

Título em Português: Estudo de reações relevantes para astrofísica usando o Brazilian Nuclear Potential

Título em Inglês: Study of nuclear reactions relevant for astrophysics using the Brazilian National Potential

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

Estudos de reações relevantes para a astrofísica usando o Brazilian Nuclear Potential

Gabriel Pistore Cessel¹, Leandro Romero Gasques²

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

² Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), Universidade de São Paulo - Brasil
cessel@usp.br

Objetivo

O objetivo do presente trabalho é o estudo de três reações de extrema importância para a astrofísica: $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$, $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$, $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$. Essas reações ocorrem tipicamente no interior de estrelas massivas, em energias bem abaixo da barreira Coulombiana (seção de choque da ordem de nano-barn).

Métodos e Procedimentos

Recentemente, uma nova abordagem teórica para a parte real da interação nuclear foi proposta pelo nosso grupo de pesquisa [1]. Esse modelo, nomeado Brazilian Nuclear Potential (BNP), é baseado no método de double-folding, e depende de dois ingredientes: a distribuição de densidade do núcleo e a interação nucleon-nucleon. Para os núcleos estudados nesse projeto, que possuem mesmo número de prótons e neutrons, a distribuição de densidade da matéria foi calculada como sendo duas vezes a densidade de carga, que por sua vez é obtida através de experimentos de espalhamento de elétrons. Já, a interação nucleon-nucleon, é expressa por

$$v_{mm}(\vec{r}) = -U_0 e^{-(\frac{r}{a})^2}, \quad (1)$$

sendo $U_0 = 87.226 \text{ MeV}$ e $a = 0.95 \text{ fm}$.

Para o cálculo da seção de choque de fusão utilizamos o BNP dentro do contexto do formalismo de canais acoplados (CC). Os cálculos de canais acoplados foram realizados com o código FRESCO [2]. 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 in-

cluídas nos cálculos [3]. 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. Para reações entre núcleos idênticos, apenas valores pares de J foram considerados nos cálculos.

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.

Em energias com interesse astrofísico, a seção de choque de fusão é frequentemente representada através do fator S^* astrofísico modificado, expresso por

$$S^*(E) = \sigma_F(E) E e^{2\pi\eta + gE}, \quad (6)$$

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. Em nossos cálculos utilizamos $g = 0.46 \text{ MeV}^{-1}$ para $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ e $g = 0$ para as outras duas reações.

A fim de reproduzir a magnitude e o comportamento ressonante dos dados obtidos do fator S^* astrofísico, utilizamos três parâmetros ajustáveis no cálculo de CC: N_r , N_i e X , ligados a parte real e imaginária do potencial óptico, respectivamente.

Resultados

$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$

Nas energias estudadas, apenas as primeiras ondas parciais ($0 \leq J \leq 4$) contribuíram para a

seção de choque de fusão. Os valores de N_r resultantes da análise de CC foram 1.0368, 0.9300 e 1.0695 para $J = 0, 2$ e 4 , respectivamente. Fixamos $N_i = 1$ para todos os valores de J . A figura 1 mostra a excelente descrição de algumas das ressonâncias apresentadas nos dados experimentais.

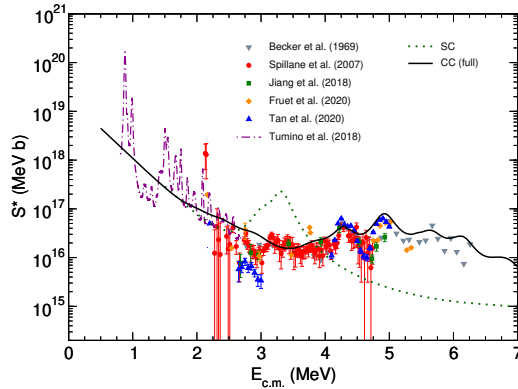
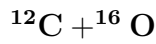


Figura 1: Fator S astrofísico como função da energia do centro de massa para $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$.



As linhas verde e vermelha na figura 2 foram obtidas através do cálculo de modelo óptico (SC) e CC, respectivamente. Nos cálculos, fixamos $N_i = 2$ e $X = 2$ para todos os valores de J e ajustamos o fator de normalização N_r . Os valores de N_r variaram em torno de 1.

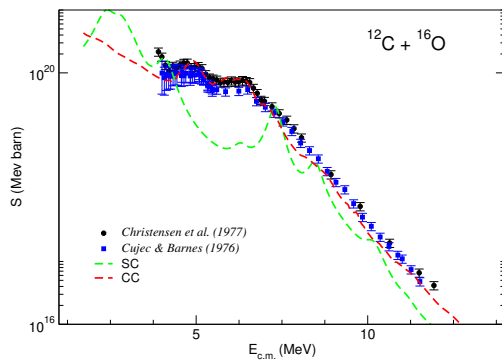
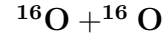


Figura 2: Fator S astrofísico como função da energia do centro de massa para $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$.



Conforme indicado na figura 3, os dados obtidos experimentalmente não apresentam estruturas ressonantes. A linha verde foi obtida através do formalismo de CC. Os valores dos parâmetros ajustáveis foram os mesmos para todos os valores de J ($N_r = 1.04$, $N_i = 30$ e $X = 2.5$). Apesar dos cálculos subestimarem os dados na região de energia entre 6 e 8 MeV, podemos considerar que os resultados obtidos foram satisfatórios.

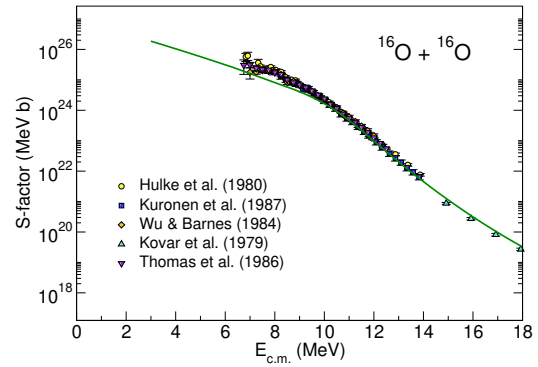


Figura 3: Fator S astrofísico como função da energia do centro de massa para $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$.

Conclusões

De maneira geral, os fatores S astrofísicos para as três reações estudadas foram satisfatoriamente descritos pelo modelo proposto nesse trabalho. Em particular, os resultados obtidos para a reação $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ foram publicados em [4].

Referências

- [1] L. C. Chamon, B. V. Carlson and L. R. Gasques, Comp. Phys. Comm. 267, 108061 (2021).
- [2] I. J. Thompson, Comp. Phys. Rep. 7, 167 (1988).
- [3] L. C. Chamon et al., J. Phys. G 41, 035101 (2014).
- [4] L. R. Gasques, L. C. Chamon and G. P. Cessel, Eur. Phys. J. A 58, 102 (2022).

Study of nuclear reactions relevant for astrophysics using the Brazilian National Potential

Gabriel Pistore Cessel¹, Leandro Romero Gasques²

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 objective of the present work is the investigation of three reactions of paramount importance to astrophysics: $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$, $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$, $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$. These reactions occur, typically, in the inner of massive stars, at energies below the Coulomb barrier (the cross-section in the nano-barn order).

Materials and Methods

Recently, a new theoretical approach for the real part of the nuclear interaction between two reacting nuclei has been proposed by our research group [1]. This model, named Brazilian Nuclear Potential (BNP), is based on the double-folding method, which relies on two main ingredients: the density distribution of the nuclei and the nucleon-nucleon interaction. In particular, for the nuclei we are concerned with (the same number of protons and neutrons), the matter density distribution can be calculated as twice the charge density, which in turn is obtained from electron scattering experiments. The nucleon-nucleon interaction is given by

$$v_{mm}(\vec{r}) = -U_0 e^{-(\frac{r}{a})^2}, \quad (1)$$

being $U_0 = 87.226 \text{ MeV}$ and $a = 0.95 \text{ fm}$.

To calculate the fusion cross sections, the BNP has been used within the context of the coupled-channel (CC) formalism. The CC calculations were performed using the FRESKO code [2]. An imaginary potential, $W(r)$, is adopted to simulate the corresponding absorption by the fusion process. The fusion probability for each J value is obtained from

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

where $\chi_{\alpha,J}^{(+)}$ is the radial wave function and α accounts for all the coupled equations included in

the calculations [3]. The total fusion cross sections is obtained as

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

where k is the wave number. As the interaction is between two identical nuclei, J can only take even values in the calculations.

The imaginary potential is given 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 both matter density distribution.

Conventionally, fusion cross sections at very low energies, typical for astrophysical conditions, are represented by the so-called modified S^* -factor, given by

$$S^*(E) = \sigma_F(E) E e^{2\pi\eta + gE}, \quad (6)$$

being $\eta = (Z_1 Z_2 e^2 / h) \sqrt{\mu / (2E)}$ the Sommerfeld parameter, μ the reduced mass, Z the charge number of the nuclei and E the center-of-mass energy. In our calculations, we assumed $g = 0.46 \text{ MeV}^{-1}$ for $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ and $g = 0$ for the other two reactions.

To reproduce the magnitude and the resonant behavior of the data obtained from the S^* -factor, three adjustable parameters have been adjusted within the CC calculation: N_r , N_i e X , which are related to the real part and imaginary part of the optical potential, respectively.

Results

$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$

According to our calculations, only the first partial waves ($0 \leq J \leq 4$) contribute significantly to the

fusion cross sections at the energies tackled in the present work. The N_r values resulting from the CC analyses are 1.0368, 0.9300 and 1.0695, for $J = 0, 2$ and 4 , respectively. The $N_i = 1$ were fixed for all J values. Fig. 1 shows the excellent description of some of resonances presented in the experimental data.

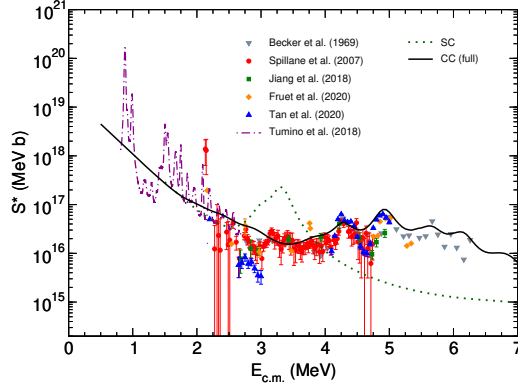
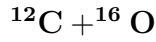


Figure 1: S-factor as a function of center-of-mass energy for $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$.



The green and red lines presented in Fig. 2 were obtained from optical model single-channel (SC) and CC calculations, respectively. In the calculations, $N_i = 2$ and $X = 2$ were fixed for all J values and we adjusted the normalization factor N_r . The N_r values vary around 1.

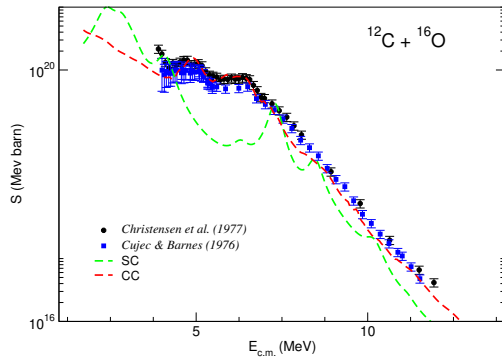
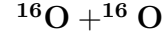


Figure 2: S-factor as a function of center-of-mass energy for $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$.



As indicated in Fig. 3, the data obtained experimentally do not present resonant structures. The green line was obtained from the CC formalism. The adjustable parameters values were the same for all J values ($N_r = 1.04$, $N_i = 30$ and $X = 2.5$). Although the calculations underestimate the data in the energy region between 6 and 8 MeV, we can consider that the results obtained with our model are satisfactory.

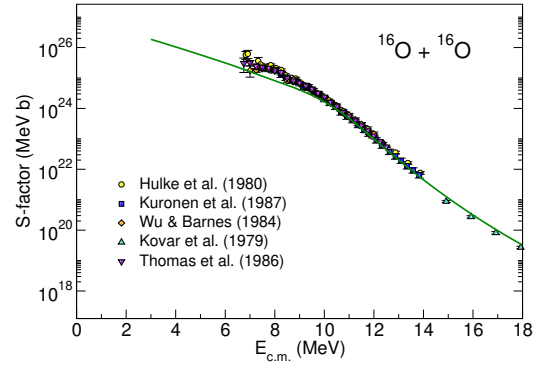


Figure 3: S-factor as a function of center-of-mass energy for $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$.

Conclusions

In general, the astrophysical S^* -factors for the three reactions investigated were satisfactorily described by the model proposed in the present work. In particular, the results obtained for the reaction $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ were published in [4].

References

- [1] L. C. Chamon, B. V. Carlson and L. R. Gasques, *Comp. Phys. Comm.* 267, 108061 (2021).
- [2] I. J. Thompson, *Comp. Phys. Rep.* 7, 167 (1988).
- [3] L. C. Chamon et al., *J. Phys. G* 41, 035101 (2014).
- [4] L. R. Gasques, L. C. Chamon and G. P. Cessel, *Eur. Phys. J. A* 58, 102 (2022).