

Dr. Erich Paul Hellmaier K.

Fundamentos físicos de la energía atómica y la desintegración del átomo



UANDO Demócrito y Leucipo, más de 2,000 años atrás, sorprendieron a sus contemporáneos con la original idea del átomo, elemento hipotético e indivisible de la materia, no sospecharon siquiera el alcance que tendría este concepto, transformado y modernizado, eso sí, para la física de nuestros días.

Ya en el siglo pasado constituyó un triunfo para la física molecular la idea de suponer a la materia constituida por moléculas y átomos. Esta disciplina, tal vez la mejor sentada de la física clásica, considera los átomos o las moléculas como partículas diminutas, de forma esférica, distribuidas uniformemente en el espacio y moviéndose según las leyes del azar. En tal vaivén de movimiento las diminutas esferas están chocando a cada rato entre sí y contra las moléculas circundantes tal vez de un recipiente, entregando o recibiendo en cada choque cierta cantidad de energía. Aplicando a este intercambio energético el raciocinio del cálculo de probabilidades, la física molecular deduce la presión ejercida por los gases, el calor específico, la conductibilidad calorífica, la viscosidad y otras características de las diversas sustancias, cuya medición está al alcance de los experimentos. La concordancia entre teoría y experimen-

to no es solamente satisfactoria sino muy superior a la alcanzada por otras ramas de la física clásica. Como ejemplo cito sólo la velocidad del movimiento molecular como resultado teórico en un comienzo, pero confirmado, hace sólo 25 años, en un ingenioso experimento ideado por *Stern*. Tales éxitos de la física molecular refuerzan nuestra confianza también respecto a resultados numéricos que escapan a la observación directa, como es por ejemplo el tamaño de los átomos. La física molecular nos indica hasta las dimensiones de estas partículas pequeñísimas dándonos por ejemplo para el diámetro del átomo de hidrógeno el valor de un cienmillonésimo de cm.

Pero no sólo la materia se compone de átomos. Así, *Faraday* había encontrado que siempre se necesita la misma cantidad de masa eléctrica, o mejor dicho de carga eléctrica, para depositar en un electrodo mediante un proceso electrolítico tantos gramos de un elemento monovalente como peso atómico tenga. Esta ley de *Faraday* junto con los conceptos de la física molecular condujeron a *Helmholtz* a la conclusión, de que también la electricidad posee estructura atómica. Es decir cualquier carga eléctrica que observemos debe componerse de un múltiplo entero de una carga elemental, que se calcula en 4 diezmillonésimos de la unidad electrostática. En los tubos de descarga se puede observar realmente este átomo, o como lo llamamos hoy en día, este cuanto eléctrico. Imaginémosnos un tubo de vidrio con dos electrodos en ambos extremos lleno de un gas cualquiera a baja presión. Al enrarecer más y más el contenido gaseoso de este tubo, *Hittors* observó en 1869 como del electrodo negativo salía una radiación produciendo una fluorescencia verde en la pared opuesta de vidrio, radiación esta conocida con el nombre de rayos catódicos. Estos rayos catódicos, fundamentalmente distintos de los rayos luminosos, están constituidos por partículas 2.000 veces más livianas que el átomo de hidrógeno y llevan consigo la carga eléctrica nega-

tiva de justamente un cuanto. A estos corpúsculos llamamos electrones.

Pero también fuera del tubo de descarga encontramos una emisión de electrones y esta vez espontánea sin la intervención del físico. Ya en 1897 descubrió *Becquerel* la emisión de rayos penetrantes desde el uranio. Investigaciones posteriores efectuadas por *Pierre y Marie Curie* demostraron que no era solamente el uranio que daba origen a tales radiaciones, sino también y en mayor grado todavía dos otros elementos contenidos en la pechblenda que llamaron polonio y radium. El análisis de estas radiaciones radioactivas hizo posible distinguir tres clases distintas de rayos, a saber: los rayos α , β y γ . Para empezar con estos últimos, los rayos γ , son de la misma naturaleza que los rayos luminosos o los rayos X, pero de una longitud de onda más pequeña y, por consiguiente, de mayor energía. Al contrario, tanto los rayos α , como los rayos β corresponden a radiaciones corpusculares. Los rayos β , en especial, son rayos compuestos de electrones, idénticos a los rayos catódicos antes nombrados, de los cuales difieren únicamente por su velocidad alcanzando hasta un 98% de la velocidad de propagación de la luz. Por fin, los rayos α , son átomos de helio con carga positiva igual a dos cuantos eléctricos. de la misma naturaleza que los rayos que salen del ánodo de un tubo de descarga al llenarlo con helio.

Para poder explicar el origen de las radiaciones radioactivas lo mismo que para indicar el mecanismo de la emisión y absorción de los rayos visibles en una substancia cualquiera, ya no basta el concepto de la física molecular. Para esto es necesario considerar el átomo mismo como partícula de estructura compleja. De aquí la necesidad de introducir un modelo atómico de acuerdo con los resultados de la observación. La primera idea de tal modelo la dió *Thomson* basándose todavía en el átomo esférico y su diámetro conocido por la física molecular. En el interior de esta esfera se distribuye uniformemente

la electricidad positiva, mientras los electrones negativos ocupan, también en su interior, posiciones correspondientes a un equilibrio estático. De acuerdo con los fenómenos eléctricos, vino abajo, sin embargo, el modelo atómico de Thomson debido a experimentos realizados por *Lenard*. Este gran físico dejó caer rayos catódicos sobre diversas sustancias, observando que la mayor parte de los electrones atravesaban estas sustancias sin sufrir mayores consecuencias. Los átomos de las sustancias irradiadas se comportaron frente a los electrones como un colador.

Aplicando rayos α , pudo establecer *Rutherford* que ni siquiera estos corpúsculos, miles de veces más grandes que los electrones, eran impelidos por los átomos irradiados. Solamente algunos pocos se desviaron o se reflejaron hacia atrás. Estos últimos debían haber chocado contra las partes impenetrables de los átomos. Tomando en cuenta, que el peso de los electrones es casi despreciable en comparación con las partículas α , el choque se tiene que haber producido sólo en las partes positivas del átomo, donde, al mismo tiempo, debe hallarse reunida prácticamente toda la masa atómica. Dirección y velocidad de las partículas reflejadas han servido, además, para deducir el espacio reducido en el cual se concentra esta masa atómica con su carga positiva. El resultado da como máximo el valor de un billonésimo de cm.

Basándose en estas observaciones ideó *Rutherford* un nuevo modelo atómico, el del átomo nuclear. Toda la masa atómica se encuentra concentrada en un núcleo de extensión subatómica y de carga positiva, mientras los electrones negativos se mueven, bastante alejados, alrededor de la carga nuclear en órbitas elípticas, que podemos comparar con las trayectorias de los planetas alrededor del sol. Entonces es la extensión total de este «sistema planetario» la que representa el diámetro atómico en la física molecular. Consecuencia lógica de este modelo atómico de *Rutherford* es la suposición que las partículas α , también de dimen-

siones subatómicas, no son otra cosa sino núcleos de helio. Pero como la carga de estos núcleos es igual a dos cuantos, el átomo de helio debe poseer justamente dos electrones exteriores para encontrarse en estado eléctricamente neutral. En general, la carga positiva de un átomo cualquiera se debe a la falta de uno o varios de los electrones que circulan alrededor del núcleo, mientras que la añadidura de otro electrón produce el átomo eléctricamente negativo. En estado neutral, el número de electrones es igual al número de cuantos de la carga nuclear.

Por supuesto que la envoltura electrónica es la parte decisiva en las características físicas y químicas del átomo. En especial, la emisión y absorción de la luz por los átomos debe estar ligada íntimamente a esta envoltura. Ya desde *Kirchhoff* y *Bunsen* sabemos que cada elemento químico emite y absorbe rayos luminosos de frecuencias bien determinadas hasta tal punto, que la determinación de estas frecuencias sirve como medio más preciso para el análisis de los elementos. Ahora bien, el modelo atómico de Rutherford implica frecuencias características que sugieren cierta relación con las frecuencias citadas. Estas frecuencias características nos dan el número de revoluciones que los electrones efectúan por cada segundo alrededor del núcleo. Rutherford supone que ambas frecuencias sean idénticas. Esto significa que el electrón al girar alrededor del núcleo emite rayos, es decir, pierde energía. Esta pérdida de energía tendría que conducir a un acercamiento del electrón hacia el núcleo lo cual a su vez hace aumentar el número de revoluciones por segundo. En resumen, durante el proceso de la emisión, la frecuencia característica del átomo aumentaría continuamente, mientras el electrón se acercaría en espiral más y más al núcleo hasta caer en él. Este resultado está en plena contradicción con la observación y, además, significaría la inestabilidad de los átomos.

Es el gran mérito de *Niels Bohr* haber subsanado las fa-

llas del modelo atómico de Rutherford y, además, de haberlo puesto este modelo de acuerdo con la teoría de los cuantos. Esta teoría, fundada por *Max Plank*, afirma que a la energía también le corresponde estructura atómica. Toda energía, sea ésta mecánica o calórica o energía de radiación, se compone de cantidades pequeñísimas e indivisibles de energía, que se llaman cuantos de energía. Ahora bien, en el nuevo modelo atómico de Bohr se supone que el átomo puede encontrarse en diversos estados estacionarios de distinto contenido energético sin emitir energía. Es decir, cada electrón de la envoltura electrónica puede circular en distintas órbitas alrededor del núcleo de acuerdo con los distintos estados estacionarios del átomo. Al pasar el electrón de una de estas órbitas posibles a otra, cambia el contenido energético del átomo. La diferencia de energía entre dos de estos estados es entonces igual a la energía emitida o absorbida. De ahí, que el proceso de la emisión consiste en el cambio de un electrón desde una órbita exterior hacia otra más cercana al núcleo, mientras que en la absorción observamos el fenómeno inverso. Además, el hecho de que la energía en general debe ser múltiplo entero de un cuanto, hace posible la existencia de sólo determinadas órbitas. Al pasar de una de estas órbitas a la siguiente cambia el contenido energético del átomo justamente en un cuanto de energía. Si la cantidad de energía absorbida es lo suficientemente grande, el electrón ocupará una órbita tal vez tan alejada del núcleo, que éste deja de ejercer su atracción sobre el electrón. Por consiguiente, el átomo pierde un electrón, se transforma en un ion positivo. La idea del modelo atómico de Bohr, perfeccionada en teoría por la mecánica cuántica de *Heisenber* explica hasta hoy día en forma más completa las manifestaciones hacia fuera del átomo. La mecánica ondulatoria tomó este mismo modelo como base y le dió solamente otra interpretación teórica.

Pero volvamos al núcleo, portador de la masa atómica. Ya dijimos, que es la envoltura electrónica la que determina las

características físicas y químicas del átomo. El eslabón entre estos electrones y el núcleo forma la atracción eléctrica entre ambos. De ahí que, precisando, podemos considerar la carga nuclear como lo esencial del átomo. Dos átomos de la misma carga nuclear presentan las mismas cualidades, es decir, son elementos químicos de la misma naturaleza. La masa nuclear, o sea el peso atómico, es solamente de importancia secundaria. Por consiguiente, es de interés primordial conocer las cargas nucleares de todos los elementos. Ya hemos dicho, que la del helio es igual a 2, lo que significa que la carga nuclear del hidrógeno, que es más liviano que el helio, sea 1. Para encontrar los números correspondientes a los demás átomos han servido las observaciones efectuadas por *Chadwick*. Este físico dirigió rayos α contra diversos elementos, haciendo visible la trayectoria de las partículas mediante un procedimiento indicado por *Wilson*. En estas fotografías se podía observar que algunas trayectorias, pocos antes de terminar, se dividían en dos. Eran las trayectorias de las partículas que habían chocado con un átomo, debiéndose el choque naturalmente a fuerzas eléctricas de repulsión. El ángulo formado por ambas trayectorias después del choque, trayectorias producidas por la partícula α y el átomo, permitió calcular la carga nuclear del átomo chocado. El resultado fué, en cada caso, idéntico al número que le corresponde al átomo en el sistema periódico de los elementos. Basándose en estos hechos de observación, *Van den Broek* estableció la hipótesis que el número del sistema periódico y la carga nuclear del átomo son idénticos; hipótesis que más tarde pudo ser confirmada.

La presencia del gran número de cuantos eléctricos en el núcleo, por ejemplo 92 en el uranio, así como la emisión de rayos en las substancias radioactivas nos indica cuán compleja es la estructura del núcleo atómico mismo. Al preguntarnos por los elementos constituyentes del núcleo llama la atención el hecho de que gran número de los elementos poseen pesos ató-

micos de un número entero. Así por ejemplo el peso atómico del helio es igual a 4; el del carbono, 12; del nitrógeno, 14; del oxígeno, 16, etc. De ahí, que *Prout* supuso que todos los núcleos atómicos eran sencillamente aglomeraciones de núcleos de hidrógeno.

Según esta hipótesis el núcleo del helio se compone de 4 núcleos de hidrógeno. Pero como la carga del helio es solamente 2 y la de 4 núcleos de hidrógeno igual a 4, es necesario suponer la presencia de 2 electrones nucleares en el núcleo del helio. Sin embargo, el descubrimiento hecho por *Chadwick* en 1932, de partículas de masa 1 sin carga eléctrica, llamadas neutrones, hace superflua la suposición de electrones nucleares, constituyéndose el núcleo del helio sencillamente de 2 neutrones y 2 núcleos de hidrógeno que llamamos protones. Si realmente estos neutrones son partes elementales que integran la materia o si los tenemos que considerar como la unión íntima de cargas positivas y negativas, no sabemos. Desde que *Anderson*, hace poco, encontró la existencia de positrones, es decir de electrones positivos, hasta nos atrevemos a pensar, que el protón está formado por un neutrón al cual se ha unido uno de estos positrones.

Ahora se nos presenta una dificultad. Hemos dicho que todos los núcleos atómicos se componen de protones y neutrones. ¿Cómo es posible entonces que, como todos sabemos, gran número de los elementos no posee un peso atómico entero? Esta dificultad desapareció, cuando *Aston* pudo demostrar, que casi todos los elementos se componen de una mezcla de átomos de pesos atómicos distintos pero enteros. Siendo la carga nuclear de estos átomos, que llamamos isótopos, la misma, químicamente no se distinguen. De ahí, que al medir el peso atómico de los elementos químicos determinamos en realidad el término medio de pesos atómicos de átomos de distinta masa. Así, por ejemplo, resulta para el peso atómico de la plata el valor de 107.8 por hallarse compuesta de isótopos del peso

107 y 109. También el hidrógeno tiene isótopos: el deuterio de peso atómico 2 y el triplón de peso atómico 3.

Es especialmente interesante saber, que mediciones minuciosas del helio han demostrado que su peso es de hecho un poquito menor que el peso conjunto de dos neutrones y dos protones. Según la teoría restringida de la relatividad, entre paréntesis sea dicho, la única parte realmente comprobada de esta teoría, este déficit de masas es equivalente a una enorme cantidad de energía. Esta energía es la que mantiene unidas las partes integrantes del núcleo del helio y la misma que tendríamos que aplicar para desintegrar este átomo. Esto nos viene a demostrar que el núcleo de helio es la partícula más estable que conocemos y que como tal puede ser lanzado como un todo desde sustancias radioactivas bajo la forma de partículas α .

Que realmente no todos los átomos poseen el mismo grado de estabilidad, hemos visto en los fenómenos de radioactividad. La emisión de los rayos α y β hace cambiar la carga nuclear de estos elementos transformándolos en otros. Así el uranio de peso atómico 238 y carga 92 se transforma al emitir partículas α en uranio X_1 de peso 234 y carga 90, que a su vez al emitir rayos β se transmuta en uranio X_2 de igual peso atómico, pero con carga 91. Todos los elementos químicos de carga nuclear superior a 82 son radioactivos. Al parecer, en el mundo del átomo existe un límite superior para aglomeraciones de masa así como en el universo no se pueden sostener estrellas que pasen de cierto peso. Pero también existen otros elementos como el rubidio y el potasio, que son radioactivos, aunque en menor grado. Especialmente estables parecen ser los átomos cuyas masas nucleares son múltiplos de 4, es decir, compuestos de núcleos de helio, y los átomos más livianos. De ahí, que los primeros 29 elementos del sistema periódico forman el 99.85% de la corteza terrestre, el 99.98% de los meteoros silíceos y el 100% de los meteoros metálicos.

Si la naturaleza nos presenta casos de transmutaciones de elementos, cabe preguntarnos: ¿Le será posible al hombre transformar los elementos químicos a voluntad, sea para la obtención de elementos valiosos a base de otros más abundantes, o sea, para aprovechar las enormes energías libradas por tales transmutaciones? La contestación es afirmativa. El descubrimiento de Rutherford en 1919 de una emisión de protones desde núcleos de nitrógeno sometidos a la acción de partículas α , representa el primer éxito de los intentos realizados para transformar los núcleos atómicos y provocar su explosión. El nitrógeno se había transformado en oxígeno. Transmutaciones análogas se obtienen hoy día en elementos ligeros, comprendidos entre el boro y el potasio. También mediante el bombardeo por protones y deuterones se han alcanzado ciertas desintegraciones atómicas. Así es posible la transmutación del litio en helio o la del berilio en litio y helio. El bombardeo de deuterio con deuterones mismos conduce a la formación de triplones y protones o a la de un isótopo de helio y la emisión de un neutrón. Pero en ambos casos se libra, al mismo tiempo, una enorme cantidad de energía, la que antes de la desintegración liga justamente el protón al neutrón, componentes únicos del deuterio.

Pero en todas estas transmutaciones la ganancia es sumamente pequeña. Debido a la carga positiva del proyectil usado, éste debe atravesar una barrera de potencial eléctrico que rodea el núcleo por desintegrar antes de llegar hasta él. De ahí, que de 20,000 fotografías tomadas por *Blackett*, sólo en 8 negativos pudo verse el efecto de la desintegración. Para aumentar el número de casos favorables es necesario utilizar proyectiles sin carga eléctrica. Los mismos rayos γ , vibraciones electromagnéticas, pueden desempeñar esta función, siempre que su energía sea suficientemente elevada. Realmente obtuvo en esta forma Chadwick la desintegración del deuterio en un protón y neutrón.

Pero los proyectiles más apropiados son sin duda los neutrones, cuya falta de carga eléctrica junto con su gran energía cinética los hacen aptos para producir grandes efectos. Sin embargo, al chocar el neutrón con un núcleo atómico, por lo general se produce un choque elástico, imprimiendo el neutrón cierto movimiento al núcleo chocado y cambiando su propia dirección. Solamente algunos átomos, y en especial los del nitrógeno, incorporan el neutrón, explotan en seguida, y emiten una partícula α . Así el nitrógeno se transmuta en boro.

Para que una mayor cantidad de neutrones sea aprovechado en la transmutación de elementos, es necesario, contrariamente a lo que sospechamos, que el neutrón sea lento. Este descubrimiento de *Fermi* nos ha dado el agente ideal de las transmutaciones atómicas. Para la producción de neutrones lentos tenemos que proveernos primero de neutrones rápidos, exponiendo polvo de berilio a la actuación de las partículas α . Al transmutarse berilio en carbono se libran neutrones rápidos, que después se frenan dejándolos pasar a través de una capa gruesa de parafina. Tales neutrones lentos dan lugar a las más diversas transmutaciones atómicas. Como caso interesante sea citado la formación de un elemento transurano de carga nuclear 93 al bombardear uranio con los agentes nombrados.

Si los efectos producidas por medio de los neutrones lentos son ya apreciables, éstos se pueden multiplicar todavía por medio de procesos observados por primera vez por *Hahn* en 1939, como vemos hace apenas 6 años. Este investigador alemán encontró que al exponer el isótopo de uranio de peso atómico 235 a la actuación de los neutrones, este elemento se divide en dos partes casi iguales emitiendo al mismo tiempo varios nuevos neutrones. Es decir, al iniciar la transmutación mediante un solo neutrón obtenemos además de la energía liberada por la desintegración, otros nuevos neutrones más que a su vez transmutan los elementos vecinos. Así sigue hasta que todos los elementos inestables presentes se han desintegrado lo

que, en vista de la rapidez de los procesos, debe ocurrir casi instantáneamente. Es este probablemente uno de los factores de mayor importancia en el aprovechamiento de la energía atómica para los efectos explosivos que en el momento actual tanto preocupan. La censura estricta de los últimos años nos impide precisar las transmutaciones que de hecho intervienen para tales efectos. Pero podemos añadir de que existen catalizadores atómicos, cuya presencia hace posible ciertas desintegraciones. Son conocidas también transmutaciones en cadena, entendiéndose por tales, reacciones nucleares que conducen sucesivamente a otras transmutaciones hasta llegar a la formación de elementos estables.

Así como en las reacciones químicas, así en las transmutaciones nucleares el proceso termina al llegar a establecerse el equilibrio estable de la materia. Este equilibrio final se produce por lo general en forma rápida. Desaparece así todo el peligro de que la materia siga desintegrándose. No tiene entonces fundamento científico lo que a menudo se oye decir sobre la dificultad de poner fin al proceso de desintegración. Pero no debemos olvidar que se han observado transmutaciones que producen la radiactivación de ciertos elementos. El azufre y el cloro irradiados con neutrones dan origen a un radiofósforo cuyo período es de 13 días. He aquí un radioelemento artificial cuya vida es suficientemente larga como para permitir numerosas aplicaciones, o también para hacer sentir sus efectos fisiológicos sumamente dañinos a los seres humanos expuestos a las radiaciones radioactivas. Así *Hevesy* ha podido observar la gran influencia que tiene sobre el crecimiento de las plantas una impregnación en una solución de radiofosfato de sodio.

Hemos visto al referirnos al déficit de masa del helio la fantástica cantidad de energía que puede liberarse durante el proceso de desintegración. Valores también muy altos se obtienen en la transmutación de otros elementos. Sólo así se explica el origen de la inmensa energía necesaria para mantener la

aparentemente inagotable irradiación solar. Suponiendo valores probables para el interior del sol, se llega a la conclusión de que simultáneamente se desarrollan en él dos reacciones nucleares distintas. Una conduce a la formación de helio a base de dos protones y otra al mismo elemento mediante un proceso en cadena partiendo de la transmutación del carbono. Así se produce la energía de 100 trillones de KWH por segundo, valor que representa la irradiación solar. Para estrellas de temperatura distinta a la del sol, los procesos atómicos varían, pero son tales que compensan las pérdidas de energía por irradiación. Y no se trata aquí, como se cree, de transformaciones de masa en energía, sino solamente de la energía que liga las partes integrantes de los núcleos, liberada por la transmutación.

Por fin, sean resumidos los conceptos principales aquí expuestos. Hemos penetrado en la constitución íntima del átomo: hemos reconocido la carga nuclear como único distintivo de los elementos químicos: hemos visto la posibilidad de transmutación de los elementos y las fantásticas cantidades de energía que en tales procesos se liberan. Además hemos seguido paso a paso el camino recorrido por el investigador hasta lograr no sólo conocer la intimidad del microcosmo sino intervenir en su mecanismo. Vale la pena recordar aquí que el estímulo para esta serie de estudios no fué la idea de obtener resultados como los que en estos momentos presenciemos. Fué el siempre sentido afán del hombre de buscar la verdad por la verdad misma.