

EVOLUÇÃO HISTÓRICO-CONCEITUAL DO MAGNETISMO

José Maria Filardo Bassalo (www.bassalo.com.br)

- Tales de Mileto (624-546) fez, provavelmente, a primeira observação sobre um fenômeno magnético ao perceber que certas pedras (encontradas na Tessália, uma província grega, depois denominada de Magnésia) apresentavam a propriedade de atrair pedaços de ferro. Essas pedras, que passaram a ser conhecidas como *magnetita* ou *ímã natural*, são hoje reconhecidas quimicamente como Fe_3O_4 .
- Diógenes de Apolônia (f.c. Século 5 a.C.) explicou a atração do ferro por parte da magnetita, 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) e Platão de Atenas (c.427-c.347) também observaram a propriedade de a magnetita atrair pedaços de ferro.
- Por volta de 215 a.C., parece que os chineses foram os primeiros a fazer o uso prático da magnetita, utilizando-a como *bússola* para orientação de viagens, quer terrestres, quer marítimas (sendo estas através do Oceano Índico).
- Tito Caro Lucrécio (c.95-c.55) também observou a propriedade magnética do ímã natural. Para ele, o nome *magnetismo* derivou da região grega denominada Magnésia.
- Plínio, o Velho (23-79) afirmou que o termo *magnetismo* 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 se encontravam ao longo de seu pastoreio, numa província grega chamada Tessália.
- Por volta do século XI, navegadores maometanos utilizaram a bússola em suas viagens pelo Mediterrâneo, fato esse que permitiu seu conhecimento aos Cruzados.

- Em 1044, Zeng Gong-Liang escreveu o livro intitulado **Compêndio das Técnicas Militares Importantes**, no qual descreveu as propriedades da agulha magnética.
- Em 1088, Shen Kua (1031-1095) escreveu o livro intitulado **Ensaio no riacho dos sonhos**, no qual apresentou a primeira descrição da bússola.
- Por volta de 1186, Alexander Neckam (1157-1217) publicou o livro intitulado **O Poder da Natureza**, no qual há a primeira referência sobre o uso da bússola na navegação.
- Em 1269, Petrus Peregrinus de Maricourt [c.1240-c.1270(1290)] escreveu o livro intitulado **O Magneto**, no qual registrou os estudos sistemáticos que fez do ímã natural. Desse modo, nesse livro, apresentou o mapeamento das diversas direções assumidas por pequenos pedaços retangulares de ferro colocados também sobre pequenas amostras esféricas de magnetita, chamadas por ele de *terrellas* (“pequenas terras”). Ao analisar esse mapeamento, observou que essas direções se cruzavam em pólos opostos, análogos aos pontos de cruzamento dos meridianos terrestres. Por essa razão, denominou-os de *pólos magnéticos*. São ainda dele, outras observações sobre os 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.
- Em 1302, Flávio Gioja (f.c. Século 14) usou regularmente o ímã natural como *bússola* em suas viagens.
- Em 1450, Nicolau de Cusa (1401-1464) parece haver sido um dos primeiros a sugerir uma lei do tipo do “inverso do quadrado da distância” para representar a força entre “pólos” magnéticos.
- Em 1492, Cristovão Colombo (1451-1506) observou o desvio da agulha magnética ao atravessar o Oceano Atlântico, em sua descoberta do Novo Mundo.
- Girolano Cardano (1501-1576) foi um dos primeiros cientistas a fazer diferença entre os fenômenos elétricos e magnéticos.

- Em 1544, Georg Hartmann (1489-1564) mediu a *inclinação magnética* (ângulo que a agulha magnética faz com o plano horizontal) de Roma, encontrando o valor de 6° . Registre-se que esse resultado ficou inédito até 1831.
- Em 1558, Giambattista Della Porta (1535-1615) publicou o livro intitulado **Magia Natural**, no qual apresentou uma visão poética sobre a relação entre a magnetita e o ferro, ao escrever que:

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, Della 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.

- Em 1580-1581, Robert Norman publicou o livro intitulado **Uma Nova Atraente** que continha não somente “um pequeno discurso sobre o ímã ou magnetita”, mas também um “novo segredo descoberto” sobre seu comportamento, o fenômeno conhecido como **inclinação magnética** (ângulo que a agulha magnética faz com o plano horizontal), a qual difere de um lugar para outro. Ainda nesse livro, Norman (que fora um antigo marinheiro) discutiu a **declinação magnética** (ângulo entre os meridianos magnético e terrestre num dado local) cuja descoberta é atribuída aos navegadores do final do Século XV e começo do Século XVI.
- Em 1599, Simon Stevinus (Stevin) (1548-1620) publicou seus cálculos sobre a declinação magnética de 43 pontos localizados na Terra.
- Em 1600, William Gilbert (1544-1603) publicou seu famoso tratado intitulado **O Magneto**. Nos seis livros que compõem esse tratado, reuniu suas observações experimentais sobre os fenômenos elétricos e magnéticos. Nessas observações, mostrou que esses dois fenômenos eram diferentes, ao

examinar o comportamento do âmbar, quando atritado, e do ferro quando se aproxima de um ímã. Por outro lado, em suas observações dos fenômenos magnéticos, Gilbert percebeu que os ímãs também apresentavam um *effluvium magnético* em seus redores, e mais ainda, que os raios dessa “virtude” (elétrica ou magnética) partiam do centro dos corpos e em todas as direções, agindo sobre os corpos vizinhos e os atraindo. Em vista disso, Gilbert é considerado como o precursor do conceito de “campo” (elétrico e magnético). 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. Suas observações com ímãs, levaram-no a importantes descobertas. Com efeito, investigando as forças entre ímãs, observou que num ímã uniforme, a força magnética era proporcional à sua “quantidade de matéria” (massa). Em vista disso, alguns historiadores da Ciência consideram Gilbert como o primeiro a reconhecer a distinção entre peso e massa. Além do mais, Gilbert descobriu que o ímã perdia suas propriedades quando aquecido até o vermelho rubro (hoje, essa temperatura é da ordem de 588°C), readquirindo-as quando se esfriava. Mostrou mais ainda, que os diamantes não apresentavam nenhuma propriedade magnética, como se acreditava até então. Por outro lado, após realizar uma série de experiências com um ímã esférico - a sua **Mini-Terra (terrella)** -, especialmente construído para observar o comportamento de uma agulha magnética em presença dessa esfera, concluiu que a Terra se comportava como uma imensa esfera magnética. Dessas experiências, observou que quando a agulha magnética era suspensa nas proximidades de sua **Mini-Terra**, ela mergulhava em sua direção. Observou, também, esse médico da Rainha da Inglaterra, que a agulha magnética apontava sempre na direção dos pólos magnéticos terrestres, quase coincidentes com os pólos geográficos, e que, neles, a agulha tomava a direção vertical. Gilbert fez, ainda, observações sobre a declinação e inclinação magnéticas. É oportuno registrar que 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”.

- Em 1631, Henry Gellibrand (1597-1636) descobriu que o campo magnético terrestre variava com o tempo, ao observar que tanto a *declinação magnética* quanto a *inclinação magnética* sofriam lentas modificações com o passar do tempo.
- Em 1644, René Descartes (1596-1650) publicou o livro intitulado **Princípios**

Filosóficos, no qual descartou a tese de que a magnetita possuía uma alma, já que explicou os fenômenos magnéticos por intermédio de sua teoria dos vórtices. Com efeito, 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 terrestres 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. Descartes supunha, também, que a ação entre as partículas fibradas e o ferro se devia às resistências proporcionadas pelos movimentos dos átomos de ferro.

- Em 1701, Edmund Halley (1656-1742) organizou um mapa magnético, decorrente das observações que fez sobre as variações da bússola, durante uma viagem feita aos trópicos. De posse desse mapa, traçou sobre o mesmo curvas que uniam entre si os pontos de mesma declinação magnética, resultando um método gráfico de grande utilidade para as viagens futuras.
- Em 1750, John Michell (1724-1793) publicou o livro intitulado **Um Tratado sobre Magnetos Artificiais**, no qual propôs a idéia de que a força entre os “pólos magnéticos” variava com o inverso do quadrado da distância entre eles. Ele chegou a esse resultado utilizando uma balança de torção construída por ele próprio. Registre-se que essa lei foi aceita por Tobias Mayer (1723-1762) e por Johann Heinrich Lambert (1728-1777).
- Em 1759, Franz Maria Aepinus (1724-1802) publicou o livro intitulado **Uma Tentativa Teórica da Eletricidade e do Magnetismo**, considerado como sendo o primeiro trabalho sobre a aplicação da matemática para explicar a eletricidade e o magnetismo. Com efeito, nesse livro, Aepinus usou a teoria de um fluido elétrico desenvolvida por Benjamin Franklin (1706-1790), entre 1747 e 1748, para explicar que as propriedades magnéticas dos “pólos” dos ímãs se deviam à falta ou excesso de um **fluido magnético**, cujas partículas repeliam uma a outra, assim como atraíam partículas de ferro e aço. Ainda nesse livro, Aepinus afirmou que o magnetismo permanente do ímã era devido ao emaranhamento desse fluido nos poros desse

mesmo ímã, e que a indução elétrica nos isolantes era mais fraca do que nos condutores.

- Em 1763, Johan Carl Wilcke (1732-1796) descreveu a construção de um dispositivo que havia inventado, e que servia para medir a declinação magnética.
- Em 1777, Charles Coulomb (1736-1806) usou argumentos mecânicos para explicar o magnetismo, contra a idéia dos “vórtices magnéticos” proposta por Descartes, em 1644.
- Em 1778, Antoon Brugmans (1732-1789) observou que o bismuto (*Bi*) metálico, flutuando em um pequeno recipiente contendo água ou mercúrio, era repellido pelos pólos de um ímã. É interessante observar que Brugmans era partidário da teoria de *dois fluidos magnéticos - boreal e astral* para explicar o fenômeno do magnetismo. Aliás, Wilcke também era partidário dessa teoria. Segundo essa teoria, esses dois fluidos imponderáveis eram supostos possuírem propriedades de atração e repulsão mútuas similares àquelas possuídas pelos dois fluidos elétricos.
- Em 1789, Coulomb explicou que a inseparabilidade dos pólos magnéticos (fato que havia sido observado por Petrus Peregrinus, em 1269), decorria do fato de serem os “fluidos magnéticos” (“boreais” e “austrais”) permanentemente presos no interior das moléculas dos corpos magnéticos, e que são incapazes de passar de uma molécula para sua vizinha. Portanto, para Coulomb, cada molécula continha, em qualquer circunstância, igual número desses fluidos. Desse modo, a magnetização consistia simplesmente na separação desses dois fluidos para as extremidades opostas de cada molécula, concluiu Coulomb.
- Em 24 de agosto de 1804, Jean Baptiste Biot (1774-1862) e Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) realizaram experiências com um balão lançado na atmosfera, com o propósito de verificar se a intensidade do campo magnético terrestre decrescia em grandes altitudes. Nessas experiências, eles mediram as oscilações de uma agulha magnetizada em várias altitudes, e observaram que até 4.000 metros não houve nenhuma variação.
- Em 1819, Christopher Hansteen (1784-1873) publicou um atlas magnético que incluía a distribuição mundial da declinação magnética.

- Em junho de 1821, Samuel Hunter Christie (1784-1865) estudou a influência de uma placa de ferro não magnetizada sobre uma bússola e, nesse estudo, observou que:

Uma simples rotação do ferro tem uma considerável influência sobre suas propriedades magnéticas.

- Em 1822, André Marie Ampère (1775-1836) apresentou a idéia 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). Afirmou 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*. Observe-se que, por essa ocasião, Augustin Fresnel (1788-1827), em carta escrita a Ampère, sugeriu que essas “correntes” deveriam ser de dimensões moleculares e não macroscópicas.
- Em 1823, Christie publicou um trabalho no qual registrou suas observações sobre os efeitos da temperatura na variação diurna do campo magnético terrestre.
- Em 1823, William Sturgeon (1783-1850) inventou o *eletroímã*.
- Em 1824, Siméon Poisson (1781-1840) usou o modelo de dois fluidos magnéticos para 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. Essa explicação ficou conhecida como *lei do magnetismo induzido de Poisson*.
- Em 1825, Christie publicou um trabalho no qual afirmou que:

1. *Uma simples rotação do ferro tem uma considerável influência em suas propriedades magnéticas.*

2. *A direção da polaridade magnética adquirida pelo ferro em rotação em torno de um eixo ... refere-se sempre à direção das forças magnéticas terrestres ... este magnetismo comunicado pela terra.*

Ainda nesse trabalho, Christie especulou que os efeitos da temperatura sobre a variação diurna do campo magnético terrestre, observada por ele, em 1823, era devido a correntes termoelétricas na terra produzidas pelo calor solar.

- Em 1826, Dominique Arago (1786-1853) realizou uma experiência na qual observou que um disco de cobre em rotação era capaz de afetar uma agulha magnética colocada em suas proximidades. Este fenômeno foi explicado por Arago por intermédio de sua teoria do “magnetismo de rotação”, ou seja, por uma magnetização induzida pelo disco em rotação.
- Em 1827, Antoine César Becquerel (1788-1827) observou que o antimônio (Sb), flutuando em um pequeno recipiente contendo água ou mercúrio, era repelido pelos pólos de um ímã.
- Em 1829, Joseph Henry (1797-1878) aperfeiçoou o eletroímã que Sturgeon havia construído em 1823, ao observar que o enrolamento excessivo de fios provocava contatos e, conseqüentemente, curtos-circuitos. Assim, isolando os fios em tiras de seda conseguiu construir eletroímãs potentes.
- Em 1830, Johann Karl Gauss (1777-1855) desenvolveu sua teoria do campo magnético terrestre, na qual considerou o pólo magnético norte (boreal) da Terra como situado no arquipélago chamado Passo do Noroeste.
- Em 1^o de junho de 1831, James Clark Ross (1800-1862) descobriu o pólo magnético norte (boreal) terrestre, nas proximidades da costa ocidental da Boothia.
- Em 1831, Henry construiu um eletroímã na Universidade de Yale, com o qual levantou uma carga de uma tonelada de ferro, superando, desse modo, os eletroímãs construídos por Sturgeon, em 1823, que só levantavam cargas de cinco quilos de ferro. Nesse mesmo ano, Henry descobriu o princípio do *motor elétrico* ao converter energia elétrica em energia mecânica.

- Em novembro de 1831, Christie publicou um trabalho no qual registrou a observação que fizera sobre a influência direta da aurora sobre o campo magnético terrestre.
- Em 1832, Gauss 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.
- Em 1837-1838, Gauss inventou o *magnetômetro unifilar* e o *magnetômetro bifilar*.
- Em 1838, Michael Faraday (1791-1867) observou a figura formada por limalhas de ferro numa folha de papel ou lâmina de vidro, sob a qual colocava um ímã (figura que havia sido observada por Petrus Peregrinus, em 1269). Para explicar essa figura, Faraday passou a visualizar as forças magnéticas e elétricas como uma espécie de “tubos de borracha” que se estendem a partir dos fios condutores, ou de ímãs, ou de corpos eletrizados, tubos esses que receberam dele a denominação de *linhas de força*, cujas primeiras idéias sobre as mesmas ele as havia tido em 1821. No caso das forças magnéticas, a visualização dessas linhas poderia ser feita através das limalhas de ferro, porém, no caso das forças elétricas, a visualização era mais difícil de ser realizada experimentalmente. Para Faraday, essa visualização seria através da “polarização elétrica” do meio. Como essas linhas deveriam encher completamente o espaço, este, segundo Faraday, passava a constituir-se um *campo de forças*. Assim, segundo essa idéia de linhas e de campos, Faraday explicou o aparecimento de uma corrente elétrica induzida toda a vez que um tubo de força magnética cortava um fio condutor e, inversamente, que o movimento de tubos de força elétrica fazia aparecer *campos magnéticos*. Desse modo, Faraday completou a grande síntese matemática newtoniana, substituindo a “ação à distância” pela “ação de campo”.
- Em 1839, Gauss preparou o trabalho intitulado *Teoremas Gerais sobre as Forças Atrativas e Repulsivas as Quais Atuam de Acordo com o Inverso do Quadrado da Distância*, no qual incluiu a *lei de Michell (1750)-Coulomb (1785)*, referente às forças elétricas e magnéticas, junto com a

gravitação, num tratamento matemático geral da lei do inverso do quadrado da distância.

- Em 1841, Hansteen fundou o primeiro observatório magnético na Noruega.
- Em 1841, Ross chegou perto do pólo magnético sul (austral) terrestre. É importante frisar que esse pólo só foi oficialmente descoberto em 16 de janeiro de 1909 por Tannatt William David (1858-1934).
- Em 6 de agosto de 1845, William Thomson 1824-1907) (mais tarde conhecido como Lord Kelvin) escreveu uma longa carta a Faraday na qual descrevia seu tratamento matemático das “linhas de força faradayanas”. No final da carta, havia uma série de sugestões sobre experiências que deveriam ser realizadas com o propósito de testar a teoria de Faraday. Numa dessas sugestões, ele indicou a possibilidade de Faraday observar a ação do magnetismo sobre a luz plano-polarizada.
- Em 13 de setembro de 1845, Faraday observou pela primeira vez a ação do magnetismo sobre a luz plano-polarizada. Com efeito, 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, Faraday 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. Esse fenômeno - que ficou conhecido como **efeito Faraday** - sugeriu-lhe a idéia de que o campo magnético não poderia estar apenas confinado no ferro, níquel e cobalto (como já era conhecido) e sim, em toda a matéria. Na continuação de suas experiências, ainda em 1845, no sentido de confirmar essa tese, 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 (*Bi*) e o antimônio (*Sb*), são pobres condutores de campo magnético, divergindo suas linhas de força através de si mesmos: tais corpos receberam de Faraday a denominação de *diamagnéticos*. É oportuno dizer que foi por essa ocasião que Faraday cunhou o termo *campo magnético*.

- Em 1847, Wilhelm Weber (1804-1891) tentou explicar as propriedades *dia* e *paramagnéticas* de alguns corpos usando as correntes amperianas. Assim, para explicar o diamagnetismo (no qual a polarização magnética induzida nos corpos por um campo magnético externo, é contrária à direção deste), Weber 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* (1834)), explicam o diamagnetismo. Essa explicação, contudo, apresentava dificuldades, uma vez que, segundo a mesma, *todos* os corpos seriam diamagnéticos. 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 diamagnetismo.
- Entre junho de 1849 e julho de 1850, Kelvin completou seus estudos matemáticos do magnetismo, iniciados em 1847, principalmente os relacionados com o cálculo da força magnética sobre “pólos magnéticos” situados no centro de várias formas de cavidades feitas ficticiamente no interior de materiais magnéticos. Foi ainda por essa ocasião que Kelvin apresentou a famosa relação entre os vetores (na linguagem de hoje) *indução magnética* \vec{B} , *campo magnético* \vec{H} e **magnetização** \vec{I} :

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{I}.$$

Aliás, é oportuno destacar que Kelvin 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. Ainda nessas pesquisas, Kelvin introduziu a *suscetibilidade magnética* χ para representar a relação entre \vec{H} e \vec{I} :

$$\vec{I} = \chi\vec{H},$$

e a *permeabilidade magnética* μ para representar a relação entre \vec{B} e \vec{H} :

$$\vec{B} = \mu\vec{H}.$$

Registre-se que foi James Clerk Maxwell (1831-1879) quem denominou de *indução magnética* \vec{B} e de *força magnética* \vec{H} .

- Em 1851, Kelvin publicou o livro intitulado **Teoria Matemática do Magnetismo** no qual reuniu seus estudos sobre o magnetismo, realizados em 1849-1850.
- Em 1852, Weber publicou um trabalho no qual afirmou que a hipótese da existência de correntes elétricas no interior dos corpos refutava a idéia dos fluidos magnéticos de Brugmans-Wilcke. Ainda usando essa hipótese, Weber explicou porque em substâncias altamente magnéticas, como, por exemplo, o ferro, a magnetização induzida não aumentava em proporção ao aumento do campo magnetizante, mas tendia para um valor saturado. Portanto, de acordo com Weber, a força magnetizante externa meramente orientava 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 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. Registre-se que essa hipótese foi aceita por Maxwell em seu livro intitulado **Um Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo**, publicado em 1873.
- Em 1852, Weber realizou uma experiência na qual demonstrou a existência do diamagnetismo, ao mover um cilindro de bismuto (*Bi*) no interior de um campo magnético uniforme produzido por um solenóide longo.
- Em 1857, Kelvin descobriu que a resistência elétrica de um material variava com a aplicação de um campo magnético. Essa alteração ficou conhecida como *magneto-resistência* (*MR*).
- Em 1861, Maxwell idealizou uma experiência com a qual poderia produzir o *magnetismo de rotação*, proposto por Arago, em 1826.
- Em 1866, Rudolph Kohlrausch (1809-1858) observou que havia, em certos processos físicos, um certo “atraso” entre a aplicação de uma força e o seu

efeito. Nessa ocasião, inventou a expressão *elastische Nachwirkung* (“efeito posterior elástico”) para representar esse fenômeno.

- Em 1871, Kelvin propôs que o sistema de unidades proposto por Gauss, em 1832, passasse a adotar as seguintes unidades fundamentais:

Centímetro - cm, Grama - g, Segundo - s.

Hoje, nesse famoso *sistema gaussiano - CGS*, a unidade de indução magnética é o *gauss*.

- Em 1873, Maxwell publicou seu famoso livro intitulado **Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo** no qual apresentou as leis empíricas dos fenômenos eletromagnéticos, nas famosas *equações de Maxwell* (na atual notação):

$$\nabla \cdot \vec{E} = 4 \pi \rho \text{ (Lei de Coulomb (1785));}$$

$$\nabla \times \vec{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{4 \pi}{c} \vec{J} \text{ (Lei de Ampère (1820)-Maxwell(1865));}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \text{ (Ausência de Monopolo Magnético, Ampère (1822));}$$

$$\nabla \times \vec{E} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \text{ (Lei de Faraday-Henry (1831)),}$$

onde \vec{E} é o *campo elétrico*, \vec{B} é a **indução magnética**, \vec{J} é a *densidade de corrente*, ρ é a *densidade de carga* e c é a velocidade da luz no vácuo.

- Em 1875, Peter Tait (1831-1901) fez um estudo teórico da influência do campo magnético sobre o estado de polarização da luz na absorção seletiva.
- Em 1878, Hendrik Lorentz (1853-1928; PNF, 1902) mostrou que o campo magnético no interior de um material magnético era composto de dois termos: o campo externo e um “campo molecular” devido à distribuição espacial de “densidade magnética”. Nessa ocasião, chegou a calcular essa contribuição “molecular”:

$$H_m = \frac{4\pi}{3} I,$$

onde I é a *magnetização*.

- Em 1880, Augusto Righi (1850-1920) descobriu e descreveu o fenômeno mais tarde conhecido como *histerese magnética*.
- Em 1881, Nicola Tesla (1856-1943) apresentou as primeiras idéias sobre o princípio do campo magnético girante, base do motor polifásico de indução.
- Em 1881, Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) publicou um trabalho no qual analisou o movimento de uma esfera carregada. Inicialmente, para velocidades baixas, Thomson observou que o campo elétrico coincidia com o campo eletrostático e que o campo magnético coincidia com o campo criado por um elemento de corrente. No entanto, quando a velocidade da esfera aumentava, Thomson observou o aparecimento de uma “massa eletromagnética” adicional, que aumentava indefinidamente, na medida em que a velocidade da esfera se aproximava da velocidade da luz.
- Em 1881, James Alfred Ewing (1855-1935) publicou um trabalho no qual registrou seus estudos sobre as propriedades termoelétricas dos metais. Nesses estudos, descobriu que o efeito termoelétrico 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 ocorria, com essas correntes, o mesmo “atraso”, introduziu, então, o termo *histerese magnética* (*histerese* significa, em grego, *estar em atraso*), para simbolizar esse fenômeno.
- Em 1881, Emil Gabriel Warburg (1846-1931) descobriu o fenômeno da *histerese magnética*, independentemente de Ewing. Registre-se que esse fenômeno já havia sido observado por Righi, em 1880.
- Em 1882, Ewing observou que a área sob a curva de *histerese magnética* era proporcional ao trabalho realizado durante o ciclo completo de magnetização e desmagnetização.
- Em 1888, Tesla obteve as patentes dos dínamos e motores polifásicos de corrente alternada, bem como dos transformadores.
- Em 1889, Arthur Schuster (1851-1934) mostrou que as variações magnéticas diárias são de duas espécies: interna e atmosférica. A primeira, é devida a correntes elétricas induzidas na Terra, e a segunda, a essas mesmas correntes induzidas na parte superior da atmosfera.

- Em 1893, Joseph J. Larmor (1857-1942) estudou a ação do magnetismo sobre a luz.
- Em 1895, Pierre Curie (1859-1906; PNF, 1906) publicou alguns resultados de seus trabalhos realizados em sua tese de doutoramento. Por exemplo, que a *suscetibilidade magnética* χ variava inversamente com a temperatura absoluta T , nas substâncias paramagnéticas enquanto que para as diamagnéticas era independente dessa mesma temperatura, exceto para o bismuto (Bi). Este resultado passou a ser conhecido como a *lei de Curie*:

$$\chi \propto \frac{1}{T}.$$

Ainda nesses trabalhos, Pierre Curie estudou o comportamento da magnetização de substâncias ferromagnéticas em função da temperatura e/ou do campo magnético externo aplicado, ocasião em que observou existir uma determinada temperatura - mais tarde chamada *temperatura de Curie* T_C - acima da qual a substância ferromagnética se comporta como paramagnética. Destaque-se que em suas pesquisas sobre o magnetismo, Pierre Curie usou as seguintes substâncias: *ferromagnéticas* - ferro (Fe), níquel (Ni), magnetita, ferro fundido; *paramagnéticas* - oxigênio (O), paládio (Pd) e sulfato de ferro; *diamagnéticas* - água, sal de rocha, cloreto de potássio, sulfato de potássio, nitrato de potássio, quartzo, enxofre (S), selênio (Se), telúrio (Te), iodo (I), fósforo (P), antimônio (Sb) e bismuto (Bi).

- Em 1897, Larmor demonstrou que o efeito de um campo magnético de intensidade B sobre partículas carregadas que descrevem órbitas circulares, era o de superpor à frequência própria de rotação (ν_o), uma frequência precessional em torno do campo externo, hoje conhecida como *frequência de precessão de Larmor* ω_L :

$$\omega_L = \frac{e B}{4 \pi m},$$

onde e e m representam, respectivamente, a carga e a massa das partículas girantes.

- Em 1901-1902, Woldemar Voigt (1850-1919) estudou 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. Com isso, demonstrou 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 contêm elétrons circulando em órbitas fechadas e periódicas, sob a ação de forças centrais. Para contornar essa dificuldade, Voigt admitiu que o diamagnetismo ou o paramagnetismo 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 dessa explicação, esse modelo atribuía ao dia e ao paramagnetismo a mesma origem, o que, no entanto, contradizia a *lei de Curie* (1895).

- Em 1903, Thomson apresentou um modelo semelhante ao de Voigt (1901-1902) para explicar o dia e o paramagnetismo.
- Em 1905, Paul Langevin (1872-1946) desenvolveu um modelo para explicar o dia e o paramagnetismo. No caso do paramagnetismo, Langevin admitiu que os átomos e moléculas possuíam um momento magnético intrínseco e permanente μ , cuja distribuição espacial era determinada pela *estatística de Maxwell-Boltzmann* (1860/1868). Desse modo, demonstrou que a magnetização M é dada por:

$$M = N \mu L(x), \quad (x = \frac{\mu H}{k T}, \quad L(x) = \operatorname{cotgh} x - \frac{1}{x})$$

onde N é o *número de Avogadro*, H é a intensidade do campo magnético externo, k é a *constante de Boltzmann*, T a temperatura absoluta e $L(x)$ é a *função de Langevin*. Usando a expressão, Langevin observou que, para temperaturas altas ou campos magnéticos fracos ($x \ll 1 \rightarrow L(x) \sim \frac{x}{3}$), a mesma se transformaria na expressão:

$$M = \frac{N \mu^2}{3 k T} H = \chi H,$$

que está de pleno acordo com a *lei de Curie*. Para explicar o diamagnetismo, Langevin considerou a *freqüência de Larmor* dos elétrons em torno de um campo magnético externo de intensidade H e, com isso, demonstrou que o acréscimo do momento magnético (ΔM), devido a um particular elétron circulante na mesma, é dado por:

$$\Delta M = - \frac{H e^2}{4 m c^2} \bar{r}^2,$$

onde r é a distância do elétron ao núcleo atômico, projetada em um plano perpendicular a H , \bar{r}^2 é a média quadrática estendida às durações de diversas revoluções eletrônicas, e o sinal menos (-) é devido à *lei de Lenz*. Esse resultado concordava com a observação experimental de que a suscetibilidade diamagnética não dependia da temperatura. Contudo, o bismuto (metal diamagnético) apresentava uma exceção, pois sua suscetibilidade diamagnética diminuía linearmente com o aumento da temperatura. Segundo Langevin, essa anomalia devia-se a elétrons-livres de condução. Tais elétrons haviam sido propostos por Riecke, em 1898.

- Em 1907, Pierre Ernst Weiss (1865-1940) usou o *modelo de Langevin* (1905) para explicar o ferromagnetismo. Segundo Weiss, uma substância ferromagnética era constituída de pequenos dipolos magnéticos, submetidos a um intenso campo magnético interno - o *campo molecular* - $H_m = q M$. Assim, considerando que $x = \frac{\mu (H + q M)}{k T}$, Weiss demonstrou que:

$$\chi = \frac{N \mu^2}{3 k (T - T_c)}, \quad (T_c = \frac{N q \mu^2}{3 k}, \quad q_{exp} \sim 10^3, \quad q_{teo} \sim 4).$$

Com esse modelo, Weiss foi capaz de prever a transição de fase ferromagnetismo-paramagnetismo, já que pela expressão acima se vê que quando $T = T_c$, $\chi \rightarrow \infty$. Isso significa dizer que um corpo ferromagnético deixa de sê-lo quando sua temperatura atinge o valor T_c , o chamado *ponto Curie* (nome dado por Weiss, em 1910). Nesse estudo do ferromagnetismo, 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 posições, de modo que uma parte finita da substância ferromagnética pode não estar magnetizada.

- Em 1908, Owen Willians Richardson (1879-1959; PNF, 1928) sugeriu um tipo de experiência que pudesse comprovar as “correntes amperianas”, medindo, através da mesma, a relação entre o momento angular mecânico \vec{L} do elétron “amperiano” e seu momento magnético $\vec{\mu}$. Assim, imaginou um longo cilindro fino, de ferro, suspenso por uma fibra. Quando o mesmo estivesse desmagnetizado, as “correntes amperianas” apresentavam momento angular nulo, afirmava Richardson. Contudo, ao ser aplicado um campo magnético vertical, os elétrons seriam orientados para o mesmo, e o cilindro, como um todo, sofreria um torque que, ao ser medido, permitiria determinar

aquela relação. Apesar de ser engenhosa essa experiência, Richardson não conseguiu medir o torque previsto.

- Em 1909, Samuel Jackson Barnett (1873-1956) idealizou um tipo de experiência com o objetivo de medir as “correntes amperianas”. Sua idéia consistia em considerar cilindros de ferro, inicialmente com momento magnético nulo, e que se tornavam magnetizados após serem submetidos a uma aceleração angular. Muito embora as primeiras experiências hajam confirmado o *efeito Barnett*, o mesmo não foi reproduzido em experiências subseqüentes.
- Em 1911, Weiss propôs que a magnetização máxima de uma substância ferromagnética poderia ser expressa com múltiplos inteiros de um *Grammagneton* μ_W , uma espécie de quantização do momento magnético de um elétron.
- Em 1911, Niels Bohr (1885-1963; PNF, 1922) demonstrou que a Mecânica e o Eletromagnetismo clássicos, aplicados ao *modelo de Langevin*, indicavam que as contribuições para e diamagnéticas se cancelavam e, portanto, não contribuía para o cálculo da suscetibilidade magnética χ .
- Em 1915, Barnett apresentou o resultado de suas experiências para a determinação da relação entre os módulos do momento angular mecânico \vec{L} do elétron “amperiano” e do momento magnético $\vec{\mu}$, relação essa que mais tarde recebeu o nome de *razão giromagnética g do elétron*:

$$g = \frac{|\vec{L}|}{|\vec{\mu}|} = 0,5 \times 10^{-7} \text{ uCGS.}$$

Classicamente, essa relação é calculada da seguinte maneira. De acordo com o Eletromagnetismo Clássico, o módulo do momento magnético de um elétron orbital é dado por:

$$|\vec{\mu}| = e \nu A,$$

onde ν é a frequência de oscilação do elétron de carga e , e A a área de sua órbita. Por outro lado, segundo a Mecânica Clássica, o módulo do momento angular do elétron de massa m na órbita é dado por:

$$|\vec{L}| = 2 m e A.$$

Portanto, o valor teórico de g_t será:

$$g_t = \frac{|\vec{L}|}{|\vec{\mu}|} = \frac{2m}{e}.$$

- Em 1915, Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) e Wander de Haas (1878-1960) realizaram uma experiência com o objetivo de determinar g . Assim, ao estudarem a magnetização e a desmagnetização periódica de um cilindro suspenso e torcido, também periodicamente, encontraram que:

$$g = 1,11 \times 10^{-7} uCGS.$$

Como esse valor é o dobro do encontrado por Barnett, os físicos procuraram descobrir a razão dessa discrepância. Registre-se que ela só foi resolvida com a proposta do *spin* do elétron, em 1925.

- Em 1920, Wolfgang Pauli (1900-1958; PNF, 1945) estudou o diamagnetismo das substâncias ionizadas por intermédio da *fórmula de Langevin*, obtendo o seguinte valor para a suscetibilidade magnética χ :

$$\chi = - \frac{e^2 N}{4 m c^2} \sum \bar{r}^2,$$

onde Σ se estende a todos os elétrons do átomo ou molécula. Foi por essa ocasião que Pauli propôs, pela primeira vez, a unidade fundamental do momento magnético de um elétron numa órbita bohriana:

$$\mu_B = \frac{e h N}{4 \pi}.$$

A essa unidade, Pauli denominou de *magnetron de Bohr*, que valia cerca de 5 vezes o *magnetron de Weiss*.

- Em 1925, George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) e Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978) introduziram o conceito de *spin* - uma espécie de rotação interna do elétron - que poderia assumir dois valores: $+\frac{\hbar}{2}$ (*up*) e $-\frac{\hbar}{2}$ (*down*).
- Em 1925, Ernest Ising (1900-1998) apresentou seu modelo para sistemas magnéticos segundo o qual os momentos magnéticos colocados sobre sítios equidistantes e em uma cadeia unidimensional, interagem 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 uma direção contrária, não sendo, no entanto, permitidas outras direções. Esse *modelo de Ising* não conseguiu explicar o ferromagnetismo.

- Em 1925, Pauli apresentou seu famoso *princípio da exclusão*:

Dois elétrons em um campo de força central nunca podem estar em estados de energia de ligação com os mesmos quatro números quânticos.

Para Pauli, um elétron atômico era caracterizado por quatro números quânticos: o número quântico principal (n), o número quântico azimutal (k) e dois números quânticos magnéticos (m_1, m_2).

- Em 1927, Pauli aplicou a idéia de *spin* aos elétrons de condução e demonstrou o aparecimento de uma pequena suscetibilidade paramagnética nos metais e que a mesma era independente da temperatura, segundo a expressão:

$$\chi = \frac{e^2 k_F}{4 \pi^2 m c^2},$$

onde k_F é o raio da superfície de Fermi. Esta é definida pelos vetores \vec{k} para os quais a energia de Fermi ϵ_F é constante. Por sua vez, essa energia significa a mais alta que, no zero absoluto ($T = 0$), o elétron pode ocupar em sua distribuição orbital.

- Em 1927, John Hasbrouck van Vleck (1899-1980; PNF, 1977) fez um estudo geral sobre a suscetibilidade magnética das moléculas, usando a Mecânica Quântica. A expressão que obteve para χ foi a seguinte:

$$\chi = - \frac{e^2 N}{6 m c^2} \sum \bar{r}^2 + 2 N \sum | \langle s | \mu_z | 0 \rangle |^2 / (E_s - E_o),$$

onde $\langle s | \mu_z | 0 \rangle$ é o elemento de matriz da componente \mathbf{z} do momento magnético orbital $\vec{\mu}$, 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 *diamagnético* ou *paramagnético* dependendo se o segundo termo da expressão acima - chamado *paramagnetismo de van Vleck* - for menor ou maior do que o primeiro.

- Em 1928, Werner Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932) apresentou seu famoso modelo do ferromagnetismo para explicar a razão de ser tão alto o *campo molecular de Weiss*, usando, nessa explicação, o *princípio da exclusão de Pauli* e a superposição das funções de onda eletrônicas. Ora, de acordo

com esse princípio, elétrons com os mesmos números quânticos (inclusive o spin) tenderiam a permanecer afastados, enquanto os de spins diferentes se aproximavam. Portanto, segundo esse *modelo de Heisenberg*, o forte alinhamento dos spins (característica do ferromagnetismo) decorria de uma energia de troca (“exchange”) entre os spins de elétrons vizinhos.

- Em 1929, Paul Dirac (1902-1984; PNF, 1933) obteve a famosa Hamiltoniana que caracteriza o ferromagnetismo Heisenbergiano, qual seja, a hoje conhecida *Hamiltoniana de Heisenberg*:

$$H = \sum_{i,j} J_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j,$$

onde J_{ij} é a *integral de troca* e \vec{S}_i é o *operador de spin total* do i -ésimo átomo da rede.

- Em 1929, Felix Bloch (1905-1983; PNF, 1952) estudou o papel dos elétrons de condução no fenômeno do ferromagnetismo. Assim, ao calcular a energia de troca entre elétrons-livres de um gás, observou que a energia do ponto zero entre os mesmos era importante para produzir o estado ferromagnético.
- Em 1930, John Clarke Slater (1900-1976) e, independentemente, Bloch descobriram as famosas *ondas de spin* (cujo quantum se denomina *magnon*), que são estados de energia correspondente à precessão dos spins alinhados no estado fundamental. Slater chegou a essas “ondas” estudando a coesão de metais, e Bloch estudando o ferromagnetismo, ocasião em que demonstrou a hoje conhecida *lei de Bloch*:

$$\frac{\Delta M}{M(0)} \propto T^{3/2},$$

onde ΔM representa a variação da magnetização devido às flutuações decorrentes das ondas de spin a baixas temperaturas (T).

- Em 1930, Francis Bitter fez o primeiro estudo do diamagnetismo de elétrons de condução usando a Mecânica Quântica. Nesse estudo, Bitter calculou o valor esperado da *fórmula de Langevin-Pauli*, utilizando as funções de onda do elétron-livre estendida a uma célula unitária.
- Em 1930, Lev Davidovich Landau (1908-1968; PNF, 1962) usou a Mecânica Estatística Quântica para estudar o diamagnetismo de um gás de elétrons

(sem spin) em um campo magnético externo. Desse modo, demonstrou que a suscetibilidade diamagnética é exatamente $(-\frac{1}{3})$ da suscetibilidade paramagnética obtida por Pauli para um gás de elétrons com spin, ao invés de valor nulo conforme Bohr havia demonstrado, em 1911, usando a Física Clássica. Além disso, Landau demonstrou que o momento de dipolo diamagnético apresentava uma forte periodicidade, sob a ação de um campo magnético externo, fenômeno esse que logo seria observado (final de 1930) no chamado *efeito de Haas-van Alphen-Shubnikov*. Apesar desses importantes resultados obtidos por Landau, a questão da alta suscetibilidade diamagnética do bismuto (*Bi*) permanecia inexplicável.

- Em 1931, Hans Albrecht Bethe (1906-2005; PNF, 1967) estudou o ferromagnetismo heisenbergiano, ocasião em que apresentou, pela primeira vez, a solução exata de um sistema quântico de muitos-corpos em interação.
- Em 1931, Dirac usou o argumento da simetria das *equações de Maxwell* para propor a existência do *monopolo magnético*. Assim, segundo Dirac, para contemplar esse monopolo, as *equações de Maxwell* deveriam tomar a seguinte forma, hoje conhecida como *equações de Maxwell-Dirac*:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 4 \pi \rho_e \text{ (Lei de Coulomb (1785));}$$

$$\nabla \times \vec{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{4 \pi}{c} \vec{J}_e \text{ (Lei de Ampère (1820)-Maxwell (1865));}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 4 \pi \rho_m; \text{ (Presença de Monopolo Magnético, Dirac (1931));}$$

$$\nabla \times \vec{E} - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{4 \pi}{c} \vec{J}_m \text{ (Lei de Faraday (1831)-Henry (1831)-Dirac (1931)),}$$

onde ρ_e é a *densidade de carga elétrica*, ρ_m é a *densidade de carga magnética*, \vec{J}_e é a *densidade de corrente elétrica* e \vec{J}_m é a **densidade de corrente magnética**. Para calcular o valor da *carga magnética* - g , Dirac usou a Mecânica Quântica que havia sido desenvolvida a partir de 1926. Segundo essa teoria, a evolução de uma partícula é traduzida por uma *função de onda* $\psi(\vec{r}, t)$, afetada por um *fator de fase imaginária* multiplicativo que não intervém nas medidas das grandezas observáveis daquela partícula. Assim, quando esta se desloca de um lugar para outro, a diferença nos fatores de

fase entre a partida e a chegada é definida por um trajeto próprio. Porém, se o trajeto for fechado, as variações nesses fatores das diversas funções de onda possíveis entre a partida e a chegada da partícula serão idênticas. Com esse argumento simples, Dirac re-obteve as *equações de Maxwell* (vistas acima) como consequência das restrições impostas àquelas variações dos fatores de fase, bem como fez a predição do valor de g através da relação:

$$\frac{g e}{\hbar c} = \frac{n}{2}, \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

onde e é a carga do elétron e $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, com h a *constante de Planck*. Essa teoria do monopolo magnético proposto por Dirac apresentava uma séria dificuldade, uma vez que não era compatível com a observação experimental de que as linhas de força de \vec{B} são fechadas, fato esse que é traduzido pela equação:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0.$$

- Em 1932, Bloch estudou a dinâmica do ferromagnetismo heisenbergiano, principalmente o movimento das fronteiras que separam os domínios elementares, as hoje famosas *paredes de Bloch*.
- Em 1932, Louis Eugène Félix Néel (1904-2000; PNF, 1970) apresentou um modelo de uma estrutura magnética para o qual os spins nas redes são arranjados, de um modo paralelo e antiparalelo, de maneira que o campo magnético resultante é nulo. Usando esse modelo, Néel demonstrou que esse estado - ao qual denominou de *antiferromagnetismo* - desaparece acima de uma determinada temperatura, conhecida desde então como *temperatura Néel* T_N .
- Em 1932/1933, Rudolf Ernst Peierls (1907-1995) tratou do diamagnetismo em seu estudo sobre elétrons livres em campos magnéticos externos fracos e fortes. 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 dessa superfície), elevava aquela suscetibilidade, como ocorre, por exemplo, no bismuto. No caso de campos fortes atuando em elétrons de condução, Peierls deu uma explicação teórica para o *efeito de Haas-van Alphen-Shubnikov*.

- Em 1935, Landau e Evgenil Lifshitz (1915-1985) explicaram as *paredes de Bloch* como decorrência de várias contribuições à energia (de troca, anisotropia e magnética) de um corpo magnético.
- Em 1936, Meghnad N. Saha (1894-1956) obteve a condição de quantização de Dirac para o monopolo magnético usando argumentos semiclássicos.
- Em 1941, Hendrik Kramers (1894-1952) e Gregory H. Wannier (1911-1983) estudaram o *modelo de Ising* em duas dimensões, calculando com o mesmo a temperatura T_C para uma rede quadrada.
- Em 1944, Lars Onsager (1903-1976; PNQ, 1968) resolveu, exatamente, o *modelo de Ising bi-dimensional*, para o caso de ausência do campo magnético externo.
- Em 1948, Néel descobriu um outro estado magnético, denominado por ele de *antiferrimagnetismo*, 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, Néel chamou-os de *ferrites*, cuja fórmula química usual é - $MO.Fe_3 O_3$ -, onde o cation divalente M pode ser: $Zn, Cd, Fe, Ni, Cu, Co, Mg$. Os *ferrites* são cristais que têm pequena condutividade elétrica comparada aos materiais ferromagnéticos.
- Em 1948, Dirac contornou a dificuldade apresentada por sua teoria do monopolo magnético, proposta em 1931, qual seja, que ela era incompatível com a observação experimental de que as linhas de força de \vec{B} são fechadas, propondo a existência de uma “linha” - a *linha de Dirac* - formada de dipolos magnéticos (ou equivalentemente, um solenóide delgado de espiras bem próximas), que se estende até o infinito e que, no entanto, ainda segundo Dirac, um elétron não poderia cruzar. Porém, como tal corda não poderia ser orientada *a priori*, ela não seria detectável.
- Em 1968, Julian Schwinger (1918-1994; PNF, 1965) propôs um **modelo magnético da matéria** segundo o qual as partículas que sofrem interação nuclear (*hádrons*) seriam constituídas por outras partículas, as *dyons*, compostas de cargas elétricas e_o e g_o , cargas essas fracionárias das cargas dos monopolos elétrico (e) e magnético (g). Assim, por exemplo, os prótons e nêutrons, partículas constituintes do núcleo, conteriam elementos portadores de cargas magnéticas de total nulo.

- Em 1971, Kenneth Geddes Wilson (1936- ; PNF, 1982) iniciou o estudo dos sistemas críticos, principalmente sistemas magnéticos, por intermédio do *Grupo de Renormalização*, uma técnica matemática desenvolvida na Teoria Quântica de Campos.
- Em 1972, Pierre-Gilles de Gennes (1932-2007; PNF, 1991) estabeleceu uma correspondência precisa entre um polímero e um sistema magnético em um campo magnético nulo, isto é, que um polímero em solução poderia ser descrito como um sistema crítico *tipo Landau-Ginsburg* e, desse modo, poderia ser estudado com auxílio da Teoria Quântica de Campos, ou seja, que se tratava de um sistema crítico.
- Em 1972, V. Canella e J. A. Mydosh descobriram o primeiro **vidro de spin** ao realizarem experiências nas quais foram feitas medidas da magnetização em função da temperatura em uma liga de ferro (*Fe*) e ouro (*Au*) (16 por cento de ferro), liga essa na qual o ferro (magnético) substituía aleatoriamente o ouro (não magnético) na disposição da rede cristalina. Nessas experiências, observaram que existia uma certa temperatura (T_g), para a qual há uma transição de fase paramagnética para aquele tipo de vidro.
- Em 1974, Gerardus 't Hooft (1946- ; PNF, 1999) e, independentemente, Aleksandr Polyakov demonstraram que a unificação entre as interações eletromagnética, fraca e forte ocorre em altas energias e começa a se diferenciar à medida que se inicia a diminuição de energia. Então, quando a simetria entre esses três tipos de interação se quebra para dar lugar à interação eletromagnética, aparecem, então, vários tipos de monopolos magnéticos, os chamados *monopolos magnéticos de 't Hooft-Polyakov*, com cargas magnéticas diferentes, e seriam resultante da desintegração do próton ($t_{vm} \sim 10^{32}$ anos). A escala de energia em que esses monopolos aparecem é bastante alta: $10^{14} GeV = 10^{23} eV$, sendo a massa dos mesmos: $m_{MM} = 10^{16} GeV$. Para comparação, observe-se que: $m_e = 0,5 MeV$.
- Em 1975, Chen Yang (1922- ; PNF, 1957) e Tai Tsun Wu (1933-) “curaram” a “doença” da *linha de Dirac* ao demonstrarem que não são os campos elétrico e magnético, e nem os potenciais elétrico e vetor, que descrevem os meios magnéticos, mais sim, um “fator de fase” (hoje conhecido como *campo de gauge*), que é o responsável pelos fenômenos magnéticos. Assim, ao escolherem um sistema de coordenadas conveniente, comprovaram que a **linha de Dirac** nada mais era do que a “projeção” de um monopolo

magnético do mesmo modo que, em Cartografia, o *planisfério* tem os pólos terrestres representados por linhas e não pontos. Nessa situação, muito embora as calotas esféricas que envolvem o monopolo magnético tenham os potenciais magnéticos com valores diferentes, existe, no entanto, uma função que transforma esses potenciais, passando de um para o outro sem mudar o “fator de fase”.

- Em 1975, P. B. Price, E. K. Shirk, W. Z. Osborne e L. S. Pinsky realizaram uma experiência na qual examinaram o traço deixado por uma partícula cósmica em uma emulsão nuclear fotográfica. O exame de tal evento levou esses pesquisadores a aventarem a hipótese de que haviam detectado um monopolo magnético com $g = 137 e$. Tal hipótese foi descartada, ainda em 1975, por Luís Walter Alvarez (1911-1988; PNF, 1968) que explicou aquele traço como sendo produzido por um núcleo pesado.
- Em 1975, Michel Jullière anunciou que havia observado evidência de uma grande *magneto-resistência* (MR) ao estudar o tunelamento entre filmes ferromagnéticos. Ele mediu a MR de um sanduíche de dois filmes de ferro e cobalto, com uma camada intermediária de germânio ($Fe - Ge - Co$), em duas situações: com a magnetização dos filmes em sentido paralelo e antiparalelo. Como há um efeito de tunelamento dos elétrons de condução dos filmes magnéticos através da camada intermediária, a MR medida por ele ficou conhecida como TMR (“Tunnel Magnetoresistance”).
- Em 1981, Allan H. Guth (1947-) apresentou o *modelo inflacionário* segundo o qual o Universo teria começado com um *Big Bang*, ocorrido entre 15 e 25 bilhões de anos atrás, porém, logo em seu começo sofreu um período de expansão muito acelerada, isto é, uma *inflação*, durante a qual produziram-se muito menos monopolos magnéticos, o que explicava a não observância deles até então. Registre-se que até o presente momento (outubro de 2007), ainda não foi detectado nenhum monopolo magnético.
- Entre 1981 e 1983, Vladimir Rubakov e, independentemente, Cutis G. Callan propuseram a hipótese de que o decaimento do próton, previsto pelas Teorias de Grande Unificação (1972), seria dado por:

$$p \rightarrow M + e^+ + \nu_{e^+},$$

onde M é o monopolo magnético, e^+ é o pósitron e ν_{e^+} é o neutrino do pósitron.

- Em 14 de fevereiro de 1982, Blas Cabrera relatou uma experiência (que durou 150 dias) na qual um dispositivo supercondutor - conhecido como *SQUID* - “Superconductive Quantum Interference Device” - foi utilizado para detectar uma carga magnética em movimento. Em seu relato, Cabrera afirmou haver detectado um monopolo magnético com a carga magnética prevista por Dirac: $g = 68,5e$.
- Em 1988, Mário N. Baibich, J. M. Broto, Albert Fert, F. N. Vandau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich e J. Chazelas anunciaram a descoberta do fenômeno da **magnetoresistência gigante**. Com efeito, ao usarem estruturas formadas por sanduíches de ferro [(001)*Fe*] ”recheados” com uma camada de três átomos de cromo [(001)*Cr*], eles mediram a resistência elétrica do sistema para diferentes campos magnéticos aplicados. A importância dessa descoberta foi a de que eles encontraram uma variação de até 50% (contra 3% até então conhecido, o que originou o nome de *GMR* (“Giant Magnetoresistance”) entre as resistências em duas situações: alinhamentos magnético anti-paralelo e paralelo, respectivamente, das camadas exteriores do sanduíche. Com efeito, eles observaram que para uma camada de 9 angströms ($9 \times 10^{-8} \text{ cm}$) de espessura de *Cr* na temperatura de $T = 2.4K$, a resistividade foi baixada por quase um fator 2 em um campo magnético de 2 *teslas*. Destaque-se que, a partir dessa descoberta, desenvolveu-se a tecnologia hoje conhecida como *spintrônica*, enormemente utilizada na maioria dos cabeçotes de leitura dos discos rígidos dos computadores. Atualmente, já existem protótipos de **transistores de spin**, construídos com base nessa tecnologia.
- Em 1989, G. Binasch, Peter A. Grünberg, F. Saurenbach e W. Zinn anunciaram que haviam redescoberto o fenômeno da *GMR* (“Giant Magnetoresistance”), ao medirem a resistência elétrica de camadas de ferro-cromo-ferro (*Fe - Cr - Fe*) com material antiferromagnético entre elas.
- Em 1991, os físicos P. R. Pedutto, Sônia Frota-Pessôa (1942-) e M. S. Methfessel desenvolveram um formalismo matemático conhecido como *RS - LMTO - ASA* (“real space - linear muffin-tin orbital - atomic sphere approximation”) para calcular as impurezas intersticial e substitucional em metais. É oportuno destacar que esse formalismo é baseado no formalismo *LMTO - ASA*, desenvolvido por O. K. Andersen e O. Jepsen, em 1984.
- Em 1993, Frota-Pessôa, L. A. de Mello, H. M. Petrilli e Ângela Burlamarqui

Klautau apresentaram os primeiros cálculos, realizados com o formalismo $RS - LMTO - ASA$ sobre a estrutura eletrônica em torno de impurezas de ferro (Fe) intersticiais isoladas nos seguintes metais: escândio (Sc), titânio (Ti), ítrio (Y) e zircônio (Zr).

- Em 1994, Sung-Ho Jin, T. H. Tiefel, M. McCormack, R. A. Fastnacht, R. Ramesh and L. H. Chen comunicaram que haviam descoberto uma colossal magneto-resistência, que ficou conhecida, a partir daí, como CMR ("Colossal Magnetoresistance"), em um cristal isolante de óxido de manganês, conhecido como *manganita* ($La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$). Eles observaram que a aplicação de um campo magnético reduzia a resistência desse cristal, pois havia a transformação do material não-magnético [lantânio (La) e cálcio (Ca)] em ferromagnético. Observaram, também, que essa transformação só ocorria em temperaturas abaixo de $150 K$ e com campos magnéticos de vários teslas (T). É oportuno registrar que a primeira evidência da CMR foi descoberta na década de 1950 por G. H. Jonker e J. H. van Santem, nos *Laboratórios Philips*, na Holanda.
- Em 1994, N. A. de Oliveira, A. A. Gomes e Amós Troper (1945-); M. A. Continentino, Glória M. Japiassú e Troper; e C. E. Leal e Troper estudaram, respectivamente, as propriedades hiperfinas e magnéticas das $n - d$ impurezas no ferro (Fe); as propriedades termodinâmicas e de escala nos isoladores Kondo; os momentos locais e a valência intermediária de impurezas do cério (Ce) em metais terras raras ferromagnéticas.
- Em 1995, S. A. Solin e M. Lee anunciaram que haviam observado uma MR ("Magnetoresistance") em um material envolvendo somente materiais não-magnéticos. Essa observação decorreu da medida da resistência elétrica de uma super-rede semicondutora (heteroestrutura), constituída de arseneto de gálio e arseneto de gálio e alumínio ($GaAs - Ga_{0.7}Al_{0.3}As$) empilhadas em um sanduíche. Nessa experiência, eles analisaram de que maneira a espessura das camadas determinava como a super-rede se comportava como metal ou como isolante. Ao envolverem o sistema em um campo magnético, eles foram surpreendidos com o aumento da resistência elétrica da super-rede com o aumento do campo magnético. Esse novo efeito de MR , passou a ser conhecido como **efeito maneto-resistência extraordinária** ou EMR ("Extraordinary Magnetoresistance").
- Em 1997, Luiz Carlos Lobato Botelho (1960-) estudou uma representação

de corda Fermiônica para o *Modelo de Ising tridimensional*.

- Em 1998, Solin, J. M. Bennett, J. J. Heremans, D. R. Hines, M. Kawano, N. Oda, M. Sano, T. Thio e T. Zhou construíram uma heteroestrutura de antimoneto de índio e ouro ($InSb - Au$) e, sob um campo magnético de 5 teslas e na temperatura ambiente, mediram uma MR milhares de vezes maior do que qualquer MR até então medida naquela temperatura.
- Em 1999, N. Garcia, M. Munõz e Y. W. Zhao anunciaram a descoberta de uma nova modalidade de MR ("Magnetoresistance"), ao estudarem a resistência de nanocontatos de níquel (Ni), na temperatura ambiente e submetidos a um campo magnético de 100 Oe (cem Oersteds). Como o efeito desse campo é consequência da trajetória balística dos elétrons de condução ao longo do nanocontato (diferentemente do transporte difuso desses elétrons nas outras MR), a MR medida por eles, cerca de 280 por cento maior, passou a ser conhecida como *magneto-resistência balística* ou BMR ("Ballistic Magnetoresistance").
- Em 1999, Klautau, Sergio Benites Legoas (1956-), R. B. Muniz e Frota-Pessôa discutiram o comportamento magnético de camadas finas de cromo (Cr) sanduichadas por ferro (Fe), usando o método $RS - LMTO - ASA$ ("real space - linear muffin-tin orbital - atomic sphere approximation").
- Em 2000, W. Figueiredo e B. C. S. Grandi discutiram os sistemas magnéticos de não-equilíbrio, com uma Hamiltoniana bem definida, no contexto de processos de não-equilíbrio.
- Em 2000, Aurino Ribeiro Filho, R. C. de Miranda Filho, R. S. de Vasconcelos e José Fernando Moura Rocha apresentaram um tratamento Hamiltoniano da *Teoria de Landau-Ginzburg* para a transição de fase de sistemas ferroelétricos do tipo $(NH_4)_2BeF_4$.
- Em 2003, Solin, Hines, A. C. H. Rowe, J. S. Tsai e Y. A. Pashkin começaram a desenvolver nanossensores de campo magnético.
- Em 2004, Klautau e Frota-Pessôa usaram o método $RS - LMTO - ASA$ no cálculo de momentos orbitais e de spin de nanofios finitos de cobalto (Co_n - $n = 1, 3, 5, 7, 9$) sobre superfícies de $Cu(001)$.
- Em 2005, Klautau e O. Eriksson calcularam os momentos orbital e spinorial, bem como a anisotropia cristalina magnética de uma superfície $bcc Co(001)$.