

1- A DESCOBERTA DO FENÔMENO ELÉTRICO

Pode-se estabelecer o início da ciência do eletromagnetismo, como será feito aqui, em algum tempo próximo de 6 séculos antes de Cristo. Credita-se a Tales, da cidade grega de Mileto, uma descoberta curiosa. Quando se atrita o âmbar (por exemplo, esfregando-o no cabelo), percebe-se que ele adquire a capacidade de exercer forças sobre pequenos objetos, como penas (vide vídeo). Esse foi o primeiro fenômeno associado à eletricidade que os humanos se deram conta. Tales foi um dos primeiros filósofos da natureza. Viveu no período de 625 a 546 aC. De acordo com Platão ele teria sido um dos 7 sábios da antiguidade. Tales tinha uma proposta radical a respeito da constituição de tudo. De acordo com Tales todas as coisas seriam feitas a partir da água. O âmbar é uma resina que incorpora insetos no seu interior (vide fig.1). É, ademais, um material muito bonito. Tanto na antiguidade como nos dias de hoje ele é utilizado no fabrico de objetos ornamentais. A descoberta citada acima ficou conhecida por muitos anos como “efeito âmbar”. O efeito âmbar era do conhecimento de Platão, de Aristóteles e de outros sábios da antiguidade. No entanto, não encontramos escritos dessa época que corroborem o crédito que se dá a Tales por tal descoberta.



Figura 1. O âmbar e a eletrização. O início da eletricidade

Para entender o fenômeno da eletrização assista ao Vídeo:

<https://www.youtube.com/watch?v=3l7DcJgNd0>

Hoje sabemos que Tales de Mileto (ou outros curiosos da antiguidade), estava descobrindo as forças elétricas as quais resultam da existência de um dos atributos dos constituintes da matéria denominado carga elétrica. Algo que só tivemos certeza cerca de 2500 anos depois da descoberta do fenômeno da eletrização. No início tal fenômeno foi tratado como sendo uma mera curiosidade, pois de início não se encontrou uma forma de tirar proveito disso. Como resultado, o fenômeno da eletricidade demorou dois séculos até que ele viesse a ser entendido minimamente. E esse entendimento mínimo ocorreu depois do lançamento da obra de William Gilbert, em 1600.

2- A DESCOBERTA DO FENÔMENO MAGNÉTICO

É Interessante constatar que praticamente ao mesmo tempo da descoberta da eletricidade, noutra região da Grécia, ou melhor, numa cidade de nome Magnésia alguns curiosos descobriram um fenômeno de certa forma, parecido com o anterior. No entanto, nesse caso, o fenômeno consistia de que alguns materiais, que hoje chamamos materiais ferroelétricos, (na verdade se tratava de um mineral, um ímã natural), exibiam uma propriedade, do ponto de exercer forças sobre objetos, análoga ao âmbar. Só que nesse caso, como observou William Gilbert, não havia necessidade de atritá-lo. Estes minerais exibiam a propriedade de atrair pequenos pedaços de ferro. Figura 2. A magnetita, ou a pedra-ímã, um ímã natural. Assistir ao Vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=AWYqYbEd-UY>

O comportamento dos ímãs era este sim, do conhecimento de Aristóteles, de Platão e de outros sábios da antiguidade, e aparentemente, também de Tales. Por se comportarem de uma forma diferente dos demais objetos, discutiam se o ímã e o âmbar teriam uma alma. O início do estudo dos fenômenos eletromagnéticos pode ser estabelecido com a descoberta de dois tipos de forças as quais inicialmente eram tratadas indiferentemente, mas que hoje são denominadas elétricas e magnéticas. Poderíamos assim, estimar o início do eletromagnetismo como tendo ocorrido cerca de 600 anos antes de Cristo. As incertezas em relação à data levam, no entanto, a questionamentos.

É curioso constatar que os gregos estavam descobrindo, quase que ao mesmo tempo, o que hoje denominamos propriedades, ou atributos, dos constituintes da matéria. No caso da força elétrica estamos falando de forças exercidas por objetos dotados de carga elétrica. No outro caso, estamos falando de algo que só veio a ser entendido apenas no século XX. Ou seja, que essas propriedades dos materiais ferroelétricos têm a ver com outro atributo constituintes últimos da matéria: o spin

3- A PRIMEIRA APLICAÇÃO DOS FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS

A primeira grande aplicação do eletromagnetismo e que, na avaliação de muitos, foi absolutamente revolucionária, foi uma aplicação desse fenômeno que desaguou na descoberta da bússola. Sua história é repleta de incertezas. Muitas obras creditam a descoberta da bússola aos chineses e isso teria se originado com uma descoberta que ocorreu cerca de 100 anos dC. Não seria na verdade uma bússola, mas se descobriu que um objeto, por exemplo, uma colher, quando constituída a partir de um determinado material, apontava para o sul ou para o norte. Estamos falando aqui do sul e do norte geográficos. É bem provável que isso teria se constituído inicialmente, numa mera curiosidade. A partir daí, demorou algum tempo para que se fizesse um uso prático desse fenômeno. De acordo com alguns relatos, os chineses desenvolveram a bússola e passaram a utilizá-la como instrumento de navegação. Isso aconteceu cerca de 1000 anos mais tarde.



Figura 3: Alguns objetos podem se orientar indicando a direção norte-sul. Seria essa uma versão primitiva da bússola, no caso, do século IV d.C.

O fato é que a bússola acabou passando por uma série de melhoramentos. Por exemplo: é possível encontrar registros que dão conta que cerca de 1300 DC o navegador italiano Flavio Gioia, desenvolveu uma bússola baseada na rosa dos ventos colocada no fundo de uma caixa e sobre ela equilibrou uma agulha magnética sobre um pivô. Isso teria dado a origem às bússolas secas.



Figura 4: Selo comemorativo do feito de Flavio Gioia.

O fato é que a descoberta das bússolas propiciou grandes avanços na navegação marítima. Seu uso se disseminou a partir de iniciativas como a famosa Escola de Sagres. Com o uso das bússolas, as navegações passaram a ser mais seguras. Os marinheiros tinham como se orientar no oceano. Não se tem registro de aplicações do fenômeno da eletricidade ao longo de quase dois mil anos. No entanto, no caso das forças magnéticas logo se descobriu uma aplicação para o que chamamos hoje de magnetismo da matéria.

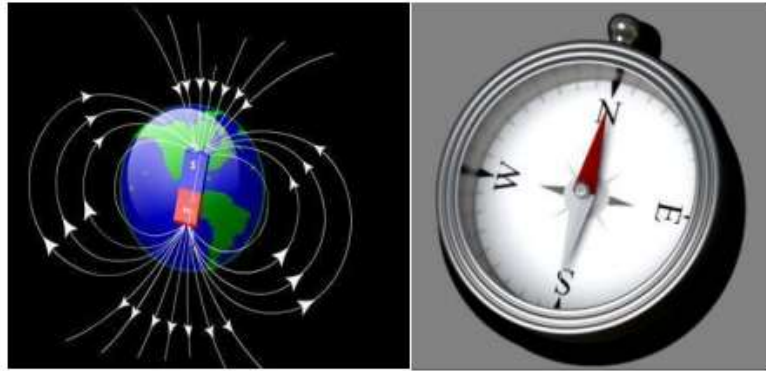


Figura 5: A bússola por conta da existência do campo magnético da Terra.

4- PEREGRINUS E A EPÍSTOLA SOBRE O MAGNETO

Nos primórdios, o magnetismo definitivamente despertara mais interesse do que a eletricidade. Provavelmente, por conta da descoberta da bússola. Por conta do interesse nesse fenômeno, um engenheiro militar francês de nome Petrus Peregrinus publicou, em 1269, uma epístola (ou carta) na qual comunica suas descobertas a respeito do magnetismo. Ou seja, sobre as propriedades da pedra ímã. Essa obra poderia ser traduzida com o título Epístola Sobre o Magneto. A capa de uma das edições está apresentada na figura abaixo.

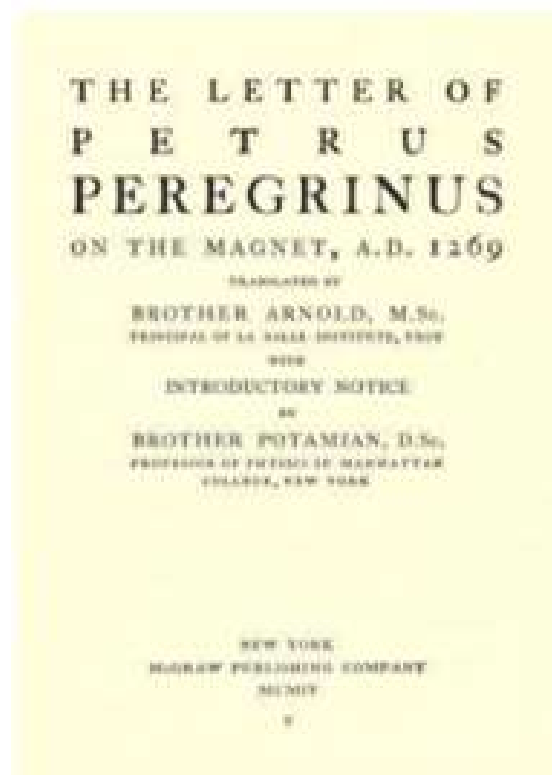


Figura 6: A epístola sobre o magnetismo

Esses estudos levados a cabo por Peregrinus, com bases em experiências, permitiram-no chegar às seguintes conclusões

- 1- A pedra ímã, ou a magnetita, exibia 2 polos. Seriam 2 regiões localizadas diametralmente opostas. Também ele sugeriu alguns meios para identificar esse dois polos. Cada um dos polos, por outro lado, é capaz de atrair pedacinhos de ferro. Além disso, Peregrinos fez outras descobertas importantes.
- 2- Peregrinus verificou que quando colocamos polo norte próximo de outro polo norte ou o polo sul com polo norte, eles apresentavam comportamentos diferentes. Ou seja, ele observou que polos de um mesmo nome se repelem. E polos com nomes diferentes se atraem. Polo sul atrai polo norte. Polo norte repele polo norte. Portanto, Peregrinos se deu conta dessa propriedade bastante relevante dos ímãs, ou seja, ele percebeu algo que só foi entendido mais tarde, que forças magnéticas exercem forças de atração e forças de repulsão. Até esse ponto se sabia de forças elétricas exercendo apenas forças atrativas.
- 3- Peregrinus também descobriu outra propriedade a respeito dos polos, a respeito da pedra ímã, descobriu que quando quebramos uma pedra ímã em duas partes cada uma delas conserva as propriedades de terem dois polos magnéticos. Ou seja, um ímã ao ser quebrado se transforma em dois ímãs. No entanto, essa propriedade a rigor só poderia ser entendida a partir do século XX, por que estamos falando de orientações de spins. Cada pedaço do ímã tem um conjunto de spins orientados numa direção. Então, ao quebrá-lo, cada parte há de continuar sendo magnetizada por conta da magnetização espontânea, uma magnetização permanente, dos ímãs.
- 4- Também percebeu que uma agulha de ferro pode se magnetizar quando ela é atraída ou está próxima dos polos magnéticos da pedra ímã. Teria assim descoberto a possibilidade de termos uma agulha, ou um objeto, ser magnetizada. Logo, ele teria descoberto que os materiais ferroelétricos que não tem um ímã permanente podem adquirir uma magnetização. Claro que isso não fora exposto nessa linguagem.
- 5- Finalmente, ele deu o nome a essas duas regiões, denominadas polo, de norte e sul. Também explica como determinar o polo norte e sul. Para chegar a essa conclusão, Peregrinus colocou um pedaço de madeira flutuante na água de uma tina e nela colocou uma pedra ímã. Observou que ao atingir o repouso ela apontava para o polo celestial norte. O polo celestial norte é determinado pela direção da estrela polar, a qual é visível apenas no hemisfério norte. A esta região da pedra, que apontava para o polo celestial norte, ele deu o nome de polo norte. Ou seja, cunhou as expressões polo norte e polo sul. Na realidade, não é exatamente o polo celestial mas, como sabemos a partir dos trabalhos de Gilbert, em 1600, um ponto próximo do polo geográfico.

5- SOBRE OS DOIS PRIMEIROS MILÊNIOS DO ELETROMAGNETISMO

Os grandes filósofos da antiguidade tinham conhecimento tanto do fenômeno da eletricidade quanto do fenômeno do magnetismo. O fato é que se pode encontrar referências de Aristóteles a Tales de Mileto. Aristóteles deixou uma obra que hoje foi condensada em dois grandes volumes. Os sábios na antiguidade desenvolveram uma teoria a respeito do âmbar e da pedra ímã porquanto eles tinham a capacidade, a habilidade de atrair outros objetos. Consequentemente tinham alguma coisa de diferente em relação aos demais objetos, aos demais materiais. Logo discutiam a possibilidade de que tanto o âmbar quanto o ímã terem uma alma.

Por muito tempo, esses fenômenos, que poderíamos denominar fenômenos eletromagnéticos, não passavam de uma curiosidade. Sem dúvida, eram fenômenos interessantes. No entanto, assim como no caso da força mais comum (a força gravitacional), o entendimento da origem dessas forças só foi alcançado no século XX. Os agentes responsáveis pelas forças elétricas, os elétrons e os prótons, só foram plenamente identificados no início do século XX. Entender o spin e seu papel no entendimento dos materiais ferroelétricos demorou um pouco mais. Exceto pela obra de Peregrinus não se tem registro de estudos acurados, minuciosos, do magnetismo ou da eletricidade, ao longo de mais de 2000 anos. Ou seja, ao que consta, não aconteceram grandes descobertas relativas ao fenômeno da eletricidade e do magnetismo. No caso do magnetismo podemos destacar uma aplicação que para muitos seria um avanço considerável, que é a descoberta da bússola. Isso do ponto de vista das navegações. Ou seja, durante 2000 anos fizemos muito pouco progresso em relação às duas ciências. Durante mais de 2000 anos entendia-se as forças elétricas como forças de atração apenas. Nesse aspecto elas tinham algo em comum com o magnetismo. A possibilidade de haver forças repulsivas veio a ser registrada bem mais tarde. Além disso, durante muito tempo se pensava nos 2 fenômenos como sendo praticamente idênticos. Além disso, havia até mesmo uma mística em torno, tanto do âmbar quanto da pedra ímã. A esse propósito podemos chamar a atenção para o fato de que se conheciam poucos materiais como o âmbar.

6- WILLIAM GILBERT E O DE MAGNETE

No contexto da evolução histórica do eletromagnetismo, deve-se chamar a atenção para uma obra importantíssima. Trata-se de uma coletânea de 6 livros que William Gilbert, um médico da rainha da Inglaterra, publicou. Essa coletânea tinha o título de “De Magnete” (Sobre o Magneto), foi escrita em latim que era a língua culta da época. Esse livro foi publicado em 1600. É curioso notar que, quer seja uma coincidência ou não, o livro trata daqueles dois principais fenômenos descobertos na antiguidade. Claramente, pelo título, se percebe que a ênfase está no magnetismo. No entanto, o tratado aborda as duas ciências.



Figura 7. O De Magnete, a grande obra de Gilbert

Até a obra revolucionária de William Gilbert, se conhecia poucos materiais exibindo as propriedades do âmbar e da pedra ímã (a magnetita). Além dessas duas se conhecia, àquela época, apenas o azeviche e o diamante. Gilbert ampliou, realizando experiências, o conjunto de materiais exibindo a eletricidade. Como explicar esses fenômenos? Durante muito tempo prevaleceram as ideias de Aristóteles, o aristotelismo. Conseqüentemente, durante milênios ideias místicas como a de terem alma, ou a ideia de eflúvios, eram as únicas teorias prevalecentes. Coube a William Gilbert desqualificar essas teorias. Para tal, se baseou apenas em dados empíricos. Sua obra marcou época. Empregava um novo método, baseado na experimentação. Era uma obra baseada em experiências e cheia de ilustrações. O segundo volume era dedicado, em parte, à eletricidade. Os demais, como antecipa o título, foram dedicados ao magnetismo e considerações cosmológicas. William Gilbert é considerado o fundador da ciência do magnetismo. Mas poderia se dizer também que ele foi o fundador da ciência da eletricidade pois, na sua grande obra, ele dedica um dos capítulos, o capítulo 2, e parte do capítulo 1, do livro 2 ao fenômeno da eletricidade. Gilbert teve um papel fundamental, portanto, no entendimento de vários aspectos tanto da ciência da eletricidade quanto da ciência do magnetismo. Por exemplo, ele foi o primeiro a estabelecer uma diferenciação entre a eletricidade e o magnetismo. Também fez uma revisão daquilo que se sabia a respeito das duas ciências. Em particular confirmou os relatos, e as descobertas, de Petrus Pelegrinus. Mas ampliou, e muito, as descobertas relativas ao magnetismo. Gilbert estabeleceu com clareza a diferença entre a eletricidade e o magnetismo. Ou seja, entendeu que, com base naquilo que se conhecia até então, as duas ciências são distintas, uma vez que eram baseadas em fenômenos que não podem ser relacionados um ao outro. Até esse ponto ele estava coberto de razão.

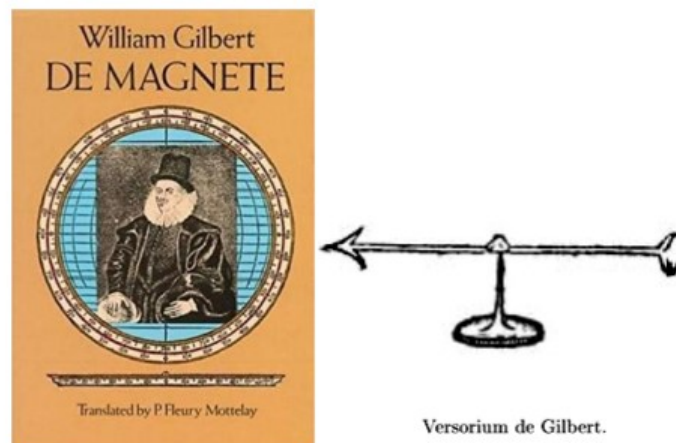


Figura 8. William Gilbert e seu versorium.

Ele nos brindou com o primeiro instrumento do eletromagnetismo ao qual dera o nome de versorium. Mediante o uso deste instrumento poderíamos saber se um objeto está ou não eletrizado. William Gilbert também produziu uma “terrella” que era um modelo para o globo terrestre.

Vídeo: magnetismo da Terra

<https://www.youtube.com/watch?v=EHSJ46zPyU>

Para construir uma Terrella basta colocar no interior de uma esfera um ímã, com 2 polos é exatamente um modelo que é muito útil para descrever o magnetismo terrestre. A preocupação

dele era entender o magnetismo terrestre. No seu *De Magnete* (sobre o primeiro no “elektron” (no âmbar). Com isso Gilbert cunhou a palavra elétron. Assim, pelas mãos de Gilbert, e depois de cerca de 2000 anos o estudo da eletricidade e do magnetismo havia sido retomado. A obra de Gilbert avançou consideravelmente o entendimento de vários aspectos do magnetismo, com particular atenção para o magnetismo terrestre. Para ele a Terra seria uma grande pedra imã, um grande magneto. Formulou, portanto, uma teoria do magnetismo terrestre. Afirmou ele: “O próprio globo terrestre é um grande imã” Pode-se até mesmo creditar a Gilbert a ideia de linhas de campo. A figura 9 indica que, intuitivamente, ele entendeu esse conceito.

Entendeu que as propriedades do espaço no entorno de uma pedra imã são alterados por ela. A essa propriedade denominou “*orbis virtutis*”. Com isso antecipou o conceito de campo magnético.

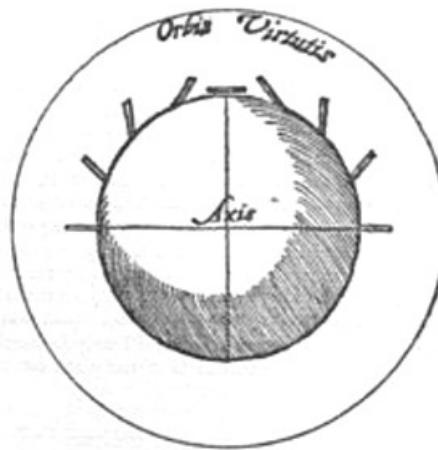


Figura 9. O conceito de *Orbis Virtutis* e as linhas de campo.

7- 200 ANOS DE ESTUDO DA ELETRICIDADE

Um novo ciclo se inicia com a obra de Gilbert. A publicação da sua obra ressalta uma fase marcada pelo interesse no magnetismo que, ademais se mostrara muito mais útil. No entanto, depois de Gilbert, e por cerca de 200 anos, o fenômeno da eletricidade passou a ser de um interesse muito maior do que o fenômeno do eletromagnetismo.

Poderíamos iniciar esse ciclo no ano de 1600, e encerrá-lo com a descoberta da pilha, descoberta essa feita por Alessandro Volta. Com ela se inicia um novo ciclo.

O que fez a diferença, a partir de 1600, em relação às duas ciências foi à concepção e utilização das máquinas elétricas, ou máquinas eletrostáticas. Com elas, o efeito da geração de campos elétricos, ganha uma nova dimensão. Ou seja, quando temos muitas cargas elétricas podemos gerar campos intensos e, com isso, gerar efeitos lúdicos, assustadores e interessantes.

Por exemplo, o conde Von Guericke fez uma demonstração que parecia uma mágica. Primeiramente, atritava uma esfera. A seguir depositava uma penugem sobre ela. Ao entrar em contato com a esfera, adquiria carga elétrica de mesmo sinal (eletrização por contato). Com isso, a penugem era repelida e, conseqüentemente, flutuava. Essa experiência apareceu no seu livro “*Novas Experiências de Magdeburg sobre o Espaço Vazio*”. Foi publicado em 1672, e escrito em Latim, a língua das pessoas cultas.



Figura 10. Experiência de Von Guericke, publicada em seu livro do ano de 1672. A precursora das máquinas elétricas está na segunda parte da figura.

A primeira máquina eletrostática surgiu em 1666. Na figura abaixo, apresentamos este instrumento.



Figura 11. A primeira máquina elétrica, construída por Hauksbee.

Elas foram evoluindo, proporcionando voltagens cada vez maiores. Na figura abaixo, apresentamos uma dessas máquinas.

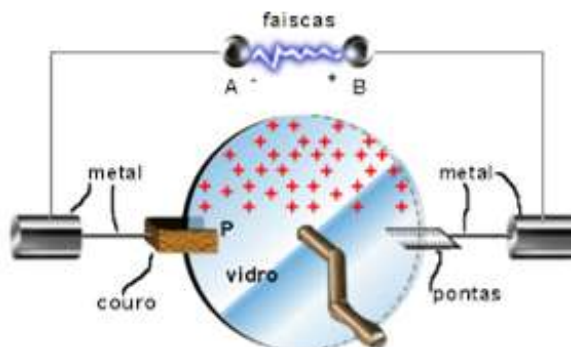


Figura 12. Máquinas elétricas como essa, fizeram toda a diferença em relação ao desenvolvimento da eletricidade.

Note-se que elas geram faíscas. Muitos se sentiam atraídos pelo fenômeno. Outros faziam espetáculos com os fenômenos elétricos.

O choque foi um efeito que alguns se deram conta a partir da descoberta das máquinas elétricas. Muitos queriam se submeter a ele. Parecia, a alguns, como se fora uma brincadeira. De qualquer forma era algo inusitado.

O fato é que com o passar do tempo, o interesse pelos fenômenos elétricos cresceu a olhos vistos. Muitos cientistas passaram a se ocupar do tema.

8- CARGA ELÉTRICA

“Em 1729 um cientista inglês de nome Stephen Gray, comunicou á Royal Society sua teoria de que os corpos podem desenvolver uma “virtude elétrica”, e que essa virtude pode ser transmitida a outros corpos. Essa parece ter sido a primeira sugestão no sentido de introduzir o conceito de carga elétrica.

Charles-François Dufay, em meados do século XVIII, introduziu a ideia de que a eletricidade seria constituída de dois tipos de fluidos. Um objeto não eletrizado possuía quantidades iguais dos dois fluidos. Atrito poderia remover um tipo de fluido de um objeto. Quanto mais fluido fosse removido, maior seria o efeito de atração entre os corpos. Pode-se creditar a ele a ideia de dois tipos de cargas.

Benjamim Franklin defendia, em 1750 a existência de apenas um tipo de fluido. Num processo de eletrização o material ou ganha (um estado positivo) ou perde esse fluido (um estado negativo). Com isso estava sugerindo também a conservação da quantidade total do fluido. Franklin introduziu os conceitos de cargas positivas e negativas a partir de algo que fluía. Ampère, em 1826, descrevia a corrente elétrica em termos de movimentos de dois tipos de cargas elétricas (não utilizando, no entanto, esse termo). Preferia utilizar a palavra eletricidade. No entanto, falava em eletricidade positiva e eletricidade negativa.

A determinação do valor da carga elétrica do elétron só aconteceu um pouco mais de 150 anos depois.

9- MATERIAIS CONDUTORES E ISOLANTES

Gray foi o primeiro cientista a atribuir aos metais e outros condutores a propriedade de atrair corpos leves colocados em suas proximidades, fenômeno que atualmente é conhecido como indução ou polarização elétrica. Em 1731 estabeleceu, com base nos comportamentos em relação à eletrização, a diferença entre condutores e isolantes.

Ademais, descobriu a eletrização por indução. Descobriu, portanto, um novo tipo de efeito âmbar.

Du Fay recebe o crédito parece ter percebido que existem dois tipos de cargas elétricas, o que ele denominava dois tipos de fluidos. Isso em 1733.

Em seguida, gostaríamos de destacar a introdução das séries triboelétrica por Wilcke e Wilson.

10- ARMAZENANDO CARGAS ELÉTRICAS

Outra grande descoberta foi feita por três pesquisadores, e de forma independente, no ano de 1745. Desenvolveram um dispositivo visando a armazenar cargas elétricas. Naquela época eles não se referiam à carga elétrica e sim à eletricidade. Mas o que eles estavam fazendo é armazenar cargas elétricas porque a garrafa de Leyden (em homenagem à cidade na qual a descoberta aconteceu) nada mais é do que nós chamamos hoje de capacitor. Nesses dispositivos temos condições de armazenar cargas elétricas. Com isso armazenamos energia também.

O curioso é que eles se deram conta do risco a que estavam expostos. Perceberam que quando tocavam em algumas partes do aparelho, no qual guardavam a garrafa de Leyden, eles experimentavam um choque. E este passou a ser alvo de curiosidade.

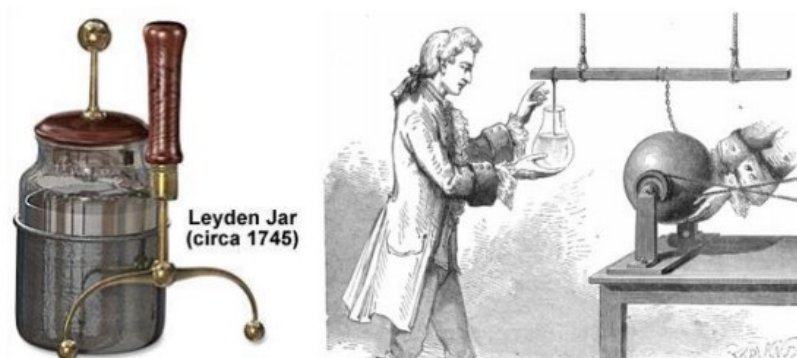


Figura 13. A garrafa de Leyden.

11- FRANKLIN E A ELETRICIDADE DAS TEMPESTADES

O próximo passo importante a destacar, é o trabalho de Benjamim Franklin, agora nos Estados Unidos. Franklin percebeu a existência de dois tipos de cargas elétricas: cargas positivas e cargas negativas. A descoberta das cargas positivas e negativas aconteceu no ano de 1750. Em 1752 deu uma grande contribuição ao perceber, mediante a realização de uma experiência com a pipa, que se tornou famosa. Ele se deu conta de que os raios de uma tempestade têm uma natureza elétrica. Foi uma grande descoberta. Uma experiência de alto risco, mas procurou minimizá-lo.



Figura 14. A famosa experiência de Franklin.

Assim, até o ano de 1770, o que se sabia da eletricidade poderia ser resumido assim:

1. Existem dois tipos de eletricidade
2. A eletricidade se conserva
3. Existem materiais isolantes caracterizados pela demora em perderem a eletrização
4. Existem materiais condutores caracterizados pela rapidez com que perdem a condição de corpo eletrizado
5. As forças tanto podem ser de atração, como no caso do âmbar, quanto de repulsão.

12- DESCOBRINDO AS CARACTERÍSTICAS DAS FORÇAS ELÉTRICAS

Coulomb desempenhou um papel, no sentido de entender a força elétrica, análogo ao de Newton no entendimento da força gravitacional. Coulomb foi capaz de entender o comportamento das forças que surgem entre objetos dotados de carga. Esse feito ele conseguiu através da utilização de um aparato experimental conhecido como “balança de torção”. A Balança de Torção foi criada no ano de 1777 por Charles-Augustin de Coulomb como um equipamento voltado para a medida de forças muito fracas. A balança consiste de duas bolas metálicas localizadas nas extremidades de uma barra isolante.

Essa barra pode experimentar um movimento de rotação porquanto tal barra está suspensa por um fio no meio da barra. Um movimento de rotação qualquer vai provocar um deslocamento angular, por um valor do ângulo de torção que será medido. Para se comparar forças, basta comparar o valor dos ângulos associados a uma dada torção da barra.

Para medir a força eletrostática usando a balança de torção devemos eletrizar as duas bolas na extremidade e em seguida aproximarmos de uma delas uma terceira bola. De preferência, a terceira bola deve ter uma carga elétrica comparável aquela das outras duas bolas. Dependendo do sinal das cargas elétricas teremos uma aproximação ou um afastamento das bolas cuja magnitude será proporcional ao deslocamento angular.

A lei de Coulomb estabelece as características das forças entre duas cargas puntiformes. É uma lei análoga à lei da gravitação universal de Newton, a qual determina a intensidade, a direção e o sentido da força entre dois corpos puntiformes dotados de massa. Esta é uma lei inferida a partir da experimentação. Seu arranjo experimental é esboçado na figura abaixo:

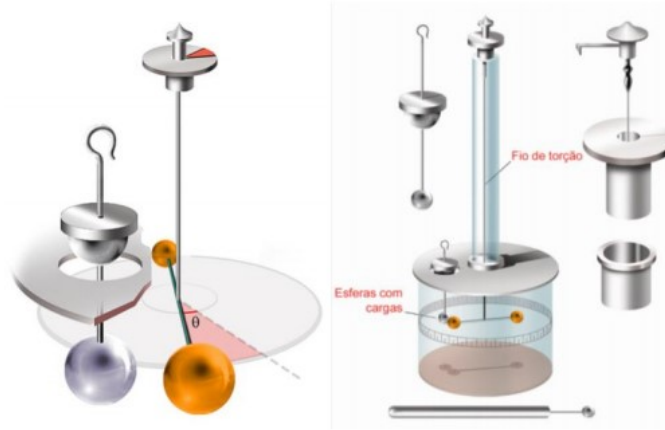


Figura 15. Balança de torção: a aproximação de uma terceira bola carregada provoca o deslocamento das outras duas. Esquema do aparato experimental idealizado por Coulomb.

As forças tanto podem ser repulsivas (para partículas de cargas iguais), quanto atrativas (quando as cargas são diferentes). Essa é outra coisa não entendida. Por que dois tipos de cargas: cargas positivas e cargas negativas.

De acordo com Coulomb, as características da força elétrica, força essa que surge entre duas partículas de cargas q_1 q_2 , são as seguintes:

1. As forças elétricas podem ser atrativas ou repulsivas. Tudo depende de uma característica das cargas elétricas conhecida "sinal da carga" elétrica. Conclui-se assim que as cargas elétricas existem em duas grandes variedades: cargas positivas e cargas negativas (ou seja, as cargas têm sinal positivo ou sinal negativo). Partículas de cargas iguais se repelem. Partículas de cargas diferentes se atraem.

Ressalte-se aqui a grande diferença entre a força gravitacional e a força elétrica. As forças gravitacionais são sempre atrativas. Não faz sentido, portanto, falar em massas positivas e massas negativas

2. A direção da força elétrica é aquela de uma reta que passa pelas duas partículas
3. O sentido da força depende do caráter atrativo ou repulsivo das forças.
4. A intensidade da força elétrica é diretamente proporcional às cargas dos objetos. Ou seja, quanto maior as cargas dos objetos, tanto maior será a força de atração (ou de repulsão) experimentada por eles.

13- LUIS GALVANI E A ELETRICIDADE DOS SERES VIVOS

Em torno do ano de 1790 Luis Galvani, um professor de anatomia na Bolonha, realizou algumas experiências curiosas, as quais impulsionaram uma nova era na ciência, a qual passou a denominar biofísica.

Ele dissecava uma rã, mas o fazia quando estava próximo de uma máquina elétrica Ele cortou ao meio uma rã, ficando com a metade do tronco e as pernas. Em seguida, pôs a nu os nervos lombares. Descobriu que as centelhas da máquina provocavam a contração das pernas da rã.

Depois, fazendo uso de um arco metálico (constituído por dois metais: zinco e cobre) com uma extremidade tocava os nervos lombares, e com a outra, um músculo da perna ou da coxa. A cada contacto, os músculos se contraíam, como se a rã estivesse viva (figura 16). Galvani atribuiu o fenômeno a uma eletricidade que supôs existir na rã. Lançou a ideia de que todo corpo animal possui eletricidade.



Figura 16. Esquema do experimento de Luis Galvani.

14- ALESSANDRO VOLTA E A PILHA

Depois das descobertas de Galvani, Volta realizou experiências com rãs e sapos. Observou que, quando usava um arco de um único metal, em vez de usar dois metais, as contrações musculares eram muito mais intensas. Com isso, começou a atribuir maior importância aos metais do que à rã. Abandonou as ideias de Galvani, e fez as seguintes hipóteses:

1a) que a origem da eletricidade não era o corpo do animal, mas o contacto dos dois metais diferentes com esse corpo.

2a) que o corpo da rã atuava como condutor, e ao mesmo tempo funcionava como um eletroscópio muito sensível. Depois dessas primeiras investigações, Alessandro Volta passou a pesquisar somente com metais e soluções. Até que, em 1.800, chegou à invenção da sua famosa pilha.

Assim, em 1800, Alessandro Volta descobre o primeiro gerador e isso foi fundamental para as pesquisas que aconteceram em seguida. Esse primeiro gerador recebeu o nome de “pilha de volta”. Com isso, os cientistas dispunham agora de uma forma de gerar corrente elétrica. Como diríamos na linguagem de hoje, passamos a adquirir a capacidade de colocar os elétrons em movimento de elétrons que, aliás, é o agente central do eletromagnetismo. A partir daí passamos a nos interessar pela eletrodinâmica. Nome adotado a seguir por vários cientistas.



Figura 17. Alessandro Volta e sua pilha.

Volta entendia, acertadamente, que a corrente elétrica seria algo análogo ao que aconteceria no processo de descarga de uma garrafa de Leyden. A descoberta da pilha dá início a um novo ciclo de descobertas. Alguns se referem a essa descoberta como sendo uma das mais importantes da história das ciências. Afinal, nos dias de hoje, os aparelhos que nos proporcionam comodidade são movidos a energia elétrica.

15- A ELETRICIDADE E O MAGNETISMO SÃO INTERLIGADOS: OERSTED

Em 1819, Oersted descobriu uma coisa curiosíssima. Quando se fazia passar a corrente elétrica ela conseguia influenciar ímãs. Agora temos algo inusitado, uma vez que ele estava tratando de uma inter-relação entre eletricidade e o magnetismo.

Hans Christian Oersted era professor na Universidade de Copenhague quando, em 1819, decidiu dar uma aula de demonstrações. A ideia era demonstrar o aquecimento de um fio resultante da passagem de uma corrente elétrica e fazer algumas demonstrações do fenômeno do magnetismo. Para isso, dispunha de uma bússola e uma pilha para produzir a corrente elétrica. Na plateia havia alguns alunos e amigos.

Ao realizar as demonstrações, notou que quando a bússola ficava disposta paralelamente ao fio, então quando no fio se estabelecia uma corrente elétrica (ao iniciar a corrente, portanto), a bússola se movimentava á procura da direção perpendicular ao fio (vide figura 18). Por outro lado, se ela já estivesse nessa posição originalmente, nada acontecia.

Ora, uma agulha magnética, suspensa pelo seu centro de gravidade, só entra em movimento quando está em um campo magnético. O deslocamento da agulha só se explica pela formação de um campo magnético em torno do condutor percorrido por corrente elétrica. Foi essa a primeira vez que se observou o aparecimento de um campo magnético como resultado de uma corrente elétrica.

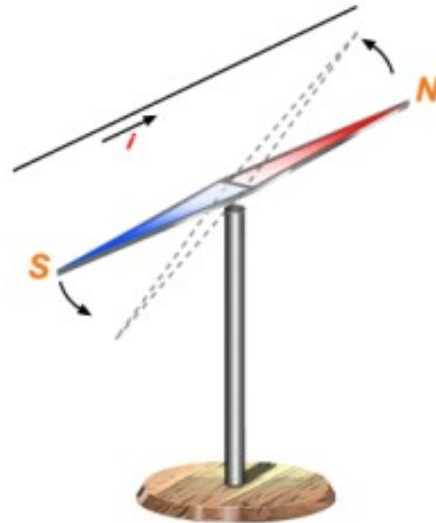


Figura 18. A experiência de Oersted.

Com essa experiência pioneira, ficava estabelecida pela primeira vez uma relação entre os fenômenos elétricos e magnéticos.



Figura 19. Hans Oersted.

16- AMPÉRE E SUA DESCOBERTA

Tendo tomado conhecimento da descoberta de Oersted, Andre-Marie Ampère decidiu realizar experiências envolvendo a passagem da corrente elétrica. Verificou experimentalmente que dois fios dispostos paralelamente um em relação ao outro, experimentam a ação de forças. As forças têm duas características interessantes:



Figura 20. Ampère.

1- Se as correntes tiverem o mesmo sentido, os fios experimentam uma força de atração. No entanto eles se repelem se as correntes tiverem sentidos opostos.

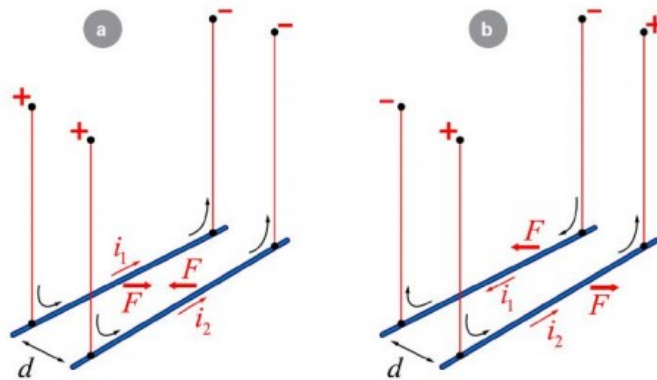


Figura 21. A Experiência de Ampère.

2- A força tem uma intensidade tal que ela é diretamente proporcional á intensidade das correntes. A intensidade da força varia com o inverso do quadrado da distancia entre os fios. Portanto, um afastamento produz uma força mais débil e o contrário ocorre quando aproximamos os fios. Esse resultado pode ser resumido, para fios paralelos, pela expressão:

$$F = \frac{KI_1I_2}{R^2} \quad 1.1$$

Onde k é uma constante (dependendo do comprimento dos fios) e R é a distancia entre os fios. I_1 e I_2 são as correntes que passam pelos fios.

A expressão mais geral para forças entre dois fios é mais complicada do que essa.

Ao longo da história, Ampère ficou mais famoso do que Oersted. Isso aconteceu por algumas razões. A primeira é que Ampère dava um tratamento matemático ao fenômeno. Ademais, Ampère estava se dando conta do fato de que, como no caso da experiência de Oersted, a passagem de uma corrente elétrica dá lugar a um campo magnético. Isso ficava igualmente comprovado na experiência de Ampère.

No entanto, Ampère descobriu que o movimento de elétrons pode ser afetado pela presença de um campo magnético na região na qual ele se move. A essa força damos o nome, hoje, de força de Lorentz.

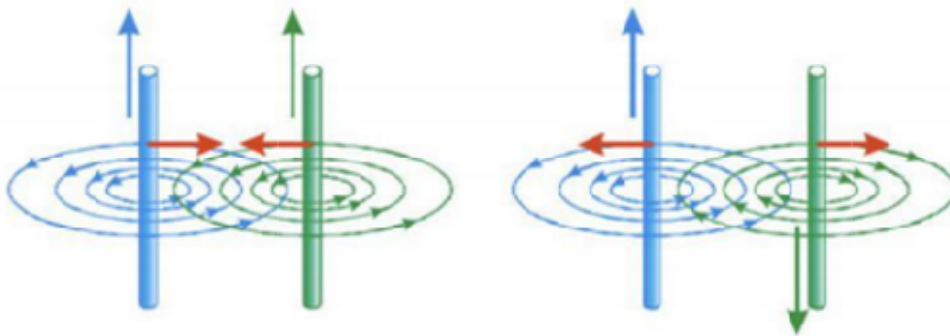


Figura 22. Cada fio gera um campo magnético que influencia o outro.

Até o início do século XIX, pensava-se que os fenômenos elétricos e magnéticos fossem completamente distintos. Ou seja, havia a ciência do magnetismo, cujo grande marco fora o livro “De Magnete”, de William Gilbert (ano de 1600), e a ciência da eletricidade. Esta última se encontrava num estágio mais avançado, pois alguns princípios da eletrostática já eram conhecidos.

Até 1820, tudo que se sabia sobre o magnetismo era o comportamento estranho dos materiais magnéticos e o magnetismo da terra, refletindo-se na orientação das bússolas.

Evidências para que os dois fenômenos tivessem alguma relação eram praticamente inexistentes. Sabia-se, por exemplo, que relâmpagos provocavam alterações no funcionamento das bússolas. No entanto, isso não era suficiente para se estabelecer uma relação segura entre os fenômenos elétricos e magnéticos.

A partir dos trabalhos de Oersted e de Ampère, tudo isso mudou. A partir daí, ocorreu uma unificação das duas ciências. O eletromagnetismo passou a ser a ciência dos fenômenos elétricos e magnéticos, pois como sabemos eles estão inter-relacionados.

17- A ELETRODINÂMICA DE AMPÉRE

Outra contribuição importante de Ampère diz respeito à sua concepção do que seja a corrente elétrica. Ela resultaria do movimento de cargas elétricas. Não exatamente como entendemos hoje. Ele estava certo, no entanto, em relação à análise da dinâmica das cargas em movimento.

Ampère publicou uma obra, em 1826, que se tornou famosa, e bastante polêmica. Trata-se do livro intitulado “Teoria dos fenômenos eletrodinâmicos, deduzidos unicamente a partir das experiências”. Vide capa na figura 23. Nela surge, pela primeira vez, a palavra corrente elétrica que substitui o termo “corrente galvânica” utilizada até então.



Figura 23. Capa do livro de Ampère.

A obra tinha a virtude de expressar o seu conceito sobre corrente elétrica. Para tal, procurava diferenciar fenômenos que resultam de dois conceitos: O conceito de “tensão elétrica” e o conceito de corrente elétrica.

Por fenômenos associados à tensão elétrica ele incluía os fenômenos da eletrostática. Por exemplo, quando cargas de sinal oposto estão separadas por um material isolante. No caso, podemos pensar em corpos eletrizados separados pelo ar.

Os fenômenos associados à corrente elétrica seriam aqueles que ocorrem quando cargas de sinais opostos estão separados, agora por um material condutor.

But when the two bodies, or two systems of bodies, between which the electromotive action takes place are in contact via conducting bodies between which the electromotive action is not equal and opposite to the first so as to maintain the state of electric equilibrium and hence the tensions, these tensions vanish, or at least become very small, and characteristic phenomena occur. Since the arrangement of the bodies between which the electromotive action takes place is otherwise the same, the action doubtless continues, and since the mutual attraction of the two electricities, as measured by the difference between the electric tensions which has become zero, or else is considerably diminished, can no longer balance this action, it is generally accepted that it continues to carry the two electricities in two senses as before; a double current thus results, the one positive electricity and the other negative electricity, moving in opposite senses from the points where the electromotive action takes place to meet again in the part of the circuit opposite these points.

De qualquer forma, na sua eletrodinâmica a corrente elétrica seria o resultado do movimento de cargas de sinais opostos. Ou seja, dois fluxos distintos de cargas elétricas em qualquer ponto no interior do condutor. Um fluxo de cargas positivas, num sentido e um fluxo de cargas negativas no sentido oposto. O sentido da corrente seria no sentido contrário ao do movimento das cargas negativas. É assim que orientamos o sentido da corrente até hoje.

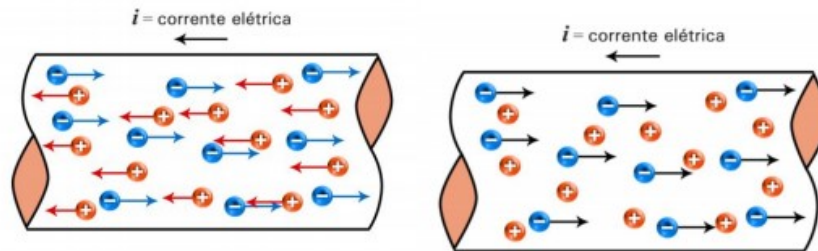


Figura 24. Concepção de Ampère sobre a corrente elétrica e a concepção atual. Utilizava, na sua teoria, as palavras eletricidade positiva e negativa.

Assim, trata-se de entender a dinâmica de cargas elétricas.

18- A LEI DE OHM

Esta é uma das leis mais conhecidas da eletricidade. Foi proposta por Jorge Simon Ohm. A partir de 1822, Ohm se dedicou ao estudo da eletricidade. Além de bom teórico, dispunha de boa cultura matemática, era bom experimental.



Figura 25. Jorge Simon Ohm.

Ohm estabeleceu, teoricamente, a lei que leva seu nome, em 1827. Fez isso a partir de uma analogia com o comportamento de um líquido. Ele entendeu que existe uma semelhança entre a corrente elétrica e o movimento de um líquido num canal. A partir daí equiparou a diferença de potencial ao longo do fio com a diferença de nível no líquido. Ao enunciar sua lei, definiu com clareza o conceito de resistência elétrica de um condutor, exatamente como a concebemos hoje. Além disso, demonstrou que a resistência de um condutor é diretamente proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional à área de sua secção transversal.

19- FARADAY E A DESCOBERTA DE NOVOS FENÔMENOS

Faraday deu grandes contribuições ao eletromagnetismo. A seguir vamos enumerar algumas delas. No entanto, devemos destacar sua descoberta relativa a um novo fenômeno: o fenômeno da indução de campos elétricos mediante a variação de um campo magnético.

20- A ELETRÓLISE

Pouco tempo depois da descoberta da corrente elétrica, alguns físicos observaram que certas soluções são condutoras de eletricidade.

A eletrólise consiste em fazer passar uma corrente elétrica por um composto iônico dissolvido numa solução aquosa. A corrente separa os constituintes do composto em íons positivos e íons negativos. A partir dos seus estudos referentes à eletrólise, Faraday, em 1833, descobriu duas leis importantes relativas ao fenômeno.

Pode-se creditar a Faraday o mérito de ter fornecido as primeiras evidências da existência do elétron. De fato, a partir dos trabalhos de Faraday, em 1833, sobre a eletrólise poder-se-ia suspeitar de uma natureza atômica da eletricidade.

Na primeira lei, Faraday estabeleceu que a quantidade de um elemento que é formado é diretamente proporcional à intensidade da corrente que passa através da solução aquosa. Na segunda lei, Faraday notou que os pesos das substâncias depositadas pela passagem da mesma corrente são proporcionais às suas valências químicas.

A partir dessas leis, Faraday concluiu que a quantidade de eletricidade no processo de eletrólise está associada ao átomo de cada uma das substâncias líquidas. Faraday chamou de íons os transportadores de carga e a eles associou um átomo ou conjunto de átomos. Os íons seriam os “átomos” de eletricidade. Os íons de carga negativa dirigiam-se para o anodo ao passo que os de carga positiva se dirigiam para o cátodo.

Assim, na visão de Faraday, os íons seriam os transportadores de certa quantidade de eletricidade.

21- LINHAS DE CAMPO

Faraday merece o crédito pela ideia das linhas de campo, ou linhas de força. Entendeu que os atributos dos constituintes são capazes de gerar uma alteração no espaço ao seu redor. A essa alteração associamos a ideia de campo. As linhas de campo são uma forma de representar os campos. Em relação a isso, ele foi claro,

“By magnetic curves, I mean the lines of magnetic forces, however modified by the “juxtaposition” of poles, which could be depicted by iron fillings; or those to which a very small magnetic needle would form a tangent.”

22- FENÔMENOS DA INDUÇÃO

Apesar de outros pesquisadores estarem, naquela época, investigando o fenômeno, credita-se a Michael Faraday a descoberta, experimental, da indução eletromagnética no ano de 1831

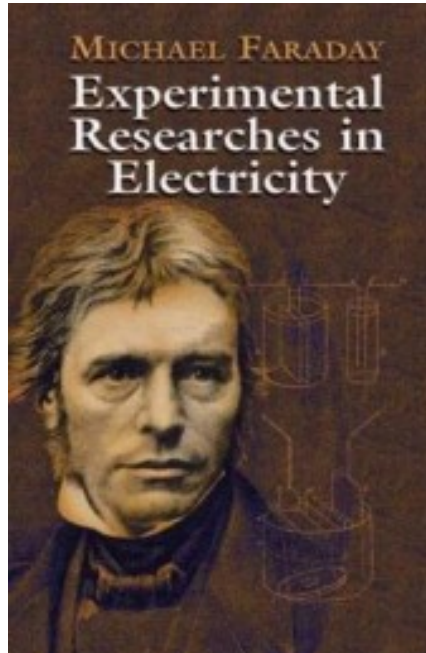


Figura 26. O livro de Faraday: relatando, basicamente, pesquisas experimentais.

As experiências de Faraday eram simples.

Numa delas, ele colocou duas bobinas próximas uma da outra. Em seguida fez passar uma corrente por uma delas. Notou que, ao abrir e fechar o circuito nessa bobina surgia uma corrente na outra. Dedicou-se ao tema ao longo de muitos anos tendo realizado experiências envolvendo a indução provocada por ímãs, além de bobinas.

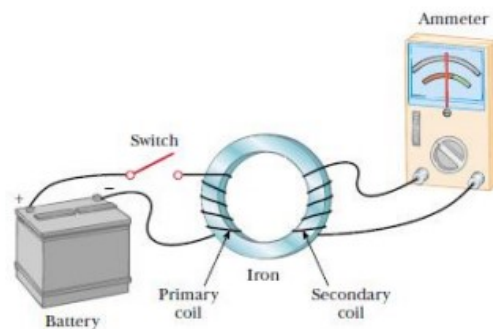


Figura 27. A experiência apontando para o novo fenômeno da indução de campos, o qual leva à indução de correntes.

Coube a ele a construção do primeiro gerador, conhecido como “Disco de Faraday” (um gerador homopolar). O disco era feito de cobre e girava entre os polos de um magneto com a forma de uma ferradura.

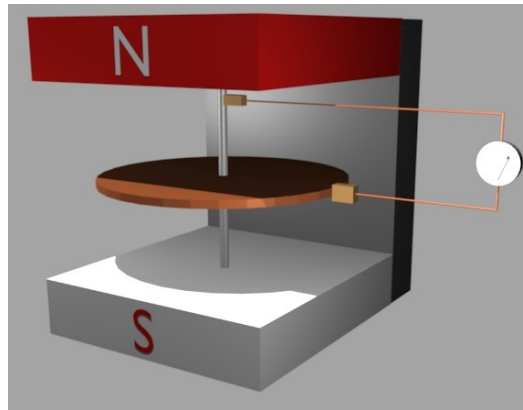


Figura 28. Faraday descobriu também um novo mecanismo de indução de correntes.

Faraday descobriu, com sua experiência, que se pode gerar uma tensão nas extremidades de um condutor elétrico quando esse se move em determinadas direções em relação a um campo magnético.

Friedrich Emil Lenz deu outra contribuição significativa no entendimento do fenômeno ao estabelecer um critério para se estabelecer o sentido da corrente elétrica induzida. Tal critério acarreta, na verdade, a determinação do sinal num dos membros da equação de Maxwell.

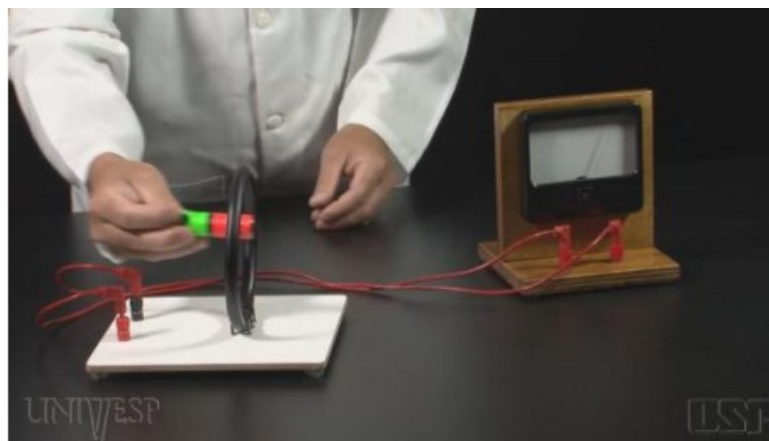


Figura 29. Ilustrando o fenômeno da indução de forma simples.

Logo depois da descoberta da indução houve uma corrida para se construir os precursores dos Dínamos, que são geradores de eletricidade cuja geração está ligada à variação do fluxo de campos magnéticos. Os primeiros geradores eram muito ineficientes. Até então, assim como certo tempo depois, a corrente elétrica era fornecida pelas pilhas. A viabilidade prática de tais dispositivos, e a fabricação de dínamos em larga escala, só veio a acontecer depois de 1866.

23- O ELETROMAGNETISMO BÁSICO EM 15 ANOS

A metade dos fenômenos fundamentais do eletromagnetismo foi descoberta num período de 15 anos, aproximadamente. Foi o período mais fértil da história dessa ciência. A partir dessa fase a física iria exercer uma influência profunda no *modus vivendi* da humanidade. Durante esse período tivemos as seguintes descobertas

1- Cargas elétricas em movimento geram campos magnéticos

A primeira grande aplicação da descoberta de Oersted foi feita três anos mais tarde, por Dominique François Arago e Joseph Luis Gay-Lussac. Agora as aplicações dão uma nova relevância para o eletromagnetismo.

Arago e Gay-lussac observaram que quando se faz passar uma corrente por um condutor enrolado numa barra de ferro, esta se imantava: estava, pois, inventado o eletroímã.

No mesmo ano, André Marie Ampère descobriu que um solenoide atua como um ímã. Ou seja, entendeu que cada espira produz um campo magnético semelhante ao campo de um ímã.

Posteriormente, Jean Baptiste Biot e Felix Savart descobriram, ao mesmo tempo, e independentemente um do outro, a lei que leva seus nomes. Nela encontramos formas de determinar o campo magnético uma vez conhecidas as densidades de correntes ou correntes elétricas que lhe dá origem. Essa lei é escrita sob a forma de integrais.

2- Cargas elétricas sob a ação de um campo magnético experimentam forças.

23.1 MOTORES E GERADORES

A principal aplicação do fato de que quando sob a ação de campos magnéticos um condutor experimentará uma força, a força de Lorentz, são os motores elétricos e os geradores. Os motores são assim definidos:

Motores são dispositivos que servem para colocar um corpo em movimento, utilizando-se para tal, campos magnéticos e correntes elétricas.

Geradores, por outro lado, são dispositivos que utilizam essa força, a força de Lorentz, para colocar elétrons em movimento, gerando correntes.

Geradores são dispositivos que, mediante a ação de campos elétricos nele gerados, são capazes de movimentar elétrons, ou cargas elétricas, gerando uma corrente elétrica.

As forças elétricas capazes de impulsionar elétrons são originárias de apenas três fenômenos:

- 1- Forças elétricas associadas a diferenças de potencial entre os terminais de um gerador (caso das pilhas).
- 2- Força de Lorentz.
- 3- Força elétrica resultante da indução de campos.

23.2- MOTOR ELÉTRICO: A RODA DE BARLOW

A primeira versão do motor elétrico movido a corrente contínua, foi a roda de Barlow.

Trata-se de uma roda metálica dentada, suspensa por um eixo horizontal, cujos dentes submergem no mercúrio contido numa cuba C (figura 30). A roda fica colocada entre os polos de um ímã, de maneira tal que o campo magnético seja perpendicular à roda. A corrente i , fornecida por um gerador, percorre a roda segundo um raio do círculo, e passa através do mercúrio da cuba C, pois os dentes que estão em contato com mercúrio fecham o circuito.

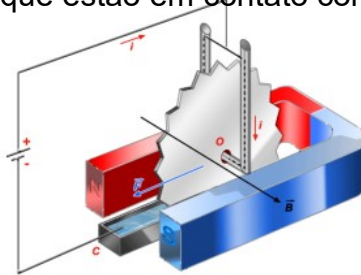


Figura 30. A roda de Barlow.

A roda de Barlow é, no sentido mais amplo da palavra, um exemplo de motor elétrico. Pois se trata de um dispositivo que utiliza corrente elétrica e campo magnético para obter o movimento (em geral circular) de algum corpo.

3- O fenômeno da indução de campos elétricos

Michael Faraday descobriu, como apontado antes, o fenômeno da indução de correntes. Dois mecanismos para indução da corrente. Agora percebemos que existe uma maior inter-relação entre eletricidade e magnetismo, uma vez que basta o campo magnético variar com o tempo que ele há de dar origem a um campo elétrico. Foi essa, sem dúvida, uma das grandes descobertas de Faraday.

A outra descoberta está associada à força de Lorentz. É quando surge uma força eletromotriz por conta do movimento de um condutor numa região na qual temos um campo magnético.

As duas descobertas são expressas em termos de uma única lei, a qual é denominada lei da indução eletromagnética.

24- O EFEITO JOULE

Em dezembro de 1840, James Prescott Joule anunciou à Royal Society, que calor pode ser gerado pela passagem de uma corrente num condutor. Joule foi o primeiro a estabelecer a equivalência entre energia e o calor. Por essa razão, a unidade de energia no SI recebe o nome de Joule e que é representada pela letra J.



Figura 31. James Prescott Joule.

A partir de experiências, Joule inferiu que a quantidade de calor gerada quando da passagem de uma corrente elétrica é diretamente proporcional tanto à resistência do condutor, quanto ao quadrado da intensidade da corrente. Essa relação entre é conhecida hoje chamada lei de Joule. Esse efeito, relativo à liberação de calor num resistor, é também conhecido como efeito Joule.

25- CIRCUITOS ELÉTRICOS E AS LEIS DE KIRCHHOFF

Os circuitos elétricos tiveram uma enorme utilidade nas nossas vidas. O primeiro estudo dos circuitos foi feito por Gustav Robert Kirchhoff. Em 1845, ele estabeleceu as suas famosas leis para circuitos elétricos. Numa delas fica explícita a lei de conservação da carga elétrica. Na outra, a conservação da energia.

As leis de Kirchhoff são voltadas para a determinação das relações de correntes e tensões para circuitos contendo dois, ou mais elementos. Cada elemento é assumido como estando conectado, em qualquer um de seus dois terminais a outro elemento. Fios condutores são usados para conectar os terminais de um elemento do circuito a outro elemento.

Denominamos nó uma conexão, ou junção, de fios condutores. Um caminho fechado é um percurso aquele se inicia em um terminal de um circuito atravessando-o, passando por vários nós e retornando ao ponto de partida. Um caminho fechado é também denominado malha do circuito.

A primeira lei de Kirchhoff estabelece que a soma algébrica das correntes num nó arbitrário se anula. Isto é, se num determinado nó temos n fios condutores, cada um deles conduzindo uma corrente, temos:

$$\sum_{i=1}^n i_i = 0 \quad 1.2$$

Onde i_j é a corrente elétrica no j -ésimo fio condutor.

Essa lei pode ser entendida a partir do princípio da conservação da carga elétrica, pois uma vez que cargas não se acumulam nos nós, as cargas no mesmo saem à mesma taxa com que ali chegam.

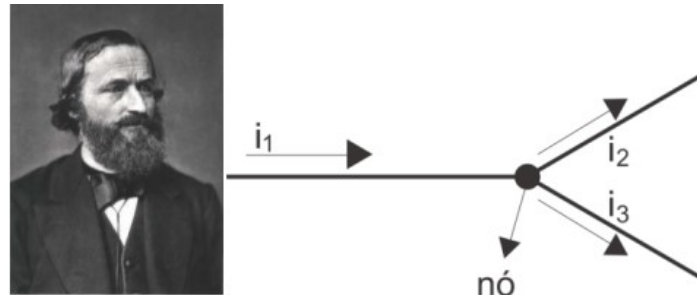


Figura 32. Kirchhoff e ilustração de uma das suas leis.

26- JAMES CLERK MAXWELL

Maxwell, em 1864, fez outra descoberta inovadora. A saber, que um campo elétrico variando com o tempo dá lugar a um campo magnético. É uma espécie de efeito oposto aquele que fora descoberto por Faraday. É, portanto, um fenômeno associado à indução de campos. Maxwell incorporou ao eletromagnetismo uma nova lei, lei essa voltada para descrever esse novo fenômeno de indução. Essa nova lei acabou levando a uma alteração da lei de Ampère, à qual se acrescenta mais um termo voltado para descrever a indução. Esse acréscimo é denominado corrente de deslocamento.

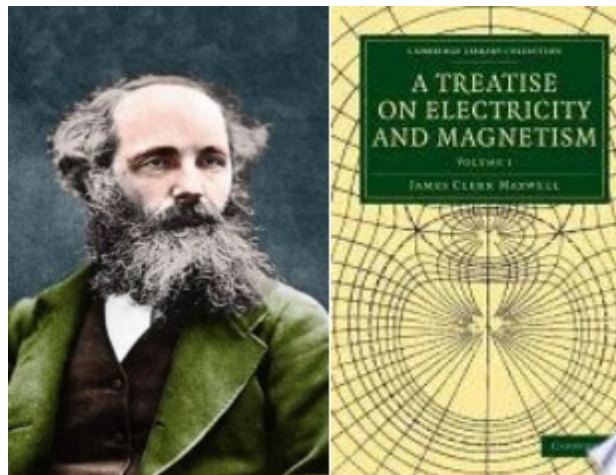


Figura 33. Maxwell e seu tratado sobre o eletromagnetismo de 1873.

Maxwell percebeu o potencial da sua descoberta por que a partir dela conseguir prever a existência de ondas eletromagnéticas. Ao prevê-las, por outro lado, Maxwell conseguiu unificar agora três ciências. A do magnetismo, a da eletricidade e da óptica. A unificação da eletricidade com o magnetismo fora feita por Oersted e Ampere.

Ou seja, com essa descoberta de Maxwell, da existência de ondas eletromagnéticas, ele fez com que o eletromagnetismo também pudesse descrever a óptica. De forma que temos aqui a

unificação de 3 ciências: da eletricidade, do magnetismo e também da óptica. Foi uma descoberta fantástica, revolucionária.

Em 1888 Hertz conseguiu gerar e detectar ondas eletromagnéticas, comprovando assim a teoria de Maxwell.

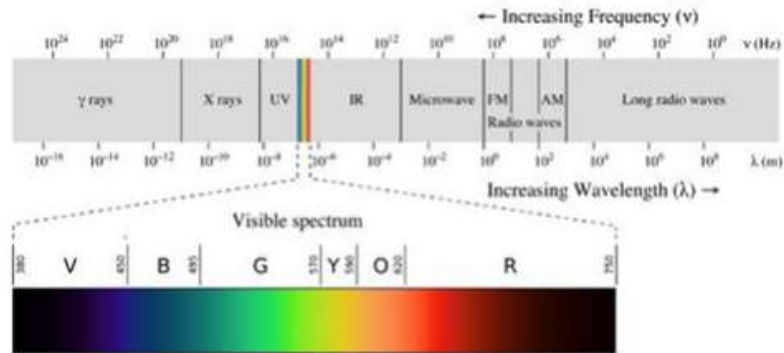


Figura 34. O espectro eletromagnético.

Alem da descoberta de um novo fenômeno da indução, da descoberta das ondas eletromagnéticas, Maxwell procurou formular o eletromagnetismo a partir de 4 equações, conhecidas como equações de Maxwell. Elas descrevem todos os fenômenos eletromagnéticos.



Figura 35. Maxwell recebeu justas homenagens por suas descobertas.

27- O OSCILADOR DE HERTZ

Em 1888 Hertz comprovou a existência de ondas eletromagnéticas. O seu arranjo é ilustrado na fig. (36).

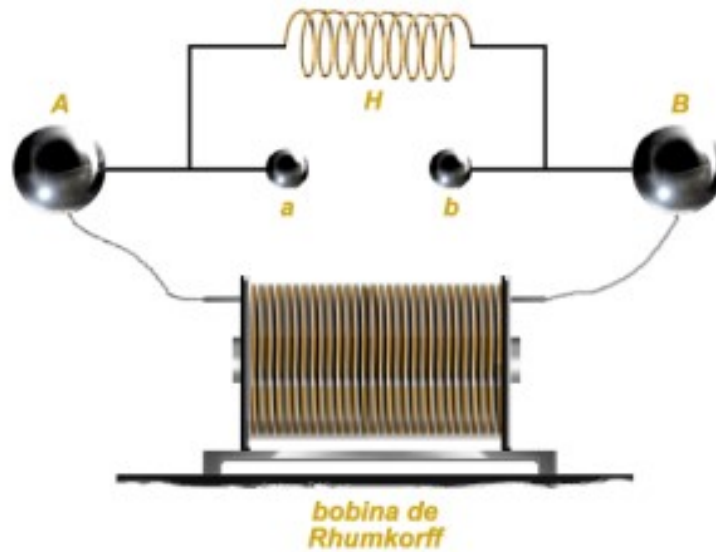


Figura 36. Arranjo experimental de Hertz.

28- OS RAIOS CATÓDICOS

Os grãos de eletricidade foram paulatinamente sendo desvendados a partir do estudo dos raios catódicos.

O estudo sobre descargas elétricas em gases submetidos a baixas pressões levou a novas evidências experimentais da existência de partículas de eletricidade negativa (os elétrons). Consideremos a situação em que um gás fica confinado num tubo de vidro, onde dispomos de dois eletrodos (denominados cátodo e ânodo), aos quais podemos aplicar uma diferença de potencial. Se a diferença de potencial for suficientemente alta haverá passagem de eletricidade pelo gás, produzindo luz. A corrente se origina no cátodo. Com a passagem da corrente, o tubo se torna iluminado. Esta é a base de algumas lâmpadas a gás (neon e sódio) muito utilizadas ainda hoje.



Figura 37. Arranjo para produzir raios catódicos e defletí-los.

Se reduzirmos a concentração do gás dentro do tubo (produzindo a redução da pressão do gás) verifica-se que para pressões muito baixas, no intervalo de 10^{-4} a 10^{-5} mmHg, surge no lado oposto ao cátodo um brilho fluorescente. A presença desse brilho foi atribuída desde os primórdios, nesse tipo de experiência, a raios provenientes do cátodo. Recebiam, por isso, o

nome de raios catódicos. Os raios catódicos foram descobertos por Gleisser e Plücker, em 1859.

Os raios catódicos exibem as seguintes propriedades:

- a) A ausência de campos externos, os raios se propagam em linha reta;
- b) Os raios catódicos são capazes de penetrar e atravessar materiais de pequena espessura;
- c) Os raios têm uma carga elétrica negativa (essa propriedade decorre da análise de deflexão dos raios catódicos por campos elétricos e magnéticos) e
- d) Os raios catódicos transportam uma quantidade de energia cinética.

A explicação mais razoável para os raios catódicos seria a de que eles seriam constituídos por partículas com carga negativa. Essa proposta fora feita por Crookes, em 1880, a partir de experiências por ele realizadas, envolvendo a deflexão dos raios catódicos quando submetidos a campos elétricos e magnéticos.

29- A CARGA ELÉTRICA DO ELÉTRON

J. J. Thomson mediu a relação entre a carga do elétron (que ele chamava de "corpúsculo negativo") e sua massa. Realizou medidas com uma precisão muito boa. A partir dessas medidas percebeu que os elétrons eram muito velozes. Atingiam velocidades de cerca de $1/10$ da velocidade da luz. Pode-se creditar a ele o início da construção de aceleradores de partículas para a investigação da estrutura da matéria.

A identificação, por parte de J. J. Thomson, dos grãos de eletricidade levava a outra consequência importante: os átomos poderiam ser divisíveis. De fato, no modelo de Thomson para o átomo, este seria constituído de elétrons embebidos numa pasta de carga positiva. Thomson levantou ainda a hipótese de movimentos vibratórios dos elétrons no átomo. A teoria dos movimentos vibratórios dos elétrons no átomo foi desenvolvida por Lorentz. Essa teoria de Lorentz descrevia a difusão e a dispersão de luz pelos átomos, fazendo assim um elo com a teoria da radiação.

Wilson, em 1903, imaginou um método muito simples. Fazia passar uma nuvem ionizada entre duas placas paralelas de um grande capacitor, dentro das quais podia criar um campo elétrico uniforme. Primeiramente observava a queda das gotículas ionizadas sob a ação da gravidade e depois sob a ação da gravidade e do campo elétrico produzido entre as do capacitor.

O trabalho mais importante no que diz respeito à história do elétron é aquele de R. A. Millikan. Millikan (1917) deu a demonstração cabal de que a eletricidade tinha uma natureza atômica ao determinar a carga do elétron. Millikan introduziu aperfeiçoamentos no método de Wilson. Ao invés de água (que evaporava com facilidade) utilizou gotículas de óleo. Percebeu também que poderia trabalhar com uma só gotícula ajustando a voltagem de tal forma a equilibrar a força gravitacional com a força elétrica.

A determinação da carga eletrônica havia se iniciado com o trabalho de Stoney e se baseava, incluindo o trabalho de Millikan, em analisar o movimento de íons. Para facilitar a visualização do movimento dos íons utilizava-se de uma estratégia: faziam com que o vapor d'água viesse a se condensar nos íons formando uma pequena nuvem. Essa nuvem ionizada em movimento poderia ser observada por um pequeno telescópio.

A partir da relação entre a força elétrica e a força gravitacional Millikan determinou o valor da carga elétrica do elétron.

De qualquer maneira a carga elétrica do elétron só foi determinada experimentalmente em 1913. De forma que tivemos aí a determinação precisa da carga elétrica do elétron. Essa descoberta valeu o prêmio Nobel para Millikan.

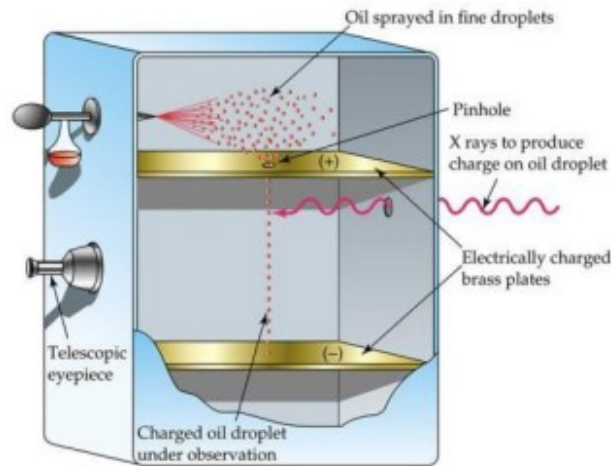


Figura 38. A experiência de Milikan.

30- O FÓTON

Einstein deu duas grandes contribuições ao eletromagnetismo. A primeira foi a de demonstrar que as equações de Maxwell são válidas e escritas sob a mesma forma para quaisquer referenciais inerciais. Aboliu a ideia do Éter.

Podemos ainda dizer que Einstein contribuiu para o eletromagnetismo na medida em que ele descobriu o fóton. E hoje, a teoria moderna mais avançada do eletromagnetismo parte do pressuposto de que as interações eletromagnéticas são mediadas por meio de uma partícula destituída de carga elétrica conhecida hoje como fóton. Einstein contribuiu para entender as interações eletromagnéticas no nível mais fundamental possível: a eletrodinâmica quântica.

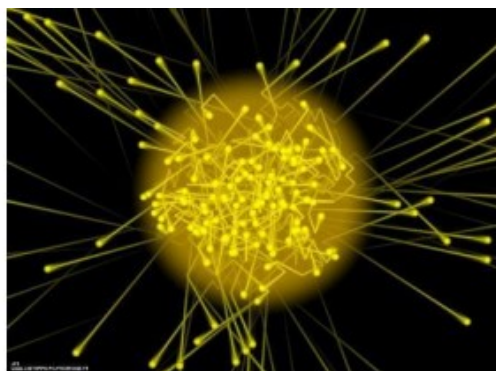


Figura 39. Luz é composta por fótons.

A teoria quântica levou a uma melhor descrição das interações eletromagnéticas. Por exemplo, na descrição do átomo de hidrogênio. Neste caso, a mecânica quântica chama atenção para o fato de que a grandeza física importante é o potencial eletromagnético. A outra grande

contribuição foi dada por Dirac em 1930, ao propor uma partícula conhecida como pósitron, a qual se constitui na antipartícula do elétron. Agora temos partículas como o elétron que tem 32 cargas opostas, são as antipartículas e a diferença entre elas nesse caso é tão somente a carga elétrica.

Aprendemos que a teoria quântica é a única capaz de explicar o magnetismo da matéria.



Figura 40. O ferromagnetismo só pode ser entendido a partir da teoria quântica.

31- ANTIPARTÍCULAS

P. A. M. Dirac fez uma proposta revolucionária em 1930. Suas soluções da equação relativística pensada para descrever o movimento dos elétrons exibiam soluções com energia negativa (algo difícil de interpretar fisicamente). Ao invés de rejeitar suas equações ou essas soluções, ele interpretou essas soluções, corretamente, como sendo soluções associadas a antipartículas).

Para entendermos o que isso significa, lembremo-nos de que o próton e o elétron são partículas que têm carga elétrica. Poderíamos então perguntar-nos se seria possível existir outras partículas que em tudo seriam iguais a essas, exceto na carga. As antipartículas teriam uma carga oposta àquela das partículas. Seriam, portanto, objetos diferentes das partículas.

A intuição de Dirac se revelou correta. As antipartículas existem. A antipartícula do elétron é denominada de pósitron (de positivo). Ela, o pósitron, tem uma massa igual à do elétron (bem como outras características) mas tem uma carga de mesmo valor em módulo mas sinal oposto.

Anderson, em 1932, descobriu experimentalmente a existência de pósitrons. O surgimento de tal partícula ocorreu concomitantemente com o surgimento de um elétron. Sob a ação do campo magnético cada uma delas exibiu uma trajetória diferente. O que se observa na figura ao lado é que o par elétron-pósitron parece surgir do nada. Ele surge da subdivisão do fóton em um par. Esse par é formado pelo elétron e pelo pósitron.



Figura 41. A descoberta do pósitron.

32- A ELETRODINÂMICA QUÂNTICA

A partir de 1930, com Dirac, Pauli e grandes outros teóricos Schwinger, Feynman, Tomonaga, se constrói uma teoria quântica para o eletromagnetismo. E essa teoria tem o nome de eletrodinâmica quântica e essa é a forma mais completa de descrever o eletromagnetismo, o eletromagnetismo quântico e relativístico. Essa descrição foi conseguida nos anos próximos da década de 1950. Foi uma teoria desenvolvida a muitas mãos, principalmente por Schwinger, Feynman e Tomonaga que foram agraciados com o prêmio Nobel por esse feito.

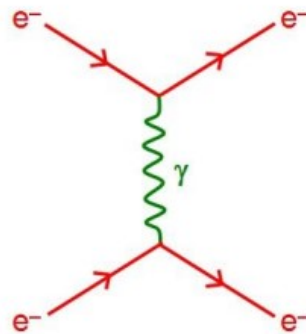


Figura 42. Fótons são partículas intermediárias das interações eletromagnéticas.

33- O Modelo Padrão

O último grande desenvolvimento em relação ao eletromagnetismo é entender melhor a eletrodinâmica a partir de uma teoria unificada das interações eletromagnéticas com as interações fracas e as interações fortes. Isso aconteceu aproximadamente no ano de 1987. Os proponentes dessa teoria ganharam o prêmio Nobel. Estamos falando da obra de Steve Weinberg, Abdus Salam e Sidney Glashow. Nesse contexto, a teoria unificada englobaria três das quatro interações. Essa a teoria mais moderna e mais aceita para a descrição das interações eletromagnéticas.