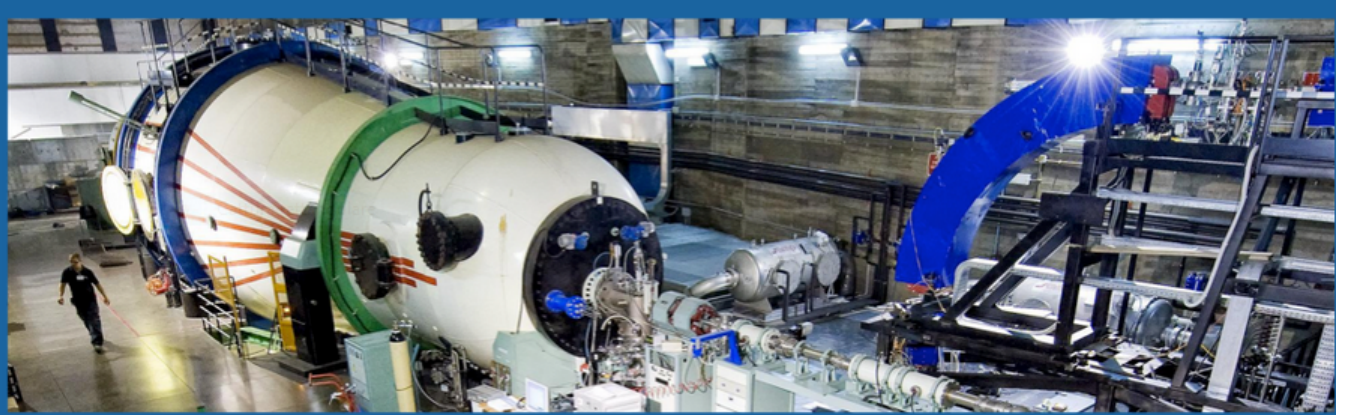




Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Laboratori Nazionali del Sud



PID - Programma INFN per Docenti

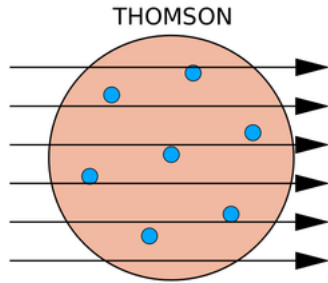
31 marzo-4 aprile 2025
Laboratori Nazionali del Sud

Tecniche di rivelazione in fisica nucleare

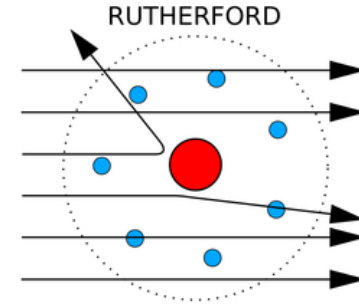
E.V. Pagano

INFN-Laboratori Nazionali del Sud

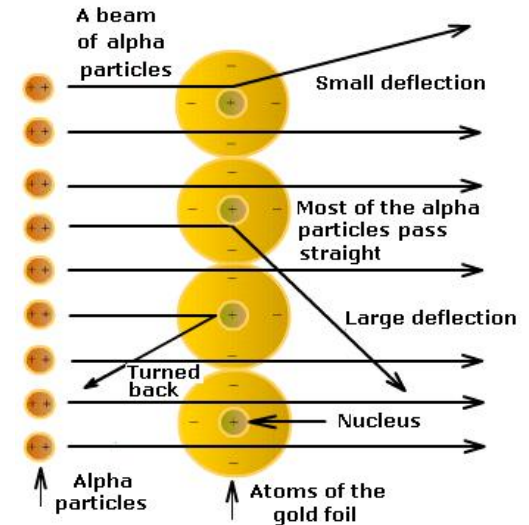
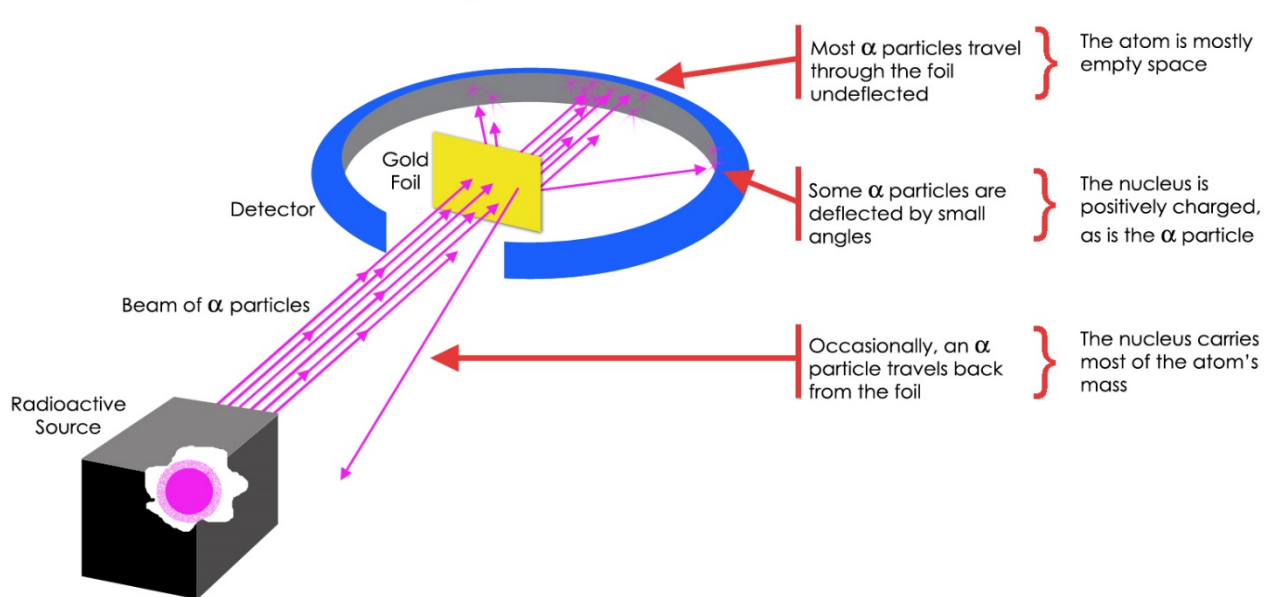
L'inizio della fisica nucleare



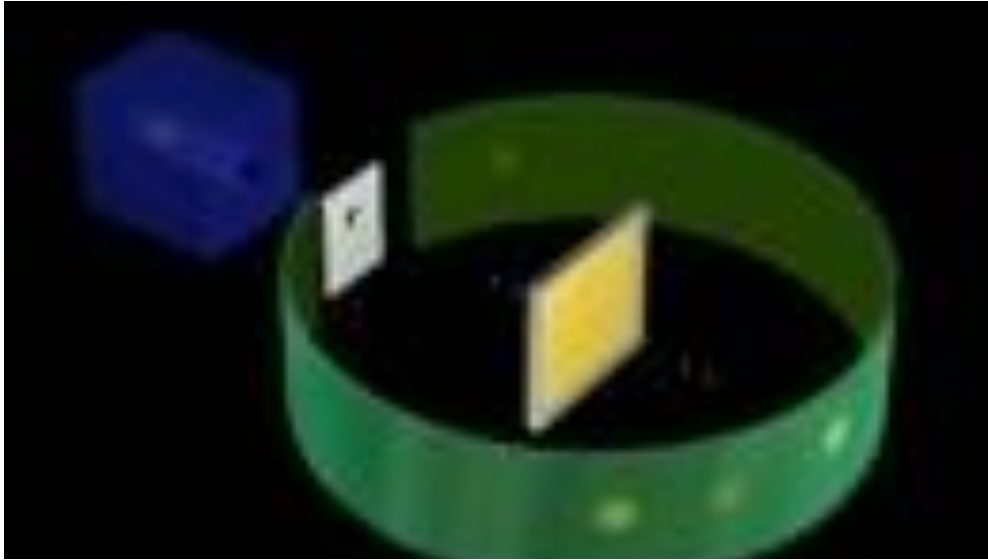
Primi del 1900
Atomo:
Panettone o planetario?



Rutherford's Gold Foil Experiment (1908-1913)



L'esperimento di Rutherford



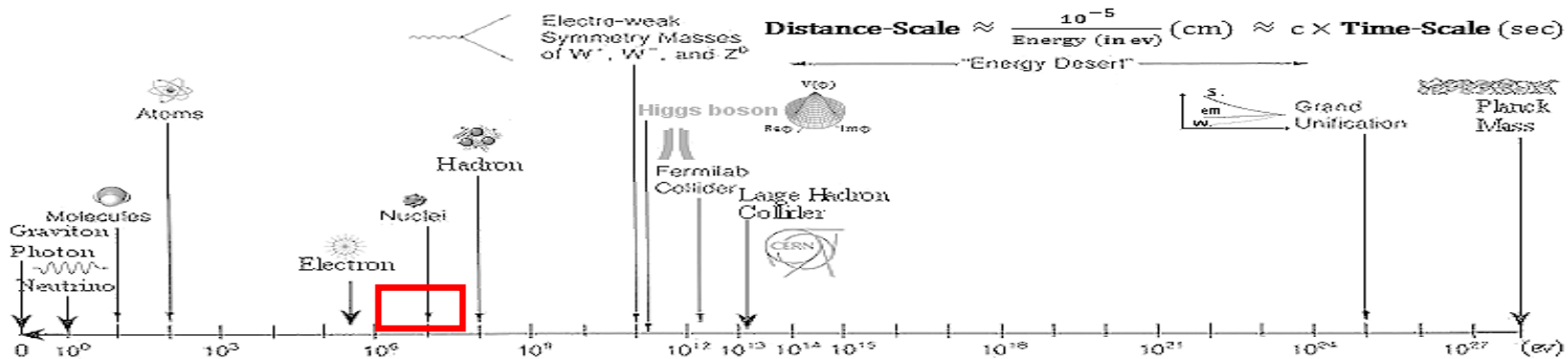
so sottili strati metallici. L'apparato sperimentale originario era costituito anzitutto da una sorgente radioattiva di polonio che emette particelle α e da uno schermo di piombo con una fenditura sottile che permetteva di ottenere un fascio ben collimato; i raggi α bombardavano quindi una laminetta sottile di metallo e venivano in seguito intercettati a diversi angoli da uno schermo di solfuro di zinco, un materiale fluorescente che emette lampi di luce quando viene colpito dalle particelle (Figura 3). Geiger e Marsden osservarono che, anche se la maggior parte delle particelle attraversava il foglio metallico quasi in linea retta, alcune di esse - circa 1 su 8000 - erano fortemente deviate di un angolo maggiore di un angolo retto.

http://www.dmf.unicatt.it/~sangalet/PLS/Buone_pratiche/Esperimento_Rutherford.pdf

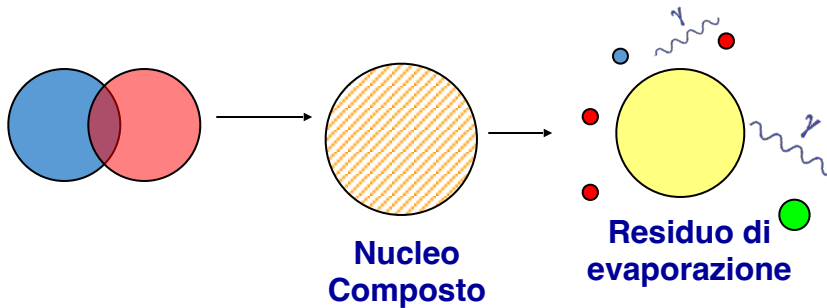
IERI: Uomo che guarda lampi di luce su uno schermo in una stanza buia...
situazione non facile

OGGI: Sistemi-elettronici digitali che processano i lampi di luce o gli impulsi di corrente prodotti nei **rivelatori** avvisandoci dell'arrivo di un nucleo e fornendoci, a seconda dei casi, quante più informazioni su di esso
situazione anch'essa non facile

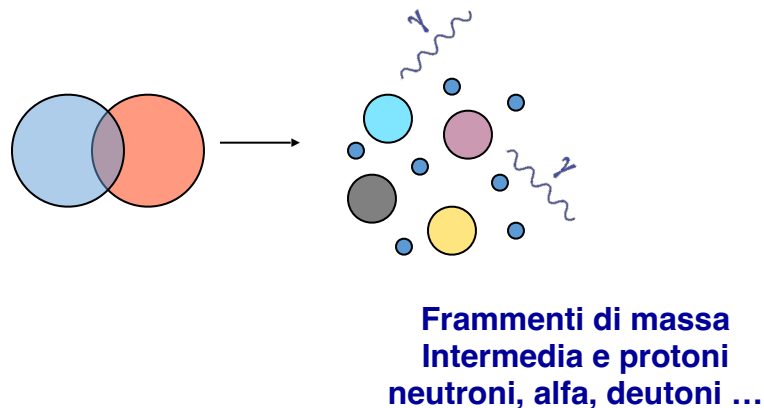
Fisica nucleare e particellare, molta varietà in base all'energia in gioco (dal KeV al TeV)



Focalizziamoci però, in maniera non esaustiva, su ciò di cui abbiamo esperienza ai LNS
Collisioni tra Ioni Pesanti (centrali):...una schematizzazione brutta



Basse energie ($E/A < 10 \text{ MeV/A}$), si forma un nucleo composto eccitato che si diseccita emettendo particelle leggere, neutroni e gamma ($p, n, d, t, \alpha, \gamma$), oppure fissionandosi

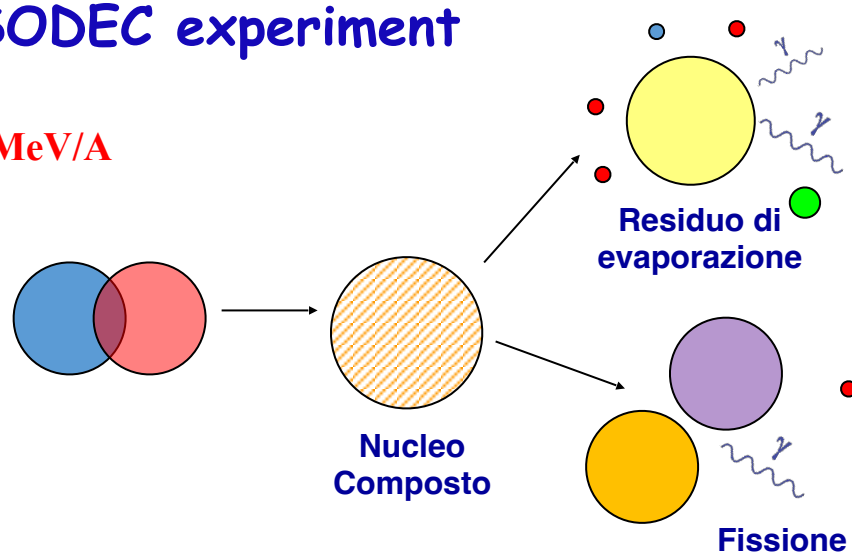


Energie Intermedie ($10 \text{ MeV/A} < E/A < 100 \text{ MeV/A}$), produzione di particelle leggere ($p, n, d, t, \alpha, \gamma$) e di diversi nuclei di piccola taglia (C, N, O, Al) (multiframmentazione)

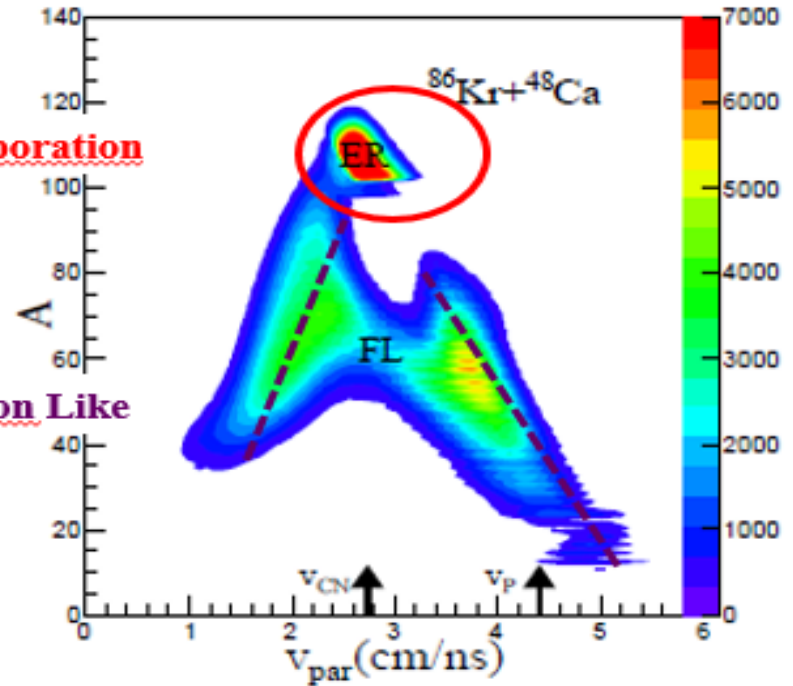
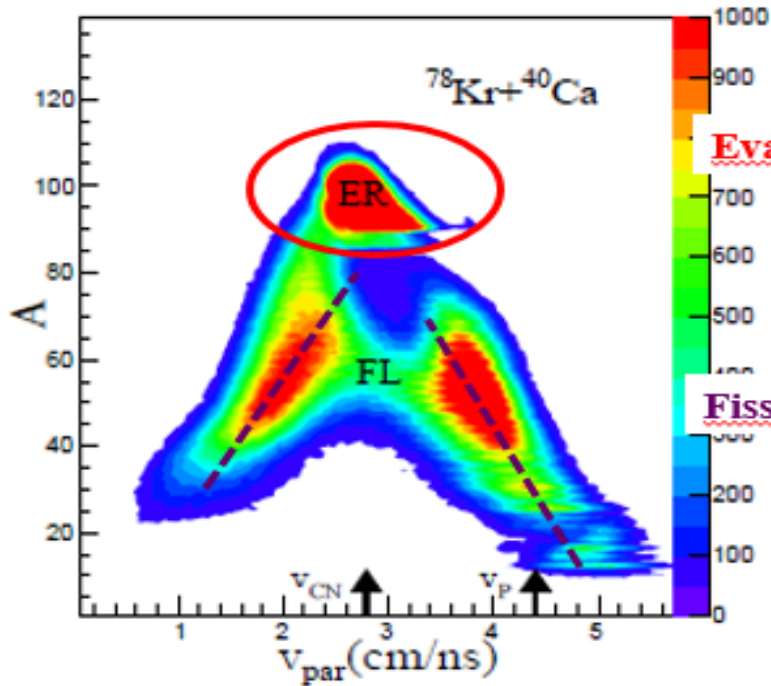
ISODEC experiment



@E/A=10 MeV/A



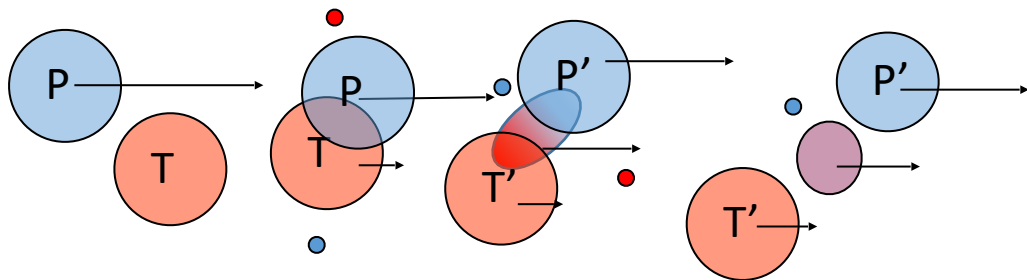
ISODEC Experiment



S. Pirrone et al., EPJ Web of Conf. 122, 13001 (2016)

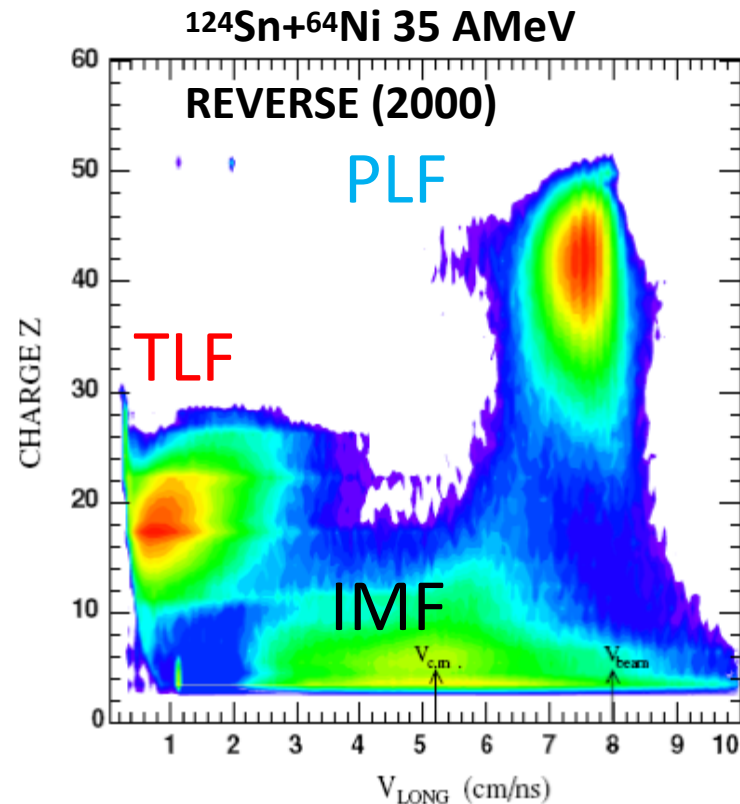
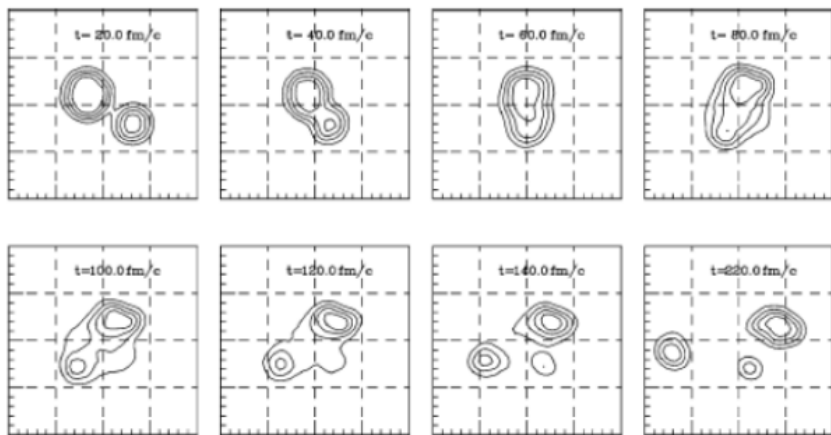
B. Gnoffo et al., Nuovo Cimento C 39, 403 (2016).

IMF emission mechanism in ternary events



$^{124}\text{Sn}+^{64}\text{Ni}$ 35 AMeV

M. Colonna (LNS) SMF calculation



Semi-peripheral collisions:

- Projectile-Like Fragment (PLF)
- Target-Like Fragment (TLF)
- Intermediate Mass Fragments (IMF)

E. De Filippo et al., Phys. Rev. C71 044602 (2005)

E. De Filippo et al., Phys. Rev. C86 014610 (2012)

Pygmy Dipole Resonance in ^{68}Ni ---- $^{68}\text{Ni} + ^{12}\text{C}$ at $E=40$ A MeV (CHIMERA+FARCOS @ LNS EXOTIC Beam)

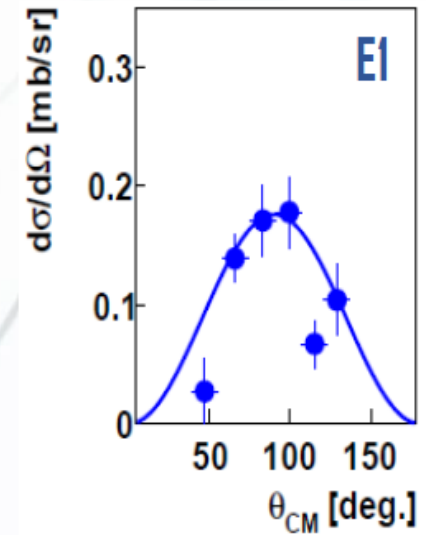
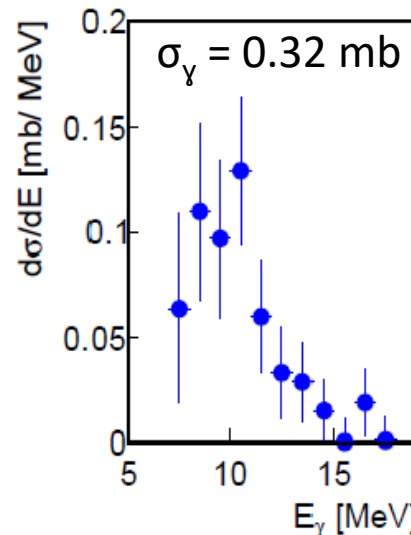
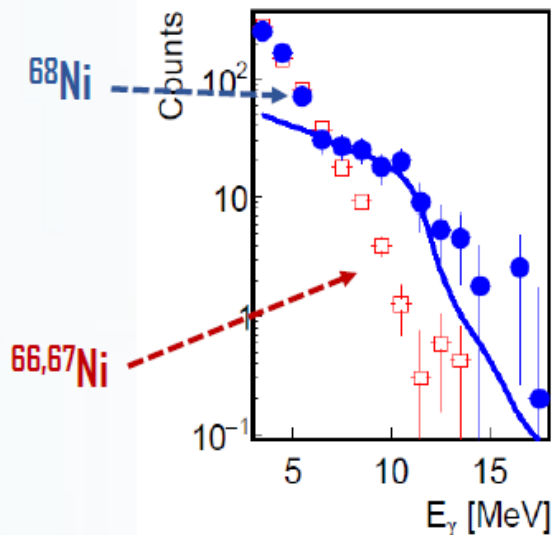
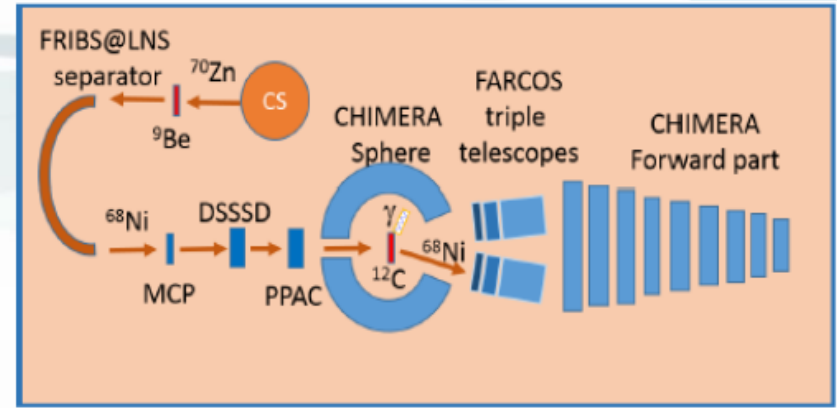
First isoscalar excitation of Pygmy Dipole Resonance (PRD) in neutron rich ^{68}Ni , already studied with isovector probe

^{68}Ni produced and tagged at 40 A MeV by Fragmentation system at LNS

Reaction ^{12}C target \rightarrow detected by FARCOS

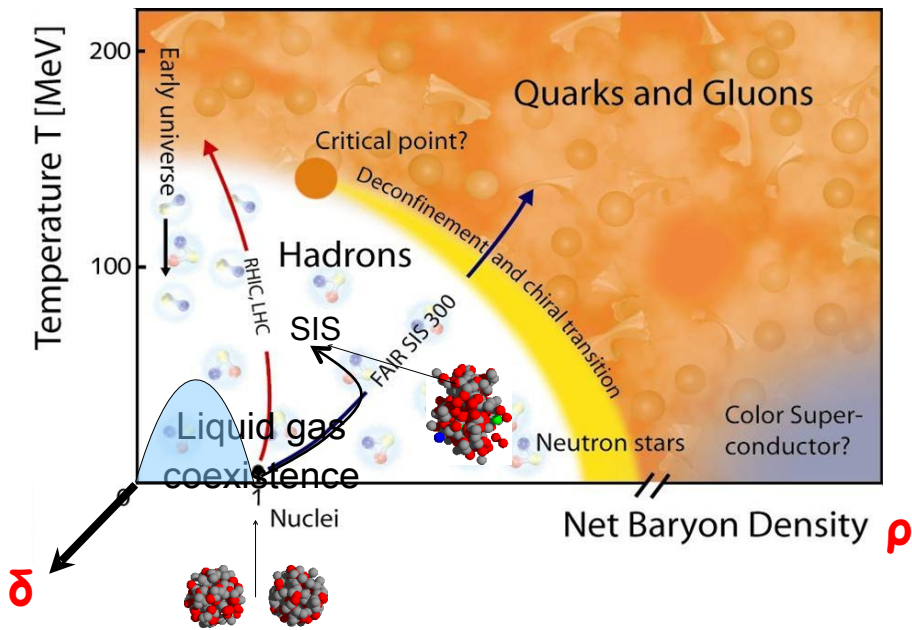
γ rays measured with CHIMERA

\rightarrow PDR with max at 10 MeV and E1 behaviour

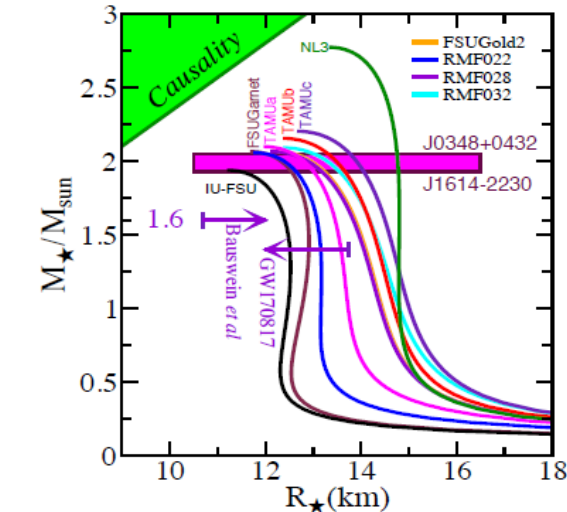


The nuclear EOS describes the relation among energy, pressure, density, temperature and **isospin asymmetry**. It is a **fundamental ingredient** in nuclear physics and astrophysics.

Nuclear matter phase diagram (schematic)



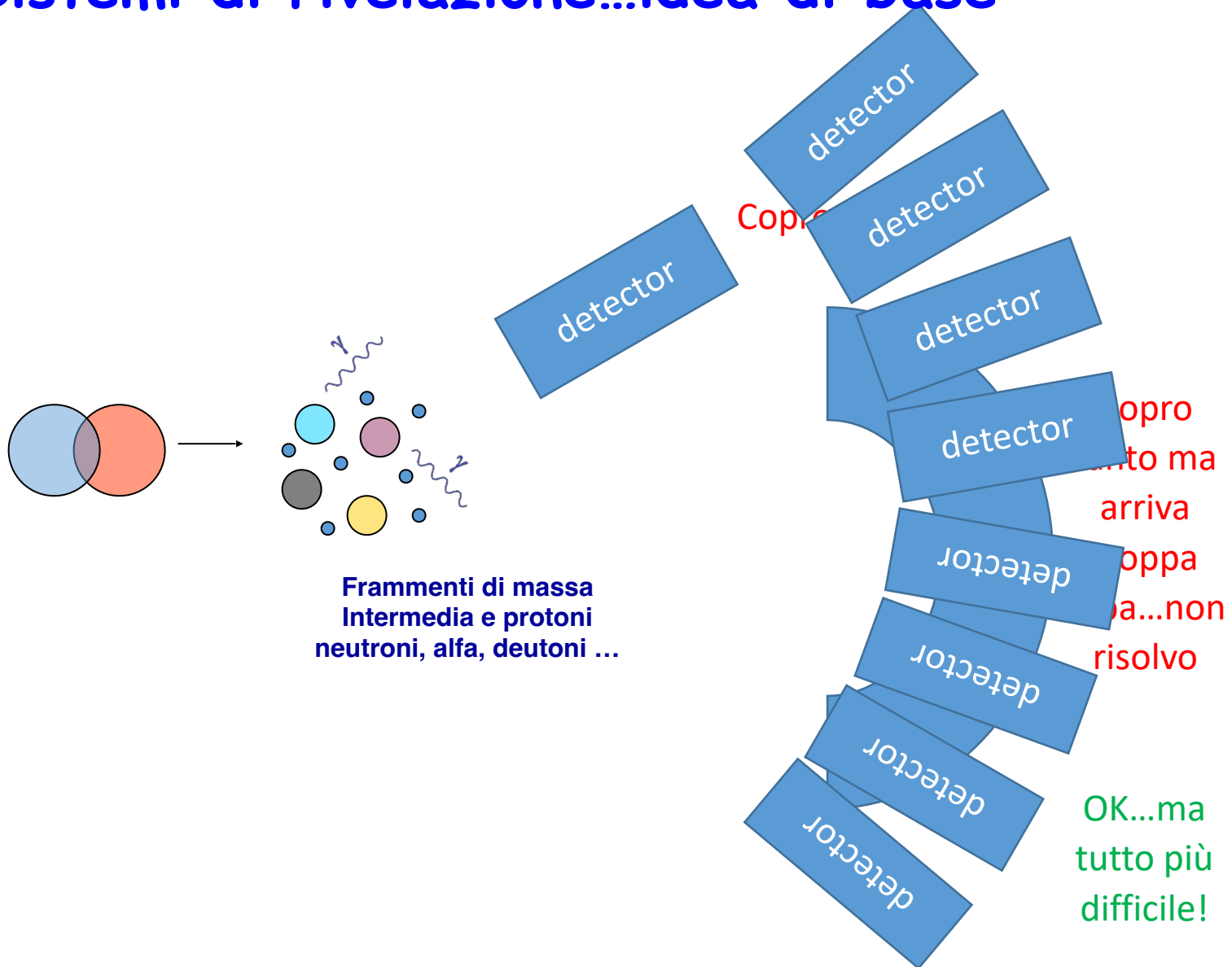
$$\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_n + \rho_p} = \frac{N - Z}{A}$$



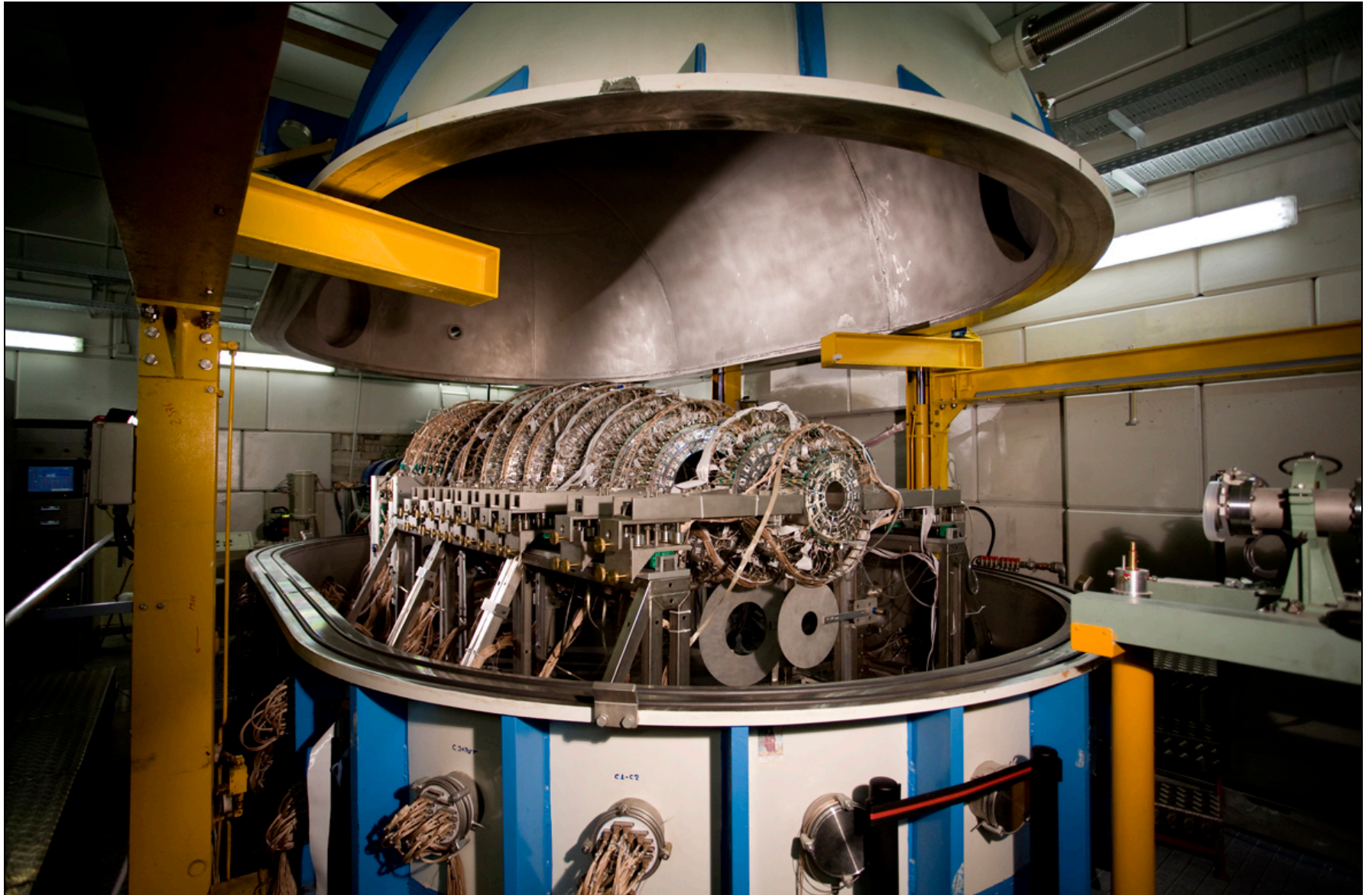
Fattoyev, Piekarewicz, Horowitz

arXiv:1711.06615v2 [nucl-th]

Sistemi di rivelazione...idea di base



CHIMERA @LNS



A. Pagano et al, Nucl. Phys A 734, 504 (2004)

A. Pagano, Nucl. Phys. News 22, 28 (2012) and references therein.

E. De Filippo & A. Pagano EPJA 50 (2014) and references therein.

Camera di scattering

$$P_i = (x_i, y_i, \theta_i, \phi_i, \delta_i)$$

Quadrupole



Dipole

Transport Matrix

$$M: P_i \rightarrow P_f$$

$$M^{-1}: P_f \rightarrow P_i$$

Good compensation of the aberrations:

Trajectory reconstruction

Measured resolutions:

- Energy $\Delta E/E \sim 1/1000$
- Angle $\Delta\theta \sim 0.3^\circ$
- Mass $\Delta m/m \sim 1/160$

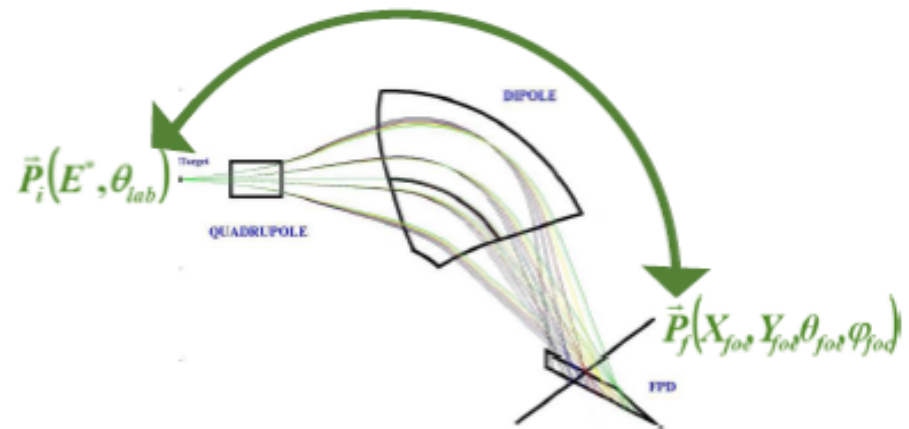
$$qvB = m \frac{v^2}{\rho}$$

$$\rho B = \frac{mv}{q}$$

Optical characteristics	Values
Maximum magnetic rigidity	1.8 T m
Solid angle	50 msr
Momentum acceptance	-14.3%, +10.3%

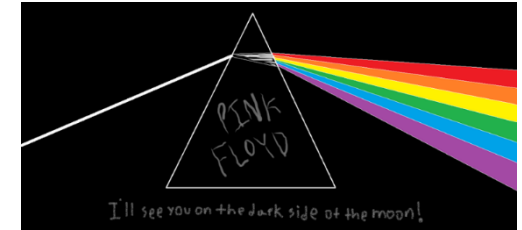
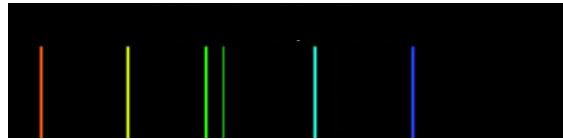
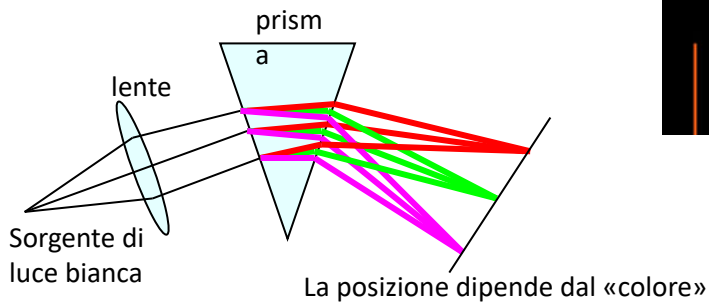
Focal Plane Detector (FPD)

$$P_f = (x_f, y_f, \theta_f, \phi_f)$$

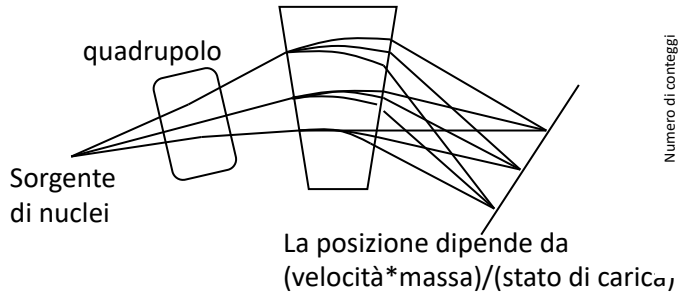


Come funziona uno spettrometro

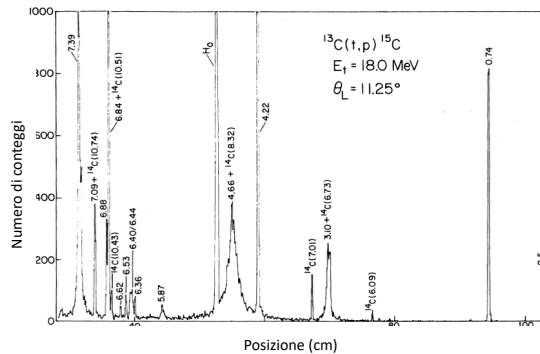
Spettrometro di luce



Spettrometro magnetico



Lavora con fasci CS e Tandem

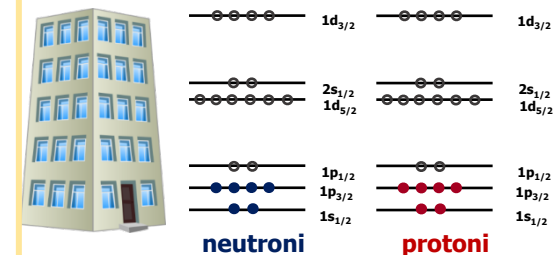


Carta d'identità del nucleo

Funziona come un filtro selezionando il tipo di nuclei desiderato

Studi di struttura nucleare

Il modello a shell



Caratteristiche generali dei rivelatori

Scopo della rivelazione delle particelle:

- Rivelare la presenza e la posizione
- Misurare energia - impulso
- Misurare l'istante di arrivo
- Identificare la particella

La rivelazione si basa sull'interazione tra particella e materiale del rivelatore

- particelle cariche e p $k^{+,-}$ $\pi^{+,-}$ nuclei
- particelle neutre γ π^0 k^0 n

Caratteristiche generali dei rivelatori

- **Sensitivity:** capacità di produrre un segnale «valido» per un certo tipo di particella ed energia
- **Detector Response:** capacità del rivelatore di fornire informazioni aggiuntive alla presenza della particella, ad es., misurarne l'energia

- **Energy resolution:**

$$\text{Resolution} = \Delta E/E .$$

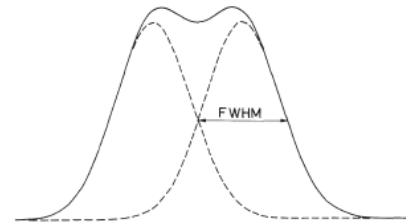
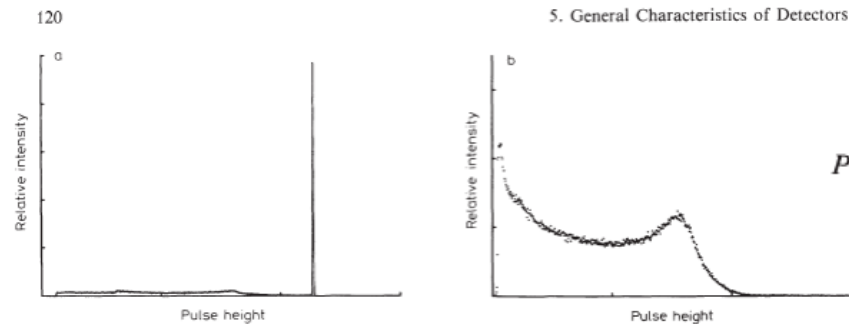


Fig. 5.1. Definition of energy resolution. Two peaks are generally considered to be resolved if they are separated by a distance greater than their full widths at half maximum (FWHM). The *solid line* shows the sum of two identical Gaussian peaks separated by just this amount

- **Response function:**



$$PH(E) = \int S(E')R(E, E') dE' ,$$

Fig. 5.2a, b. The response functions of two different detectors for 661 keV gamma rays. (a) shows the response of a germanium detector which has a large photoelectric cross section relative to the Compton scattering cross section at this energy. A large photopeak with a relatively small continuous Compton distribution is thus observed. (b) is the response of an organic scintillator detector. Since this material has a low atomic number Z, Compton scattering is predominant and only this distribution is seen in the response function

Caratteristiche generali dei rivelatori

- **Response time:** tempo che il rivelatore impiega a rispondere; importante per mantenere informazione temporale sull'arrivo della particella

- **Efficienza geometrica e intrinseca:**

$$\mathcal{E}_{\text{tot}} = \frac{\text{events registered}}{\text{events emitted by source}} .$$

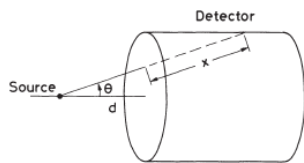


Fig. 5.3. Calculating the detection efficiency of a cylindrical detector for a point source

$$\mathcal{E}_{\text{tot}} \approx \mathcal{E}_{\text{int}} \mathcal{E}_{\text{geom}} .$$

$$\mathcal{E}_{\text{int}} = \frac{\text{events registered}}{\text{events impinging on detector}} .$$

- **Tempo morto:** tempo che il sistema di rivelazione impiega per tornare pronto a rivelare una nuova particella

5.7 Dead Time

143

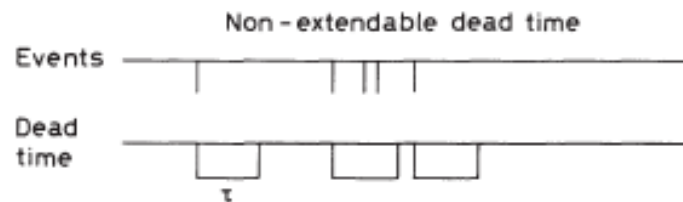


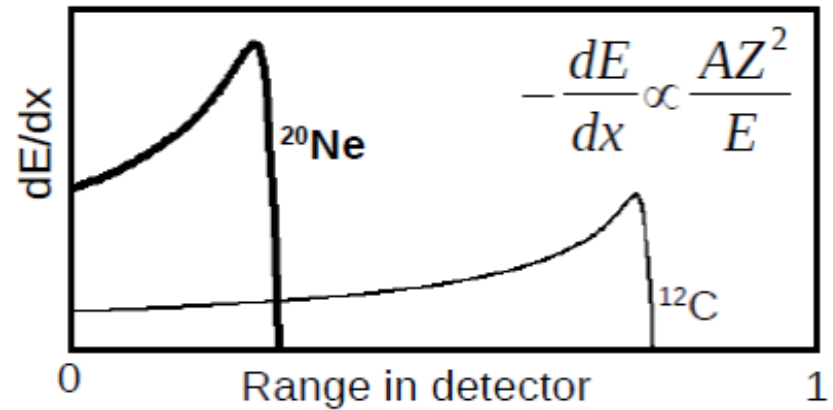
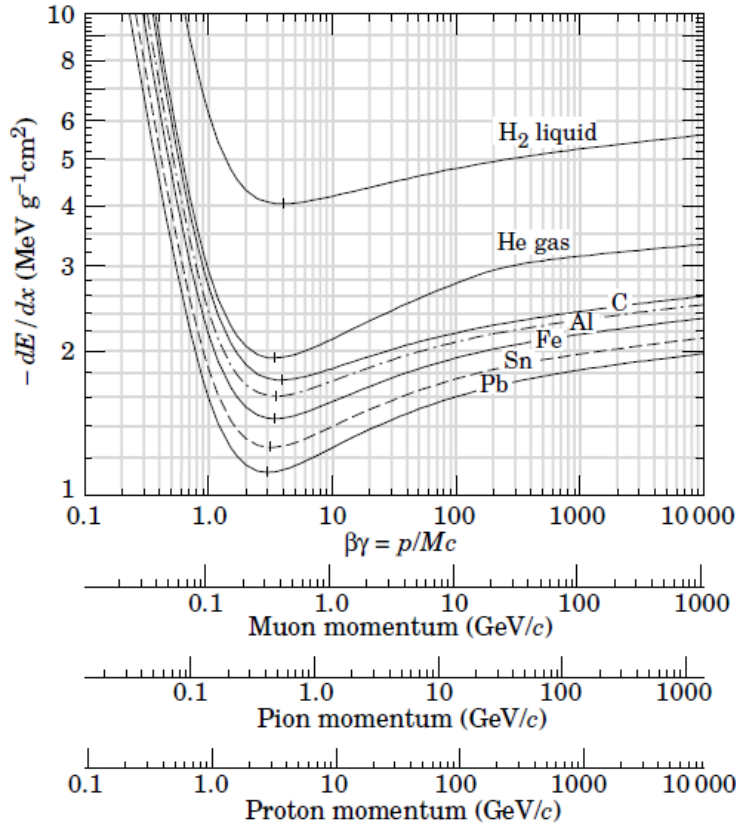
Fig. 5.4. Extendable (paralyzable) and non-extendable (non-paralyzable) dead time models

Interazione particelle/onde materia

Particelle cariche:
perdita di energia per ionizzazione

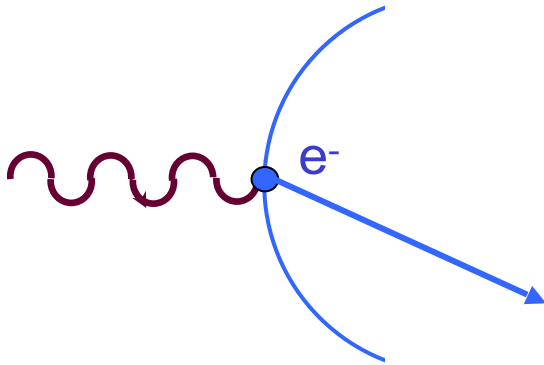
formula di Bethe-Bloch

$$\frac{dE}{dx} = C \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left(\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{\langle I \rangle} - \beta^2 \right)$$



Interazione particelle/onde materia

Particelle neutre: raggi gamma



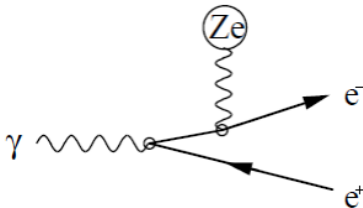
Effetto fotoelettrico

$$E_e = E_\gamma - E_b = h\nu - E_b$$

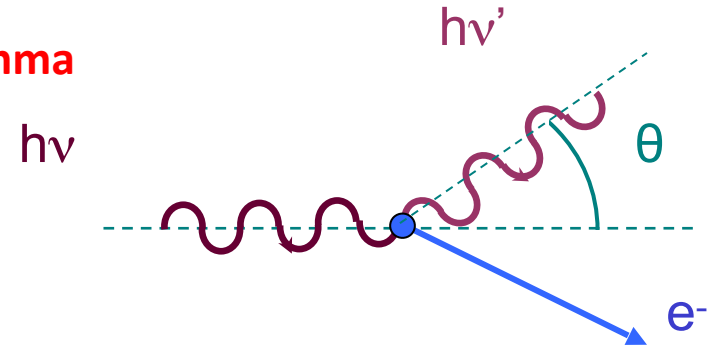
Produzione di coppie

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

$$E_{e^-} + E_{e^+} + K_{nuc} = E_\gamma - 2m_e c^2$$



può avvenire se l'energia del fotone è $E > 2m_e c^2$.



Effetto Compton

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

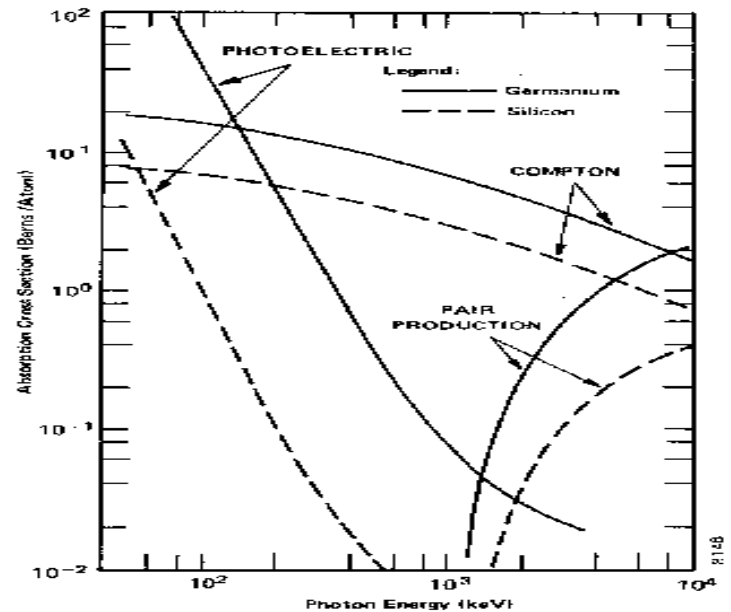


Fig. 7.2. Relative Probability of Each of the Three Types of Interactions as a Function of Energy.

Interazione particelle/onde materia

Particelle neutre: neutrone

I neutroni vengono classificati in base all'energia

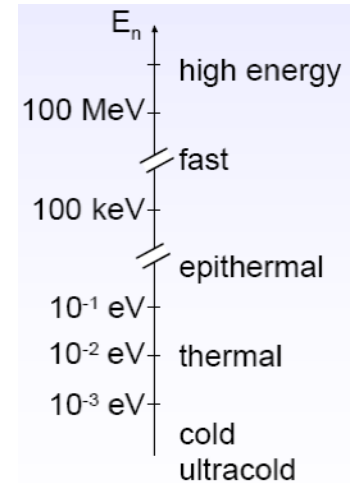
Unica interazione possibile con i nuclei mediante la forza nucleare, per dare

- diffusione elastica $n+A \rightarrow n+A$ ed inelastica $n+A \rightarrow n+A^*$ (H è il moderatore ideale)
- cattura radiativa: Il nucleo cattura il neutrone assorbendo la sua energia ed emette particelle o γ oppure si spacca



- fissione $n + {}^{233,235,238}\text{U}, {}^{209}\text{Bi}, {}^{237}\text{Np}, {}^{239,241}\text{Pu} \rightarrow$ fissione

- Reazioni, importanti per neutroni veloci



Rivelazione di particelle cariche

Processo di interazione con la materia in vari stati gas - liquido - solido

eccitazione/ionizzazione -> portatori di informazione

Processo continuo che avviene sempre nel mezzo:

-> probabilità di rivelazione ~ 1

Misura dell'energia rilasciata nel rivelatore se il segnale è legato a quest'ultima

Rivelazione di particelle neutre

- Decadimento o conversione in particelle cariche

- Interazione con la materia con una data probabilità

Con l'interazione si generano particelle cariche

gamma -> elettroni

neutroni -> particelle cariche pesanti o γ

Due stadi: decadimento/conversione -> rivelazione

-> probabilità di rivelazione < 1

Misura corretta dell'energia solo se essa viene rilasciata per intero nel processo di conversione

Le proprietà dei semiconduttori

Solido: reticolo con elettroni in stati energetici raggruppati in bande

Banda di valenza: elettroni fissi nel reticolo

Banda di conduzione: elettroni liberi

Metalli: bande praticamente sovrapposte, elettroni presenti in banda di conduzione $n \approx 10^{28} \text{ el/m}^3$

-> passaggio agevole di corrente

Isolanti: bande molto distanti separate da un gap energetico $E_{\text{gap}} \approx 5 \text{ eV}$ dove non vi sono stati permessi, non vi sono elettroni in conduzione

-> passaggio di corrente bloccato

Il drogaggio

I semiconduttori vengono solitamente drogati con l'aggiunta di impurità (oltre quelle già presenti)

Effetto del drogaggio

- equilibrio delle cariche perturbato
- livelli energetici presenti nella zona proibita



Drogante pentavalente (P, As, Sb)

Elemento con un elettrone in più, debolmente legato

-> livelli appena sotto la conduzione
passaggio in banda di conduzione a **T** ambiente

-> donore con concentrazione N_d

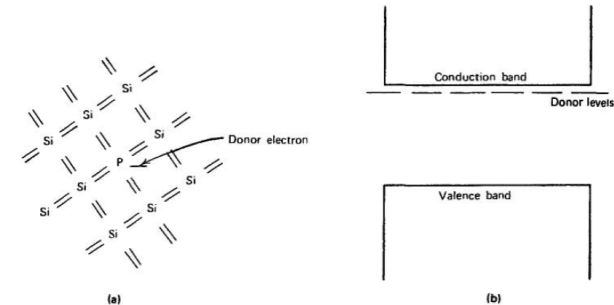
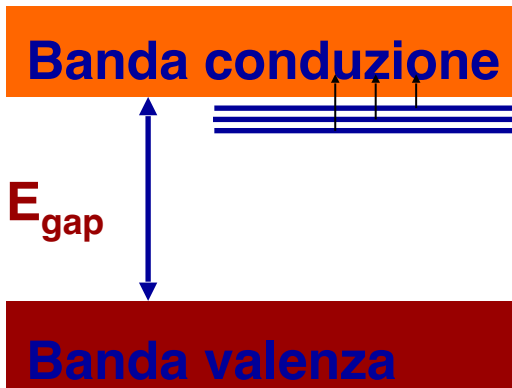


Figure 11.3 (a) Representation of a donor impurity (phosphorus) occupying a substitutional site in a silicon crystal. (b) Corresponding donor levels created in the silicon bandgap.

-> aumento delle cariche negative libere

$$n = n_i + N_d \approx N_d = 10^{15} \text{ atomi/cm}^3$$

Drogante trivalente (B)

Elemento con un elettrone in meno, i cui atomi catturano un **e** che si mette nei livelli sopra la valenza

L'elettrone è bloccato nell'accettore e lascia una lacuna libera in valenza

-> accettori con concentrazione

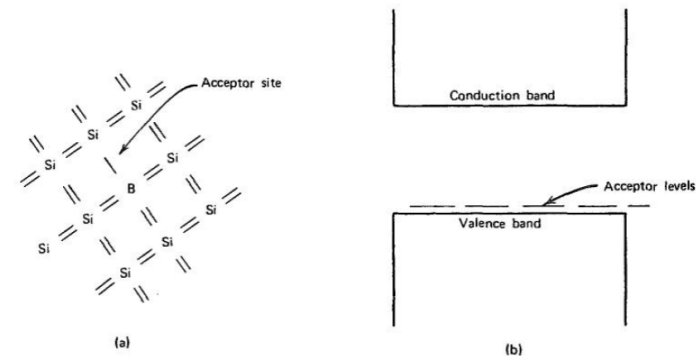


Figure 11.4 (a) Representation of an acceptor impurity (boron) occupying a substitutional site in a silicon crystal. (b) Corresponding acceptor levels created in the silicon bandgap.

-> aumento delle cariche positive libere

$$p = p_i + N_a \approx N_a = 10^{14} \text{ atomi/cm}^3$$

Le giunzione n-p

Unione di un materiale di tipo **n** con uno di tipo **p**, maggiormente drogato \rightarrow **p+** in modo che le cariche siano libere di migrare da uno all'altro

Tipo **p** \rightarrow eccesso cariche libere positive

Tipo **n** \rightarrow eccesso cariche libere negative

Al contatto le cariche libere in eccesso migrano da un tipo all'altro \rightarrow diffusione e ricombinazione

Il processo si ferma quando si genera un campo elettrico che si oppone a tale moto

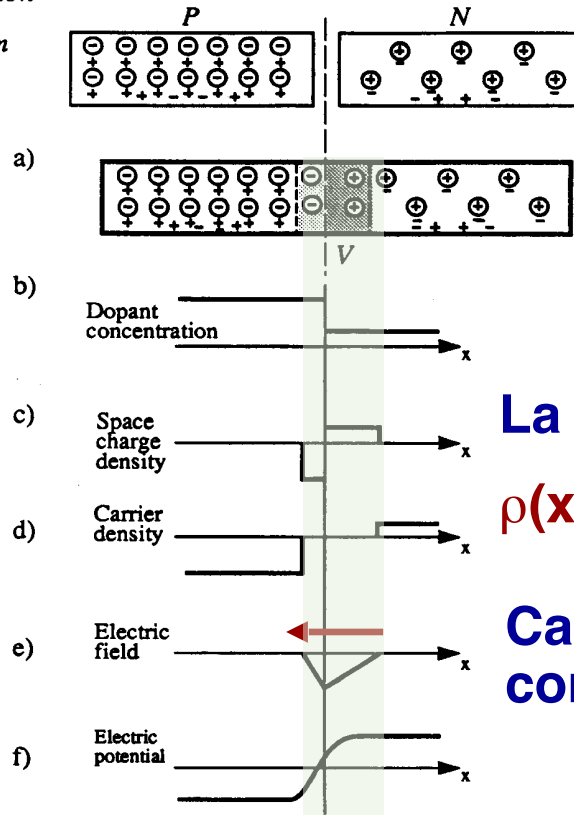
\rightarrow equilibrio dinamico

Regione di svuotamento dove le cariche libere si ricombinano lasciando solo le cariche fisse

-> densità di carica fissa -> campo elettrico -> ddp

⊖ Acceptor ion
⊕ Donor ion
+ Hole
- Electron

THE PN JUNCTION



La densità di carica fissa è uniforme

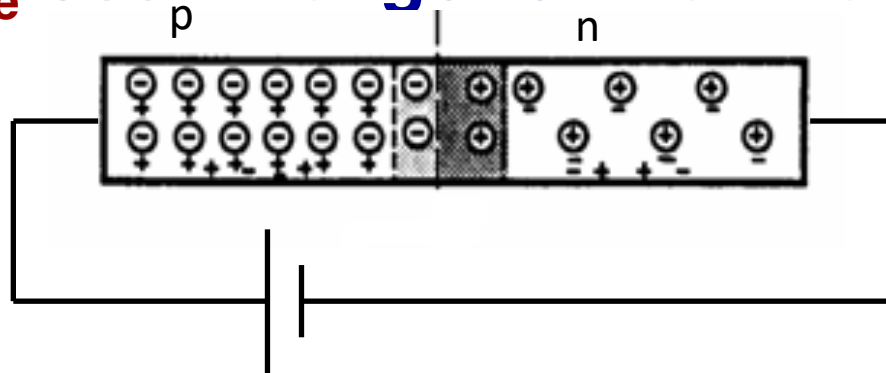
$$\rho(x) = qN_d \quad \rho(x) = qN_a$$

↓
Campo elettrico lineare
con pendenza $\sim N_d$ e N_a

$$W = X_p + X_n$$

La polarizzazione

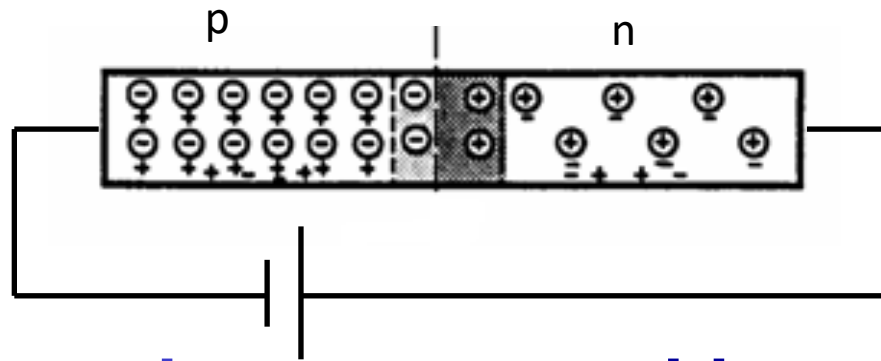
Se ai capi di una giunzione **n-p** viene posta una tensione V_e ossia vengono iniettate delle cariche:



- polarizzazione diretta: **p** positivo e **n** negativo

Il moto della cariche maggioritarie è favorito->
alta corrente anche a piccole V_e

Lo svuotamento si riduce ed la ddp si abbassa a
 $V_i - V_e$



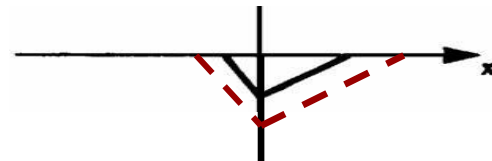
- polarizzazione inversa: **n** positivo e **p** negativo

Il moto delle cariche maggioritarie è bloccato dal campo interno \rightarrow bassa corrente anche ad alte **V**

Le cariche iniettate fanno aumentare la zona di svuotamento **W** ed il potenziale diventa **$V_i + V_e$**

Il campo elettrico si estende mantenendo la sua pendenza all'interno della

giunzione



La rivelazione

Se delle particelle cariche attraversano la zona di svuotamento vi lasciano energia -> ionizzazione

Coppie elettrone/lacuna $n \text{ coppie} = \text{Energia}/w$

w = Energia media di ionizzazione

Silicio $w = 3,6 \text{ eV}$ Germanio $w = 3 \text{ eV}$

-> portatori liberi in una zona vuota

Tali coppie si muovono sotto l'effetto del campo elettrico della giunzione (V_i o V_t) verso i poli di

segno opposto elettroni -> n lacune -> $p+$

-> segnale di corrente misurabile

I Rivelatori a Scintillazione

Introduzione

Principio di base:

- le particelle cariche (primarie o secondarie)

 - rilasciano energia **E** eccitando il mezzo rivelatore

- il mezzo si diseccita emettendo luce $\sim 100\text{eV/}$ fotone

- la luce viene raccolta e trasformata in un segnale

 - che contiene varie informazioni

Mezzi scintillanti organici ed inorganici, in vari stati fisici (gas, liquidi, solidi)

Scintillatore ideale:

- **Alta efficienza e linearità nella conversione E - luce**
- **Trasparenza alla luce prodotta**
- **Semplicità di manipolazione e lavorazione**
- **Indice di rifrazione simile allo strumento per la rivelazione della luce per migliore accoppiamento**
- **Spettro di emissione in luce accoppiato con la sensibilità dello strumento di lettura**
- **Tempi brevi di emissione della luce**

Compromesso tra esigenze e prestazioni

Gli spettri di emissione variano in base al materiale

Alcuni scintillatori inorganici più comuni

Ioduro di sodio **NaI(Tl)**

elevata resa di luce
igroscopico, fragile

Ioduro di cesio **CsI(Tl)**

alti **Z** e ρ

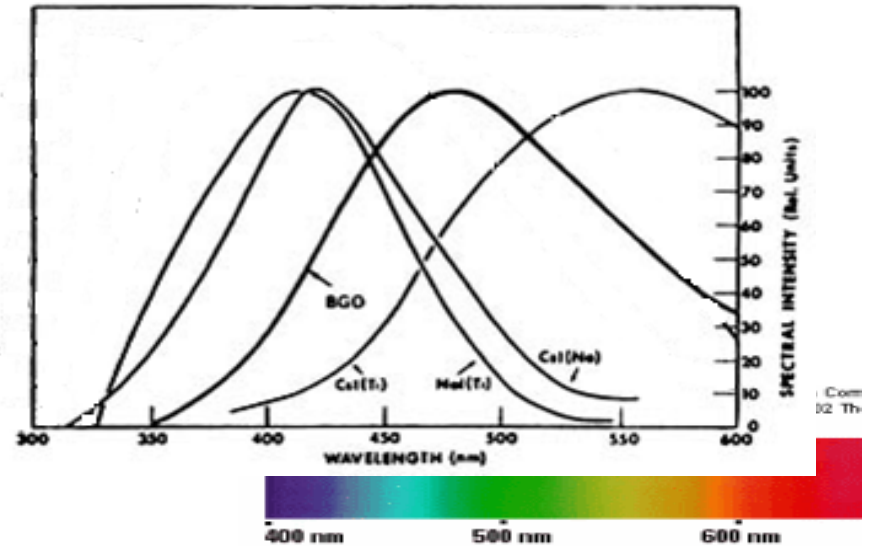
componenti lenta/veloce

facile lavorazione, resistenza

spettro luce spostato ad alta λ

Fluoruro di Bario **BaF₂**

alto **Z**, componenti lenta/veloce



Risposta di scintillazione

Parte dell'energia è convertita in luce ma molta si perde eccitazione non radiativa

Efficienza di conversione

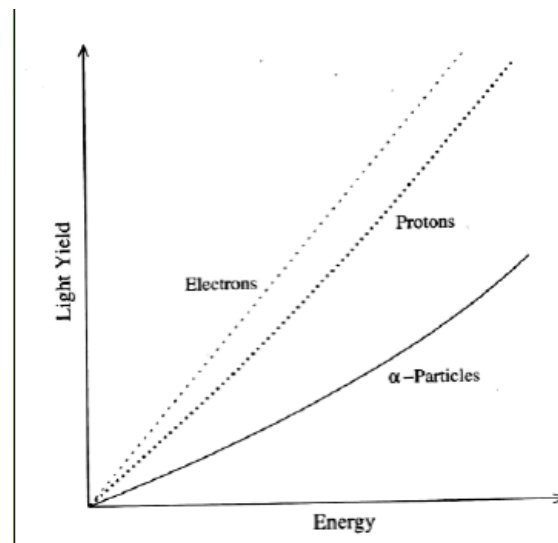
$$\frac{dL}{dx} = S \frac{dE}{dx}$$

S = frazione di energia convertita il luce

Se **S** non è costante la risposta **L(E)** dello scintillatore non è lineare

Inoltre tale risposta dipende dal tipo di particella

Es.: **NE102**

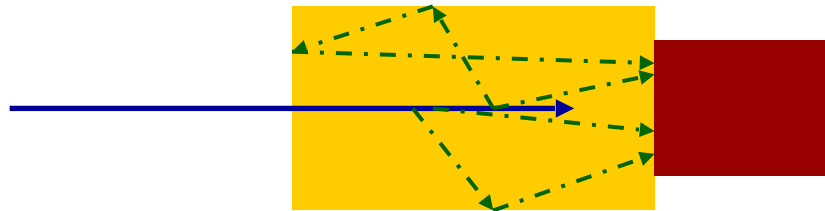


La raccolta della luce

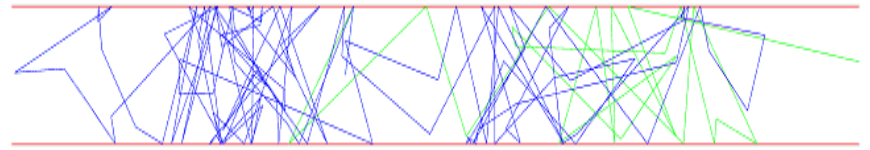
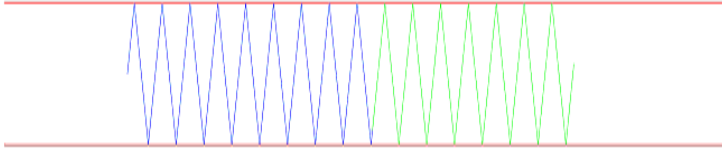
La luce prodotta viene raccolta in uno strumento di lettura che genera un segnale -> tempo, energia, Z/A

Emissione isotropa della luce lungo la traccia

Una parte della luce raggiunge subito lo strumento, una parte per eventuali riflessioni successive nelle pareti



**Scintillatore avvolto in materiale riflettente
speculare (alluminio) o diffuso (teflon bianco)**



**Finitura della superficie che può essere liscia o
rugosa**

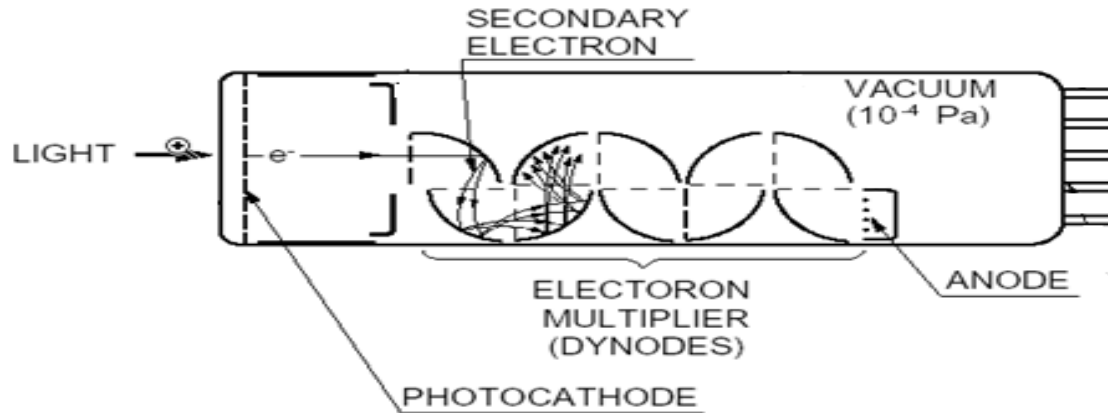
**Avvolgimento esterno con materiale nero per
impedire l'ingresso della luce dall'esterno**

**Accoppiamento cristallo/fotolettore con indici di
rifrazione simili -> $n_c < n_f$ per evitare la riflessione
totale per i fotoni in uscita**

**Una eventuale interfaccia deve avere n
intermedio**

Fotosensori 1: Fotomoltiplicatori

La luce raccolta può generare un segnale elettrico grazie ad un fotomoltiplicatore-fototubo **PMT**



Tubo sotto vuoto con:

Fotocatodo -> produce elettrone per e.f.

Dinodi -> moltiplicazione di elettroni

Anodo -> raccolta elettroni e produzione del segnale

Fotosensori 2: Rivelatori a Semiconduttore

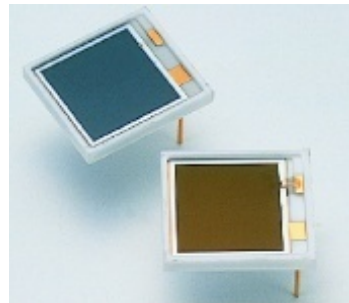
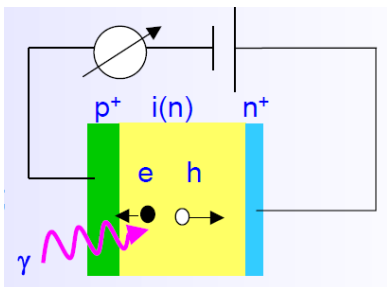
I rivelatori a semiconduttore possono essere utilizzati per la lettura della luce di scintillazione

Fotodiodi (Photo Diode PD)

I fotoni incidono su una giunzione pn generando coppie elettrone-lacuna che sono raccolte dal campo elettrico presente nella giunzione

$$QE(\%) = \frac{N_{pe}}{N_\gamma}$$

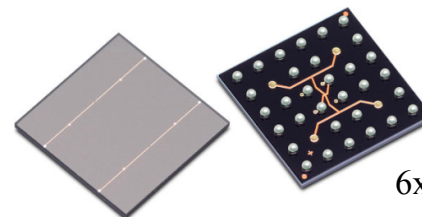
- **QE** molto elevata su un vasto dominio di λ
- basse tensioni operative **< 100 V**
- segnale proporzionale al numero di fotoni senza alcuna moltiplicazione
- stabile ma non adatto a basso numero di fotoni



Fotomoltiplicatore al Silicio (SiPM)

Sono migliaia di microcelle di PD che lavorano in regime a valanga in cui un singolo fotone produce centinaia di elettroni per singola cella la carica di tutte le celle viene sommata e raccolta

- **QE** molto elevata su un vasto dominio di λ
- basse tensioni operative **< 50 V**
- segnale proporzionale al numero di fotoni senza moltiplicazione (PD a valanga) ma vi è una moltiplicazione (PD a valanga)
- adatto a basso numero di fotoni
- Teme il danno da radiazione e la temperatura alta

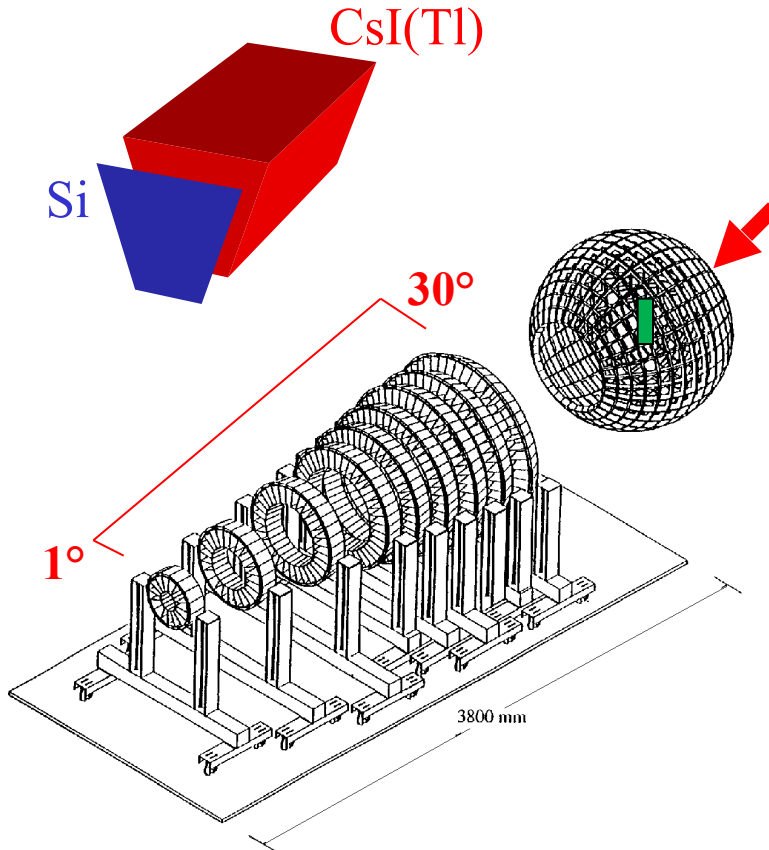


BROADCOM
AFBR-S4N66C013

6x6mq con $\approx 40k$ microcelle da $30\mu m$ di spessore

CHIMERA

Charge Heavy Ion Mass and Energy Resolving Array



Granularity	1192 telescopes Si (300 μ m) +CsI(Tl)
Geometry	RINGS: 688 telescopes 100-350 cm SPHERE: 504 telescopes 40 cm
Angular range	RINGS: $1^\circ < \theta < 30^\circ$ SPHERE: $30^\circ < \theta < 176^\circ$ 94% of 4π
Identification method	ΔE -E E-TOF PSD in CsI(Tl) PSD in Si (upgrade 2008)
Experimental observables and performances	TOF $\delta t \leq 1$ ns $\delta E/E$ LCP (Light Charge Particles) $\approx 2\%$ $\delta E/E$ HI (Heavy Ions) $\leq 1\%$ Energy, Velocity, A, Z, angular distributions
Detection threshold	≈ 1 MeV/A for H.I. ≈ 2 MeV/A for LCP

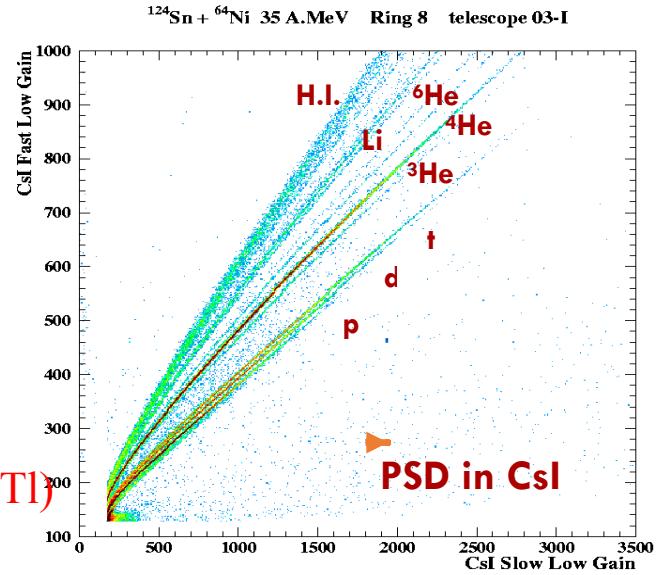
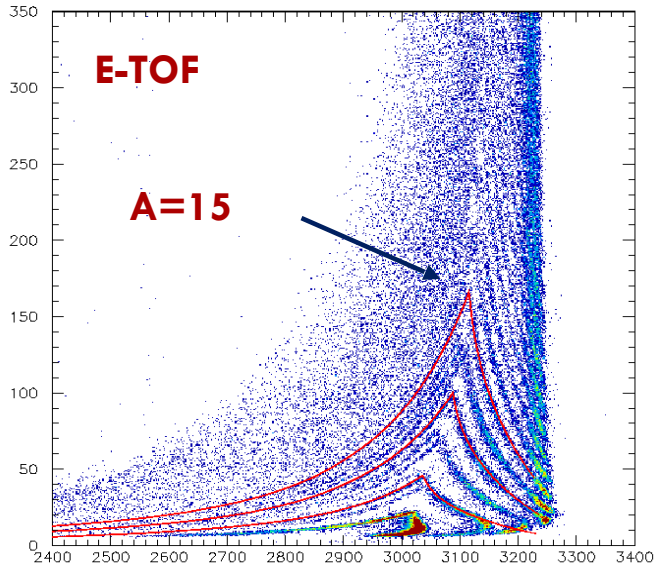
Dynamical range : from fusion, fusion-fission to multifragmentation reaction

A. Pagano et al, Nucl. Phys A 734, 504 (2004)

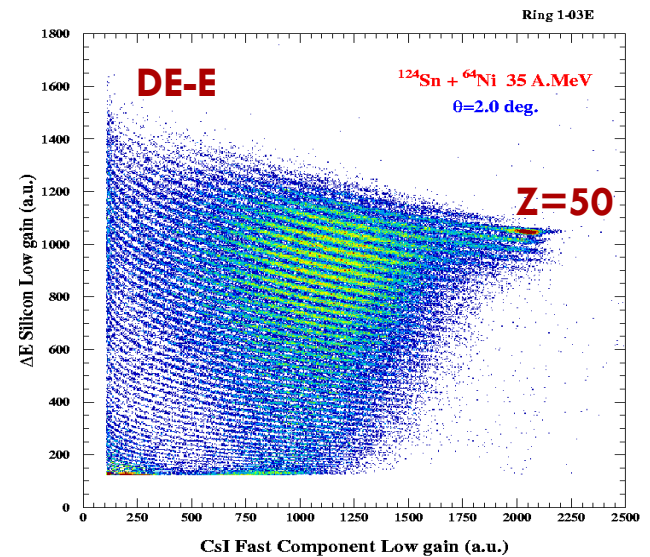
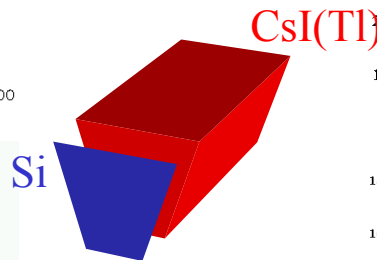
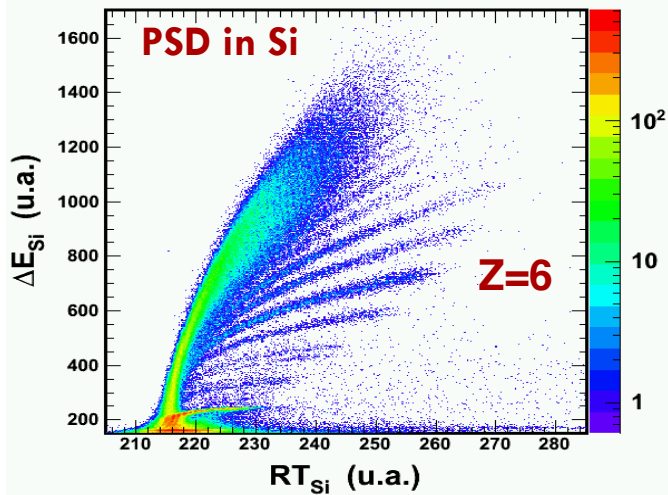
A. Pagano, Nucl. Phys. News 22, 28 (2012) and references therein.

E. De Filippo & A. Pagano EPJA 50 (2014) and references therein.

CHIMERA identification methods: Z and A



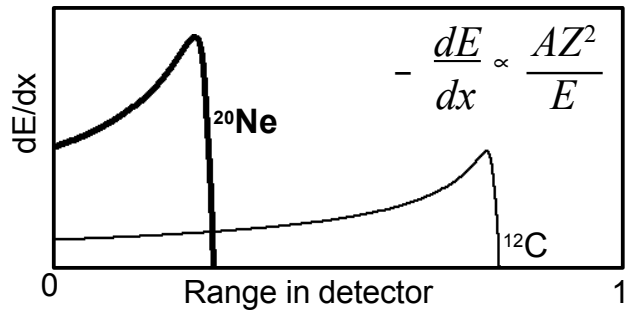
$^{78}\text{Kr} + ^{40}\text{Ca}$ at 10 A.MeV, ring 10-S, $\theta = 34.0^\circ$



Isotopic identification with the ΔE -E method

Stopping power

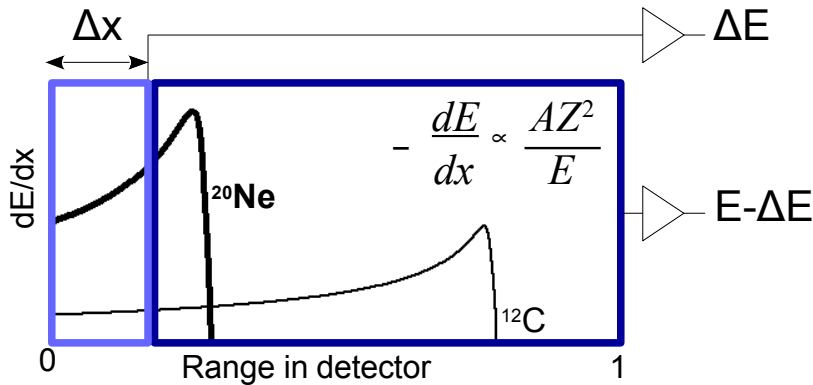
Stopping power depends on the charge (Z), mass (A), and energy (E) of the particle



Isotopic identification with the ΔE -E method

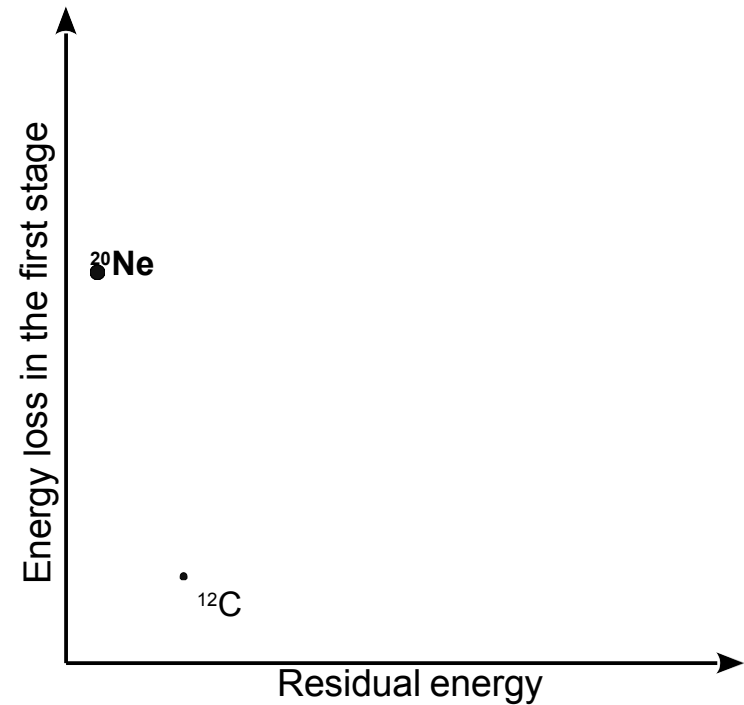
Stopping power

Stopping power depends on the charge (Z), mass (A), and energy (E) of the particle



ΔE -E method

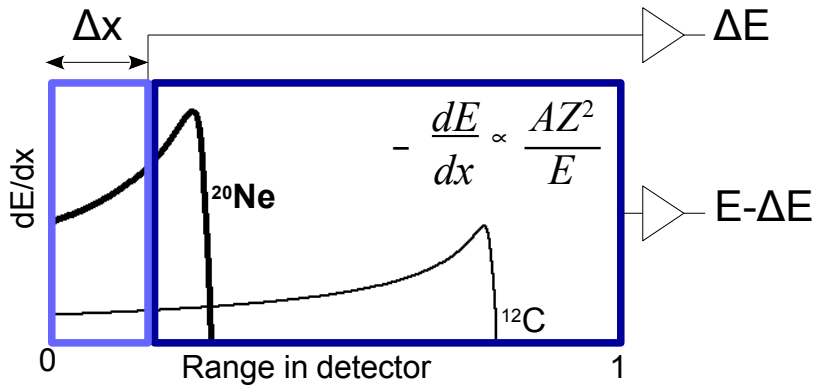
Divide the material in ΔE and E layers. In the ΔE -E plot, particles populate lines characteristic of their charge and mass



Isotopic identification with the ΔE -E method

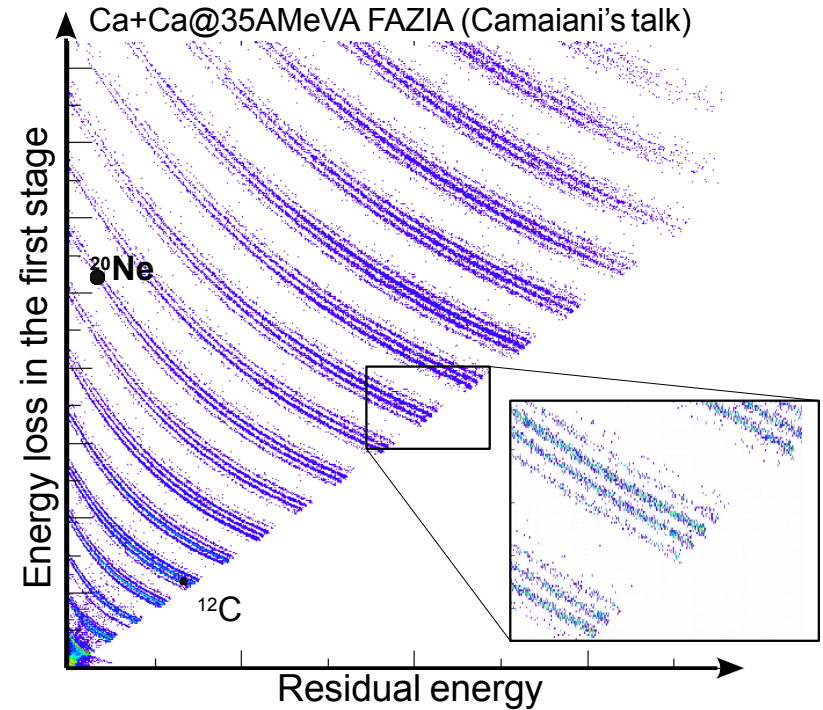
Stopping power

Stopping power depends on the charge (Z), mass (A), and energy (E) of the particle

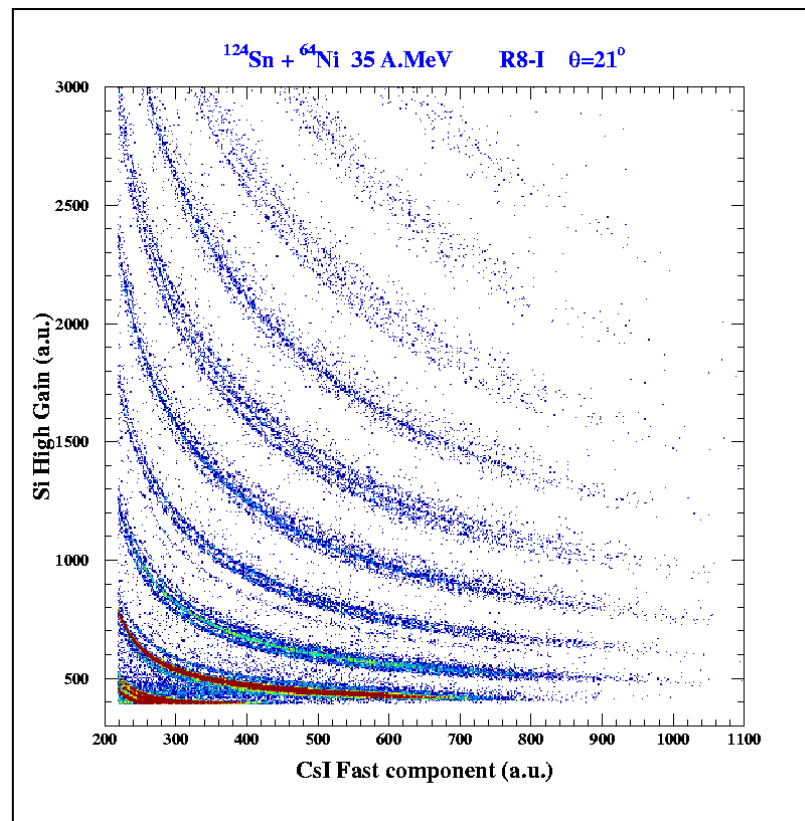
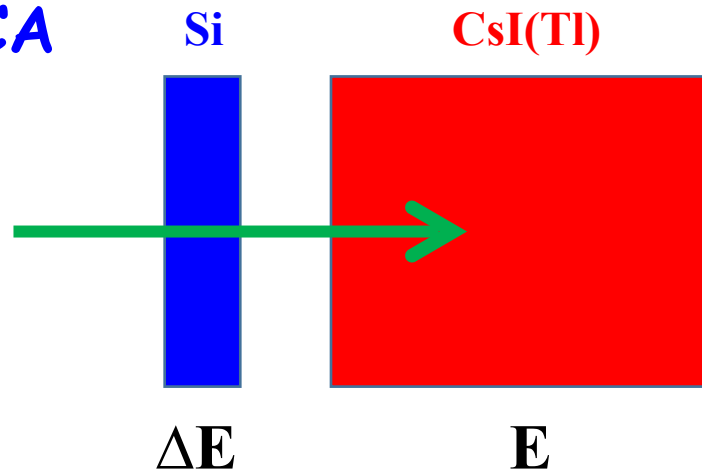
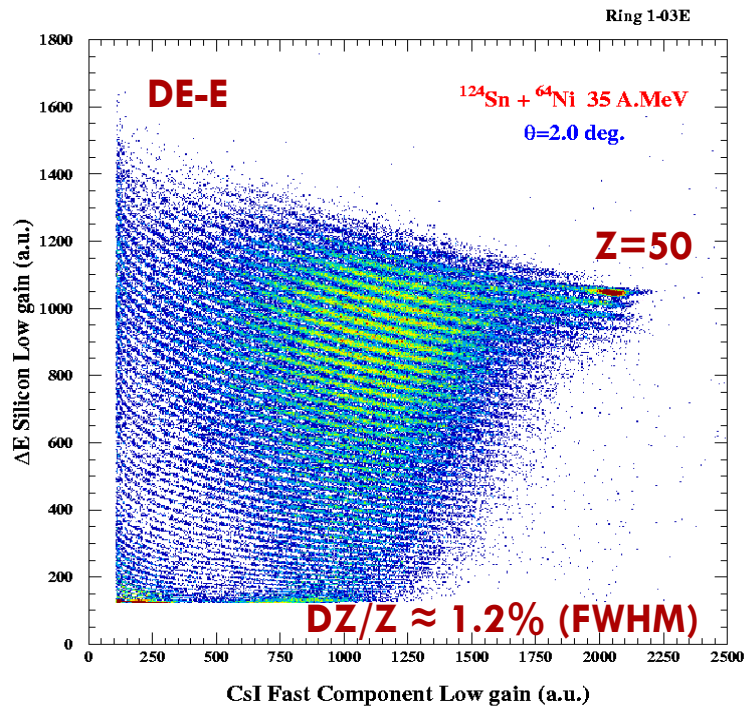


ΔE -E method

Divide the material in ΔE and E layers. In the ΔE -E plot, particles populate lines characteristic of their charge and mass



IDENTIFICAZIONE IN CARICA



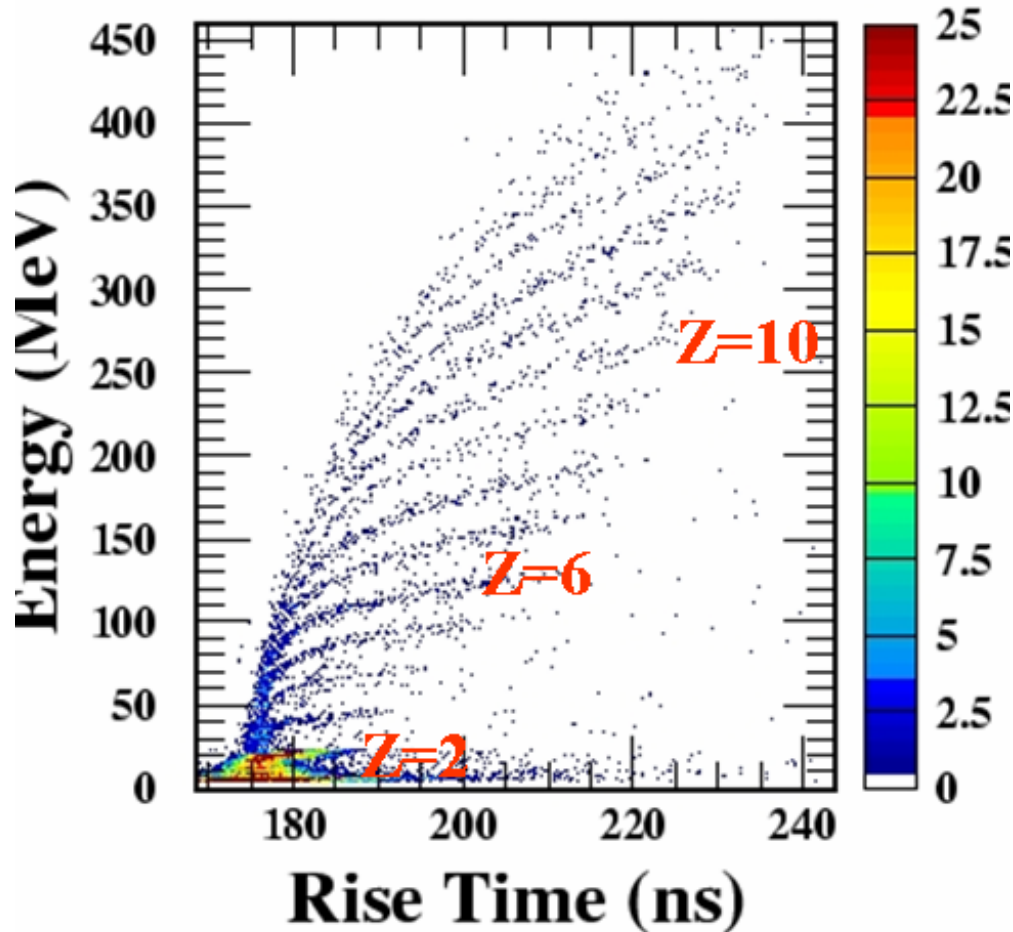
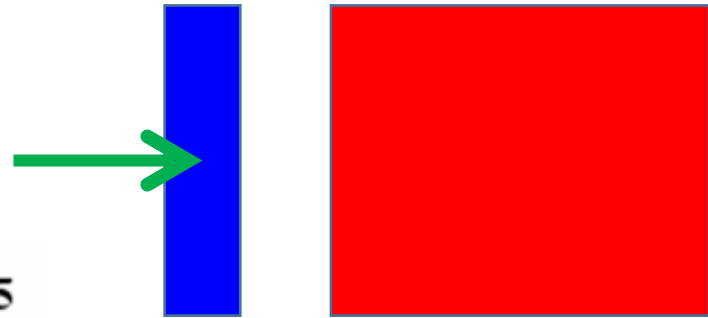
Dalla formula di Bethe – Bloch

$$\Delta E \propto \Delta x(AZ^2) / E$$

IDENTIFICAZIONE IN CARICA

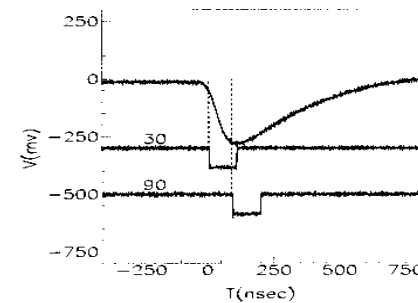
Si

CsI(Tl)



E- Rise Time (PSD_Silicio)

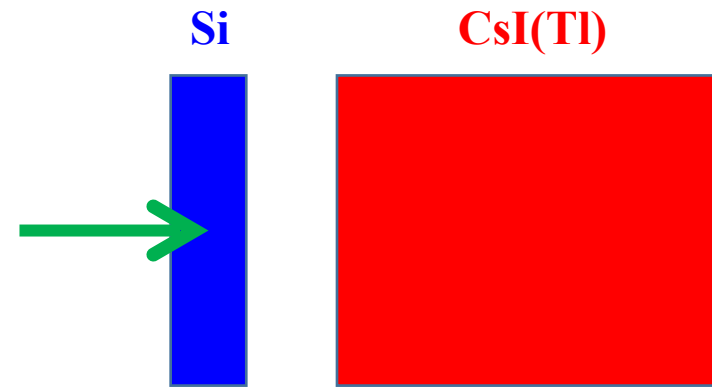
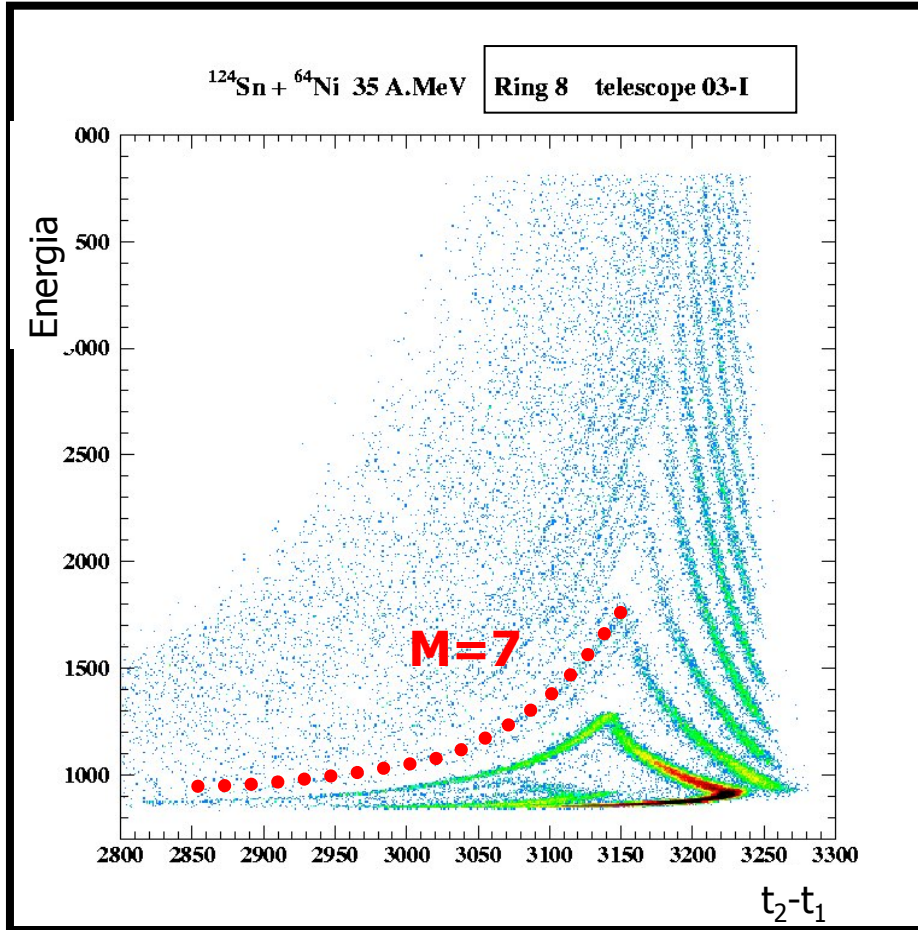
Rise time = $f(Z, E)$



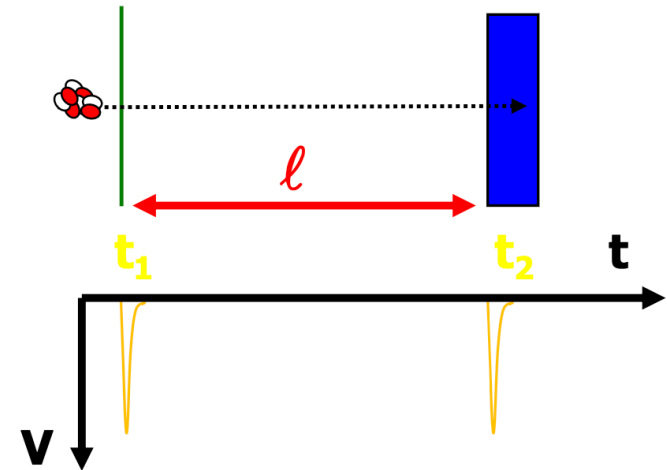
Rise time measurement with two CFD with different fractions: **30%** and **90%**

time difference $t_{90\%}-t_{30\%}$ is prop. to signal **rise time**

IDENTIFICAZIONE IN MASSA



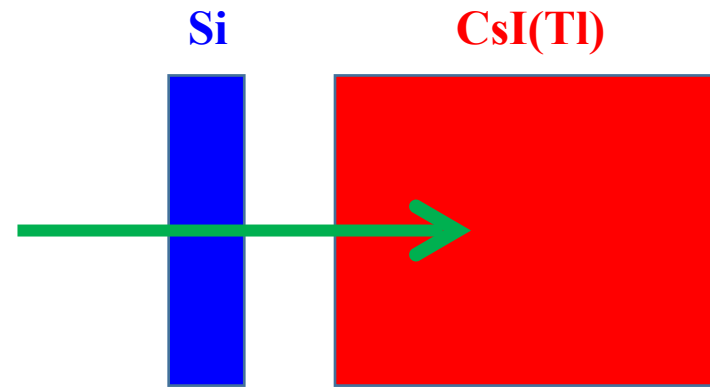
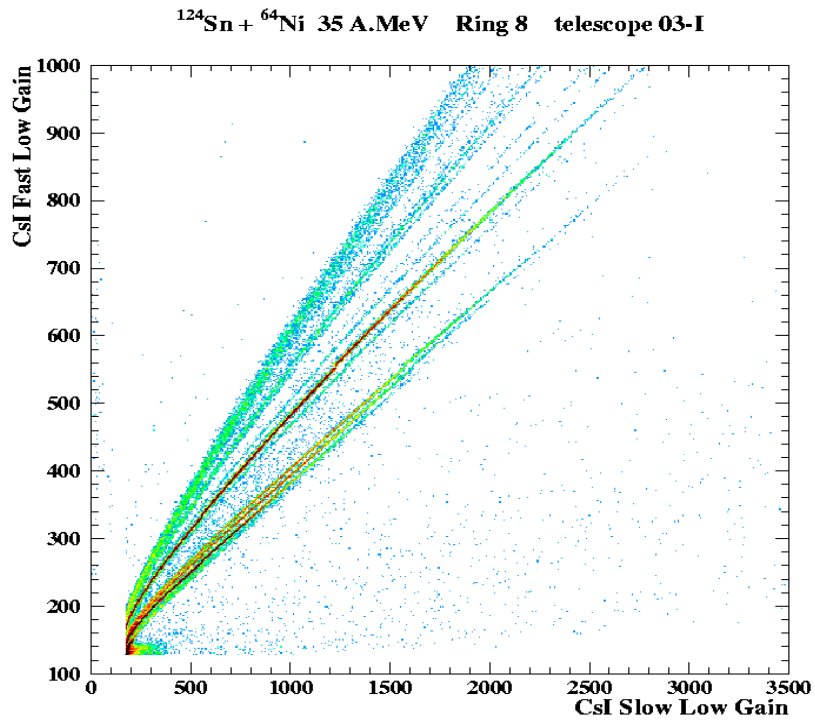
E - TOF



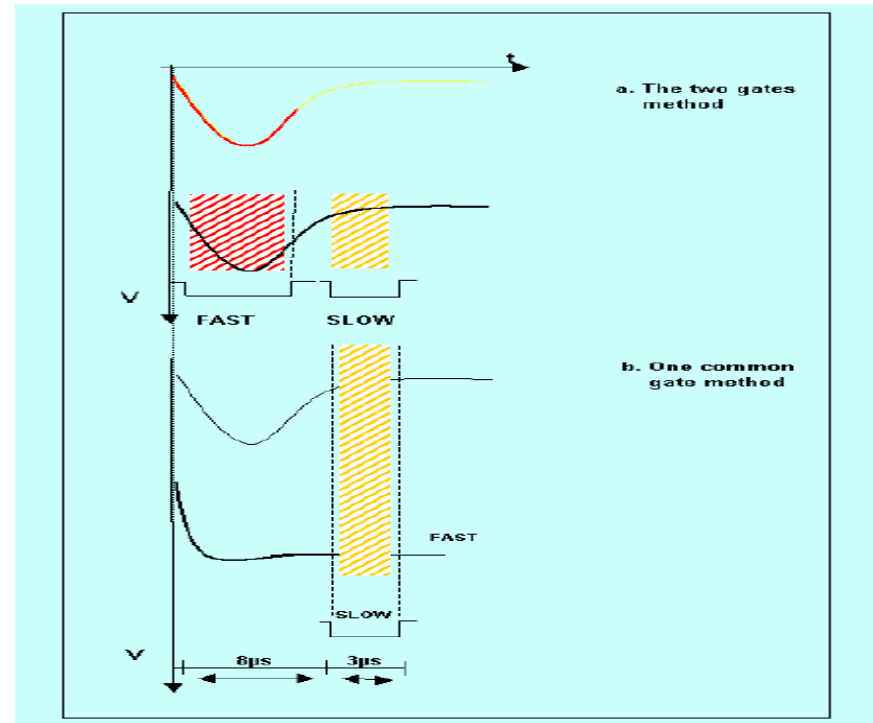
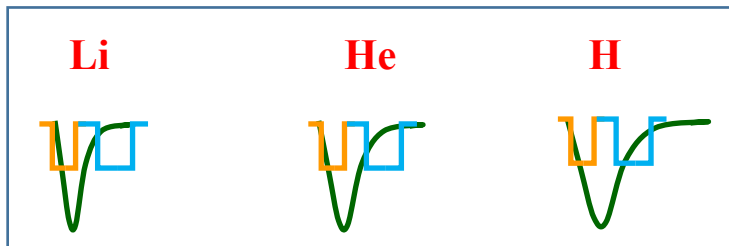
$$E = \frac{1}{2} MV^2 = \frac{1}{2} M \frac{l^2}{(t_2 - t_1)^2}$$

$$M = \frac{2}{l^2} \cdot E(t_2 - t_1)^2$$

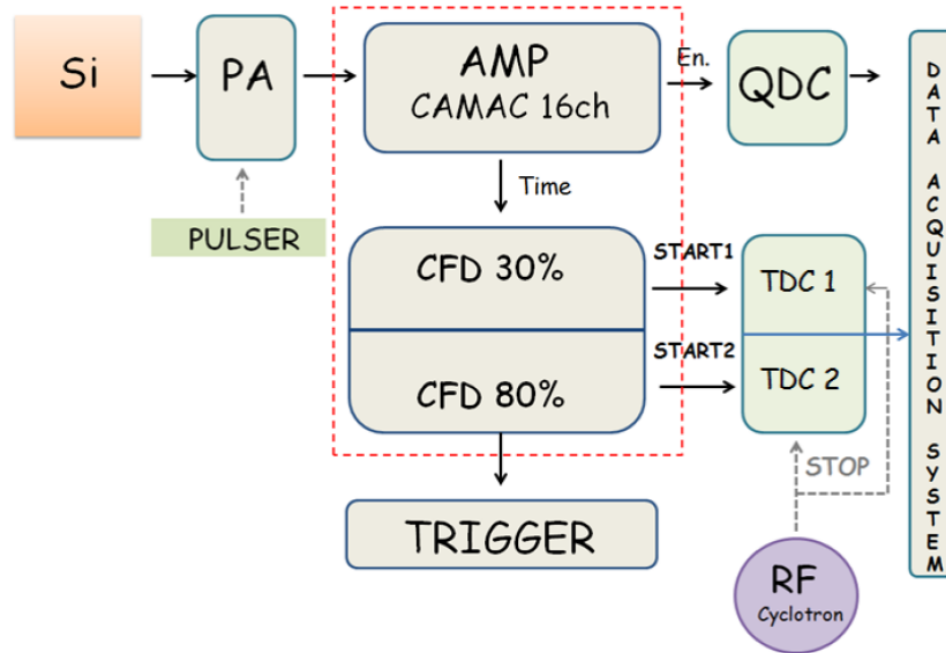
IDENTIFICAZIONE LCP (A,Z)



E Fast- E Slow
PSD CsI(Tl)



Catene elettroniche (front-end)

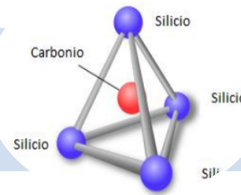


Trigger mainly based on
Silicon multiplicity
with geometry
modularity

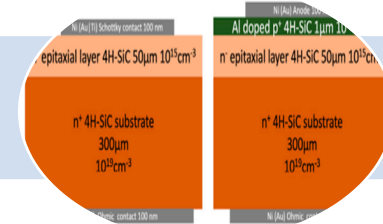
Rivelatori innovativi al SiC

Materiale composto da 50 % di Si e 50 % di C, rarissimo in natura si trova solo in piccolissime quantità in alcuni tipi di meteorite e all'interno di depositi di corindone

1893-1905

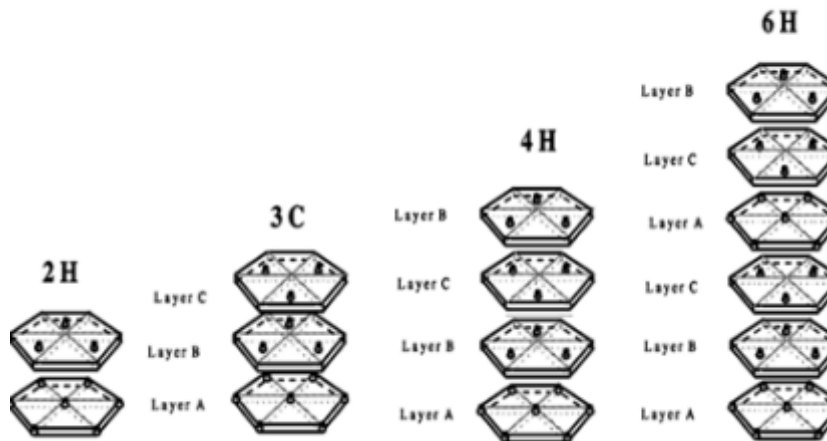


1990s miglioramento delle tecniche di produzione



1960s studio del materiale come rivelatore

Il SiC cristallizza in strutture che pur mantenendo la stessa composizione chimica differiscono nell'ordine di impilamento dei tetraedri di Si e C

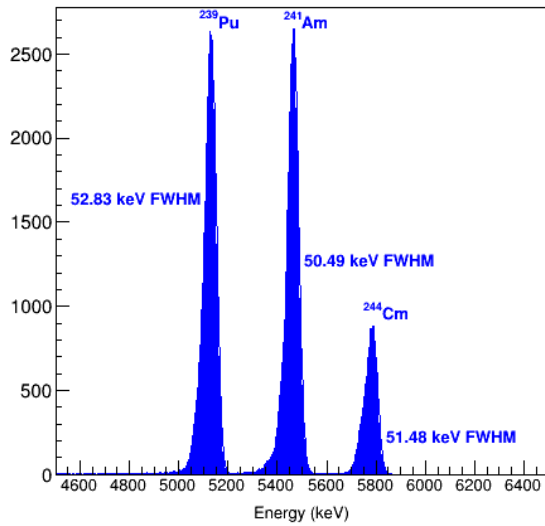
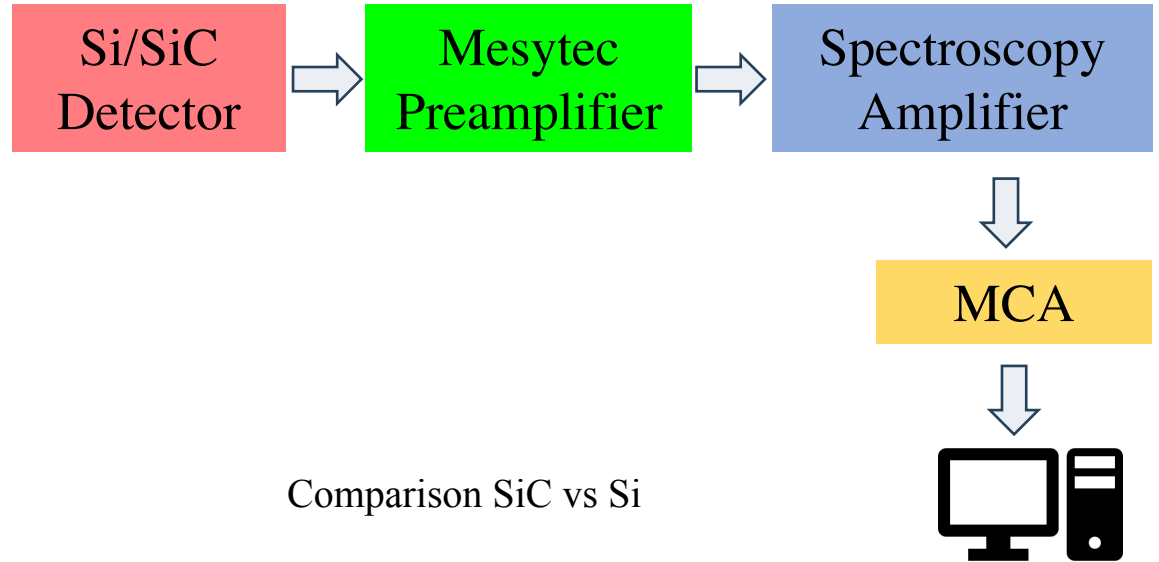
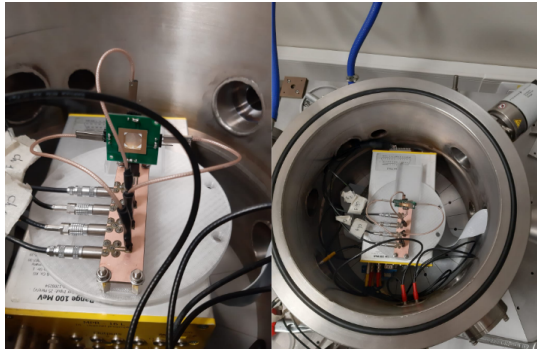


Properties	D	Si	4H-SiC
Bandgap (eV)	5.5	1.12	3.27
Relative dielectric constant	5.7	11.9	9.7
Breakdown field (MV cm ⁻¹)	10	0.3	3.0
Density (g cm ⁻³)	3.5	2.3	3.2
Atomic Number Z	6	14	14-6
e-h creation energy (eV)	13	3.6	7.78
Saturated electron velocity (10 ⁷ cm s ⁻¹) at 300K	2.2	1.0	2
Electron mobility (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹) at 300K	1800	1300	800
Hole mobility (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹) at 300K	1200	460	115
Threshold displacement energy (eV)	40-50	13-20	22-35
Minimum ionizing energy loss (MeV cm ⁻¹)	4.7	2.7	4.4

S. Tudisco et al., Sensors 2018, 18, 2289; doi:10.3390/s18072289

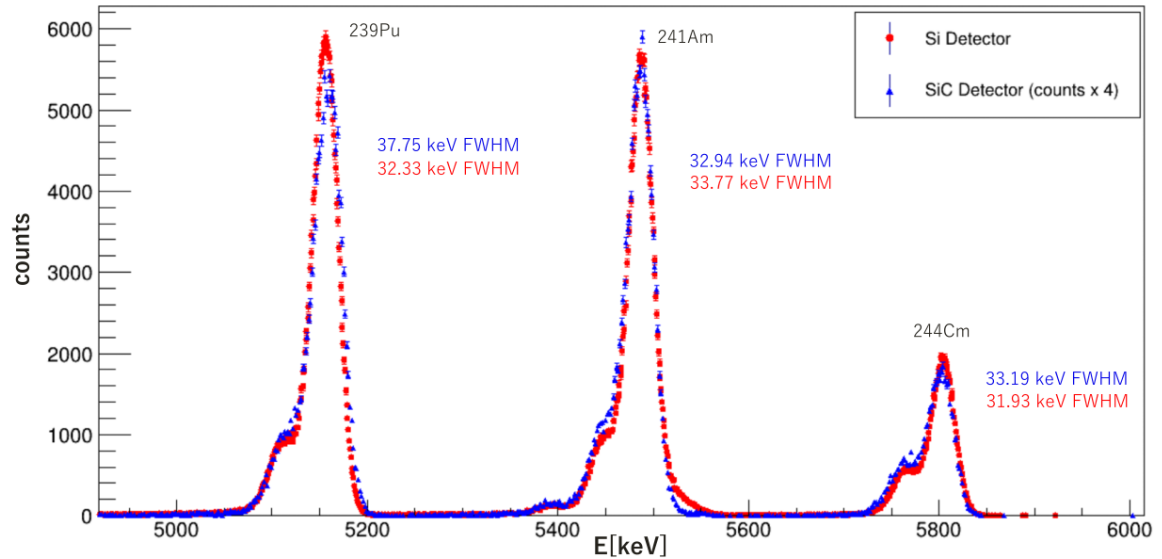
Il suo sviluppo in fisica nucleare come rivelatore è legato alla sua robustezza contro al danno di radiazione

In particolare può essere usato per misurare direttamente un fascio di particelle o per scopi di ricerca o di fisica applicata (fisica medica)



Spettro energetico ottenuto con una sorgente mixed α ²³⁹Pu, ²⁴¹Am, ²⁴⁴Cm

Comparison SiC vs Si



THE END