

SISTEMATIZAÇÃO DOS NÚCLEOS ESPELHOS LEVES

J. L. Silva e M. Assunção

Universidade Federal de São Paulo/ Departamento de Ciências Exatas e da Terra, Rua Artur Ridell, 275, Jd Eldorado, Diadema, CEP 09972-270, julychemistry@gmail.com

Resumo- Este projeto consiste na sistematização das propriedades dos núcleos espelhos de interesse astrofísico. Este mapeamento refere-se às propriedades nucleares (estados e larguras nucleares, identificação de ressonâncias) e parâmetros astrofísicos (fator S astrofísico, taxa de reação). O objetivo geral é estudar os núcleos de interesse astrofísico a partir de seu núcleo espelho. O estudo destes núcleos espelhos pode fornecer informações relevantes para justificar a proposta de um experimento empregando feixes estáveis ou radioativos. A literatura abordando os aspectos dos núcleos espelhos (elementos leves) será a principal aliada deste estudo. Após o mapeamento destes núcleos espelhos, a idéia do projeto é determinar as condições necessárias para a realização da medida utilizando sistemas conhecidos.

Palavras-chave: Núcleos Espelhos, Feixes Radioativos, Fator S Astrofísico.

Área do Conhecimento: Física

Introdução

As reações nucleares desempenham um papel importante na formação e evolução do Universo e de todos os objetos astrofísicos (ROLFS et al., 1988; CLAYTON et al., 1983). A criação e abundância dos elementos químicos são explicadas a partir dos mecanismos envolvidos nestas reações. Nas medidas de reações nucleares com interesse astrofísico, os esforços estão concentrados na determinação das seções de choque, medidas das larguras dos níveis, identificação de ressonâncias. Estes parâmetros são relevantes na extrapolação dos fatores S astrofísicos e nos cálculos da taxa de reação.

Os núcleos espelhos contêm um número de prótons (Z) e um número de nêutrons (N) que são mutuamente invertidos. Este é o caso do ${}^7\text{Li}$ (Z=4 e N=3) e ${}^7\text{Be}$ (Z=3 e N=4) e também do ${}^{11}\text{B}$ (Z=5 e N=6) e ${}^{11}\text{C}$ (Z=6 e N=5). Os esquemas de níveis destes mostram que a estrutura nuclear destes núcleos é bastante semelhante. A ausência de algum estado ou ressonância em um núcleo pode fornecer indicações da existência do nível ou ressonância no esquema de níveis quando comparado ao seu núcleo espelho. Outras características podem ser observadas para os núcleos espelhos do ponto de vista da física e astrofísica nuclear. O estudo dos núcleos espelhos dentre muitas aplicações tem mostrado que a força nuclear associada aos prótons e nêutrons no núcleo permanece quase a mesma quando um nêutron é substituído por um próton.

Recentemente, os núcleos espelhos foram empregados para verificar a relação entre seus prótons e nêutrons no cálculo dos coeficientes de normalização assintótico (TIMOFEYUK, et al. 2003). Esse método é empregado nos estudos de reações nucleares periféricas na previsão de seções de choque em energias relevantes em astrofísica. Neste sentido, os núcleos espelhos podem fornecer os parâmetros nucleares associados às reações importantes no entendimento da formação e evolução do Universo.

O objetivo deste trabalho é mapear os núcleos espelhos leves ${}^{11}\text{B}$ e ${}^{11}\text{C}$ na tentativa de identificar e evidenciar os aspectos nucleares destes núcleos para justificar a sua medida e técnica nuclear a ser empregada. Deste modo, trata-se de um trabalho de sistematização de informações que requer uma intensa pesquisa bibliográfica e a agregação de conhecimento nas áreas de Física nuclear e Astrofísica bastante considerável. Como parte do trabalho será realizada alguns cálculos para a viabilidade da medida experimental, seja ela de caráter astrofísico ou de estrutura nuclear. O estudo destes núcleos é importante na investigação da formação dos elementos leves no Universo primordial e também por apresentarem muitas informações sobre seus esquemas de níveis.

Metodologia

O desenvolvimento desse projeto consta de três etapas. A primeira refere-se à seleção dos núcleos espelhos de interesse astrofísico. O critério de seleção será norteado pelos dados disponíveis na literatura. A segunda etapa é a comparação das propriedades (identificação do halo, energia dos níveis nucleares) e parâmetros nucleares (spins, multipolaridade, paridade, largura de nível, meia-vida do nível) que possuem relevância no entendimento da estrutura nuclear destes núcleos. Outro aspecto refere-se à identificação de prováveis ressonâncias e suas implicações em ambientes astrofísicos, por exemplo, caminho mais favorável para a reação, permanência de uma estrela na seqüência principal. A importância da descoberta de ressonâncias já foi atestada no caso dos núcleos de carbono e oxigênio. A terceira etapa refere-se à verificação da viabilidade da medida da reação nuclear envolvendo o núcleo espelho estudado. Essa viabilidade empregará o sistema RIBRAS instalado no Acelerador Pelletron/Linac do Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Nos cálculos serão utilizados programas computacionais que podem ser executados na plataforma Linux. Algumas vezes, será preciso criar algumas rotinas para a execução dos cálculos na descrição dos sistemas estudados. Em geral, os programas utilizam rotinas pré-estabelecidas nos pacotes do Cernlib (gratuitos para o sistema operacional Linux) e são de domínio público.

Resultados

Para a melhor compreensão da metodologia deste trabalho foram observados os núcleos ${}^7\text{Be}$ - ${}^7\text{Li}$ e ${}^{11}\text{B}$ - ${}^{11}\text{C}$. Esses núcleos são conhecidos e apresentam interesse astrofísico no Universo primordial. O feixe de ${}^7\text{Be}$ pode ser produzido no RIBRAS (LICHTENTHÄLER, et al., 2003) A Figura 1 mostra os esquemas de níveis usados para comparar os núcleos ${}^7\text{Be}$ e ${}^7\text{Li}$. Nestes esquemas de níveis foram inseridas pares de janelas para mostrar as regiões que merecem uma atenção especial no ponto de vista experimental.

A Tabela 1 mostra os valores da energia, spin de cada nível para o ${}^7\text{Be}$ e ${}^7\text{Li}$ Na Figura 2 são apresentados os esquemas de níveis que estão sendo usados para comparar ${}^{11}\text{B}$ e ${}^{11}\text{C}$ e a Tabela 2 contém as informações destes núcleos. Os valores foram extraídos da "Triangle Universities Nuclear Laboratory".

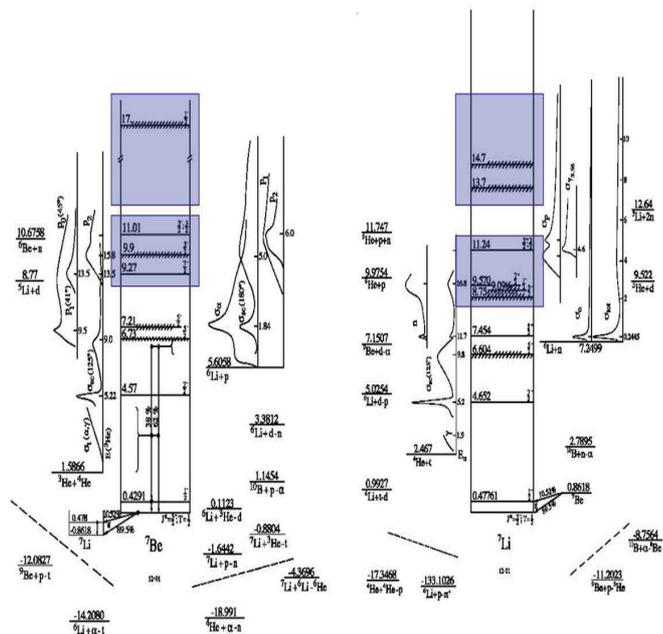


Figura 1: Esquema de níveis para os núcleos espelhos ${}^7\text{Be}$ e ${}^7\text{Li}$

Tabela 1: Características nucleares dos núcleos espelhos ${}^7\text{Be}$ e ${}^7\text{Li}$.

${}^7\text{Be}$				${}^7\text{Li}$			
E_x (MeV ± keV)	J^π, T	τ	Γ_{em}	E_x (MeV ± keV)	J^π, T	τ	Γ_{em}
g.s.	$3^- \frac{1}{2}$	$\tau_n = 192 \pm 25 \text{ fsec}$		g.s.	$3^- \frac{1}{2}$		
$0,42908 \pm 0,10$	$1^- \frac{1}{2}$	$\tau_{1/2} = 53,29 \pm 0,07 \text{ d}$		$0,477612 \pm 0,003$	$1^- \frac{1}{2}$	$\tau_n = 105 \pm 5 \text{ fsec}$	
$4,57 \pm 50$	$7^- \frac{1}{2}$		$175 \pm 7 \text{ keV}$	$4,630 \pm 9$	$7^- \frac{1}{2}$		$93 \pm 8 \text{ keV}$
$6,73 \pm 100$	$5^- \frac{1}{2}$		$1,2 \text{ MeV}$	$6,68 \pm 50$	$5^- \frac{1}{2}$		875_{-100}^{+100}
$7,21 \pm 60$	$5^- \frac{1}{2}$		$\leq 0,5 \text{ MeV}$	$7,4597 \pm 1,2$	$5^- \frac{1}{2}$		89 ± 7
$9,27 \pm 100$	$7^- \frac{1}{2}$			$9,67 \pm 100$	$7^- \frac{1}{2}$		≈ 400
9,9	$3^- \frac{1}{2}$		$\approx 1,8 \text{ MeV}$	9,85	$3^- \frac{1}{2}$		≈ 1200
$11,01 \pm 30$	$3^- \frac{1}{2}$	320 ± 30		$11,24 \pm 30$	$3^- \frac{1}{2}$	260 ± 35	
17	$1^- \frac{1}{2}$		$\approx 6,5 \text{ MeV}$		$1^- \frac{1}{2}$		

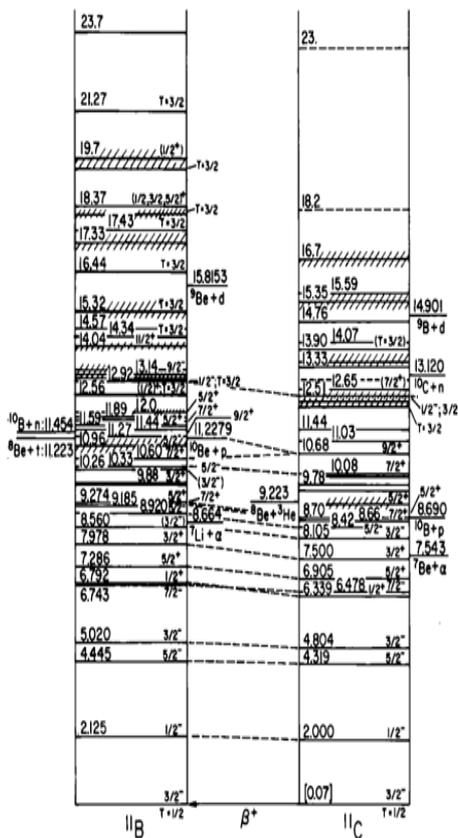


Figura 2: Esquema de níveis para os núcleos ¹¹B e ¹¹C

Discussão

Os resultados observados para o ⁷Be e ⁷Li, e ¹¹B e ¹¹C considera apenas os aspectos nucleares destes núcleos espelhos. A primeira observação a ser considerada é que o ⁷Li é um núcleo estável e bem conhecido na literatura. As energias dos níveis destes núcleos são próximas e possuem os mesmos spins. O nível de 17MeV foi observado no núcleo de ⁷Be, porém será necessário uma medida de estrutura nuclear para a sua confirmação, uma vez que não está sendo observado no núcleo de ⁷Li. A meia vida dos níveis de ⁷Be a partir da energia de 4,57MeV não foram ainda obtidas. A largura do nível de 9,27MeV é outro parâmetro desconhecido. O nível de 9,9MeV foi observado em ambos os núcleos, porém a sua incerteza é desconhecida. Este nível pode ser medido em termos da sua meia-vida e da sua largura de nível. Com relação aos níveis de energia do ¹¹B e ¹¹C, pode-se observar que os esquemas apresentam um número elevado de

níveis bastante estreitos. A fase de análise é preliminar. As reações envolvendo o ⁷Be, ⁷Li, ¹¹B e ¹¹C estão presentes nos estágios evolutivos das estrelas.

Tabela 2: Características e propriedades dos núcleos espelhos ¹¹B e ¹¹C.

E_x	J^π, T (MeV ± keV)	τ_m (fs) or $\Gamma_{c.m.}$ (keV)	E_x in ¹¹ C (MeV ± keV)	J^π, T	τ or $\Gamma_{c.m.}$
0	$\frac{3}{2}^+, \frac{1}{2}$	stable	0	$\frac{3}{2}^+, \frac{1}{2}$	$\tau_{1/2} = 20.39 \pm 0.02$ min
2.124693 ± 0.027	$\frac{1}{2}^-$	$\tau_m = 5.5 \pm 0.4$	2.0000 ± 0.5	$\frac{1}{2}^-$	$\tau_m = 10.3 \pm 0.7$ fs
4.44489 ± 0.50	$\frac{5}{2}^-$	1.18 ± 0.04	4.3188 ± 1.2	$\frac{5}{2}^-$	< 12 fs
5.02031 ± 0.30	$\frac{3}{2}^-$	0.34 ± 0.01	4.8042 ± 1.2	$\frac{3}{2}^-$	< 11 fs
6.7429 ± 1.8	$\frac{7}{2}^-$	22 ± 5	6.3392 ± 1.4	$\frac{7}{2}^-$	< 110 fs
6.79180 ± 0.30	$\frac{1}{2}^+$	1.7 ± 0.2	6.4782 ± 1.3	$\frac{7}{2}^-$	< 8 fs
7.28551 ± 0.43	$\frac{3}{2}^+$	0.57 ± 0.04	6.9048 ± 1.4	$\frac{5}{2}^+$	< 69 fs
7.97784 ± 0.42	$\frac{3}{2}^+$	0.57 ± 0.06	7.4997 ± 1.5	$\frac{3}{2}^+$	< 91 fs
8.5603 ± 1.8	$(\frac{3}{2}^-)$	0.70 ± 0.07	8.1045 ± 1.7	$\frac{3}{2}^-$	0.06 ± 0.04 fs ^b
8.9202 ± 2.0	$\frac{5}{2}^-$	$\Gamma = 4.37 \pm 0.02$ eV	8.420 ± 2	$\frac{5}{2}^-$	0.043 ± 0.011 fs ^b
9.1850 ± 2.0	$\frac{7}{2}^+$	1.9 ^{+1.5} _{-1.1} eV	8.655 ± 8	$\frac{7}{2}^+$	$\Gamma \leq 5$ keV
9.2744 ± 2	$\frac{5}{2}^+$	4	8.699 ± 10	$\frac{5}{2}^+$	15 ± 1
9.82 ± 25	$(\frac{1}{2}^+)$		9.20 ± 50	$\frac{5}{2}^+$	500 ± 100
9.876 ± 8	$\frac{3}{2}^+$	110 ± 15	9.65 ± 50	$(\frac{3}{2}^-)$	210 ± 50
10.26 ± 15	$\frac{3}{2}^+$	150 ± 25	9.78 ± 50	$(\frac{3}{2}^-)$	240 ± 60
10.33 ± 11	$\frac{3}{2}^+$	110 ± 20	9.97 ± 50	$(\frac{7}{2}^-)$	120 ± 20
10.597 ± 9	$\frac{3}{2}^+$	100 ± 20	10.083 ± 5	$\frac{7}{2}^+$	≈ 230
10.96 ± 50	$\frac{3}{2}^+$	4500	10.679 ± 5	$\frac{3}{2}^+$	200 ± 30
11.265 ± 17	$\frac{3}{2}^+$	110 ± 20	11.03 ± 30	$T = \frac{1}{2}$	300 ± 60
11.444 ± 19	$\frac{3}{2}^+$	103 ± 20	11.44 ± 10		360
11.600 ± 30	$\frac{3}{2}^+$	170 ± 30	12.16 ± 40	$T = \frac{3}{2}^c$	270 ± 50
11.886 ± 17	$\frac{3}{2}^+$	200 ± 20	12.4	$\pi = -$	1 – 2 MeV
12.0 ± 200	$\frac{3}{2}^+$	≈ 1000	12.51 ± 30	$\frac{1}{2}^-, \frac{3}{2}$	490 ± 40 keV
12.557 ± 16	$\frac{1}{2}^+, (\frac{3}{2}^+); \frac{3}{2}^c$	210 ± 20	12.65 ± 20	$(\frac{7}{2}^+)$	360
12.916 ± 12	$\frac{1}{2}^-, \frac{3}{2}^c$	200 ± 25	(13.01)		
13.137 ± 40	$\frac{9}{2}^-$	426 ± 40	13.33 ± 60		270 ± 80
13.16	$\frac{5}{2}^-, \frac{7}{2}^+$	430	13.4		1100 ± 100
14.04 ± 100	$\frac{11}{2}^+$	500 ± 200	13.90 ± 20	$(T = \frac{3}{2})$	200 ± 100
14.34 ± 20	$\frac{5}{2}^-, \frac{3}{2}^c$	254 ± 18	14.07 ± 20		135 ± 50
14.565 ± 15		≤ 30	14.76 ± 20		≈ 450
15.29 ± 25	$(\frac{3}{2}^-, \frac{5}{2}^+); (\frac{3}{2}^-)$	250 ± 50	15.35 ± 50	$\pi = -$	broad
16.437 ± 20	$T = \frac{1}{2}$	≤ 30	15.59 ± 50		≈ 450
17.33		≈ 1000	16.7	$\pi = -$	800 ± 100
17.43 ± 50	$T = \frac{3}{2}$	100 ± 30			
18.0	$T = \frac{3}{2}$	870 ± 100			
18.37 ± 50	$(\frac{1}{2}^-, \frac{3}{2}^+)$	260 ± 80	(18.2)		
19.13 ± 30	$(\pi = +); \frac{3}{2}^c$	115 ± 25			
19.7	$(\frac{1}{2}^+)$	broad			
21.27 ± 50	$T = \frac{3}{2}$	300 ± 30			
23.7	$(\frac{1}{2}^-, \frac{3}{2}^+)$		(23.0)		
26.5		broad	(28.0)		

Conclusão

A motivação desse trabalho é a identificação de problemas astrofísicos e esclarecimentos sobre a estrutura nuclear que poderá contribuir para o cenário astrofísico. Essas contribuições poderão justificar a sua proposta de medida bem como pode elucidar alguns níveis de energias na sua estrutura. A observação dos esquemas de níveis dos núcleos espelhos fornece um caminho para investigação de alguns parâmetros nucleares (energias dos níveis, spins, paridade, largura do

nível, ressonâncias). No caso dos núcleos ${}^7\text{Be}$ e ${}^7\text{Li}$ foi observado que a medida de espectroscopia nuclear pode contribuir para esclarecer melhor o núcleo de ${}^7\text{Be}$. As reações envolvendo o ${}^7\text{Be}$ possui implicações no problema de neutrinos solares. Quanto aos núcleos ${}^{11}\text{B}$ e ${}^{11}\text{C}$ apresentam esquemas de níveis bastante ricos do ponto de vista nuclear e astrofísicos.

Referências

- CLAYTON, D. D., "Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis", The University of Chicago Press, Chicago - USA (1983).
- LICHTENTHÄLER, R., et al. Nucl. Instr. And Method in Phys. Reaserach, **A505**, 1-2, 612-615 (2003) e Braz. Jou. Of Phys., **33**, 2, 294-296 (2003).
- ROLFS, C. E., RODNEY W. S., "Cauldrons in the Cosmos", The University of Chicago Press, Chicago - USA (1988).
- TIMOFEYUK, et al., Phys. Rev. Letters, 91, 23, 2003.
- Disponível : <http://www.tunl.duke.edu/NuclData/>