

coleção primeiros passos



Ernst W. Hamburger

O QUE É FÍSICA

4.^a
edição

editora brasiliense

O QUE É FÍSICA

Ernest W. Hamburger

Editora Brasiliense - 1992
Coleção Primeiros Passos Nº 131
ISBN 85-11-01131-5

OS FÍSICOS HOJE E O INÍCIO DA FÍSICA

Nunca a ciência foi tão importante, nunca os cientistas foram tão prestigiados, como a Física e os físicos após a 2ª. Guerra Mundial. Tinham sido os principais responsáveis pelo desenvolvimento do radar inglês e americano, dos foguetes V-2 alemães e, finalmente, das bombas atômicas americanas jogadas no Japão. As verbas dos governos para pesquisas em Física Nuclear foram dadas generosamente em todos os países, a Física passou a ser assunto de segurança nacional e muitos físicos tornaram-se gerentes de grandes projetos de construção de aceleradores, de reatores ou de novas armas.

O povo que olhava maravilhado foi ficando assustado. O cientista distraído, filósofo, ingênuo, meio trapalhão, cabelos desarrumados, foi sendo substituído pelo jovem executivo, cabelo escovado, eficiente e preciso. Além de ajudar a fazer armas de guerra, os físicos passaram a ser importantes também na grande indústria: as companhias multinacionais fundaram grandes laboratórios de pesquisas eletrônicas, óticas, radiativas, para aperfeiçoar a fabricação de aparelhos elétricos, computadores, telefones e aumentar os lucros.

Época de vacas gordas para os físicos como nunca houvera antes: laboratórios governamentais e particulares, universidades e institutos de pesquisas disputavam o contrato dos físicos mais cotados. O número de estudantes aumentou para o dobro, triplo, quádruplo... Todos tinham emprego e ganhavam bem.

Mas o milagre acabou. A economia parou de crescer. Nos EUA, o presidente (Nixon) achou que não eram necessárias tantas verbas de pesquisa, nas grandes companhias que mantêm laboratórios também; não havia mais empregos para os formados. O número de estudantes diminuiu repentinamente, laboratórios foram fechados, aparelhos desmontados. A Física voltou a ser uma atividade mais acadêmica, menos industrial, gerencial ou técnica. Essas mudanças, iniciadas nos Estados Unidos, logo ocorreram também na Europa Ocidental.

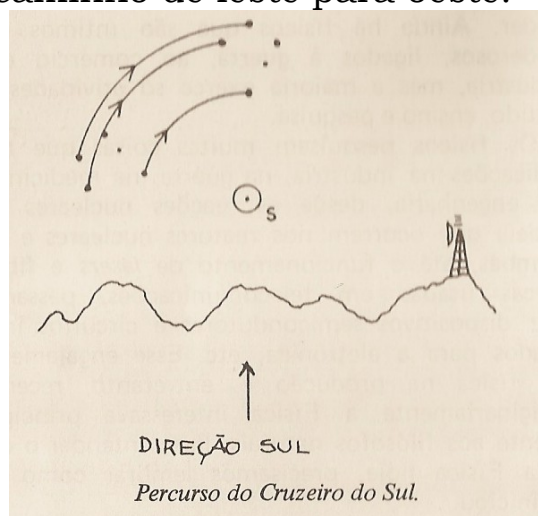
Assim foi a trajetória dos físicos no pós-guerra: primeiro, supervalorizados e mimados, depois, relegados a um segundo plano pelos detentores do poder. Ainda há físicos que são íntimos dos poderosos, ligados à guerra, ao comércio e à indústria, mas a maioria exerce apenas atividades de estudo, ensino e pesquisa.

Os físicos pesquisam muitas coisas que têm aplicação na indústria, na guerra, na medicina, na engenharia, desde as reações

nucleares em cadeia que ocorrem nos reatores nucleares e nas bombas, até o funcionamento de *lasers* e fibras óticas usadas em telecomunicações, passando por dispositivos semicondutores e circuitos integrados para a eletrônica, etc. Esse engajamento da física na produção é, entretanto, recente. Originariamente, a Física interessava principalmente aos filósofos naturais. Para entender o que é a Física hoje, precisamos lembrar como ela se iniciou.

Onde e como nasceu a Física? Seu início moderno é geralmente situado na revolução copernicana, isto é, no estabelecimento de novas idéias sobre o movimento dos astros, inclusive da Terra, que se deu a partir de Copérnico, de Kepler e de Galileu, no século XVII.

Tudo começou com o movimento das estrelas, que os homens observaram durante milhares e milhares de noites. Se olharmos o céu, vemos cada estrela, durante a noite, descrever um arco de circunferência tendo como centro o eixo da Terra. Todas as estrelas se movem juntas, como se estivessem incrustadas por dentro de uma grande esfera. Esta esfera celeste é que gira como um todo em volta de nós, fazendo uma volta completa em 24 horas. Na verdade, não são *todas* as estrelas que são fixas umas em relação às outras, como se tivessem incrustadas na abóbada celeste. O Sol e a Lua se movem em relação à abóbada, bem como alguns astros que chamamos *planetas*. Cinco planetas – Júpiter, Saturno, Marte, Vênus e Mercúrio – aparecem como se fossem estrelas brilhantes, e seus deslocamentos relativamente às estrelas fixas foram observados em detalhe durante séculos. Eles percorrem no céu trajetórias parecidas com as da Lua e do Sol, mas em um movimento mais complicado; a cada poucos meses sua velocidade diminui, param, voltam um pouco para trás, param novamente e depois retomam o caminho de leste para oeste.

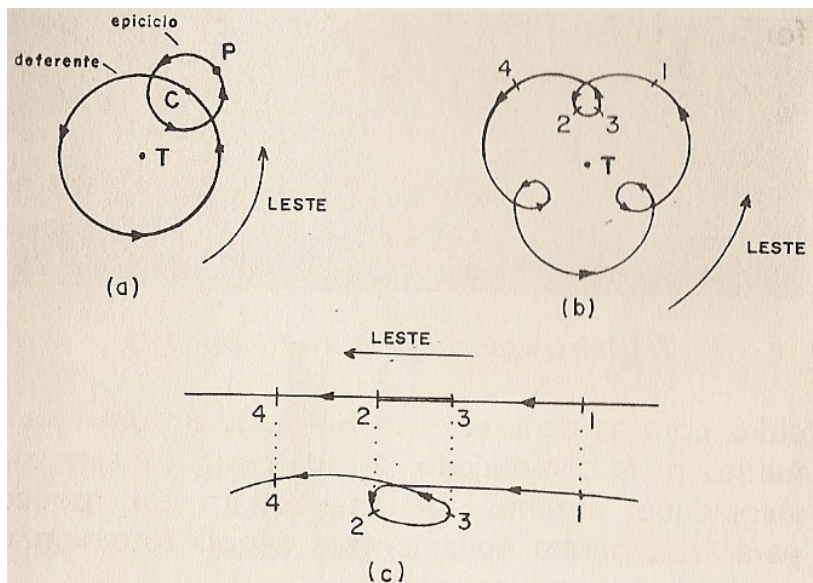


A cada noite vemos a abóbada celeste girar em torno de nós, e no dia seguinte o Sol se move através do céu. Copérnico sustentou que não eram o Sol e as estrelas que se moviam, mas sim a Terra: a Terra gira sobre si mesma a cada 24 horas, em torno de seu eixo, e, além disso, dá uma grande volta em torno do Sol a cada 365 dias. A antiga teoria *geocêntrica*, que colocava a terra no centro do Universo, deveria ser substituída por uma teoria *heliocêntrica*, em que o Sol ocupava o centro. Levou um século para que a maioria dos filósofos naturais da época (hoje diríamos cientistas) se convencesse de que a teoria de Copérnico, apesar de manifestamente contrária à nossa intuição (é *óbvio* que as montanhas, as pedras, as casas estão paradas e que o Sol se move através do céu), é que estava certa. Hoje também o Sol foi desbancado do centro do Universo e foi relegado à condição de uma entre milhões de estrelas em uma galáxia de estrelas que, por sua vez, é uma entre milhares de galáxias visíveis no céu.



Trajetoória aparente de Mercúrio em 1979.

Acreditava-se que a posição das estrelas e dos planetas influi e determina o destino das pessoas. Era importante saber calcular as posições dos astros no futuro e também no passado, para se saber onde estavam quando certa pessoa nasceu e daí predizer o seu futuro. Até hoje muitas pessoas acreditam na Astrologia, que forneceu motivação inicial para a astronomia e para a própria Física. Para prever as posições futuras (e passadas) dos astros era necessário achar métodos matemáticos que descrevessem esse movimento.



Ptolomeu, o último grande astrônomo da antiguidade, que viveu por volta do ano 140, propôs uma construção geométrica para determinar o movimento dos planetas: cada planeta P descreve uma circunferência em torno de um ponto C que, por sua vez, percorre outra circunferência em torno da Terra, que é fixa. P gira em volta de C que gira em volta de T. A trajetória de P chama-se epiciclóide. Quando vista da Terra, a trajetória aparece como uma linha reta percorrida de 1 para 2, para 3, para 4.

Os astrônomos gregos já conheciam, por volta do início da era cristã, métodos precisos para calcular as posições dos astros, utilizando construções geométricas baseadas sempre na composição de movimentos circulares centrados, em última análise, na Terra. A figura anterior mostra simplificada o método do grande astrônomo Ptolomeu, que viveu em Alexandria, no Egito.

Depois de Ptolomeu, o próximo grande passo para a compreensão dos céus demorou mil e quinhentos anos e foi dado por Kepler, que percebeu que a órbita de Marte não concordava exatamente com as previsões do método de Ptolomeu. Obteve acordo melhor, adotando a hipótese heliocêntrica de Copérnico e, além disso, postulando órbitas *elípticas*, e não circulares, em torno do Sol. Kepler hesitou muito em publicar sua descoberta (a obra saiu depois de sua morte), pois temia ser considerado herege pela Igreja, que, nesta época, adotara o geocentrismo como artigo de fé.

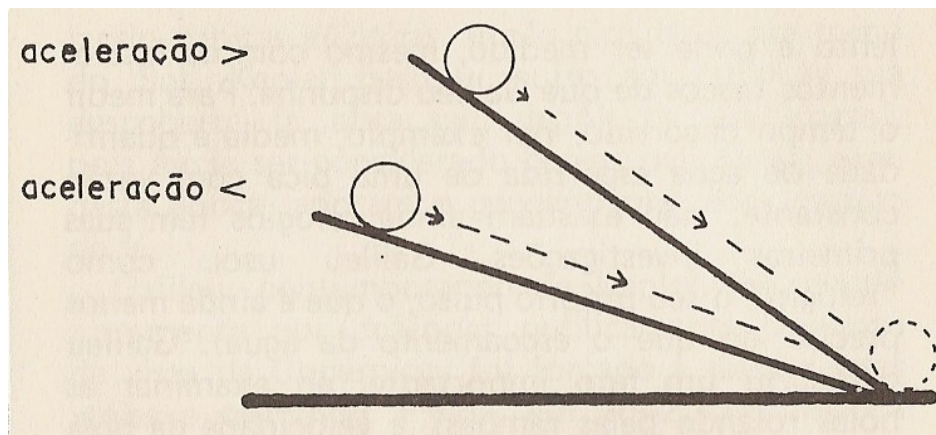
Galileu, contemporâneo de Kepler, foi punido justamente por defender publicamente o ponto de vista de Copérnico; foi forçado a abjurar essas idéias e terminou a vida, em 1642, confinado à sua

casa. A contribuição de Galileu à Física foi ainda maior do que as de Kepler e de Copérnico. Enquanto estes dedicaram todos os seus esforços ao estudo dos movimentos dos astros no céu, Galileu utilizou os mesmos modos de raciocínio e de comparação, somados à matemática, para estudar também os movimentos dos corpos na terra e as suas propriedades. Aparecia pela primeira vez com clareza um método científico como é utilizado ainda hoje. Assim nascia a Física.

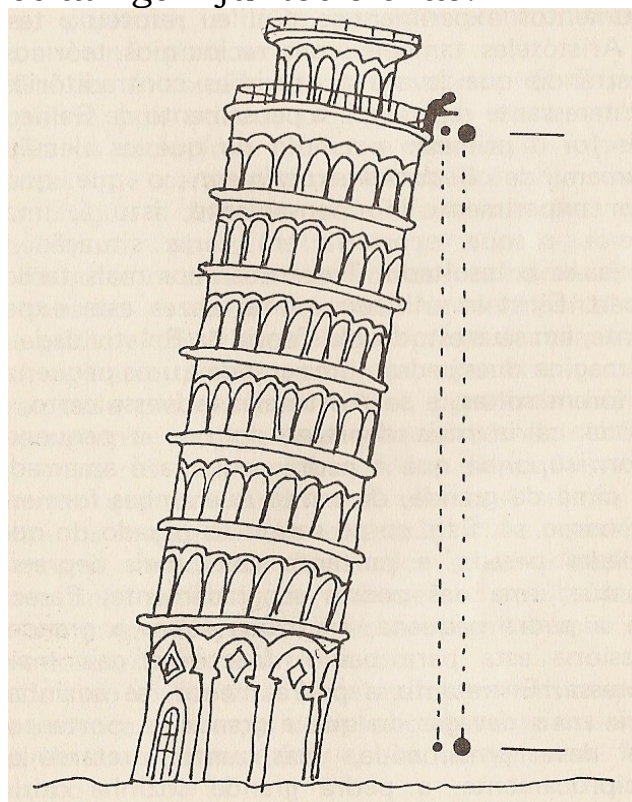
Entre os assuntos estudados por Galileu, vamos falar um pouco sobre a *queda dos corpos*. Quando deixo uma pedra cair, ou quando uma bala é disparada de um canhão, como se dá o movimento? Galileu realizou experimentos para descobrir a resposta. As pedras caem depressa demais para serem observadas em detalhe. Então ele teve a idéia de observar o movimento de uma bola que rola ao longo de uma rampa: para rampas pouco inclinadas, quase horizontais, o movimento é lento e pode ser medido, mesmo com os instrumentos toscos de que Galileu dispunha. Para medir o tempo decorrido, por exemplo, media a quantidade de água escorrida de uma bica com vazão constante: não existiam ainda relógios (em suas primeiras investigações, Galileu usou como “relógio” o seu próprio pulso, o que é ainda menos preciso do que o escoamento da água). Galileu descobriu um fato importante, ao examinar as bolas rolando pelas rampas: a velocidade da bola aumenta, à medida que ela desce, em ritmo constante. Durante o tempo que a água leva para encher um copo, o aumento de velocidade é sempre o mesmo, seja quando a bola está no início do movimento, seja no fim, quando sua velocidade já é grande. Ele criou então um conceito novo: além da velocidade e da posição de um corpo em movimento, devemos observar também o ritmo de variação da velocidade, que hoje chamamos de *aceleração*. A aceleração de um corpo é quando a velocidade do corpo varia (aumenta ou diminui) durante uma unidade de tempo (por exemplo, um segundo). Uma bola em uma rampa pouco inclinada tem aceleração pequena, isto é, sua velocidade aumenta devagar. Quanto mais inclinada a rampa, tanto maior a aceleração, Istoé, tanto mais rapidamente aumenta a velocidade. Mas para cada rampa existe um só valor de aceleração, que se mantém constante desde o início, no alto, até a bola atingir o ponto mais baixo, e que é o mesmo para todas as bolas, de diferentes pesos e tamanhos.

Galileu imaginou que este fato – a constância da aceleração – valesse também para rampas muito inclinadas, quase verticais, em que o movimento era rápido demais para se poder medi-lo, e até

mesmo no caso limite, vertical, em que a bola cai livremente. Uma bola que cai livremente tem, portanto, uma aceleração constante durante a queda, e esta aceleração é a mesma para todas as bolas, independente do seu tamanho e de seu peso. Mas uma bola não cai diferentemente de uma pedra, de um pedaço de madeira, ou de um outro corpo qualquer. Assim, qualquer corpo cai sempre, segundo Galileu, com a mesma aceleração.



Conseqüência disto é que, se soltarmos dois corpos diferentes (um pesado, outro mais leve), simultaneamente de uma mesma altura, eles atingem juntos o chão.



Galileu diz que soltou simultaneamente uma bala de canhão e uma bala de mosquete do alto de uma torre, e que as duas chegaram juntas ao chão – mas há dúvidas se realmente ele realizou este experimento. Em todo caso, hoje sabemos que chegam mesmo. Na época era aceita a doutrina do filósofo grego Aristóteles, que afirmava que os corpos pesados caem mais depressa que os leves, proporcionalmente ao seu peso. Além de argumentos experimentais, Galileu refutou a tese de Aristóteles também com raciocínios teóricos, mostrando que levava a previsões contraditórias. É interessante reproduzir o pensamento de Galileu, pois foi o primeiro exemplo do que os alemães chamam de *Gedankenexperiment*, o que quer dizer experimento no pensamento, isto é, imagina-se o que ocorreria em certa situação e analisa-se o resultado. Trezentos anos mais tarde, Albert Einstein utilizou muitas vezes este expediente, em seus estudos da Teoria da Relatividade.

Imagine duas pedras, uma grande e uma pequena. Se forem soltas, e se Aristóteles estivesse certo, a grande cairia mais depressa do que a pequena. Agora suponha que a pedra pequena é amarrada em cima da grande, de modo que ambas formem um corpo só. Este corpo será mais pesado do que a pedra pesada e, portanto, cairá mais depressa do que um das pedras separadamente. Parece que a pedra pequena, amarrada sobre a grande, pressiona esta para baixo, fazendo-a cair mais depressa. Entretanto, a pedra menor, se estivesse sozinha, cairia mais devagar do que a grande, e, portanto, não deve pressioná-la, mas, antes, retardá-la. Reciprocamente, a pedra grande sozinha cairia mais depressa do que a pequena, e deve, portanto, puxar esta por meio do amarrio. Por estes raciocínios, o corpo formado pelas duas pedras deveria cair com velocidade intermediária entre a da pedra grande e a da pequena. A afirmação de Aristóteles leva, portanto, a duas previsões contraditórias entre si e não pode ser verdadeira.

Galileu é considerado o fundador da Física moderna, pois utilizou pela primeira vez a combinação de raciocínio teórico e observação experimental que caracteriza a Física até hoje, mas não chegou a formular uma teoria completa do movimento. Isso foi feito pelas gerações seguintes de filósofos naturais e astrônomos e culminou com o trabalho de Isaac Newton. Newton percebeu que podia explicar as órbitas elípticas dos planetas se imaginasse que há uma força, a *gravitação*, que atrai cada planeta para o Sol, com intensidade inversamente proporcional ao quadrado da distância entre dois corpos. Além disso, Newton admitiu que um corpo que

não está sujeito a nenhuma força não tem aceleração, isto é, mantém a mesma velocidade (em valor e em direção) como tinha no início do movimento: a velocidade de um corpo só pode mudar se ele sofrer ação de uma força, devido a outro corpo.

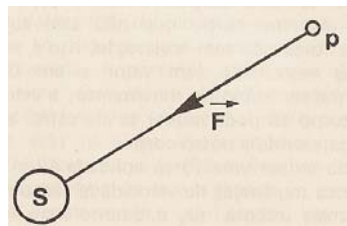
Quando existe uma força aplicada a um corpo, ela provoca mudanças de velocidade tanto maiores quanto mais intensa for, e quanto mais leve for o corpo.

LEIS DE NEWTON

A Lei da Gravitação, de Newton, pode ser representada matematicamente pela equação:

$$F = G \frac{M_p M_s}{d^2}$$

que significa que a força F que o Sol exerce sobre um planeta P aumenta proporcionalmente à massa M_s do Sol e diminui proporcionalmente ao quadrado da distância d entre o Sol e o planeta. A letra G representa um valor numérico constante pelo qual devemos multiplicar a fração $\frac{M_p M_s}{d^2}$ para obter o valor de F . Na equação acima, falta dizer qual é a direção da força: é uma força que puxa o planeta para o Sol; na figura, a seta indicada por $\vec{F}$ representa a força.



Outra lei de Newton diz que aceleração uma força produz, e pode ser resumida pela equação $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$, o que significa que para produzir uma aceleração em um corpo de massa m é necessário aplicar uma força $\vec{F}$ que é igual ao produto de m por a . As setas nos símbolos F e a significam que força e aceleração têm, cada uma, direção bem definida, e a equação diz que ambas têm a mesma direção. Por exemplo, se certa força produz em um corpo de 1 kg uma aceleração de 2 metros por segundo, então a mesma força aplicada a um outro corpo maior, de 2 kg, produzirá uma aceleração menor, de um metro por segundo. Por outro lado, se quisermos obter uma

aceleração maior, por exemplo, de 4 metros por segundo, a cada segundo, precisaremos aplicar a cada corpo uma força proporcionalmente maior: dupla para o primeiro corpo de 1 kg e quádrupla para o de 2 kg.

As leis de Newton não dizem nada sobre a trajetória dos planetas, mas a partir delas pode-se deduzir matematicamente que os planetas devem ter órbitas elípticas em torno do Sol; pode-se deduzir também, matematicamente, qual a sua velocidade ao longo do trajeto, obtendo-se assim, pelo cálculo, resultados que são iguais às observações astronômicas.

O sucesso de Newton ao explicar o movimento dos planetas, em detalhe, como sendo consequência da força de atração gravitacional, teve uma influência enorme nos séculos seguintes. Os filósofos e cientistas passaram a acreditar que seria possível explicar cientificamente, a partir da Física e da Matemática, tudo o que há no mundo. Realmente, os conhecimentos científicos aumentaram vertiginosamente, principalmente durante os últimos cem anos.

O estudo do movimento dos corpos, ou Mecânica, desenvolveu-se muito a partir de Newton. Cálculos matemáticos cada vez mais complicados foram inventados para permitir explicar e prever em todos os seus detalhes os movimentos dos planetas e de seus satélites, e dos cometas. Nasceu assim uma parte importante da Física, a *Física matemática*, em que os diversos métodos de cálculo são aplicados aos fenômenos naturais para compreendê-los e às vezes até para poder controlá-los. Os métodos conhecidos são utilizados, e também são desenvolvidas idéias novas na própria matemática. Por exemplo, o conceito de derivada de uma função apareceu a partir da velocidade: podemos dizer que a derivada é sempre a velocidade de variação da função em relação a uma variável. A Matemática foi assim fecundada por muitas idéias novas provindas da Física, como também houve o processo inverso.

Os astros no céu aparecem como pontos, como se não tivessem tamanho. Os corpos que se movem aqui na terra – pessoas, pássaros, peças de máquinas, carros, aviões. E assim por diante – têm, cada um, seu tamanho.

Cada ponto de um mergulhador que salta em uma piscina tem uma trajetória diferente: a ponta do nariz, o umbigo, o calcanhar, cada um tem o seu movimento. É muito mais difícil explicar o movimento de um mergulhador do que o de uma pequena pedra, e

por isso o cálculo matemático necessário também é mais complicado. Durante os últimos séculos, a partir de Newton, os físicos-matemáticos estudaram movimentos cada vez mais complexos, seja de corpos celestes, seja de objetos terrestres, e inventaram modos de calculá-los e de prevê-los.

O DESMATAMENTO NA INGLATERRA E A TERMODINÂMICA

Desde o século XII até o século XVI, as florestas inglesas foram sendo cortadas para fazer lenha para aquecer as casa no inverno, e também para as indústrias que começaram a ser instaladas. Assim, no século XVII não havia mais lenha suficiente, e os habitantes recorreram ao carvão de pedra. As minas de carvão eram inicialmente superficiais, mas logo acabaram essas jazidas e foi necessário abrir buracos e galerias cada vez mais profundas. Essas minas freqüentemente ficavam inundadas de água e era necessário bombear a água para obter carvão. Também as minas de estanho tinham o mesmo problema. A máquina a vapor foi inventada para esse fim específico: bombear água para esvaziar as minas. Por isso podemos dizer que a invenção da máquina a vapor teve como uma das suas causas o desmatamento.

O que é calor? Quanto calor é necessário fornecer a um corpo para aumentar sua temperatura? Como se pode realizar trabalho, produzir energia, a partir do calor? Estas são perguntas respondidas pela *termodinâmica*, que é uma parte da Física que se desenvolveu justamente da tentativa de compreender e de aperfeiçoar a máquina a vapor. Já da Grécia antiga há relatos de provocar o movimento por meio do calor, por exemplo, as portas de um templo que se abriam “sozinhas” quando era aceso um fogo no altar (o ar dentro do altar era aquecido e se expandia, assim causava o movimento das portas), mas não havia máquinas que funcionavam continuamente à base de calor. Havia moinhos e indústrias incipientes que eram movidas por rodas d’água, mas isto só era possível em locais onde havia quedas d’água.

A primeira máquina a vapor foi construída em 1698, mas era pouco eficiente e só se tornou de importância econômica e social depois de aperfeiçoada durante cerca de setenta anos. Foi nesse período também que as idéias fundamentais do estudo do calor se tornaram mais claras. Inicialmente não se distinguia claramente entre *temperatura* e *quantidade de calor*. Depois ficou evidente que eram necessárias estas duas grandezas para se descreverem

coerentemente os fenômenos observados: para aumentar a temperatura de um corpo fornece-se calor, como, por exemplo, uma panela com água no fogo. Quanto mais calor a panela receber do fogo, mais alta será sua temperatura. Mas para atingir uma certa temperatura - por exemplo, para fazer a água ferver -, a quantidade de calor necessária vai ser diferente, dependendo da quantidade de água: para fazer ferver dois litros, o tempo (a quantidade de calor) será aproximadamente o dobro do que para um litro. Isso mostra que quantidade de calor e temperatura são coisas distintas. Além do mais, se em vez de água houver óleo ou outra substância na panela, o calor que precisa ser fornecido para atingir a mesma temperatura é novamente diferente: as diferentes substâncias, mesmo em volumes (ou pesos) iguais, precisam de diferentes quantidades de calor para atingir a mesma temperatura final.

O que é então o calor? Acreditava-se, no século XVIII, que era uma substância invisível que podia penetrar em qualquer corpo, chamada *calórico*. O calórico era atraído pelos átomos das substâncias, mas era auto-repelente. Formava-se uma nuvem de calórico em torno de cada átomo e estas nuvens se repeliam entre si, evitando assim que os átomos se aproximassem demais. A temperatura dependia da densidade de calórico na superfície do corpo. Para aumentar a temperatura, fornecia-se calórico ao corpo. Isto aumentava não só o calórico na superfície, mas também a repulsão entre os átomos, fazendo com que o corpo aumentasse de volume. Explicava-se assim o fato de os corpos se dilatarem quando a temperatura aumenta.

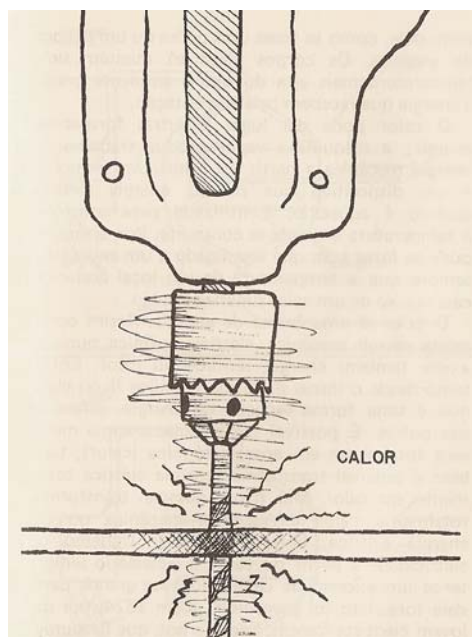
A teoria do calórico explicava quase todos os fenômenos térmicos e foi aceita durante todo o século XVIII. Ainda hoje grande parte da população concebe o calor como se fosse um fluido, e, mesmo entre os cientistas, muitas palavras e muitas idéias vêm dessa teoria. No entanto, ela foi abandonada em meados do século XIX, porque ficou claro que o calor é uma forma de energia que passa de um corpo a outro em que é devida às energias de movimento de todos os átomos do corpo. Se o corpo é sólido, o movimento de seus átomos é de vibração em torno de uma posição de equilíbrio: quanto maior a temperatura, mais intensa é essa vibração. Se for um gás ou um líquido, seus átomos (ou moléculas) se deslocam com velocidades tanto maiores quanto maior for a temperatura.

Há muitas transformações possíveis de outras energias em calor e vice-versa. Por exemplo, quando dois corpos sólidos são esfregados um sobre o outro, produz-se calor: era assim que os

índios faziam calor. Uma observação famosa deste tipo foi feita pelo conde Rumford, um aventureiro e cientista americano, na Bavária, em fins do século XVIII. Ele estava fabricando canhões para o potentado local, e para isto um tarugo de bronze precisava ser furado por uma broca de aço, para se fazer o cano do canhão. Ele observou que o atrito da broca com o canhão produzia calor continuamente, mesmo quando a broca já tinha perdido o seu corte. Parecia haver um reservatório infinitamente grande de calórico que fornecia o fluido à broca e ao canhão enquanto os dois estivessem se movimentando com atrito.

Aliás, quem já utilizou uma furadeira elétrica, sabe que sempre a broca esquenta e precisa ser resfriada com água para não se destemperar a altas temperaturas. Quando a broca está cega (sem corte), ela esquenta muito mais. A energia que é gasta no motor que faz a broca girar (Rumford usava uma parelha de cavalos em vez de motor) aparece como calor que aquece a broca e a peça que está sendo furada.

Quando um ferro de passar roupa é ligado, a corrente elétrica que passa dentro faz ele ficar quente: é energia elétrica sendo transformada diretamente em calor. Reações químicas também liberam calor: quando comemos alimentos, a digestão (que consiste numa série de reações químicas) produz calor que, entre outras coisas, mantém nossa temperatura próxima de 37°C. Se não houvesse fornecimento contínuo de calor ao nosso corpo, ele logo se resfriaria até ficar à mesma temperatura do ambiente, por exemplo, 20°C: é o que acontece na morte. Um cadáver adquire a mesma temperatura dos objetos em volta dele, como se fosse uma pedra ou um pedaço de madeira. Os corpos vivos só mantêm uma temperatura mais alta do que o ambiente graças à energia que recebem pela alimentação.

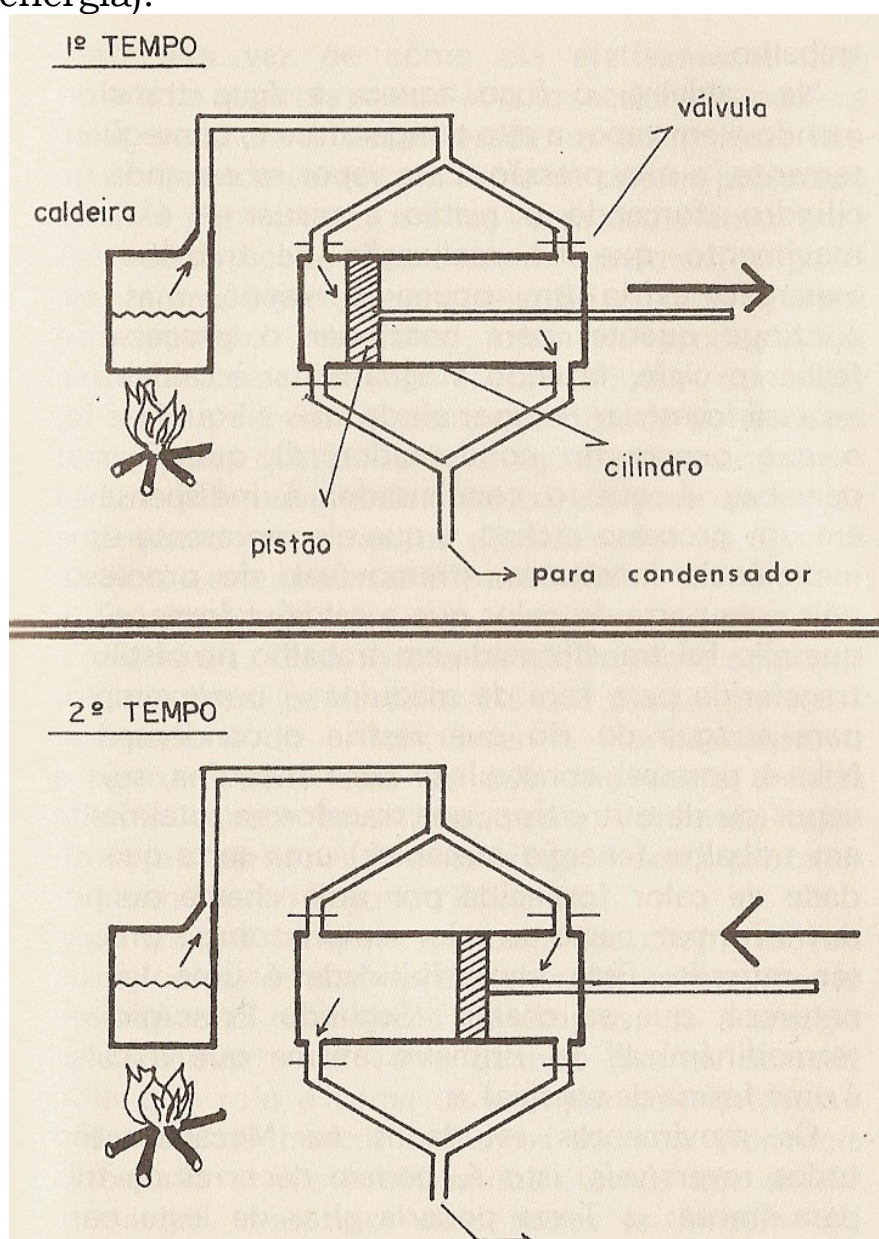


O calor pode dar lugar a outras formas de energia: a máquina a vapor produz trabalho ou energia mecânica a partir do calor. Um termopar é um dispositivo que produz energia elétrica quando é aquecido; é utilizado para controlar a temperatura e mantê-la constante. Por exemplo, pode-se fazer com que seja ligado a um aquecedor sempre que a temperatura de um local aquecido caia abaixo de um valor preestabelecido.

O calor é uma forma de energia. Assim como existe energia mecânica, elétrica, química, nuclear, existe também energia térmica ou calor. Entretanto, desde o início da termodinâmica ficou claro que é uma forma especial de energia, diferente das outras. É possível transformar energia mecânica totalmente em energia térmica (calor); também é possível transformar energia elétrica totalmente em calor. Mas não é possível transformar totalmente calor em energia mecânica ou em energia elétrica. Para se produzir trabalho ou eletricidade a partir do calor, é necessário sempre ter um excesso de calor e jogar grande parte dele fora. Isso foi percebido, já em 1824, por um jovem cientista francês, Sadi Carnot, que procurava um jeito de fazer a máquina vapor mais eficiente: gastar menos carvão ou lenha e realizar mais trabalho.

Na caldeira, o fogo aquece a água transformando-a em vapor a alta temperatura e, conseqüentemente, a alta pressão. Esse vapor se expande no cilindro, forçando o pistão a recuar – é nesse movimento que há realização de trabalho. A expansão esfria um pouco o vapor, mas ele continua quente; para continuar o processo e fazer o ciclo, fazendo a água voltar à caldeira, é necessário esfriar o vapor ainda mais e liquefazê-lo, o que ocorre no condensador. O

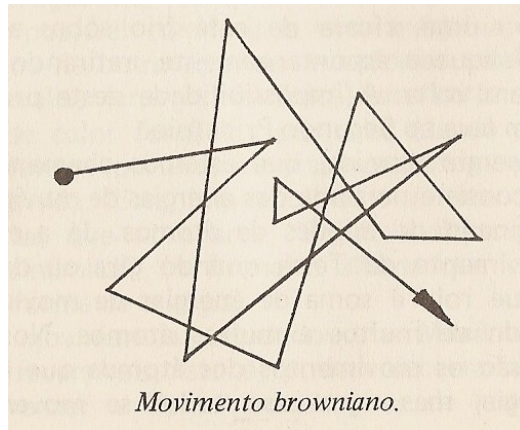
que Carnot percebeu é que o condensador é indispensável em um processo cíclico, e que ele representa uma ineficiência intrínseca, irremovível, do processo, pois nele parte do calor que a caldeira forneceu, e que não foi transformada em trabalho no pistão, é transferida para fora da máquina – por exemplo, para a água do rio que resfria o condensador. Não é possível construir uma máquina, seja a vapor ou de outro tipo, que transforme totalmente em trabalho (energia mecânica) uma certa quantidade de calor fornecida por uma chama ou por outra forma: parte do calor sempre sobra e precisa ser retirada. Esta impossibilidade é uma lei da natureza, que se chama “*Segundo Princípio da Termodinâmica*” (o primeiro princípio da termodinâmica afirma que o calor é uma forma de energia).



Os movimentos estudados na Mecânica são todos reversíveis, isto é, podem decorrer de trás para frente: a Terra poderia girar de leste para oeste em vez de como ela efetivamente gira; uma bola que rola rampa abaixo, acelerada, poderia rolar para cima, desacelerada, se assim fosse lançada. Quando vemos um filme de cinema projetado de trás para frente, muitas vezes demoramos a percebê-lo se só aparecerem movimentos puramente mecânicos, reversíveis. Só quando aparece um processo irreversível, onde há produção de calor, a coisa fica óbvia: um homem que salta do alto e cai numa piscina não pode voltar para cima, pois quando cai na água, sua energia mecânica (de movimento) desaparece para dar lugar a pequenos movimentos desordenados da água, e a calor, e este processo é irreversível.

Os processos em que intervém o calor são irreversíveis. Uma xícara de café quente colocada sobre a mesa perde calor até que a sua temperatura se iguale à do ar circundante. Nunca ocorre o inverso: uma xícara de café frio sobre a mesa não se aquece espontaneamente, retirando calor do ar em volta. A impossibilidade deste processo também leva ao Segundo Princípio.

A energia térmica, que estamos chamando de calor, consiste na soma das energias de movimento desordenado de bilhões de átomos. Já a energia de movimento da Terra quando gira ou de uma bola que rola é soma de energias de movimento ordenado de muitos e muitos átomos. Nos dois casos são os movimentos dos átomos que detêm a energia, mas num caso todos se movem em conjunto, coordenados, quando o corpo todo se move, e noutro caso cada átomo se move em uma direção diferente, com velocidade diferente e mudando rapidamente. O quente de uma xícara de café consiste no movimento desordenado, mas rápido, de todos os seus átomos, uns vibrando sem sair do lugar, outros indo para cima, outros para baixo, para o lado, e assim por diante. Quando o café esfria, estes movimentos continuam, mais devagar, entretanto, com menos energia. A figura mostra como seria o caminho de uma partícula em um movimento desordenado desses. É interessante notar que esse movimento foi descoberto por um botânico chamado Brown, quando observava grãos de pólen de flores, com um microscópio. Depois se percebeu que tais movimentos ocorrem para quaisquer partículas no ar ou em líquido. Nos sólidos, os movimentos das partículas, devido à energia térmica, são diferentes da figura, pois são deslocamentos em torno de uma posição fixa, como uma corda de violão que vibra para um lado e para outro de sua posição de equilíbrio.



A IRREVERSIBILIDADE, AS MENTIRAS ECONÔMICAS E A EXPANSÃO DO UNIVERSO:

A irreversibilidade que é característica dos fenômenos térmicos não existe na Mecânica ou na Eletricidade, e é o aspecto mais interessante da termodinâmica. Um elétron que é acelerado em campos elétricos e gravitacionais pode sempre percorrer a mesma trajetória em sentido inverso. Em contrapartida, o calor (energia térmica) nunca flui espontaneamente de um corpo de temperatura baixa para outro de temperatura alta: sempre flui do corpo quente para o frio. A xícara de café quente sempre esfria até ficar à mesma temperatura do ar em volta. Nunca se observa uma xícara de café frio esquentar sozinha às custas de calor retirado do ar. É necessário colocar a xícara sobre outro corpo mais quente do que ela para esquentá-la.

A irreversibilidade está na raiz do segundo princípio da termodinâmica e distingue o calor de outras formas de energia. Significa que para os fenômenos térmicos existem um passado e um futuro que não podem ser trocados entre si – ao contrário dos fenômenos mecânicos ou elétricos, em que essa troca pode ser feita, pois os processos são reversíveis: as leis de Newton e de Maxwell (da eletricidade) sempre que admitem um movimento, admitem também o inverso.

Sabemos pela nossa vida que o tempo não volta para trás. Entretanto, na Física não havia, antes desse princípio, nenhuma lei que distinguisse passado e futuro:

Passado → Futuro

receber um pouquinho de energia acima da média, logo em seguida ela perca o excesso e volta à média.

Uma versão mais sofisticada desta explicação era aceita, até pouco tempo, como uma demonstração de que o Segundo Princípio da termodinâmica é uma consequência, ou pode ser deduzido, teoricamente, das probabilidades das colisões atômicas. O ramo da Física que trata do movimento de número muito grande de partículas chama-se Mecânica Estatística, e dizia-se que o Segundo Princípio pode ser demonstrado a partir da Mecânica Estatística.

O público brasileiro sabe que a estatística é uma ciência delicada, que pode ser usada para enganar os outros: basta lembrar das informações oficiais sobre inflação, custo de vida, etc. Também na Física, os argumentos precisam ser examinados com cuidado. Tudo indica que a demonstração citada no parágrafo anterior, embora correta, depende de uma hipótese adicional, não contida na Mecânica nem na Teoria das Probabilidades e que não costuma ser explicitada. Sem esta hipótese, não é possível fazer a demonstração. Admitir a hipótese é praticamente admitir a irreversibilidade e o Segundo Princípio. Assim, hoje não se acredita mais que a Mecânica Estatística sozinha justifica este princípio. Um argumento geral que ajuda a entender isto é que, tomando duas teorias que não distinguem passado e futuro – a Mecânica e a Teoria das Probabilidades – e juntando-as, não se obterá uma teoria que preveja a irreversibilidade sem juntar um elemento adicional que já tenha esta característica. Juntando somente duas teorias reversíveis, obter-se-á outra teoria reversível.

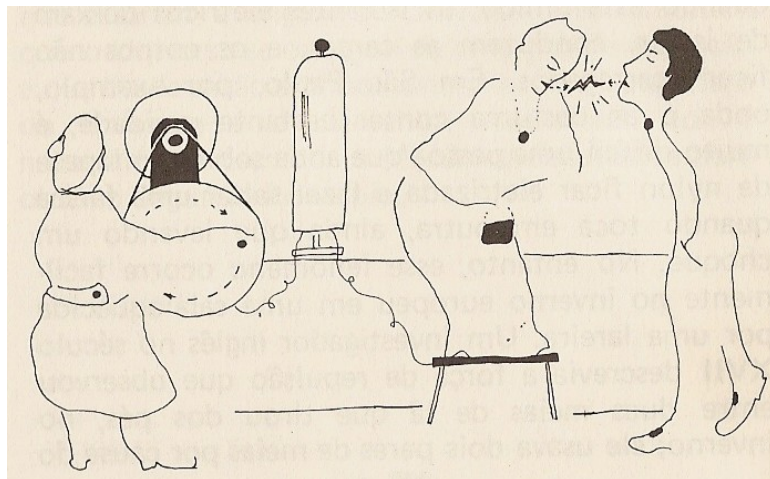
Os cosmólogos - que estudam a origem do Universo – se meteram nesta briga. Eles acreditam que o Universo se originou de uma grande explosão e que desde então estamos em expansão. A expansão do Universo é o elemento irreversível que é necessário acrescentar à Mecânica Estatística para obter o Segundo Princípio.

O BEIJO ELÉTRICO

A eletricidade foi estudada primeiramente em climas secos. Quando a umidade é baixa, os corpos adquirem cargas elétricas com facilidade, e os fenômenos elétricos são fáceis de estudar. Já quando está úmido, os isolantes elétricos deixam de isolar, conduzem as cargas, e os corpos não ficam carregados. Em São Paulo, por exemplo, onde o ar costuma conter bastante umidade, é muito difícil uma pessoa que anda sobre um tapete de nylon ficar eletrizada e fazer saltar uma faísca quando toca em outra, ainda

que levando um choque. No entanto, esse fenômeno ocorre facilmente no inverno europeu em uma sala aquecida por uma lareira. Um investigador inglês, no século XVII, descrevia a força de repulsão que observou entre duas meias de lã que tirou dos pés, no inverno; ele usava dois pares de meias por causa do frio, e o atrito de um com outro na hora de tirar eletrizou-os.

No século dezoito, faziam-se brincadeiras com estes fenômenos. Havia conferencistas-demonstradores que viajavam de cidade em cidade para mostrar os novos efeitos descobertos e falar sobre eles. A eletricidade era produzida por máquinas que causavam atrito entre materiais diferentes, por exemplo, vidro e pele de gato, e era armazenada em peças metálicas isoladas, isto é, apoiadas somente em isolantes. Em uma das brincadeiras, uma jovem ficava sobre uma plataforma isolante de madeira e tocava um terminal da máquina. Se um rapaz ousasse beijá-la, ambos levavam um choque. Havia também tentativas de utilizar a eletricidade para fins mais úteis, como curar dor de dente e certas doenças, mas os efeitos não eram seguros.



Em 1800, Alessandro Volta, na Itália, descobriu um método de produzir quantidades muito maiores de carga elétrica do que as máquinas existentes, em um dispositivo que chamou de pilha elétrica em que um ácido reage quimicamente com metais, carregando-os. A descoberta de Volta foi rapidamente assimilada, principalmente na Inglaterra e na França, e mudou os rumos da ciência elétrica. Alguns meses depois de saber dos trabalhos italianos, Humphrey Davy construía, no porão da Royal Institution, em Londres, uma pilha muito maior e mais potente do que a que Volta tivera meios de fazer. Com este equipamento fez descobertas

importantes. Descobriu a eletrólise, que é o processo inverso do que se dá na pilha: em vez de reações químicas produzirem eletricidade, é a corrente elétrica que decompõe as substâncias químicas. Por meio da eletrólise identificou elementos novos, como sódio e potássio.

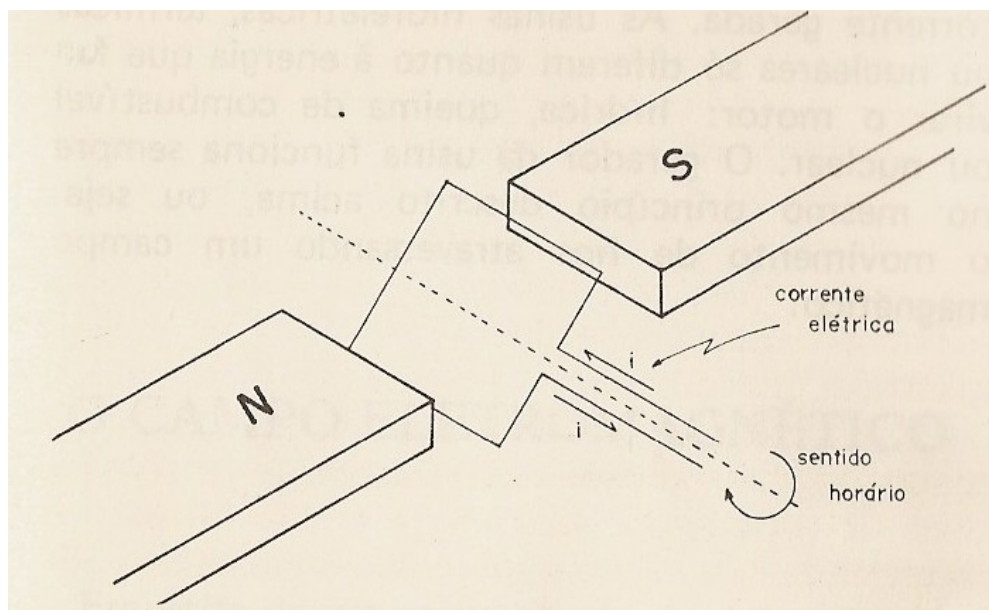
As correntes elétricas intensas que foi possível produzir a partir da pilha de Volta permitiram outras descobertas. Um professor dinamarquês, Oersted, percebeu que uma corrente em um fio produz um campo magnético, causando o desvio da direção de uma bússola colocada perto do fio. O magnetismo já era conhecido e a bússola era um instrumento básico de navegação, há mais de um século, mas sempre produzido por ímãs, que são pedaços de ferro magnetizados. Agora era possível obter efeitos magnéticos com qualquer material, contanto que passasse uma corrente elétrica. Eletricidade e magnetismo deixaram de ser assuntos independentes. Assim como no caso da pilha, a descoberta dinamarquesa foi rapidamente aproveitada por cientistas ingleses e franceses. André Ampère, em Paris, rapidamente repetiu e ampliou as experiências de Oersted e procurou formular uma teoria do novo fenômeno.

Antes de prosseguir a história, abrimos um parêntese: hoje, como naquela época, as descobertas científicas feitas nos países periféricos ou não industrializados vão beneficiar, via de regra, as economias dos países altamente industrializados, pois eles contam com instituições e meios para desenvolver rapidamente as pesquisas até chegar a aplicações práticas. Oersted e Volta fizeram as descobertas, mas o desenvolvimento posterior e as aplicações ocorreram principalmente em países onde a industrialização e o capitalismo estavam mais avançados.

Não só uma corrente elétrica produz um campo magnético, como também o fio pelo qual passa sofre uma força quando é colocado em um outro campo magnético. Assim, um fio que está perto de um ímã se move quando é ligada a corrente. Quando foi descoberto este efeito, logo foram construídos os primeiros motores elétricos, ainda como brinquedos, mas sem aplicações úteis.

Ainda faltava completar o quadro: se a corrente elétrica produzia campo magnético e sofria forças magnéticas, era de se esperar que, inversamente, um ímã (campo magnético) devesse ser capaz de gerar uma corrente elétrica ou um campo elétrico. Esse efeito foi mais difícil de descobrir, mas acabou sendo achado pelo inglês Michael Faraday. A dificuldade proveio do fato de um ímã parado perto de um fio não produzir efeito elétrico nenhum. A

corrente elétrica só aparece quando o ímã é rapidamente movimentado perto do fio, ou quando o fio é movimentado perto do ímã. Este é o princípio dos geradores de eletricidade: um motor movimenta rapidamente os fios em um campo magnético, sendo que o próprio campo magnético costuma ser produzido pela corrente gerada. As usinas hidrelétricas, térmicas ou nucleares só diferem quanto à energia que faz virar o motor: hídrica, queima de combustível ou nuclear. O gerador da usina funciona sempre no mesmo princípio descrito acima, ou seja: o movimento de fios atravessando um campo magnético.



Princípio de funcionamento do motor elétrico

O CAMPO ELETROMAGNÉTICO

Em volta de um corpo eletrizado, há um campo elétrico. Isto quer dizer que a presença da carga elétrica modifica o espaço em volta. Quando se coloca outra carga em um ponto próximo, ela sofre uma força de atração ou de repulsão, conforme as cargas tenham sinal oposto ou o mesmo sinal. A corrente elétrica que flui em um fio ligado a uma pilha é impulsionada pelo campo elétrico que surge dentro do fio por ação da pilha.

Por outro lado, um ímã modifica o espaço, criando um campo magnético que é uma região em volta dele, onde outros ímãs sofrem forças. Uma corrente elétrica também cria um campo magnético em torno do fio.

O mais interessante, entretanto, é o que ocorre quando o ímã é movimentado, fazendo variar o campo magnético. Faraday

descobriu que esta variação fazia aparecer corrente elétrica sem necessidade de pilha: quando o campo magnético em um ponto não é constante com o tempo, faz aparecer um campo elétrico. Os dois campos são intimamente ligados entre si.

Desde Ampère, a explicação aceita para a existência de imãs é que, nesses materiais, existem correntes elétricas internas que produzem o campo magnético. Cada átomo de ferro contém correntes elétricas internas que o tornam um pequeno imã. Quando todos os imãzinhos em um pedaço de ferro são alinhados, paralelamente, temos um imã. Este mesmo pedaço de ferro pode ser desmagnetizado, fazendo com que os átomos fiquem fora do alinhamento, com seus imãzinhos apontados em todas as direções. A corrente elétrica interna aos átomos é interpretada como devida ao movimento dos elétrons em torno do núcleo do átomo. Assim, todos os fenômenos do magnetismo são explicados como devidos ao movimento de cargas elétricas, seja em correntes elétricas em fios ou em outros corpos condutores de eletricidade, seja dentro dos próprios átomos.

A carga elétrica mesmo parada gera um campo – o campo elétrico. Quando em movimento, gera também um campo magnético. Mas, além disso, se em um local não existirem cargas elétricas, mas existir um campo magnético que se altera com o tempo, então aparece também um campo elétrico. É possível, portanto, gerar um campo elétrico mesmo na ausência de cargas elétricas, se existir um campo magnético variável.

Será que a recíproca é verdadeira? Será que um campo elétrico variável gera um campo magnético? Esse efeito não era observado diretamente, mas Maxwell, na Inglaterra, em 1860, formulou uma teoria em que supôs que realmente um campo elétrico variável gera um campo magnético. Percebeu que então deveriam existir campos eletromagnéticos que se propagam no espaço, independentemente da existência de cargas elétricas. A coisa funciona do seguinte modo: se em certo lugar existe um campo magnético que está variando com o tempo, então ele gera um campo elétrico que varia com o tempo. Mas este campo elétrico variável gera um novo campo magnético variável, que por sua vez gera um campo elétrico variável que gera um campo magnético, e assim por diante. Esse campo eletromagnético se desloca com alta velocidade no espaço, e Maxwell pôde calcular essa velocidade a partir das propriedades já conhecidas dos campos elétricos e magnéticos separados. Obteve um valor igual à velocidade, já conhecida, da luz. Seria coincidência demais haver dois fenômenos diferentes que se propagam

exatamente com a mesma velocidade. Supôs então que a luz é um campo eletromagnético que se propaga, e esta hipótese foi amplamente confirmada nos anos seguintes.

Houve, assim, uma grandiosa unificação de três campos da Física que pareciam independentes entre si: a eletricidade, o magnetismo e a ótica (que estuda a luz), que são, na verdade, manifestações diversas de um só ente físico: o campo eletromagnético.

LUZ, ONDAS ELETROMAGNÉTICAS E ÉTER

Além da luz, existem outras ondas eletromagnéticas: as ondas de rádio, produzidas por uma corrente elétrica que varia rapidamente em uma antena, as microondas, a radiação infravermelha, a ultravioleta, os raios X, os raios gama. Todas essas radiações consistem em campos eletromagnéticos que se propagam a alta velocidade (a velocidade da luz) e só diferem entre si pela sua frequência: a onda de rádio é de 100 quilociclos por segundo, até alguns milhões de ciclos por segundo, o que significa que cada componente do campo eletromagnético (a onda elétrica e a onda magnética) varia de positivo para negativo entre cem mil vezes e alguns milhões de vezes durante cada segundo. Já as microondas têm frequências de dezenas de milhões de ciclos por segundo, e para o infravermelho são ainda maiores, de milhares de milhões por segundo. A luz à qual nossos olhos são sensíveis corresponde a frequências de milhões de milhões e os raios X a bilhões de ciclos por segundo, enquanto que os raios gama emitidos pelos núcleos dos átomos têm frequências ainda mil vezes maiores. Para a luz visível, cada frequência corresponde a uma cor: o azul tem frequência alta, e maior do que o verde, que tem frequência maior que o amarelo, que por sua vez está acima do vermelho.

Existem campos eletromagnéticos em todo lugar em todo instante. De dia é a luz do Sol que tudo ilumina, mas mesmo a noite há radiação, seja proveniente da Lua e das estrelas, seja emitida pelos próprios objetos aqui na Terra. Qualquer corpo que não esteja à temperatura de zero absoluto emite ondas eletromagnéticas. Para temperaturas acima de 600°C, estas ondas são visíveis, enquanto em temperaturas mais baixas são de infravermelho, para o qual o olho humano não é sensível. Por isso os sensores de infravermelho são capazes de detectar a presença dos objetos mesmo no escuro. É que é escuro só para nós, por

limitação da nossa vista; se o nosso olho fosse sensível ao infravermelho, diríamos que a noite é menos clara que o dia, mas ainda enxergaríamos.

Até mesmo o espaço interestelar, onde não há nenhuma estrela, está cheio de radiação infravermelha, que se cruza e intercruza, em todas as direções, proveniente das estrelas e da matéria muito mais tênue que existe entre elas.

Os campos eletromagnéticos não são matéria, isto é, não são partículas que se propagam. São como as ondas que se propagam em alto mar: a onda se desloca para frente sem que haja uma correnteza levando-a. A onda avança de leste para oeste, por exemplo, sem que a água do mar se desloque nessa direção. Mas se são ondas eletromagnéticas, o que está ondulando? Qual é o meio material, a substância, que desempenha o papel da superfície da água nas ondas do mar? Esta pergunta preocupou muito os cientistas do fim do século passado (dezenove), que chamaram de éter esta substância.

Outro exemplo de ondas que conhecemos é o som, que se propaga no ar, na água ou nos objetos sólidos, e consiste em um movimento vibratório dos átomos das substâncias que se propaga de cada átomo para seus vizinhos sem que os átomos se desloquem de suas posições médias. A vibração se propaga sem que o ar (ou a água ou o objeto) sofra deslocamento como um todo, não se formando nenhum vento para o som se propagar. No vácuo, o som não existe, não pode se propagar.

Já a luz atravessa o vácuo sem nenhuma dificuldade. Até pelo contrário, quando atravessa um meio material - o ar, a água, mesmo um gás rarefeito -, a luz é parcialmente absorvida, enquanto que no vácuo ela passa incólume, sem diminuir sua intensidade. A luz do Sol que atinge a terra é muito mais intensa do que a que chega até nós, porque a atmosfera absorve uma grande parte, mas quase não há absorção ao longo do caminho entre o Sol e as camadas mais altas da atmosfera.

O éter deve ser então uma substância invisível, e imponderável, pois existe onde a luz passa e a luz passa mesmo onde há vácuo, isto é, onde pensamos que não há nenhuma matéria. Por outro lado, o éter deve ser uma substância muito rígida! Isto porque a velocidade da luz é muito grande, muito maior do que a velocidade do som ou qualquer outra velocidade conhecida. A velocidade do som em um material é tanto maior quanto mais rígido for o material: é maior no ferro do que na madeira, maior nesta do que na água, onde ainda é maior do que

no ar. A rigidez maior faz com que a vibração das partículas em um lugar se propague mais rapidamente para outros lugares.

O éter seria então um material com propriedades estranhas: levíssimo, mas muito rígido, e invisível. Além disso, deve ser perfeitamente penetrável, já que todos os movimentos dos astros, da Terra, dos seres e objetos na Terra se dão dentro dele. Mais adiante voltaremos ao problema do éter, que foi uma das questões que levou à teoria da relatividade, no início do século XX.

INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA

A termodinâmica é um ramo da ciência que nasceu dos esforços de se compreender e aperfeiçoar a máquina a vapor: a teoria veio nitidamente depois da prática, embora, depois de elaborada, a teoria tenha influído muito sobre a prática.

A eletricidade foi diferente. É o primeiro ramo da tecnologia que nasceu a partir da ciência. Podemos dizer que a teoria precedeu à prática, mas é necessário frisar que “teoria” nesta frase significa a pesquisa científica, que contém parte teórica e parte prática. Primeiro vieram os estudos da natureza da eletricidade, a descoberta de que há corpos condutores e isolantes, a formulação das leis básicas de atração e repulsão. Já nesta fase apareceu uma aplicação importante: o pára-raios, inventado por Benjamim Franklin (nos Estados Unidos, em 1750, pouco antes da independência do país), a partir do reconhecimento de que as pequenas faíscas das máquinas elétricas eram semelhantes aos raios das tempestades.

Depois de Franklin, houve cerca de 80 anos de progresso na ciência da eletricidade e do magnetismo, mas sem aplicações importantes para a vida diária. Foram desenvolvidos medidores elétricos, geradores e motores, tudo em escala-piloto, visando somente novos estudos, brinquedos e curiosidades. A próxima aplicação importante foi o telégrafo, que se tornou comercial a partir da metade do século XIX; depois, a lâmpada e o motor elétrico, que ficaram importantes ao fim do século.

Hoje, o modelo de inovação tecnológica que predomina na indústria é o da eletricidade. As indústrias mantêm grandes laboratórios de pesquisa para desenvolver novos produtos e novos métodos de fabricação e também para acompanhar as pesquisas básicas realizadas em universidades e institutos – para poder aplicar rapidamente qualquer nova descoberta. Aliás, a inovação

tecnológica se tornou um elemento essencial do sistema capitalista como fator de aumento de lucros, importante na concorrência entre empresas. As pesquisas sistemáticas com objetivos industriais e comerciais bem definidos são características dos estágios avançados do capitalismo, mas eram realizadas também nos países ex-socialistas. Na Física, o entrosamento da pesquisa no sistema de produção se deu primeiramente na eletricidade, no século passado, e ainda hoje é mais acentuado neste campo. As invenções dos transistores, dos micro-circuitos e dos outros dispositivos eletrônicos nos últimos anos se deram a partir de pesquisas básicas das propriedades elétricas dos materiais, principalmente dos semicondutores. As aplicações da energia nuclear ocorreram depois das principais descobertas sobre o núcleo atômico. O *laser* começou a ser aplicado cerca de dez anos após a sua invenção, que se deu em um laboratório de pesquisa básica, partindo de previsões teóricas de que seria possível produzir um feixe de luz monocromático (de uma só cor) e de raios paralelos e coerentes.

APOGEU E CRISE DA FÍSICA CLÁSSICA

Três grandes ramos da Física estavam plenamente desenvolvidos no fim do século XIX: a Mecânica, a Termodinâmica (incluindo aí a Mecânica Estatística) e a Eletricidade (incluindo Magnetismo, Eletromagnetismo e Ótica). São os três pilares da chamada Física clássica. Tão grande tinha sido o poder explicativo dessas teorias que os cientistas acreditavam que todos os fatos fundamentais da Física já eram conhecidos, e que às gerações futuras só restava a tarefa de preencher pequenas lacunas de conhecimento que ainda sobravam.

Os sucessos da Física clássica incluíam a explicação dos movimentos dos planetas e dos astros em geral, a ponto de se conseguir prever a existência de planetas desconhecidos (Urano) a partir da observação de pequenos desvios nas órbitas de outros planetas. A máquina a vapor tinha sido grandemente aperfeiçoada, levando a uma profunda modificação da sociedade: a revolução industrial. A eletricidade já era também utilizada na indústria e nas residências, com motores, lâmpadas elétricas e o telégrafo transmitindo mensagens até através dos oceanos. Nunca antes houvera uma explicação tão completa dos fenômenos naturais nem aplicações tão importantes na vida diária. Foi uma época *clássica*

da Física, coroamento do desenvolvimento iniciado por Galileu, três séculos antes.

Entretanto, a idéia de que nada mais restava a descobrir era ledor engano. Novos fenômenos, observados a partir de 1895 não eram explicados pela teoria clássica, e ficou claro que também fenômenos já conhecidos encerravam contradições em suas interpretações. Em poucos anos ocorreu uma nova revolução científica na Física, substituindo a Física clássica pelo que chamamos de Física moderna, que é atômica, quântica e relativística.

As rachaduras no edifício da Física clássica apareceram em várias áreas: a estrutura dos átomos, a natureza da luz, os conceitos de espaço e de tempo.

Os átomos eram imaginados como constituídos de pequenas cargas elétricas positivas e negativas, movendo-se umas em torno das outras, e a emissão de luz seria devida ao movimento das cargas. Um átomo poderia emitir qualquer quantidade de luz, grande ou pequena, dependendo dos movimentos das cargas dentro de si mesmos. Em 1900, na virada do século, Max Planck, na Alemanha, provocou uma revolução na Física, negando essa afirmação. Dizia que, para cada tipo de átomo, somente certas quantidades de energia luminosa, chamadas “quanta”, podem ser emitidas. É impossível um átomo emitir meio quantum ou um terço de quantum ou qualquer fração de quantum: somente são emitidos números inteiros de quanta. Era o início da mecânica quântica, que substituiria a mecânica na descrição dos átomos. É interessante saber que Planck foi levado à sua teoria revolucionária quase a contragosto, pois acreditava firmemente na mecânica clássica. Entretanto, foi levado a negá-la porque de outro modo não conseguia explicar as cores (isto é, os comprimentos de onda) da luz emitida por corpos muito quentes como, por exemplo, o ferro em um alto-forno de uma siderúrgica, que brilha com cor quase branca à temperatura de 3000°C, é amarelo a 1500°C e vermelho a 600°C. Se a mecânica clássica de Newton valesse dentro do átomo, então seria possível ele emitir qualquer quantidade de energia luminosa; e existência dos quanta é uma restrição adicional que caracteriza a mecânica quântica.

A FÍSICA QUÂNTICA

Demorou alguns anos até que os físicos se dessem conta de como era revolucionária a proposta dos quanta de Planck. Einstein foi dos primeiros a reconhecer isso e percebeu que toda luz é sempre quantizada, isto é, só existe em quantidades de energia bem determinadas, que são chamadas fótons. O quantum de energia luminosa, ou de qualquer radiação eletromagnética, é o fóton. O fóton é uma onda eletromagnética que se propaga com a velocidade da luz e tem frequência determinada; difere de uma onda clássica porque sua energia é determinada (é proporcional à frequência) e tem tamanho finito. Assim, em cada instante, o fóton está em um lugar bem definido. Para imaginar o que é o fóton, podemos pensar em uma lagoa num dia sem vento, com a superfície da água lisa. Um homem dá algumas braçadas e pára; ele produz algumas cristas de onda que se propagam na superfície, deslocando-se sempre juntas. O fóton consiste em um grupo de cristas de onda eletromagnéticas de certa frequência e certa energia que se propaga com altíssima velocidade através do espaço.

Como é emitida a luz? Observamos freqüentemente a matéria emitindo luz: o Sol, as lâmpadas, a chama de uma vela (trata-se de gases incandescentes), um ferro em brasa, etc. São os átomos que emitem a luz, mas havia dificuldade de explicar essa emissão com base na teoria clássica, pois ela previa que um elétron que gira em torno de um núcleo deveria emitir luz, perdendo energia de movimento para criar energia luminosa, até parar e se juntar com o núcleo. Ora, não é isso que se observa: os átomos não perdem a capacidade de emitir luz. Além disso, cada tipo de átomo, isto é, cada elemento químico, emite luz somente de certos comprimentos de onda, ou seja, de certas cores, e a teoria clássica não prevê isso.

Em 1913, Niels Bohr, na Dinamarca, estendeu a teoria quântica para os fenômenos de emissão de luz. Postulou que a teoria da eletricidade que vale para corpos de tamanho de centésimo de milímetro para cima, não vale dentro do átomo (tamanho de um centésimo de um milionésimo de centímetro), e que, portanto, o elétron em órbita em volta do núcleo não irradia luz, mas continua indefinidamente girando com a mesma velocidade na mesma órbita; só que isso não acontece em qualquer órbita, mas somente em certas órbitas, características do tipo de átomo. A emissão de luz se dá, segundo Bohr, de uma só vez – um fóton – quando o elétron passa de uma órbita permitida para outra de energia menor. A energia do fóton é igual à diferença das

energias do elétron na órbita inicial e na final. Assim, a quantização da luz, isto é, o fato de a luz emitida por certo átomo conter somente certos comprimentos de onda, corresponde a uma quantização das órbitas possíveis para o elétron naquele átomo. Ambas as quantizações são, no fundo, de energia: o átomo emite somente fótons de certas energias porque o elétron só pode ficar em órbitas com certas (outras) energias.

A teoria de Bohr foi aceita rapidamente porque explicava bem as emissões de luz por muitos átomos. A mecânica clássica, baseada nas leis de Newton, e que explica tão bem o movimento dos astros, das peças das máquinas, dos projéteis balísticos, dos corpos macroscópicos, enfim, falhava quando aplicada às micropartículas dos átomos. O elétron não podia ser representado como uma minúscula bolinha que se movimenta como se fosse uma bola: apareciam fenômenos novos, inexplicáveis na Física clássica. Este fato foi ficando cada vez mais evidente. Descobriu-se que o elétron às vezes se comporta como se fosse uma onda, semelhante ao fóton. Este, por sua vez, se comporta em certos experimentos como se fosse uma partícula. Em verdade, ambos têm ao mesmo tempo propriedades de partícula e de onda! Ao nível atômico não existem partículas que possam ser pensadas como minúsculas bolas que têm certa massa e certa posição: sempre existem associadas a elas propriedades de onda, isto é, um comprimento de onda, e um lugar no espaço que não se restringe a um ponto, mas cobre toda uma região, ainda que pequena.

Como se evidencia a natureza ondulatória das partículas atômicas? Normalmente as cristas das ondas são tão próximas umas das outras (isto é, o comprimento de onda é tão pequeno) que não são observáveis. Entretanto, quando os elétrons passam por um cristal fino em que os átomos estão dispostos em fileiras eqüidistantes, ocorre um fenômeno característico de ondas, chamado difração, que faz com que cristas sucessivas fiquem longe umas das outras, permitindo observação. Com luz, a difração aparece ao passar por um vidro no qual há riscos opacos distantes entre si um ou alguns comprimentos de onda, coisa da ordem de 0,00005 centímetro. Para os elétrons o comprimento de onda é bem menor, comparável à distância entre átomos de um cristal; assim, a difração é observada na travessia de cristais.

Partículas atômicas mais pesadas do que os elétrons também exibem propriedades de onda: prótons (que são os núcleos de hidrogênio), nêutrons (que têm a mesma massa dos prótons, mas carga elétrica nula), partículas alfa (que são núcleos de átomos do

elemento hélio), e todas as outras partículas conhecidas, sofrem fenômenos de difração. Entretanto, o seu comprimento de onda é ainda muito menor do que os elétrons e, com mais forte razão, do que a luz. O comprimento de onda é comparável às dimensões do núcleo atômico, ou seja, um milionésimo de um milionésimo de centímetro. Assim, a difração só é observável quando as partículas atravessam outros núcleos atômicos. As experiências são feitas em aceleradores de partículas em que as partículas aceleradas a grande velocidade são dirigidas para um material cujos núcleos atravessam, desviando-se; o ângulo de desvio depende do comprimento de onda.

A dualidade entre partícula e onda que as “partículas” atômicas exibem foi um dos aspectos mais difíceis de serem aceitos pelos físicos e deu lugar a muitos debates científicos e filosóficos, pois parecia contradizer requisitos fundamentais da física. Por exemplo, quando um elétron incide sobre uma placa metálica na qual foram feitos dois pequenos orifícios vizinhos, pode atravessar a placa. Quando o comprimento de onda do elétron é comparável à distância entre os orifícios, não podemos dizer por qual dos orifícios passou: comporta-se como uma onda, que passa por ambos e se recombina depois, dando lugar a fenômenos de difração. Assim, em alguns lugares atrás da placa a probabilidade de o elétron passar aumenta quando um dos orifícios é tapado! Este efeito, incompreensível para uma partícula puntiforme, é natural para uma onda.

Neste ponto, a fábula dos cinco cegos e o elefante é instrutiva. Há muito tempo, em um país remoto, havia um rei que tinha como conselheiros cinco homens muito sábios, que eram cegos. Chegou notícia à corte de que em uma cidade nos limites do reino tinha aparecido um animal desconhecido chamado elefante. O rei então mandou seus conselheiros irem lá para examinarem o estranho animal e depois lhe darem sua descrição. Os sábios foram e, alguns dias depois, estavam de volta. O elefante é como um grande barril suspenso sobre o chão, disse o primeiro, que tinha apalpado a barriga do elefante por baixo. Não é nada disso, é como um tronco de árvore, disse o segundo, que tinha abraçado a perna do bicho. Vocês estão enganados, o elefante se parece com uma mangueira de apagar incêndio, disse o terceiro, que tinha pegado na tromba. O quarto, que tinha tocado as orelhas, achava o animal parecido com um acolchoado. O quinto tinha puxado o rabo e disse, meio envergonhado, que o elefante é como uma corda pendurada no alto

e quando a gente puxa, cai um monte de sujeira em cima da gente...

O elefante é um ente muito mais complexo do que um barril, um tronco de árvore, uma mangueira, apesar de em certas circunstâncias poder ser considerado semelhante a esses objetos. Da mesma forma, o elétron é um ente mais complexo do que uma bolinha quase puntiforme ou do que uma onda que se propaga no espaço, apesar de que em certos experimentos ele se comporte como se fosse uma bolinha e em outros como se fosse uma onda.

Como conciliar, em nossas cabeças, os aspectos de partícula e de onda exibidos por elétrons, prótons e outras chamadas “partículas” atômicas? Um exemplo da dificuldade de juntar essas propriedades está no princípio da incerteza, que é uma lei científica que afirma que é impossível saber, com precisão absoluta e ao mesmo tempo, a posição e a velocidade de uma dessas partículas: se determinarmos com grande precisão a posição, a velocidade fica indeterminada, e se, por outro lado, determinarmos a velocidade exatamente, é a posição que fica desconhecida.

A conciliação de seu por meio do conceito de probabilidade. Há uma onda que se propaga, mas o significado desta onda é a probabilidade de se encontrar a partícula puntiforme em cada ponto. Em outras palavras, nos locais onde a onda é intensa, é muito provável encontrar-se a partícula, e onde ela é fraca, é pouco provável encontrar-se a partícula. Esta interpretação da mecânica quântica levantou muitas objeções filosóficas, pois a teoria deixava de ser determinista. A mecânica clássica é determinista, isto é, quando se descrevem de forma completa a posição e a velocidade de uma partícula num dado instante, e se conhecem as forças que agem sobre ela, pode-se prever exatamente onde a partícula estará em cada instante subsequente: o seu movimento posterior fica determinado. Para a mecânica quântica, ao contrário, fica determinada somente a probabilidade de a partícula se encontrar em diversos lugares, e não sabemos com certeza onde estará. Mesmo que saibamos com toda a certeza sua posição e velocidade iniciais, não fica determinado seu movimento posterior, mas determinam-se somente as probabilidades de diversos movimentos possíveis. A teoria é indeterminista.

Einstein foi um dos físicos que mais relutaram em aceitar esta interpretação indeterminista, e tinha objeções do tipo “*Deus não joga dados para decidir a trajetória de uma partícula*”. Apesar de suas objeções, entretanto, a teoria foi sendo aceita pelos físicos, pois permitia calcular corretamente muitos fenômenos que ocorrem

nos átomos: emissão e absorção da luz, condução de eletricidade nos materiais, transmissão de calor, etc. As objeções filosóficas foram respondidas apenas parcialmente, e os fundamentos da mecânica quântica continuam em discussão.

É interessante que o desenvolvimento inicial da mecânica quântica, desde o início de século XX até a Segunda Guerra Mundial, foi centrado na Europa e, particularmente, na Alemanha. Planck foi professor em Berlim e para lá chamou Einstein. A associação de uma onda ao conceito de partícula foi proposta por Louis de Broglie, na França, e expressa de forma matemática correta por Erwin Schroedinger, na Alemanha. A interpretação probabilística dessas ondas foi dada por Max Born e o princípio da incerteza foi formulado por Werner Heisenberg, ambos na Alemanha. O modelo de átomo de Born se baseou na descoberta do núcleo do átomo por Rutherford, na Inglaterra. O elétron tinha sido identificado como partícula por Thomson, também na Inglaterra, e sua carga tinha sido medida com precisão por Millikan, entre outros, nos Estados Unidos. A difração de elétrons também foi observada primeiramente nos Estados Unidos, em um laboratório industrial de pesquisas. A derrota da Alemanha na Primeira Guerra Mundial (1914-1918) parece não ter diminuído a liderança alemã nesta área científica. Já o advento do nazismo, com suas perseguições ideológicas e raciais, e a Segunda Guerra, transferiram para os Estados Unidos essa liderança. Há interessantes estudos sociológicos para tentar entender que características sociais, econômicas, históricas, culturais e políticas da sociedade alemã da época trouxeram esse florescimento científico, mas não há ainda conclusões geralmente aceitas. Alguns fatores claramente foram importantes, como por exemplo, o sistema universitário alemão, bastante desenvolvido no século XIX, com muitas escolas e um sistema de seleção de professores que valorizavam a produção científica. A indústria metalúrgica que fomentou estudos de fenômenos a altas temperaturas foi importante para Planck, assim como estudos das cores da luz emitida por diferentes substâncias foram incentivados pela indústria química e levaram à teoria de Bohr. Há tentativas de associar o surgimento da mecânica quântica ao clima cultural do pós-guerra nos anos vinte, na Alemanha; o ambiente de inconformismo e desconfiança com as instituições oficiais teria incentivado um misticismo, que teria sido responsável pela aceitação de mudanças filosóficas tão profundas como o abandono do determinismo. Entretanto, o processo de desenvolvimento da

ciência não é ainda compreendido, e esses estudos são por enquanto especulações sobre algumas influências possíveis. Há muitas outras que não foram levadas em conta e que podem mudar, e muito, o modo de ver as coisas.

MUITOS ELÉTRONS: BÓSONS E FÉRMIONS

Até aqui concentramos a atenção nas propriedades de um elétron ou de um átomo. E quando há muitos elétrons em um átomo, ou muitos átomos em uma molécula ou em um corpo sólido?

A cada elétron corresponde uma onda. Dois elétrons não podem corresponder à mesma onda. Esta afirmação equivale, na mecânica quântica, à frase clássica: “dois corpos não podem ocupar o mesmo lugar no espaço”. No átomo de hidrogênio há um só elétron, que tem a onda de energia mais baixa possível. O próximo átomo é o de hélio, com dois elétrons; um deles tem a mesma onda do hidrogênio, e o segundo tem uma onda que é igual no espaço, mas corresponde a uma rotação diferente do elétron em torno do seu próprio eixo (dizemos que o “spin” do elétron é contrário). O átomo seguinte, o lítio, com três elétrons, tem os dois primeiros nas mesmas ondas do hélio e o terceiro numa onda diferente, a mais próxima em energia. Em outras palavras, no lítio estão ocupadas as três ondas de energia mais baixa, mas nunca dois elétrons com ondas exatamente iguais.

As partículas que são como os elétrons e não podem ocupar a mesma onda chamam-se férmions (palavra derivada do nome de físico italiano Enrico Fermi, que as estudou, por volta de 1930). Além do elétron, são também férmions os prótons e os nêutrons que formam os núcleos, bem como outras partículas que estudaremos adiante, como os múons e os neutrinos.

Entretanto, existem outras partículas que não são férmions, e para as quais é possível duas partículas terem exatamente a mesma onda. O fóton é o exemplo mais familiar; outros exemplos que veremos nos próximos capítulos são o pión, a partícula alfa e outras combinações de números pares de férmions. Essas partículas que podem ocupar muitas vezes a mesma onda, como se estivessem ocupando o mesmo lugar no espaço, chamam-se bósons (do nome do físico indiano Bose, que primeiramente as estudou). Notemos, entretanto, que ondas iguais significam apenas probabilidades iguais de aparecer num dado ponto de espaço, e não correspondem

realmente a ocupar o mesmo lugar. De qualquer modo, a existência dos bósons explica o aparecimento de fenômenos surpreendentes, como a superfluidez e a supercondutividade.

O átomo de hélio de massa 4 é um bóson, pois seu núcleo é uma partícula alfa (formada de dois prótons e dois nêutrons) e tem um par de dois elétrons. Em temperatura e densidade normais, ele se comporta como qualquer outro gás. Entretanto, quando é resfriado e comprimido até se tornar líquido, e mais ainda, os átomos ficam tão próximos uns dos outros que alguns deles ficam com a mesma onda de energia mínima, e à medida que a temperatura é diminuída ainda mais, quase todos os átomos ficam com a mesma onda. Com isso, desaparecem colisões entre átomos diferentes, que causam a viscosidade do líquido, e o hélio líquido fica *superfluido*. Qualquer movimento provocado no líquido perdura por tempos muito longos, e o líquido se espraia sobre qualquer superfície rapidamente. Por exemplo, não é possível manter um copo cheio de hélio superfluido: o líquido sobe pelas paredes do copo e escorre para fora.

A *supercondutividade* é um fenômeno mais importante para aplicações práticas, pois permite conduzir eletricidade de um lugar para outro sem perdas de energia. Estão sendo ensaiadas linhas de transmissão de potência supercondutora, que poderão baratear no futuro a energia elétrica. Certos metais a temperaturas muito baixas conduzem a eletricidade sem oferecer quase nenhuma resistência. Se estabelecermos uma corrente elétrica em um anel metálico supercondutor, a corrente perdura durante horas, quando à temperatura ambiente ela desaparece em fração de segundos. A explicação que se dá para a supercondutividade é que nesses metais, a baixas temperaturas, os elétrons que se movem de um átomo para outro dentro do metal, e cujo movimento provoca a existência das correntes elétricas, esses elétrons se emparelham, isto é, passam a se mover aos pares. Cada par de dois elétrons se comporta como um bóson e, devido à temperatura baixa, os bósons têm a mesma onda. Desaparecem então as colisões entre elétrons e de elétrons com os núcleos do metal, movendo-se os elétrons como se constituíssem um superfluido, e a resistência, que corresponderia à viscosidade, se torna nula.

Dentro do núcleo atômico ocorrem fenômenos semelhantes à superfluidez. Os nêutrons e prótons também formam pares, e com isso diminuem as colisões entre prótons e nêutrons dentro do núcleo; um nêutron ou um próton se desloca muito mais dentro do

núcleo sem sofrer colisões, e esse fato explica propriedades dos núcleos difíceis de entender de outra forma.

SÓLIDOS E LÍQUIDOS

Nos gases, as moléculas estão longe umas das outras, e cada átomo só sofre forças dos outros átomos na sua molécula. Já nos sólidos e nos líquidos, cada átomo está permanentemente interagindo com muitos átomos próximos, e fica mais complicado perceber as consequências da quantização. As propriedades do material que são medidas experimentalmente, e que a teoria deve explicar, são a condução do calor, a condução da eletricidade, a capacidade térmica (quanto calor é necessário fornecer para elevar de 1°C a temperatura) a susceptibilidade magnética, o índice de refração e a absorção da luz, e outras radiações eletromagnéticas, bem como a elasticidade, e outras mais que não caberia citar aqui. Cada uma destas propriedades varia com a temperatura e, às vezes, também com a pressão. Um bom modelo teórico da estrutura de um sólido, por exemplo, deve permitir prever se o material é ou não bom condutor de calor e de eletricidade, como varia sua capacidade térmica, qual o seu comportamento em um campo magnético externo, etc.

Os sólidos estudados primeiramente foram os metais, que se caracterizam por ter *elétrons livres*, isto é, elétrons que se movem livremente de um átomo para um átomo vizinho. No cobre, por exemplo, cujo átomo tem 29 elétrons, o último elétron é livre, não pertence a um átomo, mas a todo o metal. Os elétrons livres determinam as principais propriedades, térmicas e óticas. Deslocam-se facilmente ao longo do metal, e por isso há boa condução de eletricidade. A condução de calor também é boa, pela mesma razão: quando aquecemos uma ponta de uma barra de cobre, por exemplo, os átomos e elétrons nessa ponta passam a se mover com maior velocidade. Os elétrons rapidamente se deslocam até a outra ponta e transmitem maior velocidade aos outros elétrons e átomos por meio de colisões. Logo, a barra inteira tem átomos e elétrons em movimento mais rápido, isto é, houve transmissão de energia térmica.

A temperaturas normais, os elétrons nos metais colidem uns com os outros e com os núcleos dos átomos do metal, e a perda de energia nesses choques dá origem à resistência elétrica dos metais. Já discutimos como a resistência desaparece para certos metais, a

baixas temperaturas. Também a condução de calor se torna muito alta quando há supercondutividade.

As propriedades magnéticas de um material dependem dos campos magnéticos produzidos por intermédio de cada átomo. Esses campos são devidos aos movimentos dos elétrons em volta do núcleo (em que cada elétron é equivalente a uma pequena corrente circular) e aos campos magnéticos próprios de cada elétron, devido ao seu movimento de rotação em torno do seu próprio eixo (“spin” do elétron; em inglês *spin* significa girar).

Em alguns metais, principalmente ferro, cobre e níquel, pode haver alinhamento dos campos magnéticos de todos os átomos, dando origem aos ímãs. Esse alinhamento chama-se ferromagnetismo, mesmo para outros materiais que não o ferro. Mas existem outros tipos de alinhamentos diferentes, que dão origem a materiais com propriedades magnéticas diferentes. Por exemplo, pode ocorrer que dentro do metal existam fileiras de átomos todos orientados igualmente dentro de uma fileira, mas fileiras vizinhas orientadas umas ao contrário das outras. Por fora o material não apresenta magnetismo, e, no entanto, todos os seus átomos estão alinhados.

Ocorrem também alinhamentos semelhantes em materiais que não são magnéticos, mas têm propriedades elétricas. É o caso da chamada ferroeletricidade, em que os átomos alinham suas cargas positivas e negativas paralelamente, produzindo uma espécie de ímã elétrico.

Cada arranjo de átomos em um material chama-se *fase*, e a passagem de um arranjo para outro chama-se *transição de fase*. O estudo das transições de fase é um dos campos mais importantes da Física dos materiais, hoje. Para um certo material, as propriedades elétricas, magnéticas, óticas e térmicas dependem da fase, e são diferentes de fase para fase. Por exemplo, os cristais líquidos utilizados em mostradores de relógios digitais mudam de fase quando é aplicado um pequeno campo elétrico, e a mudança de fase transforma o material de transparente em opaco.

A TEORIA DA RELATIVIDADE

Enquanto a mecânica quântica se afastava cada vez mais da mecânica clássica, afirmando que as partículas têm propriedades de onda, que as suas trajetórias nunca podem ser previstas com certeza e, por outro lado, afirmando a variação descontínua da

energia para átomos, moléculas e outros sistemas estáveis, a mecânica clássica – enquanto isso ocorria – era questionada em suas próprias bases: os conceitos de tempo e de espaço, que não eram questionados desde os tempos de Newton, estavam em xeque. Newton afirmara que o espaço era absoluto, não dependia do observador, e o tempo também, flui igual e uniformemente em todos os lugares e para todos os observadores. Isso significa que uma vara que tem comprimento de um metro terá este comprimento em qualquer lugar e independente de estar parada ou em movimento. Dois relógios que andam juntos, sem atrasar nem adiantar, um em relação ao outro, quando estão um ao lado do outro, continuam a marcar a mesma hora quando um é levado para longe, mesmo durante a viagem. Estas idéias sobre o tempo e o espaço já são tão corriqueiras que ficaram quase intuitivas e ninguém pensa em questioná-las. Ou melhor, antes de Einstein ninguém pensava em colocá-las em dúvida.

Outras idéias já intuitivas se referem à velocidade. Quando um trem se desloca a 50 quilômetros por hora (ou 50 km/h) e eu corro dentro do trem para frente, à velocidade de 2 km/h, então, minha velocidade em relação ao chão será de exatamente $50 + 2 = 52$ km/h. Se eu correr para trás em vez de para frente, e com a mesma velocidade de 2 km/h, minha velocidade em relação ao chão será de $50 - 2 = 48$ km/h. Se eu conseguir correr para trás com velocidade igual à do trem, 50 km/h, então ficaria para sempre no mesmo lugar em relação ao chão, isto é, minha velocidade seria zero. Estas regras para combinar as velocidades de um corpo que se move em relação a um outro que, por sua vez, se desloca em relação a um terceiro (o chão ou a Terra, no nosso exemplo) valem, segundo a mecânica clássica, para qualquer velocidade, grande ou pequena: sempre devem ser somadas (ou subtraídas) as duas velocidades, para obter a velocidade resultante do primeiro corpo em relação ao terceiro. Por outro lado, não há, na mecânica clássica, nenhum limite para a velocidade de um corpo, que pode ser tão alta quanto se queira.

Einstein, por causa de evidências indiretas, foi levado a negar todas essas verdades intuitivas: a teoria do eletromagnetismo, que compreende a teoria da luz, não lhe parecia satisfatória quando aplicada em corpos em movimento. Tanto assim, que o artigo em que publicou pela primeira vez a teoria da relatividade tem como título “*Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento*”. Não vamos aqui tentar reconstruir o raciocínio de Einstein, mesmo porque há controvérsias (aliás, muito

interessantes) entre os historiadores da ciência sobre qual foi o caminho que o levou a suas descobertas.

A teoria da relatividade é hoje aceita pelos físicos porque há muitas confirmações experimentais de suas previsões, isto é, muitos fenômenos observados ocorrem de acordo com a teoria. A teoria afirma que o espaço e o tempo não são absolutos, mas dependem do observador, isto é, são sempre *relativos* a um observador. Além do mais, a velocidade da luz, que é de cerca de trezentos mil quilômetros por segundo, é a velocidade mais alta com a qual qualquer objeto físico pode se propagar, não valendo as regras de composição de velocidades; a luz, especialmente, tem sempre a mesma velocidade em relação a qualquer observador.

Tomemos inicialmente esta última afirmação. Um dos testes foi realizado ainda no século dezenove, antes da relatividade, por Michelson, nos Estados Unidos. A Terra se movimenta em torno do Sol com grande velocidade, cerca de trinta quilômetros por segundo. Então, a mecânica clássica prevê que a velocidade da luz em relação à Terra seja de 299970 km/s no sentido paralelo ao movimento da Terra, e de 300030 km/s no sentido oposto. Entretanto, as medições de Michelson davam sempre o mesmo valor, em qualquer direção. O significado desse resultado não foi bem compreendido inicialmente; pensava-se que a luz era uma onda em um meio invisível, que era chamado éter, e que o éter era arrastado pela Terra em seu movimento, e por isso a luz tinha sempre a mesma velocidade, viesse de onde viesse. Einstein mostrou que não é necessário postular a existência de um meio material invisível: a luz se propaga no vácuo, e a constância de sua velocidade é devida a propriedade do espaço e do tempo.

Todos os experimentos feitos até hoje deram sempre a mesma velocidade para a luz independentemente do movimento do aparelho que faz a medida. Outra previsão da relatividade, de que não existem velocidades superiores à da luz, também foi confirmada muitas vezes. Por exemplo, nos grandes aceleradores de partículas, os elétrons, os prótons e outras partículas atômicas são acelerados até energias cada vez mais altas e velocidades cada vez maiores. Entretanto, quando a velocidade se aproxima da velocidade da luz, ela quase não aumenta mais para energias maiores: é a massa da partícula que vai aumentando. Assim, um elétron, quando acelerado por dez mil volts, como em um tubo de televisão, atinge velocidade de 60000 quilômetros por segundo (um quinto da velocidade da luz) e sua massa praticamente não se altera. Quando acelerado por seiscentos mil volts, entretanto, sua velocidade atinge

metade da velocidade da luz, mas sua massa já é o dobro de quando está parado. Em dez milhões de volts, a velocidade vai a 99,9% da velocidade da luz e a massa aumenta mais de 20 vezes. Energias maiores dão velocidades de 99,999% da velocidade da luz e massas duzentas vezes a massa do elétron parado; e, com mais energia, a velocidade fica ainda mais próxima da velocidade da luz, sem nunca atingi-la, e a massa fica sempre maior.

Um objeto em movimento com velocidade próxima à da luz fica mais curto e, nele, o tempo passa mais devagar. Se a velocidade é metade da velocidade da luz, o encurtamento é de 15% e o tempo demora 15% mais para passar. Para 99,9% da velocidade da luz, o comprimento é dividido por vinte e o relógio anda vinte vezes mais devagar.

Também nesse caso, as experiências confirmam as previsões da relatividade. Por exemplo, a partícula chamada múon, que é semelhante ao elétron, mas tem massa duzentas vezes maior, se desintegra cerca de dois milionésimos de segundo depois de formada. Em outras palavras, quando um múon é produzido em uma colisão nuclear, ele não dura muito, mas explode, dando lugar a um elétron e outras partículas, chamadas neutrinos, chamadas neutrinos, e isto ocorre em alguns microssegundos (um microssegundo é um milionésimo de segundo). Esta é a observação quando o múon está parado ou em baixa velocidade. Quando o múon provém de raios cósmicos, que são partículas de alta velocidade, vindas do espaço interestelar, que atingem a Terra, ele tem também velocidade grande. Nesse caso, ele demora mais para se desintegrar: é que o tempo de dois microssegundos passa, no múon de alta velocidade, muito mais devagar, quando observado da Terra.

O encurtamento, ou “contração no espaço” também é facilmente observado com partículas de alta energia. O campo elétrico que existe em volta de uma partícula eletrizada tem uma distribuição esférica em torno da partícula quando ela está parada ou em pequena velocidade. Quando a velocidade é próxima à velocidade da luz, a distribuição fica mais achatada, como um disco de arremessar em atletismo, por causa da contração na direção do movimento – não há contração nas direções perpendiculares ao movimento.

A teoria da relatividade dá resultados muito diferentes dos resultados da mecânica clássica para velocidades próximas à da luz. Aqui na Terra conseguimos estas velocidades somente com partículas atômicas em aceleradores. Objetos comuns, tais como

uma pedra ou uma bola, um automóvel ou um foguete, atingem no máximo velocidades cem mil vezes menores que a da luz, de modo que a mecânica clássica continua valendo com boa aproximação. É por isso que as previsões da relatividade nos parecem estranhas e surpreendentes: os fenômenos da nossa vida diária estão de acordo com a física clássica. É só em velocidades altíssimas que os efeitos relativísticos saltam aos olhos.

O espaço e o tempo deixam de ser elementos independentes do mundo, como são na mecânica de Newton, onde o espaço fornece um palco onde se desenrolam os acontecimentos à medida que o tempo passa. Na relatividade, o espaço e o tempo são intimamente ligados entre si, isto é, dependem um do outro.

Vejam um exemplo. A praça da Sé, no centro de São Paulo, é para nós um local bem definido no espaço, já que, intuitivamente, nós, que vivemos na Terra, tomamos a Terra como referência, e indicamos os lugares com referência a ela. Não diríamos que um tico-tico que voa da Praça da Sé até o Vale do Anhangabaú está em lugar bem definido, já que ele se desloca em relação à Terra. Imagine agora um observador que está em uma estrela distante, fora de nossa galáxia. Para ele a Praça da Sé se desloca como se fosse um pássaro, pois sofre o movimento de rotação da Terra em torno do seu eixo, mais o movimento em torno do Sol, além do movimento do próprio Sol dentro da galáxia, que os planetas acompanham, e o movimento da galáxia em relação às outras. Para este observador extraterrestre, e mesmo extragaláctico, a praça de Sé não está em um local definido, pois vai se deslocando com o tempo. Em cada instante, entretanto, o local é definido. Assim, os acontecimentos do mundo se desenrolam no espaço-tempo; para localizá-los é necessário especificar lugar e hora. Os físicos imaginam o espaço-tempo como uma entidade de quatro dimensões, sendo três espaciais e uma temporal.

Além da revisão da natureza do espaço e do tempo, Einstein também modificou a idéia que tínhamos da gravitação. Partiu de uma observação simples de Galileu: em um dado local e instante, todos os corpos caem com a mesma velocidade (mais precisamente, dizemos que caem com a mesma aceleração, já que a velocidade de cada um vai aumentando), sejam eles grandes ou pequenos, leves ou pesados,. Segundo Newton, a queda é devida à força de atração que a Terra exerce sobre cada corpo. Entretanto, se a aceleração é sempre igual, isto é uma indicação de que estamos frente a uma propriedade do próprio espaço-tempo, que não depende do corpo colocado no local.

Há uma experiência no pensamento que deixa isto bem claro. Imagine que você está em um foguete no espaço interestelar, em uma região longe de qualquer estrela, onde a força gravitacional, portanto, é muito pequena. Se o foguete estiver parado, os objetos dentro dele flutuarão, parados, pois, não havendo gravitação, não têm peso. Suponha agora que o foguete ligue os motores e acelere. Os objetos dentro dele continuarão na mesma posição, mas o foguete se deslocará, fazendo com que sua base se aproxime deles. Para quem está dentro do foguete, parece que os objetos caem em direção à base. Este observador dentro do foguete não saberá dizer (se não for informado) se o que aconteceu foi o ligar dos motores ou se um astro se aproximou da base do foguete, passando a exercer uma atração gravitacional que antes não existia. Nas duas situações, os objetos dentro do foguete passam a aparentar ter peso, e não é possível decidir, sem observações externas ao foguete, se esse “peso” é devido a uma força gravitacional ou à aceleração do foguete. Há uma equivalência entre os efeitos da aceleração do foguete e da força gravitacional de um astro próximo. Einstein postula que esta equivalência é total, isto é, que em verdade todas as forças gravitacionais são propriedade do espaço-tempo, que nós atribuímos à presença de grandes massas de matéria, como a Terra ou outros astros, que “atraem” outros corpos porque a mudança de qualquer matéria deforma o espaço-tempo e é essa deformação que provoca a queda dos corpos. A gravitação passa a ser assim uma propriedade do próprio espaço-tempo e, por outro lado, as propriedades do espaço-tempo são determinadas pela matéria que está nele.

O conceito de matéria também é ampliado na relatividade. Já mencionamos que a massa de um corpo depende da velocidade e, portanto, da energia. Quanto maior a energia, maior é a massa.

Por exemplo, um elétron de velocidade próxima à velocidade da luz quase não é desviado no campo magnético de um ímã que, em baixa velocidade, faria com que ele mudasse de direção de 180°; a sua massa fica tão grande que a força que o fazia voltar para trás somente o empurra um pouco para o lado. Há uma equivalência entre energia e massa: onde há energia, há massa, e reciprocamente. Se um corpo perde energia, fica também mais leve. Um núcleo atômico que perde energia por emissão de um fóton fica também mais leve. O fóton, que era considerado como não tendo massa, tem a massa correspondente à sua energia.

A relatividade é instrumento básico para se entender a cosmologia de hoje: a evolução das estrelas e das galáxias, os

chamados buracos negros, a grande explosão inicial que talvez tenha originado a atual fase do universo, e muitos outros assuntos de que não trataremos aqui.

O NÚCLEO ATÔMICO

O século vinte começou com a revolução científica da relatividade e da mecânica quântica, mas foi a Física nuclear que dominou seus anos centrais. A explosão das bombas em Hiroshima e Nagasaki colocou os problemas da energia nuclear no centro das atenções dos governos de todo o mundo e fez com que, dentro da Física, a investigação do núcleo tivesse apoio financeiro quase ilimitado. Multiplicaram-se os laboratórios, incentivou-se a formação de especialistas. Também a exploração pacífica da energia nuclear cresceu, dando lugar a um importante ramo industrial.

O Brasil, assim como outros países subdesenvolvidos, tomou medidas para não ficar irremediavelmente para trás nessa nova corrida tecnológica e armamentista. Antes da guerra não havia grandes laboratórios de Física, mas já em 1951 havia um acelerador sendo instalado e outro em início da construção, em São Paulo, e no Rio, fundava-se a Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. A preocupação com a energia nuclear levou, ainda no mesmo ano, à criação do Conselho Nacional de Pesquisas, CNPq, primeiro órgão governamental brasileiro destinado especialmente ao apoio das ciências, especialmente nuclear.

A existência do núcleo atômico foi descoberta em 1911 por Rutherford, na Inglaterra. Imaginava-se, na época, que o átomo constasse de uma massa difusa de carga elétrica positiva que preenchia todo o volume do átomo e dentro do qual se moviam os pequenos elétrons negativos: era como se fosse um pudim recheado de uvas passas, sendo a massa do pudim positiva e as passas representando os elétrons. Se este modelo fosse correto, era de se esperar que, ao se bombardear os átomos por outros átomos menores, estes passariam por dentro do átomo alvo sem se desviar muito. Rutherford fez a experiência, fazendo partículas alfa, que são átomos de hélio que perderam dois elétrons, de alta velocidade, atravessarem uma fina folha de ouro. Para sua surpresa verificou que, de vez em quando, cerca de uma entre cada dez mil vezes, a alfa não atravessava a folha, mas era desviada para trás. Um modelo tipo pudim de passas era incapaz de explicar este resultado, que indicava, ao contrário, a existência de um caroço duro dentro

do átomo, capaz de fazer voltar o projétil, isto é, a alfa. Rutherford propôs então outro modelo do átomo: no centro está concentrada, em um volume pequeno, quase toda a massa do átomo, com carga elétrica positiva, e os elétrons, mil vezes mais leves e negativos, giram em volta, mais ou menos como os planetas em torno do Sol. O núcleo central ocupa fração pequena do volume do átomo: se assim não fosse, o número de alfas desviadas para trás seria muito maior. Assim, a maior parte do volume do átomo é vazia; é a região onde se movem os elétrons.

O modelo de Rutherford foi modificado por Born, que fez a hipótese de quantização das órbitas dos elétrons, isto é, que só algumas órbitas, dentre todas as possíveis segundo a Física clássica, são efetivamente permitidas aos elétrons. Estas regras de quantização levaram pouco depois à mecânica ondulatória, ou seja, ao reconhecimento da natureza também ondulatória do elétron. O modelo assim modificado teve sucesso impressionante em explicar as propriedades dos átomos, como já vimos acima. Não só a emissão e absorção de luz, como também a condução de eletricidade e de calor, a elasticidade, a dilatação e outras propriedades dos materiais puderam ser explicadas. Nestas explicações, o núcleo aparecia somente como um centro em que está concentrada a massa e a carga positiva do átomo: não era necessário conhecer a estrutura interna do núcleo.

Outras experiências indicavam que o núcleo tem estrutura interna: a desintegração radiativa e as reações nucleares. Nesses casos, há transformação de um núcleo em outro, seja por emissão espontânea de uma partícula (desintegração radiativa), seja por absorção de uma partícula e emissão de outra, em uma reação nuclear. Para se provocar uma reação nuclear, é necessário que um núcleo seja atirado contra outro com alta velocidade, porque há uma força elétrica repulsiva que impede a aproximação em velocidades baixas. Inicialmente foram utilizadas como projéteis as partículas alfa emitidas por núcleos radiativos, como os de Rádium ou de Tório – foi o que Rutherford fez em sua experiência pioneira. Para poder utilizar outros projéteis e mudar suas velocidades foram construídos os aceleradores nucleares, seguramente os equipamentos científicos mais complexos e dispendiosos de que se tem notícia. Mudou a escala do trabalho científico, que de quase individual passou a ser de grandes equipes, contando com pesquisadores, técnicos e apoio administrativo, e grandes orçamentos.

O nome “acelerador” indica que, nestes aparelhos, partículas têm sua velocidade aumentada até altos valores, comparáveis à velocidade da luz, adquirindo ao mesmo tempo muita energia, que pode ser liberada quando se dá a reação. O projétil mais comum é o próton que é o núcleo do elemento mais leve, o hidrogênio. A aceleração se dá por meio de campos elétricos intensos que agem sobre a carga do próton, dando-lhes energias correspondentes a milhões de volts, até centenas de bilhões de volts, nos maiores aceleradores de hoje.

As experiências mostraram que os núcleos são todos formados por prótons e por nêutrons. Nêutron é uma partícula de massa igual à do próton, mas sem carga elétrica, isto é, eletricamente neutro – daí o seu nome. Ao contrário do próton e do elétron, o nêutron não existe por muito tempo fora do núcleo, pois se desintegra em alguns minutos; essa desintegração radiativa se dá por emissão de um elétron e transformação do nêutron em próton.

O núcleo mais leve é o próprio próton. Em seguida temos o dêuteron, que é formado por um próton e um nêutron e tem massa dupla da do próton. Há dois núcleos de massa três vezes a do próton: o trítion, formado por três nêutrons e um próton, que é radiativo e se desintegra em minutos, e o hélio-3, formado de dois prótons e um nêutron. O núcleo do hélio-4 é a partícula alfa, que contém dois prótons e dois nêutrons e, além de existir nos átomos do gás hélio, é emitido por núcleos radiativos.

Um mesmo elemento químico pode corresponder a vários núcleos diferentes. Assim, o átomo de hidrogênio pode ter como núcleo um próton, um dêuteron ou um trítion e o átomo de hélio pode ter núcleo de massa três vezes a do próton, hélio-3, ou quatro vezes, hélio-4. As propriedades químicas do átomo não dependem da massa do núcleo, mas somente dos elétrons que giram em torno dele, e estes são em número igual ao de prótons do núcleo, porque a carga elétrica total do átomo é nula. Em outras palavras, é o número de prótons do núcleo que determina a que elemento pertence o átomo; os nêutrons aumentam a massa do átomo, mas não influem em suas propriedades químicas.

Juntando cada vez mais prótons e nêutrons, vamos formando átomos cada vez mais pesados, até chegar no Urânio, que contém 92 prótons e 146 nêutrons e é o átomo mais pesado que se encontra na natureza. Bombardeando o Urânio com outros núcleos, é possível produzir artificialmente átomos mais pesados, tendo-se chegado já a 105 prótons. Entretanto, estes átomos muito pesados têm vida muito curta, isto é, se desintegram em fração de segundos.

O próprio Urânio se desintegra, mas demora, em média, bilhões de anos; dizemos que sua vida média é de bilhões de anos (É interessante notar que se utiliza a palavra *vida* para designar o tempo que dura o átomo de Urânio, que, de resto, não tem vida nenhuma, do ponto de vista biológico. Somente células, que contém bilhões de átomos, são vivas no verdadeiro sentido da palavra. É comum em Física o uso de linguagem diária, mas com significado diferente. A vida do átomo radiativo é somente o intervalo de tempo até a sua desintegração).

Hoje conhecemos em detalhe não só o número de prótons e nêutrons em cada núcleo de cada elemento químico, mas também como eles estão dispostos dentro do núcleo, isto é, qual a onda associada a cada partícula.

As forças que agem entre os prótons e nêutrons dentro dos núcleos são muito intensas, muito mais intensas do que as forças entre o núcleo e os elétrons ou entre elétrons ou ainda entre átomos diferentes numa molécula ou num corpo sólido. Correspondentemente, as energias em jogo são muito maiores: para arrancar um próton ou um nêutron de um núcleo é necessário fornecer energia correspondente a milhões de volts, enquanto que para arrancar um elétron de um átomo bastam em geral alguns volts, e para separar um átomo de uma molécula, décimos de volts são o suficiente. Em certas reações nucleares há liberação de muita energia, e estas são as reações importantes para bombas e para reatores. Num caso, a súbita liberação de energia provoca enorme explosão; noutro, as reações ocorrem gradualmente, entre poucos núcleos de cada vez, e assim a energia pode ser aproveitada para gerar calor e eletricidade para uso industrial e residencial.

A fissão foi a reação utilizada primeiramente para liberar energia: quando se bombardeia o Urânio com nêutrons, provoca-se a divisão do núcleo pesado em dois núcleos, cada um com aproximadamente metade da massa, e há liberação de energia correspondente a duzentos milhões de volts para cada núcleo fissionado. Este processo artificial ocorre em reatores e em bombas de fissão; não existe na natureza. O outro grupo importante de reações, importante energeticamente, é o de fusão, em que vários núcleos leves colidem e formam um núcleo mais pesado, liberando energia. Por exemplo, dois nêutrons se fundem produzindo um núcleo de hélio e energia correspondente a vinte e quatro milhões de voltas. A fusão exige temperaturas muito altas e ocorre em bombas de hidrogênio, que precisam ser detonadas com uma bomba de fissão para alcançar a temperatura suficiente; não se

conseguiu ainda provocar fusão de modo controlado, em um reator. Por outro lado, a fusão ocorre naturalmente no interior do Sol e das estrelas, onde a temperatura é alta. É da fusão nuclear que provém a energia irradiada pelo Sol e pelas estrelas.

AS PARTÍCULAS ELEMENTARES

Os antigos chamavam de *elementos* a terra, a água, o ar e o fogo, acreditando que tudo é formado desses constituintes fundamentais. Já no século dezanove acreditava-se que todas as substâncias são formadas a partir dos elementos químicos: hidrogênio, hélio, lítio, e assim por diante, até chegar no urânio. A cada elemento correspondia um tipo de átomo. Quando se descobriu que todos os átomos são formados de prótons, nêutrons e elétrons parecia que estas três partículas é que eram verdadeiramente os elementos do Universo. Entretanto, a coisa é mais complicada, e hoje se conhecem centenas de partículas diferentes chamadas *elementares*!

Além do próton, nêutron e elétron, devemos logo incluir na lista o fóton: como ele transporta energia, tem também massa e é uma partícula como as outras, com a propriedade especial de ter sempre a velocidade da luz e não existir parado ou com velocidade menor. Por outro lado, a radiatividade com emissão de elétron, chamada desintegração beta, pode-se dar por emissão de elétrons de carga negativa, iguais aos dos átomos, ou de elétrons positivos, que não existem nos átomos. Os elétrons positivos têm vida curta: quando chegam perto de um elétron comum, negativo, colidem e desaparecem, dando lugar a dois fótons de alta energia. A desintegração beta é ainda acompanhada sempre de emissão de uma outra partícula, chamada neutrino, e de cuja existência só se desconfiou após muitos anos de estudo da desintegração beta. O neutrino é eletricamente neutro e muito leve, destacando-se, como o fóton, à velocidade da luz; interage muito fracamente com o elétron e com o próton, e por isso demorou tanto para ser descoberto. Concluiu-se indiretamente por sua existência a partir do fato de o elétron emitido em uma desintegração beta (por exemplo, a transformação do nêutron em próton) não ter sempre a mesma energia: ora tem alta energia, ora baixa. Como o nêutron inicial e o próton final são sempre os mesmos, a diferença de energia devia estar sendo levada por outra partícula que não estava sendo observada. Depois de postulada a existência do neutrino por

Fermi, na Itália, demorou mais de vinte anos até ele ser observado diretamente – mas nesta altura as evidências indiretas já eram tão fortes, que ninguém duvidava de que existisse. Hoje já se conhecem diversos tipos diferentes de neutrinos.

O campo de forças que age entre o nêutron e o próton está associado a outra partícula, o píon, previsto teoricamente por Yukawa, no Japão, e observado na Inglaterra, em 1947, por Lattes (brasileiro), Ochialini (italiano) e Powell (inglês). Existem três píons, de carga positiva, negativa e nula. Os píons exercem forças intensas sobre prótons e nêutrons, e pode-se imaginar que a força entre nêutron e próton é devida à emissão e absorção de píons pelas duas partículas. O píon desempenha para o campo de forças nêutron-próton um papel semelhante ao do fóton para o campo eletromagnético. Entretanto, o píon tem massa de cerca de um sexto da do próton e se move em geral com velocidade bem menor que a da luz. Os píons têm vida curta, de fração de segundos, e se desintegram emitindo um neutrino e se transformando em um múon.

A partir de 1950, entraram em operação muitos aceleradores com energias maiores do que centenas de milhões de volts e foram descobertas muitas novas partículas ainda chamadas de elementares. Em 1960, eram trinta e hoje centenas, tanto assim que já não se usa o adjetivo *elementares*. São classificadas em quatro grandes grupos: 1) o *fóton*, que, sozinho, forma um grupo; os *léptons*, que compreendem os elétrons, os neutrinos, os múons e uma partícula chamada taú (ou tauon), que se caracterizam por não sofrer as interações fortes (que são responsáveis pela força nêutron-próton), mas somente as interações chamadas fracas, responsáveis pela desintegração beta e emissão de múons. As partículas que sofrem interações fortes formam os dois grupos seguintes: 3) os *mésons*, que incluem os píons e muitas partículas mais pesadas descobertas recentemente, tais como os mésons K e D; 4) os *bárions*, que incluem o próton e o nêutron, e muitas partículas mais pesadas descobertas também nos últimos anos, e batizadas segundo letras gregas: Lamda, Sigma, Omega, etc.

As forças que agem entre as partículas são de três tipos: fortes, eletromagnéticas e fracas. Se acrescentarmos a força gravitacional (que é fraca demais para ser observada experimentalmente sobre partículas individuais, mas produz efeitos notáveis sobre muitas delas reunidas em corpos macroscópicos), ficamos com uma lista completa de todas as forças fundamentais do Universo. Em outras palavras, todas as forças que conhecemos

no mundo, agindo sobre corpos grandes ou pequenos, são combinações destes quatro tipos de forças. Assim, o peso e as forças entre astros são gravitacionais, as forças entre átomos dentro de moléculas ou em sólidos são de natureza elétrica, resultantes das atrações e repulsões elétricas entre os elétrons (negativos) e núcleo (positivo) de átomos vizinhos; a força que age entre dois corpos sólidos (por exemplo, um pé-de-mesa apoiado sobre o chão, ou o atrito quando a mesa é arrastada) é, da mesma forma, elétrica. As interações fortes e fracas agem somente em distâncias muito curtas e não aparecem diretamente em fenômenos do dia-a-dia: são importantes somente dentro e na vizinhança dos núcleos e das partículas.

Quando os grandes aceleradores começaram a ser construídos, no pós-guerra, acreditava-se que eles permitiriam entender a estrutura mais íntima da matéria em pouco tempo. À medida que eram descobertas mais partículas, entretanto, a situação ficava cada vez mais complicada: em lugar de esclarecer, as novas informações estavam confundindo. Foram necessários mais de vinte anos, muitas experiências e muitas teorias para se conseguisse colocar em ordem e classificar as descobertas, e isso foi feito postulando a existência de um novo tipo de partícula, os quarks.

Admite-se que existem seis tipos de quarks, mas nunca se conseguiu observar um quark livre: só aparecem em pares, ou em grupos de três ou mais. A sua existência é inferida porque explica bem a existência de outras partículas – estas, sim, observadas. Assim, todos os mésons conhecidos podem ser explicados como pares de quarks, e todos os bárions como combinações de três quarks. As partículas que sofrem interações fortes são muito bem enquadradas no modelo dos quarks, que vem gradualmente sendo aceito pelos físicos, apesar de não se observarem diretamente os atores principais. Se existissem quarks livres, deveriam ser identificados com certa facilidade, pois teriam carga elétrica de um terço ou dois terços da carga do elétron. Nunca se observou uma carga menor que a do elétron (exceto a carga nula), e admite-se hoje que os quarks não existem livres, mas somente em grupos de dois ou mais, confinados no interior das partículas.

As verdadeiras partículas elementares seriam então os seis quarks, que combinados de diversas maneiras reproduzem os mésons e os bárions, e mais seis tipos de léptons (elétron, múon, tauon e os respectivos neutrinos), além do fóton. Toda matéria e toda energia no Universo seria composta desses “elementos”.

O próton teria em seu centro, onde ficam confinados três quarks, um pequeno volume envolto em uma nuvem de píons; e o nêutron teria estrutura semelhante, só que com outros quarks. A força atrativa entre próton e nêutrons seria devido às nuvens mesônicas; mas para distâncias muito pequenas entre nêutron e próton a força é fortemente repulsiva, o que se explica como sendo devido aos quarks. Por causa dessa repulsão, a distância entre próton e nêutron nunca é muito pequena; em geral são suas nuvens mesônicas que interagem e é por isso que os efeitos da existência dos quarks em seu interior são pouco perceptíveis, justificando-se assim que eles não fossem descobertos antes (será que podemos dizer hoje que foram descobertos, se não foram observados diretamente? Seria melhor dizer que foram inferidos ou inventados?).

Paralelamente ao avanço das interações fortes por meio dos quarks, está havendo progresso nas interações fracas e eletromagnéticas: em energias altas estas interações podem ser consideradas uma só interação, que tem, como intermediárias, partículas descobertas em 1983, na Suíça, que tem massa de cerca de cem prótons, chamadas W e Z. A unificação das diversas interações em uma só é uma antiga ambição dos físicos: Einstein, especialmente, se esforçou por unificar as forças gravitacionais e eletromagnéticas na teoria da relatividade, chegando perto de consegui-lo. A descoberta agora da interação *eletrofraca* é outro avanço importante. Entretanto, ainda restam muitos pontos não confirmados; por exemplo, a nova teoria prevê que o próton se desintegre, dando lugar a elétron e píon, mas não foi encontrada até agora nenhuma instabilidade do próton, apesar de uma procura intensa. Ele parece ser perfeitamente estável, não se desintegrando nunca.

ASTROFÍSICA E COSMOLOGIA

Pode-se dizer que a Física nasceu das Astronomia, já que foram as observações dos movimentos das estrelas e dos planetas que levaram à revolução copernicana, aos trabalhos de Galileu e de Newton. Depois, a evolução da mecânica continuou influenciada pela Astronomia, mas a Física como um todo seguiu os seus próprios caminhos. Neste século, e principalmente nos últimos anos, houve uma forte influência inversa, em que as novas descobertas da Física dinamizaram sobremaneira os trabalhos de

Astrofísica e Cosmologia, a começar pela relatividade, como já dissemos.

O Sol e as estrelas, em geral, irradiam quantidades enormes de energias em forma de luz e outras ondas eletromagnéticas. Um dos mistérios no século passado era saber de onde provinha essa energia, já que as fontes conhecidas, como a combustão e outras reações químicas, são amplamente insuficientes. A descoberta das reações nucleares e das grandes energias que liberam resolveu a questão: as estrelas são sede de inúmeras reações nucleares, que não só fornecem energia como também transformam os núcleos. O primeiro ciclo de reações proposto para o Sol, por exemplo, envolvia reações com hidrogênio, carbono e nitrogênio, tendo como resultado final a transformação de quatro núcleos de hidrogênio (prótons) em um núcleo de hélio (partícula alfa), e liberação correspondente a uns vinte milhões de volts. Nas estrelas, as reações podem ocorrer mesmo sem aceleradores, porque as temperaturas são tão altas que os átomos já têm altíssimas velocidades, como se tivessem saído de um acelerador. Aliás, as velocidades são tão altas que os átomos perdem os seus elétrons quando colidem entre si, constituindo um gás de íons, isto é, de átomos carregados (falamos em átomos, e não em moléculas, porque estas são dissociadas nos choques).

À medida que progrediram os estudos de reações nucleares com aceleradores, em que havia transmutação de elementos, tomou corpo a idéia de que a origem dos elementos no Universo talvez possa ser explicada por meio de reações nucleares. Por exemplo, uma reação facilmente observada com aceleradores é o bombardeio de dêuterons por prótons em que os dois núcleos se fundem, dando como produto final da reação um núcleo de hélio-3 e um fóton de alta energia. Em uma estrela onde existem dêuterons e prótons em alta temperatura será formado o hélio-3, mesmo que originariamente ele não existisse naquela estrela.

Uma estrela pode se formar a partir de uma nuvem gasosa contendo hidrogênio e um pouco de hélio. A atração gravitacional faz com que a nuvem se contraia e ao mesmo tempo es quente. Quando a densidade e a temperatura central são suficientes, ocorrem reações de fusão com liberação de energia e formação de elementos mais pesados. A energia liberada aumenta a temperatura e conseqüentemente a pressão, e interrompe a contração da estrela. Ocorrem sucessivas fusões formando elementos cada vez mais pesados até chegar ao ferro, que tem vinte e seis prótons e trinta nêutrons e é o núcleo mais estável. Daí por diante os elementos não são mais formados por fusão, mas por sucessivas capturas de

nêutrons, seguidas de desintegrações beta. Os nêutrons necessários para essas capturas existem na estrela devido a outras reações que ocorrem e produzem nêutrons; para chegar aos núcleos mais pesados, como urânio, esses nêutrons seriam poucos, e é necessário postular que há uma grande explosão da estrela, do tipo observado como “supernova”, durante a qual há um fluxo intenso de partículas.

Como podemos saber se estas idéias sobre a origem dos elementos estão corretas? A evidência mais forte a favor das abundâncias dos elementos, isto é, do número de átomos de cada um que existe no Universo. As abundâncias na Terra são relativamente fáceis de medir; é necessário fazer delicadas análises químicas e isotópicas de rochas e outros materiais. Estendem-se as medidas ao espaço interestelar analisando, do mesmo modo, o material de meteoritos que caem na Terra vindos do espaço, e, além disso, analisando a luz emitida pelas estrelas. Procurando nessa luz as raias espectrais características de cada elemento e medindo sua intensidade, podemos estimar a quantidade do elemento existente na estrela. Em conclusão, as abundâncias são basto bem conhecidas.

Por outro lado, a hipótese da “nucleossíntese” nas estrelas, que descrevemos acima, permite calcular qual deveria ser a abundância de cada elemento, bastando para isso conhecer a probabilidade de ocorrência das reações correspondentes, o que pode ser obtido a partir de medições com aceleradores. O cálculo foi feito e dá um acordo muito bom com as informações experimentais, o que não pode ser coincidência: as idéias básicas estão certas! A chamada astrofísica nuclear explica a evolução das estrelas e a origem dos elementos de uma só vez!

Nos últimos anos, não só a Física nuclear, mas também a de partículas, tem sido muito usada no estudo dos astros, mais precisamente na Cosmologia. A hipótese de que, há cerca de quinze bilhões de anos, o Universo estava concentrado em um volume muito pequeno e que houve uma grande explosão, seguida de uma expansão que continua até hoje, é a mais aceita hoje. É a teoria do *Big Bang*. Durante as primeiras frações de segundo após a explosão, a matéria estava tão concentrada que não havia núcleos separados, mas era tudo uma grande sopa de quarks e de léptons. Em seguida, após cerca de um segundo, a expansão e o resfriamento permitiram a formação de prótons e nêutrons, além dos léptons, isto é, os quarks passaram a ficar confinados. Nos próximos minutos houve síntese de alguns núcleos leves e começou

a haver emissão de fótons, mas o Universo não era ainda transparente, o que só ocorreu após milhares de anos, quando então começou a haver formação de estrelas e depois, dentro delas, criação de elementos pesados. Com este tipo de teoria, os astrofísicos conseguem explicar por que há exatamente 25% de hélio no Universo (o resto é quase tudo hidrogênio, com somente um ou dois por cento de todos os outros elementos!). As previsões da teoria dependem de informações sobre as partículas; por exemplo, o número de neutrinos diferentes que existem é crucial. Atualmente são conhecidos dois pares de neutrinos, associados à desintegração com emissão de elétron e de múon, respectivamente, e acredita-se que exista mais um, associado da mesma forma ao tauon. A teoria admite um número de quatro; se existirem, digamos, seis pares de neutrinos, a teoria terá de ser abandonada.

A FÍSICA NO BRASIL

Qual é o papel da Física em um país como o Brasil? Até 1930, praticamente não havia. Quando foi fundada a Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, em 1934, professores vindos da Europa (Gleb Watagin, Giuseppe Ochialini) iniciaram investigações experimentais e teóricas sobre raios cósmicos. Na mesma época, no Rio de Janeiro, outro professor europeu, Bernard Gross, iniciava estudos sobre propriedades de matérias no Instituto Nacional de Tecnologia, que depois foram continuados por José Costa Ribeiro, na Faculdade Nacional de Filosofia. Em São Paulo, formou-se um ativo grupo de pesquisadores – Mário Schenberg, Marcelo Damy, César Lattes, Oscar Sala, entre outros. Depois da guerra, foram instalados dois aceleradores de partículas na Cidade Universitária em São Paulo, e no Rio de Janeiro foi fundado o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, reunindo Lattes, José Leite Lopes, Jayme Tiomno e outros, dedicado principalmente à física das partículas. Eram os primeiros laboratórios de Física no país. A partir de 1956, foram estabelecidos grupos de pesquisa em quase todas as universidades brasileiras, em sua maioria dedicados à física dos sólidos e dos materiais, pois se acreditava que este ramo seria importante para a industrialização do país.

As pesquisas, no Brasil, não são em geral de aplicação imediata; há predominância de trabalhos teóricos sobre os experimentais, e há marcada deficiência na parte de

instrumentação científica – os aparelhos de medida ainda são quase todos importados. Há pouca ligação entre pesquisas e o desenvolvimento industrial, mesmo porque não existem grandes laboratórios de pesquisa industrial. As grandes indústrias no Brasil são quase todas subsidiárias de multinacionais, cujos laboratórios estão no exterior, e as companhias estatais (como a Petrobrás, Volta Redonda, etc.), só agora começam a montar tais laboratórios. Assim, se houver descobertas feitas no Brasil que permitam aproveitamento econômico, ele se dará provavelmente nos países ricos, que têm estrutura industrial preparada para isto. A política econômica do governo federal favoreceu, em geral, a importância de tecnologia, e não sua criação local.

Para atingir maior independência tecnológica é necessário aumentar significativamente as pesquisas em ciências básicas aplicadas, inclusive Física, no país, mas isto não será suficiente se não houver mudanças políticas mais amplas.

A Física como modo de olhar e estudar o mundo é parte integrante da cultura de hoje, e só isto já justifica o seu estudo. O ensino da Física influi sobre a visão de mundo de toda a população, além de facilitar novas descobertas e o desenvolvimento tecnológico. Atualmente, o maior impacto das atividades em Física, no Brasil, é na formação de pessoal, que será importante quando o país retomar o desenvolvimento.

Sobre o autor:

Nascido em Berlim, em 1933, vive em São Paulo desde 1936. Bacharel em Física pela Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo (1954) e Doutor pela Universidade de Pittsburgh, EUA (1959), onde também foi professor visitante. Fez carreira acadêmica na USP, onde é professor desde 1956. Realizou e orientou pesquisas experimentais em Física Nuclear e implantou um programa de pesquisa e pós-graduação em Ensino de Física. Foi diretor e Conselheiro da Sociedade Brasileira de Física e da SBPC e é atualmente (1984) Presidente da Associação dos Docentes da USP.