

HISTORIA DE LA RESONANCIA MAGNETICA DE FOURIER A LAUTERBUR Y MANSFIELD: EN CIENCIAS, NADIE SABE PARA QUIEN TRABAJA

Dr. Mauricio Canals L^(1,2,3)

1. Facultad de Ciencias, Universidad de Chile.
2. Departamento de Imagenología. Fundación Arturo López Pérez. Santiago, Chile.
3. Departamento de Imágenes Médicas. Clínica Bellolio. Santiago, Chile.

THE HISTORY OF MAGNETIC RESONANCE IMAGING FROM FOURIER TO LAUTERBUR AND MANSFIELD: IN SCIENCE NOBODY KNOWS WHOM HE WORKS FOR

Abstract: Magnetic resonance imaging has brought about a revolution in medicine, particularly in imagino-logy. In its process of development, mathematicians, physicists, chemists, engineers, and physicians made important contributions by working up seemingly unrelated concepts with no current usefulness to implement an impressive technique by joining together such diverse elements as Fourier and Radon Transforms; spin concept; nuclear spin; measurement of magnetic moments in protons, neutrons, condensed matter, and tissues; in the solving of integral equations; backprojection; diffusion; gradients; spatial encoding; K-space; double-pass Fourier transform, and image construction.

As stated previously, it is highly interesting to notice that a wide variety of scientific disciplines have played a vital role in the history of magnetic resonance and that apparently unrelated discoveries pertaining to different scientific fields—mostly without any immediate usefulness in their respective epoch—currently have been articulated to produce a revolution in patients study and diagnosing. Historical records of magnetic resonance constitute a vivid example of the game that goes “Nobody knows whom he works for”.

Key words: Magnetic Resonance Imaging, backprojection, medical imaging, Fourier and Radon Transforms

Resumen: La resonancia magnética médica ha producido una revolución en la medicina y en particular en la imagenología. En su historia se mezclan

Canals M. Historia de la resonancia magnética de Fourier a Lauterbur y Mansfield: En Ciencias, nadie sabe para quién trabaja. Rev Chil Radiol 2008; 14: 39-45.

Correspondencia: Dr. Mauricio Canals L.
Casilla 653, Santiago-Chile.
mcanals@uchile.cl

matemáticos, físicos, químicos, ingenieros y médicos que desarrollaron conceptos sin una relación aparente ni una utilidad inmediata y que lograron articular una técnica de resultado impresionante, aunando elementos tan diversos como: transformadas de Fourier y Radon, el concepto de spin, el spin nuclear, la medición de los momentos magnéticos en el neutrón, en el protón, en la materia condensada, en los tejidos, la solución de ecuaciones integrales, la retroproyección, la difusión, los gradientes, la codificación de la señal en frecuencia espacial, el espacio-K, las transformadas dobles de Fourier y la imagen. Resulta extraordinariamente interesante notar en la historia de la resonancia magnética la intrincada red de personajes que participaron y que, descubrimientos sin aparente relación en diferentes campos, y sobre todo sin una utilidad inmediata para la época, se articulan hoy produciendo una revolución en el estudio y diagnóstico de los pacientes en la medicina. La historia de la resonancia magnética es un magnífico ejemplo de que en ciencias nadie sabe para quién trabaja.

Palabras Clave: Historia, Resonancia magnética.

Los cimientos de la resonancia magnética: matemáticas y física

Si G y g son funciones continuamente diferenciables y rápidamente convergentes a cero, entonces se llama transformada de Fourier a:

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cdot e^{-i\omega t} dt$$

Esta expresión que nos muestra cómo una función continua se puede expresar como la suma infinita (integral) de funciones trigonométricas basadas en la ecuación de Euler: $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$, es una expresión fundamental en el corazón de buena parte de la tecnología de hoy^(1,2). Se encuentra originada en

el extenso y original trabajo del matemático francés Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). Fourier era hijo de un sastre y, educado por los benedictinos, fue ingeniero y matemático (Figura 1). Ejerció una cátedra militar de matemáticas. Acompañó a Napoleón en su expedición oriental de 1798 y fue nombrado gobernador del Bajo Egipto. De regreso en Francia en 1801, inició sus estudios sobre la propagación del calor que condujeron a la publicación de su obra cumbre en 1822: "Théorie analytique de la chaleur". En esta obra, Fourier estudió la ecuación diferencial del flujo de calor y, como parte de ello, intentó demostrar que cualquier función diferenciable puede ser expandida en una serie trigonométrica. Trabajos posteriores de los matemáticos Dirichet, Riemann, Lebesgue, Ardí, Littlewood, Wiener, Frobenius, Selberg, Weil, Weyl y Radon con su transformada (de Radon o de rayos X) han desarrollado y completado la teoría^(1,3). Este paso, aparentemente irrelevante para la medicina en su época, es esencial tanto en la tomografía computada como en la resonancia magnética médica de hoy, como podremos ver a continuación⁽⁴⁻¹¹⁾.



Figura 1. Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), ingeniero y matemático francés, estudioso de la transferencia de calor. <http://virtual.uptc.edu.co>

Un poco antes que Fourier, en 1820, Hans Christian Oersted (1777-1851) químico y físico danés (Figura 2), haciendo una demostración a sus alumnos, adjuntó una pila eléctrica a un cable conductor que se encontraba cerca de una brújula observando que la aguja se movía en dirección al cable, descubriendo la relación entre la electricidad y magnetismo. Este último fenómeno ya era conocido por las civilizaciones del Asia Menor donde, en una región llamada Magnesia, se reportaban algunas rocas que se atraían entre sí. Se las llamó *magnets* (imanes) aludiendo al lugar de su descubrimiento⁽¹²⁾. Andre Marie Ampère (1775-1836) profesor de física y química en el Instituto de Bourg, y después profesor de matemáticas en la Escuela Politécnica de París, al tomar conocimiento del descubrimiento de Oersted, elaboró una completa teoría sobre el fenómeno que hemos mencionado. En ésta, formuló una ley sobre



Figura 2. Hans Christian Oersted (1777-1851) químico y físico danés, descubridor del electromagnetismo. www.cozmo.dk.

el electromagnetismo (ley de Ampère) en la cual se describe matemáticamente la fuerza magnética interactuando entre dos corrientes eléctricas. También Michael Faraday (1791-1867), un químico y físico prácticamente autodidacta, estudió las leyes del magnetismo y logró en 1831 inducir electricidad en un conductor haciendo pasar corriente por un conductor cercano, fenómeno conocido como inducción electromagnética, mostrando además cómo un imán podía inducir corriente en un conductor. A estos notables descubrimientos que consolidaron al electromagnetismo como una rama de la física, hay que agregar los nombres de aquellos que dieron vida a la electricidad y el electromagnetismo durante los siglos XVIII y XIX. Entre ellos destacan hombres como Benjamín Franklin (1706-1790) con sus investigaciones primigenias de electricidad; Charles Coulomb (1736-1806) con el estudio de las fuerzas electrostáticas; Alessandro Volta (1745-1827) con su invención de la batería; Luigi Galvani (1737-1798) con sus estudios de la relación entre actividad muscular y electricidad; Thomas Edison (1847-1931) con sus avances hacia el tendido eléctrico y la invención del bulbo eléctrico; Georg S. Ohm (1787-1854) con sus estudios de la resistencia eléctrica; G.R. Kirchhoff (1824-1887) con sus leyes de conducción en los circuitos; H.K. Onnes (1853-1926) con el descubrimiento de la superconducción; Nikola Tesla (1856-1943) con sus trabajos en ondas electromagnéticas; Edwin.H. Hall (1855-1938) con sus experimentos de campo eléctrico; Heinrich Hertz (1857-1894) y James C. Maxwell (1831-1879) y sus trabajos en ondas electromagnéticas; Joseph Henry (1797-1878) con sus trabajos en inducción magnética; Pierre E Weiss con sus trabajos en ferromagnetismo; Heinrich Lenz (1804-1865) con sus trabajos de inducción electromagnética. Todos ellos contribuyeron al desarrollo de la tecnología que hoy hace posible la aplicación de la resonancia magnética en medicina.

Las preguntas desde la física del núcleo

Wolfgang Pauli (1900-1930) fue un gran físico

austríaco, profesor de la Universidad de Hamburgo (Figura 3), muy conocido actualmente por la proposición del cuarto número cuántico “el *spin* del electrón” (1924) y su famoso principio de exclusión que rige la posible posición de los electrones en los orbitales atómicos (1925): “dos electrones en un mismo átomo no pueden tener los mismos números cuánticos”. Cuando Niels Bohr (1885-1962), Max Plank (1858-1947) y Albert Einstein (1879-1955) ya habían planteado el modelo atómico (1913), la cuantización de la energía y la famosa relación entre energía y masa ($E = mc^2$) respectivamente, Pauli, en los años veinte demostró que muchas de las características de la estructura hiperfina de los espectros atómicos se podían explicar si los núcleos atómicos presentaban también *spin* y su respectivo momento magnético. Con posterioridad, en 1933, refinamientos del experimento de Otto Stern (1888-1969) y Walther Gerlach (1889-1979) que consiste en la separación de haces de átomos en un campo magnético no homogéneo de acuerdo a la orientación del momento magnético de sus electrones desapareados, confirmaron dicha proposición y calcularon valores aproximados para el momento magnético del protón⁽¹³⁾. La proposición de la existencia de un *spin* nuclear sería fundamental en el posterior progreso del área.

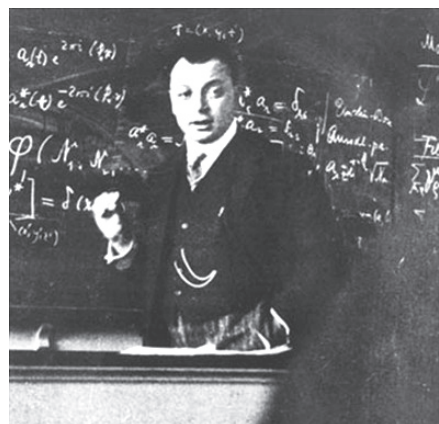


Figura 3. Wolfgang Pauli (1900-1930) gran físico austriaco, profesor de la Universidad de Hamburgo (Figura 2), quien propuso el cuarto número cuántico “el *spin* del electrón” y la existencia del *spin* nuclear. www.fnal.gov.

Cornelius Jacobo Gorter (1907-1980), físico alemán (Figura 4), intentó medir la resonancia magnética de núcleos de ^1H y ^7Li en cristales de $\text{K}[\text{Al}(\text{SO}_4)_2]12\text{H}_2\text{O}$ (alumbre potásico) y LiF respectivamente, sin éxito⁽¹⁴⁾. En su artículo de 1936 él escribió:

“The only reasonable explanation of this negative result is that the absorption of energy by the nuclear spin disturbs the Boltzmann distribution over the nuclear energy levels”.

Una explicación actualmente considerada correcta⁽¹³⁾. Propuso que la temperatura nuclear en



Figura 4. Cornelius Jacobo Gorter (1907-1980), físico alemán quien trato de medir el *spin* del protón e inspiró el trabajo posterior en el tema.

el experimento debió haber sido mayor que $1400\text{ }^\circ\text{K}$ y que la relajación *spin*-plasma fue mayor que 10^{-25} . Hoy se sabe que efectivamente LiF posee una relajación longitudinal anormalmente lenta, lo que implica tiempos anormalmente elevados para medir su resonancia magnética nuclear. En septiembre de 1937, Gorter visitó a Isidor Isaac Rabi (1898-1988), físico estadounidense (Figura 5), en su laboratorio de la Universidad de Columbia. Esta visita fue muy fructífera pues en el intercambio de opiniones entre estos dos físicos, Gorter le sugirió a Rabi en vez de cambiar el estado Zeeman de las partículas pasando un haz a través de un campo estático pobremente definido, hacerlo irradiando la transición del dipolo magnético entre dos estados Zeeman, como en su propio infructuoso experimento. En 1938, Rabi *et al* publicaron sus resultados exitosos en el artículo “A new method of measuring nuclear moment”, denominando a la resonancia nuclear magnética, espectroscopia por radiofrecuencia. Al final del artículo estos autores agradecen a Gorter⁽¹³⁾. Isidor I. Rabi, recibió en 1944 el premio Nobel de Física por este importante avance.

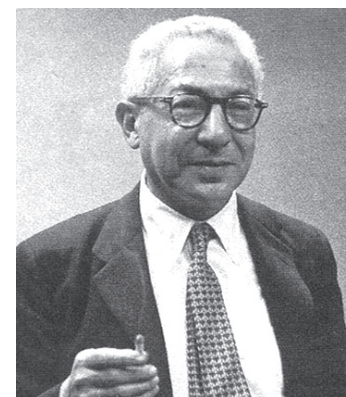


Figura 5. Isidor Isaac Rabi (1898-1988), físico estadounidense, quién logró medir el *spin* del núcleo. Premio Nóbel de Física 1944. www.student-consolidation.net/

En 1940, Luis W Alvarez y Félix Bloch, publican un método cuantitativo para medir el momento magnético del neutrón^(12,15,16). Sin embargo, la segunda guerra mundial interrumpió los estudios en este campo por un tiempo; después de terminada ésta en 1945, dos grupos de Estados Unidos, uno de Stanford dirigido por el físico suizo Félix Bloch y otro de Harvard dirigido por Edward M Purcell, ingeniero eléctrico estadounidense, retomaron la investigación de medir resonancia magnética en materia condensada⁽¹⁷⁾. Ambos grupos lo consiguieron independientemente en diciembre de 1945, por métodos completamente diferentes. Mientras el grupo de Purcell repitió esta vez con éxito la experiencia de Gorter⁽¹⁸⁾, obteniendo una señal RNM del protón en materia condensada, el grupo de Bloch diseñó un experimento diferente en el que la detección de la señal se realizaba a través de la fuerza electromotriz inducida por la precesión de los núcleos en una bobina receptora. El grupo de Bloch llamó a este método inducción nuclear⁽¹⁹⁾. Los artículos en que dan cuenta de sus resultados aparecieron juntos en la revista *Physical Review* en enero de 1946: "Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid" de Purcell *et al*⁽¹⁸⁾ y "Nuclear induction" de Bloch *et al*⁽¹⁹⁾. En 1952, EM. Purcell y F Bloch recibieron el premio Nobel de Física (Figura 6 y 7). En la Universidad de Kazan, de la ex-Unión Soviética, Yevgeni Zavoisky también realizó un intento para medir la resonancia magnética, aunque sin éxito^(12,16).



Figura 6. Félix Bloch, físico suizo.



Figura 7. Edward M. Purcell, ingeniero eléctrico. Junto con Bloch lograron medir la resonancia magnética en materia condensada. Recibieron el Premio Nóbel de Física en 1952. <http://sisbib.unmsm.edu.pe/>

La físico-química y el fantasma de Fourier

El siguiente avance se le debe a E. L. Hahn en 1949⁽²⁰⁾ quien siguió la idea de Bloch, de producir una corta excitación mediante un pulso de radiofrecuencia, induciendo una señal hoy conocida como FID (Free Induction Decay), base de las secuencias usadas actualmente. El trabajo de E. Hahn se publicó como una carta al editor en *Physical Review* en 1950. En enero de 1950 se dio a conocer también por dos grupos independientes en el mismo número de la revista *Physical Review*: "The dependence of a nuclear magnetic resonance frequency upon chemical compound", de W.G. Proctor y F.C. Yu⁽²¹⁾, estudiantes de Bloch en Stanford y "Dependence of the ¹⁹F nuclear resonant position on chemical compound" de W. C. Dickinson del MIT⁽²²⁾. En el primero se da cuenta del desplazamiento químico del ¹⁵N y en el segundo del mismo fenómeno en el ¹⁹F. También en ese año, HS Gutowsky y CJ Hoffman⁽²³⁾ descubrieron la naturaleza química asociada al desplazamiento químico, describiendo el fenómeno conocido como acoplamiento escalar *spin-spin*, que ocurre cuando dos grupos de protones no equivalentes producen desdoblamiento mutuo de sus señales, de gran utilidad analítica en RM química.

En 1965, se publicó un trabajo que recién hoy comienza a tener repercusiones en medicina. Se trata de "Spin diffusion measurements: spin echoes in the presence of a time-dependent field gradient" de E. O. Stejskal y J. E. Tanner⁽²⁴⁾ donde se establece la secuencia básica de las señales de difusión del protón, hoy de gran interés en RM médica. Sin embargo, en 1966 se publica un extraordinario avance que cambiaría la dirección del desarrollo de la RM: "Application of Fourier transform spectroscopy to magnetic resonance" en *Review of Scientific Instruments* de Richard R Ernst y Wess W Anderson^(25,26). Curiosamente, este trabajo fundamental fue rechazado dos veces en el *Journal of Chemical Physics* por ser muy técnico y no lo suficientemente original⁽²⁵⁾. En este trabajo, los investigadores aplican una nueva técnica de transformada de Fourier a la espectroscopía por RM. Utilizando la FID de Hahn y analizando la transformada de la respuesta del sistema, aumentando la razón señal/ruido además de abrir las puertas al análisis computacional de las señales, reduciendo significativamente el tiempo de registro. Sin embargo, en palabras de Ernst: "cuando uno considera el complicado tratamiento de los datos adquiridos en un computador CAT 400, en papel, luego siendo transferidos a tarjetas perforadas a un IBM San José, luego traspasados a cinta magnética en el Service Bureau Corporation, Palo Alto, para realizar la transformada de Fourier en un IBM 7090 y dibujados en un Calcom Plotter, nadie podría haber estado convencido de un ahorro en tiempo"⁽²⁵⁾. El físico-químico suizo Richard R. Ernst fue distinguido con el premio Nobel de Química de 1991 (Figura 8) por su gran contribución al avance de la espectroscopía por RM. El trabajo de Ernst, pone de relevancia la importancia del trabajo de Fourier y,

sin duda repercute en todo el desarrollo posterior de la técnica, no sólo en la química, donde permaneció muchos años y sigue desarrollándose, sino también en la medicina.

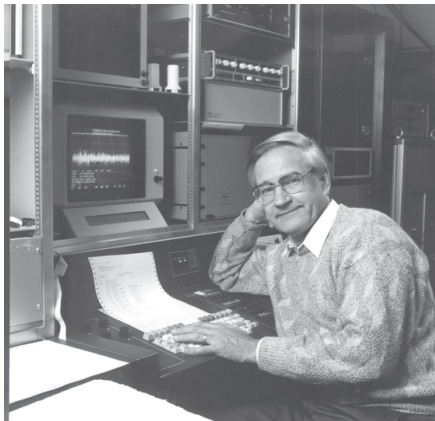


Figura 8. Richar R. Ernst, físico-químico suizo, quien aplicó una nueva técnica de transformada de Fourier a la espectroscopía por RNM, sentando las bases de toda la tecnología moderna. Además participó en la creación del algoritmo actual de transformación de la señal a la imagen mediante transformadas dobles de Fourier. Premio Nobel de Química 1991. <http://pedagogie.ac-montpellier.fr/>

La era médica

La era médica comienza con Eric Odeblad y Gunnar Lindstrom⁽²⁾, el primero médico y fisiólogo suizo (Figura 9), muy reconocido por sus estudios de las propiedades físico-químicas e inmunológicas del moco cervical. Ambos, en 1955 obtuvieron espectros del protón de eritrocitos, músculo e hígado de ratas y fluidos humanos. Posteriormente a éste y otro trabajo pionero del mismo Odeblad, Lindstrom y B. N. Bhar en 1956, en la década de 1960 comenzaron a trabajar los grupos de Jhon Mallard y Jim M.S. Hutchison, ambos físicos, en la Universidad de Aberdeen en Escocia, el médico Raymon V. Damadian en el Downstate Medical Center de Brooklyn y el bioquímico Donald P. Hollis en la Universidad John Hopkins de Baltimore.



Figura 9. Erick Odeblad, médico y fisiólogo suizo, pionero en medir la señal de resonancia en tejidos humanos. www.woomb.org

Entre 1963 y 1971 Mallard en conjunto con P.D. Cook primero, con M. Kent después y luego con J. Hutchison mostraron las diferencias en los espectros de resonancia de los electrones (*electrón spin resonance*) entre tumores de hígado y riñón y fallaron al intentar obtener señales de un ratón vivo⁽²⁷⁾. En 1971, apareció en escena Raymond V. Damadian (Figura 10) con un trabajo hoy clásico y que, como se refleja en los trabajos posteriores de Mallard y de Hollis, fue un aporte desafiante que estimuló el desarrollo posterior de la RM. Se publicó en Science bajo el título "Tumor detection by nuclear magnetic resonance"⁽²⁸⁾. Aquí, Damadian propone: "Las medidas de resonancia *spin-eco* pueden ser usadas como un método para discriminar entre tumores malignos y tejido normal". El encontró diferencias en T1 y T2 entre seis muestras de tejidos normales y dos tumores sólidos del hígado y el riñón de la rata. Además, comparó fibroadenomas con dichos tumores, encontrando que también se diferenciaban de ellos. Así, los valores de T1 y T2 de tumores se encontraban fuera del rango de los valores normales y de los fibroadenomas. Damadian apodó al método analítico para diferenciar los valores de relajación "FONAR" (*field focused nuclear magnetic resonance*). Sus resultados los corroboró con tejido humano en 1974⁽²⁹⁾. Siguió trabajando con su equipo construyendo el primer tomógrafo de RM de cuerpo entero que llamaron "el indomable" (Figura 10), obteniendo la imagen de un tumor en una rata, publicada en la revista Science en 1976.



Figura 10. Raymond Damadian, médico estadounidense quien inició la caracterización de los tumores por medio de RM y gran partícipe en la génesis de los equipos de RM. www.elmundo.es

Después de 1971, influenciado por el trabajo de Damadian, Mallard exploró las diferencias de resonancia del protón entre tejidos cancerosos y normales encontrando resultados menos claros que los que reportó Damadian en 1971, explicando que

gran parte de las diferencias en T1 eran dadas por la presencia de agua en estos tejidos⁽²⁷⁾. En 1973 Mallard exploró la posibilidad de obtener imágenes (algo después que Lauterbur) y en 1974 con Hutchison, la primera imagen de un ratón completo. Hollis y colaboradores entre 1972 y 1974 estudiaron las propiedades de relajación *spin-lattice* (T1) de diversos tejidos cancerosos, encontrando mayores T1 y exploraron su relación con el contenido de agua en los tejidos^(30,31).

El avance fundamental para la medicina se produjo cuando el químico estadounidense Paul Lauterbur, en la Universidad de New York, tuvo la idea de codificar espacialmente la señal mediante la aplicación de gradientes magnéticos y después reconstruir la imagen en forma similar a la tomografía computada. En su trabajo "Image formation by induced local interactions; example employing magnetic resonance" publicado en la revista Nature en 1973⁽⁹⁾, mostró que agregando campos magnéticos adicionales al campo principal y obteniendo un conjunto de proyecciones de la distribución de la señal de dos tubos de prueba conteniendo agua normal dentro de un contenedor de agua deuterada, se podía reconstruir una imagen por medio de retroproyección filtrada (similar a la tomografía computada). Llamó a su método Zeugmatografía (de zeugma= unión), refiriéndose a la unión de un campo magnético con la radiofrecuencia. Como muchas veces sucede, primero su artículo fue rechazado, pero ante la persistencia de Lauterbur, finalmente se publicó. En este punto es importante recordar que la reconstrucción de imágenes RM está sustentada en la de la tomografía computada, es decir en el trabajo fecundo de Johan Radon quien en 1917 demostró la posibilidad de reconstrucción tridimensional de un objeto a partir de un juego infinito de sus proyecciones⁽³⁾ y de Allan M. Cormack (premio Nobel junto a G Hounsfield en 1979 por la invención de la tomografía computada), quien resolvió en 1963 y 1964, el problema de conocer el interior de una región a partir de conocer sus proyecciones^(4,5,7). Este, en dos brillantes artículos mostró cómo resolver el conjunto de ecuaciones integrales generadas por la atenuación de un conjunto de voxels dispuestos en línea, uno al lado del otro, en función del ángulo de rotación de la proyección, mediante transformadas de Radon-Fourier, series de Fourier y el uso de polinomios de Tschebycheff.

Peter Mansfield, físico inglés, en el mismo año 1973, descubrió en forma independiente que el uso de gradientes de campo magnético producía señales que podrían ser analizadas directamente para proveer la información espacial, incluyendo una descripción matemática de la transformación de una señal temporal a la representación espacial, introduciendo el concepto del espacio-K⁽¹⁰⁾. Posteriormente siguió trabajando en la selección del corte y en 1976 propuso las secuencias EPI (*eco-planar imaging*), o como llenar el espacio-K en forma rapidísima, en

un solo disparo ("single shot")⁽¹¹⁾.

Peter Mansfield y Paul Lauterbur posteriormente siguieron contribuyendo al desarrollo de la RM, con gran número de artículos en la revista Physics in Medicine and Biology y en un artículo clásico, Mansfield y A.A. Maudsley en 1977 publicaron la primera imagen seccional de una región de la anatomía humana, un dedo⁽³²⁾. P. Mansfield y P. Lauterbur fueron galardonados con el premio Nobel de Fisiología y Medicina de 2003 (Figura 11)⁽³³⁾. Sin duda, Raymond Damadian, es junto a Lauterbur y Mansfield, uno de los responsables de la aplicación médica de la RM. Lamentablemente, no recibió el premio Nobel junto a estos dos investigadores, y se enfrascó en una ácida polémica, intentando por diversos medios publicitarios ser declarado el padre de dicha técnica. Algunos autores atribuyen el hecho a la personalidad exuberante de Damadian o a que el Nobel se otorgó por llevar la RM a una imagen medicamente útil y no por la aplicación al diagnóstico diferencial entre tejido tumoral y sano. Sea esto cierto o no, en la entrega de premios Nobel, siempre hay personajes que han sido dejados de lado, entre ellos, tal vez la más emblemática es la cristalógrafa Rosalind Franklin, esencial en el gran descubrimiento del siglo XX, la doble hélice del DNA.

Los hallazgos de Mansfield y Lauterbur y del mismo Damadian aceleraron el desarrollo de la técnica. En 1977, W. Hinshaw *et al.*⁽³⁴⁾ publicaron imágenes de RM de la muñeca, R. Damadian logró reconstruir la imagen del tórax y P. Mansfield desarrolló las secuencias EPI. R. C. Hawkes y Moore *et al* en 1980 obtuvieron las primeras imágenes de la cabeza⁽³⁵⁾ y en 1981 se instaló el primer prototipo de tomógrafo por RM en el Hospital Hammersmith de Londres, dando inicio a los estudios pioneros de Graeme M. Vides, Ian R. Young en el departamento dirigido por el profesor Robert E Steiner^(12,16). Sin embargo, en este período también hay que destacar un avance extraordinariamente relevante, que es base de la tecnología actual: Anil Kumar, Dieter Welti y R. Ernst, publicaron el artículo "NMR Fourier Zeugmatography" en donde sustituyen el algoritmo de retroproyección basado en la transformada de Radon-Fourier, por el uso de gradientes magnéticos codificadores y transformadas dobles de Fourier para reconstituir la imagen, lo que es la base de la formación actual de imágenes⁽⁸⁾.

La RM de hoy se nutre de los descubrimientos logrados por todos estos grandes investigadores: matemáticos, físicos, químicos, ingenieros y médicos, y probablemente lo seguirá haciendo, incorporando estos avances en las nuevas técnicas que se están desarrollando. Resulta extraordinariamente interesante notar en la historia de la RM la intrincada red de personajes que participaron y que, descubrimientos sin aparente relación en diferentes campos y sobre todo, sin una utilidad inmediata para la época, se articulan hoy produciendo una revolución en el estudio y diagnóstico de los pacientes. La RM médica está demostrando

una potencialidad insospechada de nuevos avances como la capacidad de realizar estudios funcionales, difusión, perfusión, tractografías, espectroresonancia, e incluso es posible el desarrollo de estudios de resonancia de otros núcleos como ^{13}C , ^{19}F , ^{31}P y ^{27}Na , por lo que probablemente se encuentra hoy en los inicios de una historia que continuará revolucionando la medicina y en particular la imagenología.



Figura 11. P. Mansfield y P. Lauterbur, los inventores de la técnica de MRI, galardonados con el premio Nóbel de Fisiología y Medicina de 2003. <http://neurocontrarian.wordpress.com>

Bibliografía

- González G. Series de Fourier, transformadas de Fourier y aplicaciones. Divulgaciones matemáticas 1997; 5(1): 43-60.
- Odeblad E, Lindstrom G. Some preliminary observations on the proton magnetic resonance in biological samples. Acta Radiológica 1955; 43: 469-476.
- Radon J. Über die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte langs gewisser mannigfaltigkeiten. Berichte Verb Saechsische Akademie der Wissenschaften. Math. Phys Kl. 1917; 69: 262-277.
- Cormack AM. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. Journal of Applied Physics 1963; 34(9): 2722-2727.
- Cormack AM. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. II. Journal of Applied Physics 1964; 35(10): 2908-2913.
- Hashemi RH, Bradley WG, Lisanti CJ. MRI. The basics. Lippincott Williams & Wilkins, 2004; 353pp.
- Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part 1. Description of system. British Journal of Radiology 1973; 46: 1016-1022.
- Kumar A, Welti D, Ernst RR. NMR Fourier Zeugmatography. Journal of Magnetic Resonance 1975; 18: 69.
- Lauterbur PC. Image formation by induced local interactions-examples employing nuclear magnetic-resonance. Nature 1973; 242(5394): 190-191.
- Mansfield P, Grannell PK. NMR "Diffraction" in solids? Journal of Physics C: Solid State Physics 1973; 6: L422-L427.
- Mansfield P. Multi-planar image formation using NMR spin echoes. Journal of Physics C: Solid State Phys. 1977; 10: L55-L58.
- Gili J. Historia de la RM. En Introducción biofísica a la resonancia magnética. Universitat Autònoma de Barcelona. 2000; A1.1-A1.2.
- Van der Waals J.H. Gorter's footprints on the magnetic trail that led to magnetic resonance. Encyclopedia of Nuclear Magnetic Resonance. 1996; 1: 667-670.
- Gorter CJ. Bad luck in attempts to make scientific discoveries. Physics today 1967; 76-81.
- Alvarez LW, Bloch F. A quantitative determination of the neutron moment in absolute nuclear magnetons. Physical review 1940; 57:111-122.
- Becker ED, Fisk CL, Khetrpal CL. The development of NMR. Ed Grant DM & Harris RK. Encyclopedia of Nuclear Magnetic Resonance 1996; 1: 1-158.
- Sánchez F. Breve resumen histórico de la resonancia magnética nuclear. Universitat Autònoma de Barcelona. 1-14.
- Purcell EM Torrey HC, Pound RV. Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid. Physical Review 1946; 37-38.
- Bloch F, Hansen WW, Packard M. Nuclear Induction. Physical Review 1946: 127.
- Hahn EL. Nuclear induction due to free Larmor precession. Physical Review 1950; 77: 297-299.
- Proctor WG, Yu FC. The dependence of a nuclear magnetic resonance frequency upon chemical compound. Physical Review 1950; 77: 717.
- Dickinson WC. Dependence of the ^{19}F nuclear resonance position on chemical compound. Physical Review 1950; 77(5): 736-737.
- Gutowski HS, Hoffman CJ. Chemical shifts in the magnetic resonance of ^{19}F . Physical Review 1950; 77: 110-111.
- Stejskal EO, Tanner JE. Spin diffusion measurements: spin echoes in the presence of a time-dependent field gradient. Journal of chemical Physics 1965; 42: 288-292.
- Ernst RR, Richard R. The success story of Fourier transformation in NMR. Ed Grant D.M. & Harris RK. Encyclopedia of Nuclear Magnetic Resonance 1996; 1.
- Ernst RR, Anderson WA. Application of Fourier transform spectroscopy to magnetic resonance. Review Scientific Instruments 1966; 37(1): 93-102.
- Mallard J.R. Magnetic resonance imaging: the odyssey of one contributor to its birth. IEEE. 14th International Conference of Engineering in Medicine and Biology Society 2006; 2860-2862.
- Damadian R. Tumor detection by nuclear magnetic resonance. Science 1971; 171(976): 1151-1153.
- Damadian R, Zaner K, Hor D, DiMaio T. Human tumors detected by nuclear magnetic resonance. Proceedings of The Natural Academy of Science 1974; 71(4): 1471-1473.
- Hollis DP, Sarvan LA, Morris HP. A nuclear magnetic resonance study of water in two Morris hepatomas. Journal of Natl. Cancer Institute 1974; 52(2): 599-602.
- Hollis DP, Economou JS, Parks LC, Eggleston JC, Saryan LA, Czeisler JL. Nuclear magnetic resonance studies on several experimental and human malignant tumors. Cancer Research 1973; 33: 2156-2160.
- Mansfield P, Maudsley AA. Medical imaging by NMR. The British Journal of Radiology 1977; 50(591): 188-194.
- Leach M. Nobel prize in physiology or medicine 2003 awarded to Paul Lauterbur and Peter Mansfield for discoveries concerning magnetic resonance imaging. Physics in Medicine and Biology 2003; 1-2.
- Hinshaw WS, Bottomley PA, Holland GN. Radiographic thin section image of a human wrist by nuclear magnetic resonance. Nature 1977; 270: 722-723.
- Hawkes RC, Holland GN, Moore WS, Worthington BS. Nuclear magnetic resonance tomography of the brain: a preliminary assessment with demonstration of pathology. Journal of Computer Assist Tomography 1980; 4: 577-586.