

Experimento para a medida indireta do raio de uma esfera e a compreensão da construção do modelo atômico de Rutherford

João José F. de Sousa¹, David Ferreira Portes², Susana de Souza Barros³

¹ Instituto de Física - Universidade Federal do Rio de Janeiro, jjose@if.ufrj.br

² Instituto de Física - Universidade Federal do Rio de Janeiro, david_portes@yahoo.com.br

³ Instituto de Física - Universidade Federal do Rio de Janeiro, susana@if.ufrj.br

Resumo

A idéia da matéria ser constituída de átomos é antiga. Demócrito (Séc.VaC) pensou em corpos diminutos e 'indivisíveis'. Dalton (Séc.XIX) explicou a formação de substâncias a partir dos constituintes últimos da matéria com identidade química; os raios catódicos deram a evidência da carga elétrica emitida por metais. Thomson determinou a relação massa/carga do elétron e Millikan a menor carga elétrica encontrada na natureza (elétron). A determinação da massa do íon de H mostrou que sua massa era muito maior que a do elétron. Finalmente Rutherford utilizou partículas positivas (alfa) da desintegração de núcleos pesados para bombardear átomos de ouro chegando à conclusão de que a parte positiva do átomo ocuparia parte muito pequena ($r \sim 10^{-14}m$). Esse breve histórico das realizações pioneiras da física moderna informa como os cientistas desenvolvem conhecimentos, objetivo do ensino de física pouco explorado no Ensino Médio. Para mostrar a possibilidade de fazer uma medida indireta das dimensões de um objeto muito pequeno (não manipulável) diretamente é proposta uma experiência que permite determinar o raio de uma esfera pela probabilidade de colisão e sua relação com a geometria do sistema utilizado. A experiência é realizada com esferas alvo (átomos), projétil (partículas alfa), um tabuleiro e uma rampa de lançamento. A determinação da probabilidade de colisão simples, P_{exp} , correlaciona o número de jogadas com o número de colisões. A probabilidade de choque depende da largura do tabuleiro D , do número de alvos N distribuídos aleatoriamente e das dimensões do alvo e do projétil. As medidas desta experiência podem ser obtidas num período de aula. O raio da esfera alvo foi obtido com 5% de erro quando comparado com uma régua. A aplicação de métodos indiretos utilizando sistemas macroscópicos, que permitem confrontação através da medida direta poderá dar credibilidade aos métodos utilizados para determinações experimentais a nível microscópico.

Palavras-chave : ensino de física, medida indireta, modelo do átomo

Introdução

A inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio (EM) tem sido considerada uma necessidade na educação do cidadão para a compreensão da cultura científica-tecnológica dominante. Terrazzan (1994) aponta que para compreender aparelhos, artefatos e fenômenos do cotidiano atual é hoje necessário utilizar conceitos que foram estabelecidos no século XX em contraposição aos programas do Ensino Médio que ensinam, na sua maioria e prioritariamente, física clássica. De acordo com Ostermann *et al.* (1998), é possível citar inúmeras razões para introduzir conteúdos de física contemporânea na escola média, dentre elas: despertar a curiosidade dos estudantes e ajudá-los a reconhecer

a física como empreendimento humano e, portanto, mais próxima dos estudantes; estabelecer o contato dos alunos com idéias revolucionárias que mudaram totalmente a Ciência do Século XX; atrair jovens para a carreira científica, tornando-os futuros pesquisadores e professores. Cavalcante *et al.* (2005), assim como outros autores, também reconhecem consenso entre os professores de física quanto à inclusão do tema no Ensino Médio, a partir das motivações reportadas acima.

As iniciativas passam, entretanto, pela mesma problemática enfrentada no ensino da física clássica, como bem apontam Osterman e Moreira (2000):

...é viável ensinar FMC no EM, tanto do ponto de vista do ensino de atitudes quanto de conceitos. É um engano dizer que os alunos não têm capacidade para aprender tópicos atuais. A questão é como abordar tais tópicos [...] Se houve dificuldades de aprendizagem não foram muito diferentes das usualmente enfrentadas com conteúdos da física clássica [...] Os alunos podem aprendê-la se os professores estiverem adequadamente preparados e se bons materiais didáticos estiverem disponíveis.

A possibilidade de um Ensino Médio que introduz física moderna na escola requer materiais didáticos adequados. Foi feito um levantamento dos conteúdos de FMC em alguns dos livros didáticos mais utilizados atualmente (Gaspar, 2000; Máximo & Alvarenga, 2000; Sampaio & Calçada, 2001) que constam da lista do PNLD (Brasil, 2006) e também dos textos de Amaldi, 1997; Hewitt, 2002. Uma síntese dessa busca revela que: a física moderna clássica, do modelo do átomo e a descrição das experiências relacionadas aparecem com frequência; as descobertas das partículas elementares e a física nuclear recebem tratamento adequado; os temas tratados aparecem geralmente associados aos cientistas que fizeram as descobertas. Tópicos de Tecnologia e Sociedade são abordados destacando novos materiais e tecnologias digitais. O tratamento dado nos livros é geralmente descritivo e aponta para a importância de um planejamento criterioso por parte dos professores para sua adequação à sala de aula.

Um dos problemas a ser enfrentado no Ensino Médio é o ‘como’ apresentar os fenômenos microscópicos, que requerem simbolismos complexos para a sua conceituação. Pergunta-se, portanto, ‘como trabalhar’ para que os tópicos de FMC desenvolvam âncoras conceituais e sejam desenvolvidos além dos aspectos informativos? Com esse objetivo em mente, este trabalho apresenta uma brevíssima introdução às idéias que levaram à determinação da estrutura atômica da matéria. E, para exemplificar o processo dos estudos que levaram a esse conhecimento (modelo microscópico), apresenta-se uma experiência simples que visa à determinação indireta das dimensões de um objeto macroscópico. Dessa forma, o aluno poderá dar credibilidade aos resultados de Rutherford, que se baseiam em princípios físicos conhecidos e aplicam métodos indiretos para determinar experimentalmente pela primeira vez o tamanho do núcleo atômico.

Do átomo de Demócrito aos modelos de Thomson e Rutherford

As concepções sobre a constituição e a estrutura da matéria remontam à Grécia clássica (IVa.C.). Supunha-se que as substâncias complexas eram constituídas de proporções variáveis das substâncias elementares: fogo, ar, água e terra. Quanto à estrutura duas crenças se antagonizavam: Aristóteles sustentava a idéia de matéria contínua e capaz de subdivisões infinitas. Demócrito (a partir de Epícuro) defendia a crença em partículas indivisíveis muito pequenas para afetar os sentidos humanos. O início do desenvolvimento da teoria atômica tal como a conhecemos deve-se a John Dalton, um químico inglês, na primeira década do século XIX. Dalton estabeleceu hipóteses sobre a estrutura atômica da matéria seguindo o método científico desenvolvido a partir de Galileu: *i*) uma amostra de um elemento consiste de partículas diminutas chamadas “átomos”; *ii*) átomos não podem ser divididos, nem destruídos, nem criados; *iii*) átomos do mesmo elemento são iguais em todas as características, em particular iguais em peso; *iv*) átomos de diferentes elementos combinam quimicamente em razões definidas.

A evidência da natureza elétrica da matéria foi estudada por Faraday, quando mostrou experimentalmente que diversas substâncias em solução decompunham-se a partir da passagem de corrente elétrica (experimento de eletrólise). Importantes descobertas sobre a natureza da eletricidade e dos átomos foram realizadas para estudar a condução de eletricidade através dos gases utilizando tubos de raios catódicos. Foi mostrado que os raios emitidos nesses tubos carregam carga elétrica e que são defletidos por campos elétricos e/ou magnéticos, como aparece na Fig. 1. Como as ondas de luz não são afetadas pelo campo eletromagnético eliminou-se a possibilidade destes raios serem de natureza ondulatória.

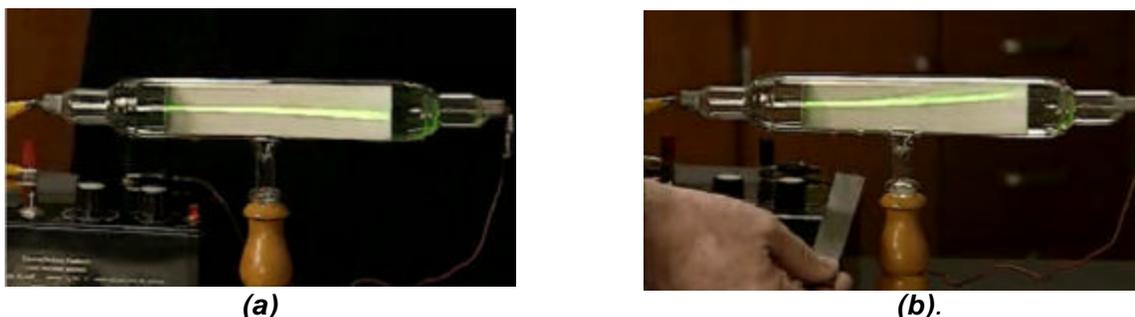


Fig. 1 Feixe de raios catódicos (a) e o mesmo feixe defletido por um campo magnético (b) (Kosasih, 2008).

No final do século XIX, J.J. Thomson interpretou esses resultados e concluiu que os raios seriam compostos por partículas muito pequenas, carregadas negativamente e movimentando-se com alta velocidade. Suas medidas determinaram que a relação carga/massa das partículas, transportadas nos raios catódicos era constante e estas foram denominadas elétrons. Millikan determinou a carga mínima dessas partículas e essa foi a primeira determinação experimental da massa e da carga do elétron. Após experiências (eletrostática, condutividade dos

metais e outras) que levaram à compreensão que o elétron se encontraria em todas as substâncias, Thomson, em 1897, postulou que deveriam ser parte de todos os átomos. Porém, sendo a maioria dos materiais eletricamente neutra, os átomos individuais seriam também neutros e, portanto, haveria uma parte positiva no átomo que seria responsável pela sua neutralidade. A determinação da massa do íon de hidrogênio mostrou que a parte positiva do átomo é muito maior do que e a massa negativa (elétron). Em 1904, Thomson chegou a um modelo do átomo no qual a parte positiva do átomo ocuparia o volume e os elétrons, carregados negativamente, estariam distribuídos como as passas de uva num bolo. Essa proposta foi considerada interessante, porém inadequada para explicar o átomo.

A história se desenvolveu olhando para o átomo como a unidade básica da matéria e levou à pergunta: como estão os elétrons relacionados ao átomo? Como estaria a carga negativa distribuída dentro do átomo? Onde estaria a carga positiva?

A experiência de Rutherford

Ernest Rutherford utilizou o conhecimento que possuía sobre a radioatividade, campo ao qual deu contribuições importantes, para pesquisar como estaria distribuída a carga positiva no interior do átomo. Sabia-se que os núcleos de alguns elementos pesados emitem espontaneamente três tipos de radiação: partículas alfa (carga positiva, núcleo do He), beta (carga negativa, elétrons) e gama (radiação eletromagnética). Foi o próprio Rutherford quem estudou a radiação do urânio e mostrou, pela deflexão em campo elétrico, que um dos tipos de radiação emitida era pouco defletido num sentido, correspondendo a cargas positivas massivas (partículas alfa) e a outra tinha uma grande deflexão no sentido oposto, indicando ser constituída por cargas negativas de massas pequenas (elétrons).

Esse conhecimento levou-o a desenvolver experimentos (1913), em colaboração com seus colegas Marsden e Geiger, nos quais lâminas finas de ouro eram bombardeadas com partículas alfa, cujo esquema é mostrado na Fig. 2. De acordo com o modelo de Thomson, se o átomo tivesse uma distribuição de massa de carga positiva que ocupasse todo seu volume, as partículas alfa, também positivas, seriam repelidas ao colidir com os átomos de ouro e voltariam sobre si mesmas, como acontece na colisão de uma bola dura contra uma parede. Com esta experiência Rutherford conjecturou ser possível obter informações sobre a estrutura atômica. A experiência foi realizada por Rutherford e seus assistentes, utilizando uma lâmina de ouro de aproximadamente 10^{-5} cm (10 micra) de espessura, que corresponde a aproximadamente 2000 átomos, bombardeada por partículas alfa. O resultado mostrou que a maior parte das partículas alfa (99%) emitidas atravessavam a lâmina de ouro, detectados pelos contadores Geiger localizados no lado oposto da fonte, posição (1) na Fig. 2. Na experiência observou-se que algumas partículas eram defletidas lateralmente e outras voltavam para o mesmo lado da fonte, para ângulos maiores que 90° (Fig.2).

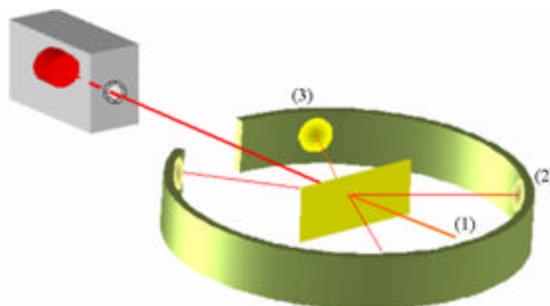


Fig. 2. Esquema da experiência de Rutherford. (1) 99% das partículas alfa atravessam a lâmina; (2) partículas alfa desviam e (3) partículas alfa totalmente repelidas.

Como muitas partículas alfa atravessavam a lâmina e poucas eram defletidas para ângulos maiores que 90° , a conclusão foi que a massa da carga positiva do átomo estaria concentrada numa região muito pequena do átomo. Esses estudos o levaram à formulação de um modelo mais adequado do átomo, que colocava a massa positiva no centro do átomo, ocupando uma fração muito pequena do seu volume. Sabe-se hoje que o núcleo atômico, positivo, é 10^{-5} do diâmetro atômico e que os elétrons ficam na região exterior do átomo, cada um com uma carga negativa, resultando num átomo eletricamente neutro.

Na época (1914) esse modelo foi aceito, já que esclareceu muitas das dúvidas e mostrou que, a partir de uma experiência indireta, era possível fazer um modelo da estrutura atômica básica, fornecendo informação sobre aquilo que o olho humano não consegue observar, mas que o conhecimento científico permite estudar.

A experiência: Determinação do raio de uma esfera a partir da probabilidade de colisão

Experiências didáticas de espalhamento mecânico já foram relatadas na literatura específica. Santos e Frölich (2005) determinaram a área de uma moeda utilizando uma analogia macroscópica do espalhamento da radiação por um átomo. Os resultados obtidos nessa determinação indireta do raio efetivo de uma moeda apresentaram erro de 21%. Ferreira et. al. (1999) determinam a forma, dimensões e orientação de um alvo plano através do estudo do espalhamento elástico de um projétil.

A experiência aqui apresentada, Strassenburg (1969), não é um análogo da experiência de Rutherford, mas permitirá ao aluno compreender que é possível determinar as dimensões de um objeto através de um método indireto. A experiência baseia-se na relação entre a probabilidade matemática de colisão e a dependência com a geometria do sistema utilizado. No ensino médio o aluno precisa ter exemplos da possibilidade de obter informações sobre um sistema físico de forma indireta. No nosso caso fazemos a determinação do raio de uma esfera, que pode ser obtida diretamente com uma régua, mas que neste caso utiliza argumentos lógicos para sua medida. No caso dos fenômenos microscópicos, não é possível extrair informação por meio de determinação direta.

Uma vantagem desta experiência é o fato de poder ser executada em tempo de aula e ser montada em qualquer sala escolar, requerendo material simples para sua execução. O material a ser utilizado é: um conjunto de esferas de aço do mesmo raio; um tabuleiro de $(50 \times 30) \text{ cm}^2$ (área de colisões); um plano inclinado de 50 cm de largura (grade de largada) e uma régua milimetrada.

Descrição

O objetivo da experiência é determinar o tamanho das esferas alvo a partir da determinação experimental da probabilidade de colisão simples de uma esfera projétil (EP) e da sua relação com as dimensões do sistema utilizado. Um número N de esferas alvo (EA) é distribuído ao acaso sobre um tabuleiro plano, horizontal, de dimensões D (largura) e L (altura). Uma esfera projétil (EP) é abandonada de um plano inclinado, como mostra a Fig. 3, e deve rolar perpendicularmente a D . O resultado de cada lançamento é classificado como colisão ou não colisão, contando-se apenas a primeira colisão.



Fig. 3. Fotografia do sistema utilizado

Para soltar a EP aleatoriamente, uma escala graduada é afixada transversalmente no plano inclinado e números gerados pelo método de Montecarlo definem as posições de largada na régua (Fig.3). A mesma condição pode ser satisfeita com os olhos fechados para evitar a interferência do experimentador. Como as EP são muito diferentes de partículas alfa e as EA igualmente diferentes dos átomos da lâmina de ouro, o experimento realizado não é um análogo da experiência de espalhamento das partículas alfa. Mas em ambos experimentos é possível determinar os raios das esferas ou dos núcleos, através do espalhamento de partículas. A diferença é que nesta experiência pode-se comparar o resultado da medida indireta com a medida direta do diâmetro das esferas, obtida com uma régua, enquanto que o mesmo não pode ser feito para o raio do núcleo do átomo.

Fundamentação da experiência

Uma colisão acontece sempre que o centro da EP fica dentro da faixa delimitada pela soma dos raios $(R+R)=2R$ a partir do centro da EA (Fig. 4). Para simplificar o cálculo, utilizam-se esferas alvo e projétil do mesmo raio R . Como a EP pode colidir até uma separação máxima entre os centros da EP quando tangenciam a EA nas duas extremidades do seu diâmetro $2R$, haverá possibilidade de colisão

entre EP e um dos alvos EA na região delimitada por $2 \cdot (2R) = 4R$ (seção de choque). A probabilidade de colisão é diretamente proporcional ao raio R das esferas.

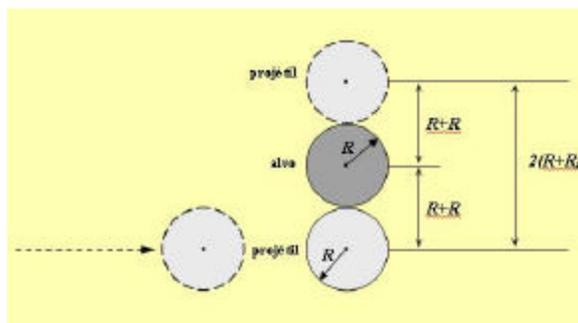


Fig. 4. Seção de choque: intervalo na dimensão perpendicular ao movimento da EP que define a probabilidade de colisão.

Dependência da probabilidade de colisão (P) com a geometria do sistema e o número de esferas alvo

Largura do tabuleiro D (N e R constantes). A probabilidade de colisão é inversamente proporcional à largura do tabuleiro D , quando D aumenta, maior será a distância entre as EA diminuindo P . (ver Fig. 3).

Número de esferas alvos N (R e D constantes). Aumentando o número N de esferas alvo EA aumentará a probabilidade de colisão.

Para evitar a superposição das seções de choque de esferas diferentes, a distribuição das EA sobre o tabuleiro deve obedecer à separação mínima inter-centros de $4R$ na direção perpendicular ao movimento de EP. Um modo seguro de comprovação é verificar se a esfera projétil pode rolar entre duas EA quaisquer sem colidir com nenhuma delas.

Dedução da expressão que relaciona a probabilidade P com as grandezas D, N e R.

Pelas relações acima analisadas temos que,

$$P_{\text{modelo}} \propto N \cdot 4R/D \quad (1)$$

Admitindo-se a hipótese de que a probabilidade de colisão no sistema experimental dependa diretamente de N e R e seja inversamente à largura D , pode-se deduzir a expressão que relaciona a probabilidade medida $P_{\text{exp}} = C/T$, determinada experimentalmente, com as grandezas relevantes do sistema. Supondo que não haja superposição de seção de choque no eixo perpendicular ao movimento da EP, a probabilidade de choque do modelo será $P = 1$ quando a largura D estiver totalmente preenchida pela seção de choque $4R$ dos N alvos, ou seja

$$D = N \cdot 4R$$

Dessa forma fica assegurado que a constante de proporcionalidade na expressão (1) seja a unidade.

A probabilidade experimental P é definida como a razão entre o número de colisões C e o número total de lançamentos T . Em caso de colisão múltipla para uma jogada, conta-se apenas a primeira colisão.

$$P_{\text{experimental}} = C/T \quad (2)$$

$$P_{\text{modelo}} = 4NR/D \quad (3)$$

As equações (2) e (3) podem ser igualadas:

$$P_{\text{modelo}} = P_{\text{experimental}}$$

$$4NR/D = C/T$$

Colocando-se a incógnita R em evidência:

$$R = D P_{\text{exp}}/4N \quad (4)$$

O valor de R assim determinado pelo método indireto será confrontado com o valor do raio medido por um paquímetro .

Dados experimentais

Dois conjuntos de medidas foram obtidos para a determinação indireta do raio de uma esfera cuja medida direta é $R = 0,79\text{cm}$. A determinação experimental da probabilidade de colisão foi feita como mostra o exemplo da Tabela.

Tabela : Dados para o cálculo da probabilidade colisão

L_i Lançamento	C_i Colisão	$P_{\text{exp}} = C/T$ Probabilidade Experimental
1	X	1,00
2	0	0,50
3	0	0,33
4	X	0,50
~	~	~
~	~	~
~	~	~
248	X	0,38
249	0	0,38
250	X	0,38
$\Sigma L_i = T$	$\Sigma C_i = C$	0,38

Nota: X: colisão; 0: não colisão

Primeira determinação

Largura do tabuleiro $D = 50\text{cm}$

Número de alvos $N = 6$

Probabilidade de Colisão $P_{\text{exp}} = 0,40$ (o valor se manteve constante após 34 jogadas de um total de 70).

Resultado

$$R = D P_{\text{exp}}/4N = (50\text{cm} \times 0,40) / 4 \times 6 = 0,83\text{cm}$$

Erro da medida indireta do raio R: $E\% = ((0,83 - 0,79)/0,79)100\% = (0,04/0,79) 100\% = 5\%$

Segunda determinação

Largura do tabuleiro D = 35cm

Número de alvos N = 4

Probabilidade de Colisão $P_{\text{exp}} = 0,38$ (valor se manteve constante após 155 jogadas de um total de 250)

Resultado

$R = D P_{\text{exp}}/4N = (35\text{cm} \times 0,38)/ 4 \times 4 = 0,83 \text{ cm}$

Erro da medida indireta do raio R: $E\% = 5\%$

As duas determinações experimentais do raio R obtidas são consistentes entre elas, apresentando um erro de 5% em relação à medida direta do raio R da esfera.

Conclusão

O resultado obtido aponta para a possibilidade de se obter informações de grandezas físicas com boa aproximação por métodos indiretos, utilizando argumentos científicos, quando a medida direta não for exequível. Na experiência realizada vemos que o resultado experimental é consistente com a medida direta. Vale lembrar que Rutherford não tinha essa possibilidade quando determinou o raio dos núcleos atômicos, os quais foram confirmados posteriormente por outros experimentos.

É relevante que experiências desse tipo venham a ser trabalhadas em sala de aula, fornecendo análogos plausíveis dos fenômenos que não vemos. O importante é que se reconheça que no ensino médio o aluno precisa dar credibilidade às informações fornecidas, frequentemente de forma descritiva, relacionadas à descrição dos fenômenos microscópicos, tal como tradicionalmente apresentadas nos textos didáticos.

Referências

Amaldi, U., *Imagens da Física*, São Paulo: Scipione, 1997.

BRASIL, MEC/SEB, *Programa Nacional do Livro Didático*, 2006.

Cavalcante, M. A.; Tavoraro, C. R. C. e Haag, R., *Física na Escola* v.6, n.1, p.75-82, 2005.

Dalton J., *A new system of chemical philosophy*, London: R. Bickerstaff, 1808.

Ferreira, A. A., Lourenço, M.F., Marcassa, L. G e Bagnato, V. S., *Rev. Bras. Ens. Fis.* v. 21, n.1, p.122-126, 1999.

Gaspar, A., *Física* v.3, Rio de Janeiro: Ática, 2000.

Hewitt, P., *Física Conceitual*, Porto Alegre: Bookman, 2002.

Kosasih, J.I, Cathode ray tube and electron. 2008. Disponível em :
<<http://br.youtube.com/watch?v=XU8nMKkzbT8>>. Acesso em: 30/09/2008.

Máximo, A. e Alvarenga, B., Curso de Física, v.3, São Paulo: Scipione, 2000.

Ostermann F.; Ferreira L. M. e Cavalcanti C. J. H., Rev. Bras. Ens. Fis. v.**20**, n.3, p.270-288, 1998.

Osterman, F. e Moreira, M.A., Atas do VII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, Florianópolis, 2000.

Strassenburg, A.A. et al, An approach to physical science – PSNS, NY: Wiley, 1969.

Sampaio, J. L. e Calçada, C. S., Universo da Física, v.3, São Paulo: Atual, 2001.

Santos, A. C. F. e Fröhlich A., Atas do XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física. Rio de Janeiro, 2005.

Terrazzan, E. A., Cad. Bras. Ens. Fis. v.**9**, n.3, p.209-214, 1992.