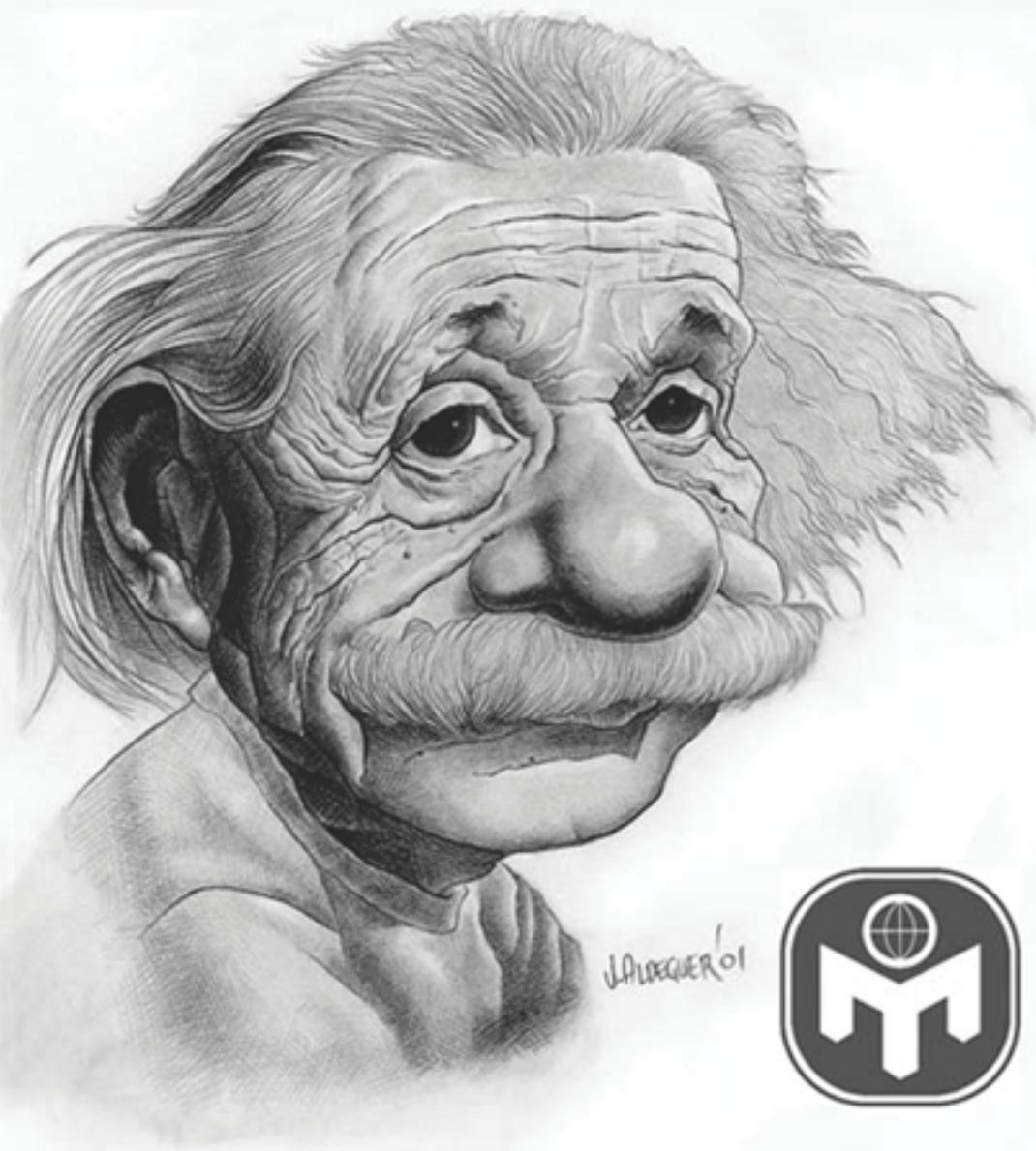


Selección del Omnia Especial Einstein

Mensa España

Abril 2005



ÍNDICE

Josep M.Albaigès i Olivart <i>Einstein y el efecto fotoeléctrico</i>	2
David C. — — — <i>Notas biográficas sobre Albert Einstein</i>	5
Javier García Algarra <i>Una tarea demasiado difícil, incluso para Einstein</i> . .	10
Juan Antonio Piñera Molina <i>Relatividad especial</i>	21
Juan Carlos Sanz-Martín <i>A la caza del zigzag browniano</i>	24

EINSTEIN Y EL EFECTO FOTOELÉCTRICO

Josep M. Albaigès i Olivart

Con mi reconocimiento al amigo Pedro Crespo, que tanto ha contribuido a este artículo con sus ideas y comentarios.

Hablar de Einstein es pensar en seguida en la famosa fórmula $E = mc^2$, y a partir de ella, en la bomba atómica y en los sorprendentes aspectos de la teoría de la relatividad. El camino sin retorno que se inició hace un siglo no se ha limitado a reformular nuestro concepto de la materia y del universo: ha supuesto un cambio en nuestras concepciones más íntimas, las relacionadas con el mismo espacio y tiempo.

Todo el mundo sabe que Einstein fue Premio Nobel, pero menos conocido es que este galardón no le fue otorgado por la Teoría de la Relatividad, sino por otra revolucionaria aportación suya: la explicación del efecto fotoeléctrico, en ese año 1905 cuyo centenario conmemoramos. Durante mucho tiempo se pensó que en realidad esa máxima distinción por un descubrimiento "menor" pretendía remediar el fallo de no habersele otorgado por su Teoría de la Relatividad, pero la reflexión que da la perspectiva de un siglo permite conceder más respeto a quienes fueron capaces de comprender, o al menos acertar con visión de futuro, con el alcance de la visión einsteiniana en ese otro campo, la más revolucionaria y original de todas.

Hagamos un poco de historia. El llamado "efecto fotoeléctrico" era conocido desde que fuera descubierto por Hertz en 1887: se sabía que un metal desprendía electrones al ser sometido a una radiación electromagnética. También, desde Maxwell (1864) se sabía que la luz era un caso particular de radiación electromagnética; su importancia especial para nosotros radica en que nuestros ojos son sensibles a esta "franja visible" de la radiación, que desde un punto de vista cualitativo, no difiere de la ultravioleta, de la infrarroja, de las ondas de radio o incluso de los rayos X.

También se sabía que en los metales hay electrones que se mueven más o menos libremente a través de la red cristalina. Estas partículas no escapan del metal a temperaturas normales porque carecen de energía suficiente, pero calentándolo, y aumentando por tanto la energía de éste, sí se producían desprendimientos electrónicos. Los electrones así "evaporados" se denominan termoelectrones, éste es el tipo de emisión que se da en las válvulas electrónicas.

El efecto fotoeléctrico consistió en ver que también se pueden liberar electrones (fotoelectrones) mediante la absorción por el metal de la energía de radiación electromagnética. Se suponía que este desprendimiento sería proporcional a la energía de la radiación, que se creía proporcional a su intensidad (nadie pensaba en que tuviera relación con la frecuencia), por lo que la explicación era primera vista fácil: al impacto contra el metal, la energía radiante sería transmitida, siempre de forma continua, a los electrones super-

ficiales, que serían así desprendidos del resto del cuerpo cuando la hubieran absorbido en cantidad suficiente. Esos llamados "fotoclectrones" transportarían la energía "captada" de la luz incidente, de la misma forma que la ola que llega a la playa es capaz de mover piedras.

Pero el análisis más atento del fenómeno presentaba inesperadas dificultades. Pues la experimentación demostraba que para cada substancia existía una frecuencia mínima o umbral de la radiación electromagnética por debajo de la cual no se producían fotoclectrones por más intensa que fuera la radiación. Además, alcanzado ese umbral mínimo, la cantidad posterior de emisión electrónica sí aumentaba cuando se incrementaba la intensidad de la radiación que incidía sobre la superficie del metal.

Aquí radicaba lo extraño del fenómeno. En primer lugar, ¿por qué la emisión no empezaba hasta un determinado umbral de frecuencia? Podría pensarse que el tamaño de las piedras hacía precisa una altura mínima de "ola". Planck había explicado la radiación del cuerpo negro mediante "efectos de resonancia", pero siempre, en la ortodoxia, considerando que la energía de la radiación era continua. No estaba la cosa muy clara, pero era una línea de investigación. De hecho, el físico alemán Philipp Lenard llevaba tiempo trabajando en el fenómeno sin llegar a una conclusión satisfactoria.

Pero esto no valía, pues, como hemos dicho, aplicada la frecuencia de luz que arrancaba electrones a partir de esa energía umbral sí se daba la proporcionalidad esperada entre la intensidad de la luz y el número de electrones arrancados, así como la frecuencia y la energía promedio de los mismos. No había ningún efecto de "acumulación" de energía, pues, alcanzado el umbral, la emisión de electrones empezaba instantáneamente, y la energía de éstos aumentaba con la frecuencia; la intensidad influía sólo en el número de electrones arrancados. ¿Cómo podían explicarse estas paradojas? Los esfuerzos de los profesores universitarios se estrellaban contra ellas.

En 1905, el joven Albert Einstein era un empleado en la oficina de patentes suiza que vivía con su esposa Mileva en un pequeño apartamento en Berna con el hijo de ambos, Hans Albert. Manteniéndose al día a través de la lectura de cuantas revistas científicas caían en sus manos, su poderosa mente daba vueltas a todos los problemas de la física del momento. No sabemos en qué noche de reflexión se le ocurrió la idea, pero ésta fue similar a la que dos mil quinientos años antes tuviera Demócrito, aunque, a diferencia del abderiense, Einstein tuvo que luchar de momento con una fuerte oposición. Así como el griego, contra la evidencia sensorial, supusiera que la materia no era continua sino formada por elementos muy pequeños a los que llamó átomos, también Einstein aplicó la misma idea a la energía. ¿Por qué no suponer que ésta era transmitida por paquetes? Con esa hipótesis, todo pasaba a ser muy sencillo. Cada paquete o "cuanto de luz", como él lo llamó (más tarde serían denominados "fotones"), tendría un contenido de energía proporcional a la frecuencia, y resultaba natural suponer que un átomo sólo sería arrancado si el cuanto transportaba una cantidad de energía suficiente para vencer su "resistencia umbral" a ser arrancado de la superficie metálica. A partir de ahí, es claro que aumentando la intensidad luminosa (número de cuantos) también lo haría el número de electrones arrancados.

Einstein, modestamente y con precauciones, presentó su trabajo con el título "Sobre una concepción heurística de la naturaleza de la luz" a la revista *Annalen der Physik*. Fue leído, pero su teoría provocó más polémica que admiración: de hecho, era un regreso a la teoría corpuscular de la luz de Newton, arrinconada desde que los experimentos de difracción habían establecido la naturaleza ondulatoria de ésta. De hecho, su teoría de los

quanta no empezó a ser comprendida del todo hasta 1913, cuando Bohr expuso su teoría atómica. El premio Nobel de 1921, tras la comprobación de la Teoría de la Relatividad gracias al eclipse solar de 1919, fue el inicio de su reconocimiento como el mayor físico del siglo.

El mundo empezaba así a pensar de otra forma. Quien no le perdonó su formulación de los *quanta* fue el antes citado Lenard, que toda su vida consideró que Einstein le había "robado" su descubrimiento. El físico Millikan, que también ganaría con el tiempo el Premio Nobel, siguió investigando el fenómeno y procedió dentro de la máxima ortodoxia científica: pese a su escepticismo y a lo que él consideraba "falta de sentido" de la teoría einsteiniana, acabó aceptándola "porque explicaba la realidad".

De hecho, 1905 fue el *annus mirabilis* en la vida de Einstein. En el mismo año emitió las teorías del movimiento browniano y de la relatividad especial, pero éstos son temas para otros autores.

Por encima del hecho del descubrimiento científico en sí, éste ilustra sobre algunos aspectos de la ciencia en los que no se medita lo suficiente. El primero sería que todo avance científico revolucionario se consigue apartándose de lo que dicta el "sentido común" (el propio Einstein definió éste como "el conjunto de prejuicios acumulados a través de los siglos"). Los antiguos creyeron siempre a pies juntillas que la Tierra estaba inmóvil en el centro del Universo, y los filósofos griegos, ateniéndose al sentido común, habían conjeturado que las leyes universales del movimiento implicaban una amortiguación progresiva de éste. En su día, Galileo, contra lo que dictaba el famoso "sentido común", adoptó la teoría copernicana según la cual la Tierra giraba alrededor del Sol, y pocos años después Newton afirmaba, también contradiciendo esos mismos "prejuicios seculares", que un cuerpo dotado de una velocidad inicial nunca detenía su movimiento rectilíneo y uniforme si no se le oponía una fuerza. Ambas ideas, con otras muchas, acabaron siendo aceptadas, y desde entonces forman parte del nuevo "sentido común" actual, transmitido en las aulas universitarias.

Es muy fácil criticar teorías científicas cuando fracasan, pero hay que ver en ellas por lo menos la audacia del que se internó en nuevas líneas de pensamiento. Un ejemplo: la teoría del éter, en el que creyeron los científicos del XIX simplemente porque su mente les llevaba hacia él. Poco importaba que esa fabulosa sustancia fuera tan ligera que resultaba indetectable con cualquier balanza, y que a la vez tuviera la rigidez del acero: la experimentación conducía, por el análisis de las propiedades de la transmisión de la luz, a concebir una enteolequia semejante, y la idea sólo fue abandonada cuando surgieron otras explicaciones más eficaces (no más intuitivas) para los mismos fenómenos. Max Planck, un científico conservador, aunque no compartía las ideas de Einstein sobre la Relatividad, escribió a la Academia Prusiana a fin de apoyar su incorporación, pues de hecho, como manifestó, "es imposible introducir ideas nuevas en las ciencias más exactas sin correr riesgos de vez en cuando".

La hipótesis de Einstein sobre el efecto fotoeléctrico, como el de la Relatividad, se internaba por caminos en los que la imaginación, libre de las muletas del mal llamado sentido común, es capaz de internarse por nuevos territorios que marcarán el paisaje de la humanidad durante los siglos siguientes. Sea reconocida una vez más, en este año del centenario de sus descubrimientos (y cincuentenario de su muerte) la genialidad del sabio, unánimemente declarado como la inteligencia más preclara del siglo XX.

Notas biográficas de ALBERT EINSTEIN

David C.

Albert Einstein nació el día 14 de marzo de 1879 en Ulm (Baviera). Su padre, Hermann Einstein, regentaba un pequeño negocio de electromecánica junto con su hermano Jacob, ingeniero, quien inculcó en Albert la pasión por la Ciencia. Pauline Koch, madre de Einstein, tenía un carácter más serio y artístico que el de su marido, y constituyó un apoyo esencial en el crecimiento y la forja de la personalidad de Albert, pues nunca dudó de la capacidad de su hijo y tuvo siempre gran confianza en él. Durante los primeros años, por motivos económicos, la familia tiene que trasladarse a diferentes ciudades, como Múnich, Milán y Pavía.

No sólo no fue un niño prodigio sino que parece que padeció cierto retraso a la hora de hablar. Ya de niño dejaba entrever los rasgos más sobresalientes de su personalidad futura: gran sensibilidad, interés intelectual, independencia y amor a la soledad. No era del agrado de Einstein el aprendizaje memorístico, y veía en la escuela una organización que ejercía sobre los niños una presión constante para inculcarles esencialmente un sentimiento de obediencia y disciplina. Fue un alumno de curiosidad insaciable, que siempre tenía preguntas que no estaban en los textos, lo que llegaba a irritar a algunos profesores. Era un aventajado alumno en Matemáticas, aunque mediocre en Historia y en lenguas clásicas.

En 1900 termina sus estudios superiores, y en 1901 publica «Consecuencias de los fenómenos de capilaridad», su primer escrito científico. En junio del año siguiente comienza su trabajo como técnico en la Oficina de Patentes de Berna, empleo que consiguió gracias a la recomendación del padre de Marcel Grossmann, matemático, compañero de trabajo y amigo que le aportó muchos conocimientos de geometría. En 1903 contrae matrimonio con Mileva, compañera de estudios, de carácter difícil, reservado, taciturno. Einstein obtuvo el grado de doctor en Filosofía por la Universidad de Zúrich con el trabajo «Una nueva determinación de las dimensiones moleculares».

Es 1905 un año especial para Einstein y para la Física, porque verán la publicación algunos de sus trabajos más importantes (se habla de ellos con detalle en otros artículos de «Omnia»). En 1906 escribe un artículo sobre el movimiento browniano con el que demuestra la existencia del átomo. Por suerte para todos, sus palabras *«pronto llegaré a esa edad estacionaria y estéril en la que uno comienza a quejarse de la mentalidad revolucionaria de los jóvenes»* estaban aún lejos de cumplirse, si es que alguna vez lo hicieron.

Tras la publicación de sus revolucionarias ideas, empieza un largo ir y venir por distintas universidades: primero es admitido en la Universidad de Zúrich, desde donde se traslada a Praga, y vuelve a Zúrich para ocupar la Cátedra de Física Teórica de la Escuela Politécnica. En 1913 es nombrado profesor de la Universidad de Berlín y miembro de la Academia de Prusia. En contra de los deseos de Mileva, la familia se traslada a la fría Berlín. La guerra la sorprende fuera, y ya no volvería junto a su marido.

Durante la guerra, Einstein, como la mayoría de los científicos, es obligado a colaborar con el ejército. Sus compañeros, movidos algunos por envidia y otros por motivos políticos, no miraron con buenos ojos sus actitudes pacifistas, ni incluso su manera de vestir. Consideraba el sistema militar como un despliegue de vanidad nacional, como *«la peor característica del rebaño humano»*, y pensaba que un hombre que siente placer al marchar de cuatro en fondo es despreciable, y *«sólo por error ha recibido un cerebro, pues le hubiera bastado con la médula»*. En 1916, publica su versión definitiva de la Teoría General de la Relatividad. Einstein se pasaba las horas muertas encerrado en su ático, su atuendo era extravagante y dejó de usar calcetines para el resto de su vida. Mileva, que no quería compartir este estilo de vida, hizo elegir a Einstein, lo que inició el expediente de divorcio entre ellos. Más tarde Einstein se casó con su prima Elsa, quien vivía en la casa desde hacía tiempo.

En 1921 le es concedido el Premio Nobel de Física por su teoría del efecto fotoeléctrico (en contra de lo que era costumbre, no vistió chaqué para la ceremonia). La situación en Alemania no hace sino empeorar. Los filósofos han observado que *«la norma del mundo es ensalzar a los santos muertos y perseguir a los vivos»*, y Einstein tampoco iba a dejar de ser víctima de este tácito comportamiento social: él y sus ideas sufren frecuentes ataques. Un tal Leibus ofreció una recompensa para quien lo asesinasen y, tras pagar una irrisoria multa, fue puesto en libertad. Era frecuente que se le interrumpiese en las conferencias llamándole *«cerdo judío»*, e incluso algunos físicos llegaron a organizar asambleas para atacar a su persona y a sus teorías. Einstein se aleja de Alemania e inicia una serie de viajes por EEUU, en los que aprovecha para defender la causa sionista y recaudar fondos para fundar la Universidad Hebrea de Jerusalén.

En su regreso a Europa se detiene en Inglaterra, donde deposita una corona de flores en la tumba de Newton; después pasa por Francia (lo que no agradó en Alemania) y por Japón. España, en momentos conflictivos pero de un resurgir social y cultural único en Europa, recibe la visita de Einstein en 1923; llega primero a Barcelona, viaja a Madrid, visita la Residencia de Estudiantes y es recibido por el rey Alfonso XIII. Fue nombrado doctor *«honoris causa»* por la Facultad de Ciencias de la Universidad de Madrid.

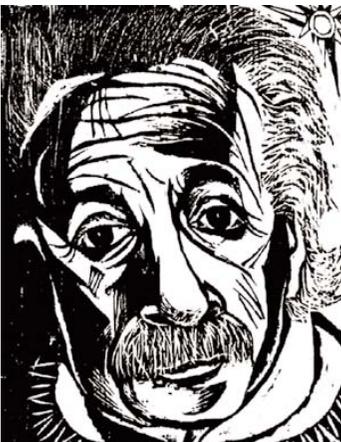
Su vida, bajo cierta complacencia oficial, era constantemente amenazada. En cuestiones científicas, en contra de la tendencia de los científicos coetáneos, sigue intentando unificar las fuerzas de la Naturaleza. En 1929 la Academia de Prusia publica su *«Teoría del Campo Unificado»*. Por otro lado, su ciudad natal retira el nombre de la calle que le había otorgado, y la policía hitleriana asalta su casa y confisca sus bienes. Regresa a Europa, pero esta vez a Bélgica, donde la policía tiene que vigilar su casa día y noche para protegerlo. Einstein presentó su dimisión en la Academia, para evitar a su amigo Planck –el presidente– la embarazosa tarea de hacerlo. Toda esta situación de inestabilidad le hace modificar su actitud pacifista, y pasa a defender la acción militar como medio para evitar un potencial mal mayor; considera el pacifismo, en esos momentos, como un suicidio. En 1933 Einstein se embarca hacia un exilio del que nunca volvería. Su amigo y físico Paul Langevin, quien con su célebre *«viajero»* ayudó a hacer más asequibles las ideas de Einstein, comentó al respecto: *«Semejante acontecimiento solamente se podría comparar con el traslado del Vaticano de Roma al Nuevo Mundo. El pontífice de la Física cambia de sede, y los Estados Unidos se constituyen así en el centro de las Ciencias»*.

Einstein, que fija su residencia en Princeton, veía en América un «país muy afortunado» y admirable no sólo por sus vastos recursos nacionales, sino también por su capacidad creadora y por la alegre actitud de su pueblo. Aunque también consideraba como «trágica miopía» el aislamiento de EEUU frente a la creciente anarquía política internacional. Cuanto más evidentes eran los indicios de una inminente guerra, con tanta más fuerza luchaba él en favor de la paz. Consideró urgente que los trabajadores del mundo decidieran no fabricar ni transportar armamentos, así quedaría abolida la guerra para todos los tiempos. Propugnaba la creación de un superestado mundial con una fuerza militar disuasoria. Toda su participación en la creación de la bomba atómica se limita a escribir dos cartas al presidente estadounidense Roosevelt para incentivar el «Proyecto Manhattan» para su creación; parece ser que Einstein, a la vista del desastre humano que causó, dijo que de haberlo sabido hubiera preferido hacerse fontanero.

En 1939, con motivo de la Feria Mundial de Nueva York, se enterró a gran profundidad un recipiente de metal al que se denominó «Cápsula del tiempo»; dentro se incluyeron algunos objetos representativos de la época... y un mensaje de Einstein. En él ensalzaba la capacidad técnica y de producción que había alcanzado el hombre, pero al tiempo se quejaba de la falta de organización que hacía vivir a los hombres con el temor de perder el empleo, de sufrir privaciones, de verse obligados a matarse entre sí: *«Todo esto se debe a que la inteligencia y el carácter de las masas son muy inferiores a la inteligencia y el carácter de la minoría que crea los valores reales de la sociedad»*. En 1950 la Universidad de Princeton publica la nueva teoría de Einstein sobre el Campo Unificado, fragmentaria, coherente formalmente, pero difícilmente experimentable en la práctica. En 1952 le ofrecen la presidencia del Estado de Israel, pero presenta su renuncia: *«Durante toda la vida me he dedicado a problemas objetivos y carezco de las aptitudes naturales y de la experiencia necesaria para tratar como es debido con la gente y ejercer funciones oficiales»*.

El tiempo no pasa en vano, y el 11 de abril de 1955 Einstein cae gravemente enfermo, es hospitalizado y el día 18 de abril fallece. Los funerales fueron tan sencillos como sus gustos: no hubo ceremonias, ni discursos, ni siquiera una tumba; rodeado de un reducido grupo de gente fue incinerado, y sus cenizas esparcidas en las aguas del río. Su hija adoptiva, Margot, quien también estaba allí hospitalizada, se había acercado en silla de ruedas a verlo unos días antes. Seeling, su biógrafo, dice *«que le habló tranquilo de lo inalterable del destino del hombre y de su próximo fin, que le parecía una terminación natural»*.

Pocos han sido los honores que no se le han rendido a este genio. Ha sido considerado como el hombre más querido y el ídolo más duradero de la Tierra, el Newton del s.XX, el cerebro más poderoso de su siglo, el hombre más grande del mundo, uno de los ocho hombres que en los últimos 2500 años han «creado universos» y representan cumbres en la síntesis intelectual y en los descubrimientos: Pitágoras, Aristóteles, Ptolomeo, Copérnico, Galileo, Kepler, Newton y Einstein.



Einstein poseía esa mezcla encantadora de niño y coloso mental, un hombre de gran personalidad y carisma, que no tenía ambición alguna por la fama y las riquezas (no le preocupaba el dinero, que consideraba subordinado a sus ilusiones); poco dado a exaltaciones sentimentales, hombre sencillo, nada amigo de los convencionalismos, que se oponía a la monarquía y a los privilegios de una aristocracia, protagonista de multitud de actos de solidaridad, desde conciertos de música (como intérprete) hasta un curso de Física elemental en un sanatorio antituberculoso. Como en otros grandes genios, se concitaban en él las raras cualidades de artistas sensibles y de científicos creadores. Sentía un profundo amor por la música clásica, y tenía una especial habilidad para tocar el violín, aunque también tocaba el piano. Fue sobrio en el comer y despreocupado en el vestir. Jamás poseyó automóvil, se desplazaba siempre en transporte público. Se negó a aceptar el cargo de vicepresidente honorario de la «Mark Twain Society», debido a que Mussolini había recibido un honor análogo. Sin embargo, siempre que pudo no le faltó una atención para las personas que acudían a su encuentro, muchas veces personas humildes, camareros, niños que deseaban pedirle opinión sobre sus propias ideas científicas.

En numerosas ocasiones hizo públicas sus ideas sobre Economía. Defendía que la industria debía ser limitada en interés del bien común, reduciendo el número de horas de trabajo hasta que quedase abolida la desocupación. También era de la opinión de que aquellas industrias que adquiriesen un carácter de monopolio tenían que ser controladas por el Estado, para evitar la estrangulación artificial de la producción y el consumo. Por el contrario, tampoco era partidario de la organización estatal: temía que el poder burocrático llevase a la muerte de toda obra sana. Se inclinaba por un Estado que pudiera intervenir como fuerza reguladora o limitativa. Le parecía también urgente el establecimiento de una pensión a la vejez, y que se excluyese a las personas de cierta edad de algunos trabajos. Opinaba que debía imponerse una restricción a las herencias, y que esta restricción, junto con un más alto nivel de educación popular, podría «*derribar las barreras que ahora separan las clases económicas de la sociedad y que determinan la esclavitud heredada de las clases inferiores*». Sugería un fortalecimiento de la organización política de Europa, y recomendaba que se ensayase una abolición gradual de las tarifas aduaneras. Fueron numerosas las ocasiones en que pidió el uso de la Economía con fines políticos, más concretamente contra los países que infringiesen unas mínimas normas internacionales. Pero cuando preguntó que por qué no se forzaba a Japón, mediante un boicoteo comercial, a desistir de su política de fuerza, le contestaron: «*Nuestros intereses comerciales son demasiado fuertes*». Coincidió con Lorentz, por quien sentía un gran respeto como persona y como científico, en que era necesaria una cooperación internacional de los hombres cultos para el bien de la humanidad. Con franco optimismo predecía que los futuros historiadores explicarían los síntomas morbosos de nuestros días como «*las dolencias infantiles de una humanidad ambiciosa, debidas tan sólo a la excesiva velocidad con que la civilización ha avanzado*».

Einstein, siempre consciente de su privilegiada posición, que cuando menos hacía su palabra fácil de oír, intentó aprovecharla cuanto pudo por el bien de la humanidad. Decía cosas como: «*La vida es muy peligrosa. No por las personas que hacen el mal, sino por las que se sientan a ver lo que pasa*». «*Serán más queridos aquellos que hayan contribuido en mayor grado a la elevación de la raza y de la vida humanas. Pero al preguntarnos cómo son nos encontramos ante dificultades no desdeñables. En el*

caso de los dirigentes políticos e incluso religiosos, muchas veces no podemos decir si su labor ha sido buena o peligrosa... El verdadero valor de un ser humano está determinado, en primer término, por la medida y la forma con que ha logrado liberarse de sí mismo». «Estoy convencido de que los pueblos por sí solos no se odian entre sí. Si no fueran lanzados unos contra otros podrían vivir amigablemente; especialmente ahora, cuando la Ciencia y el talento han vencido la mayor parte de las enfermedades, y han hecho posible a todos vivir con la alegría y la felicidad de la salud. Esta era debería ser la era del paraíso sobre la Tierra. Nunca ha dispuesto la humanidad de tantas posibilidades de ser feliz como dispone ahora». «No hay religión más elevada que la ayuda entre los hombres. Esta obra hacia el destino común del hombre es el credo más respetable». «La verdadera religión está por encima de mezquinos dogmas, catecismos, rezos solemnes y antagonismos. La verdadera religión es la vida, la vida con una sola alma, con una sola bondad, con una sola justicia». «Que un individuo pueda sobrevivir a su muerte física, está también más allá de mi comprensión, ni tampoco deseo comprenderlo; esas creencias son buenas para los temerosos, para los egoístas y para las almas débiles. Me bastan los misterios de la eternidad de la vida y la insinuación de la admirable estructura de la realidad, unidos al ingenuo deseo de intentar humildemente comprender una parte, aunque sea pequeña, de la inteligencia manifestada en la Naturaleza». Según él no era necesario profundizar mucho en la vida del hombre para saber que «es evidente que existimos para nuestros semejantes». Con todo esto no es de extrañar que los estadounidenses establecieran la Medalla Einstein para premiar anualmente el sentido humanitario de alguno de sus ciudadanos que, como el científico, dedicase su vida al bien público. Amante de Goethe, de Shakespeare, de Voltaire, de Schopenhauer, Locke, Hume y Nietzsche, decía que «Los hermanos Karamazof», de Dostoiévsky, y «Don Quijote», de Cervantes, durarán tanto como las estrellas. Opinaba que la imaginación es más importante que la inteligencia, pues hace a los hombres igual que dioses, capaces de hablar con las estrellas.

Sobre sí mismo decía que era «un hombre independiente y honrado que, libre de prejuicios nacionales y de clase, tan sólo desea el bien de la humanidad y el plan más armonioso posible de la existencia humana». Y también: «Respetad a un hombre como individuo, pero no lo transforméis en un ídolo». Antes de Albert Einstein se pensaba que si todas las cosas materiales desaparecieran del Universo, quedarían el tiempo y el espacio; pero él se encargó de demostrar, con su Teoría de la Relatividad, que el tiempo y el espacio... desaparecerían con ellas. ○

Bibliografía

- [1] «Albert Einstein», Ernesto García Camarero, Ed. Castell, 1992
 [2] «Albert Einstein», H. Gordon Garbedian, Vitae Ediciones, 2003

La segunda obra de la bibliografía, aunque escrita en vida de Albert Einstein, es en mi opinión menos objetiva que la primera. Por otro lado, quiero dar las gracias a algunos amigos y amigas que, con sus indicaciones, su tiempo y su paciencia, me han ayudado a mejorar este texto. También quiero dejar claro que este comentario de la bibliografía es la única idea u opinión mía que aparece en él, todo lo demás está tomado casi literalmente de los autores de las biografías. Un saludo

UNA TAREA DEMASIADO DIFÍCIL, INCLUSO PARA EINSTEIN

Javier García Algarra

Una manzana madura termina, tarde o temprano, por caer del árbol. No se aleja volando como un pájaro de los que se posan en las ramas, ni emprende viaje rumbo a la Luna. La observación de este obstinado comportamiento de las manzanas, las tejas desprendidas o las piedras lanzadas hacia lo alto exige una explicación convincente para satisfacer la curiosidad de la especie humana.

Aristóteles afirmó que los cuerpos caen porque se mueven hacia su lugar natural, que es el suelo en el caso de los objetos inanimados. Además añadió que lo hacen con mayor velocidad cuanto más pesados son, algo que no parece muy descabellado si comparamos el delicado vuelo de una pluma con el violento descenso de una pesa de plomo. Dada la autoridad intelectual del filósofo griego su explicación se aceptó durante veinte siglos.

Pero llegó la Edad Moderna, con su fe en la capacidad del intelecto, y una idea revolucionaria se abrió paso. Una teoría no es válida sólo porque su autor sea muy sabio sino su porque se pueda comprobar con experimentos. Galileo postuló que, en contra de lo afirmado por Aristóteles, todos los objetos caen con la misma velocidad y, según cuenta la leyenda, lo demostró arrojando dos esferas de diferente densidad desde lo alto de la torre de su ciudad natal, Pisa.

Pasadas unas décadas, un erudito inglés se preguntó si la fuerza que atrae a las manzanas suicidas es la misma que mantiene la Luna girando alrededor de la Tierra. Hace falta tener mucha imaginación para lanzar una hipótesis así. Utilizando el lenguaje preciso de las matemáticas afirmó que la fuerza con que se atraen dos cuerpos es proporcional al producto de sus respectivas masas dividido por la distancia que los separa elevada al cuadrado.

Además, formuló tres leyes muy simples:

- Todo cuerpo mantiene su dirección y velocidad si no es perturbado por una fuerza externa.
- La fuerza que ejerce un cuerpo en movimiento es el producto de su masa por su aceleración.
- La fuerza que aplica un cuerpo sobre otro es contrarrestada por otra de igual magnitud y sentido opuesto.

Con este erudito inglés, llamado Isaac Newton, nació la física en el sentido moderno, porque utilizó un "modelo matemático" para describir los sucesos naturales. La extraordinaria potencia del método científico se reveló en todo su esplendor. Fue la primera gran unificación, una meta que persiguen todos los físicos. La unificación es la formulación de una ley que permite comprender observaciones que se tenían por

fenómenos muy distintos. Kepler había descrito el movimiento de los planetas según tres hipótesis basadas en la observación y Galileo había sentado algunos de los principios sobre el movimiento de los cuerpos, pero sólo Newton dio con la clave para explicar que todo esto no eran más que manifestaciones de una misma fuerza.

El modelo matemático tiene una ventaja adicional. No sólo explica lo observado sino que permite predecir. Cuando hablamos de que un modelo predice algo, no nos referimos a una visión mágica o adivinatoria, sino a que, mediante deducción matemática, se anticipan sucesos no observados nunca. Por ejemplo, en 1846 se descubrió Neptuno en el lugar en el que habían predicho Adams y Leverrier estudiando las irregularidades de la órbita de Urano, utilizando solamente el cálculo y las leyes de Newton.

La humanidad conocía otros fenómenos que no podían explicarse mediante la mecánica clásica. Se sabía que ciertos materiales, como el ámbar, atraían o repelían a otras sustancias o que cierta piedra tenía la capacidad de atraer el hierro y servía para construir un útil tan importante como la brújula. En 1860, James Clerk Maxwell consiguió un éxito semejante al de Newton. Mediante cuatro ecuaciones demostró que electricidad y magnetismo son caras de una misma fuerza que, por ello, se denominó electromagnética. Las ecuaciones de Maxwell predecían una curiosa solución, la fuerza electromagnética podía dar lugar a ondas capaces de transmitirse por el aire. La existencia de esas ondas fue comprobada experimentalmente por Hertz. Esas simples cuatro ecuaciones son la base sobre la que se asentó toda la segunda revolución industrial (el motor eléctrico, la bombilla incandescente, el telégrafo, el teléfono, la radiodifusión) y la actual sociedad de la información.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Ecuaciones de Maxwell

A finales del siglo XIX, el éxito de la física era tal que en 1894 Michelson afirmó: "Parece probable que la mayoría de los grandes principios fundamentales han sido ya establecidos. El futuro de la física debe buscarse en la mejora de la precisión [experimental] a partir del sexto decimal". Pero la física es una ciencia muy cruel, pues un único experimento u observación cuyo resultado no se ajusta al modelo hace que éste entre en crisis y haya que construir otro nuevo que explique todo lo anterior más lo nuevo que se ha descubierto. Como los científicos son humanos, cuando empiezan a aparecer estas anomalías se suele producir una epidemia de ceguera colectiva temporal. Se echa la culpa a la inexactitud de las medidas, se mira para otro lado para evitar el vértigo de arruinar el edificio de la ciencia establecida. Los datos son obstinados y tarde o temprano no queda más remedio que afrontar la realidad, la teoría falla en determinados ámbitos aunque en otros siga siendo muy útil desde el punto de vista práctico. Es necesario que surja un genio capaz de ver más allá subido a los hombros de los gigantes que le precedieron según la hermosa metáfora de Newton.

A principios del siglo XX ese genio era un empleado de 26 años de la oficina de patentes suiza. Se llamaba Albert Einstein y estaba preparando una serie de artículos que en 1905 asombraron al mundo científico. Uno de ellos describía la agitación térmica de la superficie de un líquido, conocida como "movimiento browniano", como una manifestación inequívoca de la naturaleza atómica de la materia. Otro, por el que recibió el premio Nobel en 1921, explicaba el efecto fotoeléctrico mediante una teoría sorprendente: la luz no es un flujo continuo de energía, sino que está compuesta por una agregación de partículas discretas llamadas fotones. El tercero, y más chocante aún, la relatividad especial se basaba en una idea que es contraria por completo al modelo de Newton: la velocidad de la luz en el vacío es constante e independiente de la velocidad del observador. Este golpe mortal a la interacción inmediata a distancia estaba contenido en las ecuaciones de Maxwell y el propio Michelson junto con Morley había encontrado por medio de un famoso experimento que la velocidad de la luz era independiente del movimiento de la Tierra. Pero si es constante e independiente de la velocidad a la que se mueve el observador, la consecuencia es que el espacio y el tiempo absoluto no existen. Einstein dedujo de ese principio hechos sorprendentes como que dos cosas tan aparentemente diferentes como la masa y la energía son en realidad lo mismo.

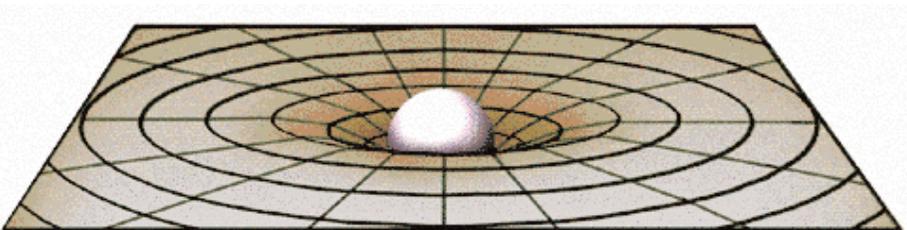
Cuando diez años después, en plena Primera Guerra Mundial, publicó su teoría sobre la Relatividad General, los cimientos de la física se tambalearon. El universo de Newton, que es el que la experiencia de nuestros sentidos nos hace sentir como natural, está compuesto por una serie de objetos que ejercen entre ellos una fuerza a distancia instantánea. Estos cuerpos (estrellas, planetas, manzanas o científicos) están situados en medio de un espacio homogéneo en el que el tiempo transcurre con el mismo paso en todos sus puntos. La relatividad especial ya había establecido que ninguna interacción física puede viajar más deprisa que la luz. ¿Cómo es posible entonces que la Tierra "sienta" instantáneamente la atracción del Sol? Descartado un intercambio de partículas que no pueden desplazarse de forma instantánea, la explicación de Einstein resulta atractiva. La Tierra gira alrededor del Sol, no porque una fuerza "tire" de ella, sino porque la masa del Sol deforma el espacio-tiempo que lo rodea y en ese medio no homogéneo la trayectoria de un cuerpo que viaja libremente por el vacío no es una línea recta sino una elipse con el Sol en uno de sus focos.

Espacio-tiempo, curiosa expresión que cualquier lector de ciencia ficción reconocerá como el recurso mágico que justifica que el chico pegue unos saltos de millones de años luz en un abrir y cerrar de ojos para salvar a la chica. La evolución de nuestra especie nos dotó de la capacidad de percibir los peligros que nos acechaban en tres dimensiones especiales y como seres racionales fuimos capaces de construir conceptos tan abstractos como "ahora", "antes" o "después". Como dijo Leibniz, el contemporáneo y rival intelectual de Newton "el espacio y el tiempo son un orden de las cosas, no cosas en sí". Forman una unidad que es deformada por la presencia de una masa y es esa deformación o curvatura la que fuerza a otros cuerpos distantes a moverse siguiendo unas líneas denominadas "geodésicas". Dicho así, resulta, para qué vamos a negarlo, incomprensible. ¿Por qué transcurrido un siglo sus ideas siguen siendo tan complicadas de entender?

La mecánica clásica es la que se enseña desde la enseñanza primaria hasta los primeros cursos universitarios. Acostumbrados a pensar en términos newtonianos, que resultan más "naturales" para nuestros sentidos, es normal que encontremos la

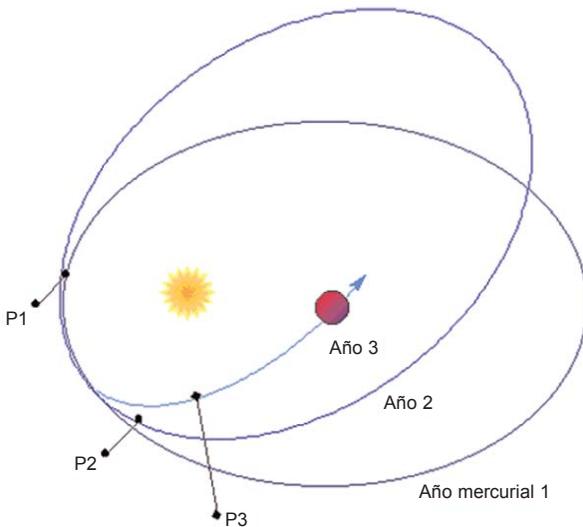
mecánica relativista retorcida. Pero Einstein no empleaba su cerebro privilegiado con la intención de amargar la existencia a las futuras generaciones sino para resolver unos enigmas que le inquietaban. La relatividad especial le había convencido de que espacio y tiempo no son entidades absolutas que sirvan a dos observadores para establecer un marco de referencia común. Un concepto como "reposo" requiere la existencia de un espacio y un tiempo absolutos para poder ser definido, puesto que por tal entendemos que un cuerpo permanezca en un mismo lugar un tiempo dado. Einstein cambió por completo el punto de vista. Un cuerpo está en reposo cuando se encuentra en "caída libre" o más exactamente en "flotación libre". Para Einstein la manzana está en reposo mientras cae y en ese viaje no "siente" ninguna fuerza. Si, por una extraña anomalía cósmica, la Tierra desapareciese la fruta madura continuaría viajando en línea recta por el vacío hasta caer bajo la influencia de otro campo gravitatorio.

¿Cómo explica entonces Einstein que nadie haya visto salir disparada una sola manzana hacia el cielo? La culpa la tiene la Tierra que con su voluminosa masa curva el espacio-tiempo y fuerza a la manzana a seguir una trayectoria que pasa por su centro. La razón por la cual la Tierra gira alrededor del Sol es la curvatura del espacio-tiempo que causa la estrella. No es el Sol, es el espacio-tiempo el que dirige la trayectoria de nuestro planeta. Según una analogía bastante visual, el universo de Newton es una mesa de billar en la que las bolas se desplazan en línea recta. El de Einstein es como una cama elástica. Al poner sobre ella una masa pesada la goma se deforma y una bola de billar que se acerca a uno de esos hoyos se mueve siguiendo una curva. Los cuerpos se mueven por el espacio-tiempo siguiendo las líneas de distancia mínima denominadas "geodésicas". La línea "geodésica" más corta en el espacio-tiempo entre dos puntos en ausencia de gravedad es la recta, en presencia de un campo gravitatorio esa retícula se retuerce y la recta deja de serlo. Si todo esto parece muy complicado un ejemplo en dos dimensiones lo puede aclarar. Toma una *mapa-mundi* (espacio bidimensional plano) y dibuja una línea recta entre Madrid y Nueva York. Ahora haz lo mismo en un globo terráqueo (espacio bidimensional curvado) pegando con cinta adhesiva un hilo tenso entre los dos extremos. ¡Sorpresa!, la línea más corta en el espacio esférico no coincide con la que dibujamos en el *mapa-mundi*. Queda bastante más al norte. Es algo que conocen muy bien las líneas aéreas y explica por qué los vuelos entre Europa y América del norte pasan por Terranova y permiten ver la punta sur de Groenlandia, lo que no deja de sorprender a los viajeros.



Esta curvatura debería afectar tanto al desplazamiento de los cuerpos materiales como al de la radiación electromagnética. La constatación en el eclipse de 1919 de que eso era así hizo célebre a Einstein en todo el mundo. La revista TIME publicó su

trabajo original con la notación matemática en forma tensorial, algo francamente incomprensible para el gran público pero que da una idea de la *Einsteinmanía* desatada. Algo había hecho mucho más feliz a Einstein en 1915, la explicación de una anomalía en el movimiento de Mercurio que había escapado a cualquier justificación clásica, la precesión de su perihelio. Según el clásico enunciado de Kepler, un planeta se mueve en torno al Sol según una elipse con la estrella en uno de sus focos. En ausencia de perturbaciones causadas por otros cuerpos celestes esa elipse sería perfecta pero sucede que, como consecuencia de la atracción de los otros planetas, se produce un pequeño giro cada año de la dirección del semieje mayor conocido como "precesión". El problema en el caso de Mercurio es que la magnitud de la precesión resultaba inexplicable. La teoría de Einstein predecía la existencia de un efecto llamado de Thirring-Lense. Un cuerpo masivo en rotación "arrastra" el espacio-tiempo cercano produciendo una precesión que hace que las órbitas sucesivas dibujen una margarita. Es muy semejante a lo que sucede en la superficie de un estanque con un corcho. Si hacemos girar con un palo el agua, el corcho se verá arrastrado en torno al remolino por la deformación del medio tanto más cuanto próximo esté a la fuente de la perturbación.



El desarrollo de la Relatividad General predecía efectos aun más espectaculares, como los agujeros negros o las ondas gravitatorias. Si el espacio-tiempo se puede curvar, no es descartable que sea capaz de transmitir un movimiento ondulatorio. Se ha comprobado de forma indirecta la existencia de estas ondas, pero su detección en la Tierra es muy complicada. El espacio-tiempo es muy "duro" y hace falta un acontecimiento cataclísmico para generar una onda gravitatoria que llegue con la suficiente intensidad. Pese a esa dificultad, los hay que no pierden la esperanza de conseguirlo.

Los agujeros negros son objetos tan masivos que producen una curvatura del espacio-tiempo máxima. Debido a ella, nada puede escapar de su interior, ni siquie-

ra la luz, puesto que todas las trayectorias quedan dentro de una superficie conocida como horizonte de sucesos. Un agujero negro se produce cuando un cuerpo de masa m tiene un radio igual a

$$r_s = 2Gm/c^2$$

Este radio, denominado de Schwarzschild, nos permite saber cómo sería la Tierra si se convirtiese en agujero negro. Tendría que tener un radio de 8,9 mm, ¡menos que una pelota de ping-pong!

Cuando Einstein publicó sus trabajos, las dos grandes fuerzas que se conocían eran la gravedad y el electromagnetismo. El mundo subatómico era un enigma que empezaba a desentrañarse, en el que se describirían los otros dos tipos de interacciones conocidas, la fuerza nuclear débil (que explica la radiactividad natural) y la fuerte (el "pegamento" que une las partículas del núcleo). Einstein gastó los treinta últimos años de su vida en un esfuerzo infructuoso, que él llamaba "teoría del todo". Su intención era encontrar una ley que consiguiese explicar de forma conjunta la gravedad y los fenómenos electromagnéticos. La meta era tan ambiciosa que ni el cerebro de Einstein pudo alcanzarla y en ello andan los mejores físicos de la actualidad.

Antes de echar un vistazo a las últimas tendencias en teorías del todo hay que hacer una breve descripción de la teoría cuántica. Al igual que observaciones inquietantes indicaban que la mecánica de Newton tenía alguna costura débil, otros fenómenos traían de cabeza a los contemporáneos de Einstein. El más célebre es el de la absoluta disparidad de las observaciones de la radiación del cuerpo negro con lo que predecía la teoría, eso es lo que cuenta todo libro de física cuántica que se precie. Mucha gente ha visto una manzana practicando la caída libre y son muy pocos los que han visto un cuerpo negro radiando, pero esta observación tan poco cotidiana dio lugar al segundo gran desarrollo de la física en el siglo XX, la teoría cuántica.

Su ámbito de aplicación es lo muy pequeño y su éxito se ha comprobado con los continuos progresos experimentales en el estudio de la estructura atómica. El universo cuántico no es continuo. La energía que puede adquirir una partícula es un múltiplo de una cantidad mínima denominada *quantum*. La estructura atómica y las propiedades de los materiales se explican a partir de esta ley y del principio de exclusión de Pauli. Los eventos a escala cuántica no se pueden predecir con total exactitud sino en términos de probabilidad. El mundo cuántico es en cierto modo borroso, no por una incapacidad de los instrumentos de medida sino por una característica intrínseca de la materia. Es lo que se conoce como principio de incertidumbre de Heisenberg.

¿Cuándo hay que recurrir a la teoría cuántica? Cuando la dimensión de un objeto es similar a su longitud de onda de Compton. Este parámetro vale $h/2pmc$. Un ser humano que mida 1,80 m y pese 75 kg tiene una longitud de Compton de $4,7 \times 10^{-45}$ m. Eso explica que no nos percibamos los unos a los otros como partículas con efectos ondulatorios evidentes. Un electrón, sin embargo, tiene una dimensión unas 100.000 veces inferior a su longitud de onda, por ello es imprescindible recurrir a la descripción cuántica si queremos saber algo sobre él. Las partículas subatómicas no son como diminutas bolas de billar, por ello se permiten comportarse a veces como onda, a veces como perdigón microscópico, para deleite propio y desdicha de generaciones de estudiantes. Las herramientas matemáticas que se desarrollaron

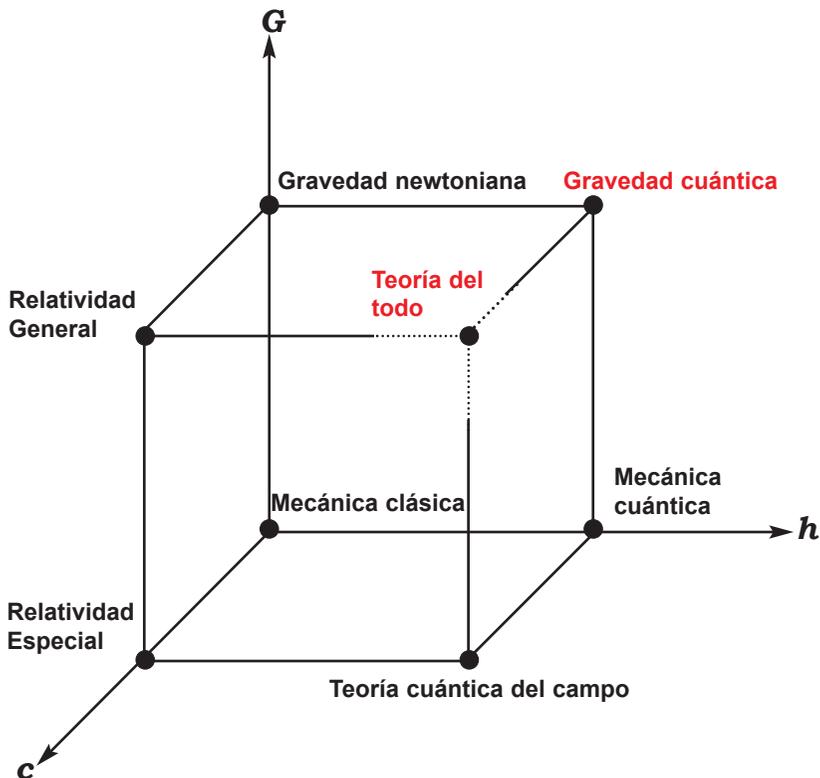
para la mecánica cuántica se han adaptado con éxito para unificar la descripción del electromagnetismo y la interacción débil y para explicar la estructura de los componentes del núcleo (cromodinámica cuántica). Sin embargo, la gravedad se resiste aún a este tipo de análisis.

Las dos teorías principales del siglo XX son muy difíciles de reconciliar. Una se basa en la continuidad de un espacio tiempo curvado, la otra en el intercambio de partículas. La relatividad general no incluye en ninguna de sus fórmulas la constante de Planck y la teoría cuántica vive ajena a la constante G. Una estudia lo muy grande y masivo (estrellas, galaxias), la otra lo infinitésimo. La relatividad es una teoría determinista, la posición de un evento en el espacio tiempo se puede establecer con precisión. En el mundo cuántico las cosas se rigen por el azar, lo que hizo a Einstein decir con disgusto su famoso "Dios no juega a los dados".

Aparentemente no hay solapamiento entre los dos campos de aplicación. Pero sólo aparentemente, porque ¿qué sucede si un objeto es lo suficientemente masivo para ser un agujero negro y lo infinitamente pequeño para resultar comparable a su longitud de onda? La condición se cumple cuando el radio de Schwarzschild es igual al doble de la longitud de onda Compton. La solución de esta simple ecuación arroja un valor fundamental de la naturaleza, la longitud de Planck, que es $1,6 \cdot 10^{-35}$ m. Es una dimensión increíblemente pequeña. Un electrón, tiene radio de 10^{17} longitudes de Planck, una relación comparable a la de una galaxia con un campo de fútbol. La luz tarda en recorrer la longitud de Planck $5,4 \cdot 10^{-44}$ s, llamado tiempo de Planck. Existe la sospecha fundada de que el universo a estas escalas no es continuo. El espacio-tiempo está cuantizado, no existe distinción entre materia y vacío, las leyes de la física conocidas fallan. La cuestión es muy importante porque hubo un momento en el que todo el Universo tenía un tamaño así, la era de Planck que siguió al Big Bang.

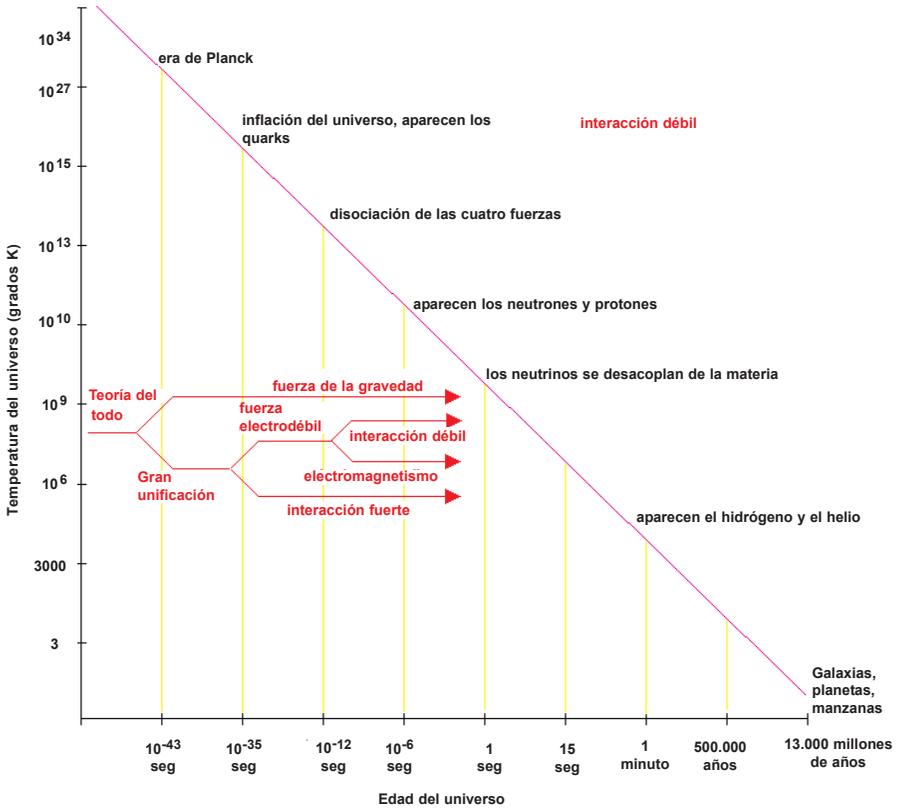
El universo de Newton tenía que ser infinito y homogéneo. De no serlo, existiría un centro de gravedad hacia el cual colapsarían todos los astros. Cuando Einstein publicó la Relatividad General y su solución a las ecuaciones de campo, introdujo un parámetro denominado "constante cosmológica" para conseguir una descripción de universo estable. Como se ha dicho en repetidas ocasiones, el peso de Aristóteles aun cargaba sobre las espaldas de Einstein. En los años 20, mantuvo una polémica matemática con el ruso Friedmann, donde éste demostró que, prescindiendo de la arbitraria constante, el universo se expandía. Los trabajos de Lemaître y Eddington y las observaciones de Hubble demostraron que el universo se está expandiendo a una velocidad asombrosa y que lo hizo a una aún mayor hace mucho tiempo. La radiación de fondo del cielo, el "ruido" amortiguado de esa colosal explosión, permite calcular que el Universo tuvo un comienzo hace unos 15000 millones de años. El espacio, el tiempo, la materia, la energía, absolutamente todo se encontraba concentrado en unos límites de dimensiones inconcebiblemente pequeñas y energía descomunal. La física teórica busca explicar las leyes que obedecía el universo en esos instantes iniciales mediante "la teoría del todo" que Einstein no pudo encontrar.

En la actualidad, la teoría-M (la "M" proviene de "membrana") es la principal candidata a teoría del todo por su capacidad para unificar las cuatro fuerzas fundamentales a escala cuántica. Es una versión evolucionada de las "supercuerdas", un modelo matemático desarrollado a partir de la física de partículas. Las "cuerdas" son



modos de vibración de la energía a escalas de dimensión diminuta. Al igual que una cuerda de un violín produce distintas notas musicales según la forma en que vibra, las diferentes soluciones de las ecuaciones de esta teoría dan lugar a distintas partículas. La teoría-M permite explicar como se disociaron las distintas interacciones durante la era de Planck y ofrece una visión cuántica de la gravedad. Al igual que la Relatividad General, su base es geométrica, pero si Einstein necesitó cuatro dimensiones, la teoría-M explica que el universo original tenía ¡11 dimensiones!, que se redujeron a las cuatro de Einstein transcurrida la era de Planck. Este número tan elevado surge de su descripción matemática, las dimensiones extras son necesarias para conseguir la unificación de las interacciones,

Resulta muy atractivo disponer de un marco teórico capaz de solucionar problemas que hasta hace poco se consideraban irresolubles, pero la teoría del todo se enfrenta a dificultades muy notables. Reproducir las condiciones de la era de Planck es imposible, la temperatura era de 10^{33} K y la densidad 10^{93} gr/cm³. Los actuales aceleradores de partículas están muy lejos de conseguir algo remotamente parecido. Esto no impide que se sigan haciendo progresos teóricos, pero sus críticos afirman que su versatilidad matemática no garantiza la validez de sus resultados si no hay observaciones que los avalen.



La teoría del todo se mueve en un terreno difícilmente verificable, la "física de la creación". No sabemos aún si tendrá éxito en su empeño, pero si así fuese nada garantiza que sea realmente una explicación unificada del universo sino de lo que conocemos del universo. Algunas deducciones en el límite de la ciencia hablan de que nuestro universo no es más que una pequeña burbuja, habría otros muchos universos regidos por leyes físicas diferentes, que se habrían originado a la vez. Lamentablemente, la hipótesis de los universos burbuja afirma que es imposible la comunicación entre dos universos diferentes, nunca tendremos pruebas directa de su existencia. Por debajo de la longitud de Planck estamos a ciegas, quizá en el futuro se descubra que a dimensiones muchos órdenes de magnitud inferiores a la de Planck no son válidas ésta u otras futuras teorías del todo. Y es que, en palabras del gran Isaac Newton, "explicar toda la naturaleza es una tarea demasiado difícil para un hombre o incluso para una época".

EFFECTOS RELATIVISTAS EN LA VIDA DIARIA

1. El sistema de posicionamiento global (GPS) permite a los barcos encontrar su posición en alta mar, a las compañías de transporte conocer en cada momento dónde se encuentran sus camiones, trenes o autobuses y cada vez más a los

conductores de turismos encontrar la forma de llegar a su destino mediante el ordenador de a bordo. También facilita la recuperación de automóviles robados, el rescate de náufragos o la navegación aérea. Es utilizado también como una referencia de reloj muy precisa. Si no se hubiesen tenido en cuenta los efectos de la relatividad en su diseño, el GPS sería completamente inútil.

Los 20 satélites orbitan la Tierra con un periodo de doce horas a unos 40000 km de distancia. A esa velocidad, se produce un adelanto de los preciosos relojes atómicos en órbita de 7 microsegundos al día. Pero hay un segundo efecto más fuerte de sentido opuesto. Según la Relatividad General, el tiempo se dilata por efecto de la gravedad. En un campo extremo, como un agujero negro, el tiempo literalmente se detiene. A 40000 km de distancia de la Tierra el tiempo transcurre más deprisa que en la superficie. Esta diferencia se puede calcular y es de 38 microsegundos. Restando a estos 38 microsegundos de adelanto los 7 de atraso producidos por la velocidad de los satélites respecto de la superficie, el efecto neto es un adelanto de 31 microsegundos al día. Puede parecer una cantidad muy pequeña, pero una diferencia de 3 microsegundos provoca un error de 1 km en la posición estimada. Si no se hubiese tenido en cuenta este fenómeno, el GPS produciría una incertidumbre de unos 10 km.

2. Enviar una sonda a Marte o Júpiter requiere un marco de referencia temporal diferente al de la superficie terrestre y las agencias espaciales lo saben. Para ello usan como referencia el tiempo baricéntrico dinámico, que es el que mostraría un reloj en el centro de masas del sistema solar y emplean una fórmula denominada "formalismo postnewtoniano" (PPN). El PPN permite tener en cuenta los efectos relativistas en campos producidos por objetos planetarios y la medición de sus parámetros hasta ahora coincide con las predicciones, pero el aumento de la precisión puede descubrir efectos de orden menor que ayuden a la investigación de la gravedad cuántica.
3. Las mareas son un fenómeno que ha intrigado a los hombres desde siempre. Newton fue el primero en dar una explicación del fenómeno atribuyéndolo a la Luna. Las mareas son el efecto relativista más cotidiano. La deformación espaciotemporal producida por un campo gravitatorio hace que los cuerpos se alarguen en el sentido normal al campo y se contraigan en el transversal, de manera que una esfera se transforma en un ovoide. Esta deformación es más extrema cuanto más intenso es el campo, en las proximidades de un agujero negro los efectos de marea son extremos.
4. Sólo las partículas carentes de masa como los fotones pueden viajar a la velocidad de la luz. Cualquier partícula material necesita un aporte externo de energía para acelerar, pero existe una energía máxima impuesto por la mecánica cuántica, que la partícula puede adquirir, la energía de Planck (2.0 GJ). Esta cantidad de energía no es extraordinaria, equivale a la que contiene el depósito de gasolina de un turismo, pero concentrarla algo tan ínfimo como un electrón requiere unos aceleradores de partículas que están lejos de las posibilidades actuales. No obstante, acelerar un electrón a una velocidad 0.3c es sencillo, lo hacen a diario tu televisor o la pantalla del ordenador.

EXPERIMENTOS EN CURSO

- GRAVITY PROBE B

La medición del efecto de precesión geodésica que ocasiona la Tierra es el objetivo del satélite Gravity Probe B, lanzado en abril de 2004. La precesión del periastron, que se comprobó en el caso de Mercurio, se produce cuando los dos cuerpos giran sobre sí mismos en un mismo plano. La precesión geodésica se da cuando el cuerpo más pequeño gira sobre sí mismo y efectúa una órbita polar en torno al más masivo. El eje de giro del cuerpo menor se desplaza por efecto de la deformación. Fue medido en 1998 para nuestro planeta por un grupo italiano con dos minisatélites. *Gravity Probe B* se basa en un giróscopo tallado en cristal de cuarzo, enfriado a 1,8 K, que apunta el satélite hacia la estrella IM Pegasus. Las medidas obtenidas permitirán contrastar experimentalmente con gran precisión la Relatividad General.

(Más información en <http://einstein.stanford.edu/>)

- LATOR (Laser Astrometric Test of Relativity Mission)

La medida de los parámetros del llamado modelo "post newtoniano" es fundamental para que las misiones espaciales tengan éxito. La NASA está planeando una misión denominada LATOR para lograr una mayor precisión que la conseguida hasta ahora. Lanzará dos minisatélites que se situarán en órbita alrededor del Sol a unos 300 millones de km de la Tierra y a 5 millones de km entre ellos. En la estación espacial internacional (ISS) se recibirán dos haces láser procedentes de estas naves y mediante un interferómetro muy preciso se podrá medir la curvatura que experimenta la luz debido al campo gravitatorio solar. La aparición de discrepancias mínimas con el modelo de Einstein es predicha por el modelo inflacionista del Big-Bang. Si se verifica, sería una prueba de que este modelo es correcto.

- LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory)

Medir una onda gravitatoria es fácil desde un punto de vista teórico. Basta con detectar que el espacio se alarga en un sentido y se acorta simultáneamente en dirección perpendicular. La cosa se complica si se tiene en cuenta que esa deformación que se quiere medir es ínfima, que hay que evitar que sea enmascarada por efectos tan poco extraordinarios como la vibración que produce el tráfico y, lo más complicado, que hay que esperar a que se produzca como consecuencia de un violento suceso galáctico. Pese a todos estos obstáculos, el LIGO se ha construido con este fin. Puede que nunca llegue a detectar una onda gravitatoria, pero está fomentando el desarrollo de interferómetros láser ultra-precisos, ya que la deformación que se busca es del orden de 10-22 m.

Más información en: <http://www.ligo.org/>

RELATIVIDAD ESPECIAL

Juan Antonio Piñera Molina

El artículo «Éter», escrito por Maxwell para la novena edición de la Encyclopaedia Britannica, comienza con una enumeración de los "elevadamente metafísicos y rutinarios usos a que se destinan los éteres". Por aquellas fechas, Maxwell estaba plenamente convencido de la existencia real de alguna clase de éter: "no puede haber duda de que los espacios interplanetarios e interestelares están ocupados por una sustancia o cuerpo material, que es ciertamente el mayor, y probablemente el más uniforme, de todos los cuerpos de que tengamos noticia".

Así fue como, en busca de ese medio en estado de reposo absoluto con respecto a las estrellas fijas, en el cual la luz se propaga y a través del cual la Tierra se mueve como si fuera transparente a ella, comenzó la búsqueda de lo que se pensaba era la referencia universal absoluta.

Dicha labor fue tomada por Albert A. Michelson. Para ello, diseñó un instrumento que trataba de medir el efecto de Maxwell; se trataba de un interferómetro cuya labor consistía en comparar los tiempos invertidos por la luz en atravesar la misma distancia, una vez en forma paralela y otra en forma transversal con respecto al movimiento de la Tierra relativo al éter. Con esta disposición, se esperaba que un éter estacionario ofreciera un tiempo equivalente a 1/25 de longitud de onda de la luz amarilla, en más cuando marchase en forma paralela; el efecto puede detectarse haciendo interferir los haces paralelo y transversal.

Dado que los resultados fueron insatisfactorios, se construyó un nuevo interferómetro, entre Michelson y un tal Edward W. Morley, mucho más robusto y menos perturbable (el de Michelson-Morley). Tras muchos intentos, y sin resultados positivos, Michelson y Morley habían logrado plantear dudas, no sólo sobre la existencia del éter, sino también sobre el concepto total de reposo absoluto, de movimiento absoluto y sobre la verdadera base del sistema newtoniano del Universo... ¿cómo puede explicarse la propagación de la luz sin un medio por el que viaje?

El físico irlandés G. F. FitzGerald concibió una forma de salvar la situación. Sugirió que todos los objetos disminuyen en longitud, en la dirección en que se mueven:

$$L' = L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Donde L' es la longitud del cuerpo que se mueve, y L es la longitud en reposo (lo mismo cambiando T' por L' y T por L , dilatación temporal).

Además, Lorentz obtuvo una ecuación similar a la de FitzGerald, mediante la cual la masa de un cuerpo en movimiento es mayor que en reposo:

$$M' = M / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Observando todos estos fenómenos, Einstein (perito en la oficina de patentes de Berna), optó por la alternativa: "Los fenómenos de la electrodinámica y de la mecánica no poseen propiedades que correspondan a la idea de reposo absoluto", basándose

en dos razones concretas: primero, la ausencia de evidencia experimental de un arrastre de éter; y segundo, la existencia de "asimetrías que no parecen intrínsecas de los fenómenos mismos". Einstein construía la Teoría de la Relatividad, basándose en dos postulados:

- 1-"las leyes de la física toman la misma forma en todos los sistemas inerciales".
- 2-"en cualquier sistema inercial, la velocidad de la luz (c) es la misma, tanto si es emitida por un cuerpo en reposo como si lo es por un cuerpo en movimiento uniforme".

La gran cuestión era la compatibilidad de los dos postulados, sobre lo cual Einstein consideró que sólo era necesario formular el concepto de tiempo de manera suficientemente precisa para superar la dificultad del resultado del experimento de Michelson-Morley. Todo lo que se llamaba anteriormente "tiempo local", podría ser definida pura y simplemente como "tiempo"; en resumen, hay tantos tiempos como sistemas inerciales... ésta es la esencia de la Relatividad.

Esta novedosa teoría dio pie a una nueva cinemática. Para explicarla, utilizaré el famoso símil de las reglas:

En un sistema inercial dado, un observador "A" mide su posición X_a con respecto al origen, por medio de reglas rígidas, usando los métodos de geometría euclídeana. Un segundo observador "B", hace lo mismo con X_b . Ahora el reloj de "A" en X_a se sincroniza con el de "B" en X_b .

Un tercer observador "C" realiza la misma operación. Los tres relojes comienzan a contar marcando tiempos exactamente iguales.

Los cuerpos "B" y "C" comienzan un viaje de ida y vuelta respecto a "A" con una velocidad igual y cercana a la de la luz. Las consecuencias serán las siguientes:

- Las longitudes de "B" y "C" parecerán acortadas a ojos de "A" durante el viaje, pero no entre ambos.
- La masa de "B" y "C" parecerá haber aumentado respecto a su anterior posición de reposo durante el viaje a ojos de "A" (nos podríamos preguntar cuál está realmente contraído y cuál ha aumentado de masa, pero la única respuesta posible es que depende del sistema de referencia).
- Los tiempos marcados en los relojes de "B" y "C" a la vuelta, respecto al de "A", ya no coinciden. Para "B" y "C" el efecto es que el tiempo se ha "frenado" respecto a "A". Entre ambos, los relojes marcan exactamente lo mismo.

En definitiva: para un cuerpo viajando a velocidad cercana a la de la luz respecto a otro, supuesto en reposo, se producen los efectos de dilatación temporal, aumento de masa y contracción de su longitud. Una vez detenido, vuelve a recuperar su masa y longitud inicial... pero no el tiempo.

Como se ha dicho, no ocurrirán estos efectos entre "B" y "C", pues la velocidad entre ellos es nula. El efecto es relativo, depende del observador y del sistema tomado como referencia.

A partir de la ecuación de Lorentz, Einstein creó la archiconocida:

$$E = mc^2$$

La energía de un cuerpo es el producto de su masa por la velocidad de la luz al cuadrado (un valor extremadamente alto que dio pie a la creación de la bomba atómica).

De ésta, se desprenden las siguientes:

$$E = mc^2 (\gamma - 1)$$

Para la energía cinética, que tiende a infinita si la velocidad se aproxima a la de la luz.

$$E = \gamma mc^2$$

Energía total de un cuerpo en movimiento.

$$v = \frac{v1+v2}{1+\frac{v1v2}{c^2}}$$

La suma de dos velocidades nunca puede superar la de la luz (velocidad límite).

Por su importancia, merece la pena mostrar la deducción de:

$$E = m c^2$$

(existen varias formas, tomamos la más sencilla pero no la original):

La ecuación de Lorentz puede escribirse en la forma siguiente:

$$M' = M / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Esto dispone la ecuación de una forma en que puede desarrollarse mediante el Teorema del Binomio de Newton.

Tomando sólo los dos primeros términos (los demás se pueden despreciar), el desarrollo queda:

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(1 + \frac{2v^2}{c^2}\right)$$

sustituyendo en la ecuación de Lorentz, tenemos:

$$M' = M \left(1 + \frac{2v^2}{c^2}\right) = M + \frac{(Mv^2)}{c^2} \cdot 2$$

El término $Mv^2/2$ representa la energía de un cuerpo en movimiento.

Siendo "e" la energía, la ecuación queda:

$$M' = M + \frac{e}{c^2}$$

El incremento en la masa debido al movimiento ($M' - M$) puede representarse como "m", así:

$$m = e/c^2$$

Despejando la energía:

$$E = mc^2$$

Einstein llegó a demostrar que la ecuación podía aplicarse a todas las masas, no solamente al incremento de masa debido al movimiento.

Aunque sus consecuencias caen fuera de la vida normal, la relatividad explica todos los fenómenos conocidos del Universo. Pero aún más: explica ciertos fenómenos que la visión newtoniana no enfoca bien o, si acaso, lo hace de una forma escasa.

Einstein ha sido preferido a Newton, pero sólo como perfeccionamiento. Las leyes newtonianas son todavía aplicables a modo de aproximación simplificada, cuyo funcionamiento es aplicable a la vida corriente e incluso en la Astronomía ordinaria. Pero cuando se trata de acelerar partículas, es conveniente introducir el crecimiento einsteiniano de la masa con la velocidad.

Cabe destacar que Einstein recibió el premio Nobel de Física en 1921, pero no por su teoría de la Relatividad, sino por el efecto fotoeléctrico. ○



A LA CAZA DEL ZIGZAG BROWNIANO

Juan Carlos Sanz-Martín

“un absoluto desgobierno
basado en la ley absoluta”

Ian Stewart

“una sucesión de pequeños desplazamientos,
mutuamente independientes e isotropos”

Benoit Mandelbrot

¿Quién no se ha fijado, jugando con el haz de luz de una linterna en la oscuridad, en que incesantemente lo cruzan muchas motas, diminutas y veloces, cuyas trayectorias son zigzagueantes? ¿Qué misteriosas partículas son éstas que se mueven en todas direcciones... (¡contra la gravedad incluso!)? Simplemente son las briznas de polvo que revolotean en el aire y que, normalmente, no suelen verse.

Existen otras situaciones donde sucede algo parecido. Por ejemplo, basta depositar en un vaso con agua limpia una pizca de permanganato potásico para observar un silencioso espectáculo de fuegos artificiales para liliputienses, con minúsculos gránulos malvas moviéndose sin cesar, de acá para allá, en zigzag... Al cabo de suficiente tiempo se obtiene una disolución homogénea sin que haya sido preciso agitar.

Todos estos casos tienen algo en común. Partículas relativamente pequeñas inmersas en un fluido (en el caso de la linterna el fluido es aire atmosférico, y agua cuando hablamos del permanganato), animadas por un perpetuo movimiento —llamado browniano, ya veremos por qué— y recorriendo trayectorias muy irregulares, siempre quebradas (Fig. 1).

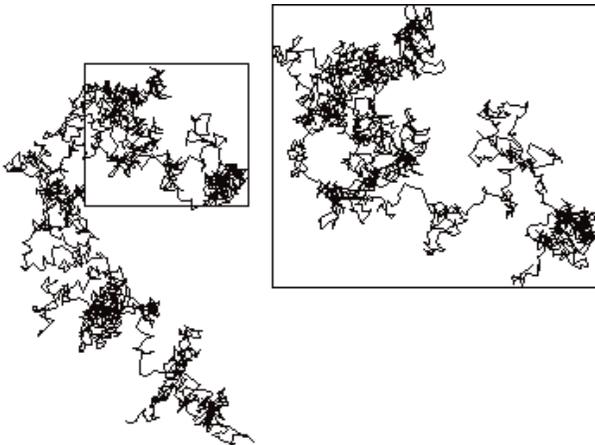


Figura 1. Trayectoria irregular de una partícula browniana

Parece cosa infantil, pero el movimiento browniano tiene miga. Ha protagonizado y protagoniza múltiples y fundamentales avances conceptuales en la Física. Por ejemplo, esclareció la validez del segundo principio de la termodinámica y que la materia está compuesta de átomos. Pero no nos anticipemos...

ALGO DE HISTORIA

Aunque el relato podría iniciarse aproximadamente en 1766, con unos trabajos del microscopista Wilhelm Friedrich Freiherr von Gleichen-Russworm (1717-1783), o quizás en 1785, con unas observaciones del médico holandés Jan Ingenhousz, los caprichos de la fama otorgan el crédito a Robert Brown (1773-1858). Corría el verano de 1827 y este botánico inglés miraba ensimismado al microscopio una suspensión acuosa de polen de una herbácea llamada godetia (*Clarkia pulchella*) cuando advirtió que estos granos no dejaban de moverse en zigzag.

Quiso saber la causa de este perenne movimiento, pero, después de observar innumerables suspensiones con inertes de polvo mineral y humo, no pudo explicarlo. Sin embargo, una de sus conclusiones es interesante: este movimiento invariablemente ocurre si las partículas dispersas son muy pequeñas.

Y pasaron los años sin que el movimiento browniano (bautizado así en honor de nuestro botánico) llamase excesiva atención, hasta que Jules Regnault, Ludwig Christian Wiener, Giovanni Cantoni, S. Oehl, Sigmund Exner, John Benjamin Dancer, Joseph Delsaux, G. Léon Gouy, Maede Bache, entre otros, reemprendieron su estudio.

Se probó, sin lugar a dudas, que este movimiento siempre era irregular y persistente, que no se debía a gradientes térmicos ni de presión, ni a la existencia de fuerzas eléctricas o capilares en el fluido. Además, a cualquier escala de tiempo, por breve que fuese, la partícula cambiaba de posición y velocidad.

A partir de la segunda mitad del siglo XIX muchos autores empezaron a considerar que la partícula browniana se movía empujada por las colisiones de los átomos del fluido que la rodeaban, y Louis Bachelier (1870-1946) en su tesis doctoral presentada en 1900 estableció el primer modelo matemático de este movimiento (¡analizando las fluctuaciones de la bolsa de París!).

Sin embargo, estas explicaciones no persuadieron entonces a nadie. Por ejemplo, Karl Wilhelm von Nägeli y William Ramsay no aceptaron la hipótesis de las colisiones porque pensaron que, al ser la masa de la partícula browniana enormemente mayor que la de cuantas forman el fluido, su inercia le impediría el movimiento. Por su parte, Gouy sugirió que el movimiento browniano constituía una violación del segundo principio de la termodinámica (pues, de un modo espontáneo, la partícula browniana extraía energía térmica del fluido para transformarla en movimiento). Las cosas estaban bastante crudas...

...Y llegó Albert Einstein (1879-1955).

1905 fue su *annus mirabilis*, ya que, junto con otros trabajos fundamentales para la física (sobre el efecto fotoeléctrico y la teoría de la relatividad), publicó en *Annalen der Physik* uno que, de una vez por todas, aclaraba cuantitativamente el movimiento browniano ("*Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*").

Cuenta la leyenda que el bueno de Albert, tomando cierto día una taza de té en compañía de su mujer Mileva Maric, parece que pensó: "qué interesante sería relacionar la viscosidad del líquido con el tamaño de las moléculas de azúcar".

Einstein, pues, partió de la hipótesis atómica y de la teoría cinética del calor, y para refutar la objeción de Nægeli y Ramsay hizo ver que la partícula browniana sufre unas $\approx 10^{20}$ colisiones por segundo!, siendo muy improbable que dos partículas del fluido al chocar con la browniana lo hagan con idéntica velocidad y misma dirección pero con sentidos opuestos. Acababa de explicar, dado el profuso número de constantes colisiones, el permanente y azaroso zigzag browniano. Jean Baptiste Perrin (1870-1942), con ayuda de su discípulo M. Chaudesaigues, comprobó estas predicciones en una serie de magníficos experimentos realizados entre 1908 y 1911, determinando, de paso, el número de Avogadro.

En 1923 Norbert Wiener (1874-1964) apuntaló teóricamente los resultados de Perrin, probando que casi todas las trayectorias son continuas. Más tarde, Wiener, R. Paley y A. Zygmund mostraron (en 1933) que la mayor parte de las trayectorias brownianas son no diferenciables en todos sus puntos.

Con estos trabajos quedaron muy pocas dudas sobre el carácter discreto de la materia y las bases estadísticas de la termodinámica, convenciendo también a muchos recalcitrantes como Svante August Arrhenius y Wilhelm Ostwald. Ernst Mach fue prácticamente el único científico que no aceptó la hipótesis atómica.

En 1939 Paul Lévy (1886-1971) publicó un análisis del movimiento browniano que casi podríamos suponer definitivo: *Processus stochastiques et mouvement Brownien*.

Se habían dilucidado, pues, las causas del movimiento browniano y con ello la naturaleza atómica de la materia y estadística de la termodinámica. ¿Se había secado el manantial browniano?

EL ZIGZAG Y LOS PROCESOS IRREVERSIBLES

A nuestro alrededor percibimos múltiples procesos irreversibles (el envejecimiento, la disipación térmica por fricción mecánica o por flujo de corriente eléctrica en un conductor con resistencia, la formación de olas en la superficie de un estanque al lanzar una piedra, etc.). Convendría entender estos procesos.

El movimiento browniano constituye un ejemplo de proceso irreversible (nunca se ha visto que la velocidad y la posición de la partícula retornen a sus valores iniciales) cuyas características nos permiten adentrarnos con "sencillez" en el intríngulis de los demás, pues debido a su mayor masa relativa la partícula browniana puede contemplarse como un sistema de un solo cuerpo (recuérdese la dificultad para describir sistemas con más de dos cuerpos).

En 1908 Paul Langevin observó que una partícula browniana dada también experimenta fuerzas de resistencia (debido a la fricción viscosa del fluido en que está zambullida), tanto mayores cuanto más veloz es aquella (esto lo saben cuantos pedalean en bicicleta). Comprobó, además, que mientras esta fricción varía en lapsos del orden de los segundos, la fuerza debida a las colisiones fluctúa en intervalos de milésimas de microsegundo (Fig. 2).

Asimismo, Langevin se fijó en que la fuerza derivada de las colisiones era estocástica, pues su valor exacto no podía predecirse en un instante dado, ni cabía correlacionarlo con el del instante precedente (o sea, que, tras cada choque, se pierde la información dinámica adquirida en la colisión previa). Para obviar esta dificultad recurrió a la estadística, postulando que esta fuerza tenía una distribución normal (el problema se reducía, pues, a conocer un promedio y la desviación estándar).

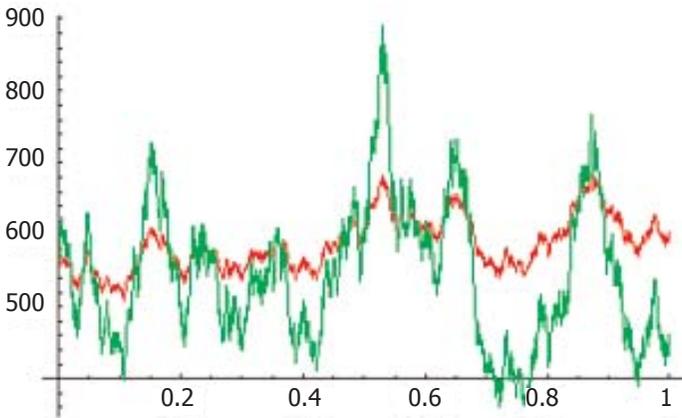


Figura 2. Las fuerzas estocástica (línea clara) y viscosa (línea oscura) que soporta una partícula browniana varían en diferentes escalas de tiempo

Numerosas consecuencias de las hipótesis de Langevin fueron luego corroboradas experimentalmente por Perrin, Victor Henri, Theodor Svedberg, Marian Smoluchowski, Eugen Kappler, Arne Westgren, etc.

Ahora bien, desde la perspectiva de la teoría cinética de la materia, ¿cómo son las fuerzas que vinculan los átomos del fluido con la partícula browniana? La dinámica exacta de semejante sistema requiere plantear complejos sistemas de ecuaciones cuya resolución exige, además, considerables simplificaciones. Empero, una de las más útiles es modelarlo como una colección de osciladores armónicos (Fig. 3).

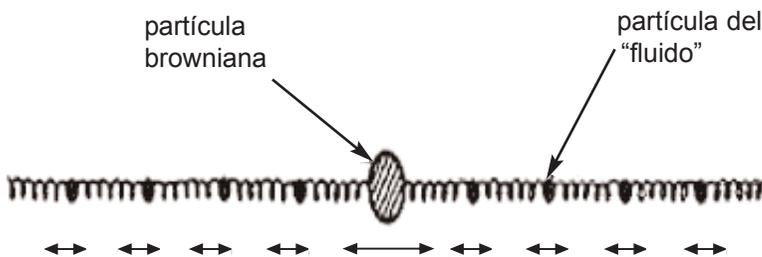


Figura 3. Modelo unidimensional de osciladores armónicos. La partícula browniana es la mayor, las demás constituyen el fluido

Este modelo predice que la evolución de la partícula browniana es, efectivamente, irreversible. Pero, asimismo, resuelve las dos siguientes paradojas. Una, planteada en 1876 por Josef Loschmidt (1821-1895), afirmaba la imposibilidad de que un sistema dinámicamente newtoniano fuese irreversible. Ernst Zermelo (1871-1953) sugirió en 1896 otra paradoja, basada en el famoso teorema de recurrencia de Jules Henri Poincaré (1854-1912): "al cabo de suficiente tiempo las variables que describen

los sistemas mecánicos con un número finito de partículas recuperan sus valores originales”.

En efecto, Per Christian Hemmer, partiendo de un sistema unidimensional formado por diez osciladores y exigiendo que los estados final e inicial coincidiesen no menos del 97%, calculó en 1959 que tardaría en recobrar su estado inicial un promedio de ¡unos 10^{10} años! ¡Bastante mayor que la edad del Universo! Y sólo para diez partículas... Obviamente, con sistemas como los reales, con una densidad de 10^{20} partículas por centímetro cúbico, el tiempo de recurrencia es casi infinito. En la práctica no puede hablarse de recurrencia y el fenómeno físico es, de suyo, irreversible.

Por otro lado, este sencillo modelo también pronostica la existencia de dos fuerzas, como supuso Langevin, siempre y cuando la masa de la partícula browniana sea mucho mayor que la de las del fluido y la frecuencia con que éstas y aquélla chocan sea suficientemente grande.

LOS LÁSERES SON BROWNIANOS

¿Qué es el láser (palabra inglesa que es un acrónimo de amplificación de luz por emisión de radiación inducida)? La teoría cuántica nos dice que en los sistemas atómico-moleculares los niveles energéticos de los electrones se parecen a las filas de butacas de un teatro: están bien definidos y son discretos (no hay filas entre dos contiguas). Se denomina estado fundamental aquél donde los electrones ocupan el menor nivel energético, en caso contrario se habla de estados excitados. Por otro lado, los electrones sólo absorben (o emiten) energía cuando pasan desde un cierto nivel energético a otro superior (o viceversa) en un proceso denominado transición electrónica.

Si se tiene un gas en equilibrio térmico (hablamos, pues, de los láseres gaseosos), la mayor parte de las moléculas que lo forman se encuentran en su estado electrónico fundamental. No obstante, mediante un procedimiento denominado bombeo óptico, se puede invertir la población de los niveles energéticos (de manera que haya más átomos en estados excitados que en el fundamental). Con ello se logra una situación de no equilibrio, que puede romperse bien con una transición electrónica espontánea, bien, como Einstein mostró en 1917, mediante una transición inducida por un campo externo de radiación electromagnética. Sepamos que en uno y otro caso se emite radiación pero de características muy distintas. Aquella transición es aleatoria y, por tanto, las ondas de la radiación emitida no están en fase. Justo lo contrario que las ondas surgidas cuando la transición es inducida, que están en fase, reforzándose sus intensidades.

Ahora ya podemos decir que, a diferencia de las fuentes convencionales de luz, un láser (Fig. 4) es un dispositivo que emite radiación inducida en haces monocromáticos muy intensos y colimados.

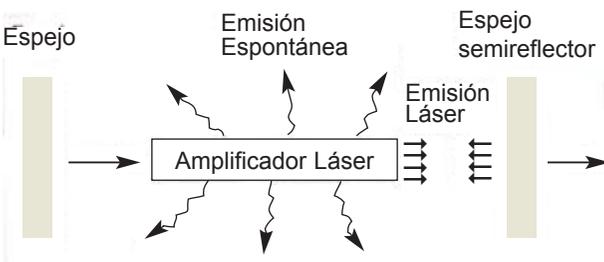


Figura 4.
Esquema de un dispositivo generador de láser

Tras el bombeo óptico, que se logra mediante un excitador, empieza la emisión inducida. Unos espejos adecuadamente dispuestos reflejan la luz hacia el interior para que su intensidad crezca y aumente así la probabilidad de otras emisiones inducidas (percatémonos de que el mecanismo es retroalimentado).

¿Podemos relacionar todo esto con el movimiento browniano? En efecto. En el láser cabe pensar que los átomos se encuentran sumidos en un "fluido" (que es el campo de radiación) con el cual experimentan "colisiones" (la interacción entre el átomo y el campo). Puesto que la intensidad del campo de radiación siempre fluctúa aleatoriamente (es, pues, estocástica), entonces las propiedades estadísticas del láser pueden describirse mediante las ideas del movimiento browniano para sistemas con varias partículas zigzagueantes.

Y LLEGARON LOS FRACTALES

En rigor las líneas rectas mostradas en la Figura 1 para la trayectoria de una partícula browniana son ficticias. Sólo son reales los puntos que se obtuvieron durante el muestreo (por ejemplo, cada 40 segundos). Su unión es una interpolación gruesa, pues si hubiéramos marcado las posiciones en intervalos de 2 segundos tendríamos que sustituir cada recta de la Figura 1 por líneas quebradas (Fig. 5).

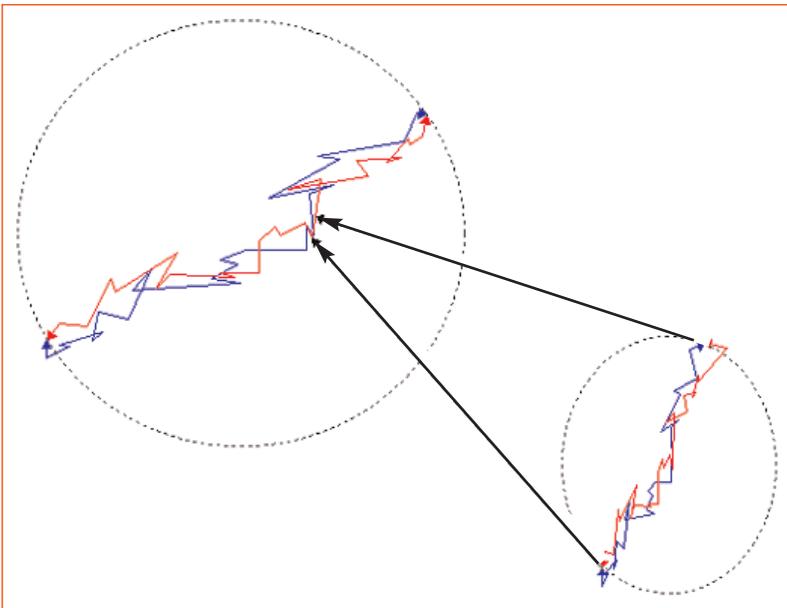


Figura 5. Posiciones inicial y final de una partícula browniana en un cierto intervalo de tiempo. En el círculo pequeño se ven las posiciones de esa misma partícula registradas en intervalos que son la veinteva parte del anterior

Si aumentamos la frecuencia del muestreo pronto se advierte que la trayectoria de la partícula browniana cada vez es más quebrada (aunque persiste su autosemejanza). Benoit Mandelbrot (1924-) llamó fractales a estos objetos cuya estructura perdura invariable aunque se cambie indefinidamente la escala de observación. Este mismo

autor y Van Ness introdujeron el movimiento browniano fraccionario, entrevistado ya en algunos trabajos previos de Andrei Nikoláievich Kolmogorov (1903-1987).

Digamos, empero, que ya en 1906 Perrin se percató de la estructura fractal del movimiento browniano y escribió que "la dirección de la línea recta que une las posiciones ocupadas en dos instantes próximos en el tiempo varía muy irregularmente conforme disminuye el intervalo entre uno y otro instante [...]. Se trata, parece ser, de una función que no posee derivada [...]. Si, como postula la teoría atómica, la materia tiene estructura granulosa, entonces disminuye en gran medida la posibilidad de aplicar rigurosamente los conceptos de derivabilidad y continuidad".

Así, pues, una característica de los fractales ideales es que la ¡distancia! entre dos puntos fijos aumenta sin cesar conforme ampliamos el grado de resolución.

A MODO DE RESUMEN

Al explicar las causas del movimiento browniano se zanjó definitivamente el debate sobre la estructura discreta de la materia y la naturaleza estadística de las propiedades termodinámicas. También fue uno de los primeros procesos irreversibles que pudo estudiarse pormenorizadamente y, con ello, hubo que desarrollar la teoría matemática de las funciones no diferenciables para analizar magnitudes estocásticas.

Con el paso de la descripción macroscópica del movimiento browniano a la microscópica se disolvieron paradojas como las de Loschmidt y Zermelo y se logró entender cómo un proceso reversible se transforma en irreversible. Por fin se habían comprendido las principales causas de la aparición de la estocasticidad. Además, al examinar los aspectos microscópicos del movimiento browniano a muy bajas temperaturas se descubrió, entre otros fenómenos, uno con una importancia teórica y técnica que apenas se ha vislumbrado: la persistencia de las fluctuaciones.

En suma, a la luz de las zigzagueantes partículas brownianas se comprenden un sinfín de cualidades de los colectivos, esenciales para desentrañar los coloides, el láser, los fluidos a muy bajas temperaturas..., de gran importancia teórica e industrial. Asimismo, la geometría fractal, todavía en su infancia y cuyos aspectos teóricos constituyen una idealización del mundo real, es deudora del estudio de fenómenos como el movimiento browniano.

Permanentemente muchas ideas surgidas al rebufo de este movimiento hallan nuevas aplicaciones teóricas y prácticas no sólo en matemáticas, física química, sino también en biología, economía, geografía, etc. El movimiento browniano, esa especie de vuelo de mosca que atrae las miradas infantiles, resulta ser un tema omnipresente en la ciencia y la técnica. ○

BIBLIOGRAFÍA

Podrían citarse muchos más textos, pero éstos son los que me parecen más simpáticos:

ALBERT EINSTEIN: "Cien años de relatividad". Nivola (Tres Cantos), 2003.

ELIEZER BRAUN: "El movimiento en zigzag". Fondo de Cultura Económica (México, DF), 1995.

ISAAC SCHIFTER: "La ciencia del caos". Fondo de Cultura Económica (México, DF), 1996.

IAN STEWART: "De aquí al infinito". Crítica (Barcelona), 2004.