

http://www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/phy_007590.html#TopOfPage

El desarrollo de la resonancia magnética

Una ventana abierta a la curación de la mente y el cuerpo: el desarrollo de la resonancia magnética

Aunque la falta de vocalización al hablar o una parálisis parcial pueden ser simplemente indicios de un ataque o una migraña, también pueden ser síntomas de un infarto cerebral. Los infartos cerebrales son la tercera causa de muerte en los Estados Unidos y una de las principales causas de discapacidad grave. Más de 3 millones de personas que han sobrevivido a un infarto cerebral han quedado incapacitadas para trabajar o cuidar de sí mismos. Por esta razón, cuando un paciente entra en una sala de urgencias con estos síntomas, los médicos deben realizar un diagnóstico crucial sin perder un segundo. Aunque el número es aún reducido, son cada vez más los hospitales que pueden realizar una resonancia magnética ultrarrápida del cerebro del paciente mediante una técnica denominada resonancia magnética funcional. En tan sólo unos minutos, el escáner revela no sólo si el paciente ha sufrido un infarto cerebral sino también qué parte del cerebro corre peligro. La urgencia de este diagnóstico no se debe subestimar. Como dijo una vez un neurólogo "Tiempo es cerebro. Cuanto antes se realice el diagnóstico y comience el tratamiento, mayor será la parte del cerebro que se podrá salvar."

Esta herramienta para el diagnóstico de infartos cerebrales representa la primera aplicación clínica importante de la resonancia magnética funcional. Desde principios de la década de 1990, la resonancia magnética funcional ha ayudado a los investigadores en neurología a aprender más sobre el funcionamiento del cerebro, ya que les permite observar los cambios que se producen en la composición química de distintas zonas, así como los cambios que se producen en la circulación de los fluidos en cuestión de segundos o minutos. La resonancia magnética funcional también se puede utilizar para comprender mejor la fisiología de otros órganos.

La resonancia magnética convencional, que proporciona imágenes detalladas de la estructura anatómica, también cumple una función esencial en la observación de otras partes del cuerpo. Permite detectar síntomas de esclerosis arterial en el corazón, así como hernias de disco, cartílagos rotos y tumores en la columna vertebral, los huesos y las articulaciones. En todos estos casos, la resonancia magnética se realiza sin necesidad de dolorosas intervenciones.

Las investigaciones básicas que dieron lugar a la resonancia magnética y a la resonancia magnética funcional se iniciaron en una serie de laboratorios de física en las primeras décadas del siglo XIX. El siguiente artículo describe el camino, con frecuencia tortuoso, que se ha recorrido durante los últimos 70 años desde el trabajo que realizaron una serie de científicos que simplemente investigaban la naturaleza de la materia hasta las aplicaciones actuales que permiten en última instancia salvar numerosas vidas.

Señales de núcleos giratorios

Las imágenes del cerebro humano obtenidas por resonancia magnética funcional representan el avance más reciente en un campo que nació hace apenas 20 años. Actualmente, los científicos utilizan la resonancia magnética funcional para estudiar los cambios que se producen en la actividad del cerebro de pacientes que han sufrido un infarto cerebral y que comienzan a recuperar aptitudes perdidas, con el objetivo de desarrollar tratamientos y terapias más eficaces. La resonancia magnética funcional permite investigar el desarrollo de las redes neuronales de los sistemas motriz, visual, auditivo y del habla de un bebé al escuchar la voz de su madre. También puede ayudar a comprender las sutiles anomalías en la activación del cerebro en niños con problemas de falta de atención por hiperactividad y los problemas de memoria de pacientes con esquizofrenia.

El fenómeno que hace posible todo esto se denomina resonancia magnética nuclear y el camino hacia su descubrimiento comenzó con las primeras investigaciones sobre la naturaleza del átomo. Aunque el concepto de átomo se remonta hasta la Grecia antigua, ha sido en los últimos cien años aproximadamente cuando se ha adquirido un conocimiento objetivo de su existencia y de las partes que lo forman. En 1897, el físico J. J. Thomson, de la Universidad de Cambridge (Inglaterra), descubrió el electrón. Durante las dos décadas siguientes, una serie de destacados físicos, entre los que se incluyen Max Planck, Ernest Rutherford, Niels Bohr, Erwin Schrodinger y Werner Heisenberg, se basaron en los trabajos de unos y otros para avanzar en el estudio de la estructura y propiedades del átomo y las partículas atómicas. Con ello, revolucionaron la física y elaboraron una teoría y un lenguaje nuevos conocidos como mecánica cuántica.

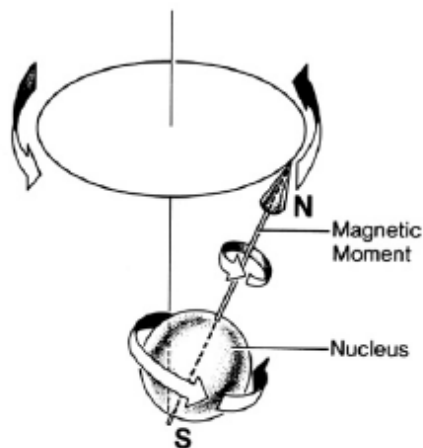
Los experimentos de I. I. Rabi

En 1929, Isidor Isaac Rabi comenzó a impartir clases de mecánica cuántica en la Universidad de Columbia. Durante la década siguiente, su equipo de investigación utilizó una técnica denominada resonancia de haces moleculares para estudiar las propiedades magnéticas de los átomos y las moléculas. En la época en la que Rabi realizó estos experimentos, los físicos sabían que los núcleos atómicos estaban compuestos por dos tipos de partículas: protones con carga positiva y partículas neutras denominadas neutrones. Alrededor de este núcleo formando como una especie de nube se encontraban los electrones, cuya carga era negativa. Los físicos también habían descubierto que los electrones, los protones, los neutrones y, en muchos casos, los núcleos en sí, se comportaban como si giraran sobre su eje, al igual que los planetas. Esto llevó al descubrimiento de una propiedad denominada momento angular de espín, que cuenta con magnitud y dirección. Una partícula giratoria de este tipo genera un campo magnético y un "momento magnético" asociado y actúa como una pequeña barra magnética con polos positivo y negativo. Si se coloca en un campo magnético externo potente, el "momento magnético" de un núcleo tiende a alinearse con (en paralelo) o contra (en sentido antiparalelo) el campo externo. La alineación paralela corresponde a un estado de energía inferior a la alineación antiparalela.

Durante la década de 1930, Isidor Isaac Rabi y su grupo de investigación de la Universidad de Columbia desarrollaron la resonancia magnética de haces moleculares como técnica para

estudiar las propiedades magnéticas y la estructura interna de las moléculas, los átomos y los núcleos, trabajo por el que le fue otorgado el premio Nobel de física en 1944. (Barton Silverman, The New York Times)

Los experimentos de Rabi consistían en hacer pasar un haz de moléculas de cloruro de litio a través de una cámara de vacío y manipular el haz con distintos campos magnéticos. Al estudiar cómo afectaba el campo magnético a la trayectoria de las moléculas, Rabi pudo adquirir nuevos conocimientos acerca de las magnitudes del momento magnético del núcleo. Rabi previó que, con el estímulo apropiado, los momentos magnéticos de los núcleos podían invertirse o cambiar su orientación en relación al campo magnético. En 1937, siguiendo los consejos del físico holandés Cornelius J. Gorter, Rabi y su equipo añadieron un nuevo elemento a sus experimentos: sometieron un haz molecular a ondas de radio (señales electromagnéticas dentro del intervalo de la radiofrecuencia o la radiodifusión) mientras variaban la potencia del campo magnético.



Las resonancia magnética utiliza algunas propiedades fundamentales de los núcleos atómicos, en particular los "momentos magnéticos", ya que se parecen a diminutas barras magnéticas con polos positivo y negativo. Cuando se colocan en un campo magnético externo potente, la dirección del momento magnético "oscila" o cambia según la dirección del campo con una frecuencia proporcional a la fuerza del campo externo. La resonancia magnética se produce cuando la fuerza del campo magnético se manipula hasta que la frecuencia de precesión de la partícula coincide con la de la frecuencia de radio aplicada. Esto hace que el momento magnético de la partícula cambie de orientación en relación al campo magnético externo, una señal detectable que revela la estructura interna y la actividad de cualquier cosa, desde elementos químicos hasta el cerebro humano.

Rabi y su equipo ajustaron la potencia del campo magnético hasta hacer que los momentos magnéticos de los núcleos se invirtieran, lo que sucede cuando la frecuencia de la señal de radio coincide con la frecuencia precesional característica de los núcleos. Cuando se produce esta coincidencia (la frecuencia de resonancia), un núcleo absorbe energía de la señal de radio igual a la diferencia entre sus dos estados de energía y, por tanto, salta al estado superior. También se produce una inversión cuando un núcleo emite dicha energía al pasar de nuevo del estado superior de energía al inferior. Rabi podía detectar la transición

tanto si el núcleo saltaba al estado de energía superior como si descendía al inferior. Esta técnica se denomina en la actualidad resonancia magnética o, de forma más precisa, resonancia magnética de haces moleculares.

El equipo de Rabi empleó esta nueva técnica para deducir detalles hasta ahora desconocidos acerca de las interacciones internas de las moléculas. Descubrieron una serie de resonancias dentro de una molécula simple que les permitió "ver" cómo los átomos individuales están unidos entre sí y cómo sus núcleos se ven afectados por los átomos vecinos. Estos extraordinarios experimentos y el desarrollo de la resonancia magnética de haces moleculares como técnica de estudio de las propiedades magnéticas y la estructura interna de moléculas, átomos y núcleos le valieron a Rabi el premio Nobel de física en 1944.

Varios meses después de realizar estos experimentos, el equipo de Rabi intentó una variación: manipular la frecuencia de radio en lugar de la potencia del campo magnético. Este método, que amplía el espectro de las señales resultantes al igual que se amplía el espectro de la luz visible al pasar por un prisma, es la base de la espectroscopia de radiofrecuencias, que revolucionaría el análisis químico y resultaría ser un componente esencial en el desarrollo de las exploraciones mediante resonancia magnética como herramienta de diagnóstico médico.

Un tipo diferente de resonancia

Aunque el comienzo de la Segunda Guerra Mundial interrumpió las investigaciones sobre resonancia magnética nuclear, en los años posteriores a la guerra se produjo un gran número de avances. En Estados Unidos, dos grupos de físicos se propusieron por separado desarrollar un método más simple para observar la resonancia magnética en los núcleos de moléculas de líquidos y sólidos en lugar de en moléculas aisladas como en los experimentos de Rabi. Edward Purcell, de cuyo equipo formaban parte Henry Torrey y Robert Pound, fue el encargado de dirigir la investigación de la Universidad de Harvard y Felix Bloch, de cuyo equipo formaban parte William Hansen y Martin Packard, fue el encargado de dirigir la investigación de la Universidad de Stanford.

En 1945, dos grupos de investigación independientes, uno dirigido por Edward Purcell de la Universidad de Harvard (izquierda) y el otro por Felix Bloch de la Universidad de Stanford, detectaron "resonancia magnética nuclear en materia condensada". En 1952, Bloch y Purcell compartieron el premio Nobel de física por estos experimentos históricos. (Harvard University News Office, Cambridge, Massachusetts y Stanford University News Service)

Tanto Purcell como Bloch decidieron estudiar el protón, el núcleo del átomo de hidrógeno (H). Al estar compuesto por un único protón, el núcleo del hidrógeno posee un momento magnético considerable. El hidrógeno se convertiría en el elemento más importante para la resonancia magnética debido a sus propiedades nucleares favorables, su presencia casi universal y su abundancia en el cuerpo humano como parte del agua (H₂O). El equipo de Purcell utilizó un bloque de 90 g de parafina como fuente de hidrógeno, mientras que el equipo de Bloch empleó unas gotas de agua contenidas en una esfera de cristal. Los dos

equipos de investigación colocaron las muestras en un campo magnético y esperaron a que los núcleos alcanzaran un equilibrio magnético y térmico, un estado magnetizado en el que los núcleos se alinean ligeramente más en paralelo al campo externo que en sentido antiparalelo. A continuación, al igual que hizo el equipo de Rabi, los equipos de investigación aplicaron ondas de radio para provocar que los momentos magnéticos de los núcleos de las muestras se invirtieran. Purcell y Bloch esperaban detectar resonancia magnética al observar la energía que los núcleos en precesión absorbían o cedían al campo de frecuencia de radio cuando se propiciaban las condiciones de resonancia.

En 1945, ambos grupos lograron crear, con tres semanas de diferencia, las condiciones necesarias para observar el fenómeno. Sus experimentos demostraron lo que técnicamente se conoce como resonancia magnética nuclear en materia condensada (actualmente abreviado como RMN), para distinguirlo del descubrimiento de Rabi, la resonancia magnética de haces moleculares. En 1952, Bloch y Purcell compartieron el premio Nobel de física por estos experimentos.

Las investigaciones en resonancia magnética nuclear siguieron avanzando. Los investigadores que formaban parte de los laboratorios de Purcell y Bloch pronto comenzaron a utilizar la espectroscopia de la resonancia magnética nuclear para investigar la composición química y la estructura física de la materia. Uno de los primeros avances en este sentido fue la medición de las cantidades denominadas tiempos de relajación, T1 y T2. T1 es el tiempo que tardan los núcleos de las muestras experimentales en volver a su alineación original; T2 es la duración de la señal magnética obtenida de la muestra. Uno de los primeros alumnos de Purcell en graduarse, Nicolaas Bloembergen, que había llegado a Harvard desde Holanda en 1946, jugó un papel decisivo junto a Pound y Purcell en esta investigación. Bloembergen fue el primer investigador en medir los tiempos de relajación de forma precisa y, junto a Purcell y Pound, también midió el modo en que estos tiempos cambiaban en gran variedad de líquidos y sólidos. Afortunadamente para futuras investigaciones y aplicaciones, los tiempos de relajación pueden medirse en segundos o fracciones de segundo, convirtiendo a la resonancia magnética nuclear en una herramienta de investigación enormemente práctica.

Bloembergen, Purcell y Pound publicaron un artículo en 1948 que ejerció una gran influencia en varias ramas de la física. La manipulación de los tiempos de relajación ha proporcionado un método de gran eficacia en química y biología para analizar la estructura de las moléculas y, como otros investigadores descubrirían más tarde, resulta esencial para producir el contraste necesario para la obtención de imágenes de tejidos del organismo humano.

En 1945, dos grupos de investigación independientes, uno dirigido por Edward Purcell de la Universidad de Harvard (izquierda) y el otro por Felix Bloch de la Universidad de Stanford, detectaron "resonancia magnética nuclear en materia condensada". En 1952, Bloch y Purcell compartieron el premio Nobel de física por estos experimentos históricos. (Harvard University News Office, Cambridge, Massachusetts y Stanford University News Service)

Tanto Purcell como Bloch decidieron estudiar el protón, el núcleo del átomo de hidrógeno (H). Al estar compuesto por un único protón, el núcleo del hidrógeno posee un momento magnético considerable. El hidrógeno se convertiría en el elemento más importante para la resonancia magnética debido a sus propiedades nucleares favorables, su presencia casi universal y su abundancia en el cuerpo humano como parte del agua (H₂O). El equipo de Purcell utilizó un bloque de 90 g de parafina como fuente de hidrógeno, mientras que el equipo de Bloch empleó unas gotas de agua contenidas en una esfera de cristal. Los dos equipos de investigación colocaron las muestras en un campo magnético y esperaron a que los núcleos alcanzaran un equilibrio magnético y térmico, un estado magnetizado en el que los núcleos se alinean ligeramente más en paralelo al campo externo que en sentido antiparalelo. A continuación, al igual que hizo el equipo de Rabi, los equipos de investigación aplicaron ondas de radio para provocar que los momentos magnéticos de los núcleos de las muestras se invirtieran. Purcell y Bloch esperaban detectar resonancia magnética al observar la energía que los núcleos en precesión absorbían o cedían al campo de frecuencia de radio cuando se propiciaban las condiciones de resonancia.

En 1945, ambos grupos lograron crear, con tres semanas de diferencia, las condiciones necesarias para observar el fenómeno. Sus experimentos demostraron lo que técnicamente se conoce como resonancia magnética nuclear en materia condensada (actualmente abreviado como RMN), para distinguirlo del descubrimiento de Rabi, la resonancia magnética de haces moleculares. En 1952, Bloch y Purcell compartieron el premio Nobel de física por estos experimentos.

Las investigaciones en resonancia magnética nuclear siguieron avanzando. Los investigadores que formaban parte de los laboratorios de Purcell y Bloch pronto comenzaron a utilizar la espectroscopia de la resonancia magnética nuclear para investigar la composición química y la estructura física de la materia. Uno de los primeros avances en este sentido fue la medición de las cantidades denominadas tiempos de relajación, T₁ y T₂. T₁ es el tiempo que tardan los núcleos de las muestras experimentales en volver a su alineación original; T₂ es la duración de la señal magnética obtenida de la muestra. Uno de los primeros alumnos de Purcell en graduarse, Nicolaas Bloembergen, que había llegado a Harvard desde Holanda en 1946, jugó un papel decisivo junto a Pound y Purcell en esta investigación. Bloembergen fue el primer investigador en medir los tiempos de relajación de forma precisa y, junto a Purcell y Pound, también midió el modo en que estos tiempos cambiaban en gran variedad de líquidos y sólidos. Afortunadamente para futuras investigaciones y aplicaciones, los tiempos de relajación pueden medirse en segundos o fracciones de segundo, convirtiendo a la resonancia magnética nuclear en una herramienta de investigación enormemente práctica.

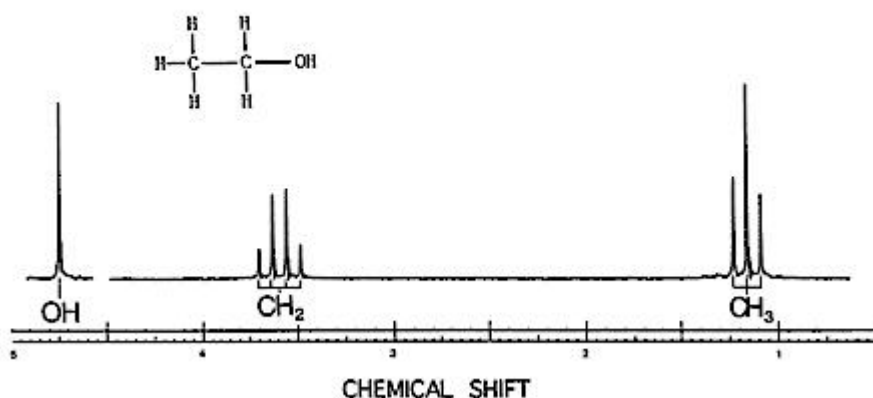
Bloembergen, Purcell y Pound publicaron un artículo en 1948 que ejerció una gran influencia en varias ramas de la física. La manipulación de los tiempos de relajación ha proporcionado un método de gran eficacia en química y biología para analizar la estructura de las moléculas y, como otros investigadores descubrirían más tarde, resulta esencial para producir el contraste necesario para la obtención de imágenes de tejidos del organismo humano.

Escuchando el eco

A finales de la década de 1940, Henry Torrey de la Universidad de Rutgers y, de forma independiente, Erwin Hahn de la Universidad de Illinois, llevaron a cabo un nuevo avance en el campo de la resonancia magnética nuclear al aplicar a la muestra impulsos de ondas de radio potentes en lugar de una única onda continua. Primero observaron señales de resonancia magnética nuclear transitorias durante la aplicación de impulsos largos. Gracias a las observaciones posteriores de Hahn acerca de que las señales de resonancia magnética nuclear transitorias podían medirse después de la aplicación de impulsos cortos, la técnica de impulsos se convirtió en la opción ideal para físicos y químicos que investigaban átomos y moléculas.

Además, Hahn descubrió un fenómeno conocido como "eco de espín", que resultó ser de gran importancia para la medición de los tiempos de relajación. En un principio, Hahn atribuyó estas señales aparentemente falsas a un fallo en su equipo electrónico. Tras un estudio más profundo, reconoció que estaban causadas por la aceleración y desaceleración de los núcleos giratorios debido a las variaciones en los campos magnéticos locales. Al aplicar dos o tres impulsos de radio cortos y, a continuación, escuchar el eco, Hahn descubrió que podía obtener información aún más detallada sobre la relajación del espín nuclear de lo que era posible con un único impulso.

La resonancia magnética nuclear con impulsos y los ecos de espín jugarían un papel esencial en el desarrollo de la resonancia magnética dos décadas después. En aquel momento, sin embargo, la idea de utilizar la resonancia magnética nuclear para la obtención de imágenes simplemente no se le ocurrió a ninguno de los científicos que utilizaban el espectro de resonancia magnética nuclear en física o química. En cualquier caso, antes de que la resonancia magnética nuclear se pudiera convertir en una herramienta práctica para la obtención de imágenes, era necesario realizar algunos avances. A finales de la década de 1950, Russell Varian, de Varian Associates, propuso un nuevo método de impulsos denominado resonancia magnética nuclear con transformada de Fourier. Prácticamente al mismo tiempo, Irving Lowe y Richard E. Norberg, de la Universidad de Washington en St. Louis, demostraron experimental y teóricamente cómo era posible obtener todos los resultados disponibles de los experimentos con onda continua mediante la manipulación matemática de las señales producidas en un experimento con impulsos. Sin embargo, en aquel momento este proceso matemático necesario para analizar los datos de los impulsos (una técnica denominada transformación de Fourier) no resultaba práctico debido a las limitaciones de los equipos informáticos de la época.



Espectro de RMN de protón de alcohol etílico. Los protones en distintos entornos químicos (es decir, CH_3 , CH_2 y OH) resuenan a distintas frecuencias químicas que corresponden a distintos "cambios químicos". La división de la resonancia de los protones de CH_2 y CH_3 se debe a las interacciones de sus espines con los espines de los protones de los átomos de carbono adyacentes. (Adaptado de "Selected ^1H Nuclear Magnetic Resonance Spectral Data" del Thermodynamics Research Center [TRC], Universidad A&M de Texas, 1982. Actualmente, TRC forma parte del departamento de propiedades físicas y químicas del National Institute of Standards and Technology en Boulder, Colorado.)

A finales de la década de 1960, Richard Ernst y Weston Anderson, que por entonces trabajaban para Varian Associates, estaban estudiando el complejo espectro de resonancia magnética nuclear, de gran interés para los químicos. El hecho de buscar las frecuencias que producen la gran cantidad de líneas del espectro mediante el método de aproximaciones sucesivas hacía que el proceso fuera extremadamente lento. Estos investigadores se dieron cuenta de que si emitían de forma simultánea un intervalo de frecuencias de radio a los átomos de la muestra y, a continuación, realizaban el análisis de Fourier a la señal de impulso resultante, podían obtener todos los resultados del método de onda continua. Esta técnica resultaba mucho más rápida que la anterior, y permitía a los investigadores observar señales hasta diez veces más débiles. Para entonces, los avances realizados en el campo de la informática hacían que la transformación de Fourier resultara práctica. Hoy es posible emplear la resonancia magnética nuclear para analizar muestras muy pequeñas de un material o identificar átomos poco comunes en muestras más grandes. En 1991, Ernst obtuvo el premio Nobel de química por sus contribuciones al desarrollo de la espectroscopia de la resonancia magnética nuclear de alta resolución.

La ciencia de las imágenes

La aparición de los equipos informáticos de alta velocidad fue fundamental para el desarrollo de la técnica de obtención de imágenes por resonancia magnética, ya que permitían gestionar los numerosos y complejos cálculos que eran necesarios para obtener las imágenes. Además de estos avances en el campo de la informática, otros tres avances contribuyeron al nacimiento de la técnica de obtención de imágenes por resonancia

magnética. Uno de estos avances fue el que realizó el ingeniero electrónico británico Godfrey Hounsfield, que en 1971 fabricó un instrumento que combinaba una máquina de rayos X con un ordenador y empleó algunos principios de reconstrucción algebraica para explorar el organismo en distintas direcciones, manipulando las imágenes para obtener una vista transversal del interior. Hounsfield desconocía que el físico nuclear sudafricano Allan Cormack había publicado básicamente la misma idea en 1957, utilizando una técnica de reconstrucción denominada transformada de radón. Aunque el trabajo de Cormack no tuvo una gran difusión, él y Hounsfield compartieron en 1979 el premio Nobel de fisiología o medicina por el desarrollo de la tomografía computerizada. Los principios fundamentales de la tomografía computerizada constituyen la base de muchos de los sofisticados métodos de obtención de imágenes que existen en la actualidad.

Los otros dos avances que contribuyeron a la obtención de imágenes por resonancia magnética estaban relacionados con la resonancia magnética nuclear. Uno fue la conceptualización de la resonancia magnética nuclear como herramienta de diagnóstico clínico y el otro la invención de un método práctico para producir imágenes útiles a partir de los datos de la resonancia magnética nuclear.

Ya en 1959, J. R. Singer, de la Universidad de California, Berkeley, propuso que la resonancia magnética nuclear podía utilizarse como herramienta de diagnóstico en medicina. Unos años más tarde, Carlton Hazlewood, del Baylor College of Medicine, publicó los resultados de una serie de trabajos en los que se utilizó la resonancia magnética nuclear para diagnosticar enfermedades musculares en pacientes humanos. En 1969, Raymond Damadian, un médico del Downstate Medical Center de Brooklyn (Nueva York), comenzó a idear la forma de utilizar esta técnica para detectar los primeros signos del cáncer en el organismo. En un experimento realizado en 1970, Damadian extirpó una serie de tumores de rápido crecimiento que se habían implantado en ratas de laboratorio y comprobó que la resonancia magnética nuclear de los tumores era diferente de la de los tejidos normales. En 1971, Damadian publicó los resultados de sus experimentos en la revista Science. Sin embargo, aún no se había demostrado la fiabilidad clínica del método de Damadian en la detección o diagnóstico del cáncer.

El gran avance técnico que hizo posible producir una imagen útil a partir de las señales de resonancia magnética nuclear de tejidos vivos lo realizó el químico Paul Lauterbur, que a principios de la década de 1970 dirigía la compañía NMR Specialties, ubicada en Pittsburgh. En 1971, Lauterbur observó al químico Leon Saryan repetir los experimentos de Damadian con tumores y tejidos sanos de ratas. Lauterbur llegó a la conclusión de que la técnica no ofrecía la información suficiente para diagnosticar tumores y se propuso idear un método práctico para obtener imágenes a partir de la resonancia magnética nuclear. La clave estaba en ser capaz de localizar la ubicación exacta de una determinada señal de resonancia magnética nuclear en una muestra: si se determinaba la ubicación de todas las señales, sería posible elaborar un mapa de toda la muestra.

La innovadora idea de Lauterbur consistía en superponer al campo magnético estático espacialmente uniforme un segundo campo magnético más débil que variara de posición de forma controlada, creando lo que se conoce como gradiente de campo magnético. En un extremo de la muestra, la potencia del campo magnético graduado sería mayor, potencia

que se iría debilitando con una calibración precisa a medida que se fuera acercando al otro extremo. Dado que la frecuencia de resonancia de los núcleos en un campo magnético externo es proporcional a la fuerza del campo, las distintas partes de la muestra tendrían distintas frecuencias de resonancia. Por lo tanto, una frecuencia de resonancia determinada podría asociarse a una posición concreta. Además, la fuerza de la señal de resonancia en cada frecuencia indicaría el tamaño relativo de los volúmenes que contienen los núcleos en distintas frecuencias y, por tanto, en la posición correspondiente. Las sutiles variaciones de las señales se podrían utilizar entonces para representar las posiciones de las moléculas y crear una imagen. (Actualmente, los dispositivos de obtención de imágenes por resonancia magnética utilizan tres conjuntos de bobinas de gradientes electromagnéticos sobre el sujeto para codificar las tres coordenadas espaciales de las señales.)

Al otro lado del Atlántico, Peter Mansfield, de la Universidad de Nottingham, Inglaterra, tuvo una idea similar. En 1972, Mansfield estaba estudiando el modo de utilizar la resonancia magnética nuclear para obtener información detallada acerca de la estructura de materiales cristalinos. En un trabajo publicado en 1973, Mansfield y sus colegas también utilizaron un esquema de gradiente de campo. En 1976, Mansfield desarrolló una técnica ultrarrápida para obtener imágenes con resonancia magnética conocida como ecoplanar, que permite explorar todo el cerebro en cuestión de milésimas de segundo. La técnica ecoplanar es la clave para crear imágenes con resonancia magnética de forma rápida para el diagnóstico de infartos cerebrales e imágenes con resonancia magnética funcional en las investigaciones sobre el cerebro.

Mientras tanto, a los resultados de Lauterbur, publicados en 1972, se incorporaba una imagen de la muestra experimental: un par de tubos de ensayo sumergidos en un vial de agua. Mediante el pequeño escáner de resonancia magnética nuclear que él mismo había creado (y una técnica denominada proyección de fondo procedente de la tomografía computerizada), continuó explorando pequeños objetos, incluido un diminuto cangrejo que su hija capturó en la playa de Long Island situada junto a su casa. En 1974, valiéndose de un dispositivo de resonancia magnética nuclear mayor, obtuvo una imagen de la caja torácica de un ratón vivo. En 1975, Mansfield ya había obtenido imágenes de una serie de tallos de plantas y de un muslo de un pavo muerto. Al año siguiente, obtuvo la primera imagen de un dedo humano por resonancia magnética nuclear, en la que se podía diferenciar el hueso, la médula, los nervios y las arterias. Damadian, por su parte, también trabajó en la obtención de imágenes. En 1977, obtuvo una imagen de la caja torácica de un hombre vivo.

Un técnico realiza una exploración mediante resonancia magnética del cerebro de un paciente. Actualmente, los avances en el campo de la informática de alta velocidad y los imanes superconductores han permitido que los dispositivos de resonancia magnética proporcionen imágenes detalladas de la estructura anatómica y que la resonancia magnética funcional detecte cualquier cambio en el funcionamiento del cerebro y de otros órganos. Estas características convierten a los dispositivos de resonancia magnética en herramientas de diagnóstico de incalculable valor para la medicina moderna. (The American College of Radiology)

A principios de la década de 1980, la gran oleada de investigaciones relacionadas con la obtención de imágenes por resonancia magnética dieron lugar a un floreciente sector comercial. (El término "nuclear" se fue poco a poco eliminando del nombre debido a sus connotaciones negativas.) Los avances en el campo de la informática de alta velocidad y los imanes superconductores permitieron a los investigadores diseñar máquinas de resonancia magnética de mayores dimensiones con una sensibilidad y una resolución inmensamente mejores.

A principios de la década de 1980, la gran oleada de investigaciones relacionadas con la obtención de imágenes por resonancia magnética dieron lugar a un floreciente sector comercial. (El término "nuclear" se fue poco a poco eliminando del nombre debido a sus connotaciones negativas.) Los avances en el campo de la informática de alta velocidad y los imanes superconductores permitieron a los investigadores diseñar máquinas de resonancia magnética de mayores dimensiones con una sensibilidad y una resolución inmensamente mejores.

De la estructura a la función

La resonancia magnética, una herramienta extraordinaria para obtener imágenes de la anatomía y la estructura del tejido vivo, se mejoró enormemente durante las décadas de 1980 y 1990 con el desarrollo de su capacidad para captar un organismo en acción (estudiar las funciones). El gran avance que condujo a la resonancia magnética funcional se produjo a principios de la década de 1980, cuando George Radda y sus colegas de la Universidad de Oxford, Inglaterra, descubrieron que la resonancia magnética se podía utilizar para registrar los cambios en el nivel de oxígeno de la sangre, lo que a su vez podía servir para realizar un seguimiento de la actividad fisiológica. El principio en el que se basa la obtención de imágenes con contraste BOLD (del inglés blood oxygen level dependent, dependiente del nivel de oxígeno de la sangre) fue descrito 40 años antes por Linus Pauling. En 1936, Pauling y Charles D. Coryell, ambos del California Institute of Technology (Instituto tecnológico de California), publicaron un estudio en el que describían el magnetismo de la hemoglobina, el pigmento que transporta el oxígeno y que le da a los glóbulos rojos su color. Mucho antes, en 1845, el físico y químico inglés Michael Faraday, el descubridor de la inducción electromagnética, investigó las propiedades magnéticas de la sangre seca y anotó el siguiente comentario: "Intentarlo con sangre reciente." Casualmente, Faraday nunca llegó a hacerlo, siendo Pauling y Coryell los que lo intentaron más de noventa años después. Ambos químicos descubrieron que la susceptibilidad magnética de la sangre arterial completamente oxigenada difería hasta en un 20% de la sangre venosa totalmente desoxigenada.

En 1990, Seiji Ogawa de los laboratorios Bell de AT&T informó que en estudios realizados con animales, la hemoglobina desoxigenada colocada en un campo magnético aumentaba la potencia de dicho campo, mientras que la hemoglobina oxigenada no. Ogawa demostró en estudios con animales que una zona que contiene gran cantidad de hemoglobina desoxigenada deforma ligeramente el campo magnético que rodea al vaso sanguíneo, deformación que se ve reflejada en una imagen por resonancia magnética.

Otros investigadores comenzaron a estudiar estos efectos en seres humanos. En 1992, por ejemplo, varios investigadores, entre los que se incluían Ogawa, John W. Belliveau del Massachusetts General Hospital y Peter Bandettini del Medical College of Wisconsin, publicaron los resultados de una serie de estudios acerca de la respuesta cerebral a estimulación sensorial realizados con estas técnicas de obtención de imágenes por resonancia magnética funcional. Actualmente, las imágenes obtenidas por resonancia magnética funcional se utilizan, entre otras cosas, para guiar a los cirujanos de forma que no se dañen zonas esenciales del cerebro, para detectar síntomas de infartos cerebrales y para esclarecer el funcionamiento del cerebro.

En la actualidad, lo que Rabi comenzó se ha convertido en una industria multimillonaria. La espectroscopia y las exploraciones por resonancia magnética son tecnologías de diagnóstico ampliamente utilizadas en medicina y, con el surgimiento en los últimos años de nuevas técnicas y máquinas aún más potentes, la velocidad y precisión de la resonancia magnética funcional ha aumentado de manera extraordinaria.

Nada de esto hubiera sido posible sin las casi cuatro décadas de investigación básica que siguieron al descubrimiento de Rabi de la resonancia magnética nuclear. En esas décadas, físicos y químicos interesados por el estudio de las propiedades magnéticas de los átomos y las moléculas, su interacción y sus estructuras básicas realizaron descubrimientos cruciales. Como dijo en 1993 George Pake, el segundo alumno de Purcell en graduarse: "Sin la investigación básica, la obtención de imágenes por resonancia magnética hubiera sido inimaginable".

Cronología

Esta cronología muestra la cadena de investigaciones que condujeron al desarrollo de la resonancia magnética y la resonancia magnética funcional.

1845

Michael Faraday investiga las propiedades magnéticas de la sangre seca.

1936

Linus Pauling y Charles D. Coryell descubren que el estado magnético de la hemoglobina cambia según su estado de oxigenación.

1937

I. I. Rabi y sus colegas desarrollan la resonancia magnética de haces moleculares al hacer pasar un haz de moléculas de cloruro de litio a través de un campo magnético y, a continuación, someterlo a ondas de radio.

1945

Con tres semanas de diferencia, los grupos de investigación dirigidos por Edward Purcell y Felix Bloch demuestran de forma independiente el fenómeno conocido como "resonancia magnética nuclear en materia condensada".

1948

Nicolaas Bloembergen, Edward Purcell y Robert Pound publican un estudio sobre la "relajación magnética nuclear".

1949

Erwin Hahn descubre el fenómeno del eco de espín en las mediciones de resonancia magnética nuclear.

Década de 1960

Richard Ernst y Weston Anderson aplican el análisis de Fourier a las señales de impulso para aumentar la sensibilidad de la resonancia magnética nuclear.

1971

Godfrey Hounsfield construye el primer escáner de tomografía computerizada, la base de casi todos los sistemas de obtención de imágenes que se usan en la actualidad.

1972

Paul Lauterbur combina la idea del gradiente con la idea del escáner de tomografía computerizada para realizar varias proyecciones y reconstruirlas para obtener la primera imagen por resonancia magnética.

1976

Peter Mansfield concibe la técnica ecoplanar, capaz de explorar todo el cerebro en unos segundos.

1976

Mansfield y sus colegas de Inglaterra publican la primera imagen de un dedo humano obtenida por resonancia magnética.

1990

Seiji Ogawa detecta variaciones en la oxigenación del tejido local al utilizar contraste dependiente del nivel de oxígeno de la sangre.

1992

John W. Belliveau, Peter Bandettini y Seiji Ogawa publican de forma independiente sus estudios sobre la respuesta cerebral a la estimulación sensorial para los que utilizan imágenes obtenidas por resonancia magnética funcional.

Créditos

El artículo "Una ventana abierta a la curación de la mente y el cuerpo: El desarrollo de la resonancia magnética" ha sido elaborado por la escritora científica Roberta Conlan, con la colaboración de los Drs. Richard Ernst, Erwin L. Hahn, Daniel Kleppner, Alfred G. Redfield, Charles Slichter, Robert G. Shulman y Sir Peter Mansfield para Beyond Discovery®: The Path from Research to Human Benefit [Más allá del descubrimiento: el camino desde la investigación hasta el beneficio humano], un proyecto de la National Academy of Sciences (Academia Nacional de las Ciencias) de Estados Unidos.

La Academia, con sede en Washington, D.C., es una sociedad de distinguidos eruditos comprometidos con la investigación científica y de ingeniería, dedicada al uso de la ciencia y la tecnología para el bienestar común. Durante más de un siglo, la Academia ha proporcionado asesoramiento científico objetivo e independiente a la nación.

El artículo ha sido financiado con fondos de la Pfizer Foundation, Inc. y la Academia Nacional de las Ciencias.

© 2001 U.S. National Academy of Sciences. Marzo 2001