



La fisica nucleare con le nuove facilities per fasci radioattivi

Andrea Vitturi



102º Congresso della Societa' Italiana di Fisica, Padova



 nucleo:sistema quantistico di fermioni fortemente interagenti, di due tipi (neutroni e protoni)

La studio della struttura nucleare di "bassa energia" parte dal comportamento caratteristico dei sistemi nucleari vicini allo stato fondamentale (temperatura T~O), bassi valori del momento angolare totale e rapporto N/Z sulla valle di stabilita'. Le caratteristiche dei sistemi variano se modifichiamo l'energia del sistema (aumentando percio' il parametro "temperatura") o il momento angolare totale, tramite ad esempio reazioni di fusione. L'interesse qui e' nello studiare come variano le proprieta' dei sistemi al variare del grado di N/Z, nel mettere in evidenza nuovi aspetti e fenomeni e nel considerare le conseguenze di queste proprieta' sui vari modelli nucleari. Le diverse linee di ricerca in campo nucleare sono legate a diverse scale di energia in gioco, alcune ben separate, altre meno (a bassa energia gradi di liberta' di particella singola e collettivi coesistono)



Una prima importante linea di ricerca: cercare di comprendere la fisica nucleare a partire dai *costituenti fondamentali*. Pertanto descrivere i nuclei come sistemi di nucleoni (magari puntiformi e non-relativistici) interagenti tramite forze realistiche *effettive* nucleone-nucleone (e eventualmente a tre corpi) basate su scambi di mesoni o approcci chirali (perturbativi e nonperturbativi)



R. Machleidt

A partire dalle interazioni basate su EFT diversi gruppi stanno sviluppando modelli e calcoli *ab initio* per nuclei leggeri, con l'obiettivo ambizioso di una consistente descrizione di struttura e reazioni, riproducendo da un lato le proprieta' spettroscopiche di struttura (livelli di bassa energia, funzioni di risposta alle diverse sonde, fattori spettroscopici di particella singola, distribuzioni di densita') in parallelo con le proprieta' dinamiche.

Gruppi attivi in Italia a Pisa, Trento, Bologna

Questi approcci vengono applicati anche ai sistemi fuori dalla valle di stabilita' (tipico esempio ⁶He).

Un esempio: il nucleo ⁶He



Sofia Quaglioni etal No-core shell model with continuum (NCSMC) N3LO NN with SRG renormalization EIHH Effective interactions

Hyperspherical Harmonics



In questa zona di nuclei leggeri le drip line sono relativamente vicine e ormai molto si conosce sperimentalmente sui nuclei fino alle drip line , caratterizzati da energie di legame sempre piu' piccole, (estendendo le conoscenze in alcuni casi anche oltre le drip line). Questa situazione di weak-binding ha da un lato aperto tutto il filone dei nuclei con alone (e dei nuclei borromei) e da un punto di vista teorico portato allo sviluppo di modelli legati al problema del trattamento del continuo e degli open systems.



Ultimo neutrone sulla shell $1p_{1/2}$



$$u(r) \sim e^{-\eta r} \quad \eta \equiv \sqrt{\frac{2m|E|}{\hbar^2}}$$

Se si misura S_n che è circa 0.5 MeV, si deduce che η ~1/6 fm⁻¹.

La dimensione dell' "alone" neutronico nel ¹¹Be è circa il doppio della dimensione del "core".

 $R_0 A^{1/3} = 2.67 \text{ fm}$



Raggi: deviazione dalla usuale legge A^{1/3}





Come misurare o evidenziare un possibile alone? ad esempio "misurando" la densita' in reazioni tipo P+^{12,14}Be in cinematica inversa (ad esempio a 700 MeV/u al GSI ,Ilieva etal)



Misura della densita' del nucleo ¹⁴Be

Scattering elastico analizzato nel modello di Glauber: Sensibilita' a diverse parametrizzazioni della densita'

Distributione angolare elastica

distributioni di densita'





Una linea di ricerca fondamentale: natura dell'interazione di pairing in sistemi nucleari diluiti (ad esempio nel nucleo con alone ¹¹Li, che e' legato solo grazie all'interazione tra gli ultimi due neutroni)



NB Test della pairing via reazioni di trasferimento di due nucleoni, in cinematica inversa $p({}^{11}Li, {}^{9}Li)t$



Per sistemi piu' pesanti, l'approccio ab initio e' tecnicamente improponibile. Inoltre i sistemi nucleari presentano spesso spettri di bassa eccitazione e altri osservabili caratteristici e semplici. L'interesse si muove percio' nel cercare di spiegare, a fronte di un grande numero di fermioni interagenti, il sorgere di semplici patterns e simmetrie.

Spesso questi comportamenti vengono classificati sulla base di analogie con una descrizione geometrica del nucleo (nuclei sferici, nuclei deformati assialmente, deformati con simmetria triassiale, deformazione quadripolare e ottupolare, etc).



Parametri spesso assunti come indicatori delle caratteristiche del sistema sono l'energia del primo stato 2+ (nei nuclei pari-pari), il rapporto E(4+)/E(2+), il valore della B(E2) tra lo stato fondamentale e il primo 2+



Ma altri indicatori sono fondamentali per caratterizzare le proprieta' del sistema, oltre allo spettro e alle transizioni elettromagnetiche: ad esempio i fattori spettroscopici legati alle reazioni di trasferimento di un nucleone o le probabilita' di trasferimento di coppie Da un punto di vista teorico i principali modelli utilizzati nella descrizione dei sistemi meio-pesanti e pesanti possono essere classificati in diverse categorie:

- 1. Modello a shell interagente (principalmente per sistemi medio-pesanti)
- 2. Modelli basati sul funzionale densita' (applicabile da nuclei leggeri come 160 fino ai super pesanti), principalmente con interazioni tipo Skyrme (somme di funzioni d e loro derivate), con estensione alla pairing. Basati su metodi variazionali, producono superfici energia potenziale e ulteriori formalismi devono essere utilizzati per ottenere i livelli oltre lo stato fondamentale
- 3. Modelli basati su simmetrie dinamiche, tipo Interacting Boson Model e sue estensioni (IBM-2 con protoni e neutroni, IBMF con l'accoppiamento ad un nucleone dispari, etc)

Perche' tanti modelli? Forse perche' ogni singolo sistema nucleare e' decisamente complesso, con molte facce, e molti aspetti da descrivere (massa, spettro, transizioni elettromagnetiche, fattori spettroscopici, moti collettivi,)

Modello a shell interagente

Idee di base:

1. Campo medio sufficientemente robusto da giustificare livelli di particella singola, da utilizzare come base per funzioni d;onda a piu' particelle per ulteriori correlazioni

2. Utilizzo di un core inerte e scelta di un set di livelli come spazio modello

3. Scelta di una interazione residua "efficace" che mescoli le configurazioni, e che abbia una derivazione quanto piu' possibile "fondamentale". Interazione a due e tre corpi?

4. Livelli di particella singola nel continuo? Continuum shell model?







La forza tensoriale di monopolo e i livelli di particella singola. Variazione delle chiusure di shell

Central part: global variation of the single-particle energies Tensor part: characteristic behavior of spin-orbit partners, etc.

----- only central
central + tensor







Shell evolution at N=20





Al variare del numero di protoni e neutroni i sistemi cambiano comportamento, con transizione di fase di forma da una situazione ad un'altra. Le diverse situazioni possono essere descritte in termini di diverse simmetrie dinamiche



I punti critici si trovano quasi sempre in corrispondenza di valori di N e Z fuori dalla stabilita'. Un esempio e' dato dalla catena isotopica del Cromo



t_{1/2}=0.49 s

point?



29	64Cu	65Cu	66Cu	67Cu	68Cu	69Cu	70Cu	71Cu	72Cu	73Cu	74Cu	75Cu	76Cu	77Cu	78Cu	79Cu	80Cu
	63Ni	64Ni	65Ni	66Ni	671 li	68NI	69NI	70Ni	71Ni	72Ni	73Ni	74Ni	75Ni	76Ni	7774	78 N i	79Ni
27	62Co	63Co	б4Co	65Co	66Co	01C0	68Co	69Co	70Co	71Co	72Co	73Co	74Co	75Co	76Co		
	35		37		39		41		43		45		47		49		N

Figure from Piet Van Duppen

L'andamento dell'energia del primo stato eccitato $E(2_1^+)$ e del valore della B(E2) tra 0_1^+ e 2_1^+ sembrano indicare una chiusura di shell (N=40) nel ⁶⁸Ni. Ma qual e' la natura degli stati di bassa energia?





Large-scale Monte Carlo Shell Model (MCSM) calculations (Otsuka etal)

Coesistenza di forma anche nei nuclei vicini : il caso del ⁷⁰Ni



et al. submitted to PRL

Un'altro caso di transizione di fase e di co-esistenza di forme: la catena isotopica dello Zirconio



stabili

Transizione di fase negli isotopi dell'Osmio



P.R.John et al., PRC90 (2014) 021301 (R)

State of the art Symmetry Conserving Configuration Mixing (SCCM) calculations performed by T.R. Rodriguez



¹⁹⁶Os is a nearly perfectly γ -unstable nucleus









A. Andreyev et al., Nature 405 (2000) 430

Transizione di fase in sistemi nucleari o dispari-dispari.

Sistemi bosonico-fermionici.

Un esempio per la shell N=40 shell. ⁶⁷Co si trova tra lo sferico (?) ⁶⁸Ni e il deformato ⁶⁶Fe, e presenta coesistenza di livelli ancora sferici e altri ormai deformati



Ni

Со

Fe

Ruolo della interazione di pairing nel canale ad isospin T=0



Nuclei leggeri (non solo N=Z) mettono in evidenza possibili comportamenti a cluster (essenzialmente particelle alfa o alfa-like).

Questi comportamenti dovrebbero essere piu' accentuati ad energie di eccitazione in vicinanza delle soglie di beak-up, o, nel caso di sistemi debolmente legati vicini alle drip-line, gia' nello stato fondamentale.

Fenomeni di clusterizzazione sodo predetti da modelli diversi, microscopici e non, ad esempio antisymmetrized molecular dynamics (AMD]) fermionic molecular dynamics (FMD), BEC-like cluster model, ab initio no-core shell model, lattice EFT, no-core symplectic model and the Algebraic Cluster Model (ACM). Tutti i modelli prevedono fenomeni di Clusterizzazione, ma non necessariamente uguali tra loro.

Esempio: ¹²C

```
Antisymmetrized molecular dynamics
```

(Kanada En'jo)

stato

fondamentale Hoyle state compatto a cluster



Algebraic Cluster Model (Iachello-Bijker) Simmetria D_{3h}

Stato fondamentale a simmetria triangolareHoyle state "breathing mode"



Neutron skin ed energia di simmetria

L'eccesso neutronico porta a distribuzioni di densita' neutroniche e protoniche con raggi diversi e la presenza pertanto di una neutron skin

$$\Delta r = < r_n^2 > 1/2 - < r_p^2 > 1/2$$

Raggio dei protoni da scattering di elettroni
Raggio dei neutroni da scattering elastico di protone, scattering inelastico della risonanza gigante di dipolo e di spin-isospin, da dati da raggi X antiprotonici



parametri nel termine di simmetria



Il valore della skin e' strettamente correlato, ad esempio, con l'energia di simmetria della EoS, e costituisce un importante test per le varie parametrizzazioni usate per i calcoli di campo medio

cf J. Roca Maza e GL Colo'

La presenza di una skin neutronica induce nuovi modi di eccitazione, come la Risonanza Pygmy di Dipolo (PDR)

Distribuzione della strength di dipolo in nuclei ricchi di neutroni



In termini macroscopici la PDR viene interpretata come dovuta ad oscillazioni della skin rispetto al core protonico-neutronico. La strength totale nella zona della PDR (in ogni caso una piccola frazione della EWSR) e' pertanto legata alla ampiezza della skin e pertanto al parametro di asimmetria



A differenza della normale Risonanza Gigante di Dipolo, di natura praticamente isovettoriale, la Risonanza Pygmy ha una natura mista isoscalare/isovettoriale. E' percio' eccitata sia in reazioni di tipo elettromagnetico, tipo γ, γ' , sia in reazioni inelastiche indotte da proiettili di tipo isoscalare, tipo α, α' o ${}^{17}O, {}^{17}O'$.



L. Pellegri et al., PLB 738 (2014) 519

Lanza, Litvinova etal

Reazioni con nuclei esotici

• fasci di nuclei esotici sono ovviamente fondamentali per lo studio delle proprieta' spettroscopiche dei sistemi lontani dalla stabilita' tramite reazioni in cinematica inversa (reazioni tipo (p,d) o simili)

ma

• altrettanto interessanti gli aspetti relativi ai meccanismi di reazione che presentano caratteristiche spesso diverse da quelle associate con sistemi stabili Alcune tematiche interessanti

Reazioni di break-up di nuclei debolmente legati

- meccanismo di reazione
- modelli per la trattazione degli stati del continuo
- effetti del break-up sulle reazioni di scattering elestico e di fusione sopra e sotto la barriera (aumento o diminuzione?)



- breakup elastico e con eccitazione del core
- break-up di nuclei con aloni con due neutroni: processo sequenziale o simultaneo?

Scattering elastico: Nuclei "normali" vs nuclei "halo "



La distribuzione angolare elastica evidenzia un assorbimento a lungo raggio. Cio' significa che, grazie alla distribuzione estesa dell'alone, I due nuclei interagiscono tramite una interazione NUCLEARE a grande distanze (> 15 fm)

Alessia Di Pietro etal

Reazioni di trasferimento per popolare e evidenziare stati collettivi di pairing ad alta energia (Giant Pairing Vibration)



Synthesis of neutron-rich heavy and super-heavy elements: isospin dependence of compound nucleus formation and decay at high energy

- Novel information can be obtained by the study of the fission cross section across long isotopic chains of compound nuclei, extending from the neutron-rich to neutron-poor side
- Fragment production at higher energies
 Dynamical component: enhanced by a factor 1.5-2 in the neutron rich especially for
 heavier IMF, while the statistical component is almost equal in both system



Grazie a

Giovanna Benzoni Alessia Di Pietro Silvia Lenzi Francesco Recchia Daniele Mengoni Tommaso Marchi Javier Valiente Dobon

