

Más allá de la relatividad especial

José Luis Cortés

Departamento de Física Teórica

Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, Spain

Resumen

Se presenta un resumen de algunas alternativas que se han seguido recientemente para explorar la posibilidad de ir más allá de la teoría de la relatividad especial de Einstein.

1 Preámbulo

Dentro del mayor respeto a la gran obra que festejamos y con toda modestia se va a tratar de defender una actitud que puede resumirse en el proverbio latino “Audaces fortuna juvat” (la fortuna ayuda a los audaces). Es conveniente evitar equívocos desde el comienzo aclarando que no se va a plantear una discusión sobre posibles inconsistencias ó problemas conceptuales de la relatividad especial. El objetivo de este ensayo es plantear una propuesta de actitud frente a la relatividad especial, después de cien años de comprobaciones cada vez más precisas de su validez, que es la de mantener los ojos abiertos a posibles ideas teóricas y a observaciones/experimentos que nos puedan llevar a identificar que hay más allá.

El esquema de esta presentación comienza con una discusión de los motivaciones para considerar la posibilidad de ir más allá de la relatividad especial de Einstein. A continuación se presentan por este orden los argumentos teóricos, fenomenológicos y experimentales en favor de seguir esta línea de investigación y finalmente se da una perspectiva del posible futuro.

2 Motivación

Al ampliar nuestro poder de observación puede ser necesario ir más allá de los principios que hemos utilizado hasta ahora incluyendo la posibilidad de que los principios de simetría

sean sólo aproximados. Después de la teoría de Newton de la interacción gravitatoria, la relatividad especial es la teoría en Física que más está perdurando.

Otro motivo para intentar ir más allá de la relatividad especial es el de abrir nuevos caminos para resolver uno de los mayores problemas probablemente no resueltos en Física que es el de hacer compatible la teoría de la gravedad con la teoría cuántica. Digo probablemente porque en un sentido formal sí se tiene una solución en el marco de lo que se conoce como teoría de cuerdas aunque no está claro que ésta sea la solución relevante en Física. El hecho de que después de veinte años de la “revolución” en teoría de cuerdas que la convierte en una teoría del todo siga sin haber una comprobación experimental, ó una propuesta de un experimento que permita establecer su no validez, hace dudar de su relevancia como teoría física. Por supuesto su relevancia como teoría matemática y/ó matemática-física es indudable.

Del mismo modo que la relatividad especial surgió a partir de la incompatibilidad de la mecánica newtoniana y el electromagnetismo podría ocurrir que la incompatibilidad entre gravedad y mecánica cuántica sea el origen de un nuevo salto más allá de la relatividad especial correspondiendo a una violación de la invariancia Lorentz (**LIV**). Por violación de invariancia Lorentz queremos decir que no hay equivalencia en las leyes de la física en sistemas de referencia conectados por las transformaciones de Lorentz. Otra forma de argumentar en favor de una LIV en una teoría cuántica de gravedad (**QG**) se basa en considerar la necesidad de un paso a un espacio-tiempo cuántico (imposibilidad de localizar con precisión ilimitada un suceso en un teoría cuántica de gravedad) junto con la observación de que las realizaciones de espacio-tiempo cuántico exploradas van unidas a una simetría Lorentz aproximada.

Otro motivo para explorar posibles correcciones a la teoría de la relatividad especial es el de su posible detectabilidad. Aunque la escala (probablemente) característica de la LIV corresponde a una energía totalmente inalcanzable o a unas distancias totalmente inexplorables es posible que algunas de las consecuencias de la desviación respecto a la relatividad especial se puedan observar. Todo lo que hace falta es buscar experimentos u observaciones donde haya un factor de amplificación del efecto debido a la LIV. Un ejemplo simple son los experimentos que ponen límites a la inestabilidad del protón donde en ese caso es el gran número de protones en el experimento el mecanismo de amplificación que hace que aunque la probabilidad de que **un** protón se desintegre sea totalmente despreciable la probabilidad de observar la desintegración de uno de los protones no lo sea. En el caso de LIV ejemplos de mecanismos de amplificación son la gran precisión en la determinación de frecuencias, la posibilidad de explorar la propagación sobre enormes distancias ó la presencia de escalas de energía muy separadas. A este nivel resultan cruciales los avances tecnológicos que permiten explorar energías más altas, interacciones

más débiles, flujos más pequeños, temperaturas más bajas, intervalos de tiempo menores y distancias más grandes.

Debido a la posible detectabilidad de LIV y más en general de huellas de la Física a la escala de Planck podemos decir que el problema de gravedad cuántica es un problema científico, no filosófico. Se abre un nuevo camino: la “Fenomenología de Gravedad Cuántica”. La identificación de LIV sería una señal genuina de nueva física al ser discernible de cualquier otra modificación dentro de una teoría de relatividad especial.

Por último es indudable la gran trascendencia que tendría el identificar una necesidad de ir más allá de la relatividad especial. No hay que olvidar su papel como pilar de la física moderna a nivel de relatividad general, cosmología, astrofísica, física cuántica y física de altas energías. Además tiene aplicaciones importantes en la vida diaria en geodesía, sistemas de localización de gran precisión, espectroscopía y metrología.

3 Teoría

3.1 Gravedad Cuántica

Hay tres perspectivas del problema de gravedad cuántica y cada una de ellas da lugar a una perspectiva diferente de la necesidad de ir más allá de relatividad especial. Por un lado está la aproximación de física de partículas que hace énfasis en los problemas asociados con el comportamiento ultravioleta (divergencias); Teoría de cuerdas es un referente de esta aproximación en la cual no hay una necesidad de considerar LIV aunque son posibles en el sentido de ruptura espontánea de simetría. Desde el punto de vista de materia condensada es natural considerar el espacio-tiempo cuántico como un ingrediente a nivel de la teoría de excitaciones colectivas con simetrías emergentes aproximadas, la simetría Lorentz una de ellas. Finalmente está la perspectiva de relatividad general donde la mecánica cuántica lleva a identificar una limitación en la localización de un punto en espacio-tiempo lo cual lleva a considerar un espacio-tiempo discretizado ó no conmutativo y una LIV.

3.2 Constante cosmológica

En cualquier caso ninguna de las perspectivas hasta ahora exploradas ha sido capaz de dar la respuesta a un problema muy básico de toda teoría cuántica de gravedad que es el problema de la constante cosmológica. En una teoría cuántica la noción de vacío no se corresponde con la imagen simple clásica y como consecuencia de ello hay una contribución uniforme a la densidad de energía del Universo debida a las fluctuaciones cuánticas inherentes a la descripción cuántica del universo. Esta densidad de energía es totalmente incompatible con las observaciones del Universo lo cual requiere identificar

un mecanismo de cancelación (casi exacto si pensamos que el contenido energético del Universo que llamamos energía oscura es debido a las fluctuaciones cuánticas en el vacío). Esta limitación pone en duda todo intento de extraer conclusiones sobre la posibilidad de LIV hasta que tengamos una solución a este problema.

3.3 *Teoría relativista extendida*

Una aproximación mas conservadora se basa en utilizar el marco de teorías efectivas bien conocido en el que se considera el límite de bajas energías de una teoría incorporando las correcciones debidas a los grados de libertad de altas energías de modo sistemático como un desarrollo en potencias de la energía.

Es posible considerar una extensión incluyendo una ruptura espontanea de la simetría Lorentz parametrizada por un conjunto de campos de fondo. Esta formulación permite un estudio sistemático de las posibles huellas de la violación de invariancia Lorentz en diferentes experimentos.

No toda extensión de una teoría relativista admitirá una formulación en el marco de teorías efectivas pues hay propiedades básicas como localidad que pueden dejar de ser válidas a nivel de la diferencia entre una teoría relativista y su extensión.

3.4 *Relatividad modificada*

Al ir más allá de la teoría de la relatividad especial no es necesario el perder el principio de la relatividad (equivalencia de sistemas de referencia) y tener un sistema de referencia privilegiado.

Una alternativa es considerar modificaciones de las transformaciones que conectan los sistemas de referencia equivalentes. El paso de la invariancia Galileana de la mecánica Newtoniana a la invariancia Lorentz de la relatividad especial es un ejemplo de una modificación del principio de la relatividad dictada por la presencia de una velocidad invariante.

La posibilidad de que la longitud de Planck (ó la energía de Planck) sea un nuevo invariante compatible con el principio de la relatividad ha llevado al estudio reciente de modificaciones del principio de la relatividad especial. Este camino para ir más allá de la relatividad especial es lo que se denomina relatividad doblemente (dos invariantes) especial ó relatividad especial deformada (**DSR**).

Como principales limitaciones de esta linea está la falta de criterios para identificar la deformación relevante y la falta de una realización dinámica de una teoría de este tipo. Por el momento sólo se dispone de un entendimiento (parcial) de la formulación de estas teorías a nivel cinemático.

4 Fenomenología

4.1 *Cinemática modificada*

Aunque la modificación en la relación entre energía y momento sea muy pequeña (porque se está muy lejos de la energía de Planck) se pueden tener efectos observables porque la velocidad adquiere una dependencia en la energía diferente de la de relatividad especial. En particular fotones (cuántos de luz) de diferente energía se propagan con velocidades diferentes. Observando luz que proviene de una fuente suficientemente alejada se puede intentar detectar este efecto.

Los umbrales de reacciones (debidos a la compatibilidad ó incompatibilidad de la conservación de energía y momento con la relación entre energía y momento) dependen de las masas. En el caso de velocidades grandes las masas son una pequeña corrección a la cinemática y la posición de estos umbrales se pueden ver afectada apreciablemente por otra corrección pequeña si es comparable a la contribución debida a las masas.

La condición de estabilidad ó inestabilidad también está controlada por las masas. El ejemplo más simple es el de una partícula desintegrándose en dos; la cinemática relativista nos dice que esta desintegración sólo es posible si la masa de la partícula que se desintegra es mayor que la suma de las masas de los productos de la desintegración. Esto deja de ser cierto en general en el caso de una modificación de la cinemática relativista y puede ser relevante a energías suficientemente altas para que la corrección debida a las masas sea comparable con la corrección debida a la modificación de la cinemática relativista.

4.2 *Dinámica modificada*

Hay tests muy precisos de la validez de la descripción en relatividad especial del comportamiento de un sistema en presencia de un campo electromagnético. Estos tests permiten establecer límites a (ó identificar señales de) LIV ó DSR

Un ejemplo relevante es la precesión de un espín en un campo magnético.

Estos tests se pueden realizar en el marco de teorías efectivas (extensión de teoría relativista) pero no es posible realizarlo de un modo más general pues requiere una realización dinámica de la teoría más allá.

4.3 *Violación de la simetría CPT*

Una característica de una teoría cuántica relativista es la simetría materia-antimateria (mismas propiedades e interacciones excepto el signo de la carga). Es natural (aunque no necesario) el esperar violaciones de esta simetría que se manifiesten en una diferencia entre las propiedades de partículas y antipartículas al ir más allá de relatividad especial.

4.4 *Desacoplo*

El desacoplo entre la física a diferentes escalas de energías característico de las teorías cuánticas en relatividad especial se puede ver afectado por la LIV lo cual abre la posibilidad de que haya señales de la extensión de la teoría no sólo a muy altas energías sino también a bajas energías y/ó grandes distancias.

5 Experimentos/Observaciones

5.1 *Universo*

Es difícil aceptar la descripción actual del contenido del Universo en el que únicamente un 4% se puede entender con la materia ordinaria con la que describimos todas nuestras observaciones. No resulta fácil el encontrar una teoría cuántica relativista con nuevos grados de libertad responsables del 96% restante (materia oscura y tal vez energía oscura si no corresponde a un mecanismo de cancelación parcial de contribuciones a la energía del vacío). Esta podría ser una indicación de física más allá de relatividad especial (y/ó relatividad general).

5.2 *Asimetría materia-antimateria*

De nuevo resulta difícil construir una teoría cuántica relativista con los ingredientes necesarios para partiendo de un Universo con simetría materia-antimateria y teniendo en cuenta la simetría materia-antimateria de todas las leyes de la naturaleza en una teoría cuantica relativista acabar en un Universo como el que observamos dominado por materia. Es necesario que aparezcan nuevos grados de libertad que puedan generar nuevas interacciones con propiedades muy restringidas para que en una fase de no equilibrio del Universo se pueda generar un exceso muy pequeño de materia sobre antimateria de magnitud determinada con una enorme precisión para que la aniquilación materia-antimateria en la evolución posterior nos lleve a un Universo con el contenido de materia que observamos. De nuevo se puede tomar esta situación como una posible indicación de física más allá de la relatividad especial. En particular una violación de CPT, que es natural en una extensión con LIV, podría permitir el generar la asimetría materia-antimateria sin necesidad de considerar una fase fuera de equilibrio.

5.3 *Rayos cósmicos*

Los rayos cósmicos son las observaciones de partículas con más alta energía que disponemos. Estas observaciones llegan a energías 10^8 veces la máxima energía alcanzada en un acelerador de partículas pero todavía 10^{-8} veces la energía de Planck.

Se tiene un entendimiento cualitativo “razonable” del mecanismo de aceleración de rayos cósmicos y posibles fuentes. Al aplicar la relatividad especial a la propagación en el medio compuesto de la radiación de fondo se obtiene que como consecuencia de un umbral cinemático para las reacciones responsables de la pérdida de energía no pueden llegar rayos cósmicos de una fuente suficientemente alejada con energía por encima de un determinado valor (5×10^{19} eV).

La observación de rayos por encima de esa energía podría ser una indicación de física más allá de relatividad especial. Digo podría porque los datos no son lo suficientemente claros para descartar un posible fallo en la determinación de la energía. Hay que tener en cuenta que la detección es bastante indirecta, basada en la reconstrucción de la cascada de partículas que se producen al paso del rayo por la atmósfera y que son identificadas en la superficie de la tierra ó alternativamente considerando la fluorescencia producida en la atmósfera.

5.4 Observaciones en Astrofísica

- *Tiempo de vuelo:* La idea es buscar un emisor de energía que varíe en un rango suficientemente amplio y que esté suficientemente alejada para que el desfase en el tiempo de llegada sea del orden de la resolución. Hace falta también conocer lo suficiente el mecanismo de emisión para poder descartar una correlación con la energía en la emisión. Los mejores candidatos son un tipo de galaxias denominadas Blazars. La mayor limitación en este momento se encuentra en la incertidumbre en la emisión.
- *Absorción:* Es un ejemplo de un umbral cinemático en la interacción de los fotones que componen la señal con la radiación de fondo. Se ha observado ya una absorción de la cual se pueden extraer límites a ciertas LIV. Los detalles de esta absorción podrían en un futuro permitir identificar una LIV. No se está muy lejos de poder reproducir en el laboratorio estas mismas reacciones de modo controlado en el mismo régimen cinemático.
- *(In)Estabilidad:* La posibilidad de que fotones por encima de una determinada energía pudieran desintegrarse o piones pasar a ser estables podría tener consecuencias fácilmente identificables en la ausencia de radiación por encima de una determinada energía (en el segundo caso debido a la pérdida de uno de los mecanismos dominantes de producción).

6 Futuro

A nivel teórico se está en una situación de gran incertidumbre. No sabemos donde nos pueden llevar los diferentes caminos abiertos (teoría de cuerdas, dimensionales adicionales, ...). Tal vez estamos ante una nueva revolución correspondiendo a una realización del espacio-tiempo cuántico en la que se encuentre una respuesta a (alguna de) las siguientes preguntas que forman la lista de lo que sería una descripción cuántica del Universo:

- Hay principios de la naturaleza por descubrir ? Nuevas simetrías, nuevas leyes físicas ?
- Qué es la energía oscura ?
- Hay dimensiones espaciales adicionales ?
- Se unifican todas las fuerzas ?
- Porqué hay tantos tipos de partículas diferentes ?
- Qué es la materia oscura ? Como podemos producirla en el laboratorio ?
- Que hay detrás de las extrañas propiedades de los neutrinos ?
- Como se originó el Universo ?
- Qué le ocurrió a la antimateria ?

No está claro el papel que en esta revolución pueda jugar la idea de intentar ir más allá de la relatividad especial.

A nivel fenomenológico hay ideas interesantes para buscar huellas de una posible desviación respecto a la relatividad especial. Hay que tratar de establecer una relación entre modelos teóricos y fenomenológicos. Sería interesante disponer de una realización dinámica de una teoría más allá de la relatividad especial que sirva de ejemplo del estudio complementario de efectos cinemáticos y dinámicos debidos a una desviación respecto de la relatividad especial. Sería también interesante el explorar modificaciones de la relatividad general relacionadas con una posible modificación de la relatividad especial.

A nivel experimental estamos ante una explosión de nueva información sobre el Universo a través de observaciones cada vez más precisas de las propiedades de la radiación de fondo, supernovas, estructuras. Nuevos experimentos en la superficie de la tierra y en el espacio nos van a dar nueva información sobre los rayos cósmicos de muy alta energía que pueden ser una de las mejores ventanas a la física a la escala de Planck.

A nivel de astrofísica se está también en un periodo de avance muy rápido en la detección de rayos gamma y neutrinos que pueden dar una información relevante. Como

ejemplo ilustrativo del grado de desarrollo en esta línea se puede mencionar la propuesta reciente de utilizar una de las lunas de Jupiter (Europa) para detectar neutrinos de muy alta energía (hasta $10^{21} eV$).

Por último queda por mencionar el esfuerzo (ya en marcha) de experimentos en laboratorio intentando comprobar la relatividad especial con mayor precisión como vía a la detección de posibles desviaciones. Estos experimentos incluyen entre otros la búsqueda de modificaciones en la dinámica a través de interferometría atómica, el uso de tecnología avanzada en óptica para la comprobación de la isotropía de la propagación y de la constancia de la velocidad de la luz, la búsqueda de fuerzas no newtonianas a cortas distancias (por debajo del milímetro), etc. Debería de considerarse todo tipo de comprobación experimental de la relatividad especial y tratar de mejorarla.

7 Epílogo

Espero haber transmitido la idea de que es posible que nos encontremos en un futuro no muy lejano con una nueva revolución como la debida en buena parte a los trabajos de Einstein que festejamos en esta serie de conferencias. Frente a una opinión contraria muy extendida hasta hace unos pocos años, disponemos de la ayuda de experimentos / observaciones para poder explorar este camino lo cual ha sido un ingrediente importante en todos los avances de la Física.

Espero que esta presentación sirva para animar a algunos de los jóvenes que en un futuro próximo se incorporen a la investigación en Física a que consideren la posibilidad de participar en esta aventura.

A continuación se da una lista incompleta de referencias relacionadas con el tema tratado en ésta presentación seleccionadas con el único criterio de su utilidad para apoyar la perspectiva presentada.

Referencias

- [1] V.A. Kostelecký, R. Lehnert, *Stability, Causality, and Lorentz and CPT Violation*, Phys. Rev. D **63**, 065008 (2001).
arXiv: hep-th/0012060.
- [2] H. Quinn, *The Asymmetry between Matter and Antimatter*, Physics Today (2003).
- [3] G. Amelino-Camelia, *Planck-scale Lorentz-symmetry test theories*,
arXiv: astro-ph/0410076 version 1.
- [4] G. Amelino-Camelia, *The three perspectives on the quantum-gravity problem and their implications for the fate of Lorentz symmetry*,
arXiv: gr-qc/0309054.
- [5] T. Jacobson, S. Liberati, D. Mattingly, *Quantum Gravity Phenomenology and Lorentz Violation*, arXiv: gr-qc/0404067.