

Studio dei fenomeni di trasporto di isospin in collisioni fra ioni pesanti alle energie di Fermi

Abstract

Questo progetto di ricerca si colloca nell'ambito della collaborazione internazionale FAZIA-INDRA, che ha lo scopo di misurare i meccanismi di reazione nelle collisioni tra ioni pesanti alle energie di Fermi (20-100 AMeV) con un apparato per particelle cariche capace di alta risoluzione isotopica dei frammenti (identificazione del singolo isotopo fino a oltre $Z=20$) e grande accettazione angolare. L'apparato è stato progettato per studiare l'Equazione di Stato della Materia Nucleare (nEOS) e in particolare la dipendenza dalla densità barionica ρ del termine di energia di simmetria E_{sym} dato che tale andamento ha implicazioni significative non solo nell'ambito della fisica nucleare, ma anche in quello dell'astrofisica (in particolare per le stelle di neutroni).

Stato dell'arte

La sezione d'urto per collisioni tra ioni pesanti alle energie di Fermi in reazioni periferiche e semiperiferiche è dominata dal canale binario con la formazione di un quasi proiettile (QP) e un quasi target (QT) eccitati, cioè due frammenti pesanti che conservano in parte le caratteristiche del canale di ingresso. Dopo questa prima fase dinamica, i due frammenti si diseccitano attraverso l'evaporazione di particelle leggere. A seconda dell'energia e della taglia del sistema, si può inoltre osservare anche una emissione di particelle a velocità intermedia fra quella del QP e QT (detta emissione a *midvelocity*), proveniente dalla rottura della regione di contatto (detta anche *neck* e ipotizzata essere a bassa densità) che si forma tra i due frammenti durante la collisione. L'energia di simmetria influenza i fenomeni di trasporto e di scambio dei nucleoni tra il QP e il QT e quindi anche il rapporto N/Z dei prodotti di reazione (geralmente indicato in questo campo con il termine "isospin").

Dal punto di vista teorico, si può schematizzare che i flussi di scambio di nucleoni durante l'interazione dipendano dal gradiente di isospin (fenomeno dell'*isospin diffusion*) e dal gradiente di ρ (fenomeno dell'*isospin drift*) [1,2]. L'*isospin diffusion* quindi avviene nel caso in cui proiettile e target abbiano diverso isospin e dipende da E_{sym} , mentre l'*isospin drift* è presente quando si formano zone a densità ρ diversa, come ad esempio si ipotizza che avvenga nel *neck*, e in questo caso gli effetti osservati sono sensibili a $\partial E_{\text{sym}}/\partial \rho$.

Per poter accedere alle informazioni sui parametri che regolano la nEOS, i dati sperimentali devono essere confrontati con i modelli teorici. In particolare, per le collisioni alle energie di Fermi è necessario l'utilizzo di un modello di trasporto che descriva la fase dinamica della reazione, come ad esempio AMD (*Antisymmetrized Molecular Dynamics*) [3], seguito da un codice statistico (*afterburner*) per descrivere il decadimento dei frammenti primari attraverso canali come evaporazione e fissione statistica. Infine, per rendere coerente il confronto delle simulazioni con i dati sperimentali, gli eventi simulati devono essere filtrati per tenere conto della copertura angolare, delle soglie di identificazione e della risoluzione energetica di ogni rivelatore in modo da riprodurre anche nel modello le limitazioni presenti nell'apparato di misura.

Un altro aspetto interessante legato a queste reazioni periferiche e semiperiferiche che è stato studiato in anni recenti è il fenomeno del *break-up* dinamico del QP. Questo processo è verosimilmente indotto e favorito da instabilità meccaniche nel sistema interagente per cui il QP (o il QT o entrambi) possono evolvere in configurazioni deformate che si assottigliano fino alla rottura. Durante tale cammino verso il *break-up* continuano i processi di equilibratura di carica regolati da E_{sym} . Il frammento leggero è caratterizzato da N/Z superiore in quanto tipicamente creato partendo dalla zona allungata a più bassa densità. La letteratura riporta [4] che all'aumentare dell'asimmetria di massa dei frammenti di fissione il frammento leggero tende ad avere N/Z superiore rispetto a quello pesante anche dopo la rottura del QP. Una possibile spiegazione è legata al fatto che in fissioni più asimmetriche la scala di tempo del *break-up* sia troppo breve per permettere di raggiungere l'equilibrio di isospin tra i due frammenti attraverso scambi di nucleoni prima della loro separazione finale. Tuttavia, sia le evidenze sperimentali per questo canale che le interpretazioni mediante modelli di trasporto sono piuttosto limitate e controverse per cui non c'è al momento un quadro coerente [4,5].

Questo tipo di studi è il terreno di gioco ideale per l'apparato FAZIA-INDRA in quanto l'ampia copertura angolare (2° - 176°) permette di caratterizzare e selezionare in modo stringente gli eventi, mentre ad angoli in avanti, grazie alle performance di FAZIA è possibile identificare in massa e carica fino a oltre $Z=20$ i frammenti, permettendo così lo studio dettagliato in termini di isospin del decadimento del QP. Il rivelatore FAZIA è costituito da 12 blocchi ognuno dei quali è formato da 16

telescopi Si1 (300 μm) - Si2 (500 μm) - CsI(Tl) (10 cm). Grazie ai silici montati in configurazione *rear side injection* [6], si hanno migliori prestazioni per quanto riguarda l'identificazione di particelle fermate nel primo silicio usando la *Pulse Shape Analysis* (risoluzione isotopica fino a circa $Z=20$) con soglie di identificazione di 5 AMeV per il ^{12}C e 7 AMeV per il ^{40}Ca [7]. Quando i frammenti sono sufficientemente energetici da oltrepassare i 300 μm del primo silicio, può essere applicata la tecnica ΔE -E che permette risoluzione isotopica fino a circa $Z=25$ [6]. Le stesse tecniche di identificazione vengono utilizzate anche per il rivelatore INDRA organizzato in corone composte da telescopi Si-CsI(Tl) o solo da CsI(Tl). Grazie all'upgrade dell'elettronica avvenuto nel 2021, ad oggi INDRA permette prestazioni migliori in termini di identificazione rispetto alle misure passate (risoluzione isotopica fino a $Z=8$ per angoli inferiori a 45°).

Descrizione del progetto

Il mio progetto di dottorato prevede di seguire l'evoluzione della reazione $^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$ tra 32 e 74 AMeV con l'obiettivo di studiare l'emissione a *midvelocity* e il QP *break-up* per mettere dei limiti più stringenti sui modelli di trasporto per quanto riguarda l'energia di simmetria e la sua dipendenza dalla densità barionica. L'obiettivo del progetto sarà quello di studiare in funzione del parametro d'urto l'emissione dal *neck* e come il QP e QT possono decadere sia attraverso il canale di evaporazione che attraverso il canale di *break-up*. L'analisi sarà particolarmente esclusiva grazie all'identificazione completa in carica e massa dei prodotti di decadimento del QP sfruttando i telescopi di FAZIA. I risultati sperimentali ottenuti saranno poi confrontati con le previsioni di modelli teorici come AMD seguito da un modello statistico come afterburner.

Per questo progetto, mi baserò su un set di dati raccolti durante gli esperimenti realizzati con FAZIA-INDRA a GANIL tra il 2019 e maggio 2022. La reazione $^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$ è stata misurata a 32 e 52 AMeV nel 2019 e parzialmente già analizzata [8], mentre con l'esperimento del 2022 a 74 AMeV si è completato il set di misure. Grazie a una borsa di studio dell'INFN ho partecipato alla preparazione e alla presa dati dell'ultima misura e ho già iniziato a lavorare all'identificazione delle particelle e alla calibrazione in energia dei rivelatori. La misura a 74 AMeV è particolarmente importante perché, se confrontata con le misure precedenti a energie più basse, offre la possibilità di studiare come cambiano le sezioni d'urto dei canali di reazione in un ampio range di variazione di energia di bombardamento che interessa anche una zona nella quale il canale di vaporizzazione può diventare importante. Un aspetto che potrebbe emergere da questo confronto è la possibilità di verificare se le collisioni a 74 AMeV conducano a sistemi nucleari meno eccitati rispetto a energie inferiori per via di una riduzione della sezione d'urto efficace nucleone-nucleone (NN) con conseguente maggiore trasparenza rispetto alle reazioni intorno a 30-40 AMeV. In tale scenario ci sarebbero anche variazioni nelle distribuzioni isotopiche dei prodotti di reazione che potrebbero emergere dal confronto fra i dati sperimentali misurati a energie diverse e dal confronto fra i dati e le previsioni [9].

- [1] A. Camaiani et al. Isospin diffusion measurement from the direct detection of a quasiprojectile remnant. *Phys. Rev. C* 103, 014605 (2021).
- [2] S. Piantelli et al. Isospin transport phenomena for the systems $^{80}\text{Kr} + ^{40,48}\text{Ca}$ at 35 MeV/nucleon. *Phys. Rev. C* 103, 014603 (2021).
- [3] A. Ono et al. Antisymmetrized molecular dynamics with quantum branching processes for collisions of heavy nuclei. *Phys. Rev. C* 59, 853 (1999).
- [4] Manso et al. Detailed characterization of neutron-proton equilibration in dynamically deformed nuclear system. *Phys. Rev. C* 95, 044604 (2017).
- [5] S. Piantelli et al. Dynamical fission of the quasiprojectile and isospin equilibration for the system $80\text{Kr}+48\text{Ca}$ at 35 MeV/nucleon. *Phys. Rev. C* 101, 034613 (2020).
- [6] N. Le Neindre et al. Comparison of charged particle identification using pulse shape discrimination and ΔE -E methods between front and rear side injection in silicon detectors. *Nucl. Instr. Meth. A* 701 (2013) 145–152.
- [7] G. Pastore et al. Isotopic identification using Pulse Shape Analysis of current signals from silicon detectors: Recent results from the FAZIA collaboration. *Nucl. Instr. Meth. A* 860 (2017) 42–50.
- [8] C. Ciampi et al. First results from INDRA-FAZIA apparatus on isospin diffusion in $^{58,64}\text{Ni}+^{58,64}\text{Ni}$ systems at Fermi energies. *arXiv*, 2022, arxiv.org/abs/2205.10171 (submitted *Phys. Rev. C*).
- [9] O. Lopez et al. In-medium effects for nuclear matter in the Fermi-energy domain. *Phys. Rev. C* 90, 064602 (2014).