

Gruppo 3

Silvia Piantelli

CdS 12 luglio 2019

Il gruppo 3 in cifre: due sigle, 21 persone, 19 ricercatori, 16.4 FTE, 6 dottorandi, 1 post doc, 3 (quasi 4) pensionati, 2 tecnici

NUCLEX

- **Sandro Barlini** (UNIFI RTDb, Responsabile nazionale) 100%
- **Maurizio Bini** (UNIFI in pensione) 0%
- **Antonio Buccola** (dottorando II anno) 100%
- **Alberto Camaiani** (dottorando III anno) 100%
- **Giovanni Casini** (INFN PR) 100%
- **Caterina Ciampi** (dottoranda I anno) 100%
- **Catalin Frosin** (dottorando II anno) 100%
- **Alessandro Olmi** (INFN in pensione) 100%
- **Pietro Ottanelli** (dottorando III anno) 100%
- **Gabriele Pasquali** (UNIFI PA) 100%
- **Silvia Piantelli** (INFN R, Coordinatore) 100%
- **Giacomo Poggi** (UNIFI PO) 0%
- **Andrea Stefanini** (UNIFI PA) 100%
- **Simone Valdré** (INFN R) 100%

Totale: 12 FTE

GAMMA

- **Adriana Nannini** (INFN PR, Responsabile locale) 100%
- **Nicla Gelli** (INFN R) 40%
- **Marco Rocchini** (INFN, Assegnista) 100%
- **Naomi Marchini** (dottoranda I anno, Univ. Camerino) 100%
- **Andrea Perego** (UNIFI in pensione) 100%

Totale: 4.4 FTE

Tecnici: Marco Ottanelli, Gianpaolo Tobia

Partecipazione a comitati (interni e non)

- Adriana Nannini è membro dell'ISOLDE Advisory Council (dal 2017)
- Adriana Nannini è membro del Gruppo di Lavoro per la valutazione dell'INFN
- Adriana Nannini è referente locale della CC3M (Commissione Coordinamento Terza Missione)
- Giovanni Casini è membro di LHCC (LHC Experiment Committee) da gennaio 2019

Richieste per i servizi di Sezione per l'anno 2020

NUCLEX

- Officina meccanica: 1 mese/uomo
- Servizio di elettronica: 6 mesi/uomo
- Servizio di meccanica: 5 mesi/uomo
- Camera pulita: 4 mesi/uomo

GAMMA

- Officina meccanica: 0.5 mesi/uomo
- Servizio tecnico: 0.5 mesi/uomo
- Servizio di elettronica: 0.5 mesi/uomo
- Servizio calcolo: 0.5 mesi/uomo

NUCLEX

RN: Sandro Barlini UniFI e Sezione di Firenze; Tommaso Marchi LNL

Prolungamento 2020-2022

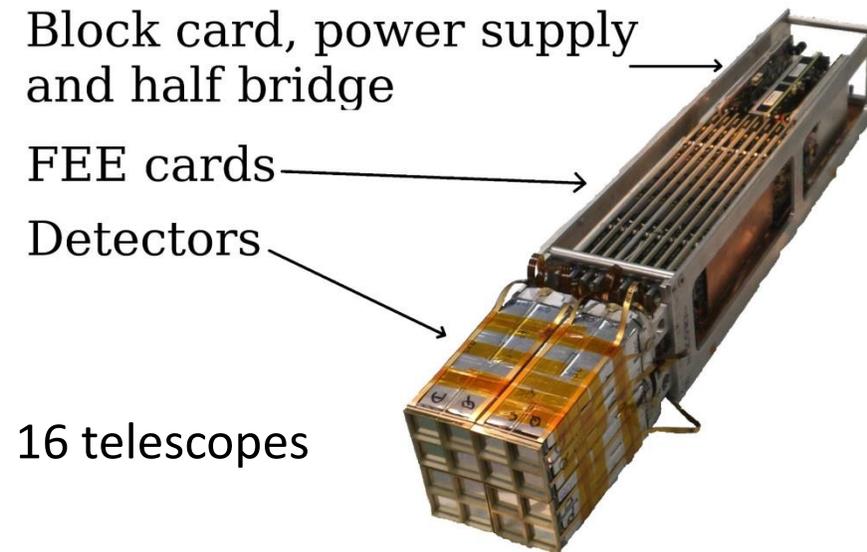
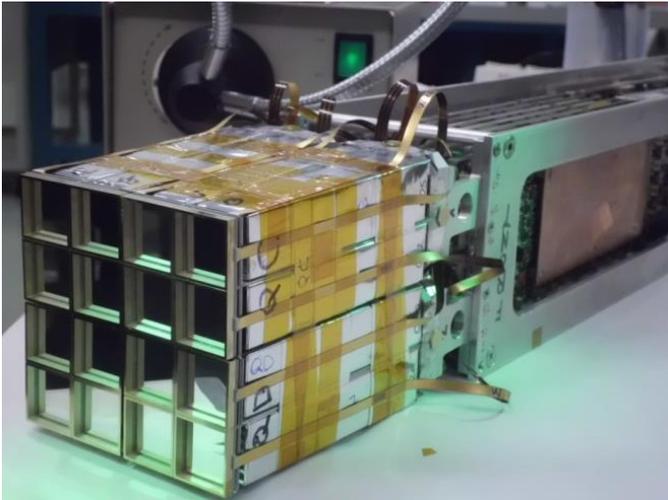
- La sigla NUCLEX è in chiusura quest'anno
- Chiederà un prolungamento per 3 anni, su cui ha già avuto parere favorevole dai referee (anche se la richiesta non è stata valutata in sede di ultima riunione della CSN3)
- Le attività programmate sono la naturale continuazione di quelle effettuate negli anni precedenti

NUCLEX

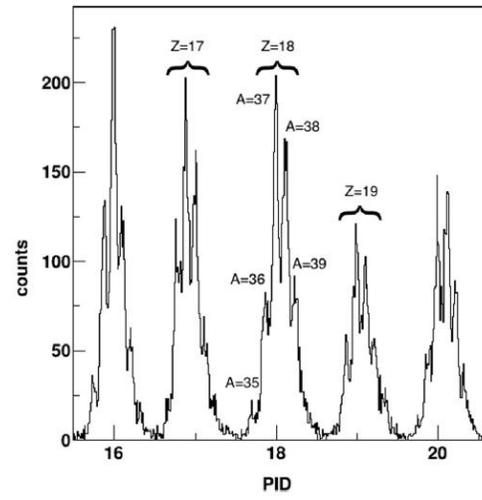
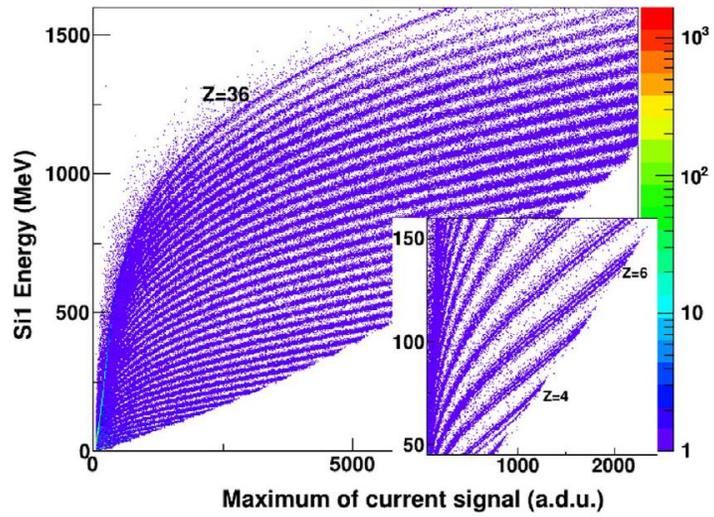
- NUCLEX si occupa dello studio dei meccanismi di reazione a energie basse e intermedie.
- Tra gli obiettivi principali si possono citare:
 - lo studio della dipendenza dalla densità del termine di simmetria dell'equazione di stato della materia nucleare,
 - l'influenza del clustering e di effetti di struttura in genere sui meccanismi di reazione,
 - misure di sezioni d'urto,
 - emissioni di pre-equilibrio
 - Studio di reazioni dirette
- L'attività di NUCLEX si articola principalmente su tre linee:
 1. Attività legate a FAZIA (adesso a GANIL – Caen (F), negli scorsi anni a LNS)
 2. Attività legate a GARFIELD-RCO (a LNL)
 3. Attività legate a ATS (Active Target for Spes) (a LNL e LNS)
- C'è anche un piccolo sottogruppo che si occupa della caratterizzazione dei SiC (studio iniziato nell'ambito della sigla di Gruppo V SICILIA, ora chiusa) e che sta effettuando misure presso la linea DEFEL del LABEC per la caratterizzazione dell'omogeneità di drogaggio (la stessa tecnica è stata usata anche per i Si di FAZIA)

FAZIA (Forward A and Z Identification Array)

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

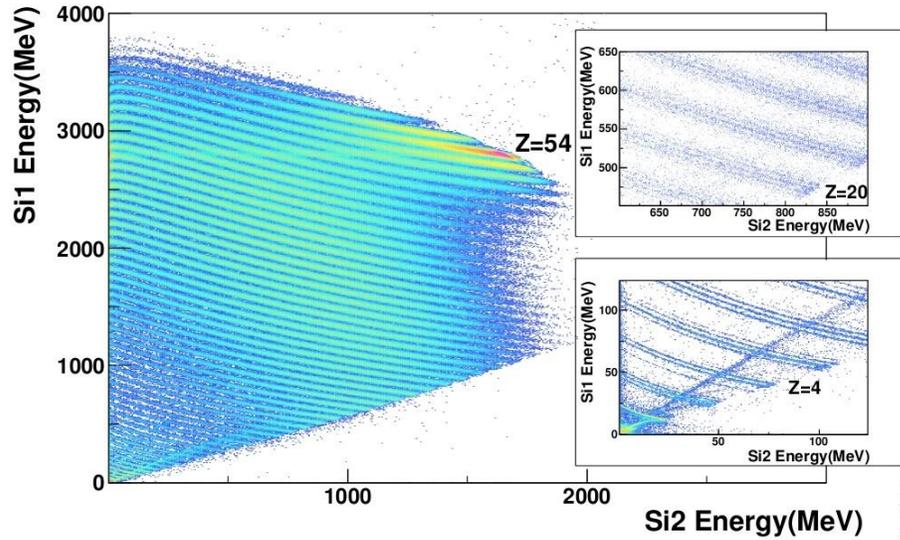


- Identificazione da:
 - $\Delta E-E$ per ioni che attraversano il Si1 => **identificazione in A fino a Z=25**
 - **PSA** (correlazione fra parametri legati alla forma del segnale) per ioni stoppati in Si1 => **identificazione in Z fino ad almeno 54** se il range è superiore di una soglia crescente con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



PSA in Si1

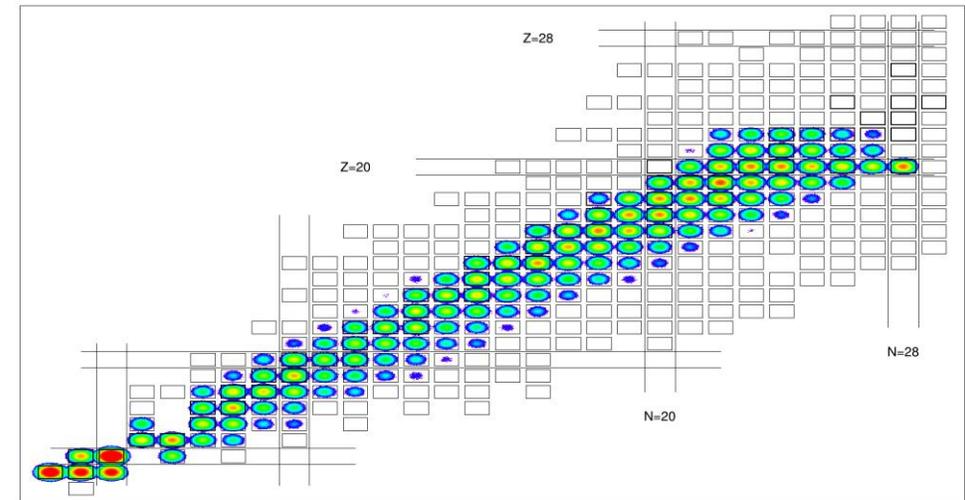
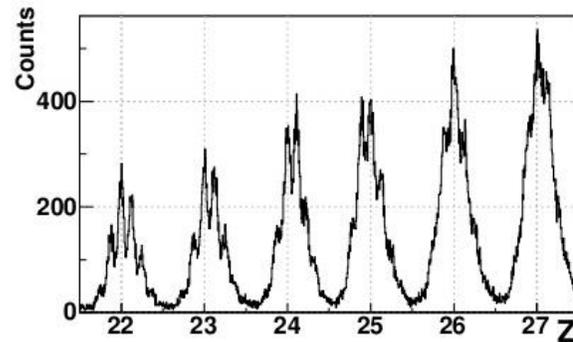
G.Pastore et al., NIMA851(2017)



$\Delta E-E$ in Si1-Si2

«Carta dei nuclidi» di FAZIA per $^{48}\text{Ca}+^{48}\text{Ca}$ @35A MeV

S.Carboni et al., NIMA 664 (2012) 251



FAZIA è il frutto di una collaborazione internazionale

- Principali istituzioni coinvolte :

INFN (Firenze, Napoli, LNL, LNS, Bologna, Padova, Catania), Italy

LPC, IN2P3-CNRS, ENSICAEN, Université de Caen, GANIL, France

CEA/DSM-CNRS, IPN Orsay, Université Paris-Sud XI, France

Dipartimento di Fisica Università di Firenze, Italy

Dipartimento di Fisica Università di Bologna, Italy

Dipartimento di Fisica Università Federico II Napoli, Italy

Jagellonian University, Institute of Nuclear Physics IFJ-Pan, Krakow, Poland

Heavy Ion Lab., Warsaw University, Warsaw, Poland

IFJ PAN, Krakow, Poland

Università di Huelva, Spain

- In vigore nuovo MoU dal 2018
- Proviene da una lunga fase di R&D, iniziata nel 2006, a cui il gruppo di Firenze ha dato un importante contributo
- *G.Casini* (insieme a N.LeNeindre) è spokesperson di FAZIA
- *G.Casini, S.Barlini, S.Valdré* fanno parte del Fazia Project Management Board
- Tutti i blocchi di FAZIA (al momento 12) sono stati assemblati nella camera pulita della Sezione di Firenze (bonding e incollaggi dei Si: *Enrico Scarlini*; fasciatura CsI e incollaggio fotodiodi: *Giampaolo Tobia*; test rivelatori prima del montaggio: *Giovanni Casini*; montaggio: *Giovanni Casini, Sandro Barlini, Silvia Piantelli....*; test FEE: *Simone Valdré*; test funzionamento blocco: *Simone Valdré, Giacomo Poggi, Giovanni Casini*).

Principali tematiche fisiche di FAZIA

- Studio della dipendenza dalla densità del termine di energia di simmetria dell'equazione di stato della materia nucleare tramite il confronto di osservabili sperimentali legate alla composizione isotopica dei prodotti di reazione con previsioni di modelli di trasporto
- Studio del break up del QuasiProiettile misurando in coincidenza carica e massa dei frammenti emessi.
- Studio del clustering alpha
- Studio del decadimento di stati eccitati risonanti tramite tecniche di correlazione tra particelle
- Misure di sezioni d'urto
- Vaporizzazione e multiframmentazione

Le campagne di misura con i blocchi di FAZIA @ LNS

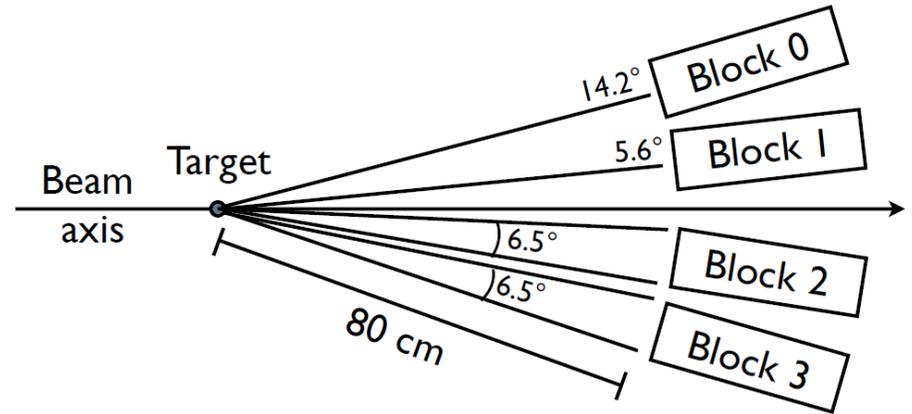
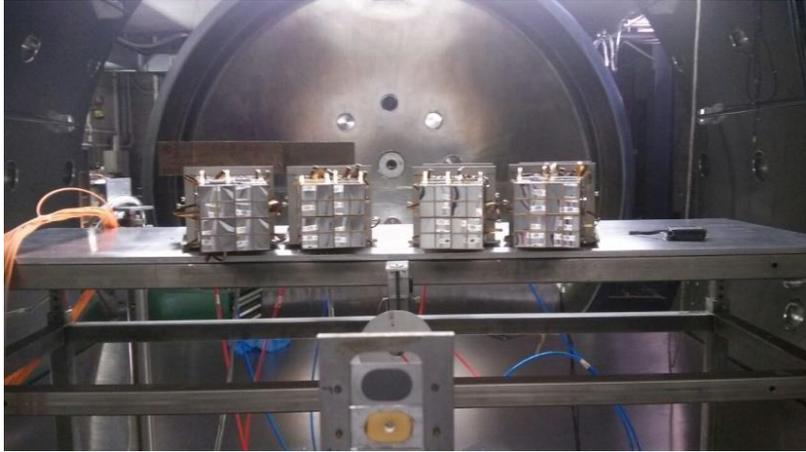
A partire dal 2015 FAZIA ha effettuato alcune misure di fisica con un setup ridotto:

1. **ISOFAZIA** (giugno 2015) $80\text{Kr}+40,48\text{Ca}$ @35AMeV, 4 blocchi (spokesperson: **S.Piantelli**, N.LeNeindre LPC Caen) PhD. Thesis di G.Pastore
2. **FAZIASYM** (dic 2015) $40,48\text{Ca}+40,48\text{Ca}$ @35AMeV, 4 blocchi (E.Bonnet Subatech Nantes, **S.Barlini**) Ph.D. Thesis di A.Camaiani
3. **FAZIACOR** (mar 2017) 4 blocchi $20\text{Ne}, 32\text{S}+12\text{C}$ @25,50AMeV (D.Gruyer LPC Caen, G.Verde Sezione di Catania)
4. **FAZIAPRE** (feb-maggio 2018) $40,48\text{Ca}+12\text{C}$ @25,40 AMeV, 6 blocchi (**G.Casini**) PhD. Thesis di P.Ottanelli
5. **FAZIAZERO** (luglio 2018) $12\text{C}+12\text{C}$ @62AMeV, 6 blocchi di cui uno a zero gradi, joint venture con Università di Beihang (China)

Analisi dati in corso, a diversi livelli di completamento

ISOFAZIA $^{80}\text{Kr}+^{40,48}\text{Ca}$ @35AMeV

4 blocchi



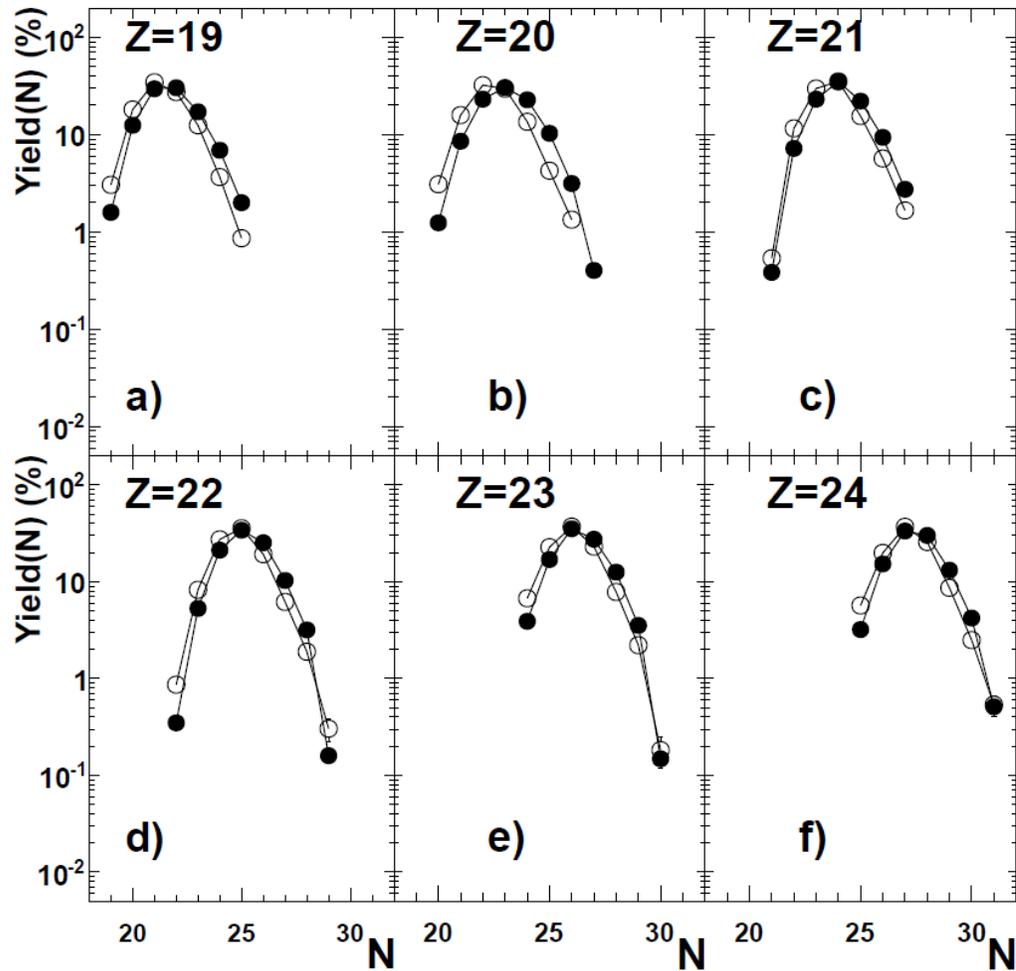
Goal:

- Studio della dipendenza dalla densità dell'energia di simmetria studiando la composizione isotopica dei prodotti di reazione tramite confronto con le previsioni del modello di trasporto AMD di A.Ono.
- Studio della fissione dinamica del QuasiProiettile con la misura di A e Z di entrambi i prodotti di reazione in coincidenza

PhD. Thesis di Giuseppe Pastore

2 articoli in preparazione (S.Piantelli, G.Casini, G.Poggi, A.Ono et al.)

ISOFAZIA#2



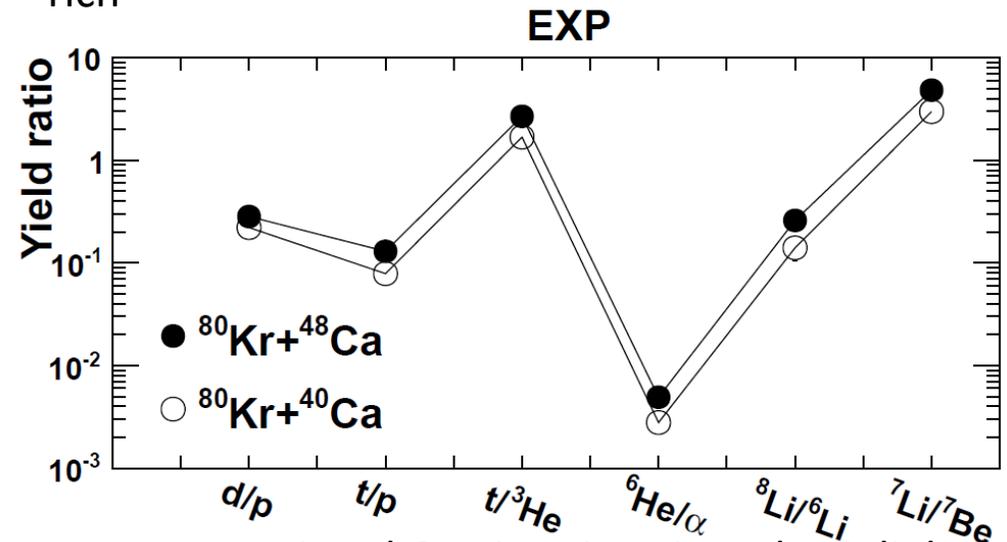
- 80Kr+48Ca
- 80Kr+40Ca

Composizione isotopica del QuasiProiettile al variare del target
 Quando il target è n-rich la distribuzione è shiftata verso gli N più alti

Sono tutti segnali di trasporto di isospin tra proiettile e target

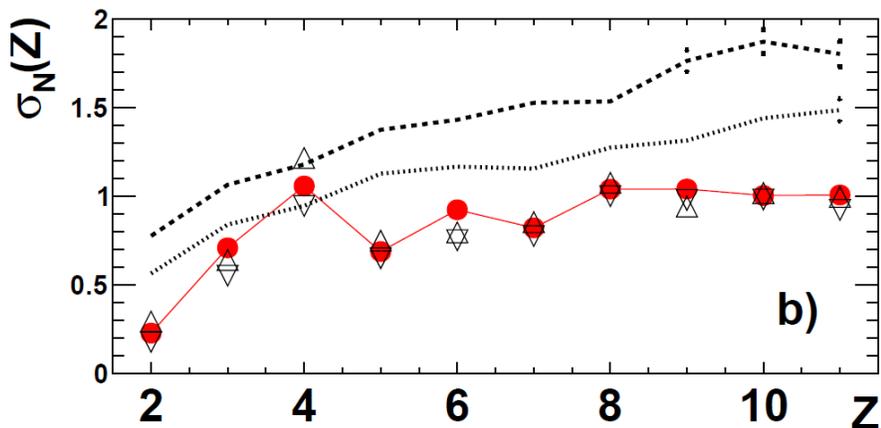
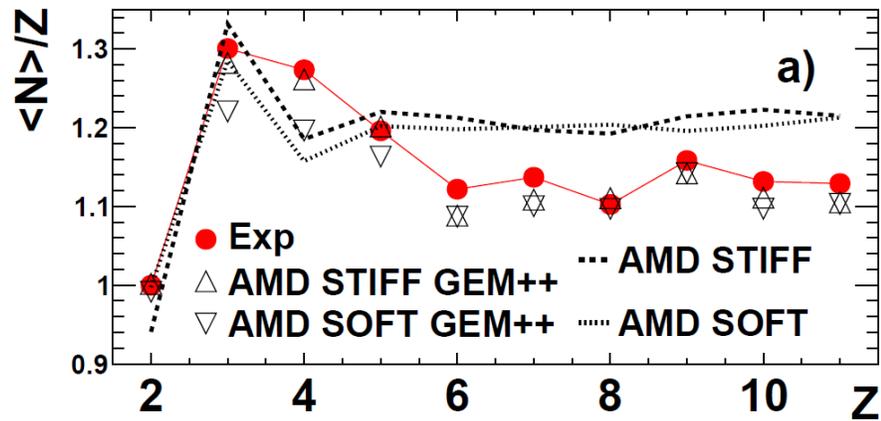
Da notare il fatto che si può studiare il trasporto di isospin contemporaneamente sia sul QP sia sui suoi prodotti di decadimento

Rapporti isotopici e isobarici di LCP e IMF emessi in avanti rispetto al QP.
 Arricchimento in isospin quando il target è n-rich



ISOFAZIA#2

Selezione di eventi periferici, cioè eventi binari, in cui si può rivelare un QuasiProiettile QP (remnant del proiettile alla fine della fase di interazione).



L'energia di simmetria agisce come forza di richiamo che equilibra N e Z. Più è alta e più i prodotti di reazione sono simmetrici.

A densità normale il suo valore è quello della formula delle masse. Per avere indicazioni sul suo andamento con la densità bisogna andare lontano da ρ_0

Secondo i modelli la sorgente a midrapidity è a densità $< \rho_0$

Momento primo e secondo della distribuzione isotopica dei frammenti emessi all'indietro rispetto al QP, cioè in buona parte provenienti dalla regione a midvelocity

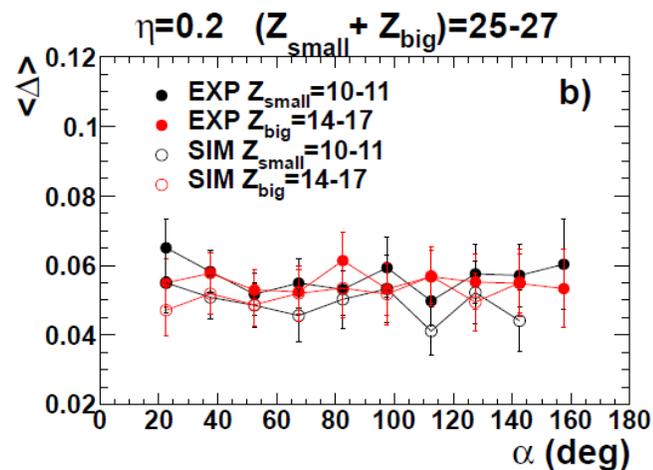
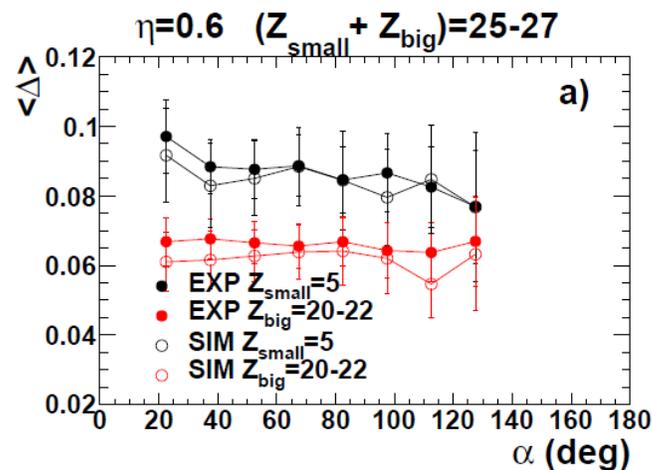
Confronto con le previsioni del codice di trasporto AMD (Antisymmetrized Molecular Dynamics) di A.Ono accoppiato al codice GEMINI++ come afterburner (abbiamo avuto molte interazioni, tuttora in corso, con l'autore di AMD, che è anche venuto qui a Firenze per un breve periodo)

Debole indicazione verso un'energia di simmetria stiff (L = 108 MeV) dal momento primo dei frammenti leggeri

ISOFAZIA#1: Misura in coincidenza di Z e A dei frammenti di fissione del Quasi Proiettile

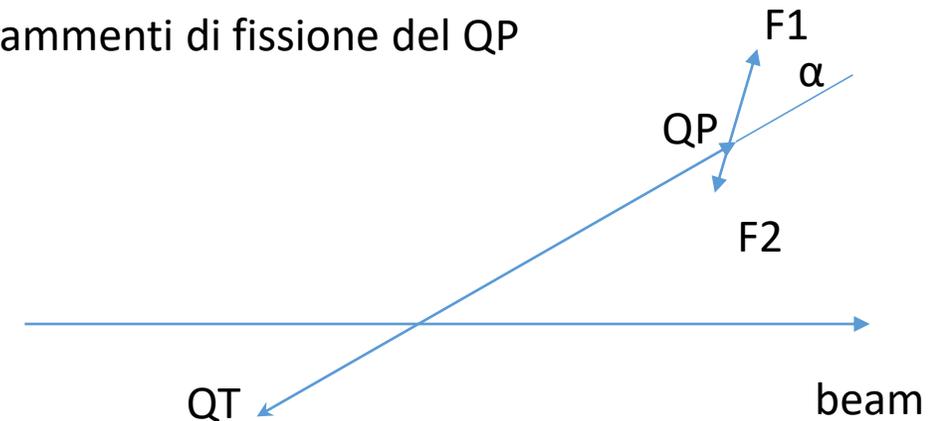
Questo è un argomento che è un terreno da gioco naturale per FAZIA: questo tipo di misura non è possibile con uno spettrometro (che può misurare A e Z di un solo frammento)

Selezione di eventi periferici in cui il QP ha fatto break up



$$\Delta = (N-Z)/(N+Z)$$

α angolo fra l'asse di separazione della fase binaria e la velocità relativa dei frammenti di fissione del QP



Risultati simili a A.Jedele et al., PRL118(2017)062501
A.Rodriguez Manso et al., PRC 95 (2017) 044604

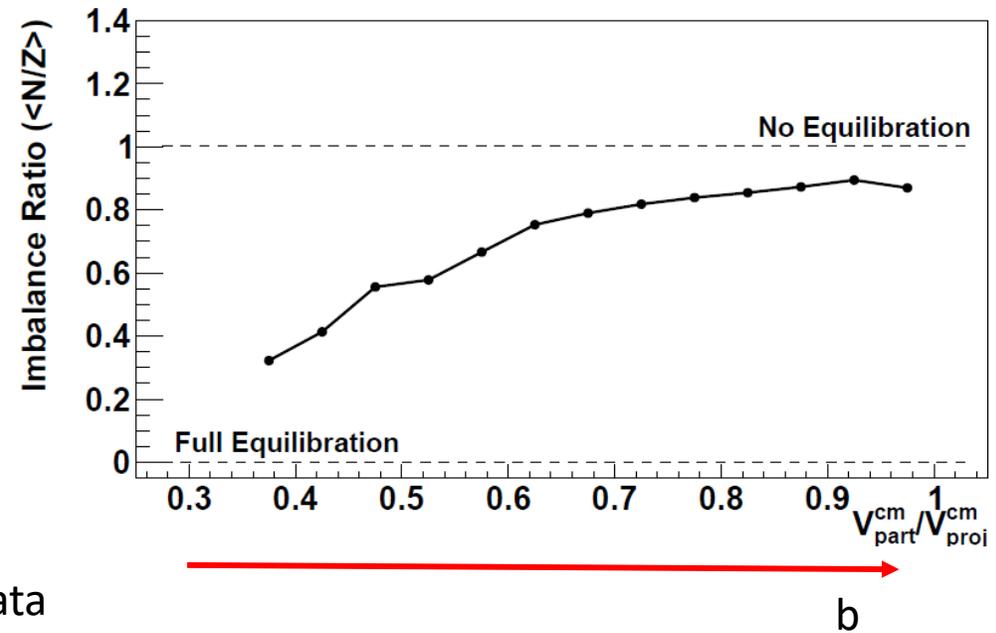
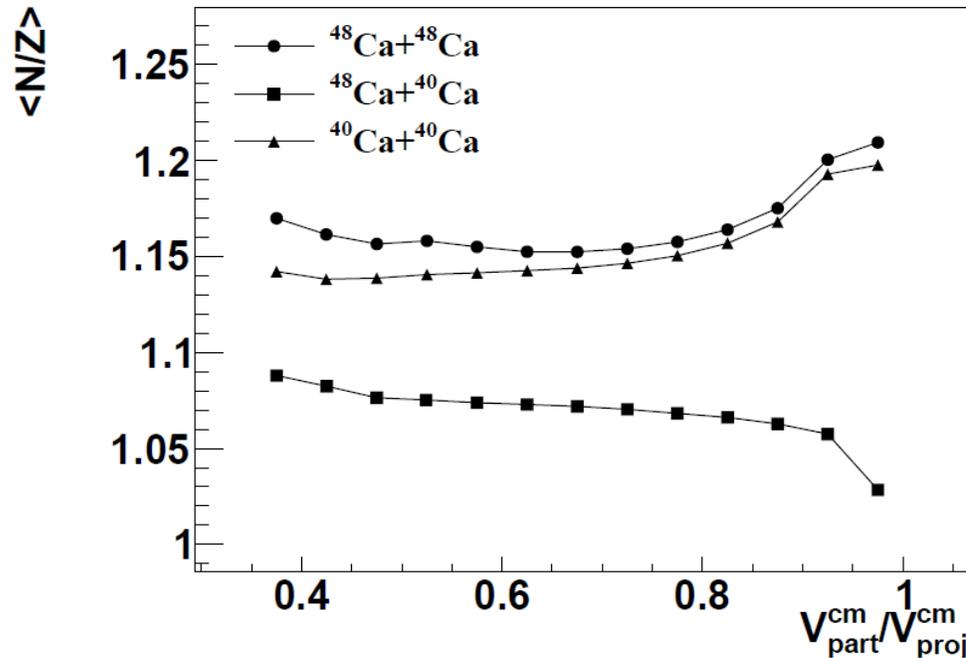
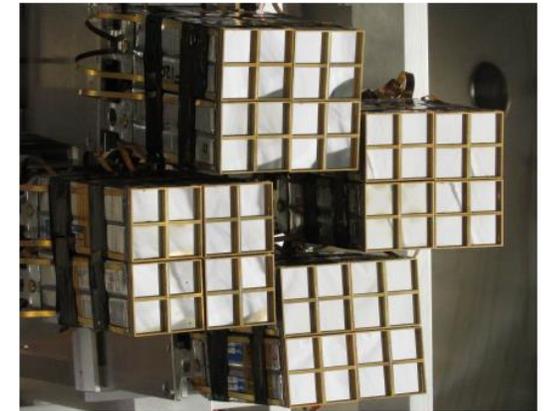
Per asimmetrie di carica grosse il gap fra i $\langle \Delta \rangle$ dei frammenti piccolo e grosso dipende dall'angolo α
Possibile correlazione con la scala di tempo della fissione (anche se il modello AMD+GEMINI non supporta questa interpretazione, per quanto riproduca i risultati sperimentali in maniera egregia)

Articolo in fase avanzata di stesura

FAZIASYM: $^{48,40}\text{Ca} + ^{48,40}\text{Ca}$ @ 35 A MeV

4 blocchi che coprono gli angoli fra 2° e 6°

Misura del grado di equilibratura di isospin



Imbalance ratio $R = 2 \frac{X_{48+40} - (X_{48+48} + X_{40+40})/2}{X_{48+48} - X_{40+40}}$, X variabile legata all'isospin (in questo caso $\langle N \rangle / Z$ del QP)
 In assenza di isospin mixing, $R=1$. In presenza di completo mixing, $R=0$

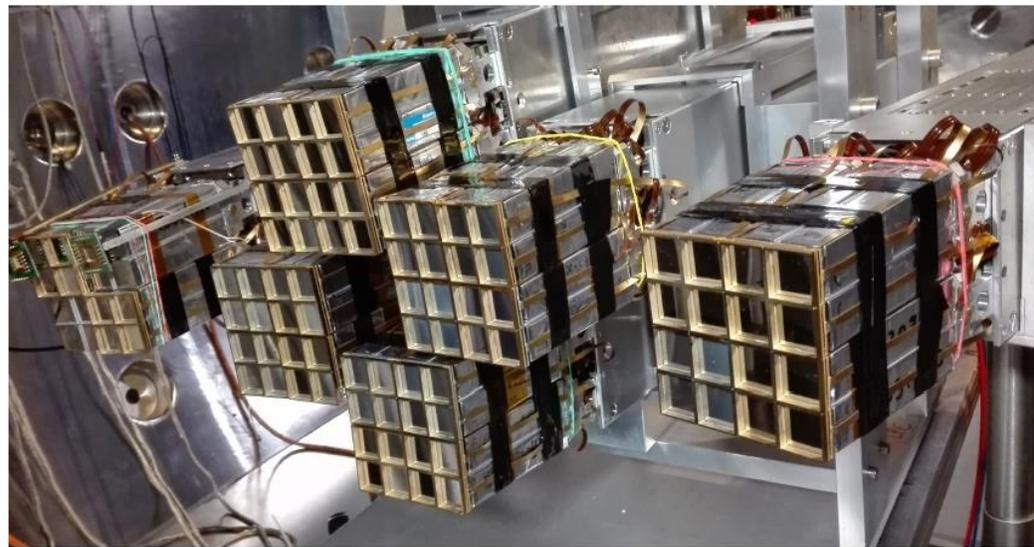
A.Camaiani, PhD Thesis

Il grado di equilibratura di isospin fra QP e QT tende ad aumentare all'aumentare della centralità. Prima misura di questo tipo fatta con $\langle N \rangle / Z$ del QP fino allo Z del proiettile

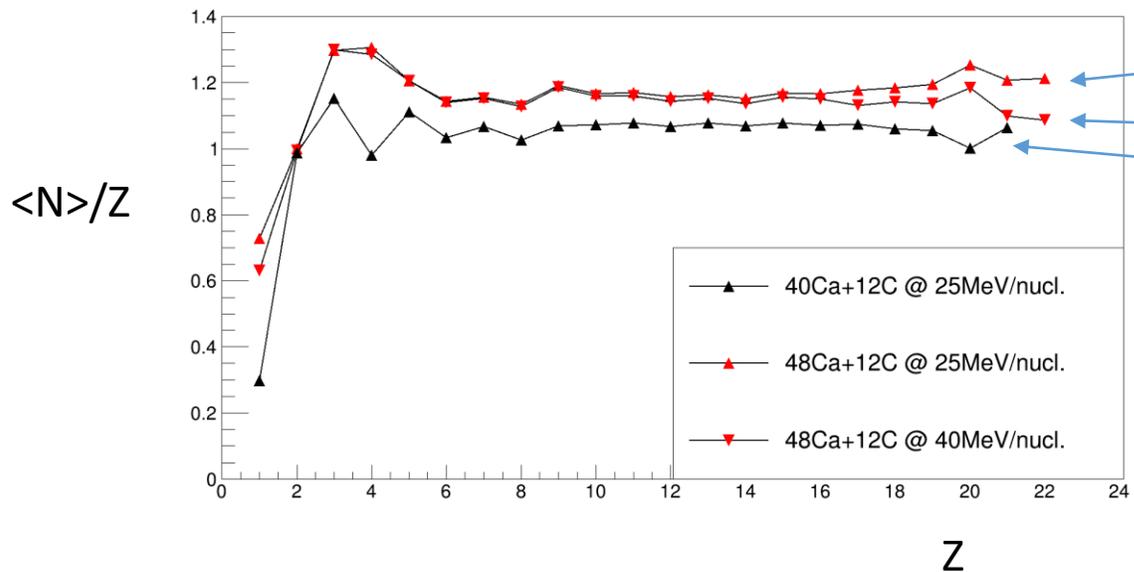
FAZIAPRE: $^{40,48}\text{Ca}+^{12}\text{C}@25,40\text{AMeV}$

Pre-equilibrio vs. trasporto di isospin

6 blocchi



$\langle N \rangle / Z$ vs Z

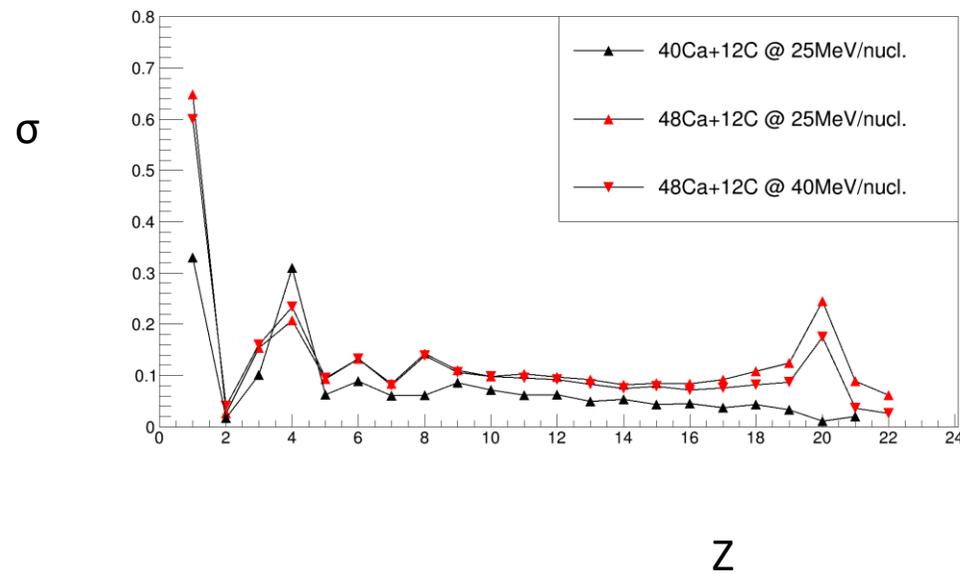


48Ca+12C@25AMeV

48Ca+12C@40AMeV

40Ca+12C@25AMeV

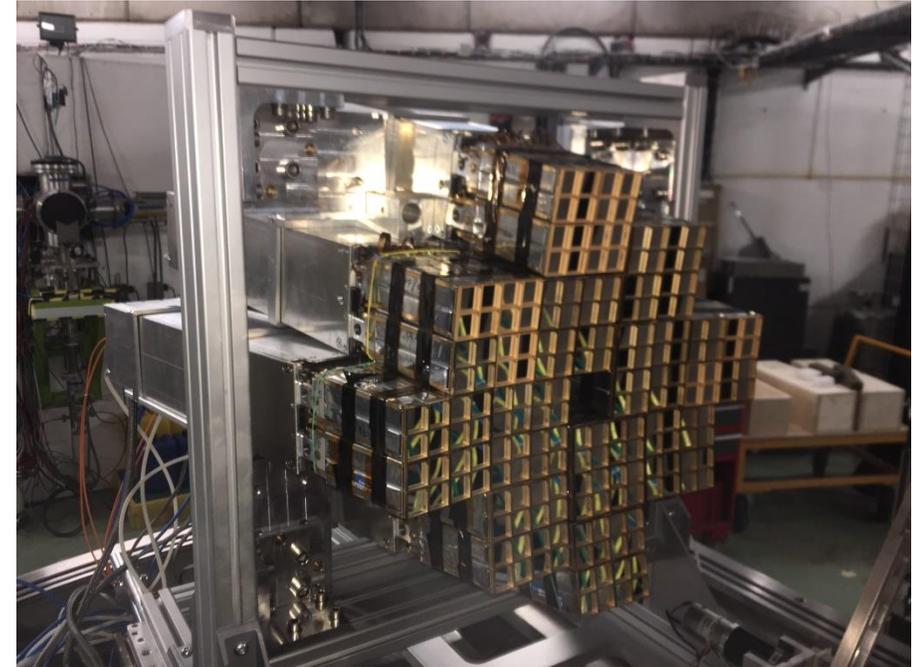
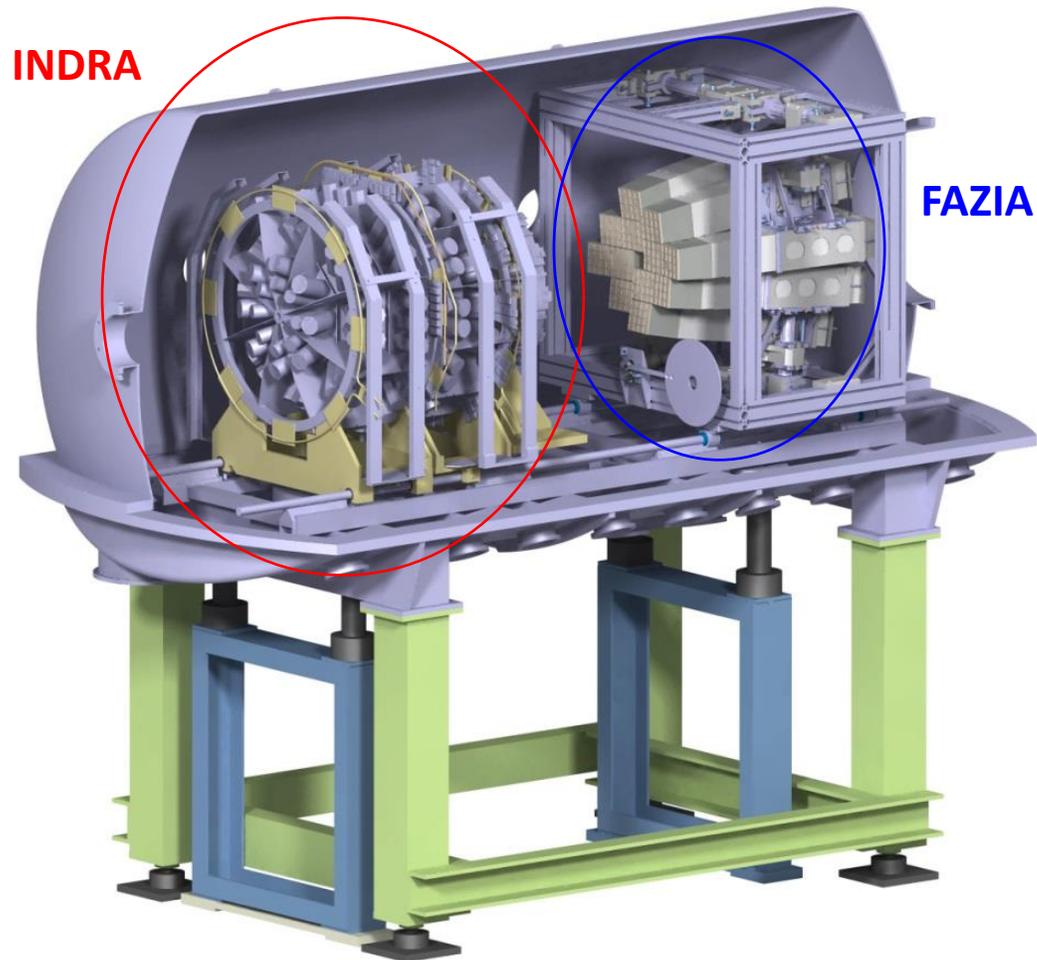
Sigma $\langle N \rangle / Z$ versus Z



Risultati preliminari, analisi in corso

FAZIA+INDRA@GANIL

- Nei primi mesi del 2019 è stato concluso il montaggio di 12 blocchi di FAZIA
- I blocchi sono stati trasferiti a GANIL e accoppiati al rivelatore INDRA (al posto dei primi 5 ring di INDRA)



La prima campagna di misura di INDRA-FAZIA@GANIL

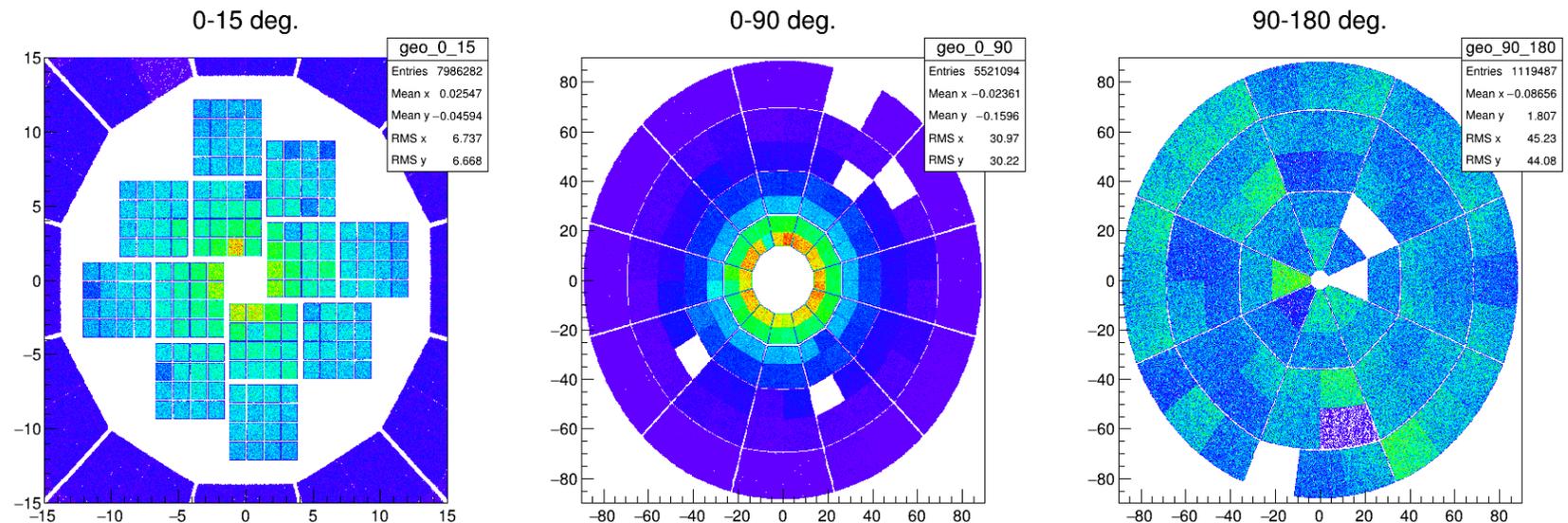
- Nel periodo aprile – maggio 2019 è stata effettuata la prima presa dati sui sistemi $^{58,64}\text{Ni}+^{58,64}\text{Ni}@32,52$ AMeV (spokesperson: O.Lopez, co-spokesperson: Silvia Piantelli)
- Goal: studio della dipendenza dalla densità dell'energia di simmetria tramite l'imbalance ratio R (che misura il grado di equilibratura dell'isospin N/Z) calcolato sull' $\langle N \rangle / Z$ del QuasiProiettile e il confronto con le previsioni di modelli di trasporto (per esempio AMD, Antisymmetrized Molecular Dynamics)

$$R = 2 \frac{X_{5864} - (X_{64+64} + X_{58+58}) / 2}{X_{64+64} - X_{58+58}}$$
 imbalance ratio, X variabile legata all'isospin

In assenza di isospin mixing, $R=-1$. In presenza di completo mixing, $R=0$

- La presa dati ha avuto successo (dati di buona qualità e statistica sufficiente)
- Analisi dati in corso

Conteggi sperimentali in rappresentazione polare



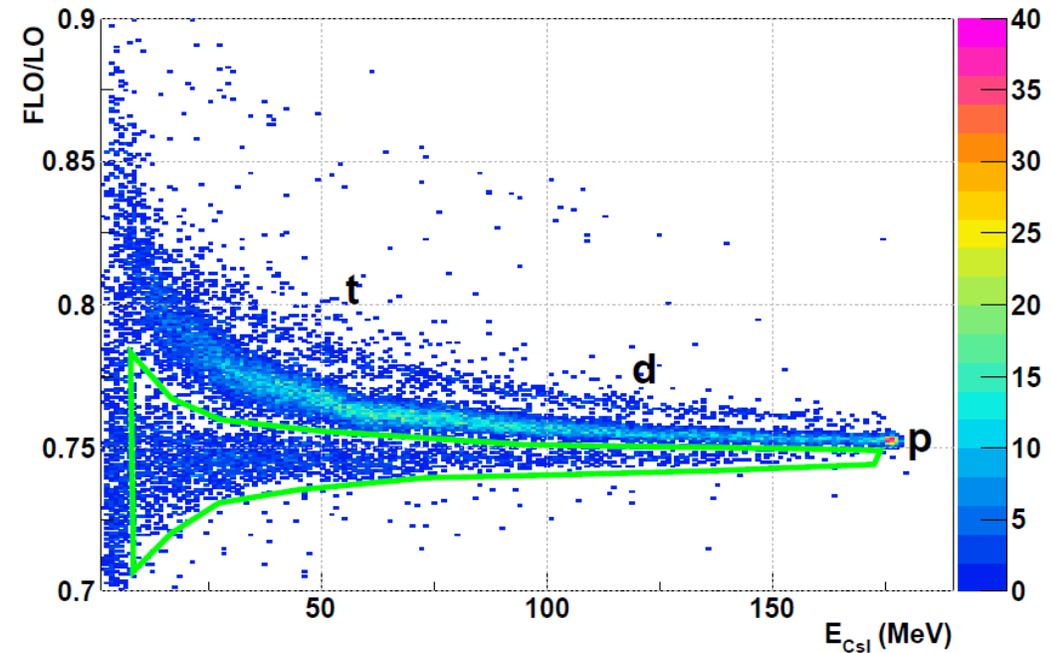
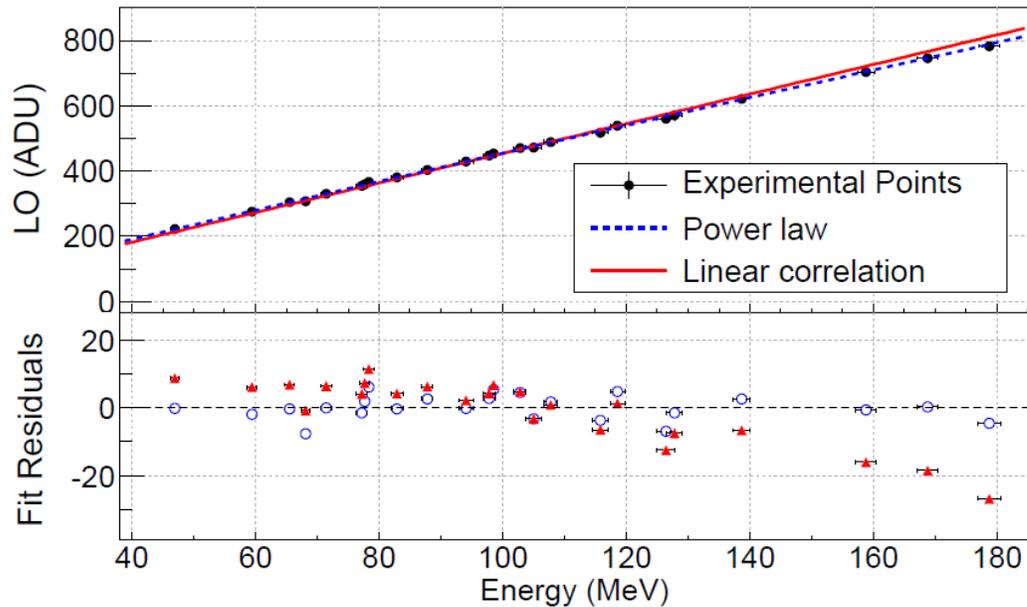
Il futuro a breve: presentati 2 proposal al prossimo PAC di GANIL per FAZIA-INDRA

- $^{48}\text{Ti}+^{48}\text{Ti}, ^{116}\text{Sn}@25,50\text{AMeV}$ (spokesperson: Silvia Piantelli, Giovanni Casini)
 - Studio della dipendenza dall'energia del fascio e dalla taglia del sistema della composizione isotopica dei frammenti di fissione del QuasiProiettile
- $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}@95\text{AMeV}$ (spokesperson: Alberto Camaiani, Diego Gruyer)
 - Studio degli eventi centrali di multiframmentazione ricostruendo i frammenti primari con tecniche di correlazione fra particelle; confronto con le previsioni di modelli di trasporto

Il lavoro sui rivelatori continua: test dei CsI(Tl) di FAZIA @ CCB Krakow (Poland) (Novembre 2018)

- Calibrazione dei CsI(Tl) con i p forniti dal ciclotrone del CCB (range di energia dei p: 47-180 MeV)
- Misura dell'efficienza intrinseca dei CsI(Tl) per i p (cioè caratterizzazione degli eventi che danno luogo a deposito incompleto dell'energia a causa di collisioni nucleari nel CsI(Tl))

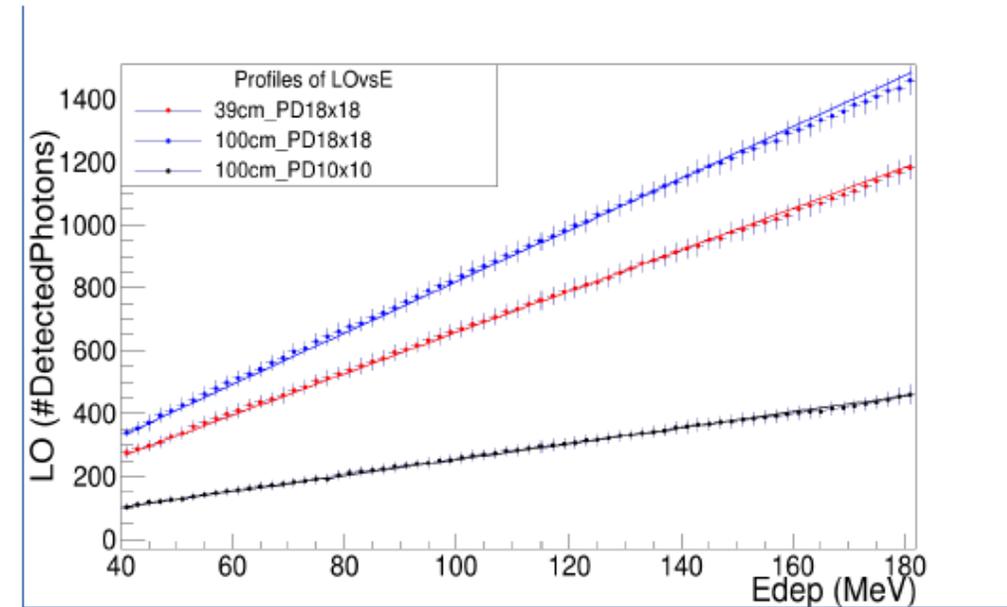
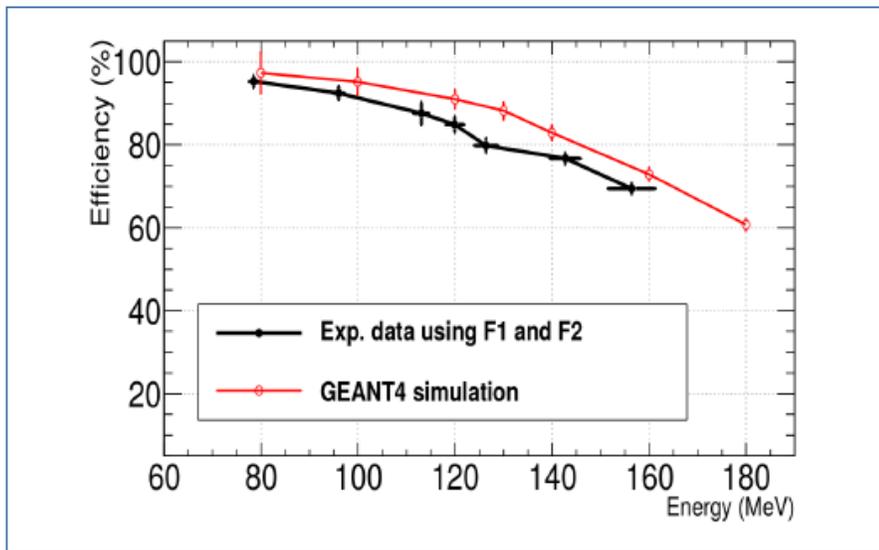
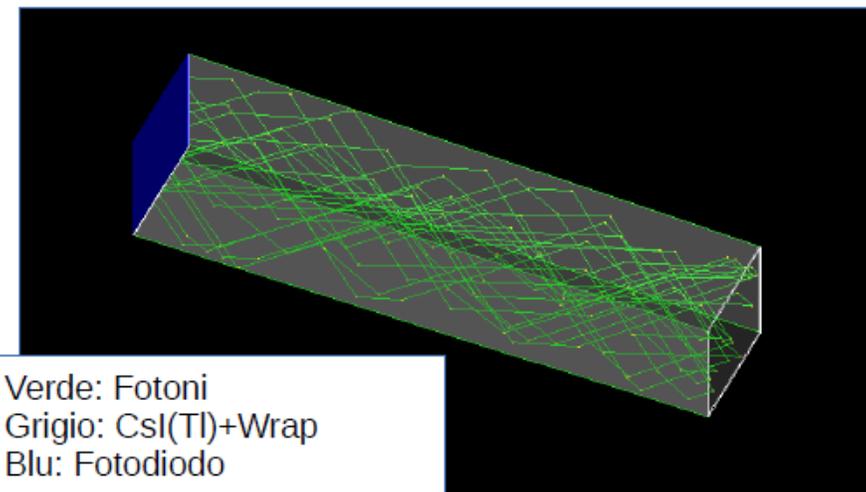
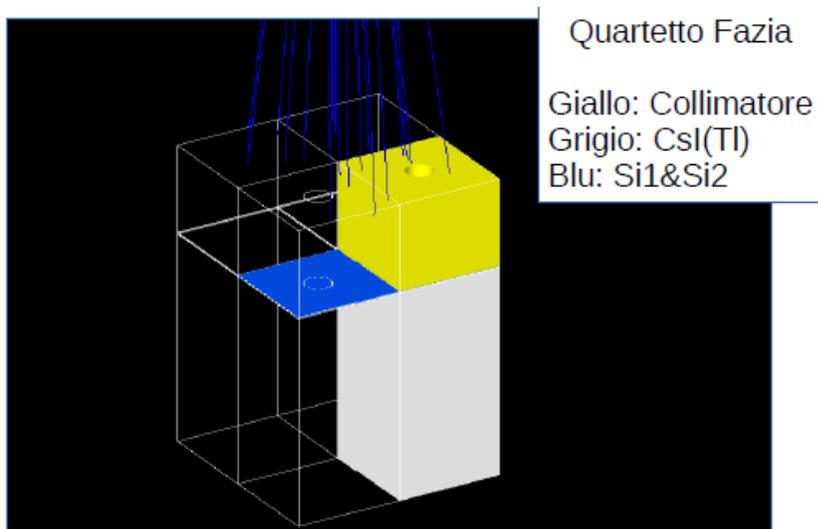
Calibrazione lineare fino a 120MeV



Efficienza ridotta al 70% per l'energia del fascio di p più alta

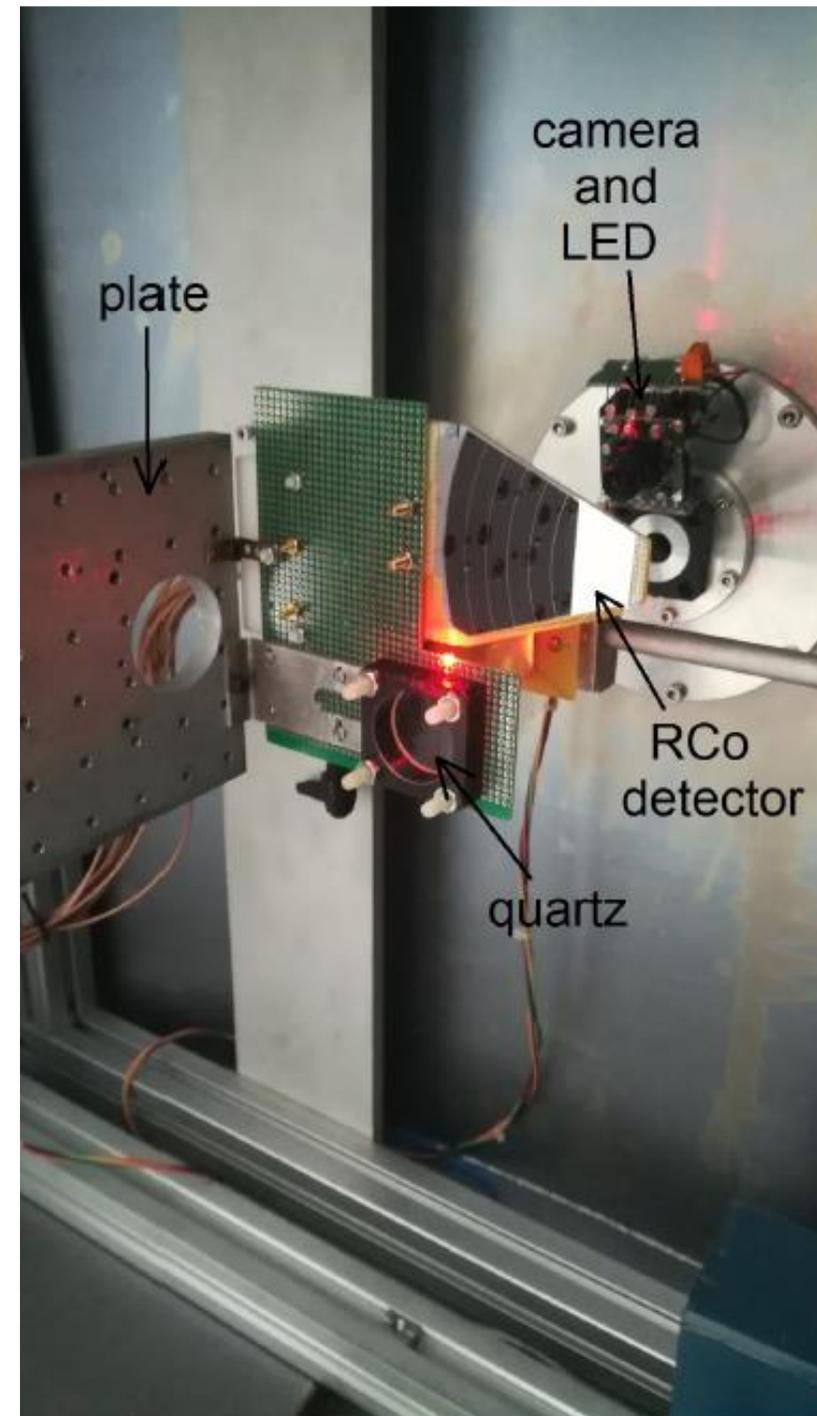
Efficienza di rivelazione: perdite dovute alla geometria (scattering) o a reazioni nucleari p+Cs,I,Tl

Light Output vs. Energia al variare del tipo di fotodiodo, wrapping, tapering (che hanno influenza sulla raccolta di luce)



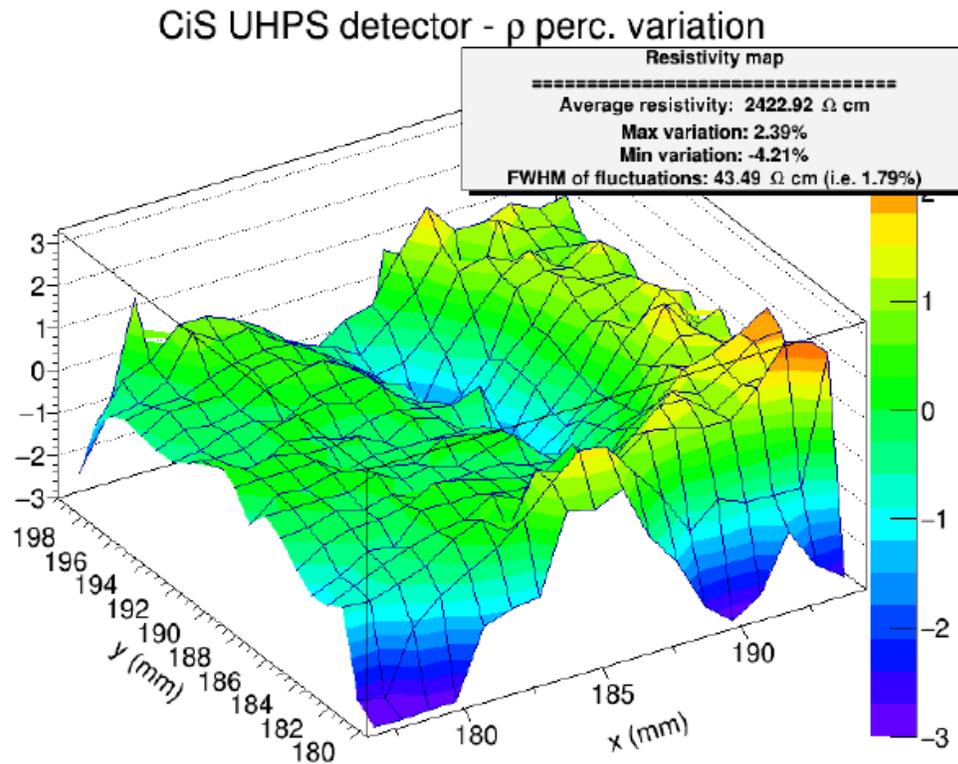
Caratterizzazione dei Si (e dei SiC) @ DEFEL - LABEC

- Realizzazione setup per mappare la resistività di rivelatori a semiconduttore
- Test effettuati in camera DEFEL (LaBeC) sia con protoni (fascio pulsato) che con α (sorgente collimata)
- Provato su rivelatori in Si di caratteristiche note con risultati ragionevoli
- Test utile per valutare l'uniformità di drogaggio del rivelatore prima che venga adoperato per PSA



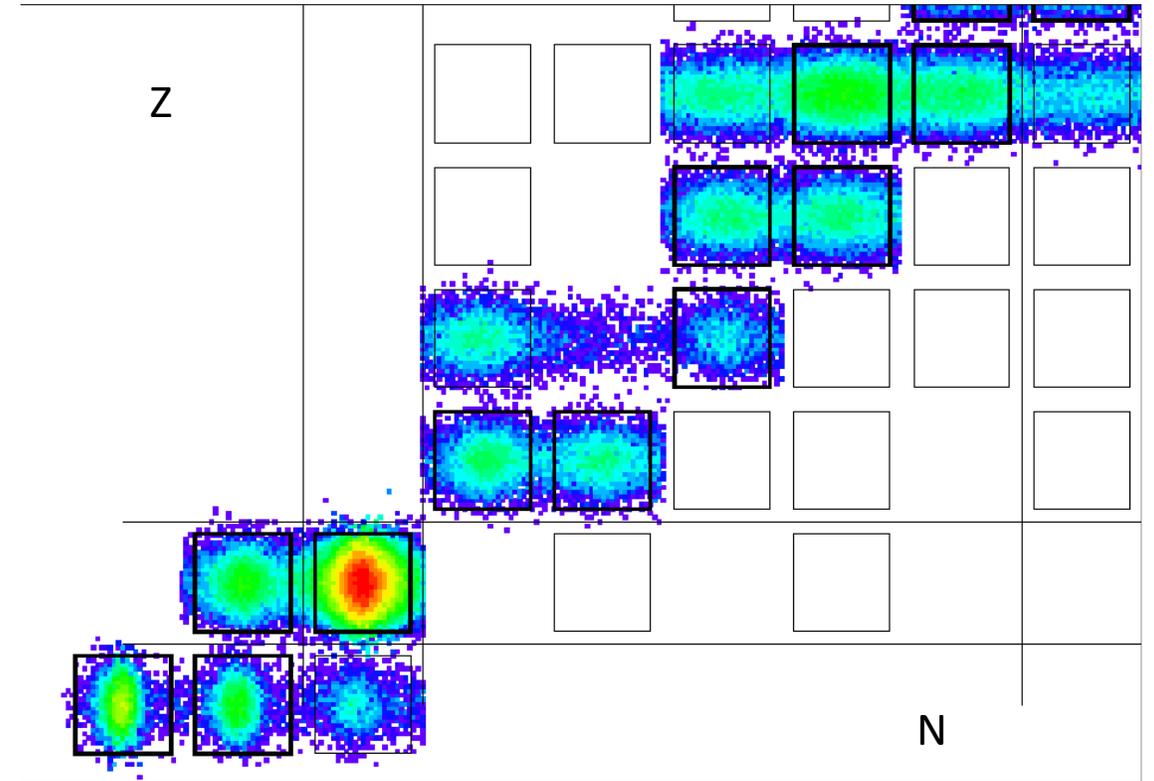
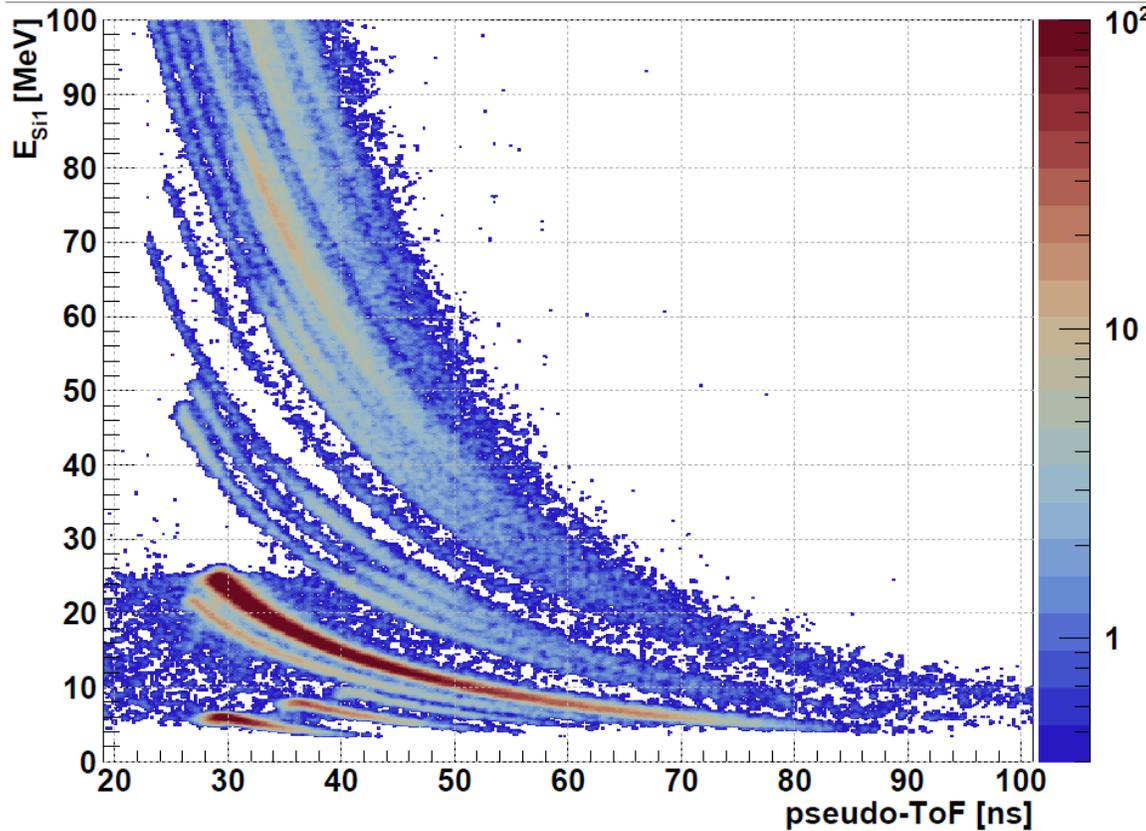
- Risultati migliori con sorgente α collimata (misura che richiede più tempo)
- Stiamo realizzando un punto di misura dedicato nel lab IONI PESANTI

Esempio di mappa di resistività per uno dei rivelatori di FAZIA (ultimo lotto acquistato)



C.Ciampi, G.Pasquali

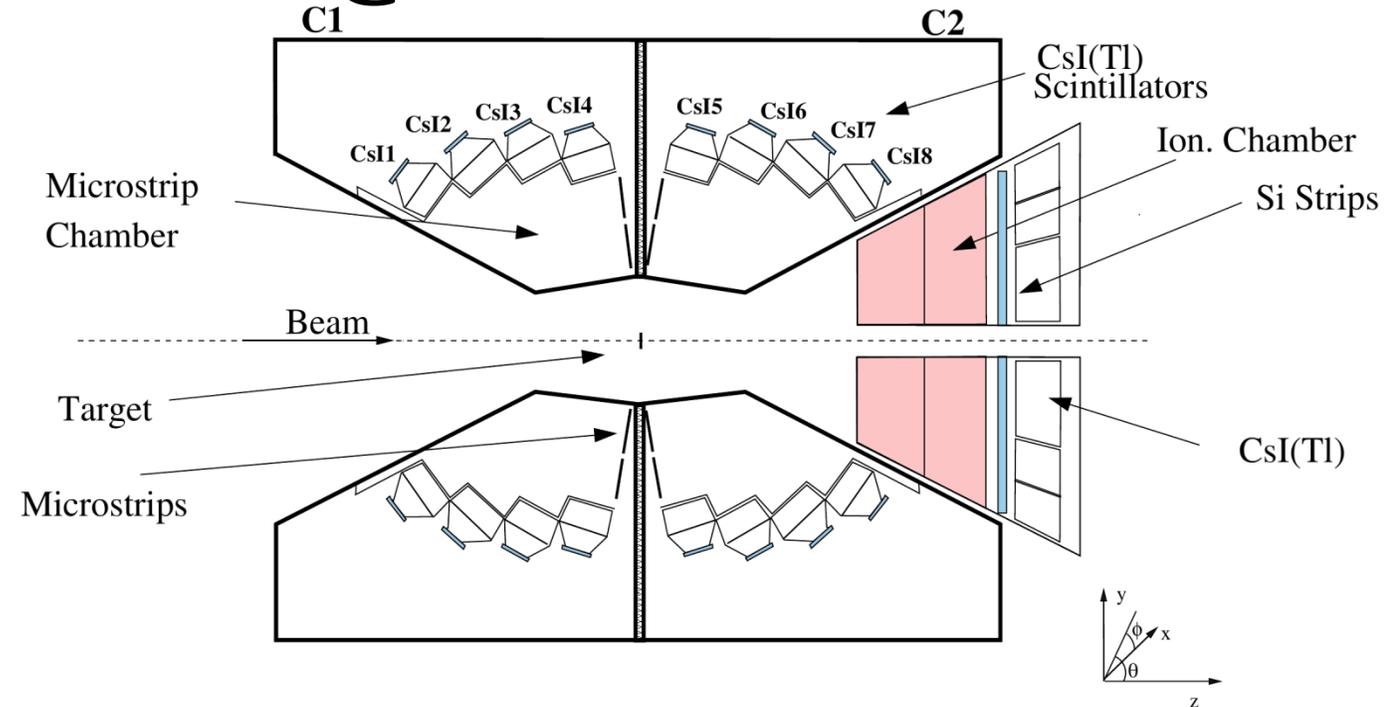
Identificazione da E-ToF per recuperare le LCP che si fermano nel Si1 (non ben identificate in A in PSA)



t_0 evento per evento da particelle ben identificate in massa ($tof = d \sqrt{\frac{m}{2E}}$)

GARFIELD+RCO@LNL

- Upgrade dell'elettronica in corso
- C'è un proposal approvato dal PAC di LNL (spokesperson: M.Bruno UniBo e Sezione di Bologna, T.Marchi LNL)
- Sistemi: $^{18}\text{O}+^{12,13}\text{C}@131\text{MeV}$;
 $^{18}\text{O}+^{12}\text{C}@300\text{MeV}$
- Goal: Studio del decadimento di un nucleo composto con neutroni in eccesso ($^{30}\text{Si}^*$ e $^{31}\text{Si}^*$) rispetto al corrispondente nucleo pari-pari $^{28}\text{Si}^*$ (sul quale la collaborazione ha già raccolto dati) per mettere in evidenza le eventuali persistenze o meno di effetti di α clustering nei branching ratio dei vari canali di decadimento rivelati in maniera esclusiva
- La presa dati è schedulata per il prossimo autunno



Verso SPES.....



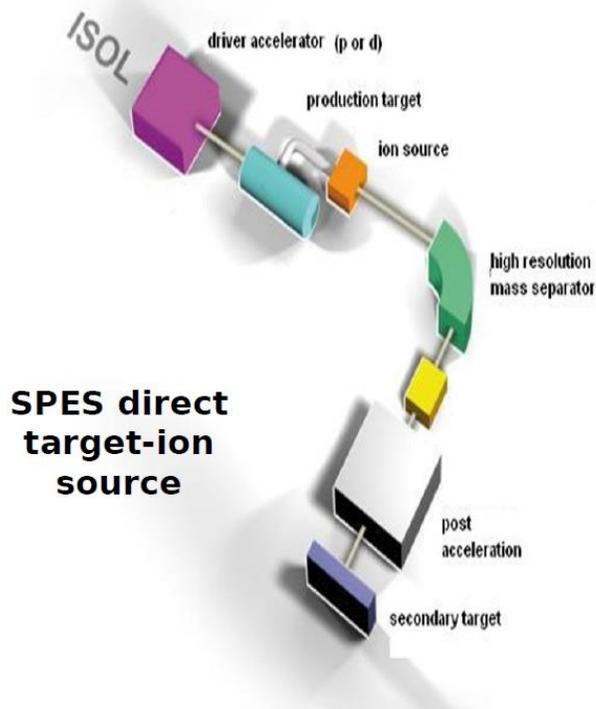
SPES
Selective Production of Exotic Species

SPES proton driver per RIB
40 MeV variable energy
200 μ A combined beam
8kW on the target

Fissione indotta dell'Uranio (Target di produzione: UCx) che permette di produrre molti nuclei instabili che poi vengono riaccelerati dagli acceleratori di LNL

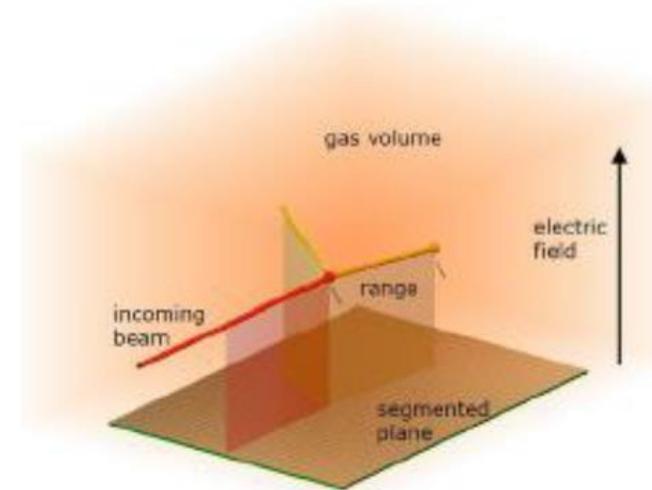
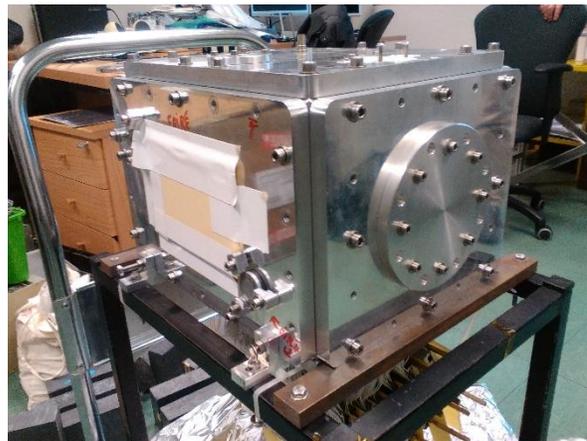
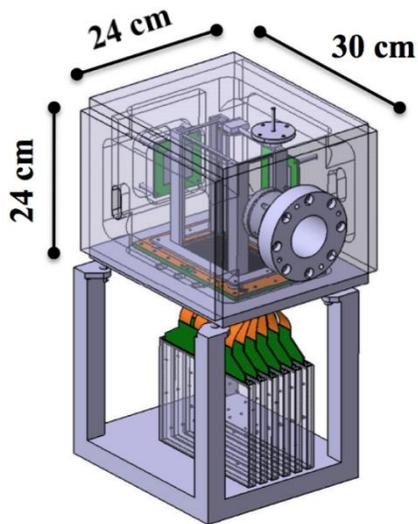
Prodotti fasci riaccelerati con energie di 10-12 AMeV nella regione di $A = 100$

Fasci di bassa energia e soprattutto basse intensità => occorrono setup appositamente studiati per sfruttare questo tipo di fasci



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 come sono i fasci radioattivi, in particolare per reazioni di trasferimento di pochi nucleoni
- Ha efficienza di rivelazione prossima a 4π
- 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 $2 \times 2 \text{ mm}^2$

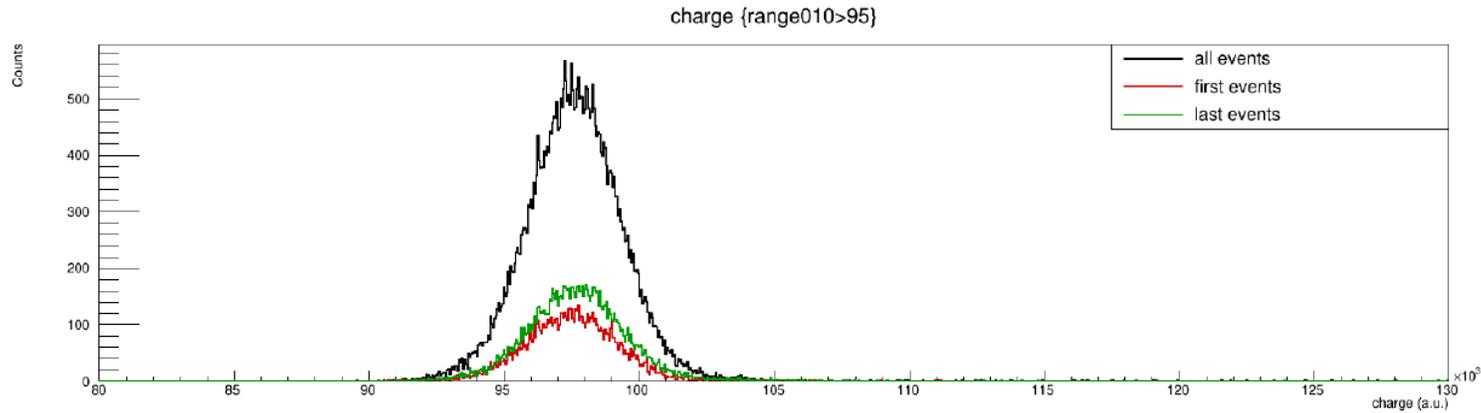
ATS

- Per poter utilizzare al meglio il target attivo è necessario che le perdite di energia del gas siano ben note
- Le tavole di perdita di energia esistenti non funzionano molto bene per i gas, soprattutto quando le energie degli ioni sono basse
- Nel periodo dicembre 2018- febbraio 2019 e' stata quindi effettuata una campagna di misura a LNS con molti fasci per costruire il profilo di perdita di energia per validare (o modificare) le tavole di perdita di energia esistenti

	Ion	Beam Energy (MeV/u)	Gases to be measured	BTU requested	<i>iC4H10 pressure (mbar) typical case example</i>
6Li	⁷ Li	1.0 - 4.5	H₂, D₂, CH₄, iC₄H₁₀, CF₄, CO₂, He	4.5	500
	⁹Be	1.5 - 4.5		4.5	500
11B	¹⁰ B	1.8 - 4.5		4.5	500
	¹² C	2.0 - 4.5		4.5	250
14N	¹⁵N	2.0 - 4.5		4.5	250
27Al	¹⁶ O	2.0 - 4.5		4.5	250
	¹⁹F	2.0 - 4.5		4.5	250
50Ti	²⁴Mg	2.0 - 4.5		4.5	250
	⁴⁰Ca	2.0 - 3.8		4.5	250
	¹²⁰Sn	1.5 - 1.7		4.5	125
Total				45	

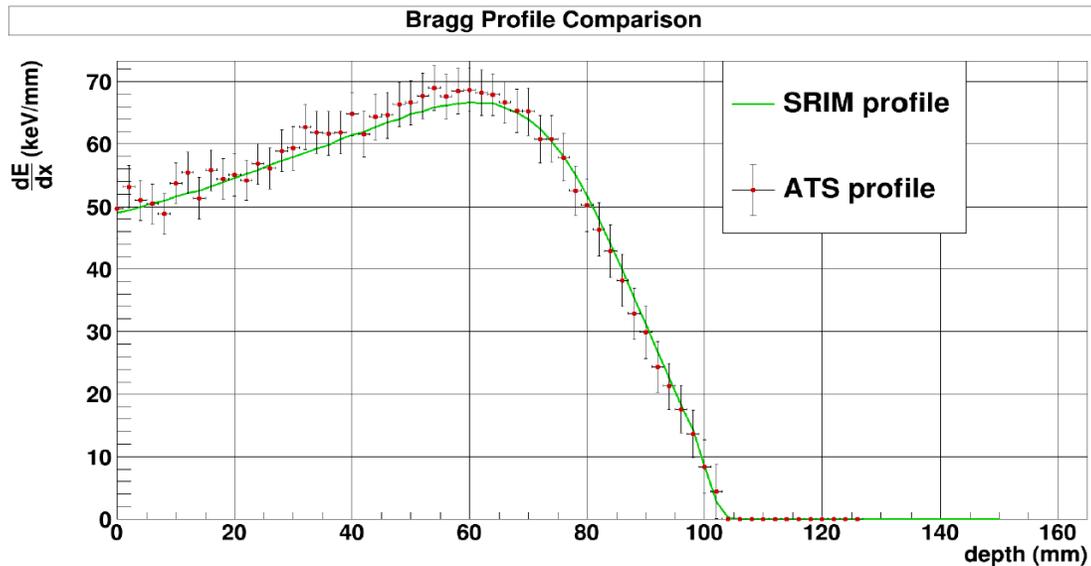
- Analisi dati in corso (PhD Thesis di A.Buccola)

Alcuni risultati: ${}^6\text{Li}@9\text{MeV} + \text{CF}_4$ (69.6mbar)

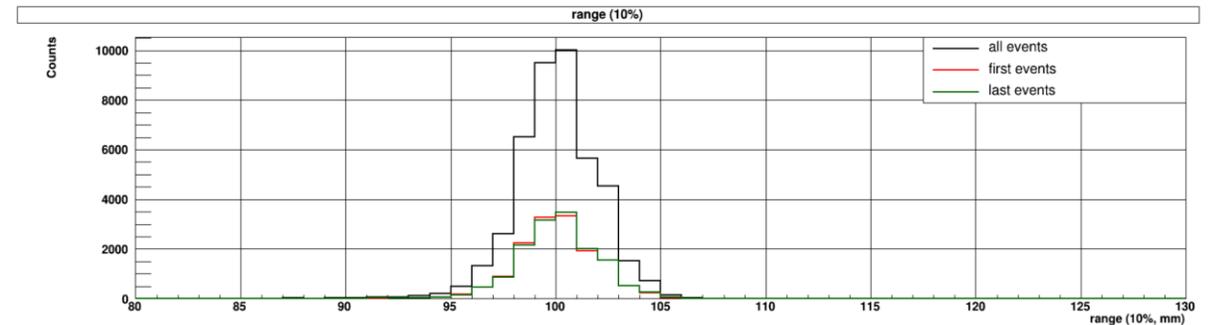


Distribuzione di carica
Nessuna variazione di pressione
durante il run (inizio: rosso, fine:
verde)

Il profilo del picco di Bragg è in accordo con SRIM

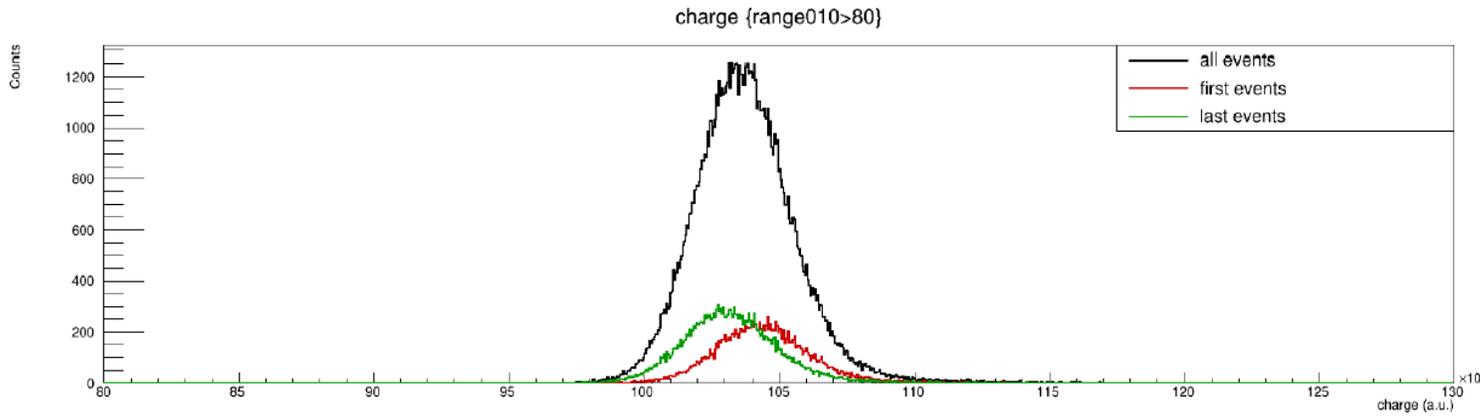


Range



$$R(\text{ATS}) = (100.1 \pm 1.8) \text{ mm}$$
$$R(\text{SRIM}) = 100.6 \text{ mm}$$

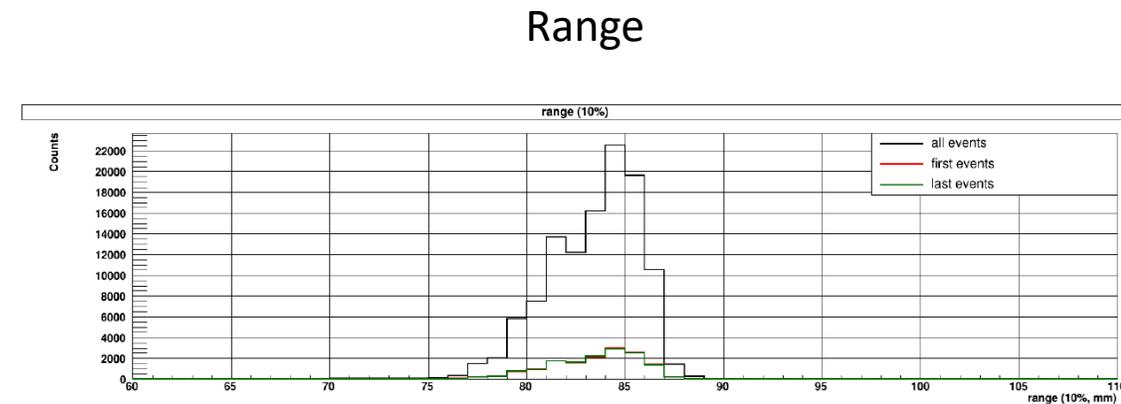
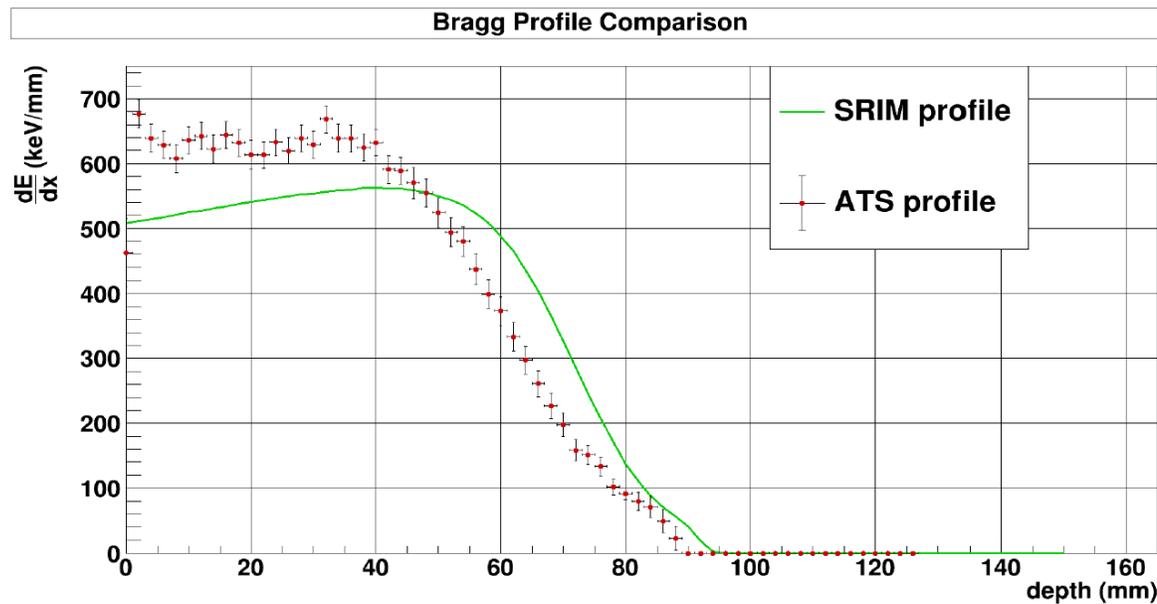
^{27}Al @75MeV, CF_4 (101mbar)



Distribuzione di carica con limitata variazione fra inizio e fine run

Profilo del picco di Bragg

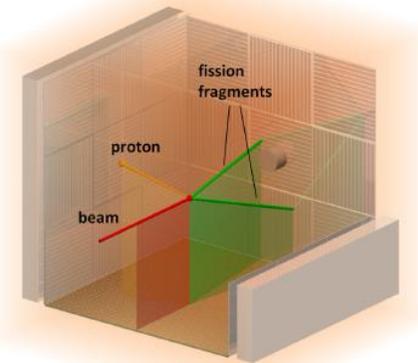
Questa volta SRIM e ATS non sono in accordo



$$R(\text{ATS}) = (83 \pm 2) \text{ mm}$$
$$R(\text{SRIM}) = 88 \text{ mm}$$

Prossime misure schedulate a LNS

- $^{136}\text{Xe}@10\text{AMeV} + \text{D}_2$ (200mbar)
Studio delle reazioni di trasferimento (d,p) per testare le performance del setup e (d, ^3He) per studiare gli stati eccitati di ^{135}I (poco conosciuto)
- $^{208}\text{Pb}@15\text{AMeV} + \text{D}_2$ (1bar), ^4He (250mbar)
Studio delle barriere di fissione di ^{209}Pb tramite la reazione di trasferimento (d,p) e di ^{211}Bi tramite la reazione di trasferimento (α ,p)
- $^{20}\text{Ne}@60\text{AMeV} + \text{He}$ (200mbar)
Studio della isoscalar giant monopole resonance in ^{20}Ne tramite la reazione $^{20}\text{Ne}(\alpha,\alpha')$



Il contributo dei pensionati

- Pubblicazione di un articolo sul confronto fra i dati di FIASCO e i risultati del codice di trasporto AMD accoppiato al codice statistico GEMINI come afterburner.

PHYSICAL REVIEW C **99**, 064616 (2019)

Comparison between calculations with the AMD code and experimental data for peripheral collisions of $^{93}\text{Nb} + ^{93}\text{Nb}$, ^{116}Sn at 38 MeV/nucleon

S. Piantelli,^{1,*} A. Olmi,¹ P. R. Maurenzig,^{1,2} A. Ono,³ M. Bini,^{1,2} G. Casini,¹ G. Pasquali,^{1,2} A. Mangiarotti,⁴ G. Poggi,^{1,2}
A. A. Stefanini,^{1,2} S. Barlini,^{1,2} A. Camaiani,^{1,2} C. Ciampi,^{1,2} C. Frosin,^{1,2} P. Ottanelli,^{1,2} and S. Valdré¹

¹*INFN Sezione di Firenze, I-50019 Sesto Fiorentino, Italy*

²*Dipartimento di Fisica, Università di Firenze, I-50019 Sesto Fiorentino, Italy*

³*Department of Physics, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan*

⁴*Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 05508-090 São Paulo, Brazil*

La descrizione teorica delle collisioni a energie di Fermi è particolarmente difficile perché si tratta di una regione di transizione in cui coesistono effetti dovuti al campo medio e effetti dovuti alle collisioni nucleone nucleone.

AMD è un codice di dinamica molecolare che ha dimostrato di saper descrivere le collisioni centrali.

In questo studio è stato verificato che fa un ottimo lavoro anche per le collisioni periferiche, riproducendo le proprietà medie del QuasiProiettile (Z , angolo polare, v_{QT}^{cm}/v_{rel}) e le molteplicità delle particelle evaporate (con l'eccezione dei p) in funzione della centralità

GAMMA

RN: Silvia Leoni UniMI e Sezione di Milano, Daniel Napoli LNL

RL: Adriana Nannini Sezione di Firenze

Attività dei GAMMisti fiorentini

Le attività del personale della Sezione di Firenze afferente a GAMMA si articolano su due linee principali:

1. Misure di Coulomb Excitation con l'apparato SPIDER accoppiato a rivelatori HPGe per gamma (es. GALILEO)
2. Misure di elettroni di conversione con un setup per fasci stabili (Florence electron magnetic spectrometer) e con un setup per fasci di SPES non riaccelerati attualmente in fase di costruzione (SLICES)

Le misure di Coulomb Excitation e quelle degli elettroni di conversione sono tecniche complementari in grado di dare informazioni sulla forma dei nuclei e sulla coesistenza di forma (presenza nello stesso nucleo di stati associati a forme diverse ad energia di eccitazione simile).

L'attività sperimentale degli afferenti a GAMMA della Sezione di Firenze si svolge principalmente presso i LNL, ma anche presso ISOLDE@CERN, LNS, HIL@Warsaw, GANIL, ILL@GRENOBLE, TRIUMF@VANCOUVER

COULOMB EXCITATION AT LNL WITH SPIDER- GALILEO SETUP

WHY COULOMB EXCITATION?

COULEX is a powerful and direct experimental tool to study nuclear collectivity and shapes.

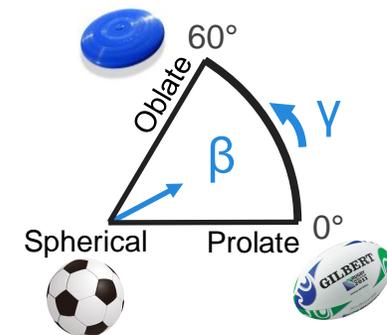
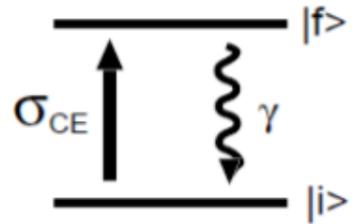
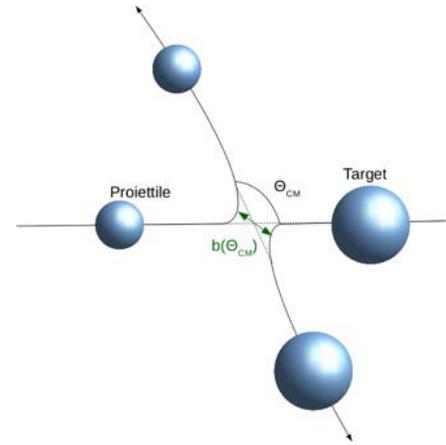
- ▶ the excitation process is purely electromagnetic
- ▶ cross-sections give a direct measure of the matrix elements of the E2 and E3 operators

$$B(\Omega L; J_i \rightarrow J_f) = \frac{1}{2J_i + 1} |\langle J_f || M(\Omega L) || J_i \rangle|^2$$

- ▶ diagonal matrix elements (spectroscopic quadrupole moments) are a measure of charge distribution

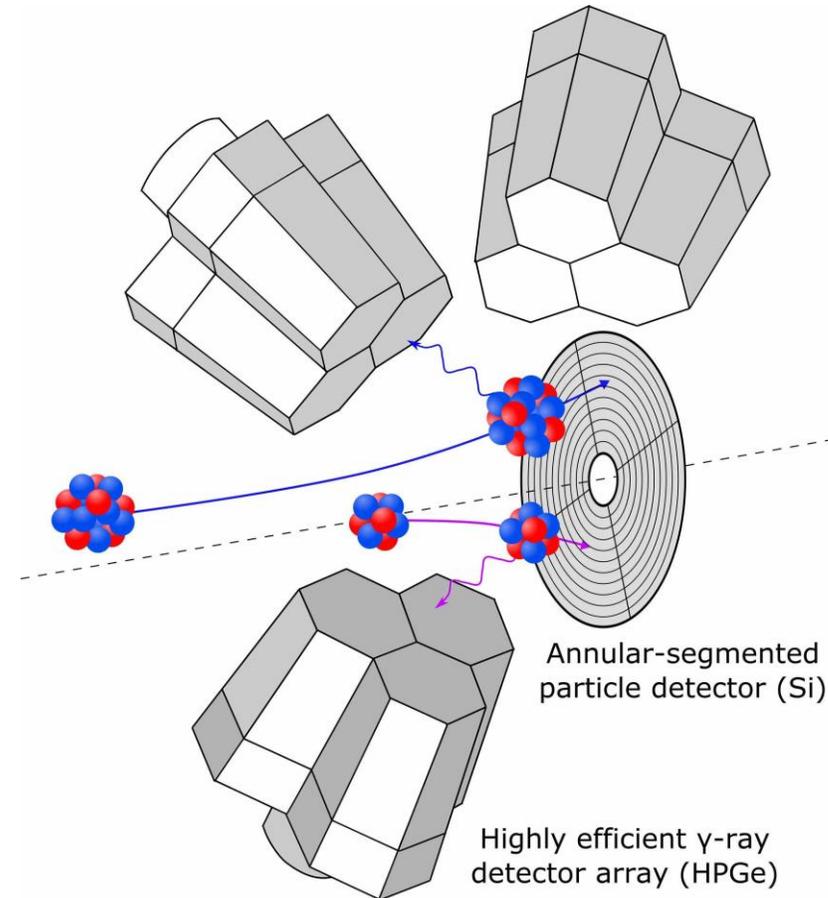
$$Q_s(J) = \sqrt{\frac{16\pi}{5}} \frac{\langle JJ20 | JJ \rangle}{\sqrt{2J+1}} \langle J || E2 || J \rangle$$

- ▶ complete set of E2 matrix elements brings information on shape parameters via quadrupole sum rules



Schema di setup sperimentale usato per CouLEX (ad esempio SPIDER + GALILEO)

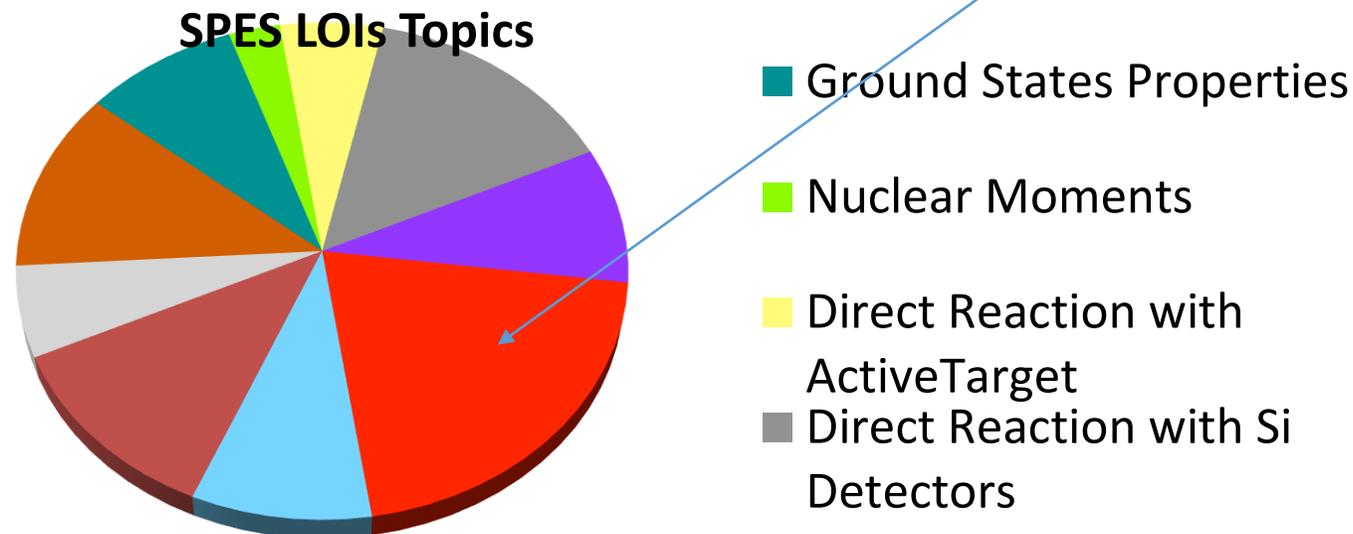
- ▶ germanium detectors to detect γ -rays
- ▶ particle detector to detect the scattered projectiles and/or recoiling target nuclei
- ▶ to select Coulomb Excitation events
- ▶ to determine scattering angle and reconstruct the kinematics of the reaction
- ▶ to perform Doppler correction



WHY COULOMB EXCITATION @ LNL

- The SPES facility for radioactive beams under construction
- Coulomb Excitation ideal “first day” experiment:
 - high cross sections (up to barns) compensate low beam intensities
 - beam energies of few MeV/A correspond to the maximum probability of multi-step excitation

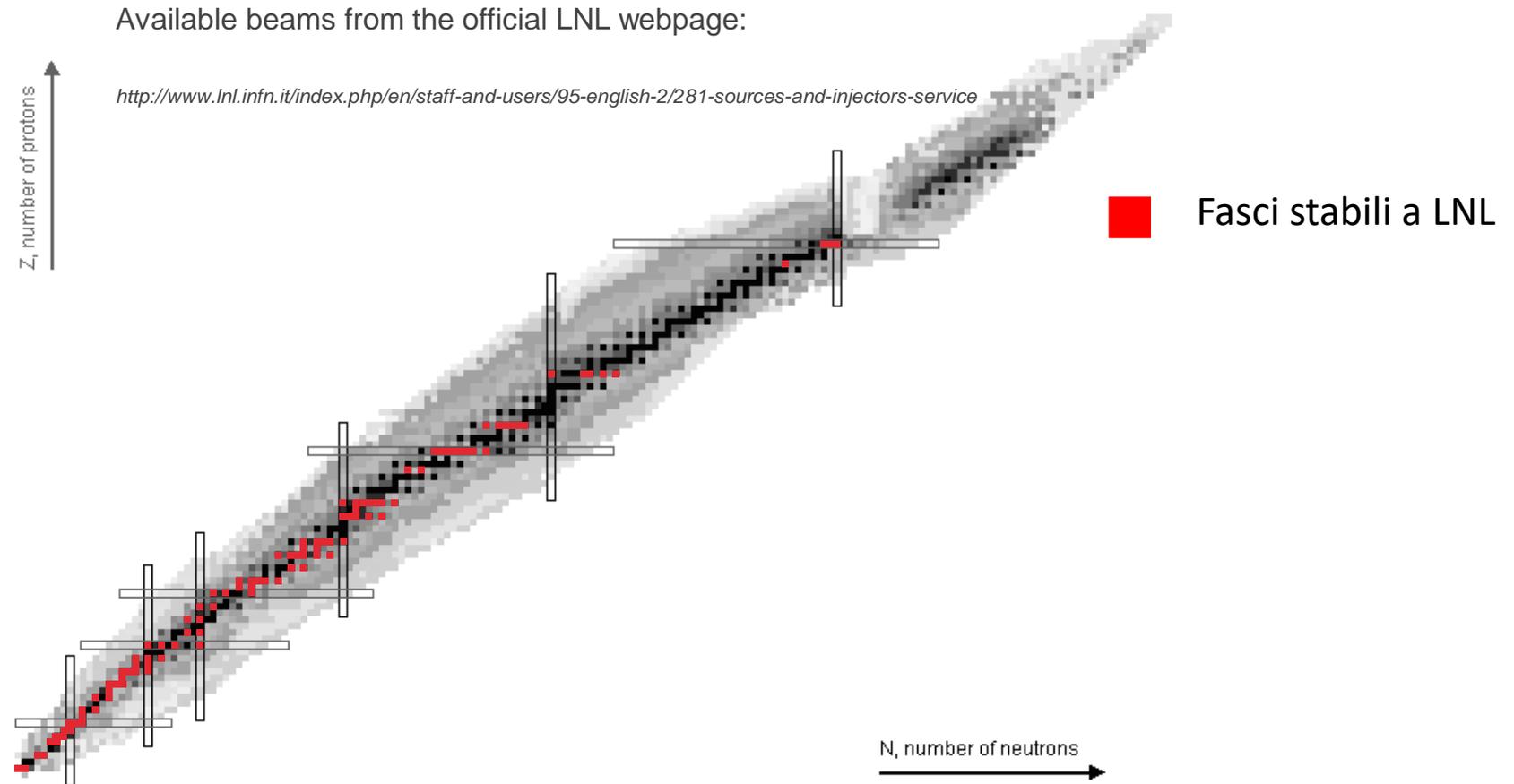
SPES International Workshop: 47 Letter of Intent (7 CoulEx)



COULEX @ LNL SPIDER&GALILEO



- Any possibilities for Coulex with stable beams? Yes (in progress)

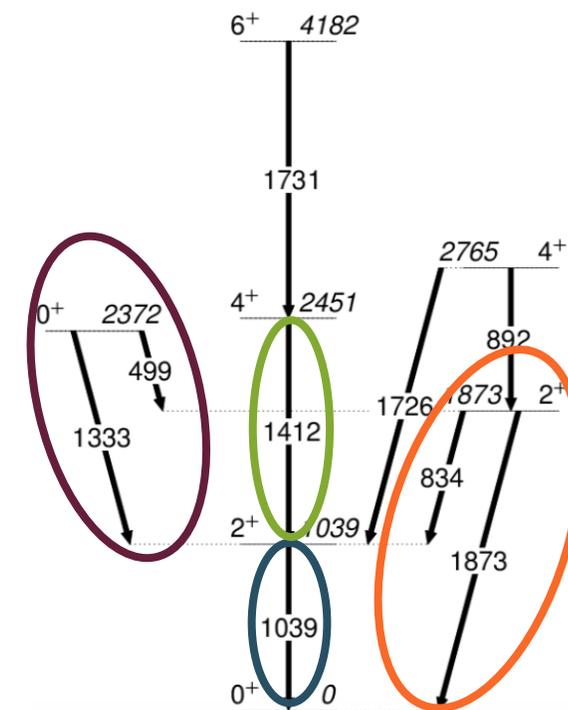




First Experiment: Coulomb Excitation of ^{66}Zn

Spokespersons: M. Rocchini, K. Hadynska-Klek

- ▶ Commissioning of the apparatus: $Q(2_1^+)$ known with high precision.
- ▶ New physics:
 - ▶ Shape of 0_2^+ ? $B(E2)$ value unknown
 - ▶ Is the 2_2^+ high-collective or not? Discrepant values for its lifetime
 - ▶ Is the 4_1^+ collective or not? Discrepant values for the $B(E2; 4_1^+ \rightarrow 2_1^+)$
- ▶ Beam: ^{66}Zn (240 MeV, 1 — 1.5 pnA)
- ▶ Target: 1 mg/cm² of ^{208}Pb



COULEX @ LNL SPIDER&GALILEO

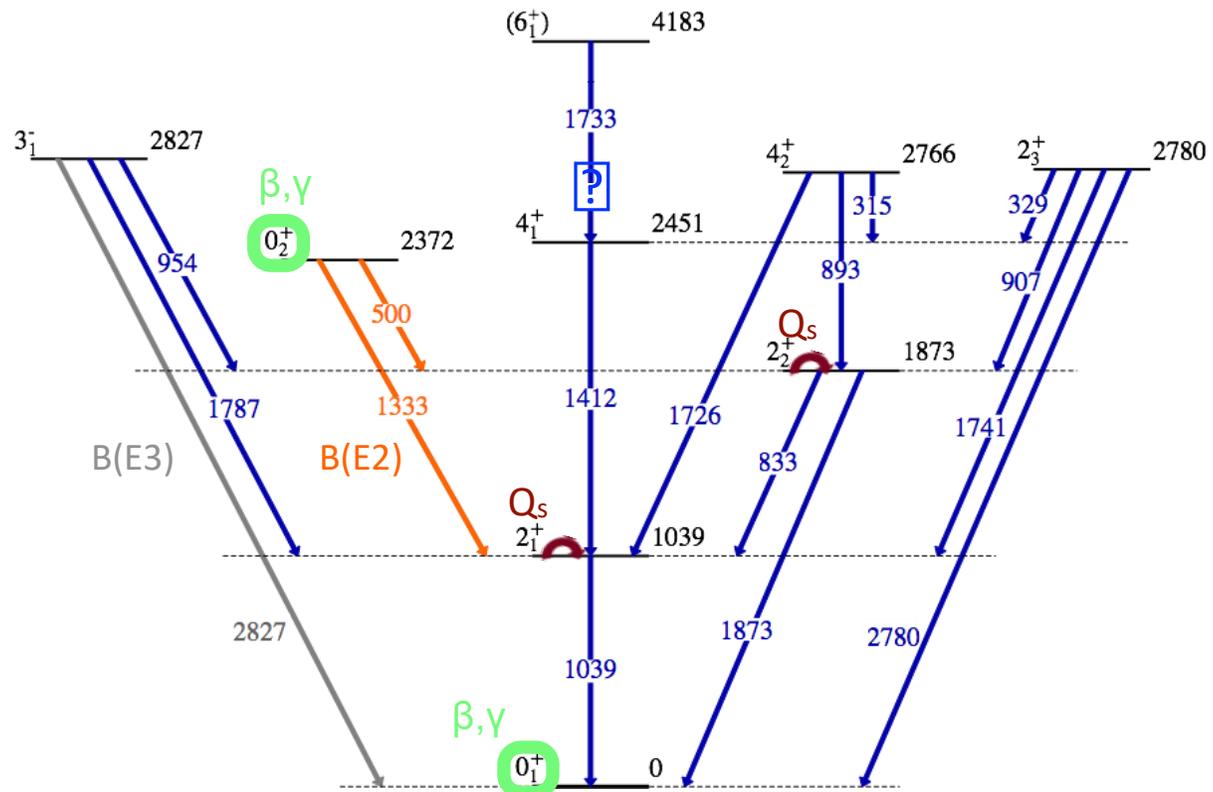


First Experiment: Coulomb Excitation of ^{66}Zn

Spokespersons: M. Rocchini, K. Hadynska-Klek

- ▶ validation of the setup performances: $Q_s(2_1^+) = +24(9)$ [old $Q_s(2_1^+) = +24(8)$] efm^2

- ▶ new physics



PhD Thesis di Marco Rocchini

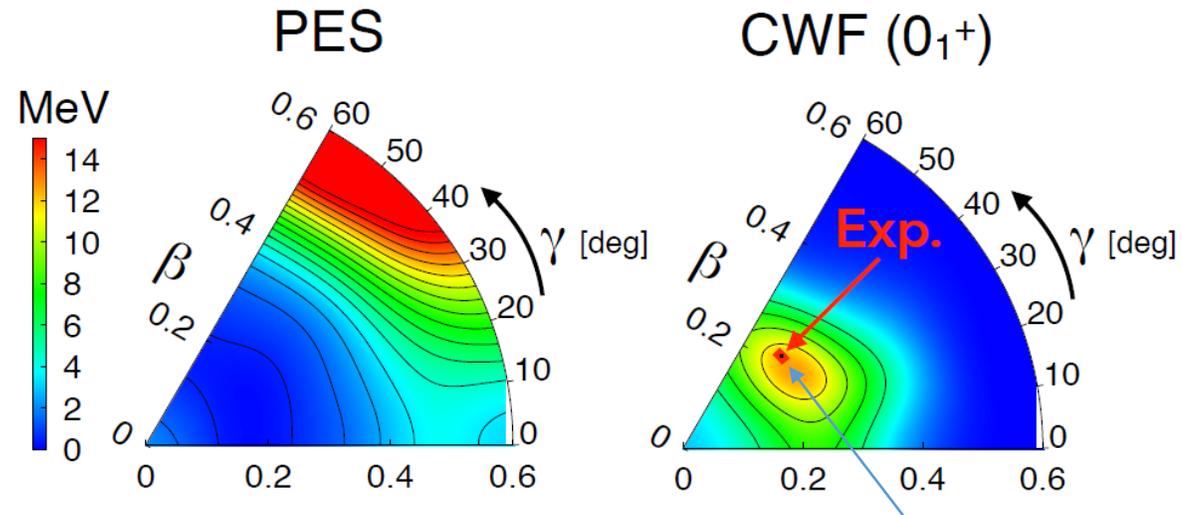
β, γ : parametri di deformazione

Q momenti di quadrupolo (alcuni noti, alcuni nuovi)

Deformation of 0^+ states

- ▶ **Quadrupole sum rule** (K. Kumar, *Phys. Rev. Lett.* 28 (1972) 249) \Rightarrow Nuclear deformation from matrix elements:
 - ▶ 0_1^+ : $\langle\beta\rangle = 0.225(8)$, $\langle\gamma\rangle = 43^\circ(3^\circ)$
 - ▶ 0_2^+ : $\langle\beta\rangle = 0.055(5)$
- ▶ Comparison with **BMF calculations** (T. Rodriguez, private communication)

Error estimation still on going



Prima misura della deformazione dello stato fondamentale e del primo 0 eccitato
 Due pubblicazioni in preparazione

COULEX @ LNL SPIDER&GALILEO



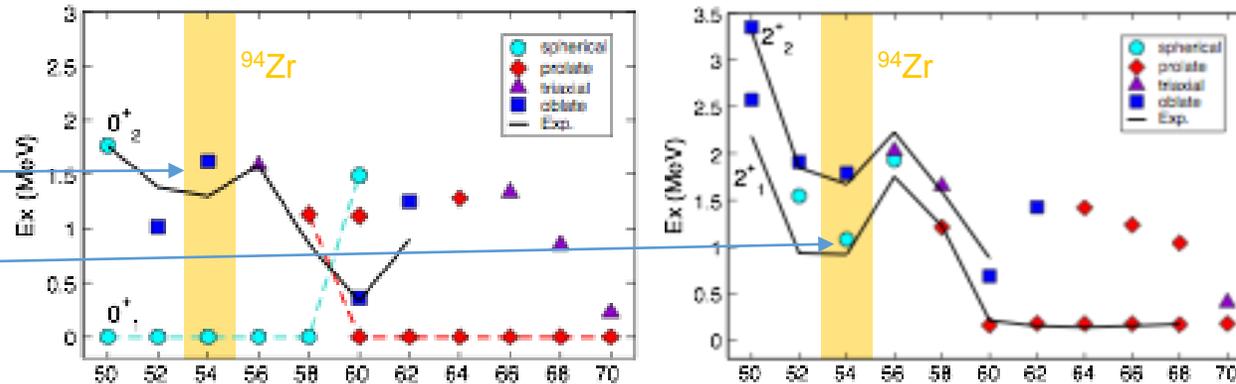
Probing collectivity and configuration coexistence in ^{94}Zr with low-energy Coulomb Excitation

Spokespersons: D. Doherty, M. Rocchini, M. Zielinska

- Recent state-of-the-art Monte Carlo shell model calculations predict shape coexistence in Zr isotopes.

Coesistenza di forma: presenza nello stesso nucleo di stati associati a forme diverse a energia di eccitazione simile

T. Togashi, Y. Tsunoda, T. Otsuka e N. Shimizu, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 172502 (2016)



N

- Observation* of a strong $2^+_{2} \rightarrow 0^+_{2}$ transition (19 W.u.) suggests a deformed band built on 0^+_{2}

* A. Chakraborty et al., *PRL* **110**, 022504 (2013).

Sembra che ci sia struttura collettiva nella banda eccitata

La misura di Coulex misura davvero la forma della banda eccitata

COULEX @ LNL SPIDER&GALILEO



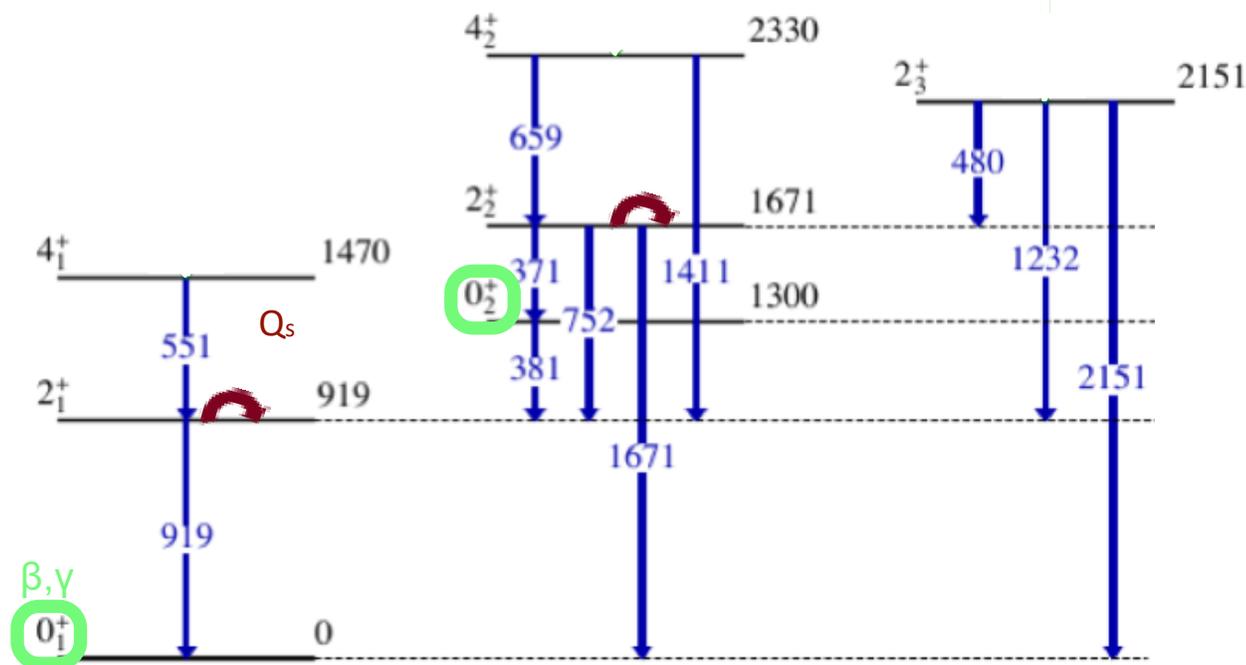
Probing collectivity and configuration coexistence in ^{94}Zr

Spokespersons: D. Doherty, M. Rocchini, M. Zielinska

- ▶ Beam: ^{94}Zr (370 MeV, 1 — 1.5 pnA)
- ▶ Target: 1 mg/cm² of ^{208}Pb
- ▶ Six 3"X3" LaBr₃:Ce used for the first time in COULEX @LNL
- ▶ GOSIA analysis on-going:

Tesi magistrale di Naomi Marchini

Risultati (analisi in corso):
Forma (cioè parametri della
deformazione β , γ oppure
momento di quadrupolo) di
alcuni livelli



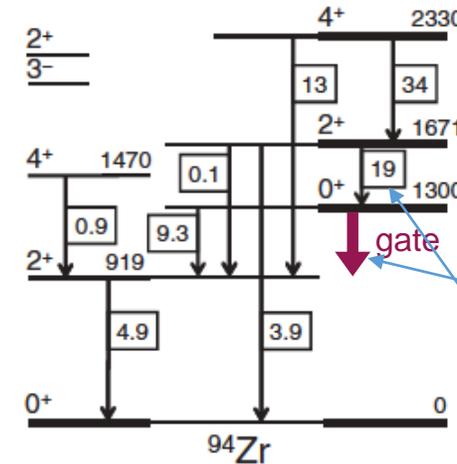
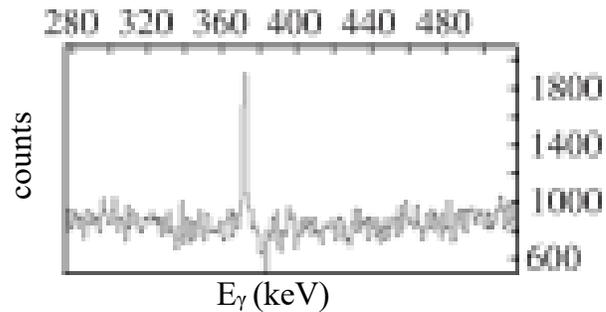


Probing collectivity and configuration coexistence in ^{94}Zr

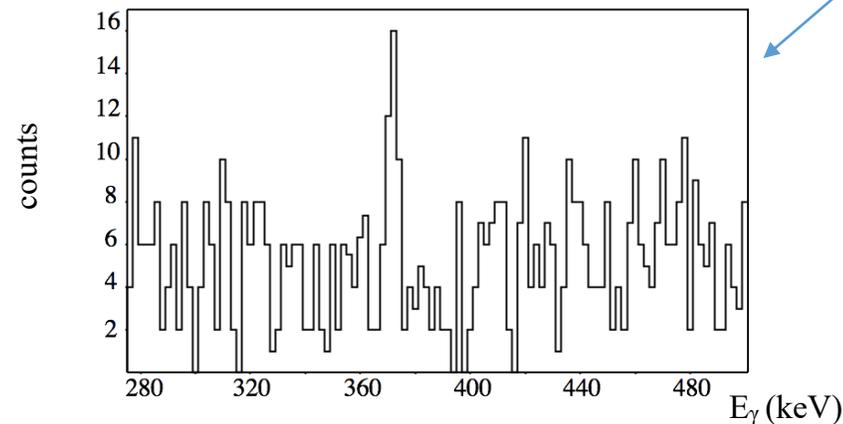
Spokespersons: D. Doherty, M. Rocchini, M. Zielinska

- ▶ Random-background-subtracted γ - γ -particle coincidence spectrum gated on the 382 keV

* *A. Chakraborty et al., PRL 110, 022504 (2013).*



Gate su questa transizione, Si vede la riga $2+ \rightarrow 0+$



Coincidenze γ - γ -particella => vede la stessa transizione del PRL di Chakraborty

Approved Coulomb excitation experiments (with Florence spokesperson)

- Shapes of 0+ states and collectivity in ^{130}Xe for studies of ^{130}Te double decay

A. Nannini P. Napiorkowsky M. Rocchini

- Coulomb Excitation of ^{58}Ni : collectivity near the doubly magic ^{56}Ni nucleus

M. Rocchini A. Nannini K. Hadynska-Klek

- Coexisting shapes and precision tests of Monte-Carlo shell model calculations in ^{96}Zr

N. Marchini D. T. Doherty M. Zielinska

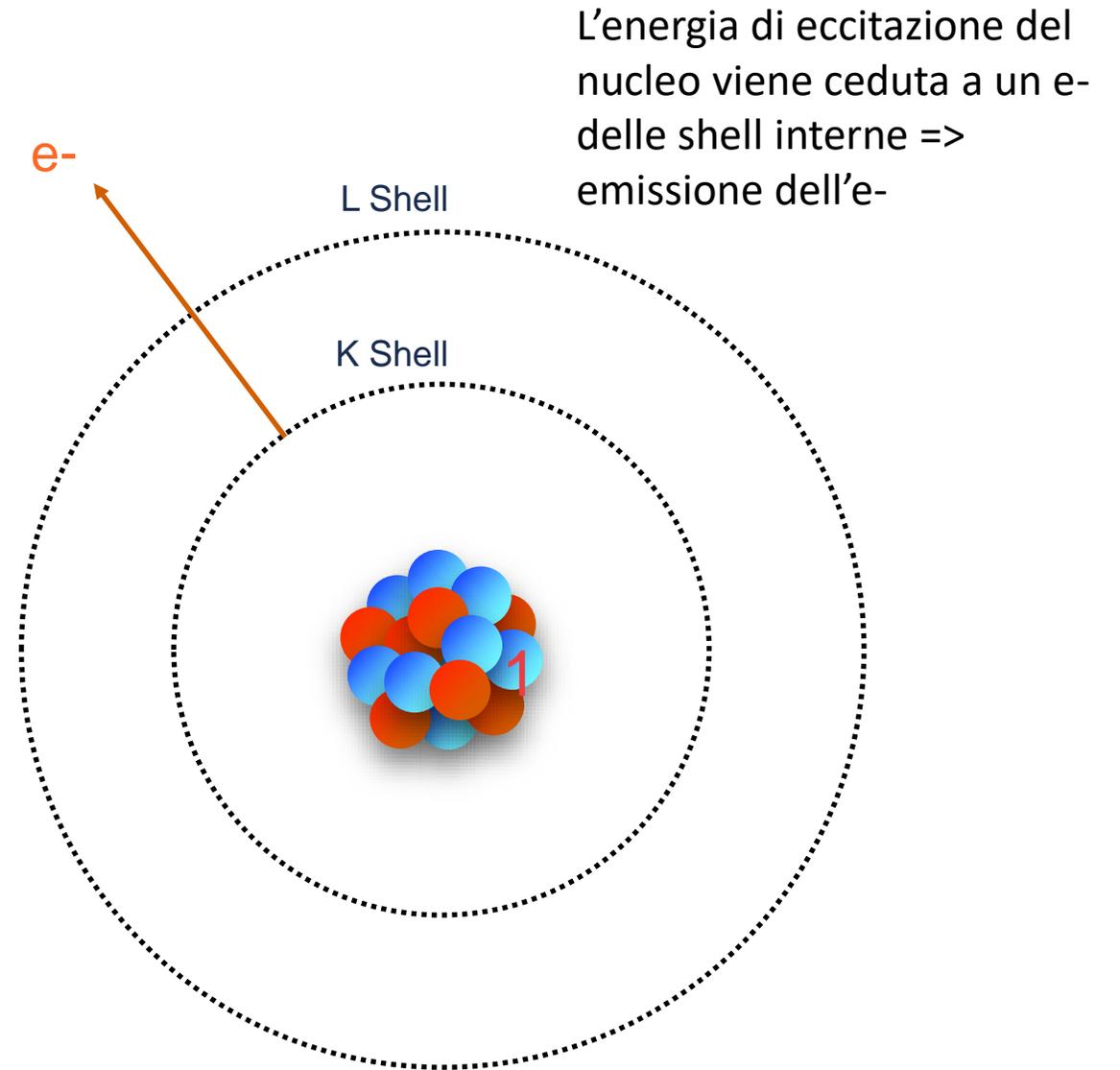
One Lol for Coulomb excitation experiments with SPES radioactive beams

Internal Conversion Electron Measurements @SPES

Internal Conversion Electron Spectroscopy

Spectroscopy of internal conversion electrons (**ICE**) provides an important tool to investigate nuclear structure:

- Complementary spectroscopy to γ -rays
- Measurement of internal conversion coefficients \Rightarrow **spin and parity of the levels**
- Study of electric monopole transitions (E0) \Rightarrow **cannot proceed via gamma emission**



E0 Transitions

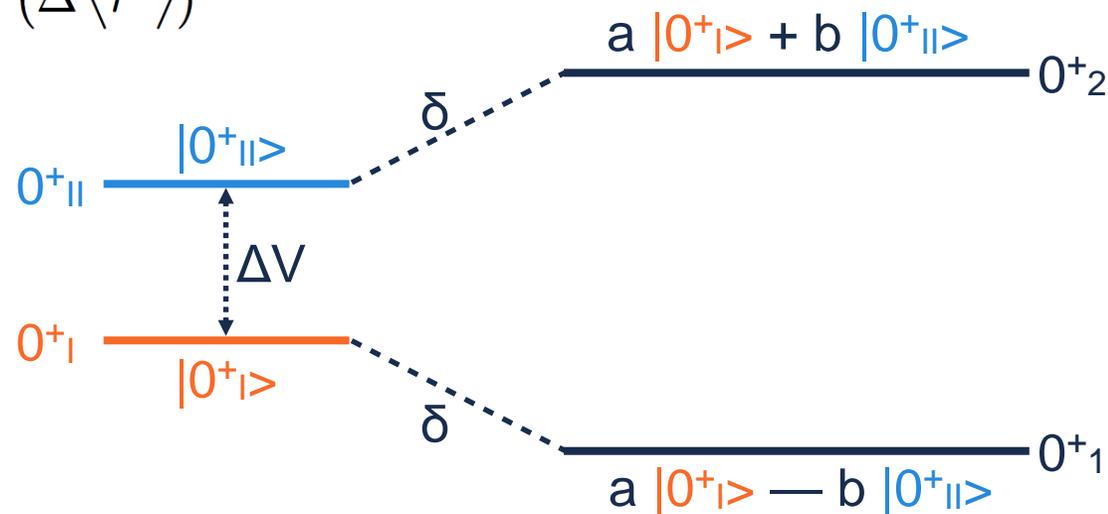
- ▶ Monopole Transition Strength:

$$\rho^2(E0) = \left| \frac{\langle f | T(E0) | i \rangle}{eR^2} \right|^2 \quad \begin{array}{l} \langle f | T(E0) | i \rangle \Rightarrow \text{monopole matrix element} \\ R \Rightarrow \text{nuclear radius} \end{array}$$

- ▶ Used for instance to study **shape coexistence**
- ▶ ρ^2 is correlated to the change of the mean square nuclear radius between the two states and the mixing of the wave functions:

$$\rho^2(E0) = \frac{Z^2}{R^4} a^2 b^2 (\Delta \langle r^2 \rangle)^2$$

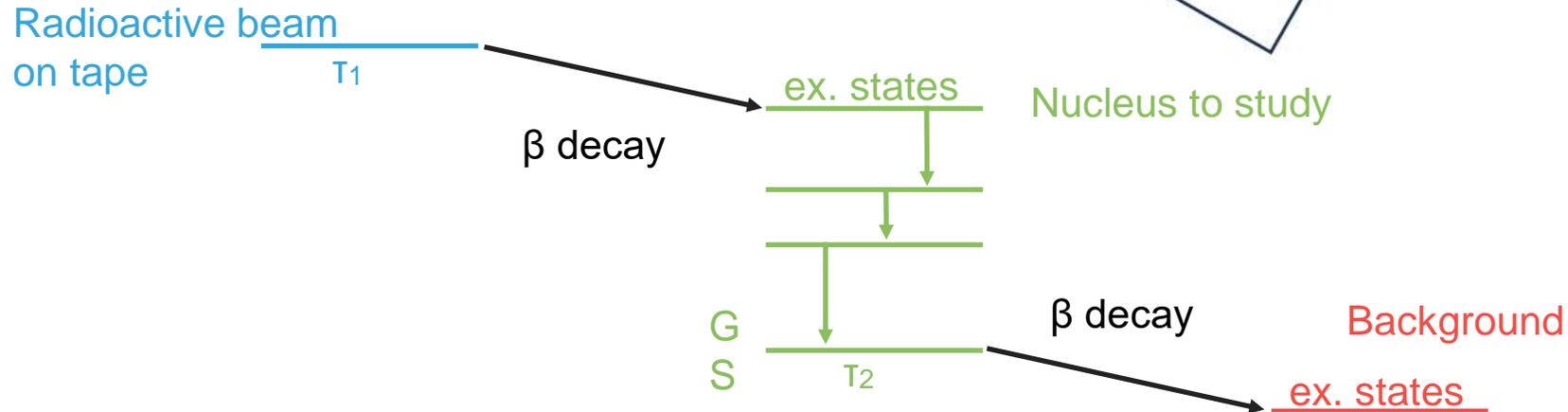
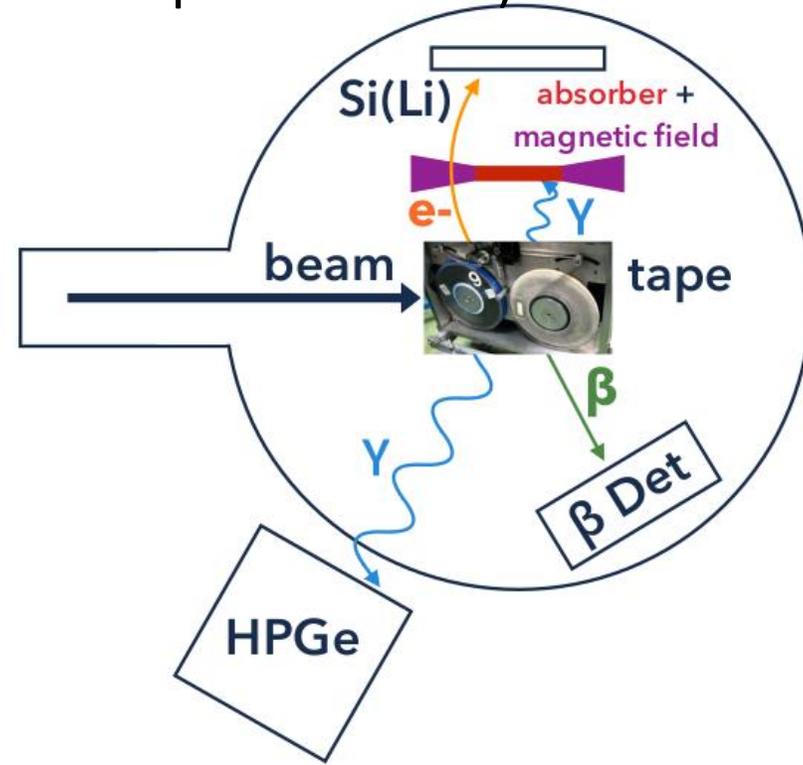
Per avere $\rho^2(E0)$ non nullo bisogna che ci sia mixing (a e $b \neq 0$) e che $\Delta \langle r^2 \rangle$ sia $\neq 0$ cioè bisogna che la forma dei due livelli sia diversa. Se $\rho^2(E0)$ è 0 non c'è transizione di monopolo elettrico e quindi non vengono emessi elettroni di conversione.



SLICES (Spes Low-energy Internal Conversion Electrons Spectrometer)

- **Si(Li)**: electron detector segmentato
- **HPGe**: coincidences and normalization
- **Scintillator**: anti-coincidences with β -decay electrons

In fase di costruzione

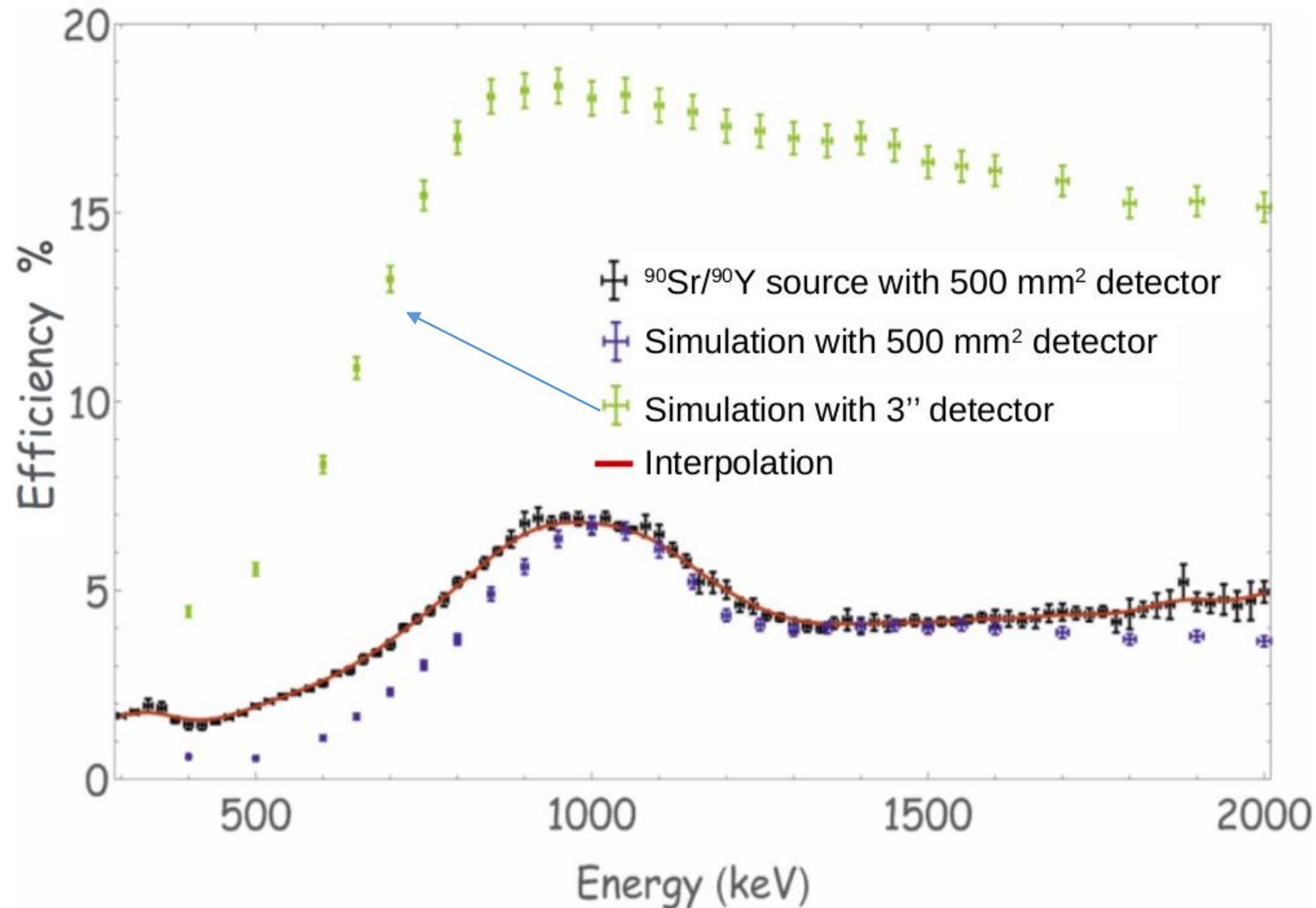


SLICES Efficiency

Distances: Source-Magnets = 50 mm, Magnets-Detector = 40 mm

Il rivelatore Si(Li) di SLICES è molto grande rispetto a quelli normalmente usati

Questo fatto, combinato alla presenza del magnete, dà luogo a un'efficienza altissima



Simulazioni confermate da misure (su rivelatori più piccoli)

Magnete

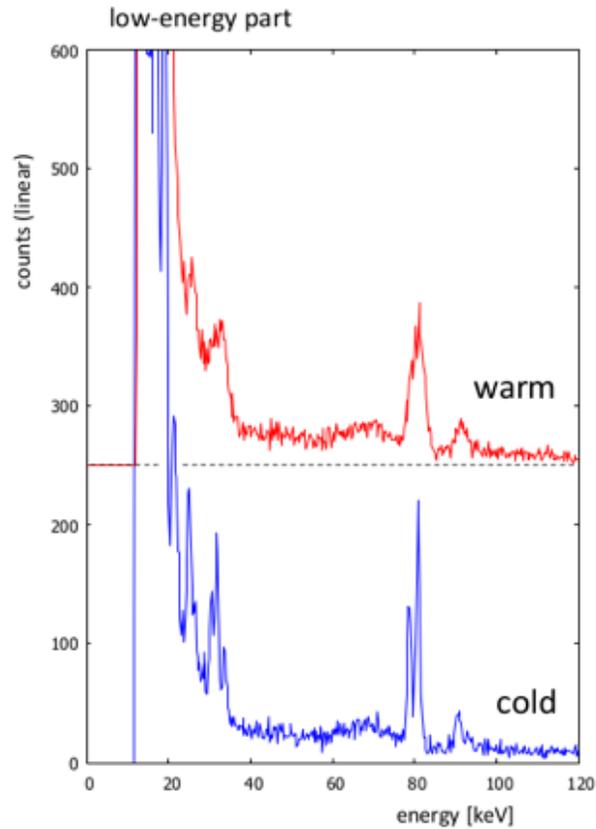


Si(Li)

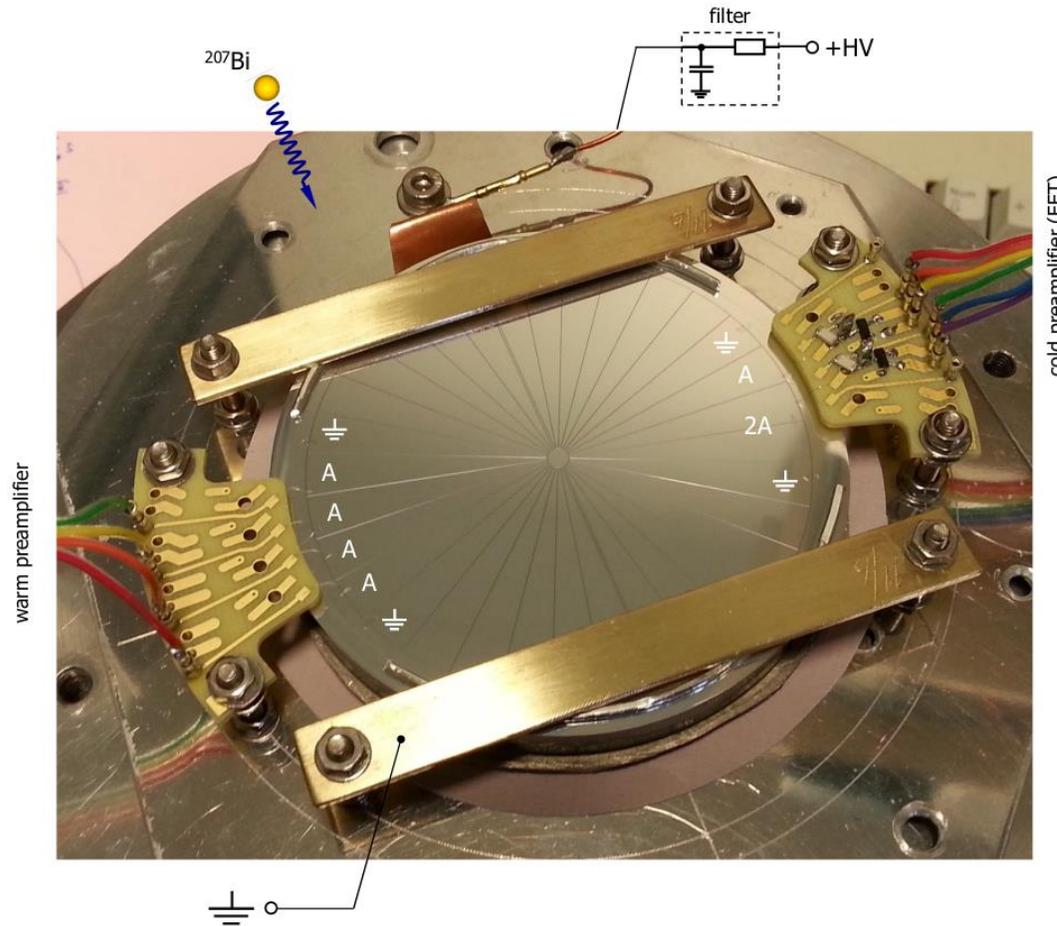


Il magnete aumenta l'efficienza e scherma i γ (che darebbero fondo Compton nel rivelatore)
La schermatura dei γ è dovuta all'assorbitore centrale

Caratterizzazione del Si(Li) di SLICES presso la ditta costruttrice:
Misura della risoluzione energetica con la sorgente di ^{207}Bi



Strips	Live Time	τ	FWHM (@975 keV)
2A	1500s	6 μs	3.4keV
A	1500s	6 μs	3.7keV
A	1500s	3 μs	2.4keV



Risoluzione energetica molto buona

Rendering del setup SLICES a LNL per fasci di SPES non riaccelerati

