

*Attività e prospettive future della  
Collaborazione NUCLEX a LNL.*

***S.Piantelli***  
***INFN – Sezione di Firenze***



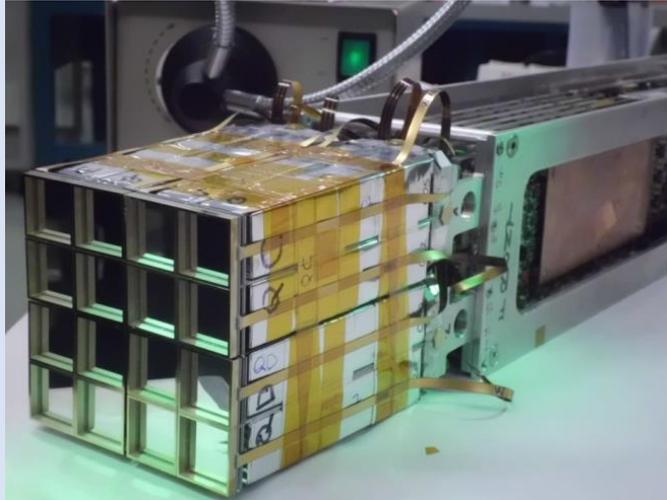
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

# **NUCLEX:** una sigla, tante attività, un filo conduttore

- Nuclex si occupa dello *studio sperimentale dei meccanismi di reazione in collisioni tra ioni pesanti in un vasto range di energie di fascio*, da poco oltre la barriera coulombiana fino alle energie di Fermi
- Alla sigla afferiscono diverse sedi INFN (FI, LNL, PD, CT, NA). Non si può dimenticare la sezione di BO, ora priva di FTE, ma che in passato ha dato un grosso contributo alle attività di NUCLEX
- L'attività si concentra ai LNL, LNS e a GANIL (Caen, France)
- A **GANIL** e ai **LNS** l'attività sperimentale è/è stata incentrata sulle **energie di Fermi**
  - **Tematiche principale:** trasporto di isospin, energia di simmetria e equazione di stato della materia nucleare
- A **LNL** vengono utilizzati fasci di **bassa energia** e – a breve – verranno utilizzati i **fasci di SPES**.
  - **Tematiche principali** sviluppate in anni recenti:
    - Discrepanze fra le previsioni di modello statistico e i processi di decadimento osservati in nuclei composti leggeri ( $\alpha$  clustering, pre-equilibrio) e pesanti ( $^{88}\text{Mo}$ , pre-equilibrio)
    - trasporto di isospin a energie  $< 20\text{AMeV}$

# Reazioni alle energie di Fermi: FAZIA

- **FAZIA**: rivelatore modulare con unità di base un **blocco** costituito da:
  - **16 telescopi** Si (300 $\mu$ m) – Si (500 $\mu$ m) – CsI(Tl) (10 cm, letto da un fotodiodo)
  - Elettronica di Front End (->segnali digitalizzati)
  - Alimentazioni



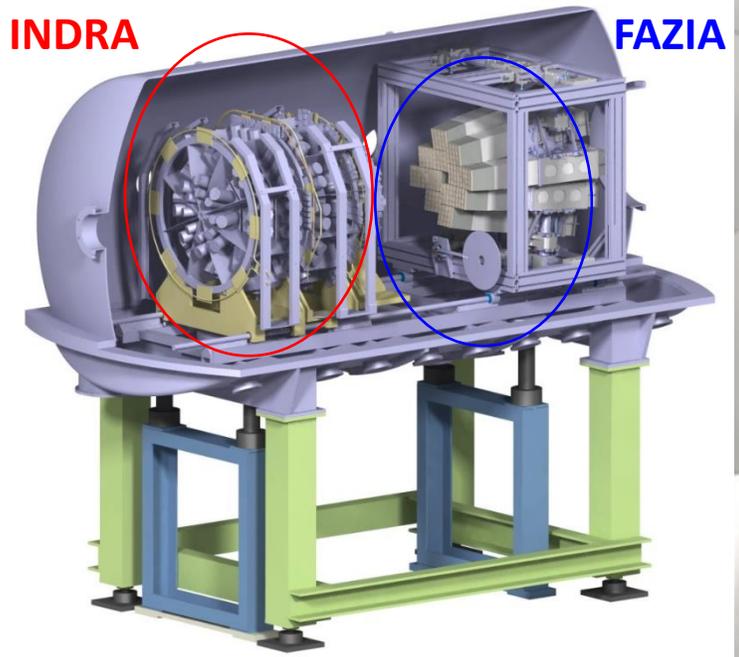
- Identificazione da:
  - $\Delta E-E$  per ioni che attraversano il Si1 => **identificazione in A fino a Z=25**
  - **PSA** (correlazione fra parametri legati alla forma del segnale) per ioni stoppati in Si1 => **identificazione in Z fino ad almeno 54** se il range è superiore di una soglia crescente con Z (30  $\mu$ m per C); **identificazione in A fino a Z=20** (se range > 150 $\mu$ m per C e crescente con Z)
  - **PSA in CsI(Tl)** per **particelle leggere e veloci**

**Prestazioni concorrenziali con quelle di uno spettrometro per ioni medio leggeri**

**FAZIA è il frutto di un'estesa collaborazione internazionale, principalmente franco-italiana**

# FAZIA+INDRA@GANIL

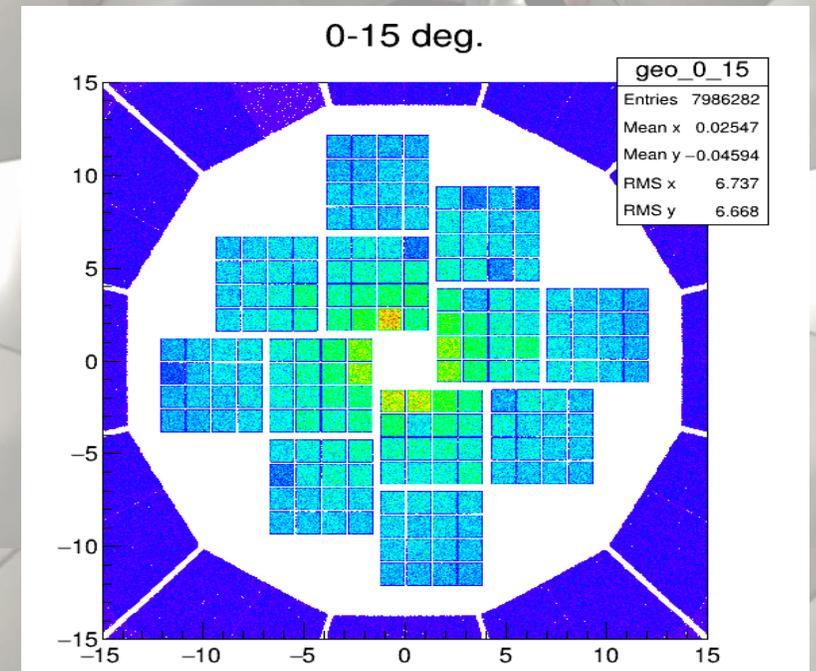
Al momento la collaborazione dispone di 12 blocchi di FAZIA, che da maggio 2019 sono accoppiati al rivelatore INDRA a GANIL



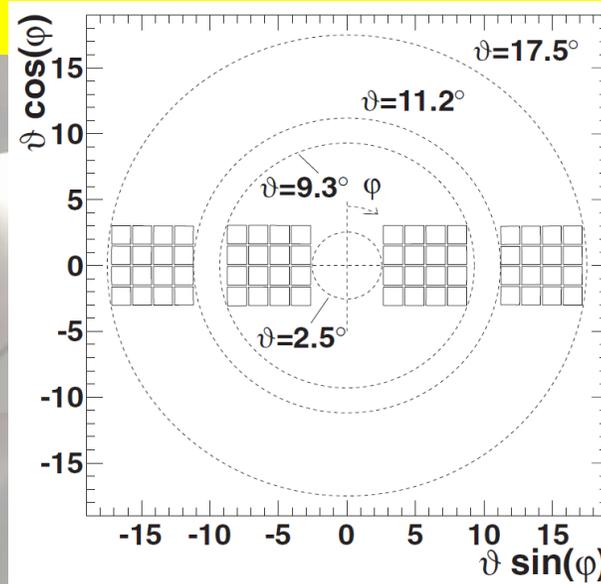
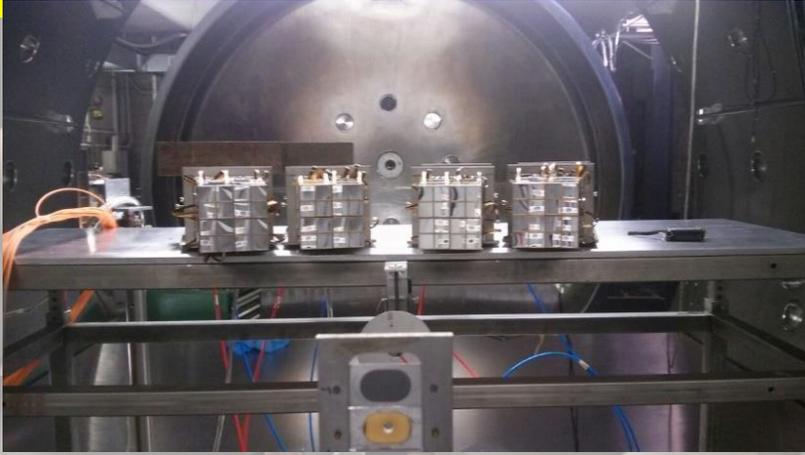
Prima campagna di misura INDRA-FAZIA a GANIL sui sistemi  
 $^{58,64}\text{Ni} + ^{58,64}\text{Ni} @ 32,52 \text{ A MeV}$



**Tematica principale della prima campagna:** studio della dipendenza dalla densità dell'energia di simmetria dell'equazione di stato della materia nucleare sfruttando osservabili legate alla composizione isotopica del QP

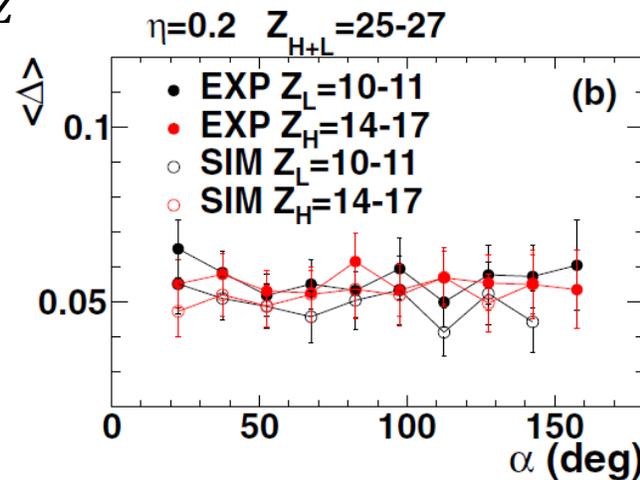
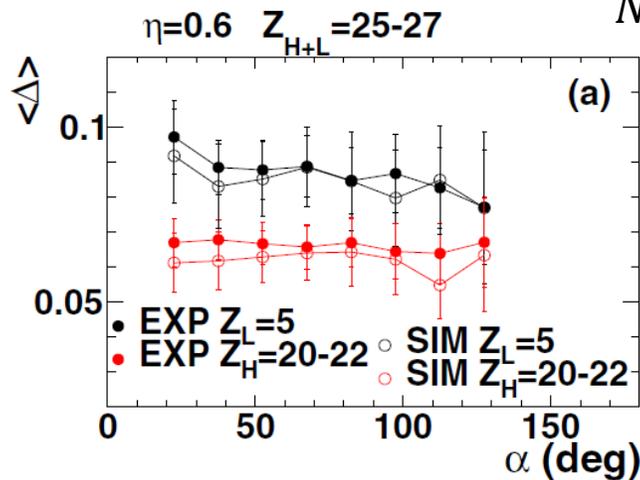


Anche con un setup parziale (4-6 blocchi) sono state effettuate campagne di misura ai LNS: ad esempio  $^{80}\text{Kr}+^{40,48}\text{Ca}@35\text{AMeV}$



Studio dei fenomeni di trasporto di isospin (drift e diffusion)  
 Studio del QP breakup, con misura di Z e A di entrambi i frammenti di breakup in coincidenza

$$\Delta = \frac{N - Z}{N + Z}$$



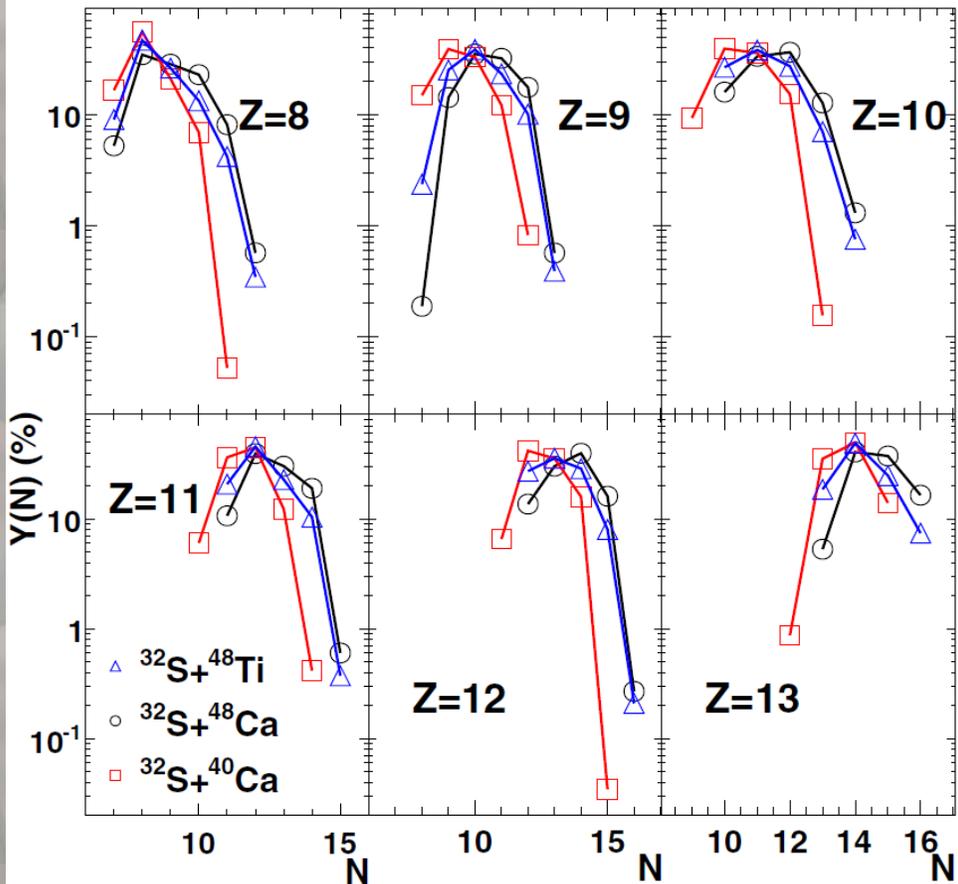
**Asimmetria  $\Delta$  del frammento leggero dipendente dal pattern di emissione per breakup asimmetrico del QP**

Piccolo  $\alpha$ : configurazione allineata, con il frammento piccolo fra QT e frammento grosso

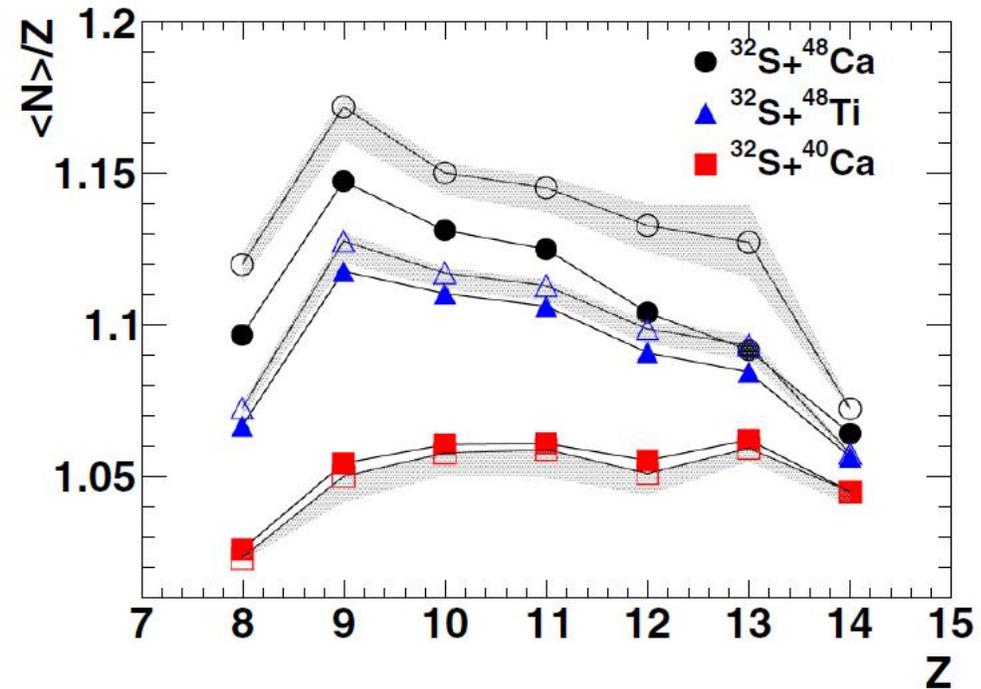
Possibile link con tempo di breakup, non confermata dal modello AMD+GEMINI++

# Il trasporto di isospin sotto 20A MeV: $^{32}\text{S}+^{40,48}\text{Ca}@18\text{A MeV}$ a LNL

Composizione isotopica del QP al variare del target



In collisioni semiperiferiche la composizione isotopica del QP dipende da quella del target => evidenza di **isospin diffusion**



Questo tipo di misura richiede la risoluzione isotopica per frammenti di taglia media

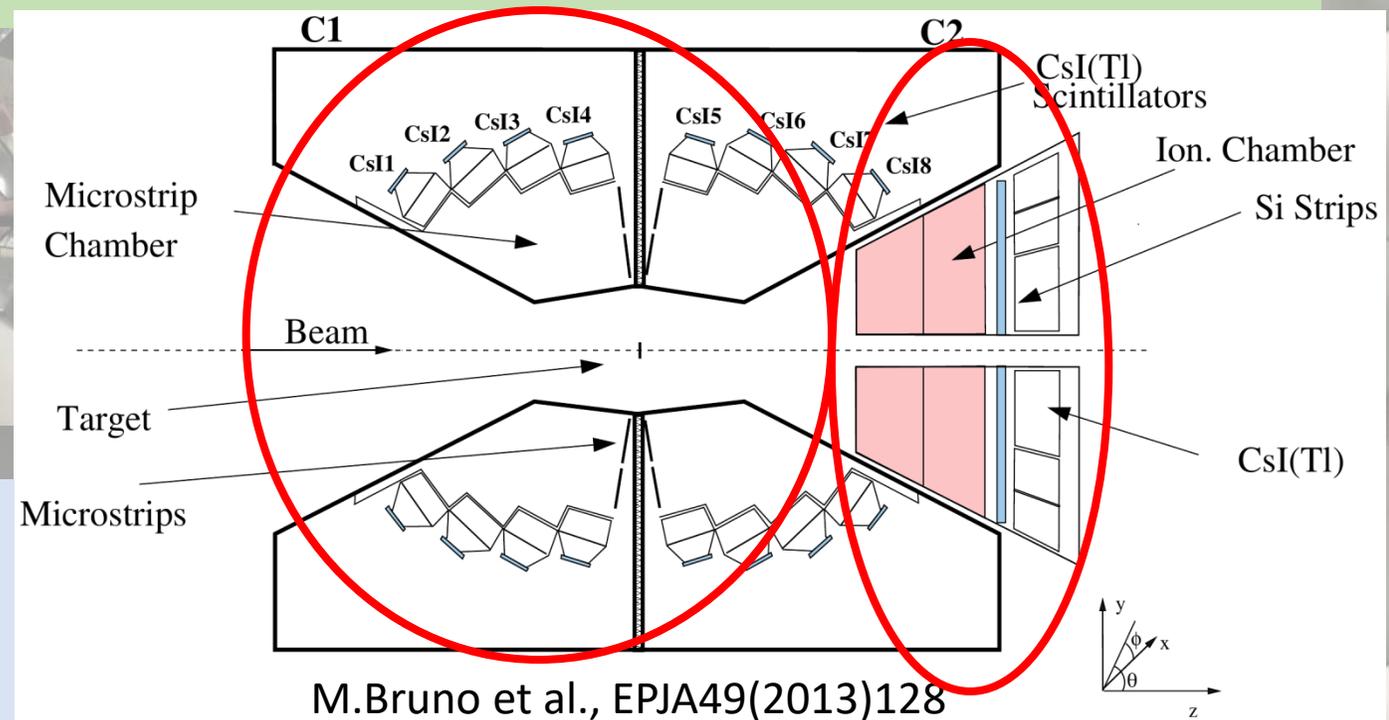
# L'apparato con cui è stata effettuata la misura è **GARFIELD + RCO**: un setup a simmetria cilindrica ad alta copertura angolare ed alta granularità

## GARFIELD:

- Due camere a drift (copertura in angolo polare:  $30^\circ - 85^\circ$  e  $95^\circ - 150^\circ$ ) con  $\text{CF}_4$
- 4 ring di CsI(Tl) dietro ciascuna camera, divisi in 24 (21) settori azimuthali ( $\Delta\phi=15^\circ$ ,  $\Delta\theta=15^\circ$ )
- Identificazione isotopica di H e He, identificazione in Z fino a 15-16
- Misura dell'energia dei prodotti

## RCO:

- Rivelatore a 3 strati (copertura in angolo polare  $5.4^\circ - 17^\circ$ ):
  - camere di ionizzazione, divise in 8 settori azimuthali
  - Strip di Si (8 per ogni settore) con spessore  $300\mu\text{m}$
  - 6 CsI(Tl) per ogni settore
- Identificazione in carica fino a  $Z \sim 30$
- Identificazione isotopica fino a  $Z \sim 15$  da  $\Delta E - E$  in Si-CsI(Tl), fino a  $Z \sim 6$  da PSA in Si
- Misura dell'energia dei prodotti



Grazie agli upgrade effettuati negli ultimi anni il setup è quasi tutto equipaggiato con elettronica digitale (->PSA in Si)  
Ulteriori upgrade sono in corso per quanto riguarda il sistema di acquisizione

GARFIELD+RCO è stato estensivamente utilizzato per campagne di misura su sistemi leggeri (studio esclusivo del canale di fusione-evaporazione, con rivelazione di eventi completi in carica)

- $^{12}\text{C}+^{12,13}\text{C}$  @ 95MeV
- $^{14}\text{N}+^{10}\text{B}$ @80MeV
- $^{16}\text{O}+^{65}\text{Cu}$  @16AMeV
- $^{16}\text{O}+^{12}\text{C}$  @ 5.6, 6.9, 8.1 AMeV
- $^{16,18}\text{O}+^{30,28}\text{Si}$  @ 7, 8 AMeV
- $^{18}\text{O}+^{12}\text{C}$  @16.7 AMeV

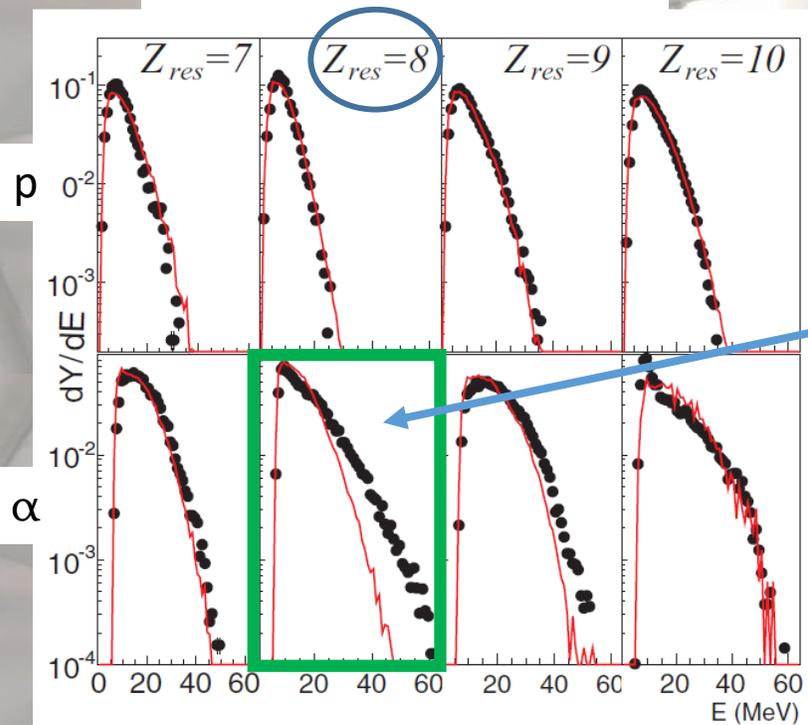
**Tematica principale:** studio delle deviazioni del decadimento del nucleo composto dalle previsioni di modello statistico, con particolare focus su effetti di  $\alpha$  clustering  
Nell'ambito della collaborazione è stato specificamente sviluppato un codice di modello statistico di tipo Hauser-Feshbach Hfl (\*) dedicato ai sistemi leggeri, con l'inclusione di tutti i livelli discreti tabulati

(\*) G.Baiocco, PhD. Thesis, 2012, Università di BO & Université de Caen Basse-Normandie

# Effetti di $\alpha$ clustering nel decadimento del $^{24}\text{Mg}^*$ CN (da $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}@95\text{MeV}$ )

G.Baiocco et al., PRC87(2013)054614

Carica del residuo del CN

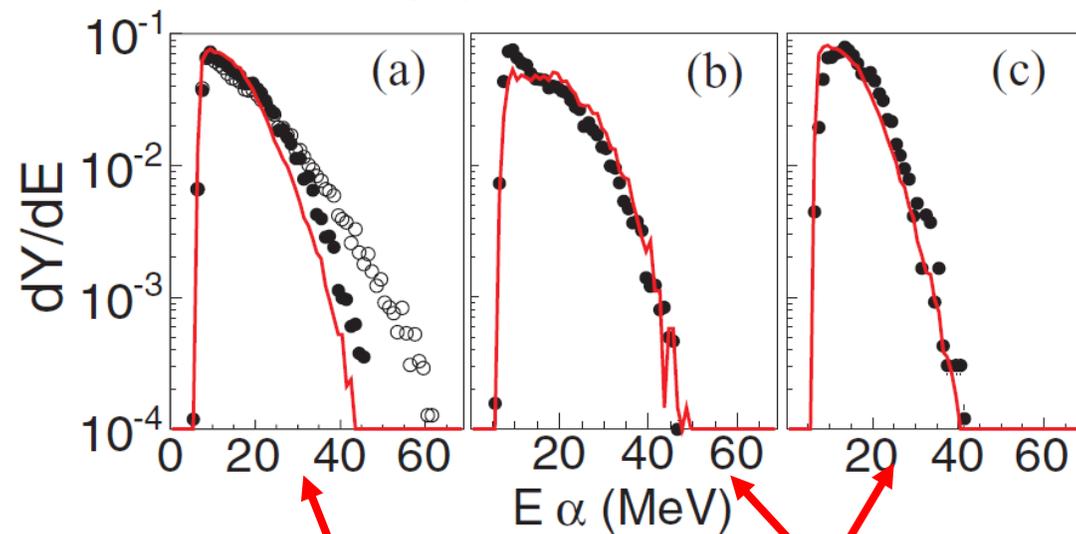


Grosse deviazioni dalle previsioni di modello statistico HFI per le  $\alpha$  in coincidenza con O

O+n $\alpha$  (n=1,2)

O+ $\alpha$

O+2 $\alpha$



Spettri singolarmente riprodotti

Spettro complessivo non riprodotto

La discrepanza è dovuta ai diversi branching ratio di modello e dati per il canale ( $2\alpha, ^{16}\text{O}^*$ ), molto più probabile nel caso sperimentale

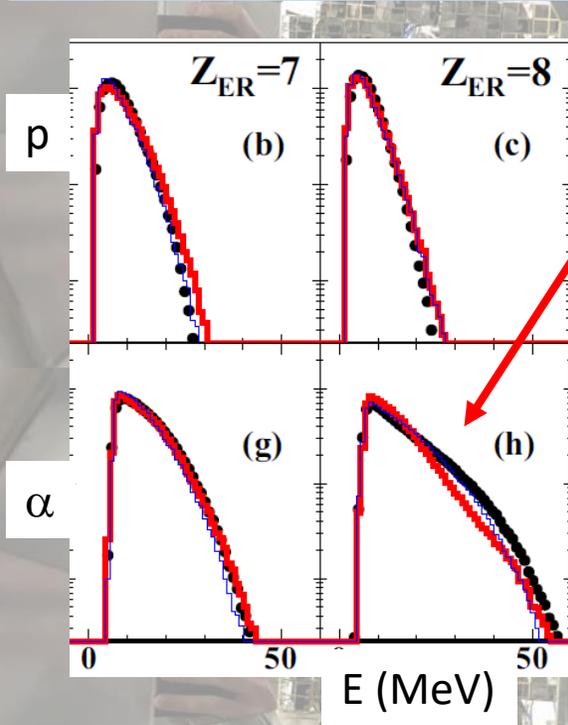
Possibile evidenza di  $\alpha$  clustering nel  $^{24}\text{Mg}^*$

| $Z_{res}$ | Channel                               | BR <sub>HFI</sub> (%) | BR <sub>EXP</sub> (%) |
|-----------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 5         | $^{11-xn}\text{B} + xn + p + 3\alpha$ | 100                   | 99                    |
| 6         | $^{12-xn}\text{C} + xn + 3\alpha$     | 78                    | 98                    |
| 7         | $^{15-xn}\text{N} + xn + p + 2\alpha$ | 95                    | 91                    |
| 8         | $^{16-xn}\text{O} + xn + 2\alpha$     | 15                    | 63                    |
| 9         | $^{19-xn}\text{F} + xn + p + \alpha$  | 88                    | 92                    |
| 10        | $^{22-xn}\text{Ne} + xn + 2p$         | 82                    | 55                    |

Studio sistematico dei BR: discrepanza significativa in tutti i canali che portano a residuo di Z pari

# Decadimento del $^{25}\text{Mg}^*$ CN (da $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}@95\text{MeV}$ )

1n in più rispetto a  $^{24}\text{Mg}$ . La presenza di questo n in più riduce la discrepanza dati – modello statistico Hfl osservata per certi canali di decadimento?



Discrepanza fra spettri di  $\alpha$  exp e di modello per Z del residuo = 8 (come per  $^{24}\text{Mg}^*$ )

Il disaccordo tra i branching ratios resta per i canali che coinvolgono l'emissione di  $\alpha$  e portano a residui di Z pari (6, 8, 10), che sono fortemente sottostimati dal modello, come per  $^{24}\text{Mg}^*$

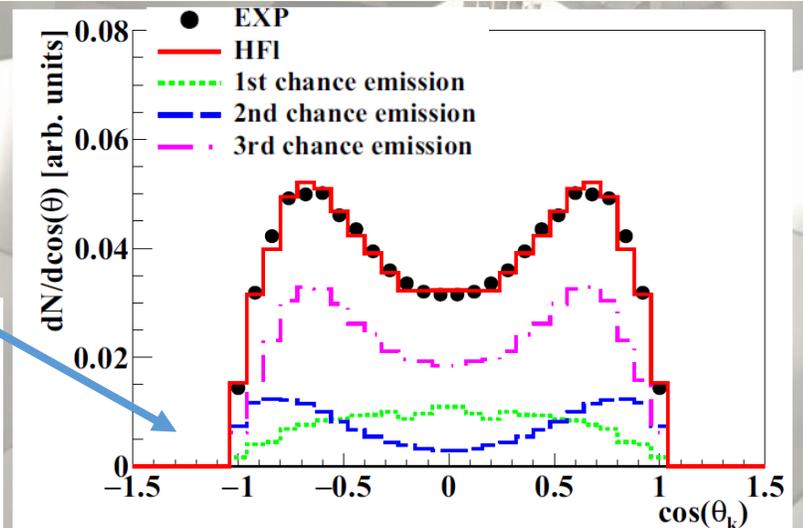
**Il n in eccesso non altera sostanzialmente il path di evaporazione e quindi i possibili effetti di  $\alpha$  clustering restano**

| $Z_{ER}$ | Channel                              | EXP [%]    | HF $\ell$ [%] |
|----------|--------------------------------------|------------|---------------|
| 10       | $^{21-x}\text{Ne} + xn + \alpha$     | $29 \pm 1$ | 3.2–3.8       |
| 9        | $^{20-x}\text{F} + xn + p + \alpha$  | $86 \pm 3$ | 84–86         |
| 8        | $^{17-x}\text{O} + xn + 2\alpha$     | $69 \pm 3$ | 30–32         |
| 7        | $^{15-x}\text{N} + xn + p + 2\alpha$ | $83 \pm 3$ | 90–92         |
| 6        | $^{13-x}\text{C} + xn + 3\alpha$     | $97 \pm 4$ | 79–83         |

**Ordine di emissione:** nel canale  $\text{O}+2\alpha+n$  sperimentalmente si osserva  $n-\alpha-\alpha$  oppure  $\alpha-\alpha-n$ , mentre il modello preferisce  $\alpha-n-\alpha$

Coordinata di Jacobi

|                   | HF $\ell$<br>original code | HF $\ell$<br>after fit |
|-------------------|----------------------------|------------------------|
| First chance $n$  | 5%                         | $20 \pm 2\%$           |
| Second chance $n$ | 70%                        | $20 \pm 2\%$           |
| Third chance $n$  | 25%                        | $60 \pm 4\%$           |



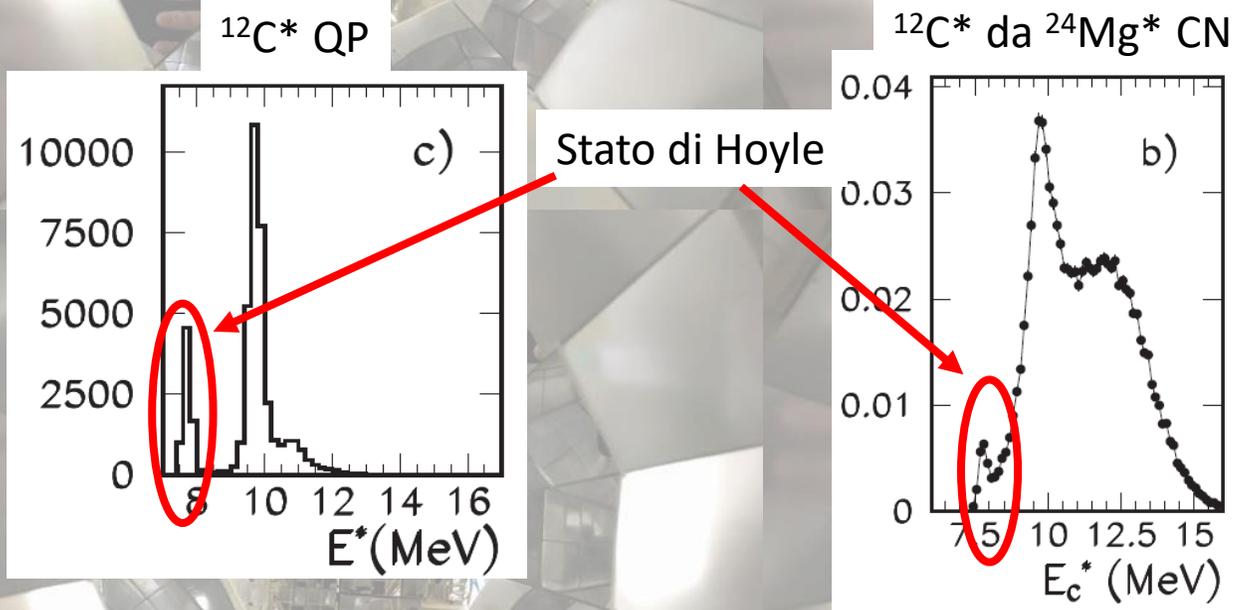
$$\cos(\theta_k) = \vec{u}_O \cdot \vec{u}_{\alpha-\alpha}$$

# Studio del decadimento dello stato di Hoyle del $^{12}\text{C}^*$ (7.65MeV)

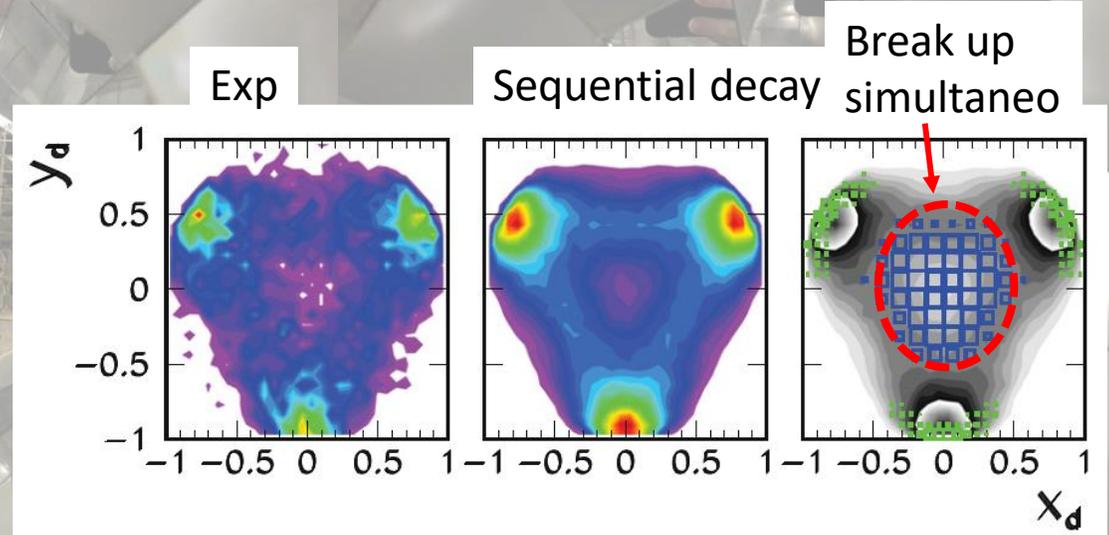
## Selezioni:

decadimento del  $^{12}\text{C}^*$  QP in collisioni periferiche (3  $\alpha$  emesse in avanti)

decadimento del  $^{24}\text{Mg}^*$  CN in collisioni centrali (6  $\alpha$ ) -> ricostruzione dello spettro di eccitazione del  $^{12}\text{C}^*$  proveniente dal decadimento del CN ottenendo combinando 3  $\alpha$



In entrambi i casi decadimento dello stato di Hoyle compatibile con il passaggio dallo stato intermedio  $^8\text{Be}_{\text{gs}}$  (sequential decay)  
**Trascurabile il break up simultaneo in 3  $\alpha$**



L.Morelli et al., JOPG43(2016)045210

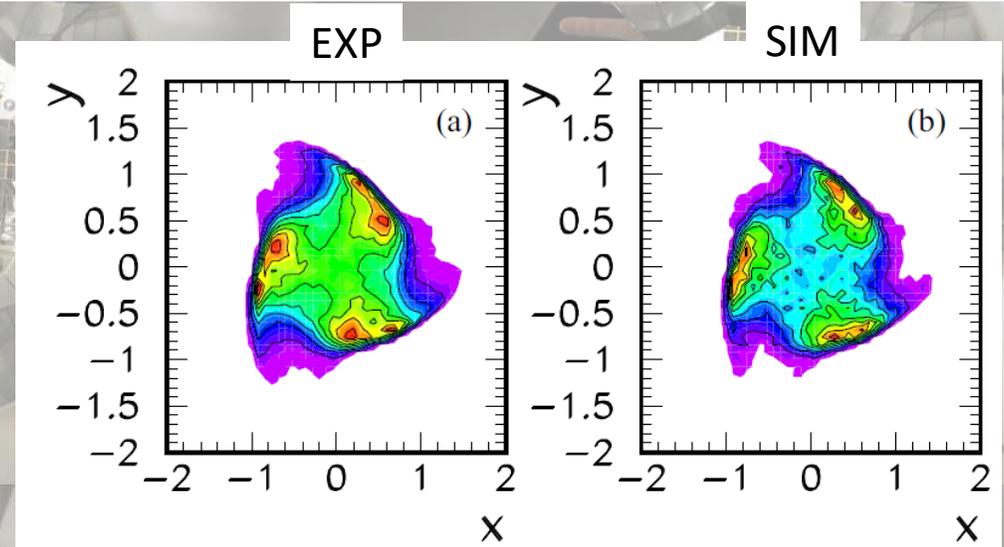
Dalitz plot costruito con le energie delle 3  $\alpha$  (QP)

# Decadimento in 6 $\alpha$ del $^{24}\text{Mg}^*$ CN (da $12\text{C}+12\text{C}@95\text{MeV}$ )

Esclusa sia l'emissione di  $\alpha$  non correlate sia il break up simultaneo  
Il decadimento passa attraverso stati intermedi che coinvolgono  $^{12}\text{C}^*$ ,  
 $^8\text{Be}_{\text{gs}}$  o  $^8\text{Be}^*$  e 1  $\alpha$   
Probabilmente il meccanismo dominante è un primo step a 3 corpi  
 $^{12}\text{C}^* + ^8\text{Be}_{\text{gs}} / ^8\text{Be} + \alpha$  seguito dalla diseccitazione di C e Be in  $\alpha$

Questo Dalitz plot esclude il break up simultaneo di  $^{24}\text{Mg}^*$  nei 3 corpi.  
Processo sequenziale, con emissione iniziale di  $\alpha$  e  $^8\text{Be}$  e poi  $^{12}\text{C}^*$

Dalitz plot costruito con le energie di  $^{12}\text{C}^*$ ,  $^8\text{Be}$ ,  $\alpha$



# Il futuro di NUCLEX a LNL: SPES

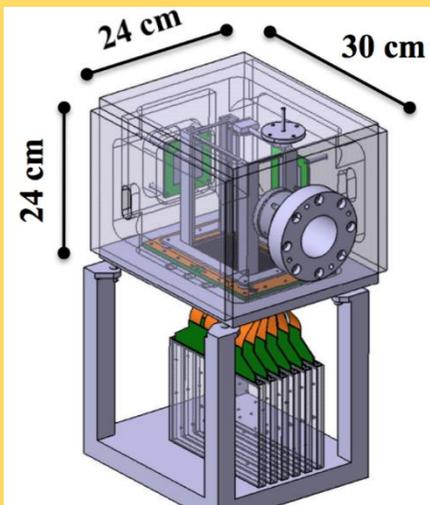
- A breve entrerà in funzione a LNL l'acceleratore **SPES** per fasci esotici
- Produrrà fasci di bassa energia (<10AMeV) e bassa intensità
- Per lo studio dei meccanismi di reazione l'utilizzo di questi fasci rappresenta una grossa sfida dal punto di vista tecnico
- E' pertanto necessario utilizzare rivelatori adatti a questo tipo di fasci, come ad esempio **il target attivo ATS Active Target for SPES** (prototipo in scala ridotta di un rivelatore più grande attualmente in uso a GANIL)



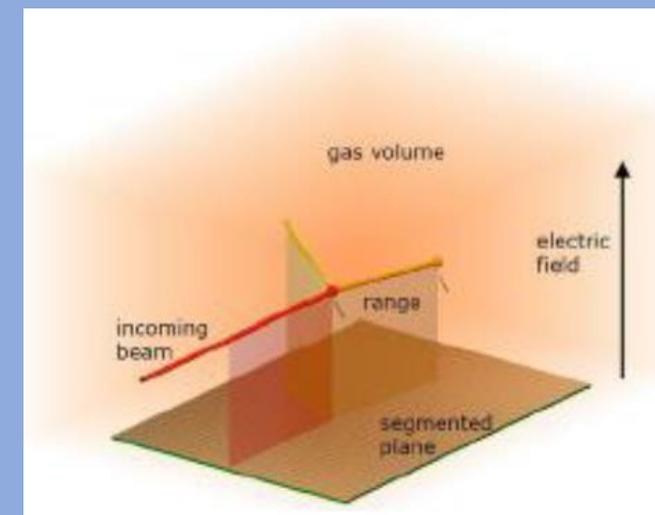
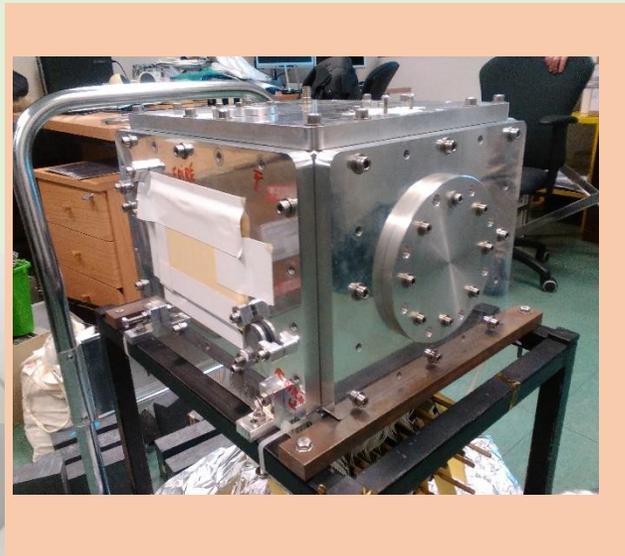
**SPES**  
Selective Production of Exotic Species

# ATS (Active Target For Spes)

- E' un rivelatore a gas di tipo TPC che fa anche da target
- E' particolarmente adatto per essere utilizzato con fasci di bassa energia e soprattutto bassa intensità ( $<10^6$  pps) come sono i fasci radioattivi, in particolare per reazioni di trasferimento di pochi nucleoni
- Ha efficienza di rivelazione prossima a  $4\pi$
- Si ricostruiscono le tracce nel gas e si misura la perdita di energia, con una ricostruzione 3D dell'evento
- Può essere accoppiato a dei rivelatori ancillari (per esempio Si) per misurare le particelle cariche che escono dal volume attivo



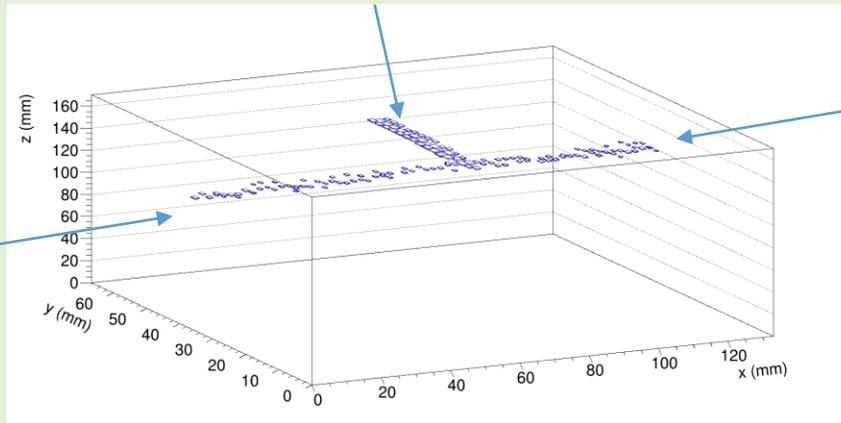
• Pad plane di lettura : 2048 canali  $2 \times 2 \text{ mm}^2$



# ATS (Active Target For Spes)@LNS

- 3 proposal approvati dal PAC dei LNS, con le misure tutte schedulate per il 2020
- Solo una è stata effettuata, appena prima del lockdown.
- Tutte le altre sono rimandate a data da destinarsi perché da giugno 2020 i LNS hanno iniziato la chiusura per l'upgrade del ciclotrone CS per il progetto NUMEN
- **Misura effettuata:** studio della risonanza gigante isoscalare di monopolo nel  $^{20}\text{Ne}$  tramite la reazione  $^{20}\text{Ne}(\alpha, \alpha')^{20}\text{Ne}^*$  (scattering anelastico di  $\alpha$  in cinematica inversa) con fascio di  $^{20}\text{Ne}@60\text{AMeV}$  su target di He.
- **Motivazione della misura:** studiare gli effetti della deformazione sulla risonanza gigante isoscalare di monopolo

Fascio incidente di  $^{20}\text{Ne}$



Traccia  
dell' $\alpha$   
diffusa

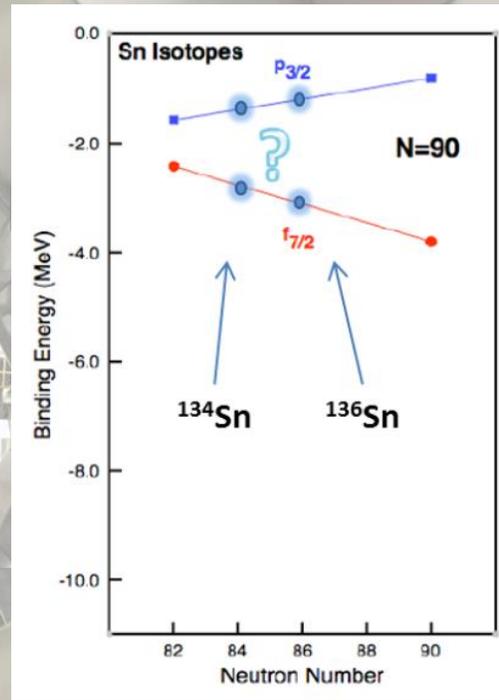
$^{20}\text{Ne}$  diffuso

Esempio di tracce misurate

A. Buccola, PhD Thesis, Università di Firenze, in progress

# Lol per ATS@SPES

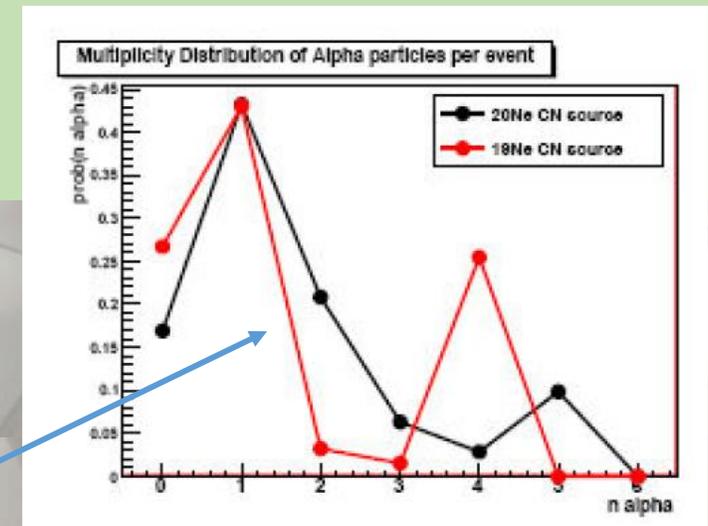
- Evoluzione della struttura a shell in Sn esotici tramite reazioni di trasferimento del tipo  $^{134}\text{Sn}(d,p)^{135}\text{Sn}$ 
  - ricerca dell'esistenza di una nuova chiusura di subshell a N=90
  - Studio dell'interazione NN nel mezzo nucleare



# Lol per GARFIELD+RCO@SPES

- Oltre alla prosecuzione del programma sui sistemi stabili leggeri, sono state presentate Lol per l'utilizzo di GARFIELD + RCO con i fasci di SPES leggeri
- **Tematica:** Studio dell'emissione delle particelle leggere cariche da CN e confronto con le previsioni di modello statistico Hfl per mettere in evidenza deviazioni dovute a effetti di clustering e per studiare l'evoluzione del parametro densità dei livelli che dovrebbe dipendere da N-Z a parità di A
- Possibili sistemi:
  - $^{14,15}\text{N}$  (stabili) +  $^{6,7}\text{Li}$  =>  $^{20,21,22}\text{Ne}$  CN
  - $^7\text{Be}$ (instabile)+ $^{12,13}\text{C}$  =>  $^{19,20}\text{Ne}$  CN
  - $^{10}\text{Be}$ (instabile)+ $^{12,13}\text{C}$ =>  $^{22,23}\text{Ne}$  CN
- ***Un altro possibile sistema è  $^{10}\text{Be}+^4\text{He}$  da fare con ATS***

Molteplicità di  $\alpha$  evaporate previste da Hfl per  $^{19}\text{Ne}$  e  $^{20}\text{Ne}$



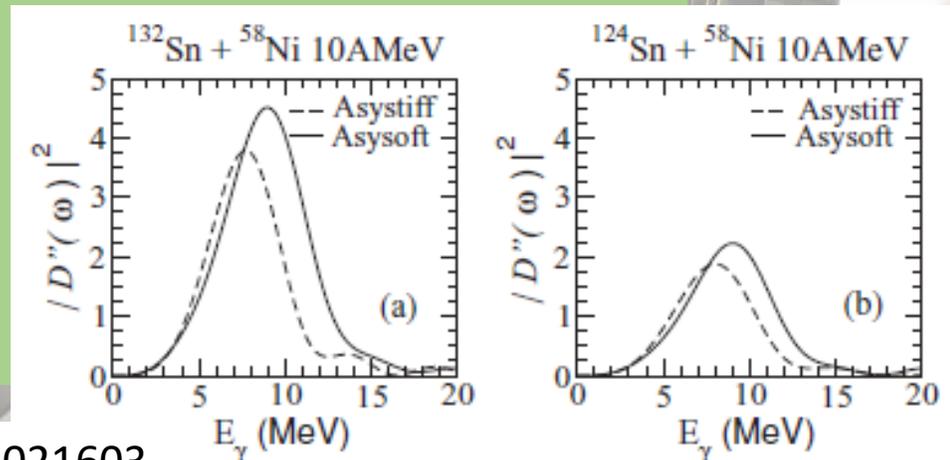
# Oltre i setup già esistenti: Lol per DDR @ SPES Dynamical Dipole Resonance

- Nei primi stadi di una reazione asimmetrica in isospin, prima della formazione del CN, **si sviluppa una oscillazione collettiva di dipolo** (che si smorza in 200-300fm/c) che dà luogo a **emissione  $\gamma$  pronta, anisotropa, nella regione 10-25 MeV**. E' un fenomeno di pre-equilibrio (la GDR invece avviene dal CN)
- E' un fenomeno trascurabile sotto 5-6AMeV e tende a smorzarsi sopra 15AMeV, quindi **è massimo nella finestra dei fasci di SPES**
- Le rese sperimentamente misurate dipendono dal momento di dipolo statico, che dipende dall'asimmetria in N/Z del canale di ingresso => **importante usare i fasci radioattivi**
- L'anisotropia angolare e le rese dipendono dall'energia di simmetria della EOS

$Y \propto \omega_0^3 \tau D(t=0)$  resa ( $\omega_0$  freq del dipolo, dipende da  $E_{sym}$ )

$$D(t=0) = \frac{r_0 (A_p^{1/3} + A_t^{1/3})}{A} Z_p Z_t \left| \frac{N_t}{Z_t} - \frac{N_p}{Z_p} \right|$$

Momento di dipolo statico



# Per studiare questo fenomeno servono setup compositi: ad esempio

- Bisogna rivelare i  $\gamma$  duri (5-25MeV) della DDR => **LaBr<sub>3</sub>(Ce) o BaF<sub>2</sub>**, per esempio posizionati al posto della camera all'indietro di GARFIELD (in fase di upgrade e semplificazione dal punto di vista meccanico per l'eventuale sostituzione dei CsI(Tl))
- Bisogna rivelare il residuo di evaporazione => **PPAD's** in avanti
- Bisogna rivelare le particelle cariche per ricostruire il CN e la sua E\*, stimando il pre-equilibrio => **camera in avanti di GARFIELD**

## Alcuni esempi di possibili sistemi:

| Proj.             | Target           | N/Z proj | N/Z targ. | D(t=0) | CN                |
|-------------------|------------------|----------|-----------|--------|-------------------|
| <sup>124</sup> Sn | <sup>56</sup> Fe | 1.48     | 1.15      | 25fm   | <sup>180</sup> Os |
| <sup>90</sup> Kr  | <sup>90</sup> Zr | 1.50     | 1.25      | 21.5fm | <sup>180</sup> Os |
| <sup>90</sup> Zr  | <sup>90</sup> Zr | 1.25     | 1.25      | 0fm    | <sup>180</sup> Hg |

Fascio radioattivo

Effetto dell'asimmetria di massa nel canale di ingresso a parità di D(t=0)

Sistema di riferimento (no DDR)

# Conclusioni

- La collaborazione NUCLEX ha svolto e sta svolgendo la sua attività sperimentale, dedicata allo studio dei meccanismi di reazione in un vasto range di energie di fascio, a LNS, LNL e GANIL
- Gli apparati sperimentali principali che sfrutta per la sua attività sono FAZIA (+INDRA), GARFIELD+RCO e ATS
- Le prestazioni di questi apparati permettono di fare studi approfonditi su tematiche legate al trasporto di isospin, agli effetti di  $\alpha$  clustering e di non equilibrio in genere nelle catene di decadimento dei nuclei composti leggeri, alle reazioni di trasferimento
- Il programma sperimentale per i prossimi anni a LNL prevede un grosso utilizzo dei fasci di SPES, per i quali sono state presentate diverse Lol