

Descrizione del calorimetro LXe dell'esperimento MEG, per la ricerca della violazione del sapore leptonic

✓ studio del decadimento " $\mu \rightarrow e \gamma$ "

Corso di Fisica Nucleare e Subnucleare 2



“Paul Scherrer Institute”

Andrea Gabrielli

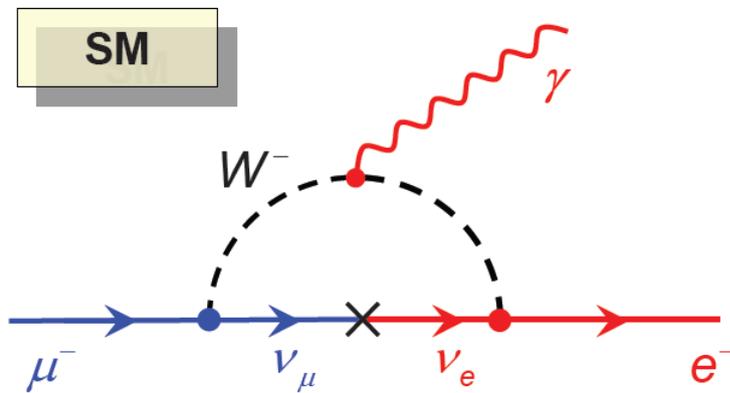
Tutors:
Cecilia Voena
Gianluca Cavoto

10 – giugno - 2010

MEG, ricerca la violazione del sapore leptonic:

✓ studio del decadimento " $\mu \rightarrow e \gamma$ "

✓ Il limite attuale del BR è 1.2×10^{-11} (esperimento MEGA 1999, @ 90% CL)



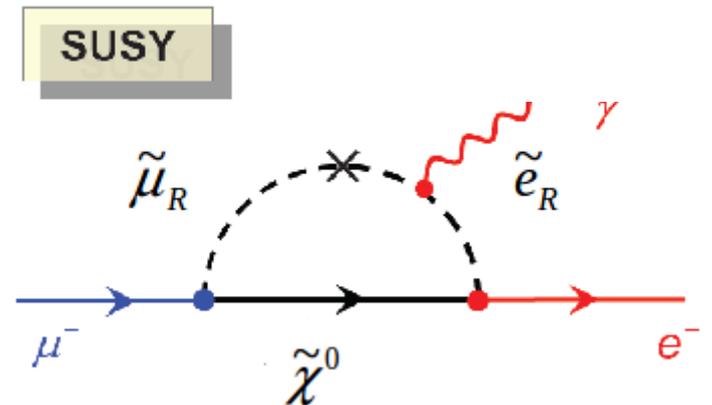
$$BR(\mu \rightarrow e \gamma) \propto \frac{\Delta m^4}{m_W^4} \sim 10^{-55}$$

Misura di questo decadimento



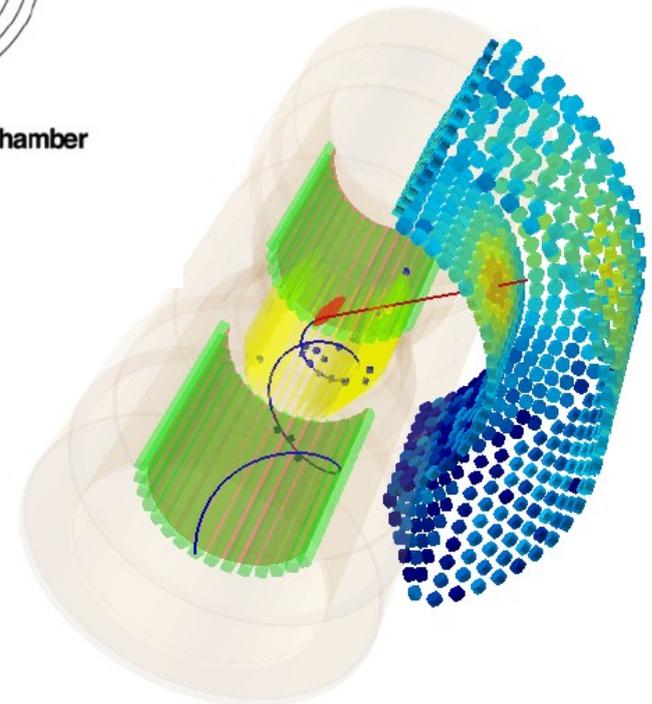
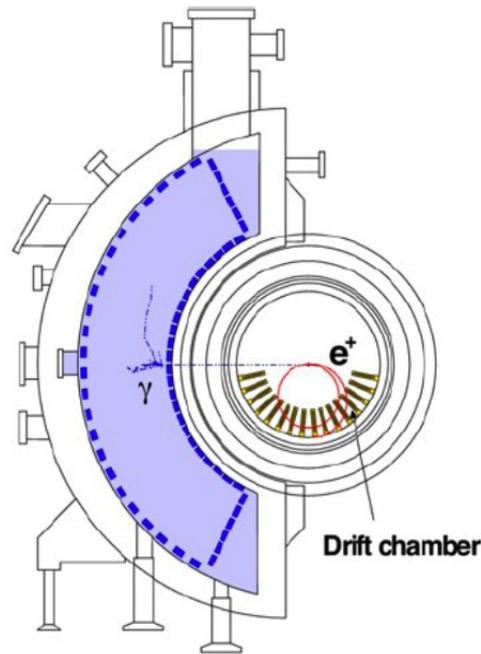
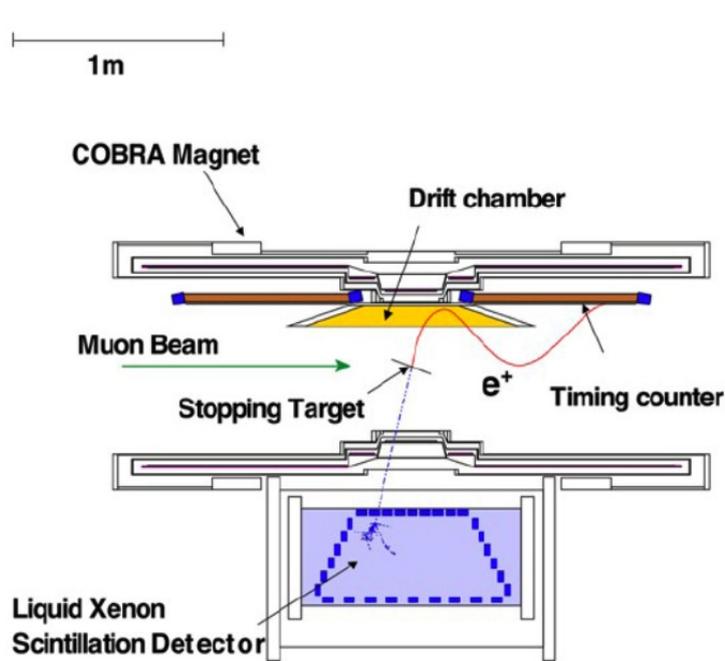
Evidenza sperimentale di nuova fisica

$m_\mu = 105.65 \text{ MeV}$
 $\tau_\mu = 2.19 \times 10^{-6} \text{ s}$
 $BR(\mu \rightarrow e \nu \bar{\nu}) \sim 1$



Diverse estensioni del MS prevedono un BR_{th} , che rientra nella sensibilità di **MEG $\sim 10^{-13}$** (**MEGA 1.2×10^{-11}**)

Struttura dell'apparato sperimentale:

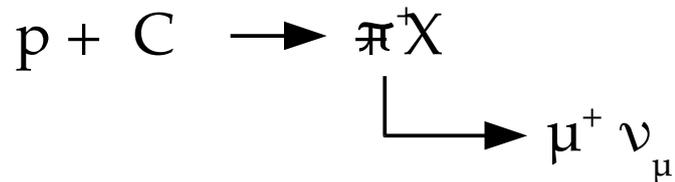


Schema esperimento:

- ✓ Fascio di μ
- ✓ Bersaglio
- ✓ Campo magnetico (COBRA)
- ✓ Camere a drift
- ✓ TC
- ✓ Calorimetro LXe

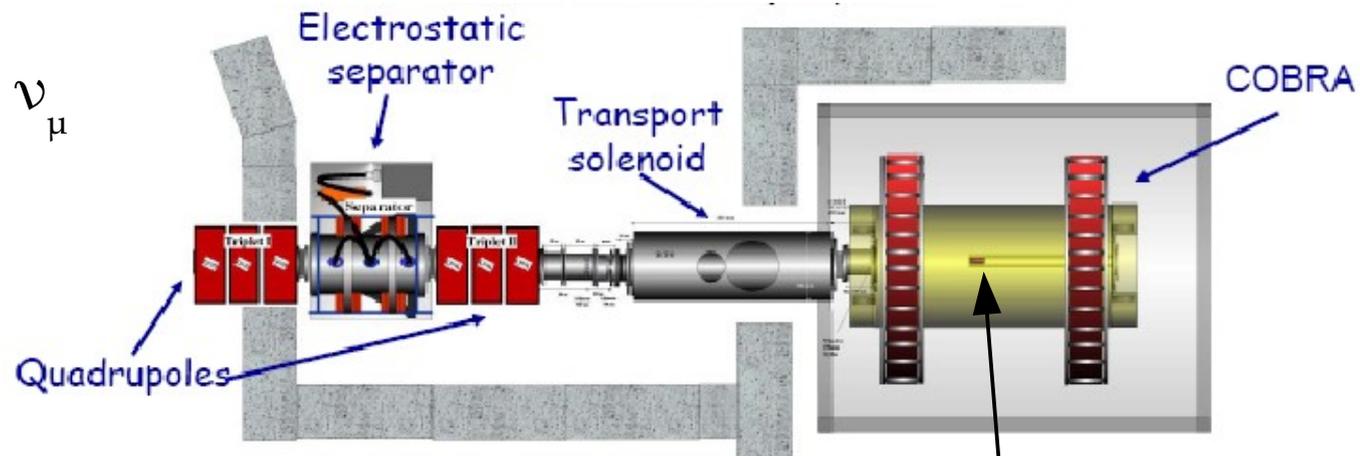
Fascio di μ e bersaglio:

Il fascio di μ si ottiene dal decadimento dei π , ottenuti da una collisione di protoni (accelerati tramite sincrotrone a 590 MeV) su un bersaglio di C ($\pi E5$).



Caratteristiche fascio:

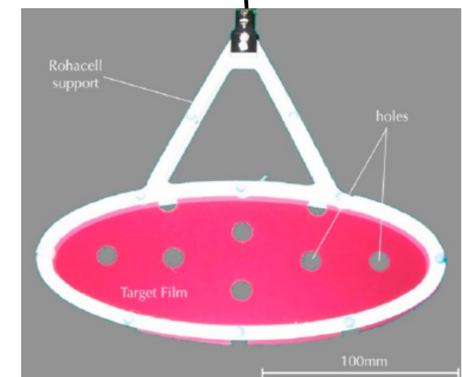
- ✓ Molto intenso $\sim 3 \times 10^7$ μ/s
- ✓ $\sigma_x \sim 9.5$ mm, $\sigma_y \sim 10.0$ mm



I μ^+ (da ~ 28 MeV) vengono fermati nella targhetta di CH_2 (polietilene) e **decadono fermi**

Vengono utilizzati i μ^+ , perchè i μ^- possono essere catturati dal nucleo

(exp. di Conversi-Paccini-Piccioni 1945)



(210 x 70 x 0.175) mm

Decadimento del μ :

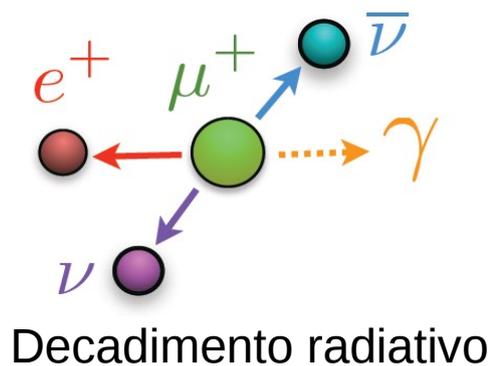
Il μ decade in quiete tramite un processo a due corpi:

Vincoli della cinematica:

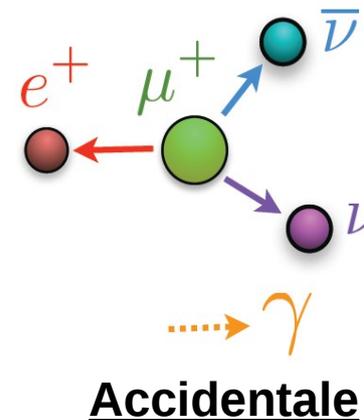
- ✓ $E_\gamma = E_e = 52.8 \text{ MeV} = m_\mu / 2$ ($m_e = 0$)
- ✓ Prodotti simultaneamente $\Delta t_{e\gamma} = 0$
- ✓ $\theta_{e\gamma} = \pi$



Eventi di fondo:



+



Si associa un γ ad un e^+ appartenenti a due decadimenti diversi (costituisce la maggior parte degli eventi di fondo)

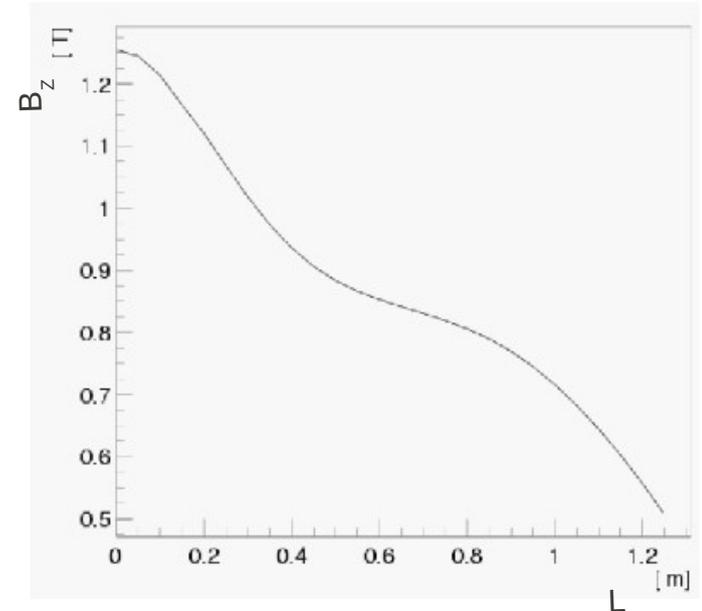
✓ Per distinguere il segnale dal fondo è necessario avere ottime risoluzioni

Constant Bending Radius magnet:

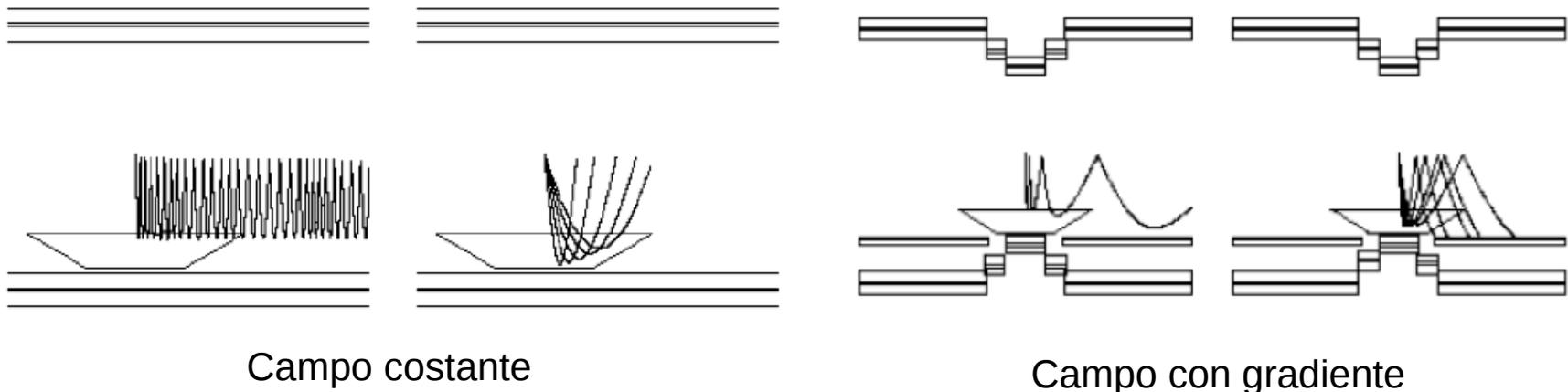
Campo magnetico non costante lungo l'asse z

I vantaggi principali sono:

- ✓ **Raggio di curvatura indipendente dall'angolo di emissione (dipendenza solo dall'impulso del e^+)**
- ✓ **Il e^+ viene "espulso prima"**



Confronto della traiettoria del positrone con due campi magnetici differenti:



Rilevamento del positrone:

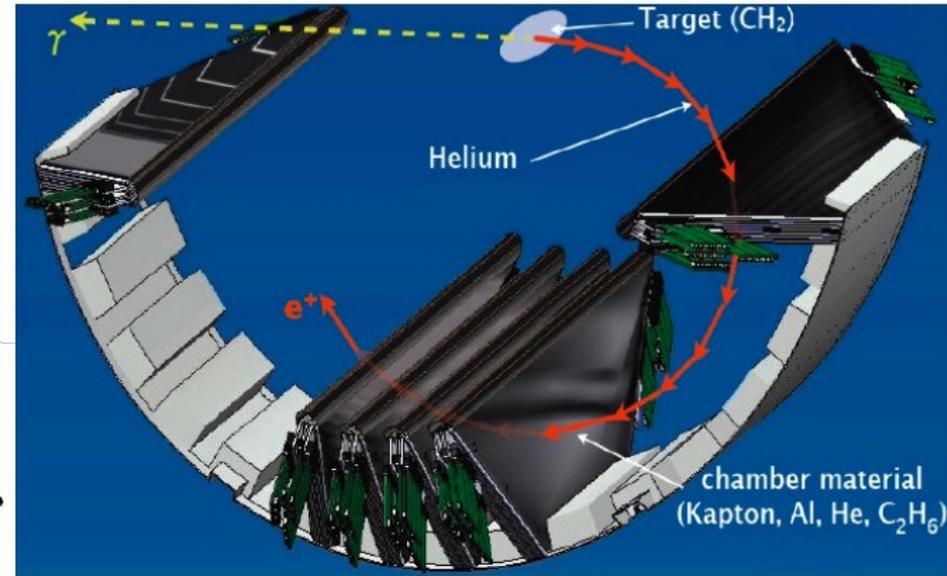
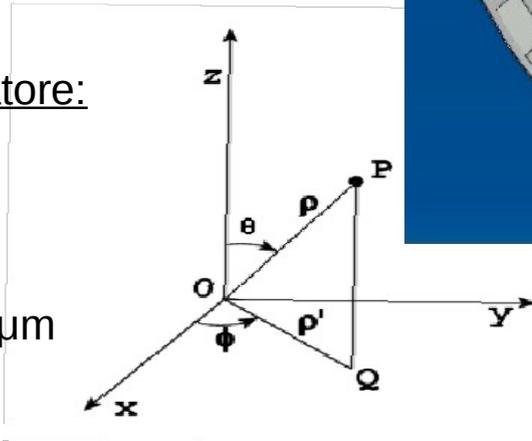
✓ misura della traccia e dell'istante di produzione

✓ La traccia del positrone viene misurata tramite 16 camere a drift

- ✓ Immerse in atmosfera di He
- ✓ 50 % He, 50 % C₂H₆
- ✓ Bassa massa (0.002*X₀)

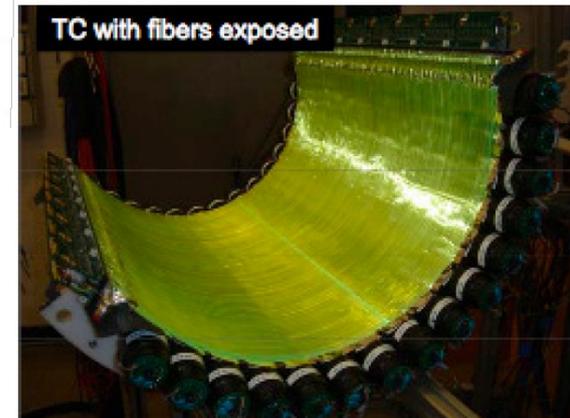
Accettanza e risoluzione del rivelatore:

- ✓ $\cos|\theta| < 0.35$
- ✓ $|\varphi| < 60^\circ$
- ✓ Risoluzione radiale $\sigma_R \sim 100 \mu\text{m}$
- ✓ Risoluzione longitudinale $\sigma_z \sim 200 \mu\text{m}$



✓ Il tempo di produzione viene misurato dal TC: (barre e fibre di scintillazione)

$$t^* = t_0 - \frac{l_{traccia}}{c} \quad (t_0 \text{ istante in cui il positrone viene misurato dal TC, } t^* \text{ istante in cui viene prodotto})$$



- ✓ Risoluzione temporale: $\sigma_{t_0} \sim 60 \text{ ps}$, $\sigma_{t^*} \sim 110 \text{ ps}$

Calorimetro LXe:

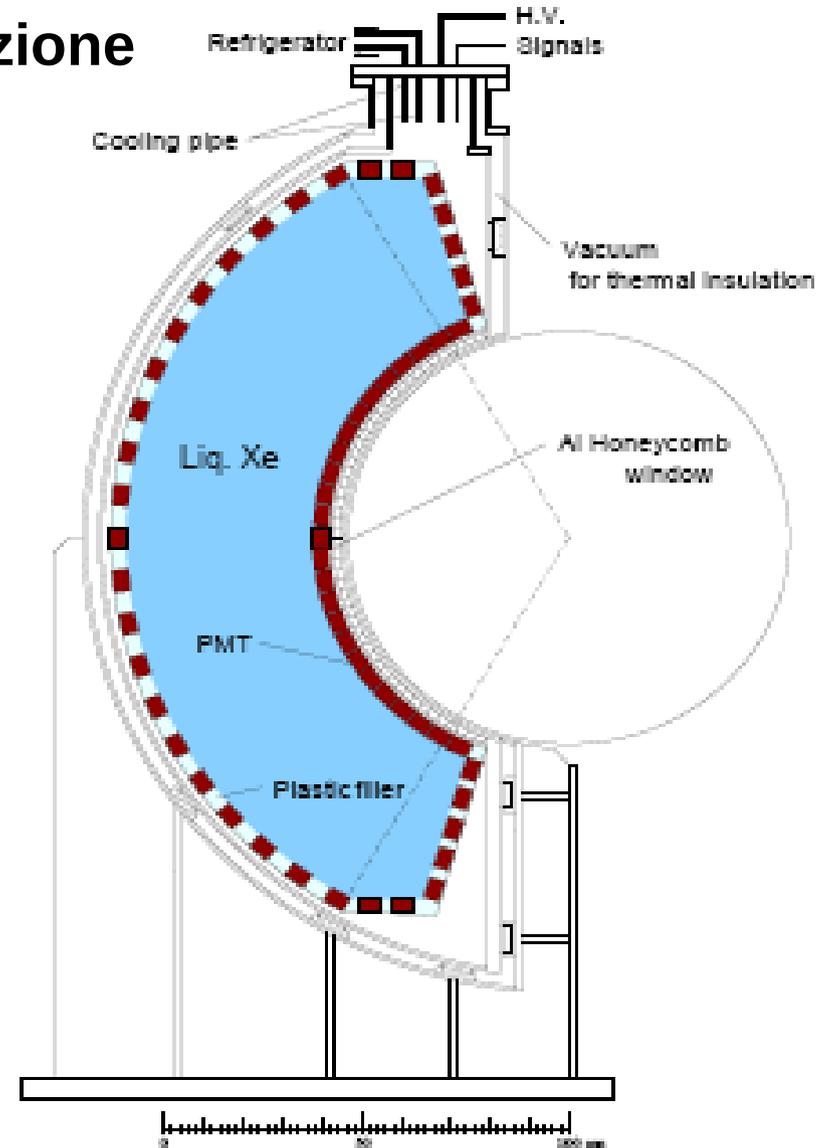
- ✓ Misura dell'energia, tempo e punto di conversione del γ

Il calorimetro LXe è la grande innovazione dell'esperimento MEG:

- ✓ È uno dei calorimetri, a gas raro, più grandi al mondo (900 lt)
- ✓ Ha una struttura a forma di "C", in modo tale da massimizzare l'angolo solido (~10%)
- ✓ Efficienza fotone 63%

Prestazioni:

- ✓ $\sigma_{t_\gamma} \sim 45$ ps
- ✓ $\sigma_{E_\gamma} \sim 1.95\%$
- ✓ $\sigma_x \sim 5-6$ mm



Proprietà LXe:

Perchè lo Xenon?

- ✓ $Z = 54$ (alta densità \rightarrow calorimetro compatto)
- ✓ Alto # di fotoni di scintillazione ($\sim 40k \gamma/\text{MeV}$)
- ✓ Tempi di risposta molto brevi

Problemi legati allo Xenon liquido:

- ✓ $T \sim 165 \text{ K}$ (-108° C)
- ✓ Emette luce UV (178 nm)
- ✓ Purezza del liquido

	Ar	Kr	Xe
$\rho(g/cm^3)$	1.39	2.45	2.98
Z	18	36	54
$\lambda_{scint}(nm)$	128	147	178
Boiling T(K)	87.3	119.9	167.1
dE/dx (m.i.p.) (MeV/cm)	2.11	3.45	3.89
$X_0(cm)$	14.0	4.76	2.87
Moliere radius (cm)	7.3	4.7	4.1
$\tau_1(ns)$	6	2	4
$\tau_3(ns)$	1000	91	22
$\tau_r(ns)$	-	-	45

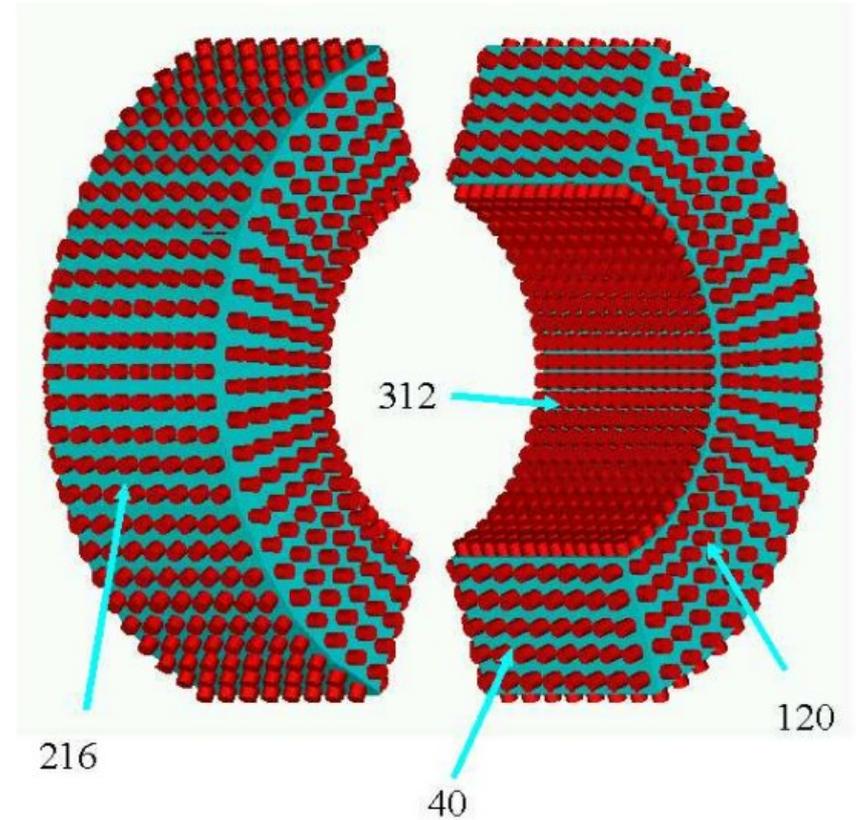
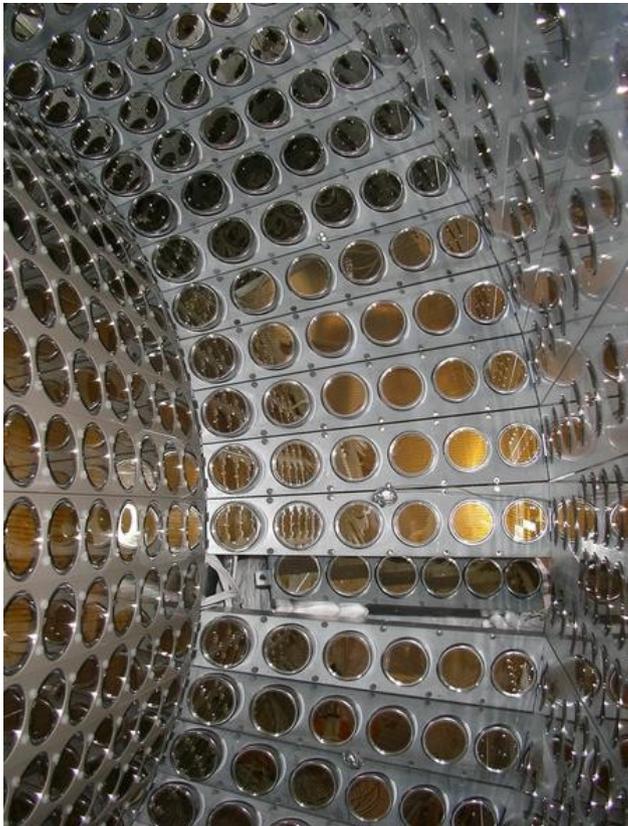
Per risolvere questi problemi servono:

- ✓ Impianto di raffreddamento
- ✓ Bisogna "costruire" PMTs idonei a quelle temperature e a quelle lunghezze d'onda
- ✓ Controllare la purezza dello Xe (il contaminante principale è l'acqua che assorbe nella regione UV)

PMTs:

Requisiti dei PMTs:

- ✓ Sensibili nella regione UV (~178 nm)
- ✓ Devono lavorare a temperature basse



Nel calorimetro LXe sono stati utilizzati 846 PMTs.

Caratteristiche:

- ✓ QE ~ 15% (misurata tramite sorgenti α)
- ✓ Guadagno ~ 10^6 (misurato tramite LEDs)

Contaminazione del LXe:

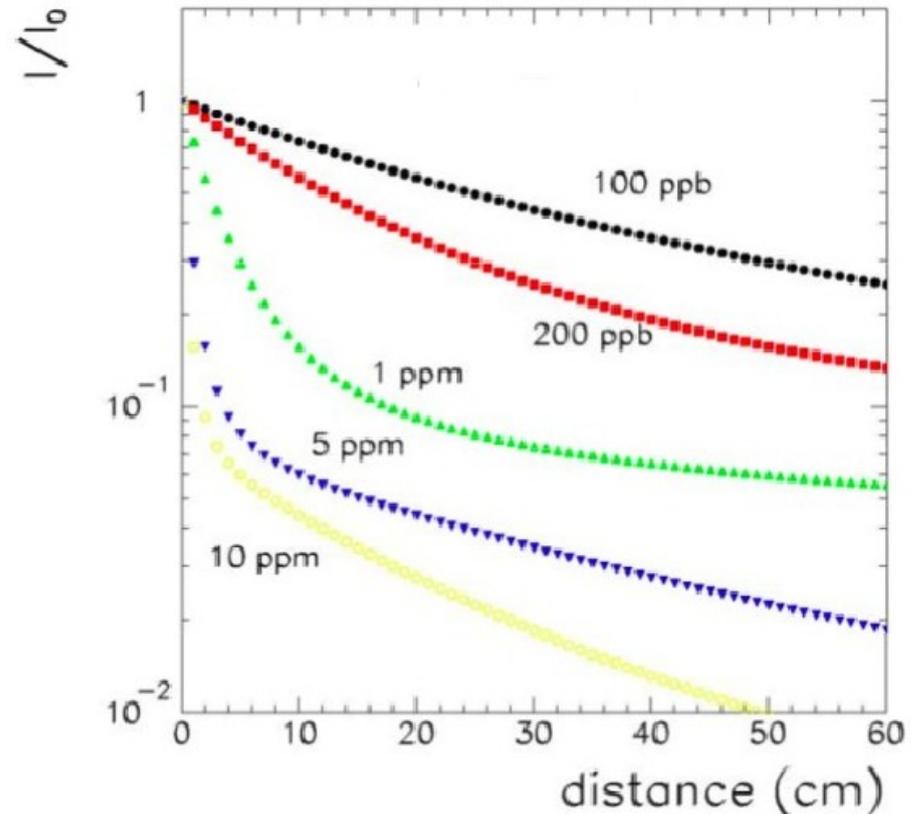
✓ L'intensità del segnale nel LXe in funzione della distanza è data da:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}, \quad \mu = \frac{1}{\lambda_{att}} = \frac{1}{\lambda_{abs}} + \frac{1}{\lambda_{diff}}$$

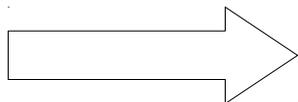
λ_{abs} = lunghezza di assorbimento (>3m)

λ_{diff} = lunghezza di diffusione (~45 cm)

Absorption in H₂O-doped Xe



✓ La presenza di acqua può influire nella risoluzione della misura.



Occorre un impianto di purificazione del LXe

Energia del γ :

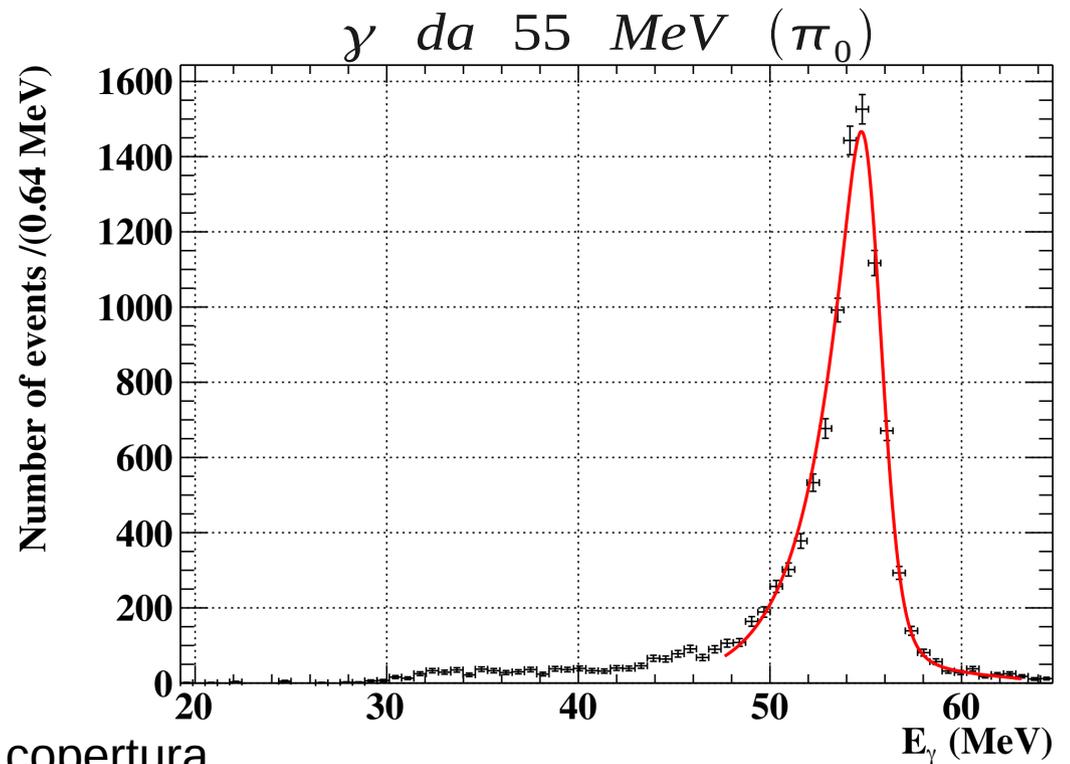
Per misurare l'energia del γ si utilizza il Metodo Q-sum:

$$E_{QSum} = \sum_i c_i Q_i$$

Somma **pesata** delle cariche accumulate nei fototubi

$$c_i = f(g_i, q e_i, w_i)$$

Guadagno Q.E. Correzione copertura
angolare dei PMTs



✓ **Risoluzione:** $\sigma_E \sim 2.0\%$

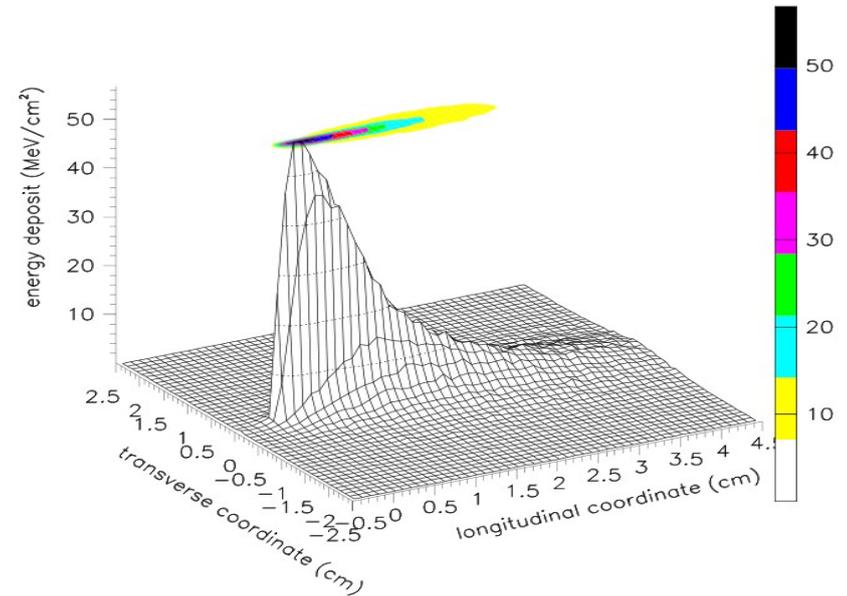
Punto di conversione del γ :

✓ **Misura del punto di conversione:**

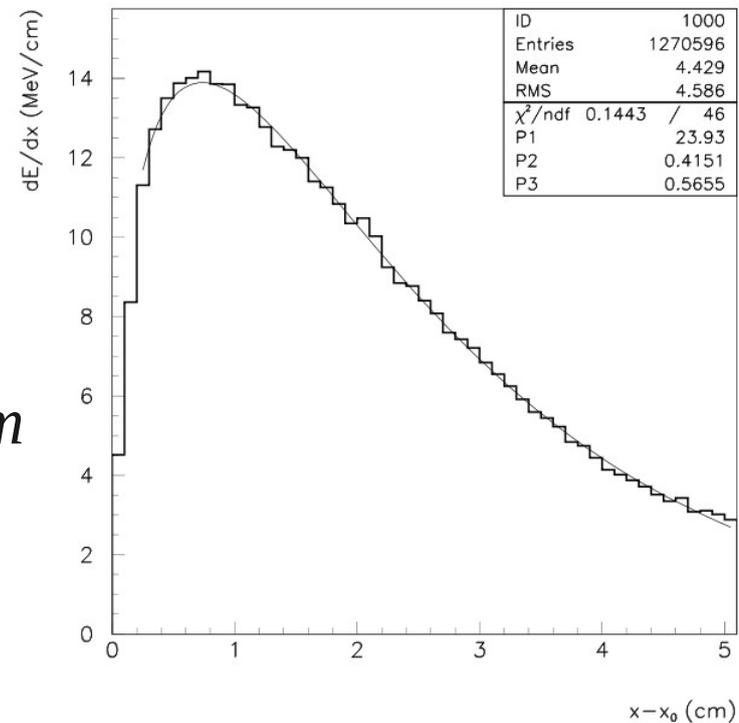
$$\bar{x} = \sum_i \frac{x_i Q_i}{Q_i}$$

$$\bar{y} = \sum_i \frac{y_i Q_i}{Q_i}$$

$$\bar{z} = \sum_i \frac{z_i Q_i}{Q_i}$$



Longitudinal shower profile



✓ **Risoluzione:** $\sigma_{xy} \sim 5 \text{ mm}$ $\sigma_{depth} \sim 6 \text{ mm}$

Istante di conversione del γ :

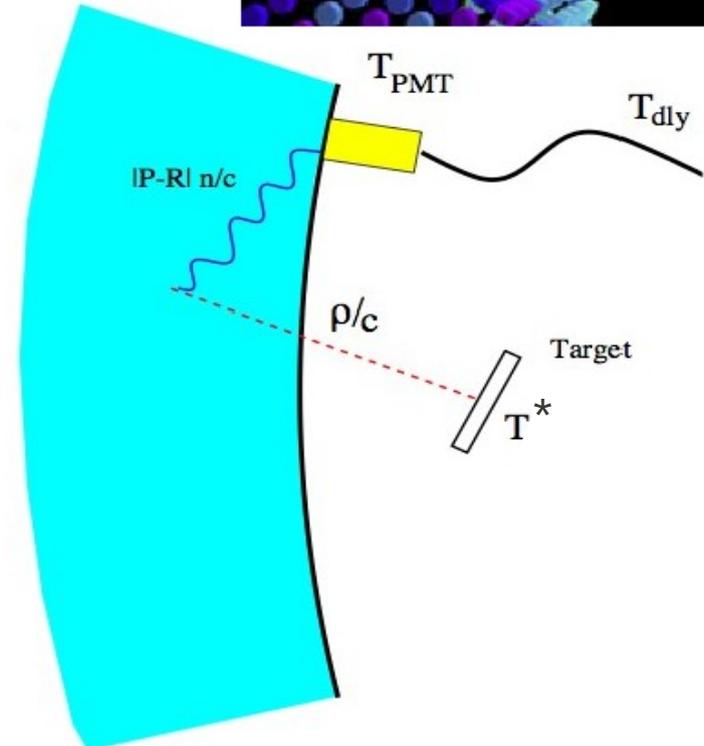
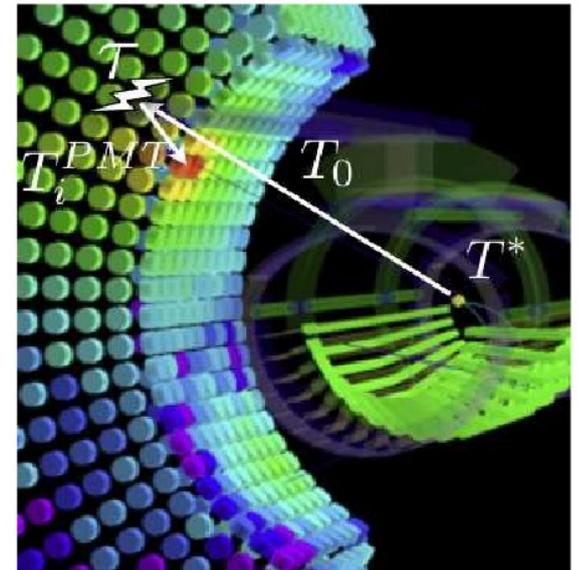
✓ L'istante di conversione del fotone (t_0)
viene misurato tramite algoritmo, in cui si tiene conto del tempo di risposta dell'elettronica e del cammino fatto dai fotoni di scintillazione

✓ Una volta noto t_0 si può ricavare t^* :

$$t^* = t_0 - \frac{\rho}{c}$$

$$\sigma_{t_0} \sim 45 \text{ ps}, \quad \sigma_{t^*} \sim 75 \text{ ps}$$

✓ Bisogna poi confrontare t^* del fotone con il t^* del positrone (le due particelle sono prodotte simultaneamente)



Errore su T*:

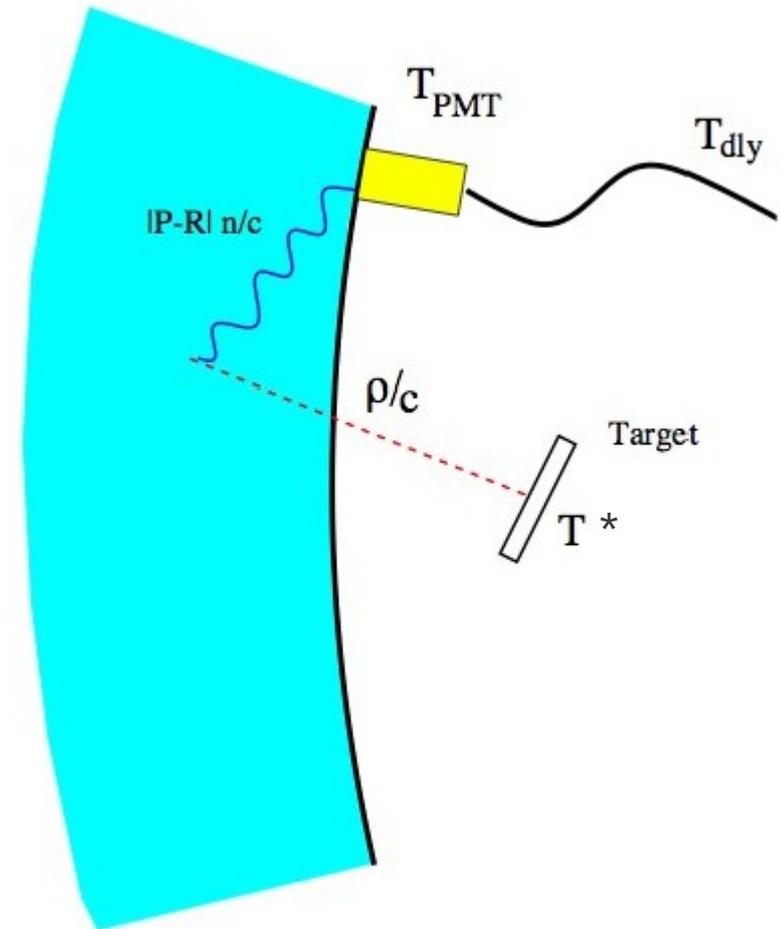
$$T^* = T_0 - \underbrace{\frac{\rho}{c}}_{\text{tempo di volo}}$$

ρ = distanza tra il punto di conversione e il punto di produzione del fotone

Il punto di produzione del fotone nella targhetta (uguale al punto di produzione del positrone), viene determinato ricostruendo la traccia del positrone.

L'errore complessivo sul tempo di produzione sarà:

$$\sigma_{T^*} = \sqrt{\underbrace{\sigma_{T_0} + \sigma_{p^*}}_{45^2 \text{ ps}^2} \oplus \underbrace{\sigma_{p^0}}_{60^2 \text{ ps}^2}} = 75 \text{ ps}$$



p^* = punto di produzione del fotone

p^0 = punto di conversione

Calibrazione del calorimetro:

Per mantenere elevate le prestazioni del calorimetro è necessario calibrarlo e monitorare il LXe.

Le tecniche utilizzate sono:

- ✓ **LED**
- ✓ **Sorgenti di particelle α**
- ✓ **Acceleratore Cockcroft-Walton**
- ✓ **Reazione di scambio carica**

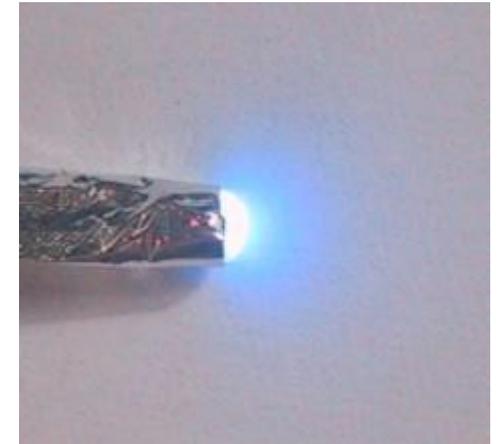
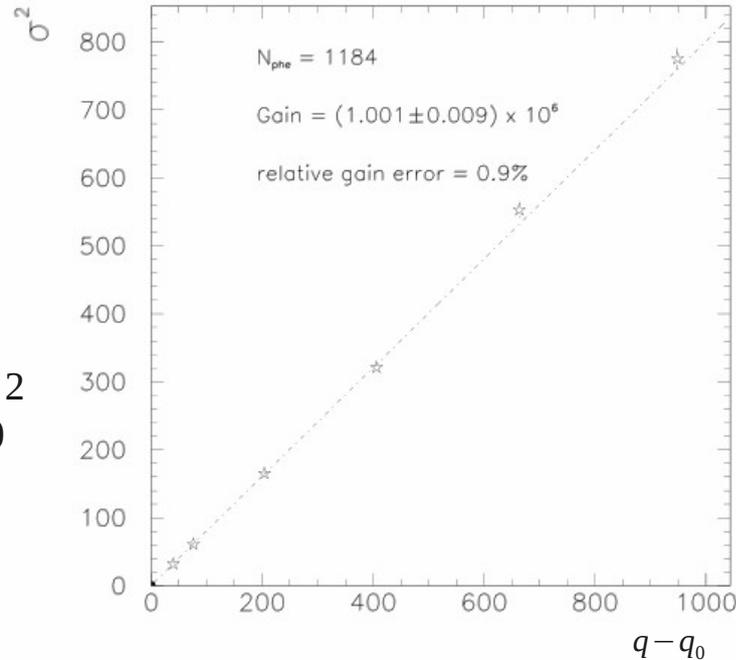
LED e sorgenti α :

Guadagno dei PMTs misurato tramite luce LED (posizionati sulle pareti del calorimetro)

$$q = gN + q_0$$

$$\sigma^2 = g^2 N + \sigma_0^2$$

$$\sigma^2 = g(q - q_0) + \sigma_0^2$$



L'efficienza di ogni PMT e le proprietà ottiche dello Xe liquido sono monitorate da sorgenti di particelle α (fili di Americio posizionati in punti precisi del calorimetro)



Acceleratore Cockcroft-Walton:

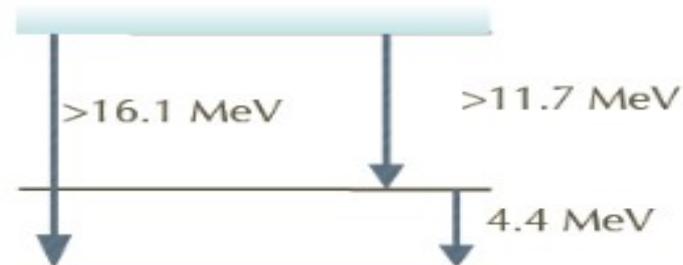
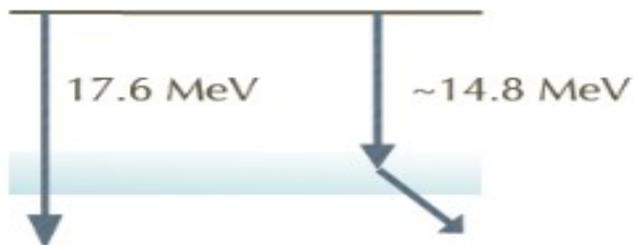
Acceleratore di protoni (~KeV), utilizzato per calibrare l'apparato sperimentale (Energia LXe e tempo relativo LXe-TC)

Nella collisione di protoni con un bersaglio di Li (o B) vengono prodotti fotoni di bassa energia



I fotoni prodotti tramite il C-W hanno energia molto più bassa del fotone prodotto da un decadimento di un muone

Reaction	Peak energy	σ peak	γ -lines
Li(p,γ)Be	440 keV	5 mb	(17.6, 14.6) MeV
B(p,γ)C	163 keV	$2 \cdot 10^{-1}$ mb	(4.4, 11.7, 16.1) MeV



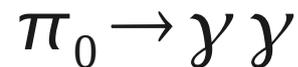
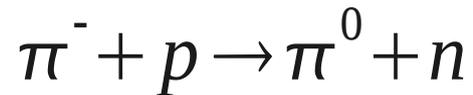
Reazione di scambio carica:

Si cerca di utilizzare fotoni con energia simile a quella del segnale (~ 52.8 MeV)

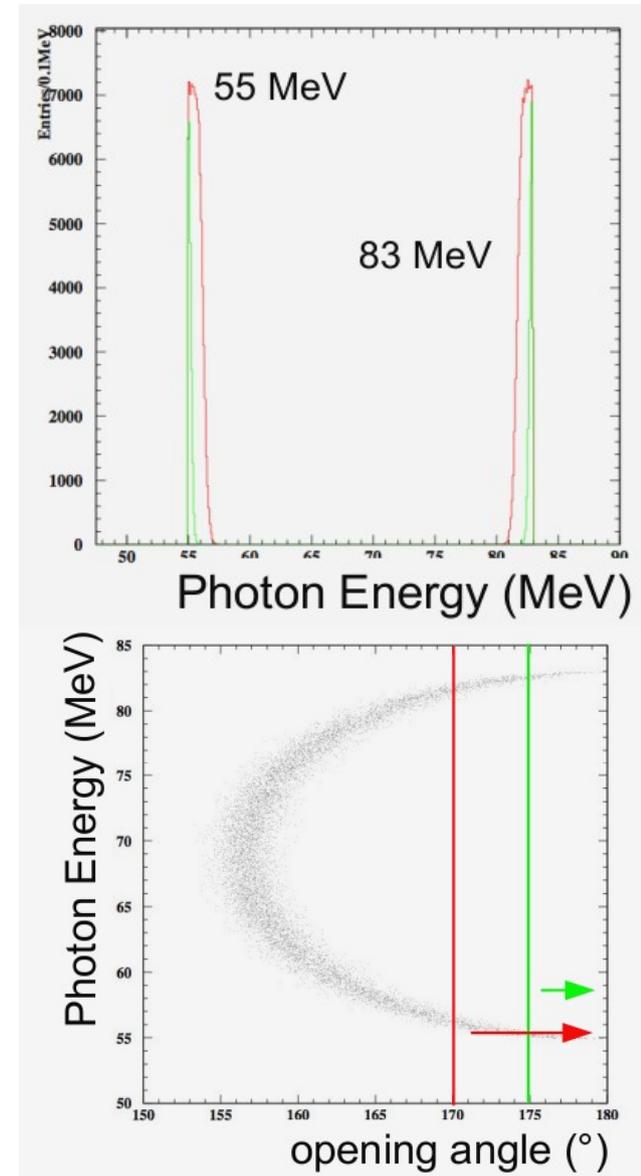


Calibrazione Energia

✓ Per lo scopo si utilizza la reazione "scambio di carica":



Selezionando i fotoni (tramite il rivelatore NaI), che vengono emessi con un angolo maggiore di 170°, si ha l'emissione di due fotoni "monocromatici" (55 e 83 MeV)



Conclusioni:

Il calorimetro di MEG ha mostrato le seguenti prestazioni nel primo periodo di presa dati dell'esperimento (2008)

- ✓ $\sigma_E \sim 2.0\%$
- ✓ $\sigma_{depth} \sim 6\text{ mm}$
- ✓ $\sigma_{xy} \sim 5\text{ mm}$
- ✓ $\sigma_{t_0} \sim 45\text{ ps}$, $\sigma_{t^*} \sim 75\text{ ps}$

Tali prestazioni, pur molto buone, non sono ancora quelle di progetto ma sono in costante miglioramento

Con i dati del 2008 e' stato pubblicato un limite superiore di $2.8 \cdot 10^{-11}$ @90%CL compatibile con quello misurato dall'esperimento MEGA

La sensibilita' di progetto ($\sim 10^{-13}$) si raggiungera' nel 2011