

Enfoque Experimental no Ensino de Mecânica Quântica

(Experimental Approach on Teaching Quantum Mechanics)

Paulo R. S. Gomes, R. Meigikos dos Anjos, Marly S. Santos,
Isa Costa, Lucia de Almeida

Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense

Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/n^o,

Gragoatá, 24210-340, Niterói, RJ

Trabalho recebido em 13 de março de 1996

Este artigo relata uma proposta de lecionar a disciplina Mecânica Quântica, não como exclusividade de teóricos, mas através de um enfoque que torna evidente ao estudante a estreita ligação deste assunto com a Física Experimental. Este enfoque é exemplificado utilizando-se soluções de problemas de espalhamento e teoria de perturbação.

Abstract

This paper presents a proposal of teaching Quantum Mechanics within an approach where it is stressed that this subject is not just a theory, but it is directly related to Experimental Physics. Examples are given on how to use this approach when solving scattering and perturbation theory problems.

I. Introdução

Geralmente as disciplinas envolvendo Mecânica Quântica (MQ), tanto a nível de graduação quanto de pós-graduação, são lecionadas com ênfase puramente teórica. Esta visão está presente mesmo nas raras ocasiões em que o professor que as leciona é um físico experimental. Além disso, MQ é considerada uma disciplina teórica por natureza pelas Comissões de Ensino, que distribuem as disciplinas, pelos professores e, consequentemente, pelos alunos. Nas ementas das disciplinas, em qualquer instituição de ensino, encontram-se basicamente os mesmos tópicos, que incluem a apresentação dos formalismos e conceitos da MQ e resolução de problemas, como: oscilador harmônico, átomo de Hidrogênio, espalhamento, aplicações de teoria de perturbação etc. O conteúdo da disciplina parece, portanto, bastante distante da *Física que se faz em laboratório*, principalmente na visão do estudante. Raramente o enfoque experimental é dado pelo professor,

mesmo quando o livro texto se presta à explicação de fatos experimentais diretamente relacionados com os problemas de MQ, como é o caso do *Quantum Mechanics*, de Cohen-Tannoudji^[1].

Também não se pode desprezar os fatos que deflagraram o surgimento da MQ, ou seja, resultados experimentais relacionados à absorção/emissão de radiação térmica.

Durante dois semestres letivos foi realizada uma gratificante experiência na disciplina Mecânica Quântica II, do curso de Bacharelado em Física da UFF, procurando mostrar o vínculo direto entre o conteúdo da mesma e a Física Experimental. Cabe ressaltar que a disciplina Mecânica Quântica I, onde são abordados os fundamentos e a formulação básica da MQ, não é tão adequada ao enfoque experimental aqui tratado.

O programa da disciplina não precisou sofrer nenhuma modificação em relação ao enfoque tradicional, anteriormente aplicado pelo mesmo professor e seguindo o mesmo livro texto.

A reação dos alunos a este tipo de abordagem foi amplamente favorável, tendo sido simples a comparação altamente positiva em relação à apresentação tradicional do conteúdo. Isto foi constatado pelo interesse demonstrado pelos alunos no decorrer das atividades. A repercussão da proposta foi também muito boa entre professores teóricos, que, posteriormente, passaram a solicitar a presença de pesquisadores experimentais em suas aulas a nível de pós-graduação, quando então foram realizadas discussões com os estudantes sobre o que é mensurável, como se mede etc.

O objetivo deste artigo é, ao contribuir neste Volume Especial, endereçar uma mensagem a Comissões de Ensino, professores (teóricos e experimentais) e estudantes interessados no tema, no sentido de alertá-los para a importância do enfoque experimental em MQ, ampliando sua discussão e aprofundamento nas diferentes instituições de ensino do país. O artigo não se propõe a ser um texto didático sobre o assunto; no entanto, para melhor relatar o enfoque aplicado, serão apresentados alguns exemplos de análise de problemas concretos. Como a maioria dos autores trabalha, ou já trabalhou, com pesquisa em Física Nuclear, tais exemplos concentram-se em aplicações desta área. Porém, cada professor encontrará facilmente exemplos de aplicações em outras áreas de pesquisa, o que também contribuirá para despertar o interesse e a motivação de alunos de graduação em aprofundar seus conhecimentos em áreas específicas da pesquisa experimental.

Uma dificuldade existente na aplicação da proposta é a ausência de livros textos com o aprofundamento deste enfoque, o que a torna muito dependente da formação profissional e do conhecimento de Física Experimental do professor da disciplina. Para minimizar este problema, é de fundamental importância a interação entre professores com formação teórica e experimental.

II. Desenvolvimento da Proposta

A inovação desta experiência didática pode ser resumida em dois aspectos. De início, procura-se deixar claro que, apesar de todos os problemas a serem resol-

vidos começarem com a definição do sistema a ser estudado e de sua Hamiltoniana, na pesquisa em Física, geralmente o maior interesse reside justamente num melhor conhecimento da Hamiltoniana. E este conhecimento é obtido pela confrontação dos resultados dos problemas (predições teóricas) com dados experimentais (medições).

O segundo passo é uma ampla análise dos resultados dos problemas, com ênfase sobre: quais são, na prática, as grandezas mensuráveis; como medir essas grandezas; o que se determina a partir dos dados experimentais; como planejar experiências que possibilitem a determinação desses dados; etc. Os tópicos de Espalhamento e Teoria de Perturbação são excelentes para serem amplamente explorados em diversas áreas da Física.

II.1 - Exemplos com Problemas de Espalhamento

* Enfoque teórico

A solução de problemas de espalhamento de partículas por um potencial de curto ou longo alcance envolve, em geral, as seguintes etapas:

- definição do potencial espalhador, que comumente é do tipo central, $V(r)$;
- resolução da equação de Schrödinger, que pode seguir métodos diferentes, tais como o de ondas parciais, ou o de aproximação de Born;
- determinação das grandezas que especificam a solução da equação de Schrödinger, como deslocamentos de fase, amplitudes de espalhamento, seções de choque.

Por exemplo, pelo método de ondas parciais obtém-se as seguintes expressões para as seções de choque diferencial, $\sigma_k(\theta)$, e total, σ_k :

$$\sigma_k(\theta) = \frac{1}{k^2} \left| \sum_{l=0}^{\infty} \sqrt{4\pi(2l+1)} e^{i\delta_l} Y_l^0 \right|^2 \quad (1)$$

$$\sigma_k = \frac{4\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \sin^2 \delta_l \quad (2)$$

onde: k é o número de onda; θ é o ângulo de espalhamento; l é o momento angular orbital; δ_l é o deslocamento de fase; e Y_l^0 é a função harmônico esférica para $m = 0$. Os valores dos deslocamentos de fase são obtidos ao se resolver a equação de Schrödinger para cada onda parcial, e são eles que contêm informações sobre o potencial espalhador.

* Enfoque experimental

Inicialmente deve ser explicado como se realiza uma experiência de espalhamento de partículas em laboratório e quais as grandezas e parâmetros envolvidos. Para tanto, é necessário especificar os parâmetros:

- fixos e variáveis durante a experiência;
- determinados a partir da montagem experimental;
- mensuráveis e suas formas de medição.

Finalmente, deve-se ter bem claro quais as informações que se quer obter a partir das medições feitas.

Um exemplo destes procedimentos é feito, baseando-se na montagem experimental simples da Fig. 1, para o problema de espalhamento de partículas.

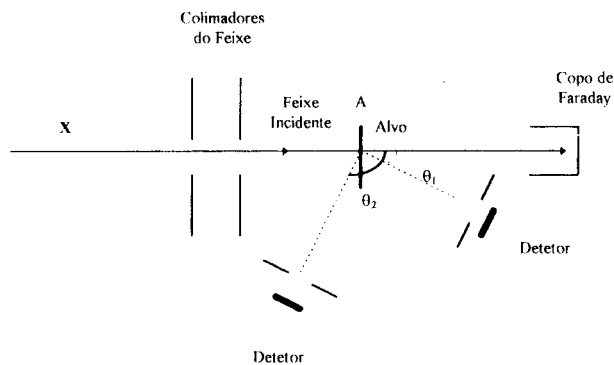


Figura 1. Esquema de um arranjo experimental simples para medidas de seção de choque de espalhamento. O feixe é originário de um acelerador; os colimadores servem para uma boa definição das direções incidente e espalhada; na figura estão representadas duas posições angulares distintas do detector.

Um feixe de partículas carregadas X (elétrons, prótons, ou núcleos pesados), proveniente de um acelerador, incide sobre um alvo (lâmina fina) de um material A. A maior parte das partículas X atravessa o alvo sem interagir com as partículas A, mas diversas sofrem

interações através de um potencial V. Se um detector for colocado a um ângulo θ com a direção incidente, este será capaz de informar:

- o número de partículas X defletidas entre os ângulos θ e $(\theta \pm \Delta\theta/2)$, durante um certo intervalo de tempo, sendo $\Delta\theta$ a abertura angular do detector;
- a energia das partículas.

O detector informa, portanto, quantas partículas X foram espalhadas elasticamente pelo centro espalhador, constituído de partículas A, numa certa direção e ângulo sólido, durante certo tempo. Assim, o detector determina a relação entre o número de partículas detetadas (N_d) e a seção de choque diferencial de espalhamento elástico, $d\sigma/d\Omega$, dada por

$$N_d = N_i N_A (d\sigma/d\Omega) \Delta\Omega, \quad (3)$$

onde: N_i e N_A são, respectivamente, o número de partículas X incidente no alvo durante o tempo de contagem no detector e o número de partículas no alvo; $\Delta\Omega$ é o ângulo sólido subtendido pelo detector. Toda a Física do problema encontra-se na seção de choque diferencial, que depende do potencial V através de sua relação com o deslocamento de fase δ_l , como mostra a equação (1); $\sigma_k(\theta)$ é a integral de $d\sigma/d\Omega$ em relação ao ângulo azimutal ϕ .

Determinam-se N_i , N_A , e $\Delta\Omega$ através de medições: N_i - utiliza-se um Copo de Faraday (Fig. 1), colocado ao final da canalização do acelerador, após o alvo; um dispositivo eletrônico acoplado ao Copo de Faraday permite a leitura da carga elétrica total que o atinge durante o intervalo de tempo de contagem. Conhecida a carga de cada partícula incidente X, pode-se então calcular quantas partículas X chegam ao Copo.

N_A - é obtido conhecendo-se a espessura e a densidade do alvo. Em geral, a espessura de alvos muito finos é calculada por uma relação entre seu peso, área e densidade.

$\Delta\Omega$ - mede-se a posição angular do detector em relação ao alvo e divide-se este valor pela área do detector exposta ao feixe espalhado (muitas vezes esta área é limitada por colimadores, como mostrado na Fig. 1).

Desta forma, conhecendo-se N_d pode-se determinar $\sigma_k(\theta)$. Para se tirar alguma conclusão sobre o potencial,

varia-se o ângulo θ e obtém-se toda a dependência angular para a seção de choque diferencial, que não depende do ângulo azimutal ϕ no caso do potencial ser central; integrando-se em θ , calcula-se a seção de choque total σ_k . Pela análise das distribuições angulares para diversos valores de l , determinam-se quais os δ_l não nulos para uma dada energia incidente. Depois, variando-se também a energia do feixe, e com isto o número de onda k , obtém-se o valor do δ_l crítico, isto é, o δ_l acima do qual todos os demais são nulos. Deve-se ressaltar que as diferenças de fase não são medidas diretamente. Este conjunto de dados gera informações sobre a forma, intensidade e alcance de potenciais, que em geral possuem parâmetros ajustáveis através dos dados experimentais, como será exemplificado na aplicação a seguir.

II.2. Aplicação - O Potencial Nuclear e o Espalhamento Elástico

O espalhamento nuclear entre dois íons pesados é uma aplicação interessante do espalhamento elástico na determinação do potencial de interação. Como não existe uma forma analítica para se descrever o forte potencial atrativo nuclear, utiliza-se então o artifício de modelos para estudá-lo. Dois núcleos podem interagir através de dois tipos de potencial: V_N - nuclear, atrativo, de curto alcance e desconhecido; V_C - Coulombiano, repulsivo, de longo alcance e conhecido. Assim, o potencial total é dado por

$$V = V_N + V_C \quad (4)$$

É comum descrever o potencial nuclear por uma expressão do tipo Woods-Saxon, com uma parte real e outra imaginária, na forma^[2]

$$V_N = -\frac{V_0}{\left(1 + \exp\left(\frac{r-r_r}{a_r}\right)\right)} - \frac{iW_0}{\left(1 + \exp\left(\frac{r-r_i}{a_i}\right)\right)} \quad (5)$$

onde: $V_0(W_0)$, $r_r(r_i)$ e a_r (a_i) são, respectivamente, a profundidade, o raio e a difusividade da parte real (imaginária) do potencial nuclear. Esta forma de descrever o potencial nuclear é chamada de Modelo Óptico^[2]. A parte imaginária é responsável pela absorção do fluxo do canal elástico em algum mecanismo de reação, de forma análoga a parte imaginária do deslocamento de

fase, que está relacionada com esta mesma absorção^[1]. Um dos maiores interesses dos físicos nucleares é determinar os valores dos parâmetros acima mencionados, para diversos núcleos e pares de núcleos, o que pode ser obtido através do ajuste de distribuições angulares do espalhamento elástico entre íons pesados. A Figura 2 mostra um exemplo destas distribuições com os respectivos ajustes, através dos quais se determinam os parâmetros do potencial óptico^[3]. Neste caso, as partículas X e A são, respectivamente, ^{16}O e ^{64}Zn , e as distribuições estão representadas em termos da razão entre a seção de choque de espalhamento elástico e a seção de choque de Rutherford (espalhamento puramente Coulombiano). É interessante lembrar que a seção de choque de Rutherford, obtida através da aplicação da teoria de perturbação dependente do tempo, é uma ferramenta experimental importantíssima, uma vez que possibilita, por exemplo, a determinação da espessura de alvos, calibrações e testes de eficiência de detetores nucleares, bem como o alinhamento de uma câmara de espalhamento e o monitoramento da experiência em execução.

Uma análise cuidadosa da Fig. 2 revela que:

- i) fixando-se em um valor de energia:
 - enquanto os dados experimentais descrevem uma linha horizontal ($d\sigma_{el}/d\sigma_R = 1$), ocorre apenas espalhamento Coulombiano; os valores de θ_{CM} para este caso são correspondentes a ângulos dianteiros, ou seja, colisões distantes associadas a ondas parciais com altos valores de l ;
 - a partir de certo valor de θ_{CM} , surgem desvios entre as seções de choque de espalhamento elástico e Rutherford, indicando o início da influência da interação nuclear; as colisões ocorrem a distâncias muito curtas.
- ii) comparando-se as curvas para diferentes energias: a faixa angular em que ocorre apenas espalhamento Coulombiano diminui à medida que a energia aumenta; para cada valor de energia é possível determinar um valor de θ_{CM} a partir do qual observa-se a contribuição do potencial nuclear. Por exemplo: para $E_{CM} = 32$ MeV, o valor deste ângulo é em torno de 130° , enquanto que para $E_{CM} = 51.2$ MeV o ângulo é aproximadamente 30° .

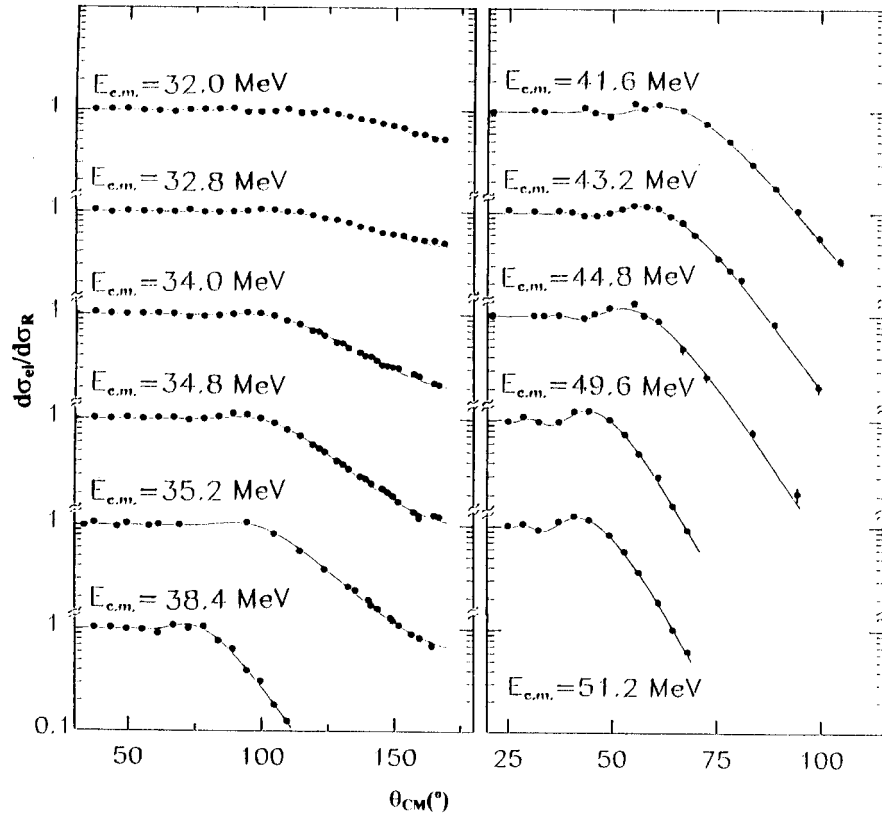


Figura 2.

Os ajustes de várias destas distribuições, para diferentes energias do feixe, permitem que valiosas informações sobre o potencial sejam obtidas; dentre elas, o alcance do mesmo, uma vez que existe uma relação direta entre o ângulo de espalhamento e a distância de maior aproximação entre os núcleos interagentes.

Do ponto de vista do enfoque tradicional, o problema a ser resolvido consiste em se determinar a amplitude de espalhamento dada pela expressão

$$f(\theta) = f_C(\theta) + f_N(\theta) \quad (6)$$

onde $f_C(\theta)$ e $f_N(\theta)$ são as contribuições do potencial Coulombiano e nuclear, respectivamente. A seção de choque diferencial é então calculada pela expressão

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f_C(\theta)|^2 + |f_N(\theta)|^2 + [f_C^*(\theta)f_N(\theta) + f_C(\theta)f_N^*(\theta)] \quad (7)$$

Note-se o termo de interferência entre os dois potenciais. As oscilações nas distribuições angulares de espalhamento elástico são incrivelmente bem ajustadas por

potenciais nucleares como os mencionados acima.^[2]

II.3. Aplicação - Problemas usando aproximação de Born

Para potenciais fracos e de longo alcance, é comum estudar o espalhamento usando a aproximação de Born, através da qual se chega à seguinte relação entre seção de choque diferencial e potencial espalhador

$$\sigma_k^{(B)}(\theta) = \frac{\mu^2}{4\pi\hbar^2} \left| \int d^3r \exp(-i\vec{K} \cdot \vec{r}) V(r) \right|^2 \quad (8)$$

onde: $\vec{K} = \vec{k}_d - \vec{k}_i$; \vec{k}_d e \vec{k}_i são, respectivamente, os vetores de onda dos feixes detectado e incidente.

A discussão deste problema é similar ao descrito anteriormente por ondas parciais, pois mede-se $\sigma_k(\theta)$ da mesma forma já descrita. As informações sobre os parâmetros do potencial espalhador $V(r)$ são então obtidas.

II.4. Exemplos com Problemas de Teoria da Perturbação

* Enfoque teórico

Este é um excelente assunto para se mostrar a relação direta entre a teoria quântica e resultados experimentais, sendo grande o número de exemplos de problemas apresentados em MQ envolvendo perturbações independentes e dependentes do tempo. Livros textos como o de Cohen-Tannoudji^[1] exploram explicitamente vários resultados experimentais, de forma próxima à que está sendo sugerida neste artigo. Os sistemas não perturbados mais usuais são o átomo de Hidrogênio e o oscilador harmônico. Em geral são apresentados vários efeitos perturbativos, tais como: interação spin-órbita, aplicação de campos externos, interação de radiação com o átomo etc. A solução do problema tem início explicitando-se a expressão da contribuição da perturbação à Hamiltoniana, sendo então calculados os novos autovalores e autoestados e as probabilidades de transição, além de serem deduzidas regras de seleção.

* Enfoque experimental

Como mencionado anteriormente, ao contrário do que ocorre com a teoria de espalhamento, não é difícil encontrar livros textos de MQ abordando resultados experimentais em diversos exemplos interessantes envolvendo variações de níveis de energia atômicos com a aplicação de campos externos, efeitos de estrutura fina e hiperfina, probabilidades de transição entre níveis atômicos etc. Não se pretende neste trabalho a repetição dos mesmos, no entanto cabe enfatizar a importância de se explicar ao aluno quais as grandezas efetivamente mensuráveis.

Por exemplo, os níveis de energia de átomos, núcleos e moléculas, com seus respectivos momentos angulares, podem ser determinados através da solução de complexos “quebra-cabeças” envolvendo as frequências dos fótons (raios X e γ) emitidos pelo material, após os mesmos terem sido excitados por colisões ou interação com radiação externa. Os raios X (ou γ) característicos de cada elemento atômico (ou nuclídeo) são registrados

por um detector de radiação que fornece os seus espectros de energia, ou seja, o número de fótons detetados com determinados valores de energia ou frequência, dando informações sobre as diferenças entre os níveis de energia inicial e final correspondentes.

Quando mais de um detector é colocado próximo ao alvo, é possível realizar experiências em “coincidência”, onde se determinam quais os raios X (ou γ) que foram emitidos sob a forma de uma cascata seqüencial de desexcitação, facilitando e permitindo a precisa “montagem” dos níveis de energia. Se o potencial utilizado estiver correto, esses níveis serão previstos pela solução da equação de Schrödinger.

Outros testes diretos da teoria podem ser exemplificados para se determinar:

- a proporcionalidade entre o número de fótons detetados num certo intervalo de tempo e a intensidade da transição correspondente;
- a relação entre as larguras dos picos correspondentes às transições e às larguras de ressonâncias;
- cálculo dos momentos angulares dos fótons emitidos, a partir da análise das formas das suas distribuições angulares.

Consequentemente, será possível verificar as regras de seleção e calcular os momentos elétricos e magnéticos dos fótons. As diversas características de certas transições detetadas só podem ser explicadas por efeitos de estrutura fina, ou hiperfina, ou ainda de “anarmonicidade”, permitindo que estas informações experimentais sejam usadas para desenvolvimento da teoria e para a determinação de parâmetros.

III. Conclusões

A avaliação da implementação desta proposta foi realizada junto aos alunos e a diversos professores que dela tiveram conhecimento durante sua aplicação; os resultados tão positivos motivaram a iniciativa da sua divulgação para que ela seja aplicada e aperfeiçoada em outras instituições de ensino e pesquisa do país. Assim, físicos experimentais são incentivados a lecionar MQ,

bem como fica estimulada uma interação mais forte entre teóricos e experimentais de uma mesma instituição ao prepararem suas aulas desta disciplina.

Acredita-se que um dos principais motivos do sucesso da proposta tenha sido esse entrosamento. Outro aspecto tem a ver com o enriquecimento dos conteúdos da disciplina. Os exemplos aqui citados, voltados para a Física Nuclear, são tão interessantes quanto os de outras áreas da Física, havendo ampla gama de opções para os professores da disciplina. Com este enfoque acredita-se que os estudantes estarão vivenciando situações mais próximas de linhas de pesquisa experimental, facilitando uma futura escolha por uma delas.

Referências bibliográficas

1. C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloe, *Quantum Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, 1977.
2. R. Bass, *Nuclear Reactions with Heavy Ions*, Springer-Verlag, Berlim, 1980.
3. C. Tenreiro, J. C. Acquadro, P. A. B. Freitas, R. Liguori Neto, N. Cuevas, P. R. S. Gomes, R. Cabezas, R. M. Anjos, J. Copnell, "Elastic and Inelastic Scattering of $^{16}\text{O} + ^{64}\text{Zn}$ at near Barrier Energies", *Physical Review C* **53**, 2870 (1996).