

# Dal decadimento del muone alla massa del neutrino

M. De Gerone

Seminario INFN  
24 maggio 2017

# Introduzione

---

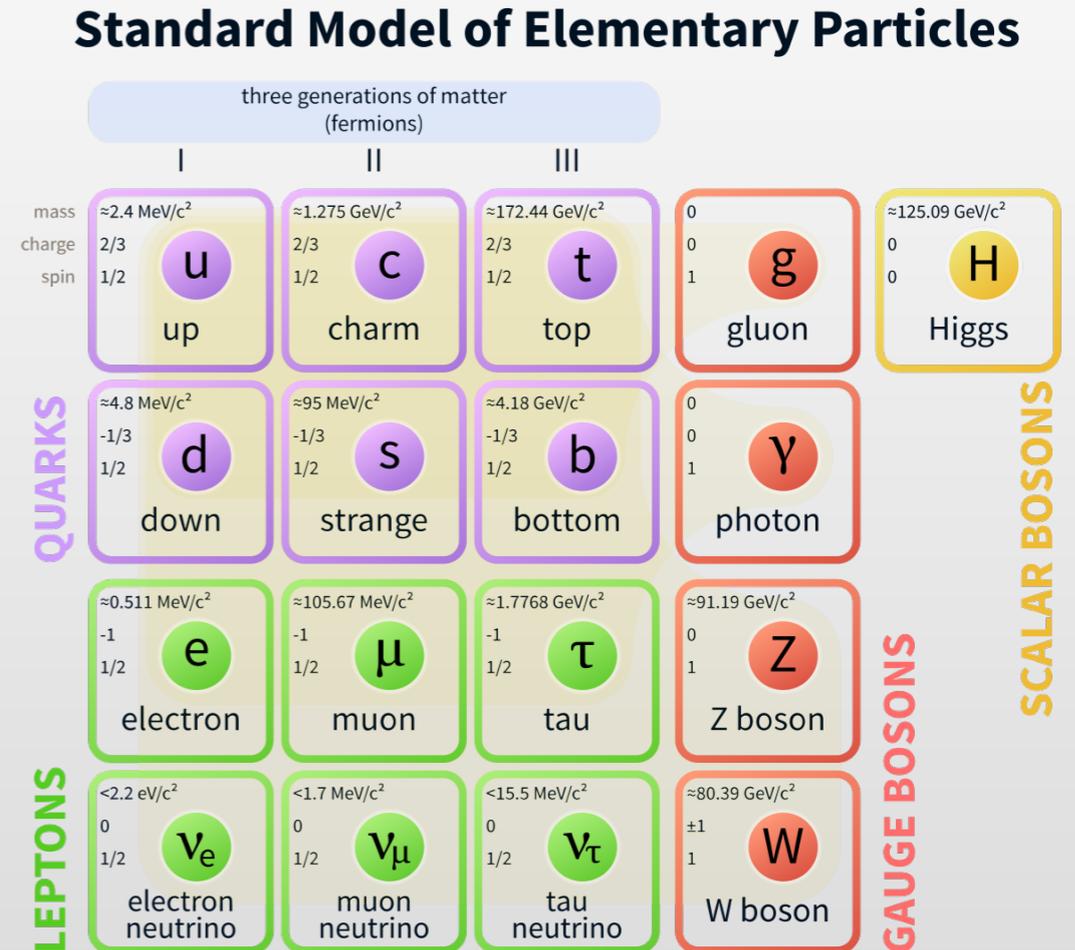
- Due misure di alta precisione:
  - decadimento raro del muone  $\mu \rightarrow e\gamma$
  - misura diretta di massa del neutrino
- (poche) motivazioni teoriche
- Setup e metodo sperimentale
- Risultati ottenuti
- Prossime attività

# Il Modello Standard

L'attuale comprensione della fisica delle particelle è racchiusa nel Modello Standard, ovvero una particolare formulazione matematica che descrive perfettamente la **maggior parte** dei fenomeni subatomici.

Gli ingredienti del MS sono le particelle elementari (quark e leptoni) e le forze fondamentali (bosoni di gauge).

Il MS descrive con estrema precisione una quantità di fenomeni del mondo subatomico, e con la scoperta del bosone di Higgs anche l'ultimo tassello mancante si è aggiunto a completare il quadro...quindi? Cosa altro manca?



# Oltre il modello standard

---

Nonostante i suoi numerosi successi, il MS viene considerato una teoria “incompleta”. Infatti:

- non include l'interazione gravitazionale
- non spiega lo spettro delle masse delle particelle
- include un certo numero di parametri arbitrari
- non contiene nessuno dei candidati dark matter

e molto altro ancora...

In generale quindi ci si aspetta che esista **una teoria più generale che contenga al suo interno il MS** come teoria efficace.

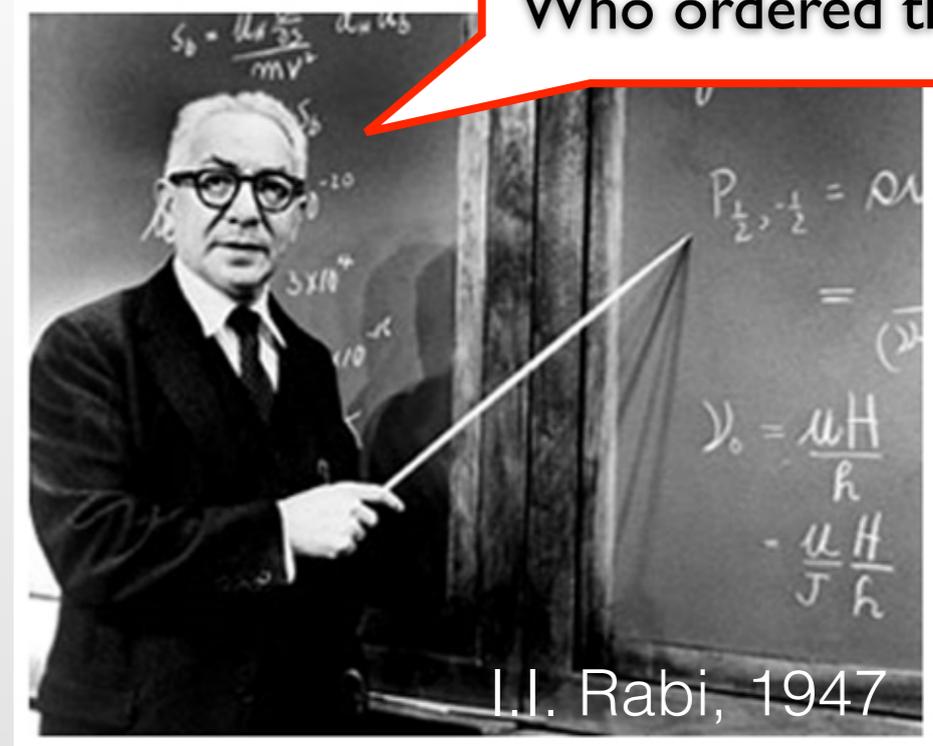
Senza entrare nel dettaglio delle teorie che sono state proposte, quello che è importante considerare è che nuove teorie predicono nuovi decadimenti...

Fra questi, il canale  $\mu \rightarrow e\gamma$  riveste un ruolo particolarmente importante.

# Perche' il $\mu$ ?

Il  $\mu$  è stata una delle prime particelle ad essere studiata: fu scoperta nei raggi cosmici nel 1937, e venne identificata come un leptone 10 anni più tardi (Conversi, Pancini, Piccioni).

Lo studio del  $\mu$  è stato fondamentale per lo sviluppo del MS. Ad esempio, e' stata la non osservazione del decadimento  $\mu \rightarrow e\gamma$  che ha portato all'introduzione dell'esistenza di più famiglie leptoniche.



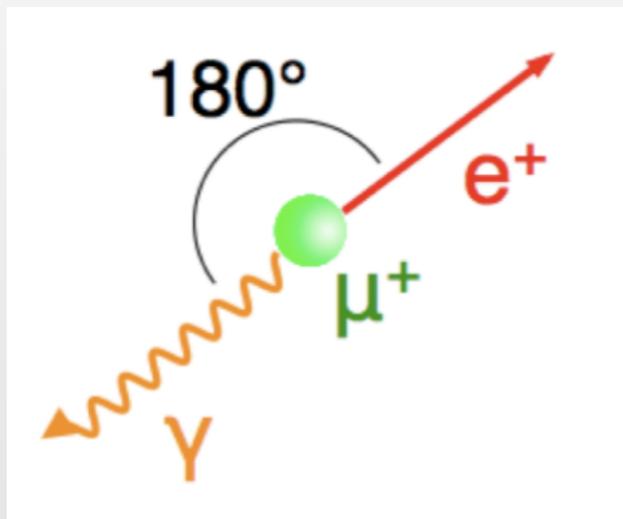
In generale, il  $\mu$  e' una particella semplice da creare (massa piccola) anche in fasci piuttosto intensi. Nel MS, il decadimento del  $\mu$  avviene secondo il canale  $\mu \rightarrow e\nu_e\nu_\mu$  (decadimento di Michel), mentre  $\mu \rightarrow e\gamma$  è soppresso (ovvero, ha una possibilità di avvenire infinitesima, stimata in  $\sim 10^{-50}$ ). Viceversa, in molte teorie oltre il MS questo decadimento è previsto con probabilità molto piccole ( $< 10^{-13}$ ) ma misurabili.

Diciamo che il  $\mu \rightarrow e\gamma$  e' un canale senza background proveniente da MS: **vedere il  $\mu \rightarrow e\gamma$  significa vedere nuova fisica.**

Inoltre è un decadimento "semplice", con uno stato finale ben definito.

# MEG: segnale e fondo

## Segnale



stato finale a 2 corpi

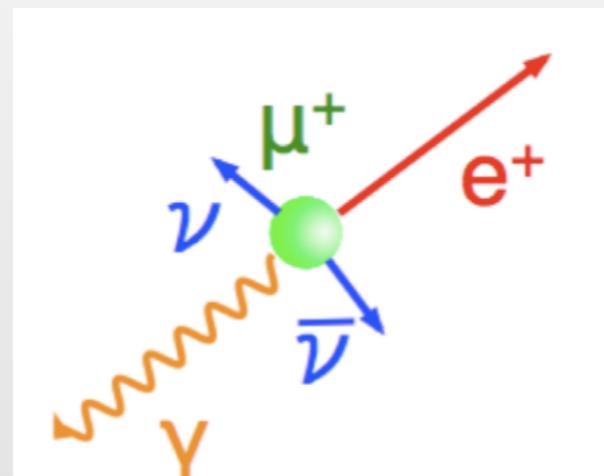
$$E_\gamma = E_e = \frac{m_\mu}{2} = 52.8 \text{ MeV}$$

$$\Delta t_{e\gamma} = 0$$

$$\theta_{e\gamma} = \phi_{e\gamma} = 180^\circ$$

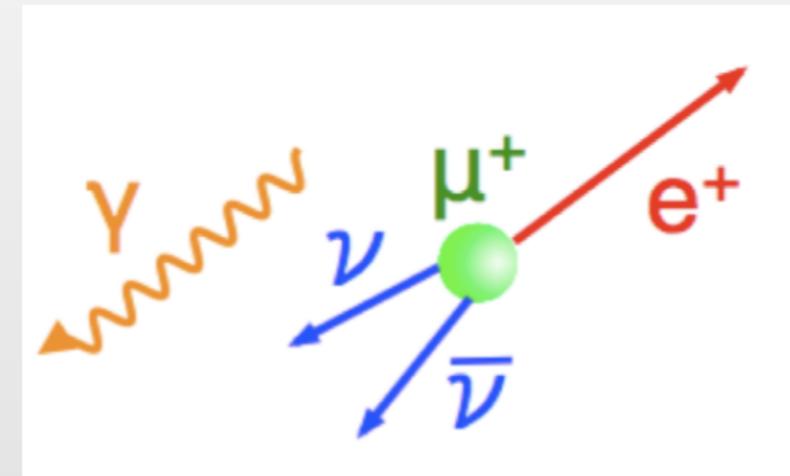
## Background

### Correlato



decadimento radiativo  
del  $\mu$

### Accidentale



Michel +  
 $\gamma$  da altri processi

$$R_{rad} \simeq R_\mu \times BR(\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu}\gamma)$$

$$R_{acc} \simeq R_\mu^2 \sigma^2(E_\gamma) \sigma^2(\Omega_{e\gamma}) \sigma(t_{e\gamma}) \sigma(E_e)$$

Il fondo accidentale è dominante e determinato dalle risoluzioni del detector.

# Come funziona MEG?

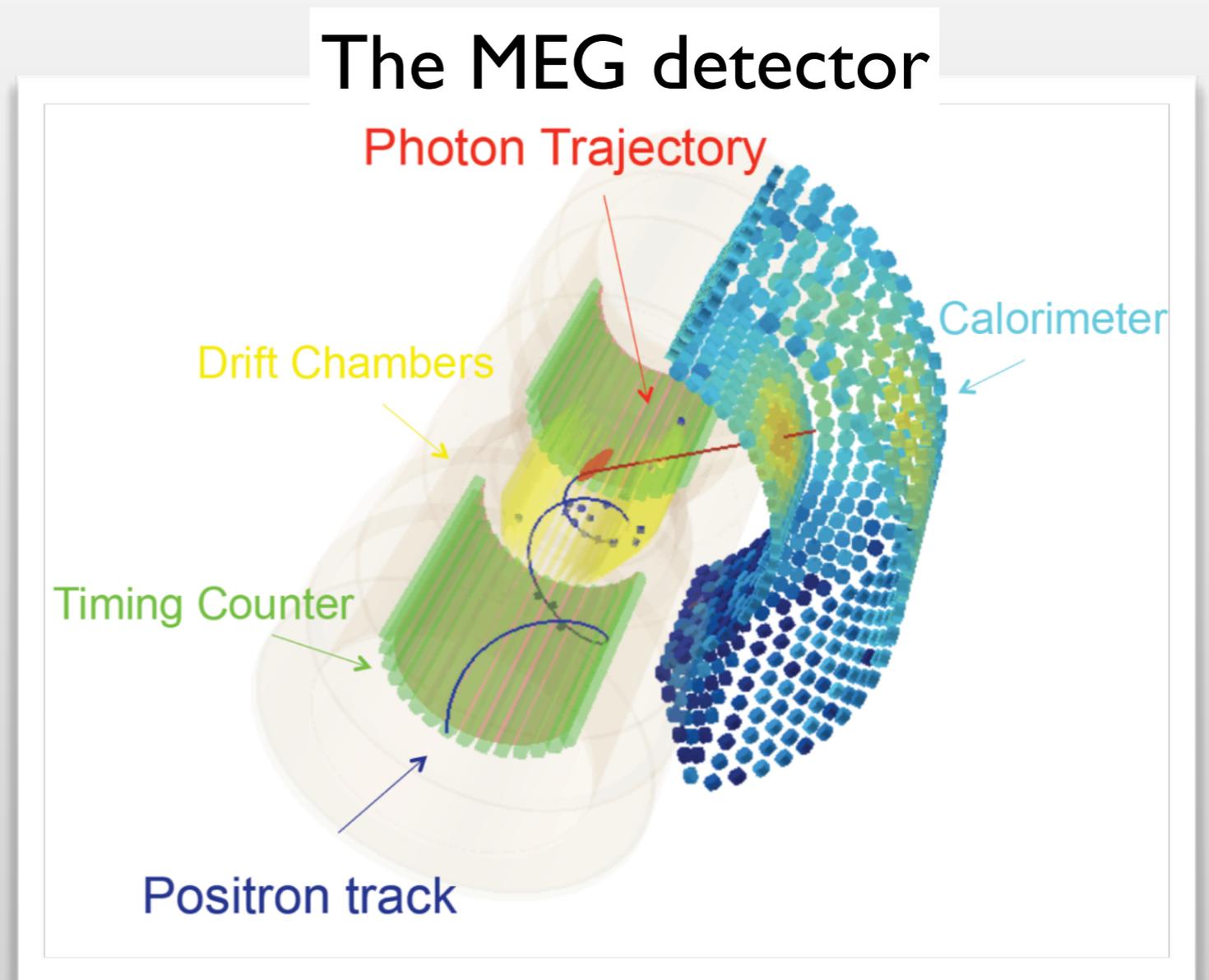
---

Il  $\mu \rightarrow e\gamma$  e' un decadimento estremamente raro (limite prima dei dati di MEG  $< 10^{-11}$ ) sommerso in un fondo il cui contributo e' direttamente proporzionale alle risoluzioni del detector percio' gli ingredienti principali dell'esperimento dovranno essere:

- un fascio di  $\mu$  ad alta intensita' per accumulare la maggiore statistica possibile
- un detector ottimizzato per misurare con la miglior risoluzione possibile le variabili che definiscono l'evento, ovvero:
  - le energie di positrone e fotone
  - le direzioni di positrone e fotone
  - il tempo di emissione delle particelle

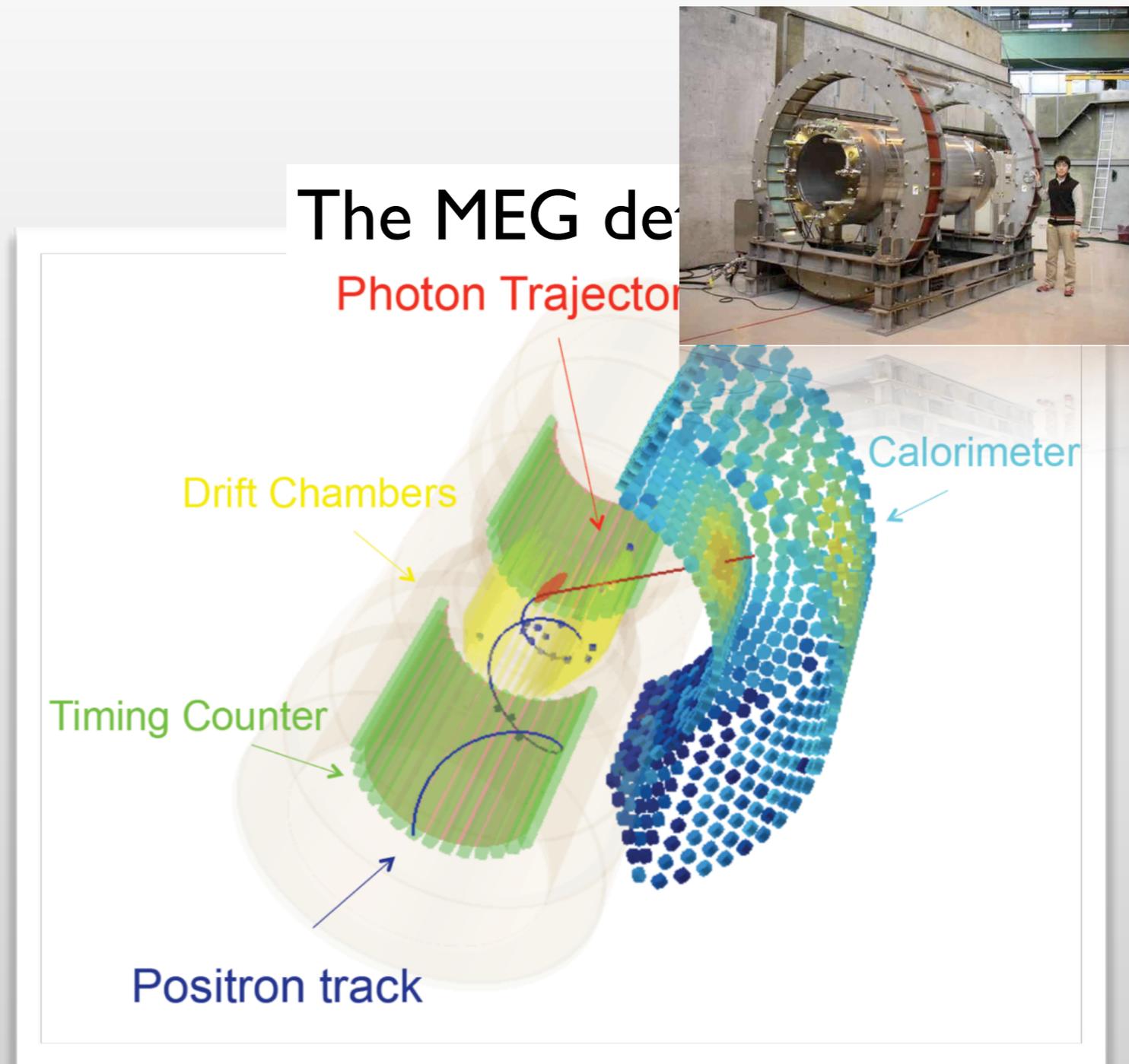
# Il detector di MEG in una slide...

- Utilizza il fascio di  $\mu$  più intenso al mondo  $10^7 \mu/s$  (in DC) che viene indirizzato su un bersaglio sottile posto al centro di un magnete solenoidale



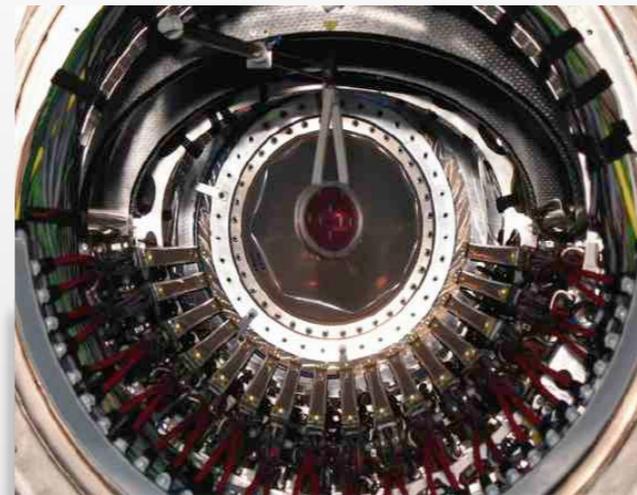
# Il detector di MEG in una slide...

- Utilizza il fascio di  $\mu$  più intenso al mondo  $10^7 \mu/s$  (in DC) che viene indirizzato su un bersaglio sottile posto al centro di un magnete solenoidale



# Il detector di MEG in una slide...

- Utilizza il fascio di  $\mu$  più intenso al mondo  $10^7 \mu/s$  (in DC) che viene indirizzato su un bersaglio sottile posto al centro di un magnete solenoidale
- L'energia del positrone viene misurata da un sistema di camere a deriva poste al centro del magnete, quindi il tempo di arrivo viene misurato dal Timing Counter



# Il detector di MEG in una slide...

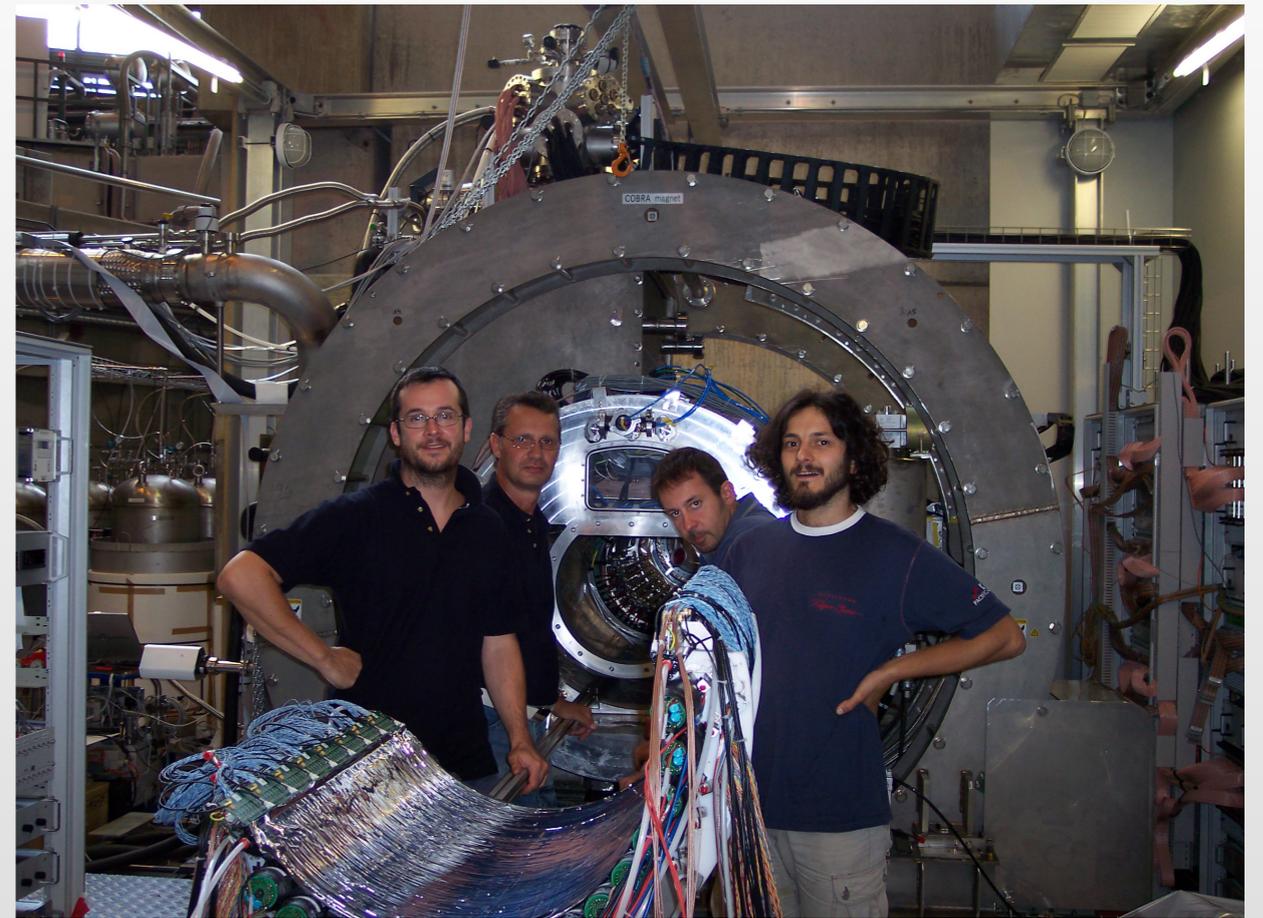
- Utilizza il fascio di  $\mu$  più intenso al mondo  $10^7 \mu/s$  (in DC) che viene indirizzato su un bersaglio sottile posto al centro di un magnete solenoidale
- L'energia del positrone viene misurata da un sistema di camere a deriva poste al centro del magnete, quindi il tempo di arrivo viene misurato dal Timing Counter
- Il fotone (energia, tempo e posizione) viene interamente ricostruito da un calorimetro elettromagnetico posto al di fuori del magnete
- Il trigger per la presa dati viene fornito dai segnali di TC e LXe analizzati online



# MEG @Genova

Il gruppo di Genova è coinvolto in MEG sin dal 2002/2003, quando l'esperimento era in fase di R&D come **responsabile della costruzione e della messa in funzione del Timing Counter.**

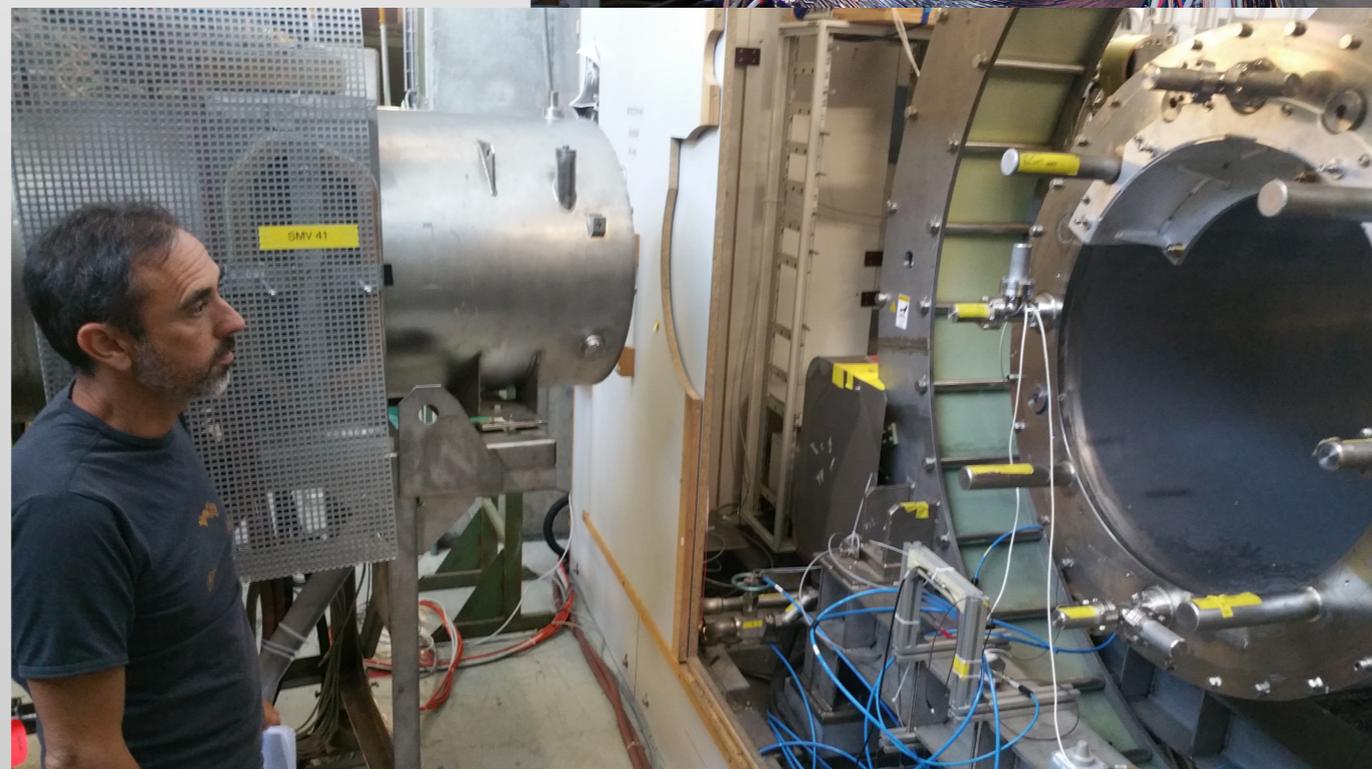
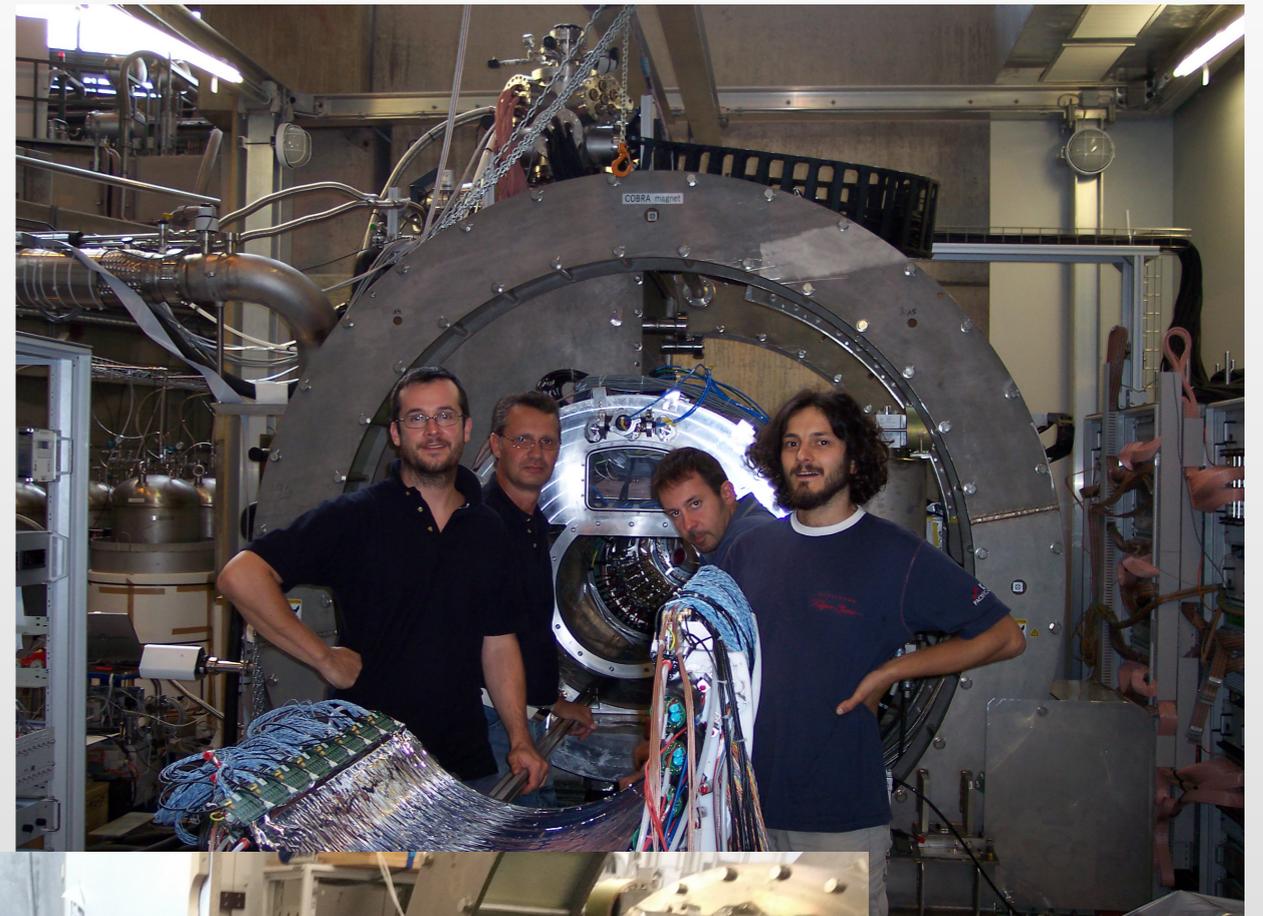
Dopo una prima fase di presa dati nel periodo 2008 / 2013, il rivelatore di MEG è in fase di upgrade. Manteniamo la responsabilita' del TC in collaborazione con Universita' di Tokyo.



# MEG @Genova

Il gruppo di Genova è coinvolto in MEG sin dal 2002/2003, quando l'esperimento era in fase di R&D come **responsabile della costruzione e della messa in funzione del Timing Counter.**

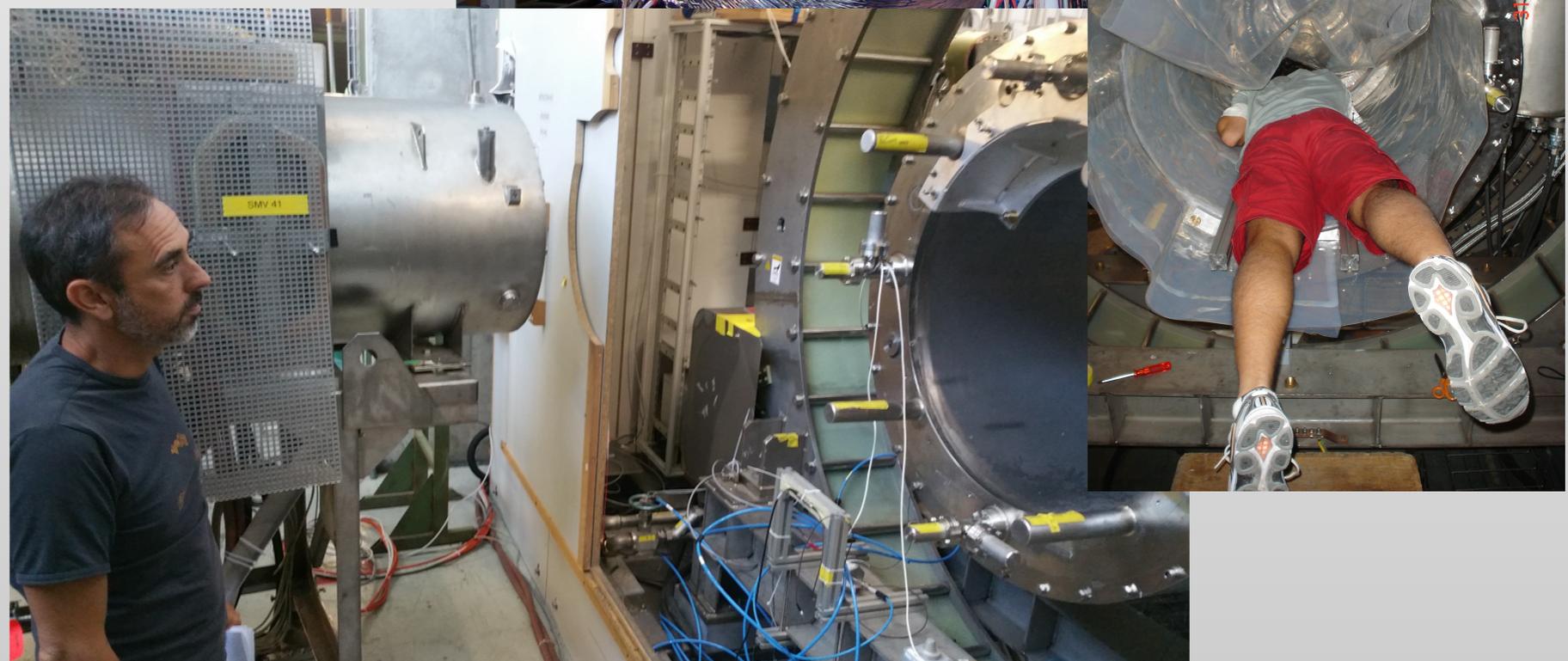
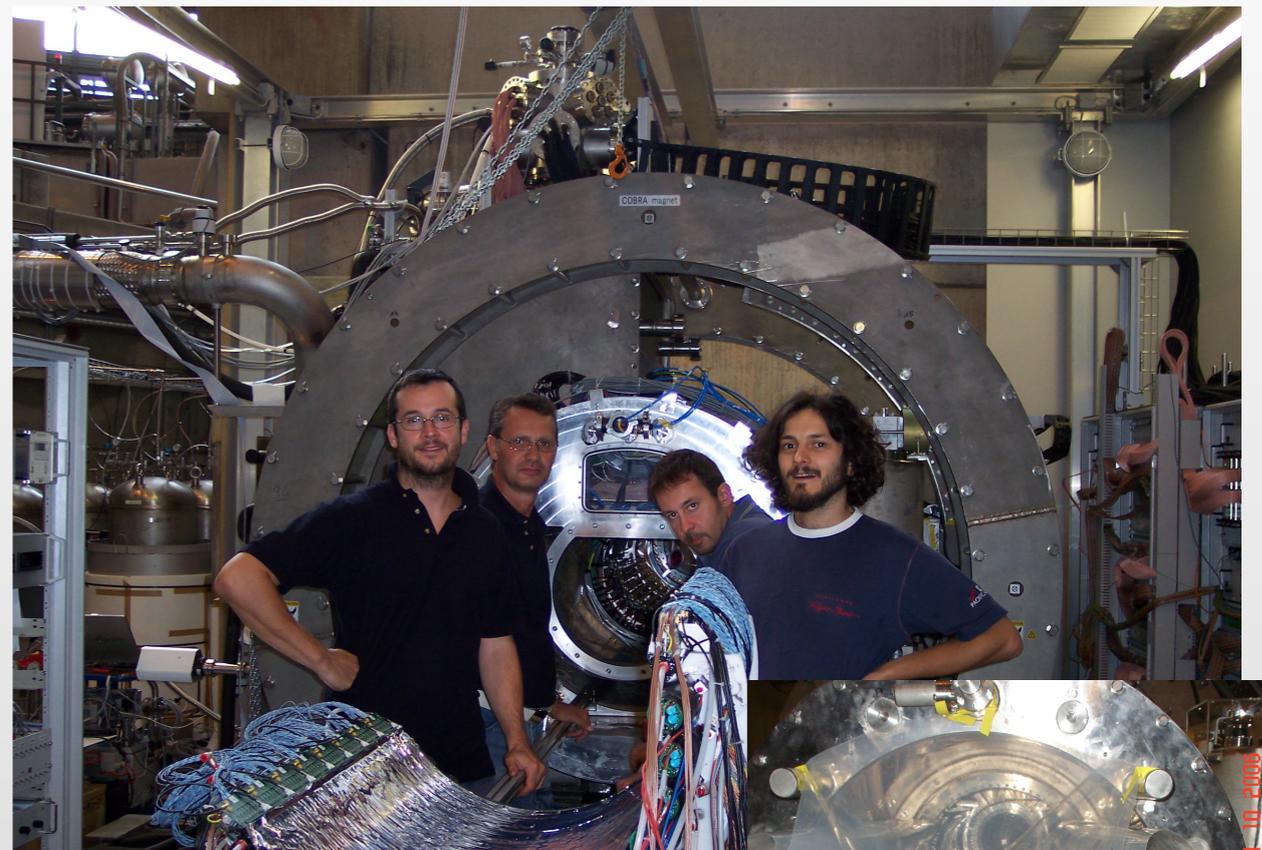
Dopo una prima fase di presa dati nel periodo 2008 / 2013, il rivelatore di MEG è in fase di upgrade. Manteniamo la responsabilita' del TC in collaborazione con Universita' di Tokyo



# MEG @Genova

Il gruppo di Genova è coinvolto in MEG sin dal 2002/2003, quando l'esperimento era in fase di R&D come **responsabile della costruzione e della messa in funzione del Timing Counter.**

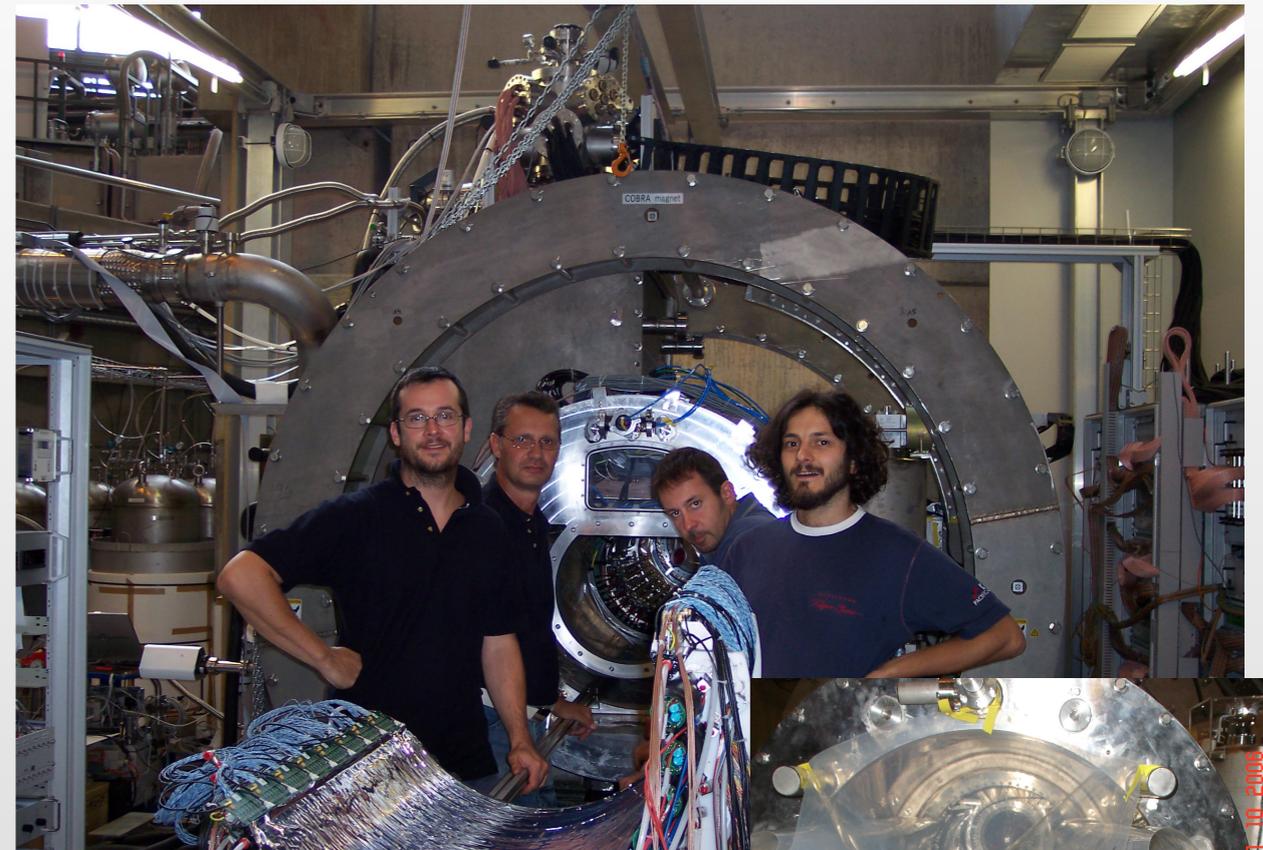
Dopo una prima fase di presa dati nel periodo 2008 / 2013, il rivelatore di MEG è in fase di upgrade. Manteniamo la responsabilita' del TC in collaborazione con Universita' di Tokyo



# MEG @Genova

Il gruppo di Genova è coinvolto in MEG sin dal 2002/2003, quando l'esperimento era in fase di R&D come **responsabile della costruzione e della messa in funzione del Timing Counter.**

Dopo una prima fase di presa dati nel periodo 2008 / 2013, il rivelatore di MEG è in fase di upgrade. Manteniamo la responsabilita' del TC in collaborazione con Universita' di Tokyo



# Il Timing Counter

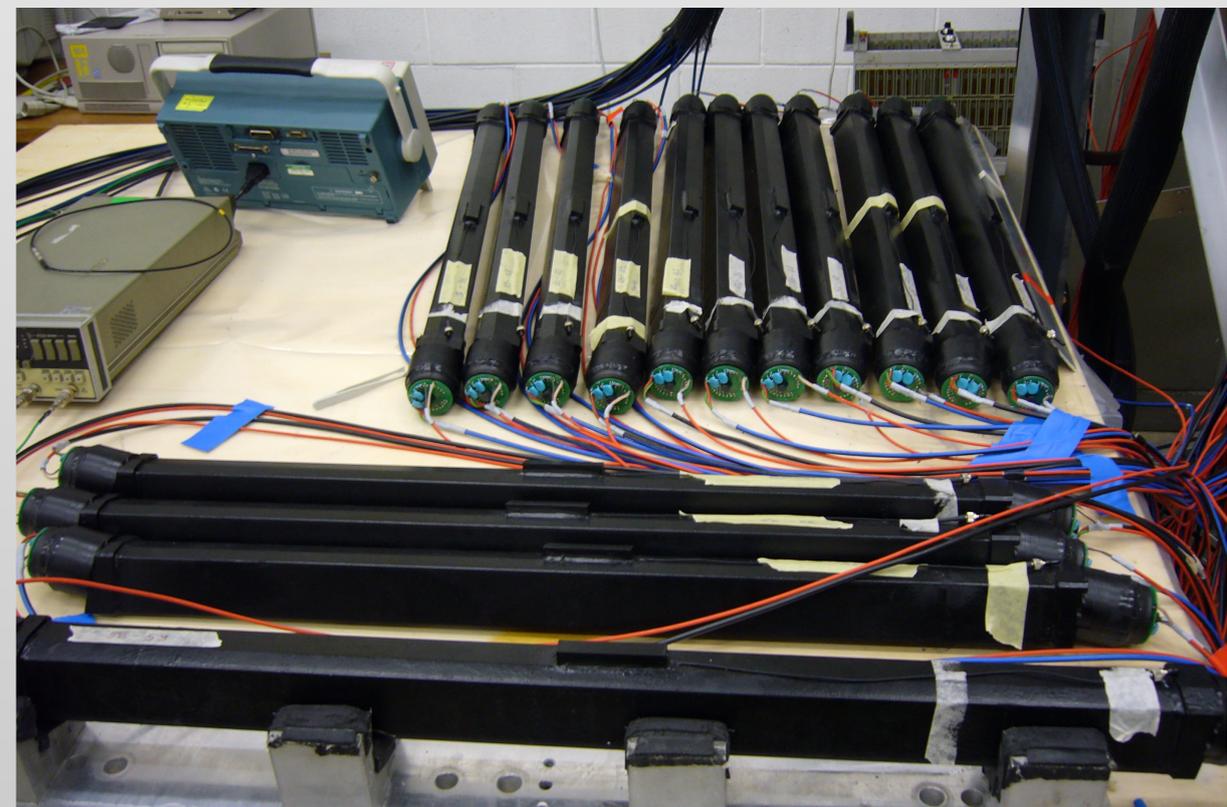
---

Richieste:

- **Alta risoluzione** ( $< 100\text{ps}$ ) per la ricostruzione degli eventi e reiezione del fondo.
- **Risposta veloce e alta efficienza** per essere utilizzato nel trigger.
- Possibilità di **ricostruire la coordinata z** (lungo il fascio) **online** con risoluzione  $\sim 10\text{ cm}$  per trovare coincidenze spaziali con calorimetro a Xenon (condizione di trigger).
- **Ricostruzione della z offline** con risoluzione  $\sim \text{cm}$  (ricostruzione eventi)

Soluzione:

- **sistema di elementi scintillatore + read-out basato su tubi fotomoltiplicatori (PMTs)**
- in una versione più recente (MEG 2), PMT sostituiti con Silicon Photomultiplier (SiPM).

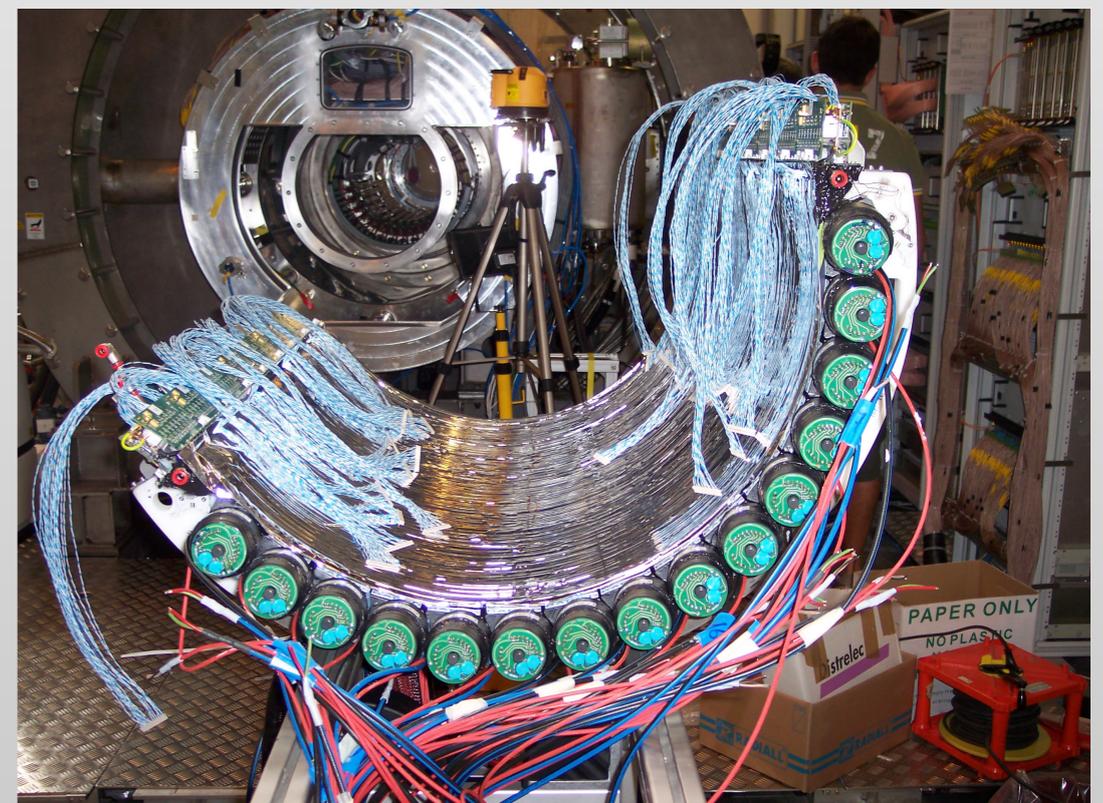


# Il Timing Counter

2 **detector** simmetrici posizionati all'interno del magnete, prima e dopo il bersaglio

Costituiti da **15 barre scintillanti** ( $80 \times 4 \times 4 \text{cm}^3$ ) assemblate in modo da seguire il profilo del magnete con lettura basata su foto moltiplicatori.

Materiali scelti per ottimizzare le risoluzione: **scintillatore plastico veloce** con alta risposta luminosa (Bicron BC404), **fototubi "fine mesh"** ad alto guadagno e basso TTS (spread del tempo di transito delle cariche sui dinodi).

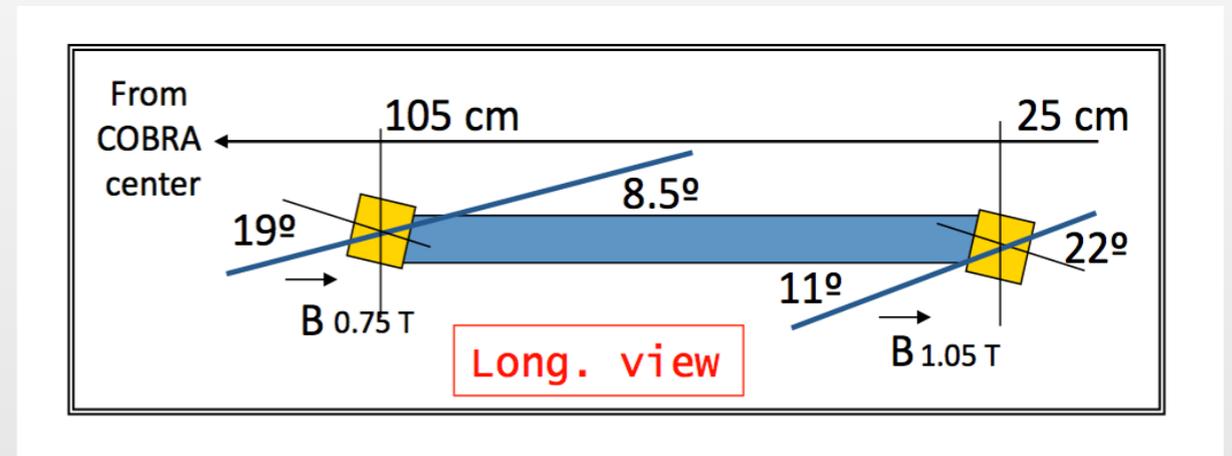


# Come funziona il TC

Considerando un positrone che attraversa una barra, il tempo misurato da ciascun PMT può essere scritto come:

$$t_{in} = T_{TC} + b_{in} + TW_{in} + \frac{\frac{L}{2} + z}{v}$$

$$t_{out} = T_{TC} + b_{out} + TW_{out} + \frac{\frac{L}{2} - z}{v}$$



i coefficienti  $b_i$  sono offset costanti dovuti alla catena di elettronica di lettura,  $TW_i$  sono i contributi di time walk (dipendono dall'ampiezza del segnale e perciò variano evento per evento) e  $v$  è la velocità efficace della luce di scintillazione nelle barre.

$T_{TC}$  è il tempo "vero" dell'evento che vogliamo misurare.

Tempo e posizione di impatto del positrone possono essere perciò estratti combinando le 2 letture:

$$T_{TC} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} - \frac{b_{in} + b_{out}}{2} - \frac{TW_{in} + TW_{out}}{2} - \frac{L}{2v}$$

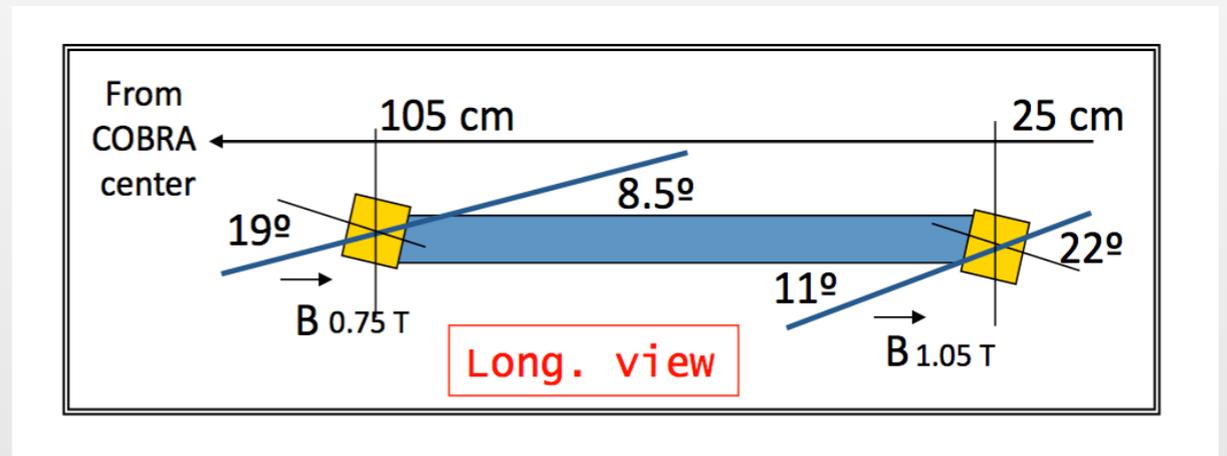
$$z = \frac{v(t_{in} - t_{out})}{2} - \frac{v(b_{in} - b_{out})}{2} - \frac{v(TW_{in} - TW_{out})}{2}$$

# Come funziona il TC

Considerando un positrone che attraversa una barra, il tempo misurato da ciascun PMT può essere scritto come:

$$t_{in} = T_{TC} + b_{in} + TW_{in} + \frac{\frac{L}{2} + z}{v}$$

$$t_{out} = T_{TC} + b_{out} + TW_{out} + \frac{\frac{L}{2} - z}{v}$$



i coefficienti  $b_i$  sono offset costanti dovuti alla catena di elettronica di lettura,  $TW_i$  sono i contributi di time walk (dipendono dall'ampiezza del segnale e perciò variano evento per evento) e  $v$  è la velocità efficace della luce di scintillazione nelle barre.

$T_{TC}$  è il tempo "vero" dell'evento che vogliamo misurare.

Tempo e posizione di impatto del positrone possono essere perciò estratti combinando le 2 letture:

$$T_{TC} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} - \frac{b_{in} + b_{out}}{2} - \frac{TW_{in} + TW_{out}}{2} - \frac{L}{2v}$$

$$z = \frac{v(t_{in} - t_{out})}{2} - \frac{v(b_{in} - b_{out})}{2} - \frac{v(TW_{in} - TW_{out})}{2}$$

# Come funziona il TC (2)

---

La ricostruzione della posizione mostrata nella slide precedente ha bisogno di essere calibrata - non può essere perciò utilizzata on-line nel trigger perché è troppo lenta!

Una maniera indipendente per determinare la coordinata  $z$  è di basare la ricostruzione sui rapporti fra le cariche misurate da ciascun fototubo.

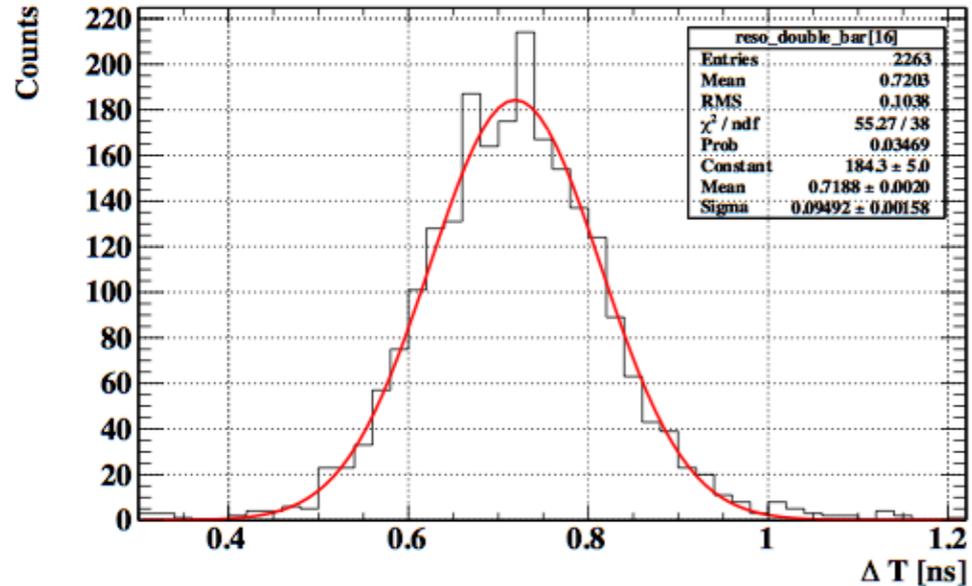
$$Q_{in} = E \cdot G_{in} \cdot e^{-\frac{L+z}{2\lambda}}$$
$$Q_{out} = E \cdot G_{out} \cdot e^{-\frac{L-z}{2\lambda}}$$

dove  $E$  è l'energia rilasciata nella barra,  $G_i$  tiene conto dei fattori legati a differenti guadagni, efficienze, etc e  $\lambda$  è la lunghezza di attenuazione della luce nella barra. Combinando:

$$z = \frac{\lambda}{2} \left( \ln \frac{Q_{in}}{Q_{out}} - \ln \frac{G_{in}}{G_{out}} \right) \quad Q_{in} \cdot Q_{out} = E^2 \cdot G_{in} \cdot G_{out} e^{-\frac{L}{\lambda}}$$

La ricostruzione della  $z$  con i rapporti di carica è veloce (noti i guadagni, non ha bisogno di essere calibrata) e può essere perciò utilizzata nel trigger. Inoltre una ricostruzione di  $z$  indipendente dal timing è utile per calibrare il rivelatore.

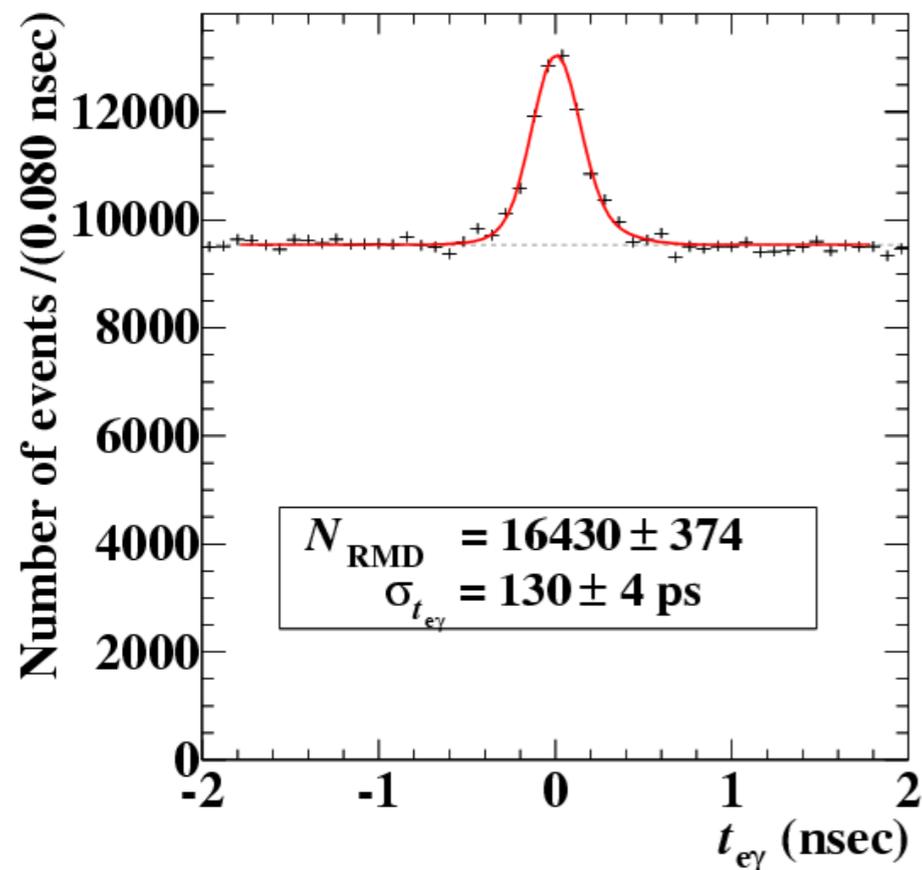
# Prestazioni ottenute



## Risoluzione di singola barra:

$$\sigma \sim 95 / \sqrt{2} = 67 \text{ ps}$$

costante e uniforme su tutte le barre nel periodo di presa dati 2008 / 2013!



## Risoluzione sul timing relativo $t_{ey}$ :

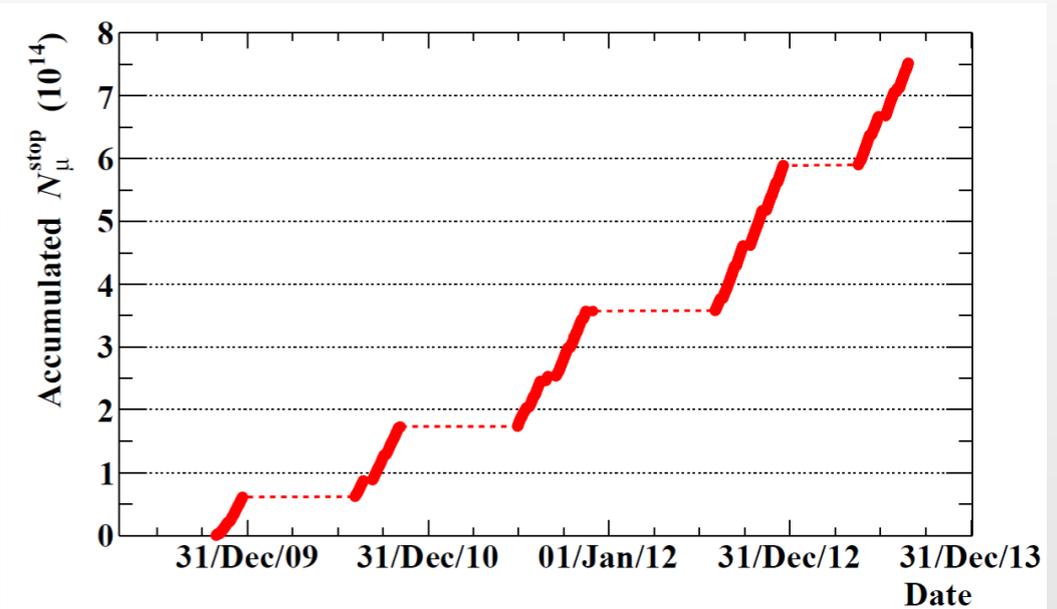
$$\sigma \sim 130 \text{ ps}$$

(include contributo del TC, del calorimetro e del tracciatore)

**E' uno dei misuratori di tempo di volo piu' precisi mai costruiti!**

# Risultati di MEG

MEG ha preso dati nel periodo 2008 / 2013, accumulando una statistica totale di circa  $7.5 \times 10^{14}$   $\mu$  al bersaglio.



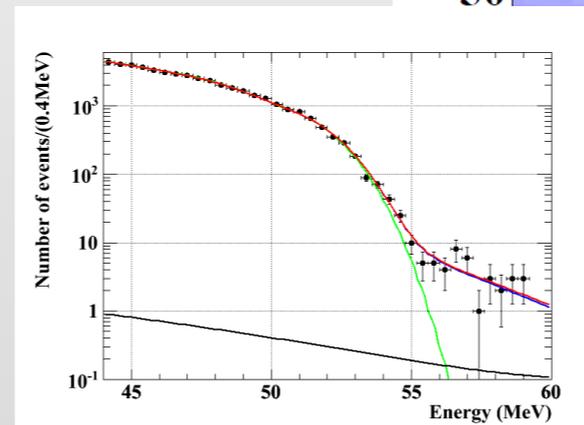
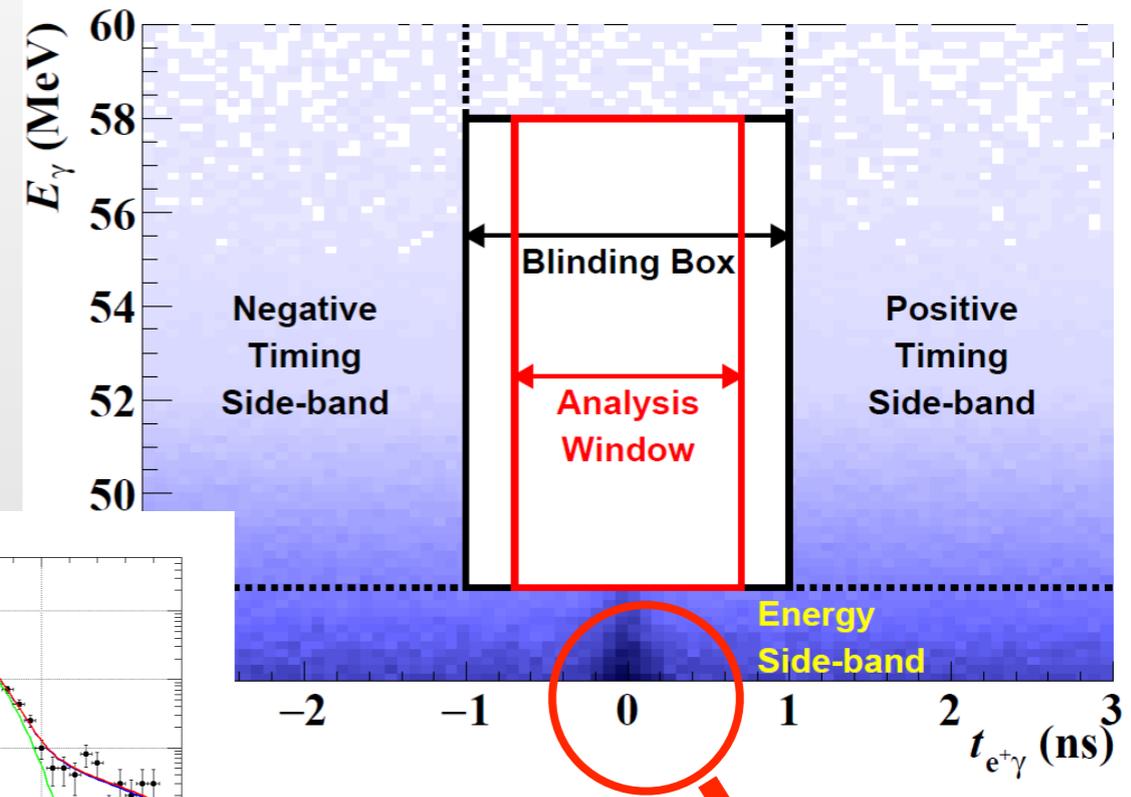
L'analisi dell'intero dataset e' stata pubblicata nel 2015 ed ha portato ad un miglioramento di un fattore 30 rispetto al limite precedente sul decadimento  $\mu \rightarrow e\gamma$ :

da  $1.2 \times 10^{-11}$  (esperimento MEGA, 1999) a  $4.2 \times 10^{-13}$  (limite finale MEG).

# Analisi dati MEG

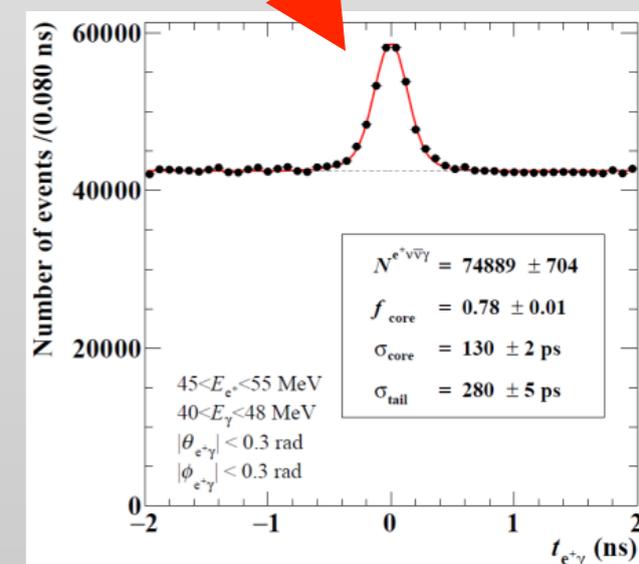
La tecnica di analisi e' basata su una analisi di likelihood (+ blind analisi).

**La regione del segnale viene resa inaccessibile** ("blinding box") fino a che tutti i tool di analisi e di calibrazione non sono completati (studiati nelle regioni di dati accessibili, le side-band).



Quando l'analisi e' pronta si apre la box e si osserva gli eventi che contiene.

Il principio e': stimare quanti eventi "buoni" (ovvero, quanti candidati  $\mu \rightarrow e\gamma$ ) ci sono nella box, e normalizzare questo numero al numero totale di muoni contati dall'esperimento.

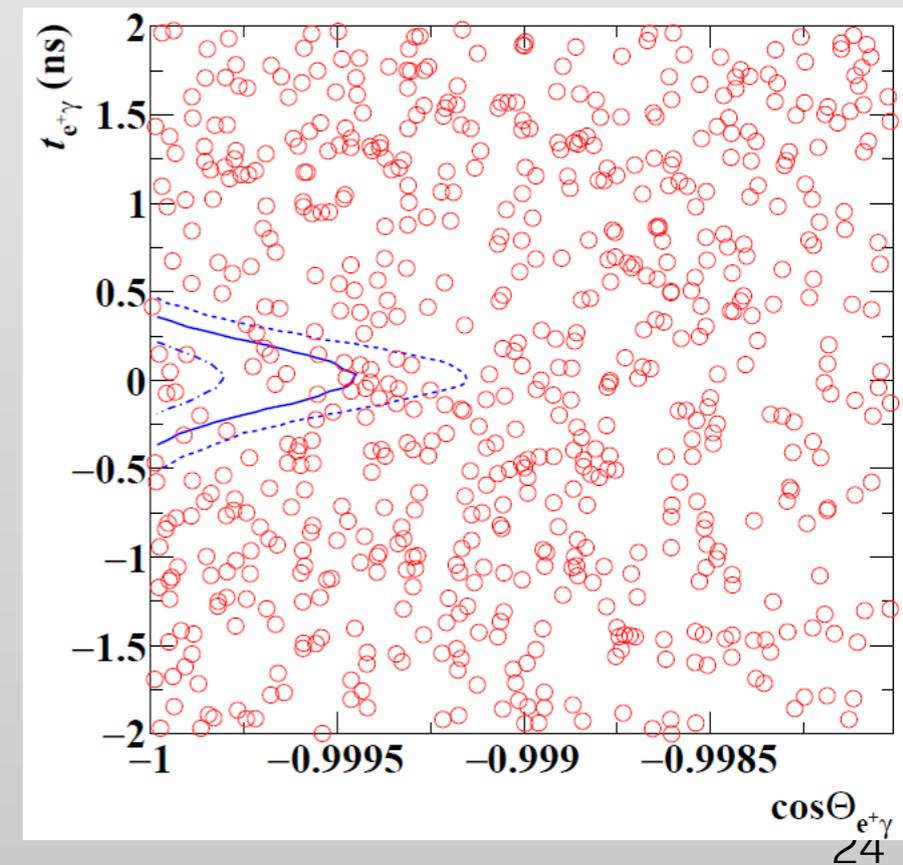
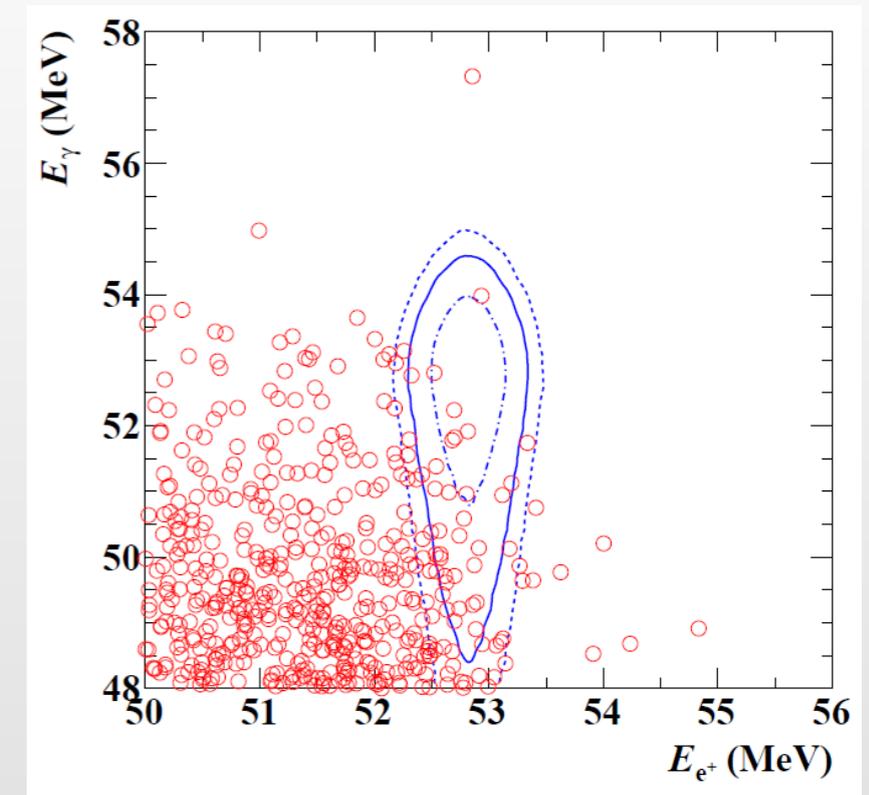


# Contenuto della blinding box

Per ciascun evento vengono ricostruite le variabili che definiscono il segnale - gli eventi possono essere rappresentati in “piani” definiti da coppie di variabili. Ad es.  $(E_e, E_\gamma)$  oppure  $(t_{e\gamma}, \cos \theta_{e\gamma})$ .

Ci si aspetta accumulo di eventi nella regione del segnale, ma stiamo cercando un segnale molto piccolo (pochissimi eventi attesi) in un background estremamente affollato.

Inoltre se ci si limitasse a contare quanti eventi cadono in una certa regione si rischia di avere forte dipendenza da dove si mette il limite (soprattutto con pochi conteggi)



# Analisi dati MEG

---

Al fine di superare le problematiche legate ad un'analisi basata su “cut and count” , non ci si limita a “contare” quanti eventi sono stati rivelati. Piuttosto, si usano metodi statistici per avere la “miglior stima” del numero di conteggi (segnale e background), basata sui dati raccolti.

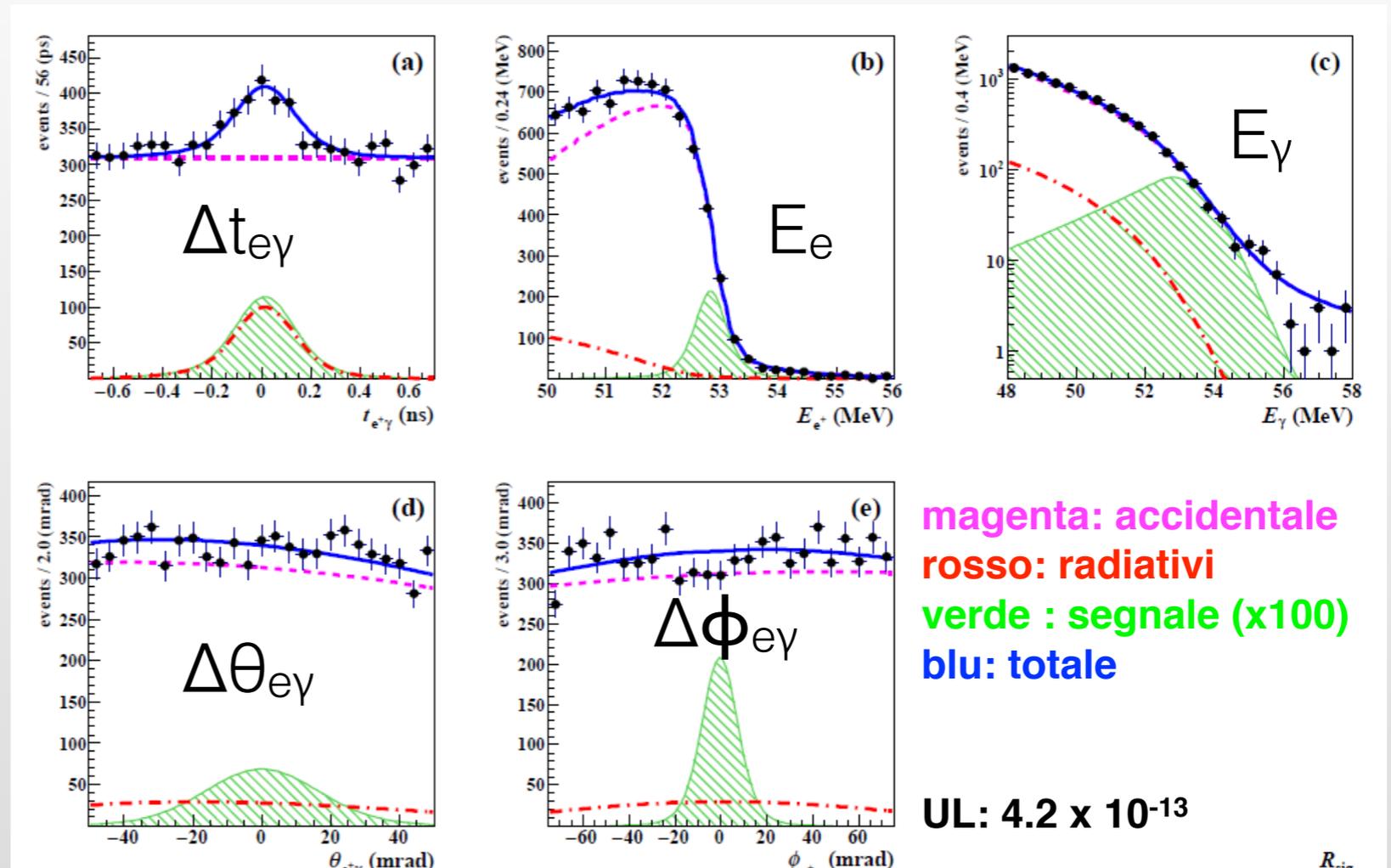
Analisi di likelihood: a partire da

- le risoluzioni misurate (o estrapolate da MonteCarlo) per ciascun detector
- le distribuzioni attese per il segnale e per i fondi

si definisce una funzione (la likelihood, appunto) che descrive quanto *verosimilmente* i nostri dati sono rappresentati da un certo numero di eventi di segnale piuttosto che di background.

# Analisi dati MEG

Likelihood fit sugli eventi osservati all'interno della finestra di analisi (proiettata su ciascuna variabile)



Il numero di  $\mu$  decaduti al bersaglio viene stimato contando quanti decadimenti di Michel arrivano al Timing Counter (tenendo opportunamente conto di tutte le efficienze)

Viene quindi stabilito un limite superiore al valore atteso per la probabilità del  $\mu \rightarrow e\gamma$  ottenendo  $\text{BR}(\mu \rightarrow e\gamma) < 4.2 \times 10^{-13}$  @90% CL.

# Si può migliorare?

---

Con l'analisi dei dati 2013 MEG ha raggiunto il suo limite sperimentale - con le attuali risoluzioni l'effetto del background renderebbe inutile continuare la presa dati.

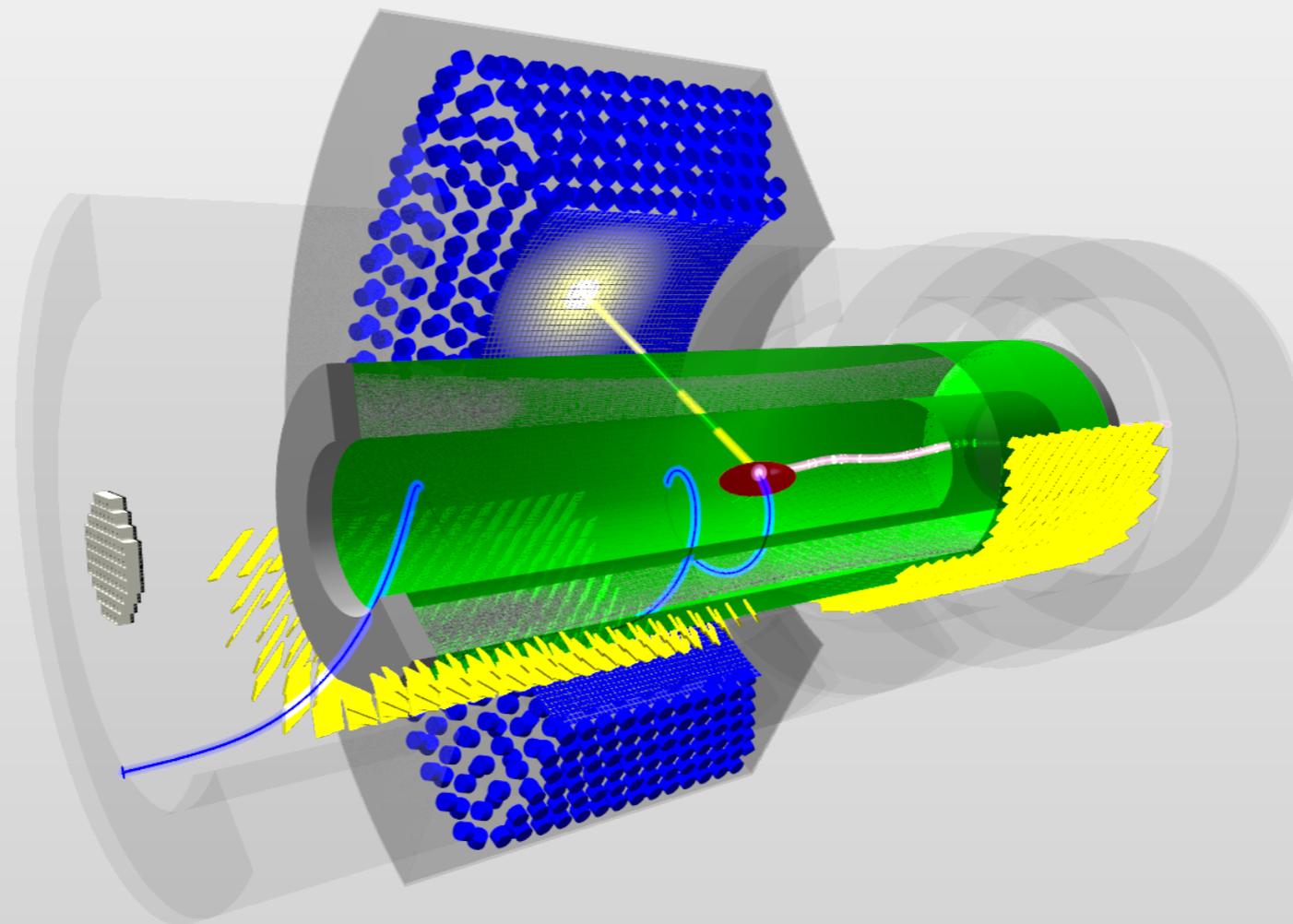
Perciò a partire dal 2013 MEG ha sviluppato un grosso lavoro di R&D per perfezionare la misura, intervenendo sui detector senza stravolgere il setup sperimentale:

- aumentata intensità di fascio ( $O(10^8 \mu/s)$ )
- le camere a drift sono state completamente ridisegnate
- sono stati sostituiti parte dei sensori ottici del calorimetro a Xenon
- il Timing Counter è stato ricostruito

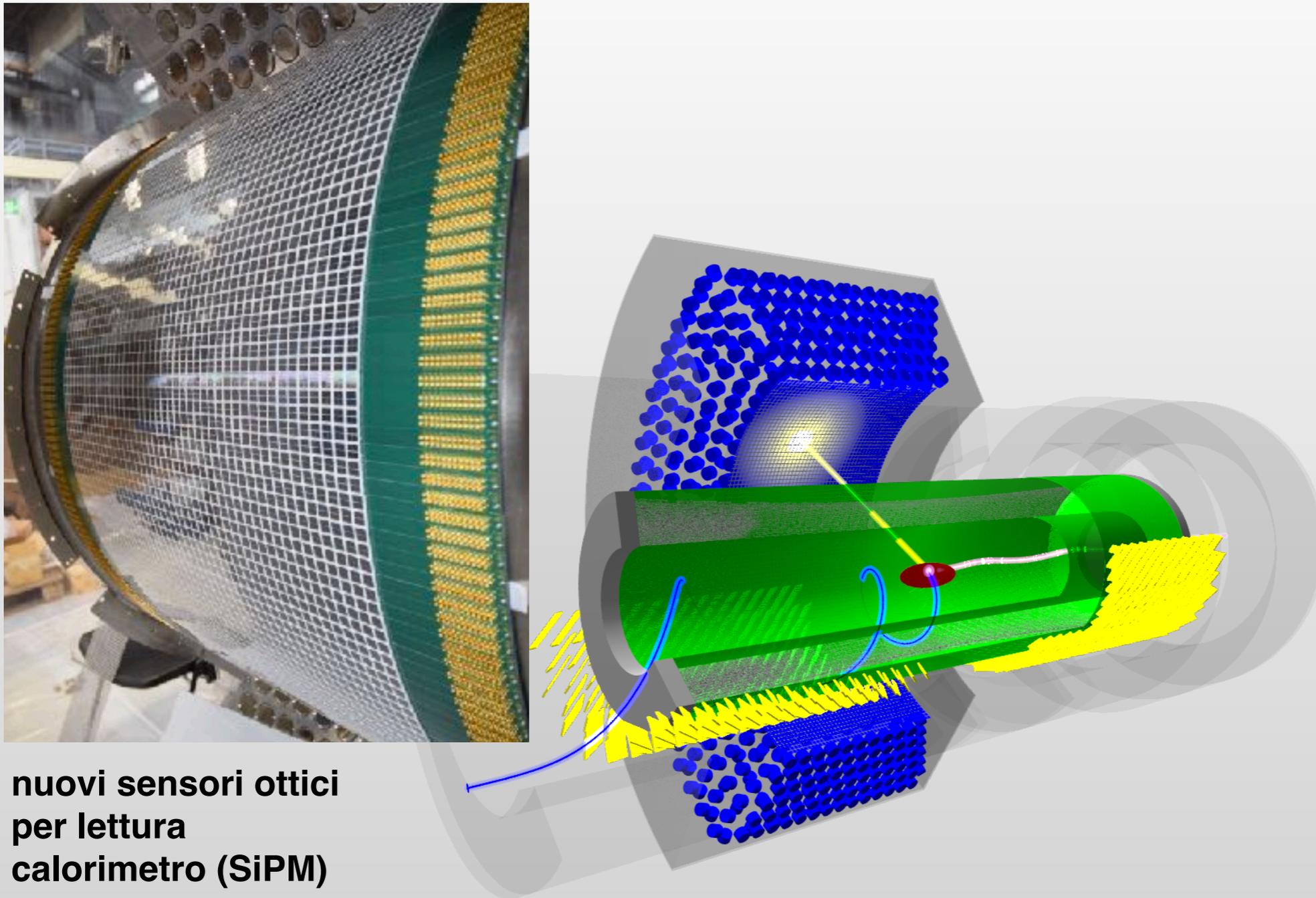
L'obiettivo è quello di migliorare le risoluzioni (e aumentare la statistica) in modo da raggiungere la sensibilità di  $\sim 10^{-14}$  ovvero un fattore 10 meglio della prima fase di MEG.

# MEG Upgrade

---

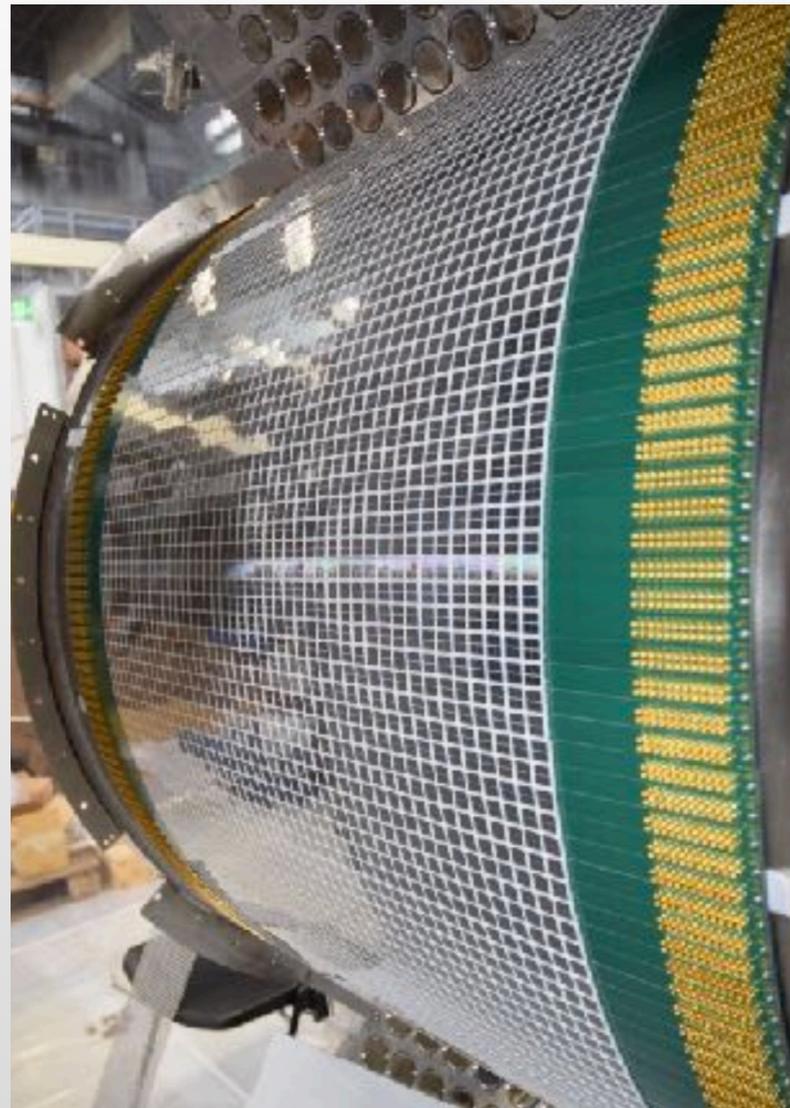


# MEG Upgrade



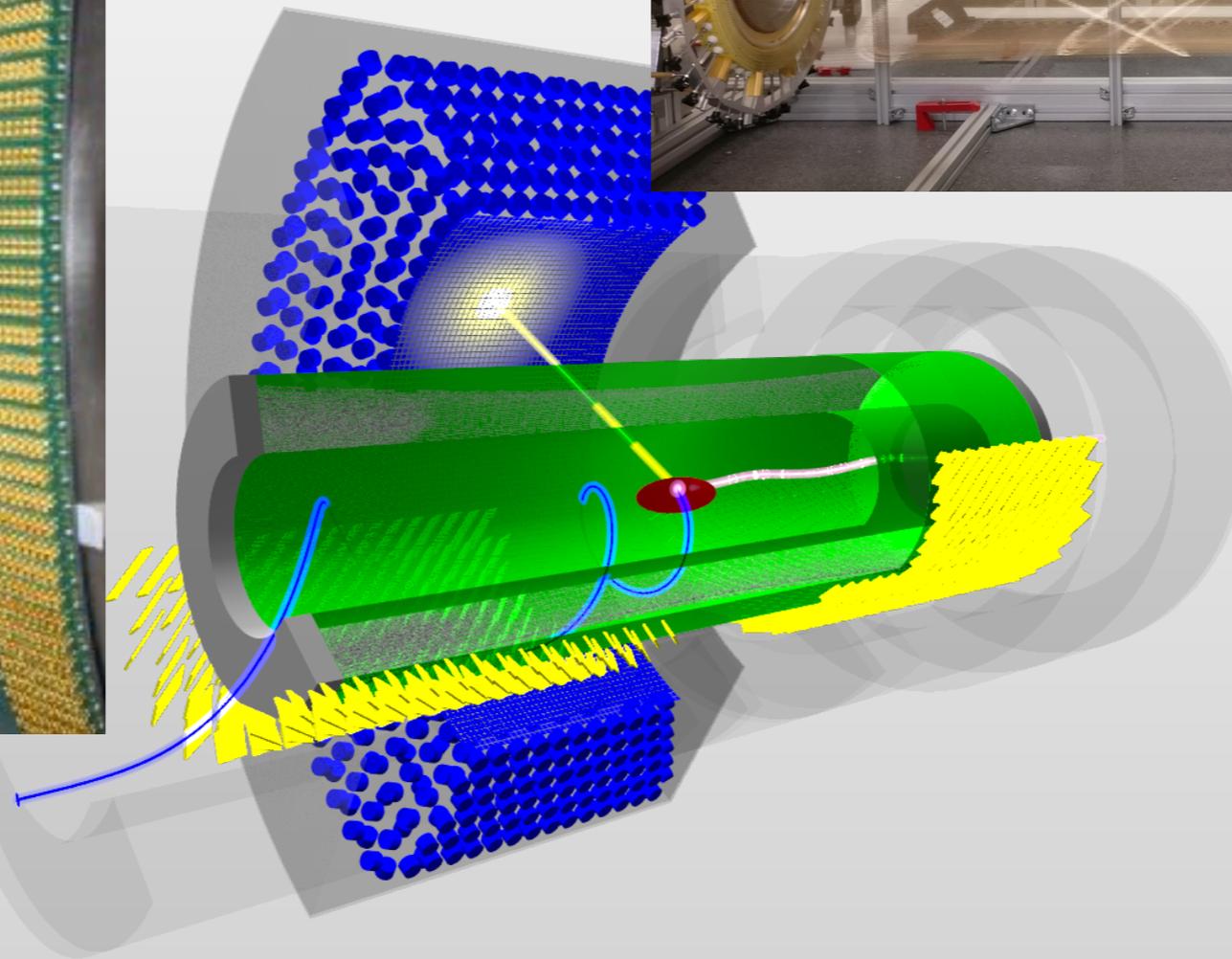
**nuovi sensori ottici  
per lettura  
calorimetro (SiPM)**

# MEG Upgrade

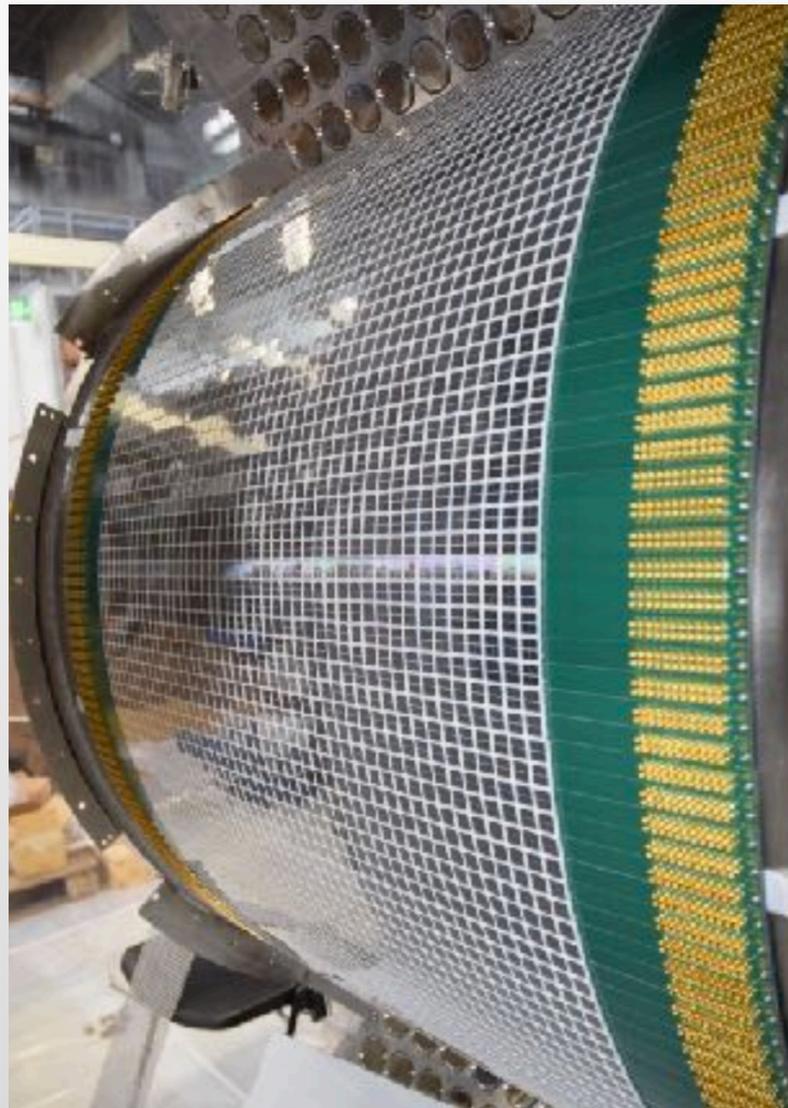


**nuovi sensori ottici  
per lettura  
calorimetro (SiPM)**

**camere a drift completamente ridisegnate**



# MEG Upgrade

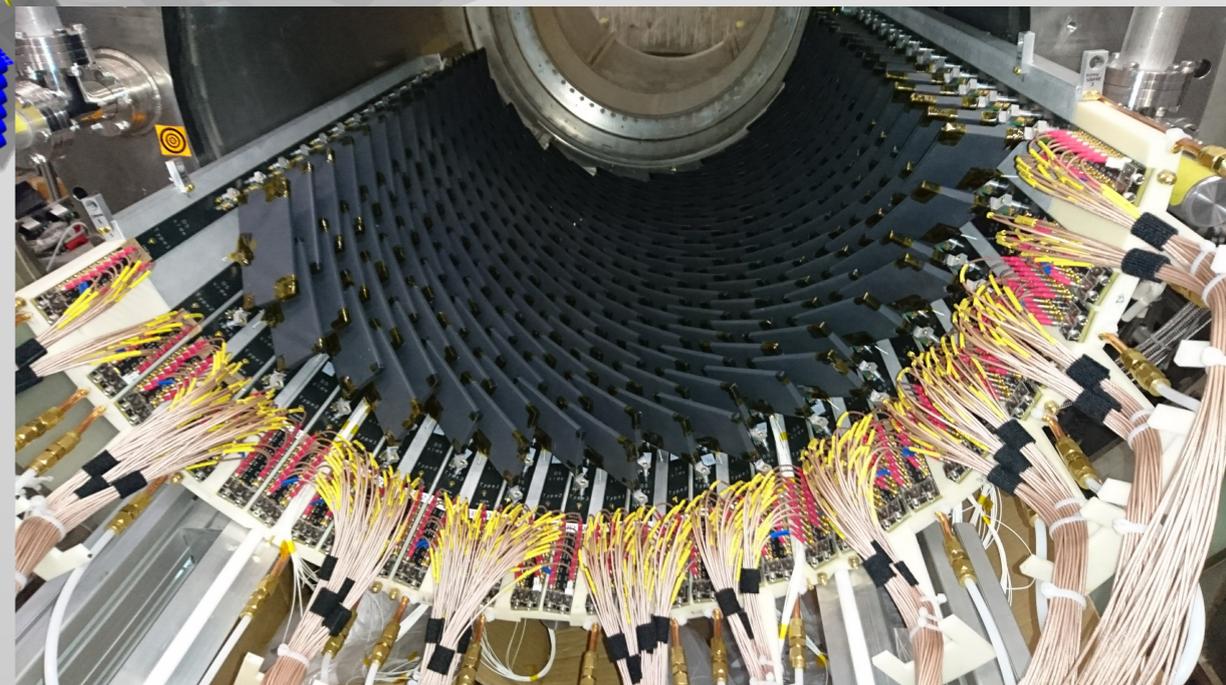
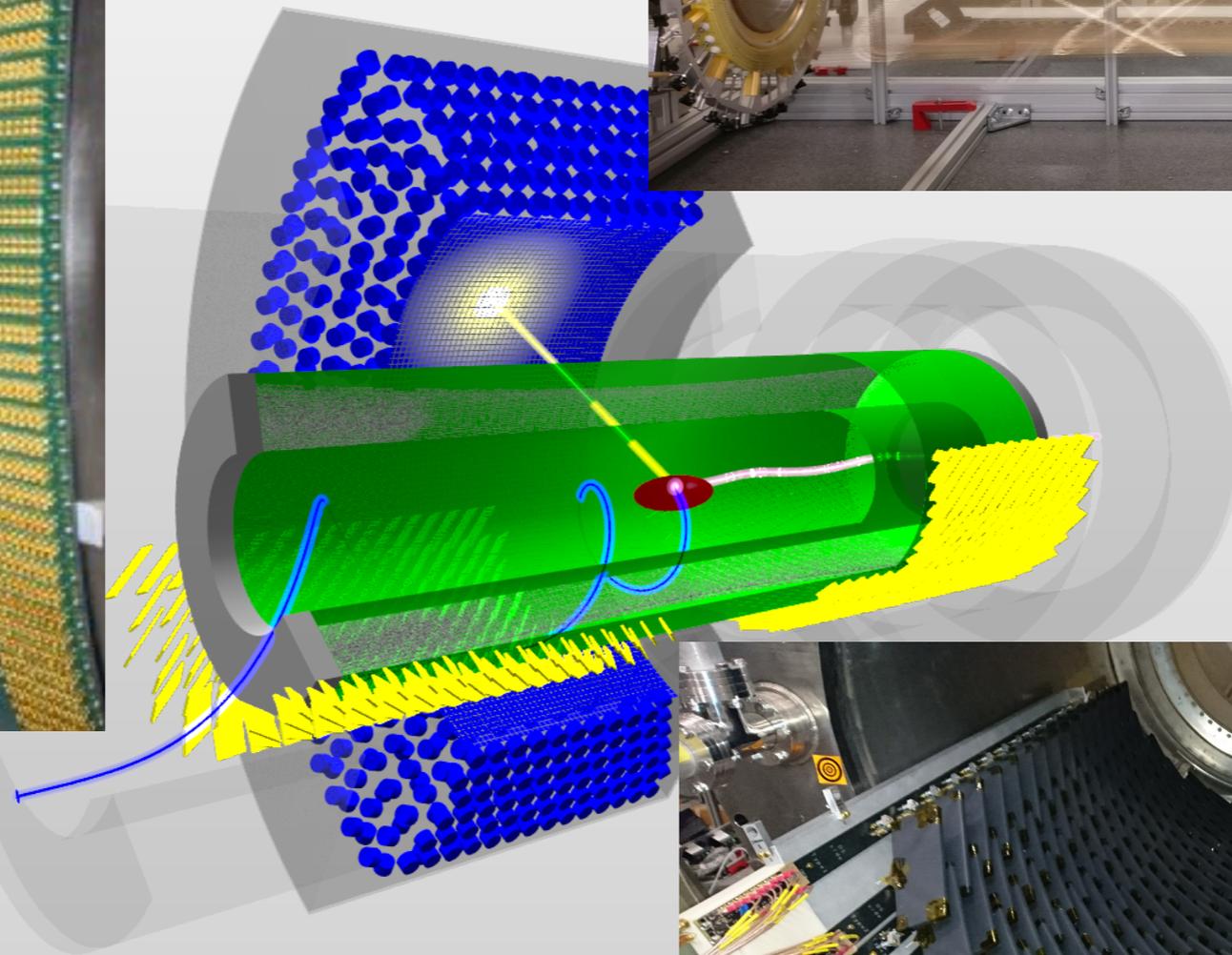


**nuovi sensori ottici  
per lettura  
calorimetro (SiPM)**

**camere a drift completamente ridisegnate**



**nuovo Timing  
Counter (maggior  
granularita', nuovo  
readout)**

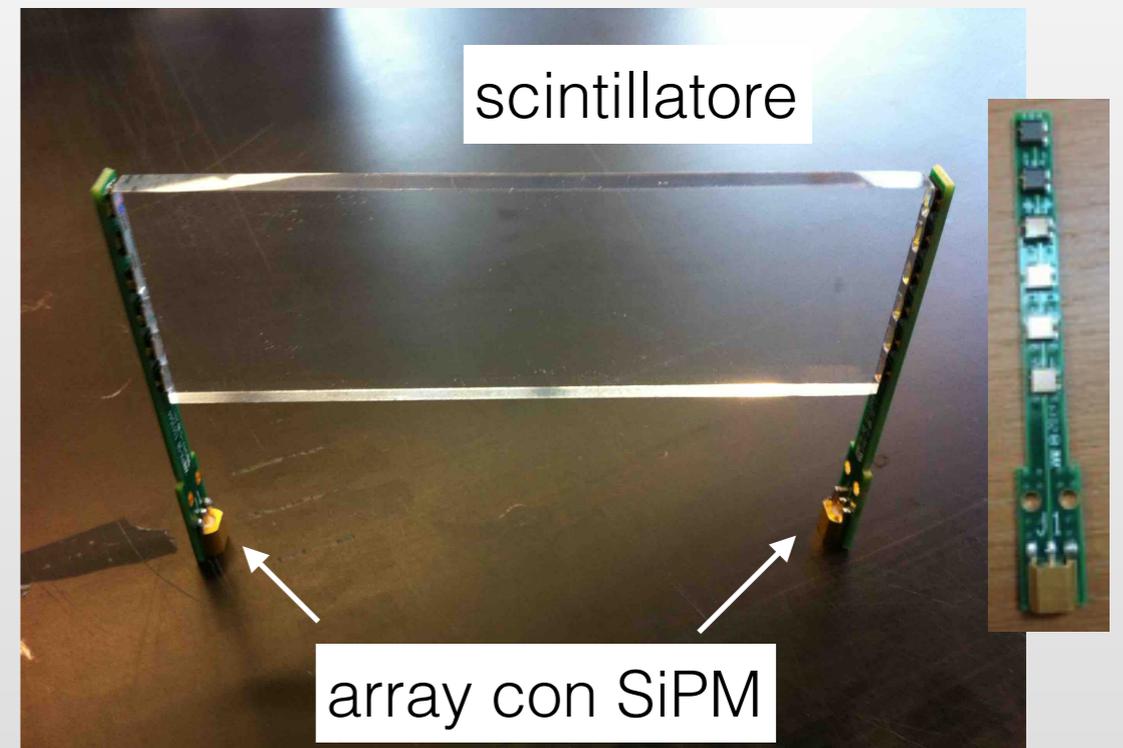


# Upgrade del TC

Da quando è stato costruito il TC di MEG, la tecnologia ha fatto passi avanti. Nuovi rivelatori basati su sensori al silicio (SiPM) hanno sostituito i PMT in moltissime applicazioni.

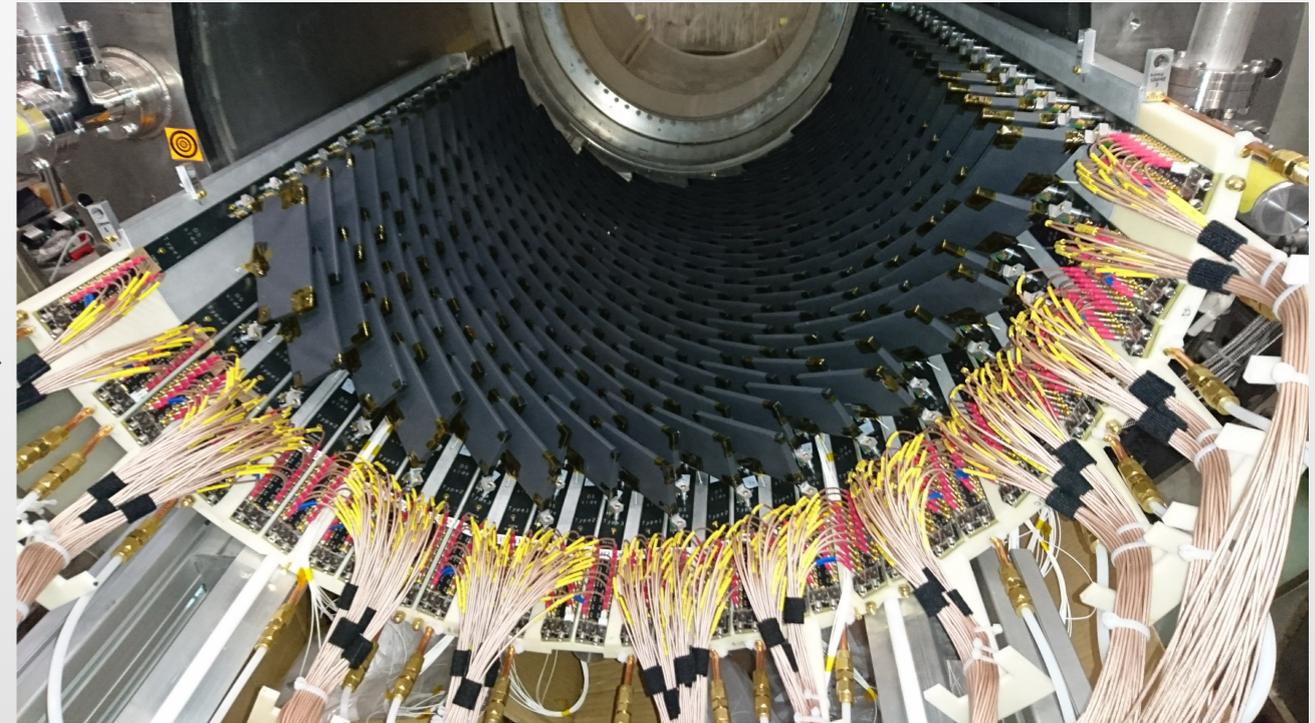
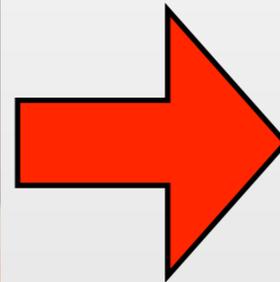
Le ridotte dimensioni e il costo contenuto permettono di aumentare la granularità del detector.

E' stato possibile ridisegnare il Timing Counter utilizzando componenti più piccoli: da barre di scintillatore a piccole mattonelle ("pixel",  $\sim 120 \times 50 \times 5 \text{ mm}^3$ ).



Il meccanismo di funzionamento è esattamente lo stesso mostrato per il timing counter. In questa nuova versione è però possibile utilizzare informazioni provenienti da più pixel, combinarle e incrementare sensibilmente la risoluzione.

# Confronto fra TC MEG e TC MEG 2



- L'utilizzo dei fototubi in campo magnetico non è ottimale
- Scintillatori grossi implicano bassa granularità e maggiori incertezze nella ricostruzione spaziale.
- Il multiplo scattering ha effetti importanti

- Maggiore granularità : da  $2 \times 15$  barre a  $2 \times 256$  pixel
- Ottima risoluzione temporale del singolo elemento ( $\sim 80$ ps, confrontabile con singola barra) può essere ulteriormente migliorata utilizzando informazioni da multipli hit.
- Meno multiplo scattering

# Risultati del nuovo TC

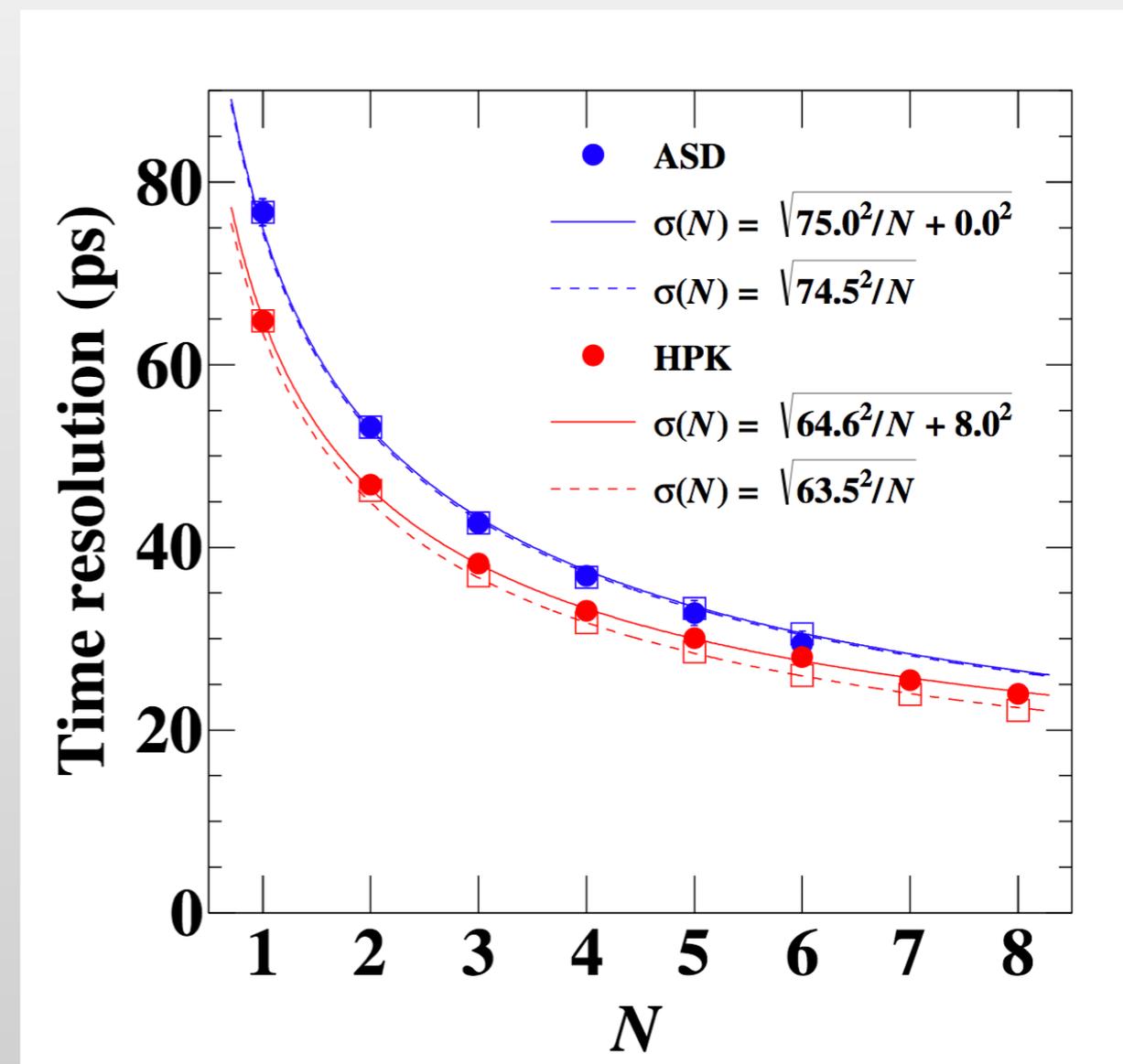
Il nuovo rivelatore e' gia' stato testato in piu' beam test, sia a Frascati che al PSI sulla linea di fascio di MEG.

La risoluzione del singolo pixel e' stata misurata in ~75ps (su un campione di piu' di 500 pixel realizzati).

In media ci si aspetta di avere 7/8 pixel colpiti per ogni evento (dato da simulazione MonteCarlo)

Combinando le informazioni di timing di ogni pixel, ci aspettiamo che la risoluzione scali come la radice quadrata del numero di pixel.

Ottenuta risoluzione < 30ps su eventi con  $N_{hit} > 6$ , un fattore 2 meglio del precedente TC!



# Il futuro (prossimo) di MEG 2

---

**Il rivelatore di MEG 2 e' in fase di installazione al PSI in questi mesi.**

Ci attendiamo di inserire il TC in posizione finale entro la fine dell'autunno.

**Entro ottobre tutto il detector verra' integrato a PSI**, eccezion fatta per le camere a drift (saranno pronte e installate in primavera).

**Un run ingegneristico di integrazione del detector e della DAQ verra' effettuato a fine anno**, mentre un run ingegneristico completo includendo anche le camere a drift e' previsto per l'anno prossimo.

**Ci aspettiamo di prendere dati a partire dal 2019...**

# Il progetto

---

**ERC Advanced Grant 2013  
Research proposal [Part B1]**

Principal Investigator (PI): *Prof. Stefano Ragazzi*  
PI's Host Institution for the project: *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*

**The Electron Capture Decay of  $^{163}\text{Ho}$  to Measure the  
Electron Neutrino Mass with sub-eV sensitivity**

**HOLMES**

**Grant europeo finanziato nel 2014, partecipano INFN GE e INFN / Uni Mi Bicocca  
Progetto pilota per la misura diretta di massa del neutrino.**

Il neutrino:

- e' massivo (oscillazioni)
- gli autostati di interazione non coincidono con gli autostati di massa
- lo studio delle oscillazioni fornisce alcune informazioni:
  - angoli di mixing
  - quadrati delle differenze delle masse

Rimangono aperte molte questioni, fra cui: **scala assoluta delle masse**, problema della gerarchia, natura del neutrino (Dirac o Majorana?)

# Come si misura la massa del $\nu$ ?

---

**Misure indirette:** ricerca di eventi che possono esistere solo se  $m_\nu \neq 0$ :

- **misure cosmologiche** (radiazione cosmica di fondo)
- **doppio decadimento beta senza emissione di neutrini**

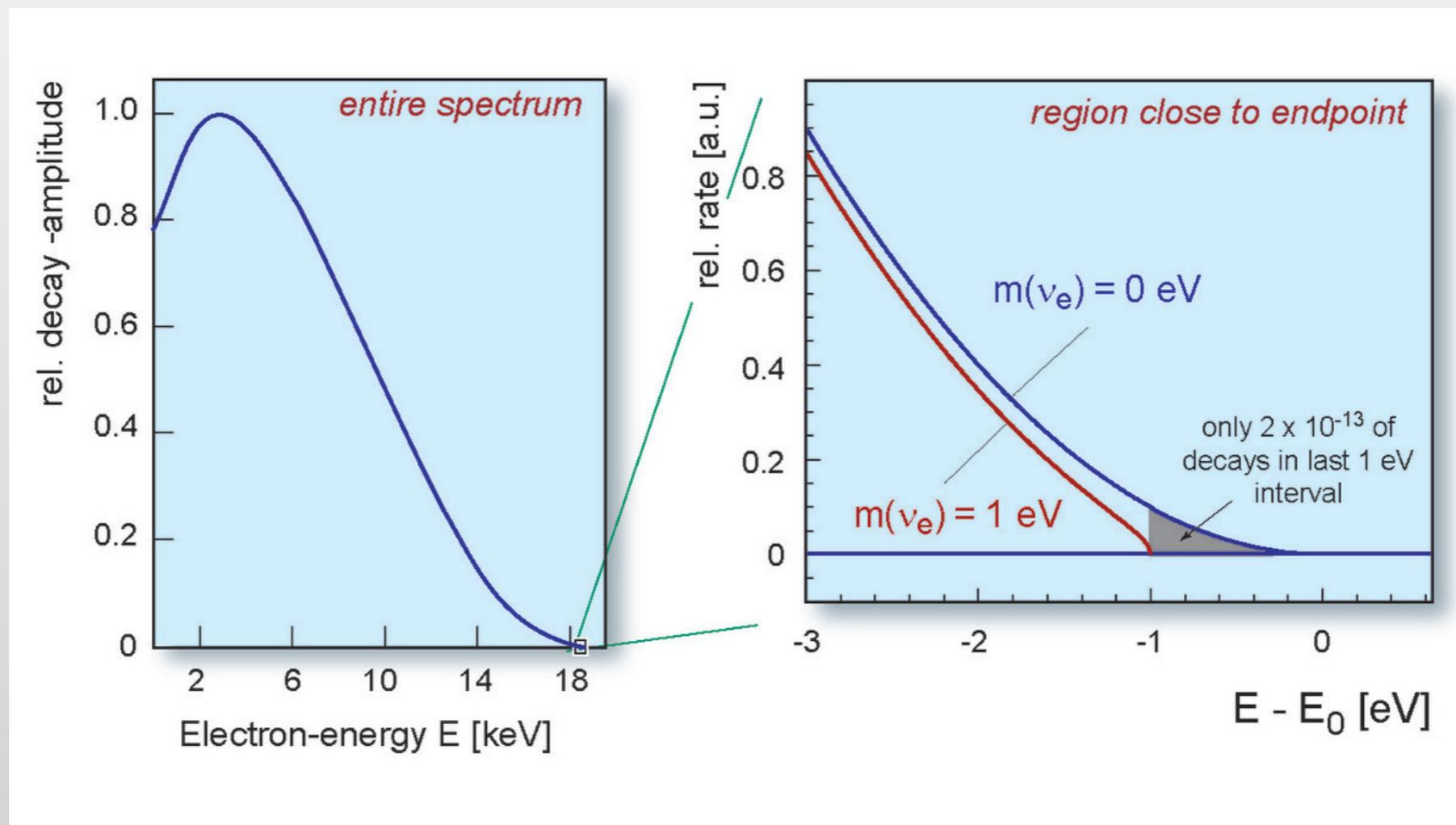
**Misure dirette:**

- **studio cinematica dei processi che prevedono neutrini nello stato finale.**
  - Tipicamente si studiano decadimenti  $\beta$ , ad esempio quello del  ${}^3\text{H}$ :
    - ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e + \nu$
- si possono usare **2 approcci**:
  - **spettrometrico** (alla KATRINE)
  - **calorimetrico** (ECHO, HOLMES)

La distribuzione dell'energia dell'elettrone emesso e' definita dalla cinematica del processo, e, nella sua parte finale (vicino all'end point), dipende dal valore della massa del neutrino.

# Come si misura la massa del $\nu$ ?

Si usano rivelatori in grado di misurare l'energia di  $e^-$  emesso durante il decadimento  $\beta$ . Si studia quindi la parte finale dello spettro di energie dell'elettrone emesso, alla ricerca di una "deformazione" rispetto allo spettro atteso:



**L'effetto ricercato e' estremamente piccolo: il limite attuale sulla massa del neutrino è  $m_\nu < 2.2$  eV.**

# 2 approcci differenti...

## Spettrometro



## Calorimetro

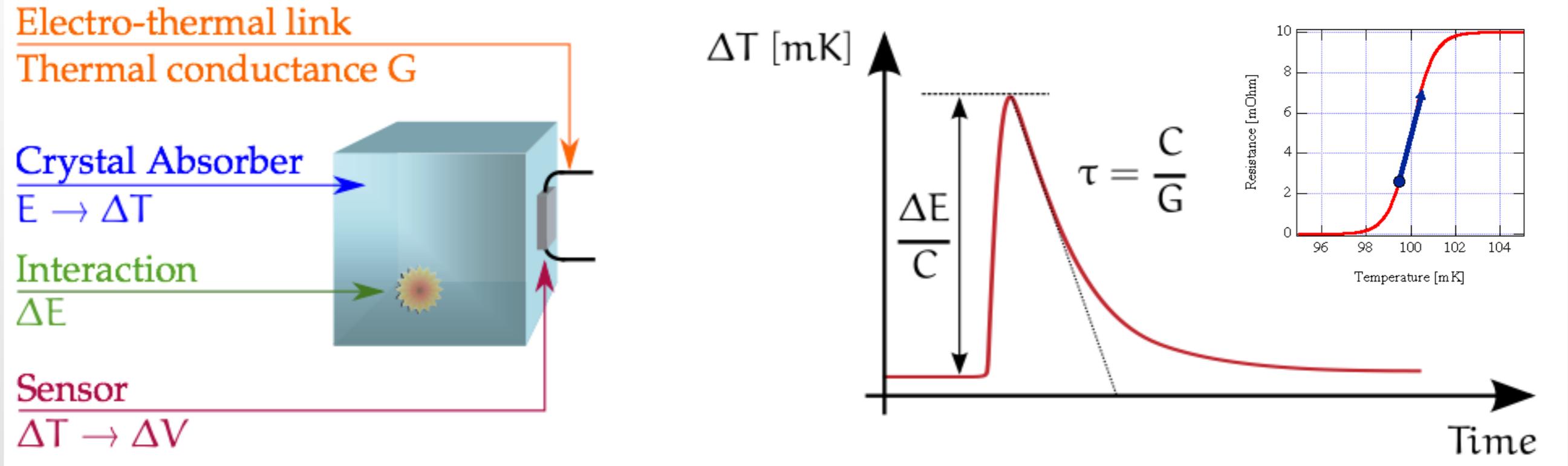


# Ingredienti per una misura calorimetrica diretta

---

- **Rivelatore con risoluzione energetica estremamente spinta** - si vogliono misurare energie con precisione migliore dell'eV.
  - micro-calorimetri basati su Transition Edge Sensor (TES).
- **Decadimento con end point il piu' basso possibile** (minore il valore di end point, maggiore la statistica che si accumula nella regione di interesse).
- **Vita media del decadimento non troppo lunga** - permette di avere buona attivita' specifica.
- Ricerca di una specie isotopica che soddisfi queste caratteristiche:
  - $^3\text{H}$  (end point circa 18.6keV,  $T_{1/2} \sim 12.3\text{y}$ )
  - $^{187}\text{Re}$  (end point  $\sim 2.5\text{ keV}$ ,  $T_{1/2} \sim 43.5\text{ Gy}$ ).
- Recente interesse per  $^{163}\text{Ho}$  (cattura elettronica, ma equivalente per la misura)
  - endpoint  $\sim 2.55\text{keV}$
  - $T_{1/2} \sim 4570\text{y}$

# Micro-calorimetri a TES



- Sistema formato da assorbitore + termometro a TES
- TES: film sottile superconduttore mantenuto sulla transizione con feedback elettrotermico negativo (alimentazione in tensione costante).
- Energia rilasciata nell'assorbitore è sufficiente a riscaldare il TES, facendone aumentare la resistenza.
- Aumento di resistenza implica diminuzione della potenza dissipata - il TES si raffredda e ritorna sulla transizione

# La misura di Holmes

---

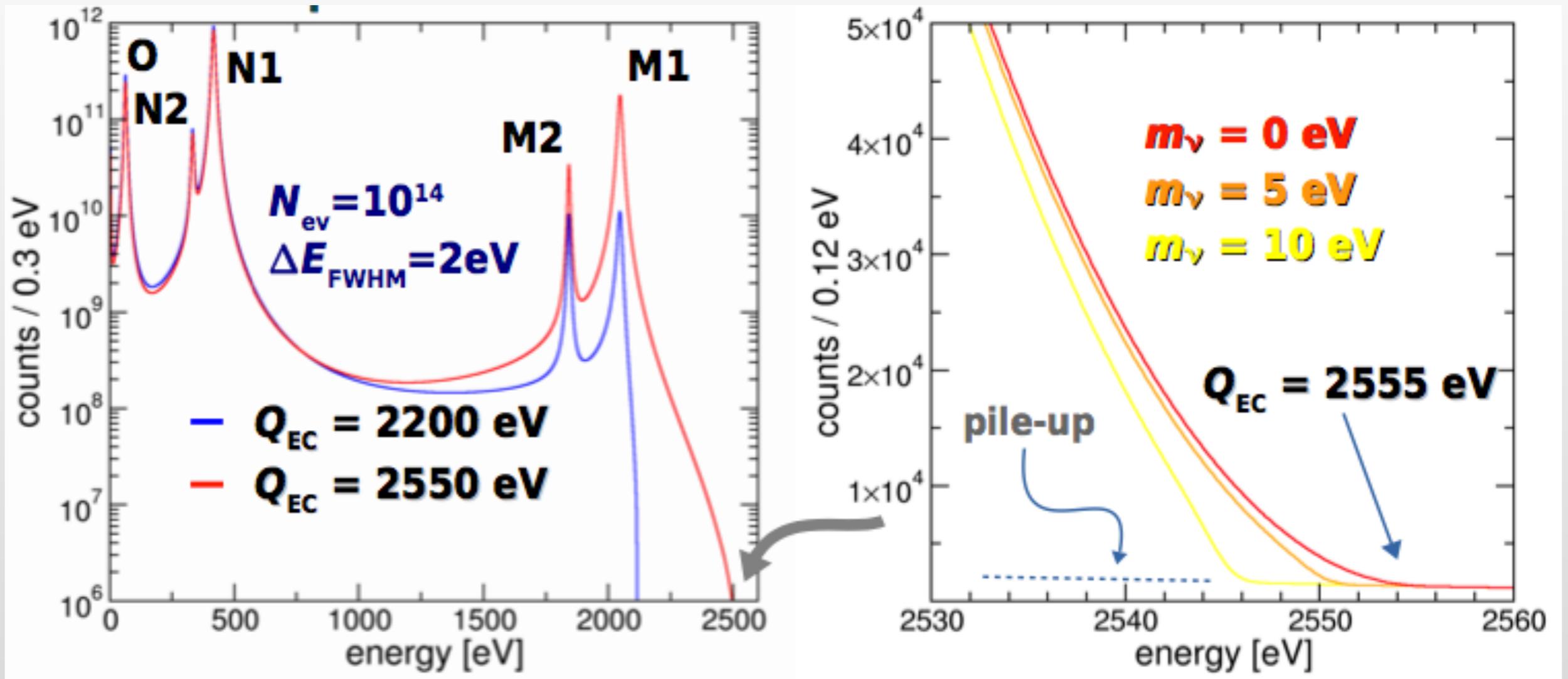
Nella sua configurazione di baseline, **Holmes consiste in:**

- **array di micro-calorimetri basati su TES** con impiantati all'interno atomi di  $^{163}\text{Ho}$ 
  - **$O(10^2)\text{Bq/detector}$** , corrispondenti a  $\sim 10^{13}$  nuclei di  $^{163}\text{Ho}$
  - risoluzioni attese:  **$\Delta E \sim 1\text{eV}$ ,  $\tau \sim 1\mu\text{s}$**
- **array da 1000 rivelatori con readout multiplexato**
  - totale di  $\sim 10^{16}$  nuclei di  $^{163}\text{Ho} \sim 18\ \mu\text{g}$
  - $O(10^{13})$  eventi in 1 anno di presa dati

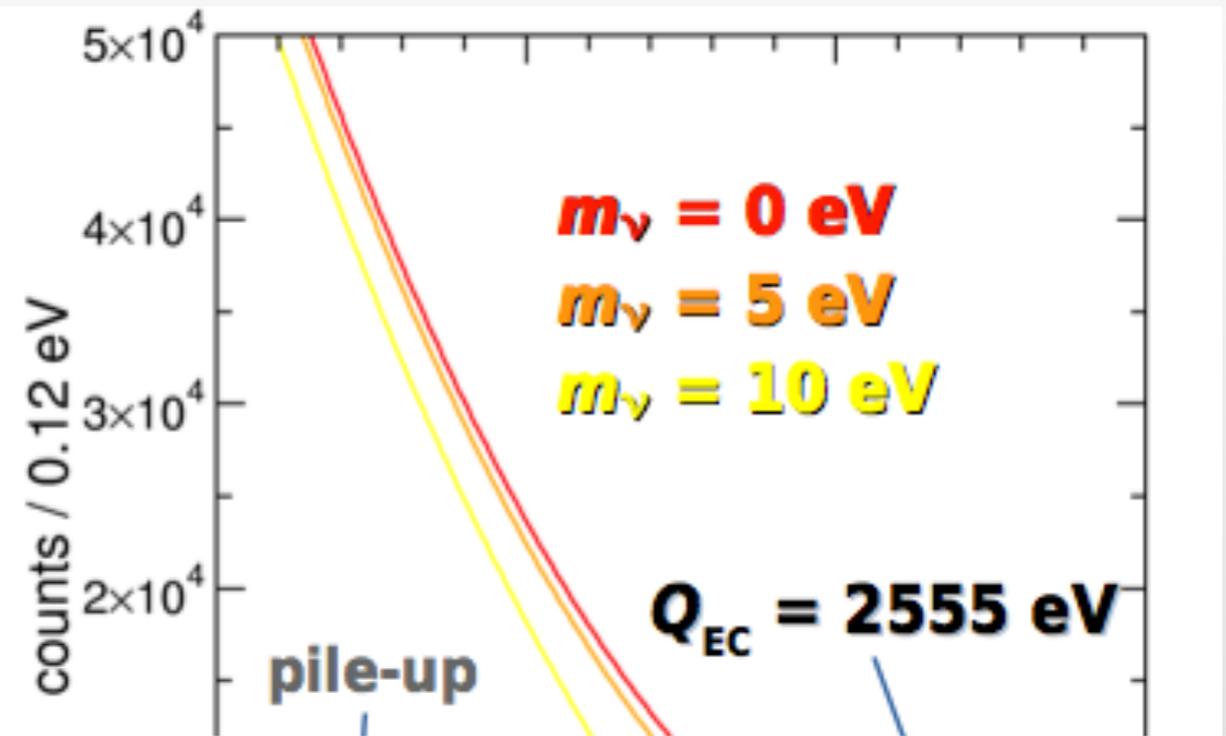
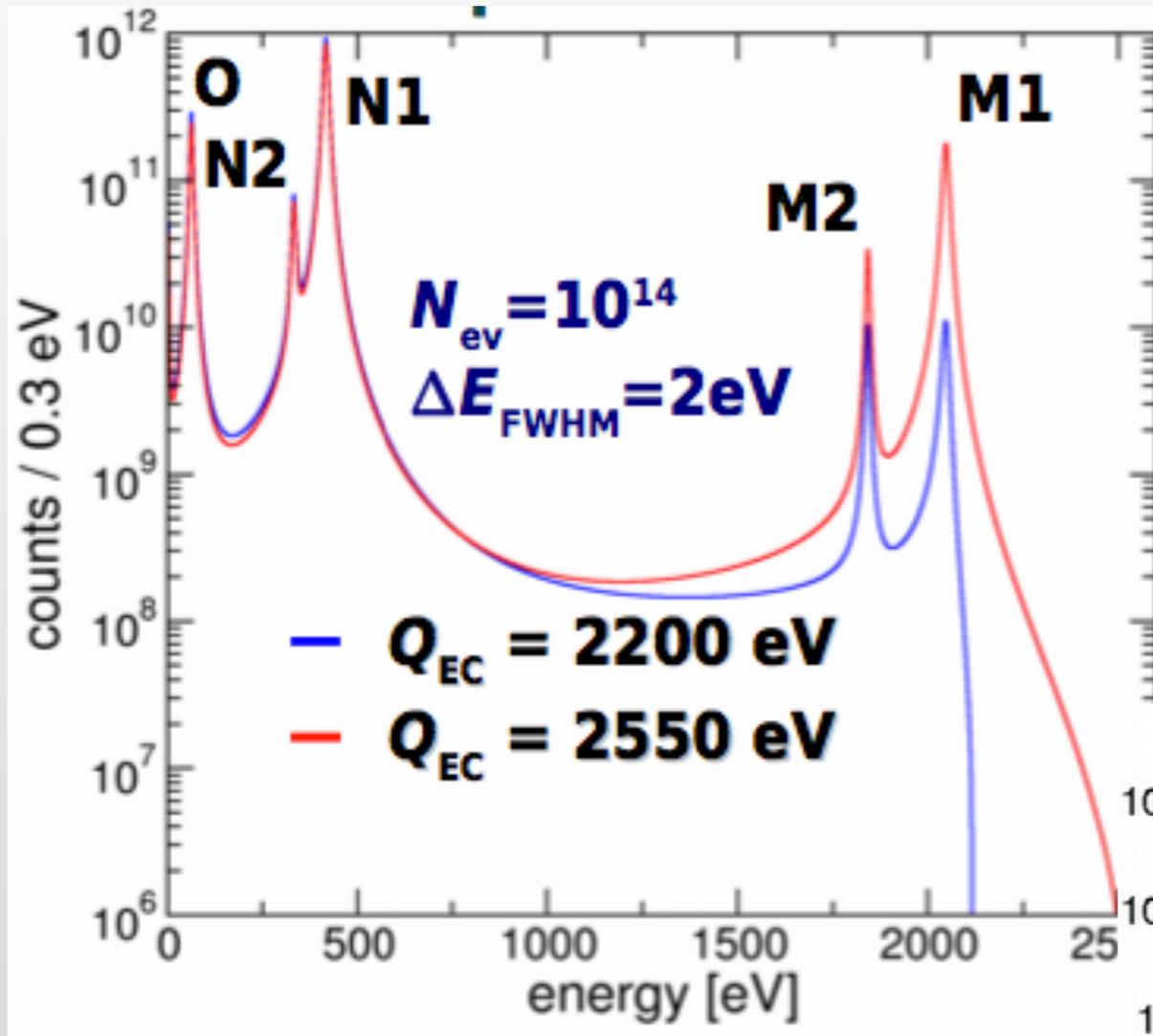
E' una **misura pilota** che vuole dimostrare:

- la **fattibilita' della misura** sul singolo array
- la **scalabilita' del progetto** (ovvero, la possibilita' di costruire molti array da misurare contemporaneamente per aumentare la statistica)

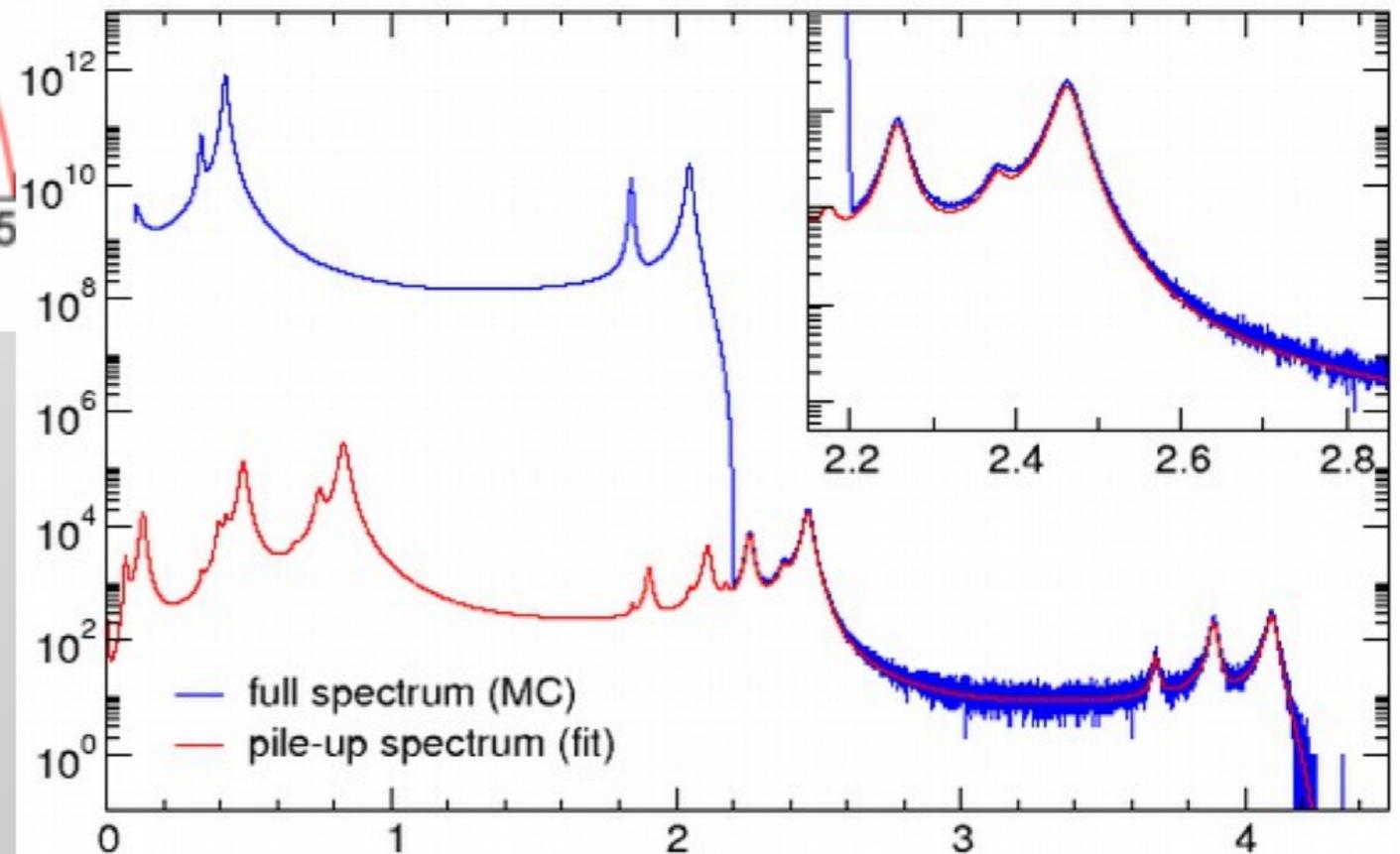
# Spettro atteso dell' $^{163}\text{Ho}$



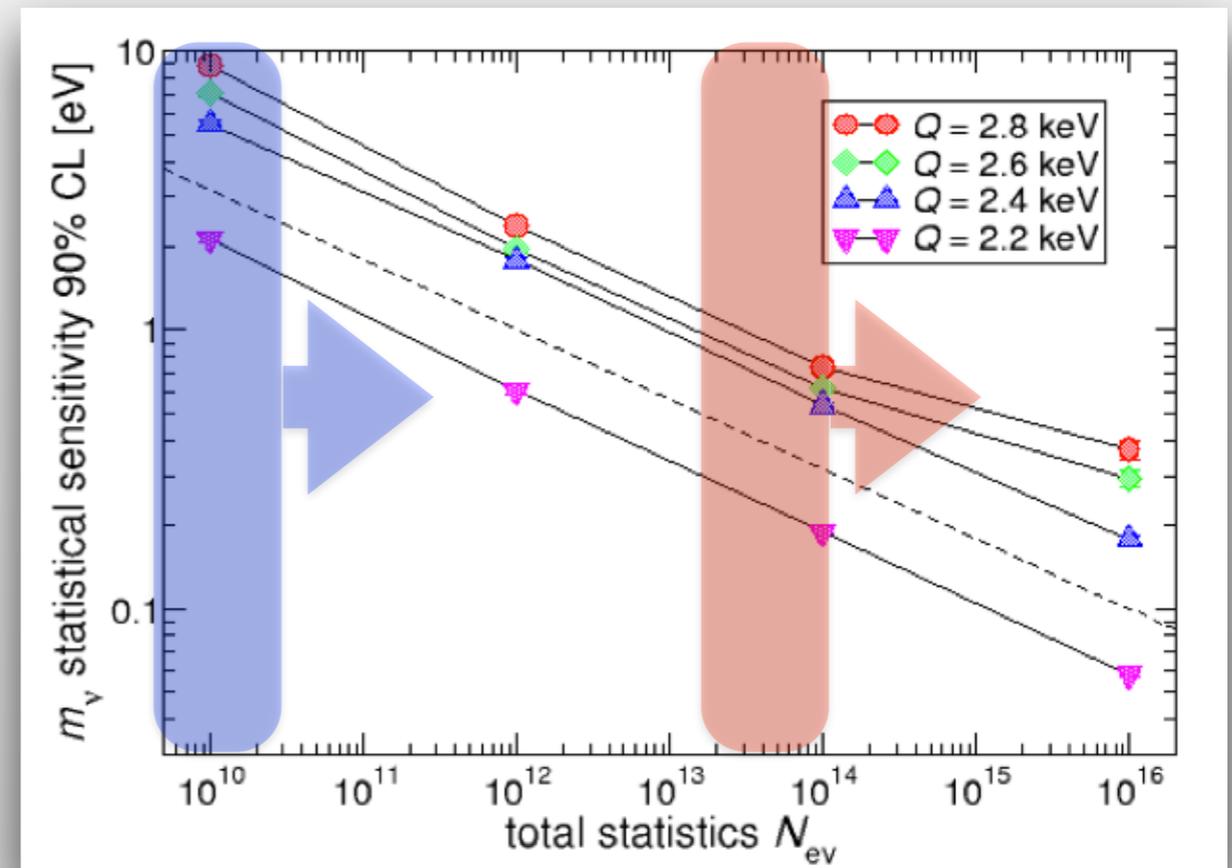
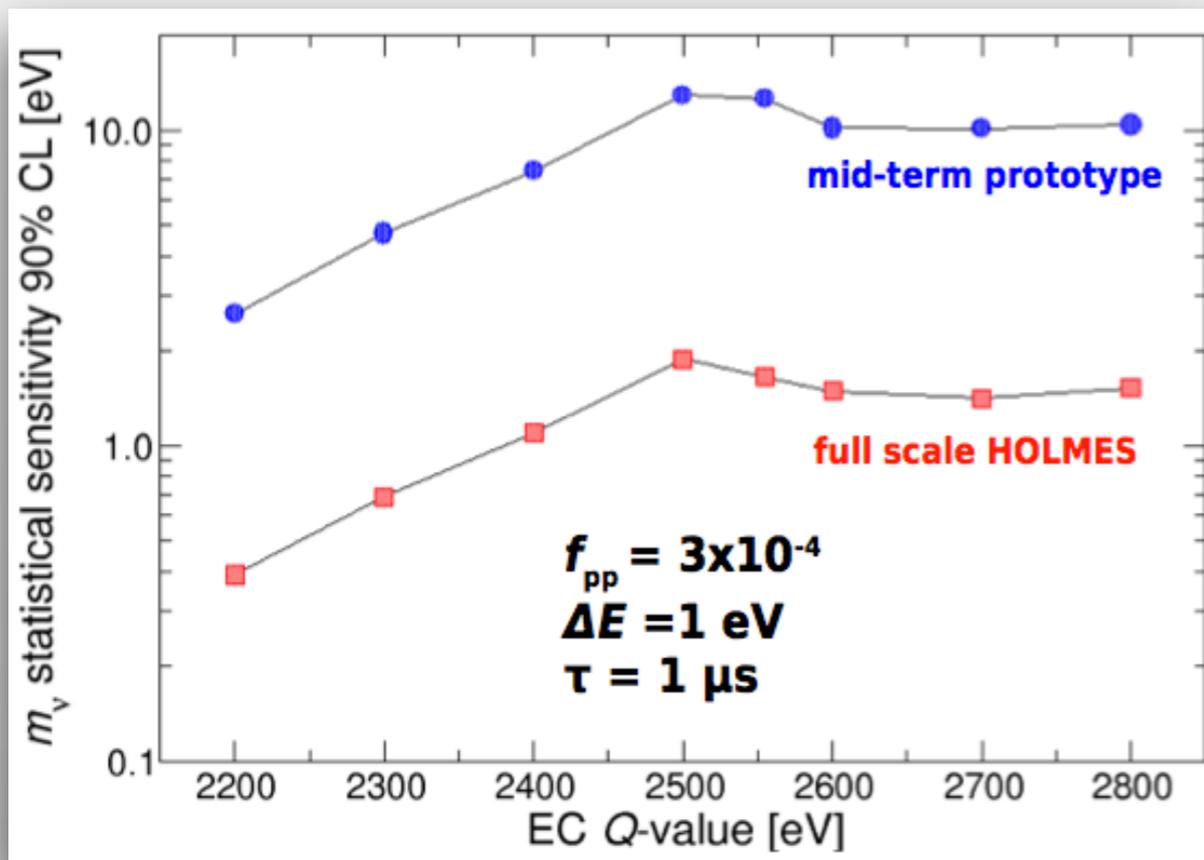
# Spettro atteso dell' $^{163}\text{Ho}$



Ma nella realtà è più complicato, a causa del pile-up (sovrapposizione di 2 o più eventi)!



# Risultati attesi



# I task di HOLMES

---

- Produzione e caratterizzazione dei singoli microcalorimetri
- Ingegnerizzazione degli array
- Produzione della sorgente di  $^{163}\text{Ho}$
- Purificazione della sorgente
- Impiantazione dell' $^{163}\text{Ho}$  nei detector e completamento
- Sviluppo readout multiplexing

**resp. Mi / NIST**

**resp. GE**

# Produzione dell' $^{163}\text{Ho}$

$^{163}\text{Ho}$  non esiste in natura, viene prodotto per attivazione neutronica di  $^{162}\text{Er}$  in reattore:

- $^{162}\text{Er} (n,\gamma) ^{163}\text{Er}$
- $^{163}\text{Er} + e^- \rightarrow ^{163}\text{Ho} + \nu_e$  ( $\tau_{1/2} \sim 75 \text{ m}$ )
- alto yield  $\sim 3 \times 10^{12}$   $^{163}\text{Ho}$  nuclei/  
mg( $^{162}\text{Er}$ )/h

Tm 163 1.81 h	Tm 164 5.1 m   2.0 m	Tm 165 30.06 h	Tm 166 7.70 h	Tm 167 9.25 d	Tm 168 93.1 d
Er 162 0.139	Er 163 75 m	Er 164 1.601	Er 165 10.3 h	Er 166 33.503	Er 167 2.3 s   22.869
Ho 161 6.7 s   2.5 h	Ho 162 68 m   15 m	Ho 163 1.1 s   4570 a	Ho 164 37 m   29 m	Ho 165 100	Ho 166 1200 a   26.80 h
Dy 160 2.329	Dy 161 18.889	Dy 162 25.475	Dy 163 24.896	Dy 164 28.260	Dy 165 1.3 m   2.35 h
Tb 159	Tb 160	Tb 161	Tb 162	Tb 163	Tb 164

Ma ci sono contaminazioni provenienti da altre specie:

- $^{165}\text{Ho} (n,\gamma) ^{166m}\text{Ho}$  ( $\beta$ ,  $\tau_{1/2} \sim 1200$  anni)
- da contaminazioni di  $^{165}\text{Ho}$  oppure  $^{164}\text{Er} (n,\gamma)$
- processo di purificazione e selezione del campione in modo da eliminare specie contaminanti che possono generare fondo nella misura
- fondamentale ridurre al minimo il contributo di  $^{166m}\text{Ho}$

# Purificazione dell' $^{163}\text{Ho}$

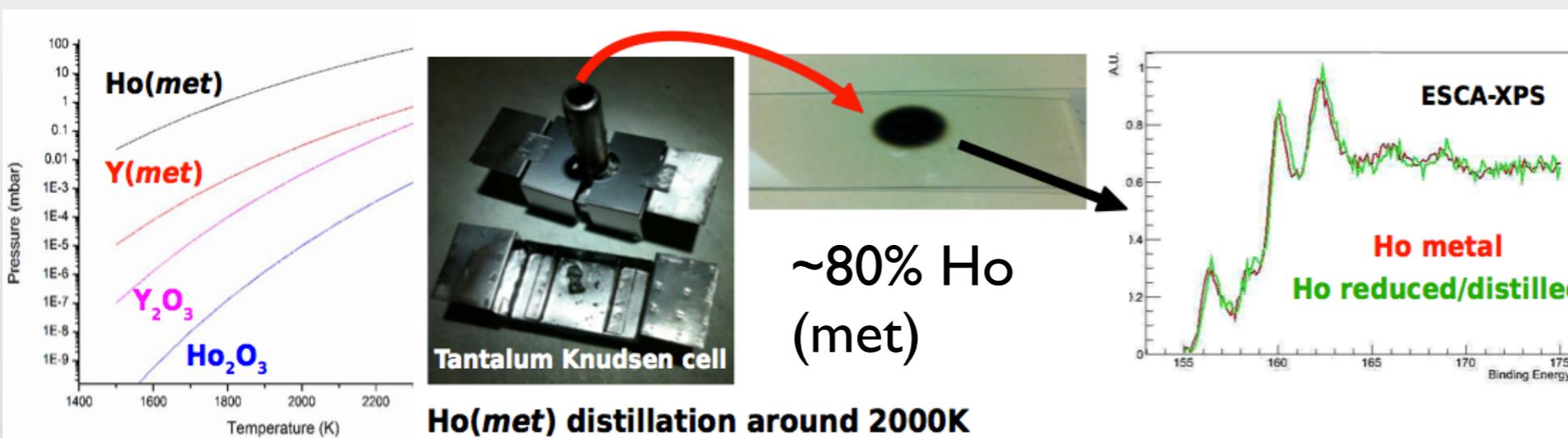
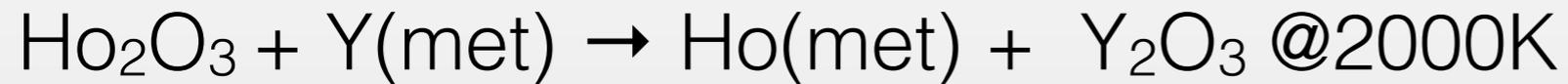
---

La separazione dell'Ho da altri contaminanti procede in piu' passaggi:

- **purificazione radiochimica** (prima/dopo il processo di attivazione)
  - permette di separare tutto cio' che non e' Ho, non ha effetti sugli isotopi (es.  $^{166m}\text{Ho}$ )
  - collaborazione con Paul Scherrer Institute
- **“distillazione” dell' $^{163}\text{Ho}$** 
  - $^{163}\text{Ho}$  dopo purificazione è in forma ossidata, necessario in forma metallica per essere utilizzato nello spettrometro
- **separazione in massa con spettrometro magnetico**
  - fondamentale per eliminare  $^{166m}\text{Ho}$
  - sviluppo di linea di fascio a bassa energia (50keV) permette di impiantare nuclei nell'assorbire

# Distillazione dell' $^{163}\text{Ho}$

La termo riduzione di  $\text{Ho}_2\text{O}_3$  ad alta temperatura fornisce campione metallico:



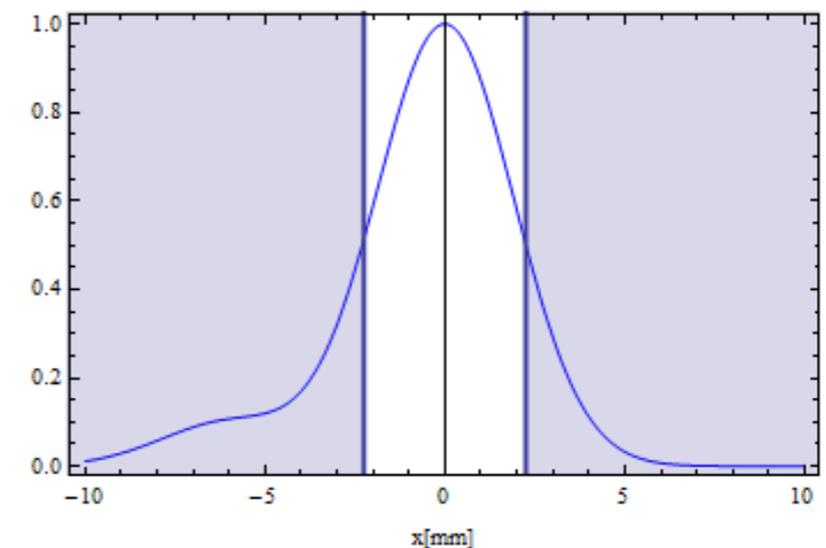
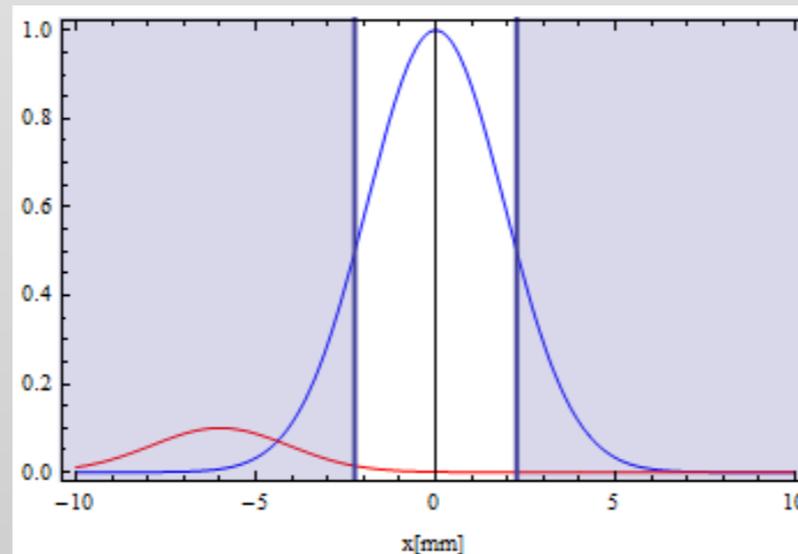
Sinterizzato con Ti - Ni - Sn per fornire disco da sputtering utile per essere utilizzato nell'impiantatore...



# Il separatore isotopico

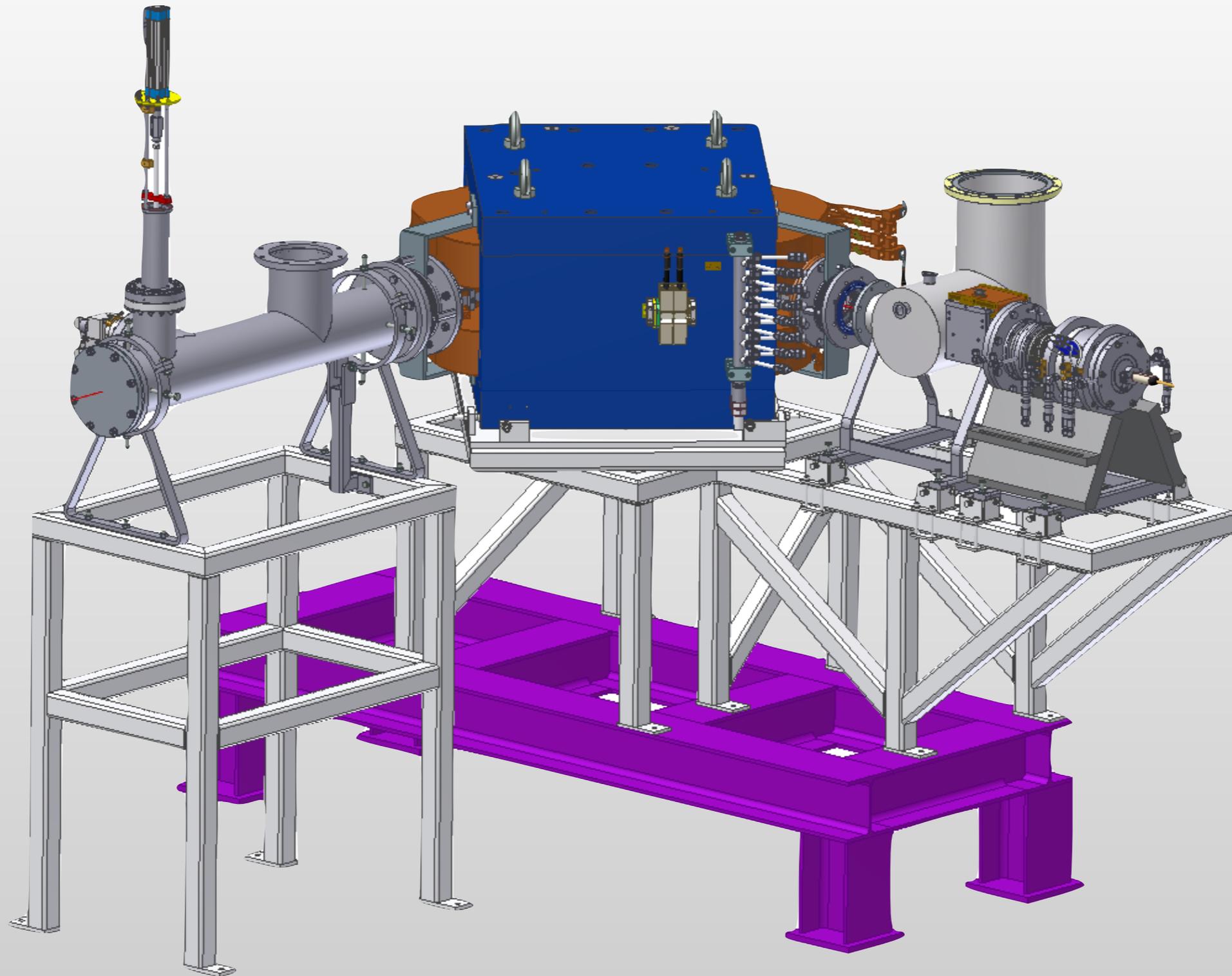
- **sorgente ionica** basata su sputtering con potenziale di accelerazione a 50kV
  - ionizza  $^{163}\text{Ho}$  in plasma d'Ar e accelera fascio
- **dipolo per analisi magnetica**
  - separa isotopi in funzione delle masse
- **camera di diagnostica e target**
  - analisi del fascio, slitte, posizionamento del target, coevaporazione di Au (la sorgente deve essere incapsulata nel micro-calorimetro)

Diametro fascio atteso circa 4.5mm FWHM alle slitte dopo magnete. Separazione fra 2 picchi masse adiacenti (es 163/162) ~ 6mm

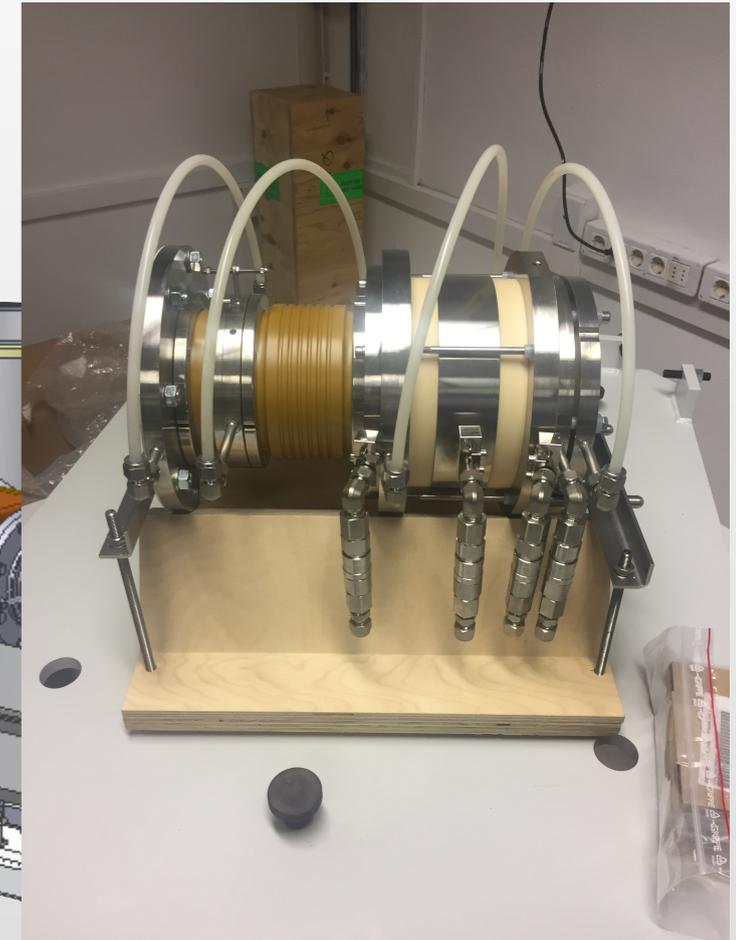
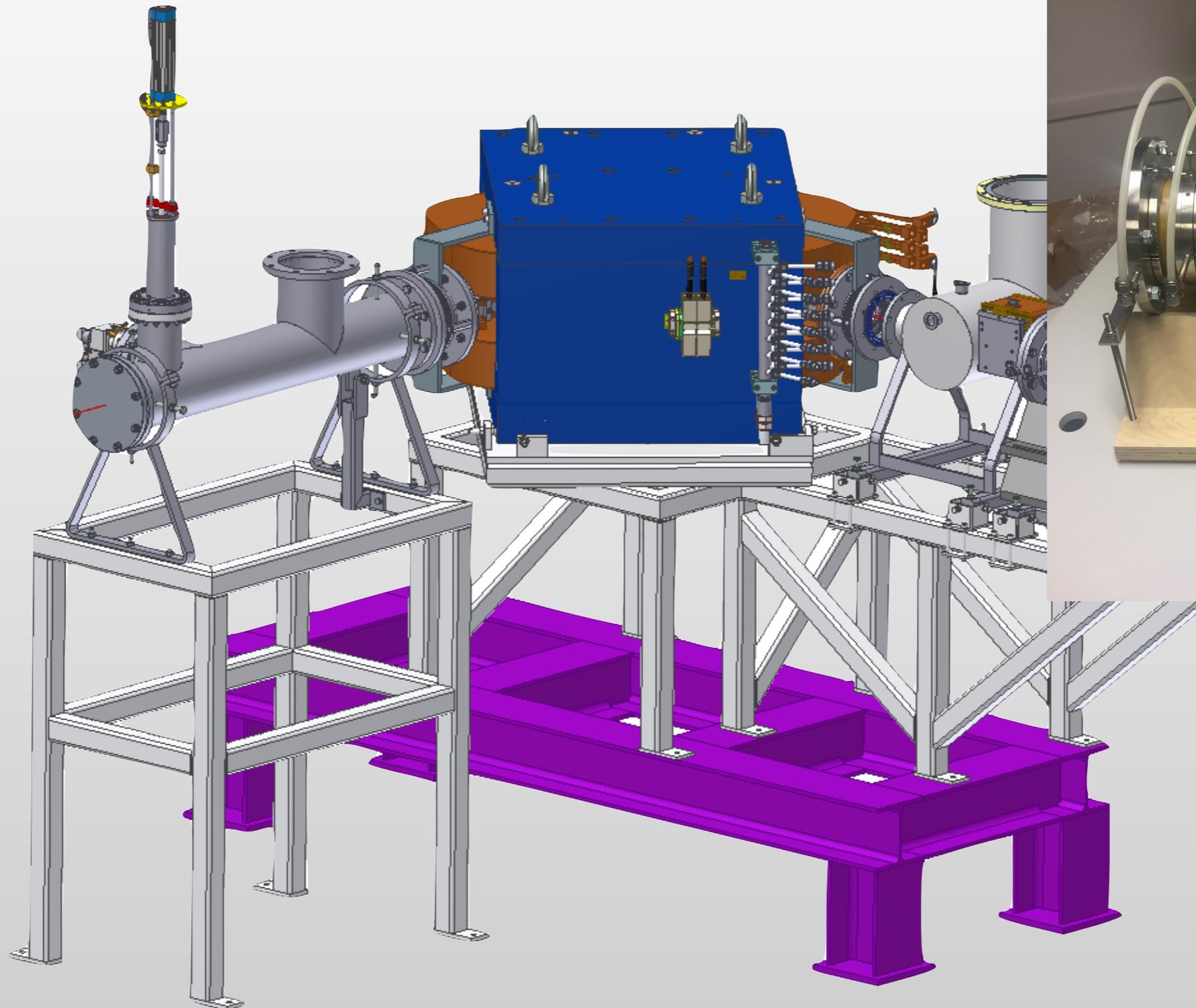


# Il separatore isotopico

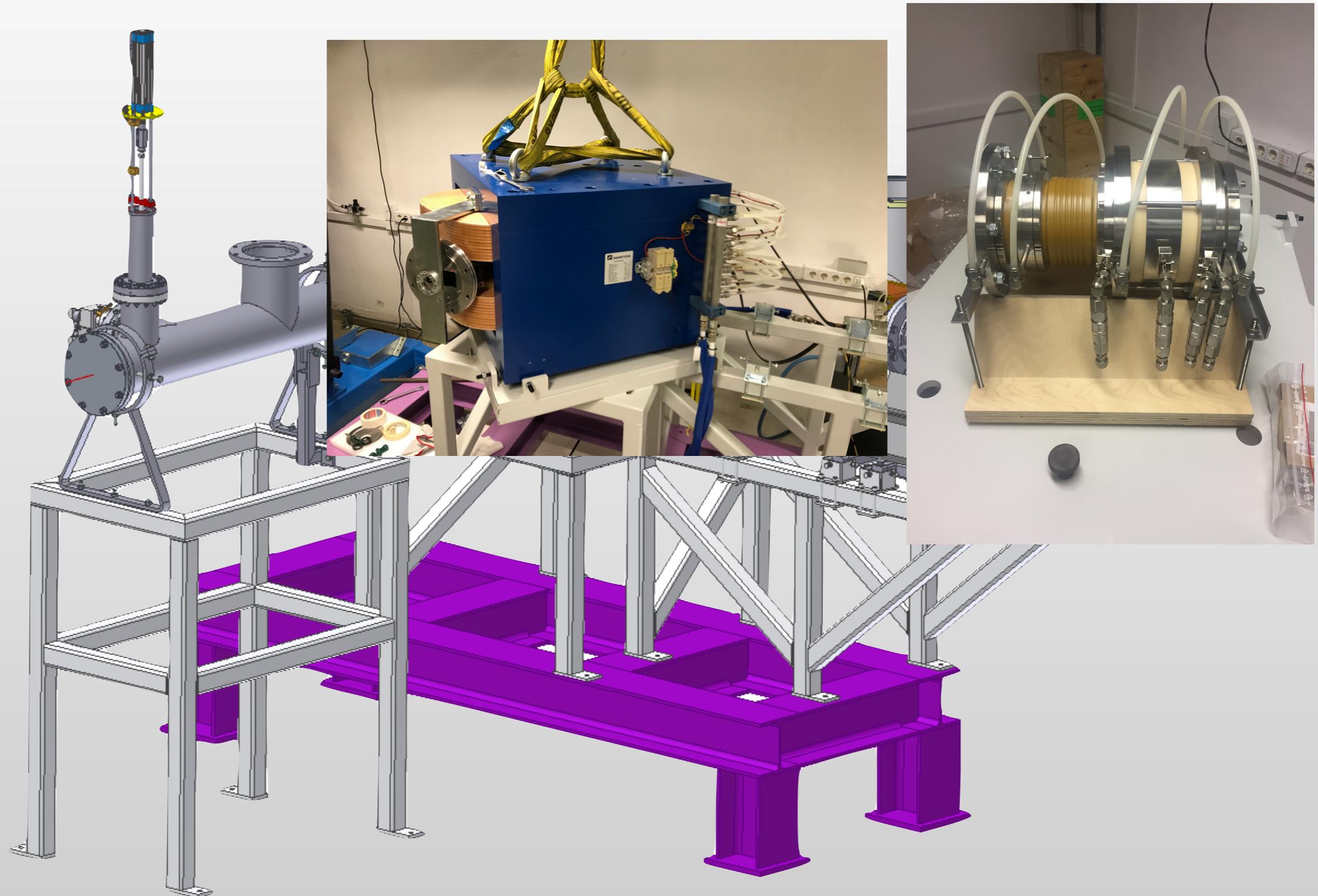
---



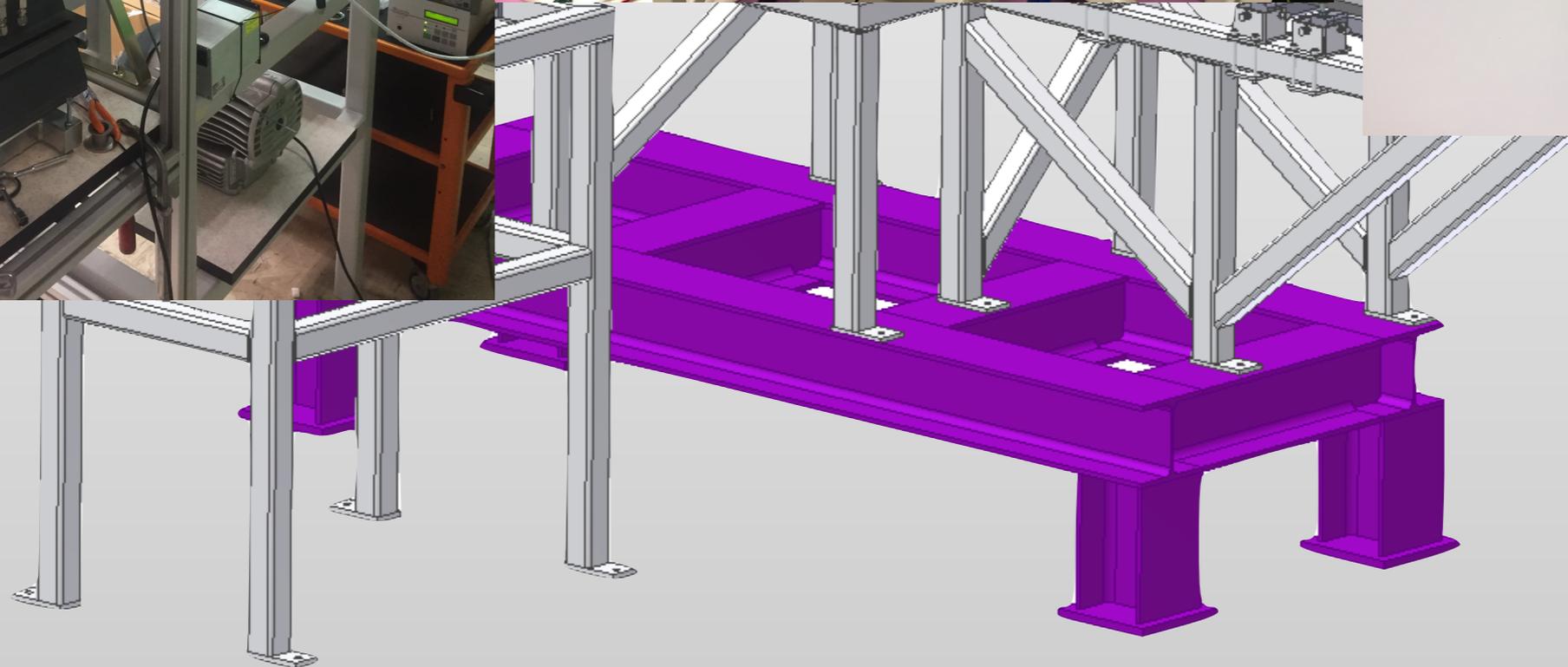
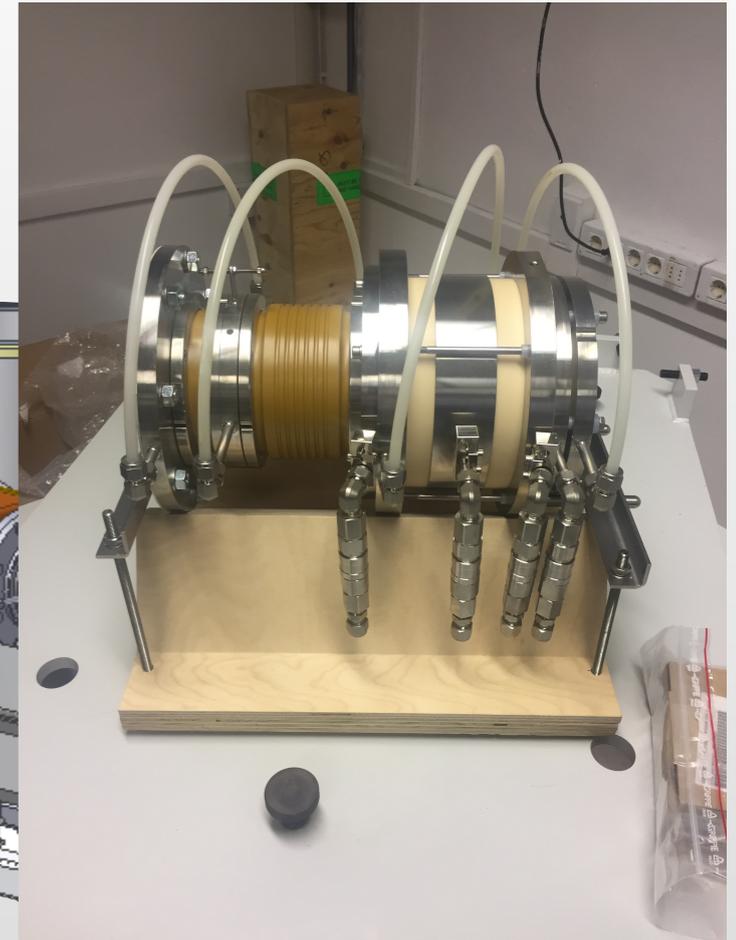
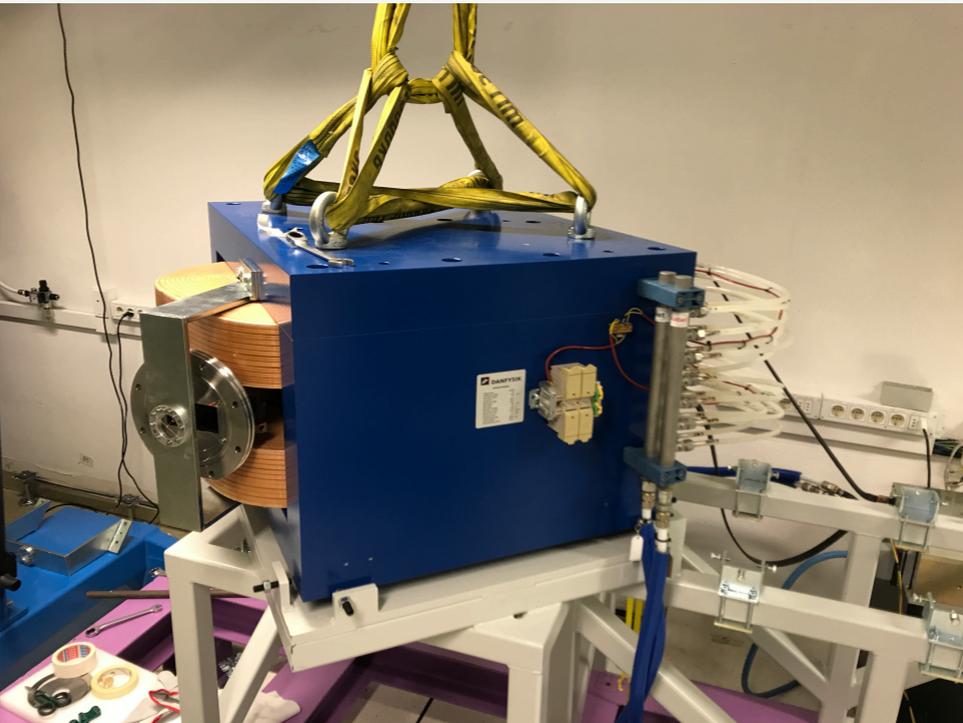
# Il separatore isotopico



# Il separatore isotopico



# Il separatore isotopico



# Attività in corso @GE

---

- L'installazione dell'impiantatore è in corso
  - Primo test di accensione della sorgente (senza HV!) su linea di fascio ridotta (senza magneti) andato a buon fine
  - Costruzione linea di fascio finale
- Ottimizzazione del processo di produzione del disco da sputtering per la sorgente ionica

Attese prime impiantazioni (con  $^{165}\text{Ho}$ , non radioattivo!) nei prossimi mesi...

# Attività in corso @GE

---

**C'e' forse luce in fondo al tunnel?**



# Grazie per l'attenzione

