

# LA FISION DE AYER A HOY

Por John Archibald Wheeler

PALMER PHYSICAL LABORATORY  
PRINCETON UNIVERSITY

## Física nuclear pura y aplicada

Niels Bohr llegó a la West 57th Street de Nueva York alrededor de la 1 de la tarde de un día nublado, el domingo 16 de enero de 1939. Traía consigo la noticia de las observaciones realizadas por Hahn y Strassmann, de la explicación dada por Frisch y Meitner, y sus propias consideraciones. Su llegada marcó para muchos investigadores el comienzo de una nueva era de la física pura.

En septiembre comenzó la guerra. Los imperativos de la defensa dieron la vida a la física nuclear aplicada.

¿Cabe afirmar que son las "conclusiones" (CON) las que dan su carácter universal a la ciencia pura? ¿El carácter activo de la ciencia aplicada consiste en "datos de decisión" (DADE)\*? Si esta distinción tiene sentido, raras veces han estado ambas actividades tan íntimamente mezcladas como en la historia de la fisión. Quizá podamos formarnos una idea de lo que sucedió en el campo de la física de la fisión entre el mes de enero de 1939 y diciembre de 1942, y desde diciembre de 1942 hasta nuestros días, si recordamos brevemente algunas de las vicisitudes científicas de cada una de las empresas acometidas.

### DADE 1. ¿Era posible concentrar la fisibilidad?

¿Es la fisibilidad del uranio natural bombardeado con neutrones lentos una propiedad del  $^{238}\text{U}$  y, por tanto, no susceptible de concentración? La respuesta es negativa. La fisibilidad se debe al  $^{235}\text{U}$ , 139 veces menos abundante. Así lo sostuvo convincentemente Bohr, ya en la primavera de 1939, basándose en la teoría de la fisión que entonces comenzaba a perfilarse. Ningún otro "dato de decisión" pesó con tanta fuerza como éste al principio de los trabajos encaminados a aprovechar la energía del uranio. Implicaba que, en principio, era posible obtener una reacción en cadena divergente. Este "en principio" llevaba implícita la idea de un programa de separación de isótopos. Sin embargo, como dijo Bohr entonces, la magnitud de la empresa era demasiado fantástica para poderla imaginar; para llevarla a cabo sería necesario el esfuerzo de todo un país. Resultó que estaba equivocado: ¡Fueron precisos los esfuerzos concertados de tres naciones!

\* Véase J.W. Tukey, *Technometrics* 2 (1960) 423-433.



John A. Wheeler (foto Orren Jack Turner)

No todos aceptaron unas conclusiones de tan vasto alcance basadas en pruebas tan sumamente teóricas, en particular un físico teórico conocido por la claridad meridiana de sus ideas. Las dudas de George Placzek -que expresó apostando en 1939 un centavo contra 18,36 dólares- no se disiparon hasta que se dispuso, en 1940, de  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  separados en cantidad suficiente para confirmar directamente la teoría. Testimonio de su gran corazón es un telegrama y un giro telegráfico de un centavo enviados el mismo año desde Ithaca (Nueva York).

### DADE 2. La fisibilidad del plutonio

La reacción neutrónica en cadena no podía servir a la causa de la paz más que si se desarrollaba a velocidad explosiva y en una masa relativamente pequeña. Un reactor grande de neutrones lentos podía en el mejor de los casos contribuir a este objetivo inmediato demostrando por anticipado la veracidad del concepto de reacción en cadena.

Apenas se había comenzado a apreciar claramente esta idea cuando hubo que modificarla. En marzo y mayo de 1940, L. A. Turner hizo notar ciertas consecuencias de la teoría de la fisión. a) La especie nuclear  $^{239}\text{Pu}$  tenía que ser, casi indudablemente, fisionable. b) Un reactor de neutrones lentos que funcionara con uranio natural sintetizaría  $^{239}\text{Pu}$  aproximadamente a la misma velocidad a que destruiría el  $^{235}\text{U}$ . c) La separación química del  $^{239}\text{Pu}$  sería más sencilla que la separación isotópica del  $^{235}\text{U}$ . Así surgió la idea de construir un reactor reproductor y fabricar un nuevo elemento químico. En la carrera entre la separación electromagnética y la separación por difusión del  $^{235}\text{U}$  para crear una reserva de material fisionable se había inscrito en el último momento un tercer competidor.

Los trabajos hacia esta nueva meta comenzaron meses antes de tener la menor prueba radioquímica directa de la fisibilidad del  $^{239}\text{Pu}$ . Cuando la prueba se obtuvo en 1942 dio nuevo impulso a los trabajos encaminados a la síntesis del elemento. El mismo efecto estimulante tuvo la visita de un equipo de científicos británicos a mediados de 1942, cuya idea era que los trabajos referentes al reactor tendrían que rendir frutos en dos años y no en dos decenios.

#### DADE 3 y 4. Fisión rápida y absorción por resonancia

Así como ciertas características de la estructura nuclear influyeron en las líneas generales del plan para sintetizar plutonio, otras afectaron a los detalles del diseño de un reactor de neutrones lentos. Era evidente que los neutrones rápidos de fisión tienen bastantes probabilidades de chocar con núcleos de  $^{238}\text{U}$ . Las fisiones suplementarias ocasionadas por estos impactos producen un incremento del "factor de multiplicación k" efectivo de la reacción en cadena de neutrones predominantemente lentos. Para acentuar este "efecto de los neutrones rápidos" era conveniente concentrar el uranio del reactor en un reticulado de esferas o cilindros de grandes dimensiones. Ya Szilard y Wigner habían propuesto este mismo reticulado para reducir cierto efecto parásito negativo. Durante su frenado los neutrones tienen considerables probabilidades de adoptar alguna de las energías de resonancia características del núcleo compuesto  $^{238}\text{U} + n = ^{239}\text{U}$  y de ser absorbidos. Tanto entonces como ahora era imposible predecir exactamente a partir de principios básicos esta absorción por resonancia y el efecto debido a los neutrones rápidos. Ambos tienen que ser caracterizados por parámetros empíricos. Estos y otros parámetros del reactor -"datos de decisión" de carácter especial- son definidos por la teoría, hallados experimentalmente y utilizados para perfeccionar el diseño del reticulado.

En otoño de 1942 quedó terminado el diseño del primer reactor de "energía cero". La construcción avanzaba sin contratiempo hacia el éxito. Las fases

siguientes acapararon la energía de muchos de los participantes. El autor estuvo en Wilmington hasta el mes de diciembre trabajando, como representante del grupo de Chicago, con los ingenieros proyectistas de duPont. El proyecto de un reactor de elevada energía planteó muchas cuestiones. Dos de ellas, el control y el envenenamiento, giraban en torno a la física de la fisión.

#### DADE 5. Período efectivo de vida de una generación de neutrones

El control de la energía total y la distribución de energía en un reactor de flujo elevado hubieran podido resultar aún más difíciles de lo que fueron en efecto. El intervalo efectivo entre dos generaciones neutrónicas en la cadena hubiera podido ser el tiempo necesario para frenar y capturar el neutrón, es decir, un período del orden de un milisegundo. Si hubiera sido así, un pequeño aumento accidental del factor de multiplicación k por encima del nivel normal de la unidad hubiera dado lugar en un minuto a un aumento catastrófico de la potencia. Pero los neutrones retardados de ciertos productos de fisión alargaban de milisegundos a minutos la vida efectiva de una generación y gracias a ello se pudo regular con seguridad la marcha del reactor.

#### DADE 6. Envenenamiento debido al xenón

Tan importante como evitar que la potencia del reactor aumentara incontroladamente era impedir que se parara. Los productos de fisión tenían que absorber a su vez neutrones pero ¿en qué cantidad? Los descendientes estables se investigaron con minuciosidad suficiente para disipar el temor de que envenasen la reacción. Sin embargo, no existía prueba alguna que permitiera excluir la posibilidad de que en un reactor de baja potencia térmica se produjera un absorbente radiactivo de neutrones. La abundancia de un producto de fisión de período corto es despreciable en los reactores de este tipo si se compara con la concentración que alcanza en un reactor productor de plutonio de tamaño normal.

En consecuencia, se planteó el problema de si sería necesario incrementar las dimensiones de los reactores de Hanford para compensar cualquier veneno no previsto. Los ingenieros químicos saben por experiencia que casi todo lo que puede fallar fallará si no se ponen los medios para evitarlo. George Graves, un veterano de los primeros trabajos de duPont sobre el nylon, estudió todo lo que se sabía y lo que no se sabía sobre productos de fisión venenosos y resolvió con audaz decisión gastar los millones de dólares y el tiempo suplementarios que suponía la construcción de reactores 25 por ciento mayores de lo que parecía necesario.

Cuando el 27 de septiembre de 1944 comenzaron a extraerse lentamente las barras de control del primer reactor de Hanford para alcanzar la criticidad,



los tubos de la periferia no estaban cargados de uranio. El agua fría del río Columbia comenzó a salir caliente. La producción de plutonio prosiguió durante algunas horas sin incidentes, pero de pronto el reactor comenzó a perder reactividad. Para que no se interrumpiese la reacción en cadena automatizada hubo que seguir retirando lentamente las barras de control. Finalmente se extrajeron del todo. No quedaba ya margen de reactividad y la reacción se detuvo. El agua volvió a salir a la misma temperatura que entraba.

¿Qué había pasado? ¿Quizá la reacción había hecho que se precipitara en los tubos alguna sustancia contenida en el agua del río capaz de absorber neutrones? ¿O había pasado agua de los tubos a la matriz de grafito del reactor? Mientras se examinaban estas y otras posibilidades, la pila comenzó a recuperar reactividad. Fue necesario introducir de nuevo las barras para mantener su control. El calor generado volvió a alcanzar su valor normal y se reanudó la producción, pero al cabo de algunas horas disminuyó de nuevo el factor de multiplicación y el reactor se paró.

A cualquiera que se hubiera ocupado durante meses de los productos de fisión venenosos y recibido los informes periódicos sobre el particular del laboratorio distante escasas millas se le hubiera ocurrido la explicación lógica: un producto de fisión precursor no absorbente de un período de pocas horas, se desintegra formando un descendiente de efectos nocivos para los neutrones. Este veneno, cuyo período es de algunas horas, se desintegra dando una tercera especie nuclear no absorbente y posiblemente estable. Si la explicación era correcta, bastaba examinar la clasificación de los núclidos para ver que el precursor tenía que ser el  $^{135}\text{I}$  de 6,68 h y el descendiente el  $^{135}\text{Xe}$  de 9,13 h. Antes de que transcurriese una hora llegaba Fermi con datos precisos sobre reactividad, que confirmaban esta hipótesis. Tres horas después se habían deducido otras dos conclusiones: a) La sección eficaz de captura de neutrones térmicos del  $^{135}\text{Xe}$  era unas 150 veces mayor que la del núcleo más absorbente hasta entonces conocido, el del  $^{113}\text{Cd}$ . b) Prácticamente, cada núcleo de  $^{135}\text{Xe}$  que se formase en un reactor de flujo elevado captaría un neutrón. Inesperadamente, el xenón se había convertido en una especie de barra de control con la que nadie contaba y para compensarla había que incrementar la reactividad.

Para obtener la reactividad necesaria no había más que cargar los tubos de reserva, y la producción de plutonio se reanudó. El rendimiento aumentaba día tras día. Poco después comenzó a funcionar un segundo reactor y más tarde un tercero

#### DADE 7. Fisión espontánea

El  $^{239}\text{Pu}$  de la planta de separación química de Hanford y el  $^{235}\text{U}$  obtenido por los dos procedimien-

tos de separación isotópica comenzaron a llegar a Los Alamos. Sin embargo, las velocidades que entonces se podían alcanzar no permitirían formar con la masa de ninguno de estos dos metales un conjunto supercrítico si se producía una ignición prematura debida a la considerable emisión natural de neutrones. Gracias a los trabajos realizados en 1939 por Flerov y Petrjak se sabía que el uranio natural se desintegra espontáneamente. Como era razonable pensar que el núcleo par-par del  $^{238}\text{U}$  sería estable en comparación con el del  $^{235}\text{U}$ , la fisión observada habría de atribuirse casi en su totalidad a este último. En tal caso, el período de fisión del  $^{235}\text{U}$  no sería más que de  $6 \times 10^{13}$  años y la emisión de neutrones sería tan intensa que constituiría un peligro de ignición prematura. Contrariamente a esta opinión, las mediciones directas realizadas por Segré y sus colaboradores con las considerables cantidades de isótopos separados ya existentes dieron para la fisión espontánea un período de  $1,8 \times 10^{17}$  años, en el caso del  $^{235}\text{U}$  (de  $8 \times 10^{15}$  años en el caso del  $^{238}\text{U}$ ) y de  $5,5 \times 10^{15}$  años en el caso del  $^{239}\text{Pu}$  (posteriormente se halló para el  $^{240}\text{Pu}$  la cifra de  $1,2 \times 10^{11}$  años). Sea cual fuere la explicación, los núcleos fisionables de masa impar eran más estables de lo que se esperaba y gracias a ello fue posible formar la masa crítica. El 16 de julio de 1945 se realizó el primer ensayo que inició la era de las armas nucleares y marcó el principio del fin de la guerra en el Pacífico.

#### DADE 8. Fisión inducida por neutrones de 14 MeV

El primer artefacto termonuclear a plena escala fue probado en el islote Elugelab del atolón de Eniwetok, el 19 de noviembre de 1952. Se produjeron grandes cantidades de neutrones de 14 MeV. En la nueva era de los dispositivos termonucleares, la eficacia con que estos neutrones inducen la fisión se transformó muy pronto en un "dato de decisión" importante, carácter que desde entonces ha conservado.

Menos de tres años después se celebró la primera Conferencia de Ginebra sobre la Utilización de la Energía Atómica con Fines Pacíficos. En ella se dieron a conocer muchos datos sobre la fisión que hasta entonces se habían mantenido secretos y renació el interés por esta cuestión.

#### **Esquema simplificado de la actual física de la fisión**

Un relato más completo mencionaría todos los descubrimientos sobre la fisión logrados antes y después de 1955, y especificaría quién realizó los trabajos que llevaron a ellos. Pero, en lo que sigue, prescindiremos de casi todos estos detalles tan importantes. Consideremos escuetamente la fisión tal como se entiende hoy y compáremosla con la fisión tal como se concebía en 16 de enero de 1939. Es difícil imaginar lo que se habría tardado en llegar a las

conclusiones que seguidamente se enumeran si no hubiera habido un 2 de diciembre de 1942 ni una tecnología nuclear.

CON 1. En el proceso de fisión inducido por neutrones de  $E_{cin} < 5$  MeV hay una fase intermedia de formación de un núcleo compuesto

Cuando un neutrón u otra partícula de energía moderada choca con un núcleo pueden suceder dos cosas: a) que conserve casi todo su impulso inicial al atravesar el núcleo ("reacción directa") o b) que intercambie tanta energía con el sistema que se forme un núcleo compuesto.

El símil clásico del núcleo compuesto es un sistema de partículas que sufren interacciones hasta que borran todo rastro del mecanismo por el que se reunieron. El sistema cuántico se diferencia del símil semiclásico en que el número de estados de un momento angular dado  $J$  no es, en general, proporcional a  $(2J + 1)$ . Por lo tanto, la distribución angular de los productos de la reacción no es enteramente independiente de la dirección. La probabilidad de que el sistema compuesto ceda su energía por re-emisión de neutrones, por radiación o por fisión depende del valor de  $J$ , de la paridad y de la energía.

Los trabajos de los últimos años han demostrado que en muchos casos es considerable la probabilidad de que se produzca una reacción de tipo directo o incluso que predomine sobre la formación de núcleos compuestos, pero no cuando se trata de la fisión inducida por neutrones de energía cinética inferior a 5 MeV. Además, sea cual fuere la reacción, si se produce por una resonancia bien definida, de propiedades típicas respecto de los niveles de energía superiores e inferiores, se dice por definición que ello constituye una reacción de núcleo compuesto.

CON 2. El núcleo compuesto se divide según diversas vías de fisión

En física molecular es habitual dividir la energía de la molécula en energía de rotación y vibración, por una parte, y en energía de excitación electrónica, por otra. Esta división queda definida por una superficie que indica la energía electrónica en función de las coordenadas nucleares. Análogamente, en física nuclear, una vía de fisión se refiere a una división de la energía del sistema compuesto entre el movimiento colectivo y la excitación nucleónica o "intrínseca". En las moléculas poliatómicas y en los núcleos se producen fases de transición no radiatorias. El sistema "se desliza" de una de estas divisiones de la energía a otra. En consecuencia, una vía de fisión no es generalmente un concepto definido más que en la región limitada del espacio de configuración colectiva en que el sistema está franqueando por encima -o por debajo- una barrera de potencial para llegar a la fisión.

CON 3. Las fluctuaciones de los anchos de fisión indican el número de fisión posibles

Comparemos el núcleo compuesto con una sala de conciertos y un estado de resonancia con una onda acústica estacionaria. Entonces, la probabilidad por segundo de que la fisión suceda según la  $k$ -ésima vía,  $Af_k$ , -o el ancho parcial  $\Gamma_{fk} = \hbar Af_k$  del nivel de resonancia con respecto a la fisión- es comparable con la fracción de sonido que sale por segundo por una pequeña ventana determinada. Esta fracción fluctúa de una resonancia a otra en torno a un cierto valor medio  $\langle \Gamma_{fk} \rangle$ , según sea la relación entre la "ventana" y el nodo de la onda.

En el caso corriente de la fisión inducida por neutrones lentos (sonido que sale por varias ventanas) la experimentación no nos permite saber por qué vía ha tenido lugar la fisión. El ancho total observado del nivel de resonancia con respecto a la fisión es la suma  $\Gamma_f = \Gamma_{f1} + \Gamma_{f2} + \dots$  de las contribuciones de todas las vías. La fluctuación porcentual de este ancho de un nivel a otro es pequeña cuando el número de vías que contribuyen efectivamente es elevado, y grande si este número es pequeño. Así, en los núcleos fisiónables mejor conocidos encontramos un "número efectivo de fluctuación de vías" que oscila entre uno y cuatro. El aspecto experimental no está todavía suficientemente precisado para que se pueda establecer una relación definida entre este número y el "número efectivo de rendimiento" deducido del valor absoluto del ancho medio  $\langle \Gamma_f \rangle$ .

CON 4. La altura de la barrera de una vía de fisión determina el número de rendimiento de dicha vía

Si en todas las ventanas de la sala de conciertos instalamos un conducto de ventilación de longitud dada, cada uno de ellos de sección diferente, un conducto determinado transmitirá efectivamente al exterior sólo cuando la frecuencia del sonido supere un cierto límite crítico. Esta frecuencia crítica varía de un conducto a otro. Lo mismo sucede en la fisión. Si hallamos la anchura parcial media que corresponde a una vía determinada para varias resonancias, la dividimos por el intervalo medio entre las resonancias y la multiplicamos por  $2\pi$ , la cantidad resultante da el "número de rendimiento" de esta vía. Ya en 1939 se demostró que el número de rendimiento es la unidad cuando la energía es sensiblemente mayor que la barrera de fisión de la vía. Cuando es francamente inferior a la barrera el número de rendimiento decrece exponencialmente con la energía (fisión espontánea). La suma de los números de rendimiento de todas las vías de fisión da el "número efectivo de rendimiento de esas vías",  $N_f$ .

CON 5. Los períodos de fisión espontánea de núcleos de A impar son de  $10^2$  a  $10^4$  veces más largos que los correspondientes a núcleos par-par próximos

Se puede comprobar que la vía más baja posible para un núcleo de, por ejemplo,  $K = 7/2$  (A impar) tiene un umbral inferior que la vía más baja posible para un núcleo de  $K = 0$ . Los pares de órbitas nucleónicas más bajas dan  $K = 0$  para todas las elongaciones del núcleo, en tanto que a partir de los estados más bajos de partículas aisladas no se puede obtener  $K = 7/2$  para todas las elongaciones.

CON 6. Los aumentos y disminuciones de la sección eficaz de fisión en la región de los MeV indican, respectivamente, el acceso a nuevas vías de fisión y a nuevas vías de reemisión de neutrones

Según el símil de la sala de conciertos, la fracción de sonido que sale por los conductos que atraviesan la pared norte aumenta cuando la frecuencia se eleva lo bastante para que comience a transmitir un nuevo conducto de esa pared. La fracción disminuye cuando comienza a transmitir un nuevo conducto en otra pared. Una vía neutrónica -contrariamente a una vía de fisión- es análoga a un conducto de longitud infinita. No transmite en absoluto por debajo del umbral.

CON 7. La distribución angular de los fragmentos de fisión es determinada por el momento angular total J del núcleo compuesto, su proyección M sobre un eje fijo en el espacio, y el momento angular K de la forma alargada de fisión -o punto de

estrangulación- en torno al eje de simetría rotatoria aproximada

La cantidad K no permanece constante durante largo tiempo en comparación con el de paso inmediato del umbral. Generalmente difiere de un canal a otro para un nivel de resonancia dado y la manera más fácil de determinarla es a partir de la distribución angular.

CON 8. La estrangulación que conecta los fragmentos de fisión nacientes se alarga y absorbe el efecto de las fuerzas coulómbicas hasta que se adelgaza y se rompe

a) La energía cinética de los fragmentos que se separan es decenas de MeV menor que la energía de esferas en contacto. b) Esta energía cinética varía ampliamente de un fenómeno de fisión a otro. c) Las palabras que siguen parecen describir adecuadamente los hechos observados en la emisión neutrónica de fragmentos aislados. El esfuerzo de alargamiento no se traduce en la excitación nucleónica general de la materia nuclear (no produce "calentamiento"). Algunas veces, la rotura de la estrangulación se produce mucho más cerca de un fragmento naciente que del otro. El primer fragmento queda demasiado poco excitado para emitir siquiera un sólo neutrón. Casi toda la estrangulación se repliega sobre el otro fragmento que, en ese momento, queda excitado y emite varios neutrones.

### Física al otro lado del umbral

La física de la fisión "al otro lado del umbral" parece ofrecer la posibilidad de penetrar más a fondo el símil nuclear del "deslizamiento" de una molécula de un estado a otro y el mecanismo de intercambio de la excitación colectiva y nucleónica.