

DR. ING. LEOPOLDO MUZZIOLI*

MODERNA INTERPRETACION DE LA CONSTITUCION DEL ATOMO

EL TRASCENDENTAL movimiento de ideas producido por las modernas mecánicas, cuántica y ondulatoria, dio lugar a una substancial renovación en el planteamiento y estudio del problema del átomo.

Si la nueva orientación, como método, puede considerarse como un retorno al verdadero espíritu galileano, puesto que establece categóricamente que toda representación apriorística de la naturaleza puede, a lo sumo, establecerse como instrumento de trabajo, y nada más; en verdad, va mucho más allá, de la posición, a pesar de todo, neoplatónica de Galileo, en cuanto afirma en forma explícita que en realidad del mundo físico tenemos siempre algo que no se puede, y, por consiguiente, no se sabe, purificar, idealizar, hasta el estado puramente geométrico mecánico.

Queda, por consiguiente, renegada, la que podría definirse como una concepción trascendente o metafísica de la naturaleza, y, con la consecuente liquidación del mecanismo, quedan desterrados, al igual que los objetos de museo, todas las utopías materialísticas de un tiempo.

El conocimiento de la naturaleza debe partir de los hechos, de los fenómenos, de las investigaciones experimentales; sin embargo, todo este hermoso e importantísimo trabajo de descubrimientos y verificaciones, para el físico, no es el fin, sino más bien el principio del aventuroso viaje que debe llevarlo, analizando con tormentosa meditación los resultados experimentales obtenidos, hacia las síntesis más generales.

Experiencia y teoría deben completarse recíprocamente, aun cuando sea necesario cultivarlas separadamente, como sucede en el período actual, donde la notable madurez científica alcanzada por las matemáticas, y el enorme

*Director del Instituto Central de Física Experimental y Teórica. Universidad de Concepción (Chile).

conjunto de técnicas experimentales, complejas y difíciles, que se tienen hoy día a disposición, imponen, por razones debidas a la limitación de las posibilidades humanas, la división del trabajo.

Y la armonía, el equilibrio del método, se obtiene solamente mediante una estrecha colaboración entre las dos funciones fundamentales del investigador; cuales son la de obtener, analizar y estudiar los datos experimentales relacionados con los fenómenos, y la de deducir las síntesis generales correspondientes.

Todo lo que se ha hecho en estos últimos años de experimental y teórico, tendiente al conocimiento, o mejor dicho, a la interpretación de la constitución del átomo, representa un ejemplo típico y una clara demostración de esta necesaria, indispensable colaboración entre la experiencia y la teoría.

Como veremos, durante el desarrollo de esta disertación, el átomo no es más indivisible, porque lo hemos separado en un componente material cargado de electricidad positiva, el núcleo, y en una atmósfera electrónica, constituida solamente de cargas eléctricas negativas, los electrones; no es más la parte última, porque también el componente material, el núcleo, puede descomponerse en elementos distintos.

Por consiguiente, arduo y escabroso será el camino que debemos recorrer para tratar de interpretarlo en la forma más satisfactoria posible.

En el año 1910, el equipo del Instituto de Física de Cambridge, dirigido por el gran físico inglés Ernest Rutherford, estaba desarrollando un grandioso trabajo experimental sobre la difusión que sufre un haz de partículas α emitidas por una sustancia radiactiva, cuando atraviesa láminas metálicas delgadas. Estos experimentos pueden considerarse de una importancia verdaderamente trascendental; en efecto, no sólo encierran un valor conceptual enorme, sino que también fueron la causa de una primera, fundamental, revolucionaria, modificación de la interpretación de la constitución del átomo. Después de estas investigaciones, el átomo ya no se podía considerar impenetrable; podía ser atravesado, y este fenómeno se manifestaba con características tales, que Rutherford fue inducido a enunciar su audaz hipótesis, donde afirmó explícitamente que no quedaba otro remedio que demoler valerosamente la concepción atómica clásica, y considerar el átomo a guisa de un microscópico sistema solar, formado por una partícula central extremadamente pequeña, constituida por una masa material cargada de electricidad positiva que llamó núcleo, y por una especie de atmósfera, penetrable, de dimensiones relativamente enormes, con respecto al núcleo, constituida por electrones, es decir, por cargas eléctricas negativas que, con toda probabilidad, debían moverse

alrededor del núcleo mismo, con órbitas probablemente circulares o elípticas.

Este paisaje atómico se presentaba atrayente, elegante, y, por lo demás, simpático; y dado que explicaba en forma brillante los resultados experimentales obtenidos, en forma tan cuidadosa y completa por Rutherford y colaboradores, se consideró, desde un principio, como una representación notablemente satisfactoria.

El primer problema que debemos abordar y tratar de resolver es el de saber cómo están ensambladas entre sí las dos partes principales del átomo: la material y la electrónica.

¿Cómo podremos obtener las informaciones necesarias para este fin?

Mientras el sistema atómico está en condiciones normales, es mudo, sin vida, y no revela nada de sí mismo.

Para conocer su carácter, su temple, es necesario hacerlo hablar para ver cómo se expresa; es necesario hacerlo vivir, es necesario excitarlo oportunamente, para que emita luz y calor.

Las radiaciones emitidas por el átomo son su manera de expresarse, y nosotros podremos encontrar la solución del enigma, estudiando, precisamente, el conjunto de las radiaciones que emite en las diversas condiciones de excitación a las cuales podemos someterlo.

Vamos a referirnos a un caso muy particular.

Como enseña la química, el átomo de Hidrógeno es el más liviano de todos y el más sencillo; y, según la simpática representación de Rutherford, está formado simplemente por un núcleo, constituido por un solo protón, partícula material cargada de electricidad positiva, y por una atmósfera electrónica constituida por un único electrón superficial que gira alrededor del núcleo.

Encerramos un poco de Hidrógeno molecular en un tubo de vidrio donde se haya realizado previamente el vacío, y producimos en el tubo una descarga eléctrica conveniente; el Hidrógeno, separado en sus dos átomos componentes, resulta luminoso, emite radiaciones, irradia luces, mediante las cuales expresa su manera de actuar, manifiesta su personalidad.

Si analizamos las radiaciones emitidas mediante aquel maravilloso aparato, que es el espectroscopio, encontramos un espectro de rayas relativamente complicado. Algunas de estas rayas aparecen en la región visible, otras están en el ultravioleta y otras se encuentran en el infrarrojo. Cada raya corresponde a una vibración luminosa bien determinada y precisa.

Estamos en presencia de un primer misterio: ¿cómo es posible que el átomo de Hidrógeno, que es tan sencillo, sea capaz de vibrar de tantas maneras dife-

rentes?; ¿hay alguna regularidad; es posible encontrar una cierta armonía en ese conjunto de radiaciones luminosas?

El físico suizo Balmer, en el año 1885, después de un largo trabajo, paciente y genial, logró poner en evidencia que las frecuencias observadas en el espectro visible obedecen todas a una única relación numérica relativamente sencilla. Esta relación previó otras radiaciones, además de las que se habían observado experimentalmente hasta entonces; y estas radiaciones se encontraron, parte en los laboratorios, mediante investigaciones espectrográficas más refinadas, y parte en espectrogramas de absorción de la luz emitida por estrellas rodeadas por este gas, donde se encuentra notablemente excitado.

Después de todas estas verificaciones, la regla encontrada por Balmer debía, por consiguiente, considerarse justa.

En seguida, Lyman constató que las rayas correspondientes a las radiaciones en el campo del ultravioleta obedecen a la misma relación; mientras que Ritz comprobó la misma ley para el espectro infrarrojo.

Ritz, además, transformó formalmente la relación numérica descubierta por Balmer, observando que cada frecuencia de toda radiación luminosa, visible y no visible, emitida por el átomo de Hidrógeno, oportunamente excitado, puede representarse como la diferencia de dos términos; y en una sencilla ecuación sintetizó el ordenamiento del inmenso material experimental recogido en tantos años de investigaciones realizadas por los espectroscopistas. ¡Armonía y regularidad, donde aparecía la confusión y el desorden!

La relación empírica de Balmer-Ritz, valedera para el espectro del Hidrógeno, lo es también, hechas las necesarias variaciones en la expresión de sus términos, para los espectros menos sencillos de los otros elementos.

Ya se tenía la llave que podía abrir la puerta del átomo.

Sin embargo, esta ley, a pesar de su elegante sencillez, no fue tomada inmediatamente con la consideración que merecía.

Las tupidas columnas de números que representaban las frecuencias obtenidas del examen cuidadoso y preciso de los espectros, las hermosas rayas coloreadas, e iridescentes como el arco-iris, que aparecían en el espectroscopio, fueron consideradas, aun después de la interesante relación de Balmer-Ritz, como algo complicado y no sugirieron tan luego la inspiración necesaria para una interpretación racional del fenómeno de la emisión de las radiaciones que emite el átomo cuando es convenientemente excitado.

Por otra parte, la genial hipótesis de Rutherford no estaba todavía establecida y los físicos, por consiguiente, no tenían una base, una plataforma, convenientemente apta, para construir una posible teoría que diera una

explicación racional de la ley de Balmer-Ritz, que, como hemos visto, había sido obtenida en forma bastante empírica.

Fue solamente en el año 1913 que el gran físico danés Niels Bohr, utilizando la representación atómica de Rutherford, desarrolló su conocida teoría, mediante la cual encontró una justificación bastante racional de la relación Balmer-Ritz.

Cuando un electrón recorre una órbita circular o elíptica, como es el caso de un electrón superficial en la representación de Rutherford, según la electrodinámica clásica, debería emitir una radiación electromagnética. Sin embargo, esta concepción, del proceso de irradiación, no sólo da lugar a consecuencias desastrosas para el electrón mismo, puesto que su movimiento debería terminar muy luego y debería caer inexorablemente sobre el núcleo después de haber cedido toda su energía, sino que también, esta concepción no logra explicar los espectros de los elementos, ya determinados experimentalmente, ni sus regularidades, ya establecidas por la ley de Balmer-Ritz.

Bohr supera valerosamente esta dificultad, y renegando por primera vez un concepto clásico para la interpretación de los hechos atómicos, afirma categóricamente que durante sus evoluciones orbitales, los electrones, sencillamente, no emiten energía radiante. Una órbita representa un estado estacionario; recorrer una órbita determinada, es el modo de reposar del electrón, del cansancio que le procura la emisión o la absorción de radiaciones electromagnéticas.

Bohr desarrolló inicialmente su teoría para el caso del átomo de Hidrógeno, que, como hemos dicho, según la representación de Rutherford, está constituido simplemente por un núcleo positivo, que es un protón y un solo electrón superficial, que gira alrededor del núcleo.

En su estado normal, el electrón del átomo de Hidrógeno se encuentra sobre una órbita determinada; pero hemos visto que se puede excitar el átomo, si se le entrega energía, y hemos visto también que el átomo excitado puede devolver esa energía, emitiendo radiaciones electromagnéticas, irradiando luz.

¿Qué significa esto para Bohr? ¿Cómo es su interpretación de estos dos procesos?

Según Bohr, el electrón, que en su estado normal recorre una órbita determinada, aprovecha de la energía de excitación que se le entrega, para pasar a otra órbita, más grande que la primera, o por lo menos, de forma diferente.

Además, la nueva órbita no es arbitraria, como tampoco es arbitraria la energía que se puede usar para que el electrón pueda hacer este pasaje.

Tenemos, por lo tanto, un número bien determinado y finito de órbitas posibles, cada una caracterizada por un nivel energético bien determinado y finito.

Las otras órbitas, diferentes de las preestablecidas, según el categórico, autoritario y, se podría decir, despótico comando de Bohr, deben ser ignoradas por el electrón, que no puede ni debe ocuparlas.

Con la absorción de una conveniente cantidad de energía, entregada por la excitación, el electrón superficial del átomo de Hidrógeno puede pasar entonces a otra órbita; pero puede permanecer en ella un lapso brevísimo, un cienmillonésimo de segundo, porque cuando se encuentra en esta nueva órbita, el sistema atómico es inestable y no satisface más a las condiciones de equilibrio que corresponden al mínimo de energía total; baja así, casi inmediatamente, a una órbita inferior, o cae directamente sobre la órbita de partida, es decir, la más estable.

En esta forma, después de haber absorbido energía con la excitación, emite energía, bajo forma de radiación luminosa en la emisión.

Lo que es valedero para el átomo de Hidrógeno vale también para los átomos más complicados. Así que, en general, un átomo cualquiera absorbe energía en la excitación y emite energía en la irradiación, mediante saltos que los electrones superficiales del átomo realizan entre dos órbitas diversas con diferentes niveles energéticos; y la relación numérica que mide estos procesos satisface plenamente la ley experimental Balmer-Ritz.

Por otra parte, esta genial construcción teórica de Bohr puede interpretar también, en forma plenamente satisfactoria, los resultados experimentales obtenidos por la espectroscopía de emisión y de absorción de los rayos X, cuyo estudio nació precisamente en el año 1913, es decir, en aquel mismo año que vio nacer la sugestiva teoría del gran danés.

Las radiaciones X tienen frecuencia elevadísima y para producirlas es necesario disponer de tensiones de excitación del orden de muchos miles de Volt. Los rayos X no pueden, por consiguiente, nacer donde nace la luz ordinaria; no pueden ser producidos por la parte externa de la atmósfera electrónica, sino que deben provenir de la parte más interna, donde se encuentran los electrones más íntimamente ligados al núcleo, y que por esta razón pueden ser desplazados de sus órbitas originarias solamente mediante la entrega de notable cantidad de energía.

Estos electrones no toman parte, en general, en los procesos ópticos, ni tampoco intervienen en los procesos químicos, donde las energías correspondientes son, en general, relativamente pequeñas.

En el marco de la teoría de Bohr, la sistemática de los rayos X, característicos de los elementos, ha revelado que también en la región de las altísimas frecuencias X es valedero el principio de Balmer-Ritz.

Sin embargo, es necesario señalar que el proceso de excitación para obtener radiaciones de alta frecuencia X es diferente de aquel apto para producir radiaciones de frecuencia relativamente baja, como son las luminosas, visibles o no visibles.

La emisión de radiaciones luminosas, en la representación de Bohr, se obtiene, como hemos dicho, mediante saltos que realizan los electrones superficiales entre dos órbitas de dos niveles energéticos diferentes; y en este caso, después de la excitación, los electrones pueden caer, y caen para ocupar órbitas más bajas que se encuentran vacías y siempre en la posibilidad de ser ocupadas; en cambio, en el caso de la emisión de radiaciones de altísima frecuencia X, donde el salto debe verificarse entre órbitas de niveles energéticos muy diferentes, el electrón, después de la excitación, debe caer en una órbita de un nivel energético muy bajo, en una órbita muy interna, muy vecina al núcleo; y estas órbitas, en los átomos más pesados, es decir, precisamente en los átomos que pueden emitir rayos X, siempre están ocupadas; allí no se encuentran lugares vacíos; por consiguiente es necesario preparar estos lugares vacíos, echando en alguna forma los electrones que allí se encuentran: en otros términos, es necesario "ionizar" el átomo en sus niveles más bajos.

Como es sabido, esto se logra prácticamente, en los tubos de rayos X, mediante un intenso bombardeo del elemento, realizado por un veloz haz electrónico. El átomo del elemento bombardeado por los electrones del haz catódico queda ionizado en sus niveles más bajos, y los electrones que se encuentran más arriba pueden, por consiguiente, caer y ocupar estos lugares vacíos así preparados y dar lugar a la emisión de la radiación X, que en esta forma queda desencadenada.

Como hemos señalado, sólo los átomos pesados pueden dar lugar a emisiones X. El átomo de Hidrógeno, por ejemplo, que posee un solo electrón superficial, no puede, y no da lugar a radiaciones X; también las radiaciones de frecuencia más elevada que es capaz de producir, siguen el proceso normal no precedido de ionización; por otra parte el Hidrógeno ionizado, habiendo perdido su único electrón no podría emitir ninguna radiación.

De todo lo que precede se puede concluir que la teoría de Bohr explica en forma notablemente satisfactoria no sólo la emisión de las radiaciones

luminosas, visibles y no visibles, de los átomos, sino que explica también brillantemente la emisión de las radiaciones X.

Sin embargo, toda esta hermosa y elegante construcción teórica de Bohr, basada en el simpático, diminuto sistema solar de Rutherford, contenía mucha fantasía, fantasía creadora, pero fantasía.

El físico, puede y diría, debe, mediante el esfuerzo de su inspirada meditación y el vuelo de su fantasía, crear representaciones ideales de la realidad, porque muy a menudo estas representaciones pueden ser la fuente de nuevos descubrimientos y la posibilidad de frutos inesperados; sin embargo, debe tener plena conciencia que estas extrapolaciones, a veces tan hermosas y audaces, le son permitidas solamente como medio de trabajo, y nada más; porque es siempre y sólo la experiencia la que puede y debe dar su definitivo e inexorable veredicto final.

La naturaleza es como es, y se comporta como se comporta, a su manera, como ha sido creada, e independientemente de lo que pueda pensar e idear el hombre, por genial que sea.

Hay conocidas posiciones filosóficas que sostienen que no hay objeto pensado sin el sujeto pensante; o viceversa, que hay el objeto pensado, si hay el sujeto pensante; pero estas maneras de razonar u otras semejantes, no dicen absolutamente nada para nosotros los físicos.

La experiencia vio y comprobó las radiaciones luminosas emitidas por los átomos, midió sus frecuencias y determinó sus niveles energéticos, y esto ha quedado y quedará siempre; pero la experiencia nunca vio las órbitas de Bohr; y lo que es más importante y perjudicial para su suerte, es que estas órbitas nunca podrán ponerse en evidencia experimentalmente.

El principio de indeterminación del gran físico danés Heisemberg demuestra, en efecto, que no es posible, ni con experimentos prácticamente realizables, ni con experimentos idealmente realizables, conocer la posición y la cantidad de movimiento de un electrón en un determinado instante; por consiguiente, las eventuales órbitas de Bohr no son calculables por medio de datos experimentales; es inútil insistir sobre su posible o imposible existencia y no queda otro camino que dejarlas de un lado y olvidarlas sin añoranzas, a pesar de los servicios que nos habían prestado, a pesar de su elegancia y simpatía. El instrumento inventado con tanta genialidad y perspicacia por Bohr debía ser sustituido por otras representaciones más adherentes a la realidad; así lo imponía el categórico y decisivo descubrimiento de Heisemberg.

Una de las conquistas más trascendentales de la Física Moderna es la

concepción dualística de los dos componentes fundamentales del Mundo Físico: la energía radiante y la materia.

Es decir, tanto la energía radiante como la materia tienen un doble comportamiento: pueden manifestarse, a veces, como ondas y, a veces, como corpúsculos.

Por efecto de esta nueva, audaz y admirable concepción, que los hechos experimentales y las expresiones analíticas dan por cierta y verdadera, el electrón, que se había considerado como un elemento puramente corpuscular y cuyos atributos eran solamente su masa, su carga y su energía cinética, debe ahora considerarse también con propiedades ondulatorias. En otros términos el electrón no debe considerarse más un ente con características puramente corpusculares, sino que como un ente con características también ondulatorias, y con una onda asociada cuya longitud tiene, en cada caso, un valor bien determinado y preciso, dependiente de su masa, de su velocidad y de la constante universal de Planck. Esta representación, que es el lógico resultado que se deduce de la interpretación física de la mecánica ondulatoria de Schröndiger-De Broglie, ofrece una representación de la estructura atómica, de un valor conceptual enorme.

Para formarse una idea de la constitución del átomo en el cuadro de la mecánica ondulatoria, creo oportuno buscar en la acústica el modelo que puede servirnos.

Imaginemos un tubo de órgano cerrado en los dos extremos. Suponemos que en el aire contenido en el tubo se propaga una onda sonora. Esta onda parte del fondo del tubo, sube y llega al extremo superior; ahí se refleja. La onda reflejada que vuelve hacia abajo encuentra otra onda que se propaga hacia arriba; las dos ondas interfieren.

Puede formarse así aquel sistema de vibraciones, en el interior del tubo, denominado ondas estacionarias, donde a pesar que las vibraciones del aire son diferentes de punto a punto, en un punto determinado la vibración mantiene sus características invariables.

Ahora bien, la posibilidad de formación de ondas estacionarias en un tubo está limitada solamente a ciertas ondas, cuya longitud depende de la longitud del tubo.

Existen, en otros términos, condiciones bien determinadas y precisas para que un sistema de ondas pueda quedar encerrado en un tubo o, en general, en una caja cualquiera.

Los electrones convivientes en el átomo, en la concepción de Schröndiger-De Broglie, son como ondas encerradas en una caja.

A grosso modo, se puede pensar que los límites de la caja atómica están determinados por las fuerzas de atracción del núcleo, que siendo positivo no permite que los electrones negativos se alejen de él.

Se podría decir que estas fuerzas constituyen las paredes contra las cuales la onda electrónica choca, y sobre las cuales la onda electrónica se refleja. Las condiciones para que un electrón pueda quedar encerrado en una caja atómica es que en ella el electrón pueda producir ondas estacionarias.

Solamente cuando los electrones poseen ciertas determinadas longitudes de onda asociadas pueden permanecer en el átomo; pero poseer ciertas longitudes de onda asociadas, significa poseer ciertas energías; y estas energías se suceden con discontinuidad, de la misma manera que con discontinuidad se sucedían los niveles energéticos vistos anteriormente y determinados experimentalmente, y que daban y dan lugar a las radiaciones que el átomo excitado es capaz de emitir.

El modelo ofrecido por la mecánica ondulatoria, para la estructura de la atmósfera electrónica del átomo es verdaderamente de un valor conceptual enorme: en efecto, esta representación, que la mecánica clásica no habría podido ni siquiera sospechar, permite resolver en forma satisfactoria muchos enigmas.

Por ejemplo: ¿el único electrón del átomo de Hidrógeno, y su núcleo, constituido por un solo protón, cómo podían "llenar" el volumen relativamente enorme del átomo, a pesar de que estas dos partículas son tan extremadamente pequeñas?

Si nos representamos el electrón también como onda, esta cuestión recibe una luz completamente nueva: ahora debemos imaginarnos que la carga electrónica se encuentra como "difundida", en el sentido de la representación ondulatoria de Schrödinger-De Broglie, en todo el volumen del átomo, de manera que ya ese único electrón forma efectivamente una *nube* electrónica, que *llena*, diría, el átomo, y le da un aspecto quizás menos elegante del simpático y diminuto sistema solar de Rutherford-Bohr, pero mucho más adherente a las confirmaciones experimentales que logran determinar, por diferentes caminos, un diámetro y por consiguiente un volumen del átomo.

Investigaciones de cristalografía por Rayos X, investigaciones sobre los gases, para no mencionar que éstas dan la posibilidad de medir las magnitudes "espaciales" de los átomos; y todas estas determinaciones, obtenidas con métodos completamente diferentes e independientes, coinciden y dan

como resultado el dato importantísimo que el diámetro de todos los átomos es del orden de un décimo de milimicrón.

Sin embargo, si la masa de un átomo puede medirse con extremada exactitud, y hay métodos experimentales que permiten obtener este dato, de tan trascendental importancia, con una precisión verdaderamente asombrosa, el diámetro de un átomo, en cambio, no puede medirse con la misma exactitud; sencillamente porque los átomos no tienen un diámetro exacto.

En efecto, no debemos, de ninguna manera, imaginarnos un átomo en el sentido democriteo, es decir como, por ejemplo, una esfera material lisa con una superficie bien delimitada y determinada, y con propiedades simplemente mecánicas, sino más bien como una nube del cielo, cuyo contorno es fluctuante y cuyo diámetro no es de ninguna manera definido.

En otros términos, la nube electrónica generada por las ondas de Schrödinger-De Broglie, asociadas a los electrones superficiales del átomo, debe interpretarse como una especie de nube del cielo; su contorno será también fluctuante y por consiguiente su diámetro tendrá un significado físico solamente, si su valor está dado con relativa aproximación y es considerado como algo variable alrededor de este valor.

A grosso modo ésta es la representación de la atmósfera electrónica, a la luz de los resultados de las nuevas mecánicas.

Sin embargo, hasta ahora, hemos hablado de la atmósfera electrónica, ¿y el núcleo?; el núcleo que es la parte ponderable, esencial, la que verdaderamente caracteriza el átomo, ¿qué cosa es, cómo es?

En primera aproximación se puede decir que (como es por todos conocido) el núcleo está constituido por los *nucleones*, y precisamente por protones (partículas materiales cargadas positivamente) y por neutrones (partículas materiales sin carga eléctrica); el número de los protones corresponde a la carga positiva del núcleo y define el número atómico, y la masa total de los protones y de los neutrones define el peso atómico.

¿Pero cómo pueden coexistir estas partículas en el núcleo, que como hemos dicho, o son neutras o están cargadas de electricidad del mismo nombre? ¿Cómo serán las fuerzas que logran mantener unidos los nucleones, y cuya acción permite la existencia del núcleo mismo?

Antes del año 1910, es decir, antes de las clásicas experiencias realizadas por Rutherford y sus colaboradores, que ya hemos señalado, y que impusieron la hipótesis de la existencia del núcleo atómico, se conocían dos tipos de fuerzas de campo en la naturaleza: las fuerzas del campo gravitacional y las de los campos eléctrico y magnético; las fuerzas de naturaleza electro-

magnética. Con el nacimiento de la física nuclear fue necesario introducir como fuerzas fundamentales, esenciales de la naturaleza, un tercer tipo de fuerzas de campo no asimilables a las precedentes, las fuerzas nucleares.

Las fuerzas gravitacionales y las fuerzas eléctricas y magnéticas son fuerzas de largo alcance; disminuyen sí con la distancia, pero solamente con el cuadrado de ella, es decir, con una ley relativamente lenta; por consiguiente partículas también lejanas pueden actuar entre sí con fuerzas apreciables. No son así las fuerzas nucleares, porque su naturaleza es tal que pueden actuar solamente si las dos partículas que reaccionan entre sí son extremadamente vecinas, y cuando digo extremadamente vecinas, entiendo que tienen una distancia del orden de cien mil veces menor que el radio del átomo.

Las fuerzas nucleares se ejercen indistintamente entre todos los nucleones, sean que estén eléctricamente cargados o neutros; en este aspecto podrían considerarse como seudo fuerzas gravitacionales, puesto que dependen únicamente de la masa de las partículas que reaccionan entre sí y de su distancia.

Sin embargo, no siguen, de ninguna manera, la elegante y sencilla ley clásica de la gravitación universal, por el contrario, siguen una ley, obtenida en forma semiempírica por Gamov, que es bastante caprichosa y singular.

Por ejemplo, si dos nucleones se encuentran casi en contacto, se atraen con una fuerza nuclear que es extremadamente intensa; esta fuerza disminuye bruscamente con un pequeño aumento de la distancia, hasta anularse casi totalmente por una distancia de 2 "fermi" (1 "fermi" corresponde a 10^{-12} mm., es decir, es un billonésimo de milímetro).

En otros términos el radio de acción de las fuerzas nucleares es extremadamente pequeño y es bastante inferior al mismo diámetro de los núcleos atómicos, especialmente de los más pesados, puesto que, por ejemplo, el diámetro atribuido al núcleo de Uranio varía de 15 a 32 "fermi".

Por consiguiente, en el interior de un mismo núcleo atómico, un par de nucleones, que se encuentran casi en contacto, se atraen con una fuerza extraordinariamente intensa, en cambio otros dos nucleones pueden encontrarse a una distancia tal que no experimentan más ninguna acción recíproca.

A pesar de las noticias ahora expuestas, se puede señalar que, si bien es cierto que se conocen en forma plenamente exhaustiva las leyes del campo gravitacional y del campo electromagnético, las leyes fundamentales del campo de las fuerzas nucleares no se conocen actualmente en forma tan

satisfactoria y los resultados de los estudios relacionados con estas fuerzas pueden considerarse como una primera tentativa, por lo demás de carácter semiempírico.

En efecto, una verdadera teoría del núcleo, es decir, una orgánica, completa y definitiva teoría de las fuerzas nucleares (como expresó en forma muy explícita, poco antes de su prematura muerte, el gran físico italiano Enrico Fermi), no existe, a pesar del enorme, tormentoso y al mismo tiempo genial trabajo realizado en estos últimos años con este objeto, y la enorme bibliografía relacionada con este tema.

A pesar de esto, creo oportuno exponer algunos de los resultados recientemente obtenidos, con el objeto de dar una idea, por lo menos cualitativa y de carácter simplemente informativo, del estado actual de la ciencia en este importantísimo campo.

Resultados más o menos satisfactorios se han obtenido utilizando la moderna técnica experimental de la "espectrografía nuclear" mediante rayos catódicos.

En el marco de la sugestiva concepción dualística de la energía radiante y de la materia, que como hemos señalado precedentemente, es una de las conquistas más trascendentales de la física moderna, un electrón en movimiento tiene una onda asociada cuya longitud disminuye cuando aumenta su velocidad.

Ahora bien, si dirigimos sobre un cuerpo un haz de electrones de enorme velocidad, es decir, acelerados hasta adquirir energías del orden de cientos de millones de electrones-volt, puesto que las ondas asociadas a estos electrones enormemente acelerados son extremadamente pequeñas y precisamente del orden de algunos "fermi", se tiene la posibilidad de producir fenómenos de interferencia sobre partículas cuyas dimensiones son del orden de magnitud de estas ondas asociadas, es decir, sobre los núcleos atómicos.

Una de las mayores dificultades de esta moderna técnica experimental, es la de obtener un haz electrónico perfectamente monocromático, de una única longitud de onda asociada, es decir, un haz electrónico cuyos electrones tengan exactamente la misma velocidad.

En la Universidad de Stanford, en California, Hofstadter con sus colaboradores desde el año 1951 hasta hoy día, utilizando en forma sistemática este método de difracción nuclear, lograron superar las enormes dificultades a que daba lugar la monocromaticidad y obtuvieron resultados de trascendental importancia científica.

Mediante haces electrónicos de energía de 183 millones de electrones-volt,

Hofstadter y su equipo pudieron obtener, por primera vez, noticias bastante precisas sobre las dimensiones y estructura de aquella diminuta partícula ponderal, que es la parte esencial del átomo, el núcleo atómico.

Mediante estas investigaciones, ahora se sabe que, por ejemplo, el núcleo de oro tiene un centro *extremadamente denso* que se extiende uniformemente en un radio de aproximadamente 4 "fermi", y que alrededor de este centro se encuentra una película cuya densidad disminuye rápidamente hasta reducirse a cero a una distancia de más o menos 9 "fermi".

Ya hemos dicho que la parte ponderal, esencial del átomo, es el núcleo atómico, y hemos dicho también que esta partícula es extremadamente pequeña, en relación a las dimensiones relativamente enormes del átomo formado por el núcleo y la atmósfera electrónica.

Para dar una idea cuantitativa, sea de las dimensiones geométricas que de las masas correspondientes a la estructura atómica, creo oportuno exponer algunos datos numéricos que pueden deducirse de las consideraciones antes expuestas.

El diámetro de un núcleo atómico es del orden de algunos "fermi", es decir, de algunos billonésimos de milímetros; el diámetro del átomo es, en cambio, 100.000 veces más grande; por otra parte, toda la masa del átomo está prácticamente concentrada en el núcleo atómico, cuya densidad es, como hemos dicho, extraordinariamente grande. Para tener una idea de esta fabulosa densidad, podría ser interesante indicar que si fuera posible concentrar, en forma compacta, los núcleos atómicos que podrían caber en un volumen de un milímetro cúbico, se tendría una masa del orden de magnitud de 100.000 toneladas.

Estas simples y esquemáticas noticias, ponen de manifiesto que, a pesar de las dificultades, la potencia de la meditación y la audaz fantasía de los físicos, lograron encontrar datos cuyo orden de magnitud está en realidad fuera de las posibilidades de la comprensión humana.

Otro aspecto notablemente interesante, relacionado con la posibilidad de la existencia de un núcleo atómico, está dado por el hecho que la masa de un núcleo es siempre inferior (salvo el caso del Hidrógeno) a la masa de los nucleones que lo componen, considerados separados.

Esta diferencia de masa, o "defecto de masa", como se llama normalmente, satisface la ley, corrientemente denominada ley de equivalencia entre masa y energía, que ya desde el año 1905 Albert Einstein, el más grande de los físicos modernos, había previsto,

La hazaña de concentrar los nucleones, partículas elementales de materia en parte neutra, los neutrones, y en parte con carga del mismo signo, los protones, en un volumen tan extremadamente pequeño, como el núcleo atómico, implica necesariamente un gasto de energía, y esta energía es suministrada por los nucleones mismos del núcleo, puesto que cada uno al entrar en reunión compacta con los demás, se comporta como si abandonara una fracción de su masa convirtiéndola en energía.

Sin embargo, me parece de sumo interés esclarecer este aspecto de tan trascendental importancia, por el hecho que muy a menudo se afirma erróneamente que la teoría de la relatividad establece, como teorema, la equivalencia entre materia y energía.

Esta afirmación es, en realidad, una extrapolación incorrecta o, por lo menos, abusiva.

La relatividad enseña solamente que la energía posee una masa inerte, como la posee la materia; pero de esto no se sigue que ambas entidades sean equivalentes y que una de ellas pueda transformarse en la otra.

¡Nunca la experiencia condujo a ese resultado!

En las desintegraciones nucleares, como por ejemplo en el caso por todos conocidos, extraordinariamente impresionante, de la bomba atómica, es cierto que las masas de los núcleos obtenidos de la desintegración es menor que la masa del núcleo atómico que se desintegró; es cierto que aparece simultáneamente un enorme desarrollo de energía; pero de esto no se desprende necesariamente que la masa que se ha perdido proviene de una desaparición de materia; más bien se trata de una energía potencial que ya estaba contenida en el núcleo primitivo bajo forma de masa inerte.

Para afirmar la realidad de una transformación de materia en energía, sería necesario averiguar si en alguna desintegración nuclear se verifica la desaparición de algún nucleón y, contemporáneamente, la aparición de una equivalente cantidad de energía.

Hasta ahora no se ha comprobado que este hecho acontezca.

En todas las reacciones nucleares, acompañadas por cambios energéticos, el número de nucleones nunca ha tenido variaciones; nunca una partícula ponderal ha desaparecido para transformarse totalmente en energía.

Después de todas estas noticias, expuestas necesariamente en forma tan somera e incompleta, tengo que añadir que con el fin de explicar las fuerzas nucleares, nuevas partículas han sido "inventadas" por los físicos teóricos, muy a menudo también antes de ser "descubiertas" por los físicos experimentales,

En la física actual, además del electrón, el protón y el neutrón, que ya hemos mencionado, tenemos en efecto muchas otras partículas elementales: el electrón positivo o positrón, el protón negativo o antiprotón, los mesones η , positivos y negativos, los mesones π , también positivos y negativos, los mesones K, L, M, etc., el fotón, el neutrino y otras más.

En verdad, todas estas partículas, llamadas elementales, son bastante numerosas y hacen surgir muchas dudas sobre su elementalidad, por lo menos para algunas de ellas.

Si se hubiera preguntado a los físicos o a los químicos del comienzo del siglo, si el átomo podía considerarse como una partícula elemental, con toda probabilidad muchos de ellos habrían contestado afirmativamente, porque en el estado de los conocimientos de aquel entonces, no se conocía la estructura del átomo, más bien ni se sospechaba que podía tener una.

Después cuando el átomo se reveló como un ente de naturaleza compleja, y cuando esta naturaleza compleja fue explorada más profundamente, el concepto de elementalidad se transfirió a objetos más pequeños; es decir, al núcleo y a los electrones superficiales. Hoy día también el núcleo ha revelado mucho de su complicada naturaleza; así que en verdad, parece que a cada etapa de la ciencia, se llaman elementales, sencillamente, las partículas cuya estructura no se conoce.

Por otra parte, todas estas partículas antes nombradas, llamadas elementales, no pueden de ninguna manera considerarse en el sentido democriteo: las partículas, los átomos de Demócrito, de Dalton y, en general, de la ciencia clásica eran "inalterables", e "indestructibles"; las partículas elementales de hoy están, en cambio, en un estado de potencial continua variación. Así un neutrón, en un proceso radiactivo β , se transmuta en un protón, dando lugar, además, a la formación de un electrón y de un neutrino; positrones y electrones pueden compensarse recíprocamente de tal manera que logran dar lugar a fotones, y viceversa, dos fotones pueden dar origen a un par de electrones positivo y negativo. Y existen otros procesos análogos ya descubiertos, y habrán probablemente otros más del mismo tipo por descubrir. Así que la naturaleza de las partículas elementales de hoy día es mucho más complicada que lo que podría esperarse de partículas que precisamente se denominan elementales, y compleja y difícil, y actualmente no resuelta, es la tarea apta para darles una representación, una interpretación que satisfaga plenamente.

Hemos llegado así, en forma muy somera, incompleta e intencionadamente sólo conceptual y cualitativa, a lo que podría llamarse la frontera de nuestros

conocimientos en el estudio del núcleo y de la atmósfera electrónica constituyentes del átomo.

Es una frontera naturalmente en movimiento, una frontera fluida, una frontera que podrá consolidarse solamente con el aporte de nuevos datos experimentales. Y cuando esto se verifique, se podrá realizar un notable progreso en la física, porque se podrá dominar, entre otras, una verdadera teoría del núcleo, y no un semiempirismo como tenemos hoy día; porque sabemos servirnos del núcleo, sabemos aprovechar de su extraordinaria energía, pero no sabemos, en verdad, cómo está hecho.

Naturalmente más allá de esta frontera habrá otras, y otras más, porque es el inexorable destino de la física y de la ciencia en general, que la conquista de nuevos descubrimientos, ampliando el área del conocimiento, deba ampliar también el de las cosas desconocidas, alejando en vez de acercar en el hombre la ilusión del dominio absoluto y definitivo de la verdad.

Eterna, tormentosa vicisitud del humano saber.

Los límites de la física, y de la ciencia en general, retroceden, como perturbados por un inocente y al mismo tiempo pícaro pudor, cuando el hombre empuja hacia adelante su mirada escrutadora.

En la física, en la ciencia en general, no hay reposo, no hay límites donde descansar.

Sin embargo, un mundo sin porvenir, sin novedades, sin algo por descubrir y por esperar sería un sepulcro, una tumba; y la generación que nace, después de haber aprendido lo que la generación pasada ha descubierto, discutido y elaborado, tiene necesidad del aliento de nueva vida.

Y no debemos amargarnos, por el contrario, debemos alegrarnos, si una teoría física, por hermosa, elegante y atrayente que sea y que hemos aprendido a querer, desaparece; si otra más vital y más general surge para destruirla y reemplazarla.

No debemos amargarnos, sino alegrarnos de esta imperecedera juventud de la física.