

zación de la *síntesis combinatoria*, se abarata enormemente el coste global de la investigación.

Finalmente, además del optimismo con el que se contempla hoy el futuro de la *síntesis combinatoria* en la investigación de fármacos, existen otras áreas de aplicación, como son la biotecnología, la agroquímica, la catálisis y la química de los materiales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Existen recopilaciones excelentes dedicadas a la *síntesis orgánica tradicional*. Entre las cuales destacamos como fundamentales las siguientes revisiones y textos: COREY, E. J. y CHENG, X.-M. "The Logic of Chemical Synthesis", John Wiley & Sons, Nueva York, 1989. SEEBACH, D. "Organic Synthesis-Where now?", *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 1990, **29**, 1320-1367. NICOLAU, K. C. y SORENSEN, E. J. "Classics in Total Synthesis. Targets, Strategies, Methods", VCH, Weinheim, 1996.
- [2] MERRIFIELD, R. B. "Solid Phase Peptide Synthesis. I. The Synthesis of a Tetrapeptide" *J. Am. Chem. Soc.* 1963, **85**, 2149-2154.
- [3] Desde el comienzo de la *química combinatoria* con la comunicación "Cornucopia of Peptides by Synthesis", Furka, A.; Sebestyen, F.; Asgedom, M.; Dibo, G. *Abstr. 14th Int. Cong. Biochem., Praga*, 1988, **5**, 47, y su posterior publicación en *Int. J. Peptide Protein Res.*, 1991, **37**, 487-493, se han publicado miles de artículos con aplicaciones de la *química combinatoria*. Estos artículos se han recopilado en revisiones especializadas de las cuales destacamos:
- GALLOP, M. A.; BARRETT, R. W.; DOWER, W. J.; FODOR, S. P. A. y GORDON, E. M. "Applications of combinatorial technologies to drug discovery. 1. Background and peptide combinatorial libraries" *J. Med. Chem.* 1994, **37**, 1233-1251. GORDON, E. M.; BARRETT, R. W.; DOWER, W. J.; FODOR, S. P. A. y GALLOP, M. A. "Applications of combinatorial technologies to drug discovery. 2. Combinatorial organic synthesis. Library screening strategies, and future directions" *J. Med. Chem.* 1994, **37**, 1385-1401. TERRETT, N. K.; GARDNER, M.; GORDON, D. W.; KOBYLECKI, R. J. y STEELE, J. "Combinatorial synthesis - The design of compound libraries and their application to drug discovery" *Tetrahedron*, 1995, **51**, 8135-8173. THOMPSON, L. A. y ELLMAN, J. A. "Synthesis and applications of small molecule libraries" *Chem. Rev.* 1996, **96**, 555-600. BALKENHOL, F.; VON DEM BUSSCHE-HÜNNEFELD, CH. LANSKY, A. y ZECHEL, CH. "Combinatorial synthesis of small organic molecules" *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 1996, **35**, 2288-2337. MAEHR, H. "Combinatorial chemistry in drug research from a new vantage point" *Bioorg. Med. Chem.* 1997, **5**, 473-491. CHAIKEN, I. M. y JANDA, K. D. Eds. "Molecular diversity and combinatorial chemistry" ACS, Washington, 1996.
- [4] BUNIN, B. A y ELLMAN, J. A. "A general and expedient method for the Solid-Phase Synthesis of 1,4-Benzodiazepine Derivatives" *J. Am. Chem. Soc.* 1992, **114**, 10997-10998.

Paloma Ballesteros García
Departamento de Química Orgánica
y Biología (UNED)

M.^a del Carmen Avendaño López
Departamento de Química Orgánica
y Farmacéutica
Facultad de Farmacia (UCM)

TALLER Y LABORATORIO

El espejo roto

INTRODUCCIÓN

Es muy posible que TSUNG DAO LEE, de la Universidad de Columbia en Nueva York, y CHEN NING YANG, del Instituto de Estudios Avanzados, tuvieran la sensación de haber roto un espejo en mil pedazos cuando su amiga y compatriota CHIEN-SHIUNG WU, también de la Universidad de Columbia, publicó en 1957 una carta al editor de *Physical Review*¹,

en la que comunicaba los resultados de un experimento de emisión β sugerido por aquellos² que violaban el principio de conservación de la paridad. En apenas dos páginas se creaba una auténtica convulsión en la Física Teórica³.

En la mente humana, la idea de que un espejo refleja fielmente la realidad está muy arraigada. Esto

equivale a decir que si un fenómeno es posible en el mundo real, también debe serlo su imagen especular. Muchas veces hemos visto en el cine que una escena, que hasta entonces nos parecía perfectamente normal, resulta ser en realidad, como revela un ligero movimiento de la cámara, el reflejo en un espejo de la acción real. Por la misma razón, cuando miramos una diapositiva o el negativo de una fotografía no podemos distinguir si estamos mirando la fotografía al derecho o al revés. Tan solo la presencia de un objeto "artificial" (un cartel con una leyenda, unos automóviles que circulan por el carril izquierdo, ...) nos permite determinar si estamos mirando o no

¹ "Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay", C. S. WU, E. AMBLER, R.W. HAYWARD, D.D. HOPPES and R. P. HUDSON. *Phys. Rev.*, **105**, 1413 (1957).

² T. D. LEE & C. N. YANG. *Phys. Rev.* **104**, 254 (1956).

³ Ver a este respecto "Conversaciones en Compostela con C. N. Yang" en la *Revista Española de Física*, **10**, (2), 1-3 (1996), que es un resumen de las charlas que mantuvieron el Profesor Carlos Pajares y el Profesor Chen Ning Yang con motivo de las visitas que éste último hizo a la Universidad de Santiago de Compostela.

el lado "correcto". Por ejemplo, si en una fotografía aparecen varias personas, podríamos decir inmediatamente que la fotografía estaba al revés si detectáramos que todos los relojes de pulsera aparecían en la muñeca derecha y no en la izquierda. Pero esto lo hacemos sobre la base de que la gran mayoría de las personas son diestras y no zurdas. Sin embargo, existe (o existía hasta 1956) la tendencia a pensar que los objetos inanimados son ambidextros y, en consecuencia, que si en una fotografía o en una película aparecieran sólo fenómenos naturales nos resultaría imposible decir inequívocamente si la fotografía estaba bien o mal colocada.

PARIDAD

Una reflexión especular es equivalente a una inversión de coordenadas respecto del origen seguida de un giro de 180° . Si admitimos que los fenómenos físicos no cambian por el hecho de girar nuestros aparatos o por mirarlos desde una dirección u otra, todo lo que digamos para una reflexión especular es válido igualmente para una inversión de coordenadas, es decir, para un cambio del vector posición \mathbf{r} por $-\mathbf{r}$. A esta operación de inversión de coordenadas se le llama también transformación de paridad. Así pues, decir que un fenómeno reflejado en un espejo es tan "real" como el fenómeno original equivale a decir que si se da un fenómeno en el mundo real, también debe darse el transformado por paridad.

Tomemos por ejemplo un átomo de hidrógeno, constituido por un protón y un electrón enlazados por la interacción eléctrica. Si ahora hacemos una inversión de coordenadas, el átomo resultante también será un átomo posible con la misma energía que el anterior. Esto es evidente en Física Clásica. En efecto, aunque el vector velocidad \mathbf{v} cambie a $-\mathbf{v}$, la energía cinética no cambia, ya que depende de su cuadrado. Y tampoco varía la energía potencial



Madame Wu (1959).

coulombiana, que solo depende del módulo de \mathbf{r} , que es invariante.

En Mecánica Cuántica las cosas son algo más complicadas. Ahora, los sistemas vienen descritos por una función de onda $\psi(\mathbf{r})$. Los valores de las magnitudes del sistema se obtienen a partir de la acción de ciertos operadores sobre la función de onda, y su evolución temporal está determinada por el operador hamiltoniano H . Este mismo operador determina además los posibles niveles energéticos del sistema: los valores E_n de dichos niveles satisfacen una ecuación de valores propios $H\psi_n = E_n\psi_n$, siendo las ψ_n las funciones de onda que describen el estado del sistema en dichos niveles. El operador hamiltoniano se construye entonces a partir de las expresiones clásicas de las energías cinética y potencial mediante la aplicación de unas determinadas reglas de transformación.

Si la función $\psi(\mathbf{r})$ representa un posible estado cuántico de un sistema y la función transformada por paridad $\psi(-\mathbf{r})$ ha de representar también un estado posible, con la misma energía, entonces el hamiltoniano y, en particular, la energía potencial de interacción deben ser invariantes bajo una transformación de paridad; es decir, $V(\mathbf{r}) = V(-\mathbf{r})$. Esto tiene dos consecuencias importantes: en primer lugar, las funciones propias del hamiltoniano deben satisfacer o bien la igualdad $\psi(\mathbf{r}) = \psi(-\mathbf{r})$ (funciones pares) o

bien la igualdad $\psi(\mathbf{r}) = -\psi(-\mathbf{r})$ (funciones impares). En segundo lugar, si la función de onda inicial del sistema tiene una cierta paridad (si es una función definida de funciones pares e impares), esta característica se mantiene constante durante su evolución, independientemente de las transformaciones que éste pueda sufrir. En definitiva, la conservación de la paridad en la evolución de un sistema físico traduce nuestra creencia en que es imposible distinguir si estamos observando un fenómeno real a su imagen especular.

Desde los años treinta, el principio de la conservación de la paridad de los estados de un sistema cuántico guió a los físicos a la hora de construir su hamiltoniano. Como la parte correspondiente a la energía cinética es siempre invariante en la inversión, se preocuparon de escoger potenciales de interacción que también fueran invariantes. Es el caso del potencial coulombiano de que ya hemos hablado. Otro ejemplo es el potencial de interacción dipolar entre la luz y los átomos. En este caso, el potencial es proporcional al producto escalar del vector campo eléctrico \mathbf{E} de la onda luminosa y del momento dipolar $\mathbf{e} \cdot \mathbf{r}$. Aunque tanto el campo eléctrico como el momento dipolar cambian de sentido cuando se transforma \mathbf{r} en $-\mathbf{r}$, su producto escalar permanece constante. Los vectores que cambian de sentido en la inversión, tales como la velocidad, la aceleración, la fuerza, la cantidad de movimiento, ..., se denominan vectores polares. Existe otro tipo de vectores que no cambian de sentido en la inversión respecto al origen de coordenadas, tales como el momento angular, el campo magnético, ..., y que se llaman vectores axiales. Su producto escalar también es invariante en la inversión y se ha utilizado para definir el potencial de alguna interacción, como por ejemplo, la interacción espín-órbita entre el espín S del electrón y su momento angular orbital L .

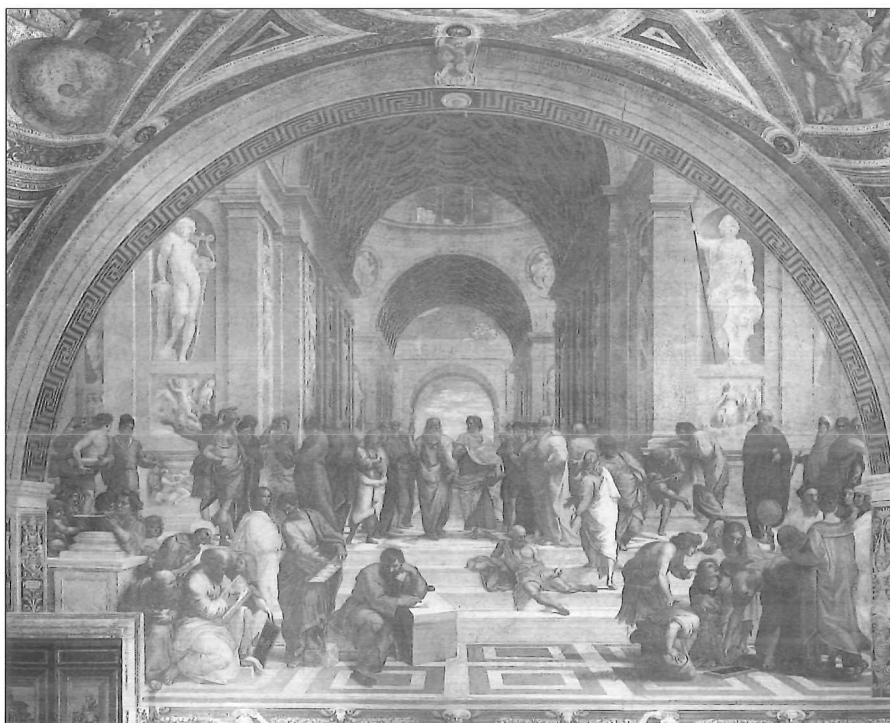
Acoplado por un lado vectores polares y por otro vectores axiales, sus productos escalares pueden entrar a formar parte del mismo

hamiltoniano de un sistema físico. Pero, ¿qué pasa si se acopla un vector axil con un vector polar? Su producto escalar no es invariante respecto a la inversión, ya que el vector polar cambia de sentido en ella y el axil no. Parejas de este tipo eran rechazadas a la hora de construir potenciales de interacción. Tal era la fe de los físicos en el principio de la conservación de la paridad o su confianza de que un espejo reflejaba fielmente la realidad.

LAS ATREVIDAS PROPUESTAS DE LEE Y YANG

En 1956 se había encontrado experimentalmente que ciertos mesones (denominados por aquel entonces τ y θ) tenían la misma masa, el mismo periodo de desintegración y el mismo espín. Esto parecía indicar que se trataba de la misma partícula. Sin embargo se desintegraban en sistemas de piones de paridad opuesta. Esto quería decir que o bien las funciones que representaban los estados iniciales de los mesones tenían distinta paridad o no se trataba de la misma partícula. En todo caso, éstas eran las dos posibilidades que el sacrosanto principio de la conservación de la paridad permitía.

Pero Yang y Lee osaron atacar ese principio. ¿Y si la paridad no se conservase en esta interacción? Había muchos experimentos que confirmaban la conservación de la paridad en las interacciones electromagnética y nuclear fuerte. Por otra parte, la teoría sobre la desintegración β (una interacción débil), debida al gran físico ENRICO FERMI, no contenía en su hamiltoniano ninguna parte que no fuera invariante respecto a la inversión. Tampoco se había encontrado experimentalmente ninguna evidencia de que el principio de conservación de la paridad hubiese sido violado en las interacciones débiles. Lee y Yang respondían a esto en un famoso artículo publicado en 1956 diciendo que quizá no se hubiese buscado dicha evidencia en los experimentos realizados. Convencidos como estaban



"La Escuela de Atenas", fresco pintado por Rafael (1508-10), según aparece pintado en el Vaticano.

los físicos de que el principio se cumplía, nadie había tratado de comprobarlo. Yang y Lee propusieron una serie de experimentos de desintegración β buscando la violación del principio de conservación de la paridad.

EL ENCUENTRO CON CHIEN-SHIUNG WU

En aquella época, Lee y Yang trabajaban en Nueva York y conocían a una compatriota, doctora en Ciencias Físicas, destacada investigadora experimental en el campo de la desintegración nuclear y a quien sus colegas llamaban Madame Wu. Con ella discutieron la posibilidad de estudiar experimentalmente la emisión β en la desintegración de Co^{60} en Ni^{60} . El experimento consistiría en lo siguiente.

- Se orientarían los espines nucleares de Co^{60} en una dirección y sentido determinados (es decir, se fijaría el vector axil I).
- En esas condiciones, se determinaría el número de electrones β por unidad de tiempo emitidos en el sentido del espín nuclear y en el sen-

tido contrario. Ahora bien, el número de electrones emitidos por unidad de tiempo en una dirección y un sentido determinados es proporcional a su velocidad v . Por consiguiente, de esta manera se determinaría experimentalmente algo proporcional a dicha velocidad, que es un vector polar.

Si se observase una diferencia entre el número de electrones β emitidos en un sentido y en otro, esto significaría que debía existir un acoplamiento entre v e I . En el potencial de interacción de la emisión β sería necesario hacer intervenir un término proporcional al producto escalar $v \cdot I$ que diera cuenta de este resultado. Este potencial ya no sería invariante respecto a la inversión, y las funciones de onda a que daría lugar ya no conservarían su paridad en la transformación especular.

El experimento estaba muy bien planteado, pero su puesta en práctica presentaba grandes dificultades. La más importante de ellas era cómo conseguir que hubiera muchos núcleos de cobalto en una muestra radiactiva con los espines orientados en una determinada



Imagen invertida de la "Escuela de Atenas", según aparece publicada en la *Historia de la Ciencia*, Ediciones Danae, 3.ª edición, 1968.

dirección y un determinado sentido. En la muestra, por efecto de la temperatura se encuentran orientados al azar. Si se aplica un campo magnético externo, los espines tienden a orientarse en el sentido que les fija el campo, pero la energía de orientación debida a éste compite con la energía de agitación térmica que tiende a desordenar los espines. La energía térmica por átomo es del orden de 10^{-23} J para una temperatura de 1 K, mientras que la energía de orientación magnética para cada espín nuclear (que es del orden del magnetón de Bohr nuclear $\beta_N \cong 0,5 \times 10^{-26}$ J T⁻¹ multiplicado por el campo magnético) es unas mil veces menor para un campo de 1 T (10^4 gauss). Era necesario, pues, trabajar a temperaturas más bajas o a campos mucho mayores. Pero en la época, los mayores campos magnéticos constantes que se podían conseguir eran inferiores a 1 T, y la temperatura más pequeña que se había alcanzado era de 0,01 K. Aun trabajando a esta temperatura sería imposible orientar los espines nucleares puesto que la energía térmica era aún diez veces superior a la magnética.

MADAME WU HACE TRABAJAR A LOS ESPINES ELECTRÓNICOS

Para resolver este problema, Madame Wu recordó que para orientar el espín nuclear, unos años antes GORTER y ROSE habían propuesto utilizar el intensísimo campo magnético local que crean los espines electrónicos allí donde se encuentra el núcleo. Si se conseguía enfriar la muestra de cobalto hasta 0,01 K, con un campo magnético de 0,01 T se podrían orientar los espines electrónicos del cobalto, ya que, en este caso, la energía magnética de orientación es unas 1.836 veces mayor que en el caso nuclear, al ser proporcional al magnetón de Bohr electrónico β_e . A dicha temperatura se orientarían fácilmente los espines electrónicos en una dirección y sentido determinados por aplicación de un campo magnético externo. Hecho esto, el campo magnético que el espín electrónico crea en el núcleo, que es del orden de 10 T, sería suficiente para orientar los espines nucleares. Madame Wu haría trabajar a los electrones a su favor. Bastaría conseguir enfriar la muestra de cobalto radiactivo a 0,01 K.

Las dificultades seguían siendo grandes, pero Madame Wu se creía ante ellas⁴. Por aquellos años, en la Oficina de Pesas y Medidas de Washington (National Bureau of Standards, NBS) existía un equipo capitaneado por Ambler que había conseguido ya alcanzar dicha temperatura por desimanación adiabática de una sal paramagnética. Madame Wu entró en contacto con estos investigadores, se trasladó a Washington y con ellos realizó el famoso experimento que demostraba la violación del principio de conservación de la paridad en la desintegración β .

LA DESIMANACIÓN ADIABÁTICA

En 1953, Ambler y sus colaboradores⁵ hicieron un experimento con una sal paramagnética, el nitrato de cerio y magnesio ($2\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 3\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$, o, más simplemente, NMC) en el que llegaron a obtener una temperatura de 0,01 K por desimanación adiabática. El ingenioso experimento consistía en lo siguiente:

- Se enfriaba previamente el cristal de NMC a 1 K con ayuda de un baño de helio líquido superfluido. Para ello colocaron el cristal en un soporte aislante del calor en el centro de un recinto cerrado, cuyas paredes conductoras estaban en contacto con el baño de helio líquido. Después de haber hecho un vacío en el recinto de 10^{-6} mmHg, se aseguraba el contacto térmico entre el cristal de NMC y las paredes del recinto introduciendo ⁴He a una presión de 10^{-3} mmHg, presión a la que el helio permea en estado gaseoso.

⁴ En su vida había encontrado muchas. Nacida en la China imperial, en una sociedad extraordinariamente discriminatoria para la mujer, que le tenía incluso prohibida la entrada a la universidad, tuvo que luchar mucho para conseguir culminar sus estudios. En el año 1936 emigró a los Estados Unidos y allí consiguió labrarse una carrera en el campo de la Física.

⁵ Ambler, Grace, Halban, Kurti, Durand & Johnson, *Phil. Mag.* 44, 216 (1953).

- Cuando el cristal de NMC se encontraba a 1 K, se orientaban los espines electrónicos del cerio con un campo magnético estático de 0,7 T, producido por una bobina superconductor. Gran parte de los iones Ce^{3+} , paramagnéticos, orientaban sus espines electrónicos bajo la acción del campo al ser la energía magnética superior a la térmica. Al orientarse, la entropía del subsistema de iones paramagnéticos disminuía, cediendo calor a la red cristalina de NMC, la cual, a su vez, se lo cedía al helio gaseoso, éste a las paredes del recinto y éstas al baño de helio líquido, que actuaba en el proceso como una masa de capacidad calorífica infinita. Esto hacía que la orientación de los espines electrónicos se produjera a la temperatura constante del baño térmico (1 K).

- En estas condiciones, se aislaba térmicamente el cristal de NMC extrayendo el helio gaseoso hasta alcanzar un vacío de 10^{-6} mmHg. Una vez hecho esto, se suprimía el campo magnético orientador de la bobina y los espines electrónicos comenzaban a desorientarse por efecto térmico. Cuando se alcanzaba la total desorientación, el subsistema de iones paramagnéticos había hecho aumentar su entropía a expensas del calor robado a la red cristalina de NMC, que, al estar aislada térmicamente, se enfriaba.

Mediante este procedimiento consiguieron alcanzar la centésima de grado kelvin.

EL FAMOSO EXPERIMENTO

Madame Wu se unió al equipo de Ambler y construyeron el dispositivo cuya parte esencial está esquematizada en la Figura 1. En el centro del recinto se encontraba un pequeño nicho fabricado con un buen monocristal de NMC, con su eje ternario (eje de imanación nula) en la dirección vertical. En el fondo de la oquedad se había hecho crecer una pequeña capa cristalina, de unas cincuenta micras de espesor, que

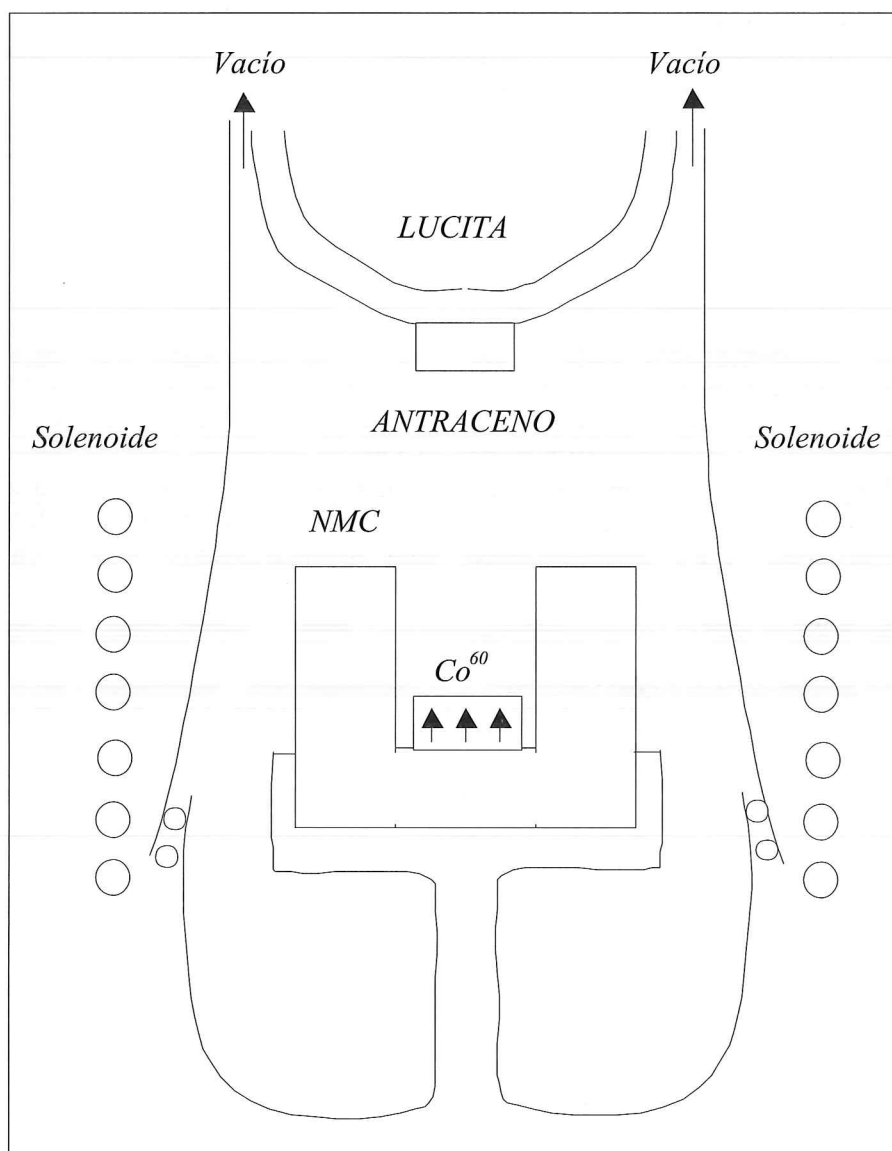


Figura 1.

contenía Co^{60} con algunos microcurios de actividad radiactiva.

Para orientar los espines del Ce^{3+} existía una bobina superconductor que creaba un campo magnético intenso horizontal de 0,7 T (que no aparece en la Figura 1), y para orientar los espines electrónicos de Co^{60} , en el momento oportuno se deslizaba un solenoide que creaba un campo magnético vertical de 0,01 T, apuntando hacia arriba o hacia abajo, según el sentido de la corriente continua que circulaba por él.

Para hacer el recuento de los electrones β se colocaba un cristal de antraceno dentro del recinto vacío y a unos dos centímetros por encima de la capa radiactiva. Cuando los electrones chocaban contra el cristal de antraceno, se producían

destellos luminosos que se transmitían al exterior por una ventana de vidrio y que eran conducidos por una barra de lucita de un metro de longitud hasta un fotomultiplicador colocado en su extremo. La señal obtenida proporcionaba el número de electrones que llegaban al cristal de antraceno por unidad de tiempo.

En la desintegración de Co^{60} en Ni^{60} se producían, además, rayos γ . Esta radiación provenía de la interacción electromagnética debida a la existencia de cargas y corrientes nucleares. Era esencialmente anisótropa y su anisotropía dependía de las direcciones de los momentos dipolares de dichas cargas. Al orientarse los espines nucleares por la acción del campo magnético local que creaban los espines electróni-

cos, también se orientaban los dipolos eléctricos. De manera que una medida de la anisotropía de la radiación nos permitiría determinar el porcentaje de espines nucleares de Co^{60} que habían sido orientados. Por otra parte, otros trabajos realizados en la época permitían relacionar esta anisotropía con la temperatura de la capa cristalina. Madame Wu y sus colaboradores estudiaron una de las emisiones γ que se producían en el experimento y para ello colocaron sendos detectores (cristales de NaI) en el exterior del criostato⁶, uno colocado en el plano horizontal (perpendicular a la orientación de los espines) y otro en una dirección próxima a la vertical.

Preparado así el experimento, procedieron de la siguiente manera:

- Una vez suprimido el intenso campo magnético horizontal y efectuada la desimancación adiabática, el cristal de NMC y la capa cristalina conteniendo Co^{60} alcanzaban la temperatura de 0,01 K. Inmediatamente después se deslizaba el solenoide alrededor del criostato y se hacía pasar una corriente que producía un campo vertical de 0,01 T apuntando hacia arriba. Este campo orientaba los espines electrónicos de Co^{60} (que, a su vez, orientaban a los espines nucleares también apuntando hacia arriba) pero no actuaba sobre los espines de los iones paramagnéticos, porque en esa dirección (eje ternario vertical) el cristal de NMC no se imanaba. Tampoco actuaría sobre los electrones β que salieran en la dirección vertical por ser paralelo a su velocidad. En llevar a cabo toda esta operación se invirtieron unos veinte segundos.

- Acto seguido se pusieron en funcionamiento los contadores de electrones β y de rayos γ . Se hizo el recuento de electrones cada minuto (con un intervalo de registro de cuarenta segundos) y se determinó el número de fotones γ cada veinte segundos.

Como se había interrumpido el proceso de desimancación, el cristal se

calentaba poco a poco y los espines nucleares de Co^{60} se iban desorientando. Al cabo de unos veinte minutos se interrumpía el experimento.

- Se enfriaba de nuevo la muestra, repitiendo el proceso, pero esta vez invirtiendo el sentido de la corriente en el solenoide que producía el campo vertical, con objeto de orientar los espines nucleares hacia abajo. Se ponían en marcha los contadores de electrones y de rayos γ y se repetía el recuento durante otros veinte minutos.

Este segundo experimento era la imagen especular del primero. Los dos equivalían a un solo experimento con los espines apuntando hacia arriba y en el que se hubiesen utilizado dos contadores de electrones β : uno por encima de la muestra y otro por debajo⁷.

Los resultados del experimento están representados en las Figuras 2 y 3. En la primera se muestra la evolución de la emisión de electrones β durante el calentamiento de la capa cristalina. El número N_+ de electrones emitidos por unidad de tiempo en el sentido en que apunta el espín

nuclear era menor que el emitido en el sentido contrario N_- . En el transcurso del tiempo esta diferencia se iba haciendo cada vez más pequeña hasta que se anulaba, tendiendo dichas cantidades al mismo valor límite N_0 . En la Figura 2 vienen representados los cocientes N_+/N_0 y N_-/N_0 .

Al principio de la operación el porcentaje de espines nucleares de Co^{60} hacia arriba o hacia abajo era máximo, lo que provocaba la máxima asimetría en la emisión de electrones β . Al transcurrir el tiempo y calentarse el cristal, los espines nucleares tendían a desorientarse y la asimetría de la emisión desaparecía.

Este hecho fue corroborado por el análisis de la emisión γ , que viene representada en la Figura 3. En ella se indica el factor de anisotropía ε definido de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{n_{\perp} - n_{\parallel}}{n_{\perp}}$$

donde n_{\perp} y n_{\parallel} son, respectivamente, el número de fotones emitidos en el plano perpendicular al campo magnético orientador (plano horizontal) y en la dirección paralela a él. Como puede verse, este factor de anisotropía era siempre positivo (n_{\perp} es siempre mayor que n_{\parallel}), cualquiera que fuera el sentido del campo magnético, y disminuía paulatinamente

⁷ En el dispositivo de este experimento, los electrones que salían hacia abajo eran absorbidos por el cristal de NMC, por lo que resultaba difícil detectarlos. Por otra parte, era mucho más sencillo experimentalmente cambiar el sentido de la corriente en el solenoide para producir la imagen especular que colocar dos detectores de electrones β en condiciones idénticas.

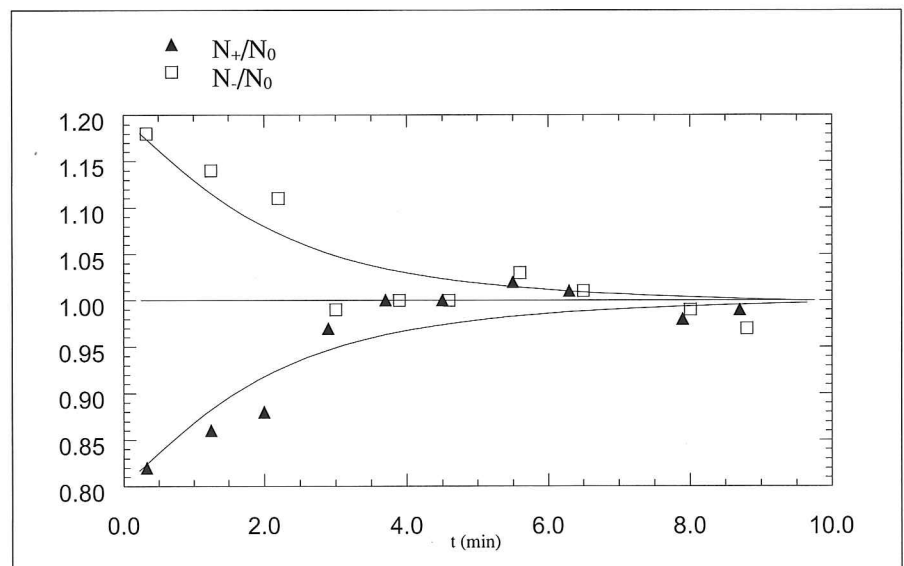


Figura 2.

⁶ No fue necesario colocarlos dentro puesto que los rayos γ son muy penetrantes.

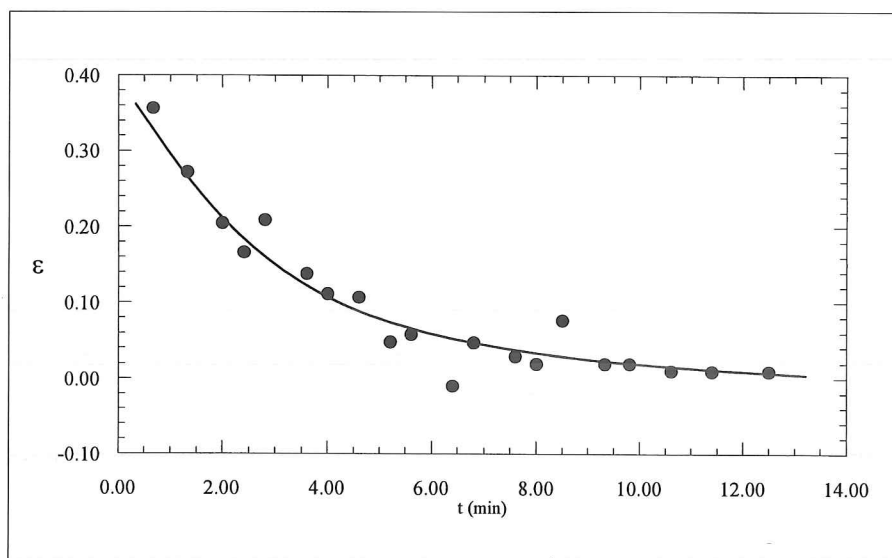


Figura 3.

desde el principio del experimento hasta anularse cuando los espines nucleares estaban orientados al azar. El momento en que esto se producía (al cabo de unos seis minutos de iniciada la operación) coincidía con la desaparición de la asimetría en la emisión β .

En resumen:

- En la emisión β se producen menos electrones en el sentido en que apunta el espín nuclear que en el sentido contrario, lo que quiere decir que existe un acoplamiento entre su velocidad v y el espín nuclear I , violándose así el principio de conservación de la paridad en la interacción débil.

- En la emisión γ no existe acoplamiento entre la cantidad de movimiento del fotón y el espín nuclear, ya que el número de fotones que se emiten en una dirección dada es el mismo para el espín apuntando hacia arriba o hacia abajo.

Lee, Yang, Wu y los físicos que colaboraron con ellos se salieron con la suya y rompieron el espejo. Los dos primeros obtuvieron el premio Nobel de Física en 1957 por haber predicho la no conservación de la paridad en las interacciones débiles. Aún hoy en día no se sabe muy bien por qué no se lo dieron también a Madame Wu, que lo demostró experimentalmente. Hay

que tener en cuenta que el Premio Nobel no se puede conceder a más de tres personas y que la ayuda del equipo de criogenia del NBS fue esencial. Por otra parte, pocas semanas después de este experimento, R. Garwin, L. Lederman y M. Weinrich, también en la propia Universidad de Columbia, llevaron a cabo otro de los experimentos sugeridos por Lee y Yang que confirmaban una vez más la no conservación de la paridad en las interacciones débiles. (Los informes de ambos experimentos aparecieron como artículos consecutivos en el mismo número de *Physical Review*.) Quizá todo se aclare cuando dentro de unos años se abran los archivos del Premio Nobel correspondientes a 1957. En todo caso, Chien-Shiung Wu, que falleció el 16 de febrero de 1997, estuvo muy bien considerada toda su vida entre sus colegas, recibiendo muchos premios y homenajes, y será siempre recordada como la persona que nos robó el espejo.

En un número próximo discutiremos las consecuencias que la violación de este principio ha tenido en el conocimiento profundo del núcleo atómico.

Manuel Yuste Llandres
Depto. de Física de los Materiales

J. Javier García Sanz
Depto. de Física Fundamental

Microondas en Química

INTRODUCCIÓN

Hoy en día en todas las cocinas suele haber un horno de microondas y, aparte de la controversia generalizada acerca de si realmente puede hacerse *buena cocina* en ellos, la primera sorpresa aparece cuando nos damos cuenta que se puede calentar un líquido casi a ebullición en menos de un minuto, recuperando además el recipiente casi frío. Es decir, es posible transmitir energía a la materia de modo **selectivo** mediante microondas.

La base fundamental del funcionamiento de un horno de microondas es la generación de microondas en el **magnetron**, donde se combinan un campo eléctrico y un campo magnético, siendo dirigidas hacia el interior de la cavidad, que puede ser una antena para una irradiación directa (monomodo) o una cavidad multimodo.

El uso de la energía producida por un microondas para calentar una reacción química data de 1969, año en que Vanderhoff en una patente americana describe la polimerización de acrilato de butilo, ácido acrílico y ácido metacrílico (1). Este trabajo pasó desapercibido hasta 1986 en que Richard N. Gedye (2) y Raymond J. Giguere (3) iniciaron la aplicación sistemática de esta técnica para acelerar reacciones orgánicas.

En cambio, la utilización de microondas para secado de vidrio en pocos minutos fue incorporada mucho antes como técnica habitual en los laboratorios (4), al ser un método simple y muy eficaz.

Las ondas producidas en un horno de microondas doméstico son ondas electromagnéticas de longitud de onda de 12,2 cm, lo que corresponde a una frecuencia de 2.450 MHz, y una energía del orden de 1 J/mol de fotones. Dicho valor energético nos indica que las microondas por sí mismas no pueden proporcionar la energía suficiente para superar las barreras de activación necesarias para que una reacción química ocurra, que recordaremos