

demonstra o valor do princípio da correspondência uma vez que, para objetos macroscópicos, fornece as mesmas respostas que a teoria clássica.

A mecânica quântica relativística está muito menos adiantada. A teoria de Dirac se limita a partículas de spin $1/2$; para outros spins há dificuldades. Mas, mesmo para partículas de spin $1/2$ em um determinado campo eletromagnético preestabelecido, há problemas. É possível desenvolver uma teoria da perturbação que, contudo, apresenta divergências. Podemos remediar a situação introduzindo um corte de alta energia, mas isso destrói a invariância relativística. Não obstante, alcançamos precisão extremamente grande e, por exemplo, o momento magnético do elétron ou do múon pode ser calculado para 0,3 partes por bilhão. O resultado está de acordo com experiências num limite de erro de 0,2 partes por bilhão. Estes são os números medidos e calculados mais conhecidos em física.

No entanto, em 1972, Dirac encerrou uma conferência sobre o desenvolvimento da mecânica quântica com as seguintes palavras:

“Agora, que podemos fazer com essa situação? Parece-me evidente que ainda não temos as leis fundamentais da mecânica quântica. As leis que estamos usando atualmente precisarão sofrer alguma modificação importante antes de termos uma teoria relativística. É muito provável que essa modificação da atual mecânica quântica para a mecânica quântica relativística do futuro seja tão drástica quanto a modificação da teoria orbital de Bohr para a atual mecânica quântica. Quando fazemos uma alteração tão drástica, naturalmente nossas idéias da interpretação física da teoria com seus cálculos estatísticos podem muito bem ser modificadas”. (Dirac, *The Development of Quantum Mechanics*. Acc. Naz. Lincei, Roma, 1974.)

Capítulo IX

O maravilhoso ano de 1932: nêutron, pósitron, deutério e outras descobertas

O estudo da mecânica quântica a partir da publicação do trabalho de Planck em 1900 até o de Bohr em 1913 tinha atraído um número relativamente reduzido de físicos. Por outro lado, de 1913 até a conclusão da teoria em 1928, tal estudo absorveu todo o vigor da nova geração de físicos com a possível exceção daqueles que rodeavam Rutherford. Nesse período, a teoria predominava sobre a experiência, embora sem apoio experimental nada pudesse consolidar-se. Para acreditar nos espantosos resultados teóricos, tão diferentes da experiência quotidiana do senso comum baseada em objetos macroscópicos, provas experimentais eram absolutamente necessárias; a experiência aparentemente paradoxal de Stern-Gerlach é um exemplo típico.

Após a teoria relativística do elétron de Dirac, de 1928, surgiu a sensação de que se havia atingido um ponto crucial na física. Que essa sensação realmente existia na época é não foi imaginada posteriormente é fato demonstrado, por exemplo, por uma interessante exposição feita pelo Professor Orso Mario Corbino (1876-1937), então diretor do Instituto de Física da Universidade de Roma. A Sociedade Italiana para o Progresso da Ciência realizava uma vez por ano uma convenção na qual se esforçava por informar a “leigos inteligentes” o que estava ocorrendo nas diversas áreas científicas. Fermi, E. Persico e outros repetidamente falavam a respeito da nova física, tentando explicar seus resultados ao público italiano. Em 1929, Corbino decidiu estudar cuidadosamente questões mais gerais sobre o futuro da física e, após ter feito consultas a Fermi, em 21 de setembro de 1929, pronunciou uma palestra intitulada “As Novas Metas da Física Experimental”, que veio a mostrar-se profética sob vários aspectos. Cito a seguir alguns trechos dessa palestra:

“Um campo de estudos cuja teoria está atrasada no tempo é o dedicado ao mecanismo do arranjo molecular ou atômico de líquidos e sólidos. Já se chegou à conclusão de que as forças de coesão molecular são de origem elétrica. O exame através dos raios X nos ensinou praticamente a ver o arranjo de átomos ou grupos de átomos em ordem nos cristais. Mas a predição numérica das constantes físicas dos conjuntos de elétrons atômicos mal está começado. Desse modo, há muita coisa para os físicos teóricos fazerem nesse campo. Também sob o aspecto experimental o campo ainda não chegou a esgotar-se. Vou citar um velho problema não resolvido até agora. Se, na estrutura desses conjuntos, se pudessem introduzir algumas das

mudanças que ocorrem espontaneamente na natureza, poderíamos, por exemplo, transformar o carvão ou grafite em diamantes, o que não seria totalmente desprovido de interesse, mesmo para a ciência. A física, que lida com os estados sólido ou líquido da matéria ou que lida com os efeitos da alta pressão e temperaturas muito altas ou muito baixas, deve, portanto, ser considerada um campo promissor para o físico teórico e experimental de hoje ou de amanhã. Além disso, as aplicações são da máxima importância prática.

Atualmente chegamos à mais alta categoria da pesquisa física: a descoberta de novos fenômenos, como a corrente elétrica e seus vários efeitos, os raios X e a radioatividade, que já foram coisas novas. Após ter pensado muito, não hesito em manifestar uma opinião que pode parecer extremamente audaciosa. Acredito que a física moderna já possui o conhecimento básico dos fenômenos possíveis que podem ocorrer ou ser produzidos experimentalmente na Terra. Por conseguinte, exceto quanto ao campo das modificações artificiais do núcleo atômico (ao qual me referirei em breve), nossos descendentes não poderão participar da revelação de novas e grandes teorias na área da física. Não compartilharão das experiências daqueles que viram o nascimento da ciência da eletricidade ou o desenvolvimento da óptica ou a descoberta de novas radiações.

Por conseguinte, a única possibilidade de novas e grandes descobertas na área da física está na chance de poder-se "atacar" o núcleo interno do átomo. Será essa a tarefa digna da física do futuro.

Assim, as experiências de Rutherford já nos deram a única possibilidade de transmutação artificial de elementos químicos. No entanto, o efeito tem ocorrido tão raramente que até agora só pudemos achar exemplos isolados de desintegração, átomo por átomo. Portanto, seriam necessários milhares de séculos para juntar uma quantidade de hidrogênio detectável através de meios químicos. Evidentemente, uma posição como a de Rutherford, embora seja a mais ousada que podemos assumir hoje em dia, ainda se mostra inadequada para nossas necessidades. Será possível "atacar" o átomo de alguma outra maneira?

... Apenas obstáculos técnicos e financeiros que, em princípio, podem ser superados se colocam no caminho desse grande projeto. O propósito não é apenas a transmutação de uma grande quantidade de elementos químicos, mas também a observação de fenômenos que envolvam quantidades colossais de energia, que ocorrem em alguns casos de fragmentação ou reconstituição do núcleo atômico.

O núcleo de vários elementos é composto, conforme já dissemos antes, de prótons, ou núcleos de hidrogênio, e elétrons. Mas, na combinação de vários prótons, como, por exemplo, quatro, para formar o núcleo do hélio, a massa do composto é ligeiramente menor do que a soma das massas dos quatro prótons. Essa redução de peso é chamada defeito de massa do núcleo. Conforme a teoria da relatividade, essa redução de massa deve ser acompanhada da liberação de enorme quantidade de energia. Portanto, na formação do núcleo do hélio a partir de quatro prótons, para cada grama de hélio formado devem ser produzidas cerca de um milhão e meio de grandes calorías, ou seja, o equivalente a dois milhões de kilowatts-hora. Naturalmente, o fenômeno inverso, isto é, a introdução de um grama de hélio em

núcleos de hidrogênio, exigiria o uso da mesma quantidade de energia. Nesses fenômenos nucleares, cuja importância transcendental não precisa ser enfatizada, transformar-se-ia matéria em energia e vice-versa ao ritmo de vinte e cinco milhões de kilowatts-hora para cada grama de matéria transformada.

Em conseqüência, pode-se concluir que, embora seja improvável um grande progresso na física experimental em seu domínio comum, estão abertas muitas possibilidades para investir-se sobre o núcleo atômico. Esse é o campo mais atrativo para os futuros físicos. Para participar do movimento geral, ou na tendência atual ou nas tendências futuras que já indiquei, é indispensável aos experimentalistas captarem bem os resultados da física teórica, e também disporem de meios experimentais cada vez mais amplos. Tentar fazer física experimental sem um conhecimento prático dos resultados da física teórica e sem amplos meios laboratoriais é como tentar vencer uma guerra moderna sem aviões ou canhões.

... Assim, mesmo que a física tenda a um nível de saturação, o estudo de sua aplicação a outras disciplinas, como a biologia, se conduzido por verdadeiros especialistas, mestres de todos os recursos da física moderna, poderá trazer resultados do maior valor prático e científico. Em vez de ter uma superposição de técnicas, seria melhor ainda se se pudesse alcançar uma fusão da atitude biológica com a atitude da nova física no mesmo cérebro.

Aos cinquenta anos de idade, Hermann von Helmholtz, o grande naturalista do século passado, renunciou a sua cátedra de fisiologia para ensinar física em Berlim. A época permitia ou até estimulava esse comportamento audacioso. Foi um período coroado do maior sucesso tanto para ele quanto para as ciências. Hoje a situação não é a mesma. A física experimental está rapidamente atingindo um estágio de maturidade e de inteireza que dificilmente se ampliará. Por outro lado, já dispõe de todos os instrumentos capazes de auxiliar outras ciências menos adiantadas".

Corbino manifestou suas idéias sobre as novas tendências da física de maneira explícita, mas certamente não foi o único a perceber que se iniciava uma nova era. Naquela época, a nova geração de físicos em muitas universidades estava passando a dedicar-se a problemas nucleares. A posição quase monopolista de Paris e de Cambridge estava abalada e novos nomes substituíram os de Marie Curie e Rutherford. Walter Bothe, James Chadwick e Frédéric Joliot iam-se aproximando do centro do palco. Além disso, os Estados Unidos, que tinham dado uma contribuição relativamente pequena para o desenvolvimento da mecânica quântica, aumentaram substancialmente sua importância nessa área. Também foram instalados novos centros experimentais na Europa, como, por exemplo, em Roma, que já tinha a reputação de centro teórico, graças a Fermi.

Todas essas novas iniciativas desabrocharam extraordinariamente em 1932, ano que, por coincidência, testemunhou uma série de descobertas históricas, reminiscetes, em termos de impacto, daquelas ocorridas por volta de 1895, já descritas no início deste livro. As principais descobertas, em ordem cronológica, foram: o nêutron; o isótopo de hidrogênio de massa 2, deutério; o elétron positivo ou pósitron; o início da era dos aceleradores e,



Figura 9.1. Walther Bothe (1891-1957) (à esquerda) e C. D. Ellis em Roma em 1931. Ao fundo, da esquerda para a direita, E. Amaldi, G. Placzek e G. C. Wick. (Foto E. Se-grè.)

logo depois, a teoria dos raios beta e a descoberta da radioatividade artificial. Creio que ouvi falar em duas dessas descobertas durante o mesmo chá que precedeu a um seminário de física na Universidade de Hamburgo.

A Descoberta do Nêutron

O primeiro evento foi a descoberta do nêutron. Trata-se de uma história complexa e dramática. Ao contrário de muitas descobertas, como a dos raios X, que ocorreu em uma noite, a descoberta do nêutron levou dois anos para ser concluída. Tem até uma pré-história importante. Rutherford pensava de maneira insistente na possível existência de uma partícula neutra de massa igual à do próton. Concebeu-a como um átomo de hidrogênio no qual o elétron se teria introduzido no núcleo, neutralizando sua carga. As especulações de Rutherford sobre o comportamento dessa partícula hipoté-

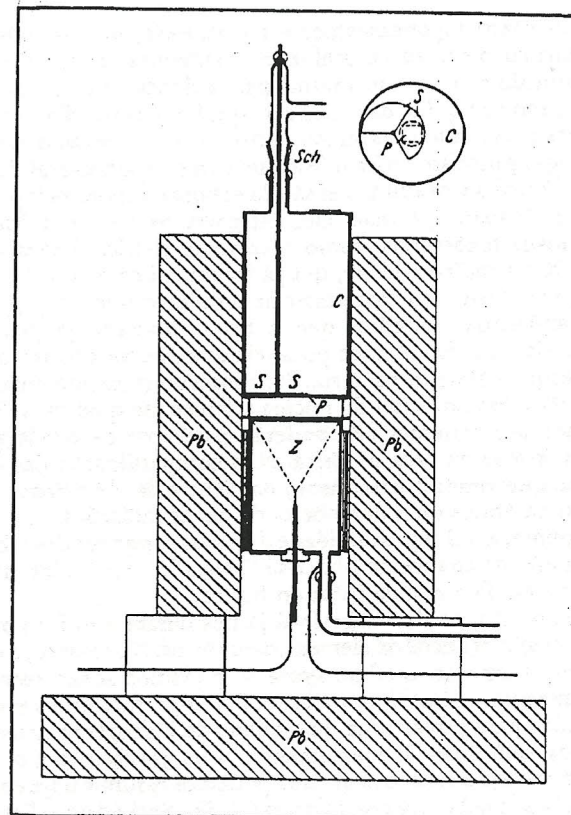


Figura 9.2. Desenho esquemático da aparelhagem usada por Bothe e Becker com a qual revelaram a radiação gama penetrante emitida do berílio bombardeado por partículas de polônio. Z indica o contador Geiger. (De Zeitschrift für Physik 66, 289 (1930).)

tica tinham sido apresentadas em sua Conferência Baker de 1920, que, conforme já vimos, manteve viva na consciência de seus alunos a possível existência de tal partícula.

Walter Bothe (Figura 9.1) e seu aluno H. Becker deram o primeiro passo para a verdadeira descoberta do nêutron em 1928, quando bombardearam berílio com partículas alfa de polônio (Figura 9.2). O objetivo de ambos era confirmar as desintegrações observadas por Rutherford e descobrir se eram acompanhadas da emissão de raios gama de alta energia. Usando métodos elétricos de contagem, descobriram uma radiação penetrante, que interpretaram como raios gama. Tentaram medir o coeficiente de absorção desses raios para calcular-lhes a energia. Ampliaram suas observações ao lítio e boro e chegaram à conclusão de que os raios gama observados tinham mais energia do que as partículas alfa incidentes. Essa energia tinha que vir da desintegração nuclear. A pesquisa durou cerca de dois anos.

Walter Bothe (1892-1957), nascido em Oranienburg, nas proximidades de Berlim, foi um dos poucos alunos de Max Planck. Iniciou sua carreira no

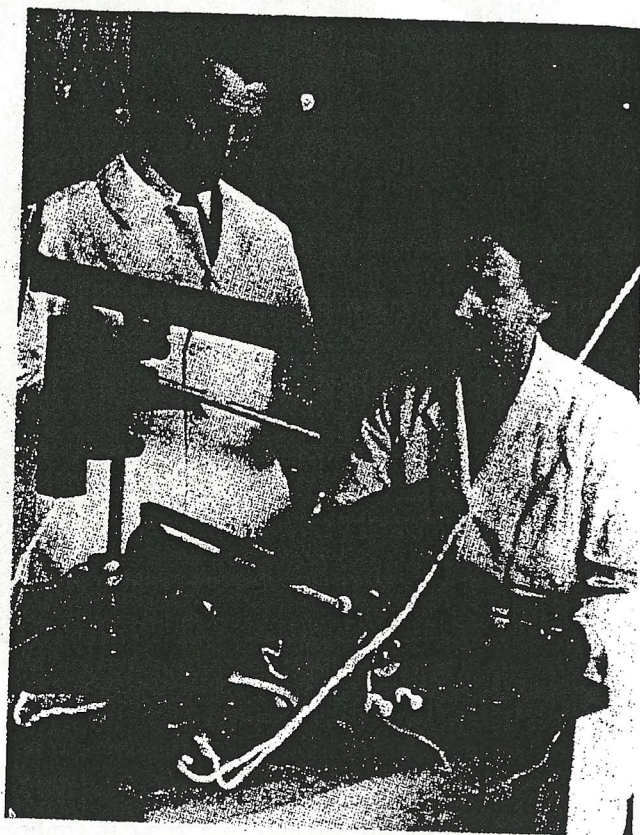


Figura 9.3. Frédéric Joliot (1900-1958) e Irène Curie (1897-1956). A jovem mulher mostrada na Figura 2.8 é agora uma cientista independente e, junto com o marido, está preparando-se para realizar algumas grandes experiências. [F. e I. Joliot-Curie, *Oeuvres Scientifiques Complètes* (Paris: Presses Universitaires de France, 1965).]

Reichsanstalt em Berlim, sob a orientação de Geiger, mas durante a Primeira Guerra Mundial foi aprisionado pelos russos e mandado para a Sibéria. Ali estudou matemática e disciplinas teóricas, e casou-se com uma senhora de nacionalidade russa. No final da guerra, reassumiu seu cargo no Reichsanstalt e aperfeiçoou métodos elétricos de contagem. Foi ele especificamente o primeiro a substituir os "olhos" de Rutherford e de Geiger no laborioso método de contagem de cintilações, por um circuito elétrico, ampliando enormemente a capacidade do método. O método de coincidências mais tarde foi aplicado por ele e seus colaboradores, Kohlhoerster, Rossi e outros, a muitos problemas de física nuclear, a raios cósmicos e ao estudo do efeito Compton. Bothe era um físico de primeira grandeza – um

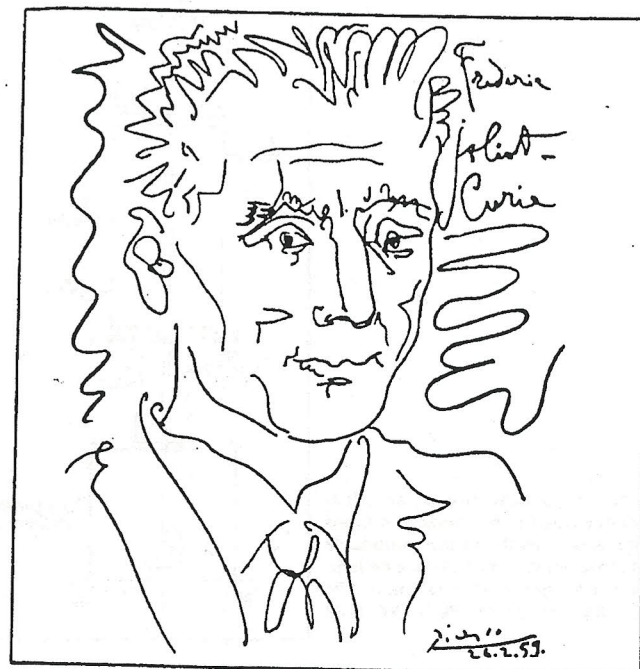


Figura 9.4. Frédéric Joliot em desenho de Pablo Picasso. (Cortesia de J. Hurwic.)

verdadeiro físico dos físicos, mais conhecido entre os colegas do que entre o público em geral. Suas qualificações abrangiam o campo artístico e ele tocava piano e pintava como um profissional. Era um tanto difícil como pessoa, mas sua sólida integridade intelectual e científica provocavam grande respeito em meio à comunidade dos físicos.

Por volta de 1931, dois novos cientistas de grande importância entram no cenário: Irène Curie e seu marido Frédéric Joliot (Figura 9.3). Irène (1897-1956) era filha de Marie e Pierre Curie e puxara à mãe tanto em matéria de caráter quanto de traços físicos; fora educada com grande desvelo pela mãe (o pai morrera quando ela tinha nove anos de idade). Marie e um grupo de cientistas e intelectuais montaram uma escola primária para seus filhos, onde também davam aulas – ela, naturalmente, dava aulas de ciências. Durante a Primeira Guerra Mundial, quando Marie organizou o serviço radiológico para o Exército francês, levou Irène como sua assistente. Com seus cromossomos e a educação recebida, não é de espantar que Irène se tenha dedicado às ciências e, naturalmente, no laboratório de sua mãe.

Frédéric Joliot (1900-1958) tinha sido recomendado a Marie Curie por seu velho amigo Langevin, precipuamente por sua excepcional capacidade técnica. Uma de suas primeiras tarefas foi preparar uma fonte de polônio extremamente forte e, em seguida, construir uma câmara de nuvens. Joliot (Figura 9.4) saiu-se brilhantemente em ambas as tarefas e, além disso, casou-

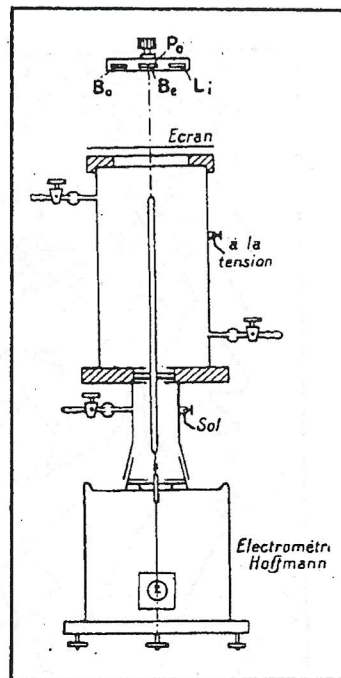


Figura 9.5. Um desenho esquemático da aparelhagem usada por Joliot e Curie para revelar os prótons de recuo causados pela radiação neutra emiída de Po-Be. No alto, a fonte; no centro, a câmara de ionização conectada a um eletrômetro (abaixo). [De *Comptes-rendus: Académie des Sciences, Paris 194, 1783 (1932).*]

se com Irène, a filha da patroa, em 1927. A nova geração estava, portanto, preparada para seguir as pegadas da geração anterior. Joliot era alegre, cordial e cheio de imaginação; fazia-me lembrar Maurice Chevalier, embora o tivesse conhecido muito superficialmente (e meu relacionamento com Chevalier limitava-se aos filmes).

Joliot e a esposa fizeram todas as suas grandes descobertas antes da Segunda Guerra Mundial. Após a queda da França, Joliot entrou para a Resistência e, de 1941 a 1945, exerceu o cargo clandestino de presidente da Frente de Libertação Nacional. Após a guerra, foi nomeado Alto Comissário para Energia Atômica, mas sua orientação política de extrema-esquerda desqualificou-o para essa função aos olhos do Governo francês, que o demitiu. Continuou sendo um dos principais expoentes de todos os movimentos ou iniciativas comunistas de caráter internacional, bem como diretor do novo laboratório científico de Orsay. Irène foi, durante curto período, Ministra de Pesquisas Científicas do Gabinete francês. Os dois morreram ainda jovens e é provável que tenham sido vítimas do trabalho rotineiro com radiação e substâncias radioativas.

Os Joliot decidiram usar sua amostra excepcionalmente forte de polônio para estudar a radiação penetrante de Bothe. Em 18 de janeiro de 1932, divulgaram uma observação surpreendente e de grande importância.

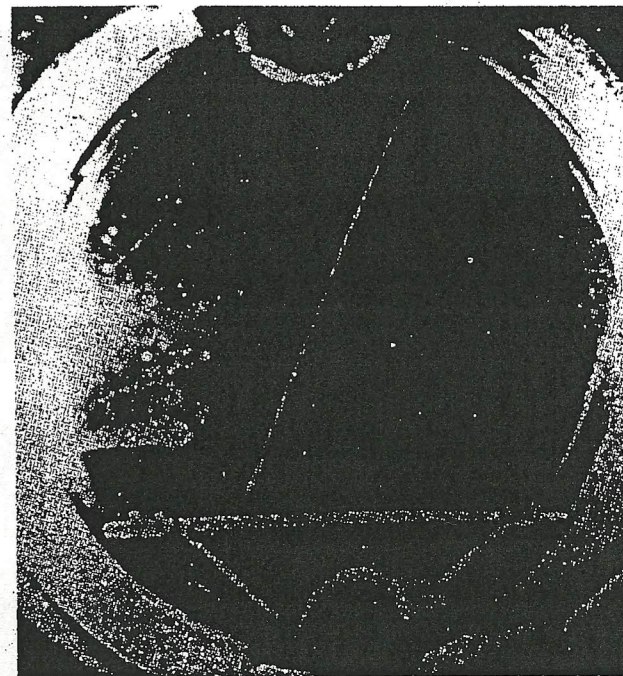


Figura 9.6. O percurso, em uma câmara de nuvens, de um próton de recuo posto em movimento por uma colisão com nêutron. O nêutron não deixa vestígio porque é neutro. [De *Comptes-rendus: Académie des Sciences, Paris 194, 847 (1932), Gauthier-Villars.*]

A radiação podia ejetar prótons de uma camada de parafina. Descobriram isso com uma câmara de ionização conectada a um eletrômetro, mas o resultado era tão estranho que tentaram confirmá-lo imediatamente com uma câmara de nuvem e, em 22 de fevereiro, publicaram o resultado de sua segunda observação, confirmando a ejeção de prótons (Figuras 9.5 e 9.6). Por que era tão estranho o fato de os raios gama penetrantes de Bothe ejetarem prótons? A projeção de uma partícula livre por um próton colidente é uma forma do efeito Compton bastante conhecida no que respeita aos elétrons. No efeito Compton comum, no entanto, os elétrons são leves ($mc^2 = 0.51 \text{ MeV}$) e se movem facilmente, mas os prótons são 1.836 vezes mais pesados e não se movem com tanta facilidade. Se uma bola de bilhar se chocar com outra, as duas facilmente recuarão; mas, se um automóvel receber um impacto de uma bola de bilhar, não se abalará de modo acentuado.

Quando Curie e Joliot tentaram interpretar suas observações como um efeito Compton, apresentaram uma proposta bastante improvável quanto a ambas: a energia que os "raios gama" incidentes deviam ter tido e a seção de choque que tinha de ser-lhes atribuída. Essa seção de choque era cerca de três milhões de vezes maior do que o esperado com uma simples extensão do cálculo válido para o elétron. James Chadwick (1891-1974) informou a Rutherford sobre a publicação de Curie-Joliot de 18 de janeiro e, quando o

nobre cientista tomou conhecimento da explicação proposta, teria dito com rara veemência que não acreditava. Ao ler o mesmo documento, Ettore Majorana, um jovem físico de Roma, dotado de especial espírito de ironia, afirmou: "Que idiotas! Descobriram o próton natural e nem se deram conta!" Chadwick, no Laboratório Cavendish, fez mais ainda. Repetiu as experiências usando polônio e berílio como fonte, mas fez colidir a radiação emergente não apenas no hidrogênio, mas também no hélio e nitrogênio (Figuras 9.7 e 9.8). Ao comparar os desvios, conseguiu provar que a radiação continha um componente neutro de massa aproximadamente igual à do próton. Chamou-o de *nêutron* e divulgou o resultado enviando uma carta ao *Nature* em 17 de fevereiro de 1932. Curie e Joliot perderam, dessa forma, uma grande descoberta.

Uma das razões da pressa e do sucesso de Chadwick foi o fato de ele estar mentalmente preparado para aceitar o conceito do nêutron. Já tinha feito diversas tentativas de produzir o nêutron em descargas fortes e por outros métodos. Em um estudo escrito sobre a descoberta do nêutron, ele diz que "algumas dessas experiências foram inteira e totalmente absurdas". Para seu grande benefício, quando o nêutron não aparecia, ele não o detectava, e, quando finalmente ele veio a aparecer, ele o percebeu de forma imediata, nítida e convincente. São essas as características de um grande físico experimental.

Diz-se que Rutherford insistiu em que se concedesse o Prêmio Nobel a Chadwick pela descoberta do nêutron, pois ele o mereceria. A alguém que observou a Rutherford que os Joliot também tinham apresentado uma contribuição essencial, este teria respondido o seguinte: "Pelo nêutron apenas para Chadwick; os Joliot são tão inteligentes que logo merecerão o prêmio por alguma outra coisa".

A descoberta do nêutron teve conseqüências amplas e profundas para a física nuclear. Até 1930, todos aceitavam a hipótese de que o núcleo era composto de elétrons e prótons (conforme Corbino afirmou na exposição apresentada no início deste capítulo). A hipótese parecia plausível porque se viam elétrons em desintegração beta e o próton era o mais leve dos núcleos conhecidos. Além disso, as massas nucleares eram aproximadamente múltiplos inteiros da massa do próton. Segundo essa hipótese, o núcleo de nitrogênio de massa 14 deveria conter quatorze prótons e sete elétrons, dando a massa de quatorze prótons e neutralizando a carga elétrica de sete deles com sete elétrons. A massa dos elétrons é desprezível em comparação com a dos prótons e deve-se sempre levar em conta a energia de ligação segundo a equação de Einstein $E = mc^2$. No entanto, deparavam-se a essa hipótese sérias dificuldades. Primeiro, o princípio da incerteza exigia uma barreira de potencial de grande magnitude para conter uma partícula tão leve quanto um elétron em um volume do tamanho do núcleo e ninguém sabia que forças podiam produzir tal barreira. Pior ainda, algumas experiências em um campo da física inteiramente diferente, a espectroscopia molecular, tinham mostrado claramente que o núcleo de nitrogênio devia conter um número *par* de férmions. Prótons e elétrons são férmions e seu número no núcleo de nitrogênio, segundo a constituição elétron-próton, deveria ser vinte e um, ou seja, um número *ímpar*. Havia, portanto, uma nítida contradi-



Figura 9.7. James Chadwick (1891-1974). Aluno e colega de Rutherford, Chadwick foi um dos maiores físicos nucleares do mundo. Sua descoberta do nêutron foi básica para todos os posteriores desenvolvimentos de física nuclear. (Biblioteca Niels Bohr.)

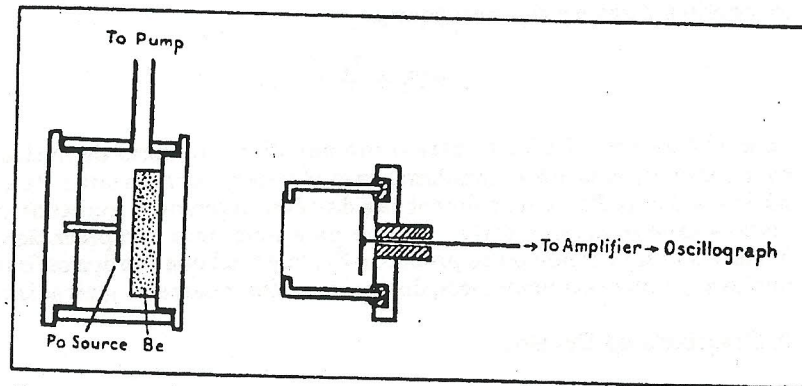


Figura 9.8. A aparelhagem com que Chadwick descobriu o nêutron. À esquerda, a fonte Po-Be; à direita, a câmara de ionização conectada com um amplificador. [De *Proceedings of the Royal Society*, Londres, 136, 692 (1932).]

ção. Essa dificuldade, além de outras concernentes ao spin, foram removidas imediatamente pela suposição de que o núcleo era composto de nêutrons e prótons, ambos férmions: segundo essa teoria, o núcleo de nitrogênio de massa 14 contém sete prótons e sete nêutrons; um número par de férmions. Tal hipótese foi apresentada independentemente por D. Ivanenko, na União Soviética, e por Heisenberg, na Alemanha. Majorana tinha chegado à mesma conclusão, não tendo, porém, publicado seus trabalhos.

O modelo nuclear baseado em uma composição nêutron-próton hoje em dia é aceito universalmente e parece que não será contraditado. Para entender-se completamente esse modelo, é importante estudar a interação próton-próton, próton-nêutron e nêutron-nêutron, com a esperança definitiva de obter todas as propriedades nucleares a partir de tais interações. Esse programa ambicioso ainda não teve sucesso completo, a despeito de êxitos parciais bastante significativos. Experiências iniciadas na década de 1930 e prosseguidas e intensificadas por muitos anos já demonstraram que as forças nucleares específicas entre nêutron e nêutron, próton e próton e nêutron são as mesmas. Heisenberg, E. U. Condon, Eugene Wigner e outros elaboraram uma formulação teórica para esse fato ao considerarem o nêutron e o próton como a mesma partícula (núcleon) em dois estados quânticos distintos que diferem pelo valor de uma coordenada interna, o que é perfeitamente análogo a um elétron que tenha um spin paralelo ou antiparalelo a uma determinada direção fixada por um campo magnético. A coordenada interna do núcleo, por força de sua analogia com a rotação, foi chamada de spin isotópico e é freqüentemente indicada pelo símbolo T . O spin isotópico não deve ser imaginado em espaço ordinário, mas em um espaço abstrato específico. Do ponto de vista matemático, tem propriedades quânticas, como regras de comutação, idênticas ao *momentum* angular. Em seu próprio espaço, é um vetor com três componentes, sendo o terceiro componente conectado à carga elétrica pela equação

$$Q = T_3 + \frac{N}{2} + \frac{S}{2}$$

onde Q é a carga elétrica (1 para o próton), N é o número de núcleons contidos no sistema, e S a estranheza, da qual trataremos mais tarde. Para os núcleons, $S = 0$. Portanto, a descoberta do nêutron removeu muitas descobertas inconvenientes e abriu caminho para uma nova compreensão do núcleo. Não solucionou outro problema fundamental que atordoa os físicos nucleares, o do decaimento beta, do qual também trataremos mais adiante.

A Descoberta do Deutério

Um dia depois de Chadwick ter enviado o anúncio da descoberta do nêutron ao *Nature*, a publicação americana *Physical Review* recebeu um outro artigo muito importante no qual se relatava a descoberta de um isótopo de hidrogênio de massa 2. Os autores eram Harold C. Urey, então professor de química da Universidade de Colúmbia em Nova Iorque; F. G. Brickewedde, diretor da seção de criogenia do *Bureau* Nacional de Padrões, de Washington, D. C.; e G. M. Murphy, da Universidade de Colúmbia.

Harold Urey (1893-1981) ficou órfão do pai, um pastor protestante de Indiana, aos seis anos de idade. A mãe casou-se outra vez, também com um pastor protestante. A família era muito pobre e Harold teve de sustentar-se a si mesmo desde bem jovem. Frequentou a Universidade de Montana, onde recebeu o diploma de bacharel em química em 1917. Depois, trabalhou em uma indústria de produtos químicos de natureza bélica, mas, logo que pôde,

retornou à Universidade de Montana, então como professor assistente de química. Somente em 1921 é que se ligou a uma verdadeira instituição de pesquisas; quando preparou a tese de PhD em Berkeley, sob a orientação do brilhante Gilbert Newton Lewis (1875-1946). Lewis começou sua carreira como físico-químico e termodinamicista, mas, com sua mente indagadora e imaginativa, interessava-se por ampla gama de assuntos de uma forma se não crítica, pelos menos entusiasmante. Chefiou o departamento de química de Berkeley, que era, em grande parte, obra de sua própria lavra. Ali tinha um bom número de alunos talentosos – entre os quais estava Urey – em diversos campos relacionados com a química.

Após concluir o doutorado, recebeu uma bolsa de estudos para Copenhague, onde aprendeu física atômica, ou pelo menos o que era conhecido nessa área até 1924, e, junto com A. E. Ruark, escreveu um livro que foi fundamental para a propagação das novas idéias entre os químicos americanos. Em 1929, foi nomeado professor de química da Universidade de Colúmbia, e ali descobriu o deutério. Durante a Segunda Guerra Mundial, encarregou-se da preparação do isótopo pelo processo de difusão para o Projeto Manhattan. Depois da guerra, foi para a Universidade de Chicago e, finalmente, para a Universidade da Califórnia em San Diego. Foi então que passou a dedicar-se basicamente a questões planetárias e lunares. Urey é um entusiasta por indole e está sempre pronto a apoiar boas causas, tradição essa comum nos Estados Unidos.

A composição isotópica dos elementos naturais e as medições de precisão de massas atômicas de isótopos isolados, desde a época de Aston, tinham demonstrado que nem mesmo os isótopos isolados têm massas inteiras. Pressupomos aqui, como é usual, uma unidade de peso atômico tal que o peso de C^{12} seja exatamente igual a 12. O valor parcial da massa do isótopo isolado se deve à energia de coesão nuclear. O fato de os pesos atômicos terem valores parciais, por outro lado, se deve principalmente a que os “elementos” químicos são misturas isotópicas. Por exemplo, o cloro tem um peso atômico químico de 35,46 e é uma mistura de dois isótopos de peso atômico 34,97 e 36,97. Já em 1919, Otto Stern tinha examinado a possibilidade de o hidrogênio, com um peso atômico de 1,0079, ser uma mistura de dois isótopos. Pesquisou essa possibilidade junto com seu colega M. Volmer, mas o resultado foi negativo. Tinham partido da hipótese de que toda a diferença entre 1 e 1,0079 poderia dever-se à mistura de um isótopo novo e hipotético de massa 2 que devia ocorrer em um total da ordem de 1%. A idéia é fundamentalmente correta, mas quantitativamente errada, porque os átomos de deutério ocorrem apenas no total de cerca de 0,015%.

Mais tarde, algumas pesquisas bastante detalhadas sobre espectros de banda de alguns elementos levaram à descoberta de isótopos raros no oxigênio e no nitrogênio e o caso do hidrogênio foi reexaminado por Urey e seus colegas, que enriqueceram o isótopo raro com uma destilação fracional de hidrogênio líquido e finalmente conseguiram demonstrar espectroscopicamente a presença do deutério (Figura 9.9). O deutério é um isótopo de rara importância na física nuclear e chega mesmo a ter aplicações práticas em alguns reatores nucleares.

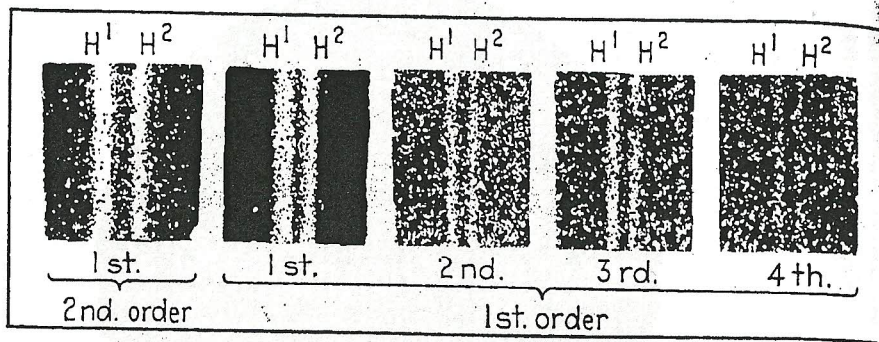


Figura 9.9. Série espectral de isótopos de hidrogênio de Lyman. Mostra a mudança das linhas de deutério em relação às de hidrogênio ordinário devidas à mudança da massa nuclear. A fórmula na Figura 7.3, que dá a frequência das linhas, contém a "massa reduzida", que é diferente para o deutério e para o hidrogênio.

O maravilhoso ano de 1932 também testemunhou o início de um bom desempenho de aceleradores de partículas, que iriam transformar a física nuclear. Por coincidência, publica-se então um dos documentos fundamentais sobre o assunto, escrito por M. S. Livingston e E. O. Lawrence, que serve de apoio ao anúncio da descoberta do deutério e é recebido pela *Physical Review* em 20 de fevereiro de 1932, dois dias após o trabalho de Urey e uma semana após o anúncio de Chadwick sobre a descoberta do nêutron.

O Pósitron

O entusiasmo por essas descobertas ainda não tinha diminuído quando ocorreu uma nova maravilha, desta vez originária do campo dos raios cósmicos. Os raios cósmicos eram conhecidos desde o início do século. Sua origem extraterrena foi estabelecida por volta de 1912, principalmente através de vôos de balão de V. F. Hess (1883-1964), que, medindo a descarga espontânea de electoscópios a várias altitudes, pôde distinguir a ionização produzida por substâncias radioativas contidas na Terra da ionização produzida por radiação penetrante de origem extraterrena. Outros estudos admiráveis na área da física e da geofísica contribuíram para a conclusão de que uma radiação isotrópica se espalhava por todo o universo. Pressupôs-se que essa radiação consistia de elétrons e de raios gama de alta energia. Qualquer análise e interpretação, no entanto, enfrentavam sérias dificuldades porque a radiação observada na superfície da Terra não é a radiação primária que vem do espaço, mas sim produtos formados pela radiação primária ao cruzar a atmosfera terrestre. Observações feitas a partir de montanhas de grandes altitudes ou em balões ajudaram a separar a radiação primária da secundária, mas o problema continuava complicado.

Um grupo bastante ativo de pesquisadores de raios cósmicos floresceu em torno de Robert Andrews Millikan, em Pasadena, Califórnia. Millikan

desenvolvera técnicas admiráveis e organizara expedições científicas e grupos de pesquisas que contribuíram enormemente para o estudo dos raios cósmicos. Mas nem todas as suas idéias estavam corretas e às vezes ele era obstinado e não se mostrava disposto a aceitar provas contrárias a suas idéias preconcebidas.

R. A. Millikan (1868-1953), como tantos cientistas norte-americanos, era um dos muitos filhos de um pastor protestante pobre. Passou a juventude em pequenas cidades do Centro-Oeste. Frequentou o Oberlin College, onde, como estudante do segundo ano, recebeu um convite para dar aulas de física, matéria que nunca tinha estudado antes. Continuou a estudar até que, com o auxílio de uma bolsa de estudos, pôde ir para a Universidade de Colúmbia, onde se doutorou em 1895. Após um estágio na Alemanha, ocupou o cargo de assistente de A. A. Michelson em Chicago. Somente em 1909 é que pôde começar um importante programa de pesquisas sobre a determinação da carga do elétron e , mais tarde, da constante de Planck, realizações experimentais que podem ser consideradas de primeira linha. De Chicago transferiu-se, em 1921, para o Instituto de Tecnologia da Califórnia, em Pasadena, onde instalou um grande laboratório de física. Era um excelente relações-públicas e conseguiu levantar enormes somas de dinheiro mesmo durante tempos considerados difíceis. Não hesitava em propagandear-se a si mesmo, gostava de falar sobre ciências e religião e referia-se aos raios cósmicos como "o primeiro choro de bebê dos átomos" ou "a música das esferas". Assim, quando um grupo religioso afixou um grande cartaz no Instituto com as palavras "Jesus salva"*, alguns estudantes acrescentaram: "e Millikan leva o crédito".

Mas a autopropaganda de Millikan tinha uma base bastante sólida em termos de realizações científicas e administrativas. Suas próprias pesquisas na área de física foram estendidas a outros campos pelos muitos grupos de cientistas importantes do Instituto. Os raios cósmicos, a espectroscopia, os raios X e a física nuclear tiveram grande desenvolvimento. Sob sua administração criaram-se laboratórios de química, biologia, engenharia e outras disciplinas, nos quais atuavam cientistas promissores que mais tarde se tornaram mundialmente famosos. Os observatórios de Monte Wilson e de Monte Palomar eram as principais instituições da área de astronomia.

As origens e o passado de Millikan se refletem em sua personalidade. Ele cresceu em uma atmosfera rural no Centro-Oeste, durante um período que foi muito bem descrito por Mark Twain. A versatilidade de Millikan evidencia-se com a gama de atividades que exerceu, que vão de arquivista de tribunal a instrutor de educação física e importante cientista prático. Suas opiniões simplórias e ocasionalmente ingênuas sobre religião e filosofia e seu estilo científico, que considera a capacidade técnica e instrumental como mais importante do que as idéias teóricas, são atitudes típicas da América de seu tempo. A despeito de seus pontos fracos e de sua simplicidade, tinha suas próprias concepções éticas e uma certa nobreza.

Um dos mais importantes alunos de Millikan foi Carl D. Anderson (Figura 9.10), nascido em 1905, em Nova Iorque, de pais suecos. Anderson fez

* N. E. - Trocadilho feito com a palavra "save" que, em inglês, significa também economizar.

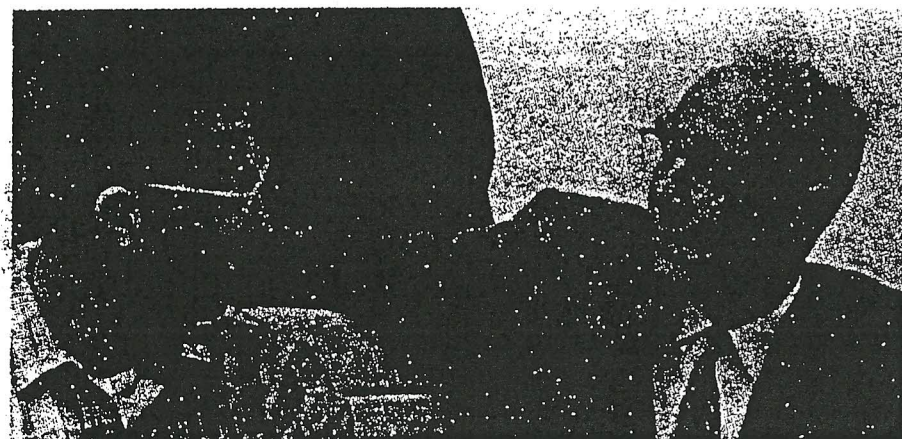


Figura 9.10. Carl D. Anderson (à direita), descobridor do pósitron, e seu aluno Donald Glaser, inventor da câmara de bolhas, por volta de 1950. (Foto de E. Segrè.)

sua longa e proeminente carreira apenas no Instituto de Tecnologia da Califórnia. Em 1930 começou construindo câmaras de nuvens sujeitas a um campo magnético e contendo placas metálicas através das quais as partículas observadas tinham de passar. Assim, pôde observar o desvio magnético das partículas e seu comportamento ao atravessarem as placas.

Usando essa técnica e seus aperfeiçoamentos ou variações, Anderson e seus alunos (S. Neddermeyer e outros) fizeram muitas descobertas importantes. Uma das primeiras ocorreu em 2 de agosto de 1932, quando ele conseguiu a foto reproduzida na Figura 9.11, que mostra um elétron que cruza uma placa de chumbo e pára na câmara de nuvens. O sentido do movimento é certo porque, ao cruzar a placa de chumbo, o elétron perde *momentum* e, em consequência, a curvatura da trajetória se amplia. O elétron, dessa forma, tem de seguir para o alto. Mas, pelo sentido do movimento e o sentido do campo magnético, a curvatura pertence a uma partícula carregada positivamente, não a um elétron comum, que é carregado negativamente. Tratar-se-ia de um próton? Impossível, porque a trajetória de um próton de *momentum* suficiente para cruzar a placa de chumbo não mostraria nenhuma curvatura visível no campo magnético da câmara de nuvens; por outro lado, se sua trajetória é curva, teria um *momentum* insuficiente para cruzar a placa de chumbo. Um exame detalhado da foto leva à inevitável conclusão de que estamos realmente lidando com um elétron positivo, ou *pósitron*, conforme o chamamos atualmente. Em 1932, Anderson não conhecia a teoria de Dirac sobre o elétron e não sabia que Dirac tinha previsto a existência do pósitron. Publicou pequeno trabalho experimental tão convincente que logo persuadiu todos os físicos de que tinha observado um elétron positivo. Naturalmente isso significava também um triunfo para a teoria de Dirac.

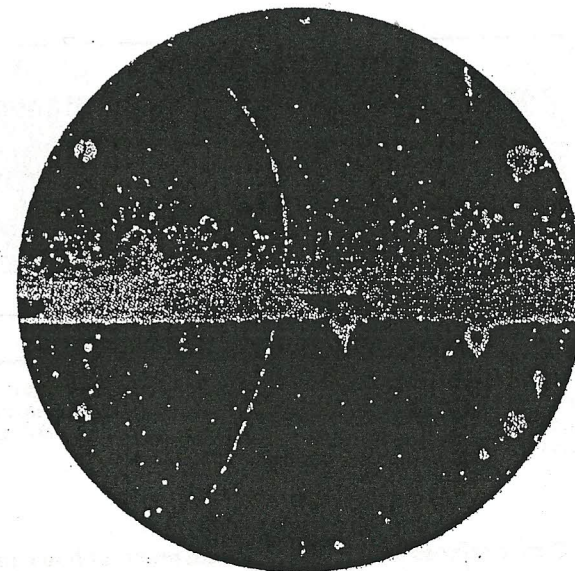


Figura 9.11. Um pósitron originário de raios cósmicos fotografado em uma câmara de nuvens sujeita a um campo magnético. O raio da curvatura da trajetória, o sentido do campo magnético e a velocidade da partícula formam um sistema de coordenadas levôgiro se a carga for positiva. O pósitron vem de baixo e cruza a placa de chumbo, onde tem sua velocidade reduzida. A velocidade reduzida é mostrada pela maior curvatura da trajetória na parte superior da fotografia. [Foto de C. D. Anderson, de *Physical Review* 43, 491 (1933).]

Após a descoberta de Anderson, outros físicos descobriram vestígios de pósitron em fotos que tinham tirado anteriormente; à época, os vestígios tinham escapado a sua atenção, tinham sido mal-interpretados ou não tinham sido bastante convincentes para provar a existência do pósitron.

Pouco tempo antes do trabalho de Anderson, Bruno Rossi tinha observado coincidências entre três contadores Geiger-Mueller colocados num arranjo triangular cercado de chumbo. As coincidências eram de difícil explicação sem pressupor-se a presença simultânea de pelo menos duas partículas carregadas emergindo do chumbo. Os resultados da experiência pareceram tão incríveis que a primeira publicação científica a que foram apresentados rejeitou o original, que foi então enviado para outra revista. A fim de esclarecer o mistério, P. M. S. Blackett e G. Occhialini providenciaram imediatamente a ampliação de uma câmara de nuvens usando uma coincidência tripla entre contadores que a circundavam. Perceberam então uma verdadeira chuva de partículas positivas e negativas na câmara de nuvens (Figura 9.12). O trabalho foi realizado no Laboratório Cavendish. Uma história dessa descoberta, talvez um pouco aumentada, afirma que, quando Occhialini viu a foto revelada, correu para a casa de Rutherford. A empregada abriu a porta e, em seu entusiasmo, Occhialini deu-lhe um beijo.



Figura 9.12. Uma chuva de elétrons e pósitrons produzida por raios cósmicos. Essa chuva é causada pela criação de pares elétron-pósitron pelos raios cósmicos. A foto foi tirada por P. M. S. Blackett e G. Occhialini em uma câmara de nuvens controlada por um contador Geiger. [De *Proceedings of the Royal Society*, 139, 699 (1933).]

Quando Rutherford viu a foto, preencheu um cheque de cinquenta libras em favor de Occhialini, que na época estava enfrentando uma situação financeira difícil.

O fenômeno da chuva de partículas é explicado pela materialização, como é chamada, dos raios gama em pares elétron-pósitron, que produz mais raios gama, e assim por diante. A materialização pode ocorrer apenas em presença de núcleos, de preferência pesados, necessários para assegurar a conservação da energia e o momento no processo.

Irène Curie e Joliot tinham visto pósitrons em uma câmara de nuvens mesmo antes de Anderson, quando estavam estudando a radiação produzida pelo polônio com berílio. Mas interpretaram-nos como elétrons movendo-se em direção à fonte e não como pósitrons originando-se da fonte.

Naturalmente era um problema entender de onde vinham os elétrons que se estavam movendo em direção à fonte... Curie e Joliot devem ter lamentado deixar passar ao largo não apenas o nêutron, mas também o pósitron. Em abril de 1933, começaram a operar sua câmara de nuvens e, em 23 de maio, demonstraram que raios gama densos originários de uma fonte de polônio misturado a berílio (emitidos por essa fonte, além de nêutrons) produzem pares elétron-pósitron por materialização. Dois meses depois, em julho, também observaram pósitrons isolados, além dos pares. Tratava-se de fato digno de nota, e mais digno de nota ainda era que a energia dos pósitrons isolados parecia ter uma série contínua de valores.

A Nova Física Nuclear

O sétimo Conselho Solvay, de 22 a 28 de outubro de 1933, foi dedicado ao núcleo; que era o ponto central de interesse da física. Como todas as descobertas mencionadas neste capítulo eram novas, não faltava assunto para debate. A Figura 9.13 mostra os participantes do Conselho; a geração mais velha está representada, entre outros, por M. Curie e Rutherford; a mais nova, por Joliot, Chadwick, Irène Curie, Bothe, Fermi e E. O. Lawrence, que era o único norte-americano. Uma leitura da ata do Conselho mostra o estágio de conhecimento, as dúvidas e a confusão então prevalentes. Alguns problemas já estavam sob controle ou tinham soluções à vista; outros estavam imersos em um caos completo.

Um dos quebra-cabeças mais desnorteadores era o decaimento beta, que parecia questionar nada menos que a conservação da energia. Os elétrons do decaimento beta têm um espectro contínuo de energia, mas os estágios final e inicial são perfeitamente definidos. Para onde vai a energia, se os elétrons do decaimento não têm uma energia igual à diferença de energia entre o estágio final e o estágio inicial? Durante anos esse problema estivera sendo pesquisado. Os físicos tinham verificado, por exemplo, se a radiação gama podia compensar a energia que faltava. Muitas experiências, mesmo com métodos calorimétricos, não conseguiram revelar o paradeiro da energia que faltava. Além do mais, havia outras dificuldades relativas à conservação do *momentum* angular e de outras quantidades geralmente conservadas. Já desesperado, Bohr estava pronto para abandonar a conservação da energia em fenômenos nucleares. Pauli, que era mais conservador, tinha sugerido, desde 1930, que os elétrons no decaimento beta eram acompanhados por partículas neutras leves que escapavam à observação, mas restabeleciam a conservação da energia e outras leis de conservação carregando, de forma indetectável, a energia que faltava. Em Roma, a partícula neutra leve de Pauli normalmente era chamada pelo nome de *neutrino* ("neutrinho" em italiano), em oposição ao *neutrone* ("neutrão" em italiano) de Chadwick, e o primeiro nome foi adotado universalmente quando, no final de 1933, Fermi formulou uma verdadeira teoria do decaimento beta baseada no neutrino.

Ao falar a respeito de espectros beta no Conselho Solvay, Francis Perrin, filho de Jean Perrin, fez uma observação de grande importância. Comentou que os pósitrons que tinham aparecido nas fotografias da câmara



Figura 9.13. Os participantes do Conselho Solvay de 1933. Nesta fotografia estão reunidos os maiores expoentes, jovens e velhos, da física nuclear de todas as épocas. Sentados, da esquerda para a direita: E. Schrödinger, I. Joliot-Curie, N. Bohr, A. Ioffe, M. Curie, P. Langevin, O. Richardson, E. Rutherford, T. De Donder, M. de Broglie, L. de Broglie, L. Meitner, J. Chadwick. De pé: E. Henriot, F. Perrin, F. Joliot, W. Heisenberg, H. Kramers, E. Stahel, E. Fermi, E. Walton, P. Dirac, P. Debye, N. Mott, B. Cabrera, G. Gamow, W. Bothe, P. Blackett, M. Rosenblum, J. Herrera, E. Bauer, W. Pauli, M. Cosyns, J. Verschäffelt, E. Herzen, J. Cockcroft, C. Ellis, R. Peierls, A. Piccard, E. Lawrence, L. Rosenfeld. (Instituto Solvay.)

de nuvens de Curie e Joliot, com sua distribuição contínua de energia, faziam-no lembrar espectros de decaimento beta. Ele nem imaginava como tinha razão.

Outro resultado surpreendente debatido na conferência foi aquele obtido pouco tempo antes por Otto Stern e seus colaboradores I. Estermann e O. Frisch na Universidade de Hamburgo. Repetiram a experiência de Stern-Gerlach com moléculas de hidrogênio e conseguiram medir o *momentum* magnético nuclear do próton, não o do elétron (Figura 9.14). A experiência foi muito difícil, porque o esperado momento magnético do próton era de magnitude três vezes menor que a do elétron, conforme podemos ver ao observar que a expressão do magnéton de Bohr contém a massa da partícula no denominador. Uma generalização simplista sugeriria então que a proporção entre o momento magnético do próton e o do elétron é o inverso da proporção da massa: $1/1836$. Era essa a expectativa dos físicos teóricos, inclusive do grande Pauli, que na época também estava em Hamburgo. Pauli contou a Stern que, se apreciasse fazer experiências difíceis, poderia fazê-las, mas que era uma perda de tempo e de esforço, porque o resultado já era conhecido. Após um seminário sobre a experiência então em andamento, Stern convenceu todos aqueles presentes a escrever num papel o resultado que esperavam e a assinarem o que escrevessem e



guardou a folha de papel no bolso. No fim, o resultado obtido, para surpresa de todos, foi que o momento magnético do próton era cerca de três vezes maior do que o valor ingenuamente esperado. Essa é uma das primeiras indicações da complicada estrutura do próton.

Após o Conselho Solvay, os participantes voltaram para seus países pensando naquilo que tinham ouvido em Bruxelas. Dentro de alguns meses, ocorreram novas e grandes descobertas.

Fermi continuava a meditar sobre o decaimento beta. Ele apreciava a idéia qualitativa do neutrino, mas ela tinha de ser transformada em uma teoria quantitativa em conformidade com as normas da mecânica quântica. Havia uma dificuldade: nas teorias em uso, o número de partículas é constante, ao mesmo tempo em que é essencial que o elétron e o neutrino sejam criados instantaneamente, ou seja, ao mesmo tempo do decaimento beta. É verdade, contudo, que a luz mostra um efeito similar; poder-se-ia dizer que os *quanta* de luz são criados no momento em que um átomo salta de um estágio superior para um estágio inferior.

Dirac, Pauli e Heisenberg tinham enfrentado esse problema em 1928, mas seus trabalhos embrionários sobre o assunto, que davam início à teoria quântica dos campos e à eletrodinâmica quântica não eram de fácil compreensão. Quantificavam o campo eletromagnético maxwelliano segundo as normas da teoria quântica expressa através de relações de comutação; daí seguia-se matematicamente a existência de *quanta* de luz, conforme postulada por Einstein em 1905. Em 1929, Fermi, após examinar em 1927 o trabalho de Dirac sobre a teoria quântica da radiação e ver os resultados obtidos, decidiu que trataria do assunto à sua própria maneira, que era mais simples, evitando as dificuldades que na época constituíam

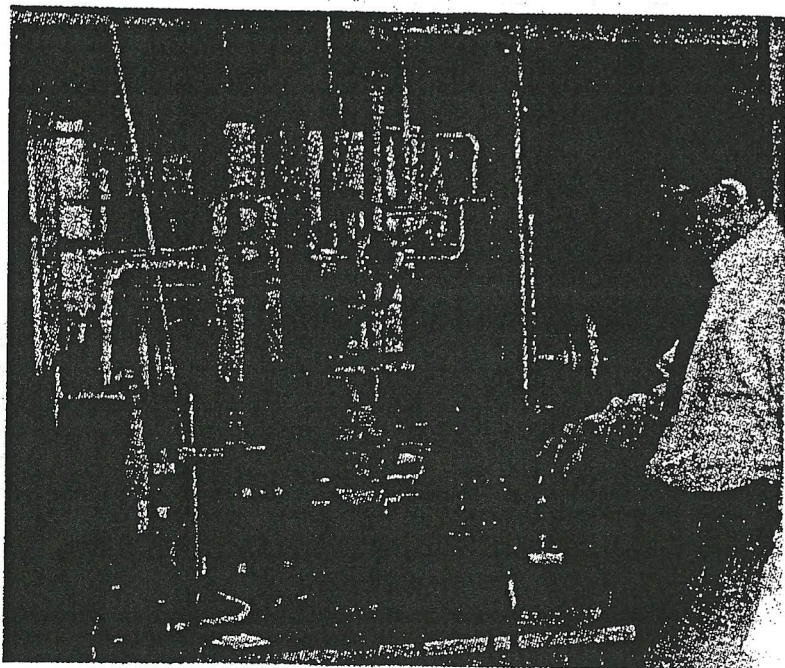


Figura 9.14. Laboratório de Otto Stern, Hamburgo, 1931. O. R. Frisch é mostrado aqui com a aparelhagem para medir o momento magnético do próton. Frisch era sobrinho de Lise Meitner e colaborou com ela na interpretação das experiências de Hahn e Strassmann sobre fissão de urânio. (Foto E. Segrè.)

obstáculos a um entendimento de Dirac. Depois escreveu um famoso artigo sobre eletrodinâmica quântica que elucidou a teoria da radiação para a maior parte dos físicos. O artigo era rigoroso e correto, mas evitava o uso de operadores de criação e de aniquilação que tinham sido inventados vários anos antes por O. Klein, P. Jordan, E. Wigner e outros. Esses operadores, conforme o próprio nome indica, criam ou aniquilam partículas. Diferem quanto a férmions e bósons e exigem uma técnica matemática que Fermi não dominava.

Voltando de Bruxelas, Fermi decidiu que agora tinha de aprender a usar esses operadores e, após algum estudo, sentiu que já conhecia o assunto e que estava pronto para um "exercício" que testaria sua proficiência. Tentou descrever o decaimento beta, modelando-o tanto quanto possível em função da eletrodinâmica. Para fazer isso, teve de introduzir uma nova interação fundamental, isto é, uma nova força natural como gravitação e eletricidade. Essa chamada interação fraca ou interação de Fermi exige uma constante universal, g , que podia ser determinada a partir de experiências do

Artificial Production of a New Kind of Radio-Element

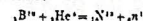
By F. Joliot and I. Curie, Institut du Radium, Paris

SOME months ago we discovered that certain light elements emit positrons under the action of α -particles*. Our latest experiments have shown a very striking fact: when an aluminium foil is irradiated on a polonium preparation, the emission of positrons does not cease immediately, when the active preparation is removed. The foil remains radioactive and the emission of radiation decays exponentially as for an ordinary radio-element. We observed the same phenomenon with boron and magnesium†. The half life period of the activity is 14 min. for boron, 2 min. 30 sec. for magnesium, 3 min. 15 sec. for aluminium.

We have observed no similar effect with hydrogen, lithium, beryllium, carbon, nitrogen, oxygen, fluorine, sodium, silicon, or phosphorus. Perhaps in some cases the life period is too short for easy observation.

The transmutation of beryllium, magnesium, and aluminium α -particles has given birth to new radio-elements emitting positrons. These radio-elements may be regarded as a known nucleus formed in a particular state of excitation; but it is much more probable that they are unknown isotopes which are always unstable.

For example, we propose for boron the following nuclear reaction:



${}^{13}\text{B}$ being the radioactive nucleus that disintegrates with emission of positrons giving a stable nucleus ${}^{12}\text{B}$. In the case of aluminium and magnesium, the radioactive nuclei would be ${}^{27}\text{Mg}$ and ${}^{26}\text{Al}$ respectively.

The positrons of aluminium seem to form a continuous spectrum similar to the β -ray spectrum. The maximum energy is about 3×10^6 e.v. As in the case of the continuous spectrum of β -rays, it will be perhaps necessary to admit the simultaneous emission of a neutrino (or of an antineutrino of Louis de Broglie) in order to satisfy the principle of the conservation of energy and of the conservation of the spin in the transmutation.

The transmutations that give birth to the new radio-elements are produced in the proportion of 10^{-10} or 10^{-11} of the number of α -particles, as for other transmutations. With a strong polonium preparation of 100 milligrammes, one gets only about 100,000 atoms of the radioactive element. Yet it is possible to determine their chemical properties, detecting their radiation with a counter or an ionisation chamber. Of course, the chemical reactions must be completed in a few minutes, before the activity has disappeared.

We have irradiated the compound boron nitride (BN). By heating boron nitride with caustic soda, gaseous ammonia is produced. The activity separates from the boron and is carried away with the ammonia. This agrees very well with the hypothesis that the radioactive nucleus is in this case an isotope of nitrogen.

When irradiated aluminium is dissolved in hydrochloric acid, the activity is carried away with the hydrogen in the gaseous state, and can be collected in a tube. The chemical reaction must be the formation of phosphine (PH_3) or silicon hydride (SiH_4). The precipitation of the activity with aluminium phosphate in acid solution seems to indicate that the radio-element is an isotope of phosphorus.

These experiments give the first chemical proof of artificial transmutation, and also the proof of the capture of the α -particle in these reactions.

We propose for the new radio-elements formed by transmutation of boron, magnesium and aluminium, the names *radio-boron*, *radio-magnesium*, *radio-aluminium*, *radio-nitrogen*, *radio-silicon*, *radio-phosphorus*.

These elements and similar ones may possibly be formed in different nuclear reactions with other bombarding particles: protons, deuterons, neutrons. For example, ${}^{13}\text{B}$ could perhaps be formed by the capture of a deuteron in ${}^{11}\text{B}$, followed by the emission of a neutron.

* Irene Curie and F. Joliot, *J. Phys. et Coll.*, 6, 481: 1922.

† Irene Curie and F. Joliot, *C.R.*, 180: 1921.

‡ Irene Curie et F. Joliot, *C.R.*, meeting of Feb. 20, 1921.

Figura 9.15. O trabalho publicado por Curie e Joliot em *Nature* em 10 de fevereiro de 1934, anunciando a descoberta da radioatividade artificial obtida pelo bombardeamento de certos núcleos (Al, B e Mg) com partículas alfa. Os produtos decaem, emitindo pósitrons.

decaimento beta. A teoria de Fermi explica a forma do espectro beta, a meia-vida do decaimento beta e muitas outras características de tais decaimentos. Ainda é válida hoje em dia, com um acréscimo fundamental feito pelos chineses T. D. Lee e C. N. Yang, que será mencionado no Capítulo XII. A pesquisa de Fermi a respeito do decaimento beta provavelmente é sua obra-prima teórica e é de fundamental importância para a física das partículas. Fermi enviou seu manuscrito ao *Nature* no final de 1933 e o artigo foi imediatamente recusado pelo editor, mas logo foi publicado em outras revistas.

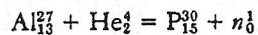
Em Roma, estávamos estudando a teoria dos raios beta quando, no início de 1934, lemos uma comunicação de uma página feita por Curie e Joliot e que nos espantou a todos.

O que tinha acontecido em Paris? Conforme mencionado no Conselho Solvay, Curie e Joliot tinham relatado um espectro contínuo de pósitrons emitido por algumas substâncias sob bombardeamento alfa. Tinham prosseguido as pesquisas sobre esse fenômeno e suas conclusões, datadas de 19 de janeiro de 1934, estavam contidas em uma carta ao *Nature* (Figura 9.15):

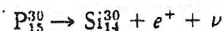
“Nossas mais recentes experiências mostraram um fato espantoso. Quando uma lâmina de alumínio é irradiada sobre uma preparação de polônio, a emissão de pósitrons não pára logo que a preparação é removida. A lâmina permanece radioativa e a emissão da radiação decai exponencialmente como um radioelemento ordinário. Observamos o mesmo fenômeno com boro e magnésio...”

O artigo de uma página consubstanciava a previsão de Rutherford segundo a qual as decepções passadas por Curie e Joliot logo seriam compensadas por alguma coisa de importância. De fato, os dois tinham realizado uma das mais fundamentais descobertas do século, a radioatividade artificial. Foram laureados com o Prêmio Nobel e espero que se tenham sentido recompensados por terem perdido o nêutron e o pósitron. Neste ponto, talvez eu pudesse sugerir a cientistas experimentais que se concentrassem em artigos curtos e substanciosos. O Comitê do Prêmio Nobel parece preferir publicações de uma página, em contraste com os comitês de promoção das universidades, que, às vezes (embora eu creia que isso ocorra raramente), supostamente julgam pelo peso do papel!

Os Joliot imediatamente constataram a natureza química das novas substâncias radioativas, separando-as do alvo por meios radioquímicos padrão. Assim, acharam que as reações nucleares que tinham produzido eram



onde o isótopo radioativo do fósforo P_{15}^{30} tem meia-vida de cerca de 3 minutos e decai de acordo com a reação



Os índices superior e inferior que se seguem aos símbolos químicos são o número de massa e o número atômico, Z . As reações nucleares quase sempre são expressas de uma forma mais concisa introduzida por Bothe. A formação de P_{15}^{30} seria expressa pelo símbolo $\text{Al}_{13}^{27}(\alpha, n)\text{P}_{15}^{30}$, onde o primeiro símbolo indica o alvo; o primeiro entre parênteses, o projétil; o segundo entre parênteses, a partícula que sai; e o último símbolo, o produto da reação.

As conseqüências da descoberta da radioatividade artificial são imensas. Muito apropriadamente, Madame Curie, então mortalmente enferma conseguiu escrever o seguinte a sua filha: *Nous voici revenus aux beaux temps du vieux laboratoire* [“Voltamos aos bons tempos do velho laboratório”]. Mal teve tempo de inserir um curto parágrafo sobre radioatividade artificial na nova edição de seu tratado sobre radioatividade, que foi publicado depois de sua morte.

Enrico Fermi e a energia nuclear

Enrico Fermi nasceu em Roma, em 29 de setembro de 1901, filho de Alberto Fermi, funcionário administrativo do departamento de ferrovias da Itália, e sua mulher, Ida de Gattis, ex-professora primária. O avô de Fermi foi agricultor nos arredores da Piacenza, ao norte da Itália, mas, através de trabalho árduo e de extrema parcimônia, a família melhorou suas condições financeiras e, à época do nascimento de Enrico, já tinha alcançado um nível de vida modesto, mas seguro.

Enrico cresceu em Roma e ali freqüentou a escola secundária. Era estudante exemplar, o primeiro em todas as matérias. Em criança, descobriu seu grande interesse pela matemática e pela física. Aos dez anos de idade, após ouvir em uma conversa entre adultos que a equação $x^2 + y^2 = r^2$ representava um círculo, conseguiu, sozinho, descobrir o significado da afirmação.

Fermi tinha um irmão pouco mais velho do que ele, considerado o mais brilhante dos dois. Aos quinze anos de idade, o irmão morreu inesperadamente, em um trágico acidente cirúrgico, e Enrico, muito apegado a ele, sofreu um grande choque. Após um certo período de tristeza, fez amizade com Enrico Persico, colega de escola do irmão. Os dois continuaram amigos durante toda a vida e estavam destinados a ser os primeiros professores de física teórica da Itália.

O pai de Fermi era amigo de Adolfo Amidei, também funcionário do departamento de ferrovias da Itália, que tinha considerável nível de conhecimento técnico. Quando Amidei conheceu Enrico, este tinha cerca de quatorze anos de idade, logo reconheceu suas raras habilidades. Amidei emprestou ao jovem seus próprios livros de matemática e de engenharia e orientou-o na leitura das obras. O jovem Enrico rapidamente adquiriu sólida formação matemática estudando em livros de álgebra, análise e geometria, e resolvendo inúmeros problemas, muitos dos quais não eram nada simples, segundo seu instrutor. Quando Enrico concluiu a escola secundária, Amidei sugeriu-lhe que procurasse fazer concurso para uma universidade oficial, a Scuola Normale Superiore, em Pisa. Fermi concordou e facilmente colocou-se em primeiro lugar no exame. Os arquivos da Scuola Normale ainda guardam suas provas de admissão.