

IV. 1 - O vácuo e os campos

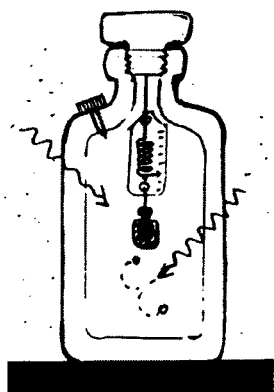
Vácuo cheio de coisas e coisas cheias de vácuo

Na mecânica newtoniana, vimos que efeitos gravitacionais ou eletromagnéticos alteram as simetrias do espaço e, na termodinâmica, que as radiações eletromagnéticas têm papel central nas trocas de energia. Portanto, não é desprovido de qualidades o espaço, onde estão e se movem objetos ou sistemas e, ainda que possamos dizer que um objeto se desloca no vácuo quando não encontra outras partículas em seu trajeto, o espaço clássico nunca é literalmente vazio.

Os termos *vácuo* ou *vazio* são usualmente identificados como o espaço não ocupado por coisa alguma e como o que não contém nada, com ausência de coisas. Se o vácuo é o que não contém nada, esta seria sua única qualidade concebível. No entanto, o vácuo ideal da física clássica não é o mesmo que o nada, nem é o que não contém nada, e sim uma delicada construção teórica. Mesmo quando, em princípio, tivesse sido eliminada toda matéria de uma região do espaço, seria incorreto dizer que não contém “nada”, pois continua tendo propriedades, preenchido e percorrido por campos e ondas, entidades etéreas e móveis, mas não exatamente fantasmagóricas.

Não há equipamento capaz de eliminar todos os átomos de uma câmara que se pretenda esvaziar, mas, tanto quanto no espaço interestelar, é possível se atingir uma muito baixa densidade de partículas, um vácuo quase perfeito, no que se refere à ausência de matéria. Se a câmara esvaziada fosse de vidro, seria possível observar

O vácuo ideal da física clássica não é o nada nem é vazio, é uma construção teórica com muitas qualidades, preenchido por campos e percorrido por ondas.



Mesmo a mais vedada câmara não poderia ser blindada contra a gravitação e seria também cruzada por contínua saraivada de neutrinos.

seu interior vazio, através de suas paredes atravessadas pela luz. Se a luz pudesse penetrar seu interior, ela já conteria algo mais do que nada e, dentro da câmara, poderiam ser sintonizadas emissões de rádio revelando a presença de outros campos eletromagnéticos lá dentro. Há um recipiente de vidro lacrado, utilizado diariamente por bilhões de pessoas, e que precisa ser relativamente evacuado para que muitos dos elétrons lançados de um de seus extremos consigam alcançar o outro extremo sem colisões no trajeto. Trata-se do tubo de TV que, aliás, não funcionaria se não fosse permanentemente cruzado por campos, que dirigem os feixes eletrônicos para desenhar na tela dezenas de novas imagens a cada segundo.

Se a câmara fosse metálica, ela não poderia ser penetrada pela luz, mas o espaço interior continuaria tendo propriedades e presenças; “invasores” de origem cósmica capazes de penetrar a blindagem metálica, como raios gama, múons e neutrinos, além do campo gravitacional, pois não existe blindagem contra a gravitação.

Esta discussão sobre o vácuo ser diferente do nada, de certa forma, dá continuidade àquela outra, da estética do espaço vazio, que procurava investigar a “tela em branco” do espaço da física clássica, o “sensório de Deus”, segundo Newton, sobre a qual a matéria desenha suas trajetórias. Agora, procura-se olhar a mesma coisa, mas revelando a “paisagem de fundo”, que condiciona ou promove o movimento da matéria, no primeiro plano. Este “fundo de tela” é o campo. O campo gravitacional corresponderia a um fundo contínuo de nuances suaves, como um céu de aquarela, ao passo que o campo eletromagnético é um fundo vibrante, como um céu de van Gogh.

Em termos menos pictóricos ou poéticos, pode-se dizer que a ação gravitacional, relativamente mais fraca, só é significativa quando gerada por grandes concentrações de massa que, por sua inércia, só oscilam de forma vagarosa. Por isso, as variações do campo gravitacional só se percebem em longos deslocamentos. Por outro lado, a intensidade maior das interações eletromagnéticas e a grande

mobilidade das cargas elétricas, responsáveis pelo campo eletromagnético e sensíveis a ele, permitem variações rápidas, percebidas mesmo no caso de pequenos deslocamentos espaciais de cargas. Movimentos periódicos de cargas produzem oscilações de campo, as ondas eletromagnéticas, rapidamente percebidas a grandes distâncias, pois se deslocam com a velocidade da luz.

Há cerca de um século já se percebeu que todos os objetos, mesmo os mais densos, têm em sua estrutura muito espaço vazio. Seus átomos são rápidos enxames de levíssimas cargas, os elétrons, que habitam o vazio em torno de densos e minúsculos núcleos, também carregados. Essa estrutura oca e dinâmica e suas propriedades físicas são essencialmente eletromagnéticas, como sua condutividade, sua transparência ou suas características químicas. Mesmo no interior de esferas de aço maciço o espaço interatômico é literalmente vazio e, numa colisão entre as esferas, as forças de contato são a ação recíproca entre cargas e campos eletromagnéticos de cada uma delas.

Poderíamos já adiantar que além dos “campos gravitacional e eletromagnético há dois outros campos na natureza, o das interações nucleares fortes e o das fracas que, diferentemente da gravitação e do eletromagnetismo, têm alcance limitado pois só agem no interior do núcleo. Detalharemos isso mais adiante, quando lidarmos com o núcleo atômico, e quando apresentarmos o tratamento quântico e relativístico das quatro forças da natureza mencionados há pouco. Nessa teoria quântica dos campos, como veremos, o vácuo é o oposto do vazio, pois quaisquer partículas podem ser “paridas” pelo vácuo, desde que se lhe forneça energia suficiente. Se houver sido surpreendente perceber que a maior parte do interior da matéria é puro vácuo, mais surpreendente será reconhecer que a matéria surge do vácuo. Literalmente, veremos ser permutadas as idéias que usualmente temos de vácuo e de matéria.

Essa é uma história a ser contada no capítulo VII, e só a mencionamos aqui para prevenir o leitor não iniciado, que já esteja

O interior dos materiais é uma estrutura oca, em que a distribuição das cargas determina as propriedades químicas, a condutividade e a transparência.

achando complicado um vácuo que não é vazio e uma matéria que não é cheia, que guarde sua preocupação para depois, que a confusão vai ser ainda maior. Por ora, podemos nos entreter com o vácuo clássico, cenário da dança dos campos gravitacional e eletromagnético.

A gravitação e as massas

O campo gravitacional, cuja forma de alterar as simetrias do espaço já discutimos, tem uma relação muito simples com a concentração de matéria que o produz, relação descoberta por Newton no século XVII. Um planeta é mantido em órbita, em sua trajetória usualmente elíptica em torno de uma estrela, por conta de uma força gravitacional cujo valor é proporcional ao produto da sua massa pela massa da estrela e que também depende da distância entre os dois. Se for dobrada a distância, sentirá uma força quatro vezes menor; se triplicada a distância, a força será nove vezes menor. Ou seja, a força gravitacional é sempre atrativa, proporcional ao produto das massas e ao inverso do quadrado da distância, que é como se pode enunciar a lei da gravitação universal, formulada por Newton. Essa força é mais perceptível quando pelo menos um dos objetos é de magnitude astronômica, mas ela age entre quaisquer dois objetos que tenham massa. ⁴⁶

Entre quaisquer dois objetos, sempre existe uma força atrativa, proporcional ao produto das suas massas e ao inverso do quadrado da distância que os separa.

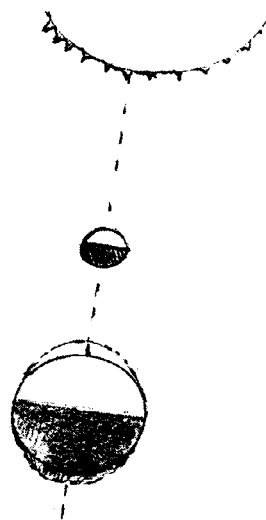
Essa relação linear entre força gravitacional e massa - a mesma massa inercial das quantidades de movimento - faz com que qualquer objeto num certo ponto do espaço tenha a mesma aceleração, devido ao campo gravitacional local. Um objeto no interior do frasco experimenta uma força gravitacional, seu peso, que é sua massa multiplicada pelo campo; sua aceleração, portanto, que é a força dividida pela massa, é a mesma de qualquer corpo situado no mesmo

⁴⁶ Dois objetos quaisquer, de qualquer tipo de matéria, viva ou inanimada, cujas massas sejam M e m , cujos centros estejam distantes r um do outro, exercem força de atração recíproca igual a $F_g = GMm/r^2$, sendo G uma constante universal. A constante gravitacional tem o valor $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg s}^2)$.

local e, neste caso da gravidade, tem o mesmo valor do campo.⁴⁷ O campo propriamente dito é uma propriedade do espaço vazio naquele ponto, que só depende de onde estão as massas que o geram. O fato de, por coincidência, a força depender também linearmente da massa do objeto sujeito ao campo, faz com que o valor do campo coincida com a aceleração de qualquer objeto ali situado, chamada assim de aceleração da gravidade. Esta coincidência entre massa gravitacional e massa inercial foi analisada por Einstein, resultando na teoria da relatividade geral, como veremos no próximo capítulo.

Em cada ponto, o vetor campo gravitacional é uma soma de todos os campos, devido a todas as diferentes massas gravitacionais do universo, mesmo distantes. Como em toda a soma de vetores, o resultado depende das intensidades e também da direção e do sentido das parcelas. Por exemplo, aqui na superfície terrestre, a parcela gravitacional que retém a água dos mares é devida sobretudo à própria Terra; no entanto, é a conjugação de direção e sentido dos campos gravitacionais da Lua e em parte também do Sol, que se sobrepõem aos da Terra, que determina a intensidade das marés.

Ao passar de propriedades do vazio para algo tão “cheio” como os oceanos, vale lembrar que, além de seu giro diário sobre si mesma, a Terra cruza o espaço, em sua volta anual em torno do Sol, assim como a Lua, bem mais próxima, circula mensalmente à nossa volta; portanto, no tempo necessário para a formação de uma maré, o planeta terá cruzado milhões de quilômetros do espaço, que tem o campo gravitacional como atributo. Portanto, se formam marés não porque o campo navegue no mar. Na realidade, o campo navega no vácuo e o mar, por sua vez, navega no campo...



Campos e ondas

Pela mudança de configuração devida ao giro diário da Terra, o campo gravitacional da Lua provoca as marés, não porque o campo navegue no mar, mas porque o mar navega no campo.

⁴⁷ A força peso tem a intensidade mg , onde $g = GM/r^2$ é o valor do campo gravitacional junto à superfície terrestre, sendo M a massa da Terra e r a distância entre a bolinha e o centro da Terra. Este campo tem o valor de $9,8 \text{ n/kg}$, que é também a aceleração da gravidade, que em unidades de aceleração se escreve $9,8 \text{ m/s}^2$.

Os campos de força e seus domínios

A total impossibilidade de se blindar a ação do campo gravitacional faz da gravitação, como vimos, uma permanente nuance de fundo, sobre a qual se estabelece a ambientação mais fina, dada pelo campo eletromagnético. Esses diferentes campos usualmente se superpõem, em cada ponto do espaço, agindo conjuntamente e ao mesmo tempo sobre qualquer objeto. Uma caixa apoiada numa mesa, por exemplo, equilibra-se pela composição da força peso, de natureza gravitacional, com a força de reação da mesa, que é uma força de contato, de natureza eletromagnética. Se compararmos a carga elétrica e seus efeitos com a massa gravitacional e seus efeitos, veremos que o campo elétrico é muito mais intenso que o gravitacional; lembremos que o equilíbrio da caixa apoiada se dá entre a força de contato entre dois objetos de porte semelhante, e a força de atração gravitacional se dá entre um desses objetos e um corpo astronômico, que é o planeta Terra. Por outro lado, se tomarmos quaisquer dois planetas, sua interação é quase que estritamente gravitacional, sendo a interação eletromagnética entre eles desprezível, exceto pelas eventuais trocas térmicas por radiação.

Assim, os diferentes campos podem se superpor, mas há domínios na natureza onde um dos campos é nitidamente hegemônico relativamente aos demais, e é o principal responsável pela própria estrutura dos objetos de dimensões correspondentes, por exemplo, o que reúne as partes de um planeta é a gravitação, assim como o que reúne as partes de um pássaro são as forças eletromagnéticas. Esta é uma regularidade na natureza que, a despeito de sua importância, não tem tido a atenção que merece. Se ousarmos enunciar esta regularidade como um princípio, que se poderia chamar de “princípio dos domínios de forças”, seu enunciado seria: *As forças que dominam a interação entre objetos ou sistemas de magnitude semelhante são as mesmas forças responsáveis pela própria agregação ou*

As forças dominantes na interação, entre objetos ou sistemas de mesma magnitude, são as mesmas responsáveis pela constituição destes objetos ou sistemas.

constituição destes objetos ou sistemas.

Estabelecem-se três domínios na natureza, no sentido deste princípio; o domínio astronômico ou gravitacional, o domínio ântropo-molecular ou eletromagnético e, finalmente, como trataremos mais adiante, o domínio nuclear ou hadrônico, ou seja, das interações fortes. Talvez esse princípio não seja usualmente enunciado porque, como veremos, há outras interações nucleares, denominadas fracas, que não ficam bem enquadradas nele. Como veremos nos capítulos VII e VIII, acredita-se que, há algo mais de treze bilhões de anos, todos esses domínios se fundiam num único, mas se e quando isto foi verdade, o universo era um simples ponto, um objeto só...

O maior desses domínios é o astronômico ou gravitacional, cujos objetos ou sistemas são planetas e seus satélites, estrelas, galáxias e aglomerados galácticos. O que lhe dá unidade é seu campo de força dominante, o campo gravitacional. De acordo com o princípio enunciado, todos os corpos celestes interagem entre si principalmente pela atração gravitacional, a mesma força que responde pela constituição de cada um deles.

O menor dos três domínios é o nuclear, cujos objetos e sistemas incluem desde constituintes do núcleo atômico, como prótons e nêutrons, até seus sub-constituintes, os misteriosos quarks, e os próprios núcleos. Também neste caso, o campo dominante, da interação denominada forte, é responsável pela agregação de cada uma das partículas nucleares, assim como pelas interações entre elas, cujo alcance é o tamanho do domínio, quase um milhão de vezes menor do que o dos átomos. Por ser tão pequeno, o domínio nuclear é também espantosamente mais denso que qualquer um dos outros dois. Para se ter uma idéia de quanto mais denso, basta lembrar que ocupamos um volume milhões de vezes maior que o volume dos núcleos de nosso corpo, mas praticamente toda nossa massa está concentrada neles, já que “o resto” é mil vezes mais leve.

Nós, seres humanos, juntamente com todos os nossos objetos,

Campos e ondas

Ocupamos um volume milhões de vezes maior que o volume dos núcleos de nosso corpo, mas praticamente toda nossa massa está concentrada neles, já que “o resto” é mil vezes mais leve.

Entre os domínios de forças, o maior e menos intenso é o gravitacional, o menor e mais intenso é o nuclear. Nós, humanos, nossos navios ou nossos vírus, somos parte do domínio eletromagnético. A vida e a inteligência são eletromagnéticas.

grandes navios ou pequenos vírus, somos parte do domínio eletromagnético, que poderíamos chamar de ântropo-molecular, que inclui objetos como átomos, menores do que um milionésimo de milímetro, ou penhascos, de muitos quilômetros. Átomos ou penhascos, pessoas ou navios, somos todos constituídos por forças eletromagnéticas e, igualmente, interagimos entre nós por meio destas mesmas forças. O campo eletromagnético estabelece a unidade e a amplitude de nosso domínio. Quando nos abraçamos, dinamitamos penhascos, construímos edifícios ou duplicamos nossas células, estamos estabelecendo ou rompendo interações eletromagnéticas, que são o cimento de todos os objetos de dimensões semelhantes às nossas, assim como do cimento propriamente dito e de nosso próprio corpo.

Todos os nossos sentidos, visão, audição, tato, olfato e paladar são eletromagnéticos, como o são nossos músculos, nosso sistema digestivo e nosso cérebro. A vida e a inteligência são, portanto, eletromagnéticas. São eletromagnéticas todas as ligações químicas, todas as forças de contato, da suave carícia ao concreto armado, todos os nossos aparelhos, instrumentos e ferramentas. Mesmo o machado de pedra paleolítico era eletromagnético, nem mais e nem menos que nossas usinas hidrelétricas.

Quanto à intensidade, a força eletromagnética também fica entre a fraca, dez bilhões de vezes menor do que ela, e a força nuclear forte, cerca de cem vezes maior. A gravitacional é a menos intensa.⁴⁸ Há uma característica comum, entre o campo eletromagnético e o gravitacional, que é decrescerem com o inverso do quadrado da distância, sem limites, portanto, enquanto o nuclear decai exponencialmente com a distância, que faz o intenso domínio nuclear ser de fato restrito ao núcleo. Há outra característica, no entanto, que o campo gravitacional tem em comum com o das forças nucleares fortes, de ser somente atrativo, enquanto as forças elétricas podem também ser repulsivas.

Certamente é o campo eletromagnético que nos permitirá

⁴⁸ A interação eletromagnética é 10^{40} vezes mais intensa que a gravitacional.

compreender a maior parte das qualidades dos materiais e das substâncias, pois é de forças elétricas que se constituem e é através dessas forças que interagem; no entanto, para que tenhamos uma boa compreensão das propriedades dos materiais, será preciso penetrar na intimidade quântica da matéria, o que será feito no capítulo VI. Mais tarde, no capítulo VII, também acabará se revelando que a interação nuclear fraca, responsável pela radiação beta, é uma espécie de “gêmea desgarrada” da interação eletromagnética, ainda que mil vezes mais fraca do que ela.

IV.2- Pólos opostos e outras atrações

Cargas e forças

Os campos não precisam de um meio material para se apoiar e seu lugar é o vácuo. Os agentes e pacientes do campo eletromagnético são partículas e materiais, cujas cargas e correntes são capazes de produzi-lo e de senti-lo, mas as evoluções, propagações e transformações do campo clássico se dão no espaço, razão pela qual é justo atribuir ao eletromagnetismo não só o mérito por muitas propriedades dos materiais, mas igualmente por algumas das mais finas propriedades do vazio.

Propriedades como a eletrização por atrito de certas substâncias e como a atração do ferro por alguns minérios são conhecidas há milhares de anos. Fenômenos elétricos e magnéticos eram vistos como coisas independentes entre si e como curiosas qualidades de poucos materiais. Sabemos hoje que a eletricidade e o magnetismo são realidades inseparáveis, e que todos os objetos e substâncias, que toda a luz e quase todas as radiações são de caráter essencialmente eletromagnético. A moderna compreensão do

Fenômenos elétricos e magnéticos eram vistos como coisas independentes entre si e como curiosas qualidades de poucos materiais.

eletromagnetismo foi desenvolvida por Ampère, Faraday, Lenzl, e Oersted, e, ao final do século XIX, sistematizada por Maxwell.

Tendo sido o eletromagnetismo incorporado aos elementos da vida contemporânea, sobretudo ao longo do século XX, hoje é fácil de conduzir experimentos simples para revelar os conceitos fundamentais do eletromagnetismo, a partir dos elementos triviais do nosso cotidiano. Começemos por uma verificação fundamental: se ligarmos com fios de cobre os pólos de uma bateria de automóvel a um sanduíche de placas metálicas, separadas por um papel seco, elas ficam eletrizadas e, mesmo depois de desligadas da bateria, passam a se atrair reciprocamente. Cada uma das placas poderá, então, ser usada para eletrizar, por contato, diferentes objetos. Todos os objetos que tiveram contato com uma só das placas se repelem reciprocamente, mas eles são atraídos por qualquer um dos objetos que tiveram contato com a outra placa. O contato entre objetos equivalentes, eletrizados pelos pólos opostos, pode resultar na neutralização de ambos, após o que não mais se atrairão. O contato entre objetos eletrizados pelo mesmo pólo não leva à neutralização.

Interpretando simples experiências de eletrização, pode-se chegar a convicções como: há dois tipos de cargas elétricas; cargas de mesmo tipo se repelem e as de tipo oposto se atraem; cargas de mesmo tipo se somam e cargas de tipo oposto se cancelam; se for atribuído o sinal de mais (+) às de um tipo, e sinal de menos (-) às do tipo oposto, pode-se compreender que a eletrização dos objetos é a soma algébrica de todas as suas cargas; há materiais condutores, como os metais, e há materiais isolantes como o papel seco e vários plásticos. Pode-se concluir ainda que a neutralidade elétrica não é a ausência de cargas, mas sim seu equilíbrio, sua compensação. A eletrização por atrito corresponde assim à transferência de cargas de um objeto neutro para outro, ficando ambos eletrizados de maneira oposta ou complementar, ao passo que baterias e pilhas elétricas podem ser pensadas como equipamentos eletroquímicos que separam cargas

Nos materiais, a neutralidade elétrica não é a ausência de cargas, mas sim seu equilíbrio, sua compensação.

positivas das cargas negativas, empurrando-as para pólos opostos.

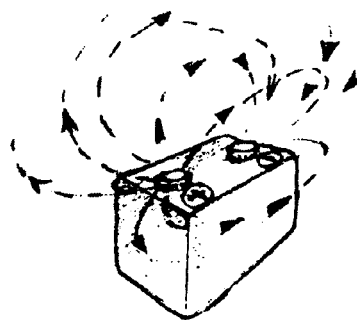
Objetos com cargas totais de mesmo tipo ou de tipo oposto se repelem ou se atraem, com força proporcional ao produto do valor de suas cargas e ao inverso do quadrado da distância entre eles.

Usando-se bolinhas leves eletrizadas, pode-se verificar que *cargas de mesmo tipo ou de tipo oposto interagem com forças respectivamente repulsivas ou atrativas, cuja intensidade é proporcional ao produto do valor dessas cargas e ao inverso do quadrado da distância entre elas*. A essa formulação se denomina lei de Coulomb, e é semelhante à lei da gravitação, em que o produto envolvido era o das massas.⁴⁹ Tanto quanto no caso gravitacional, mesmo que não haja uma carga para sentir o efeito de uma outra, nem por isso o campo deixará de existir, ou seja, o campo é uma propriedade do espaço vazio naquele ponto, independentemente de haver uma “carga de prova” unitária postada ali para conferir.

A presença de uma carga num ponto do espaço, gera, em todos os demais pontos do espaço, um campo elétrico, que aponta no sentido oposto ao da carga, se ela for positiva, e no sentido dela, se ela for negativa.⁵⁰ Um objeto carregado sente uma força que é igual a esse campo local multiplicado por sua carga. Em todos os pontos do espaço, o campo resultante é a soma vetorial do campo devido a cada pólo. Vale sempre a superposição linear, e os campos se somam sem interferir um no outro, de forma que sua intensidade e direção resultante depende da concentração e distribuição de cargas no espaço. Diferentes materiais e moléculas, mesmo quando neutros, ou seja, com cargas positivas e negativas em mesmo número, podem ter propriedades elétricas interessantes, devido aos seus dipolos elétricos.

⁴⁹ A lei de Coulomb, para duas esferas cujas cargas sejam Q e q , de sinal oposto ou igual, cujos centros estejam distantes r um do outro, afirma que entre elas dá-se uma força recíproca de atração ou repulsão igual a KQq/r^2 , onde K é uma constante. Usualmente expressa-se essa constante K em termos de outra constante, denominada permissividade do vácuo, $K=1/(4\pi\epsilon)$, sendo $\epsilon=8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm}$, expressa em termos das unidades da carga, coulomb, de tensão elétrica, volt, e de distância, metro.

⁵⁰ Se um dos objetos tem carga unitária, $q=1$, na unidade convencionada, pode-se ver que a força que sente, devida a uma outra carga Q situada a uma distância r é igual ao campo existente no ponto onde ele está, $E=KQ/r^2$.



Mesmo que não haja uma carga para sentir o efeito de uma outra, nem por isso o campo deixará de existir, ou seja, o campo é uma propriedade do espaço vazio.

Muitas propriedades de substâncias se devem a seus dipolos elétricos. Como não há massas de sinais diferentes, não existem dipolos gravitacionais.

Outra maneira de se expressar a relação entre carga elétrica e campo elétrico é a afirmação de que a carga é proporcional ao fluxo de campo elétrico atravessando qualquer superfície fechada que a envolva. Isto é mais fácil de perceber quando se trata de superfícies esféricas, com as cargas no centro, pois o tamanho da superfície cresce com o quadrado do raio e o campo decresce na mesma proporção, conservando assim o fluxo. Essa qualidade de decréscimo com o quadrado da distância, ou de conservação do fluxo, na expressão matemática denominada lei de Gauss⁵¹, é também algo que o campo elétrico e o campo gravitacional têm em comum. A diferença é que, como não existem massas de sinais diferentes, a gravitação não apresenta dipolos gravitacionais. Essa diferença é ainda mais marcante quando a comparação for feita com as interações fortes, descritas na cromodinâmica em termos das “forças de cor”, pois as três “cores” diferentes se cancelam três a três, diferentemente das cargas, mais e menos, que se cancela duas a duas. Essa distinção tem a ver com as simetrias essenciais de cada tipo de campo e têm profundas consequências para o comportamento da matéria e do cosmo.

Corrente e química

Uma carga isolada ou um dipolo elétrico produzem campo elétrico, alteram a simetria do espaço pois, como o campo gravitacional da Terra, promovem uma alteração local na homogeneidade do espaço. No caso elétrico, passa a haver uma polaridade no espaço que leva ao movimento de eventuais cargas presentes. No entanto, no ar seco entre os dois pólos geralmente não há cargas se movendo, porque todas as moléculas do ar estão neutras, com suas cargas positivas e negativas equilibradas. Contudo, se ligarmos os pólos aos terminais

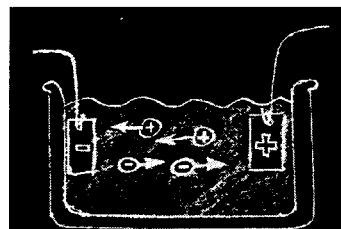
⁵¹ Esse nome se deve ao matemático alemão Karl Gauss. O fato de o campo decrescer com o quadrado do raio e a superfície fechada crescer com o quadrado do raio faz o valor do fluxo, que é “o campo vezes a superfície”, ficar constante e proporcional à carga interna à superfície, o que se escreve $F_E \sim q$.

de uma lâmpada, seu filamento de tungstênio fica incandescente, ou se os ligarmos aos extremos do resistor de um chuveiro elétrico ou ferro de passar, estes se aquecem.

A razão é que os metais, também quando neutros, têm uma estrutura cristalina com elétrons de grande mobilidade, cargas negativas que se movem quando sujeitas ao campo, por isso metais são condutores. Na colisão dos elétrons acelerados pelo campo com os átomos da rede cristalina, transfere-se a energia ordenada de movimento de uns para a de agitação térmica dos outros, ou seja, a “energia elétrica” gera calor e, se a temperatura for suficiente, também produz luz. Como consequência das inúmeras colisões, ao invés de continuarem indefinidamente acelerados, os elétrons alcançam uma velocidade limite relativamente baixa, em seu trajeto em direção ao pólo positivo.

A condução num metal, a não condução num isolante, ou a condução num semi-condutor exposto à luz serão mais bem compreendidas quando estudarmos a intimidade quântica da matéria, mas já podemos adiantar que há muitas formas de condução elétrica. Por exemplo, se mergulharmos num vidro com água destilada os extremos dos fios ligados aos pólos da bateria, não haverá condução elétrica, pois a água pura, como o ar seco, é um bom isolante, ou seja, o campo, presente na água, não encontrará carga livre para empurrar. Além disso, as moléculas de água são dipolos elétricos, que se alinham contra o campo. No entanto, se dissolvermos na água, por exemplo, sal de cozinha, logo perceberemos que cloro se acumulará junto a um dos extremos e sódio junto ao outro. Na água, o cloreto de sódio se dissocia em íons de cloro, com carga negativa, e íons de sódio, com carga positiva, que podem ser levados pelo campo em direção aos pólos opostos, onde serão neutralizados, entregando ou recebendo, respectivamente, o elétron que sobrava ou faltava. Entre outras coisas, isto também está nos revelando a natureza elétrica das ligações químicas. Este é o princípio operativo do processo de separação química

Campos e ondas



A condução elétrica se deve ao movimento de cargas sob ação do campo: nos metais movem-se elétrons da rede cristalina; na água salgada são íons que se deslocam.

A própria condução nervosa, que nos permite sentir, andar ou pensar, é um processo eletroquímico, em que os nervos são cabos coaxiais, por cujas membranas permeáveis passam diferentes íons, provocando um pulso elétrico transversal.

pela corrente elétrica em soluções, chamado de eletrólise, e este tipo de condução se chama condução eletrolítica.

Por esse processo se obtêm muitas substâncias e elementos químicos, como o alumínio a partir de seus minerais compostos e, por processo semelhante, se faz a eletrodeposição de metais, como a niquelação. Estes são dois exemplos típicos de uma série de incontáveis processos industriais que fazem uso de reações eletroquímicas. A própria bateria opera com base em um processo eletroquímico, em que diferentes metais, empilhados alternadamente, por exemplo em soluções ácidas, encontram equilíbrio de contato trocando elétrons e gerando tensão nos extremos da pilha. Na realidade, a própria condução nervosa, que nos permite sentir, andar ou pensar, é um complexo processo eletroquímico, em que os nervos são cabos coaxiais, por cujas membranas permeáveis passam diferentes íons provocando um pulso elétrico transversal.

A condução por íons pode acontecer também no ar, até mesmo pela ionização de suas moléculas, se o campo for suficientemente intenso, o que acontece quando há cargas muito concentradas e pequenas distâncias entre os pólos, geralmente produzindo centelha. Os raios, que ocorrem nas tempestades, são ocorrências naturais dessa condução por ionização da atmosfera.

Eletricidade e magnetismo

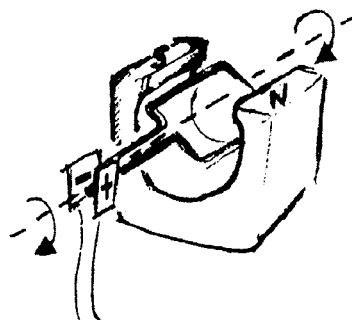
Tanto ou mais importante quanto a relação da eletricidade com a química é a relação desta com o magnetismo. Uma corrente elétrica passando por um fio interfere na orientação de uma agulha magnética e é também capaz de orientar fagulhas de ferro em sua proximidade, de forma a se alinharem perpendicularmente ao fio. Em suma, correntes elétricas produzem campos magnéticos no espaço, que circulam no plano perpendicular à corrente. Este efeito magnético da corrente

pode ser ampliado se o fio condutor for enrolado na forma de um cilindro ou bobina, resultando em um eletroímã, que tem as mesmas propriedades de um ímã permanente, exercendo atração ou torque mecânico em um ímã permanente, em um pedaço de ferro ou em outro eletroímã.

Esta ação mecânica dos eletroímãs deu origem a campainhas, alto-falantes e a medidores elétricos, pois a corrente pode ser avaliada pela deflexão de um ímã preso a uma mola espiral, no campo de um eletroímã alimentado por ela. A mesma ação também deu origem ao motor elétrico, que não é outra coisa senão um eletroímã fazendo girar continuamente um ímã ou outro eletroímã. Basta uma ligação habilidosa dos fios que alimentam a corrente, de forma que os eletroímãs voltem a estar sempre em oposição a cada meia volta, mantendo assim o torque recíproco. A ação propriamente magnética dos eletroímãs serve, entre outras coisas, para a gravação de fitas magnéticas de áudio ou vídeo, que são constituídas de pó ferromagnético diluído numa fita de plástico flexível.

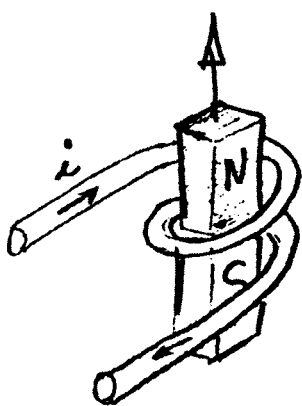
A natureza é pródiga em simetrias, e apresenta uma série delas específicas dos fenômenos eletromagnéticos. Há, por exemplo, um comportamento simétrico entre os efeitos magnéticos da corrente elétrica e os efeitos elétricos do campo magnético. Se um ímã for aproximado, afastado ou oscilado junto de uma espira condutora fechada, nesta passa a circular corrente elétrica. Mais precisamente, se variar o número de linhas de campo magnético que cruzam uma espira condutora, ou uma bobina de várias espiras, surge um campo elétrico induzido que circula ao longo desta, produzindo corrente elétrica se o circuito estiver fechado. Este efeito permite a operação de microfones, gravadores de som e de vídeo e muitas outras aplicações. Por servir para a indução de campos, a bobina é também chamada de bobina de indução ou, simplesmente, de indutor.

Talvez a aplicação mais importante deste efeito seja a própria geração de eletricidade. Um gerador é como um motor ao contrário,



Correntes elétricas produzem campos magnéticos, que podem ser ampliados enrolando-se o condutor numa bobina, resultando em eletroímãs, com que se fazem alto-falantes e motores.

em que se gira um ímã, ou um eletroímã, diante das espiras de uma bobina de fios de cobre, e produz-se eletricidade a partir do trabalho de provocar este giro. Em suma, no motor a corrente elétrica produz trabalho, enquanto no gerador o trabalho produz corrente. A própria maneira com que a eletricidade é produzida em geradores, em que um campo girante cruza periodicamente a área circundada por uma espira, faz com que a corrente resultante não seja contínua, mas sim periodicamente variável, denominada corrente alternada. Usualmente, por convenção, gera-se uma oscilação com frequência próxima a sessenta ciclos por segundo. Toda a vez que um acionamos um interruptor ou ligamos algo a uma tomada doméstica, estamos nos integrando a um longo circuito fechado que, no outro extremo, tem um gerador ou vários interligados, movidos por fontes de trabalho mecânico, como o obtido de uma queda d'água numa hidrelétrica, ou o convertido a partir de calor por uma turbina a vapor, como a que vimos no capítulo anterior.



A oscilação ou giro de um ímã, junto de uma bobina, produz uma corrente oscilante, efeito utilizado em microfones e geradores.

Estaria incompleta a investigação da simetria entre a eletricidade e o magnetismo, se não verificássemos como uma variação de fluxo de campo elétrico também produz uma circulação de campo magnético ao seu redor. É fácil investigar isto, usando de novo a bateria e o par de placas com que começamos toda esta história, que é chamado capacitor, por sua capacidade de reter cargas. À medida que vão se acumulando cargas, variando o campo elétrico que cruza o espaço entre as placas do capacitor, surge uma circulação de campo magnético semelhante à que circula a corrente no restante do fio. Cessada a corrente, com o completo carregamento das placas, cessa também o campo magnético gerado. É interessante saber que Maxwell descobriu isso não experimentalmente mas sim por motivação estética, ao buscar dar maior simetria, às equações matemáticas que descrevem o eletromagnetismo. Essas equações são chamadas equações de

Maxwell⁵².

A semelhança de comportamentos entre um ímã permanente e um eletroímã levou a uma primeira interpretação dos ímãs permanentes, cujo magnetismo passou a ser atribuído à circulação de microscópicas correntes espontâneas, próprias do material dos ímãs. Na realidade, acabaram sendo também descobertos magnetos elementares, denominados “spins”, como se as partículas fossem micro-turbilhões de carga “girando sobre si mesmas”. Uma diferença ou assimetria essencial entre o magnetismo e a eletricidade é a inexistência de cargas magnéticas ou monopolos magnéticos. Só há “dipolos” magnéticos, que são anéis de corrente. Em consequência, as linhas de campo magnéticas são contínuas e se fecham sobre si mesmas, ao passo que as linhas de campo elétricas começam numa carga positiva e/ou acabam numa carga negativa. Outra expressão deste fato, em oposição ao que acontece com o campo elétrico, é afirmar que é nulo o fluxo de campo magnético em qualquer superfície fechada.

Também são diferentes a ação magnética e a ação elétrica sobre cargas elétricas: a força devida a um campo elétrico atua sobre qualquer carga, parada ou não, ao passo que a força devida ao campo magnético estático só exerce efeito sobre uma carga elétrica se esta carga estiver em movimento, em direção não paralela ao campo. Uma carga parada diante de um ímã ou de uma corrente não percebe nenhuma força. Se a carga estiver se movendo em qualquer direção não paralela ao campo magnético, sente uma força proporcional à sua carga, à intensidade do campo magnético e à componente de sua velocidade não paralela ao campo. Esta força atua numa direção que é perpendicular ao campo e também perpendicular à velocidade. Uma consequência natural disto é que fios condutores paralelos se atraem ou se repelem reciprocamente, dependendo de suas correntes fluírem

Campos e ondas

Uma diferença essencial entre o campo magnético e o elétrico é a inexistência de monopolos magnéticos. Também diferem esses campos na ação sobre as cargas, que só sentem o campo magnético se estiverem em movimento.

52

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho$$

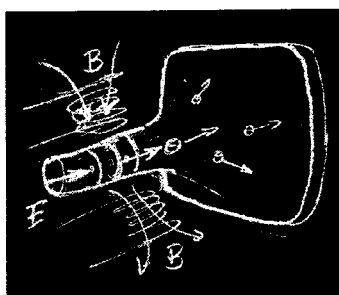
$$\frac{d\vec{B}}{dt} = -\operatorname{rot} \vec{E}$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{d\vec{E}}{dt} = \operatorname{rot} \vec{B} - \frac{4\pi\vec{j}}{c^2}$$

O termo $\operatorname{rot} \vec{B}$ foi introduzido por Maxwell, para dar simetria ao conjunto de equações.

no mesmo sentido ou no sentido oposto.

Podemos visualizar ainda melhor as semelhanças e diferenças entre as ações dos campos elétricos e magnéticos sobre cargas em condutores ou livres no espaço se acompanharmos a trajetória dos elétrons num cinescópio, ou seja, num tubo de TV. Inicialmente, um filamento incandescente forma, junto a ele, uma nuvem de elétrons disponíveis. Um forte campo elétrico entre cada par de uma série de placas paralelas com um furo no meio acelera os elétrons. Tanto para gerar a corrente que aquece o filamento, quanto para acelerar os elétrons, o campo elétrico é insubstituível, pois um campo magnético não serviria para esta operação, já que ele só passa a agir sobre cargas previamente em movimento⁵³.



Num tubo de TV ou num osciloscópio, um forte campo elétrico acelera os elétrons, e o direcionamento do feixe para cada ponto da tela exige uma força elétrica ou magnética atuando.

Este processo prepara o feixe de elétrons, que é então direcionado para atingir e varrer a tela, formando a imagem pelo brilho produzido pela colisão com a substância fluorescente que recobre a tela. O direcionamento do feixe para cada ponto da tela exige uma força atuando sobre cada elétron durante seu vôo livre. Pois bem, esta força pode ser elétrica ou magnética, pode ser produzida por eletroímãs, bobinas com corrente variável, ou por placas, com carga variável, junto ao pescoço do tubo. A deflexão do feixe será proporcional à carga ou à corrente. Sempre são necessários dois pares, em planos perpendiculares, para garantirem a deflexão horizontal e a vertical.

Para o funcionamento da televisão, tão essencial quanto campos, capazes de direcionar com precisão os elétrons para novo ponto certo da tela a cada novo instante, é a transmissão de informações precisas sobre o som e a imagem, desde a emissora de TV, até as antenas do receptores, cruzando uma longa distância com incrível velocidade. É o que tentaremos compreender a seguir.

⁵³ A chamada Força de Lorentz, expressão completa da soma da força elétrica (de um campo **E**) e magnética (de um campo **B**) sobre uma carga **q** com velocidade **v**, é então $\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, que é a soma vetorial de duas forças geralmente não paralelas, a primeira parcela na direção do campo elétrico, a outra parcela resultante de um produto vetorial numa direção perpendicular à velocidade e ao campo magnético e tem como intensidade $q \cdot v \cdot B \cdot \sin\theta$, onde θ é o ângulo entre os vetores velocidade, **v**, e campo magnético, **B**.

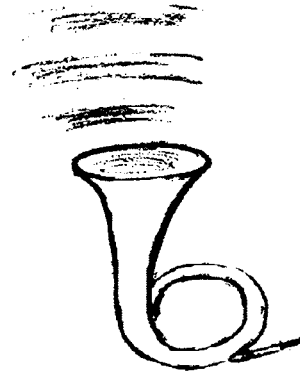
IV.3 – Oscilações no vácuo e outras ondas.

Ondas mecânicas e eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo. Hoje, em pleno século XXI, isso parece uma obviedade, mas quando Einstein fez esta afirmação, há um século atrás, foi quase um escândalo, porque as demais ondas, como o som e outras ondas mecânicas são vibrações de um meio elástico, ou variações de alguma propriedade de algum meio, que oscila periodicamente em cada ponto e que se propaga igualmente para os demais pontos. No som, a oscilação da pressão, sentida pelo nossos ouvidos, propaga-se numa seqüência de compressões e deslocamentos do ar.

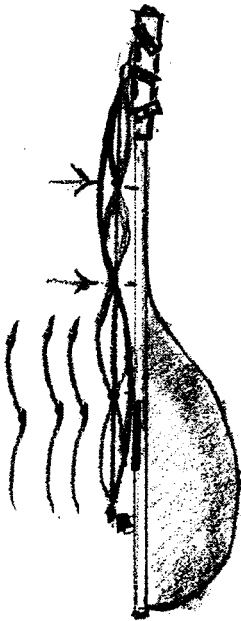
Se, num certo instante, um ponto tiver a pressão do ar maior que ao seu redor, como na detonação de uma cápsula, é natural que haja uma expansão que tenderá a baixar a pressão no ponto, aumentando-a em seu entorno. Como consequência do deslocamento de ar, no lugar onde a pressão era maior logo ficará menor, resultando em novo deslocamento compensatório. Isto se repete no próximo ponto, onde a pressão terá ficado maior, e daí para frente, com a propagação do abalo de pressão. Portanto, o som pode se propagar no ar, em líquidos ou em sólidos, mas por sua própria natureza não poderia existir no vácuo.

Cordas ou pregas vocais, instrumentos musicais ou cones de alto-falantes vibram, alternando estados de tensão maior, de energia potencial, com estados de maior movimento, de energia cinética. São ondas estacionárias, confinadas aos limites das cordas, das membranas ou de outras características do instrumento. Em contato com o ar, elas promovem uma oscilação contínua da pressão local. Como resultado, o abalo de pressão é periodicamente repetido e chega aos nossos ouvidos através da onda que se propaga com a mesma



No som, a oscilação da pressão, sentida pelo nossos ouvidos, propaga-se numa seqüência de compressões e deslocamentos do ar.

Campo e ondas



Gases, como o ar, só transmitem abalos longitudinais, variações da pressão, na mesma direção de propagação do abalo. Sólidos, a exemplo das cordas esticadas de instrumentos musicais, podem também transmitir abalos transversais.

freqüência com que foi produzida. O deslocamento de ar tem pequena amplitude, o que se desloca a grande distância é o abalo, não o ar, e o faz com uma velocidade de cerca de trezentos e quarenta metros por segundo. Gases, como o ar, só transmitem abalos longitudinais, variações da pressão, na mesma direção de propagação do abalo. Sólidos, a exemplo das cordas esticadas de instrumentos musicais, podem também transmitir abalos transversais. Em qualquer caso, uma onda é uma contínua alternância, no tempo e no espaço, de concentração de energia cinética ou de energia potencial.⁵⁴

Compreendida a natureza do som que, diferentemente do vento, não é um mero deslocamento de ar, talvez fique ainda mais estranho de se entender que algo que se comporte como uma onda possa se propagar no vácuo. Aparentemente, não haveria no vácuo qualquer propriedade cuja oscilação se pudesse propagar como onda. Felizmente, já conduzimos a necessária discussão de que o vácuo da física não é o nada, pois pode estar, e geralmente está, preenchido por campos. Por isso, poderemos afirmar que as ondas eletromagnéticas são a propagação de oscilações periódicas do campo eletromagnético, sendo assim uma qualidade dinâmica do vácuo. Se isso já é surpreendente, acrescente-se que são transversais, como se o vácuo fosse um tipo de sólido...

Todas as ondas apresentam algumas características gerais como a difração, a interferência e a ressonância. A difração é seu espalhamento, ou a abertura de seu feixe, ao cruzar um obstáculo ou ao atravessar uma fenda. Pode ser pensada, em analogia às partículas, como o correspondente ondulatório das colisões; a diferença é que, sendo um fenômeno coletivo, revela aspectos qualitativamente novos, como uma onda de mar “quebrando” contra a proa de um barco, comparada com uma gota d’água respingando em seu casco.

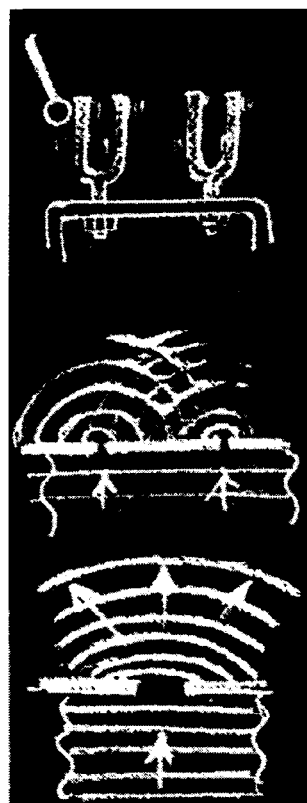
⁵⁴ Se y é a variável principal (pressão no ar, ou deslocamento transversal numa corda) e se a propagação se dá na direção x , a equação da onda é $\delta^2 y / \delta t^2 = c^2 \delta^2 y / \delta x^2$, onde c^2 , o quadrado da velocidade da onda relaciona as duplas variações no espaço e no tempo. Uma solução dessa equação é $y(x,t) = A \cos [(x/\lambda - f.t) 2\pi]$, onde λ é o comprimento de onda, f a freqüência, sendo $f.\lambda = c$,

A interferência surge pela presença conjunta de ondas afins, que têm a capacidade de somar seus campos elétricos ou pressões, quando, coerentemente, chegam duas ou mais ondas a um mesmo ponto. É claro que podem chegar em oposição, subtraindo efeitos, ou em mesma fase, somando seus efeitos. A ressonância é a resposta de um sistema oscilante aos sinais de outro, de frequência igual ou múltipla. Mesmo as ondas mais abstratas, que veremos no capítulo VI, descrevendo amplitudes de probabilidades quânticas, também apresentam difração, interferência e ressonância.

Emissão de rádio e de TV

As ondas eletromagnéticas existem na natureza em incontáveis formas, como a luz e as radiações solares e cósmicas, mas seu significado só foi mais claramente compreendido depois das equações de Maxwell, das quais podem ser até mesmo deduzidas, e depois de terem sido produzidas em laboratório por Heinrich Hertz, cujo nome designa a unidade de frequência⁵⁵. Várias destas ondas passaram então a ser produzidas e utilizadas para diferentes propósitos. É mais fácil compreender logo como elas são produzidas e como se propagam, começando pelo circuito oscilante que as gera, equipamento indispensável em qualquer emissora de rádio ou televisão, tanto quanto em nossos aparelhos receptores de rádio, TV e em telefones móveis. Cada emissor, especialmente os de longo alcance, tem sua frequência de emissão própria, que permite aos receptores sintonizá-la, sem misturar sinais. O princípio de operação de um circuito oscilante é essencialmente o mesmo para uma grande estação de televisão ou para um pequeno receptor individual de rádio ou telefone móvel.

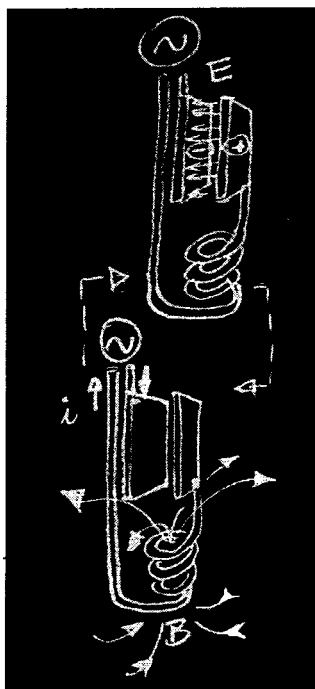
Imaginemos um capacitor carregado, ou seja, um par de placas metálicas paralelas com cargas opostas, separadas por um isolante que pode ser simplesmente espaço vazio, papel ou ar seco. A energia



Exemplos de ondas

Ondas se espalham, ao cruzar um obstáculo ou fenda: é a difração. Ondas afins somam ou subtraem seus campos elétricos ou pressões em cada ponto: é a interferência. Um sistema oscilante responde a sinais coerentes de um outro: é a ressonância.

⁵⁵ 1 hz = 1 oscilação por segundo



O circuito oscilante é análogo à corda vibrante, alternando estados de tensão e estados de movimento.

potencial que ele possui está concentrada no campo elétrico, no espaço entre as placas do capacitor. Se o capacitor estiver conectado a uma bobina de indução, como a de um eletroímã, rapidamente as cargas começarão a deixar as placas, percorrendo o circuito, passando pela bobina. Essa última, devido à corrente variável que a percorre, gera um campo magnético também variável que, por isso, gera uma circulação de campo elétrico. Nalgum instante subsequente, o capacitor estará descarregado, mas a corrente pela bobina estará com seu valor máximo. A energia, de natureza cinética, estará concentrada no campo magnético do espaço em torno da bobina indutora.

Este movimento não se interrompe abruptamente, mas conduz rapidamente o circuito a uma nova configuração, na qual o capacitor estará de novo carregado, com a polaridade inversa à que tinha antes, mas outra vez concentrando a energia entre suas placas. Então, começa de novo a circular corrente, no sentido inverso e daí para frente, indefinidamente. Na realidade, há uma compreensível dissipação de energia, pelo aquecimento do fio condutor, que é um resistor, energia que deve ser reposta regularmente por uma fonte de energia elétrica para se evitar que as oscilações no circuito decaiam, como em qualquer oscilação não reforçada.

O circuito oscilante, que acabamos de acompanhar, é análogo à corda vibrante, alternando estados de tensão e estados de movimento. Assim como cordas produzem frequências que dependem da tensão, do comprimento e da densidade, os circuitos oscilantes têm frequência de oscilação que depende, de forma muito semelhante, das características do capacitor e da bobina de indução⁵⁶. A diferença é que a corda empurra e comprime localmente o ar, provocando a onda de som, enquanto que o circuito não precisa de ar à sua volta para gerar uma onda, como veremos.

⁵⁶ No caso da corda vibrante, a frequência fundamental de ressonância é $\omega = (1/2L) [T/\mu]^{1/2}$, sendo L o comprimento, T a tensão e μ a densidade; no caso do circuito oscilante, a frequência de ressonância é $\omega = [1/(LC)]^{1/2}$ sendo L, a impedância e C a capacitância.

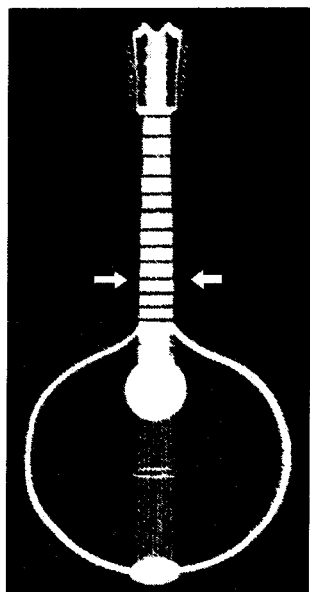
A corrente variável no circuito pode ser conduzida a uma antena, que é simplesmente um fio esticado. Acompanhemos o destino dos campos produzidos em torno deste fio, e verifiquemos porque e como se propagam como ondas. Quando a corrente for máxima, num dos sentidos, será máximo o campo magnético circulando o fio, em sua proximidade. À medida que a corrente diminua, se anule e, depois, se inverta, o campo magnético deve diminuir, se anular e, depois, também se inverter. A contínua variação do campo magnético, no plano perpendicular à antena, ou melhor, sua correspondente variação de fluxo, produz, como sabemos, uma circulação de campo elétrico também variável, em direção perpendicular à do campo magnético cuja variação o gerou.

É fácil, agora, repetir o raciocínio, se percebermos que a variação do campo elétrico e, correspondentemente, também de seu fluxo, gera uma circulação de campo magnético igualmente variável, novamente no plano perpendicular à antena, que por sua vez dará origem a nova circulação de campo elétrico e assim por diante, sucessivamente, se propagando com uma velocidade espantosa de cerca de trezentos mil quilômetros por segundo que, aliás, é a mesma velocidade com que a luz se propaga.

Nas proximidades da antena, há uma geometria cilíndrica, que reflete o fato de o campo magnético estar centrado num fio retilíneo. Longe da antena, a geometria será praticamente plana, ou seja, o que se percebe, em qualquer ponto do espaço, é um campo elétrico variável, que tem seu valor máximo no momento em que é mínimo o valor de um campo magnético perpendicular ao campo elétrico. Isto dá origem à clássica representação do campo eletromagnético, em que só se desenha o tamanho dos vetores campo elétrico e campo magnético, em seu desenvolvimento espacial como função do tempo. Como é o campo elétrico que vai ser detectado na antena receptora, usualmente a onda é representada só pela evolução do campo elétrico ao longo do tempo.

As frequências de ressonância nas cordas musicais dependem de sua tensão, sua densidade e seu comprimento. De forma semelhante, as dos circuitos oscilantes dependem de características do seu capacitor e da sua bobina.

A antena receptora também está ligada a um circuito oscilante semelhante ao da emissora, mas o capacitor do circuito de recepção pode ser variado, quando se aciona o botão de sintonia de um rádio, por exemplo, para escolher com que frequência vai entrar em ressonância. O seletor de canais de um receptor de TV faz precisamente a mesma coisa, seleciona a frequência de ressonância de seu circuito de antena. Voltando à analogia com as cordas, a mão esquerda do instrumentista pressiona a corda, em um certo ponto, para definir seu comprimento vibrante e, portanto, para escolher sua frequência de ressonância.



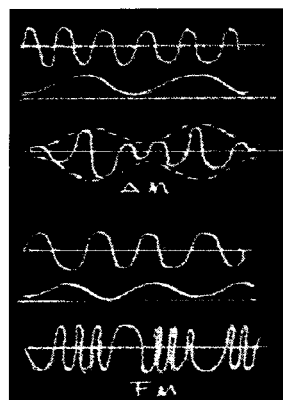
A mão que aciona um seletor de canais faz a mesma coisa que a mão esquerda de um violonista, escolhe frequências de ressonância.

Compreendemos como chegam os sinais de rádio e de TV, ou ondas portadoras, até nossos receptores, e como são sintonizadas; podemos agora tratar de compreender como as ondas portadoras transportam as informações de som e imagem. Vejamos primeiro o rádio, iniciando por entender como fazer do som um sinal elétrico. Há muitos tipos de microfone, mas podemos imaginar simplesmente um cone que vibre preso a um pequeno ímã, que se move dentro de uma bobina, que produzirá uma corrente proporcional à vibração, ou seja, produz um sinal elétrico que reproduz as oscilações de pressão exercidas pelo som sobre o cone. É o inverso de um alto-falante, onde o eletroímã move o cone. O sinal elétrico poderá ser usado também para gravar uma fita magnética que deslize diante de uma bobina, cujo campo a magnetiza, constituindo-se assim um gravador. A fita magnetizada, por sua vez, poderá ser usada, em seguida, para produzir som, se deslizada diante de uma bobina, por sua vez ligada a um alto-falante. Já podemos entender gravador e toca-fitas, microfone e alto-falante. Falta contar como estes sinais elétricos, chamados sinais de áudio, são carregados pela onda portadora da emissora.

Um dos processos para isso é usar o sinal de áudio para variar a intensidade da corrente no circuito oscilante, modulando a amplitude da onda portadora. Este processo é o usado nas emissoras de AM, ou seja, de Amplitude Modulada. O outro processo é usar o sinal de

áudio para variar o capacitor do circuito oscilante, por exemplo por vibração, modulando assim a frequência de emissão, que o que se faz nas emissoras de FM. Num caso ou noutro, é preciso que, depois de sintonizar a frequência da emissora, o aparelho receptor saiba “filtrar” a frequência portadora, deixando-a de lado e ficando somente com o sinal de áudio que será amplificado e conduzido ao alto-falante.⁵⁷

Para a TV e para outras ondas que levam informações múltiplas, o processo é um pouco mais complexo. A onda portadora leva as informações de som e as de imagem. Se padroniza à sincronização entre a varredura feita pelos feixes de elétrons da tela e da câmera, e se transmitem, lado a lado com o som, as informações sobre as intensidades de luz, em cada ponto, das cores componentes. A forma de carregar todas estas informações, mais os canais de som, com uma onda só, é dividi-la, como os vagões de um trem, colocando as informações em trechos convencionados, que se repetem na mesma ordem. Tanto quanto essas ondas, podem-se também modular feixes de luz coerente, *laser*, para uso semelhante, na telefonia, nas TVs a cabo ou na Internet.

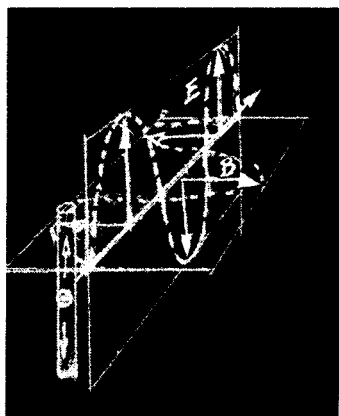


O sinal de áudio pode modular a amplitude da onda portadora ou modular a sua frequência, processos usados respectivamente nas emissoras AM e FM.

O espectro das radiações

Mesmo considerando a relativa complexidade dos equipamentos eletrônicos para emissão e recepção, é importante observar que o elemento essencial, para se produzir uma onda eletromagnética, é simplesmente uma corrente variável, ou seja, cargas sendo aceleradas e freadas. Por outro lado, já aprendemos que todas as substâncias são constituídas de partículas com carga e que, em todos os materiais, estas partículas estão em contínuo e desordenado movimento submicroscópico, oscilando e se chocando, ou seja, acelerando e freando suas cargas. É natural se concluir, a partir disto, que todas as

⁵⁷ Pode-se promover essa filtragem, por exemplo, inserindo um capacitor no circuito, dimensionado para cortar as frequências altas, das portadoras, deixando passar as frequências dos sinais de som ou imagem



Das radiofrequências aos raios gama, o único elemento essencial para se produzir uma onda eletromagnética é uma corrente variável, ou seja, cargas sendo aceleradas e freadas.

substâncias e todos os objetos emitem continuamente uma grande variedade de ondas eletromagnéticas. Vejamos, percorrendo o espectro, na direção de frequências crescentes ou, o que daria no mesmo, de comprimentos de onda decrescentes.⁵⁸

Na eletricidade e na eletrônica convencionais, utilizam-se frequências de dezenas de oscilações por segundo, como a de 50 ou 60 hertz na corrente alternada, de milhares de hertz, 10^3 hz, nas rádios AM, até centenas de milhões de hertz, 10^8 hz, nas FM's e TV's. De um bilhão, 10^9 hz até trezentos bilhões de hertz, $3 \cdot 10^{11}$ hz, está a ampla faixa das microondas, naturais ou artificiais, incluídas aquelas usadas em telecomunicações, na medicina ou na culinária. De trezentos bilhões a quatrocentos trilhões de hertz, $4 \cdot 10^{14}$ hz, estão as ondas de calor, denominadas infravermelho, para as quais nossa pele, por exemplo, possui sensores.

São estas últimas radiações, às quais nos referíamos no capítulo anterior e no parágrafo acima, que qualquer substância, mesmo materiais relativamente frios, estão continuamente emitindo, por conta do eterno movimento das suas cargas constituintes. Estar se esfriando ou se esquentando significa estar radiando mais ou radiando menos energia do que se absorve. Mesmo no vácuo, portanto, esfriam-se ou esquentam-se substâncias em desequilíbrio térmico, através das ondas eletromagnéticas de calor. Por este processo recebemos energia do Sol, ou ainda, para conter este processo se espelham as paredes das garrafas térmicas.

Acima das frequências correspondentes aos infravermelhos, estão aquelas correspondentes à luz visível. Nossos olhos conseguem detectar frequências de radiação acima de quatrocentos e trinta trilhões de oscilações por segundo, $4,3 \cdot 10^{14}$ hz, que correspondem ao vermelho, até setecentos e cinquenta trilhões de hertz, $7,5 \cdot 10^{14}$ hz, que correspondem ao violeta. Por isto, esta faixa é chamada espectro da

⁵⁸ A cada frequência f corresponde um comprimento de onda λ , fácil de calcular. A velocidade de todas as ondas eletromagnéticas é a velocidade da luz, $c = 300.000$ km/s, que é igual à frequência vezes o comprimento de onda, $c = f \lambda$, ou seja, $\lambda = c/f$. Quanto menor f , maior será λ . Uma FM pode ter comprimento de onda de vários metros e a luz visível tem λ com menos de um milésimo de milímetro.

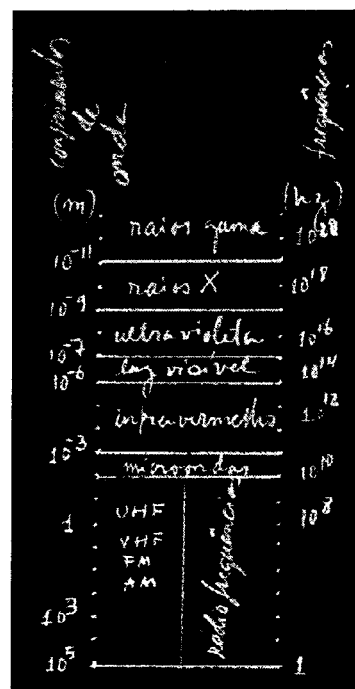
luz visível. Acima dela, até dez mil trilhões de hertz, 10^{16} hz, estão as radiações ultravioleta, seguidas pelos raios X, que chegam a três milhões de trilhões de hertz, $3 \cdot 10^{18}$ hz. Destas frequências para cima estão os raios gama, presentes em reações nucleares e na radiação cósmica.

Quanto maior a frequência da radiação, mais penetrante ela é, maior a energia dos processos capazes de produzi-la, ou maior é a temperatura do sistema que a emite espontaneamente. Como os raios gama, há raios X de origem nuclear; mas os raios X usados para radiografia são produzidos quando se freiam elétrons de altíssima energia, ao colidirem com um eletrodo metálico. Depois que se descobriu a grande variedade de radiações que a natureza produz, passou-se a investigá-las melhor, em muitos dos seus domínios. O céu, por exemplo, está sendo investigado não só por telescópios sensíveis à luz visível, mas também por antenas especiais de rádio, chamadas radiotelescópios. Há corpos celestes que emitem ondas de rádio além de luz; há outros, como as rádio-galáxias, que nem teriam sido descobertas se o céu só fosse observado com telescópios comuns.

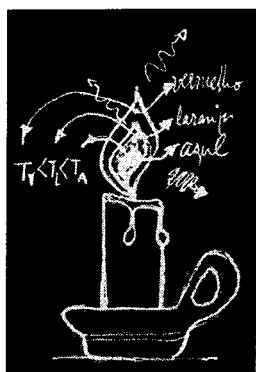
Assim como o reflexo do radar pode medir velocidades de automóveis em movimento, também se pode calcular a velocidade de estrelas e galáxias pela observação da cor de sua luz, usando-se uma propriedade descoberta já no século XIX por Hans Doppler para o som e por Hippolyte Fizeau para a luz. Se fonte e observador estiverem se afastando, o efeito é “esticar” o espaço entre ambos, diminuindo a frequência com que a onda é recebida. Nessa circunstância, o efeito Doppler faz o som ficar mais grave e a cor da luz se altera em direção ao vermelho, que é efetivamente o que se denomina desvio para o vermelho em astrofísica. Ao contrário, quando fonte e observador se aproximam, o som fica mais agudo e a luz mais azulada.

Como já dissemos, há também uma relação entre temperatura e cor nos objetos quentes, e mesmo objetos muito frios emitem várias frequências de infravermelho. À medida que um objeto vai se

Campo e ondas



Em geral, quanto maior a frequência, mais penetrante é a radiação e maior sua energia.



Todas as substâncias têm cargas em contínuo e desordenado movimento e, portanto, todos os objetos emitem continuamente uma grande variedade de ondas eletromagnéticas.

aquecendo, começam a surgir frequências mais e mais altas, que podem se tornar até dominantes. Objetos incandescentes emitem luz inicialmente vermelha, mas que pode chegar a branco-azulada, em altíssimas temperaturas. A mais notável revolução de conhecimento deste último século, a teoria quântica, surgiu da investigação da relação entre a temperatura dos objetos e a intensidade das radiações das diferentes frequências emitida por ele.

Antes de lidarmos com a teoria quântica, no entanto, é justo que tratemos de outras revoluções do conhecimento, as teorias da relatividade, até porque a teoria da relatividade especial vai permitir resolver um grave paradoxo entre a mecânica de Newton e o eletromagnetismo que se descobriu nas mudanças de referencial. Pela mecânica newtoniana, dependendo da sua velocidade relativa, quem observa veria diferentes fenômenos eletromagnéticos, ou seja, mudanças de referencial alterariam a realidade física, o que é inaceitável e, por isso, houve muita confusão, até que Einstein virou o jogo e mudou a mecânica, como veremos em seguida.