

O NÚCLEO ATÓMICO

O Núcleo Atómico é a pedra angular da estrutura da matéria que nos é familiar. Com a sua descoberta, em finais de 1910, iniciou-se um período extremamente fecundo de desenvolvimento das ciências físicas, durante o qual se têm feito descobertas extraordinárias sobre a estrutura da matéria, as leis e forças da Natureza, a constituição e génese do Universo.

J. N. URBANO

A descoberta do núcleo atómico pode situar-se nas últimas semanas do ano de 1910, quando, ao analisar os estranhos resultados obtidos por colaboradores seus em experiências de dispersão de raios alfa pela matéria, Ernest Rutherford chegou à conclusão que eles eram facilmente explicados se o átomo, em vez de ser uma esfera de carga positiva uniforme dentro da qual se moviam electrões, como se julgava na altura, possuísse uma estrutura nuclear planetária.

De acordo com a teoria de Rutherford, o átomo é constituído por um núcleo central, carregado positivamente, rodeado por um sistema de electrões que, apesar de se repelirem mutuamente, são conservados juntos uns dos outros pela força atractiva do núcleo; a carga negativa total do sistema de electrões é igual à carga positiva do núcleo que tem dimensões muitíssimo inferiores às do próprio átomo, mas contém praticamente toda a sua massa.

O modelo atómico de Rutherford apresentava uma dificuldade muito séria: de acordo com as teorias da época, o sistema de electrões não poderia ser estável. Na verdade, para um electrão se manter a uma certa distância do núcleo sob o efeito da sua atracção, tem de girar continuamente em torno dele, como fazem os planetas relativamente ao sol. Mas, segundo a electrodinâmica clássica, as cargas aceleradas irradiam energia electromagnética. Perdendo continuamente energia por irradiação, o electrão descreveria, com frequência crescente, órbitas cada vez mais próximas do núcleo, acabando por se precipitar sobre ele.

Ora o comportamento dos átomos reais é muito diferente do atrás descrito. Em primeiro lugar porque nos seus estados permanentes possuem dimensões e frequências fixas. Em segundo lugar porque, se num processo molecular é irradiada energia, os átomos regressam aos seus estados de equilíbrio, retomando as dimensões que tinham antes. Por outro lado, a energia que seria irradiada durante o processo de colapso atrás descrito seria muitíssimo maior do que aquela que é irradiada nos processos atómicos normais. Finalmente, o ponto essencial da teoria de Planck é que a irradiação de energia por um sistema atómico não tem lugar da forma contínua prevista pela electrodinâmica ordinária, mas sim por emissões distintas de quanta, possuindo um quantum de radiação de frequência ν a energia de $h\nu$, em que h é a constante universal de Planck.

Considerações deste género levaram Bohr a concluir que o modelo atómico de Rutherford representa um aspecto essencial da estrutura da matéria, mas que não se lhe podem aplicar as leis da electrodinâmica ordinária. Em 1913, numa série de três trabalhos monumentais, Bohr mostrou que podia explicar facilmente as regras empíricas que governavam a riquíssima fenomenologia dos espectros ópticos da radiação produzida por descargas eléctricas em gases, que se tinham mantido, até então, indecifráveis, postulando o seguinte:

a) O equilíbrio dinâmico dos sistemas atómicos em estados estacionários é descrito pela mecânica ordinária, mas a passagem



Licenciado pela Universidade de Coimbra, doutorado em Física Teórica pelas Universidades de Oxford e Coimbra, J. N. Urbano é professor catedrático da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. A sua actividade científica – iniciada sob orientação de Sir Rudolf Peierls – tem-se repartido pela Física Nuclear (movimentos colectivos de sistemas de muitos corpos) e pela fronteira desta área com a Física das Partículas (propriedades estáticas e dinâmicas dos nucleões e seus isóbaros). J. N. Urbano é Presidente do Conselho Directivo da FCTUC e Presidente da Direcção do Instituto Pedro Nunes.

dum sistema dum estado estacionário para outro não pode ser tratada nessa base;

- b) O processo de transição entre dois estados estacionários é acompanhado pela emissão (ou absorção) de radiação monocromática para a qual a relação entre a frequência e a quantidade de energia é dada pela teoria de Planck;
- c) Os estados estacionários dum sistema constituído por um electrão ligado ao núcleo são aqueles para os quais o momento angular do electrão em torno do núcleo é igual a um múltiplo inteiro de $h/(2\pi)$, onde h é a constante de Planck.

Para além de pressupor que a electrodinâmica clássica não era aplicável a sistemas atómicos, a teoria quântica de Bohr possuía dois ingredientes que representavam uma quebra radical com as teorias clássicas. Um deles era o postulado de que, dentre a multidão contínua dos estados permitidos pela mecânica clássica, na natureza só ocorrem alguns, os que pertencem a um conjunto discreto, determinado pelas suas regras de quantização. O outro consistia em não associar a frequência da radiação emitida a uma frequência própria de vibração do sistema emissor, mas sim a uma diferença de energias próprias do emissor.

Em 1914 Franck e Hertz confirmaram experimentalmente a existência da quantização da energia dos estados atómicos, prevista por Bohr. Mas, não obstante todo o seu sucesso, a teoria de Bohr era conceptualmente insatisfatória, porque, para além de misturar leis clássicas com regras de quantização «ad hoc», não esclarecia a relação entre os mecanismos de emissão e absorção de radiação pelos sistemas atómicos e a electrodinâmica clássica. Além disso, apesar das engenhosas generalizações a que foi sujeita, a teoria de Bohr revelou-se incapaz de explicar detalhes importantes da fenomenologia dos espectros atómicos e moleculares. Para ultrapassar estas dificuldades desenvolveu-se, durante a década dos anos vinte, uma teoria quântica inteiramente nova que, no entanto, manteve o essencial dos postulados de Bohr.

Com o advento da nova teoria quântica iniciou-se um dos mais interessantes períodos da história da ciência. Todas as propriedades dos sistemas físicos foram de novo estudadas à luz dessa teoria, recebendo muitas delas, pela primeira vez, explicação adequada. Além disso foram previstos ou descobertos muitos fenómenos importantíssimos que não se enquadravam nas teorias clássicas.

A título de exemplo, a nova mecânica quântica permitiu compreender os mecanismos das reacções químicas e nucleares e os fundamentos das propriedades eléctricas, magnéticas, ópticas e mecânicas da matéria, nos mais diversos estados e condições, tendo aberto assim o caminho para os desenvolvimentos tecnológicos que alteraram profundamente as condições de vida do homem nos últimos quarenta anos. Forneceu também o formalismo indispensável para que se pudesse iniciar, em bases sólidas, o estudo do núcleo atómico como um sistema em si mesmo.

Os núcleos atómicos possuem um número muito variado de constituintes que interagem através de forças muito diversas. Apresentam, por isso, uma fenomenologia riquíssima que tem sido intensamente investigada tanto teórica como experimentalmente, com resultados assinaláveis. Para esse efeito foram criados ou refinados métodos e técnicas teóricas e experimentais, que também se têm mostrado úteis noutros domínios de investigação.

Ao investigar a estrutura interna dos núcleos atómicos e as forças que actuam entre os seus constituintes, fizeram-se descobertas extraordinárias sobre as propriedades e a estrutura última da matéria, as leis e as forças da Natureza e a constituição e a génese do Universo. Estas descobertas alargaram as fronteiras do conhecimento a regiões de cuja existência nem sequer se suspeitava, num processo fascinante que está longe de se poder considerar concluído.

O IMPACTO SOCIAL DOS ESTUDOS NUCLEARES

Contudo, não são apenas aspectos de natureza científica que conferem importância especial aos estudos sobre o núcleo atómico. De facto, na investigação das suas propriedades e nalgumas das suas aplicações manifestaram-se pela primeira vez muitos dos aspectos que caracterizam o processo científico nas sociedades industrializadas do mundo de hoje.

A Ciência Moderna permitiu o desenvolvimento de tecnologias que asseguram, numa medida nunca antes atingida ou sequer imaginada, a satisfação das necessidades básicas do Homem. Algumas dessas tecnologias assentam em propriedades nucleares e muitas outras só foram possíveis após a formulação da mecânica quântica que, como vimos, surgiu na sequência da descoberta do núcleo atómico.

Infelizmente, nem todas as consequências das aplicações das tecnologias modernas são benéficas. Há desenvolvimentos tecnológicos que estão a alterar, numa extensão ainda difícil de avaliar, as condições ambientais onde se desenvolveram as espécies vivas. Outros há que ameaçam a continuidade da própria vida na Terra. A este propósito é difícil deixar de se fazer uma referência muito especial a certas aplicações nucleares.

Foram, aliás, as consequências desastrosas dessas aplicações que levaram o cidadão comum a alterar a sua atitude, tradicionalmente benevolente e mesmo reverencial, para com a ciência e os cientistas.

O reconhecimento do enorme potencial bélico e energético das reacções nucleares contribuiu, mais do que qualquer outro factor, para o conceito de investigação de interesse estratégico, deixando o respectivo processo de ficar sob a exclusiva responsabilidade dos cientistas que a praticam.

Tal como Francis Bacon havia previsto, “conhecer é poder”. O poder resulta, por um lado, da produção de riqueza excedentária através do aperfeiçoamento

dos processos de fabrico e, pelo outro, da posse de armas de destruição mais eficazes do que as daqueles que não têm acesso ao conhecimento. Por esta razão, a ciência encontra-se, cada vez mais, sob o controle do poder político. Também neste particular, os estudos sobre o núcleo atômico foram pioneiros da situação que actualmente se vive nas sociedades industrializadas.

Foi também nos estudos sobre as propriedades nucleares que se iniciou a escalada dos orçamentos para a investigação, com a conseqüente alteração da tradicional relação do processo científico com as restantes actividades sociais. Na verdade, para se desvendarem os segredos do núcleo atômico foi necessário construir grandes infraestruturas, de manutenção e funcionamento extremamente onerosos. A disponibilização das verbas necessárias foi justificada pelo reconhecimento do interesse estratégico da investigação nuclear. Este reconhecimento estende-se, actualmente, a outros domínios científicos, cuja investigação tem sido dotada de orçamentos gigantescos. Como consequência, certos domínios da investigação científica estão fora do alcance não só do investigador solitário, como de instituições isoladas e até dum só país, o que alterou irreversivelmente as relações tradicionais do processo científico com as restantes actividades sociais.

Finalmente, a ciência nuclear colocou, pela primeira vez na história, o Homem perante o fracasso dos seus referenciais éticos tradicionais, que se têm revelado incapazes de lidar com a situação criada pelo acesso fácil a meios de destruição generalizada.

Há pois variadíssimas razões, tanto de ordem científica como social, para tornar interessantíssimo um percurso ao longo da história do desenvolvimento dos conhecimentos sobre o núcleo atômico, começando com os antecedentes da sua descoberta e terminando com uma perspectiva dos eventuais desenvolvimentos futuros. Todavia o percurso é tão longo e tão diversificado que por força da índole deste trabalho faremos apenas algumas brevíssimas paragens em pontos escolhidos mais ou menos ao acaso, deixando de fora muitos outros igualmente fascinantes.

A DESCOBERTA DO NÚCLEO ATÔMICO

O núcleo atômico foi descoberto na Universidade de Manchester, nas últimas semanas de 1910, por Ernest Rutherford, em condições que serão melhor apreciadas inserindo a actividade deste genial cientista no ambiente científico da sua época.

Ernest Rutherford (Fig. 1) nasceu na Nova Zelândia em 1871, tendo iniciado a sua carreira científica estudando a magnetização do ferro. A alteração do regulamento da Universidade de Cambridge, abrindo esta prestigiada instituição a estudantes licenciados por outras universidades, permitiu-lhe iniciar, em 1895, estudos de pós-graduação no Laboratório Cavendish, sob a orientação do Prof. J. J. Thomson.

Em 8 de Novembro desse ano, Roentgen abalou o mundo com a descoberta dos Raios X e Rutherford, tal como toda a gente, passou também a investigar esses raios misteriosos, abandonando os seus estudos sobre magnetismo. Em colaboração com J. J. Thomson, começou por medir a ionização produzida pelos raios X em gases, para o que utilizou um dos seus famosos métodos, conceptualmente muito simples, mas extremamente eficazes.

Entretanto, em 1896, Becquerel descobriu a radioactividade. Ao tomar conhecimento desta descoberta, Rutherford passou a aplicar a técnica que vinha usando no estudo dos raios X para medir a ionização produzida pela radiação de Becquerel. Em 1898 descobriu, nessa radiação, os raios alfa e beta, naquela que foi apenas a primeira duma extensa série de descobertas sensacionais no domínio da Radioactividade, ciência que ocupou a melhor parte de 20 anos do seu labor científico.

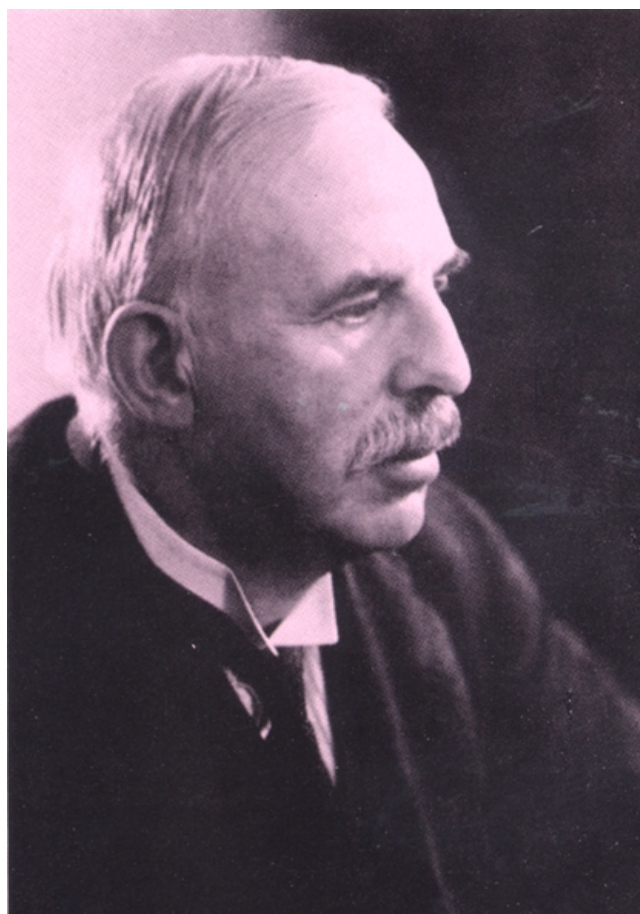


Fig. 1 – Ernest Rutherford (1871-1937), um dos mais geniais físicos experimentais de todos os tempos. Dotado duma intuição prodigiosa fez, com instrumentos de concepção muito simples, descobertas cruciais em radioactividade, física atômica e física nuclear. Depois de esclarecer que a radioactividade resulta da transmutação natural dos elementos, usou os raios alfa para revelar a estrutura dos átomos e para desintegrar os núcleos. Nos três laboratórios que dirigiu rodeou-se de colaboradores brilhantes que deixaram o seu nome associado ao desenvolvimento da ciência do século XX.

Em 1898 Rutherford aceitou um lugar de professor de física na Universidade de McGill, no Canadá, onde se manteve até 1907. O salário era baixo, mas o laboratório era, no gênero, dos mais bem equipados do mundo, graças à generosidade do excêntrico milionário do tabaco, Macdonald.

Durante a sua estadia em McGill, Rutherford desenvolveu uma actividade científica brilhante tendo, nomeadamente, clarificado a complexa fenomenologia da radioactividade e descoberto a lei do decaimento radioactivo e a transmutação natural dos elementos, o que lhe valeu ser galardoado, em 1908, com o prémio Nobel da Química.

A partida de Rutherford de Cambridge para McGill deu-se um ano após J. J. Thomson ter feito uma das outras descobertas cruciais sobre a estrutura da matéria, que marcaram indelevelmente o último decénio do século dezanove. Referimo-nos à descoberta do electrão na radiação catódica. O impacto que esta e as outras descobertas tiveram na comunidade científica da época pode ser avaliado pelos seguintes passos numa alocução feita por Soddy, em 28 de Março de 1901, perante a Sociedade de Física na Universidade de McGill:

“Avanços recentes, relacionados com a descoberta das radiações dos tipos catódicos, Roentgen e Becquerel, levaram os físicos a acreditar que estão a lidar com partículas de matéria mil vezes mais pequenas que a massa absoluta do átomo. Tão certos estão eles da interpretação dos seus resultados experimentais e da possibilidade de os explicarem pelas teorias actuais que alguns deles abandonaram definitivamente a noção correntemente aceite sobre a estrutura da matéria, tendo atacado a teoria atómica que, como todos sabem, tem constituído o alicerce da química desde o tempo de Dalton até hoje. Teorias físicas como esta, para além da imensa satisfação que dá aos seus promotores, devem ser ignoradas pela maioria dos químicos.”

“O Professor Rutherford pode ser capaz de nos convencer que a matéria que ele conhece é a mesma que nós conhecemos ou, possivelmente, admitirá que o mundo com que lida é um mundo novo que precisa numa Química e numa Física próprias. Em qualquer caso, estou certo que os químicos continuarão a acreditar nos átomos como identidades concretas e permanentes, senão imutáveis, certamente ainda não transmutáveis”.

É interessante notar que, quando proferiu estas palavras, o grande químico Soddy já se encontrava a colaborar com Rutherford, a pedido deste, nas experiências que levaram à descoberta da Lei da Radioactividade e da Transmutação Radioactiva natural dos elementos!

Em 1907 Rutherford rumou para Manchester, a convite de Schuster, para ocupar o lugar de professor que este deixara vago, reformando-se mais cedo que o habitual. Schuster acreditava que “a reputação da Universidade e o seu poder de atrair estudantes

depende inteiramente da investigação realizada nos seus laboratórios”. Por isso não só convenceu Rutherford a trocar McGill por Manchester como convenceu as autoridades locais a atribuírem a Rutherford um salário bastante superior ao praticado na época e a fornecerem-lhe os meios humanos e materiais necessários para manter em funcionamento um importante laboratório de investigação no domínio da radioactividade.

Rutherford tirou bom proveito dos meios que lhe foram proporcionados, mas teve de travar uma luta muito intensa para que, em Janeiro de 1908, o Instituto de Rádio de Viena lhe facultasse uma peça importantíssima para as suas investigações: uma fonte radioactiva equivalente a 290 mg de rádio.

Tal como havia feito em McGill, Rutherford rodeou-se em Manchester de cientistas brilhantes. Um deles foi o assistente pessoal de Schuster, um jovem alemão chamado Hans Geiger, que deixou o seu nome ligado aquela que pode ser considerada como o arquétipo das máquinas da era nuclear: o contador de Geiger.

Geiger envolveu-se nos estudos que levaram a descoberta do núcleo atómico numa maneira assaz prosaica. Vendo-se confrontado com a necessidade de encontrar um assunto para iniciar um jovem estudante nas lides da investigação, sugeriu a Rutherford: “Não acha que o Ernest Marsden, a quem já treinei nos métodos da radioactividade, deve começar a fazer investigação?”. Ao que o célebre professor terá respondido: “Por que não deixá-lo verificar se alguma das partículas alfa é difundida segundo ângulos grandes?”.

O resultado desta investigação foi publicado em 1909. Geiger e Marsden verificaram, sem que o soubessem explicar, que, na verdade, uma pequena fracção das partículas alfa dum feixe que incidia numa placa metálica era deflectida sob ângulos muito grandes, chegando algumas delas a ser detectadas no local donde partiam (Fig. 2).

Este resultado era de facto muito surpreendente, porque as partículas alfa eram tão pesadas (possuíam 4 vezes a massa do átomo de hidrogénio, ou seja cerca de 8.000 vezes a massa do electrão) e iam animados de velocidades tão grandes (cerca de 16.000 km/s) que deviam atravessar a fina folha metálica sem sofrerem desvios apreciáveis da sua trajectória. Em vez disso, o que por vezes se passava, na sugestiva imagem de Rutherford, era como se ao disparar um canhão de 15 polegadas contra uma folha de papel a bala voltasse para trás reflectida pelo papel!

Rutherford não era forte em matemática. Mas era curioso e não se envergonhava, sendo já então reconhecido como um dos mais brilhantes cientistas do seu tempo, de assistir às aulas dos seus colegas. Aprendeu desse modo o suficiente de teoria das probabilidades para poder concluir que a probabilidade numa dessas grandes deflexões resultar de sucessivas pequenas deflexões era demasiadamente pequena para explicar a

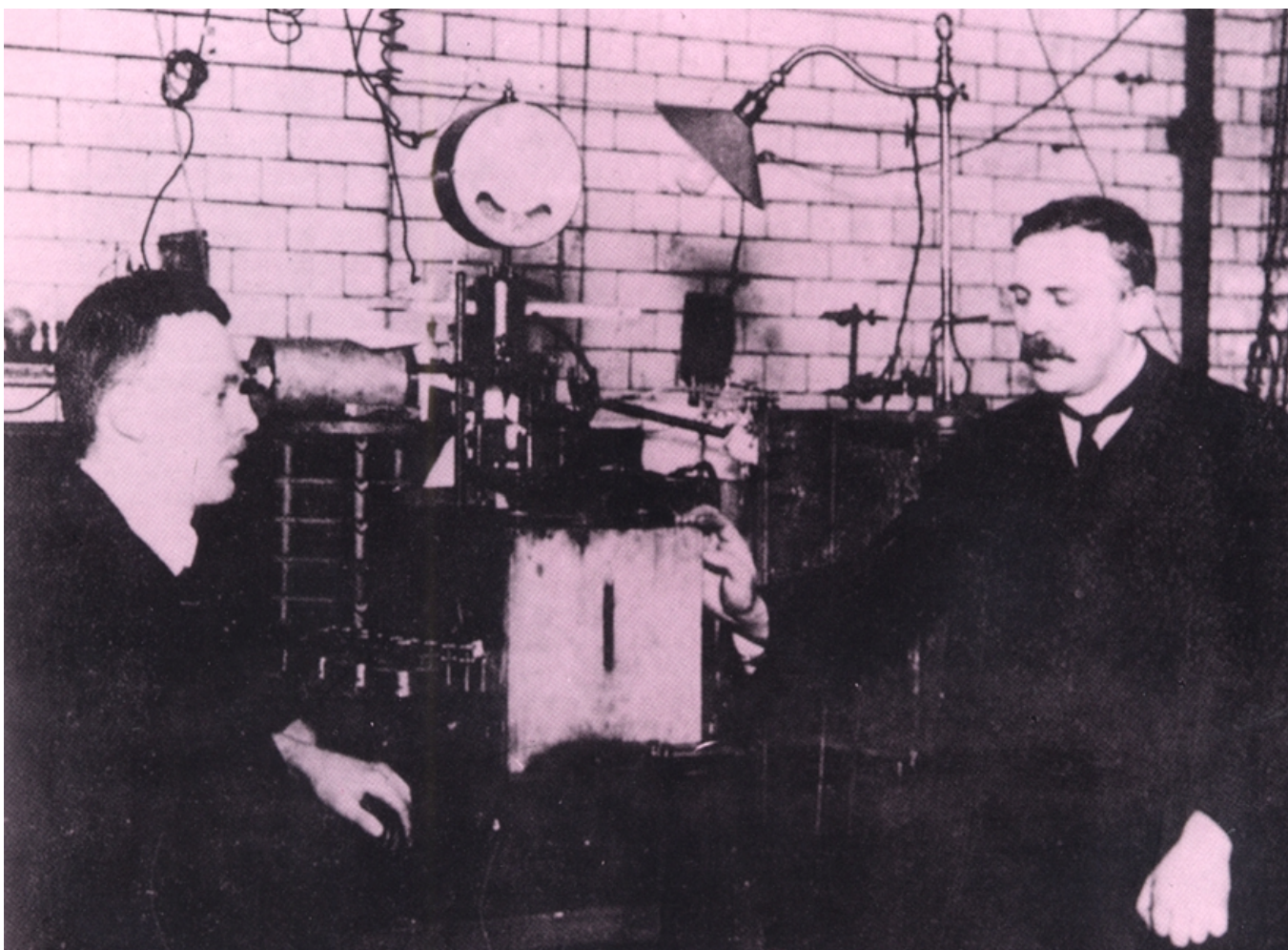


Fig. 2 – Hans Geiger (1882-1945), acompanhado por Rutherford, conta, no Laboratório de Manchester, através dum microscópio, o número de impactos sobre um ecran de fluoreto de zinco das partículas alfa que, emanadas duma fonte radioactiva, são difundidas por uma folha metálica segundo um determinado ângulo. Alterava-se o ângulo de contagem movendo-se o ecran e o microscópio, solidariamente, em torno dum eixo vertical que passa pelo ponto de impacto do feixe incidente com a folha metálica. Foi a percentagem «demasiadamente» elevada de partículas desviadas segundo ângulos grandes, observada por Geiger e Marsden, que levou Rutherford a concluir que os átomos possuem um núcleo central.

fracção das partículas que apresentavam aquele comportamento.

Perante este resultado, num golpe de génio, partiu do princípio que a deflexão duma partícula alfa era originada pela sua colisão com um único átomo da folha. Contudo, para a poder fazer recuar, o átomo tinha de possuir uma estrutura interna diferente da que então se admitia.

As ideias sobre a estrutura atómica dominantes na época eram as de J. J. Thomson. De acordo com este prestigiado cientista, o átomo era constituído por uma esfera de carga eléctrica positiva distribuída uniformemente, dentro da qual se moviam os electrões em órbitas circulares. Com base neste modelo era possível calcular as modificações introduzidas no movimento duma partícula alfa pela presença mais ou menos próxima dum átomo. Ora as deflexões assim calculadas

podiam ser, quanto muito, de alguns graus, mas nunca tão grandes quanto as reveladas nas experiências de Geiger e Marsden.

Usando o seu modelo atómico com núcleo central e estrutura electrónica planetária, que inventou para o efeito, Rutherford explicou facilmente as grandes deflexões sofridas pelas partículas alfa. Os electrões do átomo, por serem muitíssimo mais leves que as partículas alfa, perturbam pouco o movimento destas. As que passam longe do núcleo não sofrem, portanto, grandes deflexões. São as que passam perto do núcleo que são mais desviadas, devido às grandes forças que se estabelecem entre duas cargas eléctricas quando estas se aproximam uma da outra. As partículas alfa que embatem directamente sobre o núcleo podem mesmo ser obrigadas a voltar para trás se a carga do núcleo tiver o mesmo sinal que a da partícula alfa e se a sua massa for maior que a desta partícula.

Partindo desta imagem e dos resultados das experiências de Geiger e Marsden, Rutherford fez uns cálculos simples donde concluiu: a carga do centro difusor é positiva e igual – em unidades da carga do electrão – ao número atómico do átomo: a sua massa é igual à do próprio átomo; as suas dimensões são cerca de 10.000 vezes inferiores às do átomo. Estava assim descoberto o núcleo atómico!

Pode dizer-se que o núcleo atómico foi descoberto acidentalmente, porque foi encontrado sem ser procurado. Todavia a sua descoberta não surgiu por acaso, mas sim como a consequência dum projecto de investigação bem delineado, excepcionalmente executado, superiormente conduzido e genialmente interpretado. Pelas circunstâncias em que ocorreu e pela importância de que se revestiu, essa descoberta constitui um dos maiores triunfos do Método Científico Moderno que havia sido estabelecido, séculos antes, por Galileo Galilei, Francis Bacon, René Decartes e Isaac Newton, entre outros, e no qual o Homem encontrou um meio surpreendentemente eficaz de interrogar a natureza, descobrir a sua constituição, inventar as suas leis e domar as suas forças.

1932 O INÍCIO DA IDADE DE OURO DA FÍSICA NUCLEAR

Existem na história da ciência períodos singularmente fecundos durante os quais ocorrem observações experimentais ou surgem teorias que alteram qualitativamente o estado do conhecimento do mundo que nos rodeia. Tais observações ou teorias constituem pontos de viragem e estabelecem o enquadramento dos futuros desenvolvimentos.

Um dos exemplos mais significativos dum desses períodos é o que compreende os anos 1808-1810, durante o qual John Dalton apresentou “Um Novo Sistema das Ciências Químicas” que estabeleceu definitivamente a teoria atómica da matéria. Sobre esta base erigiram-se uma Ciência e uma Indústria Química excepcionalmente florescentes, que influenciaram decisivamente o desenvolvimento da ciência e da sociedade até aos nossos dias.

Outro exemplo significativo, a que já nos referimos, é o que compreende os anos de 1895 a 1897, durante os quais, em rápida sucessão, Roentgen descobriu os raios X, Becquerel a radioactividade e J. J. Thomson o electrão.

No mesmo sentido, o ano de 1932 assume especial significado para o progresso da Física Nuclear. Durante esse ano realizaram-se as primeiras desintegrações nucleares provocadas por partículas aceleradas artificialmente, descobriu-se o neutrão e foi publicado o primeiro trabalho teórico moderno sobre a estrutura dos núcleos atómicos. A estes acontecimentos estão associados, respectivamente, os nomes de Cockcroft e Walton, de Chadwick e de Heisenberg.

Cockcroft, Walton e Chadwick faziam parte da equipa de Rutherford. Os trabalhos experimentais que os tornaram famosos vieram dar resposta a anseios e previsões do grande cientista. O mesmo não acontece com o trabalho teórico de Heisenberg, com o qual o núcleo perde, definitivamente, a simplicidade rutherfordiana. No seu conjunto, estes três trabalhos constituem um ponto de viragem da Física Nuclear, marcando o início da segunda e mais importante fase do desenvolvimento desta ciência. Por isso, cada um deles merece, de per si, uma referência especial.

COCKCROFT E WALTON E OS ACELERADORES DE PARTÍCULAS

Em 28 de Abril de 1932 a Sociedade Real de Londres realizou um encontro sobre a estrutura dos núcleos atómicos. O discurso inaugural ficou a cargo de Rutherford que passou em revista o progresso feito durante os últimos três anos no ataque experimental àquele que, em sua opinião, era o problema central da Física: a estrutura do núcleo atómico.

Ao sumariar o seu discurso, Rutherford manifestou-se admirado pela rapidez do progresso realizado, afirmando que ele “será ainda muito mais rápido quando se puderem obter no laboratório fontes poderosas, mas controláveis, de átomos animados de grandes velocidades e de radiação de frequências muito elevadas, para bombardear a matéria”. Mostrou-se, a este propósito, esperançado nas experiências de Tuve, Hafstad e Dahl, no Laboratório de Magnetismo Terrestre de Washington, e de Cockcroft e Walton no Laboratório Cavendish da Universidade de Cambridge, as quais provavam que era possível, usando alta tensão, produzir artificialmente um feixe de protões com energias individuais de cerca de 1 MeV. Referiu-se também a outros métodos para produzir átomos de grandes velocidades, entre os quais destacou o desenvolvido por Lawrence e Livingston, da Universidade da Califórnia, que, com acelerações múltiplas, tinham obtido protões com energias de 1 MeV e se afirmavam capazes de obter átomos com energias muito maiores. Anunciou, em adenda, os resultados de Cockcroft e Walton das primeiras reacções nucleares provocadas com partículas aceleradas artificialmente.

As experiências de Cockcroft e Walton foram realizadas no Laboratório Cavendish da Universidade de Cambridge, com um aparelho que podia fornecer um potencial constante de 600 000 a 800 000 volts. Estes investigadores produziam protões num tubo de descarga auxiliar, os quais eram, depois, acelerados pela alta tensão, num tubo vazio. Obtinham, deste modo, feixes estáveis de protões rápidos com energias até 600 000 eV. O material a ser bombardeado era colocado dentro dum tubo, fazendo 45 graus com a direcção do feixe.

Não foi, com certeza, por acaso que as primeiras reacções nucleares provocadas com projecteis acelerados artificialmente ocorreram num laboratório dirigido por Rutherford. Na verdade, a violência das colisões nucleares tinha ficado gravada no seu espírito desde o momento em que se apercebeu que o recuo das partículas alfa observado por Geiger e Marsden era motivado por uma colisão entre dois núcleos, tendo começado imediatamente a pensar na hipótese de produzir projecteis acelerados artificialmente. Já em 1913 afirmava que “no momento presente, o desenvolvimento de máquinas eléctricas com a tensão mais elevada possível é uma questão de premente importância”. Este seu desejo teve, no entanto, de aguardar até 1929 para poder começar a ser concretizado. Até ficarem disponíveis os feixes de partículas aceleradas artificialmente usaram-se os projecteis fornecidos pela natureza, no decaimento radioactivo.

Entre estes o papel mais importante foi desempenhado pelas partículas alfa. Rutherford tinha-as identificado, logo no início da sua carreira, como átomos de hélio que tinham perdido dois electrões e, depois da descoberta do núcleo atómico, como os núcleos do átomo de hélio. Possuindo 4 vezes a massa do hidrogénio e sendo emitidas com velocidades da ordem de grandeza de 16 000 km/s, elas constituíam um instrumento de prova formidável para testar a estrutura da matéria. No entanto, como possuem uma carga eléctrica dupla e de sinal contrário da do electrão, não conseguem vencer a repulsão do campo eléctrico dos núcleos mais pesados, não podendo, por isso, penetrar no seu interior. Foi isto que aconteceu nas experiências de Geiger e Marsden. No entanto elas podem penetrar nos núcleos dos elementos mais leves. Foi assim que Rutherford provocou, em 1917-1918 a primeira transformação artificial dum elemento e que Bothe e Becker, primeiro, e Irene e Joliot Curie, em seguida, efectuaram as experiências que levaram à descoberta do neutrão.

A primeira transformação artificial dum elemento foi a última grande experiência que Rutherford realizou em Manchester. Em 1919 ocupou um lugar de Professor no Laboratório Cavendish, em Cambridge, onde, como o fizera em McGill e Manchester, se rodeou de cientistas de extraordinária envergadura e, como não podia deixar de ser, reorganizou o laboratório para investigação em radioactividade.

Do seu programa fazia parte o velho sonho de ultrapassar as limitações impostas pela natureza, acelerando artificialmente os projecteis para investigar a estrutura do núcleo atómico. Em 1929 a tecnologia da produção de altas tensões tinha atingido o grau de desenvolvimento suficiente para o concretizar e, nesse ano Cockroft e Walton iniciaram, no Laboratório Cavendish, a construção da sua máquina (Fig.3). Nesse mesmo ano Van de Graaf construiu, em Princeton, o primeiro gerador electrostático do tipo que é conhecido pelo seu nome e Lawrence e Livingston inicia-

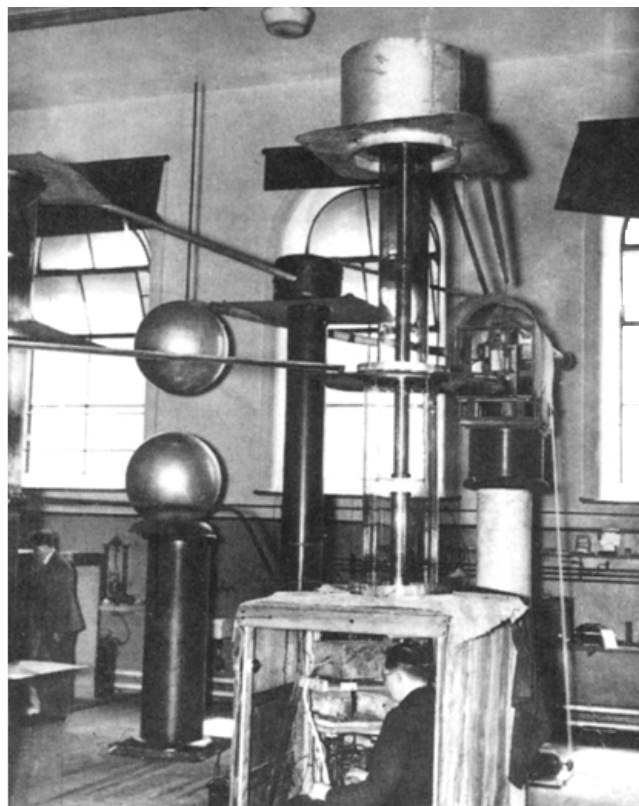


Fig. 3 – Uma fotografia, tomada em 1931, da máquina aceleradora de partículas construída no Laboratório Cavendish por Cockroft e Walton. Com esta máquina aqueles investigadores provocaram, em 1932, as primeiras reacções nucleares com projecteis acelerados artificialmente, abrindo o caminho que levou à descoberta da estrutura do protão e do neutrão. Os geradores de Cockroft-Walton são ainda hoje usados na primeira fase da aceleração de protões em máquinas gigantescas.

ram, na Universidade da Califórnia, o desenho do primeiro ciclotrão utilizável em estudos nucleares.

Construída a máquina aceleradora, Cockroft e Walton iniciaram imediatamente uma série de experiências sensacionais em que vários elementos foram bombardeados com protões de energias que podiam atingir 600 000 eV. O primeiro elemento a ser examinado foi o lítio que, absorvendo o protão incidente, se quebrou em duas partículas alfa. Foi esta a reacção que Rutherford anunciou na referida conferência.

Comentando este resultado e referindo-se a os demais métodos para acelerar iões, Rutherford afirmou que eles abriam um novo e vasto campo de investigação sobre a estrutura do núcleo atómico. Mais uma vez Rutherford demonstrava grande clarividência nas suas previsões. Se pecou, foi por defeito, pois tanto os geradores electrostáticos de Van de Graaf como os ciclotrões permitiram que os estudos das propriedades nucleares se mantivessem, durante algumas décadas, nas fronteiras do conhecimento. O que nem o próprio Rutherford terá imaginado, é que as máquinas aceleradoras em que manifestava tanta esperança iriam, três décadas depois, revelar a existência dum mundo sub-nuclear riquíssimo, até então completamente desco-

nhecido e que, sem elas, teria ficado, para sempre, ignorado.

Os aceleradores de partículas dos dias de hoje nada têm a ver, aparentemente, com os de Cockcroft e Walton. São instrumentos enormes cujo planeamento, construção, funcionamento e manutenção exigem o concurso de meios humanos e materiais que estão ao alcance apenas dos países mais ricos do mundo. No entanto estas infraestruturas gigantescas são afinal animadas pelo mesmo espírito que animou Rutherford: penetrar cada vez mais fundo no seio do microcosmos, usando projecteis cada vez mais precisos, com energias cada vez maiores.

CHADWICK - A DESCOBERTA DO NEUTRÃO E A CONSTITUIÇÃO DO NÚCLEO ATÓMICO

A descoberta do neutrão, em 1932, constituiu um passo gigantesco no sentido do esclarecimento de questões tão importantes como a da constituição do núcleo atómico e a do mecanismo do decaimento beta. No que se segue, referir-nos-emos apenas à primeira destas questões.

A questão da constituição do núcleo atómico colocou-se imediatamente após a sua descoberta. A hipótese de que todos os elementos seriam constituídos a partir dum elemento primordial, o hidrogénio, era muito aliciante. Ela havia sido adiantada por Prout, num escrito anónimo publicado em 1815, mas o facto dos pesos atómicos não serem múltiplos inteiros do do hidrogénio desacreditou a ideia que, no entanto, nunca foi complementamente abandonada, dada a sua extrema simplicidade e beleza conceptual.

Em 1917, num laboratório vazio por causa da grande guerra, Rutherford prosseguiu experiências que tinham sido iniciadas anos antes por Marsden, para verificar se núcleos de hidrogénio podiam ser extraídos de algumas substâncias radioactivas. A descrição destas experiências foi publicada em 1919. O seu principal resultado, "... o átomo de azoto é desintegrado sob as intensas forças desenvolvidas numa colisão próxima com uma partícula alfa..." é outra das grandes contribuições de Rutherford para o esclarecimento da estrutura da matéria. Mas ele concluiu também que a "partícula de hidrogénio que é libertada era uma parte constituinte do núcleo de azoto".

Em 1920, ao rever os seus trabalhos sobre a desintegração atómica e discutindo as suas implicações, Rutherford afirmava que "aparentemente os núcleos contêm electrões e também partículas de hidrogénio" que baptizou de protões, em parte para homenagear Prout, em parte também para os não confundir com electrões positivos, que, segundo julgava, talvez um dia viessem a ser descobertos, como de facto aconteceu, por sinal também no ano de 1932.

Considerações sobre as massas e as cargas envolvidas, permitiram estabelecer um modelo muito simples



Fig. 4 - James Chadwick (1891-1974), estudante e colega de Rutherford, foi um dos maiores físicos nucleares. A sua descoberta do neutrão, em 1932, iniciou a física nuclear moderna.

para a constituição dos núcleos atómicos com base em protões e electrões: um núcleo contém tantos protões quanto o número de massa do elemento e tantos electrões quantos forem necessários para ajustar a carga total do núcleo ao número atómico do elemento.

Todavia, com o advento da mecânica quântica, este modelo viu-se confrontado com uma dificuldade de natureza fundamental. Na verdade o modelo atribuiu um valor errado ao spin do núcleo do isótopo de número de massa 14 do azoto e prevê que ele obedece a uma estatística diferente daquela que determina o seu comportamento nas moléculas. Este facto foi apontado por Fowler no referido encontro da Sociedade Real de Londres, em Abril de 1932.

Sabia-se que tanto o protão como o electrão tinham spin $1/2 h/(2\pi)$ e obedeciam à estatística de Fermi. Ora as regras para determinar o spin e a estatística de sistemas quânticos constituídos por partículas de spin $1/2 h/(2\pi)$ obedecendo à estatística de Fermi, são as seguintes:

- 1.^a - Se o sistema possui um número par de partículas, obedece à estatística de Bose e o seu spin é múltiplo inteiro de $h/(2\pi)$;
- 2.^a - Se o sistema possui um número ímpar de partículas, obedece à estatística de Fermi e o seu spin é um múltiplo semi-inteiro de $h/(2\pi)$.

Se o núcleo do isótopo de número de massa 14 do azoto for composto de protões e electrões, terá 14 protões e 7 electrões, isto é, conterà ao todo 21 partículas de spin $1/2 \hbar/(2\pi)$. Portanto, o seu spin será um múltiplo semi-inteiro de $\hbar/(2\pi)$ e a sua estatística a de Fermi. As determinações experimentais apontam na direcção oposta. Esta questão foi resolvida com a descoberta do neutrão.

No trabalho de revisão de 1920, atrás referido, Rutherford previu a existência duma partícula com massa igual à do protão, mas sem carga eléctrica, que resultaria da junção dum protão e dum electrão. Previu também que, se tal partícula existir, “os seus campos externos serão praticamente nulos, excepto muito próximo do núcleo, e em consequência poderá ser capaz de se mover livremente através da matéria. Será muito difícil detectar a sua presença por meio dum espectroscópio... Por outro lado, ela entrará facilmente na estrutura dos átomos, e poderá ser ou captada pelo núcleo ou desintegrada pelo seu campo intenso, donde escapará um átomo de hidrogénio carregado, ou um electrão, ou ambos”.

Esta previsão de Rutherford revelou-se muito importante, não tanto pela sua originalidade – Harkins adianta-se-lhe neste aspecto – mas porque familiarizou os seus colaboradores com a ideia da possibilidade de existir uma partícula com aquelas propriedades.

Em carta datada de 1924 e dirigida a Rutherford, Chadwick, que acompanhou o seu mestre na mudança de Manchester para Cambridge, afirmava que continuava a pensar no neutrão e que o deviam procurar seriamente.

Em 1930 gerou-se grande interesse em torno da desintegração por meio de partículas alfa de elementos leves, tais como o berílio e o boro. Este interesse foi motivado pela descoberta, feita por Bothe e Becker em 1928, de que esses elementos emitiam uma radiação muito penetrante, aparentemente electromagnética, do tipo da radiação gama, que possuía mais energia que as partículas alfa incidentes. Essa energia tinha forçosamente de provir da desintegração nuclear. Em 1932 Irene e Joliot Curie descobriram que essa radiação possuía a propriedade surpreendente de ejectar protões com altas velocidades de materiais contendo hidrogénio.

Chadwick (Fig. 4) interessou-se vivamente pela descoberta de Irene e Joliot Curie, passando a examinar com grande detalhe as propriedades da radiação de Bothe e Becker, usando um contador de válvulas. Observou assim que ela ejectava partículas não apenas do hidrogénio, mas também do hélio, lítio, berílio, etc. e que, em todos os casos, as partículas ejectadas eram produtos de recuo dum processo de colisão. Concluiu que, para a energia e o momento serem conservados, era impossível atribuir a ejecção das partículas ao recuo produzido num choque com um quantum de

radiação. Verificou, finalmente, que “uma explicação satisfatória era obtida supondo que a radiação consiste não de quanta mas de partículas de massa 1 e carga zero, os neutrões”.

A descoberta do neutrão por Chadwick permitiu esclarecer imediatamente a velha questão da composição dos núcleos atómicos. Assim vários físicos, Iwanenko, o próprio Chadwick e Heisenberg, fizeram notar, ainda durante o ano de 1932, que a dificuldade do spin do azoto 14 era removida se o núcleo fosse constituído apenas por protões e neutrões, e se o neutrão tivesse spin $1/2 \hbar/(2\pi)$ e obedecesse à estatística de Fermi. Citando Heisenberg:

“As experiências de Curie e Joliot e a sua interpretação por Chadwick mostraram que um novo e fundamental componente, o neutrão, desempenha um papel importante na estrutura dos núcleos. Isto sugere que os núcleos atómicos são constituídos por protões e neutrões, mas não contêm quaisquer electrões”.

... “Partimos do princípio que os neutrões obedecem à estatística de Fermi e têm spin $1/2 \hbar/(2\pi)$. Esta suposição é necessária para explicar a estatística do núcleo de azoto e é consistente com os resultados empíricos sobre os momentos nucleares”.

Com a constituição dos núcleos esclarecida e os feixes de partículas aceleradas artificialmente disponíveis nos laboratórios, faltava apenas estabelecer o enquadramento para o tratamento teórico do núcleo atómico para que a Física Nuclear entrasse na segunda e mais fecunda fase do seu desenvolvimento. Este enquadramento foi definido por Heisenberg, em 1932, da forma que passamos a relatar.

HEISENBERG E A FÍSICA NUCLEAR TEÓRICA

Heisenberg foi um dos cientistas que desempenhou papel mais relevante na conceptualização e formulação da teoria quântica moderna. Desempenhou também um papel fundamental no desenvolvimento da Física Nuclear. Na verdade, entre outras contribuições valiosas, em trabalhos que efectuou durante o ano de 1932 “Sobre a Estrutura dos Núcleos Atómicos” apresentou várias ideias que serviram de base para as ulteriores investigações teóricas sobre as forças e a estrutura nucleares.

Algumas dessas ideias referem-se à constituição do núcleo atómico e às propriedades do neutrão e já foram citadas. Outra das ideias fundamentais avançadas por Heisenberg foi a de que a estrutura nuclear pode ser descrita pela mecânica quântica não relativista, em termos das interacções entre as partículas nucleares.

Com base nestas hipóteses, Heisenberg passou a usar a conhecida metodologia da investigação teórica dos sistemas de partículas para descrever a estrutura nuclear, ou seja:



Fig. 5 – Werner Heisenberg (1901-1976), cerca de 1924. A sua descoberta da mecânica das matrizes e da relação de comutação entre coordenadas conjugadas conhecida pelo seu nome constitui a primeira forma completa da nova mecânica quântica. Em 1932 Heisenberg produziu o primeiro trabalho teórico da física nuclear moderna, que estabeleceu o padrão das investigações futuras.

- Em primeiro lugar postulou uma função hamiltoniana para um sistema de neutrões e protões;
- Em seguida aplicou as regras da mecânica quântica para deduzir propriedades mensuráveis dos núcleos;
- Depois, colocado perante a impossibilidade de encontrar soluções exactas das equações quânticas, experimentou métodos de aproximação perturbativos e semi-clássicos;
- A seguir comparou os resultados assim obtidos com os valores determinados experimentalmente;
- Finalmente discutiu os limites da validade da função hamiltoniana donde partiu.

Ao formular a função hamiltoniana Heisenberg apresentou também ideias inovadoras que se vieram a revelar de grande importância.

Assim, sabendo-se, na altura, muito pouco sobre as forças nucleares, Heisenberg foi buscar à Física atómica o conceito de forças de permuta, o qual, ainda que deficientemente fundamentado neste seu primeiro trabalho, acabou por se revelar indispensável para a descrição das forças nucleares.

Além disso, como estas forças, por si só e na forma que Heisenberg lhes deu, se revelaram incapazes de explicar o fenómeno da saturação, Heisenberg in-

roduziu o conceito de caroço repulsivo, isto é, supôs que os nucleões passam a repelir-se violentamente quando a distância entre eles se torna inferior a um certo valor. Esta ideia, que foi abandonada por se ter verificado que outro tipo de forças de permuta produzia a saturação, revelou-se muito útil vinte anos mais tarde para explicar certos aspectos dos resultados das experiências de dispersão protão-protão a altas energias, não havendo hoje dúvidas sobre a existência do caroço repulsivo na interacção nucleão-nucleão e havendo até ideias sobre a sua origem.

Finalmente, na formulação da sua função hamiltoniana, Heisenberg usou uma linguagem matemática complicada, baseada no conceito de spin isotópico que então inventou, o qual, no contexto da sua teoria nuclear, era absolutamente desnecessário. Todavia, mais tarde, quando ficou estabelecido que as forças nucleares são independentes da carga do nucleão, o spin isotópico revelou-se ser não só muito útil para descrever as propriedades nucleares, mas absolutamente indispensável para a descrição, tanto fenomenológica como teórica, das propriedades das partículas elementares.

Nos trabalhos acima referidos, Heisenberg atacou o problema geral da estabilidade dos núcleos, pondo alguma ênfase na estabilidade especial do núcleo de hélio e também na estabilidade dos núcleos das séries radioactivas. As limitações da função hamiltoniana de que partiu e dos métodos que tinha ao seu dispor para aplicar as regras da mecânica quântica não permitiam obter resultados inteiramente satisfatórios. Não obstante, aqueles trabalhos constituíram referências indispensáveis das investigações teóricas que se lhes seguiram.

YUKAWA E AS FORÇAS NUCLEARES

Estabelecida a composição do núcleo atómico, a primeira questão que se colocou aos investigadores, tanto experimentais como teóricos, foi a de determinar as características das forças responsáveis pela sua estabilidade. Era evidente, à partida, que não se tratava de nenhuma das forças conhecidas. De facto, tanto as forças gravitacionais, responsáveis pela arquitectura do universo, como as electromagnéticas, que asseguram a estrutura dos edifícios atómicos e moleculares, são demasiado fracas para explicar a extraordinária estabilidade dos núcleos, manifestada, por exemplo, nas enormes energias envolvidas nas reacções nucleares.

No estudo das forças nucleares seguiram-se quatro linhas principais de investigação, a saber:

- a) A colisão entre núcleos;
- b) A observação das propriedades nucleares;
- c) A observação do comportamento dos sistemas de dois nucleões, no estado ligado (deutério) e em colisão;
- d) As teorias de campo.

Com as experiências iniciais de desintegração nuclear provocada, Rutherford iniciou a primeira destas linhas de investigação. O trabalho pioneiro de Heisenberg, a que já nos referimos, iniciou a segunda. Wigner deu início à terceira com dois artigos, escritos em 1932 e 1933, intitulados respectivamente “Sobre o defeito de massa do Hélio” e “Sobre a dispersão de neutrões por protões”. Finalmente, num artigo publicado em 1935 “Sobre a interacção das partículas elementares”, Yukawa apresentou a primeira teoria de campo das forças nucleares. É sobre a teoria de Yukawa que nos vamos concentrar. Convém, no entanto, começar por analisar a teoria de Heisenberg das forças de permuta.

Heisenberg foi guiado pelo seguinte mecanismo de formação do ião da molécula de hidrogénio: quando um átomo de hidrogénio (electricamente neutro) e o seu ião (o protão, carregado positivamente) são colocados a uma certa distância um do outro, o electrão do átomo é atraído pelo ião, transformando-se o átomo em ião e o ião em átomo. Este processo repete-se periodicamente, mantendo-se o átomo e o ião ligados um ao outro por efeito do campo do electrão. Tudo se passa como se o átomo e o ião permutassem periodicamente a sua natureza. A força de ligação, que depende das distâncias entre o átomo e o ião, é proporcional à frequência de permuta.

Heisenberg admitia que, em condições favoráveis, o neutrão se podia separar num protão e num electrão. Então, por analogia com o ião da molécula de hidrogénio, quando um neutrão e um protão são colocados a uma distância um do outro comparável com as dimensões nucleares, a carga negativa começa a trocar de lugar com uma frequência que depende da distância entre o neutrão e o protão. Entre estas partículas cria-se assim uma força cuja intensidade é proporcional à frequência de permuta.

Heisenberg estava consciente das dificuldades de se considerar o neutrão como uma partícula composta dum protão e dum electrão, porque, se assim fosse, de acordo com as regras que já atrás referimos o neutrão devia obedecer à estatística de Bose e ter spin zero, o que não acontece. Por isso não avançou na exploração desta ideia, supondo, em vez disso, que a força de permuta era uma propriedade fundamental do par neutrão-protão. Veremos adiante que existe uma outra razão para não se decalcar o mecanismo de permuta das forças nucleares pelo do ião da molécula de hidrogénio.

A teoria de Heisenberg foi aperfeiçoada por vários autores, no sentido de explicarem, nomeadamente, a singular estabilidade do núcleo de hélio e a saturação das forças nucleares isto é, o facto de ser limitado o número de nucleões, com que uma deles pode interagir simultaneamente (designam-se por nucleões, indiscriminadamente, os protões e os neutrões). Os aperfeiçoamentos eram, no entanto, puramente especulativos, isto é, procuravam-se tipos de interacção que, introduzidos nas equações de movimento do sis-



Fig. 6 – Hideki Yukawa (o terceiro da esquerda) com E. Fermi, E. Segré e G. C. Wick, em 1948. Yukawa apresentou, em 1935, a primeira teoria de campo das forças nucleares. A sua previsão que os quanta do campo nuclear deviam possuir massa foi confirmada, doze anos depois, nos traços deixados por radiação cósmica numa emulsão fotográfica, por Lattes e colaboradores. Wick interpretou a relação de Yukawa entre o alcance das forças e a massa dos quanta do campo partindo das relações de incerteza de Heisenberg.

tema de nucleões, reproduzissem as propriedades nucleares. Foi Yukawa, em 1935, que pela primeira vez, estabeleceu uma teoria fundamental das forças nucleares, usando a teoria de campos.

A parte inovadora do trabalho de Yukawa “Sobre a Interacção das Partículas Elementares” foi supor que, à semelhança do que acontece com a interacção entre cargas eléctricas, a força que um neutrão exerce sobre um protão depende da acção que é exercida sobre este último pelo campo criado pelo primeiro, e vice-versa.

No entanto existem duas diferenças essenciais entre estes dois tipos de força. A primeira refere-se às intensidades: as forças nucleares são muitíssimo mais intensas que as electromagnéticas. Esta diferença manifesta-se, por exemplo, na enorme disparidade dos valores das energias envolvidas nas reacções nucleares e nas reacções químicas. A segunda refere-se aos alcances: enquanto que as forças electromagnéticas, embora decresçam rapidamente com a distância, fazem sentir a sua acção até ao infinito, as nucleares só alcançam alguns fermis (1 fermi = = 0,0000000000001 cm é a unidade que se utiliza na descrição dos fenómenos à escala nuclear e sub-nuclear).

A fim de tomar em conta a primeira daquelas diferenças, Yukawa acoplou o campo nuclear às suas fontes muito mais fortemente que no caso do campo electromagnético. E tratou da segunda introduzindo um termo de massa na equação de campo nuclear, escolhendo o valor da massa de maneira a que a solução estacionária tivesse o alcance pretendido.

A fim de dar uma interpretação física ao termo de massa, Yukawa socorreu-se outra vez da analogia com o campo electromagnético. Os quanta do campo electromagnético são os fótons. A equação do campo electromagnético não tem termo de massa porque os fótons não possuem massa. Os quanta do campo nuclear deviam portanto ser partículas cuja massa é igual à que tem de ser introduzida na equação de campo para se obter o alcance desejado. Depois dum cálculo simples Yukawa concluiu que a massa dos quanta do campo nuclear deveria ser cerca de 200 vezes a massa do electrão. Este valor situa-se entre o das massas do electrão e do protão. Por isso chamou-se aos quanta do campo nuclear mesões ou mesões.

A relação estabelecida por Yukawa entre a massa do mesão e o alcance das forças nucleares tem um significado físico baseado no princípio de incerteza de Heisenberg, tal como foi feito notar por Wick, em 1938. O citado princípio faz depender, por exemplo, a incerteza associada a uma determinação do valor da energia dum sistema do tempo de que se dispõe para a observação: o produto da incerteza pelo tempo de observação não pode ser inferior a $h/(2\pi)$. Portanto de quanto mais tempo se dispuser menor poderá ser a incerteza do valor determinado.

Na teoria de Yukawa, a interacção entre um protão e um neutrão resulta dum sucessão de processos elementares de emissão dum mesão por uma das partículas e absorção pela outra. Mas, tal como se passa com os fótons que medeiam a força electromagnética, os mesões em trânsito entre os nucleões não são reais, mas sim virtuais. Na verdade, se eles fossem reais haveria três estados distintos – a saber: um inicial, antes do mesão ser emitido por uma das partículas; um intermédio, com o mesão em trânsito; e um final, depois do mesão ser absorvido pela outra partícula – que evoluiriam duns para os outros sem interferência externa, mas em que o estado intermédio possuiria uma energia diferente da dos estados inicial e final.

Para não haver violação da conservação da energia é indispensável que o tempo que o mesão leva a percorrer a distância entre os dois nucleões seja insuficiente para detectar experimentalmente a sua presença. Ora para se detectar a presença do mesão a margem de erro da energia tem de ser inferior à energia correspondente à sua massa em repouso. Inversamente, para se não poder concluir que a partícula vai em trânsito, a margem de erro tem de ser superior à energia correspondente à sua massa em repouso.

Conclui-se assim que quanto mais pesados forem os quanta dum campo mais curta tem que ser a sua viagem e mais pequeno é o alcance das forças. Como os

fótons não possuem massa em repouso, as forças electromagnéticas podem alcançar até ao infinito. Porque as forças nucleares possuem um alcance finito, os quanta do campo, os mesões, possuem massa.

Um quantum virtual emitido por uma partícula pode ser absorvido por ela própria. As partículas estão assim constantemente rodeadas por uma nuvem de mesões de campo virtuais. Os mesões virtuais podem tornar-se reais fornecendo ao sistema energia pelo menos igual à sua massa em repouso, o que se consegue perturbando bruscamente a partícula, fazendo-a, por exemplo, chocar com outra partícula.

O facto da interacção entre os dois núcleos ter origem em processos de emissão e absorção de quanta virtuais constitui mais um argumento para não se levar muito longe a analogia com o mecanismo electrónico da ligação do ião da molécula de hidrogénio, pois o electrão encontra-se aqui num estado real.

Além de massa, Yukawa previu que os quanta do campo nuclear deviam possuir carga eléctrica, a que transportam do protão para o neutrão ou vice versa. Deviam pois ser partículas carregadas com carga positiva ou negativa, igual, em valor, à carga do electrão. A ideia, atrás exposta, dum partícula poder ela própria absorver os mesões que emite, não foi considerada por Yukawa, como não foi considerada a hipótese de haver interacção entre dois protões ou dois neutrões. Não foi por isso prevista inicialmente a existência de quanta do campo nuclear desprovidos de carga eléctrica. No entanto teve que se admitir que eles existiam quando se constatou que as forças nucleares não dependem da carga dos nucleões (isto é, as forças de interacção são as mesmas entre dois protões, dois neutrões ou entre um neutrão e um protão).

Finalmente, e pelo mesmo argumento já invocado por Heisenberg, Yukawa previu que os quanta do campo nuclear, a existirem, deviam obedecer à estatística de Bose e ter spin nulo.

Levou algum tempo até que as previsões de Yukawa fossem confirmadas. Em experiências realizadas em câmara de nevoeiro por Anderson e Neddermeyer (1938) e Street e Stevenson (1937) foi detectada a presença dum mesão, isto é, de uma partícula desconhecida possuindo uma massa de valor compreendido entre a do electrão e a do protão. No entanto essa partícula interagiu muito fracamente com os núcleos e, por esta razão, não podia ser um quantum do campo de Yukawa. Sabe-se hoje que essa partícula era um electrão pesado, ou muão.

Foi apenas em 1947, que Lattes e seus colaboradores encontraram em emulsões fotográficas evidência incontroversa da existência do mesão de Yukawa (hoje chamado mesão pi ou pião). Esta descoberta mostrou a justeza do método de aproximação de Yukawa ao problema das forças nucleares e iniciou uma nova fase experimental, em que se começaram a usar mesões para estudar as propriedades nucleares, em particular as características das forças fortes. Esta fase não ter-

minou ainda, havendo actualmente um renovado interesse na física das energias intermédias, devido à disponibilização de feixes de mesões estranhos.

As ideias originais de Yukawa foram intensamente exploradas, inventando-se outros tipos de mesões para explicar determinados aspectos das forças nucleares. A permuta de piões dá conta da parte de maior alcance das forças nucleares. Outros piões, de maior massa, da parte intermédia, outros ainda da parte de menor alcance. Construíram-se assim, bocado a bocado, potenciais de permuta de um bosão que se têm revelado muito úteis para a determinação das propriedades dos núcleos atômicos. Os seus parâmetros são ajustados de modo a reproduzir os dados da colisão nucleão-nucleão em vários domínios de energia. No entanto, as forças que actuam entre dois nucleões no interior dum núcleo são diferentes das que actuam entre dois nucleões isolados.

A modificação da interacção de dois nucleões na presença de terceiros constitui uma alteração drástica ao velho princípio de Newton sobre a resultante das forças que as partículas dum sistema exercem sobre uma delas. O facto de se terem de considerar forças de três ou mais corpos significa que o núcleo não é o sistema simples que Heisenberg imaginava, sendo necessário também entrar directamente em conta com a dinâmica dos graus de liberdade mesónicos, o que tem sido feito com algum sucesso.

Mas, mesmo assim, o mistério das forças nucleares encontra-se longe de se poder considerar desvendado. Na verdade, os nucleões e os mesões não são partículas elementares, mas sistemas muito complexos constituídos a partir de campos quarkónicos e gluónicos, cujo comportamento é determinado pela Cromodinâmica Quântica, – a teoria fundamental das interacções fortes, de que as forças nucleares são apenas uma manifestação. Simplesmente ainda não se sabe resolver as respectivas equações de campo no regime de energias em que os quarks se agrupam em nucleões e mesões.

MODOS DE MOVIMENTO COLECTIVOS E INDIVIDUAIS

Não é possível, mesmo que se pudessem traduzir as forças de interacção dos nucleões em termos duma energia potencial, resolver exactamente as equações de movimento da esmagadora maioria dos núcleos existentes na Natureza, por serem sistemas de muitos corpos. É necessário, portanto, recorrer a modelos que representem apenas alguns aspectos específicos da complexa fenomenologia nuclear.

Um dos primeiros modelos a ser ensaiado foi o de camadas, por causa do seu sucesso na descrição das propriedades atômicas. Este modelo pressupõe que os nucleões se movem independentemente uns dos outros, num campo de forças central que representa, em

média, a acção exercida pelos restantes nucleões sobre cada um deles.

No átomo, o campo médio é determinado essencialmente pela atracção electrostática do núcleo que, por ser muitíssimo mais pesado que o resto do sistema, constitui um centro de forças natural em torno do qual se movimentam os electrões. A repulsão que sobre cada electrão exercem os restantes traduz-se essencialmente na atenuação da atracção do núcleo. A que não é tida em conta pelo campo médio pode ser tratada por métodos de aproximação perturbativos.

O modelo atômico de camadas permitiu explicar as propriedades químicas dos elementos e, em particular, fundamentar o Quadro dos Elementos de Mendeléef. De acordo com esse modelo, ao construir-se um átomo a partir dos seus ingredientes, colocam-se os electrões nos estados determinados pelo potencial médio, começando pelos que correspondem a energias mais baixas.

De acordo com o Princípio de Exclusão de Pauli, não é possível colocar mais do que dois electrões em cada orbital disponível e, mesmo assim, eles têm que alinhar os seus momentos magnéticos intrínsecos de modo a anularem-se mutuamente. Quando todos os estados disponíveis com uma certa energia estiverem ocupados diz-se que se encheu uma camada electrónica. O electrão seguinte ocupará um dos orbitais do próximo nível energético. E assim sucessivamente até se esgotarem todos os electrões que constituem o átomo.

Os electrões da última camada são os que se encontram mais fracamente ligados, sendo por isso os que se envolvem nas reacções químicas. Elementos cujos átomos apresentam configurações orbitais semelhantes na última camada possuem propriedades químicas semelhantes. Resultam daqui as regularidades reflectidas no Quadro de Mendeléef. Os átomos em que toda as camadas estão completas (os gases nobres) são particularmente estáveis; aqueles a quem falta apenas um electrão para completar a última camada ou possuem um só electrão nessa camada são particularmente reactivos.

Elsasser, em 1933 e 1934, descobriu que os núcleos que apresentavam números especiais de neutrões e protões formavam configurações particularmente estáveis, o que sugeria que os nucleões, tais como os electrões no átomo, se dispunham em camadas. Contudo as suas observações não foram tomadas em devida conta, talvez por não se vislumbrar justificação para a aplicabilidade do modelo de camadas aos nucleões.

Na verdade, todos os componentes do núcleo possuem massa semelhante, não podendo atribuir-se a nenhum deles o papel desempenhado pelo núcleo no átomo. Além disso as forças nucleares são intensíssimas e de muito curto alcance, em comparação com as atômicas, que são fracas e de longo alcance. Qualquer perturbação causada a um dos nucleões devia, por conseguinte, estender-se, repercutir-se intensamente sobre os seus vizinhos até que o excesso de energia se

distribuisse por todo o núcleo. Ora este mecanismo dissipativo é característico dos sistemas que exibem modos colectivos de movimento, como uma gota líquida, e não dos sistemas que exibem modos individuais, como os átomos.

As dúvidas sobre a aplicabilidade do modelo de camadas ao núcleo atómico foram reforçadas com a descoberta feita por Amaldi e colaboradores no Instituto de Física de Roma, em 1935, de que os neutrões lentos são muito mais eficazes que os rápidos em produzir certas reacções nucleares. Em particular, a secção eficaz para a captura de neutrões pelos núcleos, que é da ordem das dimensões nucleares para partículas com energias elevadas, aumenta para além da área nuclear quando os neutrões são retardados por substâncias ricas em hidrogénio.

Este resultado, em si mesmo, está de acordo com as previsões da mecânica quântica e o primeiro modelo nuclear usado para o explicar foi precisamente o de camadas. No entanto este modelo prevê que as secções eficazes dos processos de captura e de dispersão de neutrões lentos pelos núcleos devem ser da mesma ordem de grandeza quando, na realidade, o primeiro processo é muitíssimo mais eficaz que o segundo. O modelo nuclear em camadas é também incapaz de explicar o comportamento selectivo da captura quando os neutrões passam através de absorventes diferentes.

Para explicar estes comportamentos estranhos, Niels Bohr introduziu, em 1936, o conceito de núcleo composto, segundo o qual o neutrão capturado constitui com o núcleo alvo um sistema meta-estável, que depois decai sem guardar memória da forma como foi criado. Na base deste conceito encontra-se o mecanismo dissipativo atrás referido que, na sua forma extrema, idealiza o núcleo como uma gota líquida.

Bohr e Kalckar, em 1937, compararam pela primeira vez a dinâmica dum núcleo à de uma gota líquida. Os movimentos mais importantes duma gota são os de vibrações de superfície. A fórmula que dá a frequência dos vários modos de vibração em função da massa da gota e do coeficiente de tensão superficial havia sido deduzida em 1879 por Rayleigh. A sua aplicação ao caso dum núcleo tem de ter em conta o efeito da repulsão colombiana entre os protões, que reduz as frequências de vibração. O efeito do campo colombiano torna-se muito importante para os núcleos mais pesados, impondo restrições sérias à sua estabilidade contra as deformações de superfície. Os núcleos que se encontram nos limites destas condições podem partir-se em consequência duma pequena perturbação exterior. Foi assim que Niels Bohr e Wheeler apresentaram, em 1939, uma discussão detalhada do mecanismo da fissão que tinha sido descoberta recentemente por Hahn, um dos primeiros estudantes de pós-graduação estrangeiros a trabalhar com Rutherford em McGill, e Strassman.



Fig. 7 – Niels Bohr (1885-1962), na altura em que desenvolvia a sua teoria quântica do átomo, baseada no modelo nuclear planetário proposto por Rutherford. As dificuldades surgidas com a aplicação da teoria de Bohr levaram à formulação da nova mecânica quântica, para cuja interpretação Bohr contribuiu decisivamente. Niels Bohr foi uma das personalidades mais marcantes da ciência do século XX.

O sucesso das aplicações dos modelos do núcleo composto e da gota líquida, aliado ao grande peso científico do nome de Bohr, fez esmorecer, por uns tempos, a ideia de que os protões e os neutrões se podiam estruturar por camadas de energia. No entanto a ideia nunca foi completamente abandonada. Em finais dos anos quarenta Maria Mayer (Fig. 8) conseguiu juntar evidência experimental suficiente para demonstrar que as propriedades nucleares apresentam regularidades próprias dum modelo de partículas independentes, sendo mesmo possível identificar os “números mágicos” de neutrões e de protões que correspondem a camadas cheias. Em 1949 e 1950 ela própria e, independentemente, Haxel, Jensen e Suess, mostraram que a inclusão dum termo de ligação entre os momentos angulares orbital e intrínseco no campo médio nuclear podia explicar quantitativamente não só a excepcional estabilidade dos núcleos que possuíam números mágicos de neutrões e protões, mas também propriedades magnéticas dos núcleos e os seus spins.



Fig. 8 – Maria Mayer estudando uma tabela de núcleos na Universidade de Chicago. O estudo sistemático das propriedades dos núcleos atômicos levou-a a formular, em 1949, o modelo nuclear de camadas, que tem alguma semelhança com o modelo atômico de Bohr e explica muitas das regularidades daquelas propriedades.

O modelo nuclear de camadas revelou-se extremamente importante para o desenvolvimento dos estudos nucleares. Com o aperfeiçoamento das máquinas aceleradoras e das técnicas de detecção de partículas e de radiação, acumulou-se evidência indelével da existência de modos individuais de excitação nuclear, em conformidade com o modelo de camadas. Mas, por outro lado, os dados empíricos também não deixavam margem para dúvidas sobre a importância dos aspectos colectivos da estrutura nuclear.

Para além da fissão, a reacção ordenada dos núcleões a estímulos exteriores foi claramente evidenciada nos valores dos momentos quadripolares de muitos núcleos, que podem assumir valores 20 vezes superiores aos previstos pelo modelo de partículas independentes, e também na ocorrência de transições gama de natureza eléctrica quadripolar, com tempos de vida cem vezes mais curtos que os estimados por esse modelo.

A relação entre os modos colectivos e individuais foi esclarecida pelas investigações teóricas de A. Bohr e Mottelson (Fig. 9), em 1952 e 1953, os quais tiveram a ideia brilhante de descrever os núcleos como uma estrutura de camadas capaz de rodar livremente no espaço e de oscilar em forma e tamanho. Os movimentos colectivos do campo médio nuclear refletem-se assim no movimento individual dos núcleões, e vice-versa. Este sistema possui muitas analogias com as estruturas moleculares, em que os electrões se movem independentemente uns dos outros no campo dos núcleos atômicos, os quais podem vibrar entre si e rodar como um todo no espaço, de acordo com uma dinâmica que, por sua vez, depende também da configuração electrónica.

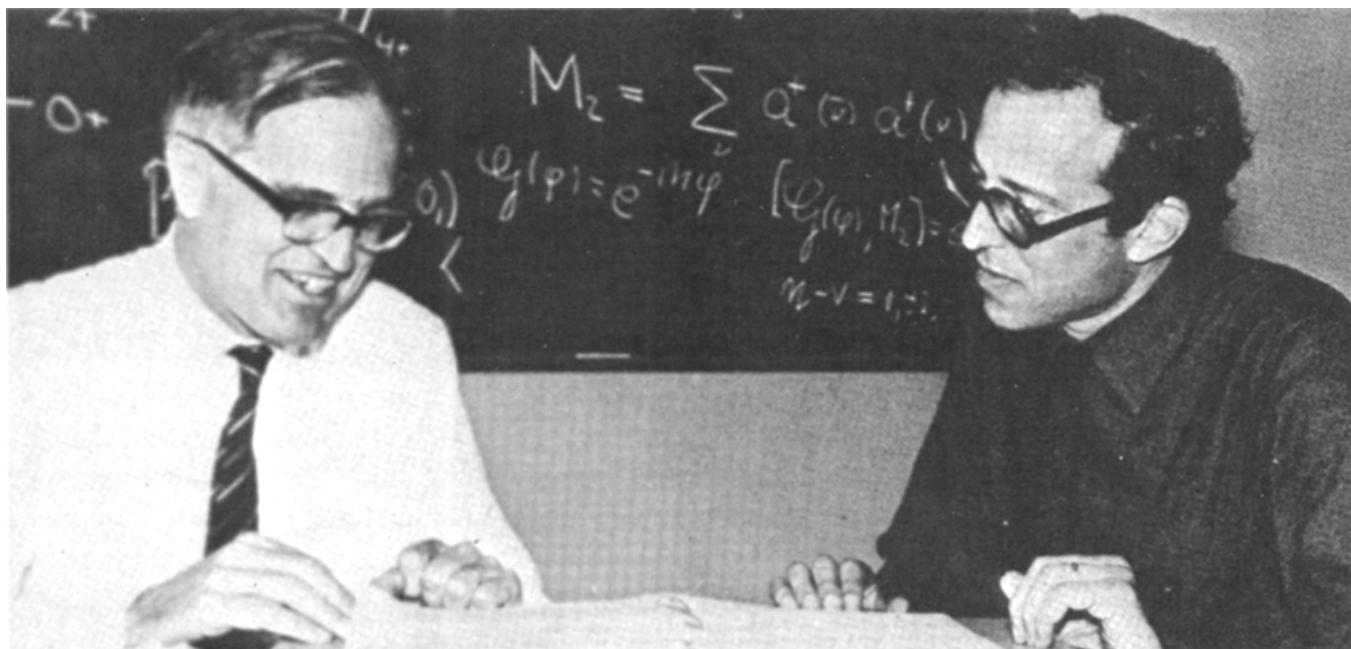


Fig. 9 – Aage Bohr (à esquerda) e Ben Mottelson em Copenhaga. Os dois notáveis cientistas unificaram as visões aparentemente antagónicas dos modelos nucleares de camadas e da gota líquida, tendo contribuído bastante para o esclarecimento dos papéis desempenhados pelos modelos individuais e pelos modos colectivos na dinâmica do núcleo atômico.

A aquisição de deformações permanentes por parte dos núcleos atômicos compreende-se partindo do processo de enchimento de camadas atrás descrito, tendo em conta que, ao contrário do que se passa com os átomos, a interacção residual dos nucleões é atractiva. Nas camadas completas, as orientações das órbitas dos nucleões ficam distribuídas uniformemente no espaço, o que confere forma esférica ao núcleo. Mas quando existem nucleões em camadas incompletas, as suas órbitas procuram, dentro das limitações impostas pelo Princípio de Pauli, sobrepor-se o mais possível para que os nucleões tirem proveito da atracção residual, o que confere à última camada uma forma asférica que, por arrastamento, deforma também as camadas interiores. Nos átomos, a natureza repulsiva da interacção residual obriga os electrões a manterem-se o mais possível afastados uns dos outros, o que favorece as formas esféricas em todas as circunstâncias.

Esclarecida a interrelação dos movimentos colectivos e individuais, ficava ainda por justificar a validade do modelo de partículas independentes no caso dos núcleos atômicos. Limitações de espaço não nos permitem entrar nesta questão fundamental da Física do Núcleo Atômico. Referiremos apenas o papel desempenhado pelo Princípio de Pauli.

O Princípio de Exclusão de Pauli proíbe que duas partículas idênticas ocupem o mesmo estado quântico. Quando dois nucleões colidem entre si na presença dos outros nucleões do núcleo, a maior parte dos estados que eles poderiam ocupar se estivessem isolados já se encontram ocupados por outros nucleões. Como consequência, um nucleão pode percorrer grandes distâncias comparadas com as dimensões nucleares, sem ser perturbado no seu trajeto.

OS NUCLEÕES E OS SEUS CONSTITUINTES

Uma molécula separa-se nos seus átomos constituintes com energias da ordem de alguns electrões-volt.

Podem extrair-se electrões dum átomo bombardeando-o com radiação ou com partículas possuindo energias da ordem das dezenas de electrões-volt.

Conseguem-se arrancar nucleões a um núcleo fazendo incidir sobre ele feixes de partículas com energias individuais da ordem de grandeza dos milhões de electrões-volt.

Bombardeando os nucleões com partículas aceleradas com as maiores energias de que é possível actualmente dispôr, eles nem se partem nos seus constituintes, nem ficam intactos! Na verdade, nos destroços dessas violentíssimas colisões tem-se encontrado de tudo: desde o próprio nucleão, aos mesões do campo nuclear até partículas estranhas muito mais pesadas do que as que colidiram entre si. Mas nunca se encontrou algo que se possa identificar com um constituinte elementar do nucleão. E, no entanto, acredita-se firmemente que eles existem.

Trata-se duma situação que é inteiramente nova no processo de encontrar os constituintes últimos da matéria. O seu esclarecimento, durante a década dos anos sessenta, é uma história fascinante que terá, contudo, de ser lida noutra local (vide, e.g., as sugestões para outras leituras no final deste artigo). As conclusões a que se chegaram são, no entanto, essenciais para se compreender o que se sabe e também o muito que ainda se não sabe sobre os nucleões e as forças nucleares, isto é, sobre os próprios fundamentos dos núcleos atômicos e das propriedades que se lhes conhecem.

Segundo as teorias actuais os nucleões são constituídos principalmente à custa de dois tipos de quarks, o quark «u» e o quark «d», ligados entre si pelos bosões do campo das forças fortes, ou sejam os gluões. Os mesões pi serão também constituídos pelo mesmo tipo de quarks, embora em composição diferente (três quarks no caso dos nucleões, um quark e um antiquark no caso dos mesões).

Os quarks e os gluões interagem entre si de acordo com a teoria da Cromodinâmica Quântica. Existe alguma semelhança entre a Cromodinâmica Quântica e a mais familiar Electrodinâmica Quântica. Tanto uma como a outra possuem como ingredientes as fontes e os bosões do campo. Na Electrodinâmica Quântica as fontes são as cargas eléctricas e os bosões do campo



Fig. 10 – Murray Gel-Mann (1929), um dos mais brilhantes físicos da presente geração. A descoberta, feita em 1961, juntamente com Néeman, de que as partículas que interagem fortemente (ou hadrões) se podem ordenar de acordo com as representações do grupo de simetria SU(3), levou-o a propôr em 1963, simultaneamente com, mas independentemente de G. Zweig, que os hadrões são todos eles constituídos por partículas ainda mais elementares, a que Gel-Mann chamou quarks.

são os fótons. No caso da Cromodinâmica Quântica, as fontes são as cores e os bósons de campo são os glúons. Mas existe uma diferença fundamental entre as duas teorias que torna as equações de campo da Cromodinâmica muito mais difíceis de resolver que as da Electrodinâmica: enquanto os fótons não possuem carga eléctrica, os glúons possuem cor. Por esta razão, ao contrário do que se passa com os fótons, os glúons são fontes de si mesmos.

Uma outra razão da dificuldade de aplicar a Cromodinâmica Quântica é a forte dependência da interacção quark-gluão da quantidade de movimento transferida, Q . Para valores de Q muito elevados a interacção é muito pequena e é possível aplicar técnicas quânticas perturbativas. Mas para pequenos valores de Q o regime é fortemente não perturbativo e não se conhecem ainda técnicas que permitam uma solução, mesmo aproximada, das equações de movimento neste regime. Ora é esse precisamente o regime que interessa à física nuclear porque é aí que surge o confinamento da cor e os nucleões ganham estrutura.

A propriedade do confinamento da cor significa que não há objectos isolados coloridos («cor» é aqui entendida como a carga da cromodinâmica, isto é, as fontes dos glúons). Esta propriedade explica a impossibilidade de se extrair um quark dum nucleão, por-

que os quarks possuem cor. Mas num processo de colisão entre partículas que interagem fortemente é possível obter essas partículas e ainda, por exemplo, um pião desde que se disponha de energia suficiente, porque um glúão pode originar um par quark-antiquark da mesma maneira que um fóton pode originar um par electrão-positrão.

Um dos problemas ainda em aberto no que toca à Física Nuclear é o de fundamentá-la a partir da Cromodinâmica Quântica, começando por construir os nucleões a partir dos quarks e dos glúons. A resolução das equações da Cromodinâmica Quântica “à força bruta” não tem encontrado o sucesso esperado, não obstante os poderosíssimos meios de cálculo actualmente disponíveis. Têm-se feito alguns progressos usando modelos que representam um estado intermédio entre a cromodinâmica pura e a física nuclear. Entre estes destacam-se os que constroem os nucleões inteiramente à custa de bósons e os que os consideram como solitões de campos quarkónicos e mesónicos em interacção. Tem-se, desta maneira, reproduzido muitas das propriedades estáticas e dinâmicas dos nucleões, mas a ligação destes modelos com a Cromodinâmica Quântica é ainda bastante ténue.

Outra questão interessante que continua em aberto é a de saber se existirão nos núcleos, pelo menos

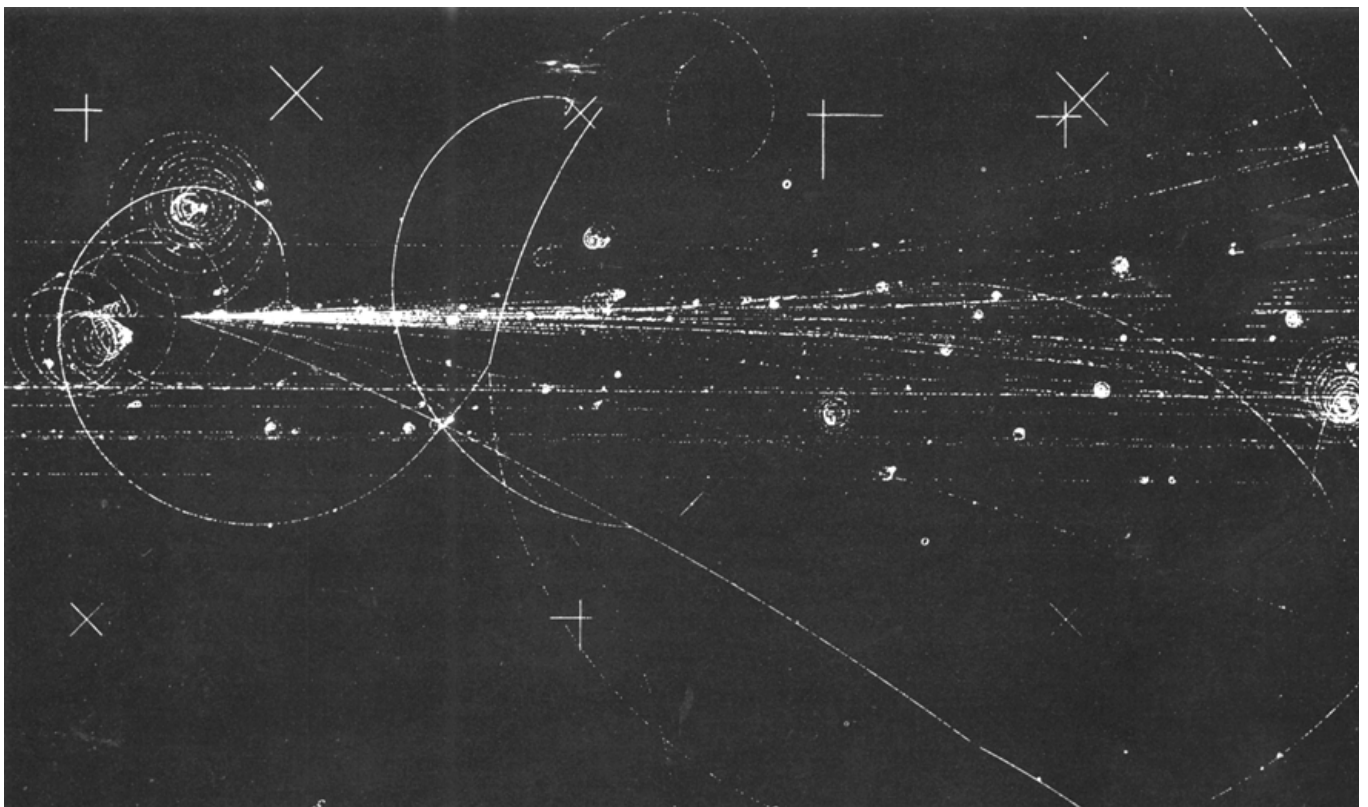


Fig. 11 – Quando se lança um protão contra outro protão, na tentativa de libertar os quarks que eles contêm, o que acontece é que nenhum quark é libertado. Em vez disso, mais partículas são criadas a partir de energia disponível. Nesta fotografia, tirada na câmara de bolhas de hidrogénio de 75 cm do Fermilab, um protão de 300 Gev, entrando pelo lado esquerdo, bate num protão do líquido, produzindo um chuva de 26 partículas carregadas, quase todas elas piões. Os rastros curvos e espiralados correspondem a electrões cujas trajectórias, por corresponderem a partículas muito mais leves que os hadrões, são facilmente encurvadas pelo campo magnético da câmara.

em condições extremas, manifestações directas dos graus de liberdade quarkónicos e gluónicos. Mas, para além destas questões fundamentais, a entrada em funcionamento de máquinas aceleradoras com energias intermédias e a invenção de técnicas mais poderosas de investigação teórica reabriram o interesse nalgumas velhas questões da física nuclear, em especial as relacionadas com a descrição relativista dos núcleos e com a dinâmica dos campos mesónicos. Por outro lado o núcleo atómico continua também a ser

um bom laboratório para se testar a teoria standard das interacções electrofracas e as suas possíveis extensões.

A Cromodinâmica Quântica e a sua unificação com as outras teorias básicas das forças da Natureza permitem-nos ter uma ideia precisa, ou pelo menos julgar que a temos, do que aconteceu no primeiro segundo depois do Big Bang. Mas, não o devemos esquecer, continuam por esclarecer os mecanismos da formação dos núcleos atómicos que, afinal, constituem 99% da massa total do Universo!

SUGESTÕES DE LEITURA

EMÍLIO SEGRÈ, *"From X-Rays to Quarks: Modern Physicists and Their Discoveries"*, University of California, Berkeley, 1980.

J. G. CROWTHER, *"British Scientists of the Twentieth Century"*, Routledge & Kegan Paul Limited, London, 1952.

F. CLOSE, M. MARTEN and C. SUTTON, *"The Particle Explosion"*, Oxford University Press, 1987.

A. BARROSO, *"De que são feitas as coisas"*. Colóquio/Ciências n.º 2.

REFERÊNCIAS

J. M. BLATT and V. F. WEISSKOPF, *"Theoretical Nuclear Physics"*, John Wiley & Sons, New York, 1952.

D. M. BRINK, *"Nuclear Forces"*, Pergamon Press, Oxford, 1965.

A. DE SHALIT and H. FESHBACH, *"Theoretical Nuclear Physics"*, John Wiley & Sons, New York, 1974.

P. J. SIEMENS and A. S. JENSEN, *"Elements of Nuclei"*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1987.

D. H. PERKINS, *"Introduction to High Energy Physics"*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1987.

M. C. BIRSE, *"Soliton Models for Nuclear Physics"*. Progress in Particle and Nuclear Physics, 1990.