

# Struttura e reazioni nucleari e l'origine degli elementi

Angela Bracco

Dipartimento di Fisica, Università degli studi di Milano, Sezione INFN di Milano

La sperimentazione riguardante lo studio dei nuclei lontano dalla stabilità e delle reazioni nucleari a energie stellari è fortemente motivata a ottenere molte informazioni indispensabili per comprendere l'origine degli elementi. I progressi fatti riguardano: i) misure di sezioni d'urto per la formazione di nuclei leggeri e per la produzione di energia delle stelle; ii) le proprietà dei nuclei con uno sbilanciamento innaturale nel numero di protoni e neutroni per studiare sia la materia neutronica simile a quella delle stelle di neutroni che i processi di nucleosintesi esplosivo che generano i nuclei pesanti. Molti risultati interessanti sono stati finora ottenuti ma la complessità del problema dell'origine degli elementi richiede ulteriore sperimentazione che è attualmente programmata in numerosi laboratori nel mondo.

Comprendere l'origine della materia visibile è un problema molto complesso, ma affascinante, che guida la ricerca sperimentale e teorica coinvolgendo fortemente la fisica dei nuclei. Le indagini

sperimentali sulle proprietà nucleari richiedono l'uso e il continuo sviluppo di un arsenale di tecniche sperimentali e diversi tipi di infrastrutture di ricerca e approcci teorici. Questo perché la fisica dei nuclei atomici è ricca di fenomeni, varia ed estremamente complessa a molti livelli. Gli sviluppi tecnici per la ricerca nucleare sono in gran parte applicati anche a vantaggio della nostra società.

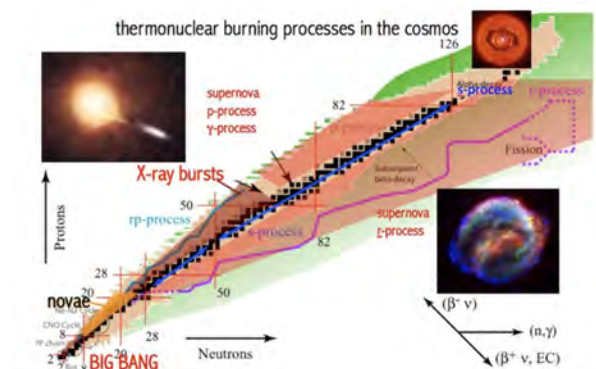
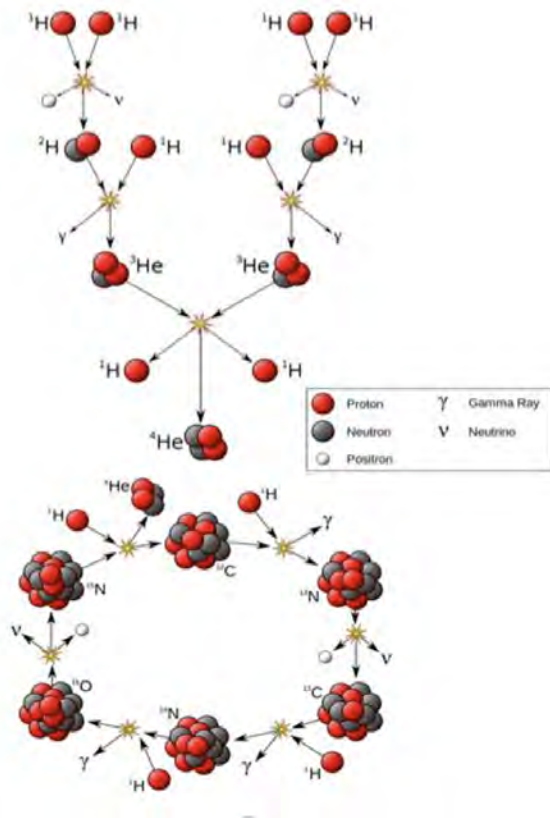


Figura 1: Illustrazione schematica della carta dei nuclidi con indicazione dei diversi processi di nucleosintesi.

Con lo studio delle proprietà dei nuclei e delle reazioni nucleari si vuole capire come gli elementi chimici sono stati prodotti e l'evoluzione della

materia nella sua complessità attraverso i tempi cosmologici. Questi tempi sono quelli del Big Bang durante cui i nuclei più leggeri, idrogeno, elio e litio, sono stati prodotti, prima che si formassero le prime stelle. Sono anche quelli dopo il Big Bang, durante i cicli di vita delle stelle, quando sono stati creati gli elementi primari necessari per la vita e nei violenti eventi cosmici che hanno prodotto gli elementi più pesanti (vedi Figura 1).



**Figura 2:** Illustrazione schematica del ciclo dell'idrogeno, parte superiore, e del CNO (Carbonio, Azoto, Ossigeno) nella parte inferiore.

Per quanto riguarda la formazione dei nuclei leggeri, con catene di reazioni nucleari che si verificano nel plasma (vedi Figura 2), e il problema dell'energia delle stelle, l'esperimento LUNA al laboratorio nazionale INFN del Gran Sasso e le numerose misure ai Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN hanno portato a molti risultati unici. Questi risultati hanno ricadute anche sulla produzione di neutrini, sulla determinazione della densità della materia ordinaria, o densità barionica (vedi referenza [1]). Sappiamo poco su come vengono creati gli elementi più pesanti del ferro nella tavola periodica.

La teoria suggerisce che molti di loro sono generati in ambienti estremamente violenti come l'esplosione di una supernova che pone fine alla vita di una stella molto massiccia, seguita dal collasso del suo nucleo in una stella di neutroni o in un buco nero. Altri processi stellari di interesse sono quelli in cui una nana bianca in un sistema stellare binario viene resuscitata in modo esplosivo estraendo gas dalla sua compagna. Anche eventi più violenti come la fusione di due stelle di neutroni o buchi neri possono innescare questi rapidi processi di nucleosintesi. Questi processi coinvolgono migliaia di specie nucleari instabili su entrambi i lati della valle della stabilità, attorno all'insieme centrale di nuclei stabili, come illustrato schematicamente in Figura 1.

La natura ha fornito alla Terra circa 300 nuclei stabili e a lunga vita che possiamo studiare in laboratorio. Tuttavia, molto più grande è la varietà di isotopi instabili, quelli creati durante le esplosioni stellari, che possono essere prodotti come fasci radioattivi nei laboratori utilizzando diversi sistemi di acceleratori di ioni. Gli sviluppi nel corso degli anni di questi acceleratori hanno fornito l'accesso a un numero crescente di nuclei esotici. Tuttavia, solo circa 3000, dei forse più di 8000 diversi nuclei che dovrebbero esistere, sono stati prodotti e caratterizzati. Resta ancora da scoprire una grande terra incognita dominata dai nuclei ricchissimi di neutroni e dagli elementi superpesanti.

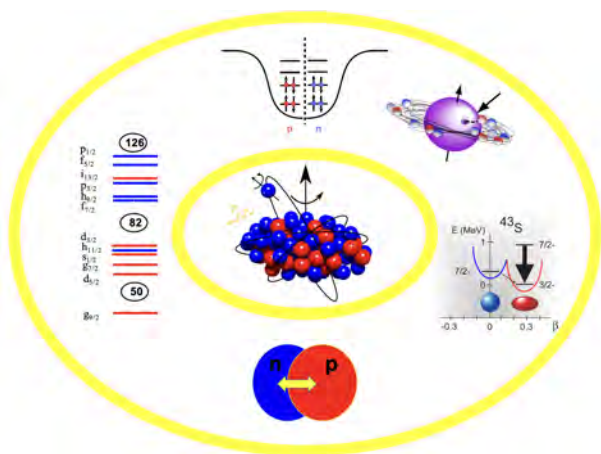
Per questi studi è iniziata un'era nuova in cui è possibile realizzare misure di alta precisione in nuclei esotici per quanto riguarda il numero di protoni e neutroni e le loro eccitazioni. Questo grazie alla varietà di fasci di ioni stabili e radioattivi, e questi ultimi sono ora e in futuro prodotti con sempre maggiori intensità e purezza e con nuovi metodi.

Le problematiche di grande interesse nell'ambito della struttura nucleare, molte con implicazioni nei modelli di nucleosintesi e delle stelle di neutroni, a cui si rivolge la sperimentazione attuale sono numerose. Per affrontarle si intende:

- studiare l'evoluzione della struttura a strati (*shell*) dei nuclei e il verificarsi di nuovi numeri magici,
- comprendere l'origine microscopica della

deformazione nucleare e l'interazione tra particella singola e i gradi di libertà di tipo collettivo,

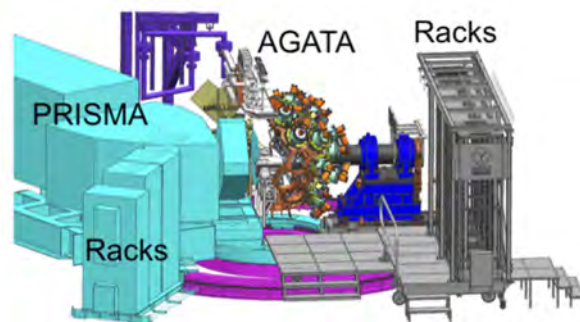
- ricerca di forme esotiche ed estreme (es. iperdeformazione),
- stabilire la coesistenza delle forme e le transizioni delle forme, e comprendere i meccanismi che portano alla loro comparsa,
- verificare le previsioni teoriche per la distribuzione di neutroni (*neutron skin*) e il collegamento con la stabilità e la struttura delle stelle di neutroni,
- sondare la natura delle correlazioni di coppia e indagare come viene generato il momento angolare,
- misurare il grado di rottura della simmetria di isospin,
- trovare evidenze di comportamento caotico nei nuclei,
- ...



**Figura 3:** Illustrazione schematica di alcuni gradi di libertà dei nuclei che derivano da diverse configurazioni ed eccitazioni nucleari. Partendo dall'alto in centro si mostrano: l'interazione di accoppiamento degli spin dei nucleoni, le eccitazioni di particella singola, la coesistenza di forme, le vibrazioni collettive dipolari, e la struttura a shell (dalla referenza [2]).

La Figura 3 mostra schematicamente alcuni di questi gradi di libertà nucleari che sono dovuti all'effetto combinato delle interazioni tra nucleoni e alla complessità dovuta alla presenza di molti

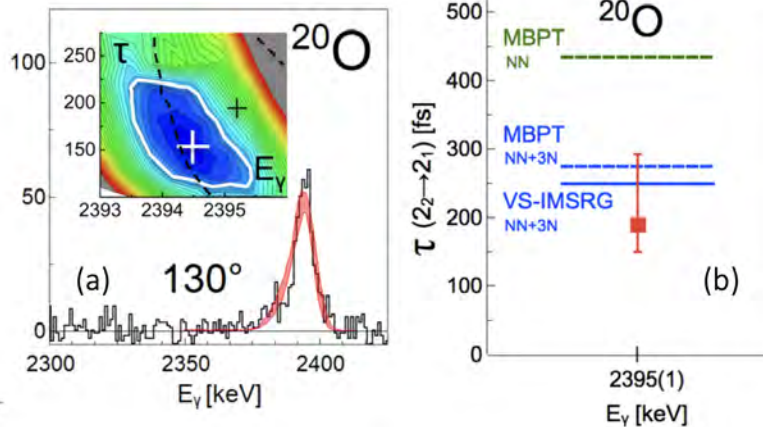
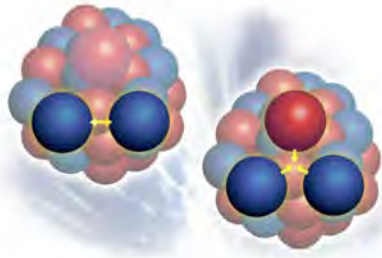
nucleoni responsabili di diverse configurazioni, forme, vibrazioni e rotazioni collettive dei nuclei.



**Figura 4:** Layout generale di AGATA 2 $\pi$  accoppiato allo spettrometro magnetico PRISMA (in azzurro) installato presso i laboratori LNL (INFN). Il Rack che contiene i digitalizzatori e gli alimentatori (in grigio), i racks che contengono l'autofill del sistema di azoto liquido (in azzurro), l'elettronica per i rivelatori accoppiati e il sistema ad alta tensione AGATA sono indicati in figura. Figura tratta da referenza [3].

La spettroscopia gamma è molto utilizzata con diversi tipi di reazioni nucleari, a energie attorno alla barriera Coulombiana ma anche in reazioni con ioni radioattivi fino a 1 GeV/u, per investigare le diverse proprietà dei nuclei e delle interazioni nucleari. In particolare, il sistema di rivelatori Advanced Gamma Tracking Array, AGATA, la cui costruzione si evolve negli anni, ha permesso e permetterà in futuro grossi passi avanti nella comprensione dei nuclei nelle configurazioni più estreme per sbilanciamento di numero di neutroni e protoni, energia di eccitazione e momento angolare. AGATA è uno spettrometro, costituito esclusivamente da rivelatori di Germanio di elevata purezza e altamente segmentati ed è in grado di misurare raggi  $\gamma$  a partire da poche decine di keV ad oltre 10 MeV, con efficienza senza precedenti, eccellente risoluzione della posizione per le singole interazioni dei raggi  $\gamma$ , e capacità di conteggio molto elevata. È uno strumento realizzato in collaborazione europea ed è, e sarà, utilizzato in campagne di misure in diversi laboratori europei, quali LNL di INFN, GANIL in Francia e FAIR in Germania che forniscono fasci di ioni stabili e radioattivi.

Attualmente AGATA è installato presso il laboratorio INFN-LNL (vedi referenza [3]) ed è utilizzato con reazioni che utilizzano fasci stabili



**Figura 5:** Pannello a sinistra: Spettro per la transizione  $\gamma$  a 2396 keV dallo stato a lunga vita lungo ( $\tau = 3.5$  ps) nel nucleo  $^{20}\text{O}$  misurato con lo spettrometro AGATA (con precisione  $< 4$  mm) a  $130^\circ$ . Lo spettro simulato sovrapposto ai dati corrisponde al minimo valore della differenza tra lo spettro misurato e quelli simulati in corrispondenza a diversi valori del tempo di vita dello stato e dell'energia della transizione gamma. Pannello a destra: Valore della vita media misurata confrontato con diverse previsioni teoriche. Quelle che includono l'interazione a tre corpi riproducono meglio il valore sperimentale. Figura tratta da referenza [2].

e nei prossimi anni sarà usato con i fasci radioattivi del complesso di acceleratori SPES. Il sistema AGATA è accoppiato allo spettrometro magnetico PRISMA e a molti altri rivelatori di particelle cariche e neutroni per selezionare la reazione che popola i nuclei d'interesse. Per l'efficiente rivelazione di gamma di alta energia sono accoppiati rivelatori a scintillazione di nuova generazione.

In questo articolo sono brevemente illustrati alcuni risultati ottenuti, insieme alle prospettive future, per la struttura nucleare con la spettroscopia gamma, in particolare utilizzando il rivelatore AGATA (vedi la referenza [2] e quelle riportate nella bibliografia).

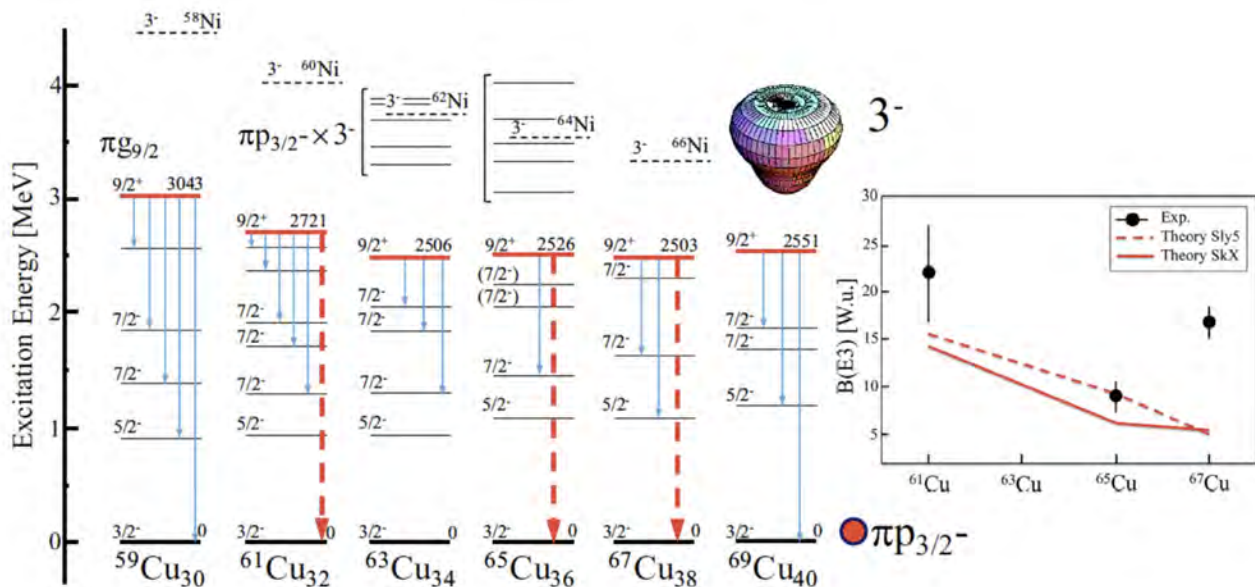
## Interazione dei nucleoni nei nuclei

L'interazione tra i nucleoni che sono coinvolti nelle diverse eccitazioni nucleari, non sembra avere semplicemente una natura a due corpi ma ci sono attualmente evidenze del ruolo rilevante dell'interazione a tre corpi.

Una delle sfide della fisica nucleare è arrivare a una descrizione unificata di tutti i nuclei basata approcci di tipo *ab initio* che utilizzano una

Teoria del Campo Effettivo (EFT) basata sulle simmetrie e sui relativi gradi di libertà della teoria *Quantum Chromo Dynamics* (QCD) in regime di bassa energia. Fino ad ora le previsioni *ab initio* hanno avuto successo nel descrivere gli stati fondamentali ed eccitati di nuclei leggeri e anche più pesanti degli isotopi dell'ossigeno. L'accordo di questi risultati con i dati sperimentali ha dimostrato la potenzialità delle interazioni di tipo EFT, in particolare di quelle a due e a tre nucleoni. Per quanto riguarda l'effetto dell'interazione a tre nucleoni (3N) è stato trovato che includendo le forze a tre nucleoni nei calcoli si ottiene un miglioramento significativo nella descrizione delle energie di legame e degli spettri di eccitazione per gli isotopi dell'ossigeno ricchi di neutroni. Inoltre, lo stesso approccio riproduce bene gli spettri di eccitazione degli isotopi di ossigeno ricchi di neutroni e prevede che il nucleo  $^{24}\text{O}$  si trovi alla *drip line* per neutroni.

Il risultato ottenuto per il secondo stato eccitato di tipo quadrupolare nel nucleo  $^{20}\text{O}$ , mostrato in Figura 5, evidenzia che questo tipo di misure, che permettono di ottenere i valori delle vite medie in nuclei vicini alla *drip line*, sono possibili grazie all'alta segmentazione dei rivelatori come quelli di AGATA. La misura di queste vite medie è un'osservabile ideale per verificare le teorie che



**Figura 6:** Pannello di sinistra: livelli di energia e ramificazioni dei raggi  $\gamma$  per i primi stati eccitati  $9/2^+$  negli isotopi dispari-pari  $^{59-69}\text{Cu}$ . Gli stati  $3^-$  (ottupolo) nei corrispondenti isotopi Ni per i quali è stata misurata la probabilità di transizione elettromagnetica  $B(E3)$  sono indicati da linee tratteggiate. Pannello di destra: dati  $B(E3)$  per gli isotopi Ni dispari-pari ricchi di neutroni rispetto alle previsioni. I calcoli sono stati eseguiti all'interno del modello schematico di accoppiamento particella-fonone di Bohr e Mottelson, per gli stati  $9/2^+$  negli isotopi  $^{61,65,67}\text{Cu}$ . Figura tratta da referenza [2].

si basano sull'approccio *ab initio*.

## Eccitazioni collettive e di particella singola

### Accoppiamento particelle-vibrazioni

A partire dalle prime indagini sulle proprietà delle eccitazioni nucleari è apparso chiaro che i nuclei sono sistemi molto complessi caratterizzati dalla presenza sia di eccitazioni di particella singola che di modi collettivi e dalla loro interazione. È ben noto che la descrizione di questi modi, in termini di configurazioni dei nucleoni e delle loro interazioni sottostanti, richiede la conoscenza delle osservabili elettromagnetiche. Quindi questi concetti di base sono attualmente molto sfruttati, in particolare per nuclei poco conosciuti e/o per eccitazioni e decadimenti non facilmente accessibili sperimentalmente ma molto interessanti per fornire dei test alle teorie moderne.

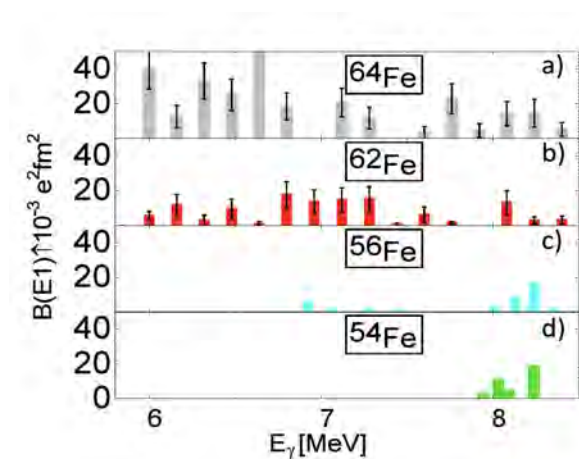
Una questione chiave riguarda le vibrazioni di tipo quadrupolo e ottupolo a bassa energia e i loro accoppiamenti a particelle singole. L'idea che esistano mattoni specifici, vale a dire

eccitazioni di particella singola e modi collettivi, che possono essere utilizzati per descrivere le eccitazioni nucleari si è rivelata cruciale per il progresso dello studio della struttura nucleare. Infatti, il modello a *shell* non può sempre descrivere stati vibrazionali o rotazionali (e altri fenomeni collettivi nei nuclei) e quindi è diventato piuttosto naturale percepire che diversi stati nucleari eccitati possono essere dovuti a eccitazioni di particella singola e di modi collettivi e delle loro combinazioni.

Il lavoro sperimentale esistente, svolto spesso in parallelo con studi teorici sempre più raffinati, ha confermato la rilevanza, per la descrizione dei nuclei atomici, di un modello basato sull'interazione tra i gradi di libertà fermionici e bosonici. In questo contesto, i nuclei dispari sono di particolare interesse, essendo sensibili ai termini nella forza nucleare e alle correlazioni che semplicemente non si presentano nei sistemi pari-pari. In un contesto più ampio, i fenomeni di accoppiamento tra fermioni ed eccitazioni collettive (bosoni) sono ben note nei sistemi a molti corpi in altri campi della fisica. Partendo dai casi emblematici dei sistemi elettronici vanno ricordati gli accoppiamenti elettrone-plasmone nei metalli, o gli

accoppiamenti elettrone-fonone che danno origine alla superconduttività. Questi fenomeni sono le controparti degli accoppiamenti di nucleoni con eccitazioni collettive. Inoltre, contrariamente alle molecole, le scale di energia nucleare sono correlate a quelle vibrazionali e le eccitazioni di una singola particella sono dello stesso ordine, e quindi il loro intreccio ha profonde conseguenze.

Alcune misure recenti in isotopi del ferro  $^{62,64}\text{Fe}$  ottenute con fasci radioattivi a 400-440 AMeV e la tecnica dell'eccitazione Coulombiana e l'emissione di radiazione gamma, presentate in figura 7, mostrano chiaramente che gli isotopi del Fe più ricchi di neutroni hanno un numero maggiore di eccitazioni dipolari. Questo risultato è ben interpretato con le previsioni del modello *Quasi Particle Phonon Model* (QPM), una teoria che è stata ampliata nel corso degli anni per includere accoppiamenti a configurazioni sempre più complesse. Questo meccanismo è quello che dà origine a una maggiore frammentazione degli stati di tipo dipolare.



**Figura 7:** Intensità delle transizioni di tipo dipolare misurata con il rivelatore AGATA per i nuclei  $^{62,64}\text{Fe}$  e con fasci radioattivi. Figura tratta da referenza [2].

## Rotazione e le deformazioni estreme dei nuclei

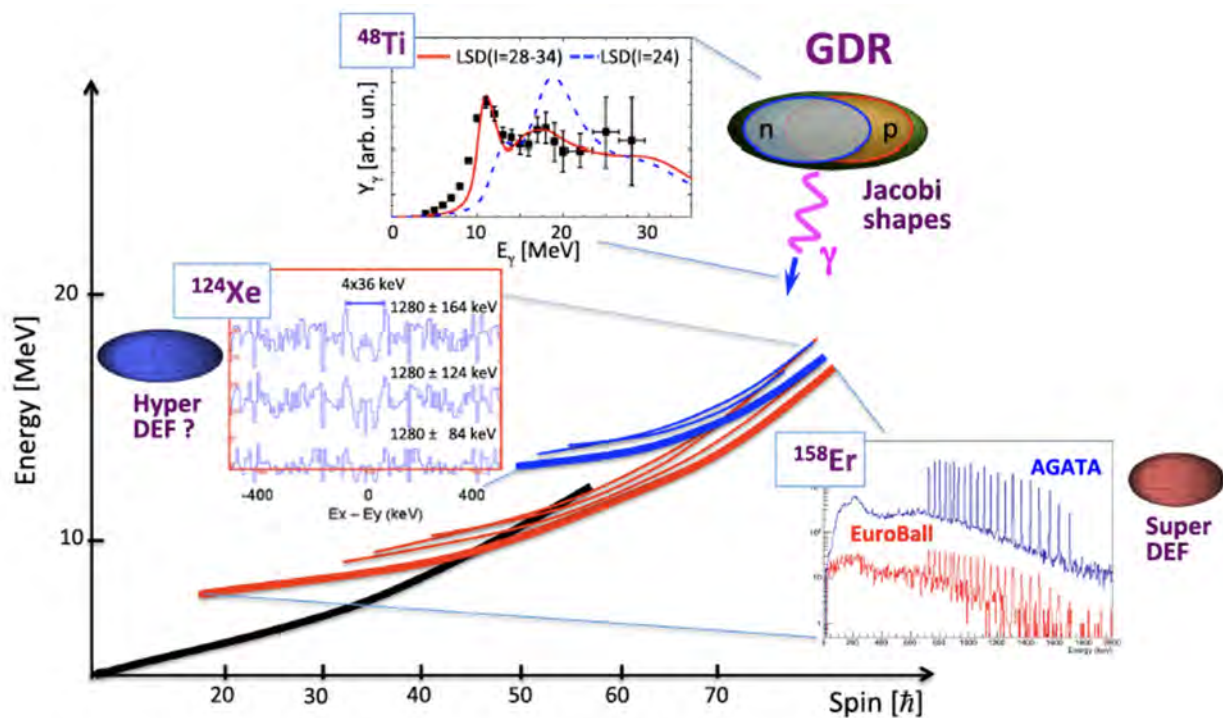
Quando un nucleo deformato ruota, l'energia degli stati dei nuclei (orbitali) cambia valore e quindi gli orbitali con particolari numeri quantici, spesso con alto valore del momento angolare,

che di solito si trovano ad alte energie si abbassano in energia (diventano orbitali così detti *intruder*). In assenza di rotazione, per popolare questi orbitali è necessario andare nelle regioni di nuclei con molti più nucleoni. Questi orbitali *intruder* sono significativamente influenzati dalla frequenza di rotazione. Questo dà origine alla configurazione caratteristica dei nucleoni su cui si costruiscono molte bande rotazionali. Lo studio delle proprietà della bande rotazionali può essere utilizzato per stabilire la natura di queste configurazioni e quindi determinare le energie di *shell* nei nuclei lontani dalla stabilità. Una caratteristica della rotazione è la rottura degli accoppiamenti degli spin dei nucleoni con il corrispondente allineamento degli spin delle coppie di nucleoni. Questo corrisponde al passaggio di un sistema da superfluido a normale.

Nella diseccitazione di uno stato di tipo *intruder* in un nucleo in forte rotazione (quindi da una banda rotazionale) attraverso l'emissione di raggi  $\gamma$ , i nuclei ricchi di neutroni possono a un certo punto diventare instabili contro l'emissione di neutroni, portando alla comparsa del nuovo fenomeno di una emissione  $\gamma$  ritardata, dopo l'emissione di neutroni. Un'analogia emissione di protoni è già stata osservata nei nuclei carenti di neutroni. Sul lato ricco di neutroni, l'emissione di particelle non è ostacolata dalla barriera di Coulomb. Tali misurazioni potrebbero quindi dare immediatamente informazioni sulla posizione dello stato *intruder* all'interno della sequenza dei livelli di particella singola. Studiando stati ad alto spin, isomeri con alti valori della proiezione del momento angolare lungo l'asse di simmetria del potenziale sarà possibile determinare le proprietà e posizioni dei livelli di particella singola e quindi ottenere l'accesso alle proprietà delle *shell* di questi nuclei.

La scoperta di forme di molto allungate dei nuclei, superdeformazioni (SD), in nuclei in rapida rotazione e quindi in nuclei altamente eccitati è stata una gli esempi più eclatanti di cambiamenti e coesistenza di forma all'interno dello stesso nucleo. Oggi sono state misurate più di duecento bande rotazionali di tipo SD per le quali è stato anche stabilito un buon accordo con le previsioni teoriche.

Tuttavia, nella maggior parte dei casi il decadimento delle bande SD verso strutture nucleari



**Figura 8:** Illustrazioni della risposta nucleare ai massimi spin e simulazioni di spettri per esempi selezionati per confrontare risultati ottenuti con la generazione precedente di spettrometri di raggi gamma, come EUROBALL, rispetto alla configurazione a  $4\pi$  con lo spettrometro AGATA. Nella parte in basso sono mostrate la popolazione di strutture altamente allungate in nuclei freddi. La banda fortemente deformata triassiale a più bassa energia in  $^{158}\text{Er}$  è mostrata a destra e le strutture forse iperdeformate in  $^{124}\text{Xe}$  sono mostrate a sinistra. Il decadimento della componente a bassa energia della risonanza gigante di dipolo (GDR) in un nucleo rotante caldo che subisce una transizione di forma del tipo Jacobi che è molto allungata in  $^{48}\text{Ti}$  è mostrato nella parte alta della misura. Lo spettrometro gamma AGATA, in futuro nella sua configurazione  $4\pi$ , consentirà di studiare molto meglio questi fenomeni fisici. Sarà possibile misurare con alta statistica coincidenze  $\gamma$  di alta molteplicità e quindi migliorerà le prestazioni degli apparati usati in passato. Figura tratta da referenza [4].

caratterizzate da deformazioni molto minori non è stato stabilito sperimentalmente. Pertanto, le energie di eccitazione, gli spin e le parità degli stati SD non sono noti, e questa mancanza di informazione ostacola gravemente un confronto dettagliato con i modelli teorici.

L'esistenza di forme ancora più estreme, le cosiddette forme iperdeformate (HD) (che si avvicinano ad un allungamento con un rapporto 3:1) non è ancora stata chiaramente dimostrata sperimentalmente.

Studi correlati al problema delle super e iper deformazioni includono, per esempio, la connessione tra queste strutture estremamente deformate strutture nei nuclei freddi e la "transizione di forma Jacobi" (da prolate a oblate) a temperature sufficientemente elevate (vedi Figura 8). In particolar modo, il ruolo svolto dalla componente a bassa energia della risposta dipolare nella popolazione degli stati SD e HD è un problema

aperto che potrebbe essere affrontato in futuro.

Per studiare i problemi aperti riguardanti le SD nucleari e la ricerca degli stati HD sarà necessario avere a disposizione fasci di ioni stabili ad alta intensità, o addirittura fasci radioattivi molto intensi ricchi di neutroni, che dovrebbero popolare stati di alto momento angolare a causa dell'aumento nella barriera di fissione con numero di neutroni.

Forme nucleari non assiali, ed in particolare configurazioni triassiali, sono d'interesse in quanto possono dare luogo a effetti di chiralità. La chiralità nasce quando un oggetto fisico non può essere sovrapposto con la sua immagine speculare attraverso un movimento continuo, come ad esempio mani umane sinistra e destra o una tripletta di vettori. Il ruolo della chiralità nella struttura nucleare può essere studiato in modo specifico nei nuclei dispari-dispari, dove i tre vettori, quelli dei due momenti angolari del protone

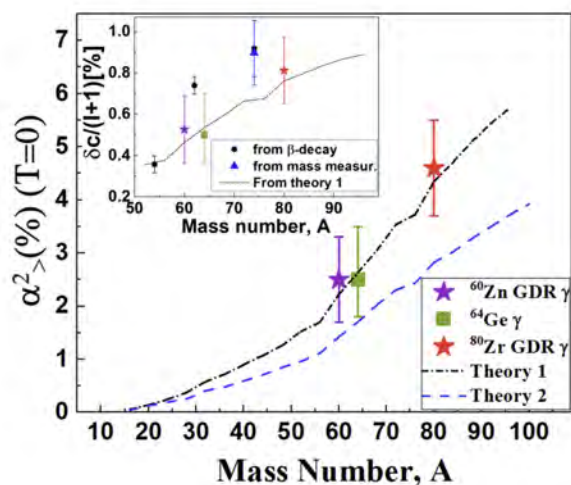
e neutroni spaiati insieme al vettore di rotazione collettiva  $R$ , sono su tre diversi assi. In linea di principio, una tale tripletta di vettori distinti nella teoria del campo medio microscopico nucleare non genera nessuna distinzione dinamica, implica solo che un nucleo ruoti da sinistra a destra o da destra a sinistra e quindi dovrebbe dare energie di rotazione identiche. L'osservazione di sequenze rotazionali non identiche è un segno di meccanismi che vanno oltre il campo medio e la scala della rottura della simmetria fornisce input importanti per una modellazione avanzata e sulla rottura spontanea della simmetria. Gli effetti della chiralità sono stati osservati fino ad ora negli spettri di energia di eccitazione di certi nuclei dispari-dispari e la loro spettroscopia si è dimostrata essere estremamente complicata. Ulteriori dettagli, a quindi ulteriori indagini, sono necessari per comprendere appieno l'influenza della chiralità.

Prove convincenti per la triassialità nei nuclei sono state ottenute con l'osservazione di eccitazioni di tipo *wobbling* (vibrazioni) nella rotazione ad alto spin nei nuclei di lutezio attorno alla massa  $A \sim 160$ . Più recentemente, diverse configurazioni triassiali fortemente deformate a frequenze di rotazione molto alta sono state osservate anche nel nucleo  $^{158}\text{Er}$  e nei nuclei vicini. Il problema aperto è quello di stabilire il valore del momento angolare di questi stati.

La determinazione di deformazioni nucleari di tipo ottupolari ha implicazioni anche in esperimenti che mirano a trovare se esiste un momento di dipolo elettrico atomico diverso da zero (EDM). Questo perché c'è un effetto nucleare che dà origine a dipolo elettrico nell'atomo. Nei nuclei si vuole misurare la differenza di energia tra *parity doublets* che per i nuclei di massa dispari non sono noti. Anche le misure dirette dei momenti ottupolari, molto difficili, dovranno essere fatte in futuro per verificare la teoria. La ricerca sulle nuove simmetrie nucleari esotiche include la ricerca di simmetrie tetraedriche e ottaedriche e la sottostante deformazione nucleare e anche questa ricerca sarà oggetto di futura sperimentazione.

## La simmetria di isospin

La simmetria isospin si basa sul fatto che protoni e neutroni sono particelle (quasi) identiche per la generazione della forza nucleare forte.



**Figura 9:** Miscelazione isospin  $\alpha^2$  e correzione miscelazione isospin  $\delta_c$  in funzione del numero di massa calcolati utilizzando teorie basate sui funzionali densità energia (DFT). Stelle e quadrati sono valori sperimentali ottenuti utilizzando transizioni di tipo  $E1$  che sono proibite nel caso non ci sia la rottura della simmetria di isospin. Figura tratta da referenza [2].

Anche se è noto che la simmetria di isospin è rotta, in piccola parte della forza forte, in modo più significativo dalla forza debole e ancor più dall'interazione elettromagnetica, il formalismo di isospin, che caratterizza gli stati nucleari mediante il numero quantico di spin isotopico (isospin), rimane uno strumento estremamente potente per descrivere i nuclei.

Il concetto di simmetria di isospin è evidente nei cosiddetti nuclei speculari, cioè nuclei con la stessa massa ma con il numero di protoni e neutroni scambiati, per i quali la struttura nucleare è stata trovata essere molto simile. Più in generale, i nuclei isobari (con lo stesso numero di massa  $A$ ) hanno livelli corrispondenti, che possono essere raggruppati in multipletti di stati con lo stesso valore del numero quantico di isospin.

La rottura simmetria di isospin porta a una miscelazione di valori di isospin, e può essere derivata dagli esperimenti. Questa rottura di simmetria dovuta alla forza Coulombiana aumenta



con il numero atomico  $Z$  e per una data massa essa è al suo massimo per nuclei con  $N = Z$ .

Sperimentalmente la rottura della simmetria di isospin può essere studiata esaminando l'*isospin mixing* di stati nucleari, che può essere direttamente accessibile misurando le transizioni dipolari di natura elettrica ( $E1$ ) che dovrebbero rispettare un certo numero di regole tra cui:

- le transizioni di tipo  $E1$  tra stati di uguale isospin sono proibite in nuclei con  $N = Z$ ,
- i valori della probabilità di emissione di radiazione elettromagnetica di tipo  $E1$  tra stati corrispondenti in nuclei speculari dovrebbero essere uguali.

Per le transizioni  $E1$ , oltre agli studi di spettroscopia discreta, si misurano i decadimenti gamma dagli stati di risonanza gigante di dipolo dove si concentra la massima intensità della transizione elettrica dipolare ed è quindi ideale per la ricerca di piccoli effetti nella rottura delle regole di selezione dovute alla simmetria di isospin.

In particolare, si può dedurre il *mixing* di isospin in nuclei con  $N = Z$  prodotti a temperatura finita, in quanto gli stati di risonanza gigante di dipolo sono presenti in nuclei fortemente eccitati. Si può da tali dati dedurre il valore a temperatura zero mediante l'utilizzo di modelli teorici. I risultati riguardanti il *mixing* di isospin ottenuti con questo metodo sono mostrati in Figura 9 insieme ad altri risultati ottenuti con misure di transizioni a bassa energia e alle previsioni teoriche.

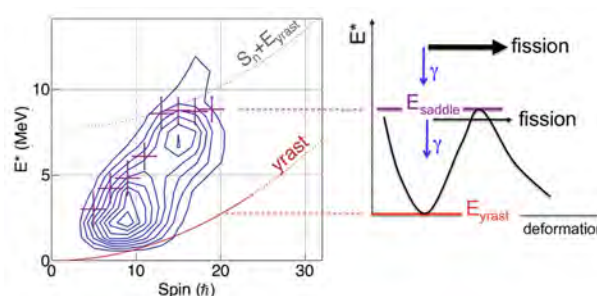
Conoscere il *mixing* di isospin è importante in quanto questa è una informazione utile per dedurre dal processo di decadimento beta, dovuto alla forza debole, il grado di accoppiamento dei quark up e down che è un elemento della matrice Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM). A questo scopo la funzione d'onda del nucleo deve essere corretta e il fattore di correzione, dedotto dai dati esistenti, che è legato all'*isospin mixing*, è mostrato nel riquadro interno della Figura 9. Da notare che il punto a maggior valore del numero di massa è stato ottenuto con il decadimento gamma dalla risonanza gigante di dipolo. I programmi futuri dovranno realizzare una mappatura più precisa dell'*isospin mixing*.

Un altro aspetto interessante dei nuclei speculari è il comportamento della differenza di energia degli stati in funzione dello spin. Sono stati

ottenuti molti dati che mostrano che gli effetti dovuti dell'interazione Coulombiana tra protoni non è sufficiente per spiegare le differenze di energia misurate ma bisogna aggiungere dei termini nel modello a *shell* dei quali bisognerà in futuro chiarirne l'origine.

## I nuclei superpesanti

La ricerca di qual è l'elemento più pesante che possa esistere in natura e quindi di trovare il limite estremo dell'esistenza della materia, ha motivato una grande quantità di lavoro sperimentale e speciali sviluppi che nel corso degli anni hanno spinto quel limite sempre più in alto.



**Figura 10:** Distribuzione in energia e spin della popolazione del nucleo  $^{254}\text{No}$  non misurati con una reazione di fusione tra ioni pesanti (Sinistra). Le linee continue e tratteggiate corrispondono alla linea con energia minima e l'altra corrisponde all'energia di separazione dei neutroni. Le croci, indicano i punti in cui la distribuzione dell'intensità di popolazione del nucleo  $^{254}\text{No}$  scende a metà del suo valore massimo. La figura sulla destra mostra l'energia potenziale del nucleo in funzione della deformazione assiale e illustra come il decadimento  $\gamma$  domina a energie sotto l'energia di sella (*saddle*) mentre la fissione prende il sopravvento a energie al di sopra della barriera. Figura tratta da referenza [4].

Inoltre, dal punto di vista teorico, la comprensione dell'estensione della tavola periodica degli elementi richiede una combinazione di fisica e chimica quantistica per descrivere la disposizione dei nucleoni e degli elettroni. Sono stati costruiti apparati di misura molto complessi e messe a punto tecniche uniche che hanno permesso di raggiungere una sensibilità record per la separazione e rivelazione di eventi rarissimi costituiti da nuclei superpesanti per quali si è po-

tuto determinare la formazione e il decadimento. Per alcuni di questi nuclei, che possono essere popolati più facilmente come il  $^{254}\text{No}$ , si possono studiare gli stati eccitati e i loro decadimenti gamma.

Tali studi forniscono informazioni chiave sulla presenza di effetti collettivi in questa regione di massa. Inoltre, la localizzazione degli orbitali vicino alla superficie di Fermi fornisce un *test* discriminante di modelli di strutture nucleari nei nuclei superpesanti e suggerisce la posizione dell'isola di stabilità per nuclei superpesanti. Quindi nei prossimi anni l'obiettivo è quello di stabilire energie e momenti angolari degli stati di nuclei superpesanti e anche le barriere di fissione.

## Conclusion

I piani futuri riguardanti sia le reazioni a energie stellari con apparati dedicati come LUNA al LNGS, sia gli studi di struttura nucleare con apparati come AGATA e altri apparati come FAZIA che sfruttano la misura di neutroni e particelle cariche in reazioni nucleari energetiche sono molto vasti e ben pianificati. Sono fortemente motivati a fornire informazioni sulle proprietà dei nuclei in condizione estreme di isospin (ovvero della differenza  $N - Z$ ), di massa, di momento angolare, di energia di eccitazione e anche di temperatura.

I laboratori di fisica nucleare nel mondo offrono e offriranno in futuro, con i loro sistemi di acceleratori nuovi o rimodernati, fasci di qualità sempre migliore e varietà di ioni radioattivi sempre più grandi che permetteranno di ottenere risultati unici e molto rilevanti. Questi dati sperimentali saranno utili per la modellizzazione dei processi di nucleosintesi e delle stelle di neutroni e ci permetteranno di scoprire quanto finora è rimasto nascosto e quindi segreto del nucleo atomico.



[1] V. Mossa et al.: *The baryon density of the Universe from an improved rate of deuterium burning*, Nature, 587 (2020) 210.

[2] A. Bracco, G. Duchêne, Zs. Podolyák, and P. Reiter: *Gamma spectroscopy with AGATA in its first phases: New insights in nuclear excitations along the nuclear chart*,

Progress in Particle and Nuclear Physics, 121 (2021) 103887.

[3] J. J. Valiente-Dobón et al.: *Conceptual design of the AGATA 2 array at LNL*, Nucl. Instr. Meth. A, 1049 (2023) 68040. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168040>

[4] W. Korten et al.: *Physics opportunities with the Advanced Gamma Tracking Array: AGATA*, Eur. Phys. J. A, 56 (2020) 137. <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00132-w>



**Angela Bracco:** è professore ordinario di Fisica Sperimentale Nucleare presso l'Università degli Studi di Milano e ricercatore associato dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Dal 2005 al 2011 è stata presidente della Commissione Scientifica Nazionale per la Fisica Nucleare dell'INFN e dal 2012 al 2017 è stata presidente del comitato europeo NuPECC. Dal 2020 è Presidente della Società Italiana di Fisica. Si occupa di esperimenti di struttura nucleare con spettroscopia gamma. È membro di molti comitati internazionali di valutazione e di *advisor* in paesi europei ed extra europei.