



SEARA DA CIÊNCIA

CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



Momentos Magnéticos, Ressonância Magnética Nuclear e os Prêmios Nobel de Física (PNF) de 1943, 1944 e 1952 e de Fisiologia ou Medicina (PNF/M) de 2003.

Os Prêmios Nobel de Física (PNF) de 1943, 1944 e 1952 foram assim atribuídos: o de 1943, ao físico alemão Otto Stern (1888-1969) por seus trabalhos pioneiros com feixes atômicos desviados por campos magnéticos variáveis e a conseqüente determinação de **momentos magnéticos (átomo de prata e próton)**; o de 1944, ao austro-norte-americano Isidor Isaac Rabi (1898-1988) por seus trabalhos pioneiros sobre **Ressonância Magnética Nuclear** ["Nuclear Magnetic Resonance" (NMR)]; e o de 1952, aos físicos norte-americanos Felix Bloch (1905-1983) (de origem suíça) e Edward Mills Purcell (1912-1997) pelo desenvolvimento de novos métodos para medir o **magnetismo nuclear**, via NMR. O Prêmio Nobel Fisiologia ou Medicina (PNF/M) de 2003 foi partilhado pelo químico norte-americano Paul Christian Lauterbur (1929-2007) e pelo físico inglês Sir Peter Mansfield (n.1933) pelo desenvolvimento da técnica **Imagem por Ressonância Magnética** ["Magnetic Resonance Imaging" (MRI)].

Stern começou a estudar os aspectos físicos da Química (Físico-Química), em 1906, na *Universidade de Breslau*, na qual concluiu seu doutoramento em 1912. Neste mesmo ano foi para a *Universidade de Praga* para trabalhar com o físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921). Logo em 1913 (*Annalen der Physik* **40**, p. 551), eles publicaram um artigo no qual estudaram as anomalias observadas no calor específico dos gases. Ainda em 1913 (*Physikalische Zeitschrift* **14**, 629), Stern trabalhou com a hipótese de que cada átomo de um sólido possui, no ponto-zero, a energia de $(3/2)h\nu$. Registre-se que, em 1919 (*Zeitschrift für Elektrochemie und Angewandte Physikalische Chemie* **25**, p. 66), Stern voltou a trabalhar com aquela hipótese. Entre 1914 e 1921, ele foi professor de Física Teórica na *Universidade de Frankfurt*. De 1921 a 1922 foi Professor Associado de Física Teórica na *Universidade de Rostock*. No ano de 1923, foi para a *Universidade de Hamburgh*, na qual foi professor de Físico-Química e Diretor do Laboratório dessa Universidade. Em 1933, em virtude de divergências com o Partido Nazista de Adolf Hitler (1889-1945), transferiu-se para os Estados Unidos, para ser Professor Pesquisador de Física do *Carnegie Institute of Technology*, em Pittsburgh.

Muito embora Stern trabalhasse em Física Teórica desde o início de sua formação científica, conforme vimos acima, em 1919, seu interesse voltou-se para a Física Experimental, quando então começou a desenvolver o método do desvio de um feixe atômico-molecular por campos magnéticos variáveis. Desse modo, logo em 1920, Stern e o físico alemão Walther Gerlach (1899-1979) realizaram uma experiência, a hoje famosa **experiência de Stern-Gerlach** (ES-G), na qual observaram que um feixe de átomos de prata (Ag), na forma de vapor, passando através de uma região de campo magnético variável, de intensidade H , era separado em dois feixes. Essa separação era explicada da seguinte maneira. Os átomos de Ag que possuíam o **momento magnético (μ)** paralelo ao campo \vec{H} se dirigiam para um lado, e os que apresentavam μ antiparalelo se dirigiam para o lado oposto. Por intermédio do afastamento entre as marcas deixadas pelos átomos de Ag em uma placa situada em uma das extremidades do equipamento que gerava o campo magnético externo, foi possível a esses dois físicos medirem o **momento magnético do átomo de prata (μ_{Ag})**. Novas experiências realizadas por Stern e Gerlach sobre esse tipo de desvio foram apresentadas em 1921 (*Zeitschrift für Physik* **7**; **8**, pgs. 249; 110), em 1922 (*Zeitschrift für Physik* **9**, pgs. 349; 353) e, em 1924 (*Annalen der Physik* **74**, p. 673). Observe-se que, em 1927 (*Physical Review* **29**, p. 308), T. E. Phipps e J. B. Taylor repetiram a ES-G usando átomos de hidrogênio (H).

É oportuno registrar que a ES-G comprovou duas previsões do modelo atômico proposto pelo físico alemão Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951), em 1916 (vide verbete nesta série). A primeira delas dizia que certos átomos, principalmente os metais alcalinos e a Ag, possuíam um **momento magnético (μ)**, dado pela expressão: $\mu = e h / (4 \pi m c)$, com e e m representando, respectivamente, a carga elétrica e a massa do elétron, h é a **constante de Planck** e c a velocidade da luz no vácuo. A segunda previsão daquele modelo era a de que o plano das órbitas eletrônicas era quantizado, a conhecida **quantização espacial**. Assim, em virtude dessa quantização, o feixe original dos átomos de Ag, sob a ação da força $\mu_z (\partial \vec{H} / \partial z)$, onde μ_z é o componente do vetor **momento magnético ($\vec{\mu}$)** do elétron (que é paralelo ao seu momento angular orbital \vec{L}) na direção de \vec{H} , deveria ser separado em dois feixes, uma vez que μ_z só poderia ser paralelo ou anti-paralelo a \vec{H} . Com o advento da Mecânica Quântica desenvolvida em 1925-1928 (vide verbete

nesta série), mostrou-se que o momento magnético ($\vec{\mu}$) e o spin (\vec{S}) tem a mesma direção e, desse modo, a **experiência de Stern-Gerlach** passou a representar a comprovação experimental do **spin** do elétron. [Robert Benjamin Leighton, **Principle of Modern Physics** (McGraw-Hill Book Company Inc., 1959); e Jagdish Mehra e Helmut Rechenberg, **The Historical Development of Quantum Theory**, Volume 1, Parts 1 and 2 (Springer-Verlag, 1982).]

Por fim, em 1933 (*Zeitschrift für Physik* **85**, p. 4), Stern e o físico austro-alemão Otto Robert Frisch (1904-1979) mediram o **momento magnético do próton** (μ_p) usando a mesma técnica do desvio de um feixe atômico-molecular (no caso específico, moléculas neutras de hidrogênio) por campos magnéticos variáveis. Note-se que essa medida foi confirmada, ainda em 1933 (*Zeitschrift für Physik* **85**, p. 17), por Stern e pelo físico alemão Immanuel Estermann (1900-1979). Para maiores detalhes sobre o trabalho de Stern, ver sua *Nobel Autobiography* e sua *Nobel Lecture: The Method of Molecular Rays* (12 de Dezembro de 1946).

Rabi, embora nascido na Áustria, em 1898, teve toda a sua formação científica nos Estados Unidos, pois foi para lá no ano seguinte de seu nascimento. Assim, em 1919, graduou-se em Química pela *Universidade de Cornell*; em 1927, defendeu sua Tese de Doutorado na *Universidade de Columbia*, tendo como tema as propriedades magnéticas dos cristais. Depois de trabalhar dois anos na Europa, com os físicos, os alemães Sommerfeld, Stern, Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932) e o austríaco Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945), voltou em 1929 para a *Universidade de Columbia*, onde começou sua carreira de pesquisador, como *lecturer* de Física Teórica. Em 1937, tornou-se *Full Professor* (Professor Titular) dessa mesma Universidade.

A partir de 1930, Rabi começou a estudar as propriedades magnéticas do núcleo atômico, usando para isso a técnica do desvio magnético de feixes atômico-moleculares que havia sido desenvolvida por Stern, da qual tratamos anteriormente. Desse modo, por intermédio dessa técnica, em 1934 (*Physical Review* **46**, p. 157), Rabi e os físicos norte-americanos J. M. B. Kellogg e J. R. Zacharias mediram o **momento magnético do próton** (μ_p). Contudo, com o objetivo de fazer medidas mais precisas de **momentos magnéticos nucleares**, em 1935, Rabi começou a aperfeiçoar a técnica de Stern, combinando-a com o **princípio da ressonância magnética**. Essa nova técnica, descrita por ele, em 1937 (*Physical Review* **51**, p. 652), era constituída por dois campos magnéticos fortes não-homogêneos que desviavam, sucessivamente, o feixe atômico utilizado em sentidos opostos, produzindo um **efeito de focagem**. No meio da trajetória desse feixe, havia um campo magnético forte homogêneo que se destinava a produzir uma **precessão de Larmor** no núcleo atômico; nessa mesma região, havia um campo magnético alternado fraco. Desse modo, se este último campo magnético estivesse em ressonância com a **frequência Larmoriana** do núcleo atômico em exame, este era lançado fora de sua trajetória normal. Com essa técnica, conhecida desde então como **Ressonância Magnética Nuclear** ["Nuclear Magnetic Resonance" (NMR)], Rabi, Zacharias e os físicos norte-americanos S. Milman e Polykarp Kusch (1911-1993; PNF, 1955) realizaram experiências nas quais mediram o **momento magnético do lítio** (Li^7), cujos resultados foram apresentados em 1938 (*Physical Review* **53**, p. 318) e em 1939 (*Physical Review* **55**, p. 526). Ainda nesses trabalhos também foi medido o **momento magnético do próton** e nos quais confirmaram, mais uma vez, o resultado de Stern. Registre-se que, em 1939 (*Physical Review* **55**, p. 318), Rabi, Kellogg, Zacharias e o físico norte-americano Norman Foster Ramsay (n.1915; PNF, 1989) anunciaram a descoberta do momento de quádruplo do dêuteron (D^2).

É oportuno observar que a **precessão** referida acima decorre do trabalho publicado pelo físico inglês Joseph J. Larmor (1857-1942), em 1897 (*Philosophical Magazine* **44**, p.503), no qual mostrou que o efeito de um campo magnético de intensidade B sobre partículas carregadas (de massa m e carga elétrica e) que descrevem órbitas circulares era o de superpor à frequência própria de rotação (ν_0) uma frequência precessional em torno do campo externo, conhecida desde então como **frequência de Larmor** [$\nu_L = eB/(4\pi m)$]. Observe-se que, ainda naquele trabalho, Larmor demonstrou que uma carga elétrica acelerada irradia energia. Para maiores detalhes sobre o trabalho de Rabi, ver sua *Nobel Autobiography*.

Agora, vamos ao PNF de 1952. Pretendendo ser engenheiro, Bloch entrou para a *Eidgenössische Technische Hochschule* (ETH) ("Instituto Federal de Tecnologia") de Zurique. Porém, já no segundo ano de seu Curso de Engenharia transferiu-se para a Divisão de Matemática e Física dessa mesma instituição, pois decidira ser físico. Nesta Divisão, teve a oportunidade de estudar com renomados físicos, como o suíço Paul Scherrer (1890-1969), o alemão Hermann Weyl (1885-1955), o holandês Petrus Joseph Wilhelm Debye (1884-1966; PNQ, 1936) e o austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961; PNF, 1933). Quando Schrödinger deixou Zurique, no outono de 1927, Bloch foi trabalhar com o físico alemão Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932), na *Universidade de Leipzig*, onde defendeu, no verão de 1928, sua Tese de Doutorado, na qual desenvolveu a Teoria Quântica da condução metálica, tendo como suporte a Mecânica Quântica que acabara de ser formalizada por Heisenberg, Schrödinger e pelo físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933), entre 1925 e 1928 (vide verbete nesta série). Em 1933, em virtude de divergências com o Partido Nazista de Hitler, Bloch deixou a Alemanha e, em 1934, transferiu-se para os Estados Unidos para trabalhar na *Universidade de Stanford* como Professor Associado de Física.

Em 1933, Purcell graduou-se em Engenharia Elétrica pela *Universidade de Purdue*, em Indiana, nos Estados Unidos. Ainda como aluno, Purcell interessou-se por Física graças ao seu professor, o físico austríaco Karl Lark-Horovitz que o permitiu participar de uma experiência sobre difração de elétrons. Depois de estudar um ano na *Technische Hochschule*, em Karlsruhe, na Alemanha, Purcell voltou, em 1934, para os Estados Unidos para iniciar sua pós-

graduação na *Universidade de Harvard* onde se doutorou, em 1938. Depois de dois anos como Instrutor de Física nesta Universidade, Purcell foi para o *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) para trabalhar no Laboratório de Radiação dessa Instituição que, em 1940, iniciara o projeto militar sobre o método de “radio detection and ranging” (*radar*). Neste Laboratório, durante o período em que os Estados Unidos participou da *Segunda Guerra Mundial*, ou seja, de 1941 até 1945, Purcell liderou o grupo que desenvolveu novas técnicas de *radar*. Foi também durante essa época que Purcell interessou-se pelo trabalho de Rabi sobre o desvio magnético de feixes atômico-moleculares, do qual já falamos neste verbete. Em 1946, ele voltou para Harvard como Professor Associado e, em 1949, tornou-se *Full Professor*.

A descoberta da **Ressonância Magnética Nuclear** em sólidos e líquidos, em 1946, que valeu a Purcell e Bloch o PNF de 1952, foi realizada em experiências distintas. Com efeito, na experiência de Purcell e dos físicos norte-americanos Henry Cutler Torrey (1911-1998) e Robert Vivian Pound (n.1919) (*Physical Review* **69**, p. 37), o método utilizado foi o de obter a subtração de energia a um campo magnético oscilante por núcleos sujeitos a um campo magnético forte e fixo, método esse capaz de medir a **frequência de Larmor** que, como vimos acima, é importante na determinação do **momento magnético nuclear**. Por sua vez, na experiência realizada por Bloch, e pelos físicos norte-americanos William Webster Hansen (1909-1949) e M. E. Packard (*Physical Review* **70**, p. 127) eles utilizaram um método semelhante ao descrito acima; porém, eles detectaram a **Ressonância Magnética Nuclear** pela intensidade máxima de sinais induzidos em uma bobina detectora perpendicular quer ao campo magnético fixo, quer ao campo magnético oscilante. Para maiores detalhes sobre esses trabalhos de Bloch e de Purcell, ver suas *Nobel Autobiography* e suas *Nobel Lecture*. De Bloch: **The Principle of Nuclear Induction** (11 de Dezembro de 1952); e de Purcell: **Research in Nuclear Magnetism** (11 de Dezembro de 1952).

É oportuno registrar que tanto Bloch quanto Purcell realizaram outras pesquisas relevantes para o desenvolvimento da Física, além das que foram objetos do recebimento do PNF. Por exemplo, conforme vimos em verbete desta série, em 1928 (*Zeitschrift für Physik* **52**, p. 555), Bloch demonstrou o famoso **Teorema de Bloch**, segundo o qual a função de onda do elétron em um auto-estado de energia em uma rede (“lattice”) periódica perfeita tem a forma do produto de uma onda plana por uma função periódica, com o período da rede. Note-se que, ainda nesse trabalho, Bloch encontrou uma proporcionalidade entre a condutividade elétrica (σ) e a temperatura absoluta T ($\sigma \propto T^{-1}$), quando $T > \theta$, sendo θ a **temperatura de Debye** ($\theta = h \nu / k$, onde ν é a frequência de vibração da rede e k é a **constante de Boltzmann**). Essa proporcionalidade foi corrigida por Bloch, em 1930 (*Zeitschrift für Physik* **59**, p. 208), para $\sigma \propto T^{-5}$, para baixas temperaturas. Em 1931 (*Physikalische Zeitschrift* **32**, p. 881), ele mostrou que a presença de impurezas em um semicondutor, além de fazer aparecer níveis de energia na **banda proibida**, é responsável por sua condutividade elétrica.

Bloch também deu contribuições ao entendimento do ferromagnetismo. Vejamos quais. Em 1928 (*Zeitschrift für Physik* **49**, p. 619), Heisenberg propôs seu célebre modelo do ferromagnetismo segundo o qual o forte alinhamento dos spins (característica do ferromagnetismo) decorria de uma energia de troca [“Heitler-London Exchange”, modelo proposto em 1927 (*Zeitschrift für Physik* **44**, p. 455), pelos físicos alemães Walter Heitler (1904-1981) e Fritz Wolfgang London (1900-1954)] entre os spins de elétrons vizinhos, pois, de acordo com o **princípio da exclusão de Pauli** (vide verbete nesta série), elétrons de spin emparelhados permanecem afastados, e os de spin diferentes se aproximam. Note-se que, na formulação desse modelo, Heisenberg usou os caracteres das representações do Grupo de Permutações e, também, a distribuição Gaussiana para incluir as flutuações nos níveis de energia eletrônicos. Em 1929 (*Zeitschrift für Physik* **57**, p. 545), Bloch propôs um modelo para evitar essa distribuição Gaussiana. Assim, ao calcular a energia de troca entre elétrons livres de um gás, ele descobriu que somente para baixas densidades eletrônicas (caso dos metais alcalinos), a interação de troca atrativa entre os elétrons proposta por Heisenberg, domina a energia do ponto zero entre esses elétrons, energia essa necessária para produzir o **estado ferromagnético** de um metal.

Na continuação de seus estudos sobre o ferromagnetismo, Bloch passou a tratá-lo na região de baixas temperaturas, já que, nela, o modelo de Heisenberg não funcionava. Assim, substituindo o “approach” da Teoria de Grupos de Permutação usada por Heisenberg, pelos **determinantes de Slater**, Bloch descobriu, em 1930 (*Leipziger Vorträge 1930, Elektronen-Interferenzen*, p. 67; *Zeitschrift für Physik* **61**, p. 206), as famosas **ondas de spin**, que são estados de energia correspondente à precessão dos spins alinhados no estado fundamental. Nesses trabalhos, ele demonstrou que $\Delta M / M(0) \propto T^{2/3}$, onde ΔM representa a variação da magnetização (M) devida às flutuações decorrentes dessas ondas a baixas temperaturas (T). Esse resultado, que ficou conhecido como a **Lei de Bloch** $T^{2/3}$, além de ser compatível com valores experimentais então conhecidos, mostrava que, no **estado ferromagnético**, é importante não só o número de vizinhos mais próximos (de um dado spin), mas sim seus próprios arranjos espaciais. Registre-se que a descoberta das **ondas de spin**, cujo **quantum** se denomina **magnon**, foi realizada simultânea e independentemente pelo físico norte-americano John Clarke Slater (1917-1976) (*Physical Review* **35**, p. 210), por ocasião em que obteve as funções de onda antissimétricas Diracianas [na forma de determinante, determinante esse obtido por ele, em 1929 (*Physical Review* **34**, p. 1293)] para um sistema de muitos-elétrons, nas quais incluía os spins orbitais desses elétrons. Observe-se que, em 1934 (*Handbuch der Radiologie* **6**, p. 354), as **ondas de spin** foram novamente tratadas por Bloch.

Em 1932 (*Zeitschrift für Physik* **74**, p. 295), Bloch deu mais uma contribuição importante para o entendimento do ferromagnetismo ao estudar a dinâmica desse fenômeno usando o formalismo dos operadores criação e destruição da Eletrodinâmica Quântica Diraciana (ver verbete nesta série). Nesse estudo, ele introduziu a hoje famosa conexão entre temperatura e tempo imaginário, demonstrando, desse modo, como problemas estatísticos de temperatura finita podem ser descritos por uma Equação de Schrödinger com tempo imaginário. Ainda nesse trabalho, há o estudo da largura de fronteiras que separam domínios elementares, em materiais magnéticos, as hoje famosas **Paredes de Bloch**. Registre-se

que essas “paredes” foram explicadas, em 1935 (*Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* 8, p. 153), pelos físicos russos Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962) e Evgenil Mikhailovich Lifshitz (1915-1985) como decorrentes de várias contribuições à energia (de troca, anisotropia e magnética) de um corpo ferromagnético. [Para maiores detalhes desses trabalhos de Bloch, bem como de outros pesquisadores, sobre o ferromagnetismo, ver: Charles Kittel, *Introduction to Solid State Physics* (John Wiley and Sons, 1971); John Michael Ziman, *Principles of the Theory of Solids* (Cambridge University Press, 1972); Rogério César de Cerqueira Leite e Antônio Rubens Britto de Castro, *Física do Estado Sólido* (Editora Edgard Blücher Ltda., 1978); John Hasbrouck van Vleck, *Reviews of Modern Physics* 50, p. 181 (1978); e L. H. Hoddeson, G. Baym and M. Eckert, *Reviews of Modern Physics* 59, p. 287 (1987).]

É ainda oportuno registrar outras contribuições de Bloch para o entendimento da Física. Conforme vimos em verbete desta série, em 1937 (*Physical Review* 52, p. 54), Bloch e o físico norte-americano Arnold Nordsieck (n.1911) explicaram a famosa *catástrofe do infravermelho* estudando o espalhamento de elétrons por um campo elétrico estático. Por fim, em 1940 (*Physical Review* 57, p. 111), Bloch e o físico norte-americano Luís Walter Alvarez (1911-1988; PNF, 1968) realizaram uma experiência na qual mediram o momento magnético do nêutron ($\mu_n \cong -1,91 \mu_B$) usando uma adaptação da técnica de Rabi, vista acima, a um intenso feixe de nêutrons oriundos de um ciclotron. Note-se que o desvio magnético dessa técnica foi substituído por um efeito de “polarização” desse feixe.

Agora, vejamos as outras contribuições de Purcell. Em 1948 (*Physical Review* 73, p. 679), Purcell, Pound e o físico norte-americano Nicolaas Bloembergen (n.1920; PNF, 1981) observaram que a largura da linha de absorção de ressonância magnética dos núcleos decrescia com o movimento rápido relativo entre eles. Em 1949 (*Physical Review* 76 p. 1262), Purcell e o físico norte-americano Eugene Gardner (1913-1950) determinaram a *razão giromagnética (g) do próton* (essa razão é dada por: $g = \frac{\gamma}{\mu} |\vec{L} + \vec{\mu}|$, onde \vec{L} e $\vec{\mu}$ valem respectivamente, o *momento angular* e o momento magnético do elétron). Em 1950 (*Physical Review* 78 p. 807), Purcell e o físico norte-americano Norman Foster Ramsay (n.1915; PNF, 1989) estudaram o *momento de dipolo elétrico do nêutron*. Por fim, em 1951 (*Nature* 168, p. 356), Purcell e o físico norte-americano Harold I. Ewen (n.1922) construíram um radiotelescópio com o qual mediram a radiação provinda de nuvens de hidrogênio (H) neutro no espaço, encontrando a hoje célebre *linha 21 cm do hidrogênio*. Note-se que medida análoga foi realizada pelo professor C. A. Muller e pelo astrônomo holandês Jan Hendrik Oort (1900-1992), também em 1951 (*Nature* 168, p. 357). Registre-se que essa linha havia sido prevista pelo astrônomo e matemático holandês Hendrik Christoffel van de Hulst (1918-2000), em 1945 (*Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* 11, p. 210).

Agora, vejamos o PNF/M de 2003 que é relacionado com a aplicação da NMR na Medicina. Conforme vimos acima, a NMR é um fenômeno que consiste na absorção de radiação eletromagnética, numa dada frequência, por núcleos que apresentam momento magnético (μ), na presença de um campo magnético externo. Este, por sua vez, provoca uma precessão de μ em torno de sua direção, mas com apenas determinadas orientações espaciais, em virtude da *quantização espacial Sommerfeldiana* antes referida. Assim, quando o núcleo (do órgão de um ser vivo, por exemplo), depois de absorver essa radiação (que lhe faz passar de uma orientação espacial para uma outra), volta ao estado original dele, emite essa radiação que é decodificada por um processador sob a forma de uma imagem. [Dictionary of Physics (Warner Books, 1985); Itzhak Roditi, *Dicionário Houaiss de Física* (Objetiva, 2005).]

Desde a descoberta da NMR, em 1946, sua aplicação se restringiu ao estudo da estrutura química das substâncias. Seu uso na Medicina somente aconteceu no começo da década de 1970. O pioneiro nessa aplicação foi o matemático (com bacharelado na *Universidade de Wisconsin-Madison*, em 1956) e médico (com o doutorado no *Colégio Albert Einstein de Medicina de Nova York*, em 1960) norte-americano Raymond Vahan Damadian (n.1936) quando, em 1971 (*Science* 171, p. 1151), observou que tecidos cancerosos de ratos apresentavam tempos de relaxação, resultantes da aplicação da NMR, mais longos do que os de tecidos normais. Em vista disso, sugeriu que essas diferenças poderiam ser usadas para diagnosticar o câncer. Muito embora essa sugestão não fosse de uso prático para esse tipo de diagnóstico, conforme se mostrou posteriormente, ele solicitou sua patente, em 1972, e a obteve em 1974 (*US Patent* 3.789.832). Em 1977 (*Hospital Practice* 12, p. 63), ele usou essa técnica (conhecida como FF – “focused field”) para “escanear” o corpo humano. Como essa técnica não permitia obter imagens, Lauterbur e Mansfield, independentemente, introduziram modificações, como veremos adiante, e a transformaram no hoje famoso MRI. (en.wikipedia.org/wiki/Raymond_Damadian.) É oportuno registrar que uma primeira tentativa do MRI foi apresentada pelo físico norte-americano Herman Y. Carr (1924-2008) (que teve Purcell como orientador de suas Teses de Mestrado e de Doutorado, na *Universidade de Harvard*), em 1958 (*Physical Review* 112, p. 1693), em artigo no qual descreveu uma técnica de precessão de estado-estacionário para obter uma imagem uni-dimensional da NMR.

Depois de concluir a *Sidney High School*, Lauterbur foi para o *Case Institute of Technology*, em Cleveland, Ohio. Como sempre gostou de Química (quando adolescente ele construiu um laboratório no porão da casa de seus pais), naquele Instituto ele fez um Curso de Química Quântica, que lhe permitiu bacharelar-se em Química, em 1951, já que não conseguira se qualificar para obter o grau de engenheiro. Lauterbur começou a lidar com a NMR quando realizou seu Serviço Militar no *Army Chemical Center*, em Edgewood, Maryland, na década de 1950. Aprimorou seu conhecimento da NMR no *Mellon Institute Laboratories* do *Dow Corning Corporation*. Ao mesmo tempo em que trabalhava nesse Instituto, ele fez o Curso de Química na *Universidade de Pittsburgh*, na qual doutorou-se em 1962. Entre 1969 e 1985, foi professor de Química Radiológica na *Universidade Estadual de Nova York*, em Stony Brook.

Em Stony Brook, Lauterbur intensificou suas pesquisas no sentido de obter imagens com a NMR. Assim, usou a idéia de introduzir gradientes no campo magnético externo utilizado nessa técnica para poder determinar a origem das ondas de rádio emitidas pelo núcleo do objeto em estudo. Com isso, ele pretendia expandir a técnica de Carr para obter

imagens de NMR, em duas dimensões. Inicialmente, trabalhou com mariscos que sua filha recolhia nas praias de Long Island Sound e, também, com amostras de pimenta verde. Depois, com a intenção de obter a imagem do corpo humano, uma vez que ele é formado principalmente de água, Lauterbur aplicou sua técnica em béqueres contendo água normal (H_2O) e água pesada (D_2O). Ele encontrou, pela primeira vez, imagens de MR diferenciando os dois tipos de água. Até essa ocasião, nenhuma técnica era capaz de registrar essa diferença.

De posse dessa descoberta, Lauterbur preparou um artigo relatando a mesma e o mandou para a *Nature*. O artigo foi rejeitado com o parecer de que as imagens eram muito vagas (“were too fuzzy”). Como não aceitou essa rejeição, Lauterbur reescreveu o artigo e o mandou de novo para aquela mesma Revista que, por fim, o publicou em 1973 (*Nature* 242, p. 190). (in.wikipedia.org/wiki/Paul_Lauterbur.) O uso médico de imagens pela NMR, denominado por Lauterbur de zeugmatografia, foi por ele apresentado em 1979 (*Institute of Electrical and Electronic Engineers: Transactions on Nuclear Science* 26, p. 2008). Para mais detalhes dos trabalhos de Lauterbur sobre NMR e MRI, ver sua *Nobel Autobiography* e sua *Nobel Lecture: All Science is Interdisciplinary – From Magnetic Moments to Molecules to Men* (08 de Dezembro de 2003).

Agora, vejamos a contribuição de Mansfield para o desenvolvimento da MRI. Em 1959, Mansfield bacharelou-se em Física no *Queen Mary College*, da *Universidade de Londres*. E, nesse mesmo Colégio, defendeu sua Tese de Doutorado, em 1962. Durante dois anos realizou um pós-doutorado com o físico norte-americano Charlie P. Slichter, na *Universidade de Illinois*, em Urbana, Illinois, em cujo laboratório começou a trabalhar com a NMR. Em 1964, foi indicado pelo físico norte-americano Edward Raymond Andrew (1921-2001) para ser *lecturer* no Departamento de Física da *Universidade de Nottingham*. Nesse Departamento, Mansfield começou a organizar um grupo de pesquisa para estudar as técnicas de multi-pulsos de NRM. Registre-se que, como veremos mais adiante, em 1977, Andrew construiu um MRI em escala média e obteve imagens de antebraços humanos e de pequenos animais *in vivo*.

No verão de 1972, na sala de chá daquele Departamento, Mansfield discutiu com seu aluno de doutorado, o físico inglês Peter K. Grannell, e com o físico norte-americano Allan N. Garroway (que lá se encontrava para realizar seu primeiro pós-doutorado, e que trabalhara, em seu doutorado na *Universidade de Cornell*, com NRM para estudar o fluxo de fluidos), sobre a possibilidade de usar a técnica experimental de estreitamento de linhas multi-pulso (“multi-pulse line narrowing experiments”) em cristais, para descobrir a sua estrutura atômica interna. Sua idéia era a de usar essa técnica, por exemplo, no fluoreto de cálcio (CaF_2), para remover a interação dipolo-dipolo que ocorre nesse cristal e, ao mesmo tempo, aplicar um gradiente linear de campo magnético para alargar a forma da linha espectral correspondente e, com isso, obter informações sobre a estrutura atômica do flúor (F). Depois desse encontro, apesar do ceticismo de Garroway sobre essa idéia, mas contando com o apoio de Grannell, Mansfield realizou uma série de cálculos teóricos que mostravam a viabilidade de sua idéia e levou-os para Grannell que estava terminando o doutorado.

Depois de concluído o doutorado, o que ocorreu em outubro de 1972, Grannell foi convidado por Mansfield para realizar o seu primeiro pós-doutorado nessa linha de pesquisa: estudo da difração em sólidos por aplicação da técnica NMR, associada com um gradiente de campo magnético externo. Uma experiência usando essa idéia foi realizada por Mansfield (junto com Grannell, Garroway e D. C. Stalker), em novembro de 1972, e o resultado foi o esperado, qual seja, a observação de efeitos de difração quando o gradiente de campo era ligado. Mansfield continuou a realizar novas experiências nessa mesma linha em uma boa parte de 1973. Como encontrava sempre os mesmos resultados, ele os apresentou no *Primeiro Colóquio Especializado Ampère*, que aconteceu em setembro de 1973, na Cracóvia, na Polônia, ao pronunciar a Conferência intitulada: Multi-pulse Line Narrowing Experiments: NMR Diffraction in Solids?. Ainda em 1973 (*Journal of Physics C: Solid State Physics* 6, p. L422), Mansfield e Grannell apresentaram os resultados formais dessa experiência, resultados esses decorrentes da aplicação da técnica da transformada de Fourier aos sinais de rádio por eles utilizados nas experiências que realizaram. Com o objetivo de melhorar as imagens produzidas por essa técnica, Garroway, Grannell e Mansfield desenvolveram uma nova técnica – a *irradiação seletiva* –, publicada por eles em 1974 (*Journal of Physics C: Solid State Physics* 7, p. L457), que examinava finas fatias (“thin slices”) do material em estudo, sem penetrar em planos adjacentes.

É importante registrar que o físico norte-americano Waldo S. Hinshaw, que trabalhou com Andrew, desenvolveu em 1976 (*Journal of Applied Physics* 47, p. 3709), uma outra técnica de obter imagens com a NMR, conhecida como *método do ponto sensitivo* (“sensitive point method”), com qual ele, Andrew, Paul A. Bottomley, G. Neil Holland, William S. Moore e C. Simaraj, em 1977 (*Physics in Medicine and Biology* 22, pgs. 571; 971), fizeram uma MRI de sistemas biológicos (um pulso humano, por exemplo).

Uma das preocupações de Mansfield no uso de sua técnica, bem como a usada por Lauterbur (da qual falamos acima, e que tomara conhecimento por ocasião de sua Conferência na Cracóvia, em 1973, e cuja descrição ouvira do próprio Lauterbur, no começo de 1974, em uma Conferência Internacional sobre NMR realizada na Índia), relacionava-se com o tempo de obtenção das imagens. Aliás, essa mesma dificuldade ocorria na técnica de Hinshaw, também descrita acima. Assim, durante o ano de 1974, Mansfield começou a pensar em uma maneira de reduzir esse tempo. Uma primeira idéia que teve foi a “line scan imaging”, segundo a qual, o objeto era “escaneado” por uma magnetização linear. Com essa técnica, em 1976, ele “escaneou” o dedo de um de seus estudantes, o físico inglês Andrew A. Maudsley, com a imagem NMR (MRI) de 64×64 “pixels” obtida em um intervalo de 15-23 minutos. Essa MRI humana foi apresentada em 1977 (*British Journal of Radiology* 50, p. 188), em um artigo assinado por Mansfield e Maudsley. É oportuno notar que, conforme vimos anteriormente, também em 1977, Damadian obteve uma MRI humana, desta vez, de um corpo inteiro. É interessante destacar que, em suas experiências, Mansfield usou a cânfora ($C_{10}H_{16}$) que, por conter alguns prótons móveis, a interação spinorial deles com o campo magnético externo da NMR fazia-os

rodar. Com isso, uma linha de absorção relativamente estreita era observada e registrada em uma imagem. Essa observação foi anotada por ele em um artigo publicado em 1976 (*Contemporary Physics* 17, p. 553).

Como o tempo da “line-scanning” permanecia ainda muito grande, Mansfield começou a pesquisar um outro método que diminuísse esse tempo. Ainda em 1977 (*Journal of Physics C: Solid State Physics* 10, p. L55), ele descreveu a técnica EPI (“Echo-Planar Imaging”). Essa nova técnica, denominada por ele de “snap-shot”, significava que as imagens bi-dimensionais MRI poderiam ser obtidas em tempos extremamente curtos, no intervalo 20-30 ms. Essa técnica foi completada com o princípio da “proteção magnética ativa” aplicada às bobinas de gradiente magnético até então utilizadas na MRI, e foi descrito por Mansfield e B. Chapman, em 1986 (*Journal of Physics D: Applied Physics* 19, p. L129; *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 19, p. 541). É oportuno dizer que essas bobinas de gradiente protegidas magneticamente compõem os aparelhos comerciais de MRI usados hoje. Para mais detalhes dos trabalhos de Mansfield sobre a MR/EPI, ver sua *Nobel Autobiography* e sua *Nobel Lecture: Snap-Shot MRI* (08 de Dezembro de 2003).



ANTERIOR

SEGUINTE