

---

## FENOMENOLOGIA NUCLEAR: UMA PROPOSTA CONCEITUAL PARA O ENSINO MÉDIO<sup>+</sup>\*

---

M. A. M. Souza

J. D. Dantas

Departamento de Física – Universidade Federal da Paraíba  
João Pessoa – PB

### Resumo

*A descoberta do núcleo atômico pelo físico E. Rutherford, no início do século XX, foi o marco inicial da Física Nuclear. A partir daí, desencadeou-se uma série de experiências em que feixes de partículas, compostos por nêutrons, prótons e outros, eram levados a colidir com um núcleo, no intuito de desvendar sua estrutura ou produzir elementos artificiais através de transmutação nuclear. Com o desenvolvimento dos equipamentos experimentais, uma série de outros fenômenos nucleares foram observados, tais como decaimento beta, fissão e fusão nuclear, efeito Möesbauer, etc. Tendo em vista o panorama político e econômico mundial e as tendências educacionais contemporâneas, este trabalho propõe-se a sugerir temas alternativos em Física Nuclear que podem ser debatidos em nível conceitual no Ensino Médio, onde o foco principal reside na importância histórica e tecnológica de tais fenômenos na sociedade.*

**Palabras-chave:** Fenômenos nucleares; núcleo atômico; Física Nuclear; Ensino Médio.

---

<sup>+</sup> Nuclear phenomenology: a conceptual proposal for High School teaching

\* Recebido: maio de 2009.  
Aceito: dezembro de 2009.

## Abstract

*The discovery of atomic nucleus by E. Rutherford, at the beginning of the twentieth century, was the Nuclear Physics original landmark, from then triggered by a series of experiments in which beams of particles, composed of neutrons, protons and others, were taken colliding with a nucleus, in order to unravel its structure or produce artificial elements through nuclear transmutation. With the development of experimental equipment a number of other nuclear phenomena have been observed, such as beta decay, nuclear fission and fusion, Möesbauer effect, etc. In view of the global political and economic landscape and the contemporary educational trends this work suggest alternative topics in Nuclear Physics that can be discussed at the conceptual level in High School teaching, where the main focus lies in the historical and technological importance of such phenomena in society.*

**Keywords:** *Nuclear phenomena; atomic nucleus; Nuclear Physics; High School teaching.*

## I. Introdução

O século XX foi marcado pelo surgimento de uma das maiores vertentes da Física, a Física Moderna. Os principais avanços tecnológicos do mundo moderno se devem, em parte, ao surgimento da Mecânica Quântica e da Teoria da Relatividade, que serviram de base para a descrição de uma série de fenômenos na escala atômica e nuclear. Como exemplo temos a supercondutividade<sup>1</sup>, descrita pela teoria BCS<sup>2</sup> (John Bardeen, Leon Cooper e John Robert Schrieffer)<sup>[1]</sup>, que

---

<sup>1</sup> Fenômeno que ocorre a baixas temperaturas, aproximadamente 4K, em que um material comporta-se como um condutor perfeito com resistência efetivamente nula levando à superfluidez de portadores de carga no mesmo.

<sup>2</sup> A teoria BCS sugere que os elétrons de *spin* contrários, em um material no estado supercondutor, acoplam-se aos pares formando os pares de Cooper, prefigurando um estado de mais baixa energia como em um condensado de Bose-Einstein, gerando a supercondutividade. A interação capaz de sobrepor a repulsão coulombiana entre os elétrons está associa-

tem se mostrado extremamente eficaz na busca por sistemas mais eficientes para transmissão de informação. Temos também inúmeros avanços na Medicina, seja do ponto de vista instrumental, para diagnóstico, por meio de aparelhos de processamento de imagem, como a Ressonância Magnética nuclear, ou mesmo do ponto de vista clínico, através de tratamentos de radioterapia. A Física Nuclear tem sido um dos ramos da Física que têm contribuído para o desenvolvimento de técnicas de tratamento na Medicina, além de servir como arcabouço teórico para outras áreas como a Astrofísica e algumas ramificações da Cosmologia.

Este trabalho tem como objetivo mostrar que alguns temas de Física Nuclear podem ser abordados em nível conceitual no Ensino Médio. Trata-se de um esforço na busca de esclarecer fenômenos de grande importância histórica e utilidade prática no mundo moderno, o que está de acordo com a proposta de Terrazzan<sup>[2]</sup>, que defende a atualização do currículo de Física doravante o desenvolvimento da ciência contemporânea como necessidade de criar cidadãos conscientes capazes de transformar a realidade, e que ainda foi enfatizado por Aubrecht<sup>[3]</sup> na conferência sobre ensino de Física Moderna em Abril de 1986 no **FERMILAB** (Fermi National Accelerator Laboratory), Batavia, Illinois, onde foi defendida a inclusão de tópicos de pesquisa em Física no Ensino Médio. Um texto interessante sobre revisão das literaturas que tratam do tema Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio pode ser encontrado nesta referência<sup>[4]</sup>.

Alguns autores têm elaborado propostas de metodologia educacional para temas de Física Moderna no Ensino Médio, como Mecânica Quântica<sup>[5]</sup> e Relatividade Restrita<sup>[6]</sup>. Algumas referências apresentam aspectos fenomenológicos utilizando experimentos de baixo custo na determinação da constante de Planck<sup>[7]</sup> e discussões sobre o efeito fotoelétrico<sup>[8]</sup>.

Neste artigo, inicialmente, vamos discutir a motivação educacional para a proposta do ensino conceitual da fenomenologia nuclear, sendo que alguns temas, como Fissão e Fusão Nuclear, já fazem parte da ementa vigente. Depois, nas seções subsequentes, iremos abordar a estrutura conceitual dos fenômenos que podem ser trabalhados em nível Médio.

## II. Motivação educacional

A Física Nuclear tem papel de destaque no cenário científico atual, e até mesmo na política econômica internacional no que concerne ao enriquecimento de

---

da à interação dos mesmos com a rede cristalina do material, por meio do *quantum* de vibração da rede denominado *fônons*.

urânio para fins militares ou produção de energia elétrica, o que a torna um assunto relevante do ponto de vista educacional. Este trabalho sugere alguns fenômenos na escala nuclear que podem ser tratados qualitativamente em sala de aula em nível Médio para fins metodológicos e práticos: tratam-se de fenômenos de elevada importância histórica e que possuem aplicações em outras áreas de conhecimento.

O que se pretende aqui não é reformular a ementa do curso de Física Moderna, mas sim, lançar mão de um arcabouço teórico que pode contribuir para a formação do aluno em nível epistemológico.

Embora tais conceitos tenham uma descrição quantitativa extremamente complexa, até certo ponto arraigada a uma análise empírica, é possível torná-la qualitativamente simples sem precisar recorrer a formulações matemáticas avançadas, conservando, entretanto, seu caráter técnico. O aluno de Ensino Médio *a priori* não teria muita dificuldade de entender a dinâmica nuclear, uma vez que, ao adentrar neste assunto, alguns conteúdos que servem de pré-requisitos para tal entendimento já foram vistos, em parte nas disciplinas de Química, como o conceito de átomo, *spin*, íons, energia de ligação, massa e número atômico, etc., e também na própria disciplina de Física, nos tópicos relacionados a Eletromagnetismo, Relatividade Restrita e Mecânica Quântica.

O aluno que estudou Reações Químicas também não terá dificuldades de entender como se processa uma reação nuclear, uma vez que a notação empregada para descrever ambas é idêntica. Por outro lado, é importante que o professor, como mediador do conhecimento, seja capaz de contextualizar os conteúdos ministrados com o cotidiano do aluno; todos os processos nucleares são passíveis de uma aplicação prática e podem ser estendidos a outras áreas do saber. Pode-se destacar, entre elas, a datação geológica com a utilização de isótopos radioativos do  $C^{14}$  ou  $U^{235}$ , na Geografia e Geologia. Temos a dosimetria em tratamento médico por  $Cs^{133}$  ou a indução de mutações genéticas em determinados organismos em Biologia, além da possibilidade de uma análise sócio-política internacional em função do impacto do uso de armas nucleares e da manipulação de lixo nuclear. Uma experiência de ensino sobre estes dois últimos temas foi feita na Holanda por Eijkelhof *et al*<sup>[9]</sup>, em que foi incluída na grade curricular de Física uma unidade denominada "Armas Nucleares e Segurança", onde 65% do alunado concordaram que o tópico deveria ser incorporado à grade de Física, embora o corpo administrativo das escolas tenham se posicionado contra a inclusão.

Pode-se discutir o acidente radiológico em Goiânia<sup>[10-12]</sup>, ocorrido em 13 de setembro de 1987, quando 0,093 kg de cloreto de cézio, um sal obtido do  $Cs^{137}$ , contido em uma cápsula revestida de aço e chumbo de um aparelho de radioterapia-

pia, foi liberado e contaminou 112.800 pessoas, a maior parte com contaminação corporal externa. Destas, 129 pessoas apresentaram contaminação corporal interna e externa concreta, vindo a desenvolver sintomas como náuseas, vômitos, diarreias, etc., sendo apenas medicadas. Outras 49 foram internadas, sendo que 21 precisaram sofrer tratamento intensivo, das quais quatro não resistiram e acabaram morrendo. Na limpeza da cidade, foram recolhidas 13,4 toneladas de lixo atômico separados em 1.200 caixas e 2.900 tambores, que permanecerão como fonte de risco para o meio ambiente por 180 anos. Há um documentário interessante acerca do ocorrido<sup>[13]</sup>.

Outro aspecto que pode ser explorado dentro da fenomenologia nuclear é a utilização de recursos computacionais, como simulações em java, no estudo experimental acerca da produção de energia nuclear, fissão e fusão nuclear, decaimento radioativo, espalhamento de partículas nucleares, etc. Existem na internet muitos softwares gratuitos com ambientes gráficos interativos e de fácil operação<sup>[14-16]</sup>. Esse é um ponto-chave, uma vez que o processo ensino aprendizagem tornar-se-á significativo se o aluno materializar os conceitos abstratos da Física teórica, conectando a fenomenologia dos processos físicos a sua vida prática mediante a observação e interação direta com um laboratório virtual.

De modo geral, a Fenomenologia Nuclear é um tema rico e de grandes potencialidades no contexto educacional. Fica como sugestão para serem abordados os tópicos que seguem.

### III. Histórico

A descrição da estrutura da matéria é um problema antigo que remonta a antiguidade clássica. Na Grécia Antiga, Leucipo e Demócrito defendiam a ideia de que todas as coisas eram formadas por corpúsculos, aos quais deram o nome de átomos. Estes eram considerados indivisíveis, rígidos e impenetráveis, dotados de um movimento incessante no vácuo<sup>[17]</sup>.

Embora as ideias concernentes ao atomismo tenham sido abandonadas e obscurecidas pela igreja na Idade Média, no início do século XIX, as hipóteses acerca da constituição atômica da matéria voltaram a ganhar força com J. Dalton, ao serem utilizadas na explicação das reações químicas e de suas leis básicas<sup>[17]</sup>.

Já no final do século XIX, com as descobertas dos raios catódicos e a determinação de sua natureza como sendo constituída por cargas elétricas negativas, e as observações acerca da radiação emitida por alguns átomos feitas por Becquerel e o casal Curie levaram a uma nova formulação acerca da constituição da matéria. O fato de átomos de um elemento químico sofrerem uma transmutação para

átomos de um outro elemento mediante a emissão de partículas com carga positiva ou negativa, levou a conjecturar-se que os átomos deveriam ser constituídos por esses dois tipos de partículas, sendo as cargas negativas os elétrons<sup>[18]</sup>.

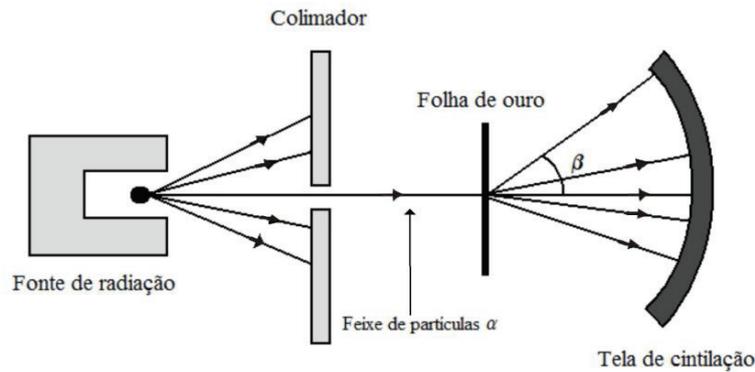
Experiências de interação de raios X com átomos feitas por C. G. Barkla (1909) levaram à concludente confirmação da existência de elétrons no interior dos átomos, onde estes eram numericamente da ordem da metade do peso atômico do átomo ( $\approx A/2$ ). Hipóteses acerca da natureza das cargas positivas não podiam ser feitas devido às dificuldades na análise das propriedades dessas partículas nos tubos de descarga gasosos, mediante a emissão advinda de substâncias radioativas, que não possuíam a uniformidade das cargas negativas<sup>[18]</sup>.

Partindo do pressuposto de que, na natureza, os átomos são observados como eletricamente neutros, era de se esperar que a quantidade de cargas positivas fosse idêntica ao número de elétrons do átomo. Outro ponto observado é que a massa dos elétrons,  $m_e = 0,9108 \times 10^{-27}$  g, é muito menor do que a massa do átomo de Hidrogênio (o mais leve da natureza), o que leva a concluir que a maior parte da massa do átomo está ligada às cargas positivas, identificadas posteriormente como prótons<sup>[19]</sup>. O átomo já não era mais indivisível, possuía agora partes eletricamente ativas, levando à formulação de modelos atômicos com o objetivo de explicar a estabilidade atômica, dos quais se destacaram o modelo de J. J. Thomson e o de E. Rutherford.

J. J. Thomson propôs um modelo no qual os elétrons estavam distribuídos uniformemente em uma esfera carregada positivamente com um raio da ordem de  $10^{-8}$  cm, que, na época, era tomada como sendo a dimensão padrão de um átomo. Esse modelo ficou conhecido como pudim de ameixas. A queda desse modelo está associada aos resultados teóricos previstos para o espalhamento de partículas por alguns átomos, que estavam em desacordo gritante com a experiência. Esse modelo não era capaz de explicar os elevados ângulos de deflexão sofridos pelas partículas ao atravessarem uma fina folha de ouro. E. Rutherford e seus assistentes Geiger e Mardsen, no ano de 1909, realizaram uma série de experimentos nos quais foram observados grandes ângulos de espalhamento<sup>[20]</sup>.

O resultado obtido pelo grupo de pesquisa levou à formulação do modelo atômico de Rutherford, no qual os átomos eram vistos como mini-sistemas planetários, com o núcleo ao centro e elétrons orbitando ao seu redor. A ideia era simples, os elevados desvios sofridos pelas partículas alfa só seriam possíveis se o centro espalhador tivesse um campo elétrico repulsivo extremamente elevado. Como as partículas alfa tinham carga positiva – são átomos de Hélio duplamente ionizados – o retroespalhamento era resultado de uma colisão frontal com uma região extremamente positiva e de massa elevada, a qual foi denominada nú-

cleo<sup>[21]</sup>. Cavalcante<sup>[9]</sup> discute o espalhamento de Rutherford, a partir de resultados experimentais e de recursos computacionais disponíveis na internet.



*Fig. 1 - Experiência realizada por Rutherford que mostra os elevados desvios ( $\beta$ ) sofridos pelas partículas  $\alpha$  ao atravessarem uma folha de ouro e serem detectadas em uma tela de cintilação.*

A descoberta do núcleo foi o marco inicial da física nuclear. A possibilidade de se obter informações acerca da estrutura atômica por meio de colisões com partículas subnucleares abriu um leque de possibilidades na busca pela compreensão e aplicação das energias envolvidas nas reações com matéria bariônica<sup>3</sup>, bem como do conhecimento das estruturas internas do núcleo. Estavam abrindo-se as portas de uma nova área de conhecimento nos quais os resultados experimentais só podiam ser obtidos por mecanismos de colisão. Com as teorias da Mecânica Quântica de W. Heisenberg e E. Schrödinger e a versão relativística de P. Dirac, uma descrição teórica mais precisa acerca dos processos nucleares pode ser obtida resultando nas teorias mais modernas da Cromodinâmica Quântica de D. Politzer, F. Wilczek e D. Gross e da teoria eletrofraca de S. Weinberg, A. Salam e S. Glashow, que unifica a interação eletromagnética com a teoria de Fermi para a interação fraca mediante a atuação de campos carregados por Bósons vetoriais.

<sup>3</sup> Matéria ordinária formada por prótons e nêutrons, que também são denominados bárions.

## IV. Fenomenologia nuclear

A dinâmica nuclear é um mecanismo complexo, onde toda a sua descrição está associada às leis de conservação, e simetrias e ao formalismo quântico de espalhamento, além do fato de muitos dos modelos teóricos propostos para explicar o comportamento do núcleo estarem estruturados em uma base experimental. A seguir, apresentaremos uma abordagem breve e qualitativa de um número delimitado de fenômenos que foram escolhidos devido a sua indiscutível importância, seja do ponto de vista histórico, seja pela sofisticação técnica e aplicabilidade prática.

### IV.1 Decaimento Alfa e Transmutação Nuclear

Iniciaremos com o processo de decaimento alfa. Esse processo está ligado diretamente às transições radioativas sofridas por núcleos instáveis, onde ocorre a emissão de uma partícula alfa na busca pela estabilidade. A natureza dessas partículas já foi evidenciada anteriormente, o nosso interesse nesse processo de decaimento está relacionado com o efeito de tunelamento quântico ou transmissão através de barreiras de potencial.

Este é um processo extremamente complexo do ponto de vista que resultados precisos estão relacionados com probabilidades quânticas, especificamente com a probabilidade da partícula alfa ser formada no núcleo mais a probabilidade dela transpor a barreira de potencial deste último<sup>[23]</sup>. Para que o processo possa ser tratado como um problema de colisão, admite-se, para efeito de cálculo, uma partícula externa já formada, à qual se pretende juntar ao núcleo de partida. Nesse contexto, basta calcular a probabilidade da partícula alfa atravessar a barreira de potencial do núcleo. Este é um problema clássico de física moderna. Veja a Fig. 2.

Do ponto de vista aplicativo, o decaimento alfa serviu de base para a realização das primeiras reações nucleares, principalmente no mecanismo de transmutação nuclear artificial provocado pela colisão de núcleos com partículas  $\alpha$ . Em 1919, E. Rutherford foi o primeiro a utilizar essas partículas como projéteis, em detrimento delas possuírem energia e momento elevados<sup>[24]</sup>. Havia, no entanto, um problema: a maioria das partículas  $\alpha$  deveria ser desviada devido ao elevado campo elétrico gerado pelo alvo, reduzindo drasticamente a probabilidade de uma reação. A saída para esse problema foi a utilização de núcleos leves, o que reduzia drasticamente as forças coulombianas repulsivas, aumentando a probabilidade de uma possível reação<sup>[18]</sup>. As reações alfa-próton e alfa-nêutron, nas quais temos a emissão, pelo núcleo residual, de um próton e de um nêutron, respectivamente,

são os exemplos mais significativos desse mecanismo. Na primeira reação, tínhamos um núcleo do átomo de nitrogênio sendo bombardeado por uma partícula  $\alpha$ , conforme a equação:

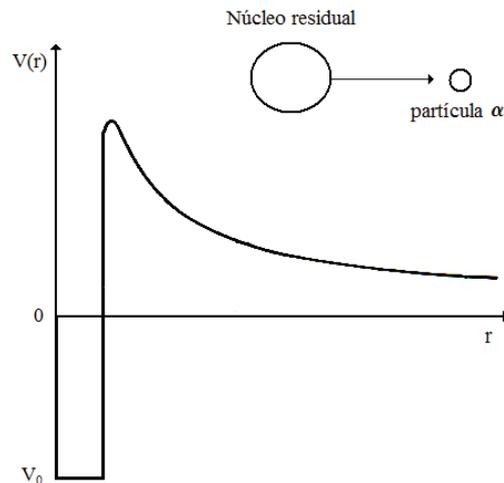
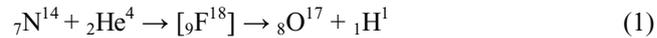
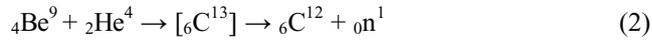


Fig. 2 - Potencial do núcleo gerado por interação eletrostática e que deve ser atravessado pela partícula alfa.

Os elementos à esquerda representam os reagentes, os da direita o núcleo composto seguido do decaimento para o núcleo residual e o próton.

A reação alfa-nêutron tem suma importância histórica, pelo fato de ter propiciado a descoberta do nêutron, o que levou a aceitar que o núcleo era composto por prótons e nêutrons, abandonando o antigo modelo que postulava a existência de elétrons no interior do núcleo, uma vez que este modelo tinha uma série de limitações, a começar pelo princípio da incerteza, que mostrava que um elétron confinado numa região da ordem do diâmetro nuclear deveria possuir uma energia da ordem de 100 MeV, sendo que o valor experimental observado de energia para elétrons do decaimento beta era de 1MeV. O momento de dipolo magnético do núcleo era três vezes menor que o momento de dipolo de um elétron<sup>[19]</sup>, logo elétrons não poderiam constituir o núcleo, uma vez que dados experimentais apontavam essa enorme discrepância

A reação a seguir tem por base a colisão de uma partícula  $\alpha$  com um núcleo de berílio:



O seu resultado nos fornece como núcleo residual carbono 12 e um nêutron. Ambas as reações, (1) e (2), podem ser explicadas a partir da teoria clássica de colisões inelásticas com o acréscimo, no entanto, da energia de repouso de cada reagente dada pela relação de Einstein  $E = m_0 c^2$ , uma vez que os níveis de energia envolvidos ainda não requerem um tratamento relativístico mais profundo. O processo de transmutação é bastante útil por possibilitar a criação de compostos artificialmente, “eliminando” em parte a necessidade de exploração de recursos naturais.

Outra aplicação interessante do decaimento alfa pode ser observada dentro dos detectores de fumaça (alarme contra incêndio), onde é utilizado o elemento radioativo denominado Amerício-241, que tem meia vida de 458 anos. Detectores de fumaça são dispositivos de baixo custo e são bastante utilizados em prédios comerciais e residenciais. São compostos de duas partes: um sensor para sentir a fumaça e uma campainha eletrônica. Existem dois tipos de detectores: os fotoelétricos e os de ionização. Para fins práticos, dentro do contexto deste trabalho, vamos nos ater aos detectores de ionização. Dentro desses detectores, temos uma câmara de ionização que encerra em seu interior  $2 \cdot 10^{-4}$  g de Amerício-241, que equivale a 0,9 microcurie. Essa quantidade de Amerício passa aproximadamente por 37 mil transmutações nucleares por segundo e, a cada transmutação, é emitida uma partícula alfa. A câmara de ionização é composta por duas placas sujeitas a uma diferença de potencial, conforme pode ser observado na Fig. 3.

As partículas alfa ionizam os átomos de oxigênio e nitrogênio do ar no interior da câmara. Os elétrons liberados nesse processo são atraídos para a placa carregada positivamente e os átomos positivos são atraídos para a placa com carga negativa, estabelecendo, portanto, uma corrente elétrica entre as duas placas advindas da movimentação dos elétrons e dos íons. Em uma situação de incêndio, as partículas de fumaça entram na câmara de ionização, reagem com os íons, tornando-os neutros, interrompendo a corrente entre as placas. O detector sente a diminuição na corrente e dispara o alarme.

## IV.2 Decaimento Beta

Em 1914, J. Chadwick foi o primeiro a observar experimentalmente, através de medidas realizadas com espectrômetros magnéticos, que os núcleos podiam emitir elétrons<sup>[23]</sup>. Essas primeiras observações levaram a crer que os elétrons fossem, assim como os prótons, os constituintes do núcleo, o que mais

tarde foi refutado com a descoberta do nêutron. Trata-se, a exemplo do decaimento alfa, de um processo de transição radioativa entre estados instáveis de alguns

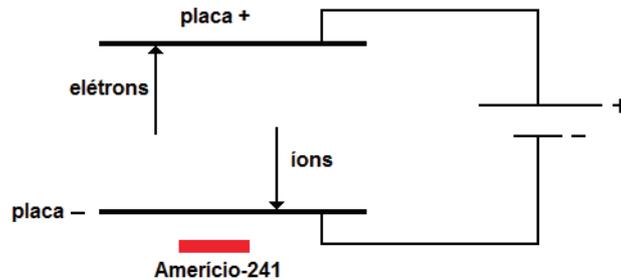
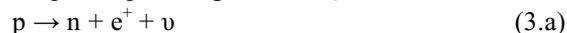


Fig. 3 - Esquema de funcionamento da câmara de ionização de um detector de fumaça.

núcleos com a emissão de elétrons de alta energia, o qual foi denominado decaimento beta. A teoria inicial do decaimento beta tinha sérios problemas, pois não dava conta do espectro de energia observado experimentalmente e que não podia ser comportado por um único elétron.

Em 1930, W. Pauli postulou a existência do neutrino, outra partícula que também era emitida no decaimento, sem carga e sem massa<sup>4</sup> e *spin* 1/2; a existência de uma partícula desprovida de massa, de carga nula e momento de *spin* 1/2 era necessária para a preservação dos princípios de conservação de energia e momento angular. Uma teoria mais precisa só foi proposta em 1934 por E. Fermi<sup>[28]</sup>, na qual se chegou à conclusão de que se tratava de um novo tipo de interação, a *interação fraca*.

Anos mais tarde essa teoria foi aprimorada com os trabalhos de R. Feynman e M. Gell-Mann<sup>[29]</sup>, sendo utilizado na descrição da interação de Fermi um tratamento relativístico coerente a partir da equação de Dirac. No interior do núcleo, o decaimento beta pode ser expresso pelas seguintes reações:



<sup>4</sup> O texto refere-se à forma original postulada por W. Pauli. Atualmente, extensões do Modelo Padrão preveem que os neutrinos devam ter massa, embora haja controvérsia uma vez que a existência de massa dos neutrinos leva à violação da conservação do número leptônico. Por outro lado, neutrinos massivos são fortes candidatos à matéria escura, contribuindo para formação e dinâmica do universo. No entanto, todas as tentativas experimentais de medir a massa dos neutrinos fracassaram<sup>[25-27]</sup>.



As equações 3.a e 3.b mostram o decaimento beta positivo e negativo com a emissão de um pósitron e um neutrino ou a emissão de um elétron e um antineutrino, respectivamente.

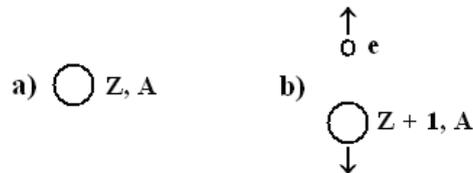


Fig. 4 - Decaimento beta ( $Z$ - número atômico e  $A$ - número de massa): a) estado inicial do núcleo antes do decaimento. b) Núcleo após a emissão do elétron.

As aplicações desse mecanismo de decaimento estão presentes em uma classe considerável de fenômenos, que se estendem da fisiologia humana, dentro da Medicina, até desenvolvimento de tecnologia espacial e industrial. Neste último caso, temos a utilização do Promécio, elemento químico de número atômico 61, que é encontrado à temperatura ambiente no estado sólido. Ele é utilizado como emissor de partículas beta na construção de medidores de espessura, dentro da metrologia de precisão, na construção de ponteiros e mostradores de relógio. Na indústria aeroespacial é utilizado para fabricação de microbaterias de longa duração e, possivelmente, como uma fonte portátil de raios-X e de calor em sondas espaciais e satélites artificiais<sup>[30]</sup>.

Um fenômeno interessante que envolve a emissão beta ocorre no interior do corpo humano, esse processo de radiação é responsável pelo funcionamento do músculo cardíaco. No sangue humano, encontra-se diluído cerca de 30 mg de potássio-40( $K^{40}$ ), que é um isótopo radioativo do potássio-39, esta concentração é suficiente para emissão de partículas  $\beta$ . Dentro do coração, existem duas cavidades, chamadas de aurículas direita e esquerda: a primeira tem a função de bombear sangue na circulação pulmonar e a segunda é responsável por distribuir sangue enriquecido com oxigênio por todas as partes do corpo. Ambas são dotadas de células e feixes de fibras nervosas denominadas de nódulo sinoauricular e feixe de Bachman, respectivamente. O potássio diluído no sangue, dentro dessas cavidades, sofre desintegração por emissão de elétrons (partículas beta) e esses elétrons, ao colidirem com as terminações nervosas das paredes das cavidades cardíacas, geram um estímulo que faz com que o músculo cardíaco se contraia e se expanda

em ritmo determinado, o que faz com que o sangue seja bombeado por todas as partes do corpo.

### IV.3 Efeito Möessbauer

Seguindo a linha de reação induzida por raios gama, destaca-se outro mecanismo denominado absorção por ressonância nuclear ou efeito Möessbauer. A descrição é a seguinte: após absorver um fóton, o núcleo passa ao estado excitado e a largura de linha associada a esse estado é dada, segundo o princípio da incerteza, pela equação  $\Gamma = \hbar/\tau$ , na qual  $\tau$  representa a vida média do estado. Após esse período, o núcleo decai pela emissão de um novo fóton  $\gamma$ , sofrendo um recuo. A ideia central é que a energia cedida ao núcleo da absorção deve ser igual à energia de recuo na emissão, prefigurando um estado ressonante.

Consideramos até aqui o núcleo de um átomo livre; o problema muda de configuração para o caso do átomo estar ligado a uma rede cristalina. Devido às ligações com a rede, o núcleo pode absorver um fóton sem recuar; diz-se que ocorreu absorção ressonante sem recuo, o que é justamente o efeito Möessbauer. O fato de o átomo poder executar vibrações harmônicas ao longo de três graus de liberdade, sendo a energia associada aos modos de oscilação quantizada e dada por  $\varepsilon = \hbar\omega$ , na qual  $\omega$  é a frequência de oscilação da rede e  $\varepsilon$  representa o *quantum* das vibrações, denominado de fônon, faz com que, no processo de emissão, a energia de recuo seja transferida para a rede na forma de oscilações, contribuindo para a elevação da temperatura da mesma. Esse fenômeno só ocorre caso a energia de recuo seja maior que a energia do *quantum* de oscilações da rede, gerando um estado de excitação desta. Caso a energia de recuo seja menor que  $\hbar\omega$ , a rede não pode ser excitada, atuando como um amortecedor e ocorre, portanto, uma emissão sem recuo. Esse efeito é bastante utilizado em astrofísica. As linhas do espectro do efeito Möessbauer fornecem uma caracterização precisa dos elementos que compõem a matéria interestelar<sup>[23]</sup>.

Outras aplicações da espectroscopia Möessbauer residem na caracterização estrutural de algumas proteínas, na composição química de meteoritos. Na indústria, pode ser utilizado para estudar a estrutura de ligas metálicas e, na geologia, para a datação geológica de cerâmicas<sup>[31-33]</sup>.

### IV.4 Força Nuclear Forte

A maior contribuição dos mecanismos de colisão à física nuclear está arraigada à caracterização da força nuclear forte, que é a força responsável por ligar

prótons e nêutrons no interior do núcleo atômico e, conseqüentemente, assegurar a estabilidade do núcleo e da matéria hadrônica. É a força de maior intensidade na natureza, daí vem o nome da interação. A interação hadrônica pode ser descrita a partir da dispersão nêutron-próton à alta energia. Este processo é descrito em termos da energia de ligação do dêuteron, que é um núcleo composto por um próton e um nêutron. O problema é tratado fisicamente com os princípios quânticos de interação entre dois corpos.

Os resultados das experiências de espalhamento entre nucleons levam às seguintes propriedades da interação nucleônica: a propriedade de saturação, isto é, um único nucleon só pode interagir com um número limitado de outros nucleons; a independência da carga, ou seja, as forças nucleares são simétricas em relação à carga, a intensidade de interação numa reação (**nn**) é idêntica a uma reação (**pp**), e a presença de forças de troca. Na mecânica quântica, quando duas partículas interagem mutuamente, existe sempre um estado em que alguma propriedade pode ser compartilhada, produzindo uma interação de troca para os nucleons. Heisenberg supôs que essa propriedade seria a carga<sup>[36]</sup>.

A propriedade de força de troca está ligada intimamente à teoria mesônica das forças nucleares propostas pelo físico japonês H. Yukawa, em 1935, que em analogia à interação eletromagnética mediada pela troca de fótons, supôs que a interação hadrônica entre nucleons fosse resultado da troca de um méson  $\pi$ ; o fato dessa partícula possuir massa possibilitava a descrição dessa interação como sendo de curto alcance, além do que os mésons possuem carga ( $\pi^-$ ,  $\pi^+$ ) ou podem ser eletricamente nêutrons ( $\pi^0$ ), requisito necessário para que, em uma interação, a carga das partículas envolvidas seja permutada. Explicitamente nesse processo, um próton pode converter-se em um nêutron e vice-versa. Veja a Fig. 5.

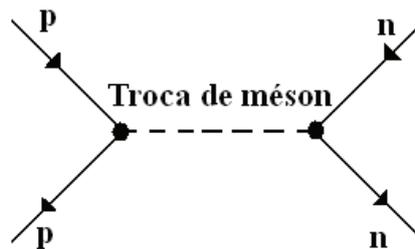


Fig. 5 - Diagrama de Feynman que ilustra a interação entre um próton e um nêutron pela troca de um méson.

A maior aplicação da força nuclear forte ocorre nos reatores de fissão nuclear utilizados para produzir energia elétrica, onde o urânio, ao ser bombardeado por nêutrons, absorve essas partículas e torna-se instável, sofrendo uma bipartição (gerando dois novos átomos mais leves). A energia correspondente à força nuclear forte que unia os prótons e nêutrons no núcleo de urânio é liberada na forma de energia cinética dos dois núcleos residuais, energia esta que pode ser aproveitada dentro do reator de uma usina nuclear ou pode ser usada para fins bélicos, como no caso da bomba atômica.

#### IV.5 Fissão Nuclear

Existem dois mecanismos de reação na física nuclear que estão intrinsicamente ligados, são eles: a moderação de nêutrons e a fissão nuclear. Em 1938, O. Hahn e F. Strassmann<sup>[35]</sup> descobriram a fissão nuclear; Liese Meitner e R. O. Frisch<sup>[36]</sup> interpretaram pela primeira vez o mecanismo do processo e, posteriormente, N. Bohr e J. Wheeler<sup>[37]</sup> propuseram um tratamento teórico baseado no modelo da gota líquida. Finalmente, só em 1942, E. Fermi conduziu a primeira reação em cadeia controlada<sup>[23]</sup>.

O processo de fissão nuclear é resultado de uma instabilidade dinâmica do núcleo, que resulta na sua bipartição em dois núcleos residuais com uma elevada liberação de energia. Para núcleos com  $Z > 92$ , existe a possibilidade de ocorrer fissão espontânea sem a atuação de um agente externo<sup>[35]</sup>. No entanto, para fins práticos, o processo de fissão induzida em núcleos com  $Z \approx 90$  (urânio 233, por exemplo) gerado nos reatores nucleares, conforme a Fig. 6, apresenta uma maior eficiência. O mecanismo se baseia na captura de um nêutron por um núcleo de urânio através de uma colisão, embora exista a possibilidade de se promover a fissão de um núcleo de urânio a partir de colisões com partículas de alta energia, prótons, dêuterons e raios  $\gamma$ <sup>[24]</sup>.

A energia dos nêutrons gerados nas reações nucleares e no próprio processo de fissão é da ordem de 1 MeV<sup>[35]</sup>, isto é, eles são extremamente rápidos, o que dificulta a sua captura pelos outros núcleos de urânio envolvidos na reação. Para se obter uma reação em cadeia, esses nêutrons devem ser termalizados, ou seja, moderados a partir da colisão com outros núcleos (como grafite, berílio, etc.). Com a diminuição de sua velocidade, aumenta a probabilidade de uma reação com um núcleo de urânio que fissiona, liberando nêutrons que serão moderados e capturados por outros núcleos dando início a uma reação em cadeia. Esse processo é utilizado em reatores de usinas term nucleares na produção de energia elétrica e na fabricação de armas de destruição em massa, como a bomba atômica.

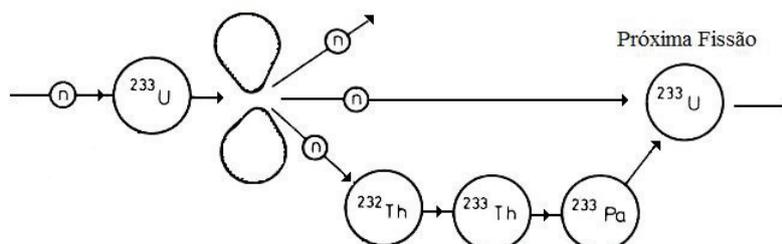


Fig. 6 - Esquema de fissão nuclear no interior de um reator em que o núcleo fissionado libera nêutrons que poderão ser capturados por outros elementos não físeis que, depois, decaem para  $U^{233}$ , ou serem absorvidos por material fissionável e induzirem fissão.

#### IV.6 Enriquecimento de Urânio

O Panorama Internacional de Energia 2007 (IEO2007), divulgado pela Agência Internacional de Energia (AIE), estima um crescimento de 57 % no consumo mundial das diversas formas de energia entre o período de 2004 e 2030. Segundo o relatório, toda a energia mundial utilizada crescerá de  $447.10^{12}$  Btu (British Thermal Unit) em 2004 para  $702.10^{12}$  Btu em 2030. Para a energia nuclear, o consumo médio deve crescer 1,3 % nesse período, com maior concentração nos países em desenvolvimento, cuja demanda estimada é de 4,2 %.

Nesse cenário, ganham importância as usinas de enriquecimento de urânio, cujas pesquisas relacionadas preocupam-se em tornar viáveis, dos pontos de vista econômico, social, ambiental, dentre outros, os processos de produção do combustível, desde a prospecção do minério até o transporte final dos rejeitos radioativos.

O urânio encontrado na natureza, sob a forma de dióxido de urânio ( $UO_2$ ), é composto de cerca de 99,3 % do isótopo  $U^{238}$  e 0,7 % de  $U^{235}$ . Este último, diferente do  $U^{238}$ , é um material fissil, ou seja, que sofre fissão causada apenas por nêutrons de baixa energia (nêutrons térmicos). O enriquecimento de urânio consiste, portanto, no aumento da concentração do  $U^{235}$  que, nos combustíveis dos reatores, deve ser de 2-4 %. Uma bomba atômica, por outro lado, é construída com urânio enriquecido a 95 %.

Um dos processos de separação de isótopos – a difusão gasosa – consiste em transformar  $\text{UO}_2$  no gás hexafluoreto de urânio ( $\text{UF}_6$ ) e fazer este gás difundir-se por placas porosas, separando o ( $^{235}\text{UF}_6$ ) do ( $^{238}\text{UF}_6$ ). Este processo foi empregado nos Estados Unidos, durante a última guerra mundial, para produção em larga escala de urânio altamente enriquecido. Outro processo que se destaca industrialmente é a ultracentrifugação, no qual se faz girar o gás  $\text{UF}_6$  em um cilindro a alta velocidade; como resultado, o  $^{238}\text{UF}_6$  fica concentrado na parede do cilindro, enquanto o  $^{235}\text{UF}_6$  permanece no centro<sup>[34, 40]</sup>.

#### IV.7 Reatores nucleares

Reatores nucleares são sistemas nos quais, de maneira controlada, são produzidas reações nucleares em cadeia para liberação de energia. A física dos reatores estuda basicamente os fenômenos relacionados com o comportamento de nêutrons em um conjunto de meios materiais especiais, organizados em quantidades e geometrias adequadas. Os reatores são classificados mediante vários fatores: materiais de construção, combustível utilizado, geometria, propósito de utilização, dentre outros. Podemos, no entanto, por simplicidade, dividi-los em dois grupos: *os reatores térmicos*, que usam moderadores para reduzir a energia (velocidade) dos nêutrons, e *os reatores rápidos*, que utilizam os nêutrons sem moderá-los<sup>[34, 40]</sup>.

As partes essenciais em um reator são: um núcleo ativo com o *elemento combustível* – geralmente urânio – onde se mantém a reação de fissão, um *moderador* – água ou grafite – para atenuar a energia dos nêutrons, um *refletor* para evitar seu escape, um *arrefecedor* para remoção do calor gerado em consequência das fissões, e uma blindagem para bloquear a passagem de radiação penetrante<sup>[41]</sup>.

Tratamos particularmente do reator térmico de fissão, cujo propósito pode ser conduzir a reação de fissão nuclear para utilização em pesquisa ou para conversão e reutilização de energia em nova forma (*reator de potência*). A função de um reator num sistema de potência é converter energia de fissão em energia térmica, preparando a conversão posterior de energia térmica em elétrica. A energia da fissão é transformada em energia cinética dos fragmentos da fissão, e o resultado imediato é o aumento da energia interna dos materiais do combustível e do moderador. Em uma usina nuclear, esse aumento de energia interna gera vapor, que aciona uma turbina (fora do reator), fazendo girar um gerador elétrico<sup>[42]</sup>, como pode ser visto na Fig. 7.

Uma fissão produzida por um nêutron libera novos nêutrons capazes de produzir novas fissões. Para cada nêutron absorvido, cerca de 2,5 novos nêutrons

são liberados. É necessário, então, que pelo menos um dos nêutrons liberados cause nova fissão para que se estabeleça a reação em cadeia desejada. A taxa de reação é controlada inserindo-se ou retirando-se *barras de controle* – de boro ou cádmio –, que absorvem nêutrons sem sofrer reações adicionais. Tais barras configuram-se também como dispositivos de segurança.

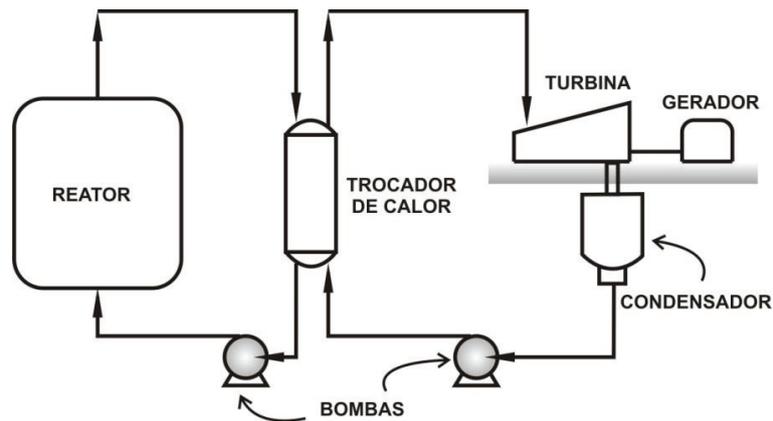
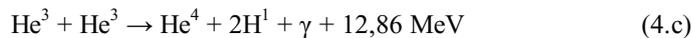


Fig. 7 - Esquema simplificado de uma Usina Termonuclear.

#### IV.7 Fusão Nuclear

O último processo a ser abordado é o de fusão nuclear. Vimos anteriormente que núcleos pesados podiam fissionar mediante a colisão com nêutrons, liberando uma enorme quantidade de energia. O mecanismo de fusão é quase o inverso: núcleos leves e rápidos podem colidir, e fundir para formar núcleos mais pesados, sendo que há também uma quantidade considerável de energia liberada nesse processo. Essa energia está associada à dissipação de calor, depende diretamente das massas dos parceiros envolvidos na reação e tem suas propriedades relacionadas com a matéria nuclear, isto é, para que ocorra a fusão, alguns requisitos devem ser satisfeitos pelos parceiros envolvidos no processo: 1) a energia cinética dos núcleos da reação deve ser grande para possibilitar o aumento da probabilidade de penetração na barreira coulombiana; esse processo ocorre em núcleos muito leves, a uma temperatura da ordem de  $10^7$  K, estando, então, os átomos completamente ionizados, prefigurando um estado de plasma<sup>[23]</sup>; 2) a densidade de matéria presente nas temperaturas envolvidas na reação de fusão deve ser extremamente alta.

O interior das estrelas, em especial o sol, dispõe de todo cenário propício a esse tipo de reação, a densidade do interior do sol é de cerca de  $1000 \text{ g/cm}^3$  a uma temperatura de  $1,5 \times 10^7 \text{ K}$ . A Fig. 8 representa a reação de fusão de hidrogênio em hélio, que ocorre no interior das estrelas e que esteve presente no início da formação do universo, na nucleossíntese primordial<sup>[43]</sup>.



Conforme a temperatura, núcleos mais pesados podem ser formados. A maior aplicação da fusão nuclear estaria relacionada à geração de energia elétrica em substituição das usinas de fissão nuclear, só que de uma forma mais limpa e segura.

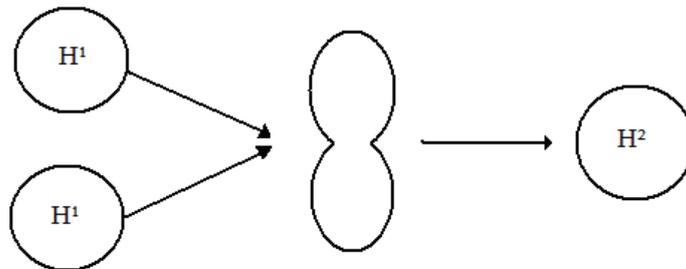


Fig. 8 - Esquema de reação de fusão nuclear em que dois prótons se fundem para gerar o deuteron.

As principais vantagens em relação aos atuais reatores de fissão são: 1) combustível de fácil obtenção e em grande quantidade, o deutério pode ser obtido da água do mar e trítio obtido no próprio reator de fusão a partir do lítio, o urânio utilizado na fissão é muito raro e de difícil extração; 2) a fusão é um processo mais seguro que a fissão, uma vez que a quantidade de combustível empregado é menor, sem liberação descontrolada de energia e as taxas de radiação emitidas são inferiores à taxa de radiação natural que incide na superfície terrestre; 3) menor produção de lixo nuclear comparado à fissão, além do que o lixo proveniente da fusão não é matéria prima pra fabricação de armas nucleares, como no caso da fissão.

Atualmente, a NASA tem investido em pesquisas na construção de reatores nucleares de fusão para gerar energia para foguetes espaciais. Propulsores a

fusão seriam mais eficientes e tornariam os foguetes mais velozes, além de propiciar viagens mais longas, uma vez que o combustível (hidrogênio) seria gerado de forma ilimitada no processo.

## V. Considerações finais

As vertentes mais modernas sobre educação defendem um ensino voltado para a construção de uma mentalidade dinâmica e criativa no aluno e, com base nesse aspecto, este trabalho explorou a possibilidade de temas que apresentam um formalismo matemático demasiadamente complexo em Física Nuclear serem trabalhados no Ensino Médio sem perda de generalidade prática, uma vez que a estrutura conceitual e filosófica dos fenômenos, sob certo aspecto, pode ser mantida sem recorrer a fórmulas matemáticas e sempre, na medida do possível, expondo aplicações práticas que podem ser identificadas pelo aluno no cenário científico-econômico atual. Nesse ponto, faz-se necessária a intervenção do educador como uma ponte entre o saber teórico e conhecimento prático e contextual. Fica como sugestão para os educadores a utilização de recursos didáticos como animações e vídeos, hoje em dia tão difundidos na internet, que tratem desses assuntos. De modo geral, a ciência deve ser divulgada entre os jovens com o objetivo de despertá-los para a realidade da sociedade tecnológica, servindo como um veículo de inclusão e como forma de estímulo para formação de novos cientistas.

## Agradecimentos

M.A.M Souza agradece a Breno Oliveira e Janaina Camargo pelas discussões e a Joselma Rangel pelo auxílio com as figuras.

## Referências

[<sup>1</sup>] BARDEEN, J.; COOPER; L. N.; SCHRIEFFER, J. R. **Phys. Rev.**, v. 108, p. 1175-1204, 1957.

[<sup>2</sup>] TERRAZZAN, E. A. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 9, p. 209-214, 1992.

[<sup>3</sup>] AUBRECHT, G. J. **American Journal of Physics**, v. 57, p. 352-359, 1989.

[<sup>4</sup>] OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. **A review on the “Modern and Contemporary Physics at High School” research area**. Disponível em:

<[http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol5/n1/v5\\_n1\\_a2.htm](http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol5/n1/v5_n1_a2.htm)>.

[5] GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, p. 444-457, 2001.

[6] OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, p. 176-190, 2002.

[7] CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, R. C.; HAAG, R. **Física na Escola**, v. 6, n. 1, p. 75-82, 2005.

[8] CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, R. C.; SOUZA, F. D.; MUZINATTI, E. J. **Física na Escola**, v. 3, n. 2, p. 24-29, 2002.

[9] CAVALCANTE, M. A.; PIFFER, A.; NAKAMURA, P. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 1, p. 108-112, 2001.

[10] EIJKELHOF, H.; KORTLAND, K.; LOO, F. V. D. **Physics Education**, v. 19, p. 11-15, 1984.

[11] IAEA, 1988. **The Radiological Accident in Goiânia**. International Atomic Energy Agency, Vienna.

[12] ANJOS, R. M.; FACURE, A.; LIMA, E. L. N.; GOMES, P. R. S.; SANTOS, M. S.; BRAGE, J. A. P.; OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M.; UMISED, N. K. **American Journal of Physics**, v. 69, p. 377-381, 2001.

[13] ANJOS, R. M.; UMISED, N. K.; FACURE, A.; YOSHIMURA, E. M.; GOMES, P. R. S.; OKUNO, E. **Radiat. Prot. Dosim.**, v. 101, n. 1-4, p. 201-204, 2002.

[14] <<http://www.youtube.com/watch?v=kdC70RKqQWk&feature=related>>

[15] EICHLER, M. L.; JUNGES, F.; DEL PINO, J. C. **Física na Escola**, v. 7, n. 6, p. 17-21, 2006.

[16] <<http://phet.colorado.edu/simulations/>>

[17] <[http://pion.sbfisica.org.br/pdc/index.php/por/multimedia/simulacoes/fisica\\_moderna\\_e\\_contemporanea](http://pion.sbfisica.org.br/pdc/index.php/por/multimedia/simulacoes/fisica_moderna_e_contemporanea)>

- [18] LOPES, J. L. **A Estrutura Quântica da Matéria**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1993.
- [19] KAPLAN, I. **Física Nuclear**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.
- [20] EISBERG, R. M. **Fundamentals of Modern Physics**. John Wiley & Sons, 1961.
- [21] RUTHERFORD, E. **Phil. Mag.**, v. 21, p. 669, 1911.
- [22] NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica 4**. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.
- [23] MAYER-KUCKUK, T. **Física Nuclear**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1993.
- [24] RUTHERFORD, E. **Phil. Mag.**, v. 37, p. 537, 1919.
- [25] MOHAPATRA, R. N.; PAL, P. B. **Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics**. World Scientific Publishing, 2004. v. 41
- [26] BILENKY, S. M.; PETCOV, S. T. **Rev. of Mod. Phys.**, v. 59, p. 671, 1987.
- [27] KIM, C. W.; PEVSWER, A. **Neutrinos in Physics and Astrophysics, Contemporary concepts in Physics**. Ed. Harwood Academic Publishers. v. 8.
- [28] FERMI, E.; ZEITS, F. **Physik**, v. 88, p. 161-177, 1934.
- [29] FEYNMAN, R.; GELL-MANN, M. **Phys. Rev.**, v. 109, p. 193, 1958.
- [30] Los Alamos National Laboratory- Promethium. Disponível em: <<http://periodic.lanl.gov/elements/61.html>>
- [31] CRANSHAW, T. E.; DALE, B. W.; LONGWORTH, G. O.; JOHNSON, C. E. **Mössbauer Spectroscopy and its applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [32] MURAD, E.; CASHION, J. **Mössbauer Spectroscopy of environmental materials and their industrial utilization**. Kluwer Academic, 2004.

- [<sup>33</sup>] MITRA, S. **Applied Mössbauer Spectroscopy: Theory and practice for Geochemist and Archeologists**. Elsevier Science and Technology Books, 1993.
- [<sup>34</sup>] ALMEIDA, E.; TAUHATA, L. **Física Nuclear**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- [<sup>35</sup>] SEGRÉ, E. **Núcleos y Partículas**. Barcelona: Editorial Reverte, 1972.
- [<sup>36</sup>] BURCHAM, W. E. **Física Nuclear**. Barcelona: Editorial Reverte, 1974.
- [<sup>37</sup>] HAHN, O.; STRASSMANN, F. **Naturwiss**, v. 27, n. 11, p. 89, 1939.
- [<sup>38</sup>] MEITNER, L.; FRISCH, O. R. **Nature**, v. 143, p. 239, 1939.
- [<sup>39</sup>] BOHR, N.; WHEELER, J. **Phys. Rev.**, v. 56, p. 426, 1939.
- [<sup>40</sup>] KRANE, K. S. **Introductory Nuclear Physics**. John Wiley & Sons, 1988.
- [<sup>41</sup>] YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A.; SEAR; ZEMANSKY **University physics**. Addison Wesley, 2009.
- [<sup>42</sup>] SERWAY, R. A.; JEWETT JR., J. W. **Principles of Physics: a calculus-based text**. Thomson, 2007.
- [<sup>43</sup>] ALPHER, R. A.; BETH, H.; GAMOW, G. **Phys. Rev.**, v. 73, p. 803-804, 1948.