

A Crônica da Física do Estado Sólido: IV. Magnetismo*

José Maria Filardo Bassalo

Departamento de Física, Universidade Federal do Pará

66075 - 900 - Guamá, Belém, Pará

Trabalho recebido em 8 de janeiro de 1993

Resumo

Nesta última parte da Crônica da Física do Estado Sólido mostramos como evoluíram os conceitos relacionados às propriedades magnéticas da matéria. Nossa análise vai desde os primórdios da Humanidade até meados do presente século. Dessa análise, verificamos que até final do século passado, as propriedades magnéticas da matéria eram estudadas, basicamente, sob o ponto de vista macroscópico (Gilbert, Coulomb, Faraday, Lord Kelvin, Maxwell, Pierre Curie). Somente a partir dos primeiros anos do século XX é que começaram os modelos microscópicos (clássicos e semi-clássicos) no sentido de entender aquelas propriedades (Langevin, Weiss). Por fim, a partir do final da década de 1920, tais propriedades foram estudadas sob o ponto de vista quanto-mecânico (Heisenberg, Landau, Pauli, Bloch, Peierls), o que ensejou a descoberta de novas propriedades da matéria: *antiferromagnetismo* e *ferrimagnetismo* (Néel), bem como a solução do *modelo de Ising* bidimensional sem campo externo (Onsager).

I. Introdução

Este artigo conclui a Crônica da Física do Estado Sólido.¹ Nele, analisaremos a evolução dos conceitos referentes às propriedades magnéticas dos corpos, sem, contudo, levarmos em consideração sua relação com os fenômenos elétricos.² Nossa análise vai desde os primórdios da Humanidade até meados do presente século.

Parece ser lendária a origem do termo *magnetismo*, pois derivou do nome de um pastor de ovelhas, o grego Magnes. Este ficou surpreso ao observar que a ponta de ferro de seu cajado assim como os pregos de sua sandália, eram atraídos por certas pedras que encontrava ao longo de seu pastoreio. Este, provavelmente, se localizava na Tessália, uma província grega que passou a ser chamada, por razões óbvias, de Magnésia.³ Essas pedras, pela mesma razão, passaram a ser conhecidas como *magnetita* ou *ímã natural*, hoje reconhecida

quimicamente como Fe_3O_4 .⁴

Lenda ou não, o fato é que a propriedade de a magnetita atrair pedaços de ferro foi mencionada pelos filósofos gregos Tales de Mileto (624-546), Anaxágoras de Clazômenas (c.500-c.428), Sócrates de Atenas (c.470-399), Platão de Atenas (c.427-c.347) e, como já frisamos, por Lucrécio. Devido ao "aspecto quase mágico e vivo de seu comportamento", alguns lhe atribuíam a crença de que a magnetita possuía uma alma. Essa tese animista foi também defendida pelo filósofo grego Diógenes de Apolônia (f.c. século V a.C.), já que afirmava que "a *secura* existente na magnetita se saciava na *humidade* existente no ferro".⁵

Uma outra versão sobre o conhecimento das propriedades da magnetita referidas acima (e objeto de controvérsia por parte dos historiadores) atribui aos chineses, que viveram entre 2637 e 1100 a.C., o de ser os detentores não só desse conhecimento, bem como o uso prático da magnetita, utilizando-a como bússola para

*Este artigo é em homenagem ao professor da Universidade Federal do Pará, ANTÔNIO GOMES DE OLIVEIRA, um dos primeiros físicos paraenses dessa IFE a fazer uma Tese de Mestrado em Magnetismo.

orientações de viagens, quer terrestres, quer marítimas, feitas por aqueles povos asiáticos. Contudo, parece que a primeira referência clara sobre o uso da bússola por parte dos chineses, data de 215 a.C.⁶

O ímã natural foi sistematicamente estudado⁷ pelo erudito francês Petrus Peregrinus de Maricourt (c.1240 - ?), em sua epístola *De Magnete*, publicada em 1269. Nela, mapeou as diversas direções assumidas por pequenos pedaços retangulares de ferro colocados também sobre pequenas amostras esféricas de magnetita, chamadas por ele de *terrellas* (pequenas terras). Em consequência, observou que essas direções se cruzavam em pontos opostos, análogos aos pontos de cruzamento dos meridianos terrestres. Por essa razão, denominou-os de *pólos magnéticos*. São ainda dele, outras observações sobre ímãs. Por exemplo, a de que seccionando-se uma agulha magnética ao meio, produzem-se dois novos ímãs, cada um deles com seus respectivos pólos magnéticos: norte e sul; a de que pólos de mesmo sinal se repelem e que de sinais contrários se atraem; e a de que quando limalhas de ferro eram colocadas em um pedaço de papelão sob o qual se encontrava um ímã, tais limalhas se orientavam em direções determinadas que se dirigiam de um pólo ao outro desse mesmo ímã. (Somente em 1832, o físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867) demonstrou que as direções seguidas pelas limalhas de ferro, na experiência de Peregrinus, obedeciam a uma característica própria do ímã, as famosas *linhas de força*, conforme veremos mais adiante.)⁸

Não obstante o profundo conhecimento que Petrus Peregrinus possuía sobre a bússola, seu uso generalizado só se tornou possível a partir de 1302, quando o navegador italiano Flávio Gioja (f.c. século XIV A.D.) passou a utilizá-la, sistematicamente, em suas viagens. O aparecimento da bússola no Novo Mundo, ocorre com a viagem do também navegador italiano Cristovão Colombo (1451-1506), em 1492, ocasião em que observou o desvio da agulha magnética ao atravessar o Oceano Atlântico.⁹

Utilizando-se do método experimental, o médico inglês William Gilbert (1544-1603) coordenou todos os fatos conhecidos sobre magnetismo, bem como acrescentou, conforme veremos a seguir, outras observações originais sobre esse tema, em seu famoso livro *De Magnete*, publicado em 1600.¹⁰ Com efeito, investigando as forças entre ímãs, observou que num ímã uniforme, a

força magnética era proporcional à sua massa, fazendo, desse modo e, presumivelmente, pela primeira vez, a distinção entre peso e massa.¹¹ Ainda decorrente de suas observações, Gilbert lançou a primeira versão dos "campos" magnético e elétrico, segundo a qual, tanto o ímã como um corpo eletrizado, emitiam uma substância etérea e imaterial - o *effluvium magnético e elétrico* - respectivamente. Desse modo, os raios dessa "virtude" magnética e elétrica partiam do centro dos corpos e em todas as direções, agindo sobre os corpos vizinhos e os atraindo. Animado com essa idéia, chegou a apresentar a tese de que a força de atração entre o Sol e os planetas era de origem magnética. Além do mais, Gilbert descobriu ainda que o ímã perdia suas propriedades quando aquecido até o vermelho rubro, readquirindo-as quando se esfriava.¹²

Além dessas observações feitas sobre o magnetismo,¹³ Gilbert apresentou no sexto livro de seu *De Magnete*, a maior contribuição ao conhecimento científico, qual seja, a de que a Terra se comportava como uma grande esfera magnética. Gilbert foi levado a essa conclusão após uma série de experiências que realizou com um ímã esférico - a sua *Mini-Terra (terrella)* -, especialmente construído por ele para observar o comportamento de uma agulha magnética em presença desse ímã. Dessas experiências, observou que quando a agulha magnética é suspensa, ela mergulha em direção à sua Mini-Terra. Observou, ainda, aquele médico, que a agulha magnética aponta sempre na direção dos pólos magnéticos terrestres, quase coincidentes com os pólos geográficos, e que neles, a agulha toma a direção vertical. Esse médico da Rainha da Inglaterra fez também estudos sobre a declinação e a inclinação magnéticas¹⁴ da agulha imantada, estudos apresentados no quarto e quinto livros do *De Magnete*.

A tese de que a magnetita possuía uma alma foi descartada pelo filósofo e matemático francês René Descartes (1596-1650) em seu *Principia Philosophiae (Princípios Filosóficos)*, de 1644, já que explicou os fenômenos magnéticos por intermédio de sua teoria dos vórtices. Vejamos de que maneira. Adepto da idéia de que a realidade do mundo material residia em dois atributos: extensão e movimento, Descartes imaginou que os fenômenos magnéticos da Terra, e dos pequenos ímãs, se deviam a pequenas partículas fibradas e fluidas que circulavam pela Terra em delgados dutos, entrando através dos poros em um dos pólos da Terra

e saindo pelo outro. Como admitia, também, haver dois tipos dessas partículas, considerou que uma delas penetrava pelo pólo norte e o outro, pelo pólo sul. A viagem de retorno dessas partículas, obviamente, se dava pelo ar. Contudo, se nesse retorno encontrassem uma substância magnética dotada de dutos, elas "prefeririam" passar por ela e ali permaneciam, entrando e saindo, formando vórtices. Sendo, ainda, partidário de uma visão atomística da matéria, Descartes supunha que a ação entre suas partículas fibradas e o ferro se devia às resistências proporcionadas pelos movimentos dos átomos de ferro.¹⁵

No século XVIII foram descobertos novos fenômenos relacionados com o magnetismo. Por exemplo, em 1751 o estadista e cientista norte-americano Benjamin Franklin (1706-1790) observou que agulhas de ferro poderiam ser imantadas ou desimantadas por intermédio de uma descarga elétrica produzida por uma *garrafa de Leiden*.¹⁶ Tal fenômeno mostrava uma relação clara entre eletricidade e magnetismo. Porém, somente no século XIX essa relação foi estudada com maiores detalhes pelo físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851), em 1820, conforme veremos mais adiante.

Ainda no século XVIII, novas contribuições ao entendimento do magnetismo foram apresentadas. Assim é que, em 1750, o geólogo e astrônomo inglês John Michell (1724-1793), em seu livro *A Treatise of Artificial Magnets (Um Tratado sobre Magnetos Artificiais)*, propôs a idéia de que a força entre os pólos magnéticos variava com o inverso do quadrado da distância entre eles¹⁷. Esclareça-se que essa lei foi logo aceita pelos alemães, o físico Tobias Mayer (1723-1762) e o famoso matemático Johann Heinrich Lambert (1728-1777).¹⁸

A hipótese dos vórtices de Descartes para explicar o magnetismo começou a ser definitivamente derrogada na segunda metade do século XVIII pelo físico russo Franz Maria Ulrich Theodor Hoch Aepinus (1724-1802) em seu *Tentamen Theoriae Electricitatis et Magnetismi (Uma Tentativa Teórica da Eletricidade e do Magnetismo)*, livro publicado em 1759, considerado como sendo o primeiro trabalho sobre a aplicação da matemática para explicar a eletricidade e o magnetismo. Com efeito, utilizando a *Teoria de um fluido-elétrico* (desenvolvida por Franklin, entre 1747 e 1748, para estudar os fenômenos elétricos), Aepinus propôs que as propriedades magnéticas dos "pólos" de um ímã se deviam à falta ou excesso de um *fluido magnético*, cujas

partículas repeliam uma a outra, assim como atraíam partículas de ferro e aço. Além do mais, para esse físico, construtor de um capacitor eletrostático, o magnetismo permanente do ímã era devido ao emaranhamento desse fluido nos poros desse mesmo ímã.¹⁹

Por outro lado, um modelo de *dois fluidos magnéticos* - o *boreal* e o *austral* - foi postulado pelos físicos, o holandês Antoon Brugmans (1732-1789) e o sueco Johann Carl Wilcke (1732-1796) para explicar o fenômeno do magnetismo. Assim, tais fluidos imponderáveis eram supostos possuírem propriedades de atração e repulsão mútuas similares àquelas possuídas pelos dois fluidos elétricos.²⁰ (É oportuno registrar que Brugmans, em 1778, observou que o Bismuto metálico, fluando em um pequeno recipiente contendo água ou Mercúrio, era repelido pelos pólos de um ímã. Observação análoga a esta, porém com o Antimônio, seria realizada pelo físico francês Antoine-César Becquerel (1788-1878), em 1827.²¹)

Uma nova investida contra a teoria dos "vórtices magnéticos" descartianos foi levada a cabo pelo físico francês Charles Augustin Coulomb (1736-1806). Com efeito, em 1777, usou argumentos mecânicos para explicar o magnetismo. Mais tarde, em 1785, confirmou a hipótese de Michell segundo a qual partículas de fluidos magnéticos se atraem ou se repelem com uma força que é proporcional ao inverso do quadrado da distância entre elas.²² Além do mais, uma de suas importantes contribuições à teoria do magnetismo, relacionou-se com a observação de Petrus Peregrinus, feita em 1269, de que os pólos magnéticos de um ímã não podem ser isolados, isto é, não existem cargas magnéticas isoladas, conforme vimos acima. Para explicar esse fato experimental, Coulomb supôs, em 1789, ser os fluidos magnéticos permanentemente presos no interior das moléculas dos corpos magnéticos, e que são incapazes de passar de uma molécula para sua vizinha. Portanto, cada molécula contém, em qualquer circunstância, igual número de fluidos *boreais* e *austrais*. Assim, para Coulomb a magnetização consistia simplesmente na separação desses dois fluidos para as extremidades opostas de cada molécula. Com essa hipótese, explicou a impossibilidade de separar pólos magnéticos de um ímã, já que o fenômeno da magnetização era microscópico.²³

A observação de Petrus Peregrinus referida acima, assim como a conexão entre a eletricidade e o

magnetismo,²⁴ continuaram a ser objeto de pesquisa por parte dos cientistas, agora, no século XIX. Logo em 1805, o físico francês Jean-Nicolas-Pierre Hachette (1769-1834) e o químico, também francês, Charles-Bernard Desormes (1777-1862), tentaram, sem êxito, verificar se uma pilha voltáica,²⁵ isolada e suspensa livremente, seria orientada pelo magnetismo terrestre, como uma bússola. Por sua vez, Oersted, em 1807, tentou, também sem êxito, realizar experiências com as quais procurava descobrir relações entre a eletricidade e o magnetismo. Contudo, durante um curso ministrado por Oersted, no inverno de 1819-1820 na Universidade de Copenhague, sobre *Eletricidade, Galvanismo*²⁶ e *Magnetismo*, fez a descoberta da ação magnética da corrente elétrica, que o tornou famoso.

Em suas primeiras experiências, Oersted colocava sempre o fio condutor do circuito galvânico utilizado em ângulo reto sobre uma agulha magnética. No entanto, não registrou nenhum movimento perceptível da agulha. Porém, ao término de uma aula noturna daquele curso, no começo de abril de 1820, ocorreu-lhe a idéia de colocar o fio condutor paralelamente à direção da agulha; aí, então, observou uma razoável deflexão dessa agulha,²⁷ e a procurada relação entre o magnetismo e o galvanismo (corrente elétrica) estava portanto descoberta.²⁸ O resultado foi por ele próprio confirmado com aparelhos mais potentes, e o anúncio público do mesmo ocorreu em julho de 1820²⁹.

Essa descoberta de Oersted despertou grande interesse da comunidade científica, pois as forças, até então conhecidas (gravitacional, elétrica e magnética), atuavam provocando deslocamentos retilíneos, uma vez que são forças centrais. Agora, contudo, existia uma força que atuava diferentemente, isto é, *perpendicular* à reta que unia o condutor ao pólo magnético³⁰.

Em Genebra, o físico suíço Marc-Auguste Pictet (1752-1825) traduziu e divulgou o trabalho de Oersted, ocasião em que o físico francês Dominique-François-Jean Arago (1786-1853) (estando naquela cidade) tomou conhecimento do mesmo e presenciou, com outros físicos, a repetição das experiências de Oersted realizada pelo também físico suíço Auguste de la Rive (1801-1873), com o auxílio de Pictet. Já na França, Arago realizou suas próprias experiências nas quais constatou que um fio de cobre, no qual circulava uma corrente elétrica (voltáica), atuava como um ímã, já que era capaz de atrair limalhas de ferro não imantadas. Além

disso, notou que esse mesmo tipo de corrente podia imantar uma agulha de aço, bem como amortecer as oscilações de uma agulha imantada quando esta se situava sob um fio de cobre no qual circulava aquela corrente. O resultado dessas pesquisas foi apresentado por Arago à Academia de Ciências de Paris, em setembro de 1820³¹.

Ainda em setembro de 1820³², o físico francês André-Marie Ampère (1775-1836) apresentou também à Academia de Ciências de seu país o resultado de suas experiências sobre o efeito magnético da corrente elétrica. Em suas *memórias*³³, apresentadas àquela instituição, fazia distinção nítida entre *tensão elétrica*, responsável pelos efeitos eletrostáticos, e *corrente elétrica*, a que provocava os efeitos magnéticos que Oersted observara. Nos trabalhos apresentados nessas *memórias*, Ampère chegou a importantes resultados, tais como: o da existência da interação entre fios condutores paralelos, que é atrativa se os mesmos conduzem corrente no mesmo sentido, e repulsiva, se forem de sentidos contrários; o do comportamento de uma bobina circular de fio metálico como se fosse um ímã comum, sempre que por ela circulasse uma corrente elétrica³⁴; o do comportamento de um fio enrolado na forma de espiral como se fosse uma barra imantada, ao qual deu o nome de *solenóide*³⁵. (É oportuno salientar que Ampère denominou de *eletrostática* e *eletrodinâmica* ao estudo das cargas elétricas em repouso e em movimento, respectivamente.)

Muito embora Ampère e Arago hajam feito experiências sobre o campo magnético criado por uma corrente elétrica, a primeira análise matemática mais precisa desse efeito foi feita pelos físicos franceses Jean-Baptiste Biot (1774-1862) e Félix Savart (1791-1841). Com efeito, no dia 30 de outubro de 1820³⁶, eles apresentaram à Academia de Ciências de Paris o resultado de suas experiências nas quais demonstraram a lei que permite calcular a ação do campo magnético criado por uma corrente elétrica. Segundo essa lei, "a ação experimentada por um pólo magnético (austral ou boreal) quando colocado a uma certa distância de um fio no qual circula uma corrente voltáica, pode ser expressa da seguinte maneira: - Desenhe a partir do pólo uma perpendicular ao fio; a força sobre o pólo é perpendicular a esta linha e ao fio, e sua intensidade é proporcional ao inverso da distância"³⁷. Esse resultado foi logo analisado, sendo então verificado que a força sobre

o pólo magnético podia ser considerada como dividida em constituintes, cada um dos quais foi considerado ser devido a um particular elemento de corrente $d\vec{s}$ no qual circula a corrente i . Na linguagem atual, essa força elementar (ou o campo magnético \vec{H}) é calculada pela expressão:

$$d\vec{F} = (Ci/r^3)d\vec{s} \times \vec{r}$$

(onde C depende do sistema de unidades escolhido), sendo r a distância do elemento $d\vec{s}$ ao ponto onde é calculada a força³⁸.

As experiências de Oersted, Arago, Ampère e Biot-Savart, vistas acima, apresentaram um resultado intrigante, qual seja, o de que o campo magnético criado por uma corrente elétrica é circular, razão pela qual ela foi aceita com um certo ceticismo na comunidade científica, havendo, portanto, alguns cientistas tentando outras explicações. Por exemplo, o químico sueco Jöns Jakob Berzelius (1779-1848) para justificar porque uma agulha imantada colocada *sobre* um fio condutor gira para um lado, e colocada *abaixo* gira no outro sentido, realizou, em 1821, experiências com fitas magnéticas condutoras e acabou por formular a hipótese de que cada seção reta da fita corresponderia a dois finos ímãs com seus pólos em oposição. Também, em 1821, o químico inglês Humphry Davy (1778-1829) chegou ao mesmo modelo de Berzelius em seus estudos sobre fenômenos eletromagnéticos, depois de, primeiramente, propor, sem sucesso, a idéia de que em cada seção reta de um fio condutor, haveria um certo número de dipolos magnéticos formando um polígono³⁹.

Esse modelo de Davy-Berzelius foi estudado por Faraday, entre 1821 e 1822, ocasião em que demonstrou que o mesmo não era correto. Desse modo, Faraday passou a defender a hipótese oerstediana do campo magnético circular produzido por uma corrente elétrica e, como defesa dessa hipótese, apresentava o resultado de suas próprias experiências, dentre as quais destacava aquela em que um ímã exibia rotação em torno de um fio condutor⁴⁰. Essas experiências, bem como outras realizadas por Faraday, inclusive a famosa descoberta da *indução eletromagnética* (da qual trataremos mais adiante), ocorrida em 1831, foram reunidas em seu célebre livro *Experimental Researches in Electricity (Pesquisas Experimentais em Eletricidade)*⁴¹, cuja publicação começou a partir de 1831, e foi concluído após 23 anos⁴².

A polêmica sobre a natureza do campo magnético

criado por uma corrente elétrica referida acima, levou o próprio Oersted a realizar novas experiências⁴³. Assim é que, em 1823⁴⁴, para demonstrar a circularidade desse campo magnético, colocou um condutor vertical, conectado ao resto do circuito através de cubas de Mercúrio colocadas em suas extremidades, de maneira que podia girar em torno de seu próprio eixo, se alterasse a corrente elétrica. Desse modo, colocando em sua proximidade uma agulha imantada, e girando o fio, Oersted demonstrou que todos os pontos da circunferência do condutor exercem uma ação igual sobre a agulha. Tal fato era compatível com a suposição de uma distribuição descontínua de pólos sobre a superfície do fio. Por fim, em 1827, em artigo publicado na *Enciclopédia de Edinburgh*, Oersted analisa as críticas apresentadas à sua idéia de rotações magnéticas em torno de um fio condutor, tanto as não favoráveis, quanto as favoráveis⁴⁵.

Ainda no século XIX, o estudo do magnetismo recebeu novas contribuições. Vejamos quais. As experiências de Oersted, Arago e Ampère mostravam que as correntes elétricas produziam efeitos magnéticos, conforme relatamos anteriormente. Portanto, uma pergunta natural a ser respondida, era a de saber se o magnetismo não poderia produzir correntes elétricas. A resposta a essa pergunta foi dada por Faraday, após uma investigação planejada cuidadosamente⁴⁶. Com efeito, em 1831, Faraday demonstrou que para produzir uma corrente elétrica, devido à presença de um ímã, era necessário que este se deslocasse na região onde se encontrava o fio condutor. Por outro lado, observou ainda Faraday que uma corrente variável circulando numa bobina provocava uma corrente transitória em uma outra bobina colocada nas imediações da primeira. A esse fenômeno deu o nome de *indução eletromagnética*, a qual já nos referimos⁴⁷.

Apesar de não possuir quase nenhuma cultura matemática, Faraday usou sua grande intuição para explicar os fenômenos eletromagnéticos que observava. À sua época, as forças elétrica, magnética e gravitacional eram consideradas como atuando através do espaço vazio que separa os corpos, isto é, elas atuavam "à distância". Contudo, para ele "a matéria é onipresente, inexistindo espaço intermediário que não esteja por ela ocupado"⁴⁸. Em vista disso, Faraday ao observar, em 1838, a figura formada por limalhas de ferro numa folha de papel ou lâmina de vidro, sob a qual colocava um ímã, passou a desenvolver sua Teoria Geral da Ele-

tricidade, segundo a qual as forças elétrica e magnética eram uma espécie de “tubos de borracha” existentes no éter onipresente, e que se estendiam a partir de fios condutores, ou de ímãs, ou de corpos eletrizados, tubos aos quais denominou *linhas de força*⁴⁹. No caso das forças magnéticas, a visualização dessas linhas poderia ser feita através de limalhas de ferro, conforme já observara; porém, no caso das forças elétricas, a visualização era mais difícil de ser realizada experimentalmente. Para Faraday, a visualização seria através da “polarização elétrica” do meio. Como essas linhas deveriam encher completamente o espaço, este, passava, então, a constituir-se um *campo de forças*. Assim, segundo essa idéia de linhas e de campos de forças, explicou o aparecimento de uma corrente induzida toda a vez que um tubo de força magnética “cortava” um fio condutor e, inversamente, que o movimento de tubos de força elétrica faz aparecer *campos magnéticos*, expressão cunhada por Faraday, em 1845⁵⁰.

No dia 6 de agosto de 1845, o físico inglês William Thomson (1824-1907) (mais tarde Lord Kelvin) escreveu uma longa carta a Faraday na qual descrevia seu tratamento matemático das linhas de força faradayananas. No final da carta, há uma série de sugestões sobre experiências que deveriam ser realizadas com o propósito de testar a teoria de Faraday. Numa dessas sugestões, Thomson indica a possibilidade de Faraday testar a ação do magnetismo sobre a luz plano-polarizada⁵¹.

O efeito predito por Thomson, Faraday já havia tentado detectá-lo nos anos de 1820 e de 1830, porém, sem sucesso. Contudo, no dia 13 de setembro de 1845 seus esforços foram finalmente coroados de êxito. Colocando um vidro rombóide de alto índice de refração entre os pólos de um forte eletroímã, constatou que o vidro procurava se orientar perpendicularmente ao campo magnético. Por outro lado, fazendo passar por esse mesmo vidro um raio de luz plano-polarizada, paralelamente às linhas de força do campo magnético, descobriu que o plano de polarização da luz era rodado; descobriu, também, que o ângulo de rotação era diretamente proporcional à intensidade do campo magnético: estava assim descoberto o famoso *efeito Faraday*⁵².

O fato de que o campo magnético atuava na luz, através do vidro, sugeriu a Faraday a idéia de que esse campo não poderia estar apenas confinado no Ferro, Níquel e Cobalto (como já era conhecido) e sim, em

toda a matéria. No curso de suas experiências no sentido de confirmar essa idéia, verificou que nem todos os corpos reagem da mesma maneira na presença de um campo magnético. Alguns deles, como por exemplo, o Ferro, conduzem bem o campo magnético, fazendo convergir as linhas de força desse campo através de si próprio. A esse grupo de substâncias denominou de *paramagnéticas*. Por outro lado, outros corpos, dentre os quais se encontram o Bismuto e o Antimônio, são pobres condutores de campo magnético, divergindo suas linhas de força através de si mesmos: tais corpos receberam de Faraday a denominação de *diamagnéticos*⁵³.

A descoberta dessas propriedades magnéticas da matéria estimulou os cientistas a formularem modelos para explicá-las. Assim, os partidários da teoria dos fluidos magnéticos (desenvolvida por Brugmans e Wilcke, no último quartel do século XIX, conforme vimos), a utilizavam para explicar o paramagnetismo como sendo devido à atração entre esses fluidos. No entanto, no caso do diamagnetismo em que há repulsão, aqueles partidários acreditavam que as substâncias que exibiam essa propriedade, tinham a capacidade de reverter a “polaridade” daqueles fluidos. Faraday, contudo, era bastante cético com relação a essa teoria polar. Para ele, conforme vimos, as propriedades magnéticas dos corpos eram devidas às linhas de força, pois as considerava como um “fluxo de poder”, já que comparava o ímã (magneto) a um circuito galvânico no qual o próprio magneto era uma fonte de poder, uma verdadeira “habitação das linhas de força”.

A explicação das propriedades magnéticas apresentadas por Faraday era insatisfatória, uma vez que não era provida de nenhum mecanismo para explicar o fenômeno magnético. No entanto, ela apresentava um aspecto muito interessante pois atribuía ao campo magnético e não ao magneto, as ações magnéticas deste. Tal comportamento, afirmou Faraday, era também característica dos campos elétrico e gravitacional. A formulação matemática dessa afirmação foi feita por Maxwell⁵⁴. Vejamos como:

Estudando os trabalhos de Faraday, Maxwell conseguiu dar um tratamento matemático bastante rigoroso das linhas de força faradayananas. Desenvolveu, com isso, um modelo mecânico do meio luminífero, no qual as linhas de força eram consideradas como tubos desse meio, girando em torno de seus respectivos eixos, de tal modo que a força centrífuga decorrente dessas rotações origi-

nava a expansão dos tubos no sentido de sua largura e a contração no sentido de seu comprimento, do mesmo modo como Faraday imaginara explicar a atração e a repulsão magnéticas. O resultado desse estudo de Maxwell foi por ele apresentado à Sociedade Filosófica de Cambridge, nos anos de 1855-1856, com o título: *On Faraday's Line of Force (Sobre as Linhas de Força de Faraday)*⁵⁵. Esse trabalho é dividido em duas partes. Na primeira delas, Maxwell estudou a analogia entre as linhas de força e as linhas de fluxo em um fluido incompressível, fazendo uma extensão do trabalho de Thomson sobre esse assunto.⁵⁶ Na segunda parte, estudou o eletromagnetismo propriamente dito, desenvolvendo a partir daí a sua célebre teoria formal dos processos eletromagnéticos, cujos resultados foram apresentados no seu *Tratado*, já por nós referido⁵⁷.

O próximo trabalho de Maxwell, realizado nos anos de 1861-1862, refere-se à análise da existência de tensões e vibrações (no meio éter que ocupa o espaço vazio entre os corpos do Universo), associadas às linhas de força de Faraday, relativas ao campo magnético. Ao estudar as leis da Dinâmica dessas tensões e vibrações, concluiu que "a luz consiste nas ondulações transversais do mesmo meio ambiente que é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos". Estava feita a grande descoberta: *-A luz é uma onda eletromagnética*⁵⁸.

Maxwell prosseguiu estudando o fenômeno eletromagnético. Assim, em 1863, com auxílio de Fleeming Jenkin, publicou o terceiro "artigo" intitulado *On the Elementary Relations of Electrical Quantities (Sobre as Relações Elementares das Quantidades Elétricas)*; em 1865, seu quarto trabalho tratou da *Dynamical Theory of the Electromagnetic Field (Teoria Dinâmica do Campo Eletromagnético)*; por fim, no *Tratado* de 1873, completou sua *Teoria do Campo Eletromagnético*. Essa Teoria foi complementada por outros físicos, porém, como já tratamos do assunto em outro local⁵⁹ e por estar o mesmo, fora do escopo desta Crônica, voltemos, portanto, ao estudo das propriedades magnéticas das substâncias.

Faraday, conforme vimos anteriormente, classificou as substâncias em *dia* e *paramagnéticas*, dependendo se as linhas de força do campo magnético, em seus interiores, divergem ou convergem, respectivamente. Como essa classificação era apenas pictórica, pois não se fazia acompanhar de nenhum mecanismo para explicar o fenômeno, o físico alemão Wilhelm Eduard Weber

(1804-1891), em 1847⁶⁰, tentou explicá-las usando as correntes amperianas⁶¹. Assim, para explicar o diamagnetismo (no qual a polarização magnética induzida nos corpos por um campo magnético externo, é contrária à direção deste), postulou a existência de circuitos moleculares amperianos nos quais a resistência ôhmica é nula (porém não o é sua auto-indução), de modo que um campo magnético externo causa correntes induzidas nesses circuitos. No entanto, embora o fluxo magnético através dos circuitos moleculares permaneça nulo, as correntes induzidas, cujas direções são dadas pela *lei de Lenz*⁶², explicam o diamagnetismo.

Essa explicação, contudo, apresentava dificuldades, uma vez que, segundo a mesma, *todos* os corpos seriam então diamagnéticos. Para escapar a essa conclusão, Weber admitiu que no ferro e nas outras substâncias magnéticas existiam correntes moleculares permanentes cujos planos eram orientados pelo campo magnetizante externo. Tais correntes assim orientadas, tinham sentido contrário às correntes induzidas pelo fenômeno do diamagnetismo. Portanto, o efeito resultante seria o paramagnetismo. Assim, para Weber, as substâncias paramagnéticas seriam aquelas para as quais o paramagnetismo seria forte o bastante para mascarar o diamagnetismo⁶³.

Usando esse modelo, Weber reafirmou, em 1852⁶⁴, que a hipótese da existência de correntes elétricas no interior dos corpos refutava a idéia dos fluidos magnéticos. Além do mais, com ela, era mais fácil explicar porque em substâncias altamente magnéticas, como, por exemplo, o ferro, a magnetização induzida não aumentava em proporção ao aumento do campo magnetizante, mas tende para um valor de saturação. (Tais substâncias foram denominadas, mais tarde, de *ferromagnéticas*.) Com efeito, de acordo com Weber, a força magnetizante externa meramente orienta os magnetos internos (circuitos moleculares) na mesma direção desta. Assim, quando todos os magnetos fossem orientados, não adiantava mais aumentar a ação externa.

No entanto, nessa explicação, havia uma dificuldade, pois, caso os magnetos internos pudessem se mover livremente, sem encontrar resistência, qualquer campo magnetizante externo era capaz de induzir magnetismo. Para contornar a dificuldade, Weber admitiu que o movimento de cada circuito molecular sofria a resistência de um torque, devido à ação mútua com outros magnetos moleculares. Essa hipótese foi aceita por

Maxwell em seu tratado⁶⁵.

O estudo do movimento interno desses circuitos moleculares nas substâncias magnéticas foi desenvolvido pelo físico escocês James Alfred Ewing (1855-1935), em virtude de suas pesquisas sobre o efeito da tensão (*stress*) sobre as propriedades termoeletricas dos metais⁶⁶. Em 1881⁶⁷, descobriu que o efeito termoeletrico se "atrasava" em relação à tensão aplicada. Em consequência dessa descoberta, passou a estudar as correntes transientes produzidas por um fio magnetizado torsido. Observando o mesmo "atraso", introduziu, então, o termo *histerese*⁶⁸ (que significa, em grego, *estar em atraso*) para simbolizar esse fenômeno. Em 1882, Ewing observou que a área sob a curva de *histerese* era proporcional ao trabalho realizado durante o ciclo completo de magnetização e desmagnetização. Essas mesmas descobertas foram feitas, ainda em 1881⁶⁹ e, independentemente, pelo físico alemão Emil Gabriel Warburg (1846-1931)⁷⁰. (Anteriormente, em 1871⁷¹, Weber havia reformulado sua teoria do magnetismo, ao admitir que a corrente amperiana era constituída por uma carga elétrica fixa, porém de sinal contrário, antecipando-se de 40 anos ao modelo proposto pelo físico inglês Ernest Rutherford (1871-1937; PNQ,1908), em 1911⁷².)

A distinção que Weber havia postulado entre a natureza do paramagnetismo e a do diamagnetismo foi confirmada pelo químico e físico francês Pierre Curie (1859-1906; PNF,1903), em 1895⁷³, ao demonstrar que a suscetibilidade χ ⁷⁴ varia inversamente com a temperatura absoluta T, para as substâncias paramagnéticas enquanto que para as diamagnéticas é independente dessa mesma temperatura, exceto para o bismuto. Essa é a famosa *lei de Curie*. Além disso, ao estudar o comportamento da magnetização de substâncias ferromagnéticas em função da temperatura e/ou do campo magnético externo aplicado, observou existir uma determinada temperatura - mais tarde chamada *temperatura de Curie* - acima da qual a substância ferromagnética se comporta como paramagnética. Curie fez, também, estudos sobre o fenômeno da *histerese*, descoberto por Ewing-Warburg, conforme vimos⁷⁵.

Na medida em que o *elétron* foi cada vez mais sendo comprovado como um constituinte da matéria⁷⁶, novos modelos para explicar as propriedades magnéticas dessa mesma matéria foram então elaborados. Por exemplo, o físico alemão Woldemar Voigt (1850-1919), em 1901 e

1902⁷⁷, e J. J. Thomson, em 1903⁷⁸, estudaram o efeito de um campo magnético externo sobre um conjunto de elétrons, igualmente espaçados, que se movimentavam em um círculo, com velocidade uniforme e em torno de um centro comum. Demonstraram, com isso, que se uma substância possui uma distribuição uniforme de tais sistemas, a sua magnetização seria nula. Portanto, seria impossível explicar o magnetismo das substâncias, admitindo que seus átomos contém elétrons circulando em órbitas fechadas e periódicas, sob à ação de forças centrais. Voigt contornou a dificuldade admitindo que o paramagnetismo ou o diamagnetismo decorriam do impacto mútuo entre os elétrons orbitais sempre que, imediatamente após o impacto, esses elétrons tivessem um excesso médio de energia potencial ou cinética. Contudo, além da complexidade da explicação, havia o fato de que tal modelo atribuía ao paramagnetismo e ao diamagnetismo a mesma causa, o que, no entanto, contradizia a *lei de Curie*⁷⁹.

A primeira aplicação de um modelo microscópico ao estudo do magnetismo (e que teve um relativo sucesso), foi apresentado pelo físico francês Paul Langevin (1872-1946), em 1905⁸⁰. Com efeito, para explicar o paramagnetismo, Langevin admitiu, de modo inteiramente *ad hoc*⁸¹, que os átomos e moléculas possuíam um momento magnético intrínseco e permanente μ , cuja distribuição espacial era determinada pela *distribuição de Boltzmann*⁸². Desse modo, demonstrou que a magnetização (M) é dada por: $M = N \mu L(x)$, onde $x = \mu H/k T$, sendo N o número de Avogadro, H o campo magnético externo, k a constante de Boltzmann, T a temperatura absoluta e $L(x) \equiv \coth x - 1/x$, mais tarde conhecida como *função de Langevin*⁸³. No caso de temperaturas altas ou campos magnéticos fracos, para os quais $x \ll 1$, então $L(x) \simeq x/3$ e a magnetização terá o seguinte valor: $M = N \mu^2 H/3 k T$, de modo que a suscetibilidade magnética ($\chi = M/H$) é inversamente proporcional a T, de pleno acordo com a *lei de Curie*, conforme vimos anteriormente⁸⁴.

Para explicar o diamagnetismo, Langevin considerou a frequência de Larmor dos elétrons em torno do campo magnético externo (H), encontrando para o acréscimo do momento magnético de uma molécula, devido a um particular elétron circulante na mesma, o valor: $\Delta M = -\frac{He^2}{4m c^2} \bar{r}^2$. Nessa expressão, r é a distância do elétron ao núcleo atômico, projetada em um plano perpendicular a H, e \bar{r}^2 é a média

quadrática estendida às durações de diversas revoluções eletrônicas. O sinal menos (-) é devido à lei de Lenz, segundo já registramos. Mais uma vez, esse resultado obtido por Langevin concordava com a observação experimental de que a suscetibilidade diamagnética não dependia da temperatura, desde que o tamanho das órbitas eletrônicas não mudassem significativamente⁸⁵.

A teoria de Langevin foi utilizada pelo físico francês Pierre Ernst Weiss (1865-1940) para explicar o ferromagnetismo. Com efeito, em 1907⁸⁶, considerou que uma substância ferromagnética era constituída de pequenos dipolos magnéticos, submetidos a um intenso campo magnético interno - o campo molecular $H_m = qM$. Desse modo, o argumento da função de Langevin tornava-se: $x = \mu(H + qM)/kT$ e a suscetibilidade χ passava a ter a forma: $\chi = N\mu^2/[3k(T - T_c)]$, onde $T_c = \frac{Nq\mu^2}{3k}$ ⁸⁷.

O modelo de Weiss teve um sucesso qualitativo muito grande, pois era capaz de prever a transição de fase ferromagnetismo-paramagnetismo, já que pela expressão de χ acima, se vê que quando $T = T_c$, a mesma diverge. Portanto, tal modelo nos diz que um corpo ferromagnético deixa de sê-lo quando sua temperatura atinge o valor T_c , o chamado ponto de Curie⁸⁸. Ainda desse trabalho, Weiss deduziu que numa substância ferromagnética, existem regiões maiores do que átomos ou moléculas - os chamados domínios - os quais são inerentemente magnéticos, cujos momentos magnéticos são orientados em diferentes direções, de modo que uma parte finita da mesma pode não estar magnetizada.

A despeito do sucesso do modelo de Weiss, haviam algumas dificuldades insuperáveis sob o ponto de vista da Física Clássica (Mecânica, Eletrodinâmica e Mecânica Estatística). Por exemplo, o fator q do campo molecular havia sido calculado por Lorentz, em 1878, como sendo da ordem de $4\pi/3$. No entanto, valores experimentais de T_c indicavam para q algo em torno de 10^3 . Por outro lado, conforme já frisamos, Bohr havia demonstrado em 1911 que, classicamente, as contribuições do paramagnetismo e diamagnetismo à suscetibilidade se cancelavam⁸⁹. (Cálculo análogo a esse foi feito por Lorentz, em 1914.) Essas dificuldades foram superadas com o desenvolvimento da Mecânica Quântica, segundo veremos mais adiante.

A idéia de "corrente amperiana" e sua visão moderna, qual seja, a de elétrons orbitando nos átomos, necessitava de uma comprovação experimental. Ex-

periência nesse sentido foi sugerida pelo físico inglês Sir Owen Williams Richardson (1879-1959; PNF, 1928), em 1908⁹⁰, pela qual se poderia determinar a relação entre o momento angular mecânico (\vec{L}) do elétron e seu momento magnético ($\vec{\mu}$). Assim, imaginou um longo cilindro fino, de ferro, suspenso por uma fibra. Quando o mesmo estivesse desmagnetizado, aduziu Richardson, as "correntes amperianas" apresentavam momento angular nulo. Contudo, ao ser aplicado um campo magnético vertical, as órbitas dos elétrons seriam orientadas para o mesmo e o cilindro, como um todo, sofreria um torque que, ao ser medido, poderia determinar a relação desejada. Embora fosse muito imaginosa essa experiência, aquele físico inglês não conseguiu medir o torque previsto e, com ele, a relação procurada.

A possibilidade de medir a relação referida acima foi também, independentemente, sugerida pelo físico norte-americano Samuel Jackson Barnett (1873-1956), em 1909⁹¹. Porém, sua idéia era realizar uma experiência inversa a de Richardson, isto é, considerar cilindros de ferro, inicialmente com momento magnético nulo, e que se tornavam magnetizados após serem submetidos a uma aceleração angular⁹². Muito embora as primeiras experiências hajam confirmado o efeito Barnett, o mesmo não foi reproduzido em experiências subsequentes. Contudo, Barnett prosseguiu com esse tipo de experiência e, em 1915, publicou um longo trabalho sobre esse tema e apresentou um valor experimental para a relação procurada, ou seja: $|\frac{\vec{L}}{\vec{\mu}}| = 0.5 \times 10^{-7}$ u CGS.

Ainda em 1915⁹³, os físicos, o alemão Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) e o holandês Wander Johannes de Haas (1878-1960) realizaram uma experiência com o objetivo de determinar a relação procurada - conhecida posteriormente como razão giro-magnética g do elétron. Assim, ao estudarem a magnetização e a desmagnetização periódica de um cilindro suspenso e torsido, também periodicamente, encontraram que: $|\frac{\vec{L}}{\vec{\mu}}| = 1.11 \times 10^{-7}$ u CGS, o que era muito próximo do valor teórico, qual seja: 1.13×10^{-7} ⁹⁴. Como havia um fator 1/2 discrepante entre os resultados de Barnett-de Haas, esses cientistas (assim como outros), procuraram descobrir a razão da mesma. O esclarecimento final sobre essa questão polêmica só aconteceu com a descoberta do spin do elétron, em 1925⁹⁵.

Depois dessa rápida digressão sobre a razão giro-magnética do elétron, voltemos ao tema central desta

Crônica que é o magnetismo. Em 1920, o físico alemão Wilhelm Lenz (1888-1957) propôs como assunto de tese de doutoramento ao seu estudante, o também alemão Ernest Ising, o estudo de um modelo teórico para um sistema magnético. Essa tese foi por ele resumida em um artigo publicado em 1925⁹⁶, e que passou a ser conhecido, desde então, como *modelo de Ising*⁹⁷. Vejamos suas idéias básicas. Na tentativa de superar as deficiências apresentadas pela teoria do *campo molecular de Weiss*, apontadas anteriormente, Ising supôs que os momentos magnéticos colocados sobre sítios equidistantes e em uma cadeia unidimensional, interagiam com seus vizinhos mais próximos, de modo que a energia potencial era mínima quando os dipolos interagentes apontavam numa mesma direção, e máxima quando apontassem em direção contrária, não sendo, no entanto, permitidas outras orientações. Não obstante Ising haver calculado exatamente a função partição de seu modelo e, conseqüentemente, estudar a sua Termodinâmica, a cadeia linear considerada não apresentava ordem de longo alcance em qualquer temperatura diferente do zero absoluto. Em vista disso, o ferromagnetismo continuava sem uma boa explicação⁹⁸.

Antes de vermos como foi contornada essa dificuldade do *modelo de Ising*, veremos como, também, foram superados os óbices ao *modelo de Langevin* sobre o dia e o paramagnetismo, referidos linhas atrás. Em 1920⁹⁹, Pauli tratou o diamagnetismo das substâncias ionizadas, calculando sua suscetibilidade usando, para isso, a fórmula de Langevin. Desse modo, obteve o valor: $\chi = -(e^2 N / 4mc^2) \Sigma \bar{r}^2$, onde N representa o número de Avogadro e o somatório Σ se estende a todos os elétrons do átomo ou molécula. Por outro lado, em 1927¹⁰⁰, Pauli aplicou a idéia de *spin*¹⁰¹ aos elétrons de condução e demonstrou o aparecimento de uma pequena suscetibilidade paramagnética nos metais e que, a mesma, era independente da temperatura. O argumento básico utilizado por Pauli foi o de considerar um metal como um gás degenerado de elétrons que obedece à *estatística de Fermi-Dirac*¹⁰². Assim, muito embora o campo magnético tentasse alinhar o spin de todos os elétrons em sua direção, acarretando, com isso, que mais de um elétron poderia ocupar cada estado de baixa energia. Isto, contudo, violaria o *princípio da exclusão*¹⁰³, que ele próprio havia descoberto em 1925. Em virtude disso, Pauli considerou que somente elétrons pertencentes a uma fina camada da *superfície*

de Fermi poderiam ser alinhados. Desse modo, a suscetibilidade paramagnética de um gás de elétrons livres obtida por Pauli é dada por: $\chi = e^2 k_F / 4\pi^2 mc^2$, onde k_F é o raio da *superfície de Fermi*¹⁰⁴.

Pauli comparou o seu resultado teórico da suscetibilidade paramagnética com algumas observações experimentais de alguns metais alcalinos (Na, K, Rb, Cs). As diferenças encontradas pareciam indicar a presença de um fraco diamagnetismo. No Rb e Cs, no entanto, o diamagnetismo era comparável ao paramagnetismo. Pauli, contudo, não fez nenhuma tentativa de entender esse diamagnetismo residual em termos das contribuições de elétrons ligados e livres (de condução). Classicamente, conforme já fizemos referência, Bohr (1911), Lorentz (1914) e van Leeuwen (1919) haviam demonstrado que os elétrons de condução não contribuíam ao diamagnetismo¹⁰⁵.

A primeira tentativa de estudar o diamagnetismo de elétrons de condução sob o ponto de vista da Mecânica Quântica¹⁰⁶ foi feita pelo físico norte-americano Francis Bitter, em 1930¹⁰⁷, ao calcular o valor esperado da fórmula de Pauli-Langevin, utilizando as funções de onda do elétron-livre estendida a uma célula unitária. Porém, esse resultado diferia cerca de 2 vezes do valor conhecido. O estudo quanto-mecânico completo de elétrons orbitais e livres em um campo magnético foi feito pelo físico russo Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962), também em 1930¹⁰⁸, em seu célebre trabalho sobre o diamagnetismo¹⁰⁹.

Ao aplicar a Mecânica Estatística Quântica a um gás de elétrons (sem spin) degenerado em um campo magnético externo, Landau demonstrou que a suscetibilidade diamagnética desse gás é exatamente (-1/3) da suscetibilidade paramagnética obtida por Pauli para elétrons com spin, ao invés do valor nulo como indicava a Física Clássica. Além disso, demonstrou, também, que o momento de dipolo diamagnético apresentava uma forte periodicidade, sob ação do campo externo, resultado esse que logo seria observado no chamado *efeito de Haas-van Alphen*¹¹⁰. Apesar desses importantes resultados obtidos por Landau, a questão da alta suscetibilidade diamagnética do bismuto permanecia ainda sem solução.

A teoria de Landau sobre o diamagnetismo foi retomada pelo físico inglês Rudolf Ernst Peierls (1907-), em trabalhos realizados em 1932¹¹¹ e 1933¹¹², nos quais tratou o problema de elétrons livres em campos

magnéticos fracos e fortes, respectivamente. No caso do campo fraco, ele o tratou como uma perturbação e, com isso, demonstrou que a suscetibilidade diamagnética se relacionava com a energia-momentum $E(k)$ do elétron na superfície de Fermi, fato que, em certas situações (grande curvatura da superfície), elevava essa suscetibilidade, como ocorre, por exemplo, com o bismuto. Em seu trabalho sobre campos magnéticos fortes, atuando em elétrons de condução, Peierls deu uma explicação teórica do efeito de Haas-van Alphen¹¹³.

Ao concluirmos esta Crônica que tratou do Magnetismo, completamos o estudo do Ferromagnetismo. Ising, em 1925, conforme vimos, havia apresentado um modelo linear para sistemas magnéticos que, contudo, não poderia ser usado para explicar o ferromagnetismo. Por sua vez, o físico alemão Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932), em 1928¹¹⁴, desenvolveu um modelo no qual explicava a origem de ser tão alto o campo molecular de Weiss, como sendo de natureza eletromagnética, usando, para isso, uma combinação do princípio da exclusão de Pauli e a superposição das funções de onda eletrônicas. Ora, de acordo com o princípio de Pauli, elétrons com os mesmos números quânticos (inclusive o spin) tenderiam a permanecer afastados, minimizando a sua energia com uma baixa repulsão eletrostática (coulombiana). Por outro lado, elétrons de spin diferentes poderiam se aproximar mais e teriam, portanto, uma energia potencial mais elevada. Dessa forma, o sistema teria uma tendência natural de manter os spins eletrônicos alinhados e com mínima energia¹¹⁵. Portanto, segundo esse modelo de Heisenberg, o forte alinhamento dos spins (característica do ferromagnetismo) decorria de uma energia de troca (*exchange*) entre o spin de um elétron e seus vizinhos mais próximos (um mínimo de 8)¹¹⁶.

A teoria quântica do ferromagnetismo foi retomada pelo físico norte-americano Felix Bloch (1905-1983; PNF, 1952) que, a partir de 1929¹¹⁷, começou a estudar qual o papel dos elétrons de condução no fenômeno do ferromagnetismo, pois pretendia evitar a distribuição Gaussiana utilizada por Heisenberg. Desse modo, calculou a energia de troca entre elétrons-livres de um gás, porém, descobriu que somente para baixas densidades eletrônicas (muito baixa para os alcalinos), a interação de troca atrativa heisenbergiana, entre os elétrons, domina a energia do ponto zero entre os mesmos, domínio esse necessário para produzir o estado ferromagnético.

Contudo, observou Bloch, a própria energia do ponto zero deve ser levada em consideração para o estado ferromagnético de um metal¹¹⁸.

No prosseguimento de seu estudo do ferromagnetismo, Bloch passou a tratá-lo na região de baixas temperaturas, já que, nela, os modelos de Weiss e Heisenberg falhavam. Assim, substituindo o "approach" da Teoria de Grupo usada por Heisenberg, pelos determinantes de Slater¹¹⁹, Bloch descobriu, em 1930¹²⁰, as famosas ondas de spin¹²¹, que são os estados de energia correspondente à precessão dos spins alinhados no estado fundamental. Ao calcular os auto-valores desses estados de energia, Bloch demonstrou que as flutuações decorrentes das ondas de spin a baixas temperaturas, em redes uni e bidimensionais, destroem a possibilidade do ferromagnetismo, enquanto que em três dimensões, a variação da magnetização ΔM é proporcional a $T^{3/2}$, isto é: $\Delta(M)/M(0) \propto T^{3/2}$. Esse resultado, que ficou conhecido como a lei de Bloch $T^{3/2}$, 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 espaciais¹²².

Os trabalhos de Heisenberg, Bloch e Slater foram sumarizados por Pauli, no Congresso Solvay, ocorrido em outubro de 1930. Dentre as dificuldades encontradas nesses trabalhos, Pauli apontou a solução do modelo de Heisenberg como sendo uma delas. Chegou, inclusive, a afirmar "que uma extensão da teoria de Ising em uma rede tridimensional, poderia explicar o ferromagnetismo". Uma tentativa de resolver esse modelo, através do cálculo das auto-funções do estado ferromagnético, foi empreendida pelo físico germano-norte-americano Hans Albrecht Bethe (1906- ; PNF, 1967). Assim, em 1931¹²³, analisou o caso de uma cadeia unidimensional de spins com interação de troca J , positiva, como no caso do ferromagnetismo de Heisenberg, ou negativa no caso "normal", relevante para o problema da coesão. Nesse trabalho, calculou a função de onda de estados com um número arbitrário de spins opostos. Esse cálculo (embora incompleto em muitos aspectos pois não considerava, por exemplo, o caso $J < 0$, referido acima), é notável já que é considerado a primeira solução exata de um sistema quântico de muitos-corpos em interação¹²⁴.

A solução correspondente a $J < 0$ foi encontrada pelo físico francês Louis Eugène Félix Néel (1904- ;

PNF, 1970), em 1932¹²⁵, ao formular um modelo de uma estrutura magnética para a qual os spins nas redes são arranjados, de um modo paralelo e antiparalelo, alternadamente, de maneira que o campo magnético resultante é nulo. Demonstrou, ainda, Néel que esse estado (ao qual denominou de *antiferromagnetismo*) desaparece acima de uma determinada temperatura, conhecida desde então como *temperatura de Néel*: T_N . (É oportuno esclarecer que em 1948¹²⁶, Néel descobriu um outro estado magnético, denominado por ele de *ferromagnetismo*, no qual os spins nas redes são alinhados paralela e antiparalelamente, porém suas intensidades não são iguais, produzindo, dessa forma, um campo magnético resultante. Aos materiais que apresentam tal propriedade, chamou-os de *ferrites*¹²⁷.)

O fenômeno do ferromagnetismo continuou ainda a ser objeto de estudo por parte de Bloch. Assim, em 1932¹²⁸, estudou a dinâmica do ferromagnetismo de Heisenberg sob o formalismo da segunda quantização (operadores criação e destruição). Nessa mesma ocasião em que introduziu a hoje familiar conexão entre temperatura e tempo imaginário, demonstrando como problemas estatísticos de temperatura finita podem ser descritos por uma equação do tipo Schrödinger, para tempo imaginário. Ainda nesse trabalho, há o estudo da largura de fronteiras que separam os domínios elementares, em materiais magnéticos, as hoje famosas *paredes de Bloch*, cuja estrutura foi explicada, em 1935¹²⁹, pelos físicos russos Landau e Evgenil Mikhailovich Lifshitz (1915-1985). Segundo esses físicos, a estrutura de um domínio é uma consequência natural de várias contribuições à energia (de troca, anisotropia e magnética) de um corpo ferromagnético¹³⁰.

Até aqui, vimos como o ferromagnetismo foi estudado tendo como base o *modelo de Heisenberg*, uma vez que o *modelo unidimensional de Ising* não se aplicava a esse fenômeno. Contudo, alguns físicos (dentre eles Pauli, em 1930, conforme dissemos) acreditavam que uma extensão desse modelo a duas ou três dimensões, certamente o explicaria. Com efeito, em 1936¹³¹, Peierls apresentou um argumento fenomenológico no qual sustentava que o modelo de Ising, bi e tridimensional, deveria exibir magnetização em baixas temperaturas¹³². Pois bem, o modelo de Ising em duas dimensões foi trabalhado pelos físicos, o holandês Hendrik Anthony Kramers (1894-1952) e Gregory Hugh Wannier, em 1941¹³³, ocasião em que determinaram exatamente a tempera-

tura Curie (T_C) desse modelo, numa rede quadrada. Partindo da idéia¹³⁴ de que a função de partição do modelo de Ising bidimensional poderia ser escrita como o maior valor de uma determinada matriz, eles conseguiram relacionar a função de partição em baixas e em altas temperaturas. No entanto, essa solução analítica não ficou completa por não conseguirem calcular o maior auto-valor da referida matriz. Desse modo, o modelo de Ising bidimensional continuava a ser um desafio¹³⁵.

Um grande passo para encontrar a solução do modelo de Ising foi dado pelo químico norueguês-norte-americano Lars Onsager (1903-1976; PNQ, 1968) quando, em 1944¹³⁶, resolveu exatamente esse modelo, para o caso bidimensional, e na ausência de um campo magnético externo. Posteriormente¹³⁷, outras soluções foram obtidas para o modelo de Ising em duas dimensões, porém, ainda sem campo externo. Contudo, esse mesmo modelo bidimensional (com campo externo aplicado, ou sua extensão em três dimensões, com ou sem campo externo), ainda não foram resolvidos exatamente. Foram obtidas apenas soluções aproximadas, usando-se, para isso, diferentes técnicas de cálculo, tais como: as expansões em série, Monte Carlo, Grupo de Renormalização, etc. Com isso, parâmetros importantes do modelo (por exemplo, a temperatura de transição) já foram conseguidos¹³⁸.

Em conclusão, é importante registrar que o tratamento matemático baseado, fundamentalmente, no estudo da interação de um sistema de muitos-corpos, e que foi utilizado para compreender as propriedades magnéticas da matéria, constituiu-se a "fábrica" da moderna teoria da Física da Matéria Condensada, que será tratada (juntamente com outros temas atuais da Física, inclusive o do Magnetismo Nuclear), na Crônica da Física Contemporânea.

Agradecimentos

Agradeço à CAPES/MEC pela parcial ajuda financeira e aos meus amigos Orlando José Carvalho de Moura, Luiz Sérgio Guimarães Cancela e Paulo de Tarso Santos Alencar, professores do Departamento de Física da Universidade Federal do Pará, pelas observações críticas feitas a este trabalho, e a minha mulher, Célia Coelho Bassalo, também professora da UFPA, pela leitura deste texto. Agradeço, também, ao Núcleo de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica

da UFPA, nas pessoas de meus amigos, os professores Carlos Alberto Dias, seu Diretor, e André Luiz Oliveira, seu Secretário-Executivo, pelo uso e ensino do editor de texto PCTEX, bem como pela impressão a laser deste texto. O seu conteúdo, contudo, é de minha inteira responsabilidade.

Notas e Referências Bibliográficas

1. BASSALO, J. M. F. 1992a. *A Crônica da Física do Estado Sólido: I. Do tubo de Geissler às Válvulas a Vácuo*. CCEN/DF - PPD001/92; 1992b. *A Crônica da Física do Estado Sólido: II. Teoria dos Metais*. CCEN/DF - PPD002/92; 1992c. *A Crônica da Física do Estado Sólido: III. Teoria de Bandas*. CCEN/DF - PPD004/92.
2. A relação entre fenômenos elétricos e magnéticos foi tratada por nós em: BASSALO, J. M. F. 1987. *Crônicas da Física*. Tomo 1. GEU/UFPA.
3. Essa versão se deve ao sábio romano Plínio, o Velho (23-79). Por sua vez, para o filósofo e poeta romano Tito Lucrécio Caro (c.95 - c.55), o nome *magnetismo* deriva do nome do local Magnésia. (BLEANEY, B. 1988. *ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA*. Macropaedia, Volume 18. The University of Chicago.)
4. GAMOW, G. 1963. *A Biografia da Física*. Zahar Editores; *ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA*. Micropaedia, Volume 9. The University of Chicago, 1988.
5. SANTOS, R. J. V. 1986. *Tese de Doutorado*. Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco, (mimeo).
6. O uso da bússola na navegação foi divulgado por vários cientistas e historiadores. Por exemplo, o naturalista alemão Alexander von Humboldt (1769-1859) afirmou que os chineses, no século III A.D., atravessaram o Oceano Índico com navios possuindo agulhas magnéticas. Por seu lado, outros historiadores (vide referência abaixo) afirmam que navegadores maometanos, por volta do século XI A.D., também a utilizaram em suas viagens pelo Mediterrâneo, fato esse que permitiu seu conhecimento aos Cruzados. Contudo, na Europa Cristã, a primeira referência sobre o uso da bússola na navegação aparece no livro *De Naturis Rerum*, publicado por volta de 1186, pelo erudito inglês Alexander Neckam (1157-1217). (SEDGWICK, W. T., TYLER, H. W. e BIGELOW, R. P. 1950. *História da Ciência*. Editora Globo; WHITTAKER, E. T. Sir 1951. *A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories*. Thomas Nelson and Sons Ltd.)
7. As propriedades da agulha magnética já haviam sido relatadas no livro *Compêndio das Técnicas Militares Importantes*, escrito pelo chinês Zeng Gong - Liang, em 1044. (NEEDHAM, J. 1973. *La Science Chinoise et l'Occident*. Editions du Seuil.)
8. LOSEE, J. 1979. *Introdução Histórica à Filosofia da Ciência*. Editora Itatiaia e Editora da Universidade de São Paulo (EDUSP); BASSALO (1987), op. cit.
9. SEDGWICK, TYLER e BIGELOW, op. cit.
10. GILBERT, W. 1971. *On the Loadstone and Magnetic Bodies*. THE GREAT BOOKS, Volume 28. *ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA*, INC. The University of Chicago.
11. DAMPIER, W. C. 1961. *Pequena História da Ciência*. IBRASA.
12. BASSALO (1987), op. cit.; SANTOS, op. cit.; WHITTAKER, op. cit.
13. Apesar de todas as observações de Gilbert sobre o magnetismo, ele acreditava que a magnetita tinha uma alma, sendo esta uma pequena parte da "alma da Terra". É interessante registrar que um antecessor de Gilbert, o cientista italiano Giambattista della Porta (1535 - 1615) apresentou uma visão poética sobre a relação magnetita e o Ferro. Com efeito, em seu *Magiae Naturalis* de 1558, escreveu: "... o ferro é atraído pela magnetita, como uma noiva para o quarto nupcial, para ser abraçada; e o ferro fica tão desejoso de se unir à magnetita como seu esposo, e é tão solícito de encontrá-la: quando é impedido pelo seu peso, ainda assim se levantará, como se estendesse as mãos a implorar pela magnetita ... e mostrar que não está contente com a sua condição: mas se de súbito ele alcança a magnetita, como se o seu desejo fosse satisfeito, ele então repousa ...". Apesar desse lirismo, Porta derrubou uma superstição entre os marinheiros de sua época, de que os mesmos não podiam comer cebola ou alho quando fossem trabalhar com a bússola, sob pena de destruir seus poderes de orientação. Ele simplesmente untou algumas bússolas com suco de cebola e alho, constatando que as mesmas não foram afetadas.

- (RIENSTRA, M. H. 1981. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 11. Charles Scribner's Sons; SANTOS, op. cit.)
14. Muito embora a *inclinação magnética* (ângulo que a agulha magnética faz com o plano horizontal) e a *declinação magnética* (ângulo entre os meridianos magnético e terrestre num dado local) houvessem sido descritas por Petrus Peregrinus e por Cristovão Colombo, foi o matemático e fabricante de instrumentos, o alemão Georg Hartmann (1489 - 1564) quem primeiro as mediu. Por exemplo, ele encontrou a inclinação magnética de Roma como sendo 6° , em 1544. Contudo, essa pesquisa permaneceu inédita até 1831. Em consequência disso, a autoria da descoberta da *inclinação magnética* é atribuída ao fabricante de instrumentos, o inglês Robert Norman, já que foi este o primeiro a divulgá-la ao mundo em seu livro *The Neue Attractive (Uma Nova Atraente)*, publicado em 1580. Por fim, em 1631, o astrônomo e matemático inglês Henry Gellibrand (1597 - 1636) descobriu que o campo magnético terrestre variava com o tempo, ao observar que tanto a declinação, quanto a inclinação magnéticas sofriam lentas modificações com o passar do tempo. (BERNAL, J. D. 1968. *Historia Social de la Ciencia*. Ediciones Península; GIBERT, A. 1982. *Origens Históricas da Física Moderna*. Fundação Calouste Gulbenkian; KISTNER, A. 1934. *Historia de la Física*. Editorial Labor, S. A.; RONAN, C. A. 1987. *História Ilustrada da Ciência*, Volume III. Jorge Zahar Editor; RITVO, L. B. 1981. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 6, op. cit.)
 15. SANTOS, op. cit.; WHITTAKER, op. cit.
 16. A *garrafa de Leyden* foi construída pelo matemático e físico holandês Pieter van Musschenbroek (1692 - 1761), professor da Universidade de Leyden, em 1745, com o objetivo de "engarrar" o *effluvium elétrico*. Assim, tampouco com uma rolha de cortiça uma garrafa de vidro comum, com suas partes internas e externas revestidas de uma delgada folha de prata, e encheu-a de água até a metade. Uma haste metálica atravessou a rolha e penetrou na água. Para engarrar o *effluvium*, utilizou o *gerador eletrostático* que havia sido construído pelo físico alemão Otto von Guericke (1602 - 1686), em 1663. Conta a história que Musschenbroek levou um tremendo choque ao segurar, ao mesmo tempo, a *garrafa* carregada e a haste metálica. (BASSALO (1987), op. cit.; SANTOS, op. cit.)
 17. Parece haver sido o Cardeal alemão Nicolau de Cusa (1401 - 1464) um dos primeiros a sugerir, em 1450, uma lei do tipo do inverso do quadrado da distância para representar a força entre pólos magnéticos. (WHITTAKER, op. cit.)
 18. WHITTAKER, op. cit.
 19. ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Micropædia, Volume 1. The University of Chicago, 1988; WHITTAKER, op. cit.
 20. A primeira idéia sobre um modelo de *dois fluidos elétricos* para explicar os fenômenos elétricos, foi apresentada pelo físico francês Charles François de Cisternay Dufay (1698 - 1739), em 1733, aos quais denominou de *eletricidade vítrea* e *eletricidade resinosa*. Mais tarde, em 1759 (*Phil. Trans. of Roy. Soc.*, 51: 340), o físico inglês Robert Symmer (c.1707 - 1763) retomou essa idéia ao observar que pares de meias de seda, de mulher, um branco e um preto, depois de serem vestidas em uma mesma perna e posteriormente retiradas, eram fortemente atraídas quando separadas a uma certa distância. Symmer concluiu, então, que todo corpo neutro tinha uma quantidade igual de cada um de dois fluidos elétricos de sinais opostos. Portanto, um corpo eletrizado teria excesso de um deles sobre o outro. Contudo, essa concepção de Symmer diferia da de Dufay, já que, para este, as duas eletricidades (*vítrea* e *resinosa*) não tinham sinais opostos. Symmer confirmou sua hipótese realizando experiências com *garrafas de Leyden*. (HEILBRON, J. L. 1981. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 13, op. cit.; WHITTAKER, op. cit.)
 21. KISTNER, op. cit.
 22. O matemático alemão Johann Friedrich Karl Gauss (1777 - 1855) incluiu a lei de Michell-Coulomb, referente às forças elétricas e magnéticas, junto com a gravitação num tratamento matemático geral da lei do inverso do quadrado da distância. Por outro lado, em 1830, desenvolveu sua teoria do campo magnético terrestre, pela qual considerou o pólo magnético norte (boreal) da Terra como situado no arquipélago chamado Passo do Noroeste. Esse pólo foi descoberto pelo oficial naval inglês Sir James Clark Ross (1800 - 1862) no dia 1º de junho de 1831, nas proximidades da costa ocidental da Boothia. (Muito embora Ross houvesse chegado perto do pólo magnético

- sul (austral), terrestre, em 1841, este só foi descoberto no dia 16 de janeiro de 1909, pelo geólogo inglês Sir Tannatt William Edgeworth David (1858 - 1934.) Voltemos a Gauss. Em 1832, demonstrou que algumas unidades físicas, como, por exemplo, o comprimento (milímetro - mm), a massa (miligrama - mg) e o tempo (segundo - s) poderiam ser escolhidas como fundamentais, já que essas unidades físicas deveriam ser preservadas e facilmente reproduzidas. Ainda nesse mesmo ano de 1832, Gauss foi o primeiro a formular um sistema de unidades magnéticas, a partir de unidades mecânicas. (Por proposta do físico escocês William Thomson (Lord Kelvin) (1824 - 1907), em 1871, esse sistema gaussiano passou a adotar as unidades: Centímetro, Grama, Segundo - o hoje famoso CGS. Nesse sistema, a unidade de indução magnética é o *gauss*. É um sistema de unidades caracterizado pelo aparecimento explícito da velocidade da luz (*c*) nas equações algébricas do eletromagnetismo.) Por fim, em 1837/1838, Gauss inventou o *magnetômetro unifilar* e o *bifilar*. (DAMPIER, op. cit.; GIBERT, op. cit.; KISTNER, op. cit.; WHITTAKER, op. cit.; ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. Micropaedia, Volumes 3 e 10. The University of Chicago, 1988.)
23. WHITTAKER, op. cit.
24. A busca dessa conexão já havia sido objeto de um prêmio proposto pela Academia Eleitoral da Bavaria, em 1774. (WHITTAKER, op. cit.)
25. A pilha voltaica recebeu esse nome em homenagem ao seu inventor, o físico italiano Alessandro Giuseppe Volta (1745-1827), em 1800. É oportuno registrar que Desormes construiu, entre 1801 e 1804, as primeiras pilhas secas, compostas de discos metálicos separados por uma pasta de sal. (MARTINS, R. A. 1986. *Cad. Hist. Fil. Ciênc.*, 10: 87; PAYEN, J. 1981. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 4, op. cit.; BASSALO (1987), op. cit.; WHITTAKER, op. cit.)
26. No início do século XIX, era hábito distinguir o estudo da *eletricidade estática* do estudo das correntes elétricas. Os primeiros estudos do movimento de cargas elétricas foram feitos pelo fisiologista italiano Luigi Galvani (1737-1798) ao observar, em 1786, que os músculos dissecados dos membros inferiores das rãs, quando penduradas em ganchos de cobre, retesavam-se, como se estivessem sob a ação de uma descarga elétrica. No entanto, Volta, em 1794, repetindo a experiência de Galvani, demonstrou que a corrente elétrica que provocava a contração das pernas das rãs, também aparecia quando dois metais, soldados um no outro, eram mergulhados em uma solução de sal e água. A esse fenômeno (que Galvani atribuía como decorrente de uma "eletricidade animal"), Volta chamou de *galvanismo*. Assim, o estudo da eletricidade dinâmica era feito sob o título geral de *galvanismo*. (BASSALO (1987), op. cit.; MARTINS, op. cit.; WHITTAKER, op. cit.)
27. Esse fato foi relatado por seu assistente C. Hansteen, em carta que escreveu a Faraday. É interessante registrar que o físico e historiador da ciência, o brasileiro Roberto de Andrade Martins (1950-) põe em dúvida a descrição feita por Hansteen sobre essa famosa experiência de Oersted. (MARTINS, op. cit.)
28. Antes, em 1802, o jurista italiano Gian Domenico Romagnosi (1761-1835) havia feito uma experiência na qual observou uma relação entre o fluido galvânico e o magnetismo, experiência relatada na *Gazetta di Trento*. Por essa razão, alguns historiadores da ciência o consideram como um precursor de Oersted. Contudo, tal afirmativa é questionável, conforme se pode ver no excelente artigo de Martins, op. cit.
29. OERSTED, H. C. 1820. *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magnetica*, Hafniae, Schultz; *Ann. Chim. Phys.*, 14(2): 417.
30. SANTOS, op. cit.
31. ARAGO, D. F. J. 1820. *Ann. Chim. Phys.*, 15(2): 93.
32. Em setembro de 1820, as comunicações apresentadas à Academia de Ciências de Paris sobre a descoberta de Oersted tiveram a seguinte seqüência: dias 4 e 11, Arago; dias 18 e 25, Ampère; dia 25, Arago. (MARTINS, op. cit.)
33. AMPÈRE, A. M. 1820a. *Ann. Chim. Phys.*, 15(2): 59; 1820b. *Ann. Chim. Phys.*, 15(2): 170.
34. Essa observação levou Ampère, em 1822, a defender a teoria de que o magnetismo natural era conseqüência de ser a substância magnética, no seu interior, composta de uma infinidade de correntes elétricas circulares diminutas (espiras). Dizia ainda Ampère que as substâncias não-magnéticas tinham essas espiras orientadas ao acaso, de modo

- que seu efeito líquido era nulo. Tais correntes ficaram mais tarde conhecidas como *correntes amperianas*. Sobre a natureza dessas correntes, o físico francês Augustin-Jean Fresnel (1788-1827), em carta escrita a Ampère, sugeriu que as mesmas deveriam ser de dimensões moleculares e não macroscópicas. O esclarecimento da natureza das correntes amperianas só ocorreu cerca de 100 anos depois, como o advento da teoria atômica do átomo, conforme veremos mais adiante. (MEHRA, J. and RECHENBERG, H. 1982. *The Historical Development of Quantum Theory*, Volume 1, Parts 1,2. Springer-Verlag; BASSALO (1987), op. cit.; MARTINS, op. cit.)
35. No prosseguimento de suas pesquisas, Ampère realizou outras experiências nas quais, por exemplo, estabeleceu a ação do campo magnético terrestre sobre as correntes elétricas. Para medir essas correntes, construiu um aparelho baseado na deflexão da agulha magnética, denominando-o *galvanômetro*, em homenagem a Galvani. Por outro lado, para indicar a direção que tomaria uma agulha imantada colocada nas proximidades de um fio condutor, Ampère idealizou uma regra - a hoje conhecida *regra da mão direita de Ampère* - segundo a qual a deflexão da agulha tomaria a direção dos dedos dobrados da mão direita, quando esta segurasse o fio condutor, desde que mantivesse o polegar na direção da corrente elétrica. As pesquisas de Ampère foram reunidas em uma *Memória* intitulada *Mémoire sur la Théorie Mathématique des Phénomènes Electrodynamique Uniquement Déduite de l'Expérience* (*Memória sobre a Teoria Matemática dos Fenômenos Eletrodinâmicos Unicamente Deduzida da Experiência*, publicada em 1825 (*Mém. Acad. Roy. Scienc. Inst. France*, 6: 175) e transformada em livro, em 1827. (BASSALO (1987), op. cit.; MARTINS, op. cit.)
36. BIOT, J. B. et SAVART, F. 1820. *Ann. Chim. Phys.*, 15: 222. (Veja-se excerto deste trabalho em: MAGIE, W. F. (Editor) 1935. *A Source Book in Physics*. McGraw Hill Book Company, Inc.)
37. MAGIE, op. cit.
38. WHITTAKER, op. cit.
39. A idéia de Davy-Berzelius também foi proposta, independentemente, tanto pelo físico alemão Johann Salomo Christoph Schweigger (1779-1857) - o inventor do *Multiplicador* (*Galvanômetro de bobina fixa*), em 1820 - assim como por J. J. Prechtl, por volta de 1821. (É oportuno registrar que o físico alemão Johann Christian Poggendorf (1796-1877) inventou, independentemente de Schweigger, o *galvanômetro*, ainda em 1820. Registre-se, também, que Schweigger opunha-se à idéia do campo magnético circular proposto por Oersted-Ampère-Biot-Savart, pois, se isso fosse verdade, um pólo magnético seria empurrado continuamente e seria levado a dar voltas em torno do fio condutor, sem parar. Como à época não se sabia que havia consumo de energia elétrica na bateria galvânica, pensou-se, desse modo, que a corrente elétrica percorrendo um circuito poderia produzir um *moto contínuo de primeira espécie*, o que não era aceitável pelo bom senso. O *princípio da conservação da energia* só foi formulado em 1845.) (ASIMOV, I. 1984. *The History of Physics*. Walker and Company; CANEVA, K. L. 1981. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 12, op. cit.; MARTINS, op. cit.)
40. MARTINS, op. cit.
41. FARADAY, M. 1971. *Experimental Researches in Electricity*. GREAT BOOKS OF THE WESTERN WORLD, Volume 45. Encyclopaedia Britannica, Inc.
42. Nesse livro há uma outra explicação de uma experiência realizada por Arago, em 1825, segundo a qual um disco de cobre em rotação era capaz de afetar uma agulha magnética colocada em suas proximidades. Com efeito, enquanto Arago atribuía o *magnetismo de rotação* como sendo responsável por esse efeito, Faraday o considerava como sendo devido a correntes elétricas induzidas no disco. Sua demonstração matemática foi apresentada pelo físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) em seu livro *Treatise on Electricity and Magnetism* (*Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo*), editado em 1873. (BASSALO (1987), op. cit.)
43. Ainda em 1820 (*Ann. of Philos.*, 16: 375), Oersted realizou novas experiências nas quais analisou, de modo apenas qualitativo, que a lei da ação e reação newtoniana permanecia válida para a interação entre o fio condutor e o ímã. (MARTINS, op. cit.)
44. OERSTED, H. C. 1823. *Ann. Chim. Phys.*, 22(2): 201.
45. MARTINS, op. cit.

46. BERNAL, J. D. 1968. *Historia Social de la Ciencia*. Ediciones Península.
47. Esclareça-se que dez anos antes, Ampère havia observado o mesmo fenômeno, mas não lhe concedeu a devida atenção. Antes de Faraday, em 1830, o físico norte-americano Joseph Henry (1797-1878) fizera uma observação análoga desse mesmo fenômeno. Em 1831, Faraday estudou essas experiências de Henry. Por sua vez, em 1834, o físico russo Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804-1865) chegou às mesmas descobertas de Faraday e Henry, utilizando o princípio da ação e reação em seu estudo sobre as ações mecânicas entre os circuitos. Por fim, a formulação matemática da lei de Faraday-Henry-Lenz foi apresentada pelo físico alemão Franz Ernst Neumann (1798-1895), num período compreendido entre 1845 e 1847. (WILLIAMS, L. P. 1981. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 4, op. cit.; ASIMOV, op. cit.; BASSALO (1987), op. cit.)
48. Segundo esse argumento, parece que Faraday rejeitara a idéia de átomos (SANTOS, op. cit.). Contudo, em 1844, em artigo intitulado *Speculation Touching Electrical Conduction and the Nature of Matter (Especulação sobre Condução Elétrica e a Natureza da Matéria)*, Faraday utilizou a teoria atômica proposta pelo físico, matemático e astrônomo italiano Roger Joseph Boscovich (1711-1787), em 1758, para explicar a condução e a não-condução da eletricidade através de corpos materiais. (Para Boscovich, o átomo se comportava como o centro de forças que variavam com a distância ao seu centro, sendo repulsivas ou atrativas, conforme essa distância fosse pequena ou grande, respectivamente.) (BASSALO, J. M. F. 1992. *Crônicas da Física*, Tomo 3. EDUFPA; WILLIAMS, op. cit.)
49. As primeiras noções sobre linhas de força foram apresentadas por Faraday em um artigo publicado no *Quarterly Journal of Science*, de 21 de outubro de 1821. Ressalte-se que nesse mesmo artigo, registrou também experiências nas quais há conversão de energia elétrica em energia mecânica. Mais tarde, em 1831, Faraday inventaria o *dinamo*, uma pequena máquina que poderia converter força mecânica em força elétrica. (WILLIAMS, op. cit.)
50. BASSALO (1987), op. cit.; BERNAL, op. cit.; SANTOS, op. cit.; WILLIAMS, op. cit.
51. WILLIAMS, op. cit.
52. SANTOS, op. cit.; WILLIAMS, op. cit.
53. WILLIAMS, op. cit.
54. WILLIAMS, op. cit.
55. Esse trabalho de Maxwell foi posteriormente publicado pela Sociedade Filosófica de Cambridge, em 1864. (*Trans. Camb. Phil. Soc.*, 10: 27.) É interessante registrar que as primeiras idéias de Maxwell sobre a teoria eletromagnética que desenvolveu posteriormente, ele as apresentou em cartas escritas a William Thomson, publicadas pelo físico e matemático inglês Joseph J. Larmor (1857-1942), em 1936. (*Proc. Camb. Phil. Soc.: Math. Phys. Scienc.*, 32: 695.) (EVERITT, C. W. F. 1981. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 9, op. cit.; WHITTAKER, op. cit.)
56. Thomson reuniu seus estudos sobre o magnetismo no livro *Mathematical Theory of Magnetism (Teoria Matemática do Magnetismo)*, publicado em 1851. (EVERITT, op. cit.)
57. EVERITT, op. cit.; SANTOS, op. cit.; WHITTAKER, op. cit.
58. A idéia de que a luz decorria da vibração do *éter luminífero* já havia sido considerada por Descartes, por não admitir a idéia de ação à distância, característica da ação gravitacional. Esse *éter* foi defendido por Huygens em sua *Teoria Ondulatória da Luz*, formulada em 1690, e por Newton em sua *Teoria Corpuscular da Luz*, apresentada em 1704. No entanto, quando a condição de transversabilidade da onda luminosa foi demonstrada por Fresnel, em 1819, tornou-se mais difícil a defesa do *éter luminífero*, pois ele exigia propriedades bem estranhas, como o de ser elástico e ter densidade finita, o que deveria, portanto, provocar alterações nas órbitas dos planetas. Como tais alterações não haviam sido observadas, várias teorias desse *éter* foram então formuladas, inclusive a do próprio Maxwell que, contudo, não usou o termo *éter luminífero* e sim *meio luminífero*. O modelo do *éter luminífero* foi a grande teoria da Física da segunda metade do século XIX e parecia que ela havia sido banida do cenário científico com a *Relatividade Restrita de Einstein*, de 1905. Contudo, a idéia de um *neoéter* está sendo considerada no âmbito da *Teoria da Relatividade Estendida* e que será objeto de estudo em

- nossa próxima *Crônica da Física Contemporânea*. Mais detalhes sobre a teoria do éter do século passado, veja-se: WHITTAKER, op. cit.
59. Além da referência BASSALO (1987), op. cit., o leitor encontrará novos aspectos da História do Eletromagnetismo em EVERITT, op. cit. e, principalmente, em WHITTAKER, op. cit.
60. WEBER, W. E. 1847. *Leipzig Berichte*, 1: 346.
61. Usando o modelo de fluidos magnéticos, o matemático francês Siméon-Denis Poisson (1781-1842), em 1824 (*Mem. de l'Acad.*, 5: 247), havia demonstrado como calcular a intensidade do campo magnético em um ponto do exterior de um corpo magnético, caracterizado por um ente (I), chamado de *magnetização*, e que, mais tarde, foi visto tratar-se de um vetor. Para Poisson, o corpo magnético se comportava como constituído de distribuições superficial e volumétrica de magnetismo. Para explicar o magnetismo temporariamente induzido no ferro doce, e em outros metais magnetizáveis, Poisson considerou que em tais corpos há um grande número de pequenas esferas, que são perfeitamente condutoras para os fluidos magnéticos, de modo que a intensidade magnética resultante no interior de cada uma delas é nula. Quando um desses corpos é colocado sob a ação de um campo externo magnetizante, este deve induzir um magnetismo no interior do mesmo. A explicação ficou conhecida como *lei do magnetismo induzido de Poisson*. (WHITTAKER, op. cit.)
62. A *lei de Lenz*, obtida em 1834, conforme nota (47), significa que a corrente de auto-indução tem sentido contrário àquela que a criou, isto é, os efeitos de uma corrente induzida por forças eletromagnéticas sempre se opõem a essas mesmas forças. (BASSALO (1987), op. cit.)
63. WHITTAKER, E. Sir 1953. *A History of the Theories of Aether and Electricity. The Modern Theories: 1900-1926*. Thomas Nelson and Sons, Ltd.; WHITTAKER (1951), op. cit.
64. WEBER, W. E. 1852. *Ann. der Phys.*, 87: 145.
65. WHITTAKER (1951), op. cit.
66. O fenômeno da *termoelectricidade* foi descoberto pelo físico russo-alemão Thomas Johann Seebeck (1770-1831), em 1821, ao observar que uma agulha magnética sofria uma deflexão quando colocada nas proximidades da junção de dois condutores, um de cobre e um de bismuto, desde que houvesse entre eles uma diferença de temperatura. O fenômeno inverso do *efeito Seebeck* foi observado pelo físico francês Jean-Charles-Athanase Peltier (1785-1845), em 1834, ao constatar que uma junção de dois metais se tornava mais quente quando era percorrida por uma corrente elétrica em um certo sentido, e se esfriava, se fosse em sentido contrário a este. (BASSALO (1987), op. cit.)
67. EWING, J. A. 1881. *Proc. Roy. Soc.*, 33: 21.
68. O "atraso" entre a aplicação de uma força e o seu efeito, em alguns processos físicos, já era conhecido desde 1866 pelo físico alemão Rudolph Hermann Arndt Kohlrausch (1809-1858) que, inclusive, inventou a seguinte expressão: *elastische Nachwirkung*. (DOSTROVSKY, S. 1981. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 4, op. cit.)
69. WARBURG, E. G. 1881. *Ann. der Phys. und Chem.*, 13: 141.
70. RAMSER, H. 1981. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 13, op. cit.
71. WEBER, W. E. 1872. *Phil. Mag.*, 48: 1.
72. WHITTAKER (1951), op. cit.
73. CURIE, P. 1895. *Ann. Chim. Phys.*, 5: 289. (Este trabalho é uma parte de sua tese de doutoramento. (WYART, J. 1981. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 3, op. cit.))
74. A *suscetibilidade magnética* χ é a relação entre a *Magnetização* \vec{M} e com o *campo magnético* \vec{H} , através de: $\vec{M} = \chi\vec{H}$. Ela é positiva para substâncias paramagnéticas e negativa para diamagnéticas. Ela foi introduzida por William Thomson em seus trabalhos sobre magnetismo realizados entre 1847 e 1851. Aliás, é interessante observar que Thomson distinguiu os dois vetores \vec{B} e \vec{H} , para os quais chamou de *força magnética de acordo com a definição eletromagnética*, e *força magnética de acordo com a definição polar*, respectivamente. Contudo, foi Maxwell quem denominou de *indução magnética* \vec{B} e *força magnética* \vec{H} . A relação entre \vec{B} e \vec{H} , através da expressão $\vec{B} = \mu\vec{H}$, foi também proposta por Thomson, sendo μ denominado de *permeabilidade magnética*. Mais tarde, foi visto que esses vetores são de dois tipos distintos: \vec{B} é *solenoidal* ($\nabla \cdot \vec{B} = 0$) e \vec{H} é *irrotacional* ($\nabla \times \vec{H} = 0$). (WHITTAKER (1951), op. cit.)

75. As substâncias ferromagnéticas usadas por Curie foram: ferro, níquel, magnetita, ferro fundido; as paramagnéticas foram: oxigênio, paládio e sulfato de ferro; e as diamagnéticas foram: água, sal de rocha, cloreto de potássio, sulfato de potássio, nitrato de potássio, quartzo, enxofre, selênio, telúrio, iodo, fósforo, antimônio e bismuto. (SANTOS, op. cit.; WHITTAKER (1951, 1953), op. cit.; WYART, op. cit.)
76. A idéia de que o *elétron* fazia parte do átomo (conforme o físico inglês George Johnstone Stoney (1826-1911) havia indicado em 1891, inclusive calculando o valor mínimo de sua carga elétrica), teve seu grande momento quando o físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902), através de sua famosa *teoria dos elétrons*, apresentada em 1892, explicou alguns fenômenos físicos até então incompreendidos como, por exemplo, a *dispersão da luz*, segundo a qual o índice de refração de uma substância depende da frequência da luz que a atravessa. Com essa teoria, Lorentz conseguiu prever um novo fenômeno físico que representa a decomposição de uma linha espectral de uma substância na presença de um campo magnético externo, e que foi observado experimentalmente por seu discípulo, o físico holandês Pieter Zeemann (1865-1943; PNF, 1902), em 1896. A existência *real* desses *elétrons* foi comprovada na célebre experiência do físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906), realizada em 1897, na qual, inclusive, determinou a relação entre a carga (e) e a massa (m) dessa partícula. Ainda em 1897, Larmor demonstrou que o efeito de um campo magnético externo sobre elétrons em órbitas circulares, era o de superpor à frequência própria de rotação, uma frequência precessional em torno do campo externo H - a famosa *frequência de Larmor*: $eH/(4\pi mc)$, onde c é a velocidade da luz no vácuo. (BASSALO (1987, 1990), op. cit.)
77. VOIGT, W. 1901. *Gött. Nach.*, 169; 1902. *Ann. der Phys.*, 9: 115.
78. THOMSON, J. J. 1903. *Phil. Mag.*, 6: 673.
79. WHITTAKER (1953), op. cit.
80. LANGEVIN, P. 1905a. *J. Phys. (Paris)*, 4: 678; 1905b. *Ann. Chim. Phys.*, 5: 70.
81. É importante observar que essa atitude de Langevin foi puramente o resultado de sua intuição pois, caso ele fizesse um cálculo rigoroso do momento magnético, cálculo baseado na teoria clássica lorentziana dos elétrons, isto é, se ele expressisse o momento magnético atômico ou molecular como função das coordenadas e das velocidades dos elétrons que o compõem, ele chegaria a um resultado nulo, indicando que o paramagnetismo é incompatível com a Mecânica e o Eletromagnetismo clássicos. Aliás, esse cálculo foi feito pela primeira vez pelo físico dinamarquês Niels Henrik Bohr (1885-1963; PNF, 1922), em sua tese de doutoramento, em 1911. (ABRAGAM, A. 1983. *Réflexions d'un Physicien*. Hermann; VAN VLECK, J. H. 1978. *Rev. Mod. Phys.*, 50 (2): 181.)
82. Esse tipo de distribuição foi proposto pelo físico austriaco Ludwig Edward Boltzmann (1844-1906), em 1868, ao generalizar a fórmula da distribuição de velocidades das moléculas constituintes de um gás, que Maxwell havia apresentado em 1860. Basicamente, Boltzmann considerou colisões binárias e não-correlacionadas entre aquelas moléculas. (BASSALO (1992), op. cit.; SALINAS, S. R. A. 1982. *Cad. Hist. Fil. Ciênc.*, 3: 28.)
83. Usando esse mesmo argumento de Langevin, o físico e químico holandês Petrus Joseph Wilhelm Debye (1884-1966; PNQ, 1936), em 1912 (*Phys. Zeits.*, 13: 97) demonstrou que a constante dielétrica dos materiais dielétricos (isolantes elétricos) depende da temperatura. (LEITE LOPES, J. 1992. *A Estrutura Quântica da Matéria: Do átomo pré-socrático às partículas elementares*. Editora UFRJ e ERCA, Editora e Gráfica; SMYTH, C. P. 1981. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 3, op. cit.)
84. KITTEL, C. 1971. *Introduction to Solid State Physics*. John Wiley and Sons, Inc.; VAN VLECK, op. cit.
85. A exceção apresentada pelo bismuto (uma substância metálica diamagnética), cuja suscetibilidade diamagnética diminuiu linearmente com o aumento da temperatura, foi explicada por Langevin e, também, por J. J. Thomson, como sendo devido à presença de elétrons-livres de condução. (O modelo de elétrons-livres para explicar as propriedades de um metal havia sido proposto pelos físicos alemães Carl Victor Edward Riecke (1845-1915), em 1898, e por Paul Karl Ludwig Drude (1863-1906), em 1900, e pelo próprio Thomson, também em 1900.) (BASSALO (1992b), op. cit.; WHITTAKER (1953), op. cit.)

86. WEISS, P. 1907. *J. Phys.*, 6: 661.
87. SANTOS, op. cit.; VAN VLECK, op. cit.
88. Esse nome foi dado por Weiss e pelo físico holandês Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926; PNF, 1913) em 1910 (*Comm. Phys. Labor. Leiden*, 114: 3). (WHITTAKER (1953), op. cit.)
89. Em 1919, uma aluna de Lorentz, a física holandesa Hendrika Johanna van Leeuwen demonstrou (em sua tese de doutoramento e usando um processo ligeiramente diferente do de Bohr), o mesmo cancelamento. Nessa tese, observou ainda que o sucesso do modelo de Langevin-Weiss, decorria do fato de que esses físicos aplicaram idéias de caráter quântico à Estatística Clássica. Com efeito, em 1911 (*J. de Phys.*, 1: 990), Weiss havia feito uma consideração quântica para explicar as propriedades magnéticas da matéria, ao admitir que a magnetização máxima de uma substância ferromagnética poderia ser expressa como múltiplos inteiros de um *Grammagnetron* μ_W . Mais tarde, em 1920 (*Phys. Zs.*, 21: 615), o físico austríaco Wolfgang Pauli Jr. (1900-1958; PNF, 1945) introduziu, pela primeira vez, a unidade fundamental do momento magnético de um elétron numa órbita de Bohr, e dada por: $\mu_B = e h N/4 \pi$, onde h é a constante de Planck. A essa unidade, Pauli denominou de *magnetron de Bohr* e que valia cerca de 5 vezes o *magnetron de Weiss*. (MEHRA and RECHENBERG, op. cit.; VAN VLECK, op. cit.; WHITTAKER (1953), op. cit.)
90. RICHARDSON, O. W. 1908. *Phys. Rev.*, 26: 248.
91. BARNETT, S. J. 1909. *Science*, 30: 413.
92. Maxwell, em seu *Tratado*, havia também idealizado uma experiência pela qual poderia produzir *magnetismo de rotação*, chegando a desenhar, em 1861, um aparelho para esse propósito. Por sua vez, a idéia de produzir *magnetismo de rotação*, no contexto do magnetismo terrestre, foi apresentada pelo físico alemão Sir Arthur Schuster (1851-1934), em 1901/1912. (MEHRA and RECHENBERG, op. cit., WHITTAKER (1953), op. cit.)
93. EINSTEIN, A. und DE HAAS, W. J. 1915. *Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.*, 17: 152.
94. De acordo com o Eletromagnetismo Clássico, o momento magnético de um elétron orbital é dado por: $|\vec{\mu}| = e \nu A$, onde ν é a frequência de oscilação do elétron, e a sua carga elétrica e A a área de sua órbita. Por outro lado, segundo a Mecânica Clássica, o momento angular do elétron na órbita é dado por: $|\vec{L}| = 2 m e A$, onde m é a massa do elétron. Portanto: $|\vec{L}| / |\vec{\mu}| = 2 m/e$. (JACKSON, J. D. 1975. *Classical Electrodynamics*. John Wiley and Sons.)
95. Maiores detalhes sobre essa questão polêmica vejam-se: MEHRA and RECHENBERG, op. cit.; e WHITTAKER (1953), op. cit.
96. O próprio Lenz, em 1920 (*Phys. Z. 21*: 613), havia esboçado algumas idéias sobre esse modelo. (HODDESON, L., BAYM, G. and ECKERT, M. 1987. *Rev. Mod. Phys.*, 59: 287.)
97. ISING, E. 1925. *Z. Phys.*, 31: 253.
98. SANTOS, op. cit.
99. PAULI, W. 1920. *Z. Phys.*, 2: 201.
100. PAULI, W. 1927. *Z. Phys.*, 41: 81.
101. O conceito de *spin* do elétron foi introduzido pelos físicos holandeses George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) e Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978), em 1925, com o propósito de explicar alguns aspectos experimentais observados nos espectros moleculares. (BASSALO, J. M. F. 1990. *Crônicas da Física*. Tomo 2. GEU/UFGA.)
102. Sobre a *estatística de Fermi-Dirac*, veja-se BASSALO (1992a), op. cit.
103. Esse princípio afirma que: -"Dois elétrons em um campo de força central nunca podem estar em estados de energia de ligação com os mesmos números quânticos". (BASSALO (1990), (1992b), op. cit.)
104. A *superfície de Fermi* é aquela definida pelos vetores \vec{k} a energia de Fermi ϵ_F é constante. Por sua vez, ϵ_F significa a energia mais alta, em que no zero absoluto ($T = 0$), o elétron pode ocupar em sua distribuição orbital. (ZIMAN, J. M. 1972. *Principles of the Theory of Solids*. Cambridge University Press; KITTEL, op. cit.)
105. HODDESON, BAYM and ECKERT, op. cit.
106. Em 1927 (*Nature*, 20: 30), o físico norte-americano John Hasbrouck van Vleck (1899-1980; PNF, 1977) fez um estudo geral sobre a suscetibilidade magnética de moléculas (em particular, trabalhou com a molécula NO), estudo no qual usou a teoria quântica perturbativa em segunda

ordem. A expressão que obteve foi a seguinte:

$$\chi = -(Ne^2/6mc^2) \Sigma \bar{\mu}^2 + 2N \Sigma | \langle s | u_z | 0 \rangle |^2 / (E_s - E_o),$$

onde $\langle s | u_z | 0 \rangle$ é o elemento de matriz da componente z do momento magnético orbital $\bar{\mu}$, conectando o estado fundamental $\langle 0 |$ ao estado excitado $\langle s |$, com E_s e E_o seus respectivos estados de energia. O material será dia ou paramagnético dependendo se o segundo termo - chamado *paramagnetismo de van Vleck* - for menor ou maior do que o primeiro. (É oportuno dizer que a Mecânica Quântica foi desenvolvida entre 1925 e 1927.) (KITTEL, op. cit.; VAN VLECK, op. cit.; WHITTAKER (1953), op. cit.; ZIMAN, op. cit.)

107. BITTER, F. 1930. *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, 16: 95.

108. LANDAU, L. D. 1930. *Z. Phys.*, 64: 629.

109. Em 1931, o físico húngaro-norte-americano Edward Teller (1908-) também estudou o diamagnetismo de elétrons livres sob o ponto de vista quanto-mecânico (*Z. Phys.*, 67: 311). (HODDESON, BAYM and ECKERT, op. cit.; VAN VLECK, op. cit.)

110. Essa experiência foi realizada no final de 1930 (*Comm. K. Onnes Lab., Univ. Leiden*, 212a: 1106). Esses físicos usaram cristais de bismuto que haviam sido crescidos por L. V. Shubnikov enquanto trabalhava com de Haas, em Leiden, entre 1926 e 1930. Nessa ocasião, de Haas e Shubnikov, fizeram a primeira observação da mudança periódica da resistividade do bismuto como função do campo magnético e em baixas temperaturas, observação hoje conhecida como *efeito de Haas-Shubnikov*. (PRINS, J. A. 1981. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 5, op. cit.; HODDESON, BAYM and ECKERT, op. cit.; ZIMAN, op. cit.)

111. PEIERLS, R. E. 1932. *Z. Phys.*, 33: 864.

112. PEIERLS, R. E. 1933a. *Z. Phys.*, 80: 763; 1933b. *Z. Phys.*, 81: 186.

113. HODDESON, BAYM and ECKERT, op. cit.

114. HEISENBERG, W. K. 1928. *Z. Phys.*, 49: 619.

115. SANTOS, op. cit.

116. É interessante observar que Heisenberg já havia esboçado esse modelo desde 1926. Porém, ele tinha dificuldade em calcular a energia de

um sistema de muitos spins em termos da interação de troca, pois não conhecia a Teoria de Grupos, importante para a realização desse cálculo. Nesse meio tempo, os físicos, o húngaro-norte-americano Eugene Paul Wigner (1902- ; PNF, 1963), e os alemães Walter Heitler (1904-1981), Fritz Wolfgang London (1900-1954), Friedrich Hermann Hund (1896- ?) e Hermann Weyl (1885-1955) (este, também matemático), independentemente, utilizaram essa teoria (em especial, as representações do Grupo de Permutações) em seus trabalhos sobre espectros atômicos e moleculares. Por exemplo, Heitler e London apresentaram, pela primeira vez, em 1927 (*Z. Phys.*, 44: 455,) a teoria das ligações químicas de átomos idênticos, na qual consideraram a troca de elétrons de valência entre dois átomos quaisquer de uma rede (*lattice*). Assim, usando a *integral de troca da teoria de Heitler-London*, Heisenberg calculou a energia de troca que tende a alinhar os spins, usando, para isso, os caracteres do grupo de representações e, também, a distribuição Gaussiana para incluir as flutuações nos níveis de energia eletrônicos. Contudo, a célebre Hamiltoniana que caracteriza o ferromagnetismo, qual seja: $H = \Sigma J_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j$, onde J_{ij} é a *integral de troca* (cuja expressão pode ser vista em ZIMAN, op. cit.) e \vec{S}_i é o operador de spin total no átomo *rede i* da rede só foi obtida por Dirac em 1929 (*Proc. Roy. Soc., London*, 123A: 714). (Aliás, nesse trabalho, Dirac apresenta as famosas funções de onda antissimétricas, na forma de um determinante, para um sistema de muitos-elétrons.) (HODDESON, BAYM and ECKERT, op. cit.)

117. BLOCH, F. 1929. *Z. Phys.*, 57: 545.

118. HODDESON, BAYM and ECKERT, op. cit.

119. Na tentativa de entender o método do *campo auto-consistente* desenvolvido pelos físicos, o inglês Douglas Rayner Hartree (1897-1958), em 1928, e o russo Valdimir Aleksandrovich Fock (1898-1974), em 1930, o físico norte-americano John Clarke Slater (1900-1976) usou as funções de onda antissimétricas (na forma de determinante) obtida por Dirac, em 1929, e construiu, ainda em 1930, as funções de onda para um sistema de muitos-elétrons, nas quais incluía os spins orbitais desses elétrons. Desse modo, verificou que seu método apresentava melhores resultados do que o *método de Hartree-Fock*. O *método de Slater* mostrou-se mais simples que o *método da teoria de grupo*, conforme verificaram os físicos que

- estavam aplicando a Mecânica Quântica à Física Atômica Espectral e à Física do Estado Sólido. (HODDESON, BAYER and ECKERT, op. cit.)
120. BLOCH, F. 1930. *Leipziger Vorträge 1930: Elektronen-Interferenzen*: 67.
121. A descoberta das ondas de spin (cujo quantum se denomina magnon) foi feita simultânea e independentemente por Slater, em seu estudo sobre coesão de metais. Contudo, foi Bloch quem as utilizou no ferromagnetismo (HODDESON, BAYM and ECKERT, op. cit.) Para alguns detalhes sobre magnons, veja-se: OLIVEIRA, A. G. 1970. *Suscetibilidade Paralela de Magnons*. Tese de Mestrado, DFPUC/RJ; KITTEL, op. cit.; ZIMAN, op. cit.
122. HODDESON, BAYM and ECKERT, op. cit.; KITTEL, op. cit.; ZIMAN, op. cit.
123. BETHE, H. A. 1931. *Z. Phys.*, 71: 205.
124. HODDESON, BAYM and ECKERT, op. cit.
125. NÉEL, L. E. F. 1932. *Ann. Phys.*, (Paris), 17: 64.
126. NÉEL, L. E. F. 1948. *Ann. Phys.*, (Paris), 3: 137.
127. A fórmula química usual de um ferrite é: $MO.Fe_3O_3$, onde o cation divalente M pode ser: Zn, Cd, Fe, Ni, Cu, Co ou Mg. Os ferrites são cristais que têm pequena condutividade elétrica comparada aos materiais ferromagnéticos, razão pela qual eles são usados em situações envolvendo alta-freqüência, porque esses materiais são imunes a correntes de fuga (*stray currents*). (EISBERG, R. and RESNICK, R. 1974. *Quantum Physics*, John Wiley and Sons; WEBER, R. L. 1980. *Pionners of Science: Nobel Prize Winners in Physics*. The Institute of Physics, Bristol and London; KITTEL, op. cit.)
128. BLOCH, F. 1932. *Z. Phys.* 74: 295.
129. LANDAU, L. and LIFSHITZ, E. M. 1935. *Phys. Z. Sowjetsunion*, 8: 153.
130. HODDESON, BAYM and ECKERT, op. cit.; KITTEL, op. cit.; VAN VLECK, op. cit.
131. PEIERLS, R. E. 1936. *Proc. Cambr. Phil. Soc.*, 32: 477.
132. SANTOS, op. cit.
133. KRAMERS, H. A. and WANNIER, G. H. 1941. *Phys. Rev.*, 60: 252.
134. Essa idéia havia sido apresentada por E. W. MONTROLL (*J. Chem. Phys.*, 9: 706 (1941); 10: 61 (1942)).
135. CASIMIR, H. B. G. 1981. IN: *Dictionary of Scientific Biography*, Volume 7, op. cit.; SANTOS, op. cit.
136. ONSAGER, L. 1944. *Phys. Rev.*, 65: 177.
137. KAFMAN, B. *Phys. Rev.*, 76: 1232.
138. SANTOS, op. cit.