

La Teoría Cuántica de la Gravedad y la Física de Partículas Elementales

Enrique Álvarez Vázquez

Arbor CLIX, 626 (Febrero 1998), 139-151 pp.

Pocos temas dentro de la FAE son tan controvertidos como el de la necesidad de estudiar efectos cuánticos de la gravitación. En este artículo se intenta argumentar su necesidad, así como se reflexiona sobre el papel de la especulación en la investigación científica.

1.—Uno de los problemas conceptuales más importantes de la Física Contemporánea es el de la armonización de la Mecánica Cuántica y la Relatividad General.

La Mecánica Cuántica es una teoría no sólo verificada experimentalmente de muchas maneras independientes, sino que ha alcanzado ya el estadio de instrumento «técnico», y de hecho sus principios se utilizan de manera más o menos explícita en la construcción de todo tipo de nanoestructuras.

Por otra parte, la Relatividad General, la mejor teoría de que se dispone para explicar las leyes de la gravitación, y que es una teoría clásica (es decir, insensible a la constante de Planck, \hbar), sólo ha podido ser verificada con detalle en el límite de campos débiles (con la notable excepción del pulsar binario PSR 1913+16); pero siempre ha pasado brillantemente todas las confrontaciones con el experimento, lo cual

es más de lo que se puede decir de prácticamente todas sus teorías alternativas.

El hecho innegable, mencionado más arriba, de su verificación experimental, y de su funcionalidad a la hora de predecir fenómenos físicos no puede ocultar la realidad de que la Mecánica Cuántica resulta todavía un tanto misteriosa conceptualmente. No faltan físicos eminentes que creen que no proporciona una descripción completa de la realidad, y que algún día se descubrirán nuevas variables, «ocultas» hasta entonces, que completarían la descripción física de la naturaleza.

Justo es señalar, sin embargo, que los recientes experimentos sobre las desigualdades de Bell (el único discriminante conocido para una amplia clase de estas variables ocultas) relegan, en opinión de muchos, las teorías aún viables al «infierno de los epiciclos»; esto es, de las complicaciones «ad hoc» a las que hay que someter a una idea sencilla, cuando en su manifestación más natural contradice el experimento¹.

Por otra parte, la Relatividad General ha sido calificada por algunos, como el famoso físico Lev Landau, como la más hermosa construcción de la mente humana. Su belleza es clásica: es, en cierto sentido, la culminación del proceso que empezó con la demostración por parte de Newton de que la concepción mecanicista al sentido antiguo era insostenible, y que era necesaria una «acción a distancia» para poder explicar las fuerzas de la gravitación, y alcanzó unos de sus puntos culminantes en el siglo XIX con la comprensión de las Ecuaciones de Maxwell como las ecuaciones de propagación del campo electromagnético.

Hay contactos, además, (como explicaremos más adelante) con algunos aspectos de las teorías «gauge» que son en este momento la manera más precisa de describir las otras tres interacciones fundamentales de la naturaleza: electromagnéticas, fuertes y débiles.

Una cuestión previa a todo intento de comprensión de los efectos cuánticos en la gravitación es la constatación de que, desde luego no existe, y parece muy difícil que nunca pueda existir, una fenomenología de los gravitones, en el mismo sentido que existe una fenomenología de las interacciones entre electrones y fotones, diferente de las manifestaciones clásicas del campo electromagnético, que interpretamos hoy en día como efectos colectivos desde el punto de vista cuántico.

Hay muchas razones para ello; baste sólo con la estimación más sencilla que nos dice que las fuerzas gravitatorias son aproximadamente 10^{19} veces menos intensas que las nucleares (fuertes), y ello hace que sea correspondientemente más difícil la producción y detección de cualquier tipo de partículas que sólo interaccionen gravitacionalmente. Re-

sulta por consiguiente impensable por ahora realizar experimentos con gravitones en los laboratorios terrestres. La única fuente de información sobre la interacción gravitatoria consiste en los datos experimentales y observacionales sobre efectos clásicos de la misma. Incluso esos datos se refieren, como decíamos más arriba, fundamentalmente al régimen en que los efectos no lineales son despreciables, y algo tan básico como la radiación gravitatoria todavía está por descubrir (aunque en principio será marginalmente accesible con los experimentos planeados en la actualidad, tanto los interferométricos como LIGO y VIRGO como otros imaginables, en particular con detectores en caída libre).

A la hora de construir una teoría cuántica de la gravitación tenemos pues que imaginarnos como sería posible edificar la electrodinámica cuántica, si no se hubiera conocido ni un sólo dato experimental sobre interacciones cuánticas de electrones y fotones; sin haber ni siquiera detectado la radiación electromagnética.

Muchos físicos opinan, sensatamente, sin duda, que esa es una empresa imposible, y relegan todo el problema a la categoría de la «física especulativa», en la que «todo está permitido», y «nada podrá ser jamás verificado».

La comparación es ligeramente injusta, sin embargo. Hay en la actualidad una comprensión de lo que es la teoría cuántica de campos incomparablemente mayor de la que había en los años 40, cuando se estaba creando la electrodinámica cuántica y, en particular, existe un marco, el de las teorías gauge, en el que todas las demás interacciones parecen encajar. Conviene no perder de vista, sin embargo, que todo el intento descrito en este artículo podría ser baldío desde el punto de vista físico; podría no ser más que una inútil pasión ².

2.—Una vez clarificada la distinción esencial entre gravitación cuántica y física de partículas elementales (es decir, la ausencia de fenomenología), justo es destacar que casi todos los grandes físicos han sido incapaces de resistir la tentación de pensar en este tema. Evidentemente, la motivación para ello es diferente de la habitual; no existen unos experimentos que haya que entender y explicar en el seno de alguna teoría. Pero existen tensiones conceptuales, paradojas lógicas e inconsistencias que suponen un reto fascinante para todo físico teórico.

Hay un sentido en el que la Relatividad General es análoga a las teorías gauge. Como es bien sabido, la base física para estas últimas es que las fases de los fermiones son inobservables; siempre que se utilice un «campo gauge» para hacer la comparación. Como el propio Yang ha sugerido repetidamente, el nombre de «invariancia de fase»

sería mucho más adecuado que el, desgraciadamente sancionado por la costumbre, de «invariancia gauge». Pues bien, cuando se considera la interacción gravitatoria entre electrones, es necesaria la introducción de sistemas localmente «en caída libre», en los cuales los efectos de la gravitación se anulan en un punto (exactamente igual que ocurre en la Tierra con un ascensor en caída libre, o en un satélite artificial; de ahí su nombre). Pues bien, sucede que la física es invariante frente a las «rotaciones» (Lorentz) de esos sistemas de referencia unos en otros, y matemáticamente la manifestación de esa invariancia es muy similar a la de las teorías gauge ordinarias.

Cuando se consiguió entender correctamente la mecánica cuántica de las teorías gauge no abelianas, trabajo brillantemente culminado por los físicos holandeses 't Hooft y Veltman, resultaba natural ensayar a ver si esas mismas técnicas funcionaban en el caso de la gravitación. El resultado es negativo y, expresado en términos ligeramente más técnicos, se puede decir que la teoría de Einstein no es renormalizable, al menos en torno al punto fijo trivial (gaussiano), que consiste básicamente en un desarrollo perturbativo para valores pequeños de la constante de acoplo (que coincide con la constante de la gravitación universal de Newton).

Ante este resultado (el hecho de que las mismas técnicas que permiten predecir resultados para las otras interacciones, no funcionen en el caso de la interacción gravitatoria) hay dos tipos de actitudes claramente diferenciadas: los que creen que el problema no está en la teoría, sino en la técnica perturbativa y tratan de desarrollar métodos diferentes de los habituales para cuantizar una teoría clásica (éste es el punto de vista preferido por la mayoría de los físicos relativistas); y los que creen que si la teoría no tiene sentido perturbativamente, es muy poco probable que se la pueda dotar de sentido en absoluto, de forma que se toma eso como una indicación de que hay que modificar la teoría.

Pocos resultados positivos se han conseguido con ninguno de los dos puntos de vista respecto del particular problema que nos ocupa, pero, en mi opinión, el primero es más improductivo que el segundo. La razón es que, al insistir en las peculiaridades de la interacción gravitatoria, se está implícitamente renunciando a explorar la posibilidad de que a muy pequeña distancia la gravitación esté realmente unificada con las demás interacciones. Por supuesto que es posible que todo este punto de vista esté equivocado, pero en mi opinión ha servido, al menos, para entender mejor la estructura de la Teoría Cuántica de Campos.

3.—De las diferentes modificaciones que se han propuesto de la Relatividad General, hay dos cuya fascinación teórica es tal que reaparecen en modelos diferentes cada vez que parece que la comunidad científica las rechaza definitivamente. Se trata de la idea de Kaluza-Klein de que el Universo puede tener más de cuatro dimensiones (pero que las dimensiones extra han de ser dimensiones compactas de muy pequeño radio, como esferitas, de forma que visto a grandes distancias, no se tendría precisión suficiente como para resolver las bolitas, y el mundo aparecería como cuatridimensional). Precisamente las simetrías gauge del mundo cuatridimensional tendrían como origen las isometrías en las variedades compactas de las dimensiones extra: las fases (generalizadas) de los fermiones, y las «conexiones» necesarias para comparar estas fases definidas en puntos diferentes, tendrían su origen en las rotaciones (isometrías) de los «ángulos» necesarios para especificar completamente la posición en la «esfera» (variedad compacta) que representa las dimensiones adicionales.

La segunda es la idea de que hay una simetría entre los fermiones (spin semientero) y los bosones (spin entero). A primera vista ésta es una idea absurda, porque, aparte de no haber degeneración de masa entre los fermiones y bosones observados en la naturaleza, el papel de los bosones es más bien el de ser los «intermediarios» de la interacción, en tanto que los fermiones son los constituyentes de la materia ella misma, al menos de la que existe a baja energía. Sin embargo, el hecho de que las contribuciones de ciertos efectos cuánticos tengan distinto signo para fermiones y para bosones, hace que estas teorías tengan un comportamiento ultravioleta mucho mejor que las teorías cuánticas de campos no supersimétricas.

Incluso aunque supersimetría fuese irrelevante para la naturaleza, sería interesante como un «laboratorio teórico» de sistemas cuánticos especialmente sencillos.

Sin embargo, ninguna de las teorías supersimétricas de la gravitación, llamadas supergravidades, posee un comportamiento ultravioleta suficientemente bueno como para que la teoría tenga sentido perturbativamente; es decir, el tipo de divergencias mejora mucho con respecto a las teorías no supersimétricas, pero no lo suficiente como para que se pueda definir la teoría de forma análoga a como se define el «modelo standard».

4.—La Teoría de (Super)cuerdas, que postula que las entidades básicas son objetos extensos unidimensionales (a diferencia de las partículas puntuales) que viven en un espacio-tiempo de diez dimensiones, y que poseen al menos una supersimetría desde el punto de vista del

espacio-tiempo, son por el momento los modelos que mejor se comportan desde el punto de vista cuántico. El desarrollo perturbativo, en particular, parece no presentar problemas especiales, lo cual no es un éxito menor, dada la larga historia de fracasos anteriores.

Y, sin embargo, existen numerosas razones para no estar satisfechos con ello, por difícil que haya sido el conseguirlo. Para empezar, no hay una comprensión dinámica de por qué el estado fundamental de la teoría es cuatridimensional (por otra parte, si se pudiera demostrar que no es así, ello sería por supuesto suficiente como para falsarla). Pero lo que es más importante, no existe tampoco una comprensión física de cómo se generan los «condensados» que dan presumiblemente lugar a métricas espaciotemporales no triviales, como las de Schwarzschild (que describe la métrica causada por una masa esférica como el Sol), o la de Robertson-Walker, que describe uno de los modelos más sencillos de universo (homogéneo e isótropo).

Realmente sí que es cierto que en gravitación se pierden cosas esenciales con la aproximación lineal. Por ejemplo, el hecho de que el campo gravitatorio sea la propia métrica del espacio-tiempo, que a su vez determina la «estructura de los conos de luz»; esto es, el conjunto de sucesos que están en el futuro de un observador dado, y aquellos que se encuentran en su pasado, hace que, por ejemplo, «fluctuaciones cuánticas» del campo gravitatorio deban, intuitivamente, de tener un efecto en la causalidad de la teoría (por ejemplo, los campos cuánticos «conmutan» (esto es, son simultáneamente medibles) en puntos que están espacialmente separados (esto es, que no se puede decir que ninguno está en el futuro del otro). Toda la formulación actualmente conocida de la Teoría Cuántica de Campos exige que esa condición esté fija «a priori», que no esté determinada por la dinámica. Todo este rico espectro de efectos queda fuera de la aproximación lineal.

Es, en este sentido, paradigmático el ejemplo del agujero negro, un objeto cuyo campo gravitatorio es tan intenso, que la «velocidad de escape» es mayor que la de la luz, de forma que ni siquiera la luz ella misma puede salir de su campo gravitatorio, lo que proporciona la razón de ser de su nombre.

Los agujeros negros tienen un «área», que, en unidades adecuadas, es proporcional al cuadrado de su masa. Curiosamente, ese área se comporta clásicamente como una entropía, y las leyes de la termodinámica tienen una generalización formal a este caso. Si se quiere, reinterpretar de esa manera, sin embargo, es necesario introducir una constante con dimensiones de longitud, lo que es imposible sin meter

\hbar . Éste es uno de los fenómenos clásicos en los que se abre de manera natural una ventana al mundo cuántico.

Los efectos cuánticos ellos mismos hacen que exista una emisión, aparentemente térmica de radiación (Hawking), con una temperatura inversamente proporcional a la masa del agujero. Se puede entender intuitivamente este efecto considerando que hay una cierta amplitud para que se produzca una fluctuación de vacío, creando un par virtual partícula/antipartícula, de forma que en algunos casos uno de sus elementos es tragado por el agujero negro, materializándose entonces el otro como una partícula real que se escapa al infinito.

Desde ese punto de vista, la entropía del agujero negro es una verdadera entropía en el sentido termodinámico del término.

No se conoce, sin embargo, una interpretación de la misma en términos de Mecánica Estadística, es decir, como contaje de estados accesibles al sistema.

Por otra parte, la existencia misma de la radiación de Hawking plantea la posibilidad de una cierta paradoja lógica, a saber, ¿qué ocurre con un agujero que se ha evaporado completamente?

Si no queda nada, y la radiación es térmica hasta el final, entonces un posible «estado puro» (es decir, el estado inicial de la materia que constituye el agujero negro) habría evolucionado al final a un estado mezcla, a una «matriz densidad». En términos matemáticos, esto supondría una evolución no unitaria, en contradicción con las leyes de la mecánica cuántica ordinaria. Aunque algunas personas, entre ellas el propio Hawking, admiten esa posibilidad como natural, a la mayoría de los físicos de partículas les agradaría modificar lo menos posible las leyes establecidas.

Recientemente ha sido posible «contar estados» para un cierto tipo muy especial de agujeros negros cargados, llamados técnicamente «extremales» (porque tienen toda la carga que se puede tener sin que la singularidad se convierta en «desnuda», esto es, sin que desaparezca el horizonte). Aunque es cierto que esto mismo no se sabe hacer para agujeros ordinarios, tipo Schwarzschild, no se debe tampoco en este caso de infravalorar el resultado; es la primera vez que se consigue una interpretación estadística de la entropía de *algún* agujero negro.

5.—Aunque desde luego, como hemos visto, tiene perfecto sentido el considerar problemas de gravitación cuántica «locales», en el mismo sentido que se estudian las teorías de las demás interacciones con objeto de ser capaz de predecir los resultados de los experimentos de «scattering» realizados en los anillos de colisiones, no es menos cierto que esos estudios son ligeramente académicos, por inverificables.

Mucho más interesante sería el combinar la teoría de la gravedad cuántica con la cosmología, y tratar de dar una explicación al problema del estado inicial del universo, el «big bang».

(Por otra parte, sólo en este contexto existen agujeros negros «eternos»; los que se forman por colapso gravitatorio a partir de materia realmente existente, toman un tiempo infinito para formarse, vistos desde el infinito asintótico).

Ello plantea, sin embargo, problemas epistemológicos casi insuperables. Como ha sido repetidamente señalado, entre otros, por el físico americano Jim Hartle, hay dos aspectos radicalmente nuevos en la «cosmología cuántica». El primero de ellos es que, obviamente, nos vemos obligados desde el principio a suponer que *todo* el universo obedece las leyes de la mecánica cuántica, renunciando a la existencia de un «mundo clásico». Por razonable que esto pueda parecer, no es fácil entender el proceso de la medida en mecánica cuántica desde este punto de vista y de hecho la mayoría de las personas que trabajan en el campo simpatizan con un punto de vista un tanto bizarro sobre este tema, debido al físico americano Everett. En todo caso, ya antes de plantearse siquiera ningún problema específico de gravedad cuántica, nos encontramos con que es necesario pronunciarse sobre uno de los temas más resbaladizos y pantanosos de la física, como es el problema de la medida, y la «definición» de mundo clásico.

Pero queda todavía un segundo punto, que es, si cabe, aún más novedoso: En todas las otras teorías físicas se buscan regularidades que se plasman en ecuaciones (no hay diferencias esenciales entre la física clásica y la cuántica desde este punto de vista). Estas ecuaciones luego se comparan con el experimento, variando todo lo que sea posible las condiciones iniciales de las ecuaciones. Incluso en experimentos de partículas, donde prácticamente lo único que se sabe es hacerlas chocar a grandes energías, es posible tener un cierto control sobre el estado inicial.

Obviamente esto no es posible en Cosmología Cuántica. Lo que se busca en esa teoría es una «predicción» del estado inicial del universo. No basta con las ecuaciones, ya que el intento es describir el universo en que vivimos que es presumiblemente único (aunque también esto es cuestionado por algunos radicales). Éste es un desafío totalmente nuevo para la física, y en mi opinión no está ni siquiera claro que su estudio corresponda a esta última disciplina.

Es importante darse cuenta de que ya la Cosmología tradicional es una ciencia ligeramente distinta de las otras, en el sentido de que no sólo es imposible realizar experimentos, sino sólo observaciones (como

en toda la astrofísica en general), sino que además hay un sólo objeto, un universo, a diferencia de muchas estrellas, o muchas galaxias.

Pero está claro que es una ciencia observacional, y la acumulación de datos va eliminando modelos. En los pocos casos en los que se dispone de un número suficiente de observaciones, como es el caso de la física del Sol, este modelo es básicamente único.

Pero por la propia naturaleza de la disciplina, en Cosmología no se buscan leyes fundamentales de la naturaleza, sino que se aplican las que se han descubierto en otros contextos, y se tratan de edificar modelos, que luego se contrastan con las observaciones, para ser modificados de nuevo, etc.

El problema de la Cosmología Cuántica es de otro nivel: no conocemos ni las leyes, ni el estado inicial. La única posible verificación «experimental» es precisamente el estudio del Universo primitivo, lo que podríamos llamar el «estado inicial» de la Cosmología clásica.

Cualquier otra configuración, parece, como hemos repetido, esencialmente inobservable. Y el problema es que hay en principio que ser capaces de separar los efectos debidos al desconocimiento del estado inicial de los efectos del desconocimiento de la interacción dinámica ella misma.

Es decir, y empleando una analogía burda con la mecánica cuántica no relativista: si encontramos un desacuerdo con el experimento, no sabemos si atribuirlo a que no conocemos el hamiltoniano, o a que no conocemos la función de ondas del estado inicial, o a una combinación complicada de ambas cosas.

Este es un problema que hasta donde yo sé, nadie ha conseguido resolver. (Por otra parte, y empleando la misma analogía, si suponemos exactamente conocido el hamiltoniano, entonces *cualquier* función de ondas de un amplio subespacio (i.e., $L^2(R)$) es reproducible escogiendo adecuadamente la función de onda inicial, lo que parece que representa una seria dificultad de principio a todo el programa de la Cosmología Cuántica).

No es menos cierto, sin embargo, que el «estado inicial» en Cosmología representa una de esas situaciones físicas donde unas ecuaciones clásicas poseen singularidades, lo que, con la experiencia actual, interpretamos como una indicación de la existencia de nuevas leyes físicas según las cuales ese mismo proceso es no singular. El problema es tan complejo que el imaginar siquiera una *posible* solución consistente con las leyes físicas conocidas es algo que todavía no se ha conseguido. Claramente, si tuviéramos una solución, habría que demostrar que es única; si varias, discriminar unas de otras mediante la observación

(lo cual sería, evidentemente, punto menos que imposible). Pero el hecho de que no sea posible ni siquiera imaginar posibles hipótesis coherentes, quizás es significativo, y es en todo caso lo que hace que se plantee este problema como un desafío intelectual importante, un «glasperlenspiel» cuántico.

Una de las personas que ha expresado con mayor claridad las paradojas a las que conduce inmediatamente el plantearse el problema de la «cosmología cuántica» es el famoso especialista Chris Isham. En sus propias palabras ³ «...For example, if such a theory predicts that, with probability 0.87, I will be typing these notes on January 27, 1991, what does the 0.87 mean? And is this prediction to be viewed as a great success for the theory? The statistical interpretation says merely that if the experiment is repeated many times, then in 87% of the cases I will indeed be found typing the notes. But how is the experiment to be repeated?...» ⁴.

Al menos, el famoso sentido del humor inglés no ha desaparecido completamente con la caída del Imperio Británico...

6.—La idea de que es posible, en cierto sentido «adelantarse» a los datos experimentales, e imaginar teorías que no sólo abarquen el mundo observado, sino que predigan fenómenos nuevos se suele calificar de platónica, pero en realidad es precientífica, podíamos llamarla «filosófica» (en el peor sentido de la palabra, indicando que se busca comprensión sin experimento).

Hay pocos ejemplos post-Galileo de grandes éxitos científicos obtenidos por este procedimiento. El más famoso es el del descubrimiento de la Relatividad General por Einstein, en el que es absolutamente cierto que la inspiración fenomenológica tuvo poco que ver.

Nadie ha expresado más claramente el camino hacia el descubrimiento de teorías físicas utilizando la «belleza» como criterio que el propio Dirac, uno de los físicos más distinguidos del siglo. En sus propias palabras ⁵. «A good deal of my research work in physics has consisted in not setting out to solve some particular problem, but simply examining mathematical quantities of the kind that physicists use and trying to fit them together in an interesting way regardless of any application that the work may have. It is simply a search for pretty mathematics. It may turn out later that the work does have an application. Then one has good luck» ⁶.

Continúa luego describiendo cómo descubrió las matrices de Dirac, y la correspondiente ecuación de Dirac, a base de jugar con las matrices de Pauli. Y sigue:

«The resulting wave equation for the electron turned out to be very succesful. It led to correct values for the spin and the magnetic moment. This was quite unexpected. The work all followed from a study of pretty mathematics, without any thought being given to these physical properties of the electron»⁷.

Casos como los de Einstein o Dirac (con todas las diferencias metodológicas que proceda) son, sin embargo, extremadamente raros en la historia de la Física. Resulta difícil pensar que *toda una disciplina* se pueda construir sobre las solas bases de la coherencia lógica, la elegancia, y la continuidad con la física ya conocida.

Sin embargo, cuando se profundiza en el estudio de las teorías de supercuerdas, inmediatamente se siente que el entramado lógico (extremadamente complicado desde el punto de vista técnico) tiene una coherencia y un poder unificador de diferentes disciplinas y puntos de vista, tanto de la física como de las matemáticas, que «necesariamente tiene que haber algo detrás».

La historia de las cuerdas es bastante pintoresca, por demás, ya que fueron inventadas a principios de los 70 como un modelo de las interacciones fuertes, de forma que la escala de energía asociada era la masa del pión; siendo a los pocos años reinterpretadas por Scherk y Schwarz como teorías cuánticas de la gravitación; dado ese pintoresquismo, decimos, el punto de vista con el que se aborda su estudio es continuamente cambiante (a esos cambios súbitos de punto de vista se les llama «revoluciones» por los entusiastas). Todavía no se posee una comprensión básica de las simetrías subyacentes.

Ed Witten ha dicho repetidamente que, por una serie de circunstancias afortunadas, hemos tenido la suerte de vislumbrar un rincón de la «física del siglo XXI», y tenemos que tratar de explorarlo con nuestras torpes técnicas y nuestros conceptos primitivos.

Es posible que sea así. Pero aunque no lo fuera, no es menos cierto que el estudio de las cuerdas ha proporcionado visiones radicalmente renovadoras, y ha relacionado problemas en campos tan dispares como las teorías gauge fuertemente acopladas, las supergravidades en diferentes dimensiones, la teoría de superficies de Riemann, las membranas embebidas en espacios superiores, la geometría algebraica y la dualidad eléctrica/magnética, por no hablar de las profundas revisiones a las que ha obligado a someter el concepto de espacio-tiempo como estructura probablemente no conmutativa; o la posibilidad misma de que la distinción entre mundo clásico/mundo cuántico no sea «absoluta» sino «relativa» (dependiente de los detalles de la compactificación del espacio cuadridimensional ordinario en la

teoría fundamental, que hoy se piensa que está definida en once dimensiones).

Como hemos dicho más arriba, puede que las teorías de cuerdas sean incapaces de predecir el mundo de baja energía, el «modelo standard» de la física de partículas elementales. Pero incluso en ese caso, su estudio sigue siendo fascinante, una de las grandes aventuras intelectuales de finales de siglo. En una frase justamente famosa, Einstein comparaba el primer miembro de sus ecuaciones para el campo gravitatorio con la pureza del mármol (porque viene dado de forma única a partir de la geometría del espacio-tiempo); mientras que el segundo miembro, esto es, las fuentes, decía que era como la «madera», caduca e imperfecta, anunciando implícitamente su esperanza de que también las fuentes se pudieran interpretar desde el punto de vista geométrico.

Ojalá que las cuerdas contribuyan a convertir un poco de madera en mármol.

Notas

¹ Claro que éste es, hasta cierto punto uno de los temas de «consenso» entre la comunidad científica, en los que a veces se aplican diferentes criterios a unas ideas y a otras. Por ejemplo, algo parecido podría decirse de «supersimetría», la idea de que a un cierto nivel, más o menos fundamental, existe una simetría entre bosones y fermiones en la naturaleza. El hecho de que el espectro de bajas energías no presente nada parecido a una degeneración en masa entre fermiones y bosones, obliga inmediatamente a una duplicación del número de grados de libertad de los modelos, que muy bien podrían verse desde fuera como algo análogo a la introducción de los epiciclos, y no muy diferente de la actitud de los que todavía defienden teorías de variables ocultas.

² «Dire que j'ai gaché des années de ma vie, que j'al voulu mourir, que j'ai eu mon plus grand amour, pour une femme qui ne me plaisait pas, qui n'était pas mon genre» (Marcel Proust, «Du côté de chez Swann»). Traducción libre: «Y decir que he estropeado años de mi vida, que me quise morir, que tuve mi mayor amor, por una mujer que no me gustaba, que no era mi tipo».

³ Tomada del artículo «Conceptual and geometrical problems in quantum gravity», incluido en el libro «Recent Aspects of Quantum Fields», editado por H. Mitter y H. Gausterer. (Springer-Verlag, Berlin, 1992).

⁴ «Por ejemplo, si una teoría predice que, con probabilidad 0.87, estaré escribiendo estas notas el 27 de Enero de 1991, ¿qué es lo que significa el 0.87? Y ¿ha de verse esa predicción como un gran éxito de la teoría? La interpretación estadística simplemente dice que si se repite el experimento muchas veces, entonces en el 87 escribiendo estas notas. Pero ¿cómo se va a repetir el experimento?».

⁵ En el artículo «Pretty mathematics», publicado en Int. J. Theor. Phys., Vol 21, Nos 8/9 (1982), p. 603.

⁶ Una parte importante de mi trabajo de investigación en física ha consistido no en ponerme a resolver un problema en concreto, sino simplemente en examinar cantidades matemáticas del tipo usado por los físicos, y tratar de encajarlas de una manera interesante independientemente de cualquier aplicación que el trabajo pudiera tener. Es sencillamente una búsqueda de belleza matemática. Puede sucer más tarde que el trabajo tenga una aplicación. Entonces uno tiene buena suerte.

⁷ Sucedió que la ecuación de ondas resultante para el electrón tuvo mucho éxito. Esto fue totalmente inesperado. Todo el trabajo provino de un estudio de matemáticas hermosas, sin que nunca se pensara en esas propiedades físicas del electrón.