

Novos ramos do velho tronco

na várias das últimas descobertas de forma notável. Weinberg é ruivo, professor de física teórica em Harvard, e exercita sua capacidade intelectual estudando história da Idade Média. Já conhecemos Salam, o professor paquistanês de Londres. Atualmente ele também dirige um centro de física teórica em Trieste (Itália), sobretudo em benefício de cientistas de países subdesenvolvidos (Figura 12.12).

Todo o campo da física das partículas, portanto, está em pleno movimento e poderá de repente explodir em uma grande descoberta. Por exemplo, já foi iniciada a corrida para a descoberta de algumas partículas muito pesadas ($80 \text{ GeV}/c^2$) previstas pela teoria de Salam e Weinberg.

Não me expandirei mais sobre física das partículas, mas voltarei a alguns outros aspectos da física contemporânea, embora constituam campo distante do meu trabalho.

Gostaria de oferecer, neste capítulo, uma idéia do que tem acontecido nesta era do após-guerra, nos ramos da física que não mencionei anteriormente. Primeiro, a quantidade de pesquisas tem aumentado tanto que se torna necessária maior especialização. Em conseqüência, há um bom número de publicações novas dedicadas a campos cada vez mais limitados. Em segundo lugar, não consigo distinguir, na física do após-guerra, nenhuma figura de relevo como Rutherford, Einstein ou Bohr.

A *Physical-Review*, publicada nos Estados Unidos, é o maior periódico entre os que tentam cobrir todo o espectro da física; é subdividida em cinco seções: física e teorias gerais, física atômica, física nuclear, física do estado sólido e física das partículas. Há motivos práticos para essa divisão: os assinantes raramente escolhem mais de uma ou duas seções e o volume anual das publicações, incluindo todas as cinco seções (cerca de 30.000 páginas), mal caberia nas casas ou escritórios de hoje em dia. As estatísticas sobre ocupações profissionais mostram que as pesquisas nesses cinco campos absorvem a maior parte dos físicos, sem contar aqueles que ensinam ou aqueles que trabalham em usos da física relacionados com a engenharia. A classificação, como todas as classificações, é um tanto convencional, há muita duplicação e os limites não são definidos. Visto não ser possível fornecer uma descrição completa de todos esses campos, mencionarei alguns tópicos selecionados com base em meus conhecimentos ou preferências.

Eletrodinâmica Quântica

Em geral ocorre que, quando as condições são melhoradas por alguma nova técnica experimental ou teórica, velhos temas passam a propiciar novos e inesperados resultados (veja-se, por exemplo, a descoberta de Zeeman, página 13). Novos fatos importantes vindos à luz mostram como era incipiente o conhecimento anterior ou como os avanços técnicos, às vezes, permitem proezas que antes teriam sido consideradas pura ficção científica.

Exemplo significativo ocorre com a espectroscopia clássica. A delicada estrutura dos níveis do hidrogênio muitas vezes tem sido estudada por meios ópticos. Alguns espectroscopistas chegavam mesmo a supor que nem tudo

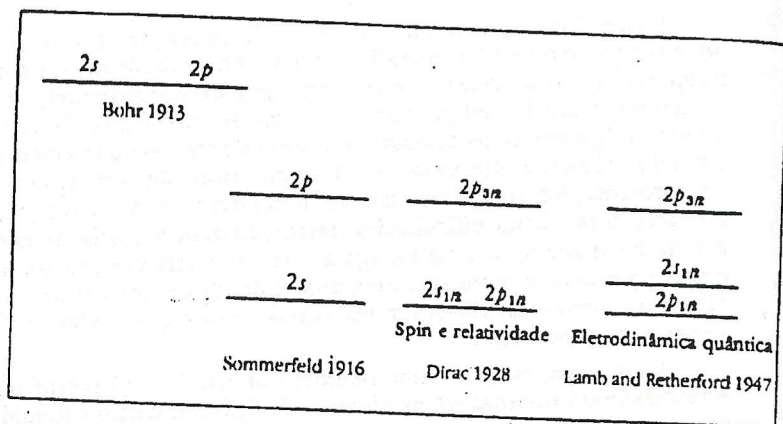
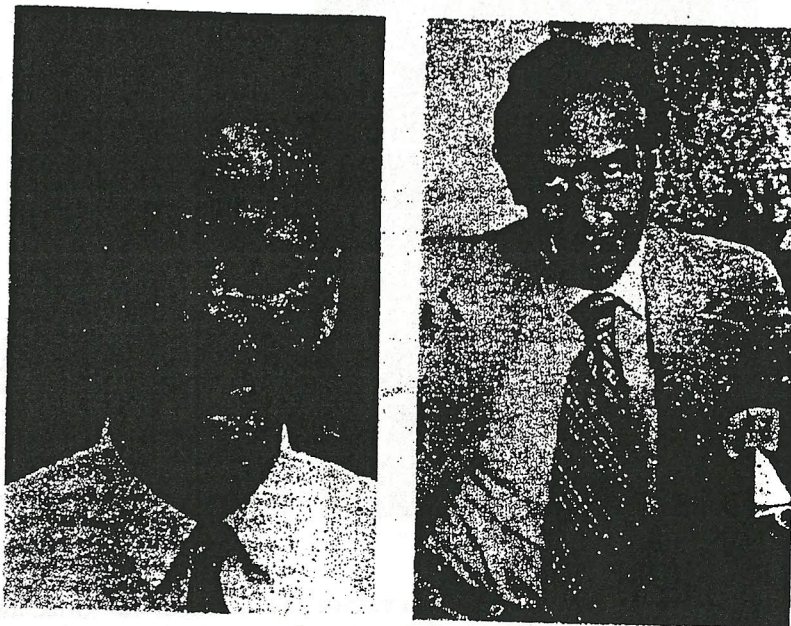


Figura 13.1. O desenvolvimento histórico da teoria dos níveis de energia no átomo de hidrogênio. O exemplo usado é o segundo nível, cujo número quântico total é igual a 2. Segundo Bohr (1913), esse nível era constituído de duas órbitas, uma circular (nível $2s$) e uma elíptica (nível $2p$), ambas exatamente com a mesma energia. Segundo Sommerfeld (1916), a relatividade muda ligeiramente a energia e separa o nível $2p$ do nível $2s$. G. E. Uhlenbeck e S.A. Goudsmit (1925) introduziram o spin e o momento magnético do elétron. Os dois níveis agora são 3, isto é $2s_{1/2}$, $2p_{1/2}$, $2p_{3/2}$, mas, se incluirmos a relatividade, os dois primeiros coincidirão, deixando apenas dois níveis distintos, como na teoria anterior de Sommerfeld. A teoria de Dirac (1928) não varia a posição dos níveis e seus números quânticos, mas relaciona o spin à relatividade. Em 1947, W. E. Lamb e R. C. Rutherford descobriram uma separação entre $2p_{1/2}$ e $2s_{1/2}$ (chamada variação de Lamb), explicada pela eletrodinâmica quântica.

estava bem e não concordavam integralmente com a teoria de Dirac, mas essas vozes não tinham ressonância e a opinião geral era que havia um consenso perfeito. Experiências contrárias a esse ponto de vista nunca poderiam ser corroboradas.

Após a guerra, Willis E. Lamb (nascido em 1913) e seu aluno R. C. Retherford, usando métodos muito mais refinados que os da espectroscopia óptica, demonstraram, mediante uma combinação de raio molecular e técnicas de microondas, uma séria discrepância na teoria de Dirac: os níveis $s_{1/2}$ e $p_{1/2}$ que deveriam coincidir, eram separados em energia (Figura 13.1).

Quase à mesma época, Polykarp Kusch (nascido em 1911) mostrou que o momento magnético do elétron era ligeiramente maior. Essas descobertas foram anunciadas na Conferência de Shelter Island, organizada por Oppenheimer em 1947. Essa conferência e algumas outras realizadas mais tarde eram uma espécie de substituto dos Conselhos Solvay, que tinham sido interrompidos pela guerra. O tema geral da Conferência de 1947 foi a aplicação prática da teoria quântica. A aplicação de princípios quânticos ao campo eletromagnético foi o primeiro exemplo. Muitos dos fundadores da mecânica quântica tinham feito várias tentativas nesse sentido, mas o êxito fora apenas parcial. Na teoria apareceram quantidades imensuráveis que impedi-



ram se chegasse a resultados rigorosos, embora se soubesse mais ou menos como eliminar as quantidades imensuráveis perturbadoras na prática ou, pelo menos, de um modo matematicamente aceitável.

No Japão, fez-se progresso substancial durante a guerra, com Sin-itiro Tomonaga e seus colaboradores, mas o Ocidente ainda desconhecia tal fato. Quando as experiências de Lamb e Kusch foram divulgadas, os participantes da Conferência de Shelter Island entabularam intensas e prolongadas discussões sobre a teoria básica. Na viagem de trem de volta à Universidade de Cornell, Hans Bethe fez um primeiro cálculo do desvio Lamb que, embora imperfeito, deu uma chave para o fenômeno. Entre os participantes da Conferência de Shelter Island estavam dois jovens teóricos, J. Schwinger (n. 1918), ex-protégido de Rabi, e R. P. Feynman (n. 1918), que tinham trabalhado em Los Alamos (Figura 13.2). Nos meses que se seguiram, os dois reformularam a aplicação prática da teoria quântica, de maneira bastante adequada aos cálculos, e com definições melhores de massas "renormalizadas" — os verdadeiros parâmetros acessíveis à observação depois das massas infinitas da teoria terem sido subtraídas de um outro infinito.

O atual consenso entre teoria e experiência é admirável, talvez o mais perfeito em toda a física. Por exemplo, o momento magnético do elétron pode ser medido até 2 partes em 10^9 , e o resultado da medição enquadra-se no cálculo de 1 parte em 10^9 . Também, o cálculo tem uma incerteza residual

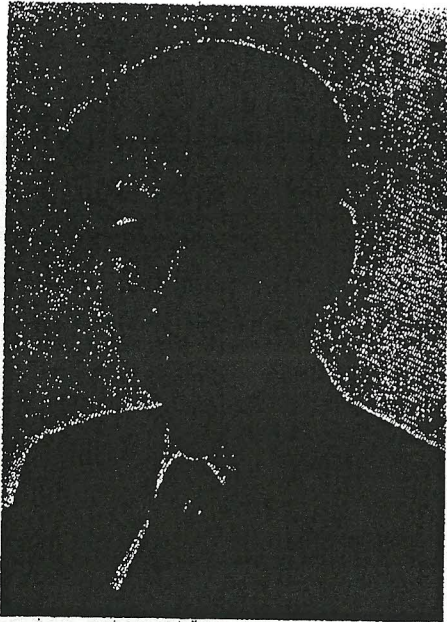


Figura 13.2. A partir da esquerda, R. P. Feynman, J. Schwinger e S. Tomonaga, que juntos receberam o Prêmio Nobel de 1965 por pesquisas em eletrodinâmica quântica. (Fotos da esquerda e do centro: E. Segrè; da direita: Instituto Americano de Física, Galerie Meggers de Laureados com o Prêmio Nobel.)

de cerca de 3 partes em 10^9 em virtude das incertezas das aproximações maiores. A despeito dessa notável realização, a teoria ainda tem lacunas lógicas que derivam da subtração de quantidades imensuráveis. Esta é a opinião de Dirac e da maior parte dos teóricos.

Em sua formulação da eletrodinâmica quântica, Feynman inventou uma técnica bastante eficaz de cálculo que atualmente é familiar à maior parte dos estudantes. Fez uso dos chamados diagramas de Feynman que representam o fenômeno de um modo intuitivo e, ao mesmo tempo, permitem a análise e derivação de fórmulas matemáticas. O método de Feynman assemelha-se a um método de taquigrafia que resume cálculos laboriosos e longos, no qual seria fácil incorrer em erros algébricos, e os transforma em processos muito mais simples, obedecendo a um conjunto fixo de normas. Quando os trabalhos de Feynman foram publicados, muita gente passou a tomar conhecimento de suas técnicas e a usá-las com fluência, mas na realidade sem entender suas justificativas. Meu amigo G. C. Wick (nascido em 1909), importante especialista em física teórica e, na época, professor em Berkeley, ficou exasperado com esse estado de coisas; descobriu que era demais ter professores e alunos de física teórica que poderiam dar-lhes todas as normas sem qualquer prova verdadeira. Procurou então estabelecer uma base sólida para a teoria matemática e elaborou alguns documentos sobre o assunto que se tornaram clássicos. Em 1949, F. Dyson mostrou que os métodos de Schwinger e de Tomonaga fatalmente dariam os mesmos resultados

que o de Feynman. A maior parte desses físicos podem ser vistos na Figura 13.3.

Feynman tinha aperfeiçoado a teoria de interações fracas em 1934, tomando como modelo a eletrodinâmica quântica, conforme era conhecida na época. Resulta daí que a teoria de Feynman não é renormalizável, embora de excelentes resultados em primeira aproximação, em virtude da fraqueza da interação. Quando se tenta fazer uma teoria de campo de interações fortes, segundo Yukawa, as dificuldades se tornam insuperáveis porque o método de aproximações sucessivas fracassa totalmente, dada a magnitude da interação forte. Essas dificuldades desacreditaram a teoria de campo na década de sessenta, mas ela foi agora revivida e está novamente nas boas graças porque parece oferecer uma possibilidade de unificar as teorias das diferentes interações. Haverá testes experimentais que podem validar ou abalar essas esperanças.

A um leigo, esse fermento relembra os estudos pré-einsteinianos da eletricidade em sistemas em movimento. Pode haver defeitos fundamentais que exigirão cuidados extremos. Vez por outra, vêem-se teorias que entram em moda por alguns anos e depois desaparecem, deixando alguns resultados parciais de valor permanente. De qualquer forma, em matéria de física, não se trata de uma situação nova.

Laser e Maser

Na década de vinte, costumávamos contar uma anedota segundo a qual os bons físicos, uma vez passados desta para melhor, encontrariam no paraíso aparelhos que, ao simples toque de botões, dariam radiação eletromagnética de qualquer frequência, intensidade, polarização e direção de propagação desejadas. Em 1917, quando Einstein elaborou o trabalho citado nas páginas 97-8, não previa estar preparando os meios conceituais de conseguir o paraíso para os bons físicos, mas foi isso de fato o que aconteceu. *Lasers*, *masers* e aparelhagens similares aproximam-se bastante da realização prática da aparelhagem ideal e a idéia de emissão estimulada, descrita no esquema de Einstein por seu coeficiente B, é básica a todos eles.

Esses instrumentos foram construídos após a guerra, quase sempre por veteranos das atividades do radar, que mais tarde usaram muito daquilo que aprenderam e aperfeiçoaram durante a guerra para finalidades científicas. Em 1954, Charles H. Townes (n. 1915) foi o primeiro a construir um amplificador que usava moléculas excitadas como elemento ativo, neste caso, a amônia. A arte foi desenvolvida por muitos especialistas em todo o mundo e levou aos *lasers* e *masers*, que geram feixes de intensidade e monocromaticidade sem precedentes, também colimados em grau elevado. Como exemplo das realizações que podem ser conseguidas com tais feixes, tem sido possível colocar espelhos na Lua e detectar feixes de *laser* enviados da Terra e refletidos nesses espelhos. O *laser* propiciou uma revolução na óptica e tem permitido a observação de novos fenômenos, tais como o da óptica não linear e o desenvolvimento de novas artes, como a holografia.



Figura 13.3. O Conselho Solvay de 1961. Sentados, da esquerda para a direita: S. Tomonaga, W. Heitler, Y. Nambu, N. Bohr, F. Perrin, J. R. Oppenheimer, Sir W. L. Bragg, C. Möller, C. J. Gorter, H. Yukawa, R. E. Peierls, H. A. Bethe. Segunda fileira: I. Prigogine, A. Pais, A. Salam, W. Heisenberg, F. J. Dyson, R. P. Feynman, L. Rosenfeld, P. A. M. Dirac, L. van Hove, O. Klein. Terceira fileira: A. S. Wightman, S. Mandelstam, G. Chew, M. L. Goldberger, G. C. Wick, M. Cell-Mann, G. Källen, E. Wigner, G. Wentzel, J. Schwinger, M. Cini. Há uma mistura da antiga geração (Bohr, Bragg, Dirac) com as novas forças em atividade especificamente na eletrodinâmica quântica (Tomonaga, Schwinger, Heitler, Bethe) e outros, cujo principal trabalho irá realizar-se mais tarde: Prigogine (termodinâmica) e Salam. (Instituto Solvay.)

Física Nuclear

Quando estávamos trabalhando em física nuclear em Roma, no ano de 1934, preparei uma tabela que continha os números atômicos como abscissa e o número de nêutrons no núcleo como ordenada. Marquei todos os núcleos conhecidos com pontos: pretos para núcleos estáveis e vermelhos para os radioativos. Alguns anos mais tarde, achei uma tabela semelhante em Berkeley, na qual os pontos tinham sido substituídos por etiquetas presas com percevejos. A tabela ocupava toda uma parede e as etiquetas eram mudadas na medida em que surgiam novas informações, o que acontecia

com bastante frequência. No final da guerra, em Los Alamos, num período em que o trabalho era menos febril, decidi atualizar uma tabela semelhante. Por essa época, no entanto, os números a serem registrados estavam na casa dos milhares e tive de recorrer à ajuda de minha mulher, Elfriede, para a tarefa. Além dos dados antigos — massa, vida média, modos de decaimento —, havia inumeráveis dados novos, como energia das radiações emitidas, seções de choque de captura de nêutrons, spins, etc. A tabela resultante teve grande êxito e foi impressa em dezenas de milhares de cópias. Os responsáveis pela segurança em Los Alamos ficaram ressabiados, mas no fim permitiram a publicação. Atualmente, tabelas semelhantes são reproduzidas por empresas sofisticadas e com muitos empregados, às vezes vinculadas a indústrias nucleares; e são quase sempre usadas como pano de fundo de retratos de almirantes no comando de navios ou frotas nucleares. Uma recente compilação (1979) de dados nucleares enche mais de 1.500 páginas de um livro que mais parece um catálogo telefônico.

O estudo dessas tabelas constitui passatempo fascinante e fonte válida de idéias para os especialistas. O acúmulo de material resultante de observações tem permitido a descoberta de regularidades antes desconhecidas e, portanto, o desenvolvimento de modelos nucleares em detalhes consideráveis e notável capacidade de previsão.

Um dos modelos de maior sucesso é o modelo de camadas, que é a extensão ao núcleo do modelo orbital atômico. Trata-se de uma idéia antiga e natural: remonta ao início da década de trinta, mas naquela época encontrou dificuldades tanto na implementação do princípio quanto na prática. Em primeiro lugar, não era muito claro o modo pelo qual as órbitas podiam existir dentro de um núcleo, uma vez que se presumia que as colisões nucleares interromperiam o movimento periódico. Mas não é exatamente assim, uma vez que o princípio de exclusão de Pauli "proíbe" colisões se o estado final estiver ocupado. Além do mais, após a guerra, os dados experimentais acumulados propiciaram uma evidência nítida da existência de camadas. Podiam-se determinar com segurança níveis de energia e números quânticos das órbitas, e surgiram "números mágicos" que indicavam o enchimento das camadas exatamente como no sistema periódico químico, no qual o fechamento de camadas é assinalado pela ocorrência de gases nobres. Os números mágicos nucleares são 2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126. Quando um núcleo contém um número mágico de nêutrons ou prótons, ele exhibe configurações particularmente estáveis. Maria Mayer (1906-1972) tinha estudado, em detalhes, em Chicago (Figura 13.4), um modelo de camadas, mas esse estudo forneceu os números mágicos errados. Ela diz como lamentou o problema junto a Fermi, que lhe perguntou "você se lembrou de incluir o acoplamento spin-órbita para os núcleons?" Sua resposta foi instantânea: "Não. E isso resolverá tudo". Na realidade, foi exatamente o que aconteceu.

Na Alemanha devastada pela guerra, independente de Mayer, H. D. Jensen, P. Haxel e H. Suess estavam fazendo algo semelhante. Suess, da mesma família do Suess que conhecemos na página 87, era um geólogo, segundo a tradição da família, e estava estudando a abundância dos elementos. Ficou impressionado com as indicações de estabilidade específica para certos números mágicos e discutiu o assunto com seus amigos físicos. Finalmente chegaram às mesmas conclusões a que Mayer havia chegado.

Embora o modelo de camadas funcionasse muito bem para núcleos que tivessem número de núcleons próximo a um número mágico, não funcionava para núcleos com camadas meio vazias. O modelo apropriado para este caso foi elaborado por vários físicos não muito tempo após o aperfeiçoamento do modelo de camadas. Aage Bohr, filho de Niels, que, ainda estudante, tinha acompanhado o pai a Los Alamos, e B. Mottelson desenvolveram uma idéia original de James Rainwater, da Universidade de Colúmbia, e examinaram movimentos coletivos de todos os núcleos nos quais a matéria nuclear se comporta mais ou menos como um fluido. O modelo de camadas e o modelo coletivo representam casos extremos. Na prática, os dois tipos de comportamento coexistem e influenciam-se mutuamente. A combinação dos dois modelos hoje em dia está bastante aperfeiçoada e proporciona uma boa quantidade de fatos que abrangem todos os núcleos.

A descoberta dos primeiros elementos transurânicos, netúnio e plutônio, teve amplas conseqüências, incluindo as de natureza prática, que vimos



Figura 13.4. Maria Mayer estudando um gráfico de núcleos na Universidade de Chicago. Esse estudo sistemático levou-a a criar o modelo de camadas que representa o modelo atômico de Bohr e explica muitas irregularidades nucleares. (Foto Universidade de Chicago.)

no Capítulo X. Não é esse, entretanto, o final da história: têm surgido muitos outros elementos de número atômico cada vez maior.

O método de preparação sempre foi o mesmo: a adição de nêutron a um núcleo, seguido pelo decaimento beta, que transforma o nêutron em próton. Por exemplo, ao irradiar Pu^{239} em um reator nuclear, obtêm-se Pu^{240} e Pu^{242} por captura de nêutron, e estes são transformados pelo decaimento beta em isótopos de amerício de número de massa 241 e 243, ambos de número atômico 95. Com um bombardeamento adicional de elemento 95 com nêutrons, seguido mais uma vez pelo decaimento beta, obtêm-se o elemento 96 (cúrio), e assim por diante. Para produzir novos elementos transurânicos, há uma grande vantagem em se usar fontes de nêutrons extremamente fortes, mesmo bombas atômicas, e tem-se descoberto alguns dos novos elementos entre os dejetos de explosões atômicas. Mas não se pode prosseguir indefinidamente, tanto porque as vidas médias dos isótopos intermediários se tornam excessivamente curtas, quanto porque outras reações concorrem favoravelmente com as reações desejadas.

Na corrida para aumentar o número atômico, o método de adição do nêutron atinge um ponto de vantagens decrescentes. Os físicos usam então o bombardeamento com ions pesados. Por exemplo, usando-se O^{16} como projétil, é possível acrescentar oito prótons de uma só vez. Para esse efeito, são necessários aceleradores especiais. O resultado, entretanto, é pequeno e, no fim, os átomos são observados um a um pela medição da emissão de suas partículas alfa ou fissão espontânea.

Os elementos 95 (amerício), 96 (cúrio), 97 (berquêlio), 98 (califórnio), 99 (einstênio), 100 (fêrmio), 101 (mendelêvio), 102 (nobélio) e 103 (lawrêncio) foram formados dessa maneira. Quatorze elementos, a começar do actínio, formam uma nova família de terras raras, e isso se reflete em alguns dos nomes a eles dados; assim, o amerício é um homólogo do európio, uma terra rara. Todos os elementos transurânicos são instáveis, seja por emissão alfa ou beta, seja por fissão espontânea. Muitos deles têm sido preparados em Berkeley por grupos de cientistas, entre os quais G. T. Seaborg, A. Ghiorso, S. G. Thompson e R. A. James, usando bombardeamento de nêutron ou de ions pesados.

Mais recentemente, alguns cientistas soviéticos, chefiados principalmente por G. N. Flerov, desenvolveram seus próprios métodos nessa atividade e competem na corrida pelo número atômico mais alto. Os números 105 e 106 foram os últimos descobertos.

O Efeito Mössbauer

Esse fenômeno coloca-se entre a física nuclear e a física do estado sólido e já encontrou inúmeras aplicações científicas. Foi descoberto em 1958 por Rudolf Mössbauer quando ainda era estudante na Universidade de Munique. Um núcleo livre emitindo um raio gama recua e a energia de recuo é subtraída da energia de transição. Em geral a energia de recuo é muito pequena se comparada com a energia de transição e o recuo produz um pequeno desvio e alargamento da linha espectral emitida. Em certos sólidos e sob certas condições, no entanto, o que recua não é um átomo isolado, mas pequena parte do cristal de massa praticamente imensurável. As linhas espectrais tornam-se então extremamente exatas porque a largura se deve apenas ao princípio de incerteza. Em casos positivos, atinge-se uma definição de energia de 1 parte em 10^{12} . A linha mais exata que se pode obter com um laser óptico tem mais ou menos a mesma exatidão. A exatidão das linhas de Mössbauer abre a possibilidade de observarem-se fenômenos que, caso contrário, seriam inteiramente inacessíveis, como o efeito Zeeman de níveis nucleares, alguns efeitos relativistas, muitas perturbações produzidas no núcleo pelos átomos em volta da malha cristalina, efeitos químicos, e assim por diante.

Há milhares de publicações relativas ao efeito Mössbauer e essa avalanche é mais um exemplo das inter-relações entre diferentes campos da física e de como uma técnica desenvolvida em um campo pode influenciar profundamente outro campo relativamente remoto. Outros exemplos que me vêm à mente são o efeito Raman, indução magnética nuclear e — possivelmente o mais espetacular — o uso de traçadores. Essas interconexões

contrastam acentuadamente com a especialização, cada vez maior, que predomina na física e enfatiza a vantagem ou necessidade de manter vínculos entre ciências diferentes. Os químicos há muito tempo enfrentaram esse problema e talvez tenham sido mais rápidos ao incorporar "novas armas" a seu arsenal de pesquisas.

Supercondutividade

Após os exemplos anteriores, tomados à física teórica, atômica e nuclear, gostaria de apresentar exemplos de progressos realizados na física do estado sólido. Infelizmente, estão um tanto longe de meus conhecimentos técnicos; além do mais, há um grande problema na seleção de exemplos.

Em meu tempo de estudante, ainda era possível seguir os avanços em toda a física, mesmo que não fosse em detalhes. Fermi estava atualizado sobre qualquer assunto relacionado à física, e meus amigos F. Bloch, H. A. Bethe e R. E. Peierls trabalharam ativamente tanto na física do estado sólido quanto na nuclear. Mas o trabalho em mais de um campo ocorria quase exclusivamente entre os teóricos, talvez porque a técnica teórica seja menos diferenciada do que a técnica experimental (esta é uma das grandes vantagens e um dos grandes elementos de atração da teoria). Há exemplos recentes de teóricos como R. Feynman, L. D. Landau e C. N. Yang, que deram contribuições substanciais em campos bastante diversos, mas esses casos são raros; exemplos semelhantes entre experimentalistas são mais raros ainda.

Se examinarmos o volume de pesquisas, o número de físicos empregados e o número de páginas especializadas em publicações sobre física, a física do estado sólido será o campo mais ativo hoje em dia. O que é natural, considerando-se que é também o campo de maiores aplicações industriais. Não é por acaso que alguns dos melhores laboratórios de física do estado sólido são financiados diretamente pela indústria.

Como minha posição é de alguém estranho à área, limitar-me-ei a uns dois exemplos. O primeiro é a supercondutividade. O fenômeno foi descoberto em 1911 por H. Kamerlingh Onnes em recompensa a seus insistentes esforços no sentido de atingir temperaturas sempre mais baixas. Durante muitos anos o progresso experimental e teórico sobre o assunto foi reduzido. Os criogenistas de Leyden e de outros locais descobriram as temperaturas de transição, o efeito de campos magnéticos, o comportamento de calores específicos e outras peculiaridades interessantes do fenômeno, mas que não representavam grandes novidades. Em 1933, W. Meissner e R. Ochsenfeld, em Berlim, descobriram um novo aspecto da supercondutividade. Dentro de um supercondutor a indução magnética B é exatamente igual a zero. Essa propriedade notável, bem como a redução da resistência elétrica a zero, definem a supercondutividade. A descoberta de Meissner abriu caminho para a primeira teoria fenomenológica macroscópica da supercondutividade, logo aperfeiçoada pelos irmãos F. e H. London (1935).

Os resultados por eles obtidos mostravam precisamente o que seria previsto por uma teoria microscópica, mas a passagem do microscópico ao macroscópico, isto é, uma teoria que poderia dar origem às propriedades de um supercondutor a partir do modelo atômico foi, comprovadamente, considerada intratável durante muito tempo. Somente em 1957 é que John Bardeen (n. 1908), Leon Cooper (n. 1930) e J. Robert Shrieffer (n. 1931) acharam a chave da solução. A explicação é complicada e exige todos os recursos da mecânica quântica. É digno de nota o fato de que o esquema matemático desenvolvido para tratar da supercondutividade encontre aplicações bem remotas do problema original. Por exemplo, a física nuclear parece fornecer exemplos de fenômenos semelhantes em matéria nuclear. Assim, a importância da teoria não se limita ao problema original, mas estende-se a muitos outros que tratam do comportamento de sistemas que contêm muitos corpos. Propicia um novo modo de pensar que está sendo comprovadamente profícuo.

Paralelo à supercondutividade há outro fenômeno notável de baixa temperatura no hélio líquido. Parte importante do trabalho sobre esse tema teve origem na União Soviética, onde Piotr Kapitza (1894-1984) foi o principal responsável pelas experiências e L. D. Landau (1908-1968) foi o principal responsável pela teoria. Abaixo de uma certa temperatura crítica $-2,18^\circ\text{K}$ o He^4 atinge uma fase desprovida de qualquer viscosidade, chamada *superfluido*. O hélio superfluido mostra um comportamento espantoso. Rasteja ao longo das paredes do recipiente em que se encontra, escapando literalmente desse recipiente que deveria confiná-lo, forma fontes espetaculares, e assim por diante. Algumas de suas propriedades tinham sido previstas por Einstein em 1924, mas a natureza provou ser muito mais imaginativa do que o próprio Einstein.

O hélio também tem um isótopo raro de massa 3, e o hélio 3 e o hélio 4 diferem grandemente em seu comportamento macroscópico a temperaturas suficientemente baixas. O hélio a baixas temperaturas se torna, portanto, um outro amplo e surpreendente campo de pesquisas. Nas teorias originais, a superfluidade de He^4 era vinculada ao fato de que ele obedece às estatísticas de Bose. Mas, quando o raro isótopo He^3 , que obedece às estatísticas de Fermi, se acumulava em quantidades suficientes e se resfriava abaixo de $0,001^\circ\text{K}$, também mostrava superfluidade! A teoria teve de ser alterada e ampliada e as idéias válidas para a supercondutividade deram a chave.

Outros Efeitos Quânticos Macroscópicos

A mecânica quântica é necessária para explicar a própria existência de átomos e assim, indiretamente, de todas as propriedades estruturais da matéria. Mas em geral é aplicada a sistemas tão pequenos que são praticamente invisíveis. Por outro lado, na física do estado sólido, há vários efeitos mecânicos quânticos que aparecem em objetos macroscópicos. Um desses exemplos é a supercondutividade e a superfluidade; um outro, mais tipicamente macroscópico, é a quantização do fluxo magnético passando através de tubos metálicos supercondutores minúsculos. Foi observado ao mesmo tempo na Universidade de Stanford e em Munique em 1961. Outro exemplo

é o efeito túnel da mecânica quântica em barreiras de potenciais. Esse fato já era bem conhecido havia muitos anos em casos nucleares em que a barreira de potencial se deve a um campo eletrostático em volta do núcleo. No exemplo a que me estou referindo, no entanto, a barreira de potencial é uma camada de óxido construída pelo homem e separando dois condutores.

Um dos casos mais interessantes de fenômenos relacionados com barreiras foi prognosticado por B. Josephson em 1962 e confirmado no ano seguinte por P. W. Anderson e J. Rowell. Quando uma camada de óxido é pressionada entre dois supercondutores, obtém-se uma corrente elétrica passando através desse "sanduíche". A corrente tem dois componentes: um é contínuo e persiste mesmo sem força eletromotora, exatamente como o faria em um supercondutor comum; superposto a ela está um segundo componente alternado, que só aparece quando se estabelece uma diferença de voltagem V entre os dois supercondutores. A frequência desse componente é $\nu = 2eV/h$, independentemente dos materiais usados para formar a junção! O fenômeno proporciona um novo método para medir e/h uma vez que V seja conhecido. Por outro lado, se e/h é conhecido, pode-se medir V . O fenômeno é tão digno de confiança e tão preciso que pode ser usado para definir a unidade de voltagem.

O estudo de materiais que têm propriedades elétricas intermediárias entre metais e isolantes — os chamados semicondutores — levou finalmente à invenção do transistor. Uma etapa necessária para essa realização foi a preparação do germânio extremamente puro. Possivelmente nenhuma substância além do germânio já foi obtida em tais quantidades e com tão poucas impurezas. Com esse material, Bardeen (o mesmo Bardeen que depois viria a descobrir a chave para a supercondutividade), W. H. Brattain e W. Shockley, nos Laboratórios Bell, construíram os primeiros transistores em 1948. O transistor é um componente extremamente versátil de todos os circuitos eletrônicos. Essencialmente faz as mesmas coisas que uma válvula pode fazer: amplificar, retificar, oscilar, etc.; mas não dispõe de filamento emissor de elétrons quentes, e isso produziu uma verdadeira revolução na eletrônica: Sem o transistor, não se poderia construir um computador moderno nem mandar alguém à Lua. O transistor afeta profundamente nossa civilização porque tornou possível a existência de computadores e alterou nossos meios de comunicação.

Nas Fronteiras da Física: Astrofísica, Biologia

É difícil delimitar a física com precisão. Se a física for definida como aquilo que é feito pelos físicos, expandir-se-á a campos remotos como a física molecular, a astrofísica e a geologia.

Grandes avanços têm sido realizados na astrofísica, astronomia e cosmologia sobretudo por causa dos progressos técnicos na observação de escalas de frequência da radiação eletromagnética que eram totalmente inacessíveis antes da Segunda Guerra Mundial. A radioastronomia, a partir da Terra, e a astronomia de raios X e de raios ultravioleta, a partir dos

satélites, abriram perspectivas inteiramente insuspeitadas antes da guerra e, também, atraíram a atenção dos astrônomos, que usavam telescópios comuns, para objetos ópticos inconspícuos e de grande interesse. Quasars, pulsars, estrelas de nêutrons e buracos negros enchem atualmente os céus de dramas cósmicos inesperados. Mesmo a origem do universo parece enquadrar-se em hipóteses plausíveis.

Numa escala mais modesta, a física nuclear tem dado uma explicação satisfatória sobre a origem da energia solar por minuciosas análises de laboratório de certos ciclos de reações nucleares, que certamente ocorrem no Sol. Uma dessas reações é a síntese de núcleos de hélio a partir de prótons. O ciclo em questão foi descoberto por H. A. Bethe em 1938. O resultado final é a combinação dos quatro prótons em um núcleo de hélio com uma liberação de grande quantidade de energia; outros núcleos têm um papel vital no ciclo como catalisadores e a carga elétrica é conservada por emissões de pósitrons apropriadas. Como disciplina teórica, a nucleossíntese está relativamente bem-desenvolvida e temos modestas experiências relacionadas com ela na Terra, tanto em reatores quanto em bombas.

As reações nucleares que ocorrem no Sol seriam fonte de energia importante na Terra se pudessem ser produzidas não numa escala astronômica, mas numa escala humana, e se pudessem ser controladas. Estudos nesse sentido estão sendo realizados em todo o mundo e com relativo sucesso. O problema básico é fazer com que os núcleos de uma mistura gasosa reajam um com o outro, o que já foi tentado por descargas elétricas ou por outros meios tais como o aquecimento com um feixe de *laser*. O antigo estudo de descargas de gás foi, desse modo, transformado em física dos plasmas. O plasma é uma mistura de átomos, elétrons e íons em forma gasosa. O objetivo imediato das pesquisas de plasma é obter um plasma a uma pressão e temperatura suficientemente altas e mantê-lo unido o tempo suficiente para iniciar uma reação nuclear entre seus componentes. Estes em geral são hidrogênio, deutério e trício comuns — os três isótopos de hidrogênio de massa 1, 2 e 3. A energia liberada nas reações nucleares que ocorrem quando o plasma é nuclearmente aquecido deveria ser suficiente para mantê-lo quente. A finalidade é extrair o excesso de calor desenvolvido sob condições controladas e usá-lo para fins práticos como se usa qualquer outra fonte de energia térmica.

As dificuldades com que se depara esse programa são enormes, e até agora o êxito ainda está longe, mas as possíveis vantagens também são enormes, porque obteríamos uma fonte de energia quase ilimitada e "limpa". Em vista desses benefícios extraordinários, e na falta de obstáculos de natureza fundamental, cientistas e técnicos, com o apoio dos governos, persistem na busca. O problema imediato e mais importante é o de armazenar o plasma. Nenhuma parede material poderia resistir às condições predominantes no plasma e seria necessário armazená-lo ou por meio de campos magnéticos ou por meio de algum artifício ainda desconhecido.

Por outro lado, as reações termonucleares explosivas são a base das chamadas bombas atômicas ou bombas de hidrogênio, que, em razão de seu poder destrutivo, levam a humanidade a defrontar-se com perigos sem precedentes. Em uma bomba de hidrogênio uma bomba nuclear comum

inflama uma mistura de elementos leves; e o poder da bomba só é limitado pelo total dos reagentes empregados.

A nova astronomia está descobrindo efeitos gravitacionais novos e importantes. O estudo da gravitação ficou basicamente estacionário entre o período de Newton e a formulação da relatividade geral em 1916, quando Einstein prognosticou a existência de três efeitos mínimos e difíceis de observar. Durante muitos anos a relatividade geral permaneceu como se fosse uma província ocupada por um número limitado de especialistas e um tanto afastada da corrente principal da física, mas atualmente a situação está-se modificando. Já é possível planejar e iniciar experiências laboratoriais sobre "radiação gravitacional". A radiação gravitacional é emitida em quantidades extremamente reduzidas, quando as massas são aceleradas. Grandes eventos cósmicos poderiam emitir radiação gravitacional suficiente para ser detectada por instrumentos terrestres.

Entre outras maravilhas dos céus, os astrônomos já viram objetos com uma massa comparável à do Sol, mas com um raio de apenas alguns quilômetros. Sua densidade é da ordem de 10^{14} g/cm³, isto é, a mesma ordem de magnitude da matéria nuclear, tal que o volume de uma gota de água pesaria tanto quanto 500 grandes petroleiros. O principal componente desses objetos são os nêutrons. Não há neles praticamente nenhum elétron ou próton. Desde 1934, mais ou menos, Landau, Oppenheimer, e seus alunos tinham postulado a existência e calculado as propriedades de estrelas de nêutrons.

Se uma estrela de nêutron exceder uma certa densidade limitante, explodirá, porque a pressão da radiação interna não pode compensar a atração gravitacional. O que pode acontecer ainda não está inteiramente claro. Tem-se detectado densidades extremamente altas e o campo gravitacional impede que qualquer radiação escape da estrela. Esta se torna um buraco negro, impossível de detectar diretamente porque nenhuma radiação pode dele escapar. Não obstante, há maneiras indiretas de observar os buracos negros e há alguns indícios de que de fato têm sido observados.

Numa base mais firme está a presença da radiação de um corpo negro correspondente a uma temperatura atual de cerca de 2° K que inunda todo o universo. Essa radiação é explicada como resíduo de uma explosão catastrófica que pode ter dado origem ao universo há 10^{10} anos**. Após a grande explosão, o universo vem-se expandindo e a radiação do corpo negro observada é o resíduo resultante da transformação da radiação existente quando da explosão.

Estas são apenas algumas das descobertas e teorias revolucionárias que atualmente estão agitando a astronomia. Os céus passaram a povoar-se de tremendos eventos dinâmicos, totalmente desconhecidos há algumas décadas, e a astrofísica se encontra em uma fase de evolução rápida comparável talvez à da física nuclear na década de trinta. A astrofísica atrai muitos cientistas jovens e entusiasmados, quase sempre treinados de início como físicos. Para alguns deles um dos elementos mais fascinantes nesse campo é o

* N.T. — 10^{14} gramas/centímetro cúbico = cem milhões de toneladas por centímetro cúbico.

** N.T. — 10 bilhões de anos.

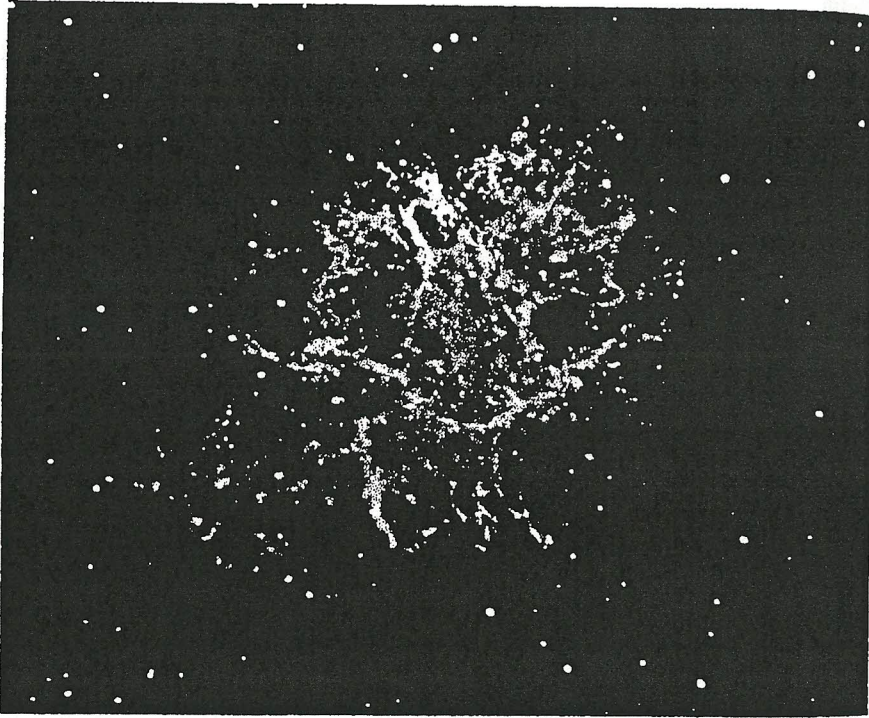


Figura 13.5. A Nebulosa de Câncer, extraordinário corpo celeste e fonte de luz, ondas rádio e raios X. Em seu centro existe uma estrela pulsante – ou pulsar – que se acredita ser uma estrela de nêutron girando rapidamente em torno de seu próprio eixo. A nebulosa é o resíduo da explosão de uma supernova observada por astrônomos chineses em 1054. (Observatório Hale.)

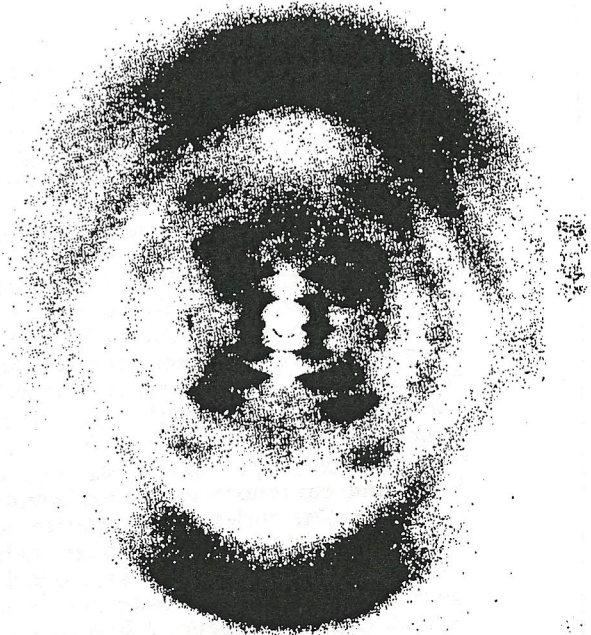
fato de não haver nenhuma aplicação prática em perspectiva para suas pesquisas (Figura 13.5).

Talvez a biologia molecular seja a conquista científica de maior significado e de mais amplo alcance no pós-guerra. Para a biologia, trata-se de algo semelhante à descoberta da mecânica quântica para a física, e não podemos prever aonde, a longo prazo, nos levará a biologia molecular. A biologia molecular certamente não é física, mas já era prevista nas palavras de Corbino em 1929:

“Seria melhor se em vez de efetuarmos uma simples superposição de técnicas, efetivamente, obtivéssemos do mesmo cérebro uma fusão da mentalidade biológica com a mentalidade criada pela nova física”.

A verdade é que não poucos dos grandes nomes da nova disciplina foram treinados e começaram suas carreiras como físicos. Como símbolo da biologia molecular, a Figura 13.6 mostra a famosa dupla hélice de Francis Crick e James Watson que esclareceu tantos e tão intrincados problemas da

Figura 13.6. (a) Fotografia em difração de raios X do DNA, tirada por Rosalind Franklin no laboratório de M. H. F. Wilkins. James Watson e Francis Crick descobriram as chaves para a estrutura de dupla hélice do DNA nesta foto. (b) Um modelo de enchimento espacial da dupla hélice do DNA. (Cortesia de M. H. F. Wilkins, Conselho de Pesquisas Médicas, Setor de Biofísica Kings College, Londres.)

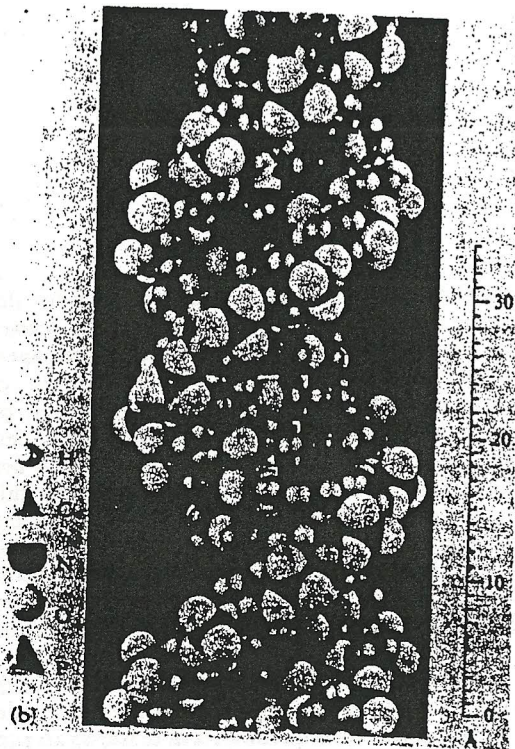


biologia. Estes problemas tinham de ser combinados com sofisticadas análises de raios X da estrutura, com estudos de traçadores e com um conhecimento da ligação química, intimamente relacionada à mecânica quântica. Muitos ramos diferentes da ciência e da tecnologia tinham, assim, de convergir sobre o objeto.

O Cientista Perplexo

Já mencionei, ligeiramente, várias correntes da física moderna. Todas elas têm um elevado conteúdo intelectual, o principal elemento de atração para os que a praticam, mas não devemos deixar de lado seus efeitos sobre a condição humana. Trata-se de argumento ardorosamente discutido e que vai muito além da física, embora seja para ela de importância fundamental. Voltarei ao tema rapidamente, embora tenha plena consciência de que os físicos, como tais, não têm nenhuma competência especial sobre o assunto.

A influência da ciência na tecnologia é um tema mais simples, mas não tão simples quanto em geral se acredita. A transformação de uma descoberta científica em um produto comercial ou em uma tecnologia nova exige tempo, capital, capacidade, mercado favorável e infra-estrutura industrial. Acima de tudo, as personalidades e os motivos dos cientistas me parecem diferentes das personalidades e dos motivos dos inventores. Creio que os



impulsos que dominaram Edison ou Marconi eram totalmente distintos daqueles de J. J. Thomson ou Hertz, para não falar de Einstein ou Bohr. Muitos físicos estão na raiz de importantes avanços tecnológicos, mas talvez pouquíssimos tenham participado de tais avanços na fase industrial.

A maneira moderna de transformar a ciência em tecnologia também é muito diferente daquela que predominava na virada do século. Atualmente grandes grupos enfrentam os problemas em laboratórios bem equipados e as recompensas financeiras não dependem inteiramente do êxito alcançado. Os membros de um grupo são de alta qualificação e também podem adaptar-se a uma empresa como se fossem trabalhadores. Que diferença em relação a inventores solitários como Edison ou Marconi, que eram apenas moderadamente educados e dependiam basicamente de seus próprios recursos! Não apenas as patentes e as transações financeiras lhes eram essenciais, como também durante muitos anos tiveram que lidar com essas patentes e transações financeiras pessoalmente, isto é, sem auxílio de ninguém. O inter-relacionamento entre ciência e indústria é muito interessante, mas está além do escopo deste livro.

A mudança na organização dos esforços e atividades científicas que ocorreu neste século é flagrantemente exemplificada por uma comparação entre a conquista do ar e a conquista do espaço. A primeira foi realizada por inventores que usavam seus próprios métodos idiossincráticos, a segunda, por técnicos que usavam métodos científicos. Uma das principais consequências é o pequeno número de vidas perdidas na conquista do espaço em comparação com as muitas perdas nas primeiras tentativas de voar. Em grande parte, isso se deve ao fato de que os pioneiros da aviação tinham pouco conhecimento dos fenômenos em que se baseia o voo, enquanto que os planejadores da atuação dos astronautas podiam calcular e experimentar quase todas as coisas necessárias antes de se aventurarem no espaço.

A conquista do espaço é um exemplo extremo de tendências características da revolução industrial, que começou no final do século XVII, graças sobretudo à engenhosidade de inventores, artesãos e empresários relativamente incultos, e evoluiu para a segunda revolução industrial, dominada por laboratórios de pesquisas inteiramente atualizados em matéria de ciências contemporâneas e dotados de pessoal não muito diferente, fundamentalmente, dos cientistas de nível universitário.

Voltemos agora à influência das ciências na condição humana. Muitos livros já foram escritos sobre o assunto e seria presunção minha tentar tratar disso em poucos parágrafos. O problema é antigo e podemos a respeito dele fazer uso das palavras de Pierre Curie citadas nas páginas 42-3.

Certos pontos me parecem bastante claros: primeiro, as ciências ampliam o poder humano. Também permitem (pelo menos aproximadamente) uma previsão das consequências de certos rumos de ação. Mas o processo de decisão, tanto no nível pessoal quanto no nível governamental, é ditado não pelas ciências, mas por fatores obscuros que só conheço superficialmente. Esses fatores me parecem altamente irracionais, possivelmente ditados por forças comportamentais, impulsos evolucionistas ou demônios subconscientes. Assim, vemos rumos de ação que, para um observador de fora, parece ter consequências totalmente irracionais e destrutivas. A corrida armamentista é um exemplo manifesto. Pelo fato de aumentarem o poder humano, as ciências tornam cada vez mais perigosas essas buscas tão tressloucadas, que possivelmente põem em perigo a própria sobrevivência da espécie. A reação Luddite defendida por alguns seria pôr um fim às ciências e, como resultado, impedir o aumento da capacidade humana de fazer o mal. Pode ser tarde demais para uma solução desse tipo, mesmo que factível, mas acredito que não o seja.

Além disso, sou de opinião que sufocar a curiosidade é um ato contrário aos mais profundos instintos humanos. Negar o uso do cérebro em razão do temor do que se poderia descobrir é indigno da humanidade. Dante Alighieri em certa ocasião colocou na boca de Ulisses as seguintes palavras:

*Considerate la vostra semenza;
Fatti non foste a viver come bruti
Ma per seguir virtute e conoscenza*

[Examinai vossa progênie:

Não fostes feitos para viver como selvagens,

Mas para buscar a virtude e o conhecimento.]

(Entretanto, a busca empreendida por Ulisses levou-o, e a seus companheiros, à catástrofe.)

O ponto de vista otimista e talvez panglossiano é que, com o tempo, as pessoas conseguirão aplicar seus poderes racionais à tomada de decisões. Não posso dizer que seja muito esperançoso com respeito a opinião tão otimista, sobretudo porque talvez não haja tempo suficiente para mudança de atitudes mentais.

Que devemos fazer? E, acima de tudo, o que devem fazer os cientistas? Devemos tentar sempre lembrar o público das conseqüências de certas ações, o que seria feito com honestidade e inteligência.

Estou consciente de que, infelizmente, a objetividade nesses assuntos é enganosa e que a política, a economia e o comportamento social não recebem o mesmo tipo de tratamento recebido pela ciência. A complexidade dos problemas, a impossibilidade de tratá-los isoladamente, a natureza dos dados envolvidos, qualitativamente diferentes daqueles examinados nas ciências físicas, infinitamente mais simples, são apenas alguns dos obstáculos às aplicações de métodos científicos a problemas sociais humanos.

Embora o cientista tenha o conhecimento especializado de sua disciplina, em outros assuntos ele é vítima das mesmas forças obscuras, à semelhança de qualquer outro homem. Seu treinamento e sua educação podem ajudá-lo a superar alguns de seus impulsos irracionais, mas a idéia de que o cientista, objetivo e frio, está acima do resto da humanidade é falaciosa. Tal fato deve ser reconhecido pelos cientistas e pelo público em geral. Os cientistas não são sacerdotes de uma religião mágica.

O dever de informar seu semelhante é essencial, mas a responsabilidade pelo uso de suas descobertas não pode honestamente ser lançada sobre o cientista. Ele não tem o poder de determinar que uso se fará de suas descobertas e não se pode separar poder e responsabilidade. Além do mais, praticamente todas as descobertas podem ser aplicadas a uma diversidade de propósitos, alguns dos quais nos parecem bons, mas outros nos parecem maus. Tal fato é conhecido desde os primórdios da civilização — um símbolo desse dilema é o uso do aço na fabricação de espadas ou arados. Nos tempos atuais, a penicilina e o DDT têm sido louvados como dádivas para a humanidade, mas o uso indiscriminado dos dois produtos pode ter conseqüências indiretamente nocivas. A energia nuclear pode ser de grande valia para a humanidade ou pode significar sua destruição. A escolha não está nas mãos dos cientistas.

Capítulo XIV

Conclusões

Gostaria de terminar este livro com algumas conclusões de ordem geral. Primeiro, a de que nosso estudo não propicia nenhum retrato fiel do que é um físico. O que há nele é uma grande variedade de personagens, o que não é surpreendente se considerarmos a ampla diversidade de contribuições necessárias ao progresso da física. Como casos extremos, podemos pensar em E. O. Lawrence e P. A. M. Dirac: uma comparação, nesse caso, revela personalidades contrastantes, mas fundamentais para o avanço da física. Duas grandes estrelas — Rutherford e Einstein — teriam dificuldade em levar adiante uma discussão científica séria entre si. Seus interesses, cultura e imaginação científica diferiam enormemente. Teria sido difícil fazer com que Rutherford sentisse a importância da invariância das equações de Maxwell face à transformação de Lorentz, ou despertar o interesse de Einstein pelos detalhes técnicos necessários para especificar a desintegração nuclear.

Se quisermos salientar traços comuns a físicos importantes, acharemos uma grande ansiedade e capacidade de trabalho, perseverança, otimismo e imaginação científica. Mas essas são as qualidades necessárias ao sucesso em praticamente todas as profissões, do atleta ao poeta, do banqueiro ao general. Qualidades intelectuais como capacidade de análise e imaginação teórica são excepcionais em algumas pessoas, mas relativamente discretas em outras que, não obstante, atingiram o ápice. Alguns físicos são universalistas, outros são especialistas. Um homem como H. A. Lorentz teria sido eminente em qualquer atividade, inclusive como diplomata ou comerciante. Mas o que teria feito um Pauli a não ser física teórica? A conclusão é que todos os caminhos *podem* levar a Roma e não que todos os caminhos *levam* a Roma.

Embora o acaso tenha seu papel nas descobertas científicas, há muitos casos de descobertas simultâneas para que se atribua a ele boa parte da responsabilidade. Ao contrário: o momento histórico do trabalho é mais importante. Há períodos férteis e períodos estéreis. Além do mais, parece haver uma certa lógica interna no desenvolvimento de uma disciplina científica e o culto da personalidade não deve ser levado a extremos. Tenhamos em mente, por exemplo, a descoberta de três modalidades de mecânica quântica. Considerando bem as coisas, temos a ligeira impressão de que, mesmo que um dos maiores físicos não tivesse nascido, cinquenta anos mais tarde, apesar de tudo, a física teria atingido o mesmo nível.