



An increase in the $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion rate from resonances at astrophysical energies*

Aurora Tumino^{1,2†} 

¹*Facoltà di Ingegneria e Architettura,
Università degli Studi di Enna “Kore”, Enna, Italy*
²*INFN, Laboratori Nazionali del Sud, Catania, Italy*

Summary

Carbon burning powers pivotal scenarios that influence the fate of stars, such as the late evolutionary stages of massive stars (exceeding eight solar masses), superbursts from accreting neutron stars and progenitors of Type Ia supernovae. It proceeds through the $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion reactions that produce an α particle and neon-20 or a proton and sodium-23—that is, $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \alpha)^{20}\text{Ne}$ and $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, p)^{23}\text{Na}$ —at temperatures greater than $0.4 \cdot 10^9$ K, corresponding to astrophysical energies exceeding a megaelectronvolt (MeV), at which such nuclear reactions are more likely to occur in stars. The cross-sections for those carbon fusion reactions (probabilities that are required to calculate the rate of the reactions) have never been measured below 2 MeV because of exponential suppression arising from the Coulomb barrier (the Coulomb barrier is around 6 MeV). The reference rate at temperatures below $1.2 \cdot 10^9$ K relies on extrapolations that ignore the effects of possible low-lying resonances. In [Tumino *et al.* \(2018\)](#), we report the measurement of the $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \alpha_{0,1})^{20}\text{Ne}$ and $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, p_{0,1})^{23}\text{Na}$ reaction rates (where the subscripts 0 and 1 stand for the ground and first excited states of ^{20}Ne and ^{23}Na , respectively) at centre-of-mass energies from 2.7 to 0.8 MeV using the Trojan Horse method and the deuteron in ^{14}N . This is an indirect technique aiming at measuring low-energy nuclear reactions unhindered by the Coulomb barrier and free of electron screening. The deduced cross-sections exhibit several resonances that are responsible for a very large increase of the reaction rate at the relevant temperatures. In particular, around $5 \cdot 10^8$ K, the reaction rate is more than 25 times larger than the reference value. This finding may have significant

*Abstract of the lecture delivered at Palazzo Grimaldi in Modica on November 29, 2019, on the occasion of the ceremony for the award of the Grimaldi Prize 2019.

†E-mail: aurora.tumino@unikore.it

implications such as lowering the temperatures and densities required for the ignition of carbon burning in massive stars and decreasing the superburst ignition depth in accreting neutron stars in the direction to reconcile observations with theoretical models.

Keywords: *nuclear astrophysics, Trojan Horse method, supernovae.*

Riassunto

Incremento nel tasso di fusione $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ da risonanze ad energie astrofisiche

La combustione del carbonio ha un ruolo chiave in diversi contesti astrofisici che influenzano il destino delle stelle, come l'evoluzione di stelle massicce (che superano le otto masse solari), i *superbursts* dalla superficie di stelle di neutroni in accrescimento e i progenitori delle supernove di tipo Ia. La combustione avviene principalmente attraverso le reazioni di fusione $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ che producono una particella α e neon-20 o un protone e sodio-23 —ovvero $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \alpha)^{20}\text{Ne}$ e $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, p)^{23}\text{Na}$ — a temperature superiori a $0.4 \cdot 10^9$ K, corrispondenti a energie astrofisiche che superano un megaelettronvolt (MeV), alle quali tali reazioni nucleari hanno maggiori probabilità di verificarsi nelle stelle. Le sezioni d'urto per queste reazioni di fusione del carbonio (probabilità che sono necessarie per calcolare il tasso delle reazioni) non sono mai state misurate al di sotto di 2 MeV poiché fortemente inibite dalla repulsione coulombiana tra i due nuclei di ^{12}C (la barriera di Coulomb è a circa 6 MeV). Il tasso di riferimento a temperature inferiori a $1.2 \cdot 10^9$ K si basa su estrapolazioni che ignorano gli effetti di possibili risonanze a bassa energia. In Tumino *et al.* (2018) le reazioni $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \alpha_{0,1})^{20}\text{Ne}$ e $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, p_{0,1})^{23}\text{Na}$ (dove gli indici 0 e 1 indicano lo stato fondamentale e il primo stato eccitato di ^{20}Ne e ^{23}Na , rispettivamente) sono state misurate alle energie del centro di massa da 2.7 a 0.8 MeV usando il metodo del *Trojan Horse* e il deutone nel nucleo ^{14}N . Si tratta di una tecnica indiretta che permette di misurare le reazioni nucleari a bassa energia senza gli ostacoli della barriera di Coulomb e dello screening elettronico. Le sezioni d'urto dedotte sono governate da una struttura risonante responsabile di un grosso incremento del tasso di reazione alle temperature di interesse. In particolare, a circa $5 \cdot 10^8$ K, il tasso di reazione è più di 25 volte maggiore del valore di riferimento. Questa scoperta può avere conseguenze significative come l'abbassamento dei valori di temperature e densità d'innesco della combustione del carbonio in stelle massicce e la riduzione della temperatura di innesco dei *superbursts*. Quest'ultima va nella direzione di riconciliare le osservazioni con i modelli teorici che vedono nella combustione del carbonio la sorgente di calore dei *superbursts*.

Parole chiave: *astrofisica nucleare, metodo del Trojan Horse, supernove.*

References

Tumino, A., Spitaleri, C., La Cognata, M., Cherubini, S., Guardo, G. L., Gulino, M., Hayakawa, S., Indelicato, I., Lamia, L., Petrascu, H., Pizzone, R. G., Puglia,

MISC8 *Increase in the $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ fusion rate from resonances at astrophysical energies*

S. M. R., Rapisarda, G. G., Romano, S., Sergi, M. L., Spartà, R., and Trache, L. (2018). *An increase in the $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ fusion rate from resonances at astrophysical energies*. *Nature* 557(7707), 687. doi:[10.1038/s41586-018-0149-4](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0149-4).