



# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

[www.bassalo.com.br](http://www.bassalo.com.br)



## Propriedades Magnéticas Clássicas da Matéria: Para, Dia e Ferromagnetismo.

Parece haver sido o filósofo grego Tales de Mileto (624-546), no ano 600 a.C., o primeiro a fazer observações sobre o fenômeno *magnético* quando notou que certas pedras existentes na Tessália (uma província grega, depois denominada de Magnésia), apresentavam a propriedade de atrair pedaços de ferro (Fe). Essas pedras, que passaram a ser conhecidas como *magnetita* ou *ímã (natural) magnético* (*ἡθος Μαγνήτις*), são hoje quimicamente reconhecidas como constituídas de óxido de ferro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Essa propriedade de a *magnetita* atrair pedaços de ferro também foi mencionada pelos filósofos gregos Diógenes de Apolônia [floresceu cerca (f.c.) Século 5 a.C.] (que defendia a tese de que a magnetita possuía uma “alma”, bem como explicou essa atração, dizendo que: - *A secura existente na magnetita se saciava na umidade existente no ferro*); Anaxágoras de Clazômenas (c.500-c.428); Sócrates de Atenas (c.470-399); Platão de Atenas (c.427-c.347); e pelos romanos, o poeta Tito Lucrécio Caro (c.95-c.55) e o sábio Plínio, o Velho (23-79). No entanto, sobre o termo *magnetismo*, há uma controvérsia. Plínio afirmou que o mesmo derivou do nome de um pastor de ovelhas, o grego Magnes, que ficou surpreso ao observar que a ponta de ferro de seu cajado, assim como os pregos também de ferro de sua sandália, eram atraídos por certas pedras que se encontravam ao longo de seu pastoreio, pela Tessália. Por sua vez, para Lucrécio, tal termo veio do nome do local Magnésia.

É interessante registrar que existe uma outra versão sobre o conhecimento da propriedade de atração da magnética muito antes dos gregos da Antiguidade. Segundo essa versão, os chineses, que viveram entre 2367 e 1100 a.C., além de já terem conhecimento daquela atração, usavam-na como bússola para orientar suas viagens, quer terrestres, quer marítimas. No entanto, parece que a primeira referência clara sobre o uso da magnetita como bússola, pelos chineses, data de 215 a.C. [W. T. Sedgwick, H. W. Tyler e R. P. Bigelow, *História da Ciência* (Editora Globo, 1950); Sir Edmund Taylor Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories* (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1951)].

O *ímã natural* foi sistematicamente estudado pelo erudito e engenheiro francês Petrus Peregrinus de Maricourt (c.1240-c.1270/1290), em carta intitulada *De Magnete* escrita a um amigo, em 1269, relatando suas experiências com a agulha magnética. Entediado por estar tomando conta de um sítio de uma cidade italiana pelo exército de Luís IX (1214-1270), do qual era engenheiro, Peregrinus começou a realizar experiências com a agulha magnética, já que, por volta de 1200, os europeus começaram a usá-la na orientação de suas viagens. Nessas experiências, observou também que os polos de mesmo sinal se repelem e de sinais contrários se atraem e, mais ainda, que quando limalhas de ferro eram colocadas em um pedaço de papel sob o qual se encontrava um ímã, tais limalhas se orientavam em direções determinadas e em linhas que se dirigiam de um polo a outro do ímã.

Por sua vez, utilizando-se do método experimental, o médico inglês William Gilbert (1544-1603) sistematizou todos os fatos conhecidos sobre o magnetismo, bem como acrescentou outras observações originais sobre esse tema, em seu famoso tratado intitulado *De Magnete*, composto de seis livros, publicado em 1600. [William Gilbert, *Great Books 26* (Encyclopaedia Britannica, Inc./Chicago, 1993)]. Como decorrência dessas observações, Gilbert chegou a conclusões importantes sobre aqueles fenômenos. Por exemplo, ele lançou a primeira versão dos “campos” elétrico e magnético, ao afirmar que tanto o ímã como um corpo eletrizado, “emitiam” uma substância etérea e imaterial - *effluvium magnético* e *elétrico* – respectivamente. Além disso, Gilbert concluiu que a Terra se comportava como uma esfera magnética. Ele foi levado a essa conclusão depois de 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.

A partir do Século 17, começaram as primeiras explicações sobre o magnetismo. Assim, o filósofo e matemático francês René Du Perron Descartes (1596-1650) em seu *Principia Philosophiae* (“Princípios Filosóficos”), de 1644, descartou a tese de que a magnetita possuía uma “alma”, propondo um modelo para explicar os fenômenos magnéticos por intermédio de sua teoria dos “vórtices”. Adepto

da ideia 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 polos de nosso planeta e saindo pelo outro. Como admitia, também, haver dois tipos dessas partículas, considerou que uma delas penetrava pelo polo norte, e o outro pelo polo sul, sendo que a viagem de retorno dessas partículas se dava pelo ar. Contudo, se nesse retorno encontrassem uma substância magnética dotada de dutos, elas “preferiam” 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 as partículas fibradas e o ferro (Fe) se devia às resistências proporcionadas pelos movimentos dos átomos de Fe. [Roberto Jorge Vasconcelos dos Santos, *Tese de Doutorado* (DFUFPE, 1986); Whittaker, op. cit.]

No Século 18 foram descobertos novos fenômenos relacionados com o magnetismo. Com efeito, em 1750, o geólogo e astrônomo inglês John Michell (1724-1793) publicou o livro intitulado *A Treatise of Artificial Magnets* (“Um Tratado sobre Magnetos Artificiais”), no qual propôs a ideia de que a força entre os *polos magnéticos* variava com o inverso do quadrado da distância entre eles. Logo depois, em 1751, o estadista e cientista norte-americano Benjamin Franklin (1706-1790) [que havia desenvolvido, entre 1747 e 1748, a teoria de um *fluido elétrico* (ver verbete nesta série) para explicar os fenômenos elétricos] observou que agulhas de ferro poderiam ser imantadas ou desimantadas por intermédio de uma descarga elétrica produzida por uma *garrafa de Leiden* (vide verbete nesta série). Esse fenômeno indicava uma clara relação entre eletricidade e magnetismo, relação essa que só foi esclarecida no Século 19, conforme veremos mais adiante.

A hipótese dos “vórtices magnéticos” cartesianos foi descartada pelo físico russo Franz Maria Ulrich Theodor Hoch Aepinus (1724-1802) no livro *Tentamen Theoriae Electricitatis et Magnetismi* (“Uma Tentativa Teórica da Eletricidade e do Magnetismo”), publicado em 1759, no qual propôs que as propriedades magnéticas dos “polos” 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 disso, Aepinus concluiu que o magnetismo permanente do *ímã natural* era devido ao emaranhamento desse fluido nos poros desse mesmo ímã. Ainda no Século 18, um modelo de *dois fluidos magnéticos* – o *boreal* e o *austral* – foi postulado pelos físicos, o holandês Antoon Brugmans (1732-1789) e o sueco Carl Wilcke (1732-1796) para explicar o magnetismo. Assim, tais fluidos imponderáveis eram supostos possuírem propriedades de atração e de repulsão mútuas similares àquelas possuídas pelos dois *fluidos elétricos*. (Whittaker, op. cit.).

Uma nova investida contra a teoria dos “vórtices magnéticos” cartesianos foi levada a cabo pelo físico francês Charles Augustin Coulomb (1736-1806) ao usar, a partir de 1777, argumentos mecânicos para explicar o magnetismo. Desse modo, em 1789 (*Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, Paris*, p. 488), Coulomb supôs serem os fluidos magnéticos permanentemente presos no interior das moléculas dos corpos magnéticos, e que são incapazes de passar de uma molécula para a outra 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. Portanto, com essa hipótese, explicou a impossibilidade de separar polos magnéticos de um ímã, indicando então a possibilidade de o fenômeno da magnetização ser microscópico. Note-se que o filósofo e matemático francês Pierre Gassendi (1592-1655), em 1647, afirmou que em cada corpo os átomos se reuniam em pequenos grupos, aos quais denominou *moléculas*, que é o diminutivo da palavra latina *moles*, que significa massa ou quantidade de matéria. [Lev Davidovich Landau and A. Kitaigorodsky, *Physics for Everyone* (Mir Publishers, 1978)].

A conexão entre os fenômenos elétrico e magnético, objeto de um prêmio proposto pela *Academia Eleitoral da Bavária*, em 1774 (Whittaker, op. cit.), só foi conseguida no Século 19, conforme veremos a seguir. Logo em 1805, os franceses, o físico Jean Nicholas Pierre Hachette (1769-1834) e o químico Charles Bernard Desormes (1777-1862) tentaram, sem êxito, verificar se a *pilha voltaica* [inventada pelo físico italiano Alessandro Giuseppe Volta (1745-1827), em 1800], isolada e suspensa livremente, seria orientada pelo magnetismo terrestre. Uma nova tentativa de observar essa relação foi realizada pelo farmacêutico e físico holandês Hans Christiaan Oersted (1777-1851), em 1807. Ele só a conseguiu em 1820, conforme vimos em verbete desta série.

Por sua vez, ainda em 1820, o físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867) tentou encontrar uma relação entre os fenômenos magnético e luminoso – o que mais tarde caracterizaria o *efeito Faraday* (ou *efeito magnético-óptico*) sem, contudo, lograr algum êxito. Somente em 1845, depois de receber uma carta do físico inglês William Thomson (Lord Kelvin de Largs) (1824-1907), Faraday retornou ao estudo da ação do magnetismo sobre a luz. Nessa carta, depois de apresentar o tratamento matemático das “linhas de força

magnéticas” (propostas por Faraday, em 1821, para explicar a experiência de Petrus Peregrinus, de 1269), Thomson sugere a possibilidade da observação da ação do **magnetismo** sobre a luz. Desse modo, instigado por essa sugestão, em 13 de setembro de 1845, Faraday observou pela primeira vez aquela ação, hoje conhecida como o famoso **efeito Faraday** (vide verbete nesta série).

O fato de o campo magnético atuar na luz sugeriu a Faraday a ideia de que esse campo não poderia estar apenas confinado no ferro (Fe), níquel (Ni) e cobalto (Co) (como já era conhecido) e sim, em toda a matéria. No curso de suas experiências no sentido de confirmar sua ideia, verificou que nem todos os corpos reagem da mesma maneira na presença de um campo magnético. Alguns deles, por exemplo, o Fe, 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 (Bi) e o antimônio (Sb), são pobres condutores de campo magnético, divergindo suas “linhas de força” através de si mesmas: tais corpos receberam de Faraday a denominação de diamagnéticos. [L. Pearce Williams, *IN: Dicionário de Biografias Científicas I* (Contraponto, 2007).]

Uma primeira tentativa de explicar o paramagnetismo e o diamagnetismo foi apresentada pelo físico alemão Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), em 1847 (*Leipzig Berichte* 1, p. 346). Com efeito, Weber explicou o diamagnetismo (no qual a polarização magnética induzida nos corpos por um campo magnético externo, é contrária à direção deste), postulando a existência de circuitos moleculares amperianos [propostos, em 1822, pelo físico francês André Marie Ampère (1775-1836)], circuitos esses que têm resistência elétrica nula, de modo que um campo magnético externo causa correntes induzidas naqueles circuitos. Todavia, embora o fluxo magnético através de tais circuitos permaneça nulo as correntes induzidas, cujas direções são dadas pela *lei de Lenz* [descoberta pelo físico germano-russo Heinrich Emil Lenz (1804-1865), em 1833, segundo a qual os efeitos de uma corrente induzida por forças eletromagnéticas sempre se opõem a essas mesmas forças]. Estava assim, segundo Weber, explicado o diamagnetismo.

Essa explicação, no entanto, apresentava dificuldades, uma vez que, segundo a mesma, todos os corpos seriam então diamagnéticos. Para contornar essa dificuldade, 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 apresentavam sentido contrário às correntes induzidas pelo fenômeno do diamagnetismo. Desse modo, 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 diamagnetismo. Usando esse modelo, em 1852 (*Annalen der Physik* 87, p. 145), Weber explicou a razão pela quais as substâncias altamente magnéticas, por exemplo, o Fe, a magnetização induzida não aumentava na mesma proporção ao aumento do campo magnético externo, mas tende para um valor de saturação. Tais substâncias foram mais tarde denominadas 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 resistências, qualquer campo magnetizante externo era capaz de induzir magnetismo. Para contornar essa dificuldade, Weber admitiu que o movimento de cada circuito molecular sofria a resistência de um torque, devido à ação mútua com outros magnetos moleculares. Note que, em 1871 (*Philosophical Magazine* 48, p. 1), Weber reformulou sua teoria do magnetismo apresentada em 1847, conforme vimos acima, ao admitir que a “corrente amperiana” (circuitos moleculares amperianos) era constituída por uma carga elétrica fixa, porém de sinal contrário, antecipando de certa maneira, o modelo atômico rutherfordiano de 1911 (sobre esse modelo, vide verbete nesta série).

O estudo do movimento interno desses circuitos moleculares nas substâncias magnéticas foi desenvolvido pelo físico escocês Sir James Alfred Ewing (1855-1935) em decorrência de suas pesquisas sobre o efeito da tensão (“stress”) sobre as propriedades termoelétricas dos metais. Em 1881 (*Proceedings of the Royal Society of London* 33, p. 21), Ewing descobriu que o efeito termoelétrico (vide verbete nesta série) se “atrasava” em relação à tensão aplicada. Em consequência dessa descoberta, passou a estudar as correntes transientes produzidas por um fio magnetizado torcido. Observando que havia o mesmo “atraso”, introduziu então o termo *histerese* (que significa em grego, *estar em atraso*) para conceituar esse fenômeno. Em 1882, Ewing observou que a área sob a curva da *histerese magnética* era proporcional ao trabalho realizado durante o ciclo completo de magnetização e desmagnetização. É interessante destacar que o físico alemão Emil Gabriel Warburg (1846-1931), também em 1881 (*Annalen der Physik und Chemie* 13, p. 141), fez essa mesma descoberta de Ewing. Destaque-se, também, que 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*. [Sigalia Dostrovsky, *IN: Dictionary of Scientific Biography* 11 (Charles Scribner's Sons, 1981)].

A distinção feita por Weber entre para e diamagnetismo foi confirmada pelo químico e físico francês Pierre Curie (1859-1906; PNF, 1903), em 1895 (*Annales de Chimie et de Physique* 5, p. 289), ao demonstrar que a *suscetibilidade magnética*  $\chi$  (relação entre magnetização M e campo magnético H) 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 (Bi). Essa observação ficou conhecida como a *lei de Curie*:  $\chi \propto 1/T$ . Além do mais, ao estudar o comportamento da magnetização das substâncias ferromagnéticas em função de T e/ou do campo magnético H externo aplicado, Pierre Curie observou existir uma determinada temperatura – mais tarde conhecida como *temperatura de Curie*  $T_C$  – acima da qual a substância ferromagnética se comporta como paramagnética. Observe-se que Curie usou as seguintes substâncias: ferromagnéticas – Fe, níquel (Ni), magnetita ( $Fe_3O_4$ ), ferro fundido; paramagnéticas – oxigênio (O), paládio (Pd) e sulfato de ferro ( $FeSO_4$ ); diamagnéticas – água ( $H_2O$ ), sal de rocha, cloreto de potássio ( $KCl$ ), sulfato de potássio ( $K_2SO_4$ ), nitrato de potássio ( $KNO_3$ ), quartzo, enxofre (S), selênio (Se), telúrio (Te), iodo (I), fósforo (P), antimônio (Sb) e Bi. [Sir Edmund Taylor Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity. The Modern Theories: 1900-1926* (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1953); Whittaker (1951), op. cit.].

Conforme vimos em verbetes desta série, em 1897, foram descobertos dois importantes resultados que foram importantes para o entendimento futuro das propriedades magnéticas da matéria. O primeiro, foi a descoberta do *elétron* pelo físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) como sendo uma partícula constituinte da matéria; o segundo, foi a demonstração realizada pelo físico inglês Sir Joseph J. Larmor (1857-1942) de que um campo magnético ( $\vec{H}$ ) agindo sobre elétrons (de massa m e carga e) que descrevem órbitas circulares, era capaz de superpor à frequência própria do elétron ( $\nu_0$ ), uma frequência precessional, a conhecida - *frequência de Larmor*:  $\nu_L = eH/4\pi mc$ , sendo c a velocidade da luz no vácuo, com e e H (módulo de  $\vec{H}$ ) dados em unidades eletromagnéticas.

Logo no começo do Século 20, o físico alemão Woldemar Voigt (1850-1919), em 1901 (*Nachrichten von der Königlich Gesellschaften de Wissenschaften zu Göttingen*, p. 169) e 1902 (*Annales de Physique Leipzig* 9, p. 115), e Thomson, em 1903 (*Philosophical Magazine* 5, p. 673), estudaram o efeito de um campo magnético sobre um conjunto de elétrons que se movimentavam em um círculo em torno de um ponto central. Em vista disso, se uma substância possui uma distribuição uniforme desses elétrons, ela não apresentaria magnetização. Para contornar essa dificuldade, Voigt explicou o para e o diamagnetismo como decorrentes do impacto mútuo entre esses elétrons orbitais sempre que, imediatamente após o impacto, esses elétrons tivessem um excesso de energia cinética. Contudo, esse modelo voigtiano não explicava a *lei de Curie* (1895).

Uma das primeiras explicações da *lei de Curie* foi apresentada pelo físico francês Paul Langevin (1872-1946), em 1905 (*Journal de Physique Théorique et Appliquée* 4, p. 678; *Annales de Chimie et Physique* 5, p. 70) ao desenvolver um modelo para explicar o dia e o paramagnetismo. No caso do paramagnetismo, Langevin admitiu que os átomos e moléculas possuíam um *momento magnético* ( $\mu$ ) intrínseco e permanente, cuja distribuição espacial era determinada pela *estatística de Maxwell-Boltzmann* (1860/1868) (vide verbete nesta série). Desse modo, demonstrou que a magnetização (M) é dada pela seguinte expressão:

$$M = N \mu L(x), \text{ sendo: } x = \mu H/kT \text{ e } L(x) = \text{cotgh } x - 1/x,$$

onde N é o *número de Avogadro*, k é a *constante de Boltzmann*, T é a temperatura absoluta, H é o módulo do campo magnético externo aplicado e L(x) é a *função de Langevin*. Com essa proposta, Langevin demonstrou que, para T grande ou H pequeno, para os quais  $x \ll 1$ , então  $L(x) \sim x/3$  (resultado que decorre do desenvolvimento de Taylor da função cotangente), a magnetização (M) é dada por:  $M = N \mu^2 H/3kT$  e, portanto a *lei de Curie* está satisfeita, uma vez que a *suscetibilidade paramagnética* ( $\chi_{para}$ ) vale  $M/H$  e, portanto:  $\chi_{para} \propto 1/T$ .

Para explicar o diamagnetismo, Langevin considerou a *frequência de Larmor* ( $\nu_L$ ) dos elétrons girando em torno do campo H externo e, desse modo, demonstrou que a *suscetibilidade diamagnética* ( $\chi_{dia}$ ) é representada por:  $\chi_{dia} = -(e^2 N / 4mc^2) \sum \bar{r}^2$  (que não depende de T, portanto, está de acordo com a *lei de Curie*), onde  $\bar{r}^2$  significa a média quadrática da distância r do elétron a um ponto central (hoje, núcleo atômico rutherfordiano), projetada em um plano perpendicular a H. O sinal menos (-), que decorre

da *lei de Lenz* (1833) (vide verbete nesta série), explica a razão pela qual uma substância diamagnética em presença do ferro, por exemplo, sofre uma repulsão e, portanto, ele levita.

É importante destacar que o modelo de Langevin foi utilizado pelo físico francês Pierre Ernst Weiss (1865-1940) para explicar o ferromagnetismo. Com efeito, em 1907 (*Journal de Physique Théorique et Appliquée* 5; 6, p. 70; 661), considerou que uma substância ferromagnética era constituída de pequenos dipolos magnéticos, submetidos a um intenso campo magnético interno – o *campo molecular*  $H_m = q M$  e, desse modo, demonstrou que a *suscetibilidade ferromagnética* ( $\chi_{ferro}$ ) era dada por:  $\chi_{ferro} = N \mu^2 H / [3k(T - T_C)]$ , com  $T_C = Nq \mu^2 / 3k$ , sendo  $q$  uma constante. Essa expressão mostra que  $\chi_{ferro}$  diverge ( $\rightarrow \infty$ ) quando  $T = T_C$  e, portanto, explica a transição de fase *ferromagnetismo-paramagnetismo* prevista pela *lei de Curie*, ou seja, quando uma substância ferromagnética atinge o *ponto Curie* ( $T_C$ ) ela passa a ser paramagnética. Nesse trabalho, Weiss deduziu que em uma substância ferromagnética existem regiões maiores do que átomos ou moléculas – os chamados *domínios* – os quais são inerentemente magnéticos, cujos momentos magnéticos ( $\mu$ ) são orientados em diferentes direções, de modo que uma parte finita da substância ferromagnética pode não estar magnetizada.

A despeito do sucesso do modelo de Weiss, havia algumas dificuldades insuperáveis sob o ponto de vista da Física Clássica (mecânica newtoniana, eletrodinâmica maxwelliana e mecânica estatística boltzmaniana). Por exemplo, o fator  $q$  de  $H_m$  havia sido calculado pelo físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902), em 1878, como sendo  $4\pi/3$ , enquanto valores experimentais indicavam valores da ordem de  $10^3$ . Por outro lado, o físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962; PNF, 1922) havia demonstrado em sua Tese de Doutorado defendida na *Universidade de Copenhague*, em 1911, que, segundo a Física Clássica, as contribuições do paramagnetismo e do diamagnetismo à *suscetibilidade magnética* se cancelavam. Esse resultado foi corroborado por Lorentz, em 1914.

É oportuno destacar que as dificuldades apontadas acima (acrescida do fato de que o Bi não se enquadra como substância diamagnética, conforme vimos acima) só foram superadas com o desenvolvimento da Mecânica Quântica, a partir de 1925, principalmente com os trabalhos dos físicos, o norte-americano John Hasbrouch van Vleck (1899-1980; PNF, 1977), em 1927, o alemão Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932), em 1928, o norte-americano Felix Bloch (1905-1983; PNF, 1952), o norte-americano Francis Bitter (1902-1967), em 1930, o russo Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962), ainda em 1930, e o inglês Rudolf Ernst Peierls (1907-1995), em 1932 e 1933. Registre-se que nesse tratamento quanto-mecânico das propriedades magnéticas da matéria, o *spin do elétron*, proposto em 1925 (vide verbete nesta série) representa um papel fundamental. [Sir Edmund Taylor Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories* (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1951); José Maria Filardo Bassalo, *Crônicas da Física 4* (EDUFPA, 1994)].



ANTERIOR

SEGUINTE