La Fisica Nucleare a Firenze:
sperimentazione futura con i fasci di SPES.... e non solo
ovvero

"Reazioni nucleari con fasci instabili"

- X Acceleratore SPES v. presentazione di Adriana Nannini
- X Rivelatore FAZIA ---- v. presentazione di Giacomo Poggi
- ✓ Alcune prospettive di Fisica



Introduzione

direzioni di sviluppo

modelli nucleari

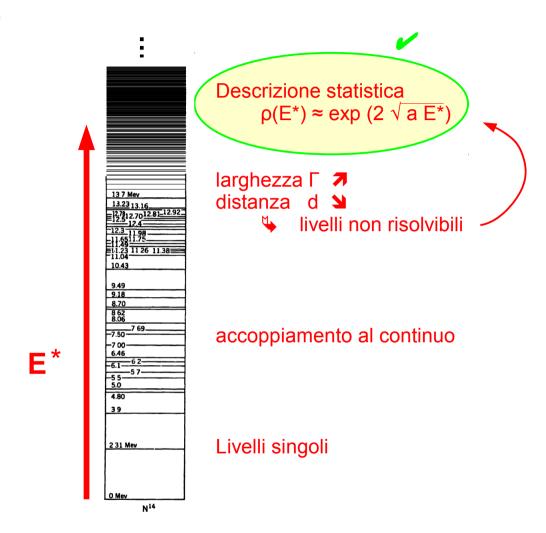
Temi di fisica dell'isospin

proprieta` "termostatistiche"

comportamenti dinamici

Finora la ricerca si e`sviluppata in tre principali direzioni:

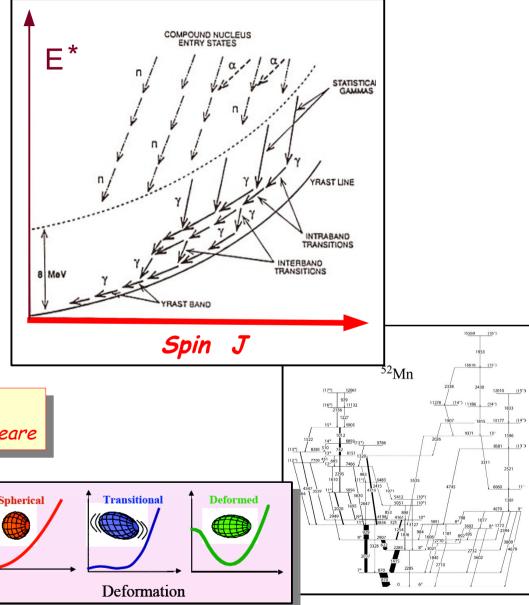
1) Energia di eccitazione E* (acceleratori)



Finora la ricerca si e`sviluppata in tre principali direzioni:

Energia di eccitazione E* (acceleratori)

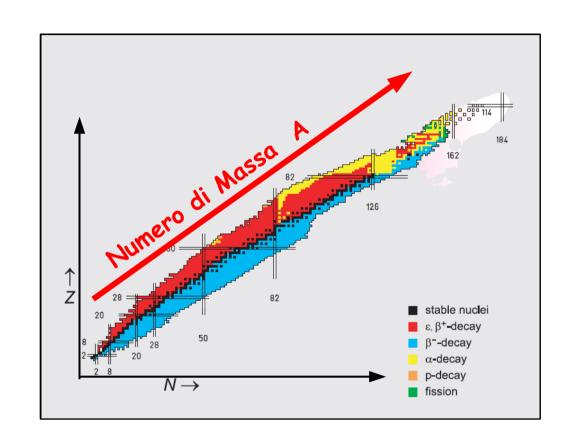
2) Spin J (grandi array γ)



→ struttura nucleare

Finora la ricerca si e`sviluppata in tre principali direzioni:

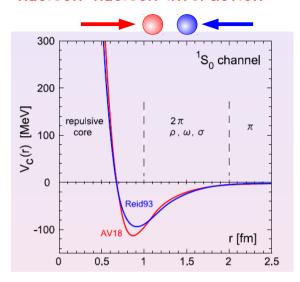
- 1) Energia di eccitazione E* (acceleratori)
- 2) Spin J
 (grandi array γ)
- 3) Massa A (fasci di ioni pesanti)

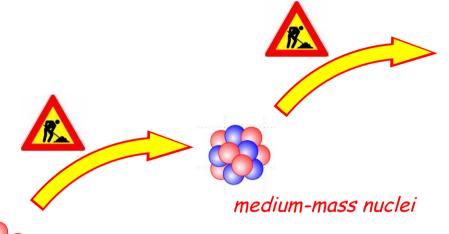


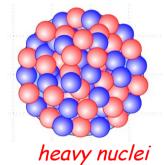
Grande varieta` di proprieta` dei tanti nuclei studiati

⇒ riconducibile a pochi elementi-base??

nucleon-nucleon interaction







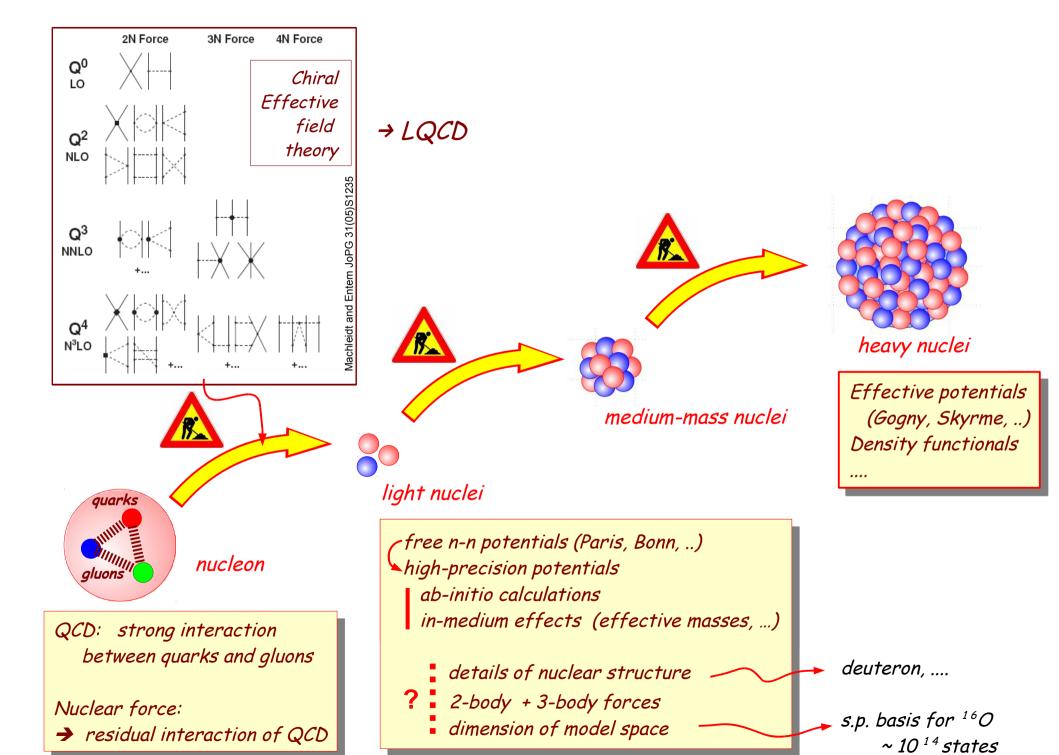
Effective potentials (Gogny, Skyrme, ..) Density functionals

light nuclei

free n-n potentials (Paris, Bonn, ..)
high-precision potentials
ab-initio calculations
in-medium effects (effective masses, ...)

details of nuclear structure
2-body + 3-body forces
dimension of model space

s.p. basis for 160
~ 10 14 states



Molti modelli per descrivere aspetti "particolari" ma una teoria unitaria e` ancora lontana...

Modelli sono necessari per comprendere meglio il nucleo nei suoi molteplici aspetti

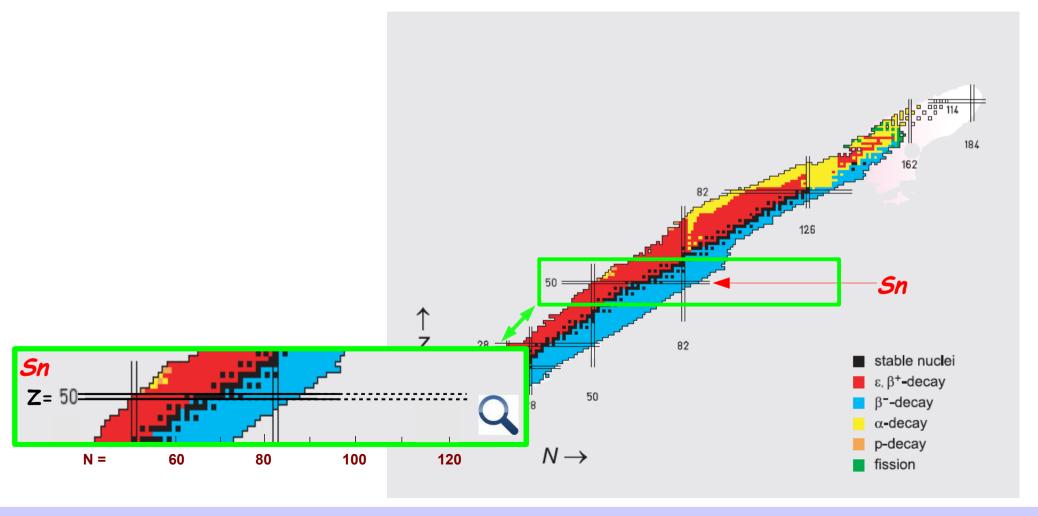
I modelli necessitano di

- buona guida teorica
- maggior numero possibile di dati sperimentali

I modelli permettono buone interpolazioni, ma le estrapolazioni sono incerte

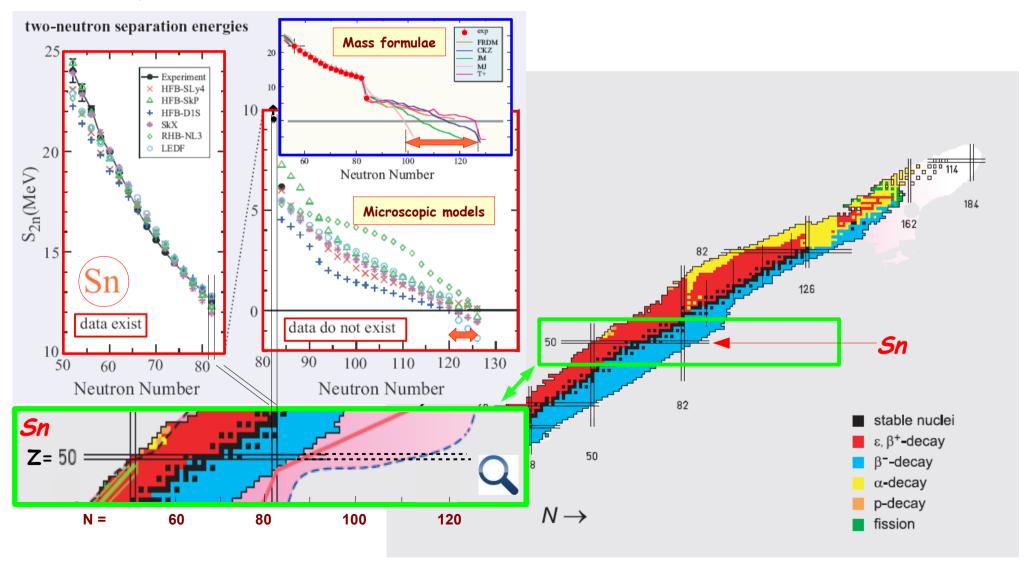
Un esempio:

two-neutron separation energies



I modelli permettono buone interpolazioni, ma le estrapolazioni sono incerte

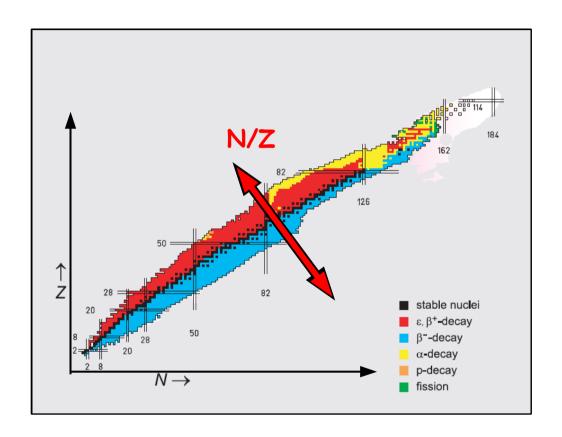
Un esempio:



Nuova direzione di sviluppo futuro

4) Asimmetria N/Z [o "isospin"]

```
(fasci di ioni "esotici": SPES - LNL,
SPIRAL2 - Ganil,
FRIB - MSU,
FAIR - GSI,
ISAC - Triumph,
RIBF - Riken,
EURISOL (?)
```



Temi di interesse

Nucleare

cambiamenti di struttura

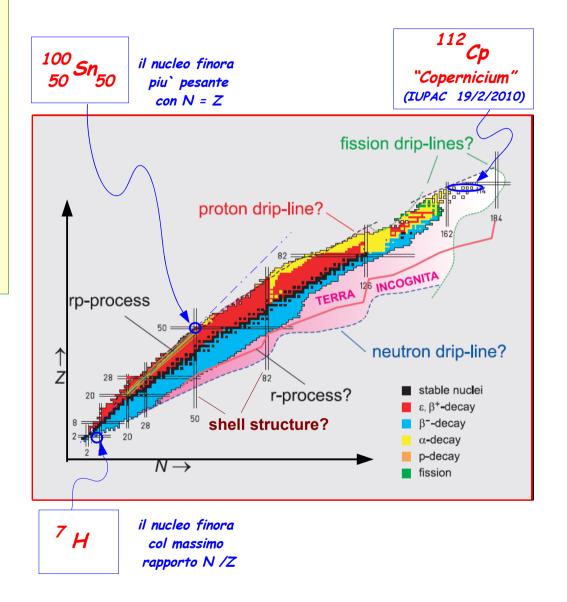
(cambiano le "shell" ed i numeri magici ?)

limiti di esistenza dei nuclei

(dove sono le "drip-lines" ?)

- ✓ equazione di stato
- ✓ comportamenti dinamici

.....



Temi di interesse

Nucleare

cambiamenti di struttura (cambiano le "shell" ed i numeri magici ?)

limiti di esistenza dei nuclei (dove sono le "drip-lines"?)

- ✓ equazione di stato
- ✓ comportamenti dinamici

Astrofisico

meccanismi stellari nucleosintesi stelle di neutroni

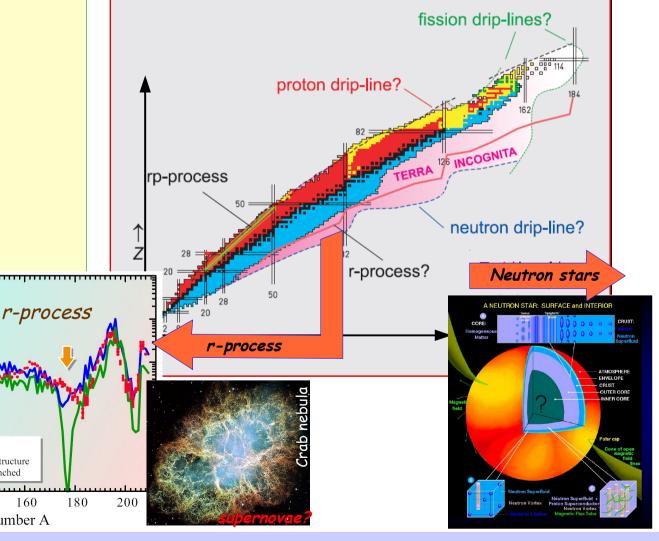
r-process abundances

pronounced shell structure shell structure quenched

120

160

mass number A



Alcune idee per futuri esperimenti con fasci instabili:

- Equazione di Stato ed Energia di simmetria
- Competizione fissione-evaporazione
- Temperatura limite
- Densita` dei livelli
- Odd-even staggering dei frammenti
- Transizioni di fase
- Trasporto di isospin
- Risonanze di Dipolo Dinamico
- Emissioni a "midrapidity"
- ·

Proprieta` termostatistiche dei nuclei

Comportamento dinamico dei nuclei

Energia di simmetria E_{sym}

➤ Ingrediente fondamentale alla base di (quasi) tutte le ricerche su reazioni con fasci esotici

energia di

I=(N-Z)/A

Energia di un sistema nucleare (EOS: eq. di stato)

$$simmetria \ E_{sym}(\rho, T,...)$$

$$E(\rho, I,...) = E(\rho, I=0,...) + \left(\frac{1}{2} \cdot \partial^2 E/\partial I^2\right)_{I=0} I^2 + ...$$

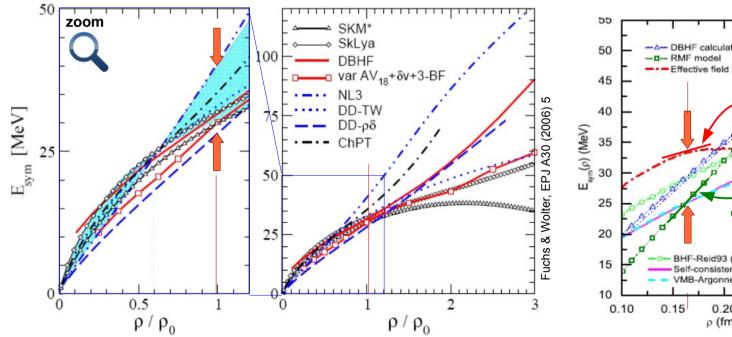
$$I = (N-Z)/A = asimmetria \ di "isospin"$$

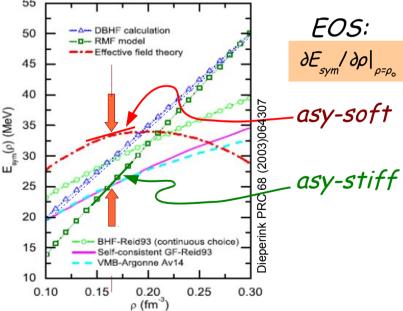
$$O = densita` nucleare$$

$$E(N, Z) = E(N, Z) = C(N, Z)$$

Cfr. formula di Weizsäcker (ρ = ρ_o , T=0):

$$E(N,Z) = -a_v A + a_s A^{2/3} + (a_a(N-Z)^2/A) + a_c Z^2/A^{1/3} + Emic$$





Incerto anche valore di E_{sym} per $\rho = \rho_0$ (exp. 30 ± 4 MeV)

 $(\rho_0$ densita` normale dei nuclei ≈ 0.17 fm⁻³)

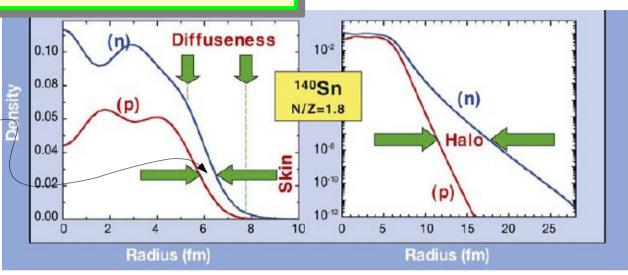
Effetti di N/Z su processi di Fusione e di Fissione

Canale di ingresso:

nuclei esotici con elevato N/Z
hanno una "neutron-skin"

che favorisce la fusione

(→ Fusione sotto barriera)



Canale di uscita:

Al variare di N/Z variano sensibilmente

- Altezza della barriera di fissione
- Configurazione di fissione

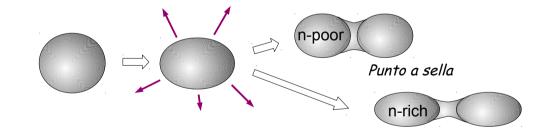
 (piu` elongata per nuclei ricchi di neutroni)

Deformazione nucleare → "fission - delay"

Cambia la competizione con evaporazione

(evap. pre-saddle, multiple-chance fission)

Accoppiamento fra modi collettivi e gradi di liberta` intrinseci



Dipendenza di barriera di fissione e · <u>viscosita`</u> nucleare da isospin N/Z

Fasci esotici: competizione di modi di formazione e decadimento partendo da isotopi iniziali con N/Z molto diverso

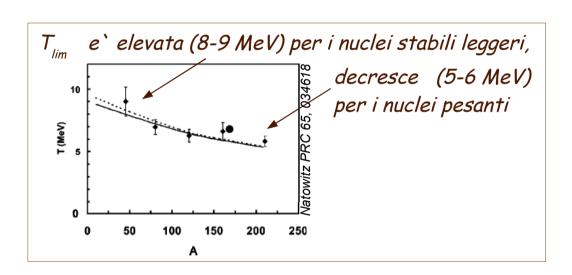
Esperimenti ai LNL con fasci di SPES

"Temperatura limite"

Nuclei altamente eccitati:

studi (exp. e teorici) dei modi di decadimento \rightarrow temperatura limite T_{lim}

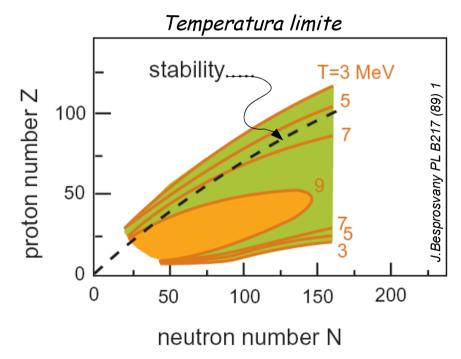
- per $T \le T_{lim}$ il nucleo (~ liquid drop) decade per evaporazione di particelle
- per $T > T_{lim}$ il nucleo e` instabile e si frammenta (decadimenti esotici, correlazioni)



Allontanandosi dalla valle di stabilita`, T_{lim} decresce con massimo spostato verso I nuclei ricchi di neutroni

(effetto combinato di repulsione Coulombiana - che non dipende da T - ed energia di simmetria - che dipende da T)

apparato con: buona <u>risoluzione isotopica, granulare</u> e a grande <u>angolo solido</u> (e.g. FAZIA)



"Temperatura limite"

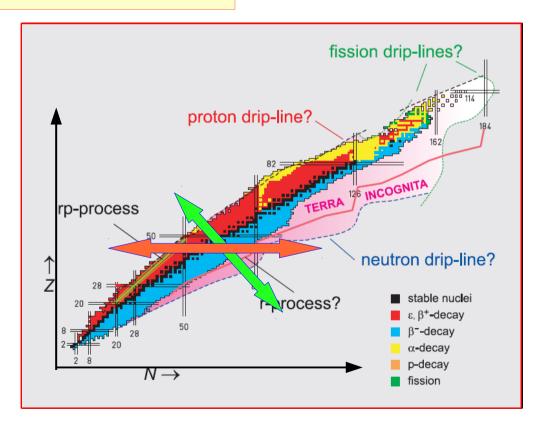
Dipendenza di T_{im} da massa A → informazioni su

- a) temperatura critica T_{crit} della Materia Nucleare infinita
- b) parte isoscalare della interazione efficace nucleone-nucleone; Dipendenza di T_{lim} da isospin N/Z \rightarrow informazioni su
 - c) parte isovettoriale della interazione efficace nucleone-nucleone

Con fasci di nuclei esotici si potranno studiare i modi di diseccitazione di <u>serie di isobari</u> sia sul versante p-rich che n-rich, (o quantomeno quelli di <u>serie di isotopi</u>)

[e.g. exp a Ganil (Indra + Vamos) 34,36,40 Ar + 58,60,64 Ni \rightarrow 92,94,96,100,104 Pd]

LoI per SPIRAL2 a Ganil



18

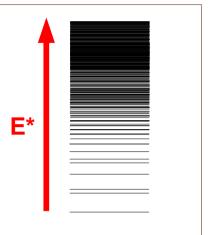
Densita` dei livelli nucleari

Densita` di livelli nucleari:

- a bassa E*, dipende dalla struttura nucleare (shell effects) vicino alla Fermi-energy
- ad alta E*, descrizione statistica

$$\rho(E^*) \approx \exp(2\sqrt{a}E^*)$$

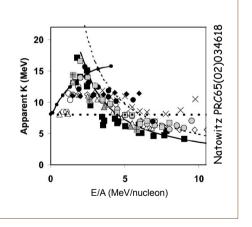
con parametro "a" = A/k e k = k(A,I,T,...)



"k" e` difficile da calcolare microscopicamente

Esperimenti:

- k~ 8 MeV per E*/A ≤ 1-2 MeV/nucl.,
- k tende a salire per E*/A maggiori (k ~ 12-14 MeV (?))
- per poi ridiscendere per E*/A> 4-5 MeV/u
 (raggiungimento di T_{lim}?)

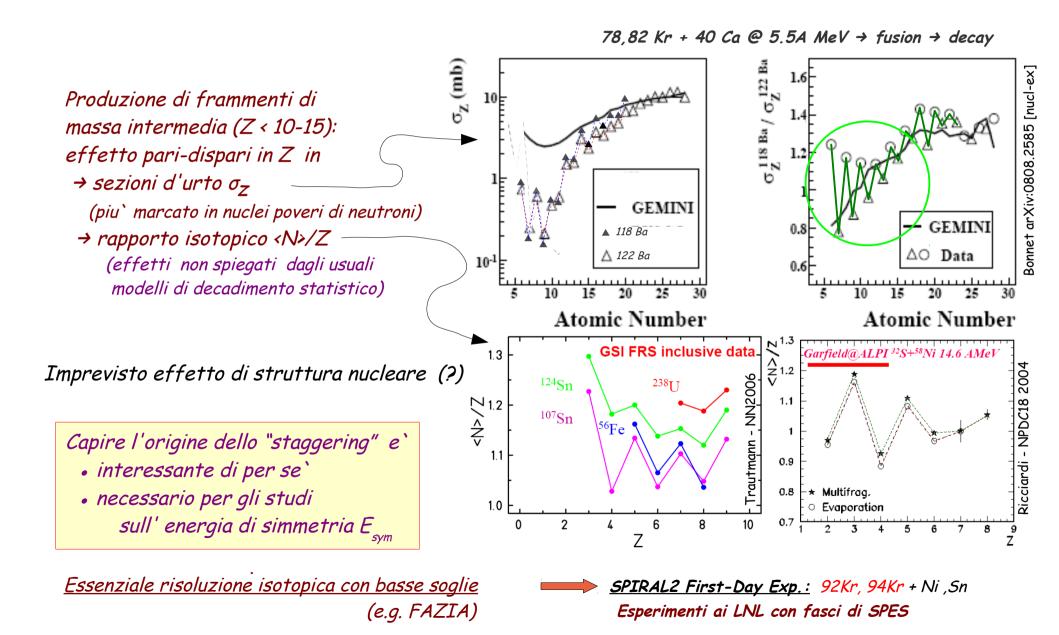


Dipendenza di "k" da N/Z scarsamente conosciuta,

 \rightarrow informazioni sulla dipendenza dalla temperatura dell' energia di simmetria: $E_{\text{sym}}(T)$

LoI per SPIRAL2 a Ganil

"Odd-even staggering" in Z



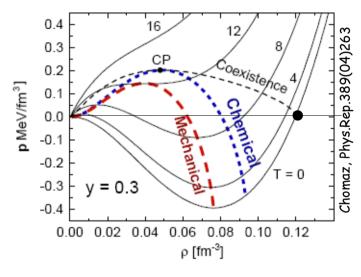
Transizioni di fase liquido-gas

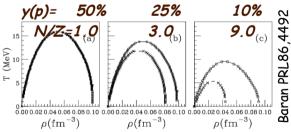
Esp. a energie di Fermi (20-50AMeV): "mutiframmentazione" ⇒ decadimento di una sorgente eccitata con produzione simultanea di molti frammenti (IMF)

→ interpretazione in termini di <u>transizione di fase liquido-gas:</u> il nucleo eccitato espandendosi entra nella zona spinodale (instabilita` "meccanica": fluttuazioni di densita` vengono amplificate e tutto il volume del fluido si separa in due fasi)

Il sistema "nucleo" e' interessante perche':

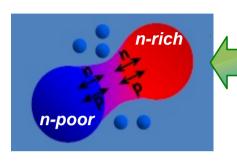
- e` un sistema "finito" (non vale limite termodinamico)
- e` un fluido a due componenti (protoni e neutroni)
- nuovo grado di liberta` (concentrazione)→ instabilita` chimico-meccanica
- ⇒ fase liquida → n-poor fase gassosa → n-rich





Fasci instabili: possibilita` di studiare cosa accade quando le concentrazioni dei due fluidi sono apprezzabilmente diverse

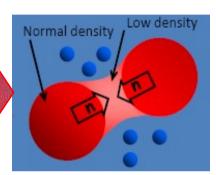
Meccanismi di trasporto dell'isospin



Fenomeni di trasporto dell'isospin possono dipendere da

- gradienti di isospin (isospin "diffusion") in reazioni fra nuclei con diverso N/Z
- gradienti di densita` (isospin "migration" or "drift") anche in reazioni fra nuclei con lo stesso N/Z





<u>Collisioni semiperiferiche:</u> dissipazione di energia cinetica del moto relatico

- → stima del tempo di interazione
 - → scale temporali di equilibrazione dei vari gradi di liberta`

<u>Fasci instabili:</u> studio della dipendenza di aspetti dinamici del meccanismo di reazione dal diverso rapporto N/Z dei nuclei collidenti

→ dettagli dell' Equazione di Stato (in particolare dipendenza da isospin)



Studi ai LNL con Garfield usando sia fasci stabili, sia i fasci di SPES

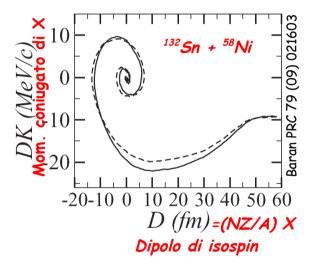
23/4/2010 - Congressino 22

Risonanze di Dipolo Dinamico

Collisione di nuclei con forte asimmetria di isospin N/Zn-poor \leftrightarrow n-rich

Baricentri di protoni e neutroni non coincidono

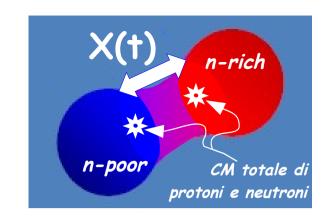
(fenomeno dinamico, analogo a quello -statistico- delle GDR)



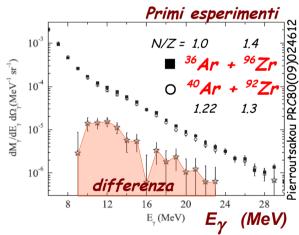
"dipolo" di isospin D(t)

varia nel tempo →

D=0 per Nucleo Composto



raggi y (distr. angolare)



→ effetti diverranno piu` evidenti con fasci esotici!!

Fenomeno dipendente da:

- dinamica del processo di fusione
- caratteristiche del fluido (viscosita`)
- forza di richiamo (ightarrow energia di simmetria $E_{\scriptscriptstyle {
 m sym}}$)



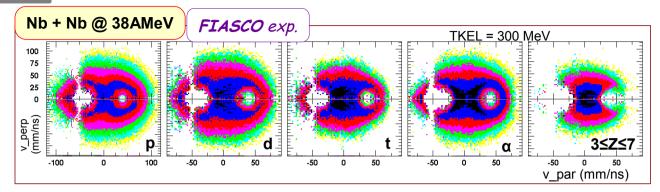
LoI per SPES: cfr. 133Cs+48Ca vs. 141Cs+40Ca \rightarrow 181 Re o 124Sn+56Fe vs. 90Kr+90Zr \rightarrow 180 Os

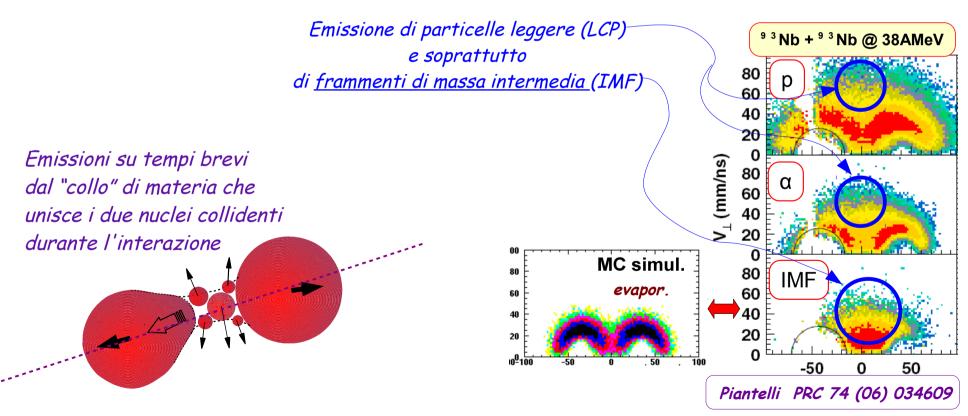
Emissioni a "midrapidity"

* Uno dei temi di ricerca principali del gruppo di Firenze negli ultimi anni (con fasci stabili dei LNS)

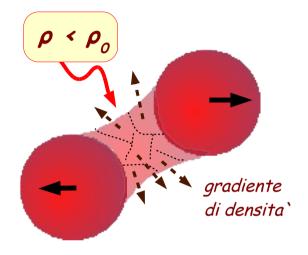
Collisioni semiperiferiche a energie di Fermi (20-50AMeV)

→ emissioni a "midrapidity"





Emissioni a "midrapidity"



Gradiente di densita` provoca

arricchimento di neutroni

Intensificazione dell'effetto con fasci "n-rich"

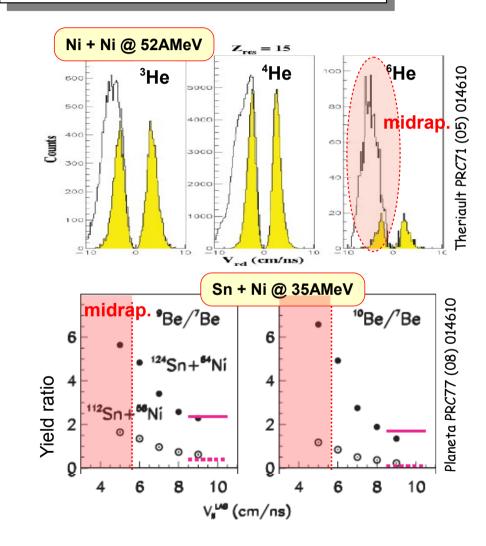
(necessari apparati con ottima

risoluzione isotopica (e.g. FAZIA))

informazioni su energia di simmetria

→ dinamica ↔ EOS ("asy-stiff" o "asy-soft"?)

Emissioni a "midrapidity" di IMF (ma anche di LCP) sono fortemente arricchite in neutroni



.... e altro ancora

Come gia` accaduto piu` volte in passato, e` possibile che le cose piu` interessanti non le abbiamo ancora neppure immaginate.

Infatti, il nucleo e` un tipico sistema "complesso", in cui
.. il "tutto" e` molto piu` della semplice somma delle sue parti

ovvero

"...at each level of complexity entirely new properties appear, and the understanding of the new behaviors requires research which I think is as fundamental in its nature as any other." da "More is different", di P.W. Anderson*, Science 177 (1972) 393

*premio Nobel per la Fisica 1977