

Título em Português: Estudo do comportamento ressonante do fator S-astrofísico para a reação $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$

Título em Inglês: investigation of the resonant behavior of the astrophysical S-factor for the reaction $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$

Autor: Gabriel Pistore Cessel

Instituição: Universidade de São Paulo

Unidade: Instituto de Física de São Carlos

Orientador: Leandro Romero Gasques

Área de Pesquisa / SubÁrea: Física Nuclear

Agência Financiadora: FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

Estudo do comportamento ressonante do fator S-astrofísico para a reação

$$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$$

Gabriel Pistore Cessel¹, Leandro Romero Gasques², Luiz Carlos Chamon²

¹ Instituto de Física de São Carlos (IFSC), Universidade de São Paulo - Brasil

² Instituto de Física de São Paulo (IFUSP), Universidade de São Paulo - Brasil

cessel@usp.br

Objectivos

O principal objetivo do presente trabalho é investigar a reação $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ dentro do contexto de canais acoplados. Essa reação tem um papel crucial na determinação da razão entre carbono e oxigênio no interior de estrelas massivas. Tipicamente, as seções de choque na região de energia relevante para os processos astrofísicos são muito pequenas. Além disso, as seções de choque apresentam um comportamento ressonante, o que dificulta sua determinação tanto do ponto vista experimental, quanto teórico.

Materiais e Métodos

Apesar dos diversos esforços experimentais nas últimas quatro décadas, ainda existem enormes incertezas sobre as seções de choque de captura para a reação $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ em baixas energias. Em torno do pico de Gamow (~ 300 KeV), as seções de choque esperadas estão em torno de 10^{-8} nbarn, o que torna muito difícil medi-las diretamente. Faz-se necessário, então, realizar extrapolações das seções de choque para energias de interesse astrofísico. Frequentemente, seções de choque de fusão são representadas através do fator S-astrofísico, expresso por

$$S(E) = \sigma_f(E) E e^{2\pi\eta}, \quad (1)$$

sendo $\eta = (Z_1 Z_2 e^2 / h) \sqrt{\mu / (2E)}$ o parâmetro de Sommerfeld, μ a massa reduzida, Z o número atômico e E a energia do centro de massa.

No presente trabalho, propomos calcular as seções de choque da reação $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ utilizando o formalismo de cálculo de canais acoplados (CC). Em 2014, nosso grupo de pesquisa publicou resultados acerca dessa reação. Nesse trabalho, os cálculos de canais acoplados foram realizados considerando apenas o primeiro estado excitado do $^{12}\text{C}(2_1^+; 4.44\text{MeV})$ [1]. Um estudo detalhado do comportamento das fases associadas ao processo de espalhamento elástico

(phase-shifts) foi realizado para diferentes valores de momento angular. No presente projeto, propomos estender essa análise, considerando mais estados excitados do carbono nos cálculos de canais acoplados.

Em um primeiro estágio, acoplamos apenas 1 estado excitado ao estado fundamental do ^{12}C . Para o cálculo das seções de choque, utilizamos o SPP2 (São Paulo Potential 2) no contexto de canais acoplados (CC). Os cálculos de canais acoplados foram performados utilizando o código **FRESCO**. Para cada valor de J , um potencial imaginário $W(r)$ foi adotado para simular a correspondente absorção pelo processo de fusão. A probabilidade de fusão para cada valor de J é obtido por

$$P_J(E) = -\frac{4k}{E} \sum_{\alpha} \int_0^{\infty} W(r) |\chi_{\alpha,J}^{(+)}|^2 dr, \quad (2)$$

sendo $\chi_{\alpha,J}^{(+)}$ a função de onda radial e α responsável por todas as equações acopladas incluídas nos cálculos [1]. A seção de choque de fusão total é obtida como

$$\sigma_F(E) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{J=0}^{\infty} (2J+1) P_J(E), \quad (3)$$

onde k é o número de onda.

O potencial imaginário é expresso por

$$W_J(r) = -N_i \times [O(r)]^X, \quad (4)$$

$$O(r) = \int \rho_m(\vec{r}_1) \rho_m(\vec{r}_2) \delta(\vec{r} - \vec{r}_1 + \vec{r}_2) d\vec{r}_1 d\vec{r}_2, \quad (5)$$

sendo $O(r)$ uma convolução das distribuições de densidade de matéria.

A fim de reproduzir a magnitude e o comportamento ressonante dos dados obtidos do fator S-astrofísico, trabalhamos com 2 parâmetros

ajustáveis no cálculo de CC: Nr (fator de normalização do SPP2) e Ni, ligados a parte real e imaginária do potencial óptico, respectivamente.

Resultados

Investigando os phase-shifts para $0 < J < 4$, foi possível determinar os valores de Nr para cada valor de J. Obtivemos 0.920, 1.0, 0.9748, 1.0035 e 0.997 para valores de momento angular iguais a 0, 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Fig. 1 e Fig. 2 mostram os resultados da análise dos phase-shifts para diferentes valores de J. As posições das ressonâncias foram ajustadas variando Nr no cálculo de canais acoplados. Para esses cálculos, o potencial imaginário é nulo.

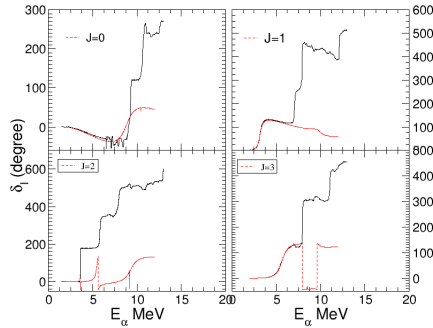


Figura 1: Análise dos phase-shifts, em função da energia, para valores de J iguais a 0, 1, 2 e 3.

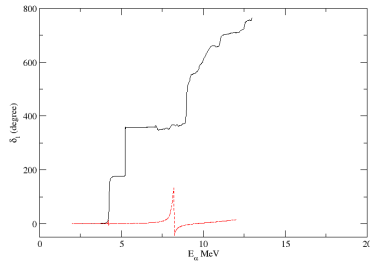


Figura 2: Mesmo que Fig. 1, para J = 4.

Uma vez determinada as posições das ressonâncias, ligamos o potencial imaginário para simular a correspondente absorção pelo processo de fusão, e com o auxílio de um programa elaborado por nós calculamos o fator S-astrofísico. Em um primeiro momento, acoplamos apenas o primeiro estado do $^{12}\text{C} : 2_1^+$. Após isso, acoplamos o Hoyle State ao estado citado

anteriormente (acoplamento de segunda ordem) para verificar a influência de mais acoplamentos aos cálculos. A figura 3 explicita os fatores S-astrofísico para os valores de J mencionados anteriormente com as respectivas normas da parte real do potencial óptico, e a influência nos cálculos referente ao acoplamento de mais um estado.

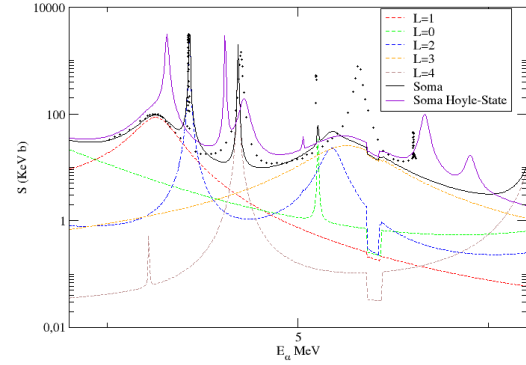


Figura 3: Fator S-astrofísico acoplando primeiro o estado 2_1^+ ao estado fundamental, e posteriormente o 0^+ ao estado 2_1^+ .

Conclusões

Apesar da fase de análise dos fatores de normalização Nr não ter sido finalizada ainda, conseguimos chegar em um resultado satisfatório, onde descrevemos ressonâncias que não apareciam em [1], com o custo de perder a descrição precisa que foi realizada nesse mesmo artigo da ressonância em torno de 5.8 MeV. Os valores das normas indicam que estamos tratando de um potencial realístico. Podemos perceber ainda que o efeito de acoplar mais estados é uma mudança nos valores do fator de normalização Nr, precisando do reajuste desses para conseguir descrever novamente as ressonâncias.

Referências

- [1] Luiz Carlos Chamon, Leandro Romero Gasques, LFM Alves, V Guimarães, Pierre Descouvemont, RJ DeBoer, and Michael Wiescher. Effect of the inelastic couplings on the scattering of alpha particles by ^{12}C at low energies. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 41(3):035101, 2014.

Investigation of the resonant behavior of the astrophysical S-factor for the reaction $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$

Gabriel Pistore Cessel¹, Leandro Romero Gasques², Luiz Carlos Chamon²

¹ São Carlos Institute of Physics (IFSC), University of São Paulo - Brazil

² São Paulo Institute of Physics (IFUSP), University of São Paulo - Brazil
cessel@usp.br

Objectives

The main purpose of the present work is to investigate the reaction $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ within the context of coupled channels. This reaction plays a crucial role in the determination of the carbon-oxygen ratio inside massive stars. Typically, cross-sections in the energy region relevant to astrophysical processes are very small. In addition, the cross-sections have a resonant behavior, which complicates its determination both from an experimental and theoretical point of view.

Methodology

Despite several experimental efforts in the last four decades, there are still huge uncertainties about the capture cross-sections for the reaction $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ at low energies. Around the Gamow peak (~ 300 KeV), the expected cross-sections are around 10^{-8} nbarn, which makes it very difficult to measure them directly. Hence, it is necessary to extrapolate the cross-sections for energies of astrophysical interest. Often, fusion cross-sections are represented by the astrophysical S-factor, expressed by

$$S(E) = \sigma_f(E) E e^{2\pi\eta}, \quad (1)$$

being $\eta = (Z_1 Z_2 e^2 / h) \sqrt{\mu / (2E)}$ the Sommerfeld parameter, μ the reduced mass, Z the atomic number and E the center-of-mass energy

In the present work, we proposed to calculate the cross-sections of the reaction $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ using the coupled channel (CC) calculation formalism. In 2014, our research group published results about this reaction. In this work, the coupled channel calculations were performed considering only the first excited state of $^{12}\text{C}(2_1^+; 4.44\text{MeV})$ [1]. A detailed study of the behavior of the phases associated with the elastic scattering process (phase shifts) was carried out for different values of angular momentum. In

the present project, we proposed to extend this analysis, considering more excited states of carbon in the coupled channel calculations.

At first, we coupled just 1 excited state to the ground state of ^{12}C . For the calculation of the cross-section, the SPP2 (São Paulo Potential 2) was used within the context of the coupled channel (CC). The coupled channel calculations were performed using the code **FRESCO**. For each J value, an imaginary potential $W(r)$ was adopted to simulate the corresponding absorption by the fusion process. The fusion probability for each J value is obtained by

$$P_J(E) = -\frac{4k}{E} \sum_{\alpha} \int_0^{\infty} W(r) |\chi_{\alpha, J}^{(+)}|^2 dr, \quad (2)$$

being $\chi_{\alpha, J}^{(+)}$ the radial wave function and α responsible for all coupled equations included in the calculations [1]. The total fusion cross-section is obtained by

$$\sigma_F(E) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{J=0}^{\infty} (2J+1) P_J(E), \quad (3)$$

where k is the wave number.

The imaginary potential is expressed by

$$W_J(r) = -N_i \times [O(r)]^X, \quad (4)$$

$$O(r) = \int \rho_m(\vec{r}_1) \rho_m(\vec{r}_2) \delta(\vec{r} - \vec{r}_1 + \vec{r}_2) d\vec{r}_1 d\vec{r}_2, \quad (5)$$

being $O(r)$ a convolution of the matter density distributions.

In order to reproduce the magnitude and resonant behavior of the data obtained from the astrophysical S-factor, we worked with two adjustable parameters in the CC calculation: N_r (SPP2 normalization factor) and N_i , related to the real and imaginary part of the optical potential, respectively.

Results

Investigating the phase-shifts for $0 < J < 4$, it was possible to determine the N_r values for each J value. We obtained 0.920, 1.0, 0.9748, 1.0035, and 0.997 for values of angular momentum equal to 0, 1, 2, 3 and 4, respectively. Fig. 1 and Fig. 2 show the results of the phase-shifts analysis for different J values. Resonance positions have been adjusted by varying N_r in the CC calculation. For these calculations, the imaginary potential is zero.

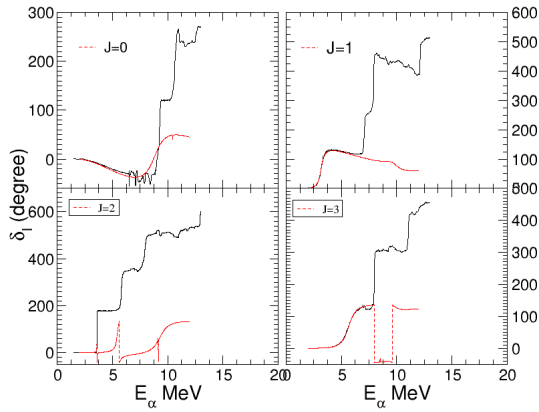


Figure 1: Phase-shifts analysis, depending on energy, for J values equal to 0, 1, 2 e 3.

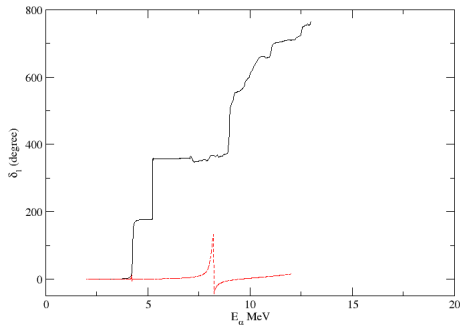


Figure 2: Same as Fig. 1, for $J = 4$.

Once the resonance positions have been determined, we turned on the imaginary potential to simulate the corresponding absorption by the fusion process, and with the help of a program elaborated by us, we calculated the astrophysical S-factor. At first, we coupled only the first state of ^{12}C : 2_1^+ . After this, we coupled the Hoyle State

to the state mentioned previously (second-order coupling) to verify the influence of more couplings on the calculations. Figure 3 shows the astrophysical S-factors for the previously mentioned values of J with the respective norms of the real part of the optical potential and the influence on the calculations regarding the coupling of one more state.

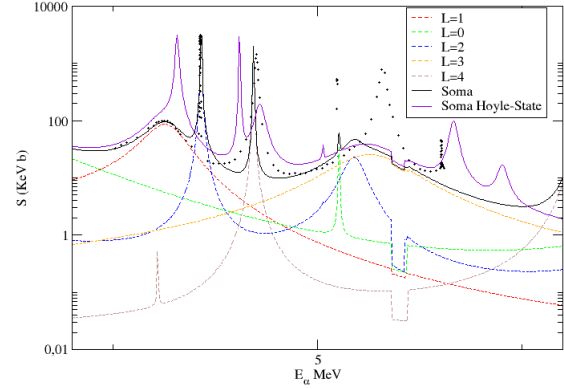


Figure 3: Astrophysical S-factor coupling first, 2_1^+ to ground-state, and subsequently the 0^+ to state 2_1^+

Conclusions

Although the analysis phase of the N_r normalization factors has not yet been finalized, we managed to reach a satisfactory result, where we described resonances that did not appear in [1], at the cost of losing the precise description, made in that same article, of the resonance around 5.8 MeV. The value of the norms indicates that we are dealing with a realistic potential. We can see that the effect of coupling more states is a change in the values of normalization factors, being necessary to readjust them in order to be able to describe the resonances again.

References

- [1] Luiz Carlos Chamon, Leandro Romero Gasques, LFM Alves, V Guimarães, Pierre Descouvemont, RJ DeBoer, and Michael Wiescher. Effect of the inelastic couplings on the scattering of alpha particles by ^{12}C at low energies. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 41(3):035101, 2014.