

Einstein y el Año de la Física

José M. Gracia Bondía

Investigador ‘Ramón y Cajal’

Departamento de Física Teórica I

Universidad Complutense, Madrid, Spain

1 El mundo después de Einstein

Nuestra sociedad post-einsteiniana testimonia el *poder constructor* de la ciencia: al cerrar el siglo XX algo más del *veinticinco por ciento* de la producción mundial en valor dependía de la física moderna. Este es un proceso creativo que sigue en auge.

Una lista somera de conquistas económico-sociales basadas en la ciencia post-einsteiniana incluiría:

- Comunicación (internet, telefonía móvil...)
- Conquista del espacio y uso de los satélites artificiales
- Avances en transporte
- Electrónica de consumo y digitalización
- Robots en industria
- Desentrañamiento del *genoma*
- Poder de atisbar el interior del cuerpo humano

Pero nuestro mundo contempla, casi impotente, asimismo el *poder destructor*, que hace que muchos jóvenes no quieran saber nada de la ciencia. La ciencia ha tenido bastante que ver con la amenaza de terrores a cuya sombra seguimos viviendo.

No es de extrañar que incluso una revista tan superficial como *Time* escogiera el 31 de diciembre de 1999 a Einstein como el *hombre del siglo*. Y no se equivocó. Porque a la influencia directa o indirecta de sus aportaciones científicas hay que añadir la manera en

que la biografía de Einstein refleja e incluso protagoniza los tormentos de la involución nacionalista de la humanidad en la primera mitad del siglo XX.

Pero mi objetivo en esta conferencia tiene que ser más modesto: evaluar cómo cambió Einstein la física, más que cómo su física contribuyó a cambiar el mundo.

Resumiría la tesis diciendo que Einstein probablemente vivió un *momento cuspidal* de la ciencia así como de nuestra humana historia.

2 El “high road” y el “low road” de la física

Para tratar de transmitir este mensaje, voy a comenzar nuestra historia por el medio. En su chispeante libro **Interactions** (Warner Books, Nueva York, 1988) Sheldon Glashow (premio Nobel de física 1979) describe lo que llama *low road* de la física. Esto es, la vía *del laboratorio a la pizarra*, de las penosas observaciones al marco de síntesis, con frecuencia matemático, en que estas últimas pueden ser entendidas y acaso anticipadas. Según él, este es el *camino propio* de la física y ciencias afines desde la época del Renacimiento.

Así, Newton trataba de explicar las evoluciones *ya conocidas*, desde Kepler, de los cuerpos celestes; Lavoisier sólo tras laboriosos experimentos pudo argüir que la materia no se crea ni se destruye; las ecuaciones de Maxwell resumen las leyes del electromagnetismo recogidas por Ampère, Faraday, Ørsted... de modo más empírico.

Lo físicos no eran especulativos, y la historia de Lord Kelvin lo prueba: no mucho antes de Einstein, en una época en que los avances de las ciencias geológicas y biológicas habían dado ya una estimación de la edad de la Tierra sustancialmente coincidente con lo que sabemos hoy, ‘demostraba’ que la energía del sol, supuesta procedente de la combustión, debía agotarse en unos cuantos centenares de miles de años. Tuvo que ser un biólogo evolucionista quien le llamara la atención sobre la probable existencia de fuentes de energía en el interior del átomo. La anécdota enseña al menos, como decíamos, la reticencia de los físicos de entonces a especular.

Pero ya en mitad de su carrera, durante 1907–15 Einstein hizo algo que ningún físico, antes o después, ha conseguido hacer (sigue Glashow): tomó el *high road* y llegó a alguna parte (!)

Esto es: sin indicación alguna del experimento, *inventó* una teoría general de la relatividad, en que la *gravedad* aparece como un aspecto de la *geometría* del espacio-tiempo: una geometrodinámica, en la feliz palabra de Wheeler. Sin esta geometrodinámica ni podríamos entender las observaciones astronómicas, ni funcionaría bien el GPS. Podrá parecer que el descubrimiento de la primera versión de la relatividad, con su énfasis tenaz en aplicar dos simples principios, tenía tal vez ya mucho del *high road*. Pero una mirada al panorama experimental y a otros trabajos del mismo Einstein en aquel 1905 ya legendario contradiría esta opinión. Ya regresaremos a ello.

Uno puede leer en la distinción Glashowiana entre los “dos caminos” una *crítica* apenas velada (que este orador no comparte enteramente) a la reacción de muchos físicos que trabajan en problemas básicos, frente a la era de frustración y desafíos que vivimos. Los ‘gurus’ de la física actual son en amplio grado *matemáticos* —los nombres de las medallas Fields Edward Witten y Alain Connes vienen a la mente— y la reconstrucción del paisaje de las interacciones fundamentales a partir de la teoría de cuerdas posee algunos elementos metafísicos.

El *low road* no está abandonado; la construcción del famoso ‘Modelo Estándar’ de las partículas (tanto si uno se siente orgulloso del mismo como si no) sería impensable sin la colaboración de físicos teóricos y experimentales. Pero es menos popular de lo que cabe esperar.

Regresando a Einstein, es indudable que él vivió un momento cuspidal de la física. Una ventana de *cautivadora simplicidad* y progreso mediante fidelidad a principios se abrió durante los treinta primeros años del siglo XX, cerrándose luego, quizá para siempre. Fue esto, quizá lo que permitió al Einstein de la primera madurez tomar el *high road* y ‘llegar a alguna parte’.

En relación con ello, está el desarrollo de la *mecánica cuántica*. La mecánica cuántica tuvo de hecho *dos nacimientos*: la “vieja” de Planck, desarrollada por Bohr y Sommerfeld y la “nueva” de Heisenberg, a la que contribuyeron Schrödinger, Born, Pauli, Dirac y tantos otros. Einstein fue “comadrona” en ambos. Claro que para el joven Heisenberg, el papel de la teoría cuántica era sólo proporcionar una “descripción física de la conexión entre experimentos”. Bien que nadie que se haya familiarizado con ella, aun por supuesto sin entenderla por completo, ha dejado de percibir la sensación de estar tocando las reglas divinas.

Hoy sencillamente vivimos otro momento histórico. Uno puede añorar el tesoro de la simplicidad perdida; pero es una proposición por lo menos razonable que el intento de recobrarla en el *high road* presenta ahora más riesgos.

Volvamos al momento clave de nuestro relato y de nuestra celebración.

3 Annus Mirabilis

En 1905, un empleado de la oficina de patentes de Berna (Suiza), nacido en Ulm (Alemania), pero con una adolescencia cisalpina, y poco hacía promovido a fijo, publica seis trabajos. Tenía Albert apenas 26 años...

- 17 de marzo: el artículo sobre la hipótesis cuántica de Planck y el *efecto fotoeléctrico*.
- 30 de abril: Einstein completa su *tesis*.

- 11 de mayo: se recibe en el *Annalen der Physik* el primer artículo sobre el *movimiento browniano*.
- 30 de junio: se recibe el primer artículo sobre la *relatividad*.
- 27 de septiembre: se recibe el segundo artículo sobre la relatividad. $E = mc^2$.
- 19 de diciembre: segundo artículo sobre el movimiento browniano.

¡Suficiente para conmemorar! Dejemos el efecto fotoeléctrico de lado por el momento. Para ver cuán involucrado estaba el joven Einstein en problemas concretos, es conveniente focalizarse primero, aunque resulte sorprendente, en la tesis. Muchos no se dan cuenta de la importancia de la tesis de Einstein, que imaginan opacada por sus grandes contribuciones contemporáneas. Lo cierto es que en su *Doktorarbeit* Einstein:

- Calcula las *dimensiones* de las moléculas
- Determina el *número de Avogadro*
- Halla la relación cuantitativa inversa entre difusión y viscosidad

De los once artículos científicos más citados escritos por cualquier persona antes de 1912, cuatro son de Einstein. Los dos primeros son la tesis y una continuación de ella escrita en 1911 (!)

Las razones de la popularidad de la tesis de Einstein son sin embargo claras. Tratando de las propiedades reológicas de partículas en suspensión, es igualmente relevante para la industria de la construcción (la difusión en la mezcla de la arena usada para fabricar cemento), para la industria láctea (el movimiento de las micelas de caseína en la leche de vaca) o para la ecología (aerosoles en las nubes). A través de esos trabajos y, en relación, de los trabajos sobre el movimiento browniano, la *realidad de las moléculas* fue establecida.

Con la *relatividad especial*, pisamos otra problemática. La teoría de Maxwell había llegado a un *abierto conflicto* con la hipótesis del éter. Mucho se ha hablado al respecto del experimento de Michelson y Morley y de las contorsiones teóricas (como la *contracción de FitzGerald*) para explicar su resultado negativo.

Personalmente encuentro mucho más terminante el experimento de Trouton y Noble. Aquí no estamos tratando con un fenómeno de óptica, ni puede ayudar en nada la famosa contracción. Simplemente, un condensador cargado suspendido de un hilo moviéndose a través del éter debería experimentar una fuerza de torsión en el hilo, de acuerdo a la interpretación entonces en boga de las ecuaciones de Maxwell. El experimento dió también por supuesto *resultado negativo*.

Desde el punto de vista de la relatividad einsteniana, ese resultado es “obvio”. Se puede enunciar el *principio de relatividad* como la validez de las mismas leyes físicas en sistemas que se mueven relativamente con velocidad constante. Sin embargo, puede y debe hacerse un análisis de fuerzas a la Newton, que permite ver cómo a la fuerza eléctrica en el condensador se añade en un sistema de referencia con respecto al cual no está en reposo una *fuerza magnética*; ambas conspiran para mantener el sistema estable.

En sus famosa conferencia ante la Sociedad Alemana de Física en Colonia en marzo de 1908, Minkowski *dixit*:

“En adelante el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo están condenados a desvanecerse en meras sombras, y sólo una forma de unión entre ellos preservará una realidad independiente”.

Como consecuencia, otras propiedades del mundo, como la masa, la energía y el impulso, quedan entretrejidas también. Tras introducir el formalismo con que hoy se escribe la relatividad, Minkowski añade:

“La validez sin excepción del postulado de la relatividad es el verdadero núcleo de la imagen electromagnética del mundo, que ahora yace abierta a la luz del día”.

Minkowski mismo no llegó a ver publicadas estas sus cuasi-proféticas palabras.

Vamos ahora, como prometido, al efecto fotoeléctrico, que podríamos llamar “el segundo advenimiento de h ”. Metales iluminados por luz producen chispas (Hertz, 1887). Este *efecto fotoeléctrico* de alguna forma está en la base de gran parte de la tecnología moderna y merecidamente le ganó a Einstein su premio Nobel. Vamos a hacer una descripción breve del mismo.

Sea E_{\max} la máxima energía con que el electrón responsable de la chispa emerge del metal. Se tiene que:

- E_{\max} varía linealmente con la frecuencia ν de la luz con que se irradia.
- La pendiente de la gráfica que relaciona E_{\max} con ν es una constante universal independiente de la naturaleza del metal.
- Esa constante no es otra que la constante de Planck \hbar (!)

Todo esto fue explicado por Einstein en su artículo de 1905 mediante la utilización del cuanto de Planck.

¿Y la geometrodinámica? El éxito de Einstein aquí con el *high road* hace que ahora podamos comprender cuán realmente peligrosa, extraña y violenta es la inmutable esfera de las estrellas fijas aristotélica. Merodean por ella agujeros negros engullidores de estrellas, de cuyo horror ninguna descripción puede dar imagen cabal. Schwarzschild (quien desapareció poco después a consecuencia de una misteriosa enfermedad contraída en el frente ruso) fue el primero en *resolver* las ecuaciones de Einstein. Su solución ya contenía los agujeros negros.

La teoría del comienzo del Universo en un *Big Bang*, reforzada por la observación de la *radiación de fondo* del universo con una distribución de frecuencias planckiana casi perfecta, es deudora de la relatividad general einsteniana.

4 El océano de la verdad

Una de las mejores frases de Newton es cuando se refiere a sí mismo como un niño que pasó su tiempo en la playa “descubriendo y jugando con alguna concha más hermosa”,

mientras “el gran *océano de la verdad* yacía inadvertido ante mí”. ¿Hasta qué punto puede aplicarse esto a Einstein y a la ciencia moderna? El momento cuspidal de que hablamos estaba destinado a durar desde luego bastante menos que la vida misma de Einstein. Es un lugar común recordar la relación conflictiva y crecientemente contradictoria de Einstein con la teoría cuántica. Esta está parcialmente reflejada en el debate Einstein–Bohr.

Una de las ironías de la historia parece ser que Bohr “triunfó” (provisionalmente, acaso) en el debate utilizando las ideas de la geometrodinámica de Einstein. Ahora bien, como ha argüido recientemente Dyson, parece haber una *conspiración* de la naturaleza para impedir que un detector de gravitones, entendidos como partículas cuánticas individuales como los fotones, no como una colección indistinguible de una onda clásica, pueda funcionar. No sabemos cuán fundamental sea esta aparente prohibición. En todo caso, es claro que a Dyson le conforta la distinción Bohriana entre un mundo de hechos y un mundo cuántico de potencialidades. De modo que el argumento de Bohr está dentro de la lógica de su *Weltanschauung*. Pero si admitimos este punto de vista, la necesidad de una teoría de supercuerdas o de una mecánica cuántica invariante por difeomorfismos (la llamada “gravidad cuántica”) parece menos compelling.

Ya asentado en Princeton, Einstein pasó a ver toda la física desde el ángulo de sus teorías de campos favoritas (“admirando alguna concha más hermosa”). En su teoría unificada sólo cabían gravitación y electromagnetismo. Grande habría sido su sorpresa de llegar a conocer la unificación del segundo con la fuerza débil, que se negó a estudiar en sus últimos años. Bien es verdad que esta se suele interpretar en términos de un éter no menos omnipresente que el Maxwelliano, en relación con la llamada ‘ruptura espontánea de simetría’ de Higgs y otros, que sin duda le habría disgustado profundamente.

5 Mi rompecabezas favorito

¿Quedan aún problemas simples? ¿Quedan, quiero decir, auténticos problemas *críticos* que se puedan enunciar y resolver de modo sencillo (consecuencias aparte)? Presentamos ahora un modesto candidato.

No muy diferente del efecto fotoeléctrico es la *difusión de Compton*, en que los electrones y los rayos de luz ‘chocan’ y se desvían mutuamente. Los *rayos cósmicos* testimonian de los paroxismos del cosmos. Un *protón* p de los rayos cósmicos lanzado a una velocidad cercana a la de la luz puede chocar con un fotón γ de la radiación de fondo del universo; para él es un rayo de la muerte de energía intolerable.

Supongamos que la energía total del sistema es suficiente para producir el mesón más ligero, el pión π :

$$p + \gamma \rightarrow p + \pi.$$

Sea m_p la masa del protón y

$$(E, \vec{p}) = (\sqrt{m_p^2 + p^2}, \vec{p})$$

su energía-impulso. Sea w la energía del fotón, cuya trayectoria forma un ángulo θ con la del protón. Un estudiante de primer año que haya llevado lecciones de relatividad puede calcular (poco más que la tristemente célebre $E = mc^2$ se requiere) que en el centro de masas del sistema la energía está dada por:

$$E_{CM} = 2w(\sqrt{m_p^2 + p^2} - p \cos \theta) + m_p^2$$

Si $E_{CM} \geq m_p + m_\pi$, el protón debe desaparecer en un largo viaje a través del cosmos. Prevemos entonces un *cutoff* en el espectro de los rayos cósmicos a una energía (desde el punto de vista de la Tierra):

$$E_{\max} \simeq \frac{m_p m_\pi}{kT_\gamma},$$

donde k es la constante de Boltzmann y T_γ la temperatura de la radiación de fondo. En esto consiste el esperado *efecto GZK* —por Greisen, Zatsepin y Kuzman (1966). El valor calculado es igual a 3×10^{20} eV, que suena enorme; pero ya se ha comprobado que el *cutoff no se observa*.

Nuestro razonamiento es seguramente bueno, porque una inflexión similar predicha en relación con la reacción $\gamma + \gamma \rightarrow e + e$ sí *se observa*.

No esperamos que rayos cósmicos tan poderosos sean galácticos. ¿Qué está pasando, entonces?

El planteamiento del problema es simple, pero su solución puede no serlo. ¿*Nueva física* ‘a la vuelta de la esquina’? Hago notar que, medida en centro de masas, la energía involucrada no es tan grande: alrededor de 10^{14} eV, esto es, al alcance de la siguiente generación de aceleradores ya en vías de planeamiento. Algunos alegan que crisis del efecto GZK apunta a violación de la relatividad (especial y/o general). Una sugerencia menos exótica a es que las “primarias” son *neutrinos* que de alguna manera adquieren interacciones fuertes.

6 A guisa de conclusión

Resumiendo, esta introducción ha tratado de establecer algunas tesis, sin duda en principio cuestionables, pero lo bastante plausibles como para lanzar al ciclo de conferencias en un espíritu no meramente de reflexión sino de imprescindible debate.

- La física y el mundo fueron transformados por Einstein. Esto es probablemente poco controvertido.

- Einstein vivió un momento histórico privilegiado. Aquí nos referimos a la ciencia. En otro aspecto, la violenta resurrección del colectivismo y el tribalismo a comienzos del siglo XX, que marcarían las décadas subsiguientes, y que están lejos de estar extinguidos o siquiera terminalmente debilitados, contribuyó sin duda a que “le tocara vivir, como a todos los hombres, tiempos malos” (Borges). Los de Einstein estuvieron entre los peores. No hay que sorprenderse del efecto consolador que para él tenía la ciencia. Por cierto, que tal contexto ha servido de pretexto a todo género de ‘biografías no convencionales’ de Einstein, girando en torno a aspectos político-personales, no necesariamente mal informadas en los mismos, pero que fallan en recoger los aspectos más profundos de su personalidad y de su obra. Mi favorita por tanto sigue siendo **Subtle is the Lord...** de Abraham Pais (O. U. P., Oxford, 1982).
- Somos y seremos siempre deudores de su prodigiosa eclosión de creatividad en 1905.
- Las dificultades de Einstein con la teoría cuántica y (en sus últimos años) con el ‘océano de la verdad’ parecen situarle en el lado oscuro de ciertos debates. Pero no cabe duda de que la problemática suscitada por su forma personal y propia de buscar la verdad continúa candente.
- La naturaleza de los problemas de hoy es muy distinta. No está completamente claro que vivamos en un momento cuspidal, pero tampoco lo contrario. Del punto de vista íntimo de cada físico con respecto a esto hoy depende que adopte el ‘low road’ o el ‘high road’, y esta división sociológica patente parece tan fundamental como para explicar que no tenga ningún rastro de carácter generacional, aparentemente.

