

LEOPOLDO MUZZIOLI A.

MATERIA Y ANTIMATERIA *

Dedico este trabajo al Profesor
Don David Stitchkin Branover, Rec-
tor de la Universidad de Concepción.

Leopoldo Muzzioli A.
Concepción (Chile), septiembre 1968

I. EL REVOLUCIONARIO MOVIMIENTO DE IDEAS QUE PERMITIO A LA FISICA SUPERAR LA DIFICIL SITUACION EN QUE SE ENCONTRABA AL INICIARSE EL SIGLO XX

LAS DOCTRINAS del calor y de la electricidad que se desarrolla-
ron en el siglo XIX y dieron lugar a aquellas monumentales construc-
ciones conceptuales, elaboradas matemáticamente en forma magistral,
que son la termodinámica y la electrodinámica, se refieren a la
materia y a sus manifestaciones energéticas en su conjunto.

Por esta razón la termodinámica y la electrodinámica deben ser
consideradas como disciplinas que se refieren al mundo macroscópico;
así que cuando a fines del siglo pasado, por efecto del descubrimiento
de asombrosos hechos nuevos se presentó la inexorable necesidad de
descender desde el mundo del macrocosmo hasta el mundo del micro-
cosmo, sea en lo que se refiere a la materia, como en lo que se
refiere a sus manifestaciones energéticas, estas doctrinas a pesar de
ser tan hermosas en su elegancia clásica y aparentemente tan per-

*Dos conferencias dictadas en los días 23 y 24 de septiembre de 1968 en
la Universidad de Concepción.

fectas, resultaron insuficientes, es decir, solamente aproximadas por no decir erradas.

Por otra parte, sea la mecánica analítica, otra monumental construcción conceptual, elaborada matemáticamente en forma magistral por los grandes mecanicistas del siglo XVIII, como también la mecánica racional que puede considerarse como un perfeccionamiento de la mecánica analítica, realizado mediante el aprovechamiento del eficaz algoritmo matemático ofrecido por el cálculo vectorial, en apariencia tan perfectas, resultaron en cambio como aproximadas y válidas solamente para el estudio del movimiento de objetos cuya velocidad no fuese demasiado grande.

En efecto, para velocidades muy grandes, es decir, cercanas a la de la luz, las mecánicas analítica y racional conducen a resultados decisivamente errados.

De modo que cuando a fines del siglo pasado, los físicos se encontraron en la necesidad de estudiar (entre otras) las características y las leyes del movimiento de partículas cargadas de electricidad expulsadas espontánea o artificialmente por la materia en los fenómenos, recién descubiertos, como la radiactividad natural y los efectos fotoeléctricos, termoiónicos, etc., chocaron con dificultades que aparecían insuperables, puesto que todas estas partículas tenían velocidades muy grandes y a veces precisamente cercanas a la de la luz.

Por consiguiente, a fines del siglo pasado, la física se encontró en una situación extremadamente difícil, por no decir dramática. En efecto, el reconocimiento que las disciplinas fundamentales sobre las cuales estaba construida toda la física eran solamente aproximadas, por no decir erradas, dio lugar como a una especie de barrera intelectual, que, si no se superaba, quedaba detenido inexorablemente el desarrollo del progreso científico.

Era necesario, o, mejor dicho, absolutamente indispensable superar esta barrera.

Para realizar esta hazaña, a principios de nuestro siglo fue necesario revisar valerosamente y sin prejuicio alguno los conceptos básicos sobre los cuales se había edificado toda la ciencia física.

En otros términos, fue necesario reexaminar no sólo los conceptos clásicos de espacio y de tiempo, tan arraigados en nuestra mente y en nuestro espíritu, sino también poner en tela de juicio el concepto clásico de la naturaleza continua de la energía; concepto cuya validez nunca se había puesto en duda.

Como consecuencia de este inexorable y al mismo tiempo audaz y

revolucionario movimiento de ideas, nacieron la teoría de la relatividad que dio lugar a la mecánica relativística y la teoría de los cuantos que dio lugar a la mecánica cuántica.

Por otra parte, también al determinismo, que se había considerado siempre como una verdad irrefutable y como un hecho indiscutible ínsito en toda la fenomenología de la naturaleza, fue puesto en duda, y, como consecuencia de esta crítica, quizás la más audaz de todas las anteriores, se reconoció la importancia que el cálculo de las probabilidades podía tener en la nueva física; y este reconocimiento abrió el camino para la elaboración de la mecánica ondulatoria.

Entonces; crítica de los conceptos fundamentales de espacio y de tiempo; crítica del concepto clásico de la variación de la energía en forma continua (o como se diría en términos matemáticos, por infinitésimos arbitrarios); y crítica del determinismo; todo esto, en síntesis, fue al revolucionario movimiento de ideas que permitió a la física superar la difícil situación en que se encontraba al iniciarse el siglo xx.

Ahora bien, el átomo fue el "personaje crucial" que más aprovechó de este audaz desarrollo del pensamiento científico y, por este aprovechamiento, sea las teorías, como las investigaciones experimentales con él relacionadas, dieron lugar a un insospechado y casi increíble progreso, que se expresó y se manifestó sobre todo mediante los descubrimientos de las partículas y antipartículas elementales; descubrimientos que hacen vislumbrar la insospechada y casi increíble posibilidad que en el Universo, además de la materia, pueda existir naturalmente o pueda crearse artificialmente la antimateria.

2. TEORIA Y EXPERIENCIA EN EL METODO DE LAS INVESTIGACIONES CIENTIFICAS

He dicho que fueron las teorías junto con las investigaciones experimentales, las que dieron lugar al asombroso progreso actual en el estudio del átomo, sin embargo, no se trata de un caso particular, especial, sino que del método general de que aprovecha la física en su desarrollo.

En efecto, el estudio de la naturaleza se realiza mediante la teoría y la experiencia. Teoría y experiencia deben completarse y complementarse recíprocamente, aun cuando sea necesario cultivarlas separadamente, como sucede en el período actual, donde la notable madurez alcanzada por las matemáticas y el enorme 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 estos dos aspectos fundamentales de la investigación física, que son la de obtener, analizar y estudiar los resultados experimentales relativos a los fenómenos y la de explicar e interpretar teóricamente estos fenómenos, con la posibilidad también de prever otros, como sucede en algunos casos donde, la audacia de la fantasía creadora del teórico, logra esta hazaña.

Todo lo que se ha hecho en estos últimos años, sea en el aspecto experimental, como en el aspecto teórico, para alcanzar el conocimiento, o, mejor dicho, para tratar de obtener una interpretación, una concepción, lo más satisfactoria posible de la constitución del átomo, representa un ejemplo típico y una clara demostración de esta necesaria, indispensable colaboración entre la experiencia y la teoría.

3. LAS INVESTIGACIONES DE RUTHERFORD Y MODELO ATOMICO CORRESPONDIENTE

En el año 1910, el grupo del Instituto de Física de Cambridge dirigido por el gran físico neocelandés Ernest Rutherford iniciaba un poderoso trabajo experimental que daba lugar a una inevitable y al mismo tiempo imprevisible y revolucionaria modificación de la interpretación de la constitución del átomo.

Estas investigaciones desarrolladas en forma sistemática y sobremedida precisa por los físicos de Cambridge, consistían en bombardear láminas metálicas delgadas mediante un haz de partículas α , esto es mediante un haz de núcleos de Helio.

Estos minúsculos y velocísimos proyectiles, emitidos naturalmente por una sustancia radiactiva, atravesaban las láminas metálicas delgadas y, de la interpretación de los resultados experimentales obtenidos, se deducía que el átomo ya no podía considerarse impenetrable; al contrario, podía ser atravesado y además el fenómeno se manifestaba con características tales que Rutherford fue inducido a enunciar su audaz hipótesis, afirmando explícitamente que no quedaba otra solución que aquella de demoler valerosamente la concepción atómica clásica, y considerar el átomo como un microscópico sistema solar,

formado por una partícula central extremadamente pequeña y extremadamente densa, 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 mucha probabilidad debían moverse alrededor del núcleo con órbitas circulares o elípticas.

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

Sin embargo, el moderno drama del átomo, tenía su comienzo.

4. LAS RADIACIONES EMITIDAS POR EL ATOMO EXCITADO; LOS ESPECTROS Y LA REGLA DE BALMER-RITZ

El primer problema que el físico debe 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 se podrán 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 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 diferentes?, ¿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 al 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, 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 de la ley de Balmer-Ritz, que como hemos visto había sido obtenida en forma bastante empírica.

5. LOS ATOMOS DE RUTHERFORD-BOHR Y DE SCHRODINGER-DE BROGLIE

Fue solamente en el año 1913 que el gran físico 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 a las preestablecidas, según el categórico, autoritario y, se podía 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, a 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 irra-

diación, 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 espectroscopia de emisión y de absorción de los rayos X, cuyo estudio nacía 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 al 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 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 sino que explicaba también brillantemente la emisión de las radiaciones X.

Sin embargo esta hermosa y elegante construcción teórica de Bohr basada en el simpático y diminuto sistema solar de Rutherford, no pudo resistir al revolucionario movimiento de ideas que se verificó sucesivamente, y, a pesar de los servicios que había prestado y a pesar de su elegancia y simpatía, tuvo que caer inexorablemente y ser reemplazada por otra representación más adherente a las nuevas concepciones.

En efecto, en el año 1925, el gran físico francés Luis De Broglie, con la audacia que caracteriza al genio, supuso, o, se podría decir previó (porque su hipótesis fue luego confirmada por la experiencia) que un electrón en movimiento debe tener una onda asociada; es decir, el electrón que hasta entonces había sido considerado exclusivamente como un corpúsculo cargado de electricidad negativa, debía ahora considerarse con una onda asociada cuya longitud podía

calcularse mediante una relación bastante sencilla en función de su masa, de su velocidad y de la constante universal de Planck.

Como consecuencia de esta suposición, o mejor dicho de esta previsión, De Broglie modifica sustancialmente la presentación de Rutherford-Bohr, transformando las nítidas y elegantes órbitas electrónicas del átomo en borrosas e inelegantes ondas estacionarias que vibran en el átomo mismo.

Para formarse una idea de esta nueva representación, 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 puede quedar encerrado en un tubo o, en general, en una caja cualquiera.

Los electrones convivientes en el átomo, en la nueva concepción 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 ondas asociadas, significa poseer ciertas energías; y estas energías se suceden con discontinuidad, de la misma manera que con discontinuidad se sucedían los niveles energé-

ticos vistos anteriormente y determinados experimentalmente, y que daban y dan lugar a las radiaciones que el átomo excitado es capaz de emitir.

Este nuevo "modelo" de la atmósfera electrónica, cuya fenomenología es guiada por la mecánica ondulatoria, elaborada en forma magistral, rigurosa y genial por el gran físico austriaco Schrödinger, a base de las ideas de De Broglie, puede considerarse 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 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 decir, el diámetro del conjunto formado por un núcleo con su atmósfera electrónica, es del orden de un décimo de milimicrón, esto es de un diez millonésimo de milímetro.

Sin embargo, si la masa de un átomo puede medirse con extrema 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 áto-

mo en el sentido democriteo, es decir como por ejemplo, una esferita material lisa con una superficie bien delineada 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, asociada 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 la audaz y revolucionaria mecánica ondulatoria de Schrödinger-De Broglie.

6. EL NUCLEO ATOMICO

Sin embargo, para el desarrollo de nuestro tema, es decir de las partículas y antipartículas elementales; de la materia y antimateria, es el "núcleo", y no la "atmósfera electrónica" que nos interesa y nos ocuparemos del "núcleo" que, como he dicho, es la parte ponderable y esencial del átomo.

En primera aproximación, podemos decir que el "núcleo", está constituido esencialmente por "nucleones", y precisamente por "protones" (partículas materiales cargadas de electricidad positiva) y por "neutrones" (partículas materiales sin carga eléctrica).

El número de "protones" corresponde a la carga eléctrica positiva del "núcleo" y determina el "número atómico", mientras que la masa total de los "protones" y de los "neutrones", o sea de todos los "nucleones" que forman el "núcleo", corresponde al "peso atómico".

Pero ¿cómo podrán cohabitar, coexistir estas partículas en el núcleo, a pesar que (como hemos dicho) en parte son neutras y en parte siendo cargadas de electricidad del mismo nombre deberían repelerse?

¿De qué tipo serán las fuerzas que podemos llamar fuerzas nucleares que logran mantener fuertemente unidos los "nucleones" permitiendo la existencia del núcleo atómico?

¿De dónde habrá salido la energía seguramente enorme, que fue

necesaria para la construcción del núcleo, donde en un espacio de dimensiones tan extremadamente pequeños se encuentran soldados todos los "nucleones" que constituyen el núcleo atómico?

7. LAS FUERZAS NUCLEARES Y LAS DIMENSIONES DEL NUCLEO ATOMICO

Como información preliminar, podemos señalar que la naturaleza de las fuerzas nucleares es tal que pueden nacer, manifestarse y actuar, solamente cuando las dos partículas que reaccionan entre sí, se encuentran extremadamente vecinas; y cuando digo extremadamente vecinas, entiendo decir que deben encontrarse a una distancia cuyo orden es generalmente menor del diámetro mismo del núcleo atómico.

Por ejemplo, si dos nucleones se encuentran casi en contacto, estos dos nucleones se atraen con una fuerza nuclear que es extremadamente intensa; pero esta fuerza disminuye de repente cuando aumenta (aun de a muy poco) la distancia y se anula completamente cuando la distancia entre los dos nucleones que se consideran, alcanza el valor de 2 "fermi", esto es 2 billonésimos de milímetro, siendo 1 "fermi", 10^{-12} mm, es decir 1 billonésimo de milímetro.

Para dar una idea de la extrema pequeñez del radio de acción de las fuerzas nucleares, es interesante considerar por ejemplo, el caso del núcleo atómico del Uranio. El diámetro de este núcleo es del orden de 25 "fermi", es decir, es muy superior al radio de acción de las fuerzas nucleares que, como hemos dicho, es del orden de 2 "fermi". A base de estos datos, se deduce que en el interior de un mismo núcleo atómico pueden verificarse hechos bastante singulares: por ejemplo, si dos "nucleones" se encuentran casi en contacto, estos dos "nucleones" se atraen con una fuerza que es extraordinariamente grande; en cambio, si dos otros "nucleones", siempre del mismo núcleo atómico, se encuentran a una distancia superior a 2 "fermi", la fuerza de atracción es nula, es decir estos dos "nucleones", a pesar de cohabitar en el mismo núcleo atómico, no experimentan ninguna acción recíproca.

Creo ahora interesante exponer algunos resultados muy satisfactorios, relacionados con la "geometría" de los núcleos atómicos, obtenidos utilizando la moderna técnica experimental llamada "espectrografía nuclear".

Como antes he señalado un electrón en movimiento tiene una

onda asociada y se comporta como onda, la onda de De Broglie; por otra parte la longitud de esta onda asociada a un electrón en movimiento disminuye cuando aumenta la velocidad del electrón.

Ahora bien, si dirigimos sobre un cuerpo, un haz de electrones con velocidad muy grande, más bien grandísima, esto es acelerados de modo tal de adquirir energías del orden de centenares de millones de "electrones-volt", puesto que las ondas asociadas a estos electrones, enormemente acelerados, son extremadamente pequeñas, es decir del orden de algunos "fermi", se tiene la posibilidad de producir fenómenos de interferencia sobre partículas cuyas dimensiones sean del orden de magnitud de estas ondas asociadas; las partículas, cuyas dimensiones son del orden de magnitud de estas ondas asociadas, son precisamente los núcleos atómicos.

He aquí encontrada la técnica experimental apta para "ver" el núcleo atómico. Sin embargo es oportuno señalar que esta técnica experimental implica notables dificultades; la de mayor entidad es aquella de lograr obtener un haz electrónico perfectamente monocromático, es decir de una única longitud de onda asociada, o, en otros términos, un haz electrónico cuyos electrones tengan exactamente la misma velocidad.

En la Universidad de Stanford en California, Hofstadter y sus colaboradores, utilizando este método de difracción nuclear, lograron superar las enormes dificultades relacionadas con esta moderna técnica experimental; superaron en particular, las dificultades inherentes a la monocromaticidad y obtuvieron, en forma sistemática y meticulosa, resultados de notable importancia científica.

Mediante la utilización de haces electrónicos de 183 millones de "electrones-volt" de energía, Hofstadter y su grupo, lograron obtener, en el año 1951, por primera vez en la historia de la ciencia, noticias bastantes precisas, sobre las dimensiones y la estructura de aquella extremadamente pequeña partícula ponderable que es la parte esencial del átomo; el núcleo atómico.

Mediante estas investigaciones, ahora se sabe que, por ejemplo, el núcleo del átomo del 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".

Resulta, por consiguiente, que el diámetro del núcleo del átomo

del oro es del orden de 18 "fermi", es decir, 18 billonésimos de milímetro.

A la luz de estos interesantes datos experimentales resulta confirmada la genial previsión de Rutherford, en el sentido que el núcleo a pesar que es la parte ponderable y esencial del átomo, es extremadamente pequeño con respecto a las dimensiones relativamente enormes del átomo formado por el núcleo y la atmósfera electrónica.

Dada la importancia del asunto, seame permitido exponer algunos datos numéricos, que pueden deducirse fácilmente a base de lo que hemos dicho, y que ofrecen una idea cuantitativa, muy eficaz sea de las dimensiones geométricas, como de las masas correspondientes a la estructura atómica.

El diámetro de un núcleo atómico (según los datos experimentales, absolutamente seguros y precisos de Hofstadter) es del orden de algunos "fermi", esto es, de algunos billonésimos de milímetro; en cambio el diámetro de un átomo (según los datos experimentales, también absolutamente seguros y precisos, obtenidos por investigaciones, sobre cristalografía por rayo X, sobre los gases y otras) es, como ya hemos señalado anteriormente, del orden de un diez millonésimo de milímetro.

En otros términos, el diámetro de un átomo tiene un valor cuyo orden es 100.000 veces más grande del diámetro de su parte ponderable y esencial que de su núcleo.

La relación entre las dimensiones de estos dos diámetros es entonces enorme.

Para tener una idea de esta enorme relación, basta pensar que si el núcleo de un átomo tuviera las dimensiones de una cabeza de alfiler de 1 mm. de radio el átomo, es decir, la atmósfera electrónica penetrable y casi imponderable sería una esfera de 100 m. de radio.

Por otra parte, puesto que la masa de los electrones de la atmósfera electrónica es despreciable, toda la masa del átomo está prácticamente concentrada en el núcleo atómico, cuya densidad es, como hemos dicho, extraordinariamente grande. Esta fabulosa densidad puede ser puesta en evidencia de la manera siguiente: si fuera posible concentrar en forma compacta, en el volumen de un milímetro cúbico, los núcleos atómicos de una sustancia, sin sus atmósferas electrónicas, obtendríamos un pequeño granito material cuya masa sería del orden de 100.000 toneladas.

A la luz de estos datos numéricos muy expresivos, pero sorpren-

dentes y casi increíbles, tenemos que cambiar bastante la interpretación que nos es tan familiar, de como son, en realidad, los cuerpos que componen nuestro mundo, y nos damos cuenta una vez más, cómo el conocimiento no se alcanza simplemente observando las cosas o los hechos; el conocimiento no es tan cómoda faena. El conocimiento se alcanza (o mejor dicho, se trata de alcanzar) mediante un proceso mucho más arduo y difícil que es la interpretación de esas cosas y de esos hechos.

Para esclarecer este concepto, que es la base del método científico galileano, y que ahora, más que nunca es utilizado por la Física del siglo xx, creo interesante exponer, lo que dice sobre el tema, José Ortega y Gasset en su magnífica obra *En torno a Galileo*.

José Ortega y Gasset escribe:

"La ciencia es interpretación de los hechos. Los hechos por sí mismos, no nos dan la realidad, al contrario, la ocultan, esto es, nos plantean el problema de la realidad.

Para descubrir la realidad, es preciso que retiremos por un momento los hechos de en torno nuestro y nos quedemos solos con nuestra mente. Entonces, por nuestra propia cuenta y riesgo, imaginamos una realidad, fabricamos una realidad imaginaria, puro invento nuestro: luego siguiendo en la soledad de nuestro íntimo imaginar hallamos que aspecto, que figuras visibles, en suma que hechos producirían esa realidad imaginaria. Entonces es cuando salimos de nuestra soledad imaginaria, de nuestra mente pura y aislada y comparamos esos hechos que la realidad imaginada por nosotros produciría, con los hechos efectivos que nos rodean. Si calzan unos con otros es que hemos descifrado el enigma, que hemos descubierto la realidad que los hechos cubrían y arcanizaban".

Hermosa síntesis que define en forma perfecta la faena que es la ciencia y que, como afirma con mucha razón, José Ortega y Gasset, todo el que se ocupa de labores científicas debería saberlo.

8. ENERGIA NECESARIA PARA LA CREACION Y EXISTENCIA DE LOS NUCLEOS ATOMICOS

Hasta ahora hemos señalado, en forma muy somera y superficial, algunas noticias relacionadas con las características de las fuerzas nucleares; esto es, de aquellas fuerzas que logran realizar la hazaña de mantener tan compactos los "nucleones" (protones y neutrones), que componen el núcleo atómico.

Sin embargo como hemos dicho anteriormente, la realización de esta hazaña (de concentrar los "nucleones" en un volumen tan pequeño, tan extremadamente pequeño, como es aquel que corresponde al núcleo atómico) no sólo implica la existencia permanente de intensas fuerzas nucleares sino que debe haber necesitado también de una enorme cantidad de energía.

Por esto que hemos formulado una pregunta bien clara y precisa, a la cual debemos tratar de contestar: ¿de dónde habrá salido la energía que fue necesaria para la construcción del núcleo, donde en un espacio de dimensiones tan extremadamente pequeñas se encuentran soldados todos los nucleones que constituyen el núcleo mismo?

Para tratar de contestar a esta pregunta, ciertamente de fundamental importancia para la comprensión de la posibilidad de la existencia de los núcleos atómicos, debemos recordar el descubrimiento de una ley que, por su trascendental importancia, dio lugar a una nueva era de la física. Me refiero a la ley denominada ley de "equivalencia entre masa y energía" descubierta en el año 1905 por Albert Einstein, el más grande de los físicos modernos.

Existe en la naturaleza la extraña y sorprendente posibilidad de transformación de una masa en energía y viceversa y la igualmente extraña y sorprendente posibilidad de transformación de una energía en masa. Einstein, con la audacia que caracteriza al genio, previó este fenómeno y determinó la ley que lo rige. Esta ley (que entre otras, es de una fascinante sencillez) permite calcular cuantitativamente, ya sea la energía que se genera cuando se aniquila una masa determinada, o la masa que se genera cuando se aniquila una energía determinada.

Después de estas premisas vamos ahora a señalar datos experimentales especiales, relacionados con los núcleos atómicos, obtenidos mediante el espectrógrafo de masa; uno de los más sensibles y precisos instrumentos de la física de hoy.

Primero se determinaron, con extremada precisión, las masas de los "nucleones" que componen los núcleos atómicos: esto es, la masa de un "neutrón" aislado y la masa de un "protón" aislado. Después mediante una seria sistemática de medidas, se determinaron las masas de todos los núcleos atómicos, de todos los elementos que existen en la naturaleza. Ahora bien, todas estas medidas sobre las cuales no podemos ni debemos tener ninguna duda, han puesto de relieve un resultado que aparece sobremanera extraño y sorprendente y que de

todas maneras, está afuera del marco de nuestras experiencias macroscópicas cotidianas.

La masa de un núcleo atómico (menos el caso del hidrógeno que está compuesto por un solo protón) es siempre inferior, más pequeña, que la suma de las masas de los "nucleones" (protones y neutrones) considerados separados, que componen el núcleo atómico mismo.

El resultado experimental se presenta bastante extraño y sorprendente y está decisivamente afuera del marco de las experiencias macroscópicas de nuestra vida cotidiana; en efecto, ninguno de nosotros osaría afirmar (y sería un error hacerlo) que por ejemplo, una aleación metálica formada por 50 gramos de Cobre y 50 grs. de Zinc daría lugar a un pedazo de Latón cuya masa resultaría inferior a 100 gramos.

Pero la física del núcleo, no es una física que mana de las percepciones de nuestros sentidos, por consiguiente no puede ser una física siempre de acuerdo con nuestro "sentido común" que es una consecuencia de estas percepciones.

Las percepciones directas del hombre son limitadas, y, puesto que los métodos modernos de observación y las teorías relacionadas van más lejos, a veces extremadamente más lejos del radio de acción de nuestra percepción directa, no debemos sorprendernos si las ideas, que salen como resultado de estas investigaciones, están en contraste con las indicaciones de nuestros sentidos y con nuestro "sentido común" que es una consecuencia de estas indicaciones.

Hemos dicho anteriormente que la masa efectiva de un núcleo atómico, es menor que la suma de las masas de los "nucleones" que lo forman, considerados separados; ahora bien esta diferencia de masas, se llama "defecto de masa" del núcleo atómico. En otros términos, el "defecto de masa" de un núcleo atómico es la diferencia entre la masa que resultaría sumando todas las masas de todos los "nucleones" (protones y neutrones) considerados aislados, que componen el núcleo atómico, y la masa efectiva que tiene el núcleo atómico mismo.

A base de las consideraciones desarrolladas precedentemente, sobre la ley de equivalencia entre masa y energía y a base del resultado experimental del "defecto de masa", obtenido mediante el espectrógrafo de masa, estamos ahora en la posibilidad de contestar a la pregunta que nos habíamos puesto.

Fue este "defecto de masa" que permitió la creación y la existencia

en la naturaleza de los núcleos atómicos y, por consiguiente, la creación y la existencia de todos los cuerpos que componen el universo; por cuanto fue la energía equivalente a este "defecto de masa" que realizó la hazaña de ligar y unir, en un espacio de dimensiones tan extremadamente pequeñas como el de los núcleos atómicos, los "nucleones" (neutrones y protones) que constituyen los núcleos atómicos mismos.

Por consiguiente, la energía necesaria para la creación y la existencia de un núcleo atómico, fue suministrada por los "nucleones" mismos que constituyen el núcleo atómico, puesto que cada "nucleón" entrando en unión compacta con los otros nucleones, para formar un núcleo atómico, se privó, abandonó, una parte de su masa convirtiéndola en energía; y este proceso de transformación, de una fracción de masa, de cada "nucleón" en energía, obedece exactamente a la genial previsión einsteiniana de la ley de equivalencia entre masa y energía.

9. LAS PARTICULAS Y ANTIPARTICULAS ELEMENTALES

Sin embargo, todas estas consideraciones y noticias relacionadas con el núcleo atómico, no aparecen muy convenientes.

Hemos bosquejado, por cierto nada más que bosquejado, a las fuerzas nucleares y a la energía que son responsables de la ardua empresa que permite la íntima unión de los "nucleones", dando la posibilidad de la existencia de los núcleos atómicos y por consiguiente de la existencia de todos los cuerpos que componen el universo; mas, en verdad este bosquejo no nos satisface: y no nos satisface, no porque fue necesariamente sólo un bosquejo, sino que no nos satisface, porque percibimos (y con razón) que se trata de resultados que, aun siendo bajo ciertos aspectos, bastante satisfactorios, puesto que representan una descripción bastante completa de las conclusiones que manan de una segura realidad experimental, no revelan todavía nada en lo que se refiere a las causas y a las razones profundas y últimas de esta realidad experimental.

Con el objeto de penetrar valerosamente en la más íntima y esencial realidad del núcleo atómico, nació en estos últimos años, la física de las así llamadas partículas y antipartículas elementales. La física de hoy es sobre todo la física de las partículas y antipartículas elementales.

Es una física fascinante y embrujadora; y sus resultados teóricos y experimentales (que muy a menudo están afuera del marco de

nuestras posibilidades de interpretación) nos hacen quedar como aturridos, hasta quitarnos el aliento.

10. LAS CINCO FAMILIAS DE PARTICULAS ELEMENTALES Y LAS RESONANCIAS

Durante el desarrollo de este trabajo, hemos ya tomado conocimiento de tres partículas llamadas elementales: los "electrones", que forman la atmósfera electrónica del átomo y los "protones" y "neutrones", esto es, los "nucleones" que componen el núcleo atómico.

Sin embargo, como he dicho anteriormente, en estos últimos años, han sido descubiertas muchas otras partículas, llamadas elementales: algunas fueron previstas antes por los físicos teóricos y reveladas después por los físicos experimentales, y otras fueron reveladas antes por los físicos experimentales y explicada después por los físicos teóricos.

Así que en pocos años, se ha verificado un aumento sorprendente de estas partículas llamadas elementales, y el registro civil de los modernos laboratorios de física se ha enriquecido y se enriquece, siempre más de nuevos vecinos y de nuevos nombres.

El complejo y numeroso conjunto de las partículas que se conocen hoy día ha sido subdividido, por algunos autores en cinco familias, según las afinidades o semejanzas naturales características de cada partícula. Es decir, esta subdivisión, en familias, se ha hecho tomando en cuenta, para cada partícula:

- a) la carga eléctrica que eventualmente tiene;
- b) al movimiento a trompo que eventualmente experimenta;
- c) la masa más o menos grande que la caracteriza;
- d) la vida, extremadamente breve o extremadamente larga, durante la cual existe y se manifiesta, y
- e) la transmutación que experimenta, sea naturalmente o también artificialmente, como cuando resulta bombardeada de un modo violento, utilizando aquellas colosales máquinas aceleradoras que se han logrado hoy día en los más importantes centros de investigación que existen en el mundo.

Ahora bien a base de estas características, se pueden considerar actualmente cinco familias, que corresponden a una subdivisión que, a pesar de ser exclusivamente convencional, es, de todas maneras, bastante racional.

La primera familia está constituida por el *fotón* y el *gravitón*.

La segunda familia, que es la familia electrónica, está constituida por el *electrón* (que ya conocemos) y por el *neutrino del electrón*.

La tercera familia, que es la familia muónica, está constituida por el *muón* y el *neutrino del muón*.

La cuarta familia, que es la familia "mesónica" está constituida por los *mesones* π (positivo, negativo y neutro), por los *mesones* k (positivo y neutro) y por el *mesón* η (exclusivamente neutro).

Y en fin, la quinta y última familia, que es la familia bariónica, está constituida por los "nucleones" que son el *protón* y el *neutrón* (que ya conocemos por el *barión* λ (exclusivamente neutro) por los *bariones* σ (positivo, negativo y neutro) y por el *barión* Ω (exclusivamente negativo).

Después desde 1960 se abrió la puerta a una nueva oleada de partículas; pero la vida media de estas partículas es tan breve, tan extremadamente breve, que no pueden merecer, no pueden tener completamente el derecho de ser consideradas partículas en el verdadero sentido de la palabra; en efecto, estas "seudopartículas" de la vida ultracorta, se llaman *resonancias*.

Las resonancias (que al año actual de la ciencia, año 1968, son más o menos una centena, pero que seguramente aumentarán, y cuyos nombres son actualmente simples designios provisionales, que deberán reexaminarse posteriormente y que por lo tanto no creo oportuno señalar) tienen una vida media, tan breve, tan extremadamente breve que "nacen" y "mueren" recorriendo (a pesar de su enorme velocidad) un intervalo de espacio que es siempre bastante menor de las dimensiones de un átomo.

Por consiguiente, las "resonancias" nunca podrían "verse", nunca podrían "revelarse" directamente, porque, no pueden dejar ninguna traza apreciable, ninguna registración medible, en los aparatos de que dispone la física de hoy, para la revelación de las partículas elementales.

El hecho que las "resonancias" existen, o mejor dicho, el hecho que las "resonancias" son una realidad física, sobre la cual no podemos ni debemos tener ninguna duda, puede deducirse solamente mediante el estudio de los productos más duraderos que se obtienen por efecto de las transmutaciones que experimentan; o, más precisamente, mediante el estudio de los productos más duraderos de su "decaimiento".

II. CONSIDERACIONES SOBRE LAS LLAMADAS PARTICULAS ELEMENTALES Y LAS RESONANCIAS; PROCESOS DE "DECAIMIENTO", "CREACION" Y "ANIKUILACION"

Sin embargo, todas estas noticias sobre las llamadas "partículas elementales" y sobre las "resonancias" nos producen una sensación que es desconcierto y perturbaciones.

En efecto, surgen espontáneos muchos interrogativos a los cuales no parece tan fácil encontrar contestaciones satisfactorias.

¿Cómo puede ser, que todas estas partículas, que nosotros consideramos actualmente como elementales, esto es, últimas, sean tan numerosas?

¿No aparece este resultado de la física de hoy en contraposición con la probable y deseable simplicidad con que la naturaleza, maestra de orden y de armonía, debería resolver su vida fenoménica?

¿Toda esta complicación, corresponderá verdaderamente a una realidad física definitiva, o será más bien el resultado de una muestra provisional precaria y contingente imposibilidad actual de ir más allá, de penetrar más a fondo en el recóndito misterio de la materia?

El drama de estos interrogativos, es el drama de la física de hoy.

La fe en la simplicidad, que ha representado siempre la idea dominante en la investigación científica, durante todo el desarrollo de la historia de la ciencia, hace dudar bastante sobre la real y efectiva elementaridad de todas estas partículas llamadas elementales. Así que, a pesar que la física de hoy, en el campo de la estructura de la materia, sea la que ha esquemáticamente expuesto, yo creo que debemos esperar que en el futuro se tendrá la posibilidad de descubrir capas todavía más profundas y fundamentales de la materia que darán la posibilidad de una representación, de la materia misma, verdaderamente simple, definitiva y de carácter universal.

Si se hubiera preguntado a los físicos o a los químicos del comienzo de nuestro siglo, si el átomo podía considerarse como una partícula elemental, con toda probabilidad muchos de ellos habrían contestado de un modo afirmativo, porque al estado de los conocimientos de aquel tiempo 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 elementaridad, se transfirió a objetos

más pequeños; esto es al núcleo atómico y a los electrones superficiales del átomo.

Hoy también el núcleo atómico se ha revelado de naturaleza bastante compleja; así que, en verdad, me parece que se puede afirmar que a cada etapa de la ciencia, se llaman elementales simplemente aquellas partículas cuya estructura nos es desconocida.

Por otra parte, todas las numerosas (demasiado numerosas) partículas, que hemos indicado anteriormente y que hemos llamado elementales, no pueden, de ninguna manera, considerarse en el sentido democriteo; los átomos de Demócrito, de Dalton, y en general de la ciencia clásica, se consideraban inalterables y no podían ser ni creados ni destruidos; las partículas elementales de hoy se encuentran, en cambio, en un estado de potencial, continua modificación, variación y transmutación y además pueden ser creadas y destruidas.

Estos procesos que se denominan "decaimiento", "creación" y "aniquilación" de partículas, son en verdad bastante sorprendentes y extraños; sin embargo, la física experimental moderna nos permite revelar continuamente fenómenos de esta naturaleza, y nos lo permite debido a los maravillosos medios experimentales que se tienen a disposición hoy día y que van desde las enormes, colosales maquinarias aceleradoras de partículas que se encuentran en los más importantes centros de investigación, hasta los más delicados y sensibles equipos de observación y revelación de partículas, ya patrimonio de casi todos los laboratorios de física.

Por consiguiente (a pesar de las críticas hechas antes sobre la elementalidad de las llamadas partículas elementales) estos eventos deben considerarse como una realidad física irrefutable, así que no queda otro remedio que aceptarlos y buscar (con el esfuerzo de nuestra meditación animado por una inspirada y fecunda fantasía), de crear las estructuras matemáticas apropiadas para interpretarlos en la forma más satisfactoria posible.

Las investigaciones teóricas relacionadas con este tema son quizás las más fascinantes de la física actual. Y no sólo, son las más fascinantes, sino que son también las de más trascendental importancia, en cuanto tienen como objetivo el de explicar e interpretar fenómenos que (abarcando la estructura más profunda de la materia que al hombre haya podido hasta ahora explorar) constituyen, la que podría llamarse, la frontera actual de nuestros conocimientos en el estudio de la materia misma.

12. LAS ANTIPARTICULAS ELEMENTALES Y LAS CINCO ETAPAS PARA EL DESARROLLO DE SU ESTUDIO

Sin embargo hasta ahora hemos hablado de las partículas elementales. ¿Y las antipartículas elementales? ¿qué cosas son? ¿cómo son? ¿cuál fue el proceso, el desarrollo del pensamiento científico, que dio lugar a este revolucionario descubrimiento, cuya consecuencia es la posibilidad que, en el Universo, además de la materia, pueda existir naturalmente, o pueda construirse artificialmente la antimateria?

Tengo que decir, que contestar a todas estas preguntas no fue faena muy fácil, especialmente por el hecho que, dado el carácter de esta exposición, no podía utilizar algoritmo matemático alguno.

Hice, en efecto, innumerables tentativas, todas orientadas hacia el objetivo de redactar una exposición que fuera no sólo la más clara y sencilla posible, sino también suficientemente rigurosa y que expresara, más que todo, cual fue el revolucionario movimiento de ideas que se verificó en el pensamiento científico de estos últimos años, y que dio lugar a estos asombrosos descubrimientos.

Al fin llegué a la conclusión que, quizás, el método más satisfactorio era el de desarrollar el tema en cinco etapas; y precisamente: *Primera etapa*: exponer "grosso modo", las características de las antipartículas elementales con respecto a las partículas elementales correspondientes.

Segunda etapa: exponer en cambio, no "grosso modo", sino en la forma más completa posible (por ser éste, el aspecto más importante relacionado con este tema) el revolucionario movimiento de ideas que dio lugar a la sorprendente y al mismo tiempo inevitable previsión de la posible existencia de las antipartículas elementales.

Tercera etapa: exponer cómo se pudieron obtener y revelar experimentalmente estas antipartículas elementales que habían sido previstas por la teoría.

Cuarta etapa: exponer cómo desde la imagen del átomo, se puede llegar (por el descubrimiento de las antipartículas elementales) a una imagen del antiátomo;

Quinta y última etapa: exponer en cuáles condiciones, podría ser posible construir antimateria, mediante sus constituyentes más simples que son las antipartículas elementales y los antiátomos, del mismo modo que, en las mismas condiciones, sería posible construir materia, mediante sus constituyentes más simples que son las partículas elementales y los átomos.

13. PRIMERA ETAPA: CARACTERISTICAS DE LAS ANTIPARTICULAS ELEMENTALES CON RESPECTO A LAS PARTICULAS ELEMENTALES CORRESPONDIENTES

Empezamos con el desarrollo de la primera etapa. Una partícula elemental y su correspondiente antipartícula elemental, tienen generalmente la misma masa y se diferencian solamente por dos magnitudes características:

- a) por el signo de sus cargas eléctricas;
- b) por el sentido de sus momentos magnéticos intrínsecos.

El significado de la diferencia del signo de las cargas, es evidente: si, por ejemplo, una partícula elemental está cargada de una cantidad de electricidad de signo positivo, la antipartícula elemental correspondiente está cargada con la misma cantidad de electricidad, pero de signo negativo.

Menos evidente es el significado de la otra diferencia, es decir, la del sentido opuesto de los momentos magnéticos intrínsecos; y este significado será menos evidente por no decir decisivamente obscuro, hasta que no se esclarezca, no sólo qué cosa es el momento magnético intrínseco de una partícula, sino también por qué una partícula tiene un momento magnético intrínseco.

En primer lugar tengo que decir que generalmente las partículas y antipartículas elementales experimentan un eterno movimiento de rotación sobre sí mismas a guisa de trompo. Este movimiento mecánico se define mediante una magnitud física que es el momento de rotación y que, en el caso de las partículas y antipartículas elementales, toma el nombre de "spin".

Ahora bien, este movimiento de rotación sobre sí misma que experimenta una partícula cargada de electricidad, corresponde a un movimiento de rotación de todas las cargas eléctricas infinitesimales que componen la carga eléctrica total elemental de la partícula misma; pero este movimiento rotatorio de cargas eléctricas infinitesimales, no es otra cosa que un conjunto de corrientes eléctricas que como tales, producen un campo magnético. En otras palabras, la partícula, por efecto de su movimiento de rotación mecánica, esto es, por efecto de su "spin", resulta asimilable a un imán, que, en este caso, es extremadamente pequeño; un microscópico imán. Ahora bien, la magnitud física que caracteriza un imán se llama precisamente "momento magnético intrínseco" del imán. He aquí la razón porque

toda partícula cargada de electricidad está caracterizada por una magnitud física bien determinada y precisa que es su "momento magnético intrínseco".

Ahora resulta clara también la segunda diferencia que aparecía tan misteriosa: una partícula elemental y su correspondiente antipartícula elemental, puesto que tienen cargas eléctricas de signo contrario, si por ejemplo sus "spin" (momentos mecánicos de rotación) tienen el mismo sentido, sus "momentos magnéticos intrínsecos" resultarán en cambio de sentido opuesto.

En otros términos, una partícula elemental y su correspondiente antipartícula elemental serán asimilables a dos microscópicos imanes cuyos polos "norte" y "sur" resultarán invertidos.

Por ejemplo, consideremos como partícula elemental el electrón. Puesto que el electrón tiene carga negativa, su "spin" y "su momento magnético intrínseco" tienen sentido opuesto; en cambio, la antipartícula elemental correspondiente al electrón, que es el positrón, puesto que tiene carga positiva, su "spin" y su "momento magnético intrínseco" tendrán el mismo sentido.

En otras palabras, el electrón y el positrón tienen la misma masa, pero tienen cargas iguales y de sentido contrario y sus "momentos magnéticos intrínsecos" son iguales y de sentido opuesto.

Sin embargo, hasta ahora hemos hablado de las partículas y antipartículas elementales cargadas de electricidad y hemos visto (me parece en forma suficientemente clara) que tienen cargas de signo contrario y "momentos magnéticos intrínsecos" opuestos, es decir se comportan como microscópicos imanes que tienen sus polos "norte" y "sur" invertidos.

Para las partículas neutras el problema es más delicado.

Surge en efecto la pregunta: ¿Si una partícula es neutra, esto es, tiene carga nula, aun si tiene "spin", aún si experimenta un movimiento rotatorio a guisa de trompo, cómo puede tener un "momento magnético intrínseco", cómo puede considerarse como un microscópico imán?

Por consiguiente, ¿cómo se podrá diferenciar, distinguir una partícula elemental neutra de su correspondiente antipartícula elemental que también será neutra?

En realidad una partícula puede ser eléctricamente neutra sin ser exenta de cargas; al contrario, puede tener cargas (y efectivamente las tiene): solamente que estas cargas siendo en partes positivas y en partes negativas dan lugar a una carga resultante nula.

En base a esto se comprende que si la partícula, a pesar de ser neutra, tiene cargas iguales y de signo contrario que se anulan, por su movimiento a trompo, puede tener lo mismo (y efectivamente lo tiene) un "momento magnético intrínseco" no nulo, que resulta por el movimiento de las cargas distribuidas en forma heterogénea.

Así que, también partículas y antipartículas elementales neutras, pueden distinguirse y se distinguen por tener sus "momentos magnéticos intrínsecos" opuestos.

Caso típico es el del neutrón y el del antineutrón.

Las dos partículas son neutras, pero en el neutrón el "spin" y al "momento magnético intrínseco" tienen signo contrario, en cambio en el antineutrón el "spin" y el "momento magnético intrínseco" tienen el mismo signo.

14. SEGUNDA ETAPA: MOVIMIENTO DE IDEAS QUE DIO LUGAR A LA PREVISION DE LA POSIBLE EXISTENCIA DE LAS ANTIPARTICULAS ELEMENTALES

Ahora que hemos señalado "grosso modo" qué diferencias tienen las partículas elementales con respecto a las antipartículas elementales correspondientes, vamos a desarrollar en la forma más completa posible la segunda etapa que, como dije, no sólo es la más importante, sino también es sobremanera interesante y sugestiva en cuanto corresponde al desarrollo del revolucionario movimiento de ideas que dio lugar a la sorprendente y al mismo tiempo, inevitable previsión de la posible existencia de las antipartículas elementales.

Como señalé al comienzo de este trabajo, fue el gran físico francés Luis De Broglie, que, en el año 1925 elaboró su audaz hipótesis que consiste en la previsión (luego confirmada experimentalmente) que un electrón en movimiento debe tener una onda asociada y por consiguiente debe comportarse también como onda.

Un año después el notable físico austriaco Schrödinger, partiendo de las fórmulas de la mecánica newtoniana y a base de la concepción de De Broglie, elaboró, en forma magistral, una nueva mecánica, que es la mecánica ondulatoria, y que estaba a la mecánica clásica como la óptica física estaba a la óptica geométrica.

En esta nueva mecánica cada corpúsculo resulta representado por una expresión matemática que se llama función de onda del corpúsculo y se simboliza mediante la letra ψ .

La mecánica ondulatoria, trastornó completamente nuestro modo de pensar. Las teorías de la relatividad y de los cuantos nos habían

obligado a revisar los conceptos de espacio y tiempo y el concepto de la continuidad de la energía, la mecánica ondulatoria puso en tela de juicio nada menos que el determinismo de la mecánica newtoniana.

En efecto, una de las consecuencias de la mecánica ondulatoria es la llamada "relación de incertidumbre" que establece cuantitativamente la indeterminación de los valores que definen la posición y la velocidad de un corpúsculo en un instante dado.

En otras palabras, "la relación de incertidumbre" establece que es imposible conocer (en un instante dado) contemporáneamente, la posición exacta y la velocidad exacta de un corpúsculo; y esta imposibilidad no es debida a una contingente y provisoria falta de medios experimentales suficientemente adelantados y precisos, sino que a un principio general ínsito en la naturaleza.

En determinismo exige que un corpúsculo de energía dada esté, en un instante determinado, localizado en el espacio; la mecánica ondulatoria, con su interpretación probabilística de la onda ψ , niega esta posibilidad, por consiguiente introduce el indeterminismo en la física; y es precisamente el pasaje del determinismo al indeterminismo, la característica esencial del pasaje de la mecánica clásica a la mecánica ondulatoria.

Así que el año 1926, año en que Schrödinger elaboró su nueva mecánica, debe considerarse como un año crucial para la física, por cuanto establece una neta separación entre dos modos completamente diferentes en el planteamiento del estudio de la naturaleza.

Ahora bien, como hemos visto anteriormente la mecánica ondulatoria interpretaba en forma bastante satisfactoria el proceso de la emisión de las radiaciones luminosas emitidas por los átomos cuando se encuentran convenientemente excitados, y justificaba también en forma bastante satisfactoria la relación numérica de Balmer-Ritz que, como sabemos, logra ordenar todo el conjunto de estas radiaciones luminosas.

Sin embargo, esta nueva mecánica, fallaba, como también fallaba la vieja teoría de Bohr, en la interpretación de un fenómeno especial relacionado con la modificación que experimentan las rayas espectrales cuando, sobre el átomo excitado, actúa un campo magnético.

Me refiero al llamado "efecto Zeeman anómalo".

No creo necesario, ni oportuno explicar en qué consiste el "efecto Zeeman anómalo", basta decir que este efecto puede interpretarse solamente admitiendo un movimiento suplementario de los electrones

de la atmósfera electrónica del átomo; un movimiento de rotación sobre sí mismos a guisa de trompo, es decir el "spin".

La mecánica ondulatoria de Schrödinger, no contenía el "spin" del electrón, y la ecuación de onda definía la función ψ como una cantidad escalar, esto es, como una magnitud sin orientación alguna.

Pauli, trató de introducir el "spin" en la mecánica ondulatoria y con este objeto consideró una función de onda ψ con dos componentes, correspondientes a dos posibles orientaciones del "spin".

Se trataba de un progreso, de un adelanto sustancial con respecto a la teoría de Schrödinger; sin embargo la teoría Pauli, no era relativística.

Fue uno de los más grandes físicos teóricos de nuestro siglo, el inglés Dirac que se impuso la faena de establecer la forma relativística de la ecuación de Schrödinger.

En la ecuación de propagación de Schrödinger, junto con la función asociada al electrón, aparece la energía w del electrón mismo.

Ahora bien, en la mecánica no relativística la energía w de una partícula tiene valores que son siempre y exclusivamente positivos; en la mecánica relativística, la energía w puede tener valores sean positivos como negativos.

¡Valores negativos para la energía de una partícula!

¿No es esto desconcertante?

Pero, ¿qué quiere decir, qué significa, por ejemplo, valores negativos de la energía de un electrón?

Esta es la dramática pregunta que se puso Dirac y para tratar de contestarla no le quedó otro remedio que utilizar aquel método que Galileo puso como base de toda investigación científica y que José Ortega y Gasset sintetizó en aquella forma tan hermosa que expuse anteriormente y que, entre otras decía: "Para descubrir la realidad, es preciso que retiremos por un momento los hechos de en torno nuestro y nos quedemos sólo con nuestra mente. Entonces por nuestra propia cuenta y riesgo, imaginamos una realidad, fabricamos una realidad imaginaria, puro invento nuestro: luego, siguiendo en la soledad de nuestro íntimo imaginar, hallamos qué aspecto, qué figuras visibles, en suma qué hechos produciría esa realidad imaginaria". Esto es lo que hizo Dirac. En efecto en su memorable "Nota" que presentó el 6 de diciembre de 1929 a la "Sociedad Real de Londres", cuyo título es "Teoría de los electrones y de los protones", escribe: "Un electrón, en un estado de energía negativa, es un objeto completamente extraño a nuestra experiencia, pero que podemos, mientras tanto, estudiar

desde el punto de vista teórico; nosotros podemos, en particular, prever su movimiento en un campo electromagnético cualquiera.

El resultado del cálculo es que un electrón que tiene energía negativa viene desviado, por el campo, exactamente como lo sería un electrón que tiene energía positiva, siempre que tuviera una carga eléctrica positiva $+e$.

Esto es lo que escribe textualmente Dirac en la primera parte de su "Nota"; pero sucesivamente se equivoca, porque en la segunda parte de su "Nota", formula la hipótesis que este misterioso corpúsculo de carga $+e$ y con energía negativa, puede ser asimilado a un protón.

A este propósito creo interesante poner de relieve que Dirac, después de haber hecho las hipótesis, las consideraciones y los razonamientos más audaces, cuando debió establecer quién era este corpúsculo misterioso que nacía de su teoría, frena el proceso que se desarrollaba en su espíritu, detiene su admirable fantasía creadora, y se equivoca, integrando en su teoría el único corpúsculo a carga positiva $+e$ hasta entonces conocido, esto es, el protón.

¿No habría podido el gran teórico llegar más allá e imaginar y suponer inmediatamente la existencia de una nueva partícula, el anti-electrón, con la misma masa del electrón y con carga $+e$? Esto parece demostrar cómo el teórico por genial que sea, cuando construye un sistema sobremanera abstracto, sienta como una imperiosa necesidad de encontrar, lo más pronto posible, el contacto con la realidad, el contacto con la experiencia; así que cuando la carga $+e$ se presentó en su hermosa teoría, Dirac pensó inmediatamente en la única partícula de carga $+e$ hasta entonces conocida, esto es el protón.

Sin embargo, continuando en su tormentosa meditación, tuvo que darse cuenta de las dificultades que nacían por la gran diferencia de masa que hay entre el protón y el electrón.

Así que el 29 de mayo de 1931 en una segunda "Nota", Dirac daba a conocer sus ulteriores investigaciones sobre el tema y expresaba que la misteriosa partícula de carga $+e$ que nacía de su teoría debía tener la misma masa del electrón. Dirac propuso para esta eventual partícula, el nombre de "antielectrón" poniendo en evidencia además que su descubrimiento y observación real implicaban (con toda probabilidad) notables dificultades, debido a la enorme facilidad de recombinación y consiguiente aniquilación del antielectrón con los electrones negativos ordinarios, tan abundantes en nuestro mundo físico.

En esa misma "Nota", del año 1931, encontramos todavía más; en efecto Dirac se expresa textualmente con estas palabras: "probablemente también los protones tendrán sus estados de energía negativa posibles; es probable por consiguiente, también la existencia de otra nueva partícula que puede llamarse "antiprotón".

Como veremos, el antiprotón fue descubierto y revelado en el año 1955, así que 24 años antes de su descubrimiento y revelación, Dirac ya lo había previsto.

Típico, magnífico ejemplo del proceso de que aprovecha la ciencia para tratar de alcanzar el conocimiento; para tratar de encontrar la verdad.

Muchas pueden ser las definiciones de ciencia, sin embargo para el físico, la ciencia es, sobre todo, la búsqueda y el estudio del orden, esto es, de las leyes que rigen a los hechos que se verifican fuera de nosotros. Por consiguiente, la ciencia, para el físico, es esencialmente objetiva, porque la naturaleza, es como es, y se comporta como se comporta, a su manera, como ha sido creada. Sin embargo el orden que está fuera de nosotros, es, muy a menudo, imaginado, ideado, previsto por nosotros, esto es maná de nuestro espíritu, lo que significa que estaba ya latente, como posible verdad, en nuestra mente.

Los descubrimientos más importantes, básicos y fundamentales, que caracterizan las etapas más significativas del aventuroso viaje a través del desarrollo de toda la historia de la física, nacieron en los espíritus de hombres como Galileo, Newton, Maxwell, Planck y Einstein, antes, a veces mucho antes, que las pruebas experimentales (que por la verdad representan el definitivo inexorable veredicto final) pudieran realizarse.

El gran físico Pauli, expresa este concepto en forma magistral.

En efecto, en un célebre discurso hecho en el año 1955, y que tuvo resonancia mundial, Pauli termina con estas palabras: "Nosotros confiamos que el espíritu humano, será siempre capaz de producir nuevas ideas que, de alguna manera, se apliquen a los objetos y a los hechos que nos rodean y que nosotros percibimos con nuestra mente como manifestaciones de materia y de energía en el sentido de la física; porque sea el espíritu humano que está en nosotros, como los objetos y los hechos percibidos que están fuera de nosotros, se encogen en el mismo orden cósmico".

15. TERCERA ETAPA: COMO SE PUDIERON OBTENER Y REVELAR EXPERIMENTALMENTE LAS ANTIPARTICULAS ELEMENTALES PREVISTAS POR LA TEORIA

Hemos expuesto el revolucionario movimiento de ideas que dio lugar a la sorprendente y al mismo tiempo inevitable previsión de la posible existencia de las antipartículas elementales. Vamos ahora a desarrollar la tercera etapa. Es decir, vamos a exponer cómo se pudieron obtener y revelar experimentalmente estas antipartículas elementales que habían sido previstas por la teoría.

La primera partícula elemental que se descubrió fue el antielectrón o electrón positivo, que sucesivamente tomó el nombre de positrón.

En efecto fue en el año 1932, es decir solamente un año después de la publicación de la segunda "Nota" de Dirac, que Anderson y Millican primero y Blackett y Occhialini después descubrieron que en las explosiones atómicas provocadas por los rayos cósmicos aparecían partículas que se comportaban exactamente como electrones positivos. Estas partículas, no sólo demostraban tener la misma masa del electrón, sino que, bajo la acción de un campo magnético experimentaban desviaciones contrarias a las experimentadas por los electrones indicando que tenían carga positiva, y, además se aniquilaban con el contacto de la materia produciendo una radiación.

En otros términos estos cuatro físicos descubrieron partículas que tenían exactamente las propiedades que debían tener los antielectrones previstos por Dirac.

Así, que, desde el año 1932, al antielectrón o electrón positivo o positrón, podía considerársele con absoluta certeza, como un nuevo ente físico real, y podía con pleno derecho entrar (por haber superado las pruebas requeridas por la teoría y la experiencia) como actor protagonista en el aventuroso drama de la física moderna.

Es necesario esperar hasta el año 1955 para obtener experimentalmente el antiprotón.

El bevatrón de Berkeley es una máquina colosal aceleradora de partículas, que acelerar protones hasta una energía de 6.2 GeV, es decir 6.200 MeV, o sea 6.200 millones de electrones-volt.

Ahora bien, la teoría prevee la posibilidad de producir antiprotones utilizando precisamente energías de este orden, así que en el año 1955, en Berkeley se tenía la máquina que podía fabricar antiprotones.

Fueron dos físicos, el italiano Segré y el norteamericano Cham-

berlain que, con un numeroso grupo de colaboradores, lograron realizar la hazaña.

Producir una nueva partícula es una cosa, revelarla e identificarla poniendo en evidencia sus propiedades características, es otra cosa.

Sin la revelación, sin la identificación, el físico no ha probado nada.

Por consiguiente, junto al bevatrón había uno de los conjuntos más delicados e ingeniosos de la física experimental de hoy formado por numerosos equipos unidos por circuitos electrónicos extremadamente complejos, cuyo objeto era el de señalar el pesaje eventual de antiprotones.

A la salida del bevatrón había un blanco de cobre que interceptaba el haz de protones que salían del bevatrón con enorme velocidad y energía. Estos protones bombardeando los nucleones del blanco de cobre producían las reacciones nucleares que daban lugar a haces de partículas cargadas de electricidad y neutras, entre las cuales se trataba de descubrir los antiprotones.

Una preliminar desviación mediante un campo magnético, permitía separar las partículas negativas de las otras; sin embargo estas partículas negativas comprendían, además de los antiprotones también un número notable de mesones π negativos.

El problema consistía entonces en separar los antiprotones de los mesones π negativos.

Para este objeto era necesario aprovechar de las diferencias que caracterizaban estas dos partículas y entre otras la diferencia de sus masas, puesto que la masa del mesón π negativo es 7 veces más pequeña de la del antiprotón que es igual a la del protón.

Dado el carácter de esta exposición, no me es posible (como sería deseable) desarrollar una relación por extenso de las complejas y difíciles técnicas experimentales utilizadas para obtener la separación de los antiprotones y de los mesones π negativos; baste decir que mediante un sistema de lentes eléctricos y magnéticos y un conjunto de especiales aparato reveladores de partículas, llamados contadores a centelleo, los físicos de Berkeley lograron el resultado esperado, y el 24 de octubre de 1955 podían comunicar al mundo científico: "hasta hoy 60 antiprotones han sido revelados e identificados". Mediante una técnica experimental sobremanera avanzada, sea en lo colosal, como en lo refinado y con un gasto quizás del orden de algunos miles de millones de dólares para cada antiprotón, el antiprotón había sido creado.

Su existencia había sido comprobada mediante un dispositivo electrónico muy complicado; se había visto mediante impulsos de contadores a centelleo, sin embargo se pretendió todavía más de este nuevo personaje de tan trascendental importancia para la física de hoy, se le obligó de manifestarse sobre las placas fotográficas nucleares, donde su trayectoria se materializa y allí se observó entonces su aniquilación.

En efecto, 15 de marzo de 1956, en una placa expuesta a un haz de protones, extremadamente acelerados por el bevatrón de Berkeley; se vio una primera estrella que correspondía a las trazas de las partículas creadas por el choque de un protón del bevatrón con un núcleo pesado de la placa.

Una de estas trazas fue identificada como la traza de un antiprotón.

Ahora bien, en la misma placa se vio que la traza de este antiprotón, llegaba a una segunda estrella a 8 ramas.

Esta segunda estrella a 8 ramas era la demostración experimental de la aniquilación de este antiprotón.

Así que, con la aniquilación del antiprotón se tuvo una prueba suplementaria de la realidad de su creación.

Más tarde se pudo poner en evidencia el antineutrón; y se puso en evidencia mediante su aniquilación.

El neutrón es una partícula difícilmente revelable.

Debido a la falta de carga, no tiene las propiedades ionizantes que tienen, por ejemplo, los electrones y los protones, y además no sólo, no deja ninguna traza en las placas nucleares, sino que también atraviesa los contadores a centelleo con una ínfima probabilidad de producir una ionización suficiente para revelarlo.

Por el contrario, la aniquilación de un antineutrón, que se verifica por el choque con un neutrón, libera una notable cantidad de energía que es equivalente (en el sentido einsteiniano) a las masas de las dos partículas; y esta notable cantidad de energía liberada por la aniquilación es un evento observable.

Aquí también no me es posible desarrollar los dispositivos experimentales utilizados para revelar la aniquilación de un antineutrón cuando choca con un neutrón; baste decir que la producción de antineutrones se realiza partiendo de antiprotones.

En efecto un antiprotón que choca con un protón, cede su carga negativa al protón, produciendo así un par "neutrón-antineutrón".

El antineutrón viene separado del neutrón y enviado a un contador especial, el contador de Cerenkov, donde se aniquila por el choque

con un neutrón. La aniquilación, que se verifica en el contador de Cerenkov, es allí revelable y medible.

16. CUARTA ETAPA: DESDE LA IMAGEN DEL ATOMO A LA IMAGEN DEL ANTIATOMO

Después de haber expuesto en forma necesariamente incompleta, como se pudieron obtener y revelar experimentalmente las tres antipartículas más importantes, o sea, el positrón, el antiprotón y el antineutrón, vamos a desarrollar la cuarta etapa de nuestro aventuroso viaje; es decir vamos a exponer como, desde la imagen del átomo, se puede llegar (por el descubrimiento de las antipartículas elementales) a una imagen del antiátomo.

Antes de todo es necesario anticipar que las investigaciones relacionadas con las partículas y antipartículas elementales, han permitido obtener una imagen del núcleo atómico mucho más satisfactoria de la que se tenía antes.

Por consiguiente creo necesario exponer antes esta nueva imagen del núcleo atómico, para tener, añadiendo la atmósfera electrónica la correspondiente imagen del átomo, que nos conducirá a la imagen del antiátomo.

Como hemos visto, los núcleos están formados por "nucleones", es decir, por "protones" (partículas materiales con carga positiva) y por "neutrones" (partículas materiales sin carga).

Hemos visto también algunas de las características de las fuerzas nucleares cuya tarea es la de mantener unidas, en forma sobremana compacta, los nucleones, que son, o neutros (los neutrones) o cargados de electricidad del mismo signo (los protones positivos). Hemos visto además el origen de la energía necesaria para que el núcleo haya podido formarse y pueda subsistir.

Ahora bien, como un tiempo se habían elaborado modelos para la atmósfera electrónica del átomo, como las nítidas y elegantes órbitas electrónicas del simpático y diminuto sistema solar de Rutherford —Bohr o como las borrosas e inelegantes ondas estacionarias del menos simpático, pero mucho más racional, átomo de Schrödinger— De Broglie, ahora se ha elaborado también un nuevo modelo del núcleo atómico.

En este nuevo modelo (considerado actualmente bastante satisfactorio) cada nucleón del núcleo atómico (es decir, cada protón y cada neutrón) estaría formado por un centro extremadamente denso

y repulsivo, rodeado por una nube de mesones π , positivos, negativos y neutros ($\pi +$, $\pi -$ y $\pi \Omega$). Estos mesones, por efecto de una especial interacción de carga llamada interacción electromagnética, guiada y definida por una teoría, denominada teoría cuántica de los campos, serían los responsables de la coesión del núcleo atómico.

Después de estas premisas, que permiten obtener una imagen bastante satisfactoria del núcleo atómico y, por consiguiente, añadiendo la atmósfera electrónica, una imagen también bastante satisfactoria del átomo, por el descubrimiento de las antipartículas elementales, se puede (como dije antes) llegar a una imagen del antiátomo.

En efecto, surge espontánea la idea de una imagen del antiátomo cuya estructura debería tener la arquitectura siguiente.

Al centro tendríamos al antinúcleo atómico, formado por los antinucleones, es decir, los antiprotones (con carga eléctrica negativa) y los antineutrones (sin carga eléctrica). Estos antinucleones estarían ligados y soldados por la interacción de canje de los mesones π positivos, negativos y neutros ($\pi +$, $\pi -$ y $\pi \Omega$) permitiendo así la existencia del antinúcleo atómico. Alrededor de este antinúcleo que resultaría cargado negativamente, y, a distancias considerables, relativamente enormes, en relación a las extremadamente pequeñas dimensiones del antinúcleo, se encontrarían los antielectrones o positrones, cargados positivamente, cuyo conjunto formaría la atmósfera positrónica.

En otras palabras, el antiátomo estaría formado por un antinúcleo central cargado negativamente, rodeado por una atmósfera de cargas positivas formada por positrones.

Sin embargo, este antiátomo, este reflejo del átomo ¿corresponderá a una realidad?

En otros términos ¿la antimateria podrá existir?

La respuesta a esta pregunta, corresponde precisamente a la quinta y última etapa de nuestro desarrollo.

17. QUINTA ETAPA: CONSTRUCCION DE ANTIMATERIA MEDIANTE LAS ANTIPARTICULAS ELEMENTALES

Un medio para averiguar si la antimateria existe, o, por lo menos, si la antimateria puede existir, sería el de tratar de creer (o mejor dicho) de construir antimateria.

El proceso apropiado para la construcción de antimateria sería muy probablemente, semejante a aquel apropiado para la construcción

de materia partiendo de sus constituyentes más simples que son los protones, neutrones y electrones o también los protones y electrones.

Por consiguiente aparece oportuno establecer, en primer lugar, como sería el proceso apropiado para construir materia, porque la comprensión de este proceso nos facilitará, seguramente, la comprensión del proceso apropiado para construir antimateria.

La creación, o mejor dicho la construcción de materia, es faena bastante ardua. En efecto para esta hazaña se necesita de partida de una temperatura considerable, mejor dicho enorme y que no podemos disponer con mucha facilidad.

Por ejemplo, para construir un núcleo de Helio, no basta disponer de dos protones y de dos neutrones, o también de cuatro protones y dos electrones; es necesario que se realice su unión, su fusión y esto requiere de una temperatura del orden de aquella que reina en el interno del Sol, esto es, de algunos millones de grados.

Nosotros disponemos actualmente solamente de la explosión atómica para obtener temperaturas tan elevadas para permitir la fusión de nucleones; y (como es sabido) es precisamente este el principio de la bomba H.

En estos últimos años se han realizado y se están realizando investigaciones para producir, en laboratorio, temperaturas de algunos millones de grados con el objeto de estudiar experimentalmente, en forma sistemática, las reacciones de fusión. Parece que se han obtenido ya resultados importantes, de modo que es posible que en el futuro, la energía nuclear de fusión pueda hacer competencia a la energía nuclear de fisión ya utilizada en la técnica moderna mediante los reactores nucleares.

Sin embargo no es fácil hacer previsiones en propósito, porque entre otros, la bibliografía relacionada con estas investigaciones es extremadamente escasa.

Ahora bien, hemos visto cómo (a pesar de las dificultades mencionadas) podría construirse la materia a partir de sus elementos constitutivos; ¿podrá también la antimateria construirse del mismo modo?

Si un antiprotón negativo llega a ligarse con un electrón positivo, tendríamos sin duda alguna la más simple imagen del antiátomo, pero, ¿qué haremos con este antihidrógeno?

Nuestro mundo terrestre, nuestros laboratorios donde realizamos nuestras investigaciones, están hechos de materia; y nosotros sabemos

que la propiedad fundamental de las antipartículas, es aquella de aniquilarse al contacto con las partículas hermanas.

¿Cómo hacer entonces, para que el electrón positivo de este antihidrógeno recién construido no encuentre uno de los innumerables electrones negativos que hay en la materia ordinaria?

¿Cómo proteger nuestro antihidrógeno? ¿Cómo defenderlo para que pueda sobrevivir, para que podamos realizar después a partir de él, la síntesis del antihelio?

En otras palabras, ¿cómo experimentar con la antimateria?

No parece muy fácil contestar a todas estas preguntas.

Lo que aparece como indispensable, es continuar con las fascinantes investigaciones sobre las partículas y antipartículas elementales, porque solamente en esta forma podremos llegar a comprender mejor a la todavía bastante oscura, estructura de la materia; y solamente después de una comprensión mejor de la estructura de la materia, podremos (sin pecar de excesiva imaginación) vislumbrar la estructura de la antimateria.

De todas maneras, al estado actual de nuestros conocimientos, esta eventual antimateria puede como hemos visto anteriormente considerarse como construida del mismo modo de la materia, solamente que sus constituyentes serían las antipartículas elementales en vez de ser las partículas elementales.

Por otra parte no es absurdo imaginar que algunas galaxias, o algunas estrellas estén compuestas de antimateria en vez de materia; eso sí que la coexistencia en un mismo lugar de los dos tipos de materia es (por lo menos al estado actual de nuestros conocimientos) una hipótesis absolutamente irrazonable.

18. CONSIDERACIONES FINALES

Un vasto campo se abre frente a nosotros y los físicos como decía Thomson y como se puede repetir hoy día, no corren riesgo alguno de quedar cesantes.

Las investigaciones sobre las nuevas partículas y antipartículas se encuentran todavía en su comienzo; ellas deberán continuar, porque solamente así podrá iluminarse de una nueva luz el problema de la estructura de estos entes; estructura actualmente escondida por no decir disfrazada por el uso exclusivo del formalismo abstracto de la función de onda ψ .

He dicho anteriormente, y no creo haberme equivocado mucho,

que se llaman elementales simplemente aquellas partículas o antipartículas de las cuales no se conoce la estructura; ahora bien, como se logró con el átomo, ¿se podrá también romper, despedazar, destriزار por ejemplo un electrón, de modo que este tan esencial e importante componente de nuestro universo abra a los físicos los secretos de su arquitectura? Por la verdad siento aparecer tan cruel con el electrón, aún más, que tengo que reconocer que hay pocos corpúsculos que tengan tantas y buenas cualidades como él; debido a su masa casi despreciable está prácticamente casi exento de inercia, por consiguiente con una mansedumbre y apacibilidad verdaderamente encomiables ejecuta fielmente los más refinados procesos, que se le ordenan; obedece disciplinadamente a las más variadas acciones, de modo que se ha dejado utilizar para innumerables aplicaciones que lo han transformado en uno de los personajes más influyentes de la técnica moderna. Sin embargo, por el contrario, con una malicia por nada encomiable, oculta su eventual estructura y no quiere que se sepa cómo está hecho. Es por esto que a pesar de la simpatía que deberíamos tener por él, no nos queda otro remedio que esperar de encontrar la manera de romperlo, despedazarlo y destrizarlo. No sé si esto será posible; sin embargo podemos estar seguros, yo por lo menos estoy absolutamente seguro, que si esta hazaña fuera realizable, muchos enigmas resultarían esclarecidos.

Hemos llegado así en forma muy somera, incompleta y solamente conceptual, informativa y cualitativa a la que podría llamarse la frontera de nuestros conocimientos en el estudio de las partículas y antipartículas elementales; estudio que conduce a vislumbrar la asombrosa posibilidad que en la naturaleza además del átomo pueda existir también al antiátomo, y por consiguiente además de la materia pueda existir la antimateria.

Naturalmente se trata de una frontera en movimiento, de una frontera fluida, de una frontera que podrá consolidarse solamente con el aporte de nuevos descubrimientos teóricos y experimentales apropiados para alcanzar una verdadera y satisfactoria teoría del núcleo; porque sabemos servirnos del núcleo, sabemos explotarlo, sabemos aprovechar de su extraordinaria energía (a veces también para fines bárbaros y homicidas) pero no sabemos, en verdad, cómo está hecho.

Y más allá de esta frontera, habrán otras y otras más, porque este es el inexorable destino de la física puesto que la conquista de nuevos descubrimientos ampliando el área del conocimiento, amplía también

el área de la faja adyacente, de las cosas desconocidas, alejando en vez de acercar en el hombre la ilusión de alcanzar al incanzable dominio absoluto y definitivo de la verdad.

Eterna tormentosa vicisitud del saber humano.

Los límites de la física retroceden como perturbados por un inocente y al mismo tiempo malicioso pudor cuando el hombre, con la audacia de su fantasía creadora, y con el tormento de su meditación trata de empujar demasiado adelante su mirada escudriñadora.

En la física no hay reposo; no existen etapas donde descansar y la generación que nace después de haber aprendido lo que la generación pasada ha descubierto, discutido y elaborado, debe proseguir el camino, ir hacia adelante, siempre más adelante con voluntad, abnegación y sobre todo amor.

En el desarrollo de este fascinante tema "Materia y Antimateria" hemos visto cómo cayeron teorías y cómo surgieron otras; hemos visto cómo este proceso del desarrollo del pensamiento científico que a veces adquirió aspectos que se podrían definir dramáticos, sea inevitable e inexorable porque solamente modificando sin prejuicio alguno, nuestras interpretaciones de los hechos ya conocidos, podemos interpretar también los hechos que sucesivamente se descubren y que las viejas teorías no están en la posibilidad de interpretar.

Sin embargo, no podemos amargarnos, por el contrario, debemos alegrarnos, si una teoría física, por hermosa, elegante y atrayente que sea y que nosotros, especialmente, nosotros los viejos físicos, hemos aprendido a querer, cae, si otra más vital y más general surge para destruirla y reemplazarla.

No debemos amargarnos, por el contrario, debemos alegrarnos de esta imperecedera juventud de la física.