

2005, voltear al pasado para mirar al futuro

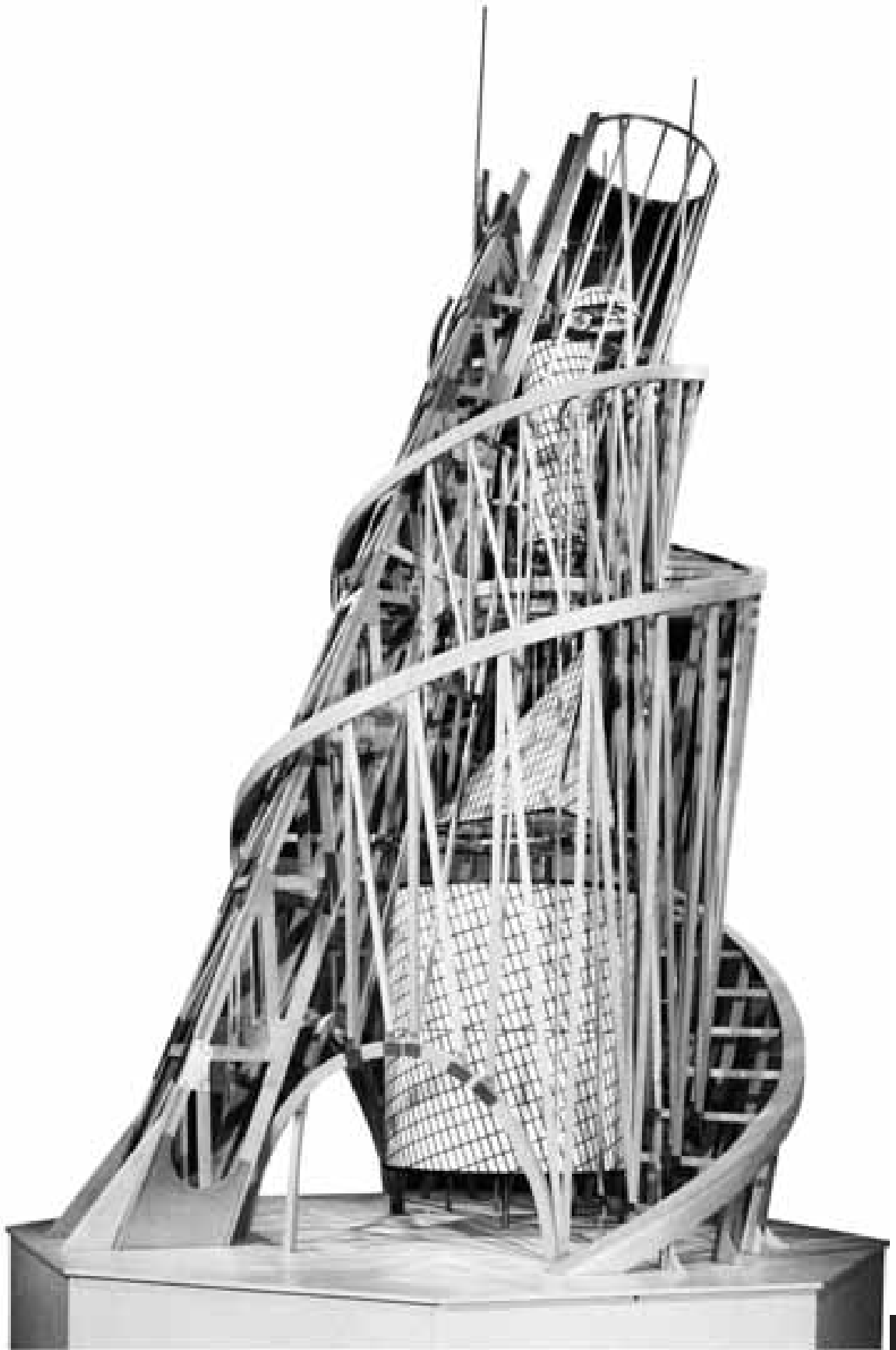
El 14 de marzo se festejó el aniversario 126 del nacimiento de Einstein. Poco después, el 18 de abril, se recordaron los cincuenta años de su muerte. Pero durante todo el año, en innumerables actos esparcidos por el mundo, se celebra el primer centenario de los trabajos que publicó durante su *anno mirabilis*, aquel 1905. Con frecuencia, los trabajos escritos y los publicados por un investigador en un año no coinciden. Para ser más realistas, normalmente no lo hacen, y menos en la actualidad pues es usual que una revista demore cerca de un año, y en ciertas especialidades mucho más, en publicar los textos recibidos. Aunque al inicio del siglo xx los plazos eran bastante más cortos —entre 3 y 4 meses—, de los cinco trabajos que Einstein escribió en 1905 sólo se publicaron cuatro ese año —el último apareció en 1906. Es bien sabido que con ellos abrió tres capítulos fundamentales de la física: la teoría de la relatividad, la teoría fotónica de la radiación —el efecto fotoeléctrico— y la teoría de los procesos estocásticos —el movimiento browniano.

A la teoría de la relatividad dedica dos trabajos. Con el primero, una de las obras maestras de la ciencia del siglo xx, nace esta teoría que ofrece una descripción de la cinemática y dinámica de los cuerpos congruente con el principio —formulado por el propio Einstein— de la constancia de la velocidad de la luz para todos los observadores. Es la forma que debe adquirir la vieja mecánica newtoniana para hacerla congruente con la teoría

electromagnética y emerge de una profunda revisión de los conceptos de espacio y tiempo, los cuales pierden su carácter de absolutos para depender del estado de movimiento de los cuerpos. Esta es la razón del nombre de la teoría.

En el segundo, concibe lo que hoy representa la fórmula más famosa de la física, $E=mc^2$, la cual establece la equivalencia entre masa y energía. Lo inesperado de este resultado puede sentirse con el siguiente razonamiento. Pensemos en un cuerpo cualquiera que ponemos en movimiento. Esto significa que le hemos suministrado energía —asociada al movimiento impartido, es decir, cinética. Siguiendo la fórmula de Einstein resulta que como el cuerpo posee más energía, también posee más masa. En otras palabras, la teoría de la relatividad predice que la masa de un cuerpo crece con su velocidad. Desafortunadamente esto no sirve para transformar un kilo de manzanas en dos, pues tendríamos que lanzarlas a una velocidad cercana a 87% de la velocidad de la luz, lo cual sería más costoso que el kilo extra de manzanas. Sin embargo, el ejemplo ilustra la riqueza de resultados —y de sorpresas— que brinda la teoría de la relatividad.

El primer trabajo que publicó en 1905 está dedicado al estudio de la absorción y emisión de la luz. En él propone la idea de concebir la luz —en general, la radiación electromagnética— como constituida por parcelas independientes de energía definida, los corpúsculos lu-





minosos conocidos hoy como fotones. Idea trascendente y audaz, cuya importancia creció con el tiempo al convertirse en fundamento de la teoría cuántica de la radiación. La ruptura conceptual propuesta con este trabajo puede apreciarse si recordamos que en la época de su publicación toda la física estaba inmersa en el concepto de continuo; ni siquiera la materia se entendía como un medio discreto.

Los dos trabajos dedicados al movimiento browniano —uno publicado en 1906, porque su autor lo utilizó como tesis doctoral— representan otro gran paso en nuestro conocimiento del mundo físico. Con ellos inicia el estudio de los sistemas físicos sujetos a la acción de fuerzas aleatorias; es decir, la teoría —tanto física como matemática— de los procesos estocásticos, cuya importancia puede estimarse al recordar que uno de estos artículos se ha mantenido a través de las décadas como el trabajo más citado de Einstein —los otros ya son tan clásicos que no se citan. Es interesante señalar que tales citas provie-

nen con mucha frecuencia del campo de la ingeniería química, concretamente de la industria de coloides, ya que resultan fundamentales en ambas especialidades.

El primer trabajo de Einstein sobre el movimiento browniano aborda y resuelve con mucha creatividad un añejo problema: abrir una vía para demostrar experimentalmente la realidad de las moléculas. Hasta ese momento, la idea de que la materia está compuesta de moléculas era una simple —pero muy útil— hipótesis, sin base experimental, fuertemente rechazada por un amplio sector de físicos y químicos, aunque atractiva para otros. En este trabajo propone un método para medir las dimensiones de una molécula de agua a partir de las propiedades estadísticas del movimiento de una partícula muy pequeña —por ejemplo, un grano de polen o de pigmento— suspendida en agua. La idea es que la partícula en suspensión es golpeada constantemente por un gran número de moléculas —en realidad, millones de ellas—, lo que debe imprimirle un constante movimiento errático. Este es el movimiento browniano, llamado así porque fue el biólogo escocés Robert Brown —quien identificó el núcleo celular— el primero en reportarlo en 1827. La causa de este movimiento perenne no fue entendida hasta que Einstein publicó su trabajo titulado “Determinación de las dimensiones de una molécula”. Poco después, los experimentos fueron realizados por el físico francés Jean Perrin, quien alrededor de 1910 anunció el éxito de su empresa: los átomos son una realidad física, no una útil ficción.

A pesar de esquemática y breve, la anterior descripción permite entrever una de las características de la investigación científica que con mayor frecuencia se entiende mal, particularmente por quienes desean planificarla o dirigirla hacia fines aplicados apremiados por las necesidades locales. Los trabajos de Einstein pertenecen al terreno de la física teórica. Ninguno fue realizado con un fin predeterminado diferente del puramente científico. Sin embargo, a la larga, todos encontraron aplicaciones de gran importancia. No sólo las inmensas consecuencias de toda índole que se derivaron del conocimiento de la estructura molecular de la materia, sino resultados directos de aplicación de los nuevos conocimientos establecidos en tales trabajos.

Por ejemplo, la teoría del movimiento browniano en la industria química. El efecto fotoeléctrico, cuya teoría fundamental Einstein esboza en el trabajo de la cuantificación de la radiación, tiene un gran número de aplicaciones —una variante moderna de uso cotidiano lo

encontramos en los controles remotos infrarrojos de los aparatos electrodomésticos. La teoría cuántica del campo de radiación, cuyo germen es el mismo trabajo, también condujo a una gran variedad de aplicaciones, entre las que el láser es de las más extendidas. La transformación relativista de masa en energía es la base de los reactores nucleares. Aunque también de las bombas nucleares.

Probablemente éste sea un buen ejemplo de lo que declaró un antiguo presidente de la Royal Society de Londres: “únicamente hay ciencia aplicada y aún no aplicada; sólo es cuestión de tiempo”. Otro excelente ejemplo lo brinda la teoría de los números. ¿Que rama de las matemáticas podemos concebir más alejada de lo mundano, del terreno de lo práctico, que la teoría de los números? Sin embargo, ella ha encontrado aplicación concreta en el diseño de sistemas inviolables de transmisión de información. Pero hay una contraparte, restringir la investigación científica a la dirigida hacia aplicaciones inmediatas equivale a cerrar su futuro. El motor fundamental de varias ciencias —matemáticas, astronomía, física, etcétera— es interno; los problemas importantes que les dan vida y dirección las más de las veces emergen de ellas mismas, no del exterior. Es claro que deben investigarse los problemas propios del entorno y, en particular, los más apremiantes y de mayor utilidad social, es decir, utilizar la ciencia en nuestro beneficio y para crear nuestra tecnología. Pero esta tarea, urgente e importante, no debe realizarse a expensas de la igual de urgente e importante tarea de avanzar en la construcción del conocimiento científico. Son dos caras de una moneda, la cual deja de ser moneda si carece de cualquiera de ellas. Trágicamente, esto se pierde de vista en nuestros países, los llamados, de manera más optimista que realista, en vías de desarrollo.

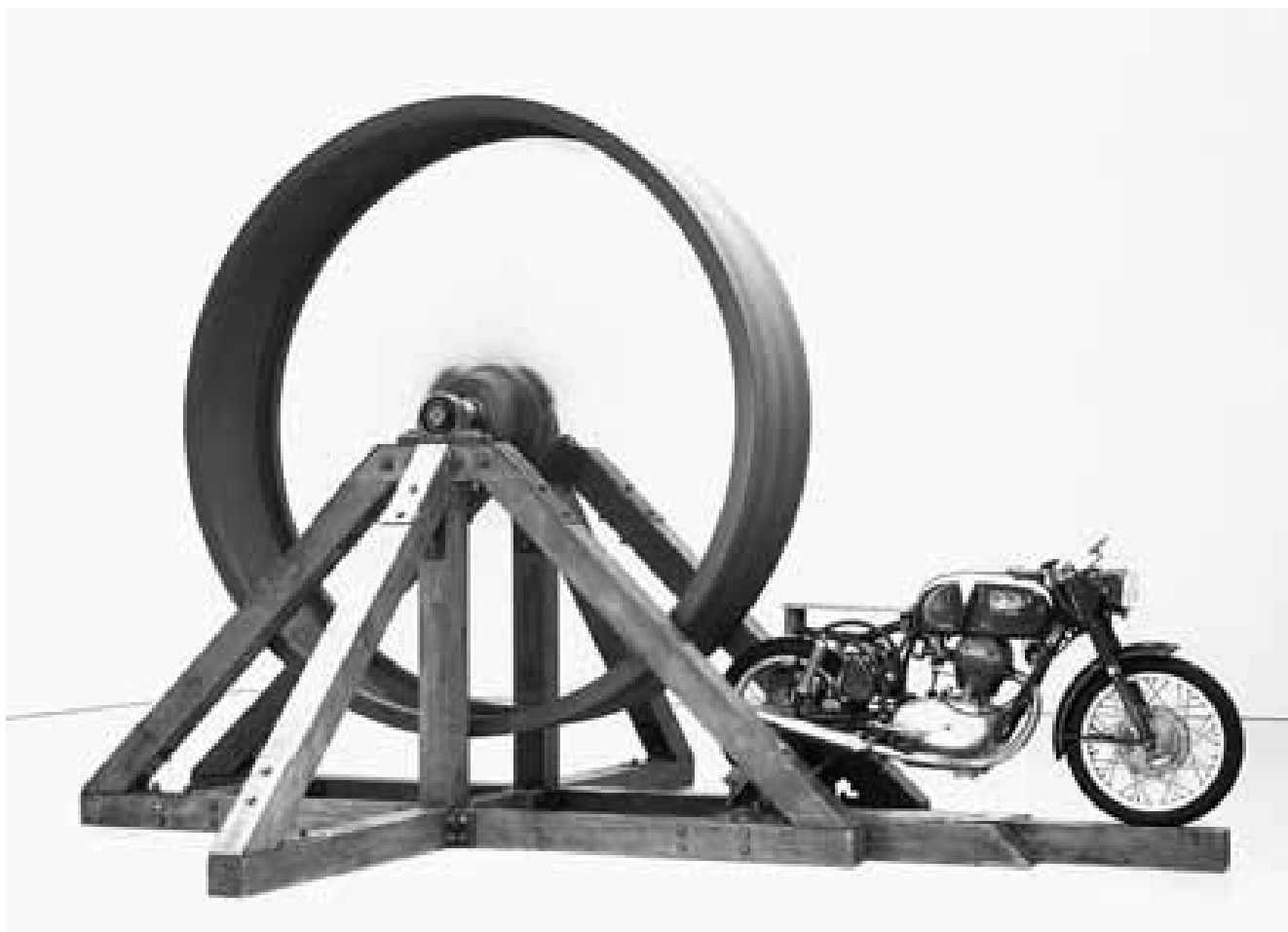
Asomándonos al futuro cercano

Durante toda su vida, Einstein se mantuvo activo en los tres frentes de la física que abrió: el relativista, el cuántico y el estadístico. Por etapas, se dedicaba a uno o al otro con mayor o menor empeño, pero sin abandonar por entero los otros dos. Su más reconocido éxito lo obtuvo con la Teoría general de la relatividad en 1915, cuya formulación constituye una de las mayores proezas intelectuales de todos los tiempos. En el fondo, es una teoría de la gravitación que tiene la peculiaridad —no se conoce otro ejemplo similar y aquí brilla único el genio de Eins-



tein— de que en ella la geometría del espacio no está fijada de entrada, sino que resulta determinada por la propia teoría en cada caso. Durante la última etapa de su trabajo —los últimos veinte años de su vida—, emprendió una nueva y muy ambiciosa tarea, tratar de construir una teoría que unificara la gravedad y el campo electromagnético, pues en la Teoría general de la relatividad el último aparece como un elemento externo, no intrínseco, como sí lo es la gravedad. No tuvo éxito. Hoy conocemos mejor la razón de ello. No sólo fue la inmensa dificultad del problema, sino que carecía de algunas de las herramientas necesarias. Por ejemplo, en la naturaleza, además de los campos electromagnético y gravitacional, únicos conocidos por Einstein, existen otros descubiertos con el auxilio de la física cuántica. Así, para construir una teoría unificada de los campos, ésta tiene que ser cuántica y debe considerar a todos los campos.

El tema brinda una buena oportunidad para otear, con cautela, hacia el futuro. Durante la transición del siglo XIX



al xx se realizaron muchas predicciones sobre el desarrollo de la física del siglo que iniciaba. Ninguna acertó, ni siquiera de manera aproximada. En retrospectiva puede afirmarse que simplemente era imposible prever en 1900 el explosivo progreso de esta ciencia apoyado en la física clásica, la cual pronto quedó rebasada. Naturalmente, no han faltado predicciones sobre lo que sucederá con la física, y más en general con la ciencia, durante este recién estrenado siglo. Es muy probable que en poco acierten. Sin embargo, para un horizonte temporal más corto, por ejemplo las próximas dos décadas, es posible entrever algunas tendencias. Existen varias ramas de la física actual que por su relevancia, sea científica o por sus posibles aplicaciones, se encuentran en estado de ebullición.

Recordemos en primer lugar el estudio de los sistemas dinámicos —también conocidos como sistemas complejos o caos determinista, entre otros nombres. Probablemente, este tema provocará una apertura de los métodos

de la física hacia otras ciencias, en particular la biología y algunas ramas de las ciencias sociales, lo cual conducirá a resultados y aplicaciones inesperadas. Los conocimientos de la mecánica que habrán de emerger del estudio de los sistemas complejos nos darán una visión totalmente renovada de ésta, la más vieja rama de la física, especialmente cuando se alcance a formular su teoría general, la cual está por inventarse prácticamente en su totalidad. Más aún, dada la visión holista que requiere este tipo de estudios, bien pueden impulsar la construcción de una teoría general de sistemas —aunque esto podría ser a un plazo mayor—, asunto pendiente desde hace décadas y que ha recibido relativamente poca atención.

Otros capítulos de la física destinados a desarrollarse explosivamente es el de las nanoestructuras y de otros sistemas mesoscópicos. Durante siglos de estudios mecánicos el nivel mesoscópico fue dejado de lado, probablemente debido a la combinación de dos factores. Pri-

mero por las dificultades para estudiarlos, pues no son aplicables las aproximaciones y simplificaciones válidas para los casos extremos de lo muy pequeño o lo muy grande —lo microscópico o lo macroscópico. Segundo, no se creía que tuvieran mayor interés, por lo que se les dejaba de lado con facilidad. Pero en las últimas décadas, algunos descubrimientos mostraron que sucede precisamente lo contrario y que en este nivel hay sistemas de enorme interés por sus extraordinarias propiedades y sus posibles aplicaciones. Prueba de ello es que varios países, particularmente los Estados Unidos y Japón, dedican varios centenares de millones de dólares anuales a estos estudios. Desafortunadamente, parece que también este tren se nos va a ir.

Actualmente, casi no hay campo de la física —incluida la astrofísica— que no explore terrenos novedosos. Por ejemplo, la mecánica cuántica, que hasta hace poco parecía estar hecha, ahora podría conducirnos, si se logran resolver los enormes problemas que se interponen en el camino, a las computadoras cuánticas, lo cual representaría una revolución no menor a la que generó la electrónica de estado sólido —la sustitución de los bulbos de las primeras computadoras por los dispositivos de estado sólido, primero el transistor y después su miniaturización y ultraminiaturización en los actuales chips, cada uno de los cuales puede contener algunos millones de transistores.

La vieja teoría electromagnética de Maxwell, construida a principios de la segunda mitad del siglo XIX, unificaba en un esquema matemático común la descripción de los campos eléctrico y magnético, y describía cómo uno puede transformarse en el otro. Estos conocimientos llevaron a resultados de enorme significado práctico, aportaron la base en que se fundó la industria eléctrica y la de radiocomunicaciones, lo cual constituye otro ejemplo de la impredecibilidad de los resultados de la investigación científica —la posibilidad de comunicación con los barcos en altamar no se resolvió antes de que Hertz demostrara la existencia de las ondas electromagnéticas, predichas por la teoría de Maxwell, y la potencialidad que tienen para la radiocomunicación.

La unificación en un esquema matemático común del electromagnetismo y la gravitación constituiría un inmenso paso hacia la construcción de una teoría física básica de la naturaleza, propósito al que Einstein dedicó sus últimos años. Hoy, el conocimiento de los diversos campos que ocurren en la naturaleza y de las partícu-

las elementales que constituyen nuestro mundo permite creer que el momento está maduro para proseguir esta búsqueda de la teoría unificada. Ahora, el programa es más ambicioso, porque creció el número de campos y por la naturaleza necesariamente cuántica del problema. Para muchos, este asunto constituye el problema central de la física, y, en consecuencia, el más atractivo que pueda concebirse. Es por ello que una parte significativa del esfuerzo actual en investigación física se realiza de manera paralela en diversas vertientes de este campo. Hasta el momento, los resultados distan de ser espectaculares, pero el futuro es promisorio. Qué habrá de salir finalmente de este enorme esfuerzo es una incógnita, pero la importancia intrínseca del problema bien lo merece.

El panorama que emerge de esta perspectiva parcial y un tanto esquemática es el de una física que profundizará y extenderá con amplitud su campo de actividad, enlazándose estrechamente con otras disciplinas y abriendo nuevas fronteras y enfoques del conocimiento científico, también promoverá novedosas e importantes aplicaciones. Si consideramos el impetuoso ritmo con el que creció la ciencia durante el siglo XX, el cual seguramente se mantendrá al menos en las próximas décadas —y que incluso tiene alta probabilidad de incrementarse, pues no hay razones para creer que el desarrollo científico actual haya alcanzado un punto de saturación— puede esperarse que las nuevas generaciones que en estos momentos se inician en las labores de investigación tendrán la oportunidad de hacer grandes contribuciones al conocimiento científico o a sus aplicaciones. Por lo tanto, podemos ser optimistas con los jóvenes físicos, por delante tienen una enorme riqueza de posibilidades. Esperemos que trabajen con ahínco y éxito.

Einstein pacifista

Sería profundamente injusto para la figura de Einstein que al recordar su obra olvidáramos otra de las vertientes en la que estuvo muy activo. Por lo más íntimo de su naturaleza, fue permanentemente un pacifista y antimilitarista nato y consistente. Al cumplir 17 años, cuando se presentó el problema de tener que cumplir con el servicio militar, sumado a que consideraba acartonada y autoritaria la enseñanza en Alemania, abandonó su país para continuar sus estudios en Suiza. No retornó hasta 1913, atendiendo una insistente invitación de Planck, Nernst y otros destacados físicos alemanes. Pero algunos

años más tarde, cuando Hitler tomó el poder, Einstein se desprendió para siempre del suelo alemán.

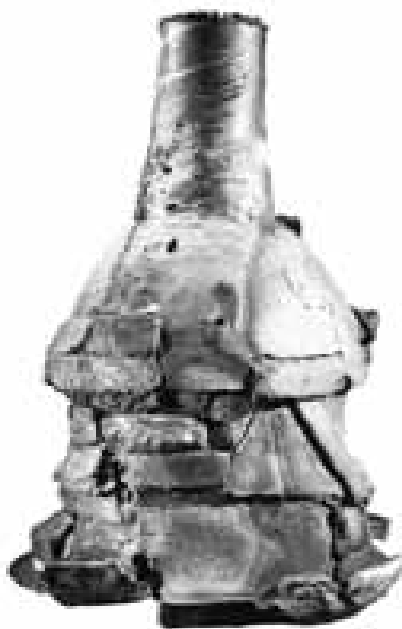
Durante la primera guerra mundial, de la cual, para muchos incluyendo al propio Einstein, Alemania era la responsable, colaboró con los movimientos pacifistas a su alcance e hizo constantes pronunciamientos por un gobierno democrático para su país. En ese momento Einstein ya era una figura internacional de relieve, por lo que sus opiniones tenían amplia resonancia, aunque en la propia Alemania su orientación pacifista causaba disgusto en vastos sectores de la población. En 1920, la recién creada Liga de las Naciones, antecedente inmediato de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), formó un Comité de Cooperación Intelectual para movilizar a intelectuales de todo el mundo en favor de la paz. Einstein fue invitado a integrarse y colaboró en él durante diez años. Renunció en 1930 declarando que lo hacía por su convicción de que al Comité le faltaba la determinación necesaria para avanzar realmente hacia mejores relaciones internacionales. Einstein también fue miembro de la mesa directiva de la Liga Alemana de Derechos Humanos y como tal en 1928, cuando el movimiento nazi ya ocupaba posiciones de poder en Alemania y Mussolini en Italia, escribió que

“la apatía política de la gente en época de paz hace temer que en su momento irán dócilmente hacia el sacrificio. Puesto que hoy carecen aunque sea del coraje para firmar un manifiesto en favor del desarme, mañana se verán forzados a derramar su sangre”. Trágicamente, pocos años más tarde, eso fue precisamente lo que sucedió. A partir de 1928 de manera insistente llamó a rehusar incondicionalmente participar en cualquier servicio para la guerra, directo o indirecto, y con independencia de las causas específicas del conflicto —misma actitud del gran físico y químico Michael Faraday, quien ya como figura de gran prestigio, se rehusó a colaborar en la producción de gases venenosos para ser usados en la guerra que Inglaterra sostenía contra Crimea. También trae a la mente el hecho de que una fracción importante, normalmente

superior a 50% en algunos países, del actual esfuerzo de investigación en ciencia y tecnología está dirigido hacia fines militares. En otras palabras, una porción muy importante de investigadores científicos y técnicos, en particular pero no exclusivamente en los países industrializados, participan de manera voluntaria en actividades con fines militares.

Cuando en los años treintas del pasado siglo, se organizaron las conferencias de Ginebra en busca de acuerdos que reglamentaran los usos de las armas, Einstein declaró: “Pienso que la Conferencia va en busca de un mal compromiso. Cualquier acuerdo que se alcance sobre

las armas permitidas durante la guerra será roto tan pronto ésta inicie. La guerra no puede ser humanizada. Solo puede ser abolida”. Aunque nunca abandonó sus convicciones pacifistas, a partir de 1933, con Hitler como canciller del Tercer Reich, se vio forzado a llamar a la resistencia armada como única posibilidad de derrotar la barbarie nazi. Este es el cambio que finalmente le condujo hacia su participación más conocida durante la segunda guerra mundial, la carta al presidente Roosevelt sugiriendo la integración de una comisión que estudiara la posibilidad de construir la bomba atómica en el tiempo más breve posible. Se trata



de un episodio de gran relieve que conviene revisar más de cerca. Hacia 1939 se hizo de dominio público que era posible sostener una reacción nuclear en cadena a partir de la fisión del uranio.

La fisión o ruptura de un núcleo de uranio —en particular, del isótopo U235— se logra bombardeándolo con un neutrón —partícula similar a un protón, pero neutra. En condiciones apropiadas la fisión también produce, en promedio, más de un nuevo neutrón, los cuales dan lugar a nuevas fisiones y así sucesivamente (en cadena) si el volumen de uranio es suficientemente grande como para que los eventos se produzcan antes de que los neutrones escapen al exterior. El volumen mínimo requerido para sostener la reacción en cadena es la llamada masa crítica. El proceso es extraordinariamente rápido y como en



cada fisión se libera energía que el núcleo original pierde, la energía total resulta enorme, produciéndose una violenta explosión. Un reactor nuclear genera energía en forma similar, pero el ritmo de la reacción se mantiene controlado, por abajo de la posibilidad de explosión. Los otros isótopos del uranio no liberan el número suficiente de neutrones como para producir la reacción en cadena; esta es la razón por la cual en la bomba se utiliza uranio muy enriquecido —por ejemplo, más de 90% de U235—, mientras que en un reactor se utiliza uranio ligeramente enriquecido —alrededor de 5% de U235. El proceso de enriquecimiento es sumamente complejo y costoso, por lo que la producción de la bomba requiere un gran esfuerzo humano y económico. Sin embargo, también países pobres han invertido en ella recursos que necesitan apremiantemente para otros fines.

Aunque hubo intentos de mantener el conocimiento en secreto, éste se extendió. Los experimentos cruciales se realizaron en Alemania y ellos, que recientemente habían invadido Checoslovaquia, país muy rico en minerales de uranio, prohibieron la exportación de ese elemen-

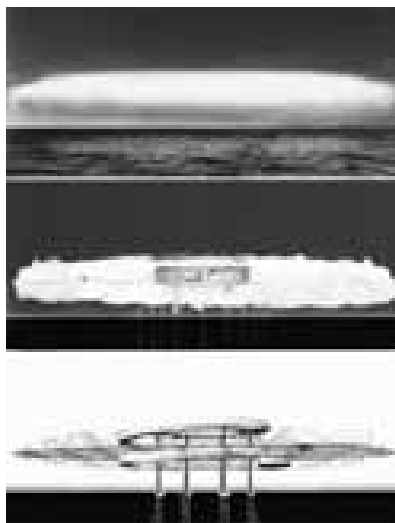
to químico. Esto fue considerado como una evidencia de que los nazis buscaban producir la bomba por el físico nuclear húngaro Leo Szilard, quien había descubierto la reacción en cadena. Ante este temor, Szilard discutió el asunto con Einstein, con quien tenía vieja amistad desde su época en Berlín. El último estuvo de acuerdo en que la bomba nuclear solo en manos de los nazis representaba un grave peligro para la humanidad y que era necesario enfrentar el problema. Así, firmó la carta redactada por Szilard dirigida al presidente Roosevelt. En ella se explicaba la existencia de una real posibilidad de construir una bomba de gran potencia y transportable, que había síntomas de que los alemanes estaban tratando de construirla, y que podrían llegar a ella durante el curso de la guerra. Como resultado se creó un comité ad hoc y para 1945 el monstruo estaba preparado. Sin embargo, el evento que realmente condujo a la fabricación de la bomba fue un informe de los servicios secretos ingleses a Roosevelt en el que afirmaban que Alemania estaba trabajando sobre ella y que podrían tenerla lista para finales de 1943.

Desafortunadamente, en cadena también se presentaron los acontecimientos políticos. Los nazis fueron derrotados pero de forma inesperada Roosevelt murió y Truman, el sucesor, resultó insensible a los llamados de los científicos —e incluso de algunos políticos— para que por razones morales y de riesgo para la paz ulterior no se empleara la bomba contra Japón, el único país del eje —nazi-fascista— aún en guerra con los estados aliados. La tragedia que de ahí se derivó es bien conocida, en agosto de 1945 las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki fueron destruidas con sendas bombas nucleares —dos diferentes, para probarlas— con más de 200 000 muertos en el acto y miles de posteriores víctimas de cáncer y otros males. A partir de ese momento se inició una carrera armamentista, sostenida fundamentalmente por los Estados Unidos y la Unión Soviética, la cual condujo a la producción y almacenamiento de miles de bombas nucleares, además de los proyectiles balísticos y aviones para su transporte.

Al término de la guerra, cuando pudo revisarse los archivos y laboratorios alemanes, quedó claro que en efecto Alemania buscó la bomba, pero estaba muy atrasada en su producción cuando fueron derrotados. Einstein entonces declaró que consideraba la firma de la carta al Presidente Roosevelt como el mayor error de su vida y que si hubiera sabido que los alemanes no llegarían a la

bomba, no habría movido un solo dedo. Constituye una trágica ironía que un pacifista y luchador empedernido por el desarme como lo fuera Einstein, se vio forzado por la gravedad de los hechos a empujar hacia la producción del más terrible artefacto creado por el hombre. A partir de ese momento y hasta su muerte, Einstein dedicó una parte muy significativa de su tiempo y sus fuerzas a su renovada lucha por el desarme, ahora el nuclear, y a prevenir contra los riesgos de la carrera armamentista.

Aunque como resultado de la suma de esfuerzos individuales y colectivos, nacionales e internacionales, se han dado algunos pasos en la dirección adecuada, como la firma de los tratados de no proliferación de armas nucleares, de no realización de pruebas nucleares, de destrucción parcial de los arsenales nucleares, de la declaración de zonas libres de armas nucleares —como el de Tlatelolco para América Latina—, en buena medida la tarea del desarme nuclear sigue en pie y representa una de las mayores responsabilidades para todos, cada quien desde su trinchera, pequeña o grande, si se quiere evitar una catástrofe producida por la inconsciencia del hombre. Más ahora, cuando es necesario generalizar la demanda hacia todo tipo de armas, pues a pesar de las prohibiciones hay fuertes sospechas de que en varios países se desarrollan en silencio armas químicas y biológicas que pasan a formar parte de sus arsenales modernos.☸



Luis de la Peña
Instituto de Física,
Universidad Nacional Autónoma de México.

IMÁGENES

P. 5: Vladimir Tatlin. Monumento a la Tercera Internacional, 1919. P. 6: Morris Louis. Alpha Phi, 1961. P. 7: Robert Rauschenberg. Reservoir, 1961.

P. 8: Chris Burden. La rueda grande, 1979. P. 10: Peter Voulkos. Big Missoula, 1996. P. 11: Richard Serra. Torqued elipses, 1997-98. P. 12: Diller y Scofidio. Edificio nube, 2002.