

Os dados nucleares da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) como aporte científico no Ensino de Física Nuclear

The application of International Atomic Energy Agency (IAEA) nuclear data as a scientific contribution in Nuclear Physics teaching

Gilberto Orengo^{*1}, Decio Schäffer^{1,2}

¹Universidade Franciscana, Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática, Santa Maria, RS, Brasil

²Universidade do Estado de Mato Grosso, Tangará da Serra, MT, Brasil

Recebido em 16 de Julho de 2019. Aceito em 14 de Agosto de 2019.

Neste artigo, é apresentada uma sugestão de atividade de ensino de Física Nuclear, na qual são utilizados dados nucleares da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), tendo como eixo motivador a compreensão da física da Terapia por Captura de Nêutrons pelo Boro (BNCT). A fissão nuclear induzida por nêutrons, da reação $^{10}_5\text{B}(n, \alpha)^7_3\text{Li}$, e o decaimento gama são os processos analisados na BNCT, com abordagens metodológicas, tanto de caráter quantitativo como qualitativo, para auxiliar na compreensão dos aspectos conceituais relativos à energia da reação, aos produtos da fissão – divididos em dois diferentes conjuntos energéticos de partículas –, e à radiação gama, oriunda do decaimento radioativo do estado isomérico do Li-7.

Palavras-chave: fissão nuclear, decaimento alfa, BNCT, ENDF, Tabela de Nuclídeos, Celular Smartphone.

This paper presents a suggestion of a Nuclear Physics teaching activity in which the International Atomic Energy Agency (IAEA) nuclear data are used. The motivating theme is the understanding of the Physics in Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). Neutron-Induced fission of B-10, in $^{10}_5\text{B}(n, \alpha)^7_3\text{Li}$ reaction, and gamma decay has been analyzed and discussed in this context. To understand the conceptual aspects of reaction energy, fission products – divided into two different energetic sets of particles –, and gamma radiation from the radioactive decay of the Li-7 isomeric state were used both qualitative and quantitative methodologies.

Keywords: nuclear fission, alpha decay, BNCT, ENDF, Live Chart of Nuclide, Smartphone.

1. Introdução

Neste artigo, é proposta uma atividade de ensino que envolve conceitos da Física Nuclear, na qual é utilizada a extração de dados nucleares disponibilizados gratuitamente pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) [1]. Como exemplo de aplicação, será detalhada a física envolvida na Terapia por Captura de Nêutrons pelo Boro ou, simplesmente, BNCT¹, cujo sucesso está no processo de uma fissão nuclear induzida, que produz uma transmutação nuclear do isótopo do B-10 ($^{10}_5\text{B}$) motivada pela absorção de nêutrons térmicos [2, 3].

A análise da reação nuclear $^{10}_5\text{B}(n, \alpha)^7_3\text{Li}$, em que n é o nêutron, α é a partícula alfa e ^7_3Li é o isótopo de lítio de número de massa 7, será realizada pela cinética nuclear e com base nos dados nucleares obtidos do banco de dados nucleares da IAEA.

A estrutura deste trabalho está organizada da seguinte forma: inicialmente são apresentadas a BNCT e as ques-

tões motivadoras do estudo, e na seqüência, nas seções 3 e 4, é realizada uma introdução aos bancos de dados nucleares da IAEA. E, finalmente, na seção 5, são apresentadas as respostas às referidas questões.

2. A Terapia por Captura de Nêutrons pelo Boro – BNCT

A Terapia por Captura de Nêutrons pelo Boro (BNCT) é um tipo de Radioterapia *não convencional*, utilizada especialmente no combate de câncer sólido [2, 4]. O princípio básico da BNCT é carregar o tumor com átomos do isótopo não radioativo Boro-10 ($^{10}_5\text{B}$ ou B-10) e, na seqüência, bombardear o tumor com nêutrons térmicos ou de baixa energia, da ordem de 0,025 eV (com $v \approx 2.200$ m/s). O B-10, ao absorver o nêutron, sofre uma fissão nuclear, cujos fragmentos, partícula alfa e o núcleo de lítio em recuo, depositam suas energias (em torno de 2,79 MeV), no interior da célula cancerígena, matando o tumor pela quebra da fita do DNA, porque o alcance das partículas é da ordem de 4 a 10 μm [4]. A BNCT é uma terapia altamente seletiva, pois somente

*Endereço de correspondência: g.orengo@gmail.com

¹BNCT, na expressão original, em inglês, significa *Boron Neutron Capture Therapy*.

as células cancerígenas são atingidas, e os tecidos saudáveis são pouco afetados pela radiação produzida. Na Figura 1, está representada esquematicamente a reação nuclear da BNCT.

A fissão nuclear é o conceito físico mais importante envolvido na BNCT, e, por este motivo, o objetivo da atividade de ensino é responder as seguintes questões de interesse:

1. Como obter os valores 6,3% e 93,7% para a proporção dos produtos de fissão?
2. Como obter e distribuir a energia da reação de 2,79 MeV entre as partículas do produto, ${}^4\text{He}$ e ${}^7\text{Li}$?
3. Qual o alcance das partículas α e ${}^7\text{Li}$ no interior das células teciduais?
4. A respeito da radiação gama emitida, qual a sua origem, e como obter o valor da energia de 0,48 MeV?

A fim de responder essas questões, é considerada a cinética das reações nucleares, em especial o decaimento alfa, e também serão realizados acessos ao banco de dados nucleares da IAEA, para extrair valores quantitativos experimentais de interesse, em duas bases: o ENDF [5], que é um arquivo de dados nucleares avaliados, e a Tabela de Nuclídeos [6], a qual fornece um mapeamento do comportamento nuclear ou radioativo dos nuclídeos. Essas duas bases de dados são descritas a seguir.

3. O ENDF – *Evaluated Nuclear Data File*

O ENDF ou arquivo de dados avaliados é um banco de dados de reações nucleares que contém seções de choque avaliadas e recomendadas, espectros, distribuições angulares, produtos de fissão, dados de interação fotoatômica e espalhamento térmico, com ênfase em reações induzidas por nêutrons.

Os formatos e bibliotecas do ENDF são decididos pelo Grupo de Trabalho de Avaliação de Seções de Choque (CSEWG²), devido a um esforço cooperativo de laboratórios americanos, indústria e universidades nos EUA e no Canadá, e são mantidos pelo Centro Nacional de Dados Nucleares (NNDC) [7].

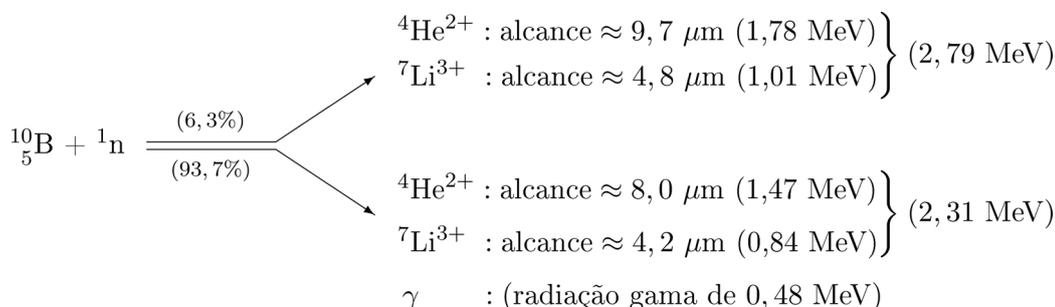
Os dados são analisados por físicos nucleares experientes para produzir bibliotecas, cujos dados são armazenados no formato ENDF-6 adotado internacionalmente, e mantidos pelo CSEWG.

O acesso ao ENDF é feito no site da IAEA [5], e os parâmetros básicos que precisam ser informados para extrair os dados e informações desejados são: o **alvo** (*Target*), no qual ocorrerá(ão) a(s) interação da(s) partícula(s) incidente(s), em especial para os nêutrons; o tipo de **reação** (*Reaction*) que se deseja analisar e, por fim, a **grandeza** física (*Quantity*), que armazenará os resultados de interesse.

4. A Tabela de Nuclídeos – *Live Chart of Nuclides*

Na Tabela ou Gráfico de Nuclídeos, são fornecidas informações como massas, abundâncias relativas, meias-vidas, seções de choque de nêutrons e propriedades de decaimento, para mais de 3.100 nuclídeos e 580 isômeros. Um código de cores é usado para enfatizar as propriedades de meia-vida e de absorção de nêutrons. A tabela está disposta num diagrama gráfico bidimensional, em que um eixo representa o número de nêutrons e o outro, o de prótons, e cada célula plotada no diagrama gráfico simboliza o nuclídeo de um elemento químico real ou hipotético.

O acesso à Tabela de Nuclídeos pode ser realizado de duas formas: numa versão *online* interativa disponibilizada pela IAEA [6] ou pelo aplicativo de celular, disponível para os sistemas operacionais iOS Apple e Android. Em ambas formas, o único parâmetro solicitado é o nuclídeo que se quer investigar, como é apresentado mais adiante.



Fonte: desenvolvido pelos autores, com base nos dados da Ref. [3] e de resultados próprios.

Figura 1: Representação esquemática do processo físico básico da BNCT. Há possibilidade de ocorrência de dois tipos de produtos da fissão nuclear, o qual é resultado da absorção de um nêutron pelo B-10: o primeiro com 6,3% de chances de ocorrer, e o segundo com 93,7%.

5. A Física na BNCT

A seguir, serão respondidas as questões levantadas anteriormente.

5.1. As proporções de 6,3% e 93,7%, para os produtos da reação de fissão $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$

A reação nuclear do nêutron com o B-10 pode ser avaliada por meio das seções de choque, as quais fornecem as probabilidades da reação ocorrer, tendo como um dos produtos a partícula alfa. A unidade padrão de seção de choque é o barn, com $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$, e os valores desta estão disponíveis no site da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), no Arquivo de Dados Nucleares Avaliados (ENDF) [5]. Para extrair os dados da seção de choque, segue-se os seguintes passos:

Passo 1 - Acesse o site www.nds.iaea.org;

Passo 2 - clique no ícone ENDF e na sequência, preencha os parâmetros (*parameters*) básicos dos seguintes campos:

Target: B-10

Reaction: N,A

Quantity: SIG.

O *Target* se refere ao alvo e é preenchido com um ou mais núclídeos desejados, separados por ponto e vírgula. O interesse aqui é no B-10. O item *Reaction* especifica o tipo de reação desejada, com ênfase nas reações com nêutrons. O parâmetro adotado foi N,A, o qual significa que o alvo será bombardeado com nêutrons (N), e um dos produtos desejado é a partícula alfa (A). Se for necessário, é possível selecionar diferentes tipos de reações, escritas separadas por ponto e vírgula. Em *Quantity*, é indicada a grandeza física que se deseja obter resultados, que, neste caso, são as seções de choque (SIG). Aqui também é permitido solicitar resultados para diferentes grandezas físicas, escritas separadas por ponto e vírgula. Para cada um desses itens, há disponível um processo de escolha interativa, que pode ser investigado clicando-se em », no site, disposto ao lado dos campos dos parâmetros;

Passo 3 - submeta esses parâmetros, clicando em *Submit*;

Passo 4 - na próxima tela, serão dispostos todos os dados nucleares, numa tabela em que cada linha contém um arquivo com os dados extraídos, sendo que, na última coluna, constam os autores das medidas realizadas, conforme é apresentado na Figura 2;

Passo 5 - para obter o gráfico, selecione todos os dados, clicando em *All* e, na sequência, em *Plot*.

Na Figura 3, são apresentados graficamente os valores da seção de choque, da reação $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, na qual se pode identificar duas linhas. A reação nuclear na BNCT ocorre, preferencialmente, com energia dos nêutrons de 0,025 eV. Desta forma, os respectivos valores de seção de choque são identificados para cada linha, em 0,025 eV, e são 242,06 barns e 3.848,58 barns. Ao se dividir o primeiro valor pelo segundo, tem-se a proporção relativa entre as seções de choque, e obtém-se 0,06289593 que corresponde, em percentual, aproximadamente, a 6,3% para a reação com seção de choque mais baixa, a de 242,06 barns. Para a seção de choque maior, de 3.848,58 barns, o percentual é de 93,7%, possuindo, assim, maior probabilidade de esses produtos ou fragmentos da reação surgirem para a energia dos nêutrons de 0,025 eV. Uma atualização dos valores de seção de choque do B-10, para baixas energias, foi publicada por Brown et al. (2018) [8, p. 11].

5.2. O conteúdo energético da reação

A análise da cinética da reação nuclear fornece informações do conteúdo energético envolvido, por intermédio do valor $-Q$ da reação [9], que é dado por

$$\begin{aligned} Q &= \Delta Mc^2 \\ &= (\text{Massa dos reagentes} \\ &\quad - \text{Massa dos produtos})c^2, \\ &= [(M_n + M_{\text{B-10}}) - (M_\alpha + M_{\text{Li-7}})]c^2, \end{aligned} \quad (1)$$

em que os valores das massas do B-10, alfa e Li-7 são extraídos do site da IAEA, no item *Live Chart of Nuclides*, ou pelo aplicativo para *smartphone*, o *Isotope Browser*, disponível gratuitamente para as plataformas da Apple

	ENDF-6	Interpreted	Plot	Reaction	Energy	Lab	Date	Author
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	ENDF/B-VIII.0	E=20MeV	Lab=LANL	Date=20240202	G.M.Hale
2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	ENDF/B-VII.1	E=20MeV	Lab=LANL	Date=20111222	G.M.Hale, P.G.Young
3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	ENDF/B-VII.0	E=20MeV	Lab=LANL	Date=20111222	G.M.Hale, P.G.Young
4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	JEFF-3.3	E=20MeV	Lab=LANL	Date=20171231	G.M.Hale, P.G.Young

Figura 2: Representação parcial da saída dos quatro primeiros resultados de seção de choque, da reação $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, em barns, versus Energia do nêutron incidente, em MeV. Fonte: gráfico gerado com dados do site da IAEA/ENDF [5].

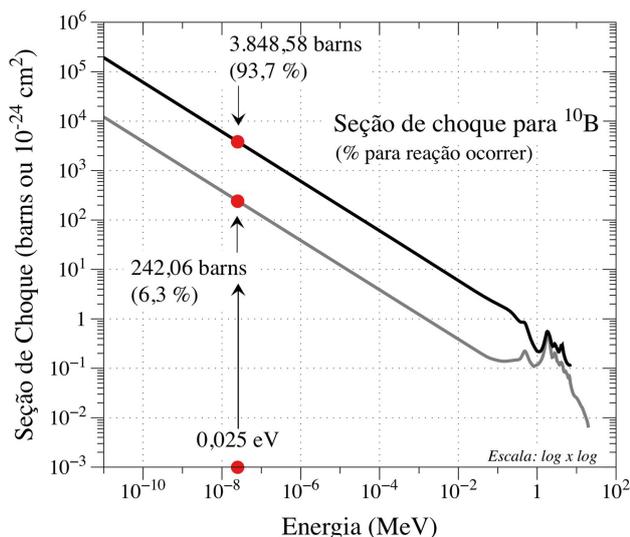


Figura 3: Representação gráfica da seção de choque, para produção de alfa, da reação $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, em barns, versus Energia do nêutron incidente, em MeV. Fonte: gráfico gerado com dados do site da IAEA/ENDF [5].

(iOS) e Android [10]. Para acessar os dados, siga o roteiro seguinte, no qual é dado preferência pelo uso do aplicativo para *smartphone*.

Passo 1 - Se acessar pelo site www-nds.iaea.org, clique no ícone *LiveChart of Nuclides*. No celular, acesse o aplicativo *Isotope Browser*, cuja cópia da tela inicial está na Figura 4.



Figura 4: Tela inicial do aplicativo da IAEA *Isotope Browser*, para iPhone. Fonte: cópia da tela do celular dos autores.

Passo 2 - no campo em branco, preencha para o boro-10: B-10 e tecle no **Go**. Na tela seguinte, clique no $^{10}\text{B}_5$, e uma nova tela aparecerá, semelhante a da Figura 5, e entre os dados está a massa (*Mass*), em *Atomic Mass Unit (AMU)*, que é o valor da massa atômica em unidade de massa atômica (u). Para o B-10, o aplicativo retorna 10.012 937 (16), em que os dois últimos números, entre parênteses, representam o erro de medida e o qual não será usado. Então, para o cálculo, será utilizado 10,012 937 u. É importante lembrar que o separador ou marcador decimal, na saída dos dados, é o *ponto*, e a represen-

tação no Brasil é a *vírgula*, conforme a 10^a resolução da 22^a Conferência Geral de Pesos e Medidas em 2003 [11]. Na prática, o ponto decimal é usado nos países de língua inglesa e na maior parte da Ásia, e a vírgula decimal, nos da América não inglesa e na maioria dos países europeus continentais. Por fim, repita este passo para o He-4 e Li-7.

É importante salientar que os dados obtidos no site podem vir escritos de forma diferente, como exemplo, a massa descrita em unidades de μu , que é o valor da massa atômica em micro unidade de massa atômica, ou $10^{-6}u$. E também o valor da massa pode ser apresentado com mais algarismos significativos, que, para o B-10, terá 10,012 936 862 u. Para os cálculos deste trabalho, serão utilizadas unidades somente em u, obtidas pelo aplicativo para celular.

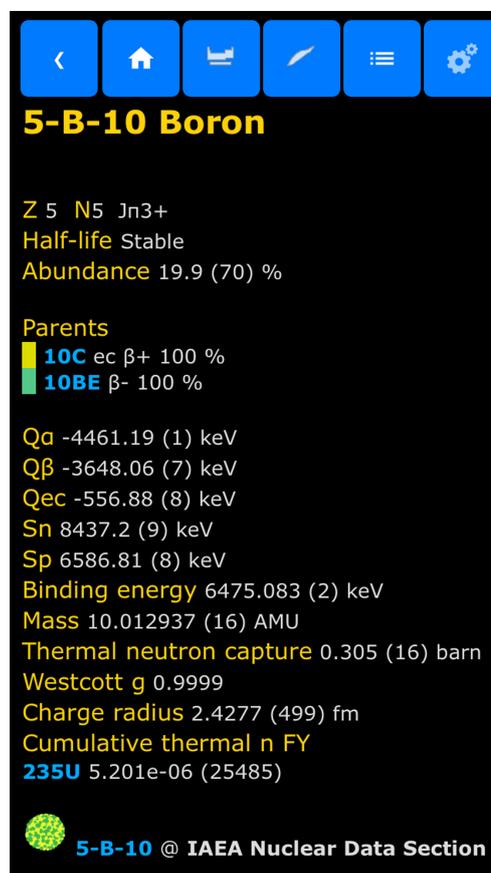


Figura 5: Tela do *Isotope Browser* com o retorno dos dados do B-10, no iPhone. Fonte: cópia da tela do celular dos autores.

O valor da massa do nêutron foi retirado do artigo publicado por Mohr, Taylor e Newell (2008) [12], e recentemente atualizado por Mohr et al. (2018) [13]. É importante ressaltar que neste artigo também constam diferentes e importantes constantes de uso na Física. Assim, os valores atualmente aceitos para as partículas em estudo, em unidade de massa atômica (u), são, respecti-

vamente:

$$\begin{aligned} M_{B-10} &= 10,012\,937\text{ u}, \\ M_{\alpha} &= 4,002\,603\text{ u}, \\ M_{Li-7} &= 7,016\,003\text{ u}, \\ M_n &= 1,008\,664\,915\,82\text{ u}, \end{aligned}$$

e considerando que $uc^2 = 931,494\text{ MeV}$ [12], temos

$$\begin{aligned} Q &= (11,021\,601 - 11,018\,606)uc^2 \\ &= 0,002\,995 \times 931,494\,028 \\ &\approx 2,79\text{ MeV}, \end{aligned} \quad (2)$$

que corresponde a uma reação espontânea ou exoenergética, com liberação de 2,79 MeV entre os produtos.

O rateio dessa energia entre as partículas α e Li-7 está baseado no mecanismo do decaimento alfa e, assim, tem-se que a energia cinética, no sistema de laboratório, da partícula alfa (T_{α}) é dada por

$$\begin{aligned} T_{\alpha} &= \left(\frac{M_{Li-7}}{M_{\alpha} + M_{Li-7}} \right) Q \\ &\approx 0,636\,741 \times 2,79\text{ MeV} \\ &\approx 1,78\text{ MeV}, \end{aligned} \quad (3)$$

e a energia cinética de recuo da partícula filha Li-7, no estado fundamental, é

$$T_{Li-7} = Q - T_{\alpha} \approx 1,01\text{ MeV}. \quad (4)$$

Esse conjunto energético de partículas ocorre em 6,3% das reações nucleares $^{10}_5B(n, \alpha)^7_3Li$. Nos outros 93,7% dos casos, o Li-7 recua, mas, antes de atingir o estado fundamental, ocupa um estado excitado (ou isomérico) e, na sequência, emite uma radiação gama, que será detalhada na seção 5.4. Neste caso, o balanço energético [14, p. 315] fornece

$$Q - E_{\gamma} = T_{\alpha} + T_{Li-7} = T_{\alpha} \left(\frac{M_{\alpha} + M_{Li-7}}{M_{Li-7}} \right), \quad (5)$$

em que E_{γ} é a energia da radiação gama, a qual corresponde à energia do estado excitado da Li-7, cujo valor é $E_{\gamma} = 0,48\text{ MeV}$. Desta forma, tem-se para energia cinética da partícula alfa

$$\begin{aligned} T_{\alpha} &= \left(\frac{M_{Li-7}}{M_{\alpha} + M_{Li-7}} \right) (Q - E_{\gamma}) \\ &\approx 0,636\,741 \times (2,79 - 0,48)\text{ MeV} \\ &\approx 1,47\text{ MeV}, \end{aligned} \quad (6)$$

e a energia cinética de recuo do Li-7, no estado excitado, é

$$T_{Li-7} = (Q - E_{\gamma}) - T_{\alpha} \approx 0,84\text{ MeV}. \quad (7)$$

5.3. O alcance das partículas nas células teciduais

Outro ponto de interesse é o alcance estimado das partículas, α e Li-7, no interior das células. O alcance das

partículas alfa, no interior do núcleo das células alvo [15], pode ser aproximado por

$$R_{tec} = R_{ar} \left(\frac{\rho_{ar}}{\rho_{tec}} \right), \quad (8)$$

em que no ar é

$$R_{ar} (\text{cm}) = \begin{cases} 0,56 \times E_{\alpha} (\text{MeV}), & \text{para } E_{\alpha} < 4 \text{ MeV} \\ 1,24 \times E_{\alpha} - 2,62 (\text{MeV}), & \text{para } 4 \leq E_{\alpha} \leq 8 \text{ MeV}, \end{cases} \quad (9)$$

para uma partícula alfa com energia E_{α} . O valor da densidade do ar é $\rho_{ar} \approx 1,229 \times 10^{-3}\text{ g/cm}^3$ [15], e a do núcleo celular $\rho_{tec} \approx 1,373\text{ g/cm}^3$ [16]. A partícula alfa com a energia $E_{\alpha} = 1,78\text{ MeV}$ terá um alcance no ar, pela equação (9), igual a 0,9968 cm, e, desta forma, o alcance desta partícula no núcleo celular será, pela equação (8),

$$\begin{aligned} R_{\alpha tec} &\approx 0,9968 \times \left(\frac{1,229 \times 10^{-3}}{1,373} \right) \text{ cm} \\ &\approx 8,9 \times 10^{-4} \text{ cm} \\ R_{\alpha tec} &\approx 8,9 \mu\text{m}, \end{aligned} \quad (10)$$

que é um valor aceitável para o alcance da partícula alfa no interior da célula. Esta partícula possui uma alta transferência linear de energia (LET³), que, neste caso, será da ordem de 190,4 keV/ μm .

Outra forma de obter o alcance pode ser pela LET. Para a Li-7, no estado fundamental, a LET é aproximadamente 175,0 keV/ μm [4, 17]. Assim, o alcance da Li-7 no interior das células, com energia de 1,01 MeV, será

$$R_{Li7 tec} \approx 5,8 \mu\text{m}, \quad (11)$$

o qual está em acordo com o alcance esperado, entre 4 e 10 μm , e é menor que o alcance da partícula alfa.

5.4. A radiação gama da reação nuclear

A partícula Li-7, em 6,3% dos casos, ao recuar na reação nuclear de fissão, ocupa diretamente o estado fundamental, e, nos outros 93,7% dos casos, ocupa um estado excitado ou isomérico. Ao se desexcitar, emite um fóton de alta energia, na forma de radiação gama [9]. O valor da energia desse fóton também pode ser obtido nos arquivos de dados nucleares da IAEA, especificamente na Tabela de Nuclídeos. Neste sentido, repete-se o Passo 2, da seção 5.2, para dados da Li-7. O resultado será uma tabela, como anteriormente, mas, observando melhor o resultado, identifica-se que há diferentes abas para explorar, conforme mostra a Figura 6.

Clicando na aba *Gammas*, tem-se como resultado outra tabela, representada parcialmente na Figura 7. E,

³LET significa, do inglês, *Linear Energy Transfer*.

mesmo sendo um nuclídeo estável, em 92,41% dos eventos, ele pode apresentar um estado excitado que, ao decair, emite uma radiação gama, conforme esquema da reação nuclear (Figura 1), e a energia inicial dessa gama é de 477,612 3 keV, que corresponde a aproximadamente 0,48 MeV [18], com um tempo de decaimento de 73 fs ou 73×10^{-15} s.

6. Considerações finais

Este trabalho propôs usar o banco de dados nucleares da IAEA, como uma ferramenta científica de pesquisa, no auxílio para o ensino de conteúdos de Física Nuclear, tendo a base física da BNCT como elemento motivador. As questões norteadoras, que foram importantes para a execução das atividades propostas, referiram-se às probabilidades dos dois possíveis produtos da fissão nuclear da reação $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, da energia da reação e a distribuição entre as partículas dos produtos, bem como o alcance nas células teciduais e a radiação gama emitida. Elas foram todas respondidas e discutidas, considerando em especial os valores da extração dos dados nucleares de interesse – as seções de choque, massas dos nuclídeos e análise de decaimento gama.

O banco de dados nucleares da IAEA pode ser utilizado em outras atividades de ensino da Física Nuclear, as quais serão apresentadas em outros artigos. Como

exemplo, tem-se, a análise do decaimento radioativo, o estudo da energia de ligação (BE) e energia de ligação por núcleon (BE/A), que também auxilia na compreensão da energia liberada pelas reações de fissão e fusão nuclear. É possível também comparar os resultados teóricos fornecidos pelos modelos nucleares com os da base de dados nucleares, e, como sugestão interessante, o estudo dos momentos de dipolo e da relação spin-paridade dos núcleos atômicos previstos pelo Modelo de Camadas [9, 19]. Enfim, espera-se que este trabalho tenha contribuído para que os professores e estudantes do Ensino Médio e Superior façam uso desse banco de dados nucleares, com o intuito de ajudar a dar mais significado aos conceitos, uma vez que, em alguns momentos, não raros, a Física Nuclear pareça ser um *terreno epistemológico árido* para sua compreensão, talvez, por se estar lidando com um “mundo” cujas dimensões são da ordem de 10^{-15} m. E, para finalizar, é importante ressaltar que estes dados nucleares são mantidos, atualizados e validados por equipes de pesquisadores experientes, de diferentes instituições internacionais, e disponibilizados gratuitamente a todos os cidadãos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -

Nuclide	Energy [keV]	J ^π	T _{1/2} Abund. [mole fract.]	T _{1/2} [s]	Decay Modes BR [%]	Isospin	μ [μN]	Q [barn]	R [fm]
⁷ ₃ Li ₄	0.0	3/2-	STABLE 92.41 % 4			1/2	+3.2564268 17	-0.0406 8	2.4440 420

Figura 6: Representação de parte da saída dos resultados, da Tabela de Nuclídeos, com dados de isômeros para o Li-7, no estado fundamental. Fonte: recorte extraído do site da IAEA [6].

Nuclide	Initial Level		Final Level		E _γ [keV]	I _γ (rel) [%]	Mult.	δ	α _T	B(EL) [W.u.]	B(ML) [W.u.]	Additional data
	E _x [keV]	J ^π _{initial}	E _x [keV]	J ^π _{final}								
⁷ ₃ Li ₄	477.612 3	1/2-	0.0	3/2-	477.595		M1(+E2)			19.7 12	2.75 14	Width 6.30 x 10 ⁻³
⁷ ₃ Li ₄	4630 9	7/2-	0.0	3/2-	4628		E2			4.3		Width x 10 ^Q

Figura 7: Representação de parte da saída dos resultados para o Li-7, na Tabela de Nuclídeos, com dados do decaimento gama. Fonte: recorte extraído do site da IAEA [6].

Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecemos o apoio da Universidade Franciscana (Santa Maria/RS - www.ufn.edu.br), pelas horas de pesquisa que permitiram a elaboração deste trabalho, no Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática (PPGECIMAT). Agradecemos também à colega Virginia Cielo Rech pela leitura crítica e sugestões incorporadas ao texto.

Referências

- [1] <https://www-nds.iaea.org/>.
- [2] K. Nedunchezian, N. Aswath, M. Thiruppathy e S. Thirugnanamurthy, *Journal of Clinical and Diagnostic Research* **10**, 12 (2016).
- [3] J.M. Floberg, *The physics of boron neutron capture therapy: an emerging and innovative treatment for glioblastoma and melanoma* (2005), disponível em <https://pdfs.semanticscholar.org/039f/b6ebc080294929987260cb61c12c3f693c00.pdf>.
- [4] R.L. Moss, *Applied Radiation and Isotopes* **88**, 2 (2014).
- [5] Evaluated Nuclear Data File, disponível em <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>.
- [6] Live Chart of Nuclides, disponível em <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.
- [7] National Nuclear Data Center, disponível em <https://www.nndc.bnl.gov>.
- [8] D.A. Brown, M.B. Chadwick, R. Capote, A.C. Kahler, A. Trkov, M.W. Herman, A.A. Sonzogni, Y. Danon, A.D. Carlson, M. Dunn et al., *Nuclear Data Sheets* **148**, 1 (2018).
- [9] A. Das e T. Ferbel, *Introduction to nuclear and particle physics* (John Wiley & Sons, New York, 1994).
- [10] Aplicativo para smartphone, disponível em <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.
- [11] Resolution 10 of the 22nd cgpm: Symbol for the decimal marker, disponível em <https://www1.bipm.org/jsp/en/ViewCGPMResolution.jsp?CGPM=22&RES=10>.
- [12] P.J. Mohr, B.N. Taylor e D.B. Newell, *Reviews of Modern Physics* **80**, 2 (2018).
- [13] P.J. Mohr, D.B. Newell, B.N. Taylor e E. Tiesinga, *Metrologia* **55**, 1 (2018).
- [14] J.M. Blatt e V.F. Weisskopf, *Theoretical nuclear physics* (Springer-Verlag, New York, 1979).
- [15] K.E. Holbert, *Charged particle ionization and range* (Arizona State University, Arizona, 2012).
- [16] L.S. Hnilica, *Chromosomal Nonhistone Protein: Volume IV: Structural Associations* (CRC Press, Boca Raton, 2018).
- [17] T.P.R. de Campos, *Revista Brasileira de Cancerologia* **46**, 3 (2000).
- [18] D.R. Tilley, C.M. Cheves, J.L. Godwina, G.M. Hale, H.M. Hofmann, J.H. Kelley, C.G. Sheua e H.R. Weller, *Nuclear Physics A* **708**, 1 (2002).
- [19] K.C. Chung, *Introdução à Física Nuclear* (EdUERJ, Rio de Janeiro, 2001).