

ríamos tener en cuenta, sin embargo, que las observaciones ópticas se refieren a promedios temporales antes que a valores instantáneos; y es perfectamente concebible, pese a la completa confirmación experimental de la teoría de la difracción, reflexión, refracción, dispersión, etc., que la teoría de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, lleve a contradicciones cuando se aplique a los fenómenos de emisión y transformación de la luz". Sin embargo, la validez de las ecuaciones de Maxwell (en el espacio vacío) en todos los sistemas inerciales es un elemento esencial en el artículo sobre electrodinámica. Asimismo, en este artículo Einstein utiliza argumentos diferentes para deducir cómo se transforman la frecuencia de una onda y la energía de los rayos luminosos al pasar de un sistema a otro. Ambos se transforman de la misma forma, pero Einstein pasa por alto que eso es lo que cabría esperar con su hipótesis del cuanto de radiación, cuya energía es proporcional a la frecuencia. Finalmente, ya hemos señalado que Einstein no asigna momento al cuanto de radiación hasta 1917, cuando ya la propia teoría de Maxwell afirmaba que la radiación transporta momento.

Estas últimas omisiones se entienden si se tiene en cuenta que en el artículo de 1905 está gran parte de la física de la relatividad especial pero falta un ingrediente importante: el espacio-tiempo que iba a introducir Minkowski en 1908. A partir de entonces, las formulaciones tetradimensionales de la relatividad aclararon muchos conceptos. En particular, energía y momento iban a ser componentes de un mismo cuadrivector cuyo módulo era sencillamente la masa en reposo. De este modo, para partículas de masa en reposo nula se recuperaba la relación entre momento y energía que salía de la teoría electromagnética clásica.

Resulta curioso que la primera reacción de Einstein a la idea de Minkowski fue que era una sofisticación innecesaria. Sin embargo, no tardó en darse cuenta de que sin ello era

imposible avanzar hacia la relatividad general.

Pero eso es otra historia.

J. Javier García Sanz

Dpto. de Física Fundamental

De Einstein al futuro

Los cien últimos años han supuesto un salto enorme en la civilización. Los descubrimientos en ciencia básica y en las ciencias aplicadas han transformado la vida del hombre. Cien años parece una brizna dentro de la historia de la humanidad pero nunca el hombre había dado un salto tan gigantesco en ese periodo de tiempo. Quizá no podemos decir qué va a pasar en este siglo que estamos casi comenzando, pero de lo que sí estamos seguros es de que la humanidad va a seguir transformando la vida, y su vida, de forma acelerada.

Se ha dicho que el siglo XIX ha sido el siglo de la Química y el XX el de la Física. Si analizamos los

avances producidos dentro de esta ciencia y originados por ella, esto es verdad. Estamos finalizando el Año Mundial de la Física en el que hemos, entre otras cosas, celebrado el aniversario del "Annus Mirabilis" de Einstein. En 1905 él escribió cinco trabajos que transformaron la física del siglo XX y que siguen influyendo en la que se está desarrollando en el siglo XXI.

Sin embargo, en pureza, el siglo para la Física nace el 14 de diciembre de 1900 cuando Planck presenta en Berlín, durante la reunión de la sociedad alemana de física, una hipótesis *ad hoc* sobre la absorción y emisión de la radiación para explicar la radiación del cuerpo negro. En el centenario del trabajo de Planck un científico francés, Claude Cohen-Tannoudji, decía "El artículo en el cual Max Planck introdujo la constante universal que llevó su nombre, fechado en 1900, inauguró un periodo de intensa actividad intelectual, de donde emergió a finales de los años veinte un profundo cambio conceptual de la física, la teoría de los cuanta. Todas las ciencias del siglo XX, desde lo infinitamente pequeño de las partículas elementales a lo infinitamente grande de la astrofísica y de la cosmología, de la física atómica y molecular a la física de la materia condensada, de la química a la biología así como todas las tecnologías que hacen progresar nuestras sociedades... están profundamente marcadas por este cambio conceptual; ellas le deben lo esencial de su vitalidad actual. Todo parece indicar que se está todavía lejos de haber agotado todo el potencial de implicaciones conceptuales y de aplicaciones prácticas de la física cuántica."

Los trabajos de Einstein de 1905 y los de Bohr en 1913 llevaron a los físicos a considerar que la radiación electromagnética y las órbitas electrónicas alrededor del núcleo están cuantificadas con expresiones formalmente análogas a las de los elementos de energía de Planck. Max Planck fue considerado desde entonces como el padre de la teoría de

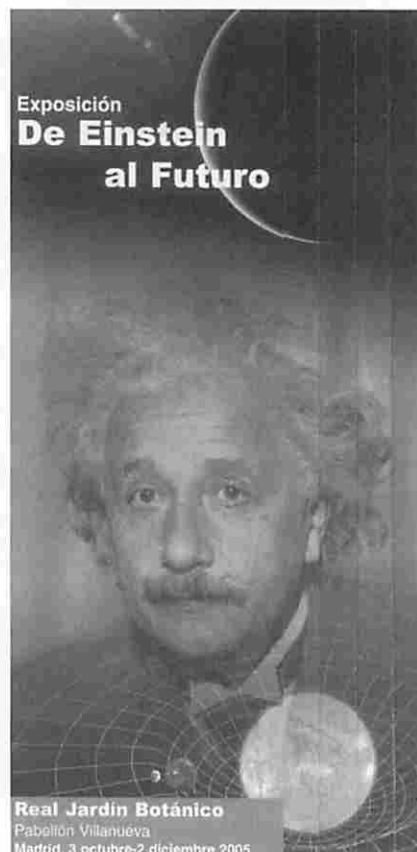


Figura 1. Díptico de la Exposición "De Einstein al Futuro".

los quanta. Sin embargo, el verdadero descubrimiento de Planck no fue el de la cuantificación de la energía sino el de la constante universal que lleva su nombre. Son los trabajos de otros investigadores entre 1905 y 1927 los que permitieron clarificar el significado de esta constante. En 1927, las relaciones de incertidumbre de Heisenberg hicieron aparecer la constante de Planck como la expresión cuantitativa de un límite fundamental impuesto para la determinación de parejas de variables que definen el estado de un sistema en física.

La primera parte del siglo veinte ha estado caracterizada por dos grandes revoluciones conceptuales: la mecánica cuántica y la relatividad. Cada una de las dos teorías ha modificado profundamente nuestra comprensión del mundo físico. La mecánica cuántica ha cambiado la manera de cómo comprendemos la naturaleza de la materia y de la radiación, dándonos una imagen de la realidad en la cual las partículas se comportan como ondas y las ondas como partículas. La relatividad, por otra parte, ha cambiado nuestras concepciones del espacio y del tiempo combinando los dos en lo que llamamos espacio-tiempo; la relatividad general nos ha indicado la unión íntima que hay entre la naturaleza de este espacio-tiempo y la de las fuerzas. Einstein estableció los fundamentos de estas dos revoluciones del siglo veinte en el mismo año 1905. Además, en su tesis doctoral sobre la determinación de las dimensiones moleculares y su análisis del movimiento browniano, también en 1905, estableció las bases de la comprensión estadística de la naturaleza que tiene enormes implicaciones en otros campos.

El papel de Einstein ha sido esencial en la elaboración de la visión actual del Universo, no solo desde un punto de vista científico, sino también filosófico. Todo esto le ha consagrado como *el sabio*, como el hombre del siglo XX. Su influjo sobrepasó con mucho el medio de la investigación y la revista Times nombró a Albert Einstein la perso-

nalidad más representativa del siglo XX.

En 1901, después de un siglo XIX muy importante para la física y la química, las áreas clásicas de la física parecían bien asentadas. Hamilton había formulado una descripción de la dinámica en 1830. Joule, Kelvin, Clausius y Gibbs habían desarrollado la termodinámica en la segunda mitad de la centuria. Las ecuaciones de Maxwell habían sido aceptadas como una descripción general de los fenómenos electromagnéticos, siendo también aplicables a la óptica y a las ondas de radio descubiertas por Hertz. Todos los fenómenos físicos parecían bien descritos y algunos observadores al final del siglo XIX pensaban que solo quedaba por explicar algunos fenómenos que en nada harían modificar el bien establecido cuerpo de doctrina de la física. Sin embargo bien pronto se pudo comprobar la falsedad de esta idea.

Uno de los fenómenos inesperados en los últimos años del siglo XIX fue el descubrimiento de los rayos X por Wilhelm Conrad Röntgen en 1895, premiado con el primer Premio Nobel de Física en 1901. Otro fue el descubrimiento de la radioactividad por Antoine Henri Becquerel en 1896 y cuya línea de

trabajo fue continuada por Marie y Pierre Curie, que recibieron el Premio Nobel en 1903.

Es también en estos primeros años cuando empieza a quedar claro cuál es la estructura de los átomos. Durante muchos años considerados como objetos sin estructura, los trabajos de Ernest Rutherford y de Joseph J. Thomson, que identificó como electrones a las partículas que emergían de los cátodos de los tubos de descarga, proporcionaron la primera idea clara de cuál era esa estructura atómica. Más tarde, la relación de la carga del electrón y su masa fue medida por Robert A. Millikan con una gran precisión.

Usando las ideas de la cuantificación de la energía. Niels H.D. Bohr trabajó sobre un modelo planetario de electrones circulando alrededor del núcleo de un átomo. Él encontró que las líneas espectrales emitidas por los átomos solo podrían ser explicadas si los electrones circularan en órbitas estacionarias caracterizadas por un momento angular cuantificado en unidades enteras de la constante de Planck dividida por 2π y si las frecuencias emitidas correspondían a emisiones de radiaciones con energías iguales a las diferencias entre los estados cuantificados de estos electrones. Esta hipótesis

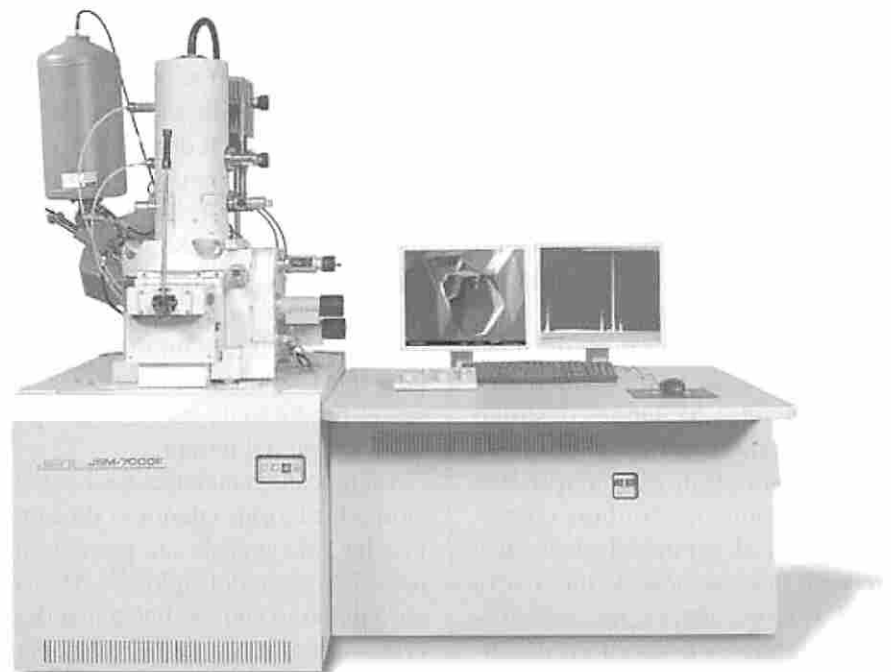


Figura 2. Microscopio electrónico.

suponía un abandono radical de la física clásica. Aunque estas ideas solo podían explicar alguna de las características de los espectros ópticos, enseguida se aceptó que debería ser un buen punto de partida.

Hasta ese momento todavía la radiación y la materia eran consideradas como dos realidades totalmente separadas, pero en 1923 el Príncipe Louis-Victor P.R. de Broglie propuso que las partículas materiales también podían mostrar propiedades ondulatorias, al igual que la radiación había mostrado aspectos de partículas, en forma de fotones, después de los trabajos de Planck y Einstein. En su descripción dual él propuso el concepto de longitud de onda de "de Broglie" de una partícula en movimiento. Experimentos posteriores de Clinton J. Davisson y George P. Thomson sobre reflexión y efectos de difracción de los electrones apoyaron totalmente la idea de la dualidad onda-corpúsculo.

Es a partir de estos años veinte cuando se desarrolló una teoría consistente que reemplazó a la mecánica clásica. En 1925, Werner K. Heisenberg, junto con Max Born y Pascual Jordan, propusieron la mecánica de matrices y, casi simultáneamente, Erwin Schrodinger creó la mecánica ondulatoria. Ambas mecánicas, que llegaban a resultados equivalentes, transformaban las ideas clásicas intuitivas de las órbitas electrónicas e implicaban que hay un límite natural a la exactitud con la cual se pueden medir simultáneamente ciertas cantidades, principio de incertidumbre de Heisenberg. La nueva mecánica solo era válida para movimientos relativamente lentos, por ejemplo los electrones de valencia en los átomos, ya que las ecuaciones no satisfacían los requisitos de la relatividad restringida. Paul A.M. Dirac construyó un formalismo modificado en el que no sólo cumplían esos requisitos sino que contenía términos correspondientes al espín del electrón y predecía la existencia de una nueva familia de partículas, las antipartículas, siendo la primera en descubrirse el positrón en 1932 por Carl D. Anderson.

Otros físicos, que contribuyeron de forma importante al desarrollo de estos años de la mecánica cuántica, fueron, Max Born con sus trabajos sobre la interpretación estadística de la función de onda y Wolfgang Pauli que formuló el principio de exclusión. Los datos experimentales, cada vez más precisos, empujaron en gran medida a los teóricos para encontrar modelos cada vez más precisos. Éste es el caso de las medidas de Willis E. Lamb, que encontró que el desdoblamiento de la estructura fina no coincidía con lo predicho por los cálculos de Dirac, lo que llevó al desarrollo de la electrodinámica cuántica (QED), la teoría más exacta en la actualidad y que en las versiones de Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger y Richard P. Feynman suponen un intercambio de varios fotones en las colisiones electrón-electrón. Este concepto de producción de pares desde un estado vacío de un campo cuantificado, como proceso virtual o real, ha sido también esencial en las modernas teorías de campos de las interacciones fuertes, la cromodinámica cuántica (QCD).

Otro aspecto básico de la mecánica cuántica y de la teoría de campos es la simetría de las funciones de onda y de los campos. Tsung-Dao Lee y Chen Ning Yang mostraron que en las transformaciones en las que está presente la interacción débil la paridad no se conserva, pero sí lo hace el producto de las simetrías de carga por la de paridad, $C \times P$. Sin embargo, algo más tarde, James W. Cronin y Val L. Fitch encuentran que existen casos en los que tampoco este producto de simetrías se conserva, por ejemplo entre los mesones K ; en este momento se espera que la simetría que se conserva sea el producto de las otras dos por la inversión del tiempo.

La mecánica cuántica y su extensión a las teorías cuánticas de campos ha sido una de las grandes líneas de trabajo del siglo XX. Ha habido un largo camino hacia una descripción unificada de las diferentes partículas y de las fuerzas de la naturaleza. En particular, los trabajos

de Sheldon L. Glasgow, Abdus Salam y Steven Weinberg al final de los sesenta formulan la teoría unificada de las interacciones débiles y electromagnéticas y, años más tarde, Gerardus 't Hooft y Martinus J.G. Veltman mostraron el camino para renormalizar la teoría electrodébil, algo que era necesario para eliminar términos que tendían a infinito en los cálculos mecano-cuánticos, de forma similar a como se había hecho en QED para la interacción de Coulomb. Queda sin embargo mucho por hacer y todavía no se sabe cómo unificar las interacciones electro-débil, la interacción fuerte y la gravedad.

A lo largo del siglo XX hemos tenido un largo camino desde la física de los objetos clásicos a los cuánticos, comenzando por el mundo de los átomos, los núcleos y las partículas subatómicas. Muchas partículas elementales han sido descubiertas en la radiación cósmica y en las colisiones entre partículas aceleradas. Los aceleradores de alta energía también han dado evidencias sobre la estructura de partículas, como los protones o los neutrones. Robert Hofstadter fue capaz de estudiar los detalles de la estructura electromagnética de los nucleones por lo que recibió el Premio Nobel en 1961. Partículas como nuevos mesones o los muy elusivos neutrinos fueron apareciendo a lo largo del siglo. El neutrino fue predicho teóricamente por Pauli hacia los años treinta, pero la primera evidencia experimental se haría en 1957 por C.L. Cowan y Frederick Reines en 1957, y fue en la década de los



Figura 3. Acelerador de partículas (CERN).



Figura 4. SPEAR (Stanford Positron Electron Asymmetric Ring): instalaciones donde se realizaron en 1974 los experimentos de colisión electrón-positrón que condujeron al descubrimiento del cuarto quark, "charm".

sesenta cuando Leon M. Lederman, Melvin Schwartz y Jack Steinberger demostraron la diferencia entre los neutrinos electrónicos y muónicos.

En estos momentos se considera que los leptones, que no sienten la interacción fuerte (electrón, muón, partícula t , neutrino electrónico, neutrino muónico, neutrino t , y sus seis antipartículas) no poseen estructura interna. Por el contrario se ha visto que los hadrones, que interactúan gracias a las cuatro interacciones, sí tienen estructura. Al principio se clasificaban como bariones y mesones (éstos más ligeros que los primeros). Entre los bariones había dos clases, los nucleones (protones y neutrones) y los hiperones, inestables y más pesados que los nucleones. En 1963, Murray Gell-Mann clasificó a los hadrones sobre la base de que estaban contruidos por unas unidades elementales llamadas quarks, aunque la prueba real de que esto era así fue hecha años más tarde por Jerome I. Friedman, Henry W. Kendall y Richard E. Taylor. En la mitad de los setenta los equipos de Burton Richter y de Samuel C. C. Ting encontraron un tipo de quark, el "charm". En el actual

modelo estándar de las partículas elementales se clasifican en tres familias con dos quarks y dos leptones y sus antipartículas. La primera, con los quarks "up" y "down", el electrón y el neutrino electrónico. La segunda, con los quarks "strange" y "charm" el muón y el neutrino muónico. Y la tercera, con los quarks "top" y "bottom", la partícula τ y el neutrino τ . Los responsables de las interacciones son: para la interacción electro-débil, el fotón, la partícula Z y los bosones W , estos dos últimos descubiertos por el equipo de Carlo Rubbia, y para la interacción fuerte entre quarks, los conocidos como gluones.

Otro gran avance en el siglo XX ha sido la Cosmología, que es la ciencia que estudia la estructura y evolución del universo. Sus modelos están basados en las propiedades de las partículas elementales y sus interacciones, de las propiedades del espacio-tiempo y de la gravitación. El modelo del "big-bang" describe un posible escenario para el comienzo de la evolución en los primeros instantes del universo. Una de las predicciones fue experimentalmente verificada por Arno A. Penzias y Robert W. Wilson cuando

en 1960 descubrieron el fondo de radiación cósmica de microondas. Algunos de los avances más importantes en este área se deben a Subramanyan Chandrasekhar, quien describió teóricamente la evolución de las estrellas, y a los estudios de William A. Fowler sobre alguno de los detalles más importantes de las reacciones nucleares en las estrellas y la formación de elementos pesados.

Además de la luz visible y de la radiación del fondo cósmico, la radioastronomía ha proporcionado una información valiosa sobre cuerpos astronómicos, que no se podría obtener por la espectroscopía óptica. Sir Martin Ryle desarrolló los conocidos como telescopios Ryle, y Anthony Hewish y su grupo usando estos telescopios encontraron en 1964 los primeros pulsares. Observando las modulaciones de un nuevo púlsar, Russell A. Hulse y Joseph Taylor Jr. pudieron encontrar la primera evidencia de la radiación gravitacional, aunque la detección de la radiación gravitacional sobre la tierra todavía no ha sido hecha.

SISTEMAS COMPLEJOS

Núcleos, Átomos, Moléculas, Agregados y Plasmas

Si todas las propiedades de las partículas elementales y las fuerzas que actúan entre ellas fuesen conocidas, en principio, parecería posible predecir el comportamiento de todos los sistemas compuestos por esas partículas. No todos los científicos creen que este programa reduccionista de búsqueda de los últimos ladrillos de los que está formada la naturaleza y de la descripción de sus interacciones sería suficiente para describir los sistemas complejos, pero aunque eso fuese posible los cálculos de los sistemas complejos enseguida serían imposibles cuando creciese el número de partículas. Los sistemas complejos formados por muchas partículas en general se describen con modelos simplificados donde

sólo se toman en cuenta las características más importantes de la composición del sistema y de sus interacciones. A menudo es posible encontrar en los sistemas complejos propiedades emergentes que no se pueden deducir de forma directa de las interacciones entre sus partes.

Los primeros sistemas complejos son los nucleones, es decir, neutrones y protones que están formados por quarks y gluones. De ahí pasaríamos a los núcleos atómicos, que están a su vez formados por esos nucleones. De ahí seguiríamos con los átomos, las moléculas, los agregados moleculares, los plasmas formados por átomos y moléculas fuertemente ionizados y seguiríamos por último con la materia condensada.

Uno de los avances importantes en la estructura nuclear fue el realizado por Maria Goeppert-Mayer y J.D. Jensen, que propusieron el modelo de capas nuclear en el que, al menos para núcleos con forma casi esférica, los nucleones externos llenaban niveles de energía de forma parecida a como lo hacen los electrones en los átomos, aunque el orden es diferente y está determinado por potenciales muy distintos. Este modelo explica por qué los núcleos con los llamados números mágicos son especialmente estables. Los núcleos con un número de nucleones lejos de los números mágicos no son esféricos. Estos núcleos se habían estudiado inicialmente con el modelo de la gota líquida, pero más tarde J. Rainwater, Aage Bohr y B. Mottelson desarrollaron otros modelos en donde aparecían diferentes tipos de movimientos colectivos. El estudio de la excitación de ciertos núcleos muy deformados llevó a entender en detalle la fisión de núcleos pesados en varios fragmentos, algo que ya se había conseguido en 1939 gracias a los trabajos de Lise Meitner, Otto Hahn y Strassmann en 1939. Estos estudios tuvieron consecuencias no sólo científicas sino militares y políticas, y esta fisión se convirtió en una de las fuentes más importantes de energía en la actualidad. Otra aportación importante a lo

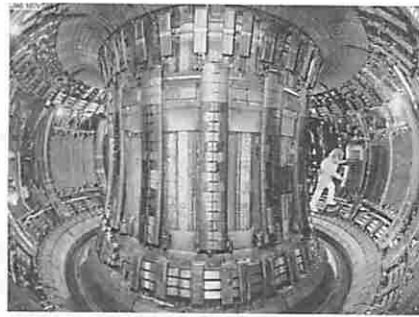


Figura 5. Interior del JET (Joint European Torus), utilizado en investigación sobre fusión nuclear.

largo del siglo fue el incremento de información sobre espectroscopía nuclear, el descubrimiento del deuterio y el comienzo de la producción de isótopos nucleares inestables por Fermi, Lawrence, Cockcroft y Walton.

Aunque en principio los átomos son más fáciles de describir que los núcleos, debido a la sencillez y debilidad de las interacciones electromagnéticas responsables de la estructura de capas electrónicas en los átomos, una descripción completa es imposible. Los efectos relativistas, muy importantes en los electrones internos de los átomos pesados, y los efectos de la correlación electrónica, solo aproximadamente descritos con los diferentes modelos, imposibilitan esa descripción total. El estudio de la estructura electrónica comenzó poco después del desarrollo de la Mecánica Cuántica con Hartree, Fock, C.C.J. Roothaan y Walter Kohn, quien desarrolló el método de funcional de la densidad que no solo es aplicable a los átomos libres sino también a los electrones en moléculas y sólidos. En el estudio de la espectroscopía atómica científicos como Herzberg o Ugo Fano crean líneas de trabajo que todavía hoy continúan en muchos laboratorios del mundo. A partir de la segunda mitad del siglo los trabajos de Alfred Kastler, que mostró que los electrones en los átomos se pueden colocar en estados excitados seleccionados por luz polarizada, abrieron el camino a la creación de los máseres y láseres, que aunque podría ser predicho a partir de las ecuaciones de Einstein formuladas

en 1917, no es hasta la década de los cincuenta que se construyen. C.H. Townes desarrolló el primer máser en 1958, en el que usaba una transición estimulada de la molécula de amoniaco. Compartió el Premio Nobel de Física en 1964 con N.G. Basov y A. M. Prokhorov que hicieron el estudio teórico del máser. El Premio Nobel de 1981 fue dedicado a los investigadores que se dedicaron paralelamente al desarrollo de los láseres, N. Bloembergen, A.L. Schawlow y K.M. Siegbahn.

Al comienzo del siglo XX todavía no estaba completa la tabla periódica, y a lo largo del siglo no solo se rellenan los huecos sino que se siguen produciendo cada vez de forma artificial elementos más pesados. Un salto importante en la física atómica, gracias a N.F. Ramsey y W. Paul, fue el desarrollo de las *trampas* que son una combinación de campos eléctricos y magnéticos que actúan sobre un volumen pequeño. El grupo del profesor H.G. Dehmelt fue el primero que aisló un positrón y también átomos. Por primera vez los experimentales pueden trabajar con un átomo aislado interactuando con señales de microondas o láseres, lo que les permitió no solo incrementar la precisión al determinar propiedades atómicas, sino que también la posibilidad de estudiar nuevos aspectos del comportamiento de la mecánica cuántica. El último aspecto importante en este campo de la física atómica fue el conseguir los llamados átomos fríos. Se llega a temperaturas del orden del microkelvin enfriándolos por colisiones con fotones. El *enfriamiento láser* fue desarrollado por S. Chu,

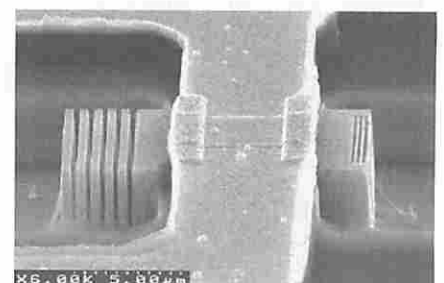


Figura 6. Microláser de 12 μm de longitud (imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido).

C. Cohen-Tannoudji y W. D. Phillips.

El siguiente nivel de complejidad son las moléculas que están compuestas por átomos. La física molecular es un área que está entre la física y la química y, de hecho, muchos científicos que tienen grandes aportaciones en el estudio de los fenómenos moleculares han sido galardonados indistintamente con Premios Nobel en Química o en Física. Uno de los galardonados en Física fue J.D van der Waals que fue el que primero se acercó a los gases reales teniendo en cuenta el tamaño finito de las moléculas, lo que fue un buen punto de partida para la descripción de los cambios de fase gas-liquido. Él formuló una ecuación de estado de las moléculas en un gas y los trabajos recientes en agregados moleculares "clusters" están basados en sus aportaciones. J.B. Perrin estudió los movimientos de pequeñas partículas suspendidas en el agua y confirmó la descripción teórica del movimiento Browniano de Einstein. Otra aportación importante fue la debida a V. Raman que abrió la puerta a la espectroscopía Raman, fuente importante de información de la estructura molecular y de la dinámica. Él explicó el corrimiento de la luz difundida por las moléculas debido a cambios en sus niveles de energía vibracional o rotacional. Otro de los grandes nombres en el mundo de la espectroscopía fue G. Herzberg que recibió el Premio Nobel de Química en 1971.

Dos grandes factores han desarrollado en el último tercio del siglo este área de la Física, la capacidad de los ordenadores y el desarrollo experimental sobre todo de las técnicas de haces moleculares y la mejora espectacular de los láseres.

Desde el punto de vista teórico, después de los trabajos, sobre el enlace químico, de L.C. Pauling, dos grandes caminos han seguido los estudios de la estructura electrónica: uno basado en la tesis doctoral presentada en la Universidad de Chicago en 1951 por C.C.J. Roothaan en la que propuso desarrollar los espín-orbitales en función de diferentes ti-

pos de bases, lo que permitió realizar cálculos de sistemas moleculares basados esencialmente en el modelo de Hartree-Fock y que muy pronto permitieron ir más allá introduciendo, de forma cada vez más exacta, parte de la correlación electrónica e, incluso, parte de los efectos relativistas. El otro camino estuvo basado en el funcional de densidad y el uso de diferentes modelos de funcionales. Quizá las personas que mejor representan estos dos avances son W. Kohn y J. A. Pople que compartieron el Premio Nobel de Química en 1998.

Los desarrollos de la técnica de haces moleculares abrieron el camino a estudios espectroscópicos y de reactividad nunca soñados antes. Algunos de los científicos más importantes que hicieron este desarrollo compartieron también el Premio Nobel de Química D.R. Herschbach, Y.T. Lee y J.C. Polanyi, aunque otros pioneros como el profesor Bernstein no estuvieron entre los galardonados. El desarrollo de los láseres fue también muy importante para la física molecular, ya que se ha llegado a intervalos de tiempo que son del orden de la vibración de las moléculas. Especialmente importante son los trabajos de A.H. Zewail, Premio Nobel de Química en 1999, y de G. Gerber.

El estudio de los plasmas ha sido también una línea importante en esta área. Los plasmas son gases que están formados por átomos o por moléculas fuertemente ionizados. H. Alfvén demostró hacia los años cuarenta la existencia de un nuevo tipo de movimiento colectivo llamado ondas magneto-hidrodinámicas en estos sistemas. Estas ondas pueden jugar un papel esencial no solo en los plasmas generados en los laboratorios sino también en la atmósfera terrestre y en el cosmos.

Materia Condensada

Muy pronto después del descubrimiento de los rayos X, Max von Laue y, algo más tarde, W.H. Bragg y W.L. Bragg notaron que cuando los

rayos X pasaban a través de un sólido cristalino las figuras de difracción que emergían podían dar información de las distancias interatómicas y analizar la distribución de los átomos en un cristal. En los años treinta, P.W. Bridgman estudió los cambios en las propiedades de los sólidos cuando se sometían a altas presiones. A partir de los años cuarenta se empiezan a usar también neutrones de baja energía para estudiar la estructura cristalina. La razón es que la longitud asociada de De Broglie está en el rango de las distancias interatómicas de los sólidos, al igual que los rayos X. Clifford G. Shull contribuyó mucho a desarrollar la técnica de difracción de los neutrones para determinar la estructura cristalina. Otro aspecto de la difracción de los neutrones, las pequeñas pérdidas de energía debido a la excitación de los modos vibracionales (fonones) en una red cristalina, fue estudiado por Bertram N. Brockhouse.

En los años posteriores a la creación de la mecánica cuántica, John H. van Vleck hizo contribuciones significativas a la teoría del magnetismo en materia condensada y Louis E.F. Neel introdujo modelos para describir materiales antiferromagnéticos, donde se alternan momentos en ambos sentidos del mismo tamaño, y materiales ferrimagnéticos, donde la alternancia es más complicada. Estos materiales son componentes importantes de muchos aparatos que incluyen "devices" de estado sólido. La distribución de los átomos en los sólidos cristalinos y los diferentes tipos de orden magnético son un caso particular de fenómenos de ordenación en la naturaleza. Kenneth G. Wilson, para explicar de forma general estos fenómenos, desarrolló la teoría de la renormalización para fenómenos críticos cuya aplicación llega hasta las partículas elementales.

Una clase especial de materiales es la de los cristales líquidos, que tiene interés no solo desde el punto de vista básico, sino por sus aplicaciones. Pierre-Gilles de Gennes desarrolló la teoría del comportamien-

to de los cristales líquidos y su transición entre diferentes fases, también usó la mecánica estadística para describir la dinámica de polímeros, mostrando que los fenómenos de orden en sistemas sencillos se pueden generalizar a sistemas complejos, como ocurre en la llamada materia "soft".

Otro de los grandes científicos en este campo fue Lev. D. Landau, quién formuló conceptos fundamentales sobre los efectos "many-body" en materia condensada, aplicándolos al estudio de la superfluidez del helio bosónico. Muchos de los experimentos fueron desarrollados por Pyotr L. Kapitsa. En el helio termiónico también se pudo encontrar la superfluidez, pero a temperaturas tres órdenes de magnitud más pequeñas; esto fue puesto de manifiesto por David M. Lee, Douglas D. Osherov y Robert C. Richardson, siendo la explicación basada en la formación de pares de partículas de espín semientero que se conocen como cuasibosones, de forma semejante a la superfluidez. De todas formas la comprensión de la superfluidez a nivel microscópico dista mucho de ser totalmente comprendida y solo recientemente se han realizado estudios experimentales y teóricos sobre lo que se conoce como superfluidez microscópica, donde se analiza el diferente comportamiento de una molécula rodeada de helios bosónicos o fermiónicos en número reducido.

La estructura electrónica de los sólidos, que determina sus propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas, es también importante para su comportamiento mecánico y térmico. Una de las líneas de trabajo más importante ha sido el estudio de los estados y de la dinámica de los electrones. Esto ha conducido a descubrimientos como la superconductividad o diversos tipos de efectos en los semiconductores. En 1911, Kamerlingh-Onnes descubre la superconductividad, la resistencia eléctrica del mercurio tiene una repentina disminución cuando la temperatura es inferior a una temperatura de transición, que es del orden de 4

grados kelvin. En la década de los sesenta, Leon N. Cooper, John Bardeen y J. Robert Schrieffer formulan una teoría basada en la idea de que los pares de electrones forman lo que se conoce como pares de Cooper que actúan como una partícula bosónica y que se mueven como un fluido microscópico coherente. Aunque en principio se pensaba que esta temperatura de transición era muy baja, en los últimos veinte años J. Georg Bednorz y K. Alexander Müller mostraron que existían compuestos con temperaturas de transición más altas. Éste fue el comienzo de una búsqueda intensa de lo que se conoce como superconductividad de alta temperatura.

Otros científicos que trabajan en el mundo de los superconductores son Brian D. Josephson, descubridor del efecto que lleva su nombre, e I. Giaver y Leo Esaki, que trabajaron sobre fenómenos de "tunneling" en semiconductores. El movimiento de los electrones en metales ha sido modelado de forma cada vez más sofisticada con la introducción de la mecánica cuántica. Aquí hay que citar nombres como Félix Bloch, Lev D. Landau, Philip Anderson y Nevill F. Mott.

La era de la electrónica de estado sólido comienza con William B. Shockley, John Bardeen y Walter H. Brattain que, además de realizar investigaciones fundamentales en la física de los semiconductores, desarrollan el primer transistor. En el año 2000, el Premio Nobel de Física se concedió a Zhores I. Alferov y Herbert Kroemer, por sus trabajos en heteroestructuras que abrieron el campo a los modernos "devices" de optoelectrónica, y a Jack S. Kilby, co-inventor del circuito integrado.

En 1982, Klaus von Klitzing descubre el efecto Hall cuántico, lo que le proporciona el Premio Nobel de Física en 1985, y algo más tarde Daniel C. Tsui y Horst L. Störmer descubren el efecto Hall cuántico fraccionario, que es explicado por Robert B. Laughlin. Los tres comparten el Premio Nobel de Física en 1998.

EPÍLOGO

Muchos de los descubrimientos y teorías han tenido un gran impacto en el desarrollo tecnológico abriendo nuevos campos o proporcionando útiles a la humanidad. Ejemplos típicos son los trabajos de Shockley, Bardeen y Brattain que llevan al transistor o más tarde a los "chips" construidos por J.S. Kilby, lo que produjo una autentica revolución en la electrónica. Lo mismo aparece como consecuencia de los trabajos de investigación básica de Townes, Basov y Prokhorov, que llevan a desarrollar máseres y láseres. Lo mismo ocurre con los aceleradores de partículas, que hoy son útiles en ciencia de materiales y en medicina, o con el microscopio electrónico. Para el desarrollo de la física nuclear y de partículas elementales ha sido especialmente importante el desarrollo de los aceleradores lineales y del ciclotrón por Cockcroft, Walton y Lawrence, respectivamente, o el uso del efecto Cherenkov para el desarrollo de detectores. Los detectores comienzan con las emulsiones fotográficas, con la cámara desarrollada por Charles T.R. Wilson, o la realizada por Donald A. Glaser de burbujas. El último paso fue el detector creado por Georges Charpak, que recibió el Premio Nobel de Física en 1992.

En el siglo XX, hasta 163 Premios Nobel han sido concedidos a investigadores en la Física, además de varios galardonados con el Premio Nobel en Química. Ha habido otros investigadores que, a pesar de su trabajo impresionante como Ugo Fano en física atómica, Slater en estructura de la materia, Bernstein en física molecular, Lise Meitner en física nuclear, no han conseguido ese Premio, pero todos han desarrollado de forma espectacular la física, haciendo de esta ciencia, sin duda, la ciencia del siglo XX.

Gerardo Delgado Barrio

*Profesor de investigación
Instituto de Matemáticas y Física
Fundamental, CSIC
Presidente de la RSEF*