

Al final del siglo XIX los científicos habían logrado tener una comprensión aceptable de nuestras experiencias de todos los días. Algunas ciencias como la mecánica, la termodinámica, la química, la óptica, la biología celular y aun la electrodinámica eran ya parte del arsenal a disposición de la industria y la agricultura. A cambio de eso, la industria le había dado a la ciencia los aparatos, como bombas de vacío, espectroscopios, etcétera, que requeriría pronto para hacer mayores progresos. La ciencia se había beneficiado también de la creciente tecnología intelectual de las matemáticas. Para el año 1900 el cálculo diferencial e integral, el análisis de variables complejas, la geometría diferencial y la teoría de grupos se habían desarrollado lo suficiente como para satisfacer las necesidades de la ciencia durante las décadas venideras.

Mas algo grande le estaba haciendo falta a la ciencia al final del siglo XIX: una idea de cómo embonaba todo. En 1900 los científicos, por lo general, suponían que cada una de las ciencias, como la física, la química y la biología, operaba bajo sus propias y autónomas leyes. Se creía que el imperio de la ciencia se componía de muchas confederaciones separadas, que vivían en paz entre ellas, pero gobernadas independientemente. Unos cuantos científicos seguían prendados del sueño de Newton de una gran síntesis de todas las ciencias, pero sin ninguna idea clara de la manera en la que se podría conseguir hacer tal síntesis.

Percibimos ecos de esta confusión en los complacientes señalamientos de los físicos de finales del siglo XIX, donde afirmaban la cercanía de la terminación de la física. Quienes hacían tales aseveraciones no pudieron haber pensado que la física había cumplido su tarea de explicar la química, ni que las ciencias físicas habían conseguido explicar la vida. La complacencia de los físicos de finales del siglo XIX es una indicación de las limitaciones de su ambición para la física.

Las cosas son muy diferentes ahora, al final del siglo XX. Entendemos en principio, y a menudo de hecho, cómo surgen las leyes de la química a partir de las leyes de la física. La biología, está claro, implica accidentes históricos de un modo que la física y la química no lo hacen, pero difícilmente alguien contemplaría seriamente la posibilidad de que existen leyes universales autónomas de la biología, independientes de la ciencia física.

Lo que en este lapso ha ocurrido son reducciones en el gran sentido: las explicaciones de un amplio espectro de principios científicos en términos de principios más simples y universales. Y también han habido, en gran medida, reducciones en el sentido menor: la explicación de



La gran reducción: la física en el siglo XX



STEVEN WEINBERG



los fenómenos naturales de una escala (de magnitud) usando los principios que rigen el comportamiento de la materia a escalas mucho menores. Así como las reglas de la química se han explicado en términos de la dinámica de los electrones en los átomos, el mecanismo de la herencia que guía la evolución biológica se comprende hoy en términos moleculares.

Este ensayo no abordará toda la ciencia, ni siquiera toda la física, del siglo xx, sino tan sólo aquella porción de la investigación en física que ha seguido la tradición reduccionista de buscar los principios más profundos que subyacen a toda la naturaleza.

Así sea sólo para los físicos, el siglo xx comenzó en 1895, con el descubrimiento accidental de los rayos X por Wilhelm Röntgen. Lo que Röntgen encontró fue que la corriente eléctrica, llevada por una potente batería eléctrica a través de un tubo de Crookes de vidrio (el primer acelerador de partículas), producía al chocar con las paredes de vidrio del tubo ciertos misteriosos rayos, que no podían ser refractados por lentes ni desviados por la materia ni por campos eléctricos o magnéticos. En sí mismo este descubrimiento no implicó ninguna gran revo-

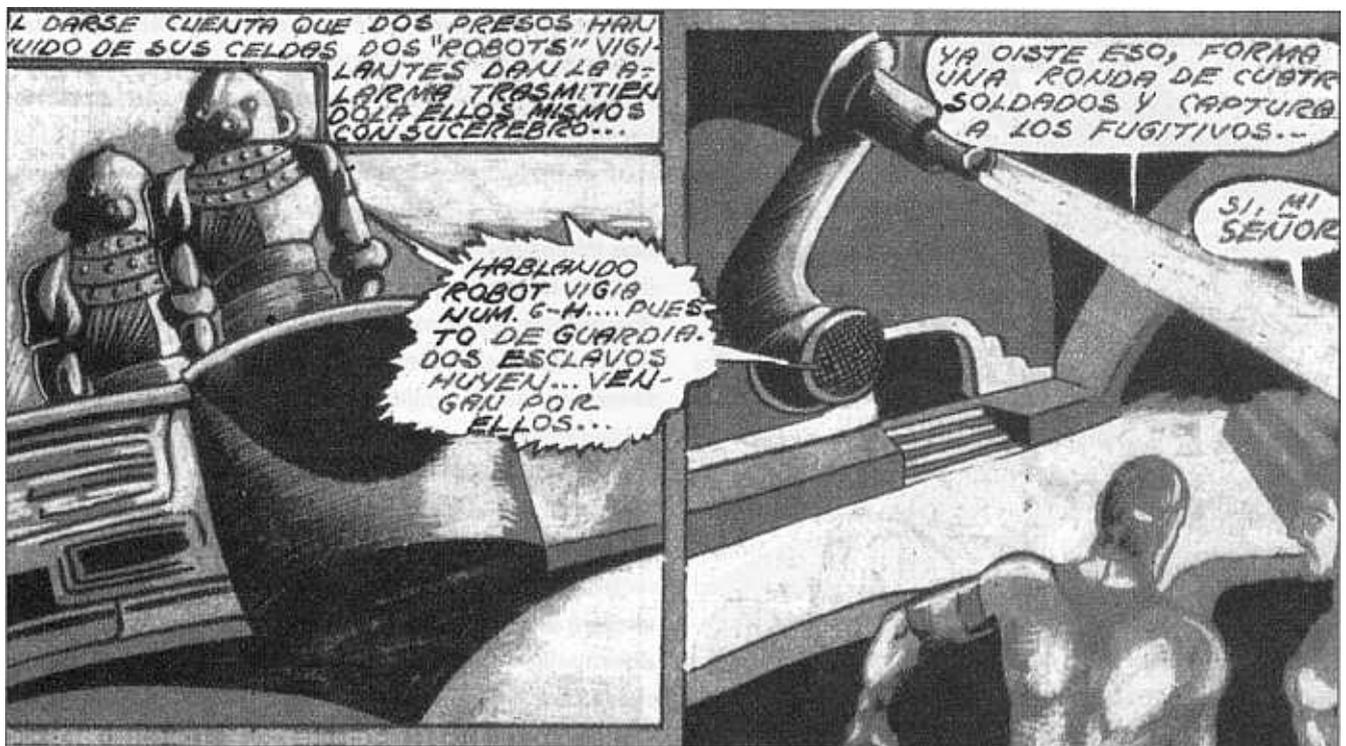
lución. Hoy día sabemos que esos rayos X son tan sólo rayos de luz de baja longitud de onda, pero el descubrimiento de Röntgen fue una señal dramática de que fuera del espectro de los fenómenos naturales que habían sido iluminados por la física del siglo xix existían muchos misterios esperando ser descubiertos.

Casi de inmediato el descubrimiento de los rayos X estimuló otros importantes hallazgos. A principios de 1896 Henri Becquerel, mientras buscaba nuevos tipos de rayos, encontró por accidente que el uranio emite rayos que pueden marcar las placas fotográficas. Pierre y Marie Curie pronto descubrieron que el torio, el polonio y el radio producen efectos similares y le dieron al fenómeno su nombre moderno: *radiactividad*. Después de mucha confusión, Ernest Rutherford y Frederick Soddy identificaron la radiactividad como un efecto de la transmutación de los elementos, en el que se libera energía que es llevada al exterior por partículas de diversa índole. Más allá de su importancia para la comprensión de la materia, el descubrimiento de la radiactividad pronto sugirió soluciones para los problemas fundamentales de la fuente de calor del Sol y de la Tierra, y de ese modo resolvió la discrepancia entre la corta edad de la Tierra que se había inferido a partir de su temperatura actual y la mucho mayor edad que se había deducido a partir del registro fósil.

Tan sólo dos años después del descubrimiento de los rayos X, tanto J. J. Thomson, en Cambridge, como Walter Kaufmann, en Berlín, midieron la proporción entre masa y carga eléctrica en las corrientes que fluían en un tubo de Crookes modificado. Esta relación entre masa y carga resultó ser miles de veces menor que la de los iones que llevan las corrientes eléctricas durante la electrólisis. Con base en esto, Thomson propuso que la corriente en un tubo de Crookes es llevada por partículas que él llamó *electrones*, miles de veces más ligeras que los átomos completos, y universalmente presentes en toda la materia.

La idea de que la materia está constituida por átomos le había resultado útil a los químicos y físicos del siglo xix, pero no había aún evidencia directa de su existencia. Ésta se obtuvo en la primera década del siglo xx por medio de una variedad de mediciones de la masa de los átomos, que en lo general dieron resultados consistentes. La mayoría de estas nuevas mediciones fueron posibles debido a los descubrimientos de los años 1895 a 1897.

Hasta 1911 no se tenía idea de cómo la masa y las cargas eléctricas se encuentran arregladas dentro de los átomos. Rutherford utilizó entonces los resultados de experimentos realizados en su laboratorio en Manchester, so-



bre la dispersión por átomos de oro de partículas de una fuente radiactiva, para mostrar que la masa de un átomo está casi completamente concentrada en un pequeño núcleo cargado positivamente. Concibió a los electrones, responsables de los fenómenos químicos, eléctricos y ópticos, como partículas que giran en torno al núcleo como planetas en torno al Sol. Se había así respondido la inmemorial pregunta sobre la naturaleza de la materia común, y sólo la composición del núcleo atómico seguía siendo por completo misteriosa.

En la gran labor de los años 1895 a 1911 que he descrito hasta ahora los experimentalistas tuvieron el papel protagonista. Cuando se utilizaron teorías físicas para analizar los resultados experimentales, se trató de las teorías clásicas familiares del siglo XIX. Pero la imagen del átomo que surgió de estos trabajos planteó preguntas inquietantes que no podían responderse dentro del marco clásico.

De acuerdo con los principios de la electrodinámica, los electrones del átomo, al girar en sus órbitas, deberían emitir luz, perder así energía y caer rápidamente con trayectoria espiral hacia el núcleo. Sin embargo, cada átomo ordinario, no radiactivo, tiene un estado de menor energía que parece ser perfectamente estable. Es más, a pesar de

que un átomo que ha absorbido energía, por medio de luz o a través de colisiones con otros átomos, la volverá a perder emitiendo luz, esta luz que se emite no tiene un espectro continuo de longitudes de onda, que es lo que se esperaría si se tratase de electrones cayendo en trayectorias espirales hasta el estado de menor energía. Tal luz es emitida más bien en determinadas y discretas longitudes de onda, características de cada tipo de átomo. Estos espectros atómicos fueron descubiertos a principios del siglo XIX, y se habían convertido en una herramienta para el análisis químico, incluso para el análisis de los elementos presentes en el Sol y en otras estrellas. Nadie, sin embargo, podía explicar los espectros de longitudes de onda en los cuales los diversos átomos emiten luz.

La solución no se hallaba en nuevas teorías del electromagnetismo o de la estructura del átomo, sino en un marco radicalmente nuevo para toda teoría física, el que se conoce como mecánica cuántica. He aquí los puntos a destacar de dicha revolución:

1900. Max Planck explica el espectro de la radiación de cuerpo negro (la intensidad de la luz que emite un cuerpo opaco caliente a diferentes longitudes de onda) asumiendo que cuando los átomos emiten luz a una determinada longitud de onda no lo hacen de forma continua, sino más bien en múltiplos de un "cuanto" (*quantum*) de energía, inversamente proporcional a la longitud de onda de la luz.

1905. Albert Einstein interpreta la conjetura de Planck (contra las objeciones de Planck) como una muestra de que la luz misma está compuesta de partículas individuales, que luego se llamarán fotones. Los fotones no tienen masa pero tienen energía y *momento*, inversamente proporcionales a la longitud de onda de la luz. Se encuentra evidencia experimental para el fotón de Einstein con el efecto fotoeléctrico, y más tarde en la dispersión de los rayos X por electrones.

1913. Niels Bohr ofrece una interpretación tentativa del espectro de los átomos. Éstos pueden estar exclusivamente en ciertos estados de energía definida. Cuando un átomo cae de un estado de energía mayor a uno de energía menor emite un fotón, cuya energía es igual a la diferencia de energía entre el estado final y el inicial del átomo, y por ende —de acuerdo con Einstein— con una longitud de onda definida, inversamente proporcional a esta diferencia de energía. Bohr usa la imagen de Rutherford de los electrones del átomo en órbita en torno a un núcleo para dar un procedimiento, *ad hoc* pero exitoso, para calcular las energías de los estados de átomos simples como el hidrógeno, que tiene sólo un electrón. Sin embargo, no es claro cómo aplicar este procedimiento para átomos y moléculas más complicadas, y tampoco por qué es exitoso para átomo alguno.

1923. Louis de Broglie ofrece una explicación del procedimiento de Bohr. Los electrones están asociados a ondas, que poseen una longitud de onda inversamente proporcional al *momento* del electrón, del mismo modo que con los fotones. El procedimiento de Bohr para calcular la energía del estado de un átomo es interpretado como el requisito para que un número entero de estas longitudes de onda quepa exactamente en torno a la órbita de

los electrones. Pero de nuevo este acercamiento sirve tan sólo para los átomos más simples.

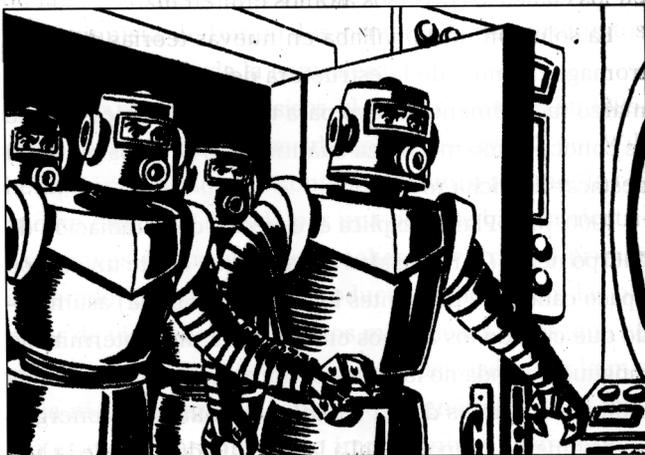
1925. Werner Heisenberg interpreta los espectros de los átomos de una manera distinta. La dinámica de los átomos ya no es expresada en términos de trayectorias de electrones en órbita en torno al núcleo, sino a través de tablas (“matrices”) de cantidades numéricas, cuyos cuadrados dan las tasas en las cuales los átomos sufren transiciones de un estado de energía a otro. Poco después, en un *tour de force* matemático, el otrora discípulo de Heisenberg, Wolfgang Pauli, utiliza el formalismo de Heisenberg para calcular el espectro del hidrógeno, recuperando los resultados obtenidos por Bohr en 1913. Sin embargo, aún parece inútil usar estos procedimientos para problemas más complicados.

1925-1926. Erwin Schrödinger regresa a las ondas asociadas a electrones de De Broglie y propone una ecuación diferencial que gobierna la amplitud de la onda (la llamada función de onda) en campos eléctricos generales. Muestra cómo las matrices de Heisenberg y las condiciones algebraicas que satisfacen pueden derivarse de su ecuación de onda. Por primera vez se dispone de un procedimiento que puede usarse para calcular la energía de los estados no sólo del hidrógeno, sino de átomos y moléculas de cualquier complejidad. Sin embargo, el significado físico de la ecuación de onda permanece oscuro.

1926. Max Born explica que las ondas de De Broglie y Schrödinger son “amplitudes de probabilidad”; la probabilidad de que se encuentre a un electrón en el pequeño volumen alrededor de un punto dado es igual al cuadrado de la función de onda en ese punto por el volumen.

Después de 1926 la mecánica cuántica se aplicó rápida y exitosamente al cálculo de las propiedades no sólo de los átomos aislados, sino también de los átomos unidos en moléculas químicas, y aun en sólidos macroscópicos. Devino claro que las reglas de la química no son principios científicos autónomos, sino las consecuencias matemáticas de la mecánica cuántica cuando se aplica a electrones y núcleos de átomos. Éste fue, puede afirmarse, el más grande logro particular de la ciencia de talante reduccionista. Paul Dirac expresó la exuberancia de aquellos tiempos cuando proclamó en 1929 que “las leyes físicas subyacentes necesarias para tener la teoría matemática de una gran parte de la física y para toda la química son de ese modo conocidas del todo, y la dificultad ahora es tan sólo que la aplicación de tales leyes conduce a ecuaciones demasiado complicadas para ser solubles”.

Tuvo que pagarse un precio por este éxito. La mecánica cuántica posee una extrañeza irreducible. Una partícula



la no tiene una posición o un *momento* hasta que una o el otro se miden; lo que sí posee es una función de onda. La función de onda evoluciona determinísticamente, por lo que si se conoce la ecuación de onda de un momento dado, uno puede usar la ecuación de Schrödinger para calcular la ecuación de onda de cualquier tiempo posterior. Pero conocer la ecuación de onda no te faculta para predecir el resultado preciso de una medición de la posición o el *momento*, sino tan sólo para saber las probabilidades de los diversos resultados posibles. ¿Cómo surgen estas probabilidades si los observadores y sus aparatos de medición son ellos mismos descritos por una ecuación de Schrödinger, complicada pero determinística?

La extrañeza de la mecánica cuántica elevó una barrera para la comunicación no sólo entre los físicos y los no físicos, sino también entre los físicos jóvenes de los años veinte y sus colegas mayores. Einstein y Planck jamás aceptaron la versión de consenso de la mecánica cuántica, y su significado ha seguido siendo debatido durante todo el siglo. Sin embargo, la mecánica cuántica probó ser notablemente resistente. Los triunfos de las físicas atómica, de materia condensada, nuclear, y de partículas elementales, desde los años veinte hasta nuestros días, se han basado en el marco teórico de la mecánica cuántica que estaba terminado para 1926.

La otra gran revolución de la física del siglo xx fue el desarrollo de la teoría de la relatividad. Aunque no se trató de un ruptura tan radical con el pasado como la mecánica cuántica, la relatividad fue en uno de sus aspectos más notables. La mecánica cuántica fue desarrollada sobre un lapso de un cuarto de siglo por contribuciones sucesivas de muchos físicos, la relatividad en cambio fue casi por completo debida al trabajo de un solo físico, Albert Einstein, entre 1905 y 1915.

Desde su juventud Einstein se preocupó por el efecto del movimiento de un observador sobre las observaciones de la luz. Para fines del siglo xix este problema se había vuelto crítico, debido al fracaso continuo de los esfuerzos de los experimentalistas por detectar cambios en la velocidad de la luz debidos a la traslación de la Tierra en torno al Sol. Varios teóricos enfrentaron este problema de manera dinámica, por medio de hipótesis acerca del efecto del movimiento sobre el éter (el medio que se creía era responsable de llevar las ondas luminosas) y sobre el aparato detector usado para medir la velocidad de la luz. Entonces, en 1905, Einstein dejó el éter de lado y



afirmó como una ley fundamental de la física el principio especial de la relatividad, que ningún movimiento uniforme de observador alguno puede tener un efecto sobre la velocidad de la luz, ni ninguna otra cosa.

La relatividad no era nueva. El principio de relatividad había sido un ingrediente importante de la mecánica de Newton; las ecuaciones de Newton del movimiento de masas desplazándose bajo la influencia de su atracción gravitacional mutua se presentan de igual manera para todos los observadores no acelerados, sin importar su velocidad. Pero la transformación "galileana" que vincula las coordenadas usadas por un observador en movimiento con las de un observador en reposo, y que deja las ecuaciones newtonianas sin cambio, no dejaría sin cambio la velocidad de la luz. Para desarrollar su nuevo principio de la relatividad, Einstein necesitaba sustituir la transformación de coordenadas galileana con un nuevo tipo de transformación, conocido como la transformación de Lorentz, en la que el movimiento del observador afecta no sólo a las coordenadas espaciales de los sucesos sino también a sus coordenadas temporales. Pero si las ecuaciones de la mecánica, así como la velocidad de la luz,

debían de ser invariantes bajo dichas transformaciones de Lorentz, entonces también las ecuaciones debían ser cambiadas. Una de las consecuencias más dramáticas de la nueva mecánica, señalada por Einstein en 1907, es que un sistema que pierde energía sufrirá una reducción proporcional de masa, que está dado por la pérdida de energía dividida entre el cuadrado de la velocidad de la luz. La energía disponible en una transmutación radiactiva de un núcleo atómico en otro podía entonces determinarse simplemente pesando el núcleo inicial y el final.

Después de 1905 sólo la teoría de la gravitación seguía siendo inconsistente con la versión de Einstein del principio de la relatividad. Einstein trabajó en este problema durante la siguiente década, y finalmente encontró la respuesta en una extensión del principio de la relatividad. De acuerdo con lo que ahora llamó el principio general de la relatividad, las leyes de la naturaleza se le presentan iguales no sólo a todos los observadores con movimiento uniforme, sino también (de algún modo) a *todos* los observadores: las fuerzas inerciales familiares que sienten los observadores acelerados no son sino una especie de gravitación. Dado que las fuerzas gravitacionales de cualquier tipo son tan sólo una función del sistema de coordenadas, éstas pueden ser descritas geoméricamente, en términos de la curvatura del espacio-tiempo, una curvatura que se produce, de acuerdo con las ecuaciones de campo de Einstein, debido a la presencia de energía y momento.

La relatividad especial y la general, al igual que la mecánica cuántica, contradicen nuestras nociones intuitivas y cotidianas de la realidad física. Sin embargo, las recepciones públicas de la relatividad y de la mecánica cuántica fueron muy diferentes. La mecánica cuántica fue confirmada inmediatamente por medio de una gran cantidad de datos anteriores sobre los espectros de los átomos, de modo que no hubo necesidad de un espectacular experimento crítico que probara que era correcta. Esto, aunado a su mayor dificultad conceptual, redujo su impacto inicial en la cultura general. En cambio, al principio había poca evidencia a favor de la relatividad. Posteriormente, después de la Primera Guerra Mundial, una expedición británica se dio a la tarea de medir un efecto que la relatividad general predecía, una pequeña desviación de la luz de una estrella distante debida al campo gravitacional del Sol. La noticia, en 1919, de que las observaciones de este fenómeno concordaban con la predicción de Einstein llegó a las primeras planas de los periódicos en todo el mundo, y elevó a Einstein a un rango público único entre los científicos del siglo xx.

Aunque la relatividad fue sin duda una presencia en las mentes de De Broglie y Schrödinger, las primeras y exitosas aplicaciones de la mecánica cuántica en los años 1925 y 1926 se basaron en la más vieja mecánica de Newton. Los electrones de las últimas órbitas de los átomos viajan tan sólo a porcentajes pequeños de la velocidad de la luz, de modo que los efectos relativísticos en los espectros de los átomos son difíciles de detectar. Pero era evidente que la mecánica relativística (como todo lo demás) tendría que reformularse en el marco de lo cuántico.

Esto no resultaba fácil. En la relatividad especial el flujo del tiempo que se observa es afectado por la velocidad del observador, de modo que aun el orden de los sucesos en el tiempo puede variar de un observador a otro. Sin embargo la relatividad especial clásica respeta la condición de que todos los observadores deben ver que los efectos siguen a sus causas, porque el orden de los sucesos puede depender de la velocidad del observador sólo cuando los sucesos están tan cercanos en el tiempo que la luz no tendría tiempo de desplazarse de un suceso al otro, y Einstein (por esta razón) asumió que ninguna influencia física puede viajar a mayor velocidad que la de la luz. El problema de la causalidad es más complicado en la mecánica cuántica, puesto que las posiciones y las velocidades de los estados cuánticos no pueden especificarse ambas con la suficiente precisión para eliminar la posibilidad de una propagación de efectos físicos a velocidades mayores a la de la luz.

La casi incompatibilidad de la relatividad especial con la mecánica cuántica habría de tener un efecto profundo sobre el estilo de la física teórica. Tanto la relatividad pre-cuántica como la mecánica cuántica no relativística habían brindado marcos generales para desarrollar teorías físicas, pero uno tenía siempre que depender de experimentos para obtener información sobre partículas y fuerzas a la hora de construir una teoría específica. La mecánica cuántica relativística, en cambio, es internamente casi tan inconsistente que uno puede avanzar mucho en la descripción de la naturaleza al exigir consistencia matemática, con pocos insumos observacionales.

La teoría bajo este nuevo estilo comenzó con el trabajo de Dirac de 1928. Su acercamiento consistió en revisar la ecuación de Schrödinger para el caso de una sola partícula que se mueve en un campo electromagnético dado, para hacerla consistente con el principio de la relatividad especial. Con esta base Dirac fue capaz de calcular la fuerza del campo magnético del electrón, así como al-

gunos detalles finos del espectro del hidrógeno. De modo más espectacular, varios años después él predijo la existencia de la antimateria; predicción que fue confirmada de un modo inesperado con el descubrimiento, que en 1932 hicieron Carl Anderson y P. M. S. Blackett, del antielectrón en los rayos cósmicos.

El acercamiento de Dirac cobró gran prestigio debido a estos éxitos, pero resultó inadecuado para lidiar con los procesos radiactivos en los cuales las partículas cambian su identidad. La necesidad de reconciliar la mecánica cuántica con la relatividad pronto dio origen a un formalismo más general: la teoría cuántica de campos.

La teoría cuántica de campos comenzó en 1926 con la aplicación (que hicieron Born, Heisenberg y Pascual Jordan) de la mecánica cuántica a los campos ya conocidos del electromagnetismo. Entonces los electrones todavía eran representados como partículas puntuales, y no como campos. Poco después, en los años 1929 y 1930, Heisenberg y Wolfgang Pauli propusieron una visión más unificada de la naturaleza. Así como existe un campo electromagnético, en el que la energía y el *momento* se hallan en pequeños paquetes llamados fotones, hay también un campo del electrón, cuya energía, *momento* y carga eléctrica, se encuentran en paquetes que llamamos electrones, y lo mismo pasa con cada tipo de partícula elemental. Los ingredientes básicos de la naturaleza son campos; las partículas son fenómenos derivados.

La teoría cuántica de campos reprodujo los éxitos de la teoría de Dirac, y consiguió algunos éxitos propios, pero la síntesis de la mecánica cuántica con la relatividad pronto se encontró con una nueva dificultad. En 1930, tanto J. Robert Oppenheimer como Ivar Waller descubrieron que los procesos en los que los electrones emiten y reabsorben fotones harían variar la energía del estado del electrón, en apariencia, en cantidades infinitas. Muy pronto comenzaron a aparecer cantidades infinitas en otros cálculos, con lo que se produjo un ánimo pesimista en torno a la validez de la teoría cuántica de campos, que persistió durante décadas.

En los años treinta la frontera de la física cambió de los átomos hacia los núcleos atómicos, y hacia nuevos fenómenos descubiertos por el estudio de los rayos cósmicos. He aquí algunos de los sucesos relevantes:

• 1932. James Chadwick descubre el neutrón, una partícula eléctricamente neutra con una masa cercana a la del protón. Heisenberg propone que el neutrón no es un

estado en el que un electrón y un protón se hallan ligados, como primero se pensó, sino que se trata de una nueva partícula elemental, constituyente, junto con los protones, de los núcleos de los átomos. Dado que son eléctricamente neutros, los neutrones pueden penetrar los núcleos de los átomos sin ser repelidos por los poderosos campos eléctricos de las cercanías del núcleo; se vuelven así una herramienta valiosa para la exploración del núcleo, especialmente en las manos de Enrico Fermi.

1933. Fermi desarrolla una teoría cuántica de campo exitosa para el decaimiento beta (el proceso radiactivo descubierto por Becquerel). Describe cómo los neutrones espontáneamente se transforman en protones y emiten electrones y neutrinos (partículas neutras y ligeras que Pauli había propuesto en 1930).

1935. Hideki Yukawa presenta una teoría cuántica de campo que intenta dar cuenta tanto de el decaimiento beta como de las fuerzas nucleares fuertes que mantienen unidos a los protones y los neutrones dentro del núcleo. Esta teoría exige la existencia de una nueva partícula

The image shows the cover of a magazine titled "EMOCION". At the top, the word "EMOCION" is written in a large, stylized, white font on a dark background. Below the title, there is a central illustration of a man in a dark suit and white shirt with a bow tie. He has a human face but a metallic, mechanical-looking head. He is sitting at a table with a plate of food, a glass, and a bottle. The text "AÑO III NUM 86" is visible in the upper right corner of the illustration. At the bottom of the cover, there is a dark banner with white text that reads "Lea en este Número 'LA VENGANZA DEL ROBOT'".



ENTONCES DEL FONDO DE UNO DE LOS GIGANTESCOS CIRCULOS LUNARES, SE ABRE UN TUNEL Y SALEN UNAS EXTRAÑAS ESPACIONAVES GIGANTESCAS.



EN SU INTERIO DE UNOS ENORMES Y CARGOS HOMBRES AHORA ELLOS LAS MIENTEN SILENCIOSAMENTE... LOS HOMBRES LEONES.



¡AL ATAQUE, HIJOS DE SATURNO! ¿QUE NO ESCAPE UNA SOLA NAVE TERRESTRE!
POR QUE ATACAN LOS SATURNIANOS? ¿QUE MARAVILLOSO COMBATE VAMOS A VER EN LAS SIGUIENTES? (CONTINUAR)

la, el mesón, con una masa como doscientas veces la del electrón.

1937. S. H. Neddermeyer y Anderson, así como C. E. Stevenson y J. C. Street, independientemente unos de otros, descubren una nueva partícula en los rayos cósmicos que posee una masa cercana a la que Yukawa predijo, y se le confunde en un principio con su mesón.

1939. Hans Bethe describe las reacciones nucleares primarias por medio de las que obtienen su energía las estrellas.

La investigación básica fue relegada durante los años que duró la Segunda Guerra Mundial, al tiempo que los descubrimientos de la ciencia se aplicaban a trabajos bélicos. La investigación aplicada cae fuera del alcance de este ensayo, pero apenas sería posible ignorar del todo la más espectacular de las aplicaciones de la física del siglo xx: el desarrollo de las armas nucleares. En 1938 Otto Hahn y Fritz Strassmann descubrieron que se producían isótopos del bario, un elemento de mediano peso, cuando los nú-

cleos pesados de uranio eran irradiados con neutrones. Unos pocos meses más tarde, en Suecia, Otto Frisch y Lise Meitner calcularon que la captura de un neutrón podría ocasionar que un núcleo pesado como el de uranio se rompiera en pedazos de tamaño mediano, como el núcleo de bario, liberando doscientos millones de electronvolts de energía. En sí misma ésta sería sólo otra reacción nuclear, en realidad no tan diferente de cientos de otras reacciones estudiadas antes. Lo que hizo de la fisión inducida por neutrones algo tan importante fue la posibilidad de que junto con el bario y otros núcleos se liberasen varios neutrones en esa fisión, cada uno de los cuales podría detonar otra fisión, conduciendo a una reacción en cadena explosiva. Sería algo como un incendio forestal, en el que el calor de cada árbol que arde ayuda a incendiar más árboles, sólo que inmensamente más destructivo.¹

Al acercarse la guerra la mayoría de las grandes potencias comenzaron a investigar la posibilidad de usar la fisión del uranio como un arma o como una fuente de energía. Gran Bretaña tomó una ventaja temprana en esta tarea, y ésta fue luego transferida a Estados Unidos. En 1942 un grupo dirigido por Enrico Fermi en la Universidad de Chicago consiguió producir una reacción en cadena en una pila de uranio. La fisión ocurrió no en el isótopo común U^{238} , sino en el isótopo raro U^{235} , que sólo es 0.723% del uranio natural usado por Fermi, pero que a diferencia del U^{238} puede hacerse fisionar aún por neutrones muy lentos. Otro núcleo, el isótopo Pu^{239} del plutonio, tiene esa misma propiedad de fisionarse con facilidad, y a pesar de que no existe en la naturaleza se produciría en las pilas de uranio.

Los problemas fueron, entonces, aislar suficiente U^{235} o producir suficiente Pu^{239} como para hacer una bomba, y desarrollar un método para detonarla. Estos problemas fueron atacados con éxito por un equipo de científicos e ingenieros encabezados por Oppenheimer. En agosto de 1945 Hiroshima y Nagasaki fueron destruidas casi por completo por bombas de U^{235} y de Pu^{239} , res-



pectivamente, lo que llevó a la rendición de Japón y al fin de la guerra.

Nos alejaría demasiado de nuestro tema el comentar acerca de los efectos de las armas nucleares sobre los asuntos mundiales, pero sería adecuado decir algo de los efectos de las armas nucleares en la física misma. El logro del proyecto de la bomba al ayudar a terminar con la guerra le dio a muchos de los físicos involucrados un sentimiento natural de orgullo, a menudo balanceado por un sentido de la responsabilidad por el daño hecho en Hiroshima y Nagasaki, y por el peligro que le representaban ahora las armas nucleares a la humanidad. Algunos físicos se dedicaron desde entonces a trabajar por el control armamentista y por el desarme nuclear. Los políticos y otros legos ahora tendían a mirar a la física como una fuente de poder militar y económico, y durante décadas brindaron un apoyo sin precedentes tanto a la investigación básica como a la aplicada en física. Simultáneamente, la imagen de la nube en forma de hongo de Hiroshima tuvo un efecto poderoso en la actitud que ante la ciencia adoptan muchos líderes culturales, y otros ciudadanos. En muchos casos, su indiferencia previa devino abierta hostilidad. El tiempo ha moderado todos estos efectos, pero al final del siglo no han desaparecido del todo.

Ya para 1947 los físicos se hallaban listos para regresar a los problemas fundamentales. La utilización de emulsiones fotográficas mejoradas muy pronto reveló un zoológico de nuevas partículas en los rayos cósmicos. Una de ellas, el mesón pi, pudo identificarse como la partícula que Yukawa había predicho.

Para discutir éste y otros avances se organizó una reunión en la isla de Shelter en junio de 1947. El punto climático de la reunión fue un reporte de Willis Lamb mediante el cual presentó evidencia experimental convincente de la existencia de una pequeña diferencia de energía entre dos estados del átomo de hidrógeno; estados que de acuerdo con la versión de Dirac respecto de la mecánica cuántica relativista deberían tener exactamente la misma energía. También se presentó evidencia, por parte del grupo de I. I. Rabi en Columbia, de que el campo magnético del electrón era como 10% más fuerte de lo que Dirac había calculado. Efectos de este tipo serían producto de las llamadas correcciones radiactivas, debidas a la emisión o reabsorción de fotones por los electrones en los átomos. De hecho, el corrimiento Lamb de energía era un caso especial del efecto que Oppenheimer había esta-

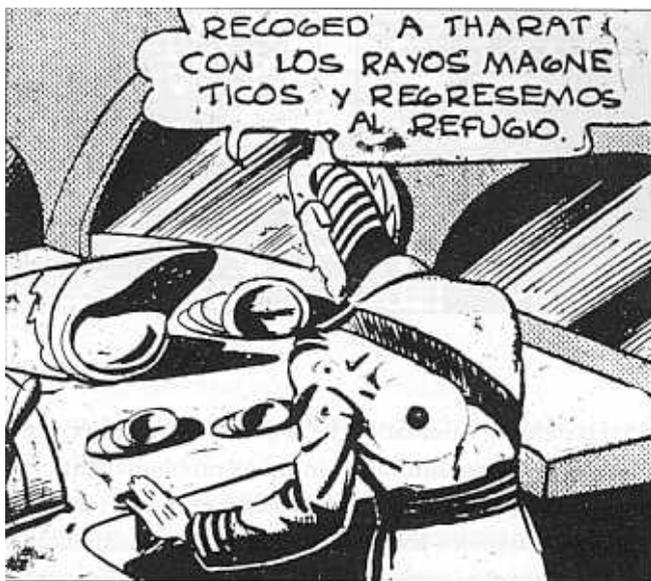


do tratando de calcular en 1930 cuando se topó por primera vez con las cantidades infinitas problemáticas.

En la isla de Shelter los teóricos se enfrascaron en intensas discusiones sobre cómo realizar esos cálculos, y en especial sobre cómo asegurarse de que las respuestas fuesen finitas. Una idea ya había sido ampliamente discutida durante los años treinta. Quizá las masas y cargas eléctricas que aparecen en las ecuaciones de campo para el electrón y otras partículas son ellas mismas infinitas, y los infinitos que aparecen en los cálculos de correcciones radiactivas sólo lo hacen para corregir o "renormalizar" estas masas y cargas, dándoles los valores (obviamente finitos) observados. Poco después de la reunión en la isla de Shelter la idea de renormalización fue usada para calcular con éxito los corrimientos Lamb de energía, tanto por Bethe, J. Bruce French y Victor Weisskopf, como por Norman Kroll y Lamb, así como para calcular el campo magnético del electrón por Julian Schwinger. No se sabía entonces en Occidente, pero al mismo tiempo cálculos similares estaban siendo realizados por un grupo en Japón, dirigido por Sin-itiro Tomonaga.

Estos éxitos llevaron a que renaciera la confianza en la teoría cuántica de campo. Varias ideas radicales que se habían presentado como soluciones en los años treinta, por parte de Dirac, Heisenberg y otros, fueron dejadas ahora de lado. Sin embargo, el método de cálculo siguió siendo oscuro y difícil, y resultaba dificultoso pronosticar si la renormalización continuaría resolviendo el problema de las cantidades infinitas en futuros cálculos.

En los pocos años que siguieron a la reunión de la isla de Shelter, Schwinger y Richard Feynman desarrollaron poderosos métodos de cálculo. La esencia de tales métodos fue el tratamiento de procesos que involucran antipartículas, de un modo tal que se conserve explícitamente la consistencia con la relatividad especial. Finalmente, en 1949 Freeman Dyson sintetizó el trabajo de Feynman, Schwinger y Tomonaga, dándole a la teoría cuántica de campo su forma moderna.



Después de 1950² la línea de avanzada de la física volvió a cambiar, alejándose de la física nuclear y las correcciones radiactivas, y moviéndose hacia la física de una cantidad creciente de partículas elementales. Las herramientas para estas investigaciones también cambiaron; los rayos cósmicos fueron sustituidos por poderosos aceleradores, y detectores de partículas de cada vez mayor tamaño y sofisticación tomaron el lugar de los contadores Geiger y las emulsiones fotográficas de los años treinta y cuarenta. Estos avances técnicos llegaron acompañados por cambios institucionales; que a pesar de haber sido quizá inevitables no significaron avance alguno. La investigación experimental se trasladó aceleradamente de los sótanos de edificios universitarios de física a laboratorios nacionales e internacionales, y los artículos de física se publicaron con un número creciente de autores, algunos de los cuales para finales del siglo alcanzaron a tener miles de firmantes de infinidad de instituciones. Se rigidizó la demarcación entre físicos teóricos y experimentales; nadie después de los años cincuenta volvió jamás a hacer trabajo tanto experimental como teórico de alto calibre en física de partículas elementales.

La gran tarea después de 1950 era reunir todas las partículas elementales conocidas, y todas las fuerzas que actúan sobre ellas, bajo el mismo marco teórico cuántico de campo que se usó antes de 1950 para entender los electrones y los campos electromagnéticos. Los obstáculos inmediatos para ello eran, primero, que los cálculos en la

teoría de Fermi de la fuerza nuclear débil responsable del decaimiento beta producían cantidades infinitas que la renormalización no podía eliminar, y, segundo, que las fuerzas en la teoría de Yukawa de la fuerza nuclear fuerte son demasiado fuertes como para permitir el tipo de cálculos por medio de aproximaciones sucesivas que funcionara tan bien en la electrodinámica. Más allá de estos problemas se hallaba una dificultad más profunda: no había nada que señalara el porqué de estas teorías.

Ya para la mitad de los años setentas se habían superado tales problemas con la terminación de una teoría cuántica de campo conocida como el modelo estándar de las partículas elementales.

El modelo estándar fue el resultado de una preocupación, que abarcó un siglo, de parte de la física teórica con los principios de simetría. En términos generales un principio de simetría es una afirmación de que las ecuaciones de la física se presentan de la misma forma desde diferentes puntos de vista. Los principios de simetría siempre habían sido importantes en la física puesto que nos permiten hacer inferencias sobre sistemas complicados sin un conocimiento detallado de los sistemas, pero adquirieron una renovada importancia en el siglo xx al revelarse como aspectos de las leyes más fundamentales de la naturaleza.

Ya en 1905 Einstein había elevado un principio de simetría, la invarianza del espacio-tiempo ante las transformaciones de Lorentz, a un rango de ley fundamental de la física. Algunas mediciones de las fuerzas nucleares en los años treinta sugirieron la existencia de incluso otra simetría; no una rotación en el espacio o el espacio-tiempo ordinarios, sino en un espacio abstracto e interno de espín isotópico, en el cual diferentes direcciones corresponden a diferentes especies de partículas. Un tipo de simetrías, conocidas como simetrías de norma, de hecho requieren la existencia de campos del modo en que, por ejemplo, el principio general de la relatividad requiere la existencia del campo gravitacional. A partir de 1954 algunos teóricos propusieron nuevas simetrías de norma, aún sin ninguna aplicación clara al mundo real. Pero para el final de los años cincuenta los experimentos ya habían revelado una pasmosa variedad de otros principios de simetría, no de norma, algunos de los cuales (como la simetría del espín isotópico y la simetría entre la izquierda y la derecha) eran sólo aproximados.

Dada la importancia de los principios de simetría resultó emocionante descubrir que la naturaleza respeta todavía otro tipo de simetrías que suelen "romperse"; no son respetadas por partículas individuales, sino que se

manifiestan en las relaciones entre procesos que involucran números diferentes de partículas. La simetría rota se convirtió en un tópico caliente después de la utilización exitosa de una de estas simetrías rotas a mediados de los años sesentas en la predicción de las propiedades de los mesones pi de baja energía.

Poco después una simetría de norma rota, interna y exacta, fue introducida como la base de una teoría unificada de las fuerzas nuclear débil y electromagnética. En 1971 se pudo probar que las teorías de este tipo evaden los problemas con las cantidades infinitas que habían plagado a la vieja teoría de Fermi. Las predicciones de la nueva teoría "electrodébil" fueron espectacularmente confirmadas en 1973, cuando se descubrió un nuevo tipo de fuerza débil, y una década después cuando se descubrieron las partículas que llevan esas fuerzas.

Esto dejó abierto el problema de la fuerza nuclear fuerte. Una pista valiosa fue el descubrimiento sorpresivo en 1968 de que los neutrones y los protones, al ser explorados con electrones de una longitud de onda muy corta, se comportan como si estuviesen compuestos de partículas que interactúan sólo débilmente. En 1973 este fenómeno fue clarificado por medio de una técnica matemática llamada "grupo de renormalización", que previamente había sido aplicada en la electrodinámica cuántica y en la teoría de transiciones de fase. Resultó finalmente que en una teoría cuántica de campo llamada cromodinámica cuántica la fuerza nuclear fuerte sí deviene más débil a escalas pequeñísimas. La cromodinámica cuántica es una teoría de partículas que interactúan fuertemente y que son conocidas como cuarks y gluones (constituyentes de los neutrones, los protones, los mesones pi, etcétera), que dependen de una simetría de norma rota e interna. Este debilitamiento de la fuerza fuerte hizo factible calcular las tasas de reacción por medio de las mismas técnicas usadas anteriormente en la electrodinámica cuántica. Experimentos de altas energías (y con varios tipos de cuarks de gran masa que se descubrieron a partir de 1974) exploraron estas escalas pequeñas, en las que los cálculos son posibles, y confirmaron que la cromodinámica cuántica de hecho describe la fuerza nuclear fuerte.

La teoría electrodébil y la cromodinámica cuántica juntas conforman aquello que se conoce como el modelo estándar. La estructura del modelo está fuertemente constreñida por sus simetrías espacio-temporal e interna exactas, así como por la necesidad de eludir las cantidades infinitas. Tanto la teoría de Fermi del decaimiento beta como la teoría de Yukawa de las fuerzas nucleares se explican en el modelo estándar como aproximaciones co-

respondientes a energías bajas. Un producto colateral afortunado del modelo estándar, que contribuyó a su rápida aceptación, es que también explica las simetrías aproximadas conocidas como consecuencias accidentales de la estructura constreñida del modelo.

El debilitamiento de la fuerza fuerte a escalas pequeñas hace que sea posible que las fuerzas fuerte, débil y electromagnética se vuelvan todas de la misma fuerza a alguna escala pequeñísima. Cálculos hechos en 1974 mostraron que la fuerza de estas fuerzas a escalas accesibles son consistentes con tal idea, y sugieren que la escala a la cual las fuerzas se vuelven de la misma fuerza es como quince órdenes de magnitud menores que el tamaño de un núcleo de átomo.

...

Después de mediados de los años setentas la física teórica entró en un periodo de intensa frustración.³ El modelo estándar, claramente, no es la respuesta final, pues tiene incorporados algunos rasgos arbitrarios y deja fuera a la gravitación. Es necesario que se efectúe otra reducción capaz de explicar tanto el modelo estándar como la relatividad general en términos de una teoría más simple y universal. Muchos teóricos han intentado dar ese paso, inventando ideas atractivas con cada vez mayor sofisticación matemática —supersimetría, supergravidad, tecnológico, teoría de cuerdas, etcétera— pero ninguno de





sus esfuerzos ha sido validado por experimentos. Al mismo tiempo los experimentalistas han continuado acumulando evidencias que confirman el modelo estándar, mas a pesar de los enérgicos esfuerzos no han logrado descubrir nada que les dé a los teóricos un indicio claro hacia una teoría más profunda. Se esperaba que alguna ayuda surgiera de experimentos destinados a clarificar la sola incertidumbre que queda en el modelo estándar, el detalle del mecanismo por medio del cual se rompe la simetría de norma electrodébil, pero un desaceleramiento en el apoyo financiero para la investigación durante los años noventas ha retardado esto hasta el siglo entrante. Parece probable que una teoría más profunda y unificada versará sobre las estructuras a escalas muy pequeñas, quizá dieciséis o dieciocho órdenes de magnitud más pequeñas que el núcleo atómico, en donde todas las fuerzas, incluso la gravitación, pueden tener una fuerza similar.

Desafortunadamente, estas escalas parecen estar desesperanzadoramente más allá del alcance de la investigación experimental directa. Para los físicos el siglo xx parece estar terminando de un modo triste, pero quizá éste es tan sólo el precio que debemos pagar por haber llegado ya tan lejos. ☹

Steven Weinberg
Departamento de Física,
Universidad de Texas.

TRADUCCIÓN

Carlos López Beltrán.

AGRADECIMIENTOS

A Luis Estrada por su esmerada revisión de la traducción.

NOTAS

¹ Éste es un buen lugar para eliminar la idea común de que las armas nucleares son de algún modo una derivación de la teoría especial de la relatividad de Einstein. Como fue derivada originalmente en 1907, la famosa ecuación de Einstein $E=mc^2$ afirma que la liberación de una energía E por un sistema ocasionará que pierda una masa m igual a E dividida entre c^2 , que es la velocidad de la luz elevada al cuadrado. Esto es tan cierto de un árbol en llamas como de una bomba nuclear, excepto que la energía que se libera durante la combustión ordinaria es demasiado pequeña como para permitir una medición del decremento de la ma-

sa en los productos de la combustión. Si uno insiste en decir que la masa se convierte en energía durante las reacciones nucleares, uno debe entonces decir lo mismo de la combustión normal. La verdadera fuente de la energía liberada cuando un árbol se quema es la luz solar absorbida durante la vida del árbol, y la verdadera fuente de energía que se libera en una fisión de uranio es la energía que se almacenó en el núcleo cuando se formó durante la explosión de una supernova mucho antes de que la Tierra se condensara a partir de materiales interestelares.

² En la investigación en física después de 1950 participaron tantos físicos, la mayoría aún con vida, que si mencionase algunos de los nombres tendría que cargarle la mano al lector con una carretada de éstos. Tomaré, por ende, el camino fácil y omitiré todos los nombres a partir de lo que sigue de este ensayo.

³ Mis opiniones sobre el estado actual de la física y sobre nuestras perspectivas para el futuro están expuestas con mayor detalle en el capítulo 8 de *Dreams of a Final Theory* (Pantheon, Nueva York, 1992; traducción española: *Sueños de una teoría final*, xxx, 1997), y también en "Nature Itself", *Twentieth Century Physics*, compilado por L. Brown, A. Pais y B. Pippard (Institute of Physics, 1995).

IMÁGENES

Pp. 51 y 55: Julio J. Prieto, *Troka el poderoso*, cuentos infantiles de Germán List Arzubide, México, 1939. P. 52: Jesús Nieto Hernández, portada de *Emoción*, magacín semanal de aventuras, núm. 4, diciembre de 1934. P. 53: Gómez Torres, "Korak, el hombre demonio", en *Pepín*, semanario ilustrado, núm. 94, diciembre de 1937. P. 54: José Cabezas, "Capitán Kuranga", en *Tesoros*, revista infantil mexicana, núm. 83, abril de 1953. P. 57: A. Tirado, portada de *Emoción*, magacín semanal de aventuras, núm. 86, agosto de 1936. P. 58: Gómez Torres, "Red Rivers", en *Pepín*, semanario ilustrado, julio de 1939; A. Tirado, "Micrópolis, el mundo terrible", en *Emoción*, magacín semanal de aventuras, núm. 81, 23 de junio de 1936. P. 59: Ruz, "Julio Viernes: la máquina que todo lo hace", en *Tesoros*, revista infantil mexicana, núm. 83, abril de 1953. P. 60: Gómez Torres, "Korak", en *Pepín*, semanario ilustrado, núm. 217, mayo de 1939. P. 61: C. Nava, "Superniño", en *Pequeñín*, núm. 15, 1949. P. 62: A. Tirado, portada de *Emoción*, magacín semanal de aventuras, núm. 87, agosto de 1936.