■ La herramienta teórica que junta a la relatividad especial y a la mecánica cuántica –la llamada teoría cuántica de campos– describe a la materia y a todas las interacciones, menos a la gravedad. Según esta teoría, todos los procesos físicos están acompañados

de “procesos virtuales” que involucran partículas de energías arbitrariamente grandes, las cuales se emiten y reabsorben en pequeñísimas fracciones de segundo. Estos procesos son responsables de algunos de los efectos físicos que conocemos con mayor precisión, por lo que se tiene una enorme confianza en esta teoría. Un ejemplo es el cálculo del momento magnético del electrón, esto es, la forma como responde un electrón a los campos magnéticos, y que se predice acertadamente con hasta 15 cifras decimales.

Motivados por el hecho de que las partículas virtuales pueden sobrepasar la energía de Planck, algunos años después del auge de la búsqueda de los efectos de la granularidad –y como parte de una colaboración en la que participó uno de los autores– se estudiaron las consecuencias de una granularidad que tiene asociada una velocidad especial. A partir de dicho análisis, utilizando la teoría cuántica de campos, se concluyó que los efectos de tal granularidad se hubieran manifestado, de manera clara y contundente, en experimentos previamente realizados. Por lo tanto, dado que esos efectos no se han detectado, se puede inferir que si existe una granularidad, ésta no puede estar asociada con una velocidad especial. Esto a su vez sugiere que los gránulos –sean lo que sean– no son fáciles de imaginar, pues, por lo visto, no es posible darle sentido a la noción de moverse respecto a ellos.

■ Nuevo enfoque

■ Dicho resultado nos llevó, junto con otros colegas de la Universidad Nacional Autónoma de México, a proponer nuevas maneras en que pudiera manifestarse una granularidad del espacio-tiempo que se ve igual para todos los observadores, independientemente de su velocidad. Esto es difícil de realizar puesto que ni siquiera podemos concebir a ese tipo de granularidades. Por eso optamos por basarnos en analogías.

La idea básica de esta propuesta se puede entender si consideramos lo que pasa cuando miramos una construcción hecha de ladrillos rectangulares. Si la construcción –como un todo– también tiene una estructura rectangular (como la Gran Muralla



Figura 1. La Gran Muralla China y las pirámides de Egipto están construidas con ladrillos rectangulares, pero tienen formas muy distintas. En el primer caso los ladrillos encajan bien con la forma de la muralla, mientras que en el segundo caso su presencia es fácil de notar por la incompatibilidad de las formas.

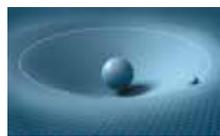
China), es difícil notar la presencia de los ladrillos, pues su forma encaja perfectamente con la forma de la muralla. Por el contrario, si con los mismos ladrillos rectangulares se edifica algo con una forma distinta (como las pirámides de Egipto), entonces los ladrillos no se ajustan a las formas oblicuas de las pirámides, por lo que su presencia se nota a simple vista como una rugosidad en la superficie. De hecho, en general, las construcciones tienen regiones donde los ladrillos encajan mejor que en otras, por lo que la rugosidad cambia dependiendo de la forma de cada parte de la construcción.

La lección de la analogía anterior es que la presencia de los gránulos del espacio-tiempo (representados por los ladrillos) podría manifestarse –y la podríamos, en principio, detectar– en regiones donde las características de los gránulos no coinciden con las características del espacio-tiempo (según la analogía, con la forma de las pirámides). De acuerdo con lo discutido más arriba, suponemos que los gránulos tienen la notable propiedad de no determinar por sí mismos velocidades especiales; dado que la curvatura del espacio-tiempo determina velocidades especiales, concluimos que existe la posibilidad de

que la estructura granular se desarregle en las regiones curvadas del espacio-tiempo. Por ello, los efectos de la granularidad únicamente podrían manifestarse en regiones con curvatura espacio-temporal.

El siguiente paso fue proponer, a través de expresiones matemáticas, un modelo concreto en el que se describiera cómo la granularidad, a través de la curvatura del espacio-tiempo, podría afectar a las partículas. En el modelo desarrollado únicamente se ven afectadas las partículas que tienen **espín** y que, por esta propiedad, se les puede asociar una dirección. Para imaginar el tipo de efectos predichos por el modelo, pensamos en otra analogía: ¿qué ocurre si tiramos cerillos en la arena? En las regiones donde la arena ha sido aplanada, los cerillos caerán apuntando en todas direcciones. Sin embargo, si tiramos los cerillos en regiones donde la arena tiene pequeñas salientes, como en una playa, la forma de la arena modificará la orientación de los cerillos. Algo parecido sucede en nuestro modelo: la orientación del espín de las partículas depende de la curvatura del espacio-tiempo en la región donde está la partícula. De esta forma, si conocemos la curvatura del espacio-tiempo, sabemos –de acuerdo con el modelo– en

Espín
Propiedad de las partículas microscópicas que puede pensarse como una rotación intrínseca.



qué dirección tiende a apuntar el espín de la partícula, lo cual puede ser medido. Por ello, el modelo pudo ser puesto a prueba con un experimento, que describimos a continuación.

Comienza la búsqueda

Cuando un científico propone un nuevo modelo y quiere buscar sus efectos en un experimento, por lo general se enfrenta con serias dificultades. En nuestro caso estas dificultades resultaron ser muy grandes, aunque, afortunadamente, no infranqueables.

El aspecto central de la propuesta —es decir, el hecho de que los efectos de la granularidad estarían asociados con la curvatura espacio-temporal— limitaba el tamaño de su manifestación porque la curvatura es muy pequeña en la Tierra. Sin embargo, se logró controlar parte de la curvatura espacio-temporal colocando grandes bloques móviles de plomo en la cercanía del experimento, lo que facilita la detección de los efectos, debido a que se conoce de antemano el comportamiento de la señal buscada. El segundo aspecto —el hecho de que los efectos predichos están asociados al espín de las partículas— parecía ser un obstáculo mayor, porque las partículas con espín son afectadas por los campos magnéticos y, por ello, algunos campos magnéticos prácticamente imperceptibles podrían simular el efecto buscado.

Pudimos resolver estos impedimentos gracias a que nuestros colegas del grupo experimental Eöt-Wash, de la Universidad de Washington, que es el grupo líder a nivel mundial en mediciones de la gravedad a escalas pequeñas, diseñaron un dispositivo que no es sensible a los efectos magnéticos pero que contiene muchas partículas cuyos espines están alineados (1 000 000 000 000 000 000 000, es decir, mil trillones de partículas). Para diseñar este sensor, los científicos del grupo Eöt-Wash tuvieron que combinar dos materiales que reaccionan de forma distinta al campo magnético: en uno de los materiales dicha reacción se debe al espín de los electrones, mientras que en el otro material la respuesta es causada por el movimiento de los electrones alrededor de los núcleos atómicos. Así, al poner dicho sensor en una región donde se conoce la curvatura del espacio-tiempo, los espines de las partículas en el sensor, de acuerdo con el modelo propuesto, intentarán alinearse con las direcciones asociadas a dicha curvatura, lo que se traduce en una fuerza sobre el sensor. Lo que nuestros colegas buscaron en el experimento eran los efectos de dicha fuerza que, dada la manera como se colocó el sensor, generarían una rotación del dispositivo, por lo que su posición fue monitoreada con mucho cuidado (véase Figura 2).

En el experimento no se encontró, incluso con el nivel de precisión logrado, ninguna señal del efecto

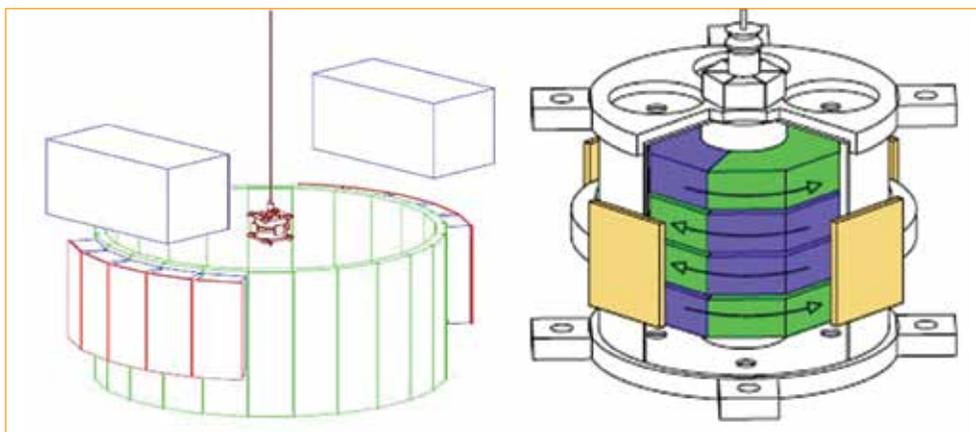


Figura 2. Esquema del experimento realizado para buscar los efectos del modelo que propusimos. En la imagen de la izquierda se presenta el sensor colgado de un hilo junto con los bloques de plomo (en azul) que contribuyen a generar la curvatura espacio-temporal. Los bloques verdes y los rojos con azul tienen la función de aislar al experimento de señales externas. En la imagen de la derecha se muestra el detector con más detalle. Éste está formado por dos materiales distintos (en verde y en morado); las flechas indican la reacción al campo magnético. El sensor está rodeado por un sistema de montaje en el que se colocaron espejos (cuadrados dorados) usados para buscar rotaciones minúsculas.

esperado. Sin embargo –como sucede frecuentemente en la ciencia–, esto debe considerarse sólo como el inicio de una búsqueda que seguramente continuará, ya que se demostró que se trata de una empresa viable. Independientemente del resultado, para nosotros fue muy gratificante que se llevase a cabo un experimento para probar nuestra propuesta, lo cual no ocurre con frecuencia en el área en la que trabajamos.

Confiamos en que a más largo plazo enfrentaremos una de las siguientes opciones: 1) que al probar con mayor precisión se encuentre el tipo de señal que hemos considerado, o 2) que su ausencia sirva para limitar aún más las posibilidades de corroborar que el espacio-tiempo está constituido de algún tipo de gránulos, como lo sugieren varios enfoques con los que se trata de elucidar los misterios de la gravedad cuántica. Habrá que seguir atentos a los desarrollos experimentales y teóricos que emanen de estas ideas.

Yuri Bonder Grimberg

Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México.

bonder@nucleares.unam.mx

Daniel Eduardo Sudarsky Saionz

Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México.

sudarsky@nucleares.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Aguilar, P., D. Sudarsky y Y. Bonder (2013), “Experimental search for a Lorentz invariant spacetime granularity: Possibilities and bounds”, *Physical Review D*, 87:064007.
- Bonder, Y. y D. Sudarsky (2008), “Quantum gravity phenomenology without Lorentz invariance violation: a detailed proposal”, *Classical and Quantum Gravity*, 25:105017.
- Bonder, Y. y D. Sudarsky (2009), “Unambiguous quantum gravity phenomenology respecting Lorentz symmetry”, *Reports in Mathematical Physics*, 64:169-184.
- Bonder, Y. y D. Sudarsky (2010), “Searching for spacetime granularity: Analyzing a concrete experimental setup”, *American Institute of Physics Conference Proceedings*, 1256:157-163.
- Collins, J., A. Pérez, D. Sudarsky, L. F. Urrutia y H. Vucetich (2004), “Lorentz Invariance and Quantum Gravity: An Additional Fine-Tuning Problem?”, *Physical Review Letters*, 93:191301.
- Corichi, A. y D. Sudarsky (2005), “Towards a new approach to quantum gravity phenomenology”, *International Journal of Modern Physics D*, 14:1685-1698.
- Mattingly, D. (2005), “Modern Tests of Lorentz Invariance”, *Living Reviews in Relativity*, 8:5.
- Terrano, W. A., B. R. Heckel y E. G. Adelberger (2011), “Search for a proposed signature of Lorentz-invariant spacetime granularity”, *Classical and Quantum Gravity*, 28:145011.