

Simulazioni Monte Carlo dello spettrometro magnetico MAGNEX per la rivelazione di ioni pesanti ad alto rate per il progetto NUMEN

G. A. Brischetto, L. Pandola, F. Cappuzzello,
M. Cavallaro, C. Agodi
per la Collaborazione NUMEN



*Dipartimento di Fisica e Astronomia
"Ettore Majorana"*



UNIVERSITÀ
degli STUDI
di CATANIA

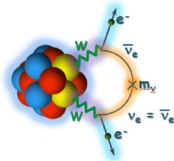


European
Research
Council

106° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica
14 - 18 Settembre 2020

$0\nu\beta\beta$ e Double Charge Exchange

$${}^A_Z X_N \rightarrow {}^A_{Z\pm 2} Y_{N\mp 2} + 2e^\mp$$



Mai osservato!

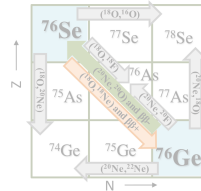
- Oltre il Modello Standard
- Natura del neutrino: **Dirac** o **Majorana**?
- Scala di **massa del neutrino**

$$\left[T_{1/2}^{0\nu}\right]^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 |f(m_i, U_{ei})|^2$$

$$M^{0\nu} = \langle \phi_f | \hat{O}^{0\nu\beta\beta} | \phi_i \rangle$$

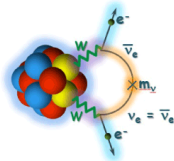
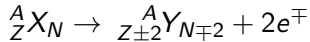
$0\nu\beta\beta$ vs DCE

- Stessa funzione d'onda nucleare
- Operatori con struttura simile



S. Calabrese (invited talk 18 Settembre)
I. Ciraldo (talk n. 763)
A. Spatafora (talk n. 747)

$0\nu\beta\beta$ e Double Charge Exchange



Mai osservato!

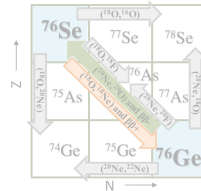
- Oltre il Modello Standard
- Natura del neutrino: **Dirac** o **Majorana**?
- Scala di **massa del neutrino**

$$\left[T_{1/2}^{0\nu} \right]^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 |f(m_i, U_{ei})|^2$$

$$M^{0\nu} = \langle \phi_f | \hat{O}^{0\nu\beta\beta} | \phi_i \rangle$$

$0\nu\beta\beta$ vs DCE

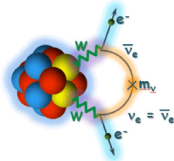
- Stessa funzione d'onda nucleare
- Operatori con struttura simile



S. Calabrese (invited talk 18 Settembre)
I. Ciraldo (talk n. 763)
A. Spatafora (talk n. 747)

$0\nu\beta\beta$ e Double Charge Exchange

$${}^A_Z X_N \rightarrow {}^A_{Z\pm 2} Y_{N\mp 2} + 2e^\mp$$



Mai osservato!

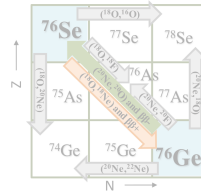
- Oltre il Modello Standard
- Natura del neutrino: **Dirac** o **Majorana**?
- Scala di **massa del neutrino**

$$\left[T_{1/2}^{0\nu}\right]^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 |f(m_i, U_{ei})|^2$$

$$M^{0\nu} = \langle \phi_f | \hat{O}^{0\nu\beta\beta} | \phi_i \rangle$$

$0\nu\beta\beta$ vs DCE

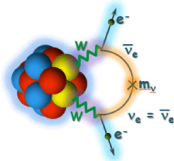
- Stessa funzione d'onda nucleare
- Operatori con struttura simile



S. Calabrese (invited talk 18 Settembre)
I. Ciraldo (talk n. 763)
A. Spatafora (talk n. 747)

$0\nu\beta\beta$ e Double Charge Exchange

$${}^A_Z X_N \rightarrow {}^A_{Z\pm 2} Y_{N\mp 2} + 2e^\mp$$



Mai osservato!

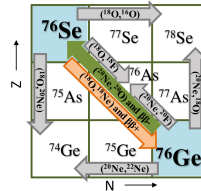
- Oltre il Modello Standard
- Natura del neutrino: **Dirac** o **Majorana**?
- Scala di **massa del neutrino**

$$\left[T_{1/2}^{0\nu}\right]^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 |f(m_i, U_{ei})|^2$$

$$M^{0\nu} = \langle \phi_f | \hat{O}^{0\nu\beta\beta} | \phi_i \rangle$$

$0\nu\beta\beta$ vs DCE

- Stessa funzione d'onda nucleare
- Operatori con struttura simile



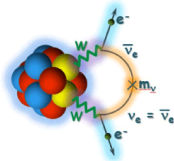
S. Calabrese (invited talk 18 Settembre)

I. Ciraldo (talk n. 763)

A. Spatafora (talk n. 747)

$0\nu\beta\beta$ e Double Charge Exchange

$${}^A_Z X_N \rightarrow {}^A_{Z\pm 2} Y_{N\mp 2} + 2e^\mp$$



Mai osservato!

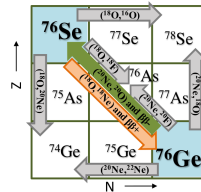
- Oltre il Modello Standard
- Natura del neutrino: **Dirac** o **Majorana**?
- Scala di **massa del neutrino**

$$\left[T_{1/2}^{0\nu} \right]^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 |f(m_i, U_{ei})|^2$$

$$M^{0\nu} = \langle \phi_f | \hat{O}^{0\nu\beta\beta} | \phi_i \rangle$$

$0\nu\beta\beta$ vs DCE

- Stessa funzione d'onda nucleare
- Operatori con struttura simile

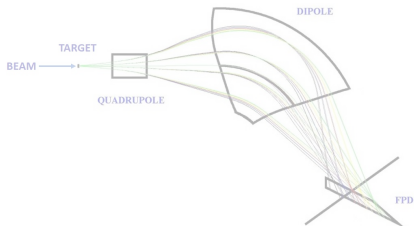


S. Calabrese (invited talk 18 Settembre)
I. Cirialdo (talk n. 763)
A. Spatafora (talk n. 747)

Il futuro FPD

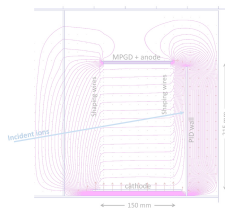
- **Sezione d'urto** tipica DCE ~ 10 nb
- Sono necessari **fasci ad alta intensità**
- **Upgrade** di MAGNEX
 - Camera di scattering **Sartirana** (talk n. 795)
 - Focal Plane Detector

Schema di MAGNEX



Il futuro FPD:

- Nuovo tracciatore a gas



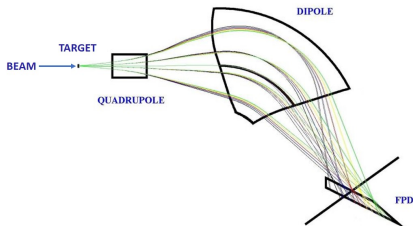
- Muro di telescopi SiC-CsI



Il futuro FPD

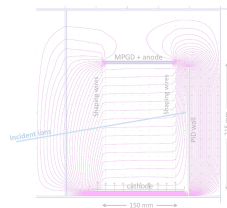
- **Sezione d'urto** tipica DCE ~ 10 nb
- Sono necessari **fasci ad alta intensità**
- **Upgrade** di MAGNEX
 - Camera di scattering **Sartirana** (talk n. 795)
 - Focal Plane Detector

Schema di MAGNEX

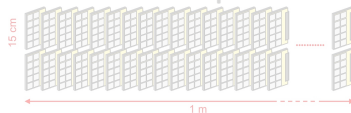


Il futuro FPD:

- **Nuovo tracciatore a gas**



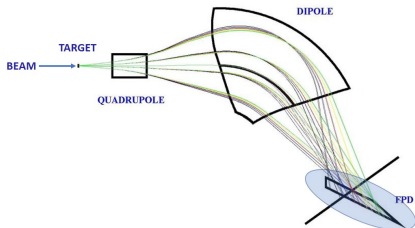
- **Muro di telescopi SiC-CsI**



Il futuro FPD

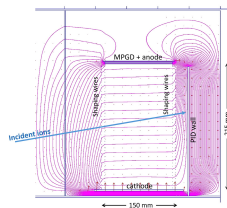
- **Sezione d'urto** tipica DCE ~ 10 nb
- Sono necessari **fasci ad alta intensità**
- **Upgrade** di MAGNEX
 - Camera di scattering **Sartirana** (talk n. 795)
 - Focal Plane Detector

Schema di MAGNEX

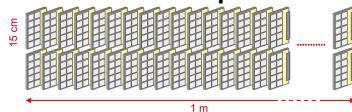


Il futuro FPD:

- **Nuovo tracciatore a gas**



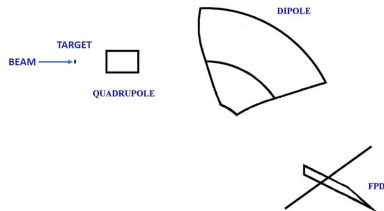
- **Muro di telescopi SiC-CsI**



Il tool di simulazioni

Il tool di simulazioni è costituito da **due parti** **interconnesse**:

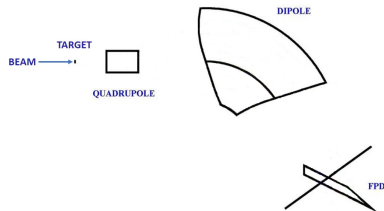
- Il software **COSY-INFINITY**
 - Cinematica della reazione
 - Moto degli eiettili in MAGNEX
- Un'applicazione specifica di **Geant4**
 - Simulazione muro telescopi SiC-Csl
 - Interazione eiettili-telescopi



Il tool di simulazioni

Il tool di simulazioni è costituito da **due parti interconnesse**:

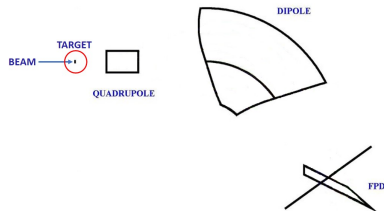
- Il software **COSY-INFINITY**
 - Cinematica della reazione
 - Moto degli eiettili in MAGNEX
- Un'applicazione specifica di **Geant4**
 - Simulazione muro telescopi SiC-Csl
 - Interazione eiettili-telescopi



Il tool di simulazioni

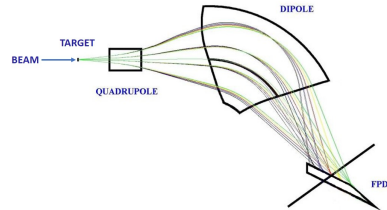
Il tool di simulazioni è costituito da **due parti** **interconnesse**:

- Il software **COSY-INFINITY**
 - Cinematica della reazione
 - Moto degli eiettili in MAGNEX
- Un'applicazione specifica di **Geant4**
 - Simulazione muro telescopi SiC-Csl
 - Interazione eiettili-telescopi



Il tool di simulazioni è costituito da **due parti interconnesse**:

- Il software **COSY-INFINITY**
 - Cinematica della reazione
 - Moto degli eiettili in MAGNEX
- Un'applicazione specifica di **Geant4**
 - Simulazione muro telescopi SiC-Csl
 - Interazione eiettili-telescopi



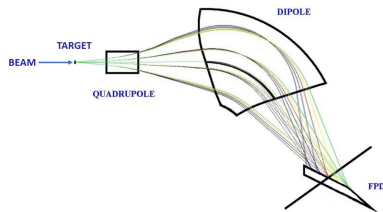
Il tool di simulazioni è costituito da **due parti interconnesse**:

- Il software **COSY-INFINITY**
 - Cinematica della reazione
 - Moto degli eiettili in MAGNEX

Output: Osservabili rilevanti

$(x_{foc}, y_{foc}, \theta_{foc}, \phi_{foc}, E, \dots)$ all'ingresso del FPD.

Output di COSY-INFINITY preso in **input** da Geant4.



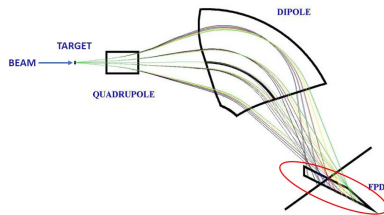
Il tool di simulazioni è costituito da **due parti interconnesse**:

- Il software **COSY-INFINITY**
 - Cinematica della reazione
 - Moto degli eiettili in MAGNEX

Output: Osservabili rilevanti

$(x_{foc}, y_{foc}, \theta_{foc}, \phi_{foc}, E, \dots)$ all'ingresso del FPD.

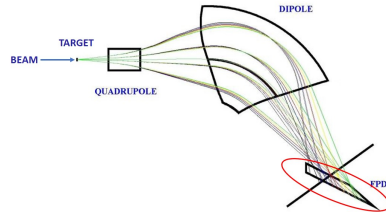
Output di COSY-INFINITY preso in **input** da Geant4.



- Un'applicazione specifica di **Geant4**
 - Simulazione muro telescopi SiC-Csl
 - Interazione eiettili-telescopi

Il tool di simulazioni è costituito da **due parti interconnesse**:

- Output di COSY-INFINITY preso in **input** da Geant4.



- ◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡

L'applicazione Geant4

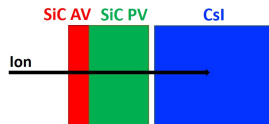
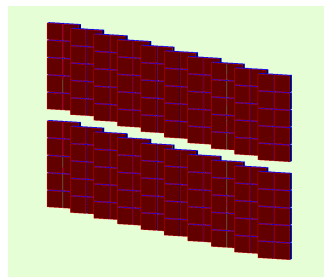
Materiali

- Tre parti per ciascun telescopio:
 - **SiC Volume Attivo (SiC AV)**
 - **SiC Volume Passivato (SiC PV)**
 - **CsI cristallo (CsI)**

Geometria

- Tre condizioni di granularità:
 - $1 \times 1 \text{ cm}^2$
 - $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$
 - $2 \times 2 \text{ cm}^2$
- Spessori:
 - **SiC AV** = $100 \text{ } \mu\text{m}$
 - **SiC PV** = $350 \text{ } \mu\text{m}$
 - **CsI** = 1 cm

Vista del muro di telescopi (Geant4)



Sezione trasversa del telescopio - Non in scala!

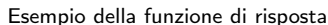
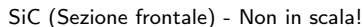
I dati simulati sono processati da una **macro specifica di ROOT**:

I dati simulati sono processati da una **macro specifica di ROOT**:

- Gli spettri energetici sono **ricostruiti** secondo la **risoluzione energetica** tipica dei rivelatori:
 - **SiC**: 0.8% FWHM @ 25.3 MeV
 - **Csl**: 2% FWHM @ 700 MeV
- Sono introdotti gli **effetti di raccolta di carica incompleta** nel rivelatore al SiC

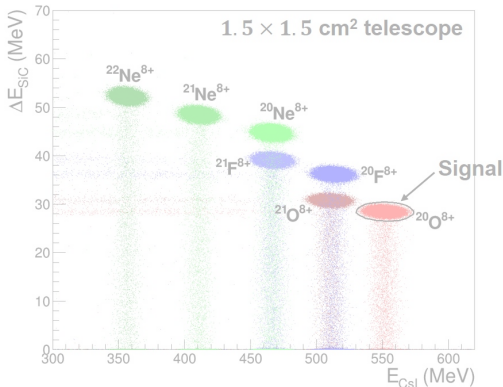
I dati simulati sono processati da una **macro specifica di ROOT**:

- Gli spettri energetici sono **ricostruiti** secondo la **risoluzione energetica** tipica dei rivelatori:
 - **SiC**: 0.8% FWHM @ 25.3 MeV
 - **Csl**: 2% FWHM @ 700 MeV
- Sono introdotti gli **effetti di raccolta di carica incompleta** nel rivelatore al SiC

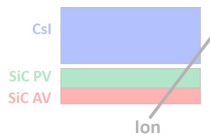


Risultati

Reazione: $^{20}\text{Ne} + ^{76}\text{Ge} @ 35 \text{ AMeV} \rightarrow ^{20}\text{O}$ è il **segnale**

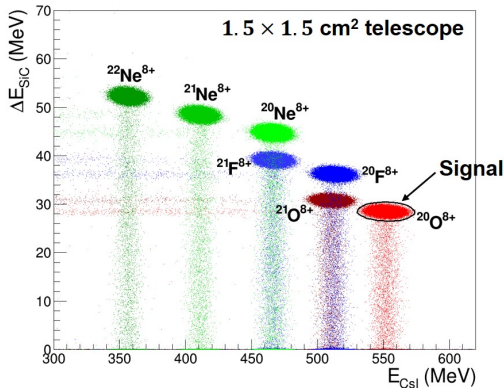


- Buona separazione in Z e in A
- Nebbia sotto i luoghi degli ioni dovuta a **effetti di raccolta di carica incompleta**
- Nebbia a sinistra dei luoghi degli ioni dovuta a ioni che **escono fuori dal CsI**

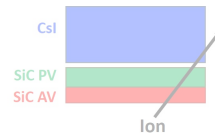


Risultati

Reazione: $^{20}\text{Ne} + ^{76}\text{Ge} @ 35 \text{ AMeV} \rightarrow ^{20}\text{O}$ è il **segnale**

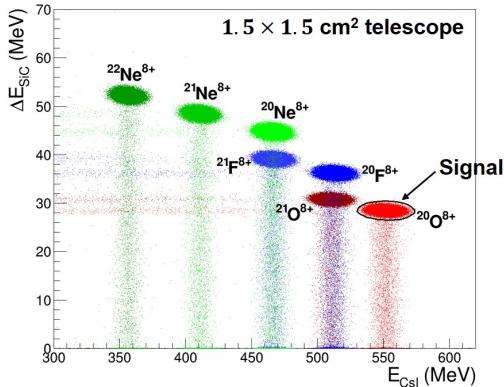


- Buona separazione in **Z** e in **A**
- Nebbia sotto i luoghi degli ioni dovuta a effetti di raccolta di carica incompleta
- Nebbia a sinistra dei luoghi degli ioni dovuta a ioni che escono fuori dal CsI

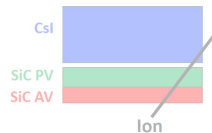


Risultati

Reazione: $^{20}\text{Ne} + ^{76}\text{Ge} @ 35 \text{ AMeV} \rightarrow ^{20}\text{O}$ è il **segnale**

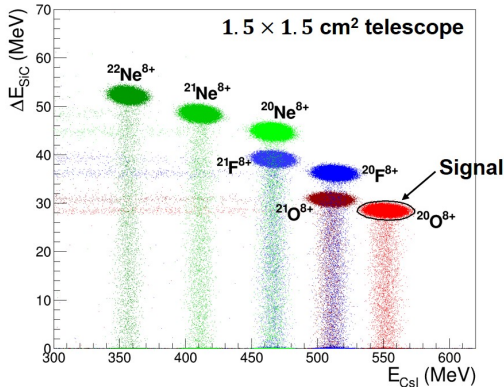


- Buona separazione in **Z** e in **A**
- Nebbia **sotto** i luoghi degli ioni dovuta a **effetti di raccolta di carica incompleta**
- Nebbia a **sinistra** dei luoghi degli ioni dovuta a ioni che **escono fuori dal CsI**

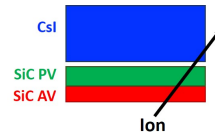


Risultati

Reazione: $^{20}\text{Ne} + ^{76}\text{Ge} @ 35 \text{ AMeV} \rightarrow ^{20}\text{O}$ è il **segnale**



- Buona separazione in **Z** e in **A**
- Nebbia **sotto** i luoghi degli ioni dovuta a **effetti di raccolta di carica incompleta**
- Nebbia a **sinistra** dei luoghi degli ioni dovuta a ioni che **escono fuori** dal CsI



I dati sulla contaminazione sono stati **riscalati** secondo la sezione d'urto del **rispettivo meccanismo di produzione dello ione**

Calcolo della contaminazione

I dati sulla contaminazione sono stati **riscaldati** secondo la sezione d'urto del **rispettivo meccanismo di produzione dello ione**

Reazione	Ione	Sez. d'urto norm. a DCE	Eventi nella ROI norm. a 1 evento di DCE
DCE	$^{20}\text{O}^{8+}$	1	0.904 ± 0.002
SCE	$^{20}\text{F}^{8+}$	10^4	$\sim 3 \cdot 10^{-5}$
1-neutron	$^{21}\text{Ne}^{8+}$	$3 \cdot 10^4$	$< 10^{-7}$ 90% CL
2-neutron	$^{22}\text{Ne}^{8+}$	10^2	$< 10^{-9}$ 90% CL
inelastic	$^{20}\text{Ne}^{8+}$	10^4	$< 10^{-8}$ 90% CL

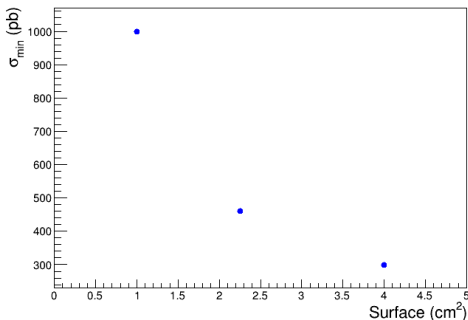
Calcolo della contaminazione

I dati sulla contaminazione sono stati **riscalati** secondo la sezione d'urto del **rispettivo meccanismo di produzione dello ione**

Reazione	Ione	Sez. d'urto norm. a DCE	Eventi nella ROI norm. a 1 evento di DCE
DCE	$^{20}\text{O}^{8+}$	1	0.904 ± 0.002
SCE	$^{20}\text{F}^{8+}$	10^4	$\sim 3 \cdot 10^{-5}$
1-neutron	$^{21}\text{Ne}^{8+}$	$3 \cdot 10^4$	$< 10^{-7}$ 90% CL
2-neutron	$^{22}\text{Ne}^{8+}$	10^2	$< 10^{-9}$ 90% CL
inelastic	$^{20}\text{Ne}^{8+}$	10^4	$< 10^{-8}$ 90% CL

- Contributo del fondo $\sim 3 \times 10^{-5}$ rispetto al segnale
- Maggiore contributo da $^{20}\text{F}^{8+}$
- $S/B > 10^4$
- Sensibilità a $5\sigma > 460$ pb

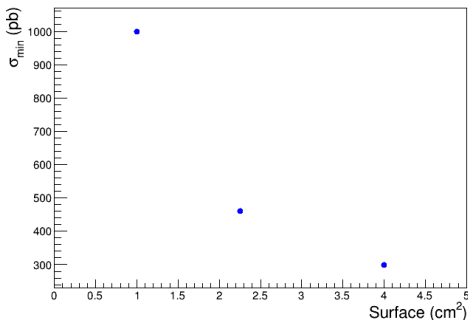
Ottimizzazione della granularità



- Aumentando la superficie del rivelatore, la sensibilità migliora
- Dal punto di vista della PID, la condizione ottimale di granularità è $2 \times 2 \text{ cm}^2$, ma altri aspetti devono essere considerati:
 - Pile-up
 - Costi
 - Complessità di fabbricazione

I telescopi da $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ sono il migliore compromesso

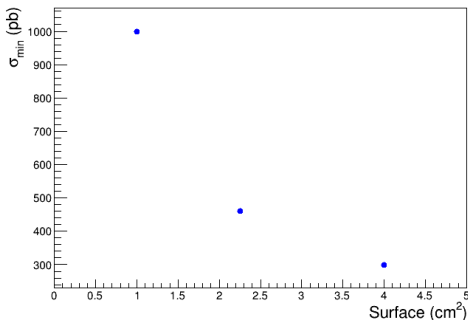
Ottimizzazione della granularità



- Aumentando la superficie del rivelatore, la sensibilità migliora
- Dal punto di vista della PID, la condizione ottimale di granularità è $2 \times 2 \text{ cm}^2$, ma altri aspetti devono essere considerati:
 - Pile-up
 - Costi
 - Complessità di fabbricazione

I telescopi da $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ sono il migliore compromesso

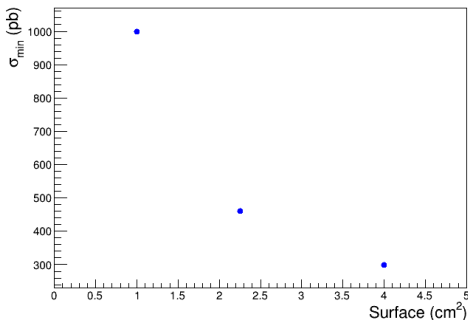
Ottimizzazione della granularità



- Aumentando la superficie del rivelatore, la sensibilità migliora
- Dal punto di vista della PID, la condizione ottimale di granularità è $2 \times 2 \text{ cm}^2$, ma altri aspetti devono essere considerati:
 - Pile-up
 - Costi
 - Complessità di fabbricazione

I telescopi da $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ sono il migliore compromesso

Ottimizzazione della granularità



- Aumentando la superficie del rivelatore, la sensibilità migliora
- Dal punto di vista della PID, la condizione ottimale di granularità è $2 \times 2 \text{ cm}^2$, ma altri aspetti devono essere considerati:
 - Pile-up
 - Costi
 - Complessità di fabbricazione

I telescopi da $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ sono il **migliore compromesso**

Conclusioni

- Un **tool di simulazioni** capace di descrivere in modo completo la cinematica di reazione, il moto degli eiettili attraverso MAGNEX e la loro interazione con il muro di telescopi SiC-Csl è stato **sviluppato e implementato** per la prima volta
- La tecnologia SiC-Csl è capace di separare efficacemente gli ioni in Z e in A e garantisce una **sensibilità sufficiente per la rivelazione del DCE**
- I telescopi da $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ rappresentano il **migliore compromesso** fra diverse esigenze (PID, pile-up, costi, complessità di fabbricazione, ...)

Grazie per l'attenzione