

# EINSTEIN: ESPACIO-TIEMPO Y ENERGÍA. RELATO DE UNA REVOLUCIÓN INACABADA

ALBERTO GALINDO TIXAIRE \*

\* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Departamento de Física Teórica. Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Complutense. 28040 MADRID. agt@fis.ucm.es.

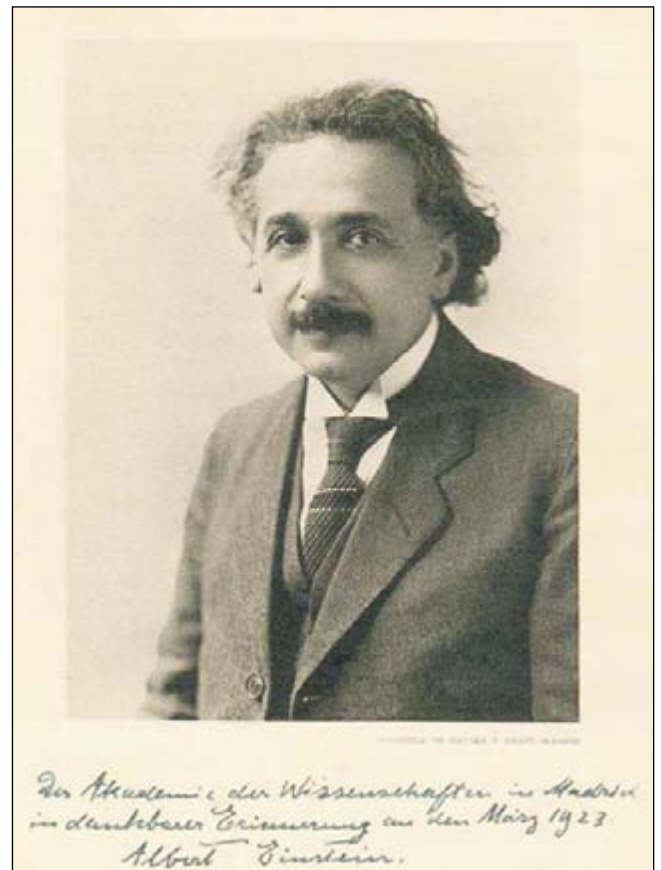
## I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de 1905 un asistente técnico de la Oficina Suiza de Patentes en Berna, llamado Albert Einstein, enviaba seis trabajos a la prestigiosa revista alemana *Annalen der Physik*, para su publicación. Los cinco primeros de estos trabajos cambiaron, en palabras del historiador y físico John Stachel, la faz de la física.

Científicos de todo el mundo van a celebrar durante el año 2005, declarado Año Mundial de la Física, el centenario de ese *Annus Mirabilis* de Einstein, del que con razón se ha escrito que “nunca, ni antes ni después, ha enriquecido tanto y en tan corto tiempo a la ciencia una sola persona como hizo Einstein en su año maravilloso”. La Real Academia de Ciencias se unirá a estas conmemoraciones acercando a todos la obra y el recuerdo de este personaje mítico y universal.

Quiero contribuir contando cómo en el tercero de sus trabajos en ese año Einstein resolvió el aparente conflicto entre el principio de relatividad y la teoría de la luz, con el abandono de la simultaneidad absoluta y del éter lumínico. El joven Einstein demolía allí con claridad y lógica impecables los cimientos de la física conocida, para erigir un nuevo esquema con un espacio-tiempo en el que pierden su carácter de absolutos tanto el espacio como el tiempo. De modo inevitable desde su principio de relatividad y constancia de la velocidad de la luz llegó Einstein en el quinto de los trabajos a la famosa relación masa-energía, escrita algunos años después como  $E = mc^2$ .

En esa época aún ignoraba su autor el descomunal poder del genio escondido en las entrañas de su sencilla fórmula, con innumerables aplicaciones que van desde las armas atómicas (con las terribles conse-



**Figura 1.** Einstein (1923): “A la Academia de Ciencias en Madrid, en recuerdo agradecido, marzo 1923”.

\* Texto base, con alguna pequeña actualización en marzo del 2007, de la conferencia con el mismo título.

cuencias que llevarían a Oppenheimer a exclamar que “los físicos han conocido ahora el pecado”), hasta su beneficiosa utilización médica en oncología, neurología y cardiología.

Años más tarde Einstein enunciará el principio de equivalencia sobre el que construirá su relatividad general, obra cumbre, por su originalidad y belleza, del pensamiento científico. La empezó a elaborar en 1907 y la concluyó esencialmente en 1915. Obligado a renunciar al espacio-tiempo absoluto de su relatividad especial para dar cobijo a la gravedad, geometriza ésta, eleva la energía a ser motor de la geometría, y derroca la teoría newtoniana de la gravitación.

Pero la física actual pide a gritos que continúe la revolución iniciada por Einstein, contestando a interrogantes como la energía oscura que dinamiza hoy la expansión acelerada del Universo, y sobre todo, impregnando de una vez el espacio-tiempo con los principios cuánticos. Hay un variado abanico de frentes, con nombres como supercuerdas/teoría M, gravedad de lazos, dimensiones extra, branas, etc.

De las relatividades sobre todo, y muy de pasada sobre gravedad cuántica, nos proponemos hablar.

## II. EINSTEIN Y LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS

Dedicaré unos instantes a recordar la visita de Einstein a España en 1923, y concretamente, a la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, de la que había sido elegido el 28 de febrero de ese mismo año Académico Correspondiente Extranjero a propuesta de la Sección de Física y Química. En una ceremonia presidida por S.M. el Rey D. Alfonso XIII, se le hizo entrega del correspondiente diploma acreditativo, y tras una docta *laudatio* a cargo del Prof. Blas Cabrera y Felipe, respondió Einstein con un breve discurso de agradecimiento en el que reconoció el profundo conocimiento que de su obra científica mostraba

tener Cabrera, y animaba en general a que se le alabara menos y se le leyera más. La Academia guarda celosamente una copia con papel carbón de este discurso, con anotaciones a mano del propio Einstein, así como su fotografía dedicada.

## III. LOS TRABAJOS TERCERO Y QUINTO DE 1905

El tercero de los trabajos de Albert Einstein enviados a los *Annalen* a lo largo de 1905 lleva por título “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”.<sup>1</sup> Junto con el quinto, titulado “¿Depende de la inercia de un cuerpo de su contenido de energía?”,<sup>2</sup> constituyen lo que hoy se llama teoría especial de la relatividad.

Había ciertos puntos en el electromagnetismo de Maxwell que inquietaban al joven Einstein.<sup>3</sup>

1. Su asimetría en la descripción de los fenómenos electromagnéticos: la acción entre un conductor y un imán depende solo del movimiento relativo entre ambos, pero la teoría de Maxwell distingue entre el caso de conductor en reposo y el caso de imán en reposo.
2. Los intentos infructuosos (sin mencionar explícitamente a Michelson y Morley) para detectar el movimiento respecto del *Lichtmedium* o éter, que le sugieren que la óptica y el electromagnetismo son incapaces de señalar un medio en reposo, y que, como la mecánica, deben tener las mismas ecuaciones en todos los inerciales.

Einstein propone un principio fundamental, que llama *Prinzip der Relativität*, y que afirma que “la física debe ser la misma en todos los sistemas inerciales”, y le añade un compañero, aparentemente incompatible con él: “La velocidad de la luz en vacío es isotropa y de igual magnitud en todos los sistemas inerciales, con independencia del estado de movimiento del cuerpo emisor”.

<sup>1</sup> A. Einstein, *Zur Elektrodynamik Bewegter Körper*, *Annalen der Physik* **17**, 891-921 (1905). Fechado en Berna: junio de 1905. Recibido: 30 de junio de 1905. Publicado: 26 de septiembre de 1905.

<sup>2</sup> A. Einstein, *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* (*Annalen der Physik* **18**, 639-641 (1905). Fechado en Berna: septiembre de 1905. Recibido: 27 de septiembre de 1905. Publicado: 21 de noviembre de 1905.

<sup>3</sup> Más detalles en A. Galindo, *Einstein y el Tiempo*, *Revista Española de Física*, Número Especial: Albert Einstein (I), **19**, no. 1, 64-73 (2005).



**Figura 2.** Hermann Minkowski (1864-1909).

Con este principio de relatividad, y el principio de constancia de la velocidad de la luz, Einstein resolvió el aparente conflicto entre el principio de relatividad y la electrodinámica de Maxwell y Lorentz, que privilegiaba algunos sistemas de referencia. Todo esto, como ya vimos en la conferencia del año anterior, le exigió el abandono de la simultaneidad y del éter lumínico, y le llevó a relativizar las nociones de espacio y tiempo.<sup>4</sup>

## A. Espacio-tiempo

Pero aunque, por el movimiento, los relojes atrasen y las reglas se contraigan, hay algo que el principio de relatividad no cambia: el llamado intervalo espacio-temporal

$$s_{12}^2 := c^2 (t_2 - t_1)^2 - (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1)^2$$

entre dos sucesos cualesquiera  $(\mathbf{x}_1, t_1)$ ,  $(\mathbf{x}_2, t_2)$ . Este intervalo, que engloba al espacio y al tiempo en forma inseparable, sigue siendo un absoluto, con valor independiente del inercial en que se mida.

Una nueva estructura espacio-temporal emerge del principio de relatividad. Fue el matemático lituano-alemán Hermann Minkowski, que había sido profesor de Einstein en el ETH de Zürich,<sup>5</sup> quien formuló por primera vez la relatividad especial en el modo geométrico no euclidiano que aún seguimos hoy.<sup>6</sup> Por eso el espacio-tiempo tetradimensional de la relatividad especial llámase *minkowskiano*, en honor a quien dio una elegante forma geométrica a la clarísima construcción teórica de Einstein.

Es célebre la conferencia pronunciada por Minkowski en Colonia, en 1908, pocos meses antes de morir, ante la 80ª Asamblea de Científicos y Médicos Alemanes.<sup>7</sup> Empezó con estas vibrantes palabras: *¡Señores! Las ideas del espacio y tiempo que quiero presentar ante Vds. han surgido del terreno de la física experimental y es ahí donde yace su fuerza. Su tendencia es radical. A partir de ahora el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo están condenados a desvanecerse en meras sombras, y solamente una especie de unión de los dos conservará su independencia. Para empezar, quisiera indicar cómo, a partir de la mecánica hoy aceptada, podemos llegar mediante consideraciones puramente matemáticas a concepciones distintas sobre el espacio y el tiempo.*<sup>8</sup>

Minkowski sugiere sustituir el postulado de la relatividad (como invariancia bajo el grupo que hoy llamamos de Poincaré) por un postulado —más apropiado según él— del “mundo absoluto”,<sup>9</sup> en el que las coordenadas  $x, y, z$  del espacio y la coordenada  $s := it$

<sup>4</sup> Para más detalles teóricos y experimentales, ver, por ejemplo, A. Galindo, *Relatividad, tiempo y asuntos de gravedad*, Revista de la Real Academia de Ciencias **100**, Número 1, p. 141-155 (2006).

<sup>5</sup> Por cierto, su opinión sobre Einstein como alumno no era muy buena que digamos. Llegó a referirse a él en un informe como “perro gaudul” (*faulen Hund*), por su poca asistencia a las clases.

<sup>6</sup> H. Minkowski, *Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern*, Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-physikalische Klasse. Nachrichten, 53-111 (1908).

<sup>7</sup> H. Minkowski, *Raum und Zeit*, Jahresbericht der deutschen Mathematiker-Vereinigung **18**, 75-88 (1909), *Physikalische Zeitschrift*, **10**, 104-111 (1909).

<sup>8</sup> *M. H.! Die Anschauungen über Raum und Zeit, die ich Ihnen entwickeln möchte, sind auf experimentell-physikalischem Boden erwachsen. Darin liegt ihre Stärke. Ihre Tendenz ist eine radikale. Von Stund' an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren. Ich möchte zunächst ausführen, wie man von der gegenwärtig angenommenen Mechanik wohl durch eine rein mathematische Überlegung zu veränderten Ideen über Raum und Zeit kommen könnte.*

<sup>9</sup> *Postulat der absoluten Welt.*

para indicar el tiempo  $t$  aparecen en pie de igualdad (en unidades  $c = 1$ ), hecho este que plasma en lo que llama “fórmula mística”

$$3 \cdot 10^5 \text{ km} = \sqrt{-1} \text{ s.}$$

Inicialmente Einstein acogió con frialdad y cierto desdén esta presentación geométrica de su teoría, refiriéndose a ella como “erudición superflua” (*überflüssige Gelehrsamkeit*). Pasados los años, reconocería que la formulación matemática de Minkowski le había sido de gran ayuda para desarrollar su teoría general de la relatividad.

### La cuarta dimensión

Aunque el tiempo como cuarta dimensión está implícito en el tercer trabajo de Einstein de 1905, fue sobre todo gracias a la proyección geométrica aportada luego por Minkowski y Marcel Grossmann cuando se incorpora definitivamente a la estructura de la física.<sup>10</sup>

La idea de una cuarta dimensión siempre había despertado extrañas reacciones. Einstein, refiriéndose a ella en 1916, escribía:<sup>11</sup> “Un escalofrío místico agita al no-matemático cuando oye hablar de la “cuarta dimensión”, una sensación parecida a la que producen las palabras del más allá. Y sin embargo no hay afirmación más trivial que el mundo en que vivimos es un continuo espaciotemporal de cuatro dimensiones”.<sup>12</sup>

Es en esa época también cuando surge el afán por plasmar en el arte una cuarta dimensión.<sup>13</sup> Es lo que pretende el cubismo, aunque en este caso sea una dimensión de tipo espacial la que se añade. Picasso es un exponente de esa vanguardia, y en su espléndido óleo “Las señoritas de Avignon” superpone varios planos de la cara que está en cuclillas a la derecha,



**Figura 3.** *Les demoiselles d'Avignon*, Picasso 1907 (Museum of Modern Art, New York).

transmitiendo la idea de que en un espacio de cuatro dimensiones todas esas vistas serían conspicuas desde el esotérico “plano astral” sin necesidad de dar la vuelta alrededor de la mujer.

Más científica es la aproximación de Dalí a una nueva dimensión, como refleja su obra “Crucifixión (Corpus Hiperbucico)”. La cruz es un tesseracto, despliegue tridimensional del hiperbucico tetradimensional para facilitar su visualización.

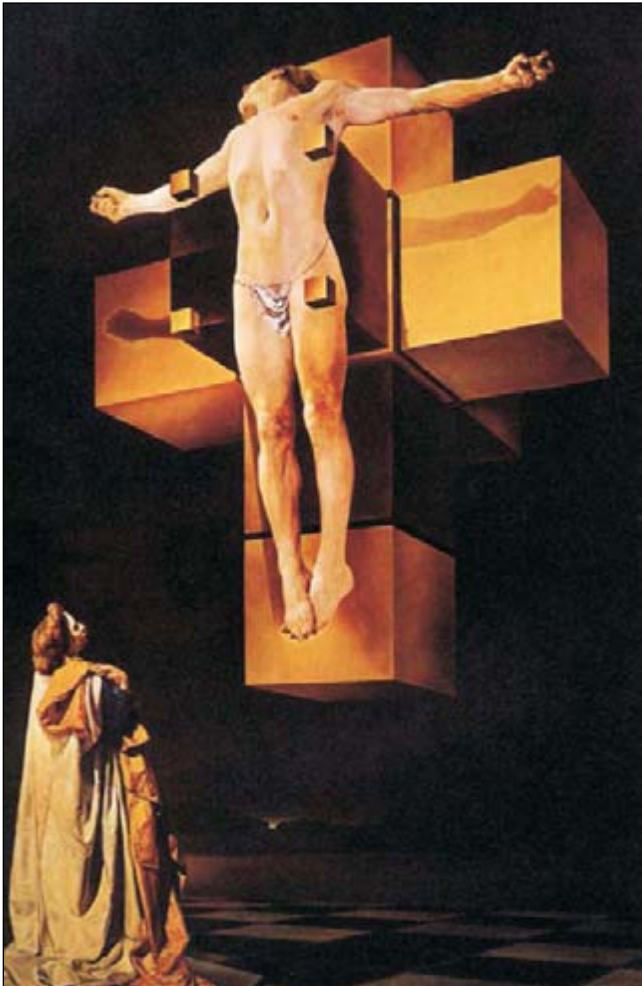
Para encontrar pinturas en que la dimensión extra sea el tiempo hay que esperar a 1912, cuando Marcel

<sup>10</sup> Henri Poincaré había contemplado anteriormente esta posibilidad, aunque la desdén. En *La relativité de l'espace*, Année psychologique 13, 1-17 (1907), y en *SCIENCE ET MÉTHODE*, Flammarion, Paris 1908, escribía: “Parece, en efecto, que sería posible traducir nuestra física al lenguaje de la geometría de cuatro dimensiones; tratar de hacer esta traducción sería tomarse demasiado trabajo para muy poco provecho ...”. (*Il semble bien en effet qu'il serait possible de traduire notre physique dans le langage de la géométrie à quatre dimensions; tenter cette traduction ce serait se donner beaucoup de mal pour peu de profit...*)

<sup>11</sup> A. EINSTEIN, ÜBER DIE SPEZIELLE UND DIE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE (GEMEINVERSTÄNDLICH), Braunschweig, Berlin 1917.

<sup>12</sup> *Ein mystischer Schauer ergreift den Nichtmathematiker, wenn von “vierdimensional” hört, ein Gefühl, das dem vom Theatergespenst Erzeugten nicht unähnlich ist. Und doch ist keiner Aussage banaler als die, daß unsere gewohnte Welt ein vierdimensionales zeiträumliches Kontinuum ist.*

<sup>13</sup> A.I. Miller, EINSTEIN, PICASSO: SPACE, TIME, AND THE BEAUTY THAT CAUSES HAVOC, Basic Books (Perseus), New York 2001.



**Figura 4.** *Crucifixión: Corpus Hiperbicus*, Dalí 1957 (Metropolitan Museum, New York).

Duchamp presentó en Nueva York la tela “Desnudo bajando una escalera (no. 2)”, donde se superponen imágenes en distintos instantes de tiempo para dar la sensación de movimiento.

## B. Energía

De modo inevitable desde su principio de relatividad<sup>14</sup> llegó Einstein en el quinto de sus trabajos de 1905, de tan solo tres páginas, a la equivalencia masa energía, traducida en la famosa fórmula  $E = mc^2$ , que él expresó entonces en la forma “variación de la masa



**Figura 5.** *Nude descendant un escalier (no. 2)*, Duchamp 1912 (Philadelphia Museum of Art, Philadelphia).

de un cuerpo igual a  $L/V^2$ ”, donde  $L$  es su cambio en energía y  $V$  la velocidad de la luz. Sugirió la posibilidad de comprobar su validez en las sales de radio; pero fue preciso esperar casi treinta años a que las reacciones nucleares desvelaran la increíble cantidad de energía que una pequeña variación en la masa conlleva de acuerdo con la simple fórmula de Einstein.

Este es esencialmente el argumento de Einstein:<sup>15</sup> supongamos un cuerpo  $X$  en reposo sobre el eje  $Ox$  de un inercial  $S = Oxyz$ , que emite dos ondas luminosas planas (pensemos por sencillez en dos fotones) en

<sup>14</sup> Einstein reconoce al comienzo de este trabajo que el postulado de constancia de la velocidad de la luz es mera consecuencia del principio de relatividad, que exige la invariancia de las ecuaciones de Maxwell bajo cambio de inerciales.

<sup>15</sup> Ver también A. Einstein, *Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung*, Deutsche Physikalische Gesellschaft, Verhandlungen 7, 482-500 (1909).

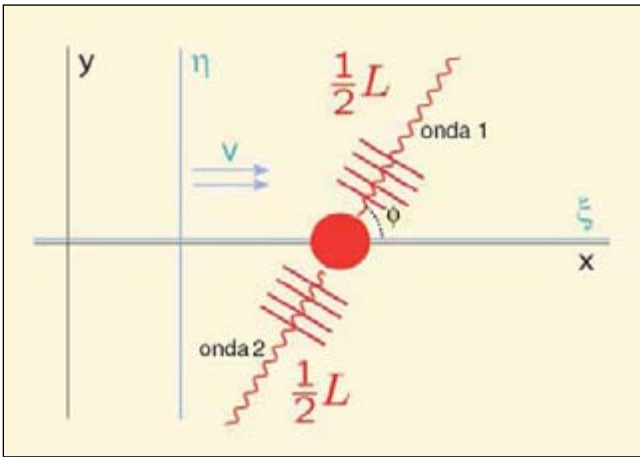


Figura 6. Esquema de una emisión de dos fotones.

direcciones opuestas y de igual energía  $\frac{1}{2}L$ , pasando a ser un cuerpo  $Y$  también en reposo y en el mismo sitio que estaba el  $X$ . Visto este proceso desde un referencial  $\Sigma = O\xi\eta\zeta$  que se mueve con velocidad  $v > 0$  a lo largo de  $Ox$ , los cuerpos  $X, Y$  se moverán con velocidad  $-v$  en  $\Sigma$ , y los fotones tendrán energías  $\bar{E}_j = \frac{1}{2}L \times \gamma(v) [1 \mp (v/c) \cos \phi]$ ,  $j=1,2$ . Exigiendo, por el principio de relatividad, la conservación de la energía en ambos inerciales, tendremos:

$$E_X = E_Y + L, \quad \bar{E}_X = \bar{E}_Y + \bar{E}_1 + \bar{E}_2 = \bar{E}_Y + \gamma(v)L,$$

donde  $E_\alpha$  son las energías en  $S$  y  $\bar{E}_\alpha$  las energías en  $\Sigma$ . Por tanto

$$K_X := \bar{E}_X - E_X = K_Y (:= \bar{E}_Y - E_Y) + [\gamma(v) - 1]L,$$

donde  $K_X, K_Y$ , como diferencias entre las energías de los cuerpos  $X, Y$  por moverse con velocidad  $v$  y sus energías en reposo, son las energías cinéticas de los mismos. Como  $v$  es arbitraria, basta tomarla muy pequeña de modo que  $v \ll c$ , para poder escribir  $K = \frac{1}{2}Mv^2$ , y obtener de la relación precedente

$$M_X - M_Y = L/c^2.$$

<sup>16</sup> Gibt ein Körper die Energie  $L$  in Form von Strahlung ab, so verkleinert sich seine Masse um  $L/c^2$ .

<sup>17</sup> Die Masse eines Körpers ist ein Maß für dessen Energieinhalt; ändert sich die Energie um  $L$ , so ändert sich die Masse in demselben Sinne um  $L/c^2$ , wenn die Energie in Erg und die Masse in Grammen gemessen wird.

<sup>18</sup> La primera vez que usa Einstein esta denominación de equivalencia masa-energía (Prinzip der Äquivalenz von Masse und Energie) es en A. Einstein, Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie, Annalen der Physik **23**, 371-384 (1907).

<sup>19</sup> J.D. Cockcroft, E.T.S. Walton, Experiments with High Velocity Positive Ions, Proc. Roy. Soc. London, **A136**, 619-630 (1932).

<sup>20</sup> I. Joliot-Curie, F. Joliot, Contribution à l'étude des électrons positifs, Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences **196**, 1105-1107 (1933).



Figura 7. Central nuclear de Cofrentes (Valencia).

En otras palabras, si un cuerpo emite radiación de energía  $L$ , su masa disminuye en  $L/c^2$ .<sup>16</sup> No es difícil ver que el resultado subsiste aunque la emisión de energía no sea en forma de ondas electromagnéticas, y puede afirmarse en general, como dice Einstein, que “la masa de un cuerpo es una medida de su contenido de energía; si esta cambia en  $L$ , la masa cambia en  $L/c^2$  en el mismo sentido”.<sup>17</sup>

La confirmación experimental de la equivalencia masa-energía<sup>18</sup> expresada por la fórmula de Einstein  $E = mc^2$  tardó muchos años en llegar. Lo hizo primero con Cockcroft and Walton, quienes, al romper un núcleo de  ${}^7\text{Li}$  bombardeándolo con un protón de suficiente energía, vieron que las dos partículas  $\alpha$  salientes, con masas de suma inferior a la del núcleo original más el protón, salían con una energía cinética que compensaba, a través de la equivalencia energía-masa, la diferencia con la energía inicial; un proceso, por tanto, de transformación de parte de masa en energía.<sup>19</sup> Poco después, el matrimonio Joliot-Curie conseguía fotografiar un suceso de transformación de un rayo gamma en un par electrón-positrón; era un proceso ahora de transformación de energía pura en materia y energía cinética.<sup>20</sup>

Al terminar el Año Mundial de la Física, ha aparecido publicada la mejor confirmación experimental hasta la fecha de la mítica fórmula de Einstein.<sup>21</sup> El balance de energía en la captura de un neutrón por núcleos  ${}^A X$  de silicio o de azufre con emisión de un gamma ha permitido comprobar la equivalencia masa-energía con precisión de  $4 \times 10^{-7}$ . Concretamente, si  $\Delta m := M({}^A X) + M(D) - M(H) - M({}^{A+1} X)$ , y  $E := E_\gamma - E_d$  es la energía del  $\gamma$  emitido menos la energía de ligadura del deuterón, se ha visto que

$$1 - \Delta m c^2 / E = (-1.4 \pm 4.4) \times 10^{-7}.$$

La cantidad de energía “congelada” en un trozo común de materia es enorme, debido a la presencia del factor  $c^2$ . Así, la transformación en energía de un simple gramo de materia equivale a unos 20 ktTNT (kilotones).<sup>22</sup>

### Usos de la energía nuclear

El ciudadano asocia generalmente la fórmula  $E = mc^2$  con la bomba atómica. Las trágicas destrucciones de Hiroshima y Nagasaki con sendas bombas atómicas de 12-15 ktTNT (uranio-235) y 20-22 ktTNT (plutonio-239) permanecerán siempre en la memoria colectiva como execrable símbolo del horror.

Los usos pacíficos de la energía nuclear son muchos e importantes. Citaré unos pocos:

1. Medicina (radiofármacos, radioterapia, imágenes, diagnóstico, etc.).
2. Arqueología (datación).
3. Gammagrafía (detección de grietas internas y soldaduras defectuosas en construcciones metálicas).
4. Fabricación de nuevos plásticos (biocompatibles, etc.).
5. Radiesterilización (material médico desechable,



**Figura 8.** Sección del ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).

higienización de lodos en depuradoras, desinfección de obras de arte afectadas por hongos, por insectos xilófagos, etc.).

6. Conservación de alimentos por irradiación (frutas, legumbres, tubérculos, bulbos, etc.).
7. Testificación de sondeos (determinación de la composición y propiedades de los estratos atravesados en una perforación del subsuelo).
8. Centrales nucleares para producción de energía.

En relación con la generación de energía, creo que puede ser interesante para el lector disponer de unas cifras:

- La fisión nuclear de un gramo de uranio-235 y la fusión nuclear de un gramo de deuterio liberan parecidas cantidades de energía, cifrables cada una en un par de toneladas equivalentes de petróleo.<sup>23</sup>

<sup>21</sup> S. Rainville, J.K. Thompson, E.G. Myers, J.M. Brown, M.S. Dewey, E.G. Kessler, R.D. Deslattes, H.G. Börner, M. Jentschel, P. Mutti, D.E. Pritchard, *World Year of Physics: A direct test of  $E=mc^2$* , Nature **438**, 1096-1097 (2005).

<sup>22</sup> 1 tTNT :=  $10^9$  calorías termoquímicas =  $4.184 \times 10^9$  J, y es aproximadamente la energía desprendida en la explosión de una tonelada (métrica) de trinitrotolueno.

<sup>23</sup> 1 tep :=  $10^7$  calorías internacionales =  $4.1868 \times 10^{10}$  J, y es aproximadamente la energía liberada en la combustión de una tonelada (métrica) de petróleo.

$$1 \text{ g } ^{235}\text{U} \approx 1 \text{ g D} \approx 2 \text{ tep}$$

- El consumo mundial de energía en el año 2000 fue de unas  $10^{10}$  tep. Es la energía que podrían producir la fisión (fusión) de unas 5000 toneladas de  $^{235}\text{U}$  (D).
- La fracción (en masa) de deuterio que hay en el agua natural es de  $0.15 \times 10^{-3}$ . Por tanto el deuterio existente en el agua de los océanos viene a ser de unas  $2 \times 10^{14}$  toneladas, y si en el futuro se consigue construir un reactor de fusión termónuclear, estas reservas de deuterio serían más que suficientes para garantizar el suministro, a los ritmos actuales, durante todo el tiempo que le queda de vida a nuestro Sistema Solar.

#### IV. EINSTEIN Y LA GRAVITACIÓN

La gravitación es la más conspicua de las interacciones básicas. En 1907 Einstein se propone encajarla en su relatividad.<sup>24</sup>

Recordando sus primeros intentos en esta dirección, escribirá más tarde:<sup>25</sup> “Entonces se me ocurrió el pensamiento más feliz de mi vida en esta forma: El campo gravitatorio puede considerarse que tiene solo una existencia relativa, de igual modo que el campo eléctrico generado por la inducción electromagnética. *Porque para un observador que cae, en caída libre, desde el tejado de una casa, no existe campo gravitatorio, al menos en su entorno inme-*

diato.” Otra manera de expresar esto es proclamando la equivalencia física entre campos de gravedad y campos de aceleraciones.

Este pensamiento lo tuvo en la Oficina de Patentes en Berna (algún día de Noviembre de 1907). Lo recordaba años más tarde así:<sup>26</sup> *Estaba sentado en una silla en la oficina de patente de Berna, cuando de pronto se me ocurrió un pensamiento: “Si una persona está en caída libre, no siente su propio peso.” Me sobresalté. Este simple pensamiento produjo en mí una honda impresión. Me empujó hacia una nueva teoría de la gravitación.*

De la misma manera que la relatividad especial reposa sobre un principio (el de relatividad), Einstein erige su teoría de la gravitación sobre el siguiente principio: “En cualquier referencial inercial local todas las leyes de la física (no gravitacionales) son las de la relatividad especial”. A esta hipótesis fundacional la bautizó Einstein como *Äquivalenzhypothese* o *Äquivalenzprinzip* en 1912,<sup>27</sup> y hoy se le conoce como principio de equivalencia de Einstein.

Este principio no incluye a la propia gravitación. Cuando se extiende también a ésta, recibe el nombre de principio de equivalencia fuerte. La teoría einsteiniana de la gravitación satisface este principio fuerte, y se conjetura que la imposición de éste singulariza a dicha teoría.<sup>28</sup>

<sup>24</sup> A. Einstein, *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen*, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik **4**, 411-462 (1907); *Berichtigungen zu der Arbeit: “Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen”*, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik **5**, 98-99 (1908).

<sup>25</sup> A. Einstein, *Grundgedanken und Methoden der Relativitätstheorie, in ihrer Entwicklung dargestellt*, en The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 7: The Berlin Years: Writings, 1918-1921. Es, muy probablemente, el borrador de un artículo para *Nature* que nunca se publicó, y que debió escribir Einstein en el primer trimestre de 1920. En su página 21, se lee: *Da kam mir der glücklichste Gedanke meines Leben in folgender Form: Das Gravitationsfeld hat an einem betrachteten in ähnlicher Weise nur eine relative Existenz wie das durch magnetische Induktion erzeugte elektrische Feld.* Denn für einen von Dache eines Hauses frei herabfallenden Beobachter existiert während seines Falles —wenigstens in seiner unmittelbaren Umgebung— kein Gravitationsfeld.

<sup>26</sup> Ver *How I created the theory of relativity*, Physics Today August, pp. 45-47 (1982) (Traducción al inglés por Y. A. Ono de unas notas de Ishiwara). Ver también la observación de A.I. Miller, *Einstein and Michelson-Morley*, Physics Today May, pp. 8-13 (1987).

<sup>27</sup> A. Einstein, *Lichtgeschwindigkeit und Statik des Gravitationsfeldes* (La velocidad de la luz y la estática del campo gravitatorio), Annalen der Physik **38**, 355-369 (1912).

<sup>28</sup> Para detalles sobre estos principios, ver, por ejemplo: 1/ C.M. Will, *THEORY AND EXPERIMENT IN GRAVITATIONAL PHYSICS*, Revised Edition, Cambridge University Press 1993; *The Confrontation between General Relativity and Experiment*, Living Reviews in Relativity, **4**, (2001), <http://www.livingreviews.org/Articles/Volume4/2001-4will>; *Relativity at the Centenary*, Physics World, vol **18**, no. 1, Jan 2005, 27-32; *Special Relativity: A Centenary Perspective*, arXiv:gr-qc/0504085; *Was Einstein Right? Testing Relativity at the Centenary*, arXiv:gr-qc/0504086 v1. 2/ A. Galindo, *Einstein y la gravitación universal*, texto base de una conferencia pronunciada dentro del



## A. 1915 y la relatividad general

Tras ocho años de intensa búsqueda, comunicaba Einstein a la Academia Prusiana de Ciencias, el 25 de noviembre de 1915, sus ecuaciones fundamentales para el campo gravitatorio. Se consideran como las ecuaciones más hermosas y profundas de la física:

$$G_{\mu\nu} := R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu},$$

con  $\kappa := 8\pi G_N/c^4$ . A la izquierda de las ecuaciones de Einstein tenemos la geometría, o si se prefiere, la gravitación, representada por el tensor  $G_{\mu\nu}$  de Einstein, expresado éste a través del tensor  $R_{\mu\nu}$  de curvatura de Ricci, de la curvatura escalar  $R$ , y del tensor métrico  $g_{\mu\nu}$  para intervalos espacio-temporales; a la derecha, la energía/materia, representada por el tensor  $T_{\mu\nu}$  de energía-tensiones. Einstein hablaría de ellas como del “mármol” (geometría) y de la “leña” (materia/energía), respectivamente.<sup>28</sup>

Con la gravitación presente, el espacio-tiempo ha dejado de ser una estructura rígida y absoluta como en la relatividad especial. Por contra, en la nueva teoría general de la relatividad que Einstein culmina con esas ecuaciones covariantes bajo cualquier cambio de coordenadas, la energía se convierte en fuente de gravitación o de curvatura, deformando el espacio y el tiempo. En frase feliz de Misner, Thorne y Wheeler,<sup>29</sup> la energía/materia le dice al espacio-tiempo cómo deber curvarse. Recíprocamente, el espacio-tiempo curvo le enseña a la energía/materia cómo debe moverse en caída gravitacional libre, concretamente, siguiendo las geodésicas de su estructura pseudoriemanniana.

## 1. Peculiaridades de la gravitación einsteiniana

La nueva teoría de la gravedad según Einstein tiene a la de Newton como caso límite, cuando los campos gravitatorios son débiles ( $|\phi|/c^2 \ll 1$ , siendo  $\phi$  el potencial gravitatorio) y las velocidades de los cuerpos pequeñas ( $v/c \ll 1$ ). Pero a diferencia de esta última, sus ecuaciones son no-lineales; dicho de otro modo, la gravitación es fuente de sí misma. En general, toda forma de energía produce gravedad. Esta circunstancia dificulta enormemente su estudio matemático, a la par que enriquece la variedad de sus soluciones.

## 2. Pruebas de la gravitación einsteiniana

La teoría einsteiniana de la gravitación ha pasado con gran éxito, hasta el momento, todas las pruebas experimentales y observacionales a que ha sido sometida.<sup>30,31</sup> Se trata de tests en campos gravitatorios débiles (como los que se encuentran en nuestro sistema solar). A saber:

1. Avance de periastrós.
2. Desviación de la luz en campos gravitatorios.
3. Pesantez de la luz o desplazamiento al rojo en la caída gravitacional de la luz.
4. Efecto Shapiro o retraso que en la recepción del eco de una señal de radar produce un campo gravitatorio interpuesto.
5. Nulidad del efecto Nordvedt o posible violación del principio de equivalencia débil por la propia energía gravitacional.

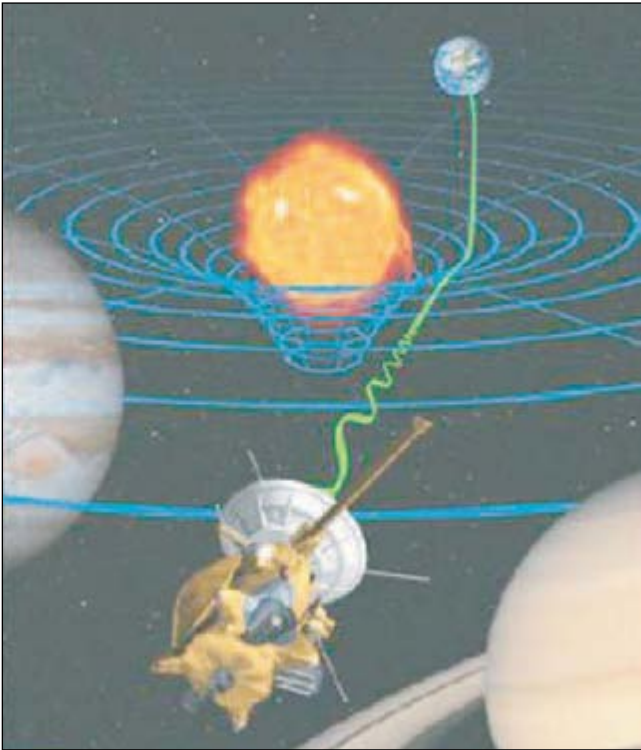
ciclo “(1905-2005): Albert Einstein” en el Instituto de España, y que aparece publicada en las págs. 39-61 del libro ALBERT EINSTEIN. CONMEMORACIÓN DEL CENTENARIO DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS EN 1905 Y DE SU OBRA (1905-2005), coordinado por A.G. y M. Aguilar, Instituto de España 2007, ISBN: 84-85559-84-3.

<sup>29</sup> *Sie gleicht aber einem Gebäude, dessen einer Flügel aus vorzüglichem Marmor (linke Seite der Gleichung), dessen anderer Flügel aus minderwertigem Holz gebaut ist (rechte Seite der Gleichung). Die phänomenologische Darstellung der Materie (auf der rechten Seite) ist nämlich nur ein roher Ersatz für eine Darstellung, welche allen bekannten Eigenschaften der Materie gerecht würde.* En A. Einstein, *Physik und Realität*, Journal of the Franklin Institute, **221**(3), 313-347 (1936). Traducción de J. Piccard: *But, it is similar to a building, one wing of which is made of fine marble (left part of the equation), but the other wing of which is built of low grade wood (right side of equation). The phenomenological representation of matter is, in fact, only a crude substitute for a representation which would correspond to all known properties of matter.* En A. Einstein, *Physics and Reality*, Journal of the Franklin Institute, **221**(3), 349-382 (1936).

<sup>30</sup> C.W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler, *GRAVITATION*, Freeman, San Francisco 1973, p 5: *Space acts on matter, telling it how to move. In turn, matter reacts back on space, telling it how to curve.*

<sup>31</sup> C. Will, *The Confrontation between General Relativity and Experiment*, Living Reviews in. Relativity **9**, no. 3, (2006); <http://www.livingreviews.org/lrr-2006-3> (Update of lrr-2001-4); arXiv:gr-qc/0510072v2.

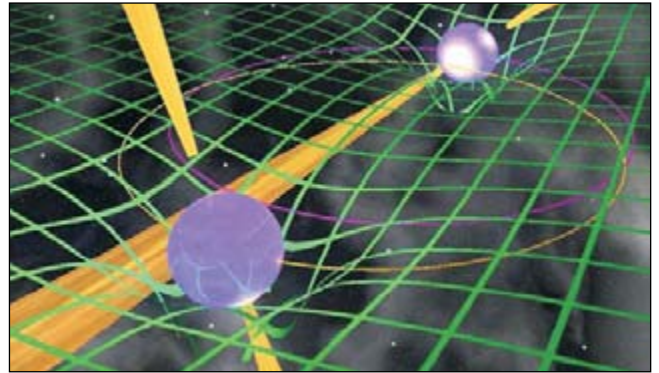
<sup>32</sup> Para una exposición elemental, ver, por ejemplo, A. Galindo, *Einstein y la gravitación universal*, loc.cit. en la nota 28.



**Figura 9.** Visión artística de la sonda Cassini en el trayecto Júpiter-Neptuno (PhysicsWeb). En verde, ondas de radio emitidas por la sonda y su deflexión solar en camino hacia la Tierra.

Las precisiones de estos tests van desde  $O(10^{-3})$  a  $O(10^{-5})$ . La comunidad científica espera con impaciencia conocer el análisis, a lo largo de este año 2007, de los datos registrados por la *Gravity Probe B* durante los años 2004-2005 sobre el efecto Lense-Thirring (acoplamiento del momento angular intrínseco de un giróscopo en caída libre entorno a la Tierra, con el momento angular de nuestro planeta).

Para gravedad fuerte (campos gravitatorios intensos, movimientos relativistas, emisión importante de ondas gravitacionales) como la existente en la vecindad de agujeros negros y estrellas de neutrones, la comprobación se ha podido llevar a cabo en escenarios limpios, como los púlsares binarios, destacando el histórico PSR B1913+16, y el singular púlsar doble PSR J0737-3039A/B. La compatibilidad de los resultados de la medida de varios parámetros en cada uno de estos



**Figura 10.** Visión artística del doble púlsar (Jodrell Bank Observatory).

sistemas con las predicciones de la teoría de Einstein es notoria, alcanzándose la impresionante precisión de 0.05% en el sistema del doble púlsar, en el que dos púlsares A y B de masas

$$m_A = 1.3381(7)M_\odot, \quad m_B = 1.2489(7)M_\odot,$$

y frecuencias

$$\nu_A = 44.054069392744(2)s^{-1}, \quad \nu_B = 0.36056035506(1)s^{-1},$$

giran uno alrededor del otro con un período  $P_b = 0.10225156248(5)d$ , en una órbita relativa de excentricidad  $\varepsilon = 0.0877775(9)$ .<sup>33</sup> Este sistema pierde constantemente energía en forma de ondas gravitacionales, y debido a ello su órbita relativa encoge 7 mm al día, estimándose en unos 85 Ma el tiempo que tardarán en fundirse sus componentes.

## B. Einstein y la cosmología

Como los griegos, y como Newton, Einstein creía en 1917 en la inmutabilidad (a gran escala) de los cielos. También era defensor ardiente del principio de Mach (la inercia de los cuerpos es relativa a otras masas, y desaparece en ausencia de estas). Para salvaguardar éste, se ve obligado a suponer un espacio finito, y sin borde. Pero entonces para evitar su colapso tiene Einstein que introducir el famoso término, llamado cosmológico, que simula una repulsión cósmica capaz de contrarrestar la atracción gravitatoria entre los astros de ese Universo finito y supuestamente estático.<sup>34</sup> Este primer modelo cosmológico relativista

<sup>33</sup> M. Kramer, I.H. Stairs, R.N. Manchester, M.A. McLaughlin, A.G. Lyne, R.D. Ferdman, M. Burgay, D.R. Lorimer, A. Possenti, N. D'Amico, J.M. Sarkissian, G.B. Hobbs, J.E. Reynolds, P.C.C. Freire, F. Camilo, *Tests of general relativity from timing the double pulsar*, Science **314**, 97-102 (2006); arXiv:astro-ph/0609417v1.

<sup>34</sup> A. Einstein, *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte (1917) 142-152.



Figura 11. Einstein (1941).

se conoce como universo cilíndrico de Einstein, en el que las secciones espaciales son esferas  $S^3$ . Al descubrirse la expansión del Universo (Hubble, 1929), Einstein se arrepintió de haber introducido ese término, “la mayor equivocación” de su vida.

En 1932, y en colaboración con el astrónomo Willem de Sitter, propone Einstein un sencillo modelo de Universo de materia no relativista en expansión crítica, que emana de una Gran Explosión y es espacialmente plano (secciones  $\mathbb{R}^3$ ).<sup>35</sup> En ese trabajo se habla por vez primera de la *constante cosmológica*.<sup>36</sup> Pero bastante antes (1923) Einstein ya estaba dispuesto a renunciar a su uso si no hay un universo cuasiestático, y los resultados teóricos de Friedmann y observacionales de Hubble le precipitan a ello. Su decepción tardía con el principio de Mach es también digna de mención, llegando a escribir en carta a Pirani (1954): *Von dem Machschen Prinzip sollten man eigentlich überhaupt nicht mehr sprechen*.<sup>37</sup>

Irónicamente, en los últimos años parece haber renacido de sus cenizas el término cosmológico, como explicación más simple de la energía oscura responsable de la aceleración observada en la expansión actual del Universo.

## V. UNA REVOLUCIÓN INCONCLUSA

Einstein persiguió infructuosamente durante casi la mitad de su vida la unificación de las interacciones clásicas conocidas (gravedad y electromagnetismo), buscando un “campo total” del que las partículas conocidas fuesen soluciones especiales y que incluso explicase las leyes cuánticas. Cuando empezó Einstein con este programa se desconocían las otras interacciones (débiles y fuertes), y se creía que las fuerzas en el interior de los átomos eran electromagnéticas.

Aunque el interés de Einstein por la unificación se remonta a 1917, el primer trabajo que tiene sobre el problema es de 1923.<sup>38</sup> En este, como en otros trabajos sucesivos, se limita a reaccionar ante las propuestas de otros autores (Kaluza-Klein, Weyl, Eddington, ...). Más tarde, presentará las suyas, en torno a conceptos como métricas no simétricas, primero, y teleparalelismo (*Fernparallelismus*) después. Recibió abundantes críticas, en ocasiones de gran rudeza. Pauli llegó a escribir (carta a Ehrenfest, 29 de septiembre 1929): “Por cierto, ya no me creo ni una sola sílaba del teleparalelismo; Einstein parece haber sido dejado de la mano de Dios”.<sup>39</sup>

Remitimos al lector curioso a la excelente puesta a punto de Goenner<sup>40</sup> para profundizar en los detalles de esta fase einsteiniana. Algunas de las técnicas desarrolladas y de las ideas propuestas en estos intentos fallidos tanto de Einstein como de otros autores han sobrevivido hasta nuestros días (concepto de *gauge*,

<sup>35</sup> A. Einstein, W. de Sitter, *On the Relation between the Expansion and the Mean Density of the Universe*, National Academy of Sciences, Proceedings, vol. XVIII (1932) 213-214.

<sup>36</sup> En su trabajo citado de 1917 se refiere a ella como constante universal.

<sup>37</sup> “La verdad es que del principio de Mach no habría que hablar para nada”.

<sup>38</sup> A. Einstein, J. Grommer, *Beweis der nichtexistenz eines überall regulären zentrisch symmetrischen Felds nach der Feld-Theorie von Th. Kaluza*, Scripta Universitatis atque Bibliothecae Hierosolymitanarum, Mathematica et Physica (Jerusalem) 7, 1-5 (1923).

<sup>39</sup> *Jetzt glaube ich übrigens vom Fernparallelismus keine Silbe mehr, den Einstein scheint der liebe Gott jetzt völlig verlassen zu haben.*

<sup>40</sup> H.F.M. Goenner, *On the History of Unified Field Theories*, Part I, Serie “Living Reviews in Relativity”, <http://relativity.livingreviews.org/lrr-2004-2>.

dimensiones extra, compactificación). Muchas otras han pasado al cajón de los recuerdos. Pero la fascinación de la utopía(?) unificadora sigue en pie, debidamente corregida y ampliada para acoger a las cuatro interacciones básicas bajo el manto común de los principios cuánticos.

Entre los intentos más importantes de las últimas décadas destacan estos dos: la teoría de supercuerdas, y la gravedad cuántica de lazos.

### A. Las supercuerdas

La idea básica del modelo de cuerdas es que las partículas elementales conocidas son excitaciones de unas estructuras unidimensionales, filiformes, llamadas cuerdas, de longitud muy pequeña, comparable a la longitud de Planck ( $10^{-35}$  m). Pero estas no pueden vivir en cualquier espacio. Las llamadas cuerdas bosónicas, cuyas vibraciones sólo producen bosones, para existir sin problemas de consistencia (relacionados con la invariancia relativista y la unitariedad), necesariamente deben vivir en un espacio-tiempo 26D (esto es, de 25+1 dimensiones).<sup>41</sup> Como buena candidata a una teoría unificadora se distinguió ya la teoría de cuerdas en 1974, cuando se encontró que entre las vibraciones de las cuerdas cerradas en un espacio-tiempo 26D aparecen unas con masa nula y spin 2, que bien podrían representar los gravitones o quanta del campo gravitatorio. En palabras de Witten, brillante físico teórico y líder indiscutible en la investigación sobre cuerdas: ... *these theories have the remarkable property of predicting gravity* ....<sup>42</sup>

Las cuerdas dieron paso a las supercuerdas al incorporar la supersimetría (simetría entre bosones y fermiones), y así poder generar, además de las fuerzas, la materia. Para “limpiar” de anomalías las supercuerdas, fue necesario restringirse a 9+1 para las dimensiones del espacio-tiempo, y a cinco modelos distintos. Pero ni estas cinco teorías consistentes de supercuerdas ni la

actual teoría M (en dimensión 10+1) que las engloba junto a la supergravedad, han tenido repercusión física alguna, observable, hasta el día de hoy. Por eso se ha escrito de las cuerdas que son una teoría en busca de un experimento.<sup>43</sup> De justicia es, sin embargo, destacar la trascendencia de estas investigaciones al terreno de las matemáticas (geometría enumerativa, topología de baja dimensión, teoría de nudos, etc.).

### B. Los lazos

Otro tanto ocurre con la gravedad cuántica de lazos, rival prominente de la teoría de supercuerdas en la búsqueda de una fusión entre la gravitación einsteniana y los principios cuánticos. Esta teoría, que también cuantifica la gravitación, no pretende, sin embargo, incorporar a las otras interacciones (fuertes, electromagnéticas y débiles) como hace la teoría de supercuerdas, aunque deja abierta la puerta para hacerlo. La denominación de “lazos” hace referencia a un tipo de variables que usa esta teoría cuántica de la gravitación, y que son ciertas integrales de campo sobre curvas cerradas.<sup>44</sup>

La gravedad cuántica de lazos se distingue, además, de la teoría de supercuerdas en que no requiere supersimetría, ni dimensiones extra, ni se desarrolla sobre un fondo continuo (el espacio-tiempo 10D) sobre el que se asientan los campos cuánticos. En la gravedad de lazos el substrato espacio-temporal es el propio campo gravitatorio, y la cuantificación forzosa de éste, como sistema dinámico, confiere un carácter “granular” a dicho espacio; en particular, el área y el volumen están discretizados.<sup>45</sup>

Este atractivo programa tampoco ha podido ser sometido al dictamen de la naturaleza.

Los años que se avecinan, con el LHC (*Large Hadron Collider*) ya en funcionamiento, tal vez arrojen alguna luz sobre por dónde buscar un final para la sinfonía inacabada de Einstein.

<sup>41</sup> Subsistía un problema, la presencia de modos taquiónicos, que se resolvería más tarde al introducir en la teoría la supersimetría.

<sup>42</sup> E. Witten, *Reflections on the fate of space-time*, Physics Today, abril 1996, págs. 24-30.

<sup>43</sup> H.J. Schnitzer, *String Theory: a theory in search of an experiment*, arXiv:physics/0311047v2.

<sup>44</sup> Se trata de holonomías de la conexión gravitacional, que, al ser cuantificadas, se convierten en excitaciones elementales del campo gravitatorio, coincidentes con los gravitones en la aproximación de bajas energías.

<sup>45</sup> C. Rovelli, *QUANTUM GRAVITY*, Cambridge University Press 2004.