

## O núcleo

Tradução de uma conferência proferida em Outubro de 1951, por Enrico Fermi, no Congresso para a celebração do vigésimo aniversário da fundação do *American Institute of Physics* e publicada em *Physics Today* que, por especial atenção, autorizou a *Gazeta de Física* a reproduzi-la.

No período de vinte anos, decorrido desde a fundação do American Institute of Physics, a Física Nuclear desenvolveu-se pelo menos tão rapidamente como qualquer outro ramo da Física. Há vinte anos o neutrão não tinha ainda sido descoberto e admitia-se geralmente que o núcleo era constituído por protões e electrões. Este simples facto pode dar uma ideia da natureza exponencial do nosso progresso; mas recordemo-nos que foi aproximadamente há quarenta anos que a descoberta do núcleo foi anunciada por Rutherford...

O progresso da Física Nuclear nas últimas quatro décadas, tal como o dos outros ramos da Física, verificou-se em variadíssimas direcções quer no domínio da técnica quer no do conhecimento fundamental. Durante esse período a energia das máquinas aceleradoras, por exemplo, aumentou gradualmente para valores da ordem de  $10 - 10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^8$  electrão-volts e é de esperar que se atinja brevemente a energia de  $10^9$  electrão-volts. No entanto, estamos ainda longe da energia das partículas que se encontram na radiação cósmica e isso é um problema permanentemente posto aos construtores de aceleradores de grande energia. Quanto às fontes de neutrões o progresso é ainda mais acentuado: com os ciclotrões obteve-se um fluxo aproximadamente um milhão de vezes maior do que o que se obtinha com as pequenas fontes de rádio-berílio e com os reactores atómicos, um fluxo também aproximadamente um milhão de vezes maior do que o que se obtinha com os ciclotrões.

Lógicamente verificaram-se acréscimos proporcionais nas verbas gastas em investigação. É notável também o acréscimo do número de físicos e o do número de pessoas que vão assistir a conferências sobre Física — se eu posso julgar pela assistência nesta sala.

Avanço técnico menos espectacular do que os referidos acima, mas não menos importante em minha opinião, verificou-se no desenvolvimento dos processos de detecção das radiações. Seria suficiente mencionar os contadores de Geiger-Müller, as câmaras de ionização e a mais recente e muito importante descoberta do contador de cintilação. Este contador faz automaticamente o que Rutherford e os seus discípulos tão laboriosamente faziam, quando observavam as minúsculas cintilações que resultam do choque de uma partícula alfa com um cristal. As técnicas electrónicas extremamente aperfeiçoadas que se usam com o contador de cintilação reduziram o tempo de contagem para valores da ordem de  $10^{-9}$  segundos, e menores. Pode medir-se assim, directamente, o tempo que uma partícula, movendo-se com uma velocidade próxima da da luz, leva a percorrer a distância de alguns pés e consequentemente obter a velocidade da partícula.

A câmara de Wilson levou ao desenvolvimento da câmara de difusão que promete ser um dos instrumentos fundamentais na investigação das reacções das partículas elementares. As placas fotográficas foram aperfeiçoadas até ao ponto de constituírem excelentes detectores da passagem de partículas.

Estes desenvolvimentos técnicos resultaram em parte, e em grande parte promoveram-no, de um progresso muito importante no conhecimento do núcleo e dos seus constituintes. Temos presentemente o que parece ser a compreensão final de, pelo menos, as generalidades da estrutura nuclear — o núcleo constituído por prótons e neutrões. Compreendemos razoavelmente as características do espectro beta. Descobrimos centenas de reacções nucleares e centenas de novos isótopos radioactivos, do que resultou a criação de um novo ramo da arte da Ciência Nuclear que inclui a Radioquímica e todas as técnicas complexas relacionadas com o uso de indicadores em Química e em Biologia.

A descoberta da fissão conduziu à ideia da possibilidade de reacções em cadeia, seguida a curto prazo pela construção de reactores nucleares. Este foi o ponto de partida para a nova ciência da Engenharia Nuclear. A espectroscopia do núcleo está-se aproximando em complexidade, embora de modo algum em clareza, da do átomo. Tabelas dos níveis de energia nuclear com as transições correspondentes por emissão de radiação gama e outras, começam a adquirir uma tal complexidade que nos fazem recordar os primitivos atlas dos níveis atômicos em uso no princípio da década que se seguiu a 1920. A medição de massas nucleares e momentos magnéticos, essencialmente pelas técnicas da espectroscopia de massa e das ressonâncias em radiofrequência, tornou-se uma arte extremamente precisa. Aprendeu-se muito acerca de partículas elementares e, com a ajuda da radiação cósmica, descobriram-se outras mais. Verificou-se também um progresso notável na determinação do espectro beta e, recentemente, a própria desintegração do neutrão com emissão de uma partícula beta, foi investigada de uma maneira bastante completa.

O conjunto de dados resultante destas descobertas constitui um desafio à nossa capacidade de compreensão mas infeliz-

mente capacidade de compreensão não é coisa que possamos controlar à nossa vontade. A situação actual pode ser ilustrada escolhendo, com o propósito de os discutirem, dois dos muitos problemas hoje postos aos físicos nucleares.

Para o esclarecimento dos problemas do átomo um dos passos mais importantes foi o reconhecimento de que é útil considerar órbitas individuais para os electrões no átomo. Isto, não nos esqueçamos, constitue apenas uma aproximação, (de facto uma aproximação grosseira), mas no entanto fornece um valioso ponto de partida para o estudo de átomos complexos que contêm grande número de electrões. Quando para os físicos se tornou razoavelmente certo que o núcleo era constituído de prótons e neutrões, levantaram-se problemas respeitantes à possibilidade de existência de órbitas para essas partículas. Poderia a estrutura nuclear ser interpretada em termos do modelo geral da estrutura atômica por atribuição aos vários neutrões e aos vários prótons no interior do núcleo de qualquer coisa como órbitas individuais e estados individuais? Se assim fosse, poderia atingir-se uma melhor compreensão dos níveis nucleares e da estrutura nuclear a partir do modelo muito mais simples dos estados individuais.

Não foi dada ainda uma resposta definitiva àquela questão embora a Ciência Nuclear tenha durante muito tempo desanimado «oficialmente» todas as tentativas de resposta afirmativa.

Tem-se objectado que os constituintes do núcleo estão tão intimamente ligados e actuam uns sobre os outros tão rapidamente que é pouco provável que a consideração de órbitas individuais possa levar a qualquer compreensão da estrutura nuclear.

Considere-se um nucleão deslocando-se no núcleo ao longo da sua órbita entre os outros nucleões. Se o livre percurso médio em relação a colisões fosse 1, este nucleão

colidiria com os outros neutrões e protões e a sua órbita seria destruída depois de ele ter percorrido uma distância igual ao seu livre percurso. Um critério que se poderia adotar para decidir se é ou não razoável falar de órbitas individuais é o de comparar o livre percurso médio com as dimensões da órbita previsível. Se o livre percurso médio é grande pode considerar-se seriamente a existência de órbitas para os nucleões.

Mas se o livre percurso médio é muito menor do que as dimensões da órbita a consideração das órbitas tornar-se-á bastante impraticável. Sucede que é um problema muito difícil o de decidir acerca da extensão do livre percurso médio, mas se se considerar simplesmente a intensidade das acções entre o neutrão e as outras componentes do núcleo é-se levado a um valor que parece demasiadamente pequeno.

A despeito deste argumento, quer neste país quer na Alemanha, têm-se acumulado razões que nos fazem crer que as órbitas realmente existem. O facto melhor conhecido que justifica uma tal hipótese é a descoberta dos chamados «números mágicos»: trata-se dos números 2, 8, 20, 50, 82, 126. Quando um núcleo contém um número de protões ou de neutrões igual a um dos números mágicos, é particularmente estável, como se uma camada de protões ou de neutrões tivesse sido completada.

Esta e outra evidência a discutir mais tarde indicam que a hipótese de existência de órbitas é muito melhor do que a discussão anterior poderia ter sugerido. Parece que, por qualquer razão, o livre percurso médio deve ser maior do que se poderia esperar de um cálculo um tanto aproximado do seu valor. Uma explicação possível para que tal aconteça pode talvez encontrar-se no princípio de Pauli, de acordo com o qual seriam proibidas colisões entre duas partículas quando, depois da colisão, uma das partículas fosse para um estado já ocupado.

Uma outra possível explicação do valor elevado do livre percurso médio poderá talvez envolver a propriedade de saturação das forças nucleares. Já foi sugerido, por exemplo, que o campo mesónico responsável por estas forças, poderia ter um carácter tão linear e atingir um nível de saturação na matéria nuclear devido à densidade elevada dos nucleões presentes. Apesar de que nenhuma das duas possibilidades acima indicadas foi até agora analisada até ao ponto de com elas se poderem elaborar teorias satisfatórias é hoje convicção bastante geral de que muitas das características do modelo que admite a individualidade das partículas impor-se-ão em última análise como correctas.

Uma outra razão forte para a aceitação deste modelo é a explicação detalhada dos números mágicos em termo da hipótese de uma ligação spin-órbita muito forte. Maria Mayer aqui em Chicago, e os investigadores na Alemanha que desenvolveram independentemente ideias semelhantes, mostraram que muitas características dos níveis nucleares isoméricos apoiam claramente aquele ponto de vista.

Presentemente não se compreende a origem da ligação spin-órbita que é sugerida por razões de ordem empírica. Tal compreensão possivelmente só surgirá quando se tiver desenvolvido uma teoria satisfatória das forças nucleares. De momento devemos tomar a existência de tal ligação como um facto empírico.

Apesar da nossa compreensão da situação ser apenas parcial, a hipótese da existência de órbitas na organização do núcleo oferece um modelo que nos permite uma esperança de obter uma compreensão, pelo menos qualitativa, da estrutura nuclear, tendo já sido possível enquadrar neste esquema um grande número de detalhes.

É naturalmente impossível esperar qualquer compreensão profunda da estrutura do núcleo sem conhecer detalhadamente as forças que actuam entre os constituintes

elementares do núcleo — entre neutrão e protão, entre protão e protão e entre neutrão e neutrão.

O método experimental clássico de investigação das forças nucleares tem sido o estudo de «scattering». Faz-se incidir um neutrão sobre um protão e vê-se como ambos são desviados. Das características da deflexão — a distribuição angular, a dependência da energia, etc. — é de esperar que se possa deduzir a força que a determina. As primeiras experiências realizadas por TUVE, HERB, e outros, interpretadas por Breit, revelaram-nos a existência de uma interacção entre nucleões nucleares só sensível a pequena distância que é responsável pelo facto de que as partículas se mantêm associadas.

Mais tarde surgiu a teoria de Yukawa que nos ajudou grandemente na compreensão do problema visto ter-nos oferecido, pela primeira vez, um modelo sobre o qual poderíamos basear as nossas considerações. O modelo é bastante semelhante em muitos aspectos ao das forças electromagnéticas: uma partícula produz um campo e esse campo actua sobre outra partícula. Neste caso contudo, Yukawa teve de enfrentar o problema adicional de elaborar uma teoria que teria automaticamente de dar conta do carácter de pequeno alcance das forças nucleares. Yukawa reconheceu que um campo cujos quanta tivessem massa zero (tal como os fotões) teria acção a grande distância, enquanto que um campo cujos quanta tivessem uma massa finita e relativamente grande teria acção a pequena distância,

De acordo com a teoria de Yukawa um neutrão converter-se-á ocasionalmente num protão e num mesão  $\pi$  o qual será depois reabsorvido, emitido outra vez, reabsorvido e assim por diante. O campo nuclear envolvido nesta oscilação far-se-á sentir até uma distância do neutrão original igual à distância que os mesões  $\pi$ , que estão continuamente a ser emitidos, podem atingir. Até onde podem eles chegar? Pode res-

ponder-se a esta pergunta tendo em atenção o seguinte:

Um mesão tem uma massa considerável, e para fabricar um mesão, que venha a tomar parte naquele estranho jogo de bola, requere-se uma quantidade de energia igual à massa do mesão,  $\mu$ , multiplicada pelo quadrado da velocidade da luz,  $c$ . Quem paga para esta quantidade de energia? Ninguém; mas, se ninguém paga, há que pedir emprestado. Ora no Banco da Energia segue-se uma regra muito especial que deveria talvez ser ocasionalmente adoptada pelos bancos comerciais — a saber, quanto maior é a quantia emprestada mais curto o prazo. Quantitativamente esta prática bancária é representada por uma das formas de incerteza de Heisenberg. Pode tomar-se de empréstimo uma quantidade de energia  $\omega$  durante um intervalo de tempo da ordem da constante de Plank  $h$  dividido por  $\omega$ ; portanto o prazo  $t$  do empréstimo deve ser  $h/\omega c^2$ . O mesão poderá afastar-se da sua origem até uma distância igual quando muito ao intervalo de tempo  $t$  multiplicado pela velocidade da luz  $c$ ; portanto, o alcance das forças nucleares, de acôrdo com este mecanismo é essencialmente  $h/mc^2$  quer dizer, inversamente proporcional à massa. Para acção a pequena distância, os quanta do campo que transmitem as forças nucleares devem possuir uma massa elevada; de facto, os cálculos primitivos de Yukawa indicaram que a massa teria de ser da ordem de 300 vezes a massa do electrão.

Quase imediatamente após a publicação da teoria de Yukawa veio a descoberta do mesão na radiação cósmica, o que deu à teoria um tremendo impulso. A partícula que primeiro foi encontrada na radiação cósmica, como é bem sabido hoje mas não o era nessa altura, não é o mesão de Yukawa, mas um filho dele. Isto foi descoberto recentemente quando Powell encontrou em placas fotográficas, que tinham sido expostas a grandes altitudes, vestígios da passagem de partículas que eviden-

ciavam a existência de dois mesões diferentes. Um deles, o chamado mesão  $\pi$ , é o responsável pelas forças nucleares; o outro, o mesão  $\mu$ , é um descendente do primeiro sem grande interesse — pelo menos parece de pouco interesse de momento.

Seguiu-se, naturalmente outro resultado experimental fundamentalmente importante que foi determinado, pelo menos em parte, pela teoria de Yukava: se dois nucleões, cada um dos quais se encontra rodeado por um campo mesónico, colidem com energia suficiente, é de esperar que alguns mesões se libertem. Havia evidência em estudos de raios cósmicos da existência deste processo, mas o resultado experimental mais espectacular nesse sentido foi obtido em Berkeley onde Lattes e Gardner descobriram que mesões são realmente produzidos em colisões de grande energia, no sincrociclotrão. A descoberta de um processo artificial para a produção de mesões  $\pi$  pôs à disposição dos físicos uma origem destas partículas facilmente controlável e cujo fluxo é muito maior do que o dos raios cósmicos. Esta é uma situação ideal para investigar as propriedades destas novas partículas do que resulta que em muitos laboratórios se está fazendo activamente investigação nesse sentido. Mas, perguntar-se-á outra vez. Qual é a nossa compreensão destes fenómenos?

Possivelmente, ao esquematizar a teoria de Yukava (que em minha opinião deve certamente considerar-se em grande parte correcta do ponto de vista qualitativo), eu devia ter feito notar que não há apenas uma teoria, mas que há várias, nenhuma das quais parece ser realmente a correcta. É muitas vezes difícil dizer o que está mal numa teoria particular porque a matemática que se usa é quase proibitivamente complicada. E raramente se pode fazer um cálculo que esteja realmente certo porque a teoria é bastante elaborada, e, quando se tenta, mais como regra do que como excepção, encontram-se termos

divergentes que habitualmente se procuram eliminar por processos não perfeitamente ortodoxos. Talvez na base desta dificuldade esteja o facto de que a teoria tenta simplificar demasiadamente uma situação que pode de facto ser bastante complicada. Quando a teoria de Yukava foi proposta havia a esperança fundamentada de que as partículas envolvidas, prótons, neutrões e mesões  $\pi$  podiam ser legitimamente consideradas como as partículas elementares. Esta esperança perde cada vez mais a sua razão de ser à medida que novas partículas vão sendo descobertas.

Talvez a situação possa ser comparada (embora comparações sejam sempre perigosas) à da antiga teoria quântica, a qual permitindo uma boa compreensão, do ponto de vista qualitativo, da estrutura atômica não obstante falhava do ponto de vista quantitativo. Talvez a situação seja semelhante; pode ser que soluções brilhantes do mesmo tipo estejam prestes a aparecer.

É difícil dizer qual o caminho que se vai seguir, se se voltar aos livros sobre método (duvido de que muitos físicos realmente façam isto) aprender-se-á que se devem tomar dados experimentais, coleccionar dados experimentais, organizar dados experimentais, começar a elaborar hipóteses de trabalho e assim por diante, até que eventualmente um modelo surgirá e então haverá apenas que tirar dele os resultados. É possível que o melhor guia seja o método científico tradicional dos livros de texto, à falta de qualquer coisa melhor.

De momento o progresso é rápido, no que respeita à colecção de dados acerca das forças nucleares quer por observação directa a partir de experiências de «scattering» quer por estudo indirecto dos mesões. Os resultados estão-se acumulando rapidamente e se até aqui não se enquadraram ainda num modelo satisfatório pode ser que isso aconteça brevemente.

Algumas das muitas teorias do tipo Yukava parecem ser excluídas por essas experiências, e, de momento, a que parece

mais favorecida é a «teoria pseudo escalar com ligação pseudo vectorial» o que em palavras ligeiramente mais simples significa que o mesão tem spin zero e se comporta como um pseudo escalar, uma propriedade de simetria que é certamente familiar à maioria dos físicos.

Naturalmente pode acontecer que alguém surja brevemente com uma solução para o problema do mesão, e que os resultados experimentais confirmem tantos detalhes

de teoria que se tornará claro para toda a gente que se trata realmente da teoria correcta. Coisas como esta aconteceram no passado. Podem acontecer outra vez. Contudo, eu não creio que se possa confiar muito nisso. Antes acredito que nos devemos preparar para um esforço grande e demorado se quisermos estar seguros de que na celebração do próximo aniversário do *American Institute of Physics* já tenhamos a solução deste problema.

## Eliminação da camada limite turbulenta em grandes obras hidráulicas

Numa nota apresentada à Academia das Ciências de Paris em 12 de Março de 1951 (1) o Prof. Léopold Escande da Faculdade de Ciências de Toulouse e director da «Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique et d'Hydraulique» dá notícia, com o laconismo próprio dessas notas, de aplicações práticas a obras hidráulicas de uma propriedade clássica e fundamental: a eliminação dos fenómenos de separação conseguida por meio da aspiração da camada limite.

Mais tarde, numa conferência realizada em Tunis em 6 de Maio de 1952 (2) o Prof. Escande trata do mesmo assunto com mais detalhe, apresentando os meios utilizados para realizar a aspiração mencionada.

Finalmente, num artigo publicado nos números de 15 de Abril e de 1 de Maio de 1952 em «Le Génie Civil» (3) apresenta os

resultados dos ensaios efectuados sobre descarregadores, utilizando aquela propriedade.

Por nos parecer que o assunto tem extraordinário interesse vimos apresentá-lo aos leitores da «Gazeta de Física».

Quando um fluido pouco viscoso se escoia em contacto com uma parede sólida (fig. 1) os atritos localizam-se numa camada



Fig. 1

extremamente delgada que está situada em contacto directo com a parede e que é chamada camada limite. As correntes de retorno que aparecem no interior dessa camada limite no caso de uma parede com forte curvatura geram fenómenos de separação e provocam a formação de esteiras. No interior desta o fluido está animado de um movimento de agitação turbilhonar e não participa no escoamento geral. Se ao longo de uma fenda  $F$ , por meio de um

(1) Influence de l'élimination de la couche limite sur le fonctionnement des grands ouvrages hydrauliques. Note de M. Léopold Escande, transmise par M. Charles Camichel.

(2) Recherches recentes sur le fonctionnement des grands ouvrages hydrauliques. Conférence prononcée le 6 de Mai 1952 sous les auspices de la Fédération de la Association d'Ingénieurs de Tunisie par M. L. Escande.

(3) Les barrages déversoirs à frente aspiratrice.