

2015: EN TORNO A EINSTEIN Y SU TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

UNA REFLEXIÓN POR ENCARGO

“La Física es un esfuerzo por registrar conceptualmente lo que existe como algo que se supone independiente de lo que es percibido”.

Albert Einstein.

POR JAVIER TURRIÓN

2015: En torno a Einstein y su Teoría de la Relatividad (una reflexión por encargo)

A MODO DE SITUACIÓN

El mundo físico tiene poderosas razones para festejar este año como singular. Dejo intacto y ambiguo este pleonismo de arranque y que cada cual lo interprete a su aire y se afine en sus motivos para unirse o no a la fiesta. Este ensayo busca aproximar la figura de Einstein mediante un repaso fidedigno, si bien somero, al feliz proceso de construcción relativista, sin duda uno de los logros más sobresalientes del entendimiento humano. Las aplicaciones prácticas, astronómicas o terrestres –y hasta escatológicas– de la relatividad tienen habitual cabida en la prensa ordinaria o en publicaciones técnicas y en el locus por excelencia, Internet, y no se van por tanto a considerar aquí. A la vocación efeméride se suma el exhaustivo ahorro de recursos formales.

La Academia Prusiana de Ciencias solía celebrar sesión conjunta de todas sus Secciones los jueves y cada *Mitglieder* que tuviese algo que decir exponía a la atención de los académicos sus últimos afanes. El mes de noviembre de 1915 tuvo 4 jueves: 4, 11, 18 y 25. Einstein, como miembro de la Sección de Física matemática, intervino con sendas ponencias cada uno de esos cuatro jueves. Como remate de faena, el 25 termina su exposición con estas palabras:

“Se cierra así por fin la teoría de la relatividad general como edificio lógico. El postulado de relatividad en su forma general, que convierte las coordenadas espacio-temporales en parámetros sin significado físico, conduce con imperiosa necesidad a una teoría de la gravitación enteramente determinada que explica el movimiento del perihelio de Mercurio. Por el contrario, el postulado de relatividad general

no puede revelarnos nada sobre la esencia de los demás fenómenos de la Naturaleza que no haya ya enseñado la teoría de la relatividad especial. Mi opinión a este respecto, expresada recientemente en este lugar, era errónea. Cualquier teoría física conforme con la teoría de la relatividad especial puede incluirse, mediante el cálculo diferencial absoluto, en el sistema de la teoría de la relatividad general, sin que esta proporcione ningún criterio para la licitud de esa teoría.”

Concentrado gastronómico para gourmets que puede, sin embargo, deletrearse. De forma asimismo sintética y accesible, Einstein resume inmediatamente a su amigo Zangger, catedrático de Medicina Legal (forense) en Zurich, los logros macroscópicos de la teoría, junto con otras servidumbres, de naturaleza no específicamente racional, asociadas al éxito:

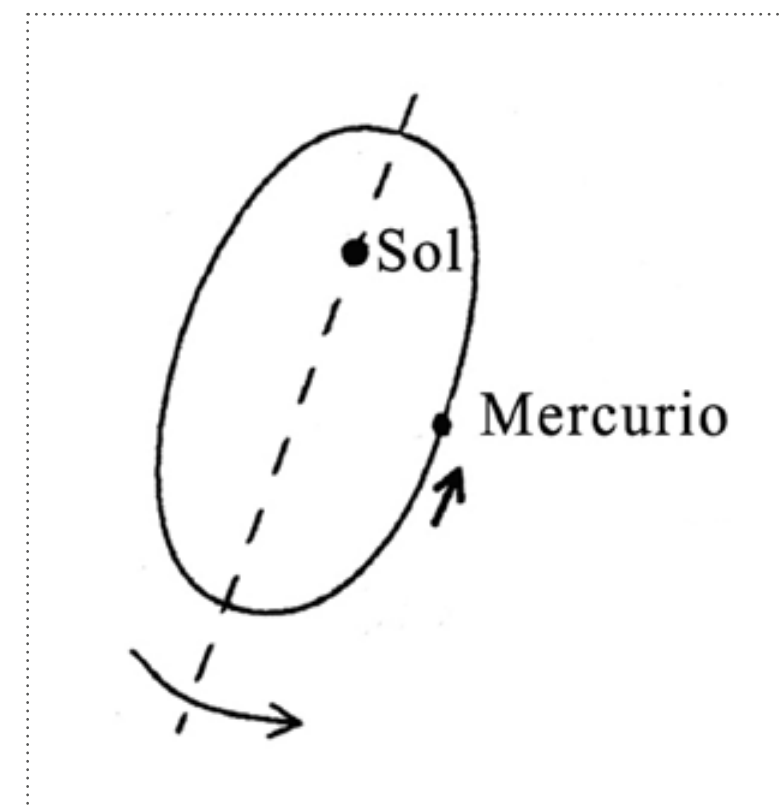
“Querido amigo Zangger:

El problema de la relatividad general está ahora legítimamente resuelto. El movimiento del perihelio de Mercurio es explicado maravillosamente por la teoría.

A partir de las observaciones, los astrónomos habían encontrado $45'' \pm 5''$. Con la teoría de la relatividad general yo he encontrado $43''$.

A esto hay que añadir el corrimiento de líneas de las estrellas fijas que también ha sido constatado con seguridad, lo que es ya una considerable confirmación de la teoría. Para la deflexión de la luz por las estrellas, la teoría proporciona ahora una cantidad dos veces mayor que antes. Te explicaré de palabra de dónde viene esto.

La teoría es de una belleza incomparable. Sin embargo, solo un colega¹ la ha entendido realmente y está tratando de nostr-

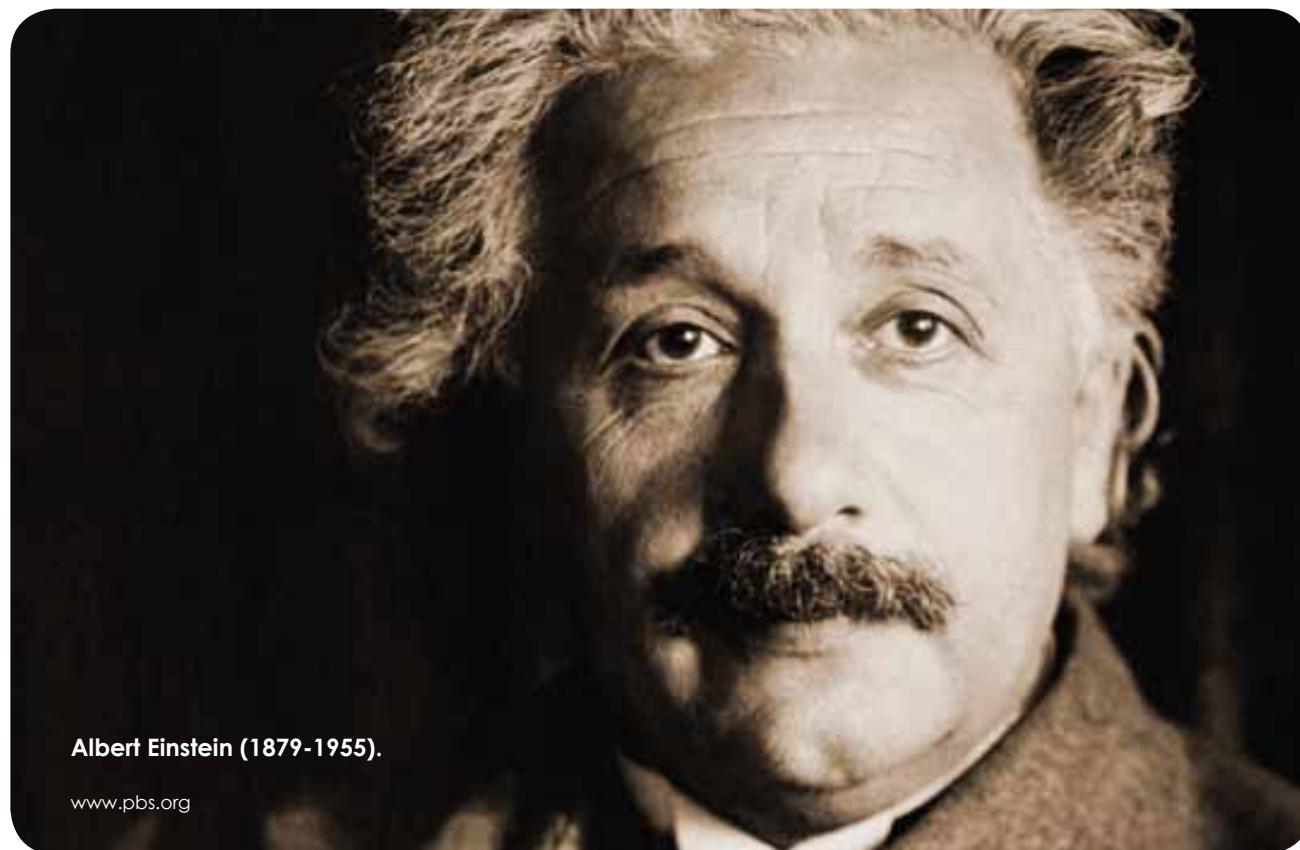


Rotación de la órbita entera alrededor del Sol en una cantidad de unos 45 segundos de arco cada 100 años, en el sentido indicado.

Imagen cedida por el autor.

REFERENCIAS:

1. Se refiere a la intrusión de David Hilbert, catedrático de Matemáticas en Göttingen.



Albert Einstein (1879-1955).

2015: En torno a Einstein y su Teoría de la Relatividad (una reflexión por encargo)

ficarla (en expresión de Abraham) de forma hábil. En mi experiencia personal, difícilmente he llegado a entender mejor la condición miserable del género humano que con ocasión de esta teoría y todo lo que guarda relación con ella. Pero eso no me inquieta."

(Carta de Einstein a Heinrich Zangger. Berlín, viernes 26 de noviembre de 1915)

Eso que llevamos por adelantado. Pero, naturalmente, aquí no se llega sin más ni más. Ha tenido que haber un recorrido previo, que Einstein señala, otra teoría más acotada, un origen más o menos explosivo que desemboque en

este escenario espectacular. En este breve paseo, introduciremos el supuesto previo de que la idiosincrasia del creador es esencial al proceso creativo y al resultado eficiente del acto creador, hipótesis de la que, como ya se intuye, va a ser difícil apearse con invocaciones empíricas. Habrá que ir a todo eso. Desde nuestra actual perspectiva, el mundo, el mundo de ayer, mientras, va a lo suyo. El año ha sido ya unos meses antes célebre por otro motivo: el 15 de abril se ha empleado por primera vez gas tóxico en Ypres (estamos en guerra desde el 1 de agosto de 1914). Einstein, por su parte, instalado en Berlín desde marzo de 1914, tiene a esas alturas su trayectoria de encuentros y desencuentros con la Física, con el mundo y con sus congéneres. Quizá sea también hora de dejar de considerar el calendario como variable independiente.

UN POCO DE FILOSOFÍA BÁSICA

Si nos adscribiésemos a pies juntillas al demolidor presagio de Hume, según el cual de lo único de lo que cabe tener certeza razonable es del pasado, no haríamos ciencia. Si del hecho de que las cosas hayan sido hasta ahora de determinada manera no cabe inferir que vayan a seguir siéndolo, el empeño en buscar "leyes de la Naturaleza" no parece sino insania, diletantismo funambulesco, terapia ocupacional, cosa de locos. Esta implícita definición de ciencia encierra a su vez, con todos sus riesgos, una fe asociada: la Naturaleza funciona de

.....
Infantería australiana en Ypres, Bélgica (1917).

ca.wikipedia.org

"La Física es pues el esfuerzo humano por cumplir el mandamiento divino de poner nombre a las cosas".



Adán y Eva, Alberto Durero.

www.harteconhache.com

forma previsible, es decir, coherente, aunque quizá no necesariamente trivial. ¿Contraviene entonces la Ciencia a Hume? Quizá sea adelantar acontecimientos, pero Einstein ha hecho vigente, al menos desde hace ahora 110 años, una desconfianza razonada en algunas certezas científicas del pasado y, simultáneamente, esa fe inherente a esta prestigiosa actividad. Ahora bien, seguimos momentáneamente irresueltos, pues, para Hume, la certeza es condición inexcusable para que haya ciencia. Por ahí andaremos.

"La Física –dice Einstein– es un esfuerzo por registrar conceptualmente lo que existe como algo que se supone independiente de lo que es percibido. En ese sentido se habla de lo físicamente-real". Que el concepto de «real» diverge de

la Física Clásica a la Cuántica es bien sabido, pero eso no altera el alcance sustancial de la ambición. En guiño a Einstein, seamos clásicos hasta donde se pueda y, puestos a apuntar alto, acudamos al Génesis: «Y puso Dios ante el hombre todo cuanto había formado de la tierra para que el hombre viese cómo lo llamaría y fuese el nombre de todo lo existente el que él le diera.» Con este apoyo, la Física es pues el esfuerzo humano por cumplir el mandamiento divino de poner nombre a las cosas, cosas que preexisten (todo cuanto Dios había formado de la tierra) a la aparición del hombre y, por tanto, a su capacidad perceptiva.

Parece que de aquí, sin miedo, podemos colegir una consecuencia inmediata: la realidad objetiva existe y es accesible al entendimiento

2015: En torno a Einstein y su Teoría de la Relatividad (una reflexión por encargo)

(los detractores –los físicos cuánticos– le llaman a eso “realismo ingenuo”). Y, sin perder el hilo, principio tienen las cosas: *En el principio (si es que hubo tal cosa), creó Dios las leyes del movimiento de Newton, junto con las fuerzas y masas necesarias*. Lo demás es cosa nuestra: *Eso es todo; el resto lo proporciona el desarrollo, por deducción, de métodos matemáticos adecuados*. Así que Einstein nos zambulle en una segunda consecuencia urgente: las Leyes de la Naturaleza existen y son únicas y permanentes. “Descubrirlas” (darles forma, ponerles nombre) es tarea humana derivada del precepto divino original.

Nos enfrentamos, por tanto, a una serie de inquietantes conclusiones:

- Estamos “dejados de la mano de Dios”.

- Las cosas son confusas.
- Nos vemos obligados a interpretar.
- Dicho de otro modo: nos vemos obligados a confiar (a tener fe) en nuestras capacidades.
- En definitiva: es imposible hacer ciencia, física en particular, sin formular hipótesis especulativas cuyo nexos con el material empírico es intuitivo, no lógico.

conjunto que verosímelmente constituye el grueso consecuente de nuestra expulsión del Paraíso.

El material empírico. Volviendo a la definición de Física, la frase de Einstein tiene un inequívoco aire burlón con respecto al obispo Berkeley, para quien, según parece (*Esse est percipi: ser es ser percibido*) solo tiene existencia real lo que puede percibirse (percepción intelectual). Es decir, en el fondo, Berkeley está en las mismas que Descartes, para quien su clásico «pienso, luego existo» viene a querer decir que, «si pienso, existo». De lo que se deriva una interesantísima conclusión: solo puedo estar seguro de que lo que pienso, existe, es decir, de la existencia de lo que pienso (puesto que estoy pensando en eso) y solo de su existencia en mi pensamiento, lo que no quiere decir que aquello que pienso corresponda a algo tangible, “real”, en el sentido ordinario. Así que, pensar es una “experiencia” empírica –para el que piensa– y, por tanto, como esa es su única verdad (su única certeza), el que piensa es un empirista. Curioso, ¿no?

¿Es Einstein empirista?



VAMOS A 1905

Einstein vive en Berna, trabaja en la Oficina Confederal de la Propiedad Intelectual (Oficina de Patentes), está *felizmente* casado con Mileva Maric y su legítimo hijo, Hans Albert, tiene un año de vida. Lieserl ha caído en combate. El 30 de junio registra en los ANNALEN DER PHYSIK su artículo «*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*» (Electrodinámica de cuerpos en movimiento). El órdago de Einstein estriba en elevar dos hechos empíricos contrastados, en apariencia contradictorios:

- El principio de relatividad de Galileo (extendido a toda la Física).
- La constancia de la velocidad de la luz.

a la categoría de supuestos previos (axiomas) sobre los que edificar su teoría y que, por tanto, den garantía notarial de los resultados que puedan obtenerse. Tras minuciosos devaneos lógicos sobre el concepto de tiempo y juegos malabares con relojes, sistemas de referencia (galileanos) y señales luminosas, se obtienen irrefutables consecuencias:

wonderfulengineering.com

“El tiempo no es un absoluto, sino que está ligado al sistema de referencia”.

2015: En torno a Einstein y su Teoría de la Relatividad (una reflexión por encargo)

- a) El arcaico éter lumínico está de sobra.
- b) La simultaneidad de los sucesos está ligada al lugar (al sistema de referencia).
- c) La velocidad de la luz es un límite insuperable para la transmisión de cualquier proceso o fenómeno.
- d) El tiempo no es un absoluto, sino que está ligado al sistema de referencia.
- e) La longitud no es un absoluto, sino que está ligada al sistema de referencia.

Es interesante reflejar la expresión que liga los tiempos de un suceso medidos desde dos sistemas distintos que se desplazan uno respecto al otro con velocidad v :

$$t_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot t_1$$

que, entre otras cosas, acredita el infranqueable límite superior de la velocidad de la luz (c). En su Conferencia de Kyoto de diciembre de 1922, resume Einstein el logro mayor:

"El tiempo no puede definirse en términos absolutos, habiendo una relación inseparable entre tiempo y velocidad de la señal. Con este nuevo concepto pude, por primera vez, resolver por completo todas las dificultades."

que viene a arruinar definitivamente nuestras certidumbres anteriores inaugurando otras incontestables. Es posible que Hume se viera en un aprieto: el empirista Einstein destapa, pensando, el verdadero rostro (nombre) del tiempo. Sin fallos lógicos. Sin trampas experimentales. No eran necesarias: la mente humana define la verdad. No hay que esperar a que nada la confirme. Lo que invierte el paradigma convencional.

Pero había más. ¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido en energía?

El 27 de septiembre presenta en los *Annalen der Physik* una especie de post data «Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?», que empieza:

"Los resultados de un estudio electrodinámico que hace muy poco publiqué en estos Anales llevan a una conclusión muy interesante que voy a deducir aquí."

e, inspiradamente, concluye:

"Si un cuerpo emite la energía L en forma de radiación, su masa disminuye en L/V^2 ... Si la teoría se corresponde con los hechos, la radiación transfiere inercia entre los cuerpos que emiten y los cuerpos que absorben."

Versión laica de aparente modestia: "Si la teoría se corresponde con los hechos...". ¡Herr Profesor: usted sabe que sí! Pero de eso ya se ocuparán otros. [En terminología actual, L es E y V , c . Por tanto: $E = mc^2$.] La masa y la energía no son magnitudes independientes (la luz transporta masa, dice Einstein). Otro golpe irreversible a las certidumbres previas. Y aún otro: la masa inerte crece con la energía total (y, por tanto, por ejemplo, con la cinética). La *spezielle Relativitätstheorie* ingresa en la Historia, si bien, de momento, no se adjetiva, porque no hay otra.

LA LARGA MARCHA

Los espíritus inquietos no se detienen. Pero quizá por eso, *audaces fortuna iuvat*. El azar quiere, en este caso, que Johannes Stark encargue a Einstein en septiembre de 1907 un artículo de recopilación sobre la relatividad –ni especial-

"La velocidad de la luz es un límite insuperable para la transmisión de cualquier proceso o fenómeno".

mente conocida ni, mucho menos, santo de la devoción de los que saben algo– para su revista *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*. El 4 de diciembre se registra ya en ella el artículo solicitado «Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen» (*Principio de relatividad y consecuencias que se derivan del mismo*), que va a significar, de hecho, el inicio del proceso hacia la relatividad general. En su parte V, titulada "Principio de relatividad y gravitación", dice Einstein:

"Hasta ahora hemos aplicado el principio de relatividad, es decir, la suposición de la independencia de las leyes de la Naturaleza del estado de movimiento del sistema de referencia, solo a sistemas de referencia no acelerados. ¿Se puede pensar que el principio de relatividad valga también para sistemas acelerados unos con relación a otros?"

Estamos acostumbrados. Cuando Einstein formula una pregunta así, la respuesta es que sí. Con algo de detalle, nos lega –oculto en el llamado Manuscrito Morgan– el relato de la transición:

"En el año 1907, estando absorto en un trabajo sucinto sobre la teoría de la relatividad especial para el Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, intentaba a la vez modificar la teoría de la gravitación de Newton para que sus leyes encajasen con la teoría [de la relatividad]. En este sentido, las tentativas me hicieron ver la viabilidad de esa pretensión, pero no me satisfacían porque tenían que basarse en hipótesis físicamente infundadas."

Me vino entonces la idea más feliz de mi vida en la siguiente forma:

El campo gravitacional solo tiene una existencia relativa, de modo similar al campo eléctrico engendrado por inducción electromagnética. Porque para un observador que cae en caída libre desde el tejado de una casa, no existe –al menos en su entorno inmediato– durante su caída, ningún campo gravitacional. Es decir, si el observador deja caer cualquier cuerpo, estos

2015: En torno a Einstein y su Teoría de la Relatividad (una reflexión por encargo)

cuerpos permanecen, con relación a él, en estado de reposo o de movimiento uniforme, con independencia² de su naturaleza física o química. El observador está legitimado por tanto para interpretar su estado como de «reposo».

La ley experimental –excepcionalmente singular– según la cual todos los cuerpos caen, en el mismo campo gravitatorio, con la misma aceleración adquiere inmediatamente, gracias a esta idea, una significación física profunda, pues si se diera una sola cosa que cayese en el campo gravitatorio de forma diferente a las demás, el observador podría darse cuenta

entonces, con ayuda de ella, de que se encuentra en un campo gravitacional y de que está cayendo en este campo. Pero no existe tal cosa –como revela la experiencia con gran precisión–, por lo que el observador carece de cualquier fundamento objetivo para considerarse en caída libre en un campo gravitacional. Más bien tiene derecho a interpretar su estado como de reposo y que, con relación a la gravitación, su entorno está libre de campo.

El hecho experimental de la independencia de la materia de la aceleración de caída es por lo tanto un poderoso argumento para hacer extensivo el postulado de relatividad a sistemas de coordenadas que se muevan, unos con relación a otros, con movimiento no uniforme."

(Principios fundamentales y métodos de la teoría de la relatividad expuestos según su evolución. Enero de 1920)³.

La idea más feliz se plasma pues en la decisión de poner en marcha la pulsión intelectual y emocional –de las que no anda precisamente falto Einstein– de que es posible extender el principio de relatividad a sistemas acelerados. En tal caso, la relatividad, la única que conocemos has-

“Las masas inercial y gravitatoria son iguales”.

Albert Einstein.

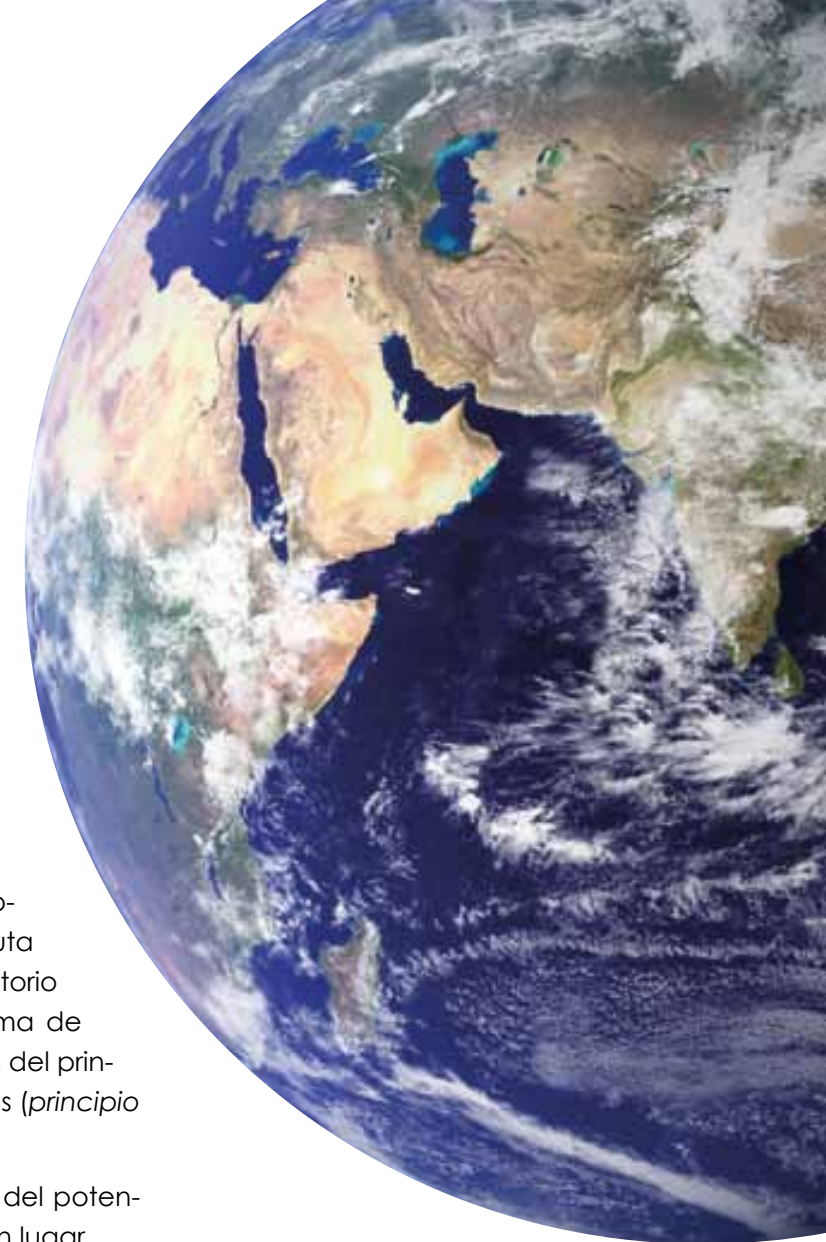
en.wikipedia.org

ta la fecha, perdería su cariz restringido y se abriría la puerta a su generalización en la que, ahora sí, cabría la gravitación. Las dificultades de la extensión planean ya en este artículo, así como el detalle, obsesivo en Einstein, de que masa inerte y masa gravitatoria son equivalentes (como ha acreditado experimentalmente Eötvös) y deben tener, por tanto, el mismo tratamiento. Listemos las nuevas certidumbres:

1. Las leyes físicas son las mismas referidas a un sistema acelerado (en una región libre de campo) o a un sistema en reposo en un campo gravitatorio (homogéneo). Dicho de otro modo, hay absoluta equivalencia física entre campo gravitatorio y aceleración correspondiente del sistema de referencia, lo que representa la extensión del principio de relatividad a sistemas acelerados (*principio de equivalencia*).
2. La velocidad de los procesos es función del potencial gravitacional del punto en que tienen lugar.
3. Los rayos de luz se *tuercen* en un campo gravitacional.
4. Las masas inercial y gravitatoria son iguales.
5. La relación $E = mc^2$ rige tanto para la masa inerte como para la gravitatoria (en caso contrario, un cuerpo caería en el mismo campo gravitatorio con diferente aceleración según el contenido en energía del cuerpo, lo que no sucede).

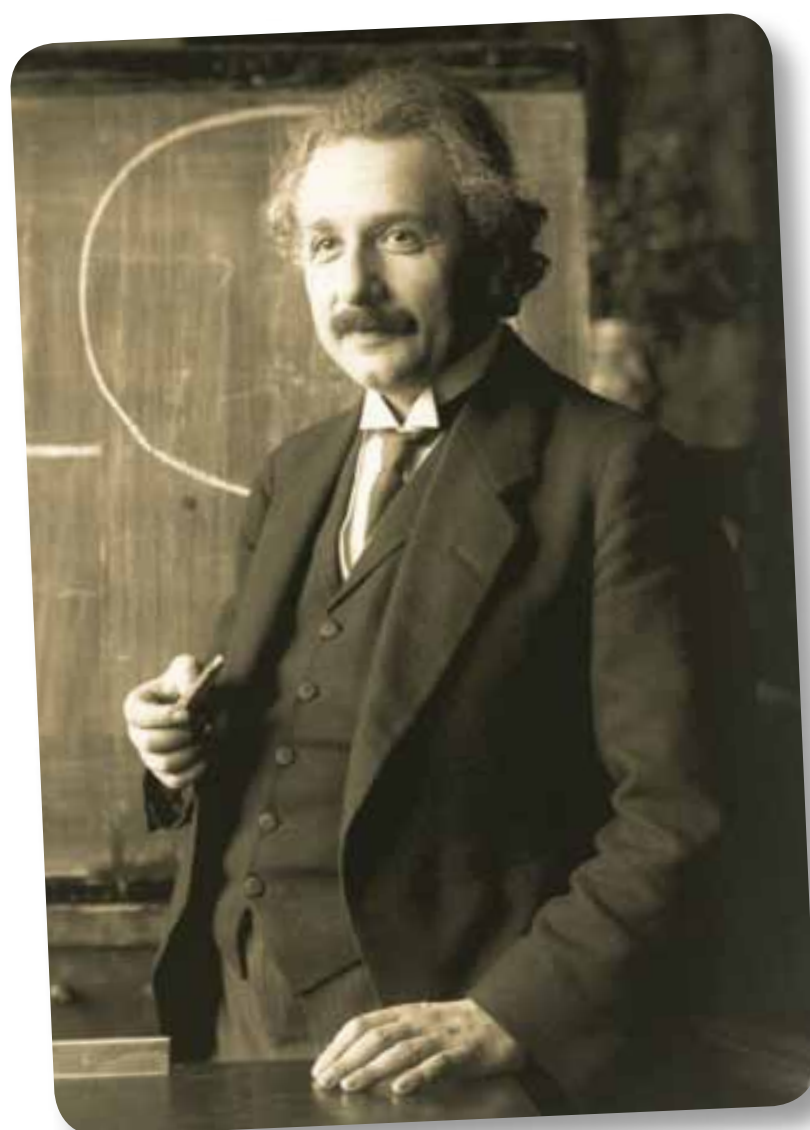
El asunto del movimiento del perihelio de Mercurio está ya en el horizonte mental einsteiniano, tal vez más como obsesión que como resaca de la idea más feliz. Es probable que, en la génesis de las ideas posteriores, también felices pero quizá más tortuosas, haya tenido un efecto inductor la tensión teórica por explicar un problema empírico. La experiencia como fuente de ideas, algo a no olvidar.

En 1908 sale Minkowski al escenario físico. La sustitución del tiempo por la variable imaginaria $t = ct \cdot \sqrt{-1}$ hace



visibleearth.nasa.gov

1. Si se prescinde, claro, deliberadamente de la resistencia del aire.
2. *Grundgedanken und Methoden der Relativitätstheorie in ihrer Entwicklung dargestellt.*



2015: En torno a Einstein y su Teoría de la Relatividad (una reflexión por encargo)

que las coordenadas espaciales y la temporal jueguen el mismo papel. Los fenómenos físicos se representan en un espacio cuatridimensional convirtiéndose entonces las relaciones espacio-temporales de los sucesos en teoremas geométricos. Empieza aquí el rápido calvario de la *matematización* de la Física, perdiendo esta progresivamente cualquier vestigio de la antigua realidad objetiva.

Todo el caudal del artículo de 1907 precipita en el tubo de ensayo de Praga, en cuya Universidad alemana trabaja Einstein 15 meses, en un nuevo artículo. El título, por lo demás, es revelador de las intenciones: «*Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes*» (Influencia de la fuerza gravitatoria en la propagación de la luz). La conclusión einsteiniana de que la velocidad de la luz no va a poder

considerarse ya en lo sucesivo, en general, una constante universal en un campo gravitatorio estático, sino que depende del potencial gravitatorio del lugar, significa el abandono de uno de los pilares de la *antigua* teoría de la relatividad (tiene ya seis años), lo que le acarrea incompreensión e incluso agresividad entre el *staff* científico.

Generalizar implica pues renunciar a parte de los supuestos previos. Algo que Einstein parece hacer con mayor soltura que sus rivales. [Si, en la extensión que se busca, hay que renunciar a algo, no será al principio de relatividad. El principio de constancia de la velocidad de la luz, en cambio, solo puede mantenerse limitándose a dominios espacio-temporales de potencial gravitacional constante.] En esta ocasión, Einstein calcula asimismo el ángulo de curvatura (la

desviación) que experimentan los rayos luminosos al pasar por la proximidad del Sol. La teoría prevé a su vez un corrimiento al rojo de las rayas espectrales del Sol. En su más puro estilo, lanza este reto: “*Sería de desear que los astrónomos considerasen la cuestión expuesta aquí incluso si las anteriores reflexiones parecen insuficientemente fundadas o descabelladas.*” Da por tanto por supuesta, a título personal, la certidumbre de su verdad. Dicho de otro modo, como se ha indicado antes, Einstein inaugura un nuevo criterio de verdad (una nueva epistemología): el albacea es la razón. Será la incredulidad de los demás la que requiera experiencias ratificadoras. Estamos en junio de 1911.

De ahora en adelante, Einstein da la impresión de tener prisa por que se comprueben experimentalmente sus resultados teóricos. Frente

a lo que pueda parecer, eso no necesariamente acredita la prevalencia de su fe empirista (en sentido convencional) sobre sus convicciones teóricas. Con independencia del innegable espaldarazo emocional íntimo que pueda significar la ratificación empírica de lo que se postula, no cabe desdeñar su dimensión social: el presumible efecto convincente de la comprobación experimental va a revertir positivamente, de paso, en la valoración pública del postulante. A nadie le amarga un dulce.

De 1912 a 1915 se va a abrir un largo proceso de dificultades teóricas, pues el mantenimiento del principio de equivalencia parece contradecir las leyes de Newton (la de acción y reacción en particular), salvo



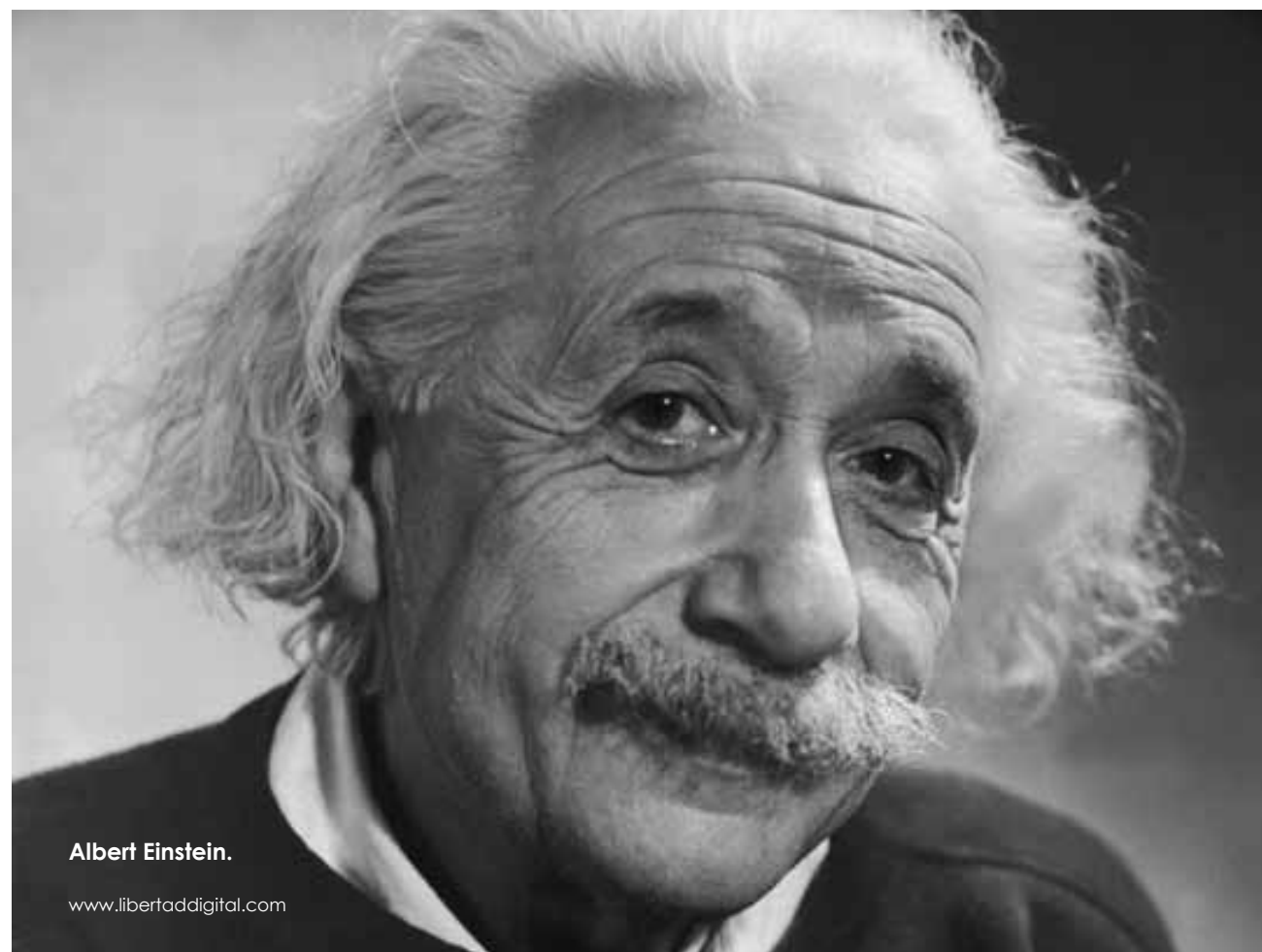
Hermann Minkowski (1864-1909).

www.gruppozerog.it

que se restrinja la validez del principio a campos (gravitacionales) infinitamente pequeños. Ambas situaciones son absolutamente contrarias a la fe einsteiniana: ser clásico hasta donde se pueda (es decir, *estirar* la vigencia de las postulaciones clásicas) y extender *ad infinitum* unas ideas felices irrenunciables. Esto le va a exigir a Einstein *descubrir* la forma variacional (hamiltoniana) de las ecuaciones del movimiento y reconsiderar la formulación tensorial

“Einstein calcula el ángulo de curvatura que experimentan los rayos luminosos al pasar por la proximidad del Sol”.

2015: En torno a Einstein y su Teoría de la Relatividad (una reflexión por encargo)



Albert Einstein.

www.libertaddigital.com

de Minkowski (con su elemento característico, el tensor unificado de energía-tensión). De ahí a la generalización del formalismo a un espacio curvo hay solo un paso perfectamente probable. Se trata, en definitiva, de sustituir la geometría sin curvatura del espacio cuatridimensional de la relatividad especial por una geometría riemanniana. La familiarización con el cálculo tensorial y con la extensión de la geometría a la de Riemann le vendrá de la mano de Marcel Grossmann.

“El tiempo, el espacio y la gravitación no tienen una existencia independiente de la materia”.

Un último empujón. Si, en la descripción de un movimiento, la elección del sistema de referencia implicase la aparición de aceleraciones sería forzoso, para enunciar las leyes de ese movimiento, incluir información sobre el sistema empleado. Precisamente, el principio de relatividad (especial) significaba que la velocidad del observador no influye en la forma de las leyes físicas. El coherente combate (unificador) einsteiniano subsiguiente va a consistir en la impenitente búsqueda de la covariancia general. Decir que determinadas ecuaciones son covariantes respecto de una transformación de coordenadas significa que dichas ecuaciones mantienen su forma cuando se pasa de un sistema de coordenadas a su transformado. Exi-

gir que determinadas ecuaciones sean covariantes generales equivale a decir que mantienen la misma forma en todos los sistemas de coordenadas (es decir, ante cualquier tipo de transformaciones de coordenadas).

EN RESUMIDAS CUENTAS

- a. Resumen de urgencia de la nueva formulación:
 - Todos los sistemas (*gaussianos*) de coordenadas son equivalentes para la formulación de las leyes de la Naturaleza.
 - Las trayectorias de los rayos luminosos en el seno de campos gravitatorios son curvas.
 - La masa *deforma* el espacio, es decir: *las propiedades del espacio no son intrínsecas, sino condicionadas por la materia.*
- b. Ratificaciones experimentales de la teoría.
 - El movimiento del perihelio de Mercurio.
 - La desviación de la luz por el campo gravitacional.
 - El corrimiento al rojo de las rayas espectrales.
- c. Resumen para la prensa: *El tiempo, el espacio y la gravitación no tienen una existencia independiente de la materia.*
- d. Resumen formal: $G = kT$.
- e. Resumen kepleriano: «Ubi materia, ibi geometria».

Lo que nos devuelve circularmente al principio. ¿Y qué hubiera pasado si el eclipse no hubiese confirmado la previsión de la teoría? *Pues lo hubiese sentido por Dios, porque la teoría es correcta.* Respuesta que no es *boutade*, sino jerarquía epistemológica. ¿Hay alguna *trascendencia* mayor?

Javier Turión
Físico

“¿Y qué hubiera pasado si el eclipse no hubiese confirmado la previsión de la teoría? Pues lo hubiese sentido por Dios, porque la teoría es correcta”.