

para seu desenvolvimento, da mesma forma que a mecânica newtoniana foi essencial para a ida à Lua; esta é uma das provas mais concretas da relatividade, se é que ainda há alguma dúvida. Para lidar com perdas de energia devidas à radiação que ocorre quando elétrons rápidos se movem em um círculo, os aceleradores lineares são melhores do que os aceleradores circulares. Para energias muito elevadas, volta-se a recorrer a aceleradores lineares, como o acelerador linear de Stanford, de duas milhas de comprimento (SLAC), em Palo Alto, Califórnia, que produz elétrons, pósitrons e fótons. Combinado com anéis de armazenagem e feixes colidentes, alcança energias de 8 GeV no centro de massa.

A corrida por energias mais elevadas é interrompida por um problema sério quando a energia da partícula é grande comparada à energia em repouso do projétil e do alvo. A energia importante não é a energia do projétil no laboratório, mas a energia no centro de massa do projétil e do alvo. A última, por exemplo, é que serve para criar novas partículas. Para um próton atingindo um próton, essa energia no centro de massa é dada no caso relativista extremo pela expressão  $E = \sqrt{2Mc^2E_{lab}Mc^2}$  são  $E = 0,938$  GeV e, assim, um próton de 1.000 GeV no laboratório atingindo um outro próton em repouso tem uma energia no centro de massa de apenas 43 GeV! O custo das máquinas aumenta em termos proporcionais à energia do laboratório ou talvez com maior velocidade; desse modo, fica evidente que a corrida por altas energias aumentando a energia do laboratório é, do ponto de vista financeiro, uma proposta que dá prejuízo.

Fazendo colidir dois feixes de prótons de 22 GeV, obtém-se no centro de massa a mesma energia alcançada pelo acelerador de 1.000 GeV, embora a intensidade passível de ser obtida seja muito menor. Os feixes colidentes parecem ser, hoje em dia, a única opção disponível para a obtenção de altíssimas energias de centro de massa.

Em 1979, o recorde de energia no centro de massa para colisões elétron-pósitron ficou por volta de 30 GeV, obtido no Desy (Deutsches Elektronen Synchrotron), perto de Hamburgo, Alemanha. Os raios cósmicos, no entanto, mantêm o recorde de energia absoluta:  $10^{20}$  eV. Tais energias são inatingíveis por qualquer meio laboratorial num futuro próximo, mas os raios cósmicos são incontroláveis e, a uma energia extremamente alta, muito raros. É difícil usá-los para pesquisas de partículas.

A necessidade de máquinas tem condicionado o progresso da física de partículas. Esse campo de pesquisas de vanguarda será estudado no capítulo seguinte.

## Capítulo XII

### Além do núcleo

Ao final da guerra, os físicos que se haviam envolvido no conflito tiveram de cuidar do futuro. A grande maioria retornou às universidades (de onde tinham-se afastado temporariamente para participar do esforço de guerra), alguns como professores, outros como alunos. Enquanto isso, o centro de gravidade da física transferira-se da Europa para os Estados Unidos, em parte porque a Europa tinha sofrido grandes danos com o bombardeio, ao passo que os Estados Unidos tinham sido poupados, e em parte porque as grandes realizações de guerra, como o radar, a bomba atômica e os primeiros computadores tinham estabelecido a supremacia científica nos Estados Unidos. E também porque as políticas ensandecidas dos países do Eixo tinham-nos destituído de considerável quantidade de sua mão-de-obra científica. Além do mais, as condições de vida em uma Europa devastada não se mostravam acolhedoras mesmo depois da guerra.

Em física ocorreram algumas mudanças grandes e óbvias: em física nuclear, o total de dados experimentais tinha aumentado imensamente e era evidente que estavam para ocorrer outros aumentos, tanto do ponto de vista qualitativo quanto do ponto de vista quantitativo. Novas invenções na área de máquinas de aceleração e de reatores nucleares proporcionavam fontes de radiações de uma intensidade inesperada. Outras técnicas mecânicas derivadas do radar contribuíram para a abertura de possibilidades inteiramente novas.

A ciência tinha-se apercebido da imaginação pública e, em consequência, surgiam generosas doações de recursos públicos. Nos Estados Unidos, propôs-se a criação da Fundação Nacional da Ciência, para financiar pesquisas científicas, mas o processo legislativo para implementá-la foi lento e, até certo ponto, ineficaz. Nesse meio tempo, a Marinha e a Comissão de Energia Atômica, uma nova instituição do pós-guerra relacionada à energia nuclear, decidiram intervir, oferecendo recursos para as pesquisas puras até que a situação se desanuviasse. A ação da Marinha é historicamente digna de nota. O Alto Comando decidiu que, para suas próprias finalidades, era mais útil financiar um programa científico intenso, mas inteiramente livre, sem quaisquer vínculos explícitos ou implícitos, do que aumentar a frota com um, ou mais, grande navio. Dessa forma, a Marinha financiou todos os tipos de pesquisas científicas, do mais alto nível, mas sem nenhuma vinculação mais evidente com seus objetivos navais.

Os estudantes do após-guerra eram muito diferentes da geração anterior: eram mais maduros e quase sempre mais bem-preparados tecnicamente. Um soldado que tivesse trabalhado como técnico em Oak Ridge teria adquirido conhecimentos práticos equivalentes a vários anos de treinamento em laboratórios universitários, e um marinheiro que tivesse servido à Marinha norte-americana, na maior parte das vezes disporia de uma boa base em eletrônica.

Tudo isso contribuiu para o grande vigor das tarefas científicas nos Estados Unidos durante o período imediatamente posterior à guerra.

### As Partículas Elementares

Estava para surgir um novo campo, ou melhor, estava para florescer um novo campo: o estudo das chamadas partículas elementares. Antes da guerra, os prótons, nêutrons, elétrons, pósitrons, fótons e neutrinos eram conhecidos; e, em raios cósmicos, já tinham sido vistas partículas com massa cerca de 200 vezes superior à do elétron, então chamadas de mésostrons. Os componentes do mundo pareciam relativamente simples, mesmo que não tão simples quanto em 1929, quando apenas prótons, elétrons e fótons eram conhecidos e pareciam suficientes para explicar a constituição da matéria. Também parecia evidente à maior parte dos físicos mais bem-informados que as partículas elementares constituiriam a fronteira seguinte da física, pois representavam os problemas mais fundamentais; e novos instrumentos experimentais, já nos primórdios de sua criação, permitiram o avanço em território desconhecido.

Outros campos, a física nuclear e a física do estado sólido, também eram promissores. Mas os problemas que apresentavam, embora interessantes e mais importantes em termos de usos que os da física das partículas, eram menos fundamentais, isto é, menos gerais, menos novos e com menos probabilidade de mudar alguns conceitos estabelecidos ou de introduzir outros conceitos novos e inesperados.

Outras ciências relacionadas à física, mas um tanto afastadas da corrente principal, como a geofísica, astrofísica e biologia molecular, também pareciam muito promissoras. Para um físico, no entanto, exigiam uma reciclagem em campos inteiramente novos e o desenvolvimento de novos hábitos mentais que não são adquiridos com facilidade. Alguns físicos fizeram o esforço necessário para a transição, e algumas vezes com ótimos resultados.

Os físicos que desejavam estar na linha de frente de sua disciplina se voltariam para a física das partículas.

No final da guerra, os raios cósmicos ainda constituíam a única fonte de partículas de alta energia. Só podiam ser observados por obra do destino e não havia possibilidade de experimentação através da modificação de sua energia ou da criação de condições variadas, como é comum em outros campos da física. Por outro lado, considerável progresso já tinha sido feito em métodos de detecção e, durante alguns anos, os raios cósmicos competiram com os aceleradores como fonte de partículas, sobretudo

porque tinham energias mais altas do que qualquer coisa que se pudesse conseguir em um laboratório daquela época. Os raios cósmicos tinham também a vantagem de não custar nada e, especialmente para os países europeus, devastados pela guerra, isso representava uma dádiva dos deuses. A tradição inglesa e italiana em matéria de estudos de raios cósmicos foi particularmente revidada logo após a guerra.

Nos Estados Unidos, os esforços centralizaram-se na obtenção de energias de raios cósmicos mediante o aperfeiçoamento de aceleradores maiores e melhores; na Europa, onde tal aperfeiçoamento era impossível do ponto de vista financeiro, pelo menos temporariamente, os esforços se centralizaram no melhoramento de métodos de detecção. O avanço mais significativo e também um dos mais simples foi o desenvolvimento das emulsões fotográficas, que permitiu fossem detectadas partículas de carga única movendo-se quase à velocidade da luz. As partículas mais lentas ionizam-se mais intensamente e, assim, são detectadas com mais facilidade, mas as partículas que se movem quase à velocidade da luz são de fundamental importância para uma análise significativa dos fatos observados. Pesquisadores ingleses e italianos, usando raios cósmicos e emulsões fotográficas, conseguiram fazer descobertas verdadeiramente importantes; assim, tinham descoberto um campo da física extremamente interessante e a baixo custo. Mais tarde, naturalmente, chegou-se à conclusão de que esse baixo custo da física das partículas era ilusório — na realidade, passou a ser um dos campos da física mais dispendiosos —, mas então as condições financeiras já tinham melhorado e também a Europa já podia se dar ao luxo de possuir aceleradores gigantes.

### A Nova Ciência no Japão

Agora, voltemos à física. Pela primeira vez vemos um físico japonês, Hildeki Yukawa (1907-1981), salientar-se na área de novas idéias teóricas.

Antes de falar a respeito de Yukawa, farei uma ligeira digressão sobre o desenvolvimento da física ocidental no Japão. À época da restauração Meiji, em 1868, o Japão tinha uma tecnologia nativa razoavelmente adiantada, mas não dispunha de nenhuma ciência, no sentido ocidental. Quando os líderes japoneses resolveram modernizar o país, depois da visita do Comodoro Perry, em 1853, e da abertura forçada dos portos ao comércio estrangeiro, perceberam a importância da "ciência" e importaram um professor de física inglês e um outro francês, encarregando-os de ensinar sua disciplina em Tóquio. As dificuldades lingüísticas eram tais que as duas escolas continuaram separadas. Alguns samurais também foram enviados à Europa para estudar física. Aparentemente, seu interesse científico era muito limitado, mas eles estavam plenos de ardor patriótico e estudaram ciências com um espírito militar. Uma autobiografia (existente apenas em japonês) de um desses samurais mostra-o como violentamente antiocidental e cheio de desprezo pelos bárbaros ocidentais, mas esses sentimentos se mesclam aos de admiração pelos êxitos ocidentais, o que, em retrospectiva, significava certamente uma perigosa combinação. Esse samurai, de início, mostrara-se cético quanto às potencialidades da ciência ocidental, mas, quando o capitão

do navio em que ele estava viajando anunciou que encontrariam um outro navio no meio do oceano naquela tarde, e foi o que aconteceu; o samurai se rendeu à evidência.

A esses pioneiros japoneses seguiram-se homens que estavam mais bem preparados e que já tinham algum entendimento e interesse em matéria de ciências *per se*, e não estavam meramente cumprindo um dever patriótico. Entre eles, Hantaro Nagaoka (1865-1950) é a figura mais importante. Nagaoka visitou a Europa na passagem do século e parecia informado a respeito de problemas de física considerados importantes naquela época. Tornou-se um dos nomes de maior relevo das ciências japonesas, área em que também exerceu grande influência como administrador. Ensinou física durante muitos anos na Universidade de Tóquio, mas quando, em 1931, foi fundada uma nova Universidade Imperial em Osaka, foi nomeado seu presidente, embora sem grande entusiasmo.

As ciências e o patriotismo eram as maiores paixões de Nagaoka. Uma carta de 1888, escrita curiosamente em inglês e destinada a seu professor Tanakadate, que se encontrava provisoriamente em Glásgow, Escócia, mostra de forma eloqüente os sentimentos de Nagaoka, embora eles possam ter mudado com o passar do tempo:

"Precisamos trabalhar ativamente com os olhos bem abertos, os sentidos bem aguçados e uma capacidade imediata de compreensão, e sem parar um só instante. Não devemos deixar que essas pessoas entrem em nossa casa e interrompam nosso trabalho, pois elas, apesar de darem a impressão de que pretendem trabalhar, param de trabalhar sempre que surge alguma coisa capaz de atrair-lhes o olhar, a boca ou o bolso. Não vejo razão para os brancos serem tão supremos em tudo e, conforme o senhor diz, espero que possamos superar essa gente *yatya hotya* (presunçosa) dentro de uns dez ou vinte anos: não creio que haja necessidade de observar com telescópio, do *jigoku* (inferno), a vitória de nossos descendentes sobre os brancos. Outro grande requisito para superar esses brancos é divulgar nosso trabalho. Trata-se de um problema muito sério. Em primeiro lugar, não podemos escrever em japonês e fazer com que os ocidentais compreendam o que escrevemos. Precisamos usar a língua dos brancos e fazer com que eles nos entendam. A verdade é que, como o senhor admite, os brancos podem expressar-se a respeito de qualquer coisa, mas, em nosso caso, às vezes somos incapazes de expressar-nos, mesmo que tenhamos material suficiente para isso. Creio que esse é o nosso grande defeito e devemos, se possível, aprender a escrever e falar clara e fluentemente. Não creio que existam muitas opções em termos de língua, a não ser inglês, francês ou alemão. Por favor, reflita sobre isso.

Mas deixando de lado os sonhos, falarei a respeito de algo que está acontecendo por aqui..." [K. Koyzumi, *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 6, p. 87 (1975).]

Nagaoka publicou muitos artigos em revistas ocidentais — sobre magnetismo, espectroscopia e outros temas. O mais notável é uma proposta, de 1903, de um modelo atômico semelhante ao sistema solar. O magnetismo tradicionalmente tem sido assunto preferido dos físicos japoneses, que a ele

trouxeram importante contribuição tanto em termos teóricos quanto experimentais.

Mas, do ponto de vista científico, a mais importante influência japonesa foi exercida por Y. Nishina (1890-1951). Primeiro, Nishina estudou engenharia elétrica em Tóquio, mas depois foi para a Europa e passou-se para o campo da física teórica. Em Copenhague, trabalhou no instituto de Bohr, onde, junto com o sueco O. Klein, calculou a seção de choque do espalhamento Compton, naquela época um *tour de force* em matéria de técnica teórica. Também trabalhou com Heisenberg na Alemanha. Finalmente, retornou ao Japão, onde entrou para o Instituto de Pesquisa Física e Química, financiado por recursos privados e governamentais. Esse Instituto teve muita influência nas ciências japonesas. Uma grande parte dos mais proeminentes físicos japoneses da geração mais jovem está direta ou indiretamente vinculada à escola de Nishina.

Muito importante, por causa de suas próprias descobertas e por suas atividades como professor, é Hideki Yukawa (Figura 12.1). Nascido em Tóquio em 1907, filho de um professor de geologia, Takuji Ogawa, em 1932 Yukawa foi adotado pela família de sua esposa, de sobrenome Yukawa. Sua formação educacional fez-se inteiramente no Japão, sobretudo em Kyoto. Até certo ponto era um autodidata. Com o amigo e colega de escola Sin-iiro Tomonaga (1906-1979), aprendeu mecânica quântica através de documentos originais e de livros. Quando Nishina retornou da Europa, Tomonaga, que viria a tornar-se famoso por seus estudos sobre eletrodinâmica, foi para o Instituto de Pesquisa Física e Química. Yukawa obteve um cargo na Universidade em Osaka, onde havia um físico formado na Europa, Seishi Kikuchi, que se transferira do Instituto de Pesquisa Física e Química.

Em 1935, em Osaka, Yukawa escreveu um documento histórico. O documento não era completo e talvez não estivesse totalmente correto, mas continha idéias novas e fundamentais, que vieram a ser extremamente produtivas e a exercer profunda influência em fatos subsequentes.

Yukawa criou uma importante escola de físicos teóricos na Universidade de Kyoto. Também fundou uma revista — *The Progress of Theoretical Physics* — que teve realce internacional, sobretudo em física teórica de partículas. Quase sempre as idéias apareciam nessa publicação independentemente da literatura ocidental e, mais tarde, ou simultaneamente, eram descobertas por autores que não tinham tido acesso à revista. Isso ocorreu sobretudo durante e logo após a Segunda Guerra Mundial.

A linguagem matemática e o idioma inglês formam uma ponte entre a física japonesa e a física ocidental, mas de quando em vez pode-se sentir a base cultural diferente. É claro que isso pode constituir uma vantagem quanto ao progresso da ciência, pois permite ângulos de exame bastante independentes.

Yukawa foi o primeiro japonês a ser laureado com o Prêmio Nobel em física, em 1949, e isso lhe deu enorme prestígio em seu país. Os japoneses iam vê-lo como uma prova viva de que tinham alcançado uma paridade científica com os ocidentais. Assim, Nagaoka pôde ver seu sonho realizado antes de morrer, em 1950.



Figura 12.1. Hideki Yukawa (o terceiro a partir da esquerda) em visita a Berkeley em 1948. Também na foto, a partir da esquerda, estão Fermi, Segrè e C. C. Wick. Yukawa foi o primeiro físico japonês a receber formação científica inteiramente no Japão. Sua teoria interpretava mésons como *quanta* de forças nucleares. (Foto E. Segrè.)

Eis uma versão simplificada das teses de Yukawa. Sabe-se que os fótons são associados ao campo eletromagnético e às suas forças. Yukawa indagava quais seriam as características dos *quanta* associados ao campo das forças nucleares. Com um raciocínio simples que envolvia pouco mais que uma aplicação do princípio de incerteza e da relatividade, chegou à espantosa

conclusão de que o *quantum* das forças nucleares deve ter uma massa em repouso finita. Estimou que essa massa em repouso deveria ser cerca de 200 vezes maior do que a massa do elétron, ou que a energia  $mc^2$  desse *quantum*, quando em repouso, deveria totalizar cerca de 100 MeV. Além disso, essa partícula deveria aparecer de três formas: eletricamente neutra, positivamente carregada ou negativamente carregada com carga igual em magnitude à do próton.

O raciocínio de Yukawa era o seguinte: as forças nucleares têm uma espécie de esfera de ação de  $10^{-12}$  a  $10^{-13}$  cm. Isso significa que a essa distância,  $r_0$ , a força decresce repentinamente. Em contraste, no potencial de força elétrica ordinária  $U(r) = e/r$  não há esse comprimento característico. Atualmente é possível interpretar a força entre dois núcleos como resultante da emissão de um *quantum* por um deles e da absorção do mesmo *quantum* pelo outro. O *quantum* precisa de um tempo maior do que  $r/c$  para ir da emissão para o núcleo absorvente, porque, em virtude da relatividade, não pode exceder à velocidade da luz  $c$ . Durante o período de viagem, a conservação da energia é violada porque se tem a massa adicional do *quantum* e a energia correspondente  $mc^2$ . Mas não se pode medir energia com uma precisão maior do que

$$\Delta E = \frac{h}{2\pi} t$$

onde  $t$  é o tempo disponível para a medida da energia. Isso, em razão do princípio de incerteza da mecânica quântica. Podemos assim "tomar emprestada" uma energia no total de  $\Delta E$ , e não há como avaliar uma violação da energia. Mas, se identificarmos  $\Delta E$  como  $mc^2$  e  $t$  com  $r_0/c$ , acharemos

$$m = \frac{h}{2\pi r_0 c}$$

A pressuposição de uma massa finita para os *quanta* automaticamente limita o raio de ação. Introduzindo  $2 \cdot 10^{-13}$  cm como valor para  $r_0$  e os valores próprios para as constantes universais, achamos para  $m$  cerca de 200 vezes a massa eletrônica ou para  $mc^2$ , uma energia de cerca de 102 MeV.

A prova empírica mostra que as forças entre nêutron e próton, próton e próton, e nêutron e nêutron são iguais e exigem carga  $\pm e$  ou zero para os *quanta*. Assim, Yukawa previu a existência de partículas de uma massa de cerca de 200 vezes aquela do elétron, ou neutras ou com uma unidade positiva ou negativa de carga, e que interagiriam fortemente com os núcleos.

Fermi já tivera idéias semelhantes ao desenvolver a teoria do decaimento beta. Julgou que os neutrinos poderiam ser *quanta* de algum campo, mas não publicou nada a respeito, porque não conseguiu chegar a conclusões significativas. Yukawa tinha estudado o documento de Fermi sobre o decaimento beta e mencionou-o de forma bastante explícita. O documento de Yukawa foi publicado em 1935 no *Journal of the Mathematical and Physical Society of Japan*; foi notado, mas não causou grande impacto. Na época ninguém ainda tinha visto partículas semelhantes àquelas postuladas

por Yukawa e assim elas pareciam mais uma interessante especulação do que qualquer outra coisa.

### Descoberta do Píon

Somente em 1937 é que os pesquisadores de raios cósmicos como C. D. Anderson (o descobridor do pósitron), seu colaborador S. H. Neddermeyer (que, mais tarde, foi responsável por importantes invenções usadas na primeira bomba atômica), M. L. Stevenson, J. C. Street, R. B. Brode e outros começam a achar nos raios cósmicos partículas de uma massa intermediária entre a do elétron e a do próton. Os melhores cálculos davam massas cerca de 200 vezes maiores do que a do elétron. Essas partículas, chamadas de *mésotrons*, são instáveis e, quando livres, decaem com uma vida média de cerca de 2 microssegundos. A vida média foi inferida por um raciocínio sutil, baseado em observações da intensidade dos raios cósmicos a diferentes elevações e a diferentes ângulos acima do horizonte, e mais tarde medida por F. Rasetti. Mas os experimentadores de raios cósmicos à época de suas primeiras observações não sabiam do trabalho de Yukawa. A guerra reduziu a intensidade do trabalho experimental e isolou o Japão do Ocidente. Os físicos japoneses tinham-se impressionado com a existência de partículas de uma massa comparável àquela postulada por Yukawa. Mas também tinham observado dificuldades que impediam a identificação de *mésotrons* com as partículas de Yukawa; acima de tudo, a vida média dos *mésotrons* era excessivamente longa. Além disso, quando os *mésotrons* são detidos pela matéria, em geral – nem sempre – interagem com núcleos do meio que os interrompe. O estudo desse fenômeno permitiu uma importante descoberta experimental pelos três físicos italianos M. Conversi, E. Pancini e O. Piccioni.

Esses três homens estavam se escondendo dos alemães, que os teriam deportado para trabalhos forçados na Alemanha, e estavam atuando clandestinamente em um porão de Roma. Descobriram que os *mésotrons* positivos e negativos parados na matéria se comportavam de maneira diferente. Os *mésotrons* positivos decaem mais ou menos como se estivessem num vácuo. Os negativos, se detidos por núcleos pesados, são capturados e produzem desintegrações, mas, quando capturados por núcleos leves como o carbono, boa parte deles decaem como se estivesse no vácuo. Não era esse o comportamento que se esperava que teriam as partículas de Yukawa. Elas deveriam ter reagido violentamente com núcleos leves ou pesados porque as forças nucleares específicas deveriam ter produzido desintegrações logo que o *mésotron* se aproximasse suficientemente de um núcleo. A experiência mostrou que não era esse o caso e assim os *mésotrons* não puderam ser identificados com as partículas de Yukawa.

A situação era realmente estranha. Yukawa tinha prognosticado a existência de partículas de massas de cerca de 300 elétrons; essas partículas tinham sido descobertas, mas não eram exatamente as partículas prognosticadas. Os físicos teóricos desorientaram-se com os resultados obtidos por Conversi, Pancini e Piccioni, os quais, entretanto, pareciam convincentes do ponto de vista experimental. Os teóricos procuraram uma explicação. Tanikawa, Sakata e Inoue no Japão, bem como H. A. Bethe e R. Marshak nos



Figura 12.2. C. Occhialini (à esquerda) e C. F. Powell durante um encontro sobre física por volta de 1960. (Foto E. Segrè.)

Estados Unidos, atuando independentemente, apresentaram uma hipótese que teria eliminado as dificuldades. Propuseram que os *mésotrons* observados seriam o produto do decaimento de *mésons* de Yukawa, o que até então ninguém havia observado. Formular uma hipótese atrativa e plausível é uma coisa, mas avaliar um fato é outra totalmente diferente.

Neste ponto, uma nova técnica experimental, ou melhor, o aperfeiçoamento de uma velha técnica, forneceu um instrumento eficaz. Antes da Primeira Guerra Mundial, Kinoshita, um físico japonês que trabalhava no laboratório de Rutherford, tinha mostrado que partículas alfa cruzando uma emulsão fotográfica deixam em seu rastilho uma coleção de grãos de emulsão que podem ser revelados. Assim, pode-se ver a trajetória da partícula. (Podemos perguntar: e a mecânica quântica? O princípio de incerteza? A natureza ondulatória das partículas? O leitor pode ficar descansado, pois há respostas satisfatórias para todas essas perguntas, dadas em detalhe, por exemplo, por Heisenberg.) As emulsões usadas por Kinoshita eram sensíveis apenas a partículas até certo ponto intensamente ionizantes; os elétrons não podiam ser detectados.

O Professor Cecil Powell (1903-1969), de Bristol, ex-aluno de Rutherford e de C. T. R. Wilson, tinha especial interesse por métodos de detecção de partículas, embora sua atividade principal fosse descargas de gás. Iria desempenhar um papel decisivo no próximo grande avanço da física das partículas (Figura 12.2). Eis uma descrição dos fatos que levaram à descoberta do píon: "Em 1945, Powell acolheu, em Bristol, G. P. S. Occhialini, que voltava à Inglaterra, vindo do Brasil, antes do fim da guerra. Occhialini estava entusiasmado quanto às potencialidades do método fotográfico e fez gestões junto à Ilford Ltd., com vistas a aperfeiçoar as propriedades de registro das

chapas. Embora já se tivesse demonstrado ser possível assegurar cálculos de alcances dignos de confiança, só se podiam distinguir traços se o número de grãos neles revelados fosse suficientemente grande. Isso depende do número de íons expelidos de átomos por uma partícula por unidade de comprimento de seu trajeto, número que se torna menor à proporção que aumenta a velocidade da partícula. Com efeito, no ponto em que estavam as coisas, as partículas só podiam ser detectadas quando eram de velocidade relativamente lenta, mas a maior parte das partículas com velocidades próximas à da luz, que são as mais numerosas na radiação cósmica, não estavam sendo registradas.

Havia um bom número de maneiras pelas quais parecia possível melhorar as propriedades de registro de emulsões: por exemplo, aumentando o volume e a sensibilidade de grãos isoladamente, ou aumentando o número de grãos em unidade de volume de emulsão. C. Waller trabalhava como químico pesquisador na Ilford naquela época, e os métodos de manufatura da empresa eram tais que ele chegou à conclusão de que era possível fazer emulsões com um aumento bastante substancial da concentração de brometo de prata. Quando as novas emulsões foram expostas e reveladas, ficou evidente que se havia conseguido uma melhoria notável no desempenho.

No final de 1946, Occhialini pegou algumas pequenas chapas cobertas com as novas emulsões – cerca de duas dúzias, cada uma com área de 2 cm x 1 cm, com cerca de 50 microns de espessura de emulsão – e as expôs no observatório francês dos Pireneus, no Pic du Midi, a 3.000 metros de altitude. Quando essas chapas foram recolhidas e reveladas em Bristol, logo ficou patente que todo um novo mundo tinha sido descoberto. O vestígio de um próton lento estava tão adensado de grãos revelados que parecia quase uma haste sólida de prata, e o pequeno volume de grãos aparecia ao microscópio como se estivesse povoado de desintegrações produzidas por partículas rápidas de raios cósmicos com energias muito maiores do que quaisquer outras que pudessem ter sido geradas na época. Era como se, de repente, se tivesse entrado em uma estufa onde as árvores protegidas tivessem florescido e todos os tipos de frutas exóticas tivessem amadurecido sem nenhum problema e em grande profusão.

Essas novas observações produziram uma atmosfera do mais vívido entusiasmo e expectativa no laboratório. Deu-se início a uma intensa pesquisa das pequenas partes da nova emulsão que tinham sido expostas e providenciou-se mais material para experiências. Por essa época, já havia vários microscópios para examinar as chapas, além de um grande número de jovens observadores que começaram uma caçada febril. Quase todos os dias aparecia alguma coisa nova e excitante. No início, os observadores, quando descobriam qualquer “fato” em sua busca, como uma desintegração, chamavam um físico para inspecioná-lo e ver se mostrava quaisquer aspectos dignos de interesse. Quase que imediatamente, mostraram a Peter Fowler (neto de Rutherford), que na época estava no último ano de sua graduação, algum fato no qual, junto com uma pequena desintegração, parecia haver uma partícula que, pelas características de seu traço, teria uma massa de cerca de 200  $m_e$  e chegara ao fim de sua trajetória em um ponto onde ocorria o

decaimento. Havia apenas duas explicações possíveis a respeito dos traços observados. Ou a partícula chegara ao repouso em um ponto que, por acaso, coincidia com o de uma desintegração completamente independente, ou os vestígios se relacionavam, e nesse caso a seqüência de fatos era ambígua: a partícula de massa relativamente pequena, um méson, deveria ter chegado ao fim de sua trajetória e produzido uma desintegração nuclear, quando estava em “repouso” – ou quase – assim, com pouca ou nenhuma energia de movimento.

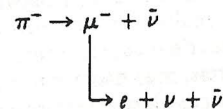
Poucos dias antes, no Imperial College, Londres, D. Perkins, que, independentemente, vinha fazendo experiências similares com as novas emulsões, descobrira um “evento” com características bastante conhecidas. A observação de dois “eventos” de natureza semelhante parecia excluir completamente a possibilidade de uma justaposição casual de traços não-correlatos e parecia certo que se estava observando as conseqüências da captura de um méson negativo por um núcleo de átomo na emulsão, e sua desintegração daí resultante.

Os observadores logo aprenderam a reconhecer os vestígios de mésons e descobriram muitos exemplos de desintegrações similares produzidas ao final de sua trajetória. A verdade é que o vívido interesse dos observadores constituiu elemento fundamental para o progresso do trabalho e muitas dificuldades, pode-se dizer, ajudaram-nos a aprender a interpretar os fatos que descobriam e a entender o significado do que estavam fazendo”. (*Seminário matemático e físico di Milano, Simposio in Onore di G. Occhialini, Milão, 1959, p. 148.*)

O grupo de Powell-Occhialini tinha, assim, descoberto um méson que fragmentava núcleos, conforme previa a hipótese de Yukawa. Uma análise detalhada dos traços permitiu que se chegasse à conclusão de que o méson tinha uma massa de cerca de 139  $\text{MeV}/c^2$ . Outros traços, entretanto, mostraram que, às vezes, um méson decaía em uma partícula de cerca de 106  $\text{MeV}/c^2$  e em uma partícula neutra com uma massa bem próxima de zero, presumivelmente um neutrino.

A partícula de 106  $\text{MeV}/c^2$  decaía em um elétron e mais de um (presumivelmente dois) neutrino. Era fácil identificar a partícula de 106 MeV como o méson, enquanto que a nova partícula de 139  $\text{MeV}/c^2$  que, ao parar, produzia desintegrações nucleares violentas em vez de decair livremente, foi identificada como o méson postulado por Yukawa. Hoje em dia, os mésonons são chamados de *múons* e as partículas do tipo das de Yukawa são chamadas de mésons ou *píons* (Figura 12.3). Usaremos essa nomenclatura.

Em benefício da clareza, mostro simbolicamente as reações existentes no decaimento do píon e do múon, indicando o píon como  $\pi$  e o múon como  $\mu$ : Consideramos um píon negativo  $\pi^-$ ; o caso do positivo é similar.



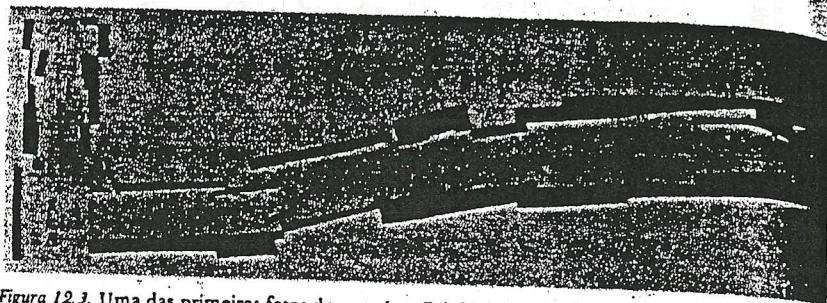


Figura 12.3. Uma das primeiras fotos de um píon. Foi tirada em uma emulsão fotográfica por C. Lattes, G. Muirhead, G. Occhialini e C. F. Powell em 1947. Um píon pára no ponto A e aqui decai, emitindo um múon. Isso demonstra o relacionamento entre píons e múons, ambos presentes em raios cósmicos. (Cortesia de C. F. Powell.)

Como foi assinalado, tanto os píons positivos quanto os negativos podem produzir reações nucleares violentas. Deve-se observar que tudo isso podia ser lido em uma chapa fotográfica com um microscópio, mas sem qualquer outro aparelho ou, para sermos mais precisos, apenas com uma lata de alumínio na qual se expunham as emulsões a uma altitude bastante elevada. Com o tempo, a técnica foi muito melhorada, mediante o aumento da espessura das emulsões, a invenção de métodos apropriados de revelação, e com o acréscimo de outros materiais às emulsões, além de materiais sensíveis do ponto de vista fotográfico. A técnica refinada que daí resultou permitiu que se medisse a velocidade, massa, carga e outras características das partículas elementares; mais tarde, porém, foi superada por câmaras de bolhas e outros métodos, embora ainda seja útil e empregada em casos especiais.

Essas descobertas estimulavam muitas atividades em que se aplicava a mesma técnica. Tratava-se de uma técnica muito barata, mas que exigia multidões de analisadores (quase todos bem jovens) que estivessem dispostos a passar os dias olhando através de microscópios e procurando e medindo traços. Essa atividade se adaptava bem aos países europeus no período imediatamente após a guerra, e, em particular, à Itália, que ainda estava sofrendo os danos provocados pelo conflito e alta taxa de desemprego. Assim, a Itália logo tornou-se importante centro para esse tipo de pesquisa, o que constituiu um dos motivos da proeminência dada naquele país à física de partículas.

### Uma Horda de Novas Partículas

Os múons e os píons não são as únicas partículas novas encontradas em raios cósmicos. Em 1946, em Manchester, G. D. Rochester e C. C. Butler tiraram muitas fotos, em câmara de nuvem, de eventos de raios cósmicos e descobriram em uma delas vestígios em forma de letra V (Figura 12.4). Esses vestígios só podiam ser explicados se se admitisse serem gerados por uma

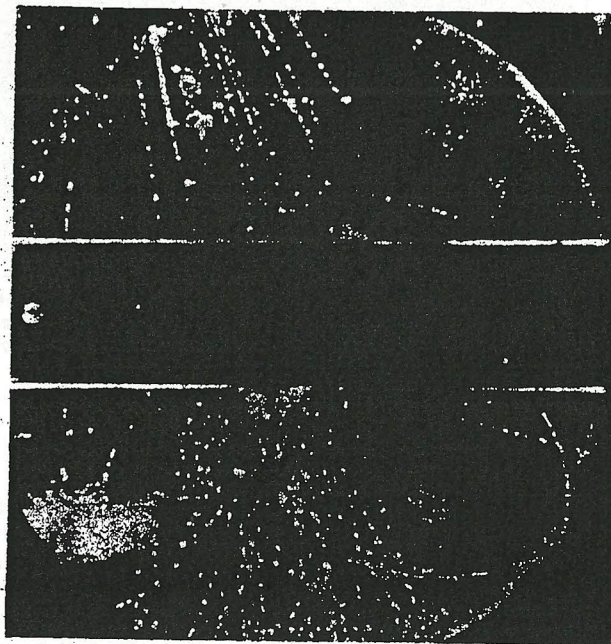


Figura 12.4. Foto de câmara de nuvens tirada por G. D. Rochester e C. C. Butler, mostrando as primeiras partículas V nos raios cósmicos. Durante quase dois anos, a essas fotos - extremamente convincentes - não se seguiram quaisquer outras. A partícula V dessa foto é chamada atualmente de  $K^0$ . [De *Nature* 160, 885 (1947).]

partícula de massa de aproximadamente  $494 \text{ MeV}/c^2$  que decaía rapidamente em dois píons. O fato permaneceu estranho durante cerca de um ano, mas a interpretação era tão inequívoca que se tinha necessariamente de acreditar na existência de um novo tipo de partícula, então chamada de V, em razão da forma do vestígio. A partícula da Figura 12.4 é chamada atualmente de partícula  $K^0$ .

As emulsões fotográficas revelaram outras partículas novas, além dos píons e dos múons. Por exemplo, o grupo de Bristol descobriu partículas, chamadas de  $K^+$  ou  $K^-$ , que decaíam em três píons, dois carregados positivamente e um negativamente, ou vice-versa. A lista de novas partículas estava aumentando quando entraram em cena os novos aceleradores de alta energia, que tinham atingido energias suficientes para criar os primeiros píons e mais tarde todas as outras partículas descobertas até então em raios cósmicos, e muitas mais.

A primeira máquina com energia suficiente para produzir novas partículas foi o ciclotron de Berkeley, de 184 polegadas (Figura 12.5). Em 1948, E. Gardner, C. G. Lattes (um brasileiro que fora aluno de Occhialini e tinha participado da descoberta do píon em Bristol, de onde se transferira para Berkeley) e outros usaram emulsões fotográficas como detectores e identificaram os píons produzidos pelo ciclotron. Pouco mais tarde, B. Moyer e seus alunos, novamente em Berkeley, detectaram raios gama que

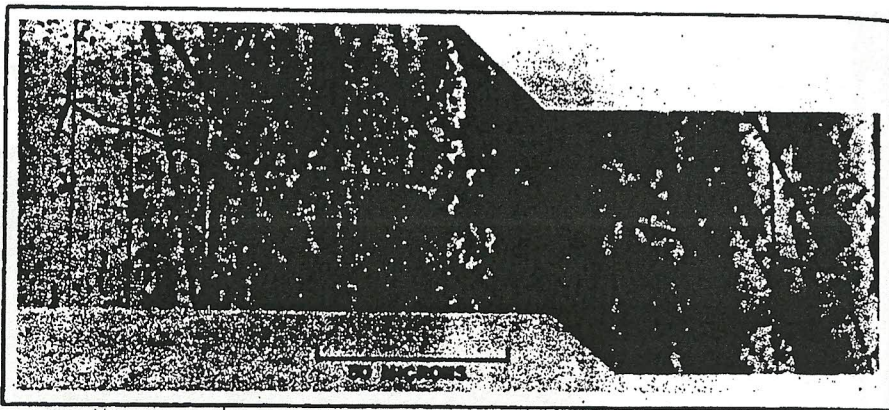


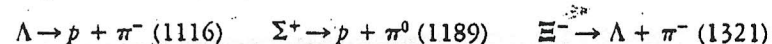
Figura 12.5. A primeira foto (em uma emulsão fotográfica) de um pión artificial produzido em Berkeley com o ciclotron de 184 polegadas, tirada por E. Gardner e C. M. G. Lattes. Pela primeira vez pions e múons foram produzidos por um acelerador e não por raios cósmicos. (Laboratório Lawrence Berkeley.)

foram atribuídos ao decaimento do pión neutro. Este tem uma vida média de  $0,8 \times 10^{-16}$  s, em contraste com a vida média dos pions carregados,  $2,6 \times 10^{-8}$  s, porque o méson neutro decai por interação eletromagnética, modalidade de decaimento impossível de ocorrer nos mésons carregados que decaem segundo a interação de Fermi, que é muito mais fraca. O pión neutro foi a primeira partícula descoberta com o auxílio de um acelerador. A maior parte das partículas anteriores tinham sido descobertas em raios cósmicos.

A produção de pions pelo ciclotron permitiu a formação de feixes de pions e a realização de experiências que são totalmente inacessíveis com fontes de raios cósmicos. A partir de então, os raios cósmicos se transformaram em instrumentos para o estudo da geofísica, da cosmologia e de outras disciplinas, mas perderam importância diante da física das partículas, onde não podiam concorrer com os aceleradores, a não ser em energias extremamente altas. Pouco mais tarde, outros aceleradores, como sincrotrons ou betatrons, conseguiram acelerar elétrons a uma energia suficiente para produzir mésons diretamente através da produção de fótons.

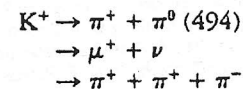
Outro avanço na área de energia ocorreu quando o Laboratório Nacional de Brookhaven ativou o "Cósmodron" que, em 1952, superou a faixa de 1.000 MeV, ou 1 GeV. Em 1953, essa máquina produziu as partículas V, que tinham sido vistas em raios cósmicos por Rochester e Butler; mas a situação então já se havia complicado. Tinha-se demonstrado que os raios cósmicos continham, além de pions e múons, vários tipos de partículas mais pesadas que os núcleons. Essas partículas decaíam de várias formas, mas sempre tinham nêutrons ou prótons entre os produtos de seu decaimento.

Tais partículas são chamadas de *híperons*. Algumas das mais importantes com seus decaimentos respectivos são:

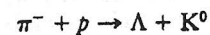


Para maior clareza, usamos a notação moderna. O número entre parênteses é a massa em  $\text{MeV}/c^2$ . Há muitas variações dos decaimentos apresentados acima. Além do mais, as partículas podem existir em diferentes estados de carga.

Além dos híperons, mostrou-se que os raios cósmicos contêm as partículas K, mencionadas anteriormente. São mais pesadas do que os pions, porém mais leves do que os núcleons, e decaem de várias maneiras, como, por exemplo:



A partícula  $\Lambda$  apresentou um paradoxo sério. Até certo ponto, era formada com facilidade, mas decaía muito lentamente. Esse fato contradiz alguns princípios gerais da mecânica quântica que prevêm que uma partícula formada com facilidade também se desintegre com facilidade. Houve várias tentativas no sentido de esclarecer esse problema, mas a verdadeira explicação foi finalmente elaborada por A. Pais e K. Nishijima, que trabalhavam independentemente. A produção e o processo de decaimento observados não são o inverso um do outro, conforme se acreditava, mas coisas inteiramente distintas e, portanto, não há necessariamente vinculação entre ambos. A produção do  $\Lambda$  ocorre apenas em associação com um méson K segundo a equação



enquanto que o decaimento  $\Lambda$  é dado pela equação  $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ . A produção de  $\Lambda$  ocorre sempre em associação com a de um méson K, ao contrário de seu decaimento. A produção associada depende da interação forte do tipo Yukawa; a degeneração depende das interações fracas de Fermi.

A fim de esclarecer esse fenômeno "estranho", em 1953, M. Gell-Mann, T. Nakano e K. Nishijima postularam, independentemente, a existência de um novo número quântico, chamado "estranheza" (*strangeness*), à falta de termo melhor. Ninguém sabe se a estranheza tem algo a ver com outras propriedades ou com quantidades mecânicas como a conexão entre o *momentum* angular e certos números quânticos, mas esclarece certas coisas e explica vários paradoxos além do mencionado acima. Atribuímos uma estranheza 0,  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ , etc. a partículas e postulamos que a soma da estranheza de todas as partículas envolvidas não se altera nas interações fortes. Desse modo, obteremos regras de seleção que permitem ou impedem certas interações, de acordo com a evidência experimental.



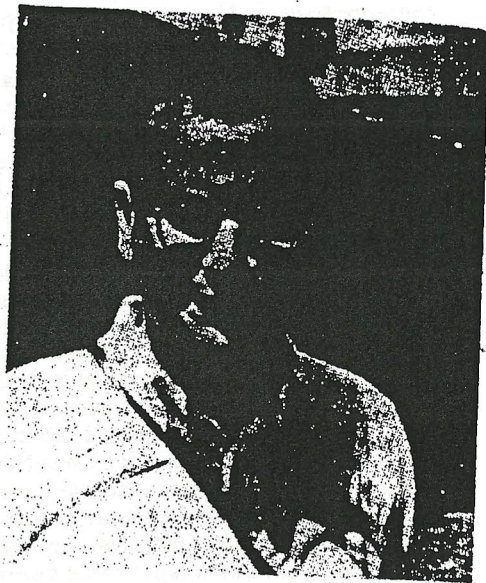


Figura 12.6. Murray Gell-Mann em 1961. Trata-se de um dos principais teóricos da física das partículas e introduziu muitas das novas idéias nessa disciplina. (Foto E. Segrè.)

A produção associada e a fenomenologia da estranheza foram nitidamente demonstradas em 1954, logo que o cósmotron atingiu uma faixa de energia suficiente para criar as partículas associadas. W. B. Fowler, R. P. Shutt, A. M. Thorndike e W. L. Whittmore usaram para esse fim uma câmara de nuvem de difusão que é continuamente sensível. Logo foram seguidos por outros físicos que empregaram uma variedade ampla de técnicas.

Murray Gell-Mann (Figura 12.6) é um dos ases da física teórica da geração atual. Nascido em Nova Iorque em 1929, de pai professor, Gell-Mann estudou na Universidade de Yale e obteve o PhD aos vinte e dois anos de idade no Instituto de Tecnologia de Massachusetts. Depois, foi para Chicago, onde, como muitos outros teóricos de sua geração, sofreu a influência de Fermi. Atualmente é professor do Instituto de Tecnologia da Califórnia, mas viaja com bastante frequência e a muitos países. Para diversas descobertas teóricas importantes no campo das partículas elementares, Gell-Mann deu um passo decisivo, simultaneamente – embora independentemente – com outros físicos: com Nakano e Nishijima para a estranheza, com Y. Ne'eman para o “método de octetos”, e com G. Zweig para a idéia dos quarks. Assim, a vida de Gell-Mann pôde despertar em seus colegas e amigos teóricos o medo de serem ultrapassados. Ao mesmo tempo, Gell-Mann ocupa sua enorme capacidade cerebral (característica comum a outros teóricos) com o estudo de diversos idiomas, inclusive o suáli, mantendo-se atualizado em biologia, trabalhando em ecologia e assessorando o governo em uma grande variedade de assuntos.

Em 1951, em Chicago, entrou em funcionamento um sincrocíclotron capaz de produzir mésons. Fermi esperava por ele com impaciência e trabalharam ativamente para apressar sua construção. Agora, podia finalmente retornar ao trabalho experimental. Para o qual se preparava tão diligentemente. Seus esforços foram compensados: pouco antes de morrer, descobriu um novo e inesperado fenômeno. A seção de choque de colisão de píons positivos com prótons mostrava um enorme pico. Era um indício evidente da formação de partículas compostas semi-estáveis, às vezes chamadas de ressonâncias ou partículas, simplesmente. Após a descoberta inicial de Fermi, centenas de outras partículas foram identificadas e seu estudo ainda constitui um campo de pesquisa ativo.

### Antinúcleons

Pouco depois, surgiu a possibilidade de dar-se resposta a uma pergunta que há muito perdurava. Como o leitor provavelmente se lembrará, Dirac tinha previsto a existência do pósitron, mais tarde confirmada por Anderson. Com a simples extensão da teoria de Dirac aos prótons, podia-se praticamente ter certeza da existência de um antipróton, de carga igual e contrária e de mesma massa que o próton. Mas uma extrapolação tão simples pode ser indesejável, conforme claramente demonstrado, por exemplo, pela descoberta de Stern de que o momento magnético do próton é muito diferente do que ingenuamente se poderia estimar com base na teoria de Dirac. Assim, era importante dar um *sim* claro ou então nenhuma resposta quanto à existência do antipróton. A observação de eventos nos raios cósmicos tinha apresentado algumas indicações sobre o assunto, mas nenhuma resposta satisfatória.

Em 1955, o bévatron de Berkeley atingiu a faixa de energia de 6 GeV, igual a cerca de 2 GeV no centro de massa. Isso era o mínimo exigido para produzir um par próton-antipróton, se é que existia o antipróton. O Chamberlain, C. Wiegand, T. Ypsilantis e eu conseguimos demonstrar sua existência de forma convincente. Podia-se, portanto, ter certeza da possibilidade da antimatéria, e mesmo de antimundos inteiros, embora até agora não saibamos se esses mundos realmente existem.

A simetria entre partícula e antipartícula é uma das novas verdades da física. Para cada partícula existe uma antipartícula de igual massa e de carga elétrica oposta, de estranheza igual e oposta, de spin igual, de momento magnético igual e oposto. Se substituirmos cada nêutron e próton em um núcleo por um antinêutron e um antipróton, teremos um antinúcleo. Podemos então cobri-lo de antielétrons – isto é, pósitrons – e teremos um antiátomo. Com antiátomos, poderemos formar antimoléculas, e assim por diante, até antimundos inteiros. Para um anti-homem vivendo em um antimundo, tudo pareceria ter a mesma forma que tem para nós e se comportaria de maneira idêntica. Não há diferenças intrínsecas entre um mundo e um antimundo e mesmo as observações astronômicas não conseguem esclarecer-nos se um astro é de matéria ou de antimatéria. Mas, se matéria e antimatéria se encontrarem (Figura 12.7), destruir-se-ão mutuamente, e em pouquíssimo tempo toda a energia de ambas se transformará

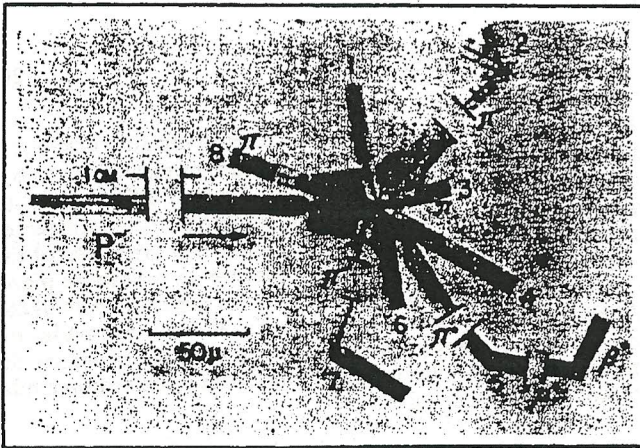


Figura 12.7. A aniquilação antipróton em uma emulsão nuclear. Um antipróton ( $p^-$ ) pára e é aniquilado com um núcleon a partir de outro núcleo. Pions e outras partículas afastam-se do ponto de colisão. A energia das partículas visíveis é maior do que a energia em repouso do antipróton, o que demonstra existir outra partícula que é aniquilada. (Laboratório Lawrence Berkeley.)

em neutrinos, antineutrinos e raios gama que se afastam do ponto de aniquilação com a velocidade da luz.

### A Queda da Paridade

Em contraste com a descoberta mais ou menos esperada do antipróton, quase à mesma época foi desacreditado um princípio supostamente seguro que dominara grande parte da física. Se realizarmos qualquer experiência de física e a observarmos diretamente ou através de um espelho perfeito, não haverá como definir se estamos olhando para a experiência diretamente ou através do espelho. É verdade que, se olharmos para um homem diretamente ou em um espelho, poderemos dizer se seu paletó está abotoado corretamente ou ao contrário. Da mesma maneira, podemos dizer se um parafuso está torcido para a direita ou para a esquerda, mas tratam-se de convenções arbitrárias e não de leis da natureza. Mesmo um homem que tenha o coração do lado direito pode viver perfeitamente bem. O leitor talvez pense que existem algumas leis de eletricidade que contêm propensão intrínseca à esquerda ou à direita, mas um exame mais cauteloso lhe dirá que não é bem esse o caso; essa propensão se relaciona à convenção sobre o sinal da carga elétrica. Todas as interações fortes e eletromagnéticas obedecem exatamente a essa simetria de reflexão. O fato de um fenômeno e sua imagem serem ambos possíveis ou ambos impossíveis é chamado de *conservação da paridade*.

Sempre que uma regularidade é válida em muitos casos, ocorre a tendência de generalizá-la a outras circunstâncias não testadas e talvez mesmo

de transformá-la em um "princípio". Se possível, douramos a pilula com algumas considerações filosóficas, como aconteceu com os conceitos de tempo e de espaço antes de Einstein. O mesmo ocorreu com o princípio da conservação da paridade e, quando esse princípio falhou experimentalmente, físicos do calibre de um Pauli ficaram profundamente abalados.

Os fatos que levaram à descoberta da não-conservação da paridade tiveram início em 1955, com a observação do decaimento de certas partículas K, então chamadas de  $\theta$  e  $\tau$ . Segundo medidas experimentais as duas partículas tinham a mesma massa e a mesma vida média, mas decaíam de forma diferente. A suposição natural era que se tratava da mesma partícula decaindo em modalidades distintas. Não havia nada de estranho nisso. Era fato conhecido desde a época de Curie e Rutherford que, da mesma forma como as pessoas podem morrer de doenças diferentes, também os átomos radioativos podem decair de respeito do decaimento de K era que não parecia obedecer à conservação da paridade. A conservação da paridade impede que uma partícula decaia pela emissão de dois pions ou então de três pions e isso era exatamente o que parecia ocorrer no caso de  $\theta$  e  $\tau$ . Esse sério dilema foi resolvido de um modo inteiramente inesperado pelos físicos chineses Tsung-Dao Lee e Chen Ning Yang, que realizaram a inexistência de qualquer prova objetiva de que as interações fracas — aquelas descobertas por Fermi em 1933 e responsáveis pelo decaimento beta — conservam a paridade. Se a interação fraca não conserva a paridade, desaparece o dilema. Eles também indicaram experiências que podiam constatar a não-conservação hipotética da paridade. A situação assemelhava-se um pouco à das roupas novas do Imperador. Dois impostores conseguiram fios de ouro para tecer um casaco para o Imperador, dizendo que só poderia ser visto por pessoas inteligentes. Ninguém teve coragem de confessar que não via o casaco e todos elogiavam a beleza do traje. Somente quando um menino, durante o desfile, gritou que o Imperador estava nu é que a verdade veio à tona.

Logo após a publicação do documento de Lee e Yang, um grupo de físicos da Universidade de Colúmbia e do *Bureau Nacional de Padrões* de Washington, D.C., liderado por uma outra física chinesa, Chien-Shiung Wu (Figura 12.8), e dois outros grupos, demonstraram independentemente que a conservação da paridade era um mito nas interações fracas.

O grupo de Wu descobriu que núcleos de cobalto radioativo orientados de modo a ter seus spins apontados em uma só direção tendiam a emitir elétrons paralelos em vez de antiparalelos àquela direção. Se a paridade fosse mantida, as direções paralelas e antiparalelas deveriam ser igualmente prováveis. Para a emissão de raios gama, que é um fenômeno eletromagnético, seria este o caso, mas a emissão beta, devida a interações fracas, não conserva a paridade.

Quem são esses físicos chineses? Chien-Shiung Wu foi minha primeira aluna em Berkeley, onde chegara vinda de Xangai. Sua força de vontade e sua dedicação ao trabalho lembram Marie Curie, mas ela é mais sociável, mais elegante e mais espirituosa. A maior parte de seu trabalho científico tem sido realizado na área do decaimento beta, na qual fez importantes descobertas. É

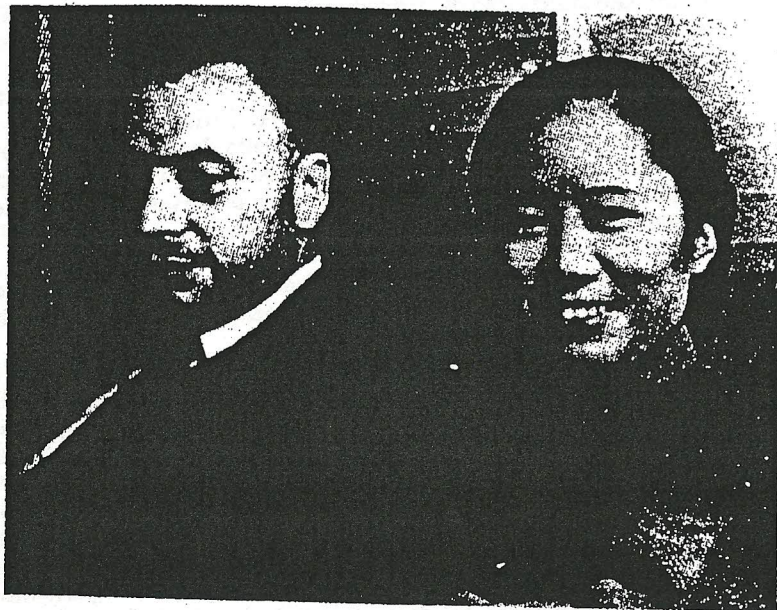


Figura 12.8. Chien-Shiung Wu (à direita) e W. Pauli, Wu, que realizou estudos fundamentais sobre interações fracas, aparece nesta foto junto com o inventor da hipótese do neutrino. O neutrino desempenha importante papel nas interações fracas.

casada com um outro físico chinês, Luke Yuan, e é mãe de um jovem físico, Vincent.

Chen Ning Yang nasceu em Hofei, Anwei, em 1922, e é o mais velho de cinco irmãos. Seu pai era professor de matemática na Universidade de Tsinghua, nos arredores de Pequim. Tanto Yang quanto seu amigo Tsung-Dao Lee estudaram na Universidade Nacional do Sudoeste, em Kuhming. Após a guerra, Yang veio para os Estados Unidos na esperança de trabalhar com Fermi em alguma universidade, mas não sabia onde Fermi se encontrava. Foi para a Universidade de Colúmbia e ali informaram-no de que Fermi tinha-se transferido para Chicago, onde finalmente foi encontrá-lo. Primeiro, fez trabalhos experimentais, embora sem muito êxito; mas, após algum tempo, sua capacidade teórica veio à tona. Em 1946, preparou sua dissertação de PhD, sob a orientação de Teller, mas depois veio a trabalhar com Fermi.

Lee nasceu em Xangai em 1926 e fez seus estudos naquela cidade. Na universidade conheceu Yang. Seu professor Ta-You Wu conseguiu-lhe uma bolsa de estudos para Chicago, onde obteve o PhD em 1950, sob a orientação de Fermi. Após receberem os diplomas de doutorado, tanto Lee quanto Yang trabalharam em diversas universidades norte-americanas importantes e atuaram juntos durante muitos anos. Além do documento histórico sobre a não-



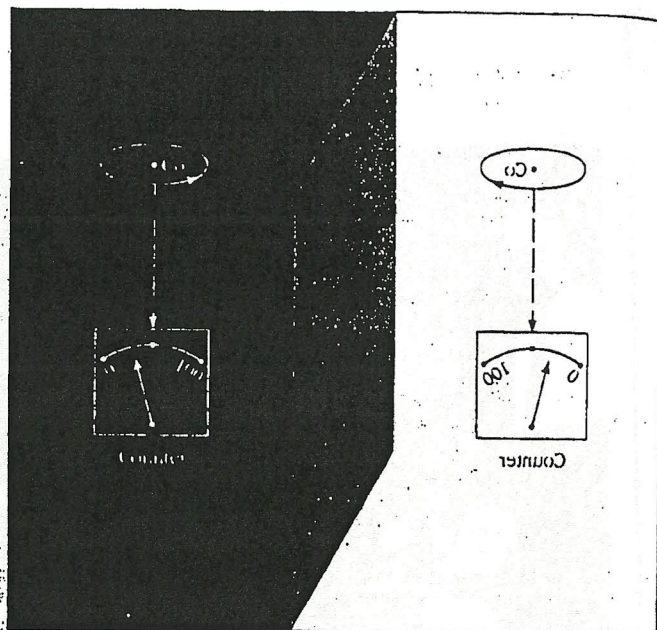
Figura 12.9. Oito laureados com o Prêmio Nobel na Conferência de Rochester, em Rochester, N. Y. A partir da esquerda, E. Segrè, C. N. Yang, O. Chamberlain, T. D. Lee, E. McMillan, C. D. Anderson, I. I. Rabi e W. Heisenberg. Essas reuniões eram, eventos periódicos de grande importância para a física das partículas e propiciaram uma das primeiras oportunidades de intercâmbio científico entre físicos ocidentais e soviéticos. (Foto L. Cuzer.)

conservação da paridade, conseguiram êxitos significativos na área teórica em uma variedade de assuntos, desde a mecânica estatística até a teoria dos campos (Figura 12.9). Atualmente Yang está na Universidade do Estado de New York, em Stonybrook, e T. D. Lee na Universidade de Colúmbia.

Esse trio de físicos chineses mostra o que poderá ser a futura contribuição da China para a física se aquele grande país superar o período de convulsões revolucionárias e retomar seu papel histórico como um dos líderes da civilização, conforme testemunharam com espanto antigos viajantes europeus.

Dois outros grupos identificaram a não-conservação da paridade no decaimento do múon – A. M. Friedman e V. Telegdi, em Chicago, usando emulsões fotográficas; e R. L. Garwin, L. M. Lederman e M. Weinrich.

Figura 12.10. Decaimento de  $\text{Co}^{60}$  e sua imagem no espelho. [De C. N. Yang, *Elementary Particles, A Short History of Some Discoveries in Atomic Physics* (copyright © 1962 by Princeton University Press - Fig. 36, p. 60. Reproduzida por autorização de Princeton University Press).]



Colúmbia, usando meios eletrônicos. Descobriram uma correlação entre a direção do spin do múon e a da emissão dos elétrons do decaimento. Logo após as descobertas originais mencionadas, muitos cientistas apressaram-se em pesquisar todas as alternativas abertas pela não-conservação da paridade e, em pouco tempo, centenas de documentos sobre o assunto foram publicados. Quase com a mesma rapidez, algumas conclusões experimentais levaram a uma decisão entre as alternativas apresentadas e assim proporcionaram um esclarecimento satisfatório a respeito do decaimento beta.

Conforme dito acima, a violação da paridade permite-nos distinguir um fenômeno de sua imagem no espelho (Figura 12.10). Mas há uma outra surpresa que restabelece a simetria, embora a um nível diferente. A imagem de um fenômeno no espelho é exatamente a que seria vista se realizássemos a experiência com antimatéria. De uma situação real, passamos, pelo reflexo em um espelho, a uma situação que chamamos de transformação P. Substituindo cada partícula por sua antipartícula, obtemos uma transformação C. Realizando ambas as transformações, chegamos a uma transformação PC; uma transformação CP, na qual primeiro mudamos uma partícula para sua antipartícula e depois a refletimos em um espelho, dá o mesmo resultado. Se começarmos de uma situação real, uma transformação CP ou PC nos levará a uma situação real.

Além das transformações C e P, também podemos analisar as transformações T, nas quais todas as velocidades são invertidas. O fenômeno que resulta é semelhante à projeção de um filme da experiência do fim para o início.

Realizando todas essas três transformações - C, P e T -, a partir de um fenômeno real, mais uma vez obtemos um fenômeno real ou possível. Esse fato é muito claro e importante para os físicos teóricos, que podem prová-lo com base em hipóteses muito gerais como a relatividade. As descobertas relacionadas com não-conservação da paridade mostraram que CP é uma transformação válida em si mesma e, assim, se CPT é válida, então T também deve ser válida em si mesma.

Seria melhor se a história terminasse aqui, mas, para sermos exatos, há ainda uma outra complicação. Em 1964, J. H. Christenson, R. Turlay, V. L. Fitch e J. W. Cronin descobriram no decaimento de mésons-K neutros uma situação em que a simetria CP é violada. É um efeito pequeno, mas indiscutível. Por outro lado, parece que a invariância CP é preservada por uma violação correspondente de T que compensa a de CP. Encontramo-nos aqui nos limites do que é conhecido.

A violação da conservação da paridade talvez seja a maior descoberta teórica do pós-guerra. Eliminou um preconceito transformado em princípio com base em testes insuficientes.

Como nota final, devo acrescentar que um físico americano, R. T. Cox, talvez tenha observado a não-conservação da paridade no decaimento beta já em 1928. Usando elétrons em decaimento em experiências de espalhamento duplo, ele observara certas assimetrias que indicavam uma polarização dos elétrons originais. Isso teria conflitado com a conservação da paridade, mas Cox estava tão convencido de que a paridade se conservava, que repetiu a experiência com elétrons termoiônicos, que não são polarizados, e ele interrompeu o resultado supondo que a primeira parte da experiência tinha falhado em algum ponto. Eis mais um caso de descoberta frustrada porque o pesquisador não estava mentalmente preparado para um resultado surpreendente.

## A Câmara de Bolhas

Já vimos que Fermi descobriu a primeira ressonância no sistema próton-nêutron, mas ninguém suspeitava de que haveria tantas ressonâncias e em todos os sistemas. A invenção da técnica da câmara de bolhas abriu as comportas. Primeiro, descobriram-se algumas ressonâncias na aniquilação próton-anti-próton (Figura 12.11), depois dezenas e finalmente centenas em todos os tipos de reações. A caça às ressonâncias manteve os físicos ocupados na década de sessenta e ainda se faz com muito vigor.

Há algum tempo, a nova técnica, a câmara de bolhas, tem dominado o estudo das ressonâncias, do mesmo modo que antes a técnica das emulsões fotográficas tinha dominado a física das partículas. A câmara de bolhas é um instrumento que mostra as trajetórias de partículas carregadas. Já vimos que, desde 1910, C. T. R. Wilson tinha demonstrado os traços de partículas carregadas movendo-se no vapor saturado ao revelar a condensação que as acompanhava. Uma repentina expansão da câmara produz a supersaturação no vapor e o líquido condensa-se preferencialmente sobre os íons deixados em seu caminho pelas partículas carregadas. Uma intensa iluminação lateral torna

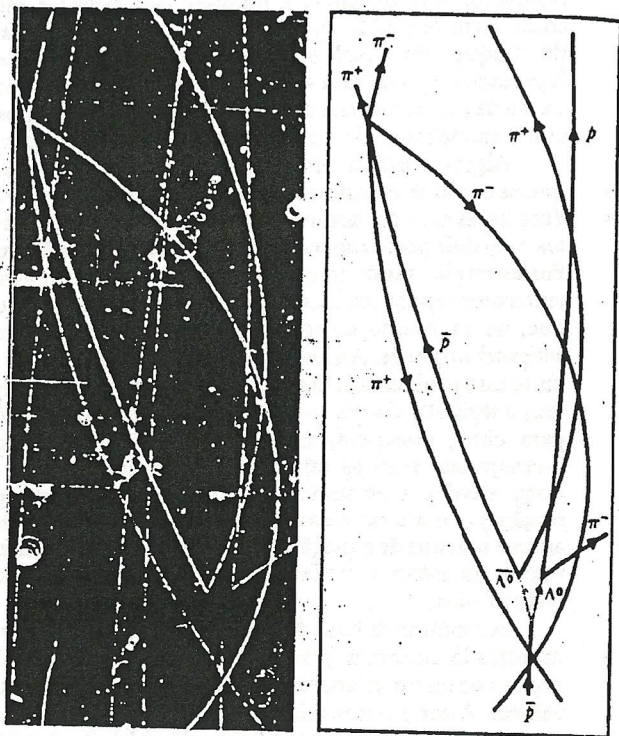


Figura 12.11. Foto da produção e decaimento de um par de partículas neutras lambda-anti-lambda, tirada em uma câmara de bolhas cheia de hidrogênio. O  $\lambda$  à direita no desenho esquemático decai em um próton ( $p$ ) e um píon negativo ( $\pi^-$ ). O antilambda (à esquerda) decai em um antipróton ( $\bar{p}$ ) e um próton positivo ( $\pi^+$ ). Ao atingir um próton no hidrogênio líquido, o antipróton é aniquilado em quatro píons. (Laboratório Lawrence Berkeley.)

o nevoeiro visível, da mesma forma como podemos ver a nuvem de vapor deixada por aviões que estejam voando a grandes altitudes. A câmara de nuvens de Wilson tem uma história fantástica: já revelou, entre outras coisas, os traços das primeiras desintegrações artificiais, os prótons de recuo postos em movimento pelos nêutrons, o pósitron e as chuvas de partículas. Mas tem o grande inconveniente de que o gás tem baixa densidade, ou seja, contém muito pouca matéria por unidade de volume.

Em 1952, Donald A. Glaser (nascido em 1926) pensou em substituir o gás por um líquido, aumentando assim a densidade em uma escala de mais ou menos um por mil. Glaser usou um líquido em ponto de ebulição e observou as bolhas formadas no caminho dos íons quando a pressão baixou de repente e, em consequência, o líquido foi levado acima de seu ponto de ebulição. Glaser aperfeiçoou seu trabalho com pequenas câmaras cheias de éter etílico.

Tendo conseguido observar os primeiros vestígios, tentou líquidos diferentes. Os mais importantes foram o hidrogênio líquido, que oferece um alvo simples, e o xênon, que oferece um alvo com número atômico elevado. Glaser abriu o caminho nesse campo, mas depois passou a dedicar-se à biologia. Suas câmaras de bolhas foram aumentadas de tamanho e escopo por um outro físico.

L. W. Alvarez (nascido em 1911) é um dos físicos que sofreram desde o início a influência de Lawrence, adquirindo assim uma tendência a grandes tarefas experimentais. Homem de grande imaginação, obteve vários resultados importantes na área dos raios cósmicos com seu professor A. H. Compton, em Chicago, mas logo se transferiu para Berkeley e passou a trabalhar no ciclotron. Durante a guerra, Alvarez foi para o MIT, por insistência de Lawrence, e ali inventou um sistema de aterrissagem de aviões por orientação de radar em condições de escassa visibilidade. Do MIT, transferiu-se para Los Alamos e mais tarde insistiu em viajar no avião que lançou a bomba sobre Hiroxima. Alvarez tinha enorme ansiedade por estar presente a eventos que julgava serem históricos. Gostava de conhecer gente importante e sentia uma espécie de veneração por grandes cientistas. Ao voltar para Berkeley, após a guerra, planejou e dirigiu a construção de um acelerador linear e depois veio a participar nos empreendimentos Livermore.

Quando Glaser inventou a câmara de bolhas, Alvarez, convencido das grandes possibilidades do instrumento, decidiu construir um outro de dimensões sem precedentes e cheio de hidrogênio líquido. Tratava-se de um grande empreendimento de natureza técnica — mesmo Lawrence tinha algumas restrições a respeito —, mas Alvarez recrutou um grupo de especialistas em vários campos, estimulou-lhes o entusiasmo seguindo a tradição de Lawrence e conseguiu construir uma série de câmaras de bolhas de tamanho cada vez maior, até alcançar o recorde de 72 polegadas, isto é, o tamanho de uma banheira grande. Atualmente, as maiores câmaras de bolhas têm vários metros de diâmetro e contêm dezenas de milhares de litros de hidrogênio líquido. As de Alvarez continuam “apenas” 500 litros.

Esses instrumentos são muito complexos e muito dispendiosos; seu preço compara-se ao dos aceleradores. No entanto, são essenciais para a utilização dos aceleradores e estão entre os meios mais eficazes de estudo das partículas elementares. Para melhor proveito das possibilidades de uma câmara de bolhas, milhões de fotos devem ser examinadas minuciosamente e rapidamente por métodos semi-automáticos. O resultado desses aparelhos de rastreamento é introduzido em computadores e analisados. A programação dos computadores para essa tarefa representou um dos aspectos mais difíceis da operação do sistema. Para avaliar o progresso, deve-se comparar a análise direta que Blackett fez das vistas estereoscópicas de suas fotografias de câmara de nuvens contendo a desintegração de nitrogênio (p. 114) com a moderna operação de uma câmara de bolhas. A união entre a câmara de bolhas e o computador tem sido prolífica e, atualmente, distribuem-se por todo o mundo filmes obtidos nos grandes laboratórios para usuários que os estudam cada vez mais, extraindo resultados da matéria bruta.

As câmaras de bolhas, as emulsões fotográficas e outras técnicas mais modernas, como as câmaras de centelhas, suplementam-se umas às outras e se combinam de forma engenhosa para acumular dados experimentais sobre partículas elementares.

Os dados obtidos indicam os níveis atômicos de energia, e a classificação e a sistematização desses mesmos dados é tarefa óbvia para a física das partículas. Embora a tarefa seja óbvia, os meios de realizá-la não são claros. Fermi e Yang, em 1949, tinham tentado um modelo composto baseado em dois componentes fundamentais: próton e nêutron (com suas antipartículas). Com a descoberta da "estranheza", três objetos se fizeram necessário. S. Sakata e seus alunos (M. Ikeda, S. Ogawa e Y. Ohnuki), a partir de 1955, desenvolveram um modelo baseado no nêutron, no próton, no  $\Lambda$  e em suas antipartículas, incluindo o tratamento matemático inerente a esse modelo. Com o acúmulo dos resultados empíricos, num determinado momento, ocorreu uma solução a Gell-Mann e a Ne'eman, independentemente. Gell-Mann fez circular uma versão preliminar de seu artigo em 20 de janeiro de 1961. Ne'eman, sem saber nada a respeito de Gell-Mann, tinha chegado praticamente às mesmas conclusões e apresentara seu artigo para publicação em 13 de fevereiro de 1961.

O físico israelense Yuval Ne'eman (nascido em 1925) fora oficial do exército de seu país e, em um período de paz, tinha sido nomeado adido militar junto à Embaixada em Londres. Ali, durante as horas livres, decidiu estudar física e matemática. Foi aluno de Abdus Salam, um físico paquistanês que ensinava no Imperial College de Londres. Ne'eman, que é um matemático de alta categoria, logo reconheceu que havia uma relação entre grupos de partículas elementares conhecidas experimentalmente e uma teoria matemática chamada de teoria dos grupos. Em particular, os hádrions são ligados a um grupo especial chamado (SU 3). Cito o nome sem entrar em detalhes técnicos: basta dizer que, com a ajuda desse esquema matemático, é possível classificar as partículas em famílias de modo a lembrar a classificação do sistema periódico de Mendeleev. As regularidades observadas são tão evidentes que permitem prognosticar-se a existência de partículas ausentes, o que foi comprovado por experiências posteriores. A mesma coisa aconteceu com o sistema periódico de Mendeleev: o químico não tinha qualquer base teórica para sua tabela, apenas uma firme confiança em suas extrapolações. A explicação do sistema de Mendeleev exigia um conhecimento completo de física atômica que levava cerca de sessenta anos para desenvolver-se. Até certo ponto, o mesmo ocorre com a classificação (SU 3). Mas podemos estar bem mais próximos de uma explicação substantiva de (SU 3) através dos *quarks*.

Os resultados matemáticos abstratos da (SU 3) podem ser obtidos postulando-se a existência de subunidades que foram chamadas *quarks* por Gell-Mann, que as inventou à mesma época em que George Zweig. O nome *quark* mostra a familiaridade de Gell-Mann com o *Finnegan's Wake*, de James Joyce, onde aparece o vocábulo. Nunca foram vistos *quarks* livres. Eles teriam propriedades que os fariam facilmente reconhecíveis – por exemplo, a carga

elétrica 1/3 ou 2/3 de vezes maior que a carga do elétron ou do próton. Os físicos têm procurado cuidadosamente *quarks* em todos os lugares possíveis, desde as pedras da Lua até chuvas de raios cósmicos, mas sem qualquer resultado. Não obstante, a hipótese dos *quarks* é responsável por muitas coisas além de (SU 3) – por exemplo, massas, momentos magnéticos, seções de choque, etc. –, de modo que tem valor considerável. Mesmo que a hipótese dos *quarks* seja apenas um estágio temporário do desenvolvimento da teoria das partículas, devemos lembrar que estágios temporários, como a teoria modelística de Bohr, podem gerar grande progresso.

Alguns teóricos têm descoberto razões pelas quais se poderia impedir que os *quarks* se manifestassem. Na física clássica, não existem pólos magnéticos livres e, se cortarmos um magneto, obteremos dois magnetos completos, não dois pólos separados. Isso poderia ser análogo à situação dos *quarks*. Por exemplo, supõe-se que um pión contenha um *quark* e um *antiquark*. Se tentarmos separá-los, a energia empregada gera um novo par *quark-antiquark* que, no momento da separação, se ligam respectivamente ao *quark* e ao *antiquark* originais. Assim, produzem dois píons, mas nenhum *quark* livre: à parte esse problema, a hipótese inicial dos *quarks* contemplava três deles com seus *antiquarks*. Os três *quarks* foram chamados de *u*, *d* e *s* (do inglês *upward*, para cima, *downward*, para baixo, e *sideways*, lateral). Relacionavam-se intimamente com as três quantidades conservadas: número de bárions, carga elétrica e estranheza. "Conservadas" aqui significa que nenhuma reação pode alterar essas três quantidades; elas devem ser as mesmas em ambos os lados de equação que representa um fenômeno natural. Interações fracas, no entanto, podem mudar a estranheza, mas não as duas outras quantidades.

A hipótese dos *quarks* é muito sedutora, mas nos últimos anos tem demonstrado sintomas perturbadores. Primeiro, descobriu-se que os *quarks* tinham de ter um número quântico adicional, chamado *cor*, que pode ter três valores. A *cor* é necessária para evitar uma terrível ruptura na estrutura da mecânica quântica, porque sem ela cairiam a relação entre o spin e a estatística (vide página 159) e outros princípios importantes. Assim, os *quarks* seriam nove e naturalmente cada um deles teria um *antiquark*. Esse, no entanto, não é o único problema.

Em 1972, Sheldon Glashow, T. Iliopoulos e Luciano Maiani, três jovens teóricos, observaram que alguns fenômenos que não ocorriam seriam impedidos pela existência de um quarto *quark* com algumas propriedades específicas, as quais eles detalharam. O argumento em favor de um quarto *quark* era muito indireto, embora fosse bastante preciso ou até mesmo válido. Dois anos depois, toda uma família de partículas novas e dignas de nota, descobertas em um período de poucas semanas, podiam ser explicadas pelo quarto *quark*, que assim passava a ter uma base sólida.

Samuel C. C. Ting, que liderava uma ala do progresso experimental, nasceu prematuramente, em 1936, em Ann Arbor (Michigan), quando seus pais, que eram chineses, visitavam os Estados Unidos. Dois meses depois, sua família voltou para a China, com o filho ainda pequeno, e ali ele permaneceu até os vinte anos, quando retornou aos Estados Unidos para completar sua formação na Universidade de Michigan. Ting tinha um interesse

especial pelo que ele chama de *fótons pesados*, partículas que decaem em um par elétron-pósitron e os procurava entre os produtos de colisões de alta energia de prótons ou berílio. Essas colisões produzem todos os tipos de partículas e os pares elétron-pósitron na realidade são raros - 1 em cada 10<sup>6</sup> colisões. Sua marca, que é como os físicos chamam os traços visíveis pelos quais uma partícula pode ser reconhecida, é muito característica e difícil de ser dissimulada. Ting e seus colegas observaram durante muitos anos as partículas procuradas, mas mantiveram o resultado em segredo, numa tentativa de impedir todas as possibilidades de que outros viessem a conhecê-lo. Finalmente, estavam prontos para publicar os resultados obtidos, mas uma surpresa os aguardava.

Em Stanford, Califórnia, um grupo de físicos do SLAC (acelerador linear de Stanford), em cooperação com outro grupo de físicos de Berkeley, andava observando a mesma partícula durante algum tempo. Mas formaram-na por uma reação diferente: colisões elétron-pósitron. Estas tinham-se tornado possíveis com o desenvolvimento de um esquema complicado no qual elétrons e pósitrons são acelerados em sentidos opostos e atirados violentamente um contra o outro (o centro de massa das duas partículas permanece em repouso). Esses aceleradores de feixes colidentes tinham sido alimentados pelo grande acelerador linear SLAC. Burton Richter, um dos guias desse empreendimento, também foi um de seus principais usuários, depois de realizá-lo. Os físicos do SLAC observaram que as colisões elétron-pósitron geravam mais hádrons do que se esperava. Com o tempo isolou-se uma energia para as partículas colidentes, para a qual esse fenômeno tomou proporções inteiramente inesperadas e localizou-se, finalmente, uma intensa ressonância que correspondia a uma partícula de vida inusitadamente longa para sua energia. Isso ocorreu num espaço de dias após a certeza final de Ting quanto à sua partícula e era evidente que se tratava da mesma partícula. A edição de 2 de dezembro de 1974 da *Physical Review Letters* trazia duas cartas dos descobridores. Infelizmente, não estavam de acordo quanto ao nome para a nova partícula. Ting chamou-a de J; os físicos de Stanford chamaram-na de  $\psi$ . Vamos usar este último nome, para evitar duplicidade. A mesma edição da *Physical Review Letters* também trazia uma terceira carta de confirmação e cálculos acurados sobre o  $\psi$  que tinham sido obtidos em Frascati, Itália, com um outro aparelho de feixe colidente de elétron-pósitron. Os físicos romanos tinham sabido da descoberta por telefone; sua máquina tinha uma energia nominal abaixo do limiar para a formação de  $\psi$ , mas eles elevaram mais ainda a energia da máquina e, fazendo-a chegar ao limite, conseguiram ultrapassar o limiar da formação de  $\psi$ .

A peculiaridade de  $\psi$  é ter uma grande massa - 3.098 MeV - e uma vida de 10<sup>-23</sup>s. Trata-se de um tempo curto, mas é pelo menos mil vezes mais longo do que se poderia razoavelmente esperar com base na energia disponível se a partícula decaísse por interação forte. O quebra-cabeça da estabilidade relativa de  $\psi$  é semelhante ao quebra-cabeça da estabilidade das partículas estranhas. De fato, a razão é praticamente a mesma e a estabilidade relativa de  $\psi$  é atribuída a um novo número quântico chamado *charm*, que é conservado em interações fortes. Mas um novo número quântico exige um novo *quark*; observando-se minuciosamente, via-se que esse era exatamente

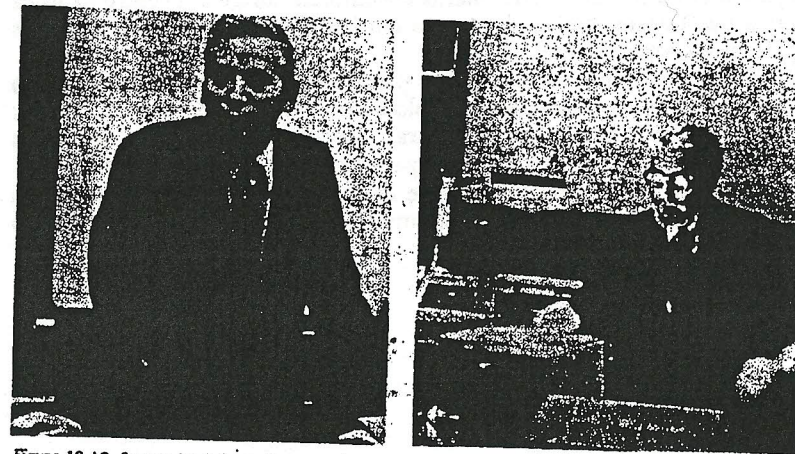


Figura 12.12. Steven Weinberg (à esquerda) e Abdus Salam (à direita) tentando explicar suas teorias a platéias de físicos em 1979. (Fotos de E. Segrè.)

o *quark* da hipótese de Glashow e seus amigos. Ao  $\psi$  original logo se seguiu toda uma família de partículas que continham *quarks* de *charm*. Assim, os *quarks* são de, pelo menos, quatro espécies. Digo pelo menos porque as experiências de Lederman e de outros, em 1977, já parecem indicar a existência de um outro *quark*. Talvez, na medida em que aumentemos a energia, surjam novos *quarks*. Não será uma perspectiva muito estimulante se esperarmos chegar a uma teoria fechada.

Os *quarks* são os componentes básicos das partículas hádrons que interagem fortemente, mas os léptons, partículas sujeitas apenas a interações eletromagnéticas e fracas, também já mostraram uma tendência a proliferar-se. De início, havia apenas dois tipos de léptons: elétrons e neutrinos. No final da década de trinta, acrescentaram-se os múons. Posteriormente, demonstrou-se que os neutrinos são de dois tipos diferentes: um relacionado com os elétrons e outro com os múons. Diferem porque produzem reações diferentes: um gera elétrons, o outro, múons. Mas não é só isso. Há experiências que indicam a existência de léptons carregados mais pesados e eles podem mesmo ter outros neutrinos como companheiros. Martin L. Perl e alguns colaboradores que observaram esse lépton no SLAC chamam-no de  $\tau$ , de *τρίτων*, o terceiro lépton.

Do ponto de vista teórico, há sérias tentativas de se elaborarem teorias abrangentes que unificariam interações fracas e eletromagnéticas e possivelmente até mesmo interações fortes. Essas teorias criariam uma síntese mais elevada, da mesma forma que o eletromagnetismo unifica a eletricidade e o magnetismo. Steven Weinberg e Abdus Salam, independentemente, formularam uma teoria viável. Essa teoria não é exclusiva e não está comprovada, mas tem demonstrado considerável capacidade de fazer previsões e coordene-

### 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 pós-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 pós-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