
ENXERGANDO O NÚCLEO ATÔMICO

José Ricardo Marinelli
Depto. de Física – UFSC
Florianópolis – SC

Uma pergunta que comumente ocorre a um estudante ou mesmo qualquer pessoa que se interesse em aprender alguma coisa sobre Física Moderna é a seguinte: “Como podemos saber se as teorias sobre átomos, núcleos e as partículas elementares que compõem a matéria são válidas se não é possível “enxergá-las”, mesmo utilizando os mais sofisticados e modernos microscópios conhecidos? Até que ponto podemos, afinal, confiar nessas teorias?” Evidentemente, a resposta para tal questão passa necessariamente por uma discussão do significado da palavra “ver” no contexto da Física do microcosmo e pelo fato de existirem métodos indiretos de estudarmos experimentalmente objetos tão pequenos como moléculas, átomos, núcleos atômicos, mésons, etc.

A Física Nuclear corresponde a um bom exemplo de como é possível desenvolver teorias a partir desses métodos “indiretos” de medição, ou mesmo de como teorias previamente estabelecidas podem ser comprovadas a partir desses métodos. O que se procura, em geral, é fazer com que o núcleo do átomo interaja com outros corpos de dimensões semelhantes ou ainda menores, comparando-se o comportamento desses corpos (e eventualmente do núcleo também) antes e depois de ocorrer a interação: é o que chamamos de espalhamento nuclear. Na verdade, podemos dizer que a Física Nuclear nasceu com uma experiência desse tipo, a conhecida experiência de espalhamento de partículas α , realizada em 1911 por Rutherford. O que se mede, na realidade, em um experimento desse tipo é a razão entre o número de partículas α que são desviadas de um certo ângulo em relação à sua trajetória inicial e o número de partículas α que incidem sobre o alvo com uma dada energia e que podem ser contadas por detectores especiais. O desvio, no caso, se dá devido à interação da partícula α com os constituintes nucleares e a razão acima é proporcional ao que definimos como secção de choque de espalhamento⁽¹⁾ (ou mais propriamente chamada de secção de choque diferencial).

O importante nesse tipo de medida é podermos relacionar os resultados experimentais com algum tipo de previsão teórica que nos permita aprender algo a respeito do alvo estudado. No caso da experiência de Rutherford, verificou-se que os resultados obtidos para a secção de choque experimental eram muito bem reproduzidos se essa mesma secção de choque fosse calculada supondo-se que as partí-

culas α eram desviadas por um centro espalhador de carga elétrica positiva, ou seja, que a interação, no caso, fosse do tipo força de Coulomb. Com tal hipótese pode-se inclusive obter a ordem de grandeza das dimensões desse centro espalhador.

Se quisermos agora aprender mais do que simplesmente a natureza das partículas que constituem o alvo e as dimensões dele, necessitaremos fazer com que a partícula incidente “penetre” na estrutura desse alvo, pois dessa forma a secção de choque será sensível aos detalhes da distribuição das partículas do alvo. No caso de espalhamento de partículas α pelo núcleo atômico, será, no entanto, necessário que tais partículas, que possuem carga elétrica positiva, tenham energia incidente suficientemente alta para vencer a repulsão coulombiana causada pelo núcleo (que também tem carga positiva). Sabemos, entretanto, que tanto o α como o núcleo são constituídos por prótons e nêutrons, os quais interagem através de outro tipo de força, conhecida como força nuclear ou interação forte, que é muito mais intensa a curtas distâncias (da ordem das dimensões nucleares) do que a força coulombiana. Porém a força de atração nuclear não é tão bem conhecida como a força coulombiana; isto pode se constituir numa vantagem do método, pois esse tipo de experimento pode nos fornecer um meio de obtermos informações sobre a força nuclear. No entanto, se quisermos conhecer a estrutura nuclear, ou seja, de que forma os prótons e nêutrons se arranjam dentro do núcleo, sem termos que depender do conhecimento exato da interação nuclear, isso pode se constituir em uma desvantagem. Uma forma de resolvermos esse problema é utilizarmos, como “ponta de prova”, não mais partículas α , mas partículas que, mesmo ao penetrarem suficientemente o núcleo, continuem a interagir com ele apenas através de forças eletromagnéticas, ou seja, forças bem conhecidas. A partir de meados da década de 50, elétrons de alta energia (algumas centenas de milhões de elétron-volt) começaram a ser utilizados para experiências de espalhamento⁽²⁾, já que o elétron satisfaz a condição acima mencionada. Graças a esse tipo de experimento, foi possível comprovar que a distribuição média dos prótons, ou seja, a distribuição de carga é praticamente constante dentro do núcleo, caindo rapidamente a zero na superfície e que esta forma é essencialmente a mesma, independente do número de prótons presentes. No entanto, a aplicação desse método de investigação pode ser ainda mais poderosa: ao incidir sobre o núcleo, o elétron pode ser desviado não apenas pela interação coulombiana, mas também pela interação com o campo magnético gerado pelos prótons nucleares. Se isso ocorre é porque os prótons no núcleo não estão “congelados”, mas apresentam algum tipo de movimento. Esse movimento gera então uma corrente, que por sua vez cria um campo magnético que irá interagir com o elétron em movimento. Porém é possível criar situações experimentais em que a secção de choque depende apenas da interação do elétron com a corrente nuclear, ou seja, o desvio sofrido pelo elétron é devido apenas a essa corrente e não depende da carga (estática) do núcleo propriamente dita. Mas, se pudermos conhe-

cer a forma dessa corrente dos prótons através desse tipo de experimento, isto corresponde a aprendermos sobre o movimento dos prótons, ou seja, sobre a dinâmica da estrutura nuclear.

Poder-se-ia pensar, do que foi exposto até aqui, que é possível apenas aprendermos sobre a estrutura dos elétrons devido aos prótons. Entretanto o nêutron, embora eletricamente neutro, possui uma distribuição interna de carga (o próton e o nêutron não são de fato partículas pontuais!) e portanto podem também interagir com o elétron. Mais recentemente, tem-se proposto que o núcleo não seja constituído basicamente por prótons e nêutrons, mas sim pelos chamados “quarks”, que em número de três formariam um núcleon (próton ou nêutron). Também aqui a utilização de elétrons como sonda nuclear será importante. Nesse caso será necessário, no entanto, que o feixe incidente de elétrons possua energias bem mais altas que as atualmente utilizadas (da ordem de bilhões de elétrons-volt) – grandes aceleradores estão sendo projetados para um futuro próximo, com tal finalidade.

Muito se tem aprendido sobre o núcleo atômico utilizando a técnica de espalhamento de elétrons. Embora não seja a única forma, talvez seja, no momento, uma das mais poderosas, e a razão básica para isso é, como dissemos anteriormente, que a força de interação elétron-núcleo é bem conhecida. Mas existe outra razão igualmente importante: a força que mantém prótons e nêutrons ligados dentro do núcleo é aproximadamente duas mil vezes mais intensa que a força eletromagnética que caracteriza a interação do elétron com os constituintes nucleares. Assim, o elétron é uma espécie de sonda nuclear não-destrutiva, no sentido de que, mesmo penetrando suficientemente o núcleo, não causa grandes modificações em sua estrutura.

Podemos entender um pouco melhor o processo de espalhamento de elétrons fazendo uma analogia com o espalhamento (ou difração) da luz por um objeto. Sabemos que, ao sofrer difração, a luz projeta sobre um anteparo as chamadas figuras de difração características, que por sua vez vão depender das dimensões e forma do objeto. Se quisermos conhecer com detalhes sua forma, sabemos que o comprimento de onda associado à luz incidente deve ter no máximo as mesmas dimensões do objeto. Lembrando agora do princípio de dualidade onda-partícula da mecânica quântica, podemos pensar no elétron como a “luz” incidindo sobre o objeto (no caso o núcleo) e produzindo figuras de difração, representadas em nosso caso pela secção de choque. De fato, essa secção de choque em função do ângulo de espalhamento apresenta o comportamento esperado de máximos e mínimos de difração. A Fig. 1 mostra um cálculo teórico feito para o núcleo de ^{208}Pb juntamente com os dados experimentais. Esse resultado permitiu descobrir que a densidade de carga do ^{208}Pb varia em função da distância r ao centro do núcleo como mostrado na Fig. 2. Embora esse seja de fato o caso para o núcleo de ^{208}Pb , nem todos os núcleos possuem forma esférica; muitos deles apresentam formas geométricas mais complicadas, o que ficaria evidente apenas se pudéssemos obter a forma espacial

da distribuição de carga, o que também é possível usando elétrons como ponta de prova através de mecanismos especiais de espalhamento que têm sido recentemente desenvolvidos. É interessante ainda notar que a distribuição de carga do núcleo de ^{208}Pb , como mostrada na Fig. 2, pode ser obtida a partir de experiências de espalhamento de elétrons com um erro da ordem de 1% apenas, o que mostra a grande precisão com que esse tipo de experimento pode ser realizado atualmente. O modo de se fazer isto é – conhecida a forma da interação elétron-núcleo – obter a melhor distribuição de carga nuclear que ajuste os dados experimentais da secção de choque. Essa distribuição de carga “experimental” pode então ser comparada com previsões teóricas.

Finalmente, gostaríamos de chamar atenção para a Fig. 3. Nela, é mostrada a distribuição espacial da densidade de corrente do núcleo de ^{87}Sr . Embora essa seja uma previsão teórica, os resultados de experiências de espalhamento de elétrons, que são sensíveis à distribuição de corrente para esse núcleo, mostram que a realidade não deve ser muito diferente. Vemos, portanto, que o movimento das partículas nucleares, embora pareça estar longe de possuir uma interpretação simples, pode ser revelado experimentalmente e analisado através de modelos teóricos, e assim melhor compreendido.

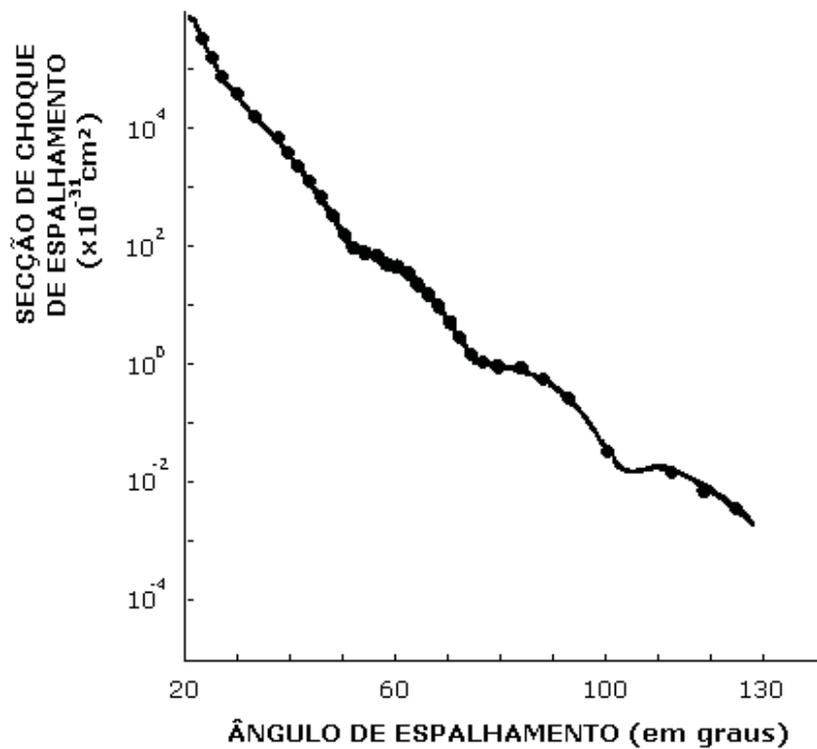


Fig. 1 - Secção de choque de espalhamento de elétrons para o ^{208}Pb em função do ângulo de espalhamento. São mostrados o cálculo teórico (—) e os pontos experimentais medidos (...). A ordenada está em escala logarítmica. Resultados retirados da Ref. (3).

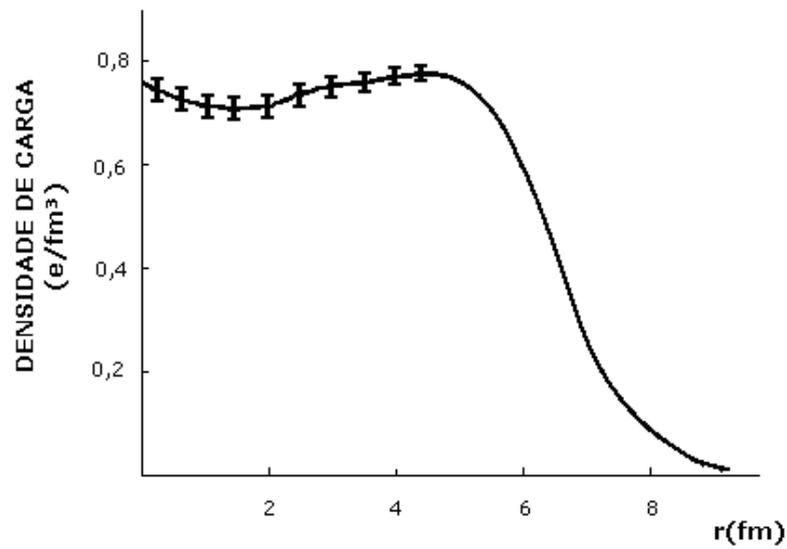


Fig. 2 - Densidade de carga do núcleo de ^{208}Pb em função da distância ao centro do núcleo. As barras de erro (1) nos dão uma indicação do erro cometido na determinação da densidade de carga. As distâncias são medidas em fermis ($1\text{fm} = 10^{-13}\text{cm}$). Resultados retirados da Ref. (3).

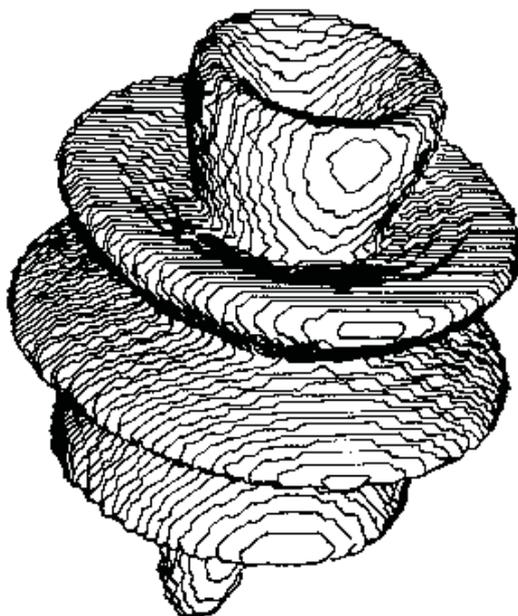


Fig. 3 - Previsão teórica da distribuição espacial da densidade de corrente (corrente por unidade de área) do núcleo de ^{87}Sr . Resultado obtido da Ref. (4)

Referências Bibliográficas

1. SYMON, K. R. **Mecânica**. Rio de Janeiro: Campus, 1986. cap. 3, seção 3.16.
2. HOFJTADTER, R. Nuclear and nucleon scattering of high-energy electrons. **Ann. Rev. Nucl. Sci.**, v. 7, p. 231-316, 1957.
3. DONNELLY, T. W., WALLECKA, J. D. Electron scattering and nuclear structure. **Ann. Rev. Nucl. Sci.**, v. 25, p. 329-405, 1975.
4. DONNELLY, T. W., SICK, I. Elastic magnetic electron scattering from nuclei. **Rev. Mod. Phys.**, v. 56, n. 3, p. 461-566, 1984.