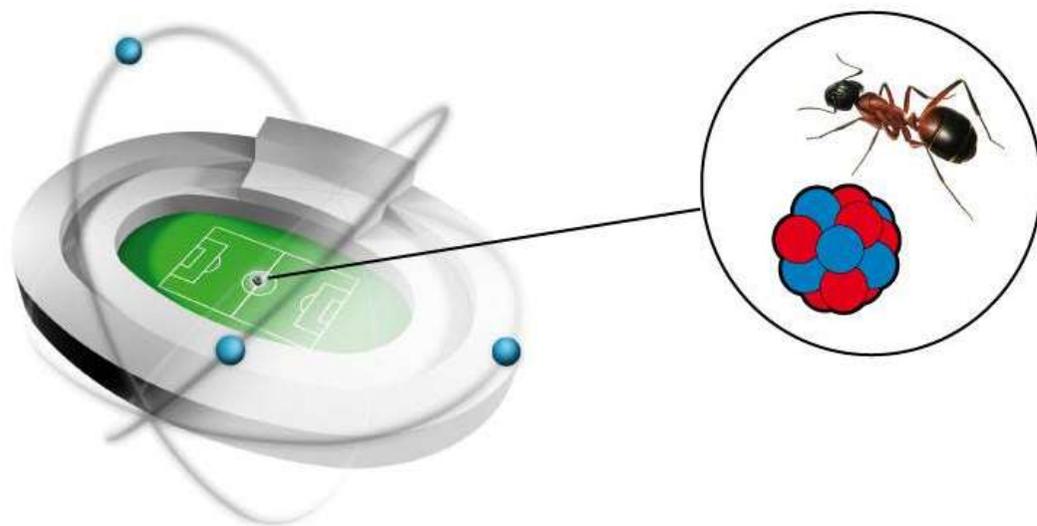
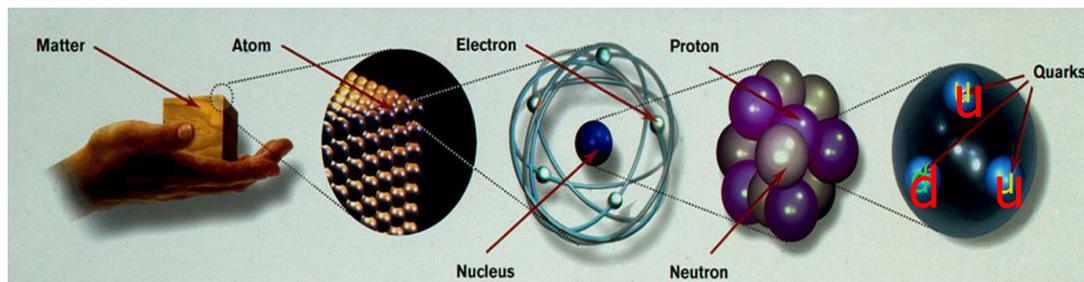


La fisica nucleare ai Laboratori Nazionali del Sud

Diana Carbone



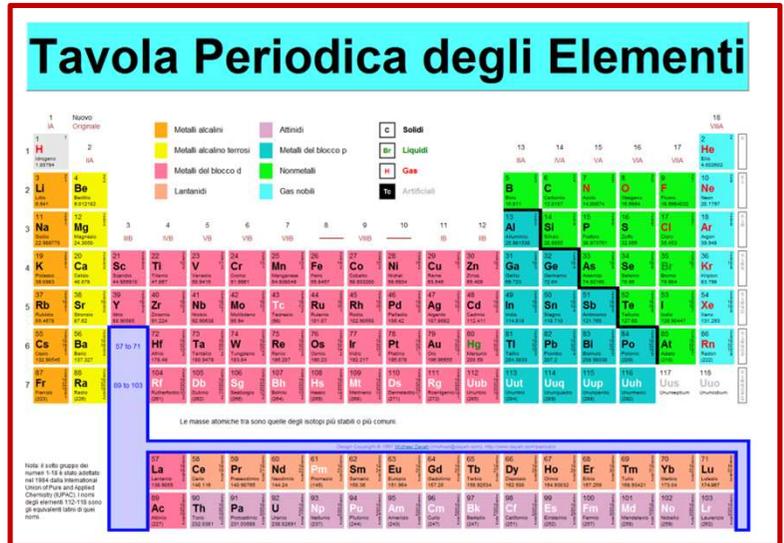
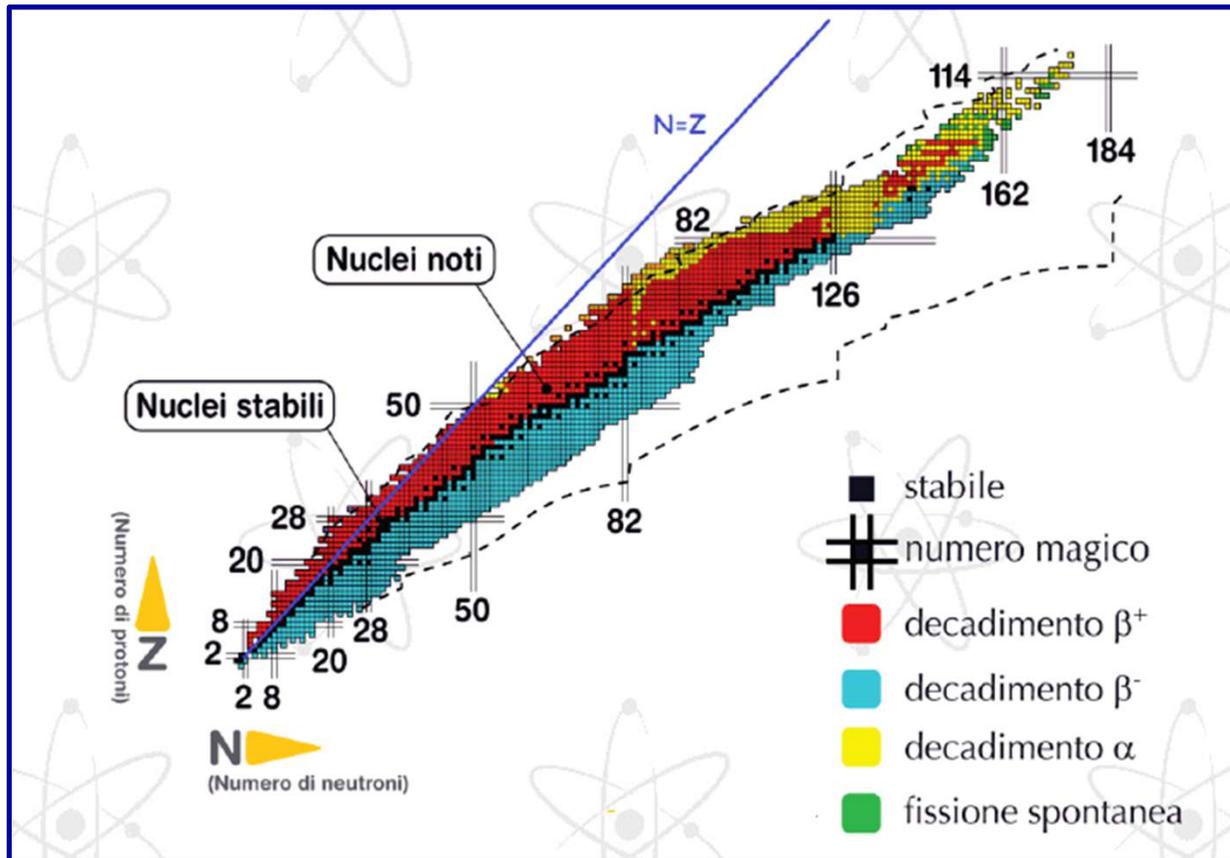
L'atomo e il nucleo atomico



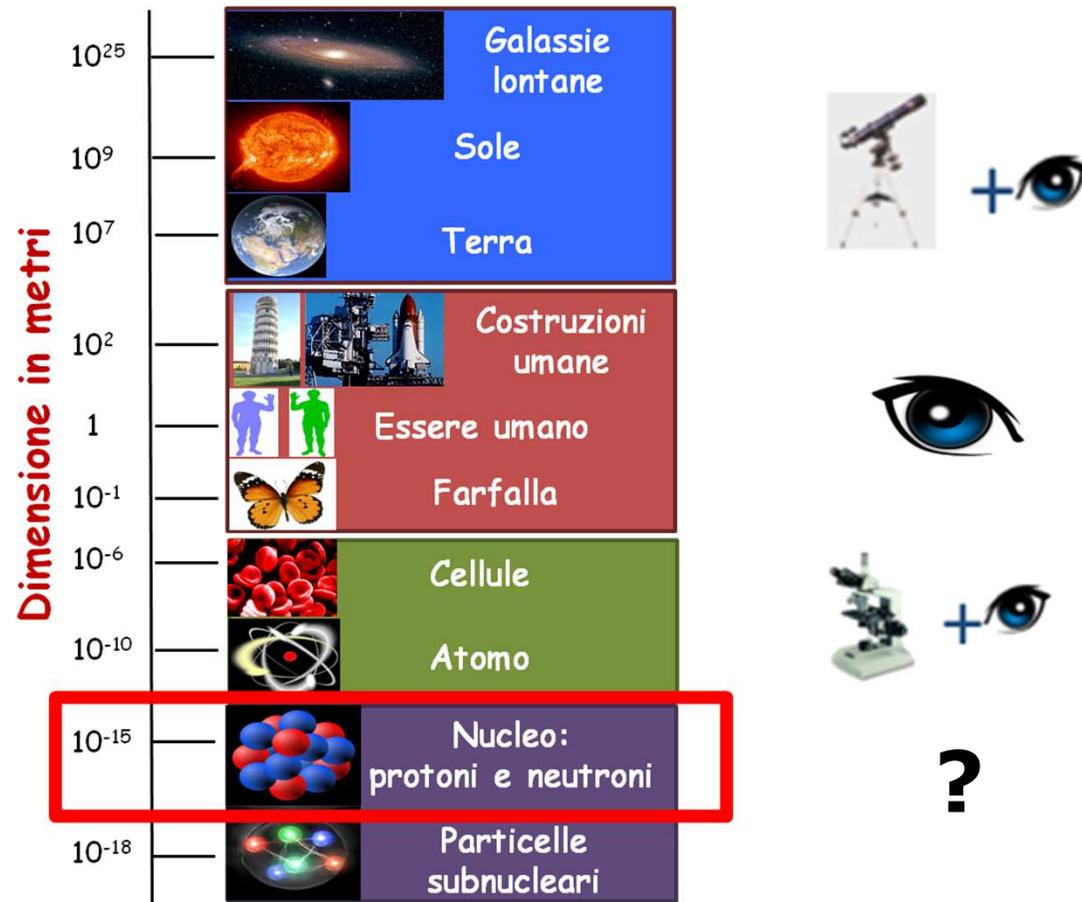
L'atomo è costituito da un nucleo centrale ed una nube di elettroni che vi orbitano intorno

Un nucleo è circa 10000 volte più piccolo di un atomo

La classificazione dei nuclei



Come osservare i nuclei



Come studiare i nuclei e con quali strumenti ?

Come osservare i nuclei

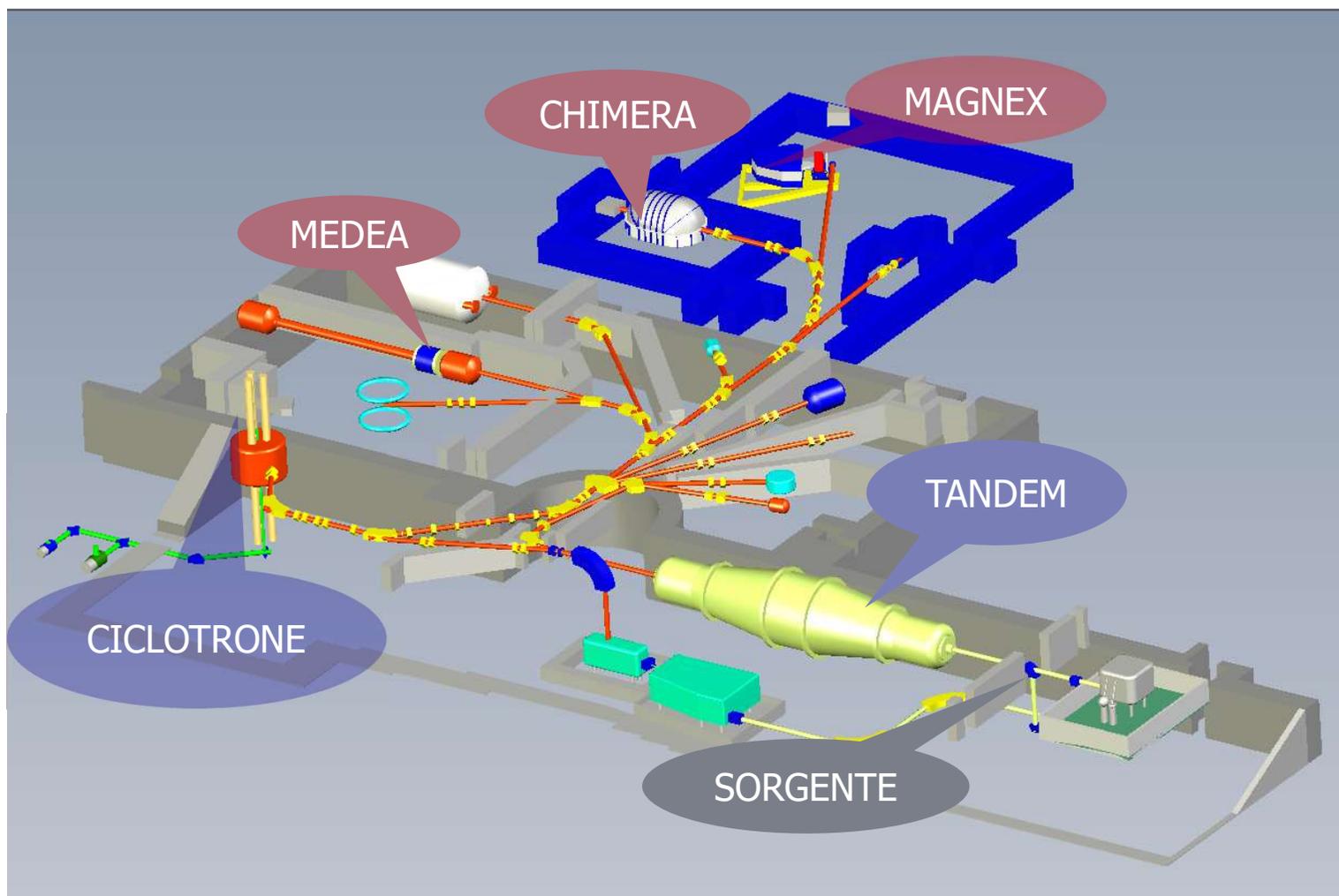
Facendoli collidere tra loro ed «osservando» i frammenti (particelle) emessi

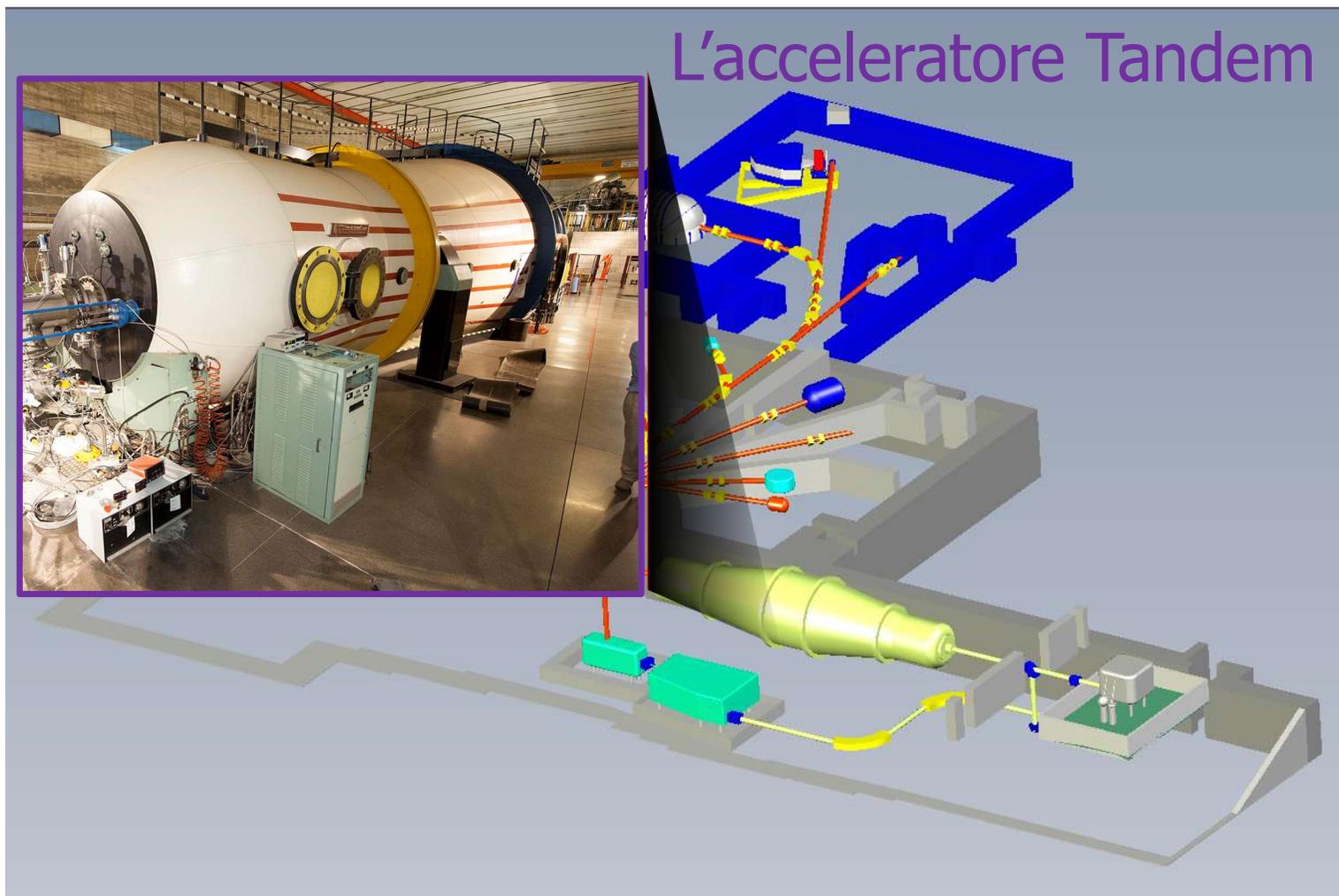


Abbiamo bisogno di:

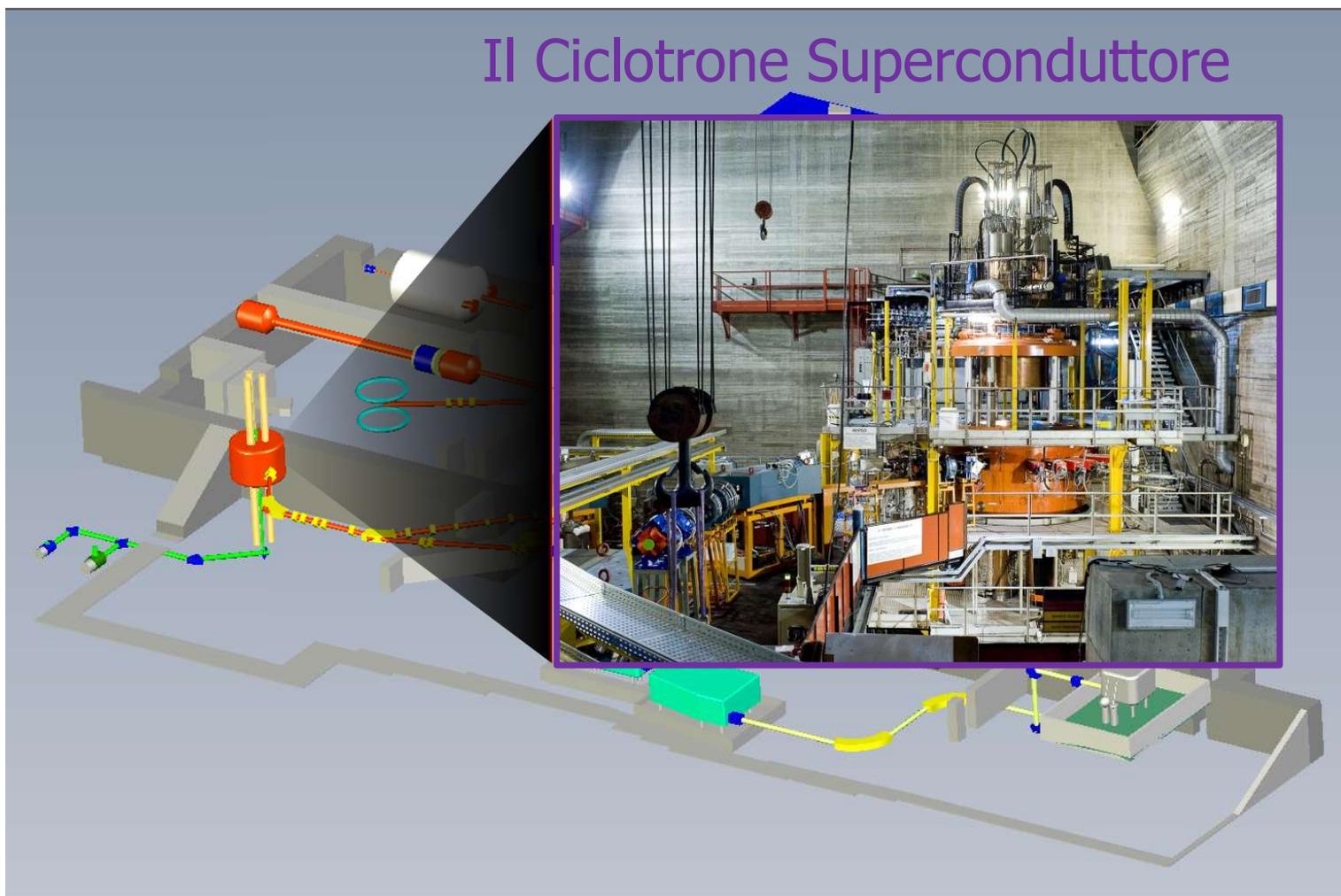
- un acceleratore di particelle
- una lamina sottile di nuclei bersaglio
- rivelatori per caratterizzare le particelle emesse

I Laboratori Nazionali del Sud





Il Ciclotrone Superconduttore



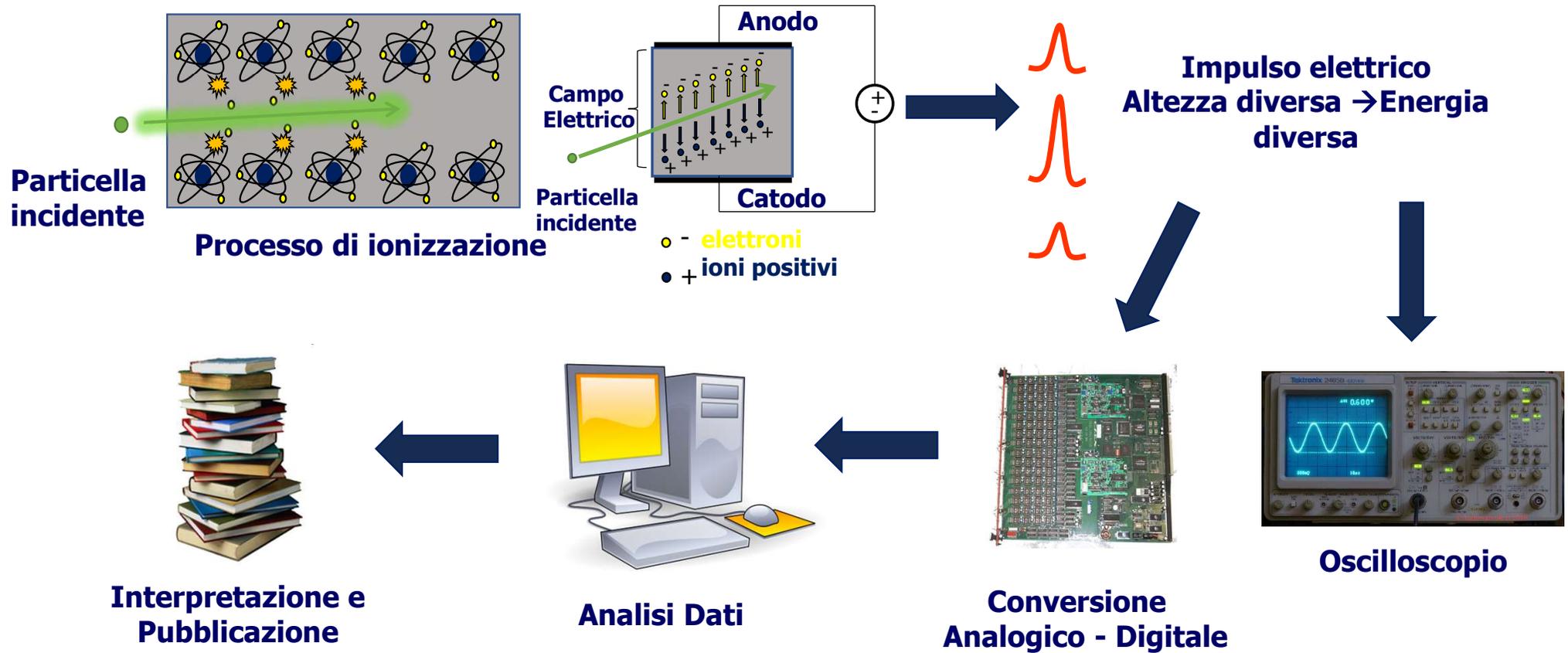
Lo spettrometro magnetico MAGNEX



Multirivelatore Chimera



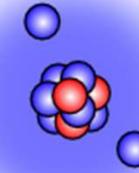
Dalla rivelazione al risultato sperimentale



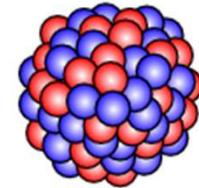
Struttura del Nucleo:

dimensioni, forma, livelli energetici, vite medie, distribuzione di carica, moti collettivi ...

^{11}Li

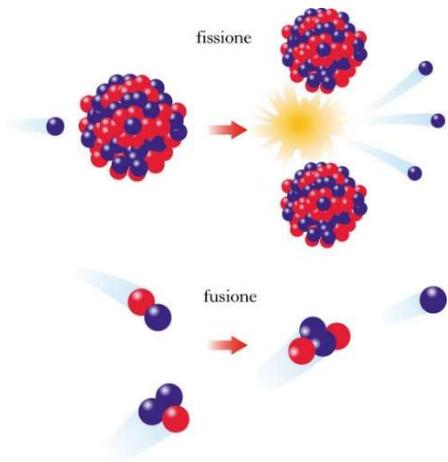


^{208}Pb



Meccanismi di Reazione:

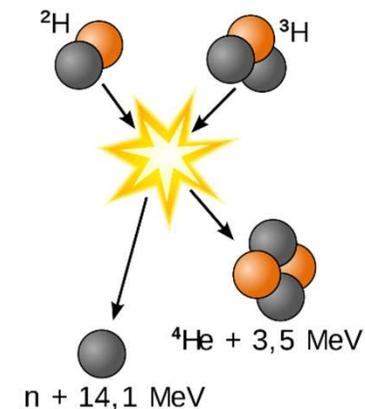
differenti processi, collegati alle proprietà delle forze nucleari, mediante i quali i nuclei interagiscono, come scattering elastico, scattering inelastico, fusione, fissione



Astrofisica Nucleare:

Come sono sintetizzati gli elementi nelle stelle ?

Quali sono le reazioni nucleari coinvolte nella produzione di energia nelle stelle?



Il progetto POTLNS



Progetto di potenziamento del Ciclotrone e delle infrastrutture dei LNS

Finanziato dal MUR (progetto PON) con 19.4 M€

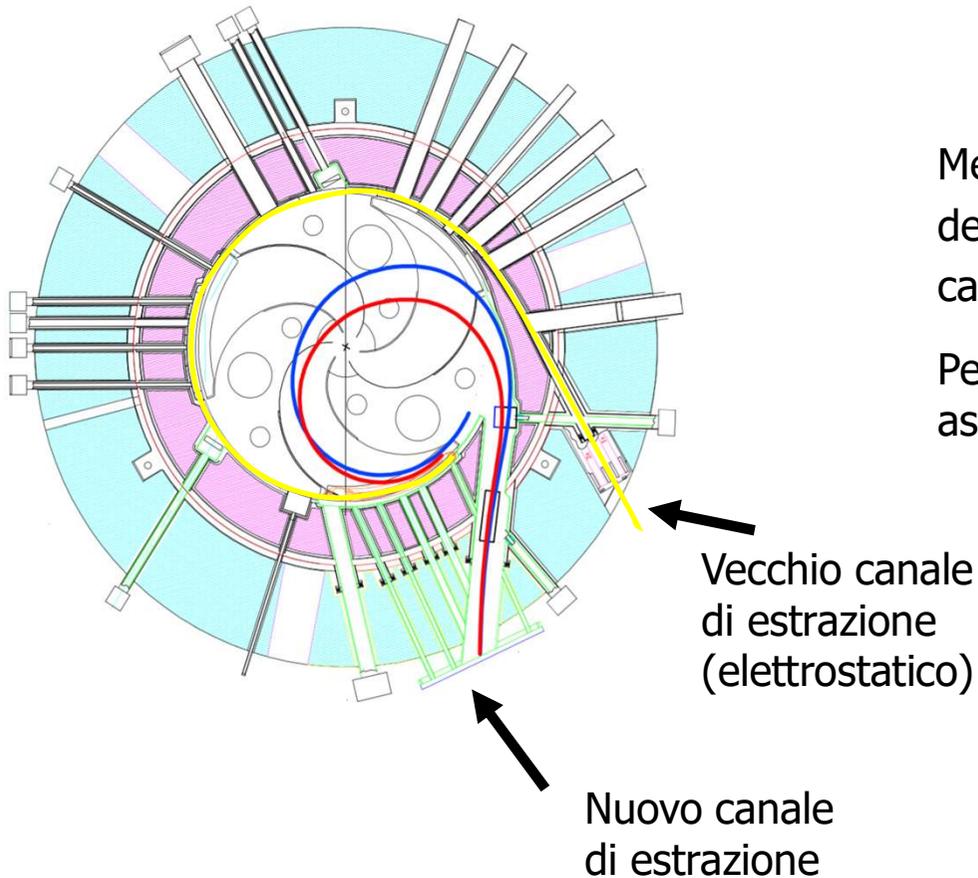


Stimolato dal caso di fisica del progetto NUMEN

**Aumentare l'intensità dei fasci di ioni accelerate dal Ciclotrone
(da 100 W a 5-10 kW)**



Il progetto POTLNS



Estrazione tramite stripping

Metodo basato sull'improvviso cambio della **rigidità magnetica** del fascio accelerato quando viene cambiato il suo stato di carica mediante l'attraversamento di un sottile foglio (stripper)

Per ioni con $A < 40$ ed energie maggiori di 15 MeV/u, ci si aspetta una efficienza del **99%**

Intensità attuali

$^{13}\text{C}^{4+}$ @ 45 MeV/u, $P_{\text{extr}} = 100$ watt, $I = 1 \times 10^{12}$ pps

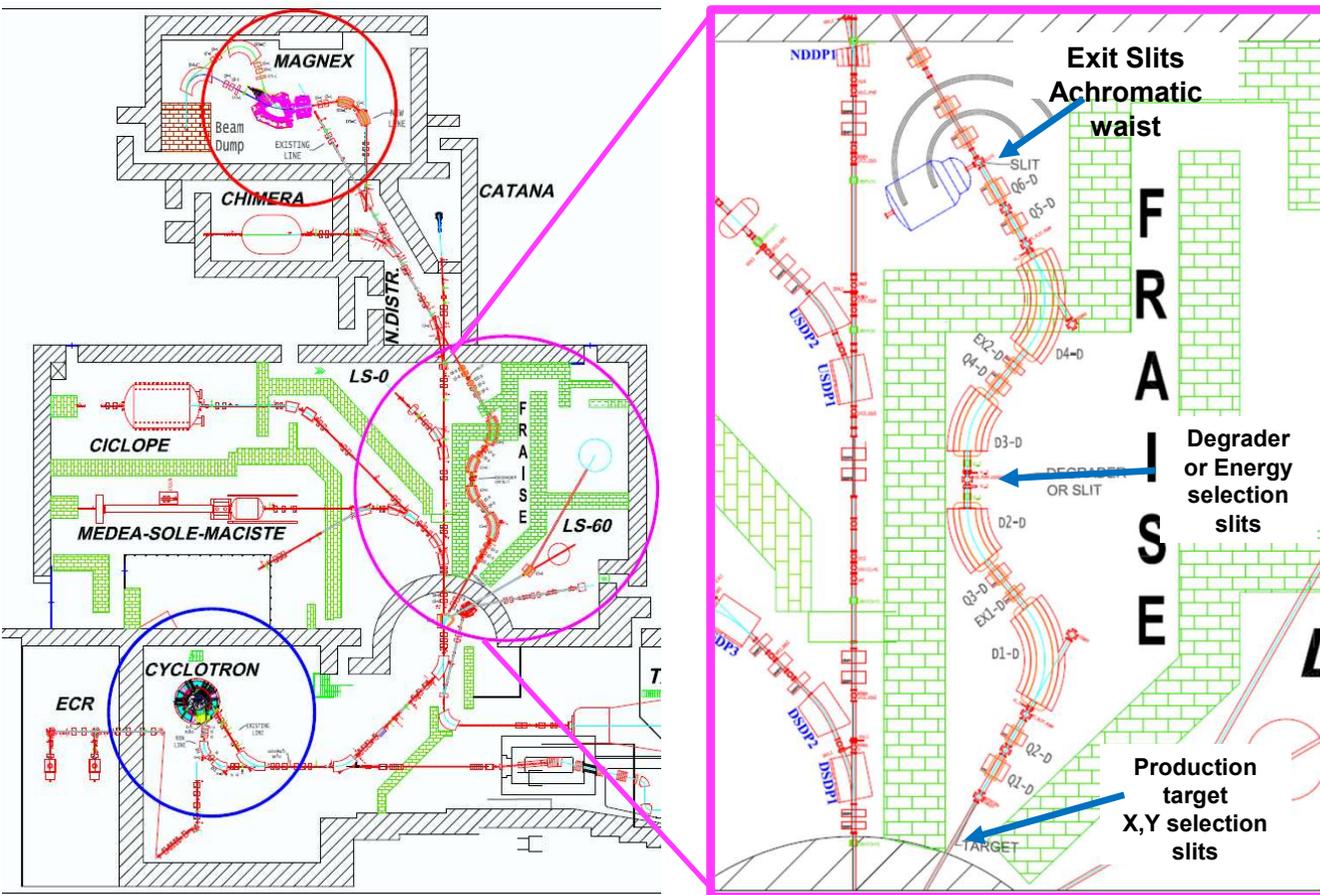
Intensità previste:

$^{12}\text{C}^{4+}$ @ 45 MeV/u, $P_{\text{extr}} = 8100$ watt, $I = 9.4 \times 10^{13}$ pps

Altre specie atomiche:

^{18}O , ^{20}Ne , ^{40}Ar , ...

Produzione di fasci di ioni radioattivi



- Linea di fascio FRAISE
- Formata da 4 dipoli e 6 quadrupoli magnetici posti in configurazione simmetrica

Courtesy of P. Russotto

FRAISE: produzione di fasci

RIB	Fascio Primario/Energia (AMeV)	Intensità (kHz)	Energia RIB (AMeV)	Purezza (%)
¹⁴ Be	¹⁸ O/55	2.6	46	2
¹⁴ Be	¹⁸ O/55	2.2	43	70
¹³ N	¹⁶ O/40	1230	4	54
¹⁴ O	¹⁶ O/40	807	4	36
¹⁶ C	¹⁸ O/55	6800	40	60
¹⁸ Ne	²⁰ Ne/60	16700	43	16
¹⁸ Ne	²⁰ Ne/60	3120	24	47
¹⁷ F	²⁰ Ne/60	3300	23	49
³⁴ Si	³⁶ S/40	980	11	81
³⁸ S	⁴⁰ Ar/40	1840	17	66
³⁴ Ar	³⁶ Ar/50	2800	41	4
³⁴ Ar	³⁶ Ar/50	426	41	12
⁴⁶ Ar	⁴⁸ Ca/50	1000	38	50
⁶⁸ Ni	⁷⁰ Zn/40	490	18	50

Supponendo 2 kW di fascio primario

- Facility competitiva nella produzione di Fasci di Ioni Radioattivi (RIBs) di massa medio-leggera ($A < 70$)

Courtesy of P. Russotto



La ricerca in fisica nucleare oggi

Il neutrino

La particella più **elusiva** e più **misteriosa** dell'universo conosciuto

Ogni secondo il nostro corpo è attraversato da
decine di migliaia di miliardi di neutrini



Qual è la loro massa?
Qual è la loro natura?

Il neutrino potrebbe essere l'antiparticella di se stesso?



Ettore Majorana

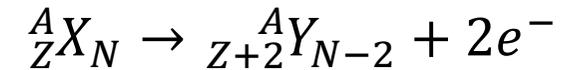
TEORIA SIMMETRICA DELL'ELETTRONE
E DEL POSITRONE

Nota di ETTORE MAJORANA

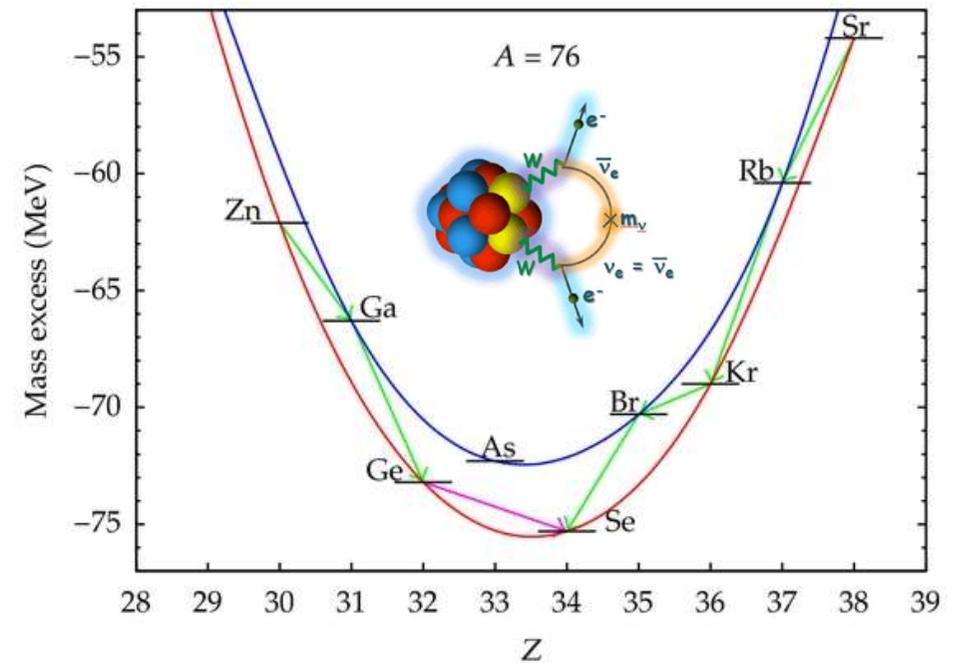
Il Nuovo Cimento 14, 171 (1937)

Doppio decadimento beta senza neutrini

Il processo **$0\nu\beta\beta$** è considerato uno dei più promettenti per fornire risposte sulla natura e sulla massa dei neutrini



${}^{76}\text{Br}$	${}^{77}\text{Br}$	${}^{78}\text{Br}$	${}^{79}\text{Br}$	${}^{80}\text{Br}$
${}^{75}\text{Se}$	${}^{76}\text{Se}$	${}^{77}\text{Se}$	${}^{78}\text{Se}$	${}^{79}\text{Se}$
${}^{74}\text{As}$	${}^{75}\text{As}$	${}^{76}\text{As}$	${}^{77}\text{As}$	${}^{78}\text{As}$
${}^{73}\text{Ge}$	${}^{74}\text{Ge}$	${}^{75}\text{Ge}$	${}^{76}\text{Ge}$	${}^{77}\text{Ge}$
${}^{72}\text{Ga}$	${}^{73}\text{Ga}$	${}^{74}\text{Ga}$	${}^{75}\text{Ga}$	${}^{76}\text{Ga}$



- ✓ Processo mediata dall'**interazione debole**
- ✓ Osservabile in nuclei pari-pari quando il singolo **β -decay** è energeticamente proibito

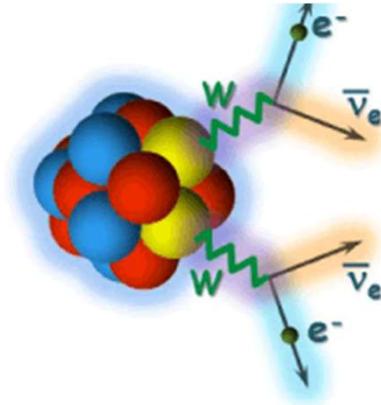
Doppio decadimento beta

Two-neutrino double beta decay ($2\nu\beta\beta$ decay)

Osservato in 11 nuclei dal 1987



M. Goeppert-Mayer, Phys Rev. 48 (1935) 512



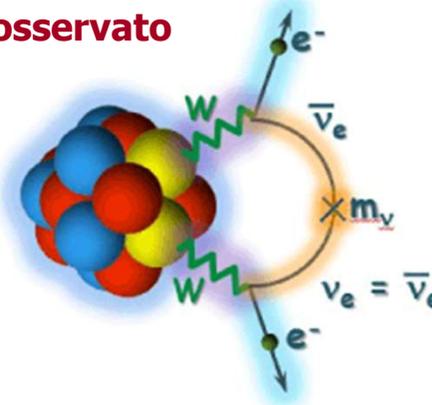
1. Processo previsto dal Modello Standard

2. $T_{1/2} \approx 10^{19}$ to 10^{24} yr

$$1/T_{\frac{1}{2}}^{2\nu}(0^+ \rightarrow 0^+) = G_{2\nu} |M^{\beta\beta 2\nu}|^2$$

Neutrinoless double beta decay ($0\nu\beta\beta$ decay)

Non ancora osservato



E. Majorana, Il Nuovo Cimento 14 (1937) 171
W. H. Furry, Phys Rev. 56 (1939) 1184

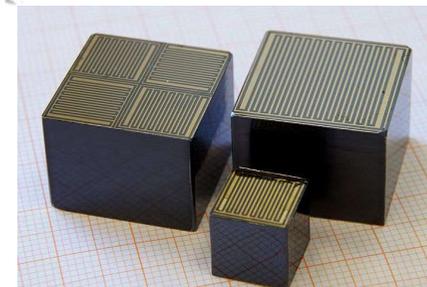
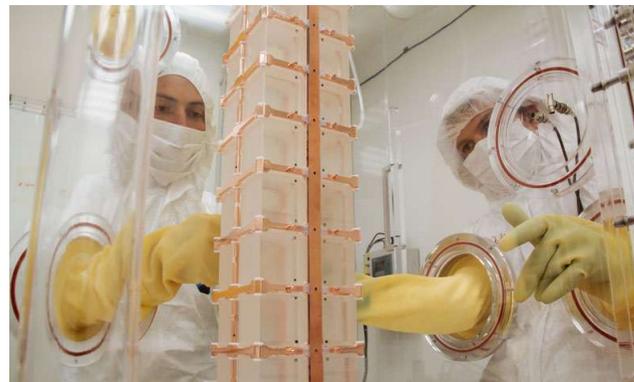
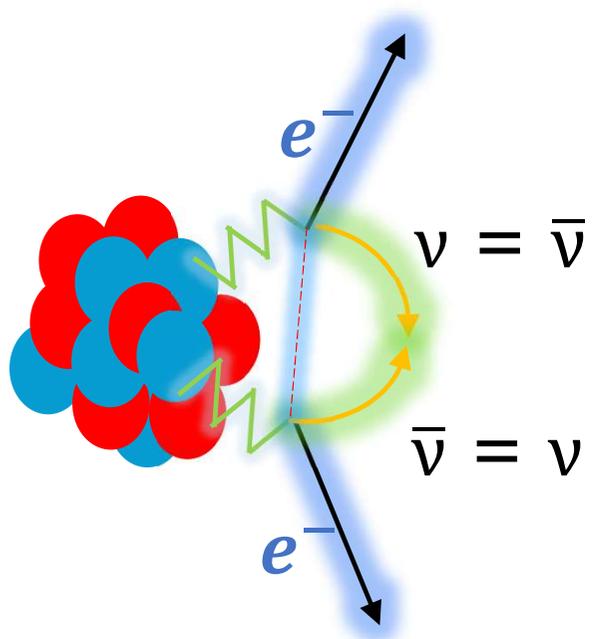
1. Processo oltre il Modello Standard

2. Accesso alle masse efficaci dei neutrini

3. Violazione della conservazione del numero leptonico

$$\left(T_{\frac{1}{2}}^{0\nu\beta\beta}(0^+ \rightarrow 0^+)\right)^{-1} = G_{0\nu\beta\beta} |M^{0\nu\beta\beta}|^2 |f(m_i, U_{ei})|^2$$

Doppio decadimento beta senza neutrini



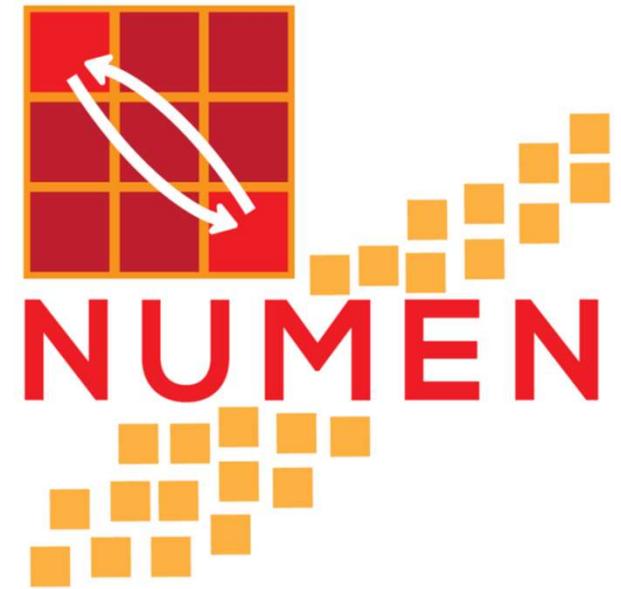
Viene ricercato in tutto il mondo

Non ancora osservato sperimentalmente!



NUMEN

**NUclear Matrix Elements for
Neutrinoless double beta decay**



L'idea del progetto NUMEN

Tempo di dimezzamento

Spazio delle fasi degli elettroni

Contiene le masse efficaci dei neutrini

$$\left(T_{1/2}^{0\nu\beta\beta}(0^+ \rightarrow 0^+)\right)^{-1} = G_{0\nu\beta\beta} \left|M^{0\nu\beta\beta}\right|^2 \left|f(m_i, U_{ei})\right|^2$$

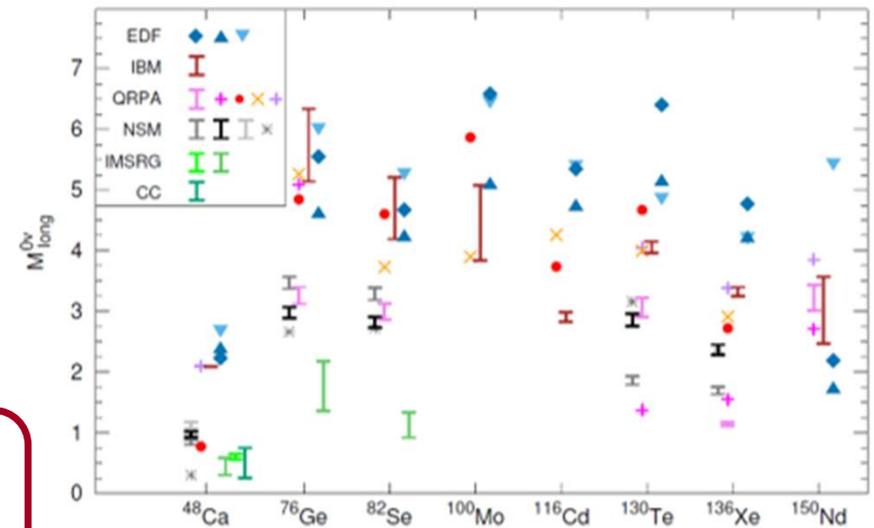
Elemento di matrice nucleare (NME)

Esprime la probabilità di transizione di un processo nucleare

Viene calcolato con diversi modelli teorici e presenta **grandi incertezze**

- Nuove misure sperimentali:
Reazioni di Doppio Scambio di Carica tra ioni pesanti (DCE)

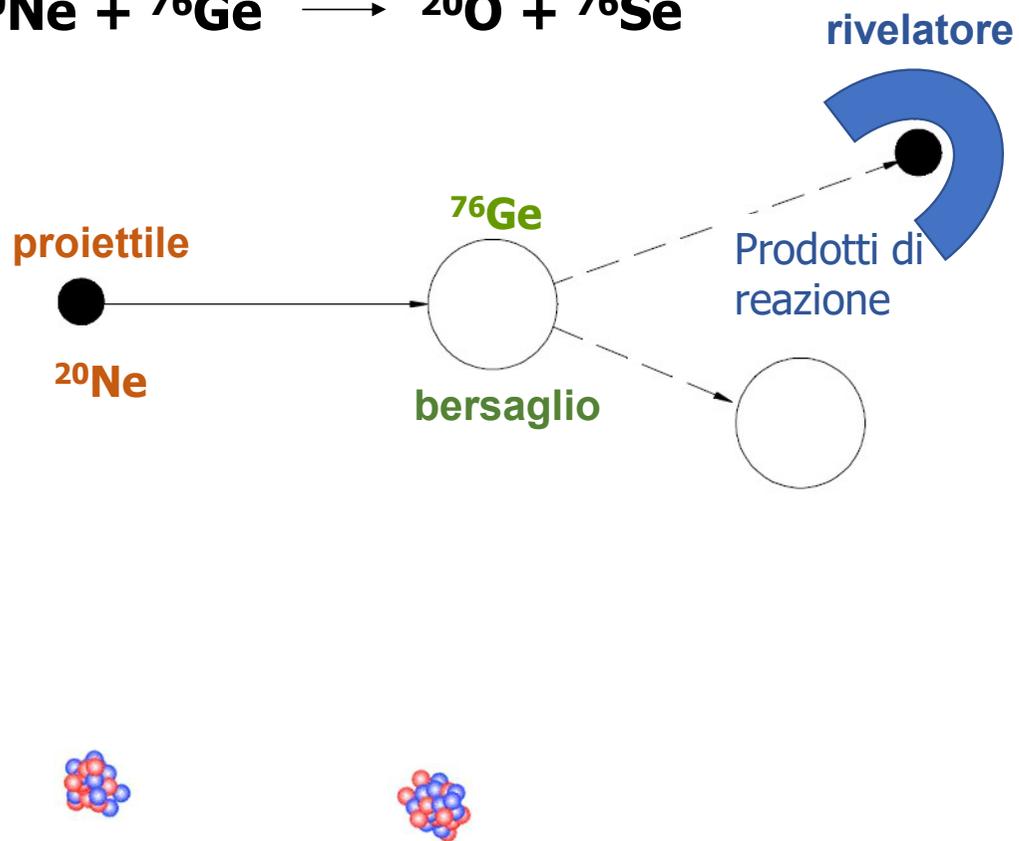
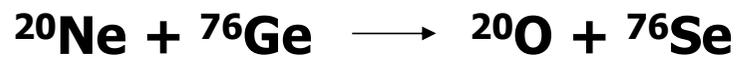
Valori attuali dei NME



M. Agostini et al., Rev. Mod. Phys. 95, 025002 (2023)

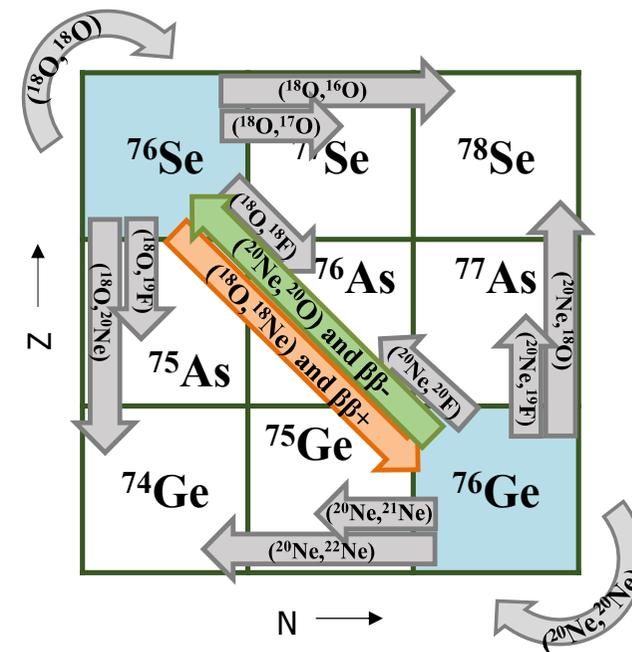
H. Ejiri et al., Phys. Rep. 797 (2019) 1–102

Le reazioni di doppio scambio di carica

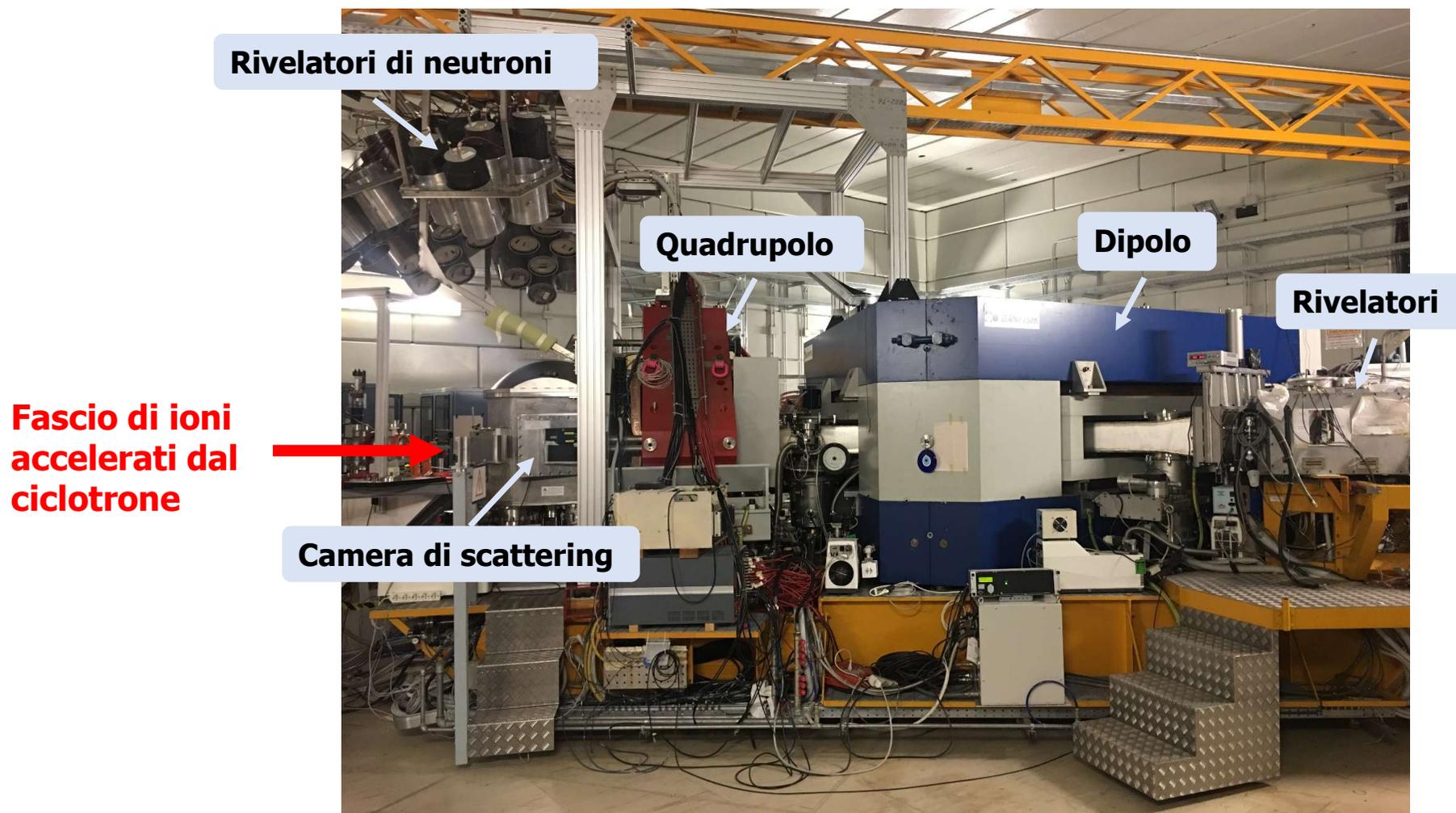


Rivelatore

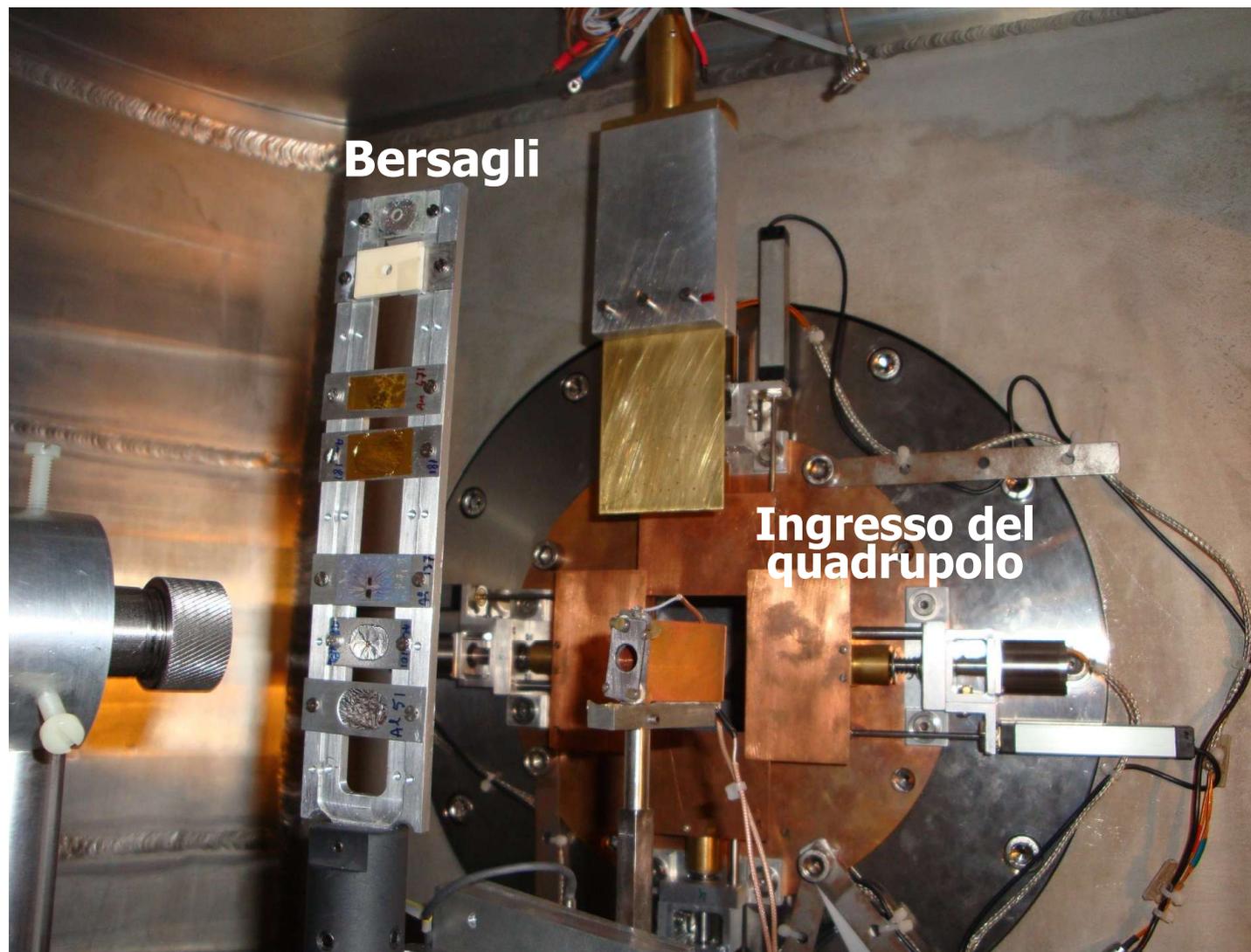
- Identificare le particelle (massa, carica)
- Misurare l'energia
- Misurare l'angolo
- Contarle



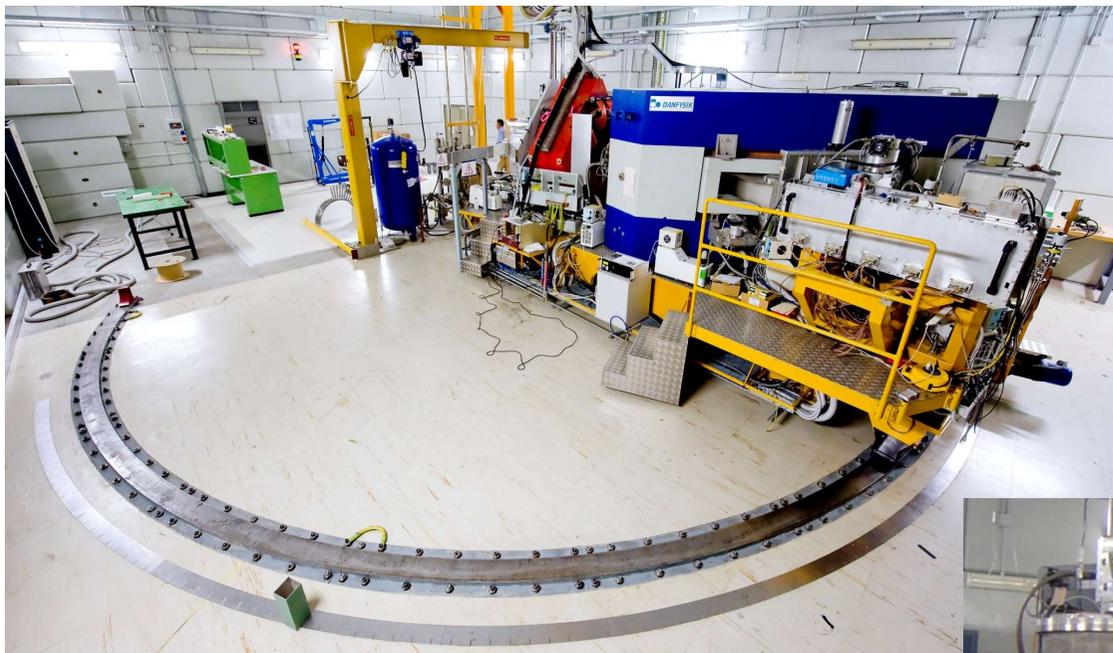
Lo spettrometro magnetico MAGNEX



Camera di scattering

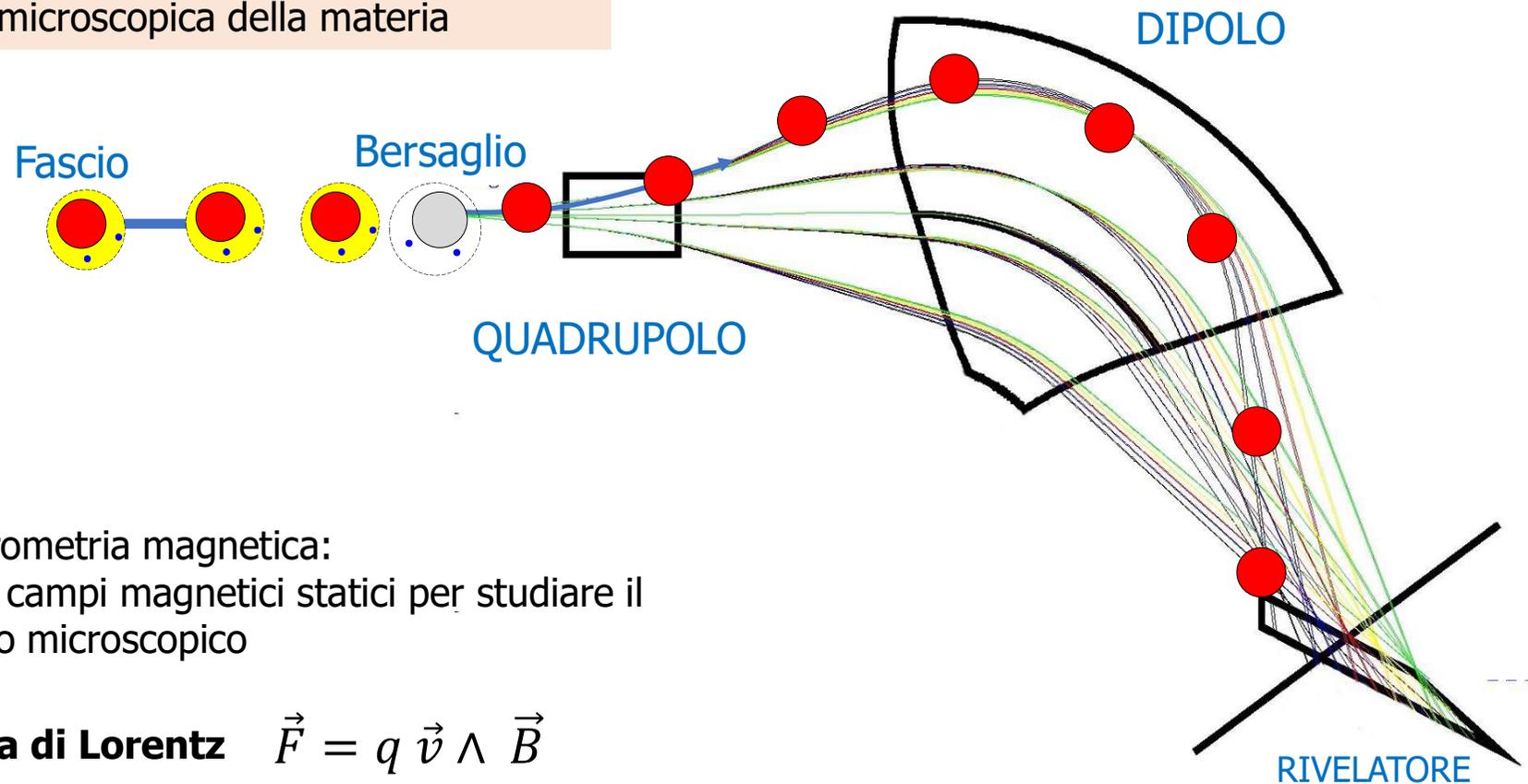


Lo spettrometro magnetico MAGNEX



Lo spettrometro magnetico MAGNEX

Lo studio del moto delle particelle cariche attraverso un campo magnetico è una delle tecniche per esplorare la struttura microscopica della materia

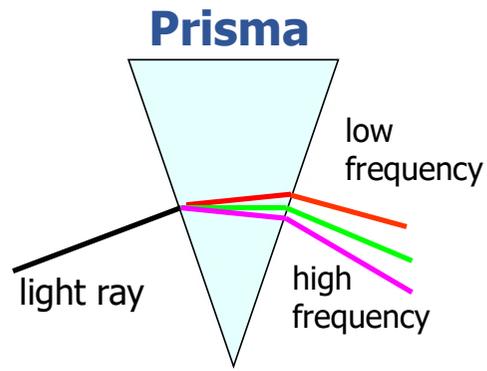
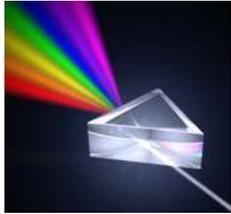


Spettrometria magnetica:
Usare campi magnetici statici per studiare il mondo microscopico

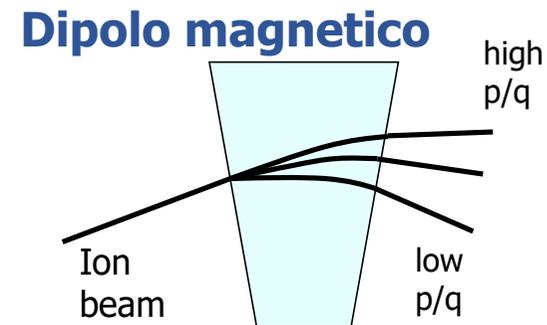
Forza di Lorentz $\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$

Come funziona uno spettrometro magnetico?

Analogia con la Luce



La deflessione dipende dalla **frequenza** della luce



La deflessione dipende dal rapporto **p/q** (rigidità magnetica)

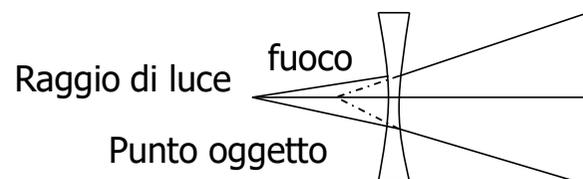
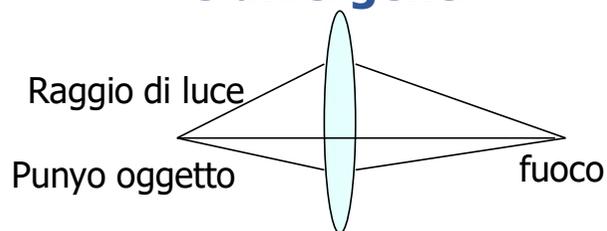


Elementi dispersivi:
separano frequenze o p/q in
posizioni diverse nello spazio

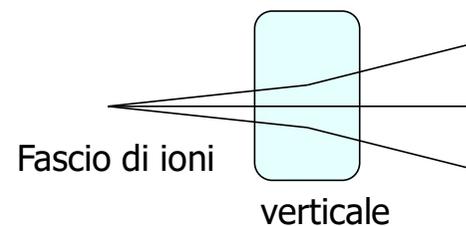
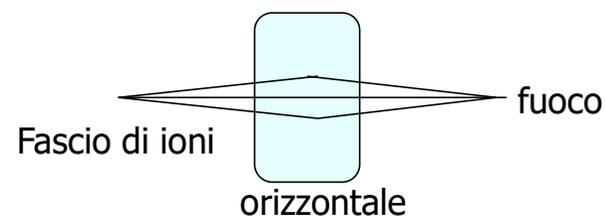
Come funziona uno spettrometro magnetico?

Analogia con la Luce

Lenti convergenti e divergenti

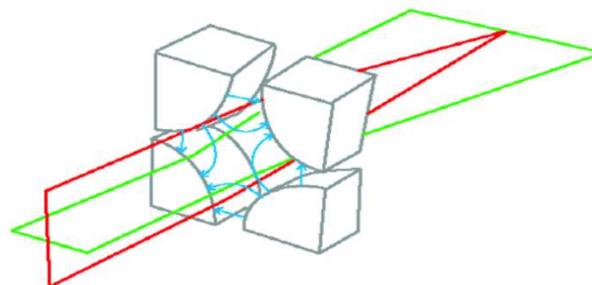


Quadrupolo magnetico



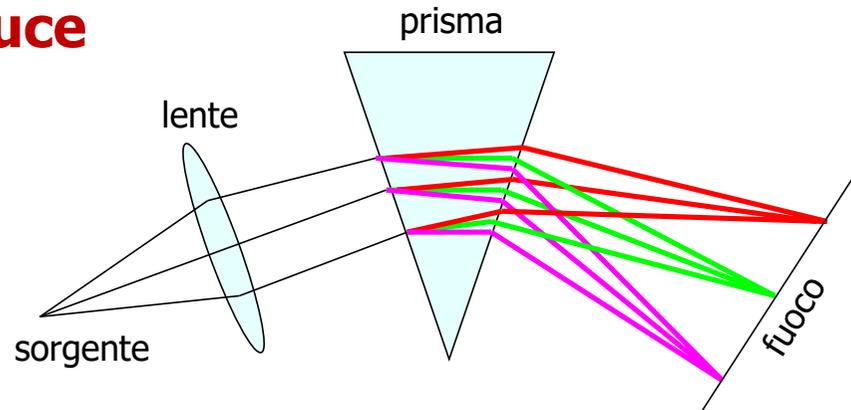
Elementi focalizzanti

Per concentrare l'intensità



Come funziona uno spettrometro magnetico?

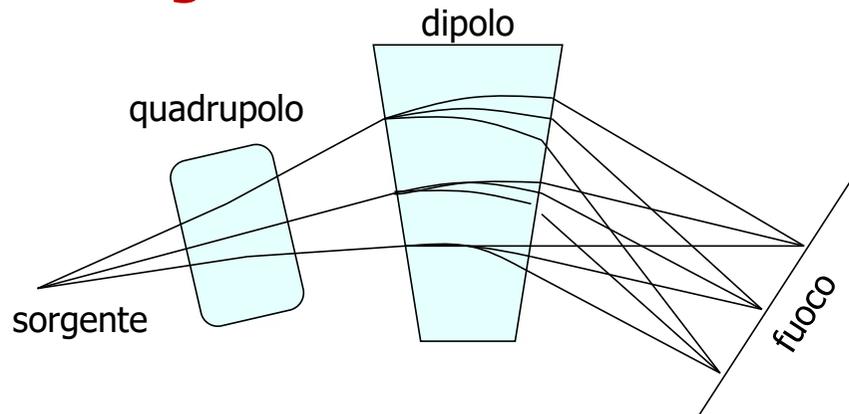
Spettrometro di luce



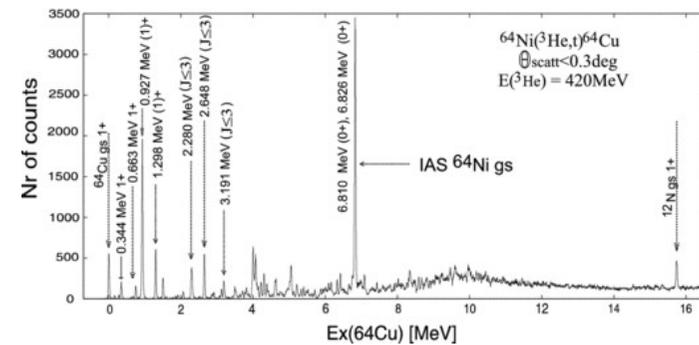
il fuoco dipende dalla frequenza



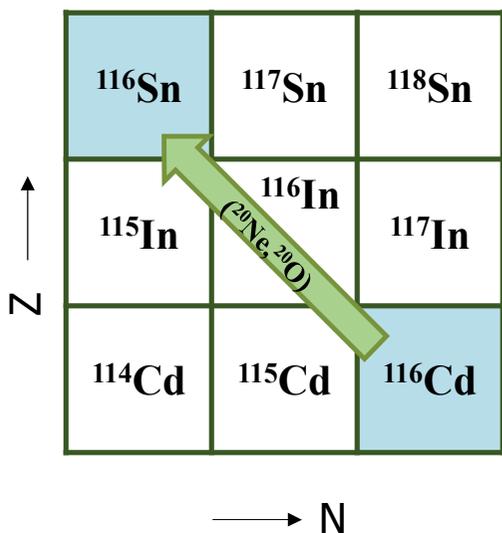
Spettrometro magnetico



il fuoco dipende da p/q

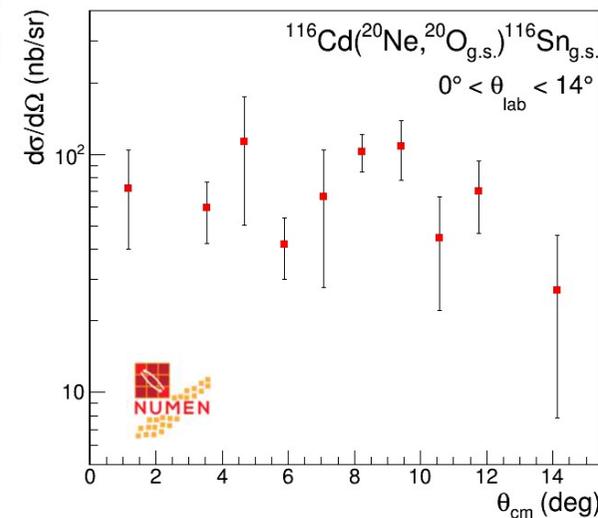
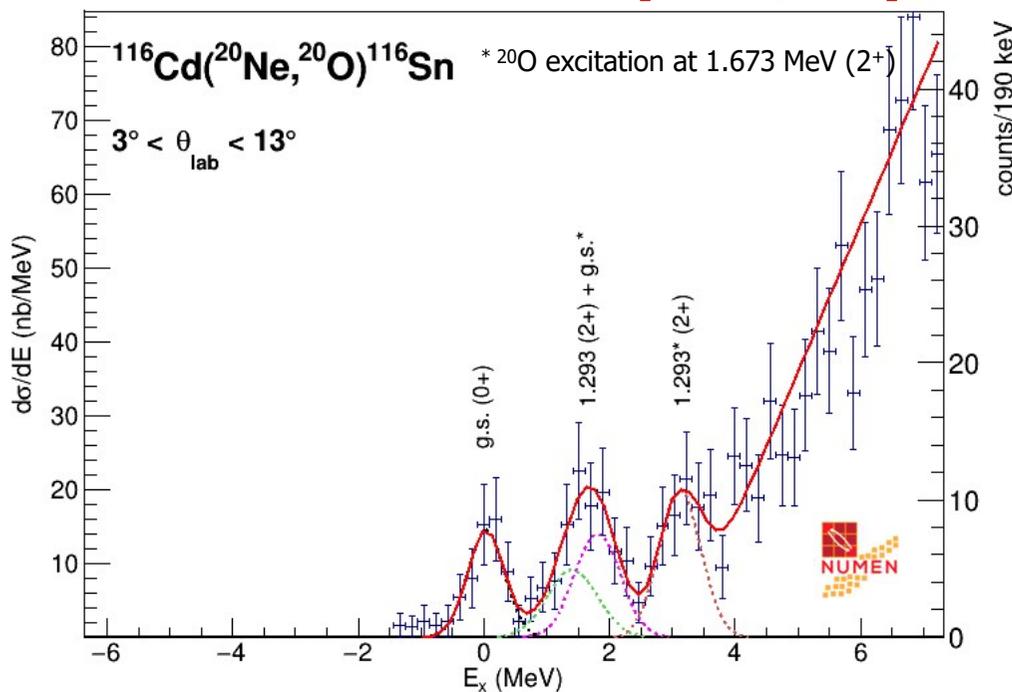


Reazione di Doppio Scambio di Carica



$$\sigma_{\text{g.s.} \rightarrow \text{g.s.}} = 12 \pm 2 \text{ nb}$$

Reazione DCE $^{116}\text{Cd}(^{20}\text{Ne}, ^{20}\text{O})^{116}\text{Sn}$



Riusciamo a misurare la transizione analoga a quella del doppio decadimento beta (g.s. to g.s.)

La sezione d'urto

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \frac{N(\theta)}{N_{beam}N_{target}\Delta\Omega}$$

$N(\theta)$ numero di conteggi all'angolo θ

N_{beam} numero ioni incidenti

N_{target} numero ioni bersaglio per unità di superficie (**1/cm²**)

$\Delta\Omega$ porzione di angolo solido coperto dal rivelatore

Il raggio di un nucleo leggero è dell'ordine di $r = 10^{-12}$ cm e quindi la sua sezione è $\sigma = \pi r^2 \sim 3 \cdot 10^{-24}$ cm² ~ 3 barn.
La sezione d'urto di un barn corrisponde alla probabilità di cattura da parte di un disco perfettamente assorbente di dimensioni nucleari. Il barn corrisponde a una sezione d'urto particolarmente grande.

Sezioni d'urto molto basse
(nb = 10^{-33} cm²)

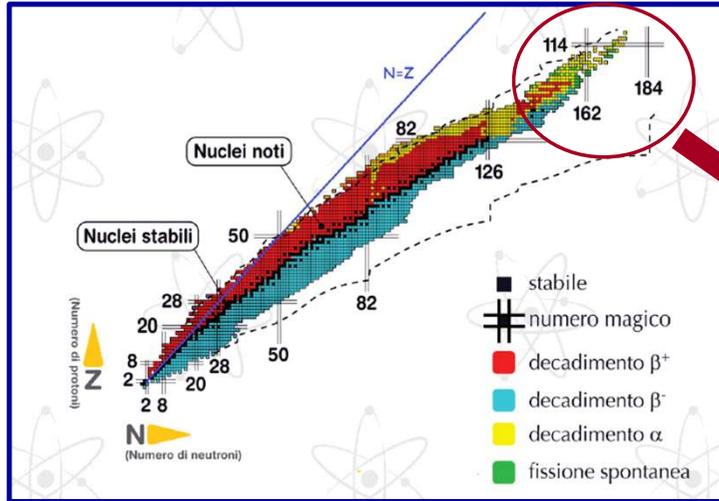


Aumentare il numero di ioni incidenti
(fasci intensi dal Cs dopo l'upgrade)

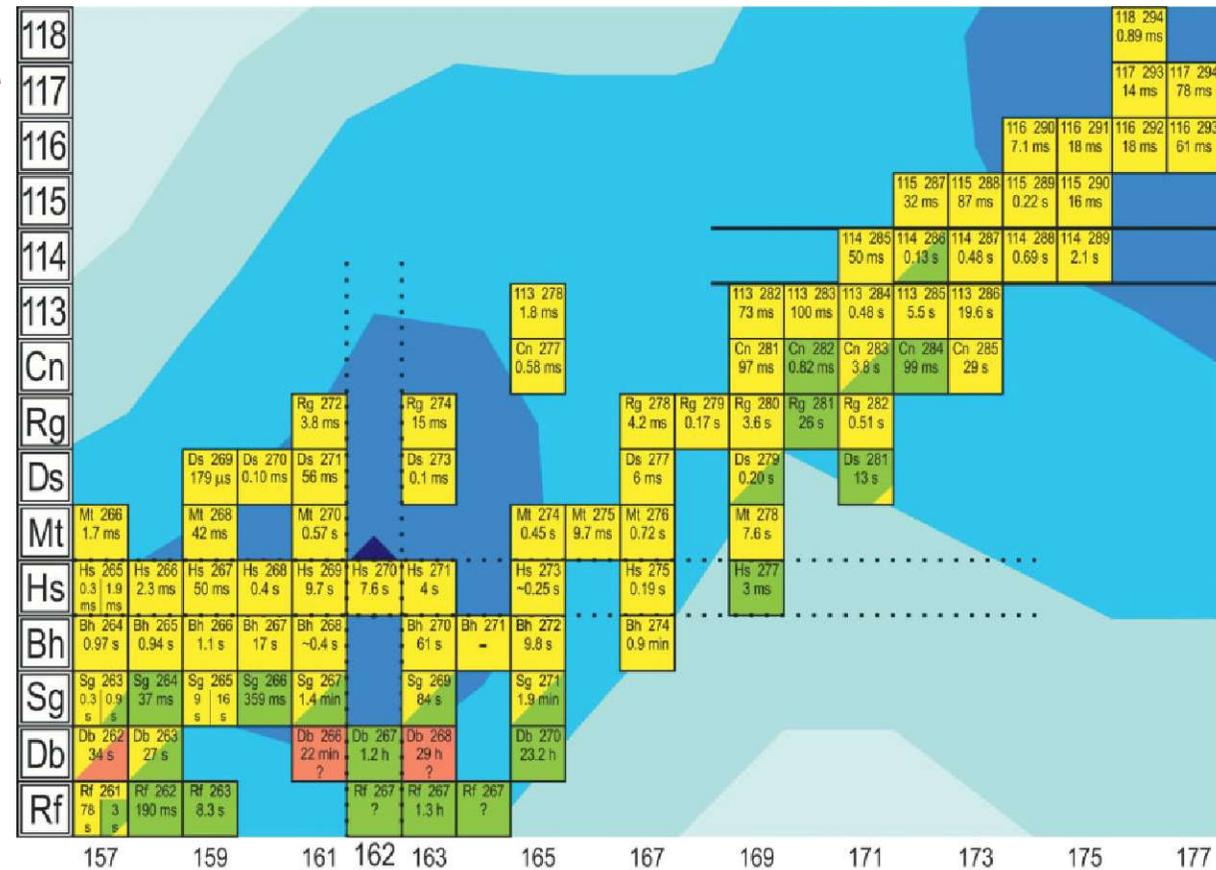


Altri casi di fisica da studiare con i fasci intensi dopo l'upgrade

Nuclei Superpesanti



In corrispondenza della chiusura della guscio nucleare con **114 protoni e 184 neutroni** (nuclidi *doppi magici*) dovrebbe ricomparire un nuclide stabile



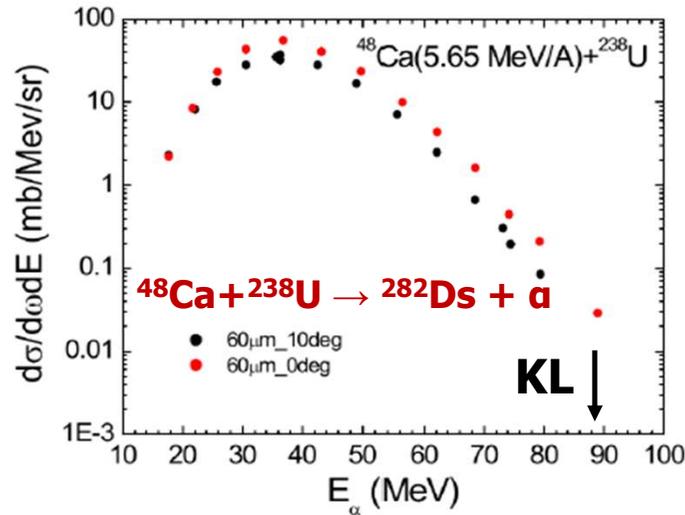
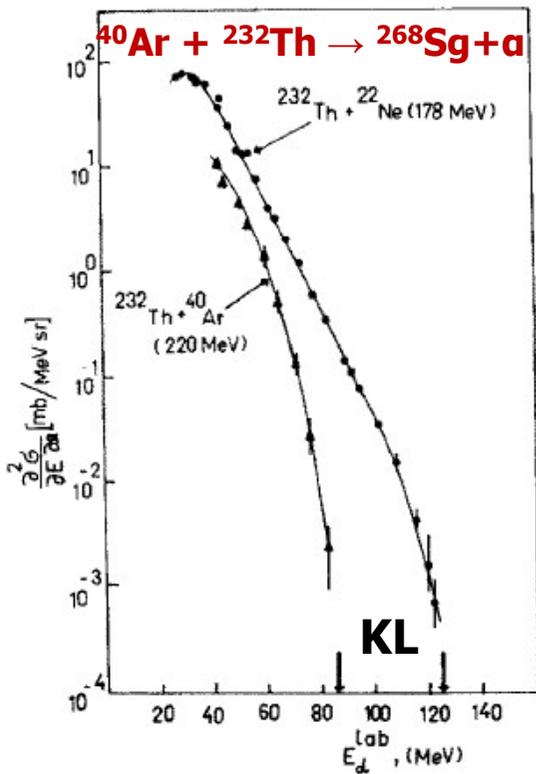
Produzione di nuclei Superpesanti

Fasci stabili

Reazioni a 2 corpi per sintetizzare elementi super-pesante

Metodo alternativo al processo di fusione-evaporazione

Spettri di energia di particelle α emesse a 0° misurate da uno spettrometro magnetico



KL Limite Cinematico:
energia massima di una particella α a 0° in un processo a 2 corpi in cui non si eccitano i prodotti di reazione

Metodo sperimentale

- Bassa sezione d'urto (μb)
- Fascio CS ^{66}Zn
- Energia sopra la barriera Coulombiana
- **Spettrometro MAGNEX** per rivelare a 0° sia la particella α che il SHE in **coincidenza**
- **Test di fattibilità** già realizzato sulla reazione $^{66}\text{Zn} + ^{232}\text{Th}$ @ 370 MeV per la **produzione dell' ^{294}Og** ($Z = 118$ $N = 176$)

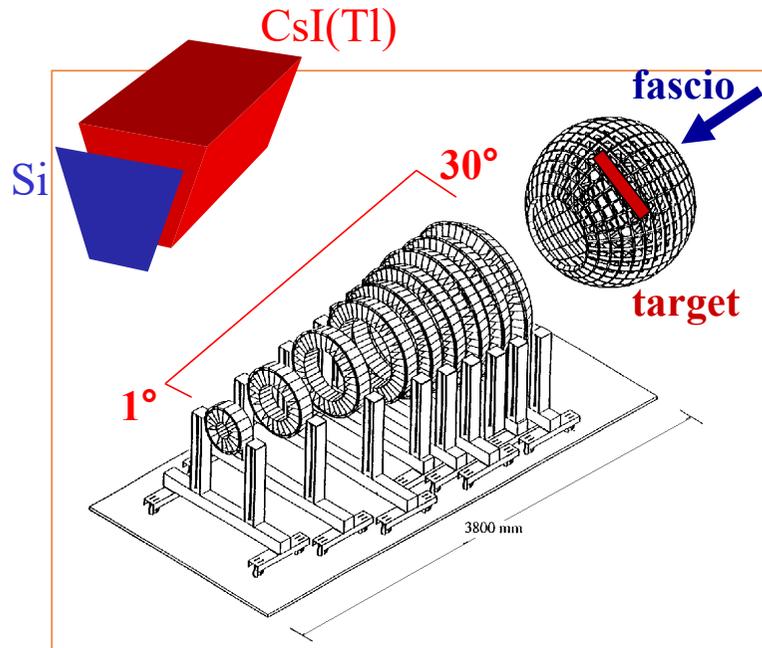
C. Borcea *et al.*, Nucl. Phys. A 351 (1981), 312-320

C. Borcea *et al.*, Proceedings of the International Symposium on Exotic Nuclei 2016, Kazan, Russia

Multivelatore CHIMERA

Fasci FRAISE

CHIMERA Charge Heavy Ion Mass and Energy Resolving Array

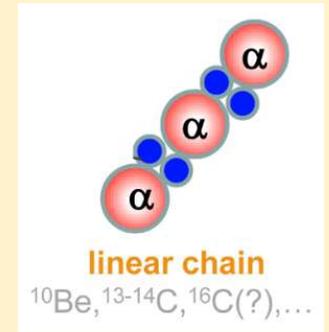
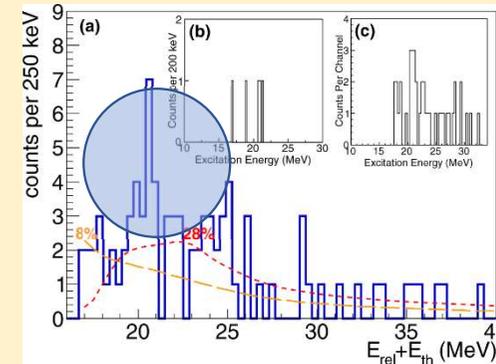


Granularità	1192 telescopi Si (300 μ m) + CsI(Tl)
Geometria	ANELLI: 688 telescopi 100-350 cm SFERA: 504 telescopi 40 cm
Copertura angolare	ANELLI: 1° < θ < 30° SFERA: 30° < θ < 176° 94% di 4 π

Clustering esotico

Misure in coincidenza dei frammenti di break-up con CHIMERA

Fascio ^{16}C @ 49.5 MeV/u su target CH_2



Già osservata una indicazione della presenza di una risonanza nel ^{16}C ma bisogna aumentare la statistica

D. Dell'Aquila et al., PRC 93 024611 (2016)

^{14}Be and ^{16}C beams

CHIRONE group

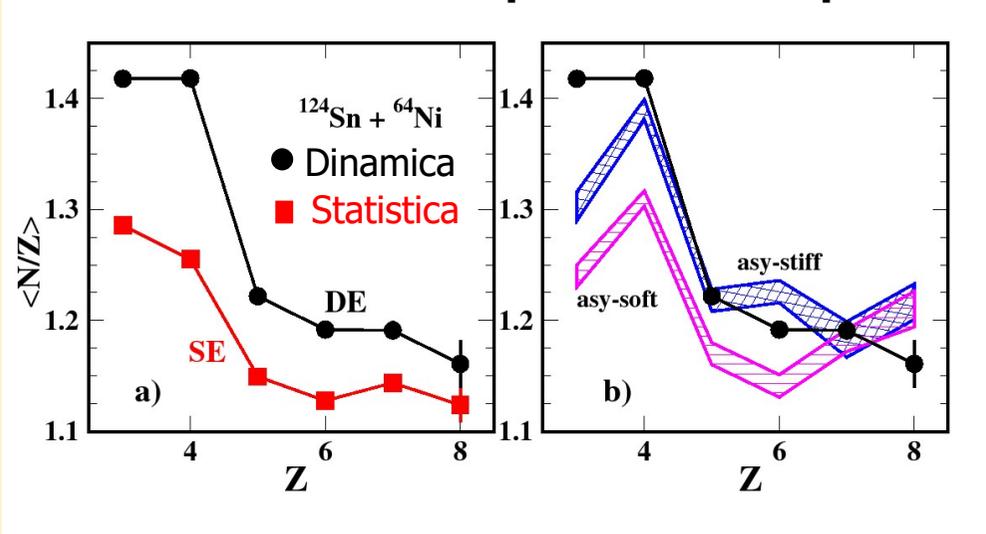
Influenza dell'isospin sulla dinamica della reazione

Collisioni tra ioni pesanti con diverse asimmetrie neutroni-protoni per studiare l'equazione di stato della materia nucleare asimmetrica

Fasci FRAISE

Effetti dell'energia di simmetria e del contenuto di isospin

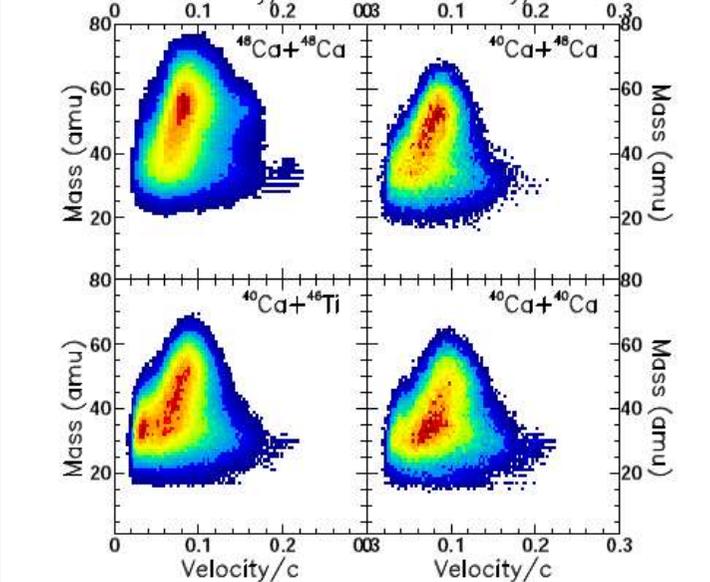
Produzione di frammenti di massa intermedia e loro composizione isotopica



E. De Filippo et al., PRC 86 014610 (2012)

^{68}Ni beam

Competizione tra meccanismi di reazione: reazioni binarie vs. fusione incompleta



F. Amorini et al., PRL 102, 112701 (2009)

^{34}Ar and ^{46}Ar beams

Uso dei nuclei esotici come lente di ingrandimento

CHIRONE group



Grazie

