

Em memória de Rutherford*

Há cinco anos Sir James Chadwick proferiu nesta Universidade a segunda conferência dedicada à memória de Rutherford. Li-a muitas vezes e penso que ela é um relato admirável da carreira científica de Rutherford e uma descrição judiciosa e profunda do seu génio invulgar como físico experimental. Chadwick deu especial atenção aos notáveis êxitos de Rutherford durante a sua estadia em McGill como professor da Cadeira MacDonal'd de Física e à grande dívida do mundo científico para com esta Universidade, que soube dar tão grandes oportunidades a um homem tão jovem. A conferência de Chadwick, bem como as outras quatro realizadas em memória de Rutherford sob os auspícios da Royal Society, dão-nos um relato bastante completo da sua vida e da sua obra. Não vou fazer aqui uma recapitulação; limitar-me-ei a um comentário sobre certos aspectos da maneira de pensar de Rutherford, relativamente ao experimentador, que parecem ter hoje um interesse especial.

Aqui em McGill, o declínio exponencial das substâncias radioactivas foi, pela primeira vez, observado e interpretado como devido à desintegração espontânea dos áto-

mos. Passou um quarto de século até que esta brilhante interpretação fenomenológica de Rutherford e Soddy tivesse uma explicação teórica em termos da mecânica ondulatória. Hoje, com os desenvolvimentos surpreendentes da última década e a descoberta de várias famílias de partículas elementares instáveis, vemos que a desintegração espontânea dum quantidade sub-atômica de matéria em quantidades menores é um dos factos mais significativos do mundo sub-atômico. Realmente estas famílias de partículas elementares não são, de um ponto de vista superficial, diferentes das famílias de elementos radioactivos, para cujo conhecimento Rutherford e os seus colaboradores tanto contribuíram. Uma diferença essencial é que não se encontrou ainda uma explicação teórica para a desintegração espontânea de partículas elementares, e muitos teóricos pensam que se não deve procurar nenhuma, pois julgam que um tal comportamento é apenas uma propriedade fundamental da matéria microscópica.

O meu contacto pessoal com Sir Ernest Rutherford, começou em 1921, quando me formei em Física por Cambridge. Rutherford regia a Cadeira Cavendish havia dois anos, e estava ainda ocupado na montagem do Laboratório e em reunir os seus antigos colegas de Manchester, após a dispersão causada pela primeira guerra mundial. No primeiro ano depois da guerra, um jovem

* This has been reproduced with the permission of the Royal Society. The author wishes to state that a few amendments have been made where the facts quoted were incorrect.

físico japonês, Shimizu, veio trabalhar em Cambridge, e Rutherford iniciou-o no problema de usar a câmara de Wilson para o estudo do processo de desintegração dos núcleos de azoto, que ele havia descoberto em Manchester, pelo método das cintilações, durante os últimos anos da guerra. O próprio Rutherford, juntamente com Chadwick, continuou activamente estas experiências e conseguiu mostrar que a maior parte dos elementos leves podiam ser desintegrados por partículas α rápidas. Rutherford compreendeu que o método das cintilações, que era conveniente para a detecção dos protões rápidos emitidos pelos núcleos bombardeados, não era capaz de revelar os pormenores do processo da colisão.

Por volta de 1911 Wilson, depois de quinze anos de uma experimentação cuidadosa e árdua, tinha aperfeiçoado o seu método de revelar os traços de partículas atómicas individuais. Algumas das suas primeiras fotografias continuam sendo hoje, do ponto de vista técnico, as melhores jamais obtidas. Rutherford viu que o método da câmara de Wilson era excelentemente adequado para a elucidação dos mais finos pormenores dos processos de desintegração atómica; a única dificuldade era o número de fotografias necessárias.

As experiências por meio de cintilações tinham já mostrado claramente que o número de partículas α que deveriam desintegrar um núcleo de azoto na câmara de Wilson era extremamente pequeno. Não se podia contar com mais do que dez desintegrações por cada milhão de traços de partículas α fotografados. Rutherford, confiante, propôs a Shimizu a tarefa de construir uma câmara de Wilson com a qual se pudesse obter uma grande quantidade de fotografias. Shimizu resolveu este problema introduzindo um êmbolo que, accionado por um volante, se movia continuamente de uma maneira harmónica provocando várias expansões por segundo em vez da expansão única e rápida que ocorre na câmara de Wilson vulgar. Esta câmara era pequena, apenas

com 6 cm de diâmetro e 1 cm de profundidade. Shimizu projectou também uma pequena e elegante máquina fotográfica por meio da qual duas imagens da câmara de Wilson eram fotografadas no mesmo filme. Com este aparelho fotografou cerca de 3 000 traços α e observou vários traços ramificados devido a colisões de partículas α com núcleos de azoto.

Infelizmente Shimizu teve de regressar bruscamente ao Japão e, assim, o trabalho foi interrompido. Foi então que Rutherford me perguntou se o queria continuar o que, é claro, eu estava extremamente interessado em fazer.

Assim, o meu primeiro trabalho de investigação consistia em continuar o trabalho começado por Shimizu. Usei muitas partes do aparelho original, mas alterei o ciclo de expansão de um movimento harmónico contínuo para uma série de expansões rápidas de quinze em quinze segundos. O aparelho foi completamente automatizado e, quando tudo ia bem, era possível tirar 1 000 fotografias por dia, mostrando traços de 20 000 partículas α . Primeiro estudei em pormenor os frequentes traços bifurcados que se formam quando uma partícula α colide com o núcleo de um átomo de gás, e mostrei, por medidas precisas do ângulo de bifurcação, que as colisões eram elásticas, dentro dos erros experimentais. Contudo, entre cerca de 400 000 traços fotografados durante 1924, foram encontradas seis bifurcações que não eram claramente colisões elásticas. Depois de medidas cuidadosas, mostrou-se que estas representavam a desintegração de um átomo de azoto pelo choque de uma partícula α rápida, com emissão de um protão e captura de uma partícula α . O núcleo resultante, formado por este processo, era claramente um isótopo do oxigénio, de massa 17, então desconhecido. Assim, o problema posto quatro anos antes por Rutherford — sobre o que acontecia à partícula α na desintegração de um núcleo de azoto — estava resolvido.

Muito do meu trabalho subsequente de

investigação foi profundamente influenciado por este primeiro problema, proposto por Rutherford. Compreendi que não podia sozinho, como jovem estudante graduado em Física, ter escolhido o meu próprio tema de investigação com uma fracção do sucesso que teve a escolha feita por Rutherford. Assim, aprendi muito cedo a importância vital do papel do director de investigação na escolha de problemas prometedores para os seus colaboradores que se iniciam na investigação. Aprendi também a importância de se atingir um alto nível na técnica de tirar fotografias na câmara de Wilson. Nisto, o meu desejo era não ficar aquém do nível atingido por C. T. R. Wilson no seu trabalho pioneiro: uma tarefa nada fácil quando se tem de obter dezenas de milhares de fotografias ou quando, mais tarde, as câmaras de Wilson aumentaram de tamanho e complexidade. Se não é mantido um alto nível técnico, pode acontecer que as raras fotografias que interessam não sejam suficientemente boas para mostrarem exactamente o que se passou. Relacionado com isto, está a importância do estudo cuidadoso e quantitativo de todos os fenómenos sub-atómicos normais que ocorrem na câmara, de tal forma que, quando algo de estranho se passa, seja imediatamente reconhecido como tal. Durante dezassete anos após Rutherford me propor o trabalho com câmaras de Wilson continuei, com pequenos intervalos, a usá-la nos meus estudos. A partir daí, o meu trabalho pessoal diminuiu, mas a investigação com câmara de Wilson, continua sendo uma actividade fundamental no meu laboratório.

Até cerca de 1940, a câmara de Wilson era o único método visual de estudar partículas atómicas. Depois, surgiu a emulsão fotográfica que originou, nos últimos anos, uma grande quantidade de descobertas importantes. Finalmente, há poucos anos, o advento da câmara de bolhas, inventada por Glaser, forneceu um novo instrumento de grande alcance.

A característica essencial destes três

métodos distintos, embora análogos (câmara de Wilson, câmara de bolhas e emulsão fotográfica) é que os pequenos pormenores de processos sub-atómicos individuais são observados directamente. Assim, *uma só fotografia*, tènicamente boa, pode servir para verificar as leis da conservação do momento, energia, massa e carga, para revelar um novo fenómeno, ou para descobrir uma nova partícula. Contudo, para se obter alguma informação sobre as *forças* que caracterizam a interacção entre duas partículas quaisquer, é necessária informação estatística sobre a frequência com que ocorrem os diferentes tipos de acontecimentos.

Vemos assim, que o desenvolvimento destes métodos se faz ao longo de duas vias: uma melhoria na precisão das medidas em acontecimentos individuais e o aumento do número de acontecimentos estudados mantendo, evidentemente, a esperança de que ambos os objectivos possam ser atingidos simultaneamente.

Recordando os quarenta anos da carreira científica de Rutherford, com a sua espantosa quantidade de descobertas, é de grande interesse tentar elucidar alguns dos segredos do seu sucesso. Muitos dos seus contemporâneos pensaram nisso e todos parecem de acordo sobre muitos factores importantes. O extremo poder de concentração de Rutherford num problema particular, até que o pudesse ver de todos os lados e de todos os ângulos; a sua viva imaginação figurativa, no espaço e no tempo, dos acontecimentos do mundo das partículas sub-atómicas, que era o seu campo de investigação favorito; a sua habilidade em projectar aparelhos simples e perfeitamente adequados aos trabalhos a realizar; a sua capacidade de selecção para traçar e seguir rumos de investigação compensadores; a sua visão para o imprevisto; o pouco caso que fazia das matemáticas, mas o grande sucesso que tinha quando as empregava; e, por último, o seu entusiasmo sem limites para descobrir mais coisas acerca do mundo físico. A bem conhecida história da descoberta de

Rutherford, aqui em McGill, da emanção do tório, como resultado de ter seguido a observação ocasional, por Owen, de que a ionização devida a uma certa preparação de tório era notavelmente afectada por correntes de ar, tem uma moral óbvia para todo o experimentador. Possa cada jovem cientista recordar esta história e conservar os olhos abertos e a inteligência atenta à possibilidade de que uma irritante deficiência dos aparelhos em dar resultados consistentes possa, uma vez ou duas durante uma vida, esconder uma descoberta importante.

O caso da difusão das partículas α , por outro lado, foi uma descoberta menos ocasional do que inesperada; Rutherford procurava especificamente este efeito, mas ficou extraordinariamente surpreendido quando o encontrou. Num certo sentido, Rutherford procurava o que não seria de esperar, porque compreendeu perfeitamente que a grande intensidade dos campos eléctricos necessários para explicar a difusão segundo ângulos grandes, deveria implicar a ideia revolucionária de uma carga eléctrica altamente concentrada no átomo. Em poucos meses, encontrou matematicamente a probabilidade de difusão das partículas α segundo um ângulo determinado, na hipótese de toda a carga positiva do átomo estar concentrada num núcleo central muito pequeno, de tal forma que a força mútua seja a do inverso do quadrado da distância; esta previsão foi posta à prova experimentalmente no laboratório e concluiu-se que era correcta. Assim nasceu a teoria nuclear do átomo: esta foi a maior de todas as grandes descobertas de Rutherford.

Parece-me que tem muito interesse esquetizar esta relação entre a teoria e a experiência, não só através da carreira de Rutherford, mas também nos desenvolvimentos subsequentes em campos semelhantes. Entre estes destaca-se o campo das partículas elementares instáveis, que seguramente teria

agradado a Rutherford. Nos últimos anos provou-se efectivamente ser um dos campos que tanto lhe agradaria — um dos seus «campos de Tom Tiddler onde tudo pode acontecer». Tem também, creio eu, valor prático estudar esta interrelação, porque aqueles que estão ligados às tarefas práticas da educação de jovens investigadores e à tática e estratégia de investigação, devem ter de pensar muitas vezes nestas questões. De especial importância é, por um lado, a relação entre programas de investigação e descobertas acidentais e, por outro lado, entre experiências planeadas para verificar algumas previsões teóricas específicas e as feitas para explorar um campo promissor, com atenção a qualquer coisa que possa acontecer.

Existem, na verdade, muitas lendas acerca da maneira como Rutherford criticava, com humor, os físicos teóricos: «Eles brincam com os seus símbolos mas nós, no Cavendish, descobrimos os factos reais da natureza». Ele próprio fazia um uso contínuo e extremamente eficiente de conceitos físicos simples, tais como a conservação da energia e do momento, da teoria orbital em dinâmica elementar e dos conceitos da teoria das probabilidades. Dificilmente, penso, teria ele afirmado que estes conceitos pertencem à teoria. Rutherford chamava teoria aos desenvolvimentos mais matemáticos, tais como a mecânica quântica. Apesar da sua amizade pessoal e da sua admiração pelo trabalho de Niels Bohr, era claro que não achava fácil assimilar a teoria quântica à sua própria maneira de pensar.

Embora este dito de espírito de Rutherford fosse apenas ligeiramente sério, servenos bem, por nos encorajar a estudarmos cuidadosamente quais foram, na verdade, os papeis da previsão teórica e da descoberta acidental, na história da física das partículas elementares, durante os últimos quarenta anos, isto é, desde que Rutherford se mudou de Manchester para Cambridge.

Começemos por indicar qual a estrutura da matéria, tal como era conhecida quando Rutherford aceitou a Cadeira Cavendish, em

1919. Então apenas duas partículas elementares eram conhecidas, o prótão e o electrão. O melhor modelo da parte exterior do átomo, e também das suas propriedades espectroscópicas e químicas, era ainda o modelo orbital de Bohr. Alguns anos teriam ainda de passar antes que o trabalho de Broglie e Schrödinger mostrasse que os electrões atômicos eram mais correctamente representados por um sistema de ondas estacionárias em torno do núcleo. Pensou-se então que o próprio núcleo era constituído por protões e electrões, apesar de ser bem reconhecida a dificuldade de juntar no núcleo um grande número de electrões.

A partir de 1919 uma verdadeira revolução teve lugar no nosso conhecimento sobre as partículas elementares da natureza. Isto foi devido, em parte, a uma revolução na teoria e, em parte, a um grande número de descobertas experimentais mais ou menos inesperadas. Os grandes marcos do avanço teórico foram o aparecimento das mecânicas ondulatória e quântica a partir do estudo do exterior do átomo, a teoria relativística do electrão de Dirac e a sua previsão de anti-matéria, a previsão do neutrino, por Pauli e a teoria de Yukawa das forças nucleares e previsão do mesão. Do lado experimental, salientemos a descoberta do neutrão, do electrão positivo, dos mesões μ e π e da grande família das partículas estranhas, isto é, mesões pesados e hiperões. O número total de partículas e anti-partículas que podem, razoavelmente, ser consideradas elementares, é agora de trinta.

Quando Rutherford fez, em 1920, as suas famosas especulações sobre a possível existência do neutrão, ele admitia-o como uma íntima combinação de um electrão e de um prótão, de certa maneira como o estado de menor energia do modelo de Bohr do átomo de hidrogénio. Hoje em dia, o neutrão é correctamente tratado como uma partícula elementar. Contudo, é interessante notar que se Rutherford tivesse vivido o suficiente para conhecer a prova experimental de que o

neutrão decaí espontaneamente num prótão e num electrão, certamente teria afirmado que a sua imagem inicial não estava muito longe da verdade. De facto, porém, não parece hoje geralmente útil supor que, quando uma partícula se transforma noutras, estas últimas estejam, em qualquer sentido real, existindo previamente na partícula mãe. Durante 1919-20, Rutherford fez várias experiências para detectar o neutrão previsto. Nenhuma delas teve sucesso e agora vemos que nenhuma estava no caminho certo. O neutrão foi descoberto por Chadwick em 1932, como resultado de uma complicada sucessão de descobertas experimentais inesperadas, feitas em diferentes países. O princípio foi a descoberta, por Bothe, na Alemanha, de que, quando partículas α do polónio bombardeiam o berílio, são produzidos raios γ duros de cerca de 5 MeV. Prossequindo por este caminho Joliot, em França, estudou aqueles raios com uma câmara de Wilson, usando um alvo de parafina, ficando muito surpreendido ao encontrar, juntamente com electrões rápidos, um certo número de protões rápidos. Joliot tentou atribuir estes protões ao recuo Compton de raios γ muito enérgicos — uma energia de cerca de 50 MeV seria necessária. Então, Chadwick, lendo o trabalho de Joliot, e com o conhecimento das especulações de Rutherford sobre as possíveis propriedades do neutrão, reconheceu imediatamente que aquela partícula tinha sido encontrada. Os traços dos protões de Joliot não eram devidos ao recuo produzidos por fotões mas originados pelos neutrões há tanto tempo procurados. Depois de algumas semanas de brilhante experimentação e raciocínio, Chadwick publicou o seu artigo clássico no qual foi anunciada a descoberta do neutrão e descritas as suas propriedades. Na conferência aqui realizada em memória de Rutherford, em 1953, Chadwick disse modestamente «que a descoberta do neutrão apareceu naturalmente na linha geral de investigação traçada, anos antes, por Rutherford». O caminho real percorrido foi, como vimos, bastante sinuoso e incluiu duas des-

cobertas acidentais em dois países diferentes.

Em 1928, Dirac fez a sua famosa teoria do electrão. Ao procurar uma equação para o electrão, em mecânica quântica, que fosse consistente com o princípio da relatividade restrita, não só explicou de uma maneira natural o spin e momento magnético do electrão, então recentemente descoberto, mas mostrou que a equação implicava a existência de partículas idênticas aos electrões e com carga positiva. Enunciou algumas das suas propriedades, tais como a maneira como podiam ser produzidas por raios γ energéticos, ou como podiam desaparecer ao combinar-se com um electrão, originando um fotão. Naquele tempo estas conclusões pareciam tão estranhas que o próprio Dirac tentou, durante um certo período, evitá-las, modificando a sua teoria por forma a que as partículas positivas fossem protões. A tentativa falhou: a teoria não podia ser alterada de forma a não prever o electrão positivo. Contudo, os físicos não pareciam tomar muito a sério estas previsões. Quando Carl Anderson, em 1932, descobriu experimentalmente esta partícula na radiação cósmica, isso pareceu-lhe, como a quase toda a gente, uma descoberta ocasional e totalmente inesperada. Anderson não mencionou a teoria de Dirac e muito provavelmente nunca tinha ouvido falar dela. Quando alguns meses mais tarde Occhialini e eu, de uma forma igualmente inesperada, encontramos um grande número de traços de electrões positivos nos raios cósmicos, conhecíamos o trabalho de Dirac, pois que ele trabalhava em Cambridge e em ligação com as nossas experiências. Assim, estávamos aptos a discutir os nossos resultados experimentais à luz da sua teoria, e a afirmar que os positrões, deviam, de facto, ter sido criados pelo processo da produção de pares. Isto foi rapidamente verificado por Chadwick, Occhialini e eu. Além disso, foi possível identificar a radiação observada por Gray e Tarrant durante a absorção de raios γ

duros como os fotões de aniquilação previstos na teoria de Dirac.

A elegância e generalidade da teoria de Dirac levou a acreditar que também seria aplicável aos protões. Foi o ponto de partida para uma longa pesquisa do protão negativo ou anti-protão, que apenas há poucos anos foi coroada de sucesso.

Em 1935, Yukawa tentou explicar as intensas forças entre nucleões e, seguindo Heisenberg, supôs que estas forças eram do tipo de permuta como era usual na ligação homopolar dos átomos, em muitas moléculas. Yukawa fez notar que isto implicava a existência de uma partícula nova, de massa cerca de 300 vezes a massa do electrão, e ainda que esta partícula devia ser instável, decaindo num electrão com uma vida média de cerca de 10^{-18} segundos. Em 1938, a descoberta acidental, por Anderson e Street, de traços de uma partícula, com massa aproximada daquela, nos raios cósmicos, parecia confirmar a teoria de Yukawa. Mostrou-se, contudo, que não era a partícula de Yukawa que tinha sido descoberta, mas uma partícula bastante inesperada e estranha, chamada agora mesão μ . Esta partícula tinha uma interacção muito fraca com nucleões, em contradição com a partícula de Yukawa, cuja característica essencial era ser altamente interactiva. A verificação da previsão de Yukawa teve de esperar a descoberta acidental do mesão π em 1947, por Powell, Occhialini e colaboradores, em Bristol, no decurso de estudos de traços de raios cósmicos em placas fotográficas. Contudo, a previsão de Yukawa ajudou notavelmente os experimentadores a descobrirem o mesão μ porque os levou a estar atentos a partículas de massa intermédia. Além disso, introduziu, pela primeira vez, o conceito de partícula nuclear instável e assim muito auxiliou os experimentadores a interpretar, por meio desta propriedade, certas anomalias dos raios cósmicos. A dificuldade teórica em explicar a preponderância dos mesões μ , que indica uma forte interacção no processo de produção, com a sua muito pequena interacção

com a matéria levou, em 1947, à sugestão, por Marshak e Bethe, de que talvez uma outra partícula pesada fosse primeiro produzida, a qual decairia subsequentemente num mesão μ .

Quando consideramos as primeiras três das partículas estranhas — as partículas Λ , carregadas e neutra, descobertas por Rochester e Butler, em Manchester, e o mesão τ , por Powell e colaboradores, em Bristol — concluímos que nenhuma sugestão da sua possível existência precedeu a sua descoberta accidental, em 1947. Em anos seguintes o hiperão Λ , o hiperão cascata, o hiperão Σ , a partícula θ^0 e os outros mesões K carregados (para usar os seus antigos nomes fenomenológicos), foram todos descobertos experimentalmente pelo estudo da interacção dos raios cósmicos energéticos, usando emulsões fotográficas ou a câmara de Wilson. Os experimentadores estavam atentos a qualquer coisa que pudesse aparecer. De há muito, tantas coisas se tornaram conhecidas acerca de tantas partículas novas, que se tornou possível encontrar ordem nos fenómenos complexos, e assim estar-se em posição de formular teorias fenomenológicas, a partir das quais se pudessem fazer previsões pormenorizadas sobre o comportamento de algumas das partículas ou, nalguns casos, prever a existência de outras. Foi o caso da partícula θ^0 e dos hiperões neutros Σ e Ξ .

O primeiro argumento teórico importante sobre o comportamento das partículas estranhas foi proposto por Pais, em 1952. Experimentalmente, as partículas estranhas são produzidas copiosamente em colisões energéticas, sendo o seu número uma pequena percentagem do número de mesões π produzidos. Isto indica que elas devem interactuar com os núcleos de uma maneira intensa, comparável, de facto, com a forte interacção entre mesões π e nucleões. Por outro lado, todas as partículas estranhas têm uma vida média entre 10^{-10} e 10^{-18} s, o que é muito longo comparado com o tempo característico (da ordem de 10^{-25} s) que é de esperar para

processos de declínio associados directamente com interacções fortes. Pais sugeriu que possivelmente todas as partículas estranhas eram produzidas aos pares. Quando duas partículas estranhas interactuam conjuntamente com um nucleão, fazem-no de uma forma intensa e assim são copiosamente produzidas. Mas quando uma só partícula interactua, a interacção é fraca, originando desta forma uma vida longa. Por exemplo, no declínio de um hiperão Λ num próton e num mesão π , apenas uma partícula estranha está presente, e assim a interacção é fraca e pequena a razão de desintegração.

Esta previsão foi cedo verificada pela experiência no caso da colisão de mesões π negativos de grande energia, obtidos por meio de prótons no cosmotrão de Brookhaven. Concluiu-se que se produziam pares de partículas estranhas, neste caso um hiperão Λ e um mesão K^0 . Crê-se agora que esta produção associada é uma regra geral.

Subsequentemente, Gell-Mann e, independentemente, Nishijima propuseram um esquema empírico bastante simples para descrever o comportamento observado na produção e desintegração das partículas estranhas. A cada partícula é atribuído um novo número quântico S , a chamada «estranheza» (*): supõe-se que a soma algébrica dos valores de S se conserva nos processos de produção, que são todos interacções fortes; e que muda de ± 1 durante os processos de desintegração fracos. Este esquema descrevia, com sucesso, todos os factos conhecidos no tempo, e previa correctamente alguns factos novos. Embora a «estranheza» seja essencialmente um número quântico empírico, sabe-se agora que ela está relacionada de uma maneira bem definida com o spin isotópico e a paridade, que provaram ser conceitos de grande utilidade na física nuclear e na física dos mesões π .

Uma outra descoberta puramente empírica é a da conservação dos bariões — sendo um barião uma partícula com massa igual ou

(*) Em inglês, *strangeness*; em francês, *étrangeté*.

maior que a dos nucleões — ou, mais geralmente, a conservação do número de bariões menos o número de anti-bariões. Vemos isto a partir do facto de que quando um hiperão se desintegra dá sempre um nucleão. A única ocasião em que um nucleão desaparece é quando se conjuga com a sua anti-partícula (aniquilação). Provou-se que isto ocorria com anti-protões e anti-neutrões. Crê-se agora que todas as partículas têm as suas próprias anti-partículas, quer sejam fermiões ou bósons, embora a teoria original de Dirac se aplique apenas às primeiras. Agradeço ao Prof. Salam a seguinte informação sumária sobre anti-partículas. Os pares partícula — anti-partícula conhecidos são:

$$(\nu, \bar{\nu}), (e^+, e^-), (\mu^+, \mu^-), (\pi^+, \pi^-), (K^+, K^-), \\ (\theta^0, \bar{\theta}^0), (p, \bar{p}), (n, \bar{n}), (\Lambda, \bar{\Lambda}).$$

Espera-se que $\Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0, \Xi^0, \Xi^-$, tenham as suas anti-partículas com as quais se possam aniquilar em partículas leves.

Ninguém pode contemplar esta lista de trinta partículas ditas elementares sem especular sobre se algumas delas não seriam melhor consideradas como estruturas complexas. Várias tentativas foram feitas neste sentido, por exemplo, admitindo que nucleões, mesões K e π são realmente partículas elementares e que os hiperões se formam a partir destes. Mas ainda nenhuma destas teorias foi mais do que uma esperança: os cinco processos alternativos de desintegração de um mesão K mostra bem as dificuldades pertinentes. Por agora, concluamos, com Salam, que «todas as partículas são elementares, mas algumas são mais elementares do que outras». Oppenheimer comparou o estado actual da teoria das partículas estranhas com o estado da teoria dos espectros cerca de 1910, quando a duplicidade dos espectros atómicos foi reconhecida, mas se estava ainda bastante longe da descoberta do spin do electrão e mais longe ainda da teoria do electrão de Dirac.

Um dos acontecimentos mais curiosos e excitantes da história da física moderna foi

a descoberta da não conservação da paridade. A minha descrição corresponderá à maneira como ela aparece a um físico experimental de mentalidade não muito abstracta, ou antes, como ela teria aparecido a Rutherford se ele tivesse vivido o suficiente para ouvir o fim da história. O termo paridade foi introduzido para designar as propriedades das funções de onda atómicas e nucleares. Uma função de onda tem paridade ímpar ou par conforme muda ou não de sinal quando o sinal das coordenadas é mudado. Um estudo experimental pormenorizado de reacções nucleares mostra que a paridade da função de onda de um núcleo complexo se conserva durante todas as mudanças de estado. Isto foi verificado com alto grau de precisão por várias maneiras diferentes: estudo pormenorizado de transições nucleares, experiências de polarização com protões difundidos e pelo estudo de interacções fortes que ocorrem durante a produção de mesões π e de partículas estranhas. A conservação da paridade é geralmente enunciada por forma a implicar que «todos os resultados físicos devem ser independentes do facto de o observador usar um sistema de referência directo ou retrógrado». Deduzia-se disto que se qualquer reacção física se produz, a reacção correspondente a esta, vista num espelho, é também fisicamente possível. Assim, se existem electrões polarizados em sentido directo, também existem electrões polarizados em sentido retrógrado. Foi ainda postulado, por analogia com interacções fortes em núcleos, que em todos os fenómenos físicos se deveria sempre encontrar um número igual de partículas orientadas para a direita ou para a esquerda. Afirmava-se que na loja de ferragens da Natureza havia sempre tantos saca-rolhas com hélice direita como com hélice esquerda. Como exemplo da rigidez desta convicção afirmava-se que seria perdido o tempo que o experimentador dedicasse a verificar, por exemplo, se a radiação β emitida por um núcleo radioactivo é polarizada longitudinalmente com respeito à sua direcção de emissão (porque isto indicaria uma prefe-

rência da natureza por uma heliticidade direita ou esquerda); ou se haveria assimetria no número de partículas emitidas por um núcleo orientado magnéticamente.

Então, em 1956, Lee e Yang chamaram a atenção para o facto de que não havia evidência experimental para a conservação da paridade em interacções fracas, tais como a desintegração β , e indicavam a possibilidade de vários testes experimentais. Wu e colaboradores mostraram experimentalmente que as partículas β de núcleos de ^{60}Co orientados por um campo magnético eram emitidas de uma forma assimétrica relativamente à direcção do campo. Em poucas semanas, outros investigadores mostraram que as partículas β provenientes de núcleos radioactivos não orientados eram polarizadas longitudinalmente: a experiência é tão simples que podia ter lugar como trabalho prático do último ano de um curso de Física.

Os efeitos de polarização foram também demonstrados para os processos de desintegração mesão π — mesão μ — electrão e, mais recentemente, para a desintegração de algumas partículas estranhas.

É útil recordar, como Grodzins (1959) o fez num artigo recente, que uma experiência feita há muito (1928) mostrara haver forte evidência de polarização longitudinal das partículas β emitidas por substâncias radioactivas naturais. A sua história é interessante e começa com a introdução do spin do electrão, por Uhlenbeck e Goudsmit em 1925, para explicar a estrutura múltipla das linhas espectrais. Em termos do contemporâneo modelo orbital de Bohr, o spin do electrão considerava-se orientado em ângulo recto com a órbita do electrão e com sentido paralelo ou anti paralelo ao momento angular orbital. A energia de interacção entre o momento magnético do electrão nas suas duas posições e o momento magnético orbital resultava, então, na separação em duplete de um estado p .

Com estes conhecimentos, Cox, McIlwraith e Kurrelmeyer (1928), na Universidade de New-York, começaram a trabalhar no sentido

de observarem se os electrões seriam polarizados, utilizando um tipo de experiência análogo ao usado por Barkla quando descobriu a polarização dos raios X, isto é, por difusão dupla. O artigo daqueles autores foi publicado com o título «Evidência aparente de polarização num feixe de raios β ». O trabalho foi continuado por Chase, um aluno de Cox, que publicou três artigos sobre o mesmo assunto em 1929 e 1930. O método geral consistia na dupla difusão, a 90° , por meio de alvos de ouro espessos, de um feixe de partículas β . A intensidade do feixe, após a segunda difusão, era medida, visto que se variava o ângulo dos planos respeitantes à primeira e segunda difusão. Como resultado de muitas experiências, estes investigadores concluíram que a intensidade da difusão dupla era 3% maior quando o detector estava a um ângulo de 90° para a direita do que quando se encontrava a 90° para a esquerda. Os autores salientavam que a diferença entre as duas posições, era apenas a diferença entre um sistema de eixos directo e retrógrado. Concluímos que, com toda a probabilidade, «temos aqui uma verdadeira polarização devida à difusão dupla de electrões assimétricos».

Apesar de, à luz dos padrões actuais, a técnica e a disposição experimental empregadas não terem sido as melhores, parece muito provável que as experiências realmente provaram a polarização longitudinal das partículas β naturais e assim, em linguagem moderna, demonstraram a não conservação da paridade.

Se estas experiências tivessem sido seguidas, por exemplo, por qualquer dos mais jovens colaboradores de Rutherford, muitos dos quais procuravam naquele tempo experiências novas e simples para fazerem — porque este período, no Cavendish, foi menos activo do que usualmente — então a hipótese da conservação universal da paridade nunca teria sido formulada, e a assimetria essencial da natureza entre sistemas directos ou retrógrados teria sido afirmada cerca de trinta anos mais cedo do que na realidade o foi.

Sem dúvida, uma das razões pelas quais estas experiências não foram seguidas, foi a diversão de interesse ocasionada pela polarização transversal dos electrões. Isto resultou da aplicação da mecânica ondulatória à difusão de partículas em campos coulombianos, feita por Mott em 1929. Mott previa que em electrões relativistas, difundidos segundo ângulos grandes por núcleos de número atómico elevado, deviam estar polarizados transversalmente, e que isto deveria ser detectável experimentalmente pela assimetria de uma segunda difusão. Os experimentadores confirmaram em breve esta importante previsão de Mott sobre a polarização transversal, mas pareciam ter esquecido a descoberta da polarização longitudinal por Cox e seus colaboradores. O primeiro, sendo um efeito electromagnético, não entra em conflito com a conservação da paridade, ao contrário do que acontece com o segundo. Todos os experimentadores que tentaram verificar a teoria de Mott usaram electrões acelerados artificialmente com o fim de obterem melhor geometria e maior intensidade. Desde que, claro está, um tal feixe de electrões não é polarizado, apenas foi encontrada a polarização transversal, que se esperava, após a primeira difusão. Se as experiências tivessem sido feitas com uma fonte de raios β , então ambos os efeitos teriam sido encontrados: a assimetria de frente para trás, devida à polarização transversal introduzida pela primeira difusão, e a assimetria da esquerda para a direita devido à polarização longitudinal, já existente na radiação β .

De facto, a experiência de Cox não podia ser completamente interpretada sem a teoria de Mott. Hoje descrevemos o processo físico como segue. Os electrões emitidos por um núcleo de rádio têm helicidade negativa, isto é, o seu spin é anti-paralelo ao seu momento linear. Na primeira difusão a 90° a direcção do spin não muda, e assim o feixe difundido fica polarizado transversalmente sendo, por isso, assimetricamente difundido, no plano esquerdo-direito, pelo segundo alvo.

Recordando aqueles anos, não me lembro de ter lido ou ouvido falar dos trabalhos de Cox — e isto apesar de estar intimamente ligado às experiências de Dymond para verificação da previsão de Mott da polarização transversal, e de estar a trabalhar pessoalmente na verificação da outra previsão de Mott, a da difusão interdiferencial de partículas idênticas (neste caso, partículas α difundidas por núcleos de hélio).

Há também alguns aspectos curiosos na história do estudo das radiações emitidas por núcleos radioactivos, orientados magneticamente a temperaturas muito baixas. Durante quase uma década este foi um activo campo de pesquisa em vários laboratórios e foram feitos muitos estudos pormenorizados sobre a distribuição angular de raios γ relativamente à direcção orientadora do campo magnético. Um conhecimento destas distribuições, que são todas simétricas em relação ao plano normal ao campo magnético, dá informação importante sobre a natureza da transição nuclear na qual é produzido um certo raio γ . O estranho é que, apesar de muitos investigadores deverem ter pensado em fazê-lo, aparentemente nenhum deles mediu a distribuição angular de partículas β . Se o tivessem feito, a assimetria prevista por Lee e Yang e observada por Wu e colaboradores em 1956, podia ter sido descoberta três anos mais cedo.

É certo que se se constrói um modelo rutherfordiano clássico de um núcleo magneticamente alinhado, com a forma, por exemplo, de um solenóide magnético muito pequeno, não se esperaria uma assimetria entre a energia dos electrões emitidos na direcção do campo magnético ou na direcção contrária. Por outro lado, não parece de todo impossível supôr que a estrutura de um núcleo pesado possa não estar disposta longitudinalmente de uma forma simétrica em relação ao eixo magnético. Se se postula uma estrutura em forma de pera (Wilets, 1959), então deve esperar-se uma assimetria na emissão β . Assim, em retrospectiva, parece ter havido

boas razões rutherfordianas para se ter examinado, pelo menos sumariamente, a distribuição angular da emissão β , até porque a experiência não era difícil. Acontece frequentemente na história da ciência que uma teoria errada conduza o investigador a fazer a experiência correcta.

Uma situação semelhante existiu no que diz respeito à polarização de partículas β naturais, pois que, por razões puramente electromagnéticas, os electrões emitidos por um núcleo orientado magnéticamente devem ser um pouco polarizados longitudinalmente. Isto resulta da interacção do spin do electrão com o campo magnético externo e com o do núcleo, respeitando a conservação da paridade. Por outro lado, a intensa polarização longitudinal observada nas partículas β naturais, que não respeita a conservação da paridade, resulta do efeito de spin e do momento linear do electrão: quando a velocidade se aproxima da da luz, a polarização torna-se completa. Assim, se os experimentadores tivessem examinado o pequeno efeito clássico, apesar de na realidade ele ser pequeno de mais para ser observado, teriam encontrado o efeito real, que é grande. Foi isto o que Cox e colaboradores fizeram em 1928.

Além disto, havia uma razão por analogia que nos levava a esperar um grande efeito — na realidade, sabe-se agora que a analogia é falsa, mas era uma forte razão para se fazer a experiência. Mott mostrou que electrões muito rápidos se polarizam transversalmente, de uma forma quase completa, por difusão coulombiana a 90° , utilizando núcleos pesados. Isto resulta de uma interacção entre o spin e o momento linear: o electrão que se move muito rapidamente no campo eléctrico do núcleo «vê» um campo magnético muito intenso e é polarizado por ele. Uma partícula β rápida ao ser emitida por um núcleo move-se também num campo eléctrico e magnético intenso: poderá uma forte polarização longitudinal ser possível? Claro, nós sabemos agora que uma forte polarização transversal de um electrão rápido difundido

respeita a conservação da paridade, enquanto que uma forte polarização longitudinal não conserva a paridade.

O caso da desintegração mesão π — mesão μ — electrão é, talvez, o caso mais claro em que um raciocínio físico simples nos podia ter levado a esperar efeitos que estivessem em contradição com a teoria da conservação universal da paridade, segundo a qual não se devia esperar qualquer polarização longitudinal em partículas resultantes da desintegração. Efectivamente, é difícil imaginar um processo físico mais essencialmente assimétrico segundo a longitude do que a desintegração de um mesão π num mesão μ e num neutrino. Como o mesão tem, tal como o electrão, um spin igual a $1/2$, é natural supor que ele possa estar polarizado. Que se pode admitir de mais natural do que a sua polarização longitudinal, depois de ter sido produzido juntamente com um neutrino no processo assimétrico da desintegração do mesão μ ? Se assim é, então teria sido razoável esperar que a polarização pudesse ser detectada observando uma assimetria na direcção da subsequente emissão do electrão, no qual o mesão μ se desintegra.

Há vários anos, foram feitas algumas medidas, com emulsões fotográficas, da direcção de emissão dos electrões resultantes da desintegração do mesão μ : foi encontrada uma pequena assimetria relativamente ao traço do respectivo mesão. É compreensível que este trabalho não tenha sido enérgicamente continuado visto que, nos primeiros tempos da técnica das emulsões fotográficas, havia muitas investigações importantes, fáceis de realizar, e que, de facto, levaram a muitas descobertas de grande importância. Assim, as medidas simples, mas aborrecidas, necessárias para confirmar assimetrias tão pequenas foram deixadas para o futuro — até que, de facto, Lee e Yang chamaram a atenção para a sua extrema importância teórica. Sabemos agora que electrões provenientes de um mesão μ em repouso são completamente polari-

zados com helicidade negativa, com os seus spins anti-paralelos aos seus momentos. Como o spin é também conservado no processo, os dois neutrinos, que são emitidos com momentos opostos ao do electrão, devem também ter helicidade negativa.

Uma indicação da relativa simplicidade das experiências necessárias para verificar as previsões de Lee e Yang está no facto de que, nos dois anos que se lhes seguiram, centenas de experiências foram feitas em muitos países, com o fim de investigar os três efeitos principais: a polarização dos raios β naturais, a emissão assimétrica por núcleos orientados e a polarização dos mesões μ obtidos por desintegração de mesões π . Como resultado de todo este trabalho, o campo parece, por agora, estar completamente explorado, salvo, é claro, nos seus pormenores mais finos. Contudo, isto só se aplica à desintegração β e do mesão π : há ainda uma grande quantidade de trabalho para ser feito no campo das partículas estranhas.

Tem interesse recordar que não foram considerações físicas gerais, nem estudos pormenorizados dos processos de desintegração β e do mesão μ , que levantaram, pela primeira vez, dúvidas sobre a validade universal da conservação da paridade: o primeiro estímulo foi o resultado experimental de que duas das partículas estranhas acabadas de descobrir tinham esquemas de desintegração diferentes em estados de paridade

oposta, mas tinham massas e períodos idênticos, e assim, muito provavelmente, eram uma e mesma partícula.

A moral, para os experimentadores, deste curioso fragmento da história da Ciência, é clara. Muitos deles foram dissuadidos de fazer algumas experiências simples mas importantes por causa das previsões de uma teoria que não compreendiam claramente — porque se a compreendessem, teriam visto que não tinha uma base sólida.

Gostaria de saber o que Rutherford teria pensado desta história excitante, com a sua complexa interacção entre teoria e experiência; e da incapacidade dos experimentadores em fazerem experiências simples, fornecendo os resultados aos teóricos — que brincam com os seus símbolos — para obterem as respostas correctas.

BIBLIOGRAFIA

- Chase, C. T., *Phys. Rev.*, **34**: 1069, 1929; **36**: 984; **36**: 1060, 1929.
 Cox, R. T.; McIlwraith, C. G. e Kurrelmeyer, B., *Proc. Nat. Acad. Sci. Wash.*, **14**: 544, 1928.
 Gródzins, L., *Proc. Nat. Acad. Sci., Wash.*, **45**: 399, 1959.
 Wilets, L., *Science*, **129**: 361, 1959.

P. M. S. BLACKETT, F. R. S.

(Conferência realizada na Universidade de McGill, em 29 de Setembro de 1958)

(Tradução de J. Sousa Lopes)