

Le stelle sotto la montagna

L'esperimento LUNA ai Laboratori del Gran Sasso

di Alba Formicola e Gianluca Imbriani



a.
Dettaglio dell'apparato sperimentale di LUNA400 ai Laboratori del Gran Sasso. In primo piano si vedono la linea di fascio, che trasporta le particelle accelerate fino al bersaglio, e parte del sistema di rivelazione usato per misurare le reazioni nucleari di interesse astrofisico.

Nei Laboratori del Gran Sasso esiste un acceleratore di particelle che lavora da oltre trent'anni nel silenzio della roccia. Si tratta dell'esperimento LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics), che misura direttamente le reazioni nucleari che alimentano le stelle, aprendo una nuova frontiera dell'astrofisica sperimentale.

Tra i risultati più importanti di LUNA c'è la misura ad alta precisione della reazione tra protone e deuterio, che dà origine all'elio-3 con l'emissione di radiazione gamma, pubblicata su Nature nel 2020. Questa misura ha permesso di determinare con maggiore accuratezza l'abbondanza finale del deuterio prodotta durante la nucleosintesi primordiale del Big Bang, uno dei parametri chiave per ricavare la densità di materia barionica dell'universo.

LUNA nacque nel 1991 per trovare una risposta al problema dei neutrini solari. Dalla fine degli anni '60, gli esperimenti che rivelavano neutrini provenienti dal Sole misuravano un flusso significativamente più basso rispetto alle previsioni del modello solare standard sviluppato da John Bahcall. Nel 1972 il futuro premio Nobel William Fowler pubblicò su Nature un breve articolo in cui propose una possibile, per sua stessa ammissione disperata, soluzione: l'esistenza di una risonanza a bassa energia in una delle reazioni finali della catena protone-protone, il processo che alimenta il Sole. Una risonanza avrebbe infatti modificato il bilancio delle reazioni nucleari nel centro della stella, riducendo la produzione dei neutrini associati al decadimento del berillio-7 e riconciliando così teoria ed esperimenti (vd. in Asimmetrie n. 26 p. 18, ndr). Fu allora che nacque un'idea semplice e radicale: proporre di svolgere l'esperimento sottoterra. Operando in un ambiente sotterraneo, dove il fondo cosmico è fortemente soppresso, è possibile spingersi verso energie sempre più basse, avvicinandosi, per la prima volta, alla regione di interesse astrofisico. A energie così basse, infatti, il numero di reazioni nucleari prodotte diventa estremamente piccolo e, senza la schermatura naturale offerta dalla montagna, il segnale verrebbe completamente sommerso dal fondo generato dai raggi cosmici.

Facendo questo tipo di misure nelle sale sperimentali sotterranee dei laboratori del Gran Sasso è stato possibile



ridurre drasticamente il fondo cosmico e spingere le misure fino alle energie del Sole, escludendo l'esistenza di questa risonanza (vd. in Asimmetrie n. 9 p. 24, ndr).

La soluzione del problema dei neutrini solari arrivò poco dopo, all'inizio degli anni 2000, dalla conferma della teoria di Pontecorvo: i neutrini cambiano identità durante il loro viaggio verso la Terra, il fenomeno noto come oscillazione dei neutrini (vd. p. 22, ndr). LUNA aveva però ormai dimostrato che le reazioni nucleari di interesse astrofisico potevano essere misurate direttamente nella regione energetica delle stelle, aprendo una nuova frontiera sperimentale.

Oggi il programma sperimentale di LUNA è entrato in una nuova fase, grazie al nuovo acceleratore da 3,5 MV, la Bellotti Ion Beam Facility, entrata in funzione sempre ai Laboratori del Gran Sasso nel 2023, che consente di estendere le misure a reazioni nucleari rilevanti per le fasi avanzate dell'evoluzione stellare.

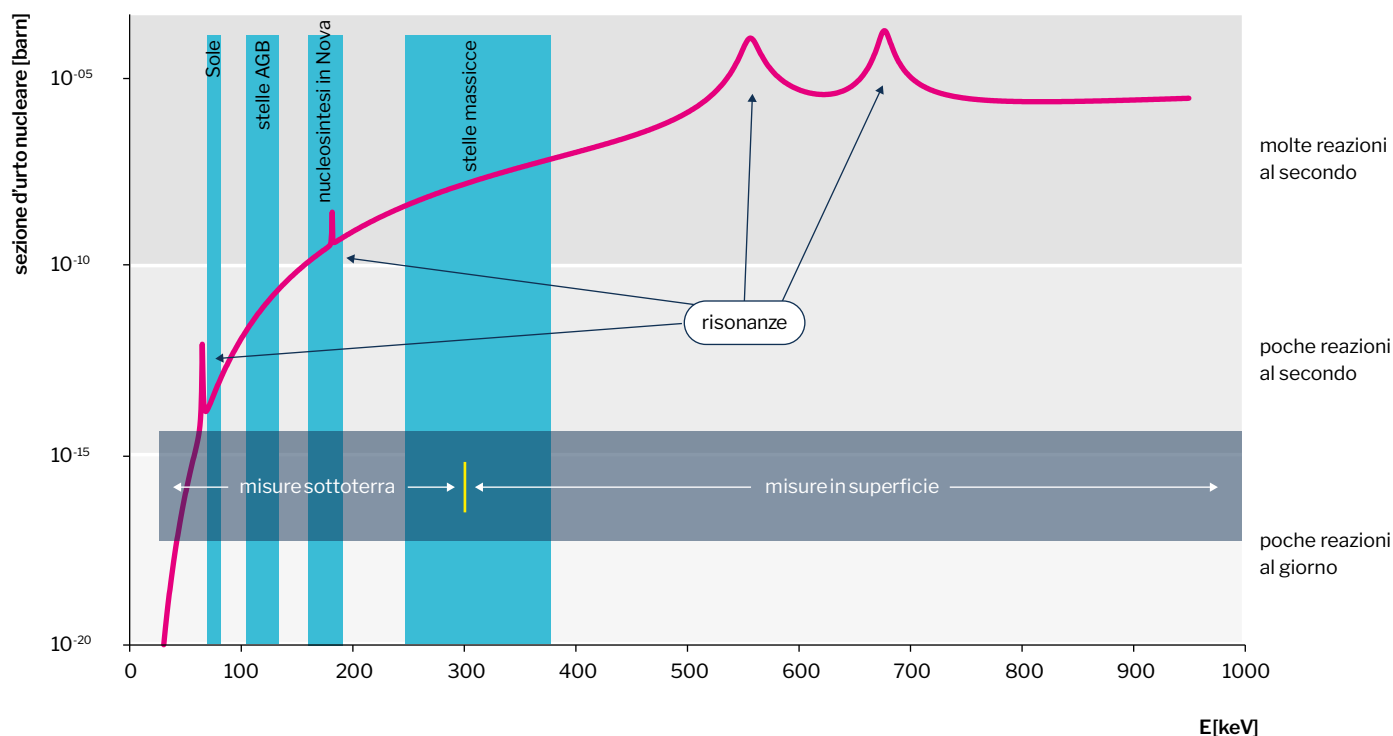
Tra queste, un ruolo centrale è giocato dalla reazione di fusione tra due nuclei di carbonio-12, che segna l'innesco della combustione del carbonio nelle stelle massicce, ovvero stelle con massa maggiore di circa 8 volte quella del Sole. Si tratta di un passaggio cruciale, da cui dipende la struttura del nucleo stellare, le fasi evolutive successive e, in ultima analisi, il destino finale della stella, dall'esplosione come supernova alla formazione di una stella di neutroni o di un buco nero.

Il bruciamento del carbonio è inoltre alla base dei modelli delle supernovae di tipo Ia, utilizzate come indicatori di distanza su scala cosmologica. Le condizioni di innesco della combustione del carbonio determinano infatti le proprietà osservabili dell'esplosione e quindi la calibrazione di queste sorgenti come candele standard. Nonostante questa importanza, la reazione tra due nuclei di carbonio-12 rimane una delle principali fonti di incertezza nei modelli astrofisici.

Nel regime di energia rilevante per le stelle ($E \lesssim 2-3$ MeV), la sezione d'urto è estremamente piccola e le misure dirette sono ostacolate dal fondo cosmico. Di conseguenza, i tassi di reazione utilizzati nei modelli stellari si basano in larga parte su estrapolazioni affette da incertezze significative o su misure indirette. La possibile presenza di risonanze a bassa energia, non ancora osservate direttamente, potrebbe modificare in modo sostanziale tali tassi.

In particolare, anche variazioni moderate della sezione d'urto possono spostare la soglia di massa che separa stelle che terminano la loro evoluzione come supernovae a collasso del nucleo da quelle che evolvono verso la formazione di nane bianche di carbonio-ossigeno, potenziali progenitrici di supernovae di tipo Ia. I risultati di questa misura saranno inoltre cruciali per chiarire il ruolo della struttura a *cluster* dei nuclei e il suo possibile impatto sull'insorgenza di risonanze nella regione di bassa energia.

b.
La Bellotti Ion Beam Facility nei Laboratori del Gran Sasso. In primo piano sono visibili le due linee di fascio, che guidano le particelle accelerate verso gli esperimenti; sullo sfondo, la *tank* dell'acceleratore da 3,5 MV.



La misura della reazione tra due nuclei di carbonio-12 è attualmente in corso presso la Bellotti Facility, e i primi dati nel regime astrofisico sono attesi a breve.

Ridurre queste incertezze significa migliorare in modo diretto la nostra comprensione dell'evoluzione stellare, della nucleosintesi e dei meccanismi che regolano le esplosioni stellari, collegando in maniera quantitativa la fisica nucleare di laboratorio all'evoluzione chimica dell'universo. In questa prospettiva si inserisce anche LUNANOVA, un progetto internazionale

recentemente finanziato dallo European Research Council nell'ambito ERC-Synergy, che nei prossimi anni permetterà alla comunità INFN di estendere ulteriormente il programma dell'astrofisica nucleare sotterranea e di mantenere una posizione di *leadership* internazionale nel campo. L'esperimento LUNA dimostra come l'astrofisica nucleare possa costruire un ponte tra il microcosmo del nucleo atomico e il macrocosmo delle galassie, tra la fisica fondamentale e l'evoluzione dell'universo.

c. Andamento schematico della probabilità che una reazione nucleare avvenga al variare dell'energia. Alle energie tipiche delle stelle questa probabilità diventa estremamente piccola, mentre eventuali risonanze possono aumentarla localmente. Grazie alla riduzione del fondo cosmico, i laboratori sotterranei permettono di misurare queste reazioni più vicino alla regione di interesse astrofisico.

Biografie

Alba Formicola è ricercatrice dell'INFN presso la sezione di Roma. Si occupa di astrofisica nucleare sperimentale in ambiente sotterraneo, è membro della collaborazione LUNA dal 1998 e ne è attualmente portavoce. Ha contribuito a numerose misure di reazioni nucleari di interesse astrofisico e allo sviluppo delle tecniche sperimentali a basso fondo presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

Gianluca Imbriani è professore di fisica presso l'Università di Napoli Federico II. La sua attività di ricerca è dedicata all'astrofisica nucleare sperimentale, con particolare attenzione alla misura di sezioni d'urto di reazioni nucleari rilevanti per l'evoluzione stellare e la nucleosintesi. Membro della collaborazione LUNA fin dalle sue prime fasi, ne è stato portavoce dal 2020 al 2024 e ha contribuito alla realizzazione della Bellotti Ion Beam Facility ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso.