

FISICA NUCLEARE E SUBNUCLARE II

Prof. C. DIONISI

Misura del decadimento

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ nell'esperimento MEG

Di

Federico Preiato

Tutor

Prof. G. Cavoto

Prof.ssa C. Voena

IL MUONE

La massa del muone e la sua vita media sono parametri dello Standard Model

$$m_\mu = 105.658389 \text{ MeV}$$

e

$$\tau_\mu = 2.19703 \times 10^{-6} \text{ s}$$

I suoi decadimenti sono:

Decay mode	Branching Ratio
(Michel decay) $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$	$\approx 100\%$
(radiative decay) $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \gamma$	$1.4 \pm 0.4\%$ (for $E_\gamma > 10 \text{ MeV}$)
$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$	$(3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}$
$\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_e \nu_\mu$	1.2%
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$	$< 1.2 \times 10^{-11}$
$\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$	$< 1.2 \times 10^{-12}$
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma \gamma$	7.2×10^{-13}

Misurato
con
MEGA

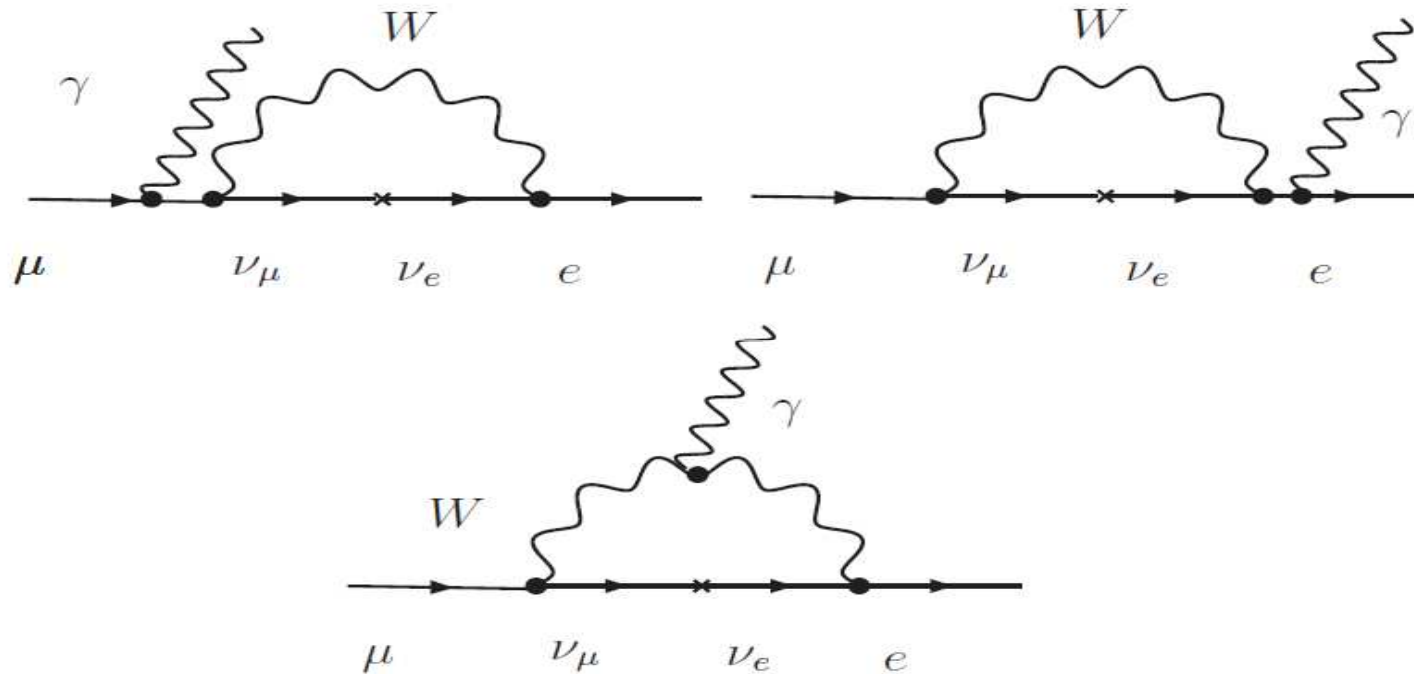
LFV:
PROIBITO
NELLO SM

I limiti superiori sono al 90% del livello di confidenza (C.L.)

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ nello STANDARD MODEL

Questo decadimento implica una massa per il neutrino ed è legato all'oscillazione dei neutrini (mixing di neutrini)

La Lagrangiana per questo tipo di processo porta ai diagrammi di Feynman per $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ del tipo



Il rate atteso di decadimenti è dato da

$$\Gamma(\mu \rightarrow e \gamma) = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192 \pi^3} \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_i (V_{PMNS}^*)_i (V_{PMNS})_i \frac{m_{\nu_i}^2}{m_W^2} \right|^2$$

V_{PMNS} è la matrice 3X3 di Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ nello STANDARD MODEL

Se assumiamo per semplicità che solo i neutrini μ ed e vengono mixati
la probabilità di oscillazione sarà

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(L) = \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta m^2 L/4E).$$

Allora il rate di $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ può essere scritta come

$$\Gamma(\mu \rightarrow e\gamma) \approx \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3} \frac{\alpha}{2\pi} \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)$$

$$\approx \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3} \frac{\alpha}{2\pi} \sin^2 2\theta \left(\frac{\Delta m^2}{m_W^2} \right)^2$$

← Decadimento μ
← Vertice γ
← Oscillazione ν

che porta quindi a un Branching Ratio (normalizzato al decadimento principale) di

$$B(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{\Gamma(\mu \rightarrow e\gamma)}{\Gamma(\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu})} \approx \frac{\alpha}{2\pi} \sin^2 2\theta \left(\Delta m^2 / m_W^2 \right)^2$$

$$\approx \frac{1}{2 \times 137 \times \pi} \left(\frac{7 \times 10^{-5} \text{ eV}^2}{80 \text{ GeV}^2} \right)^2$$

$$\approx 10^{-55}.$$

NON MISURABILE in laboratorio

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ fuori lo STANDARD MODEL

Modelli di NUOVA FISICA potrebbero aumentare il rate di questi eventi

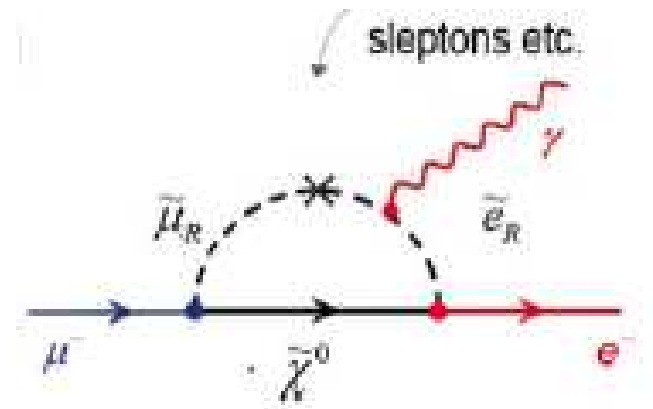
SUSY - GUT: particelle supersimmetriche e teoria della grande unificazione.

Presenza di nuove particelle più pesanti (masse anche di 100 GeV – 1 TeV)

Ricordando che il BR $\propto \frac{m_{\nu_i}^2}{m_W^2}$

Supponendo l'esistenza del neutralino, che sostituirebbe il neutrino nel processo, con una massa di quell'ordine di grandezza si avrebbe

$$\text{BR} \approx 10^{-14} - 10^{-13}$$



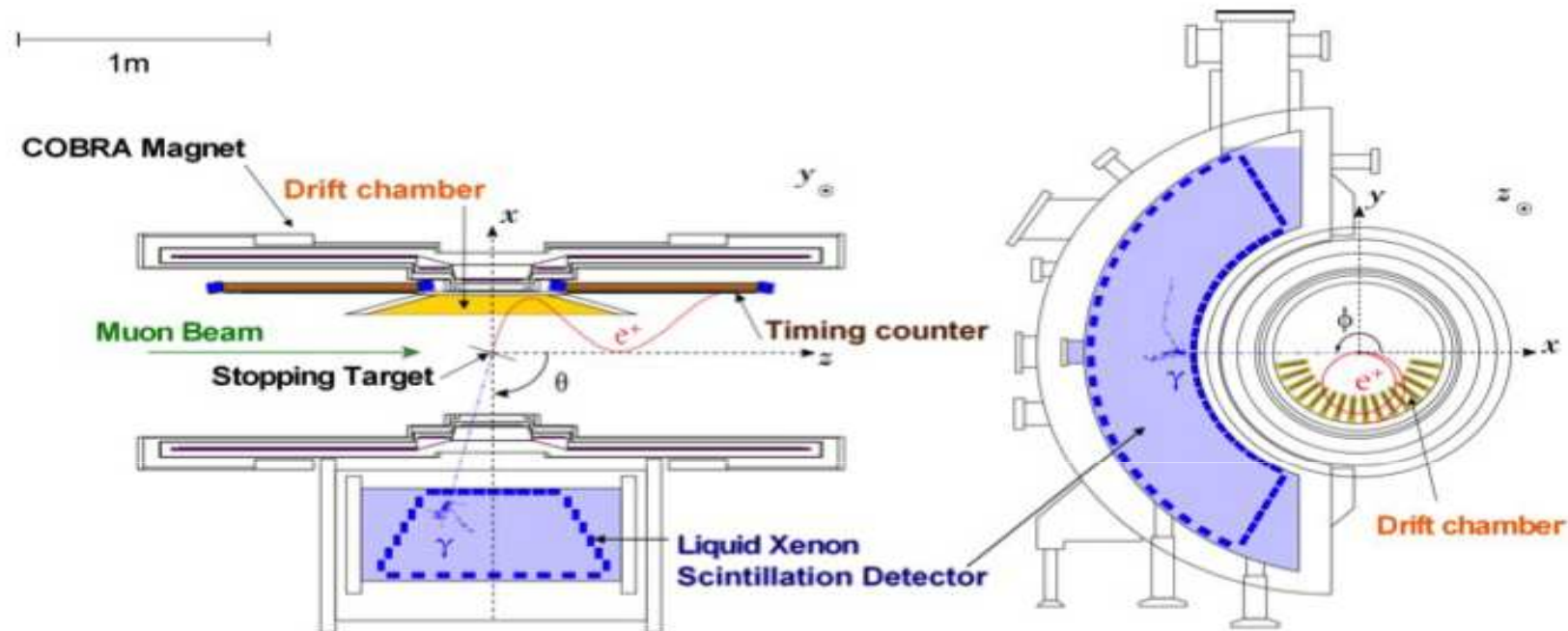
L'ESPERIMENTO MEG: IL LABORATORIO



L'esperienza è stata allestita presso Zurigo, al Paul Scherrer Istitut dove è stato realizzato il più intenso fascio di muoni al mondo ($10^7 \mu/\text{sec}$)

Per la sensibilità del BR richiesta ($10^{-14} - 10^{-13}$) si devono osservare $10^{13} - 10^{14}$ decadimenti
→ Con questo rate ci vogliono quindi 10^7 sec (1 ANNO!!)

L'ESPERIMENTO MEG : $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$



Un ciclotrone accelera protoni a 590 MeV. Fasci secondari di pioni sono generati in due bersagli. Dal decadimento dei pioni viene estratto il fascio di muoni.

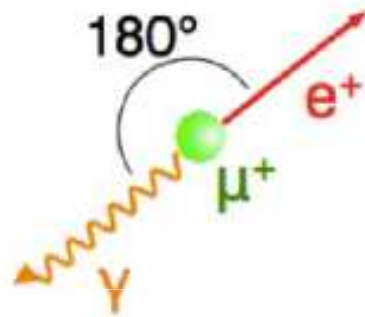
Successivamente il fascio di muoni è inviato su un bersaglio di polietilene.

Il processo è un decadimento a due corpi emessi back-to-back con il muone a riposo nel suo sistema di riferimento \rightarrow positrone e fotone hanno la stessa energia pari a metà della massa del muone ($E_{e^+} = E_{\gamma} = m_{\mu}/2 = 52.8 \text{ MeV}$)

IL SEGNALE E IL BACKGROUND

Positrone da un decadimento Michel e un fotone da un decadimento radiativo, da bremsstrahlung o da annichilazione di un positrone in volo

Segnale

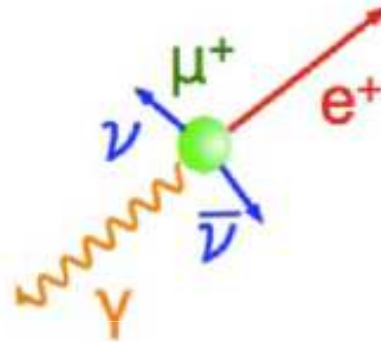


- $\theta = 180^\circ$
- 52.8 MeV/c
- Coincidenza temporale

$$R_{sig} \propto R_\mu B(\mu \rightarrow e\gamma)$$

il rate dei muoni

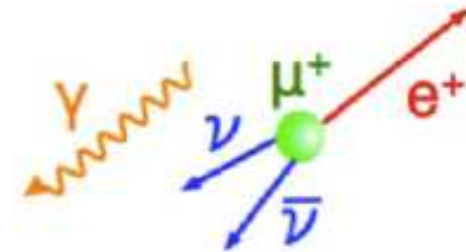
Fondo Fisico



- θ qualsiasi
- < 52.8 MeV/c
- Coincidenza temporale

$$R_{bck} \propto R_\mu B(\mu \rightarrow e\bar{\nu}\nu\gamma)$$

Fondo Accidentale (dominante)



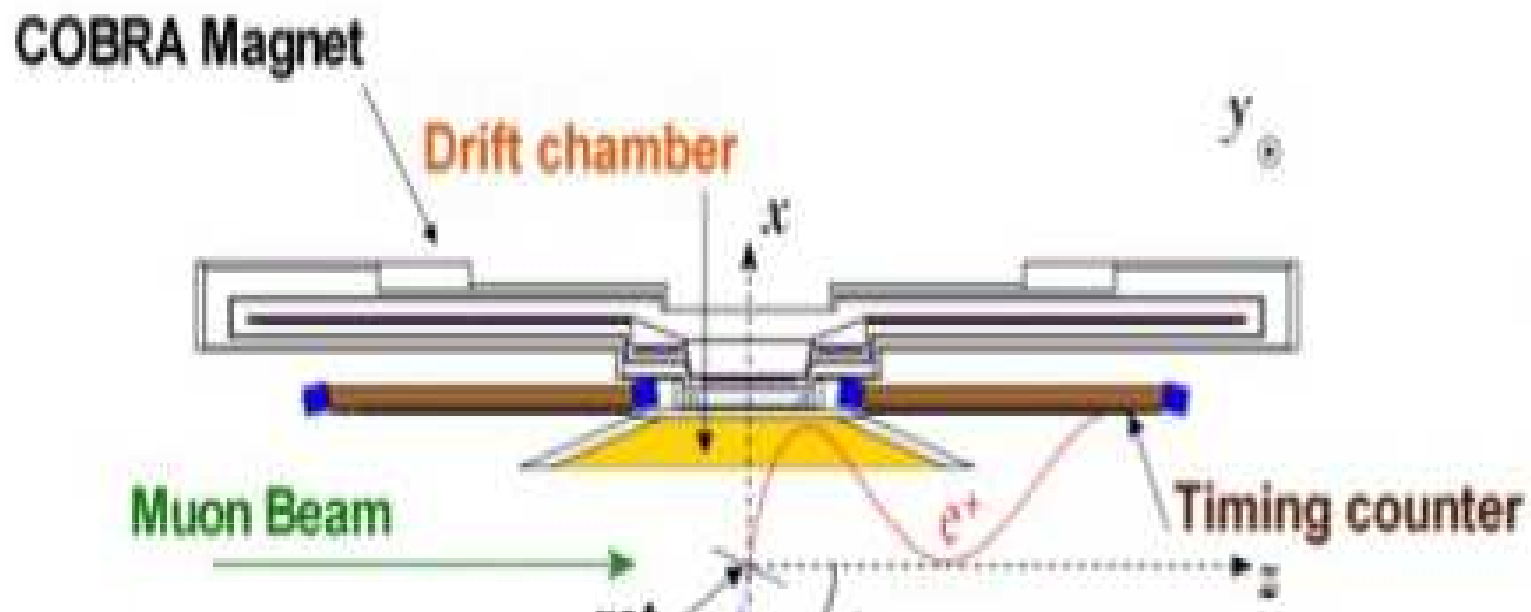
- θ qualsiasi
- < 52.8 MeV/c
- Nessuna coincidenza (scorrelati)

$$R_{acc} \propto (R_\mu)^2 (\delta E_\gamma)^2 \delta E_e (\delta \theta_{e\gamma})^2 \delta t_{e\gamma}$$

Pile-up

IMPORTANTE ricostruire la cinematica: Energia del positrone; energia del fotone; tempo relativo tra le due particelle e angolo relativo (polare e azimutale). Serve un' ALTA RISOLUZIONE

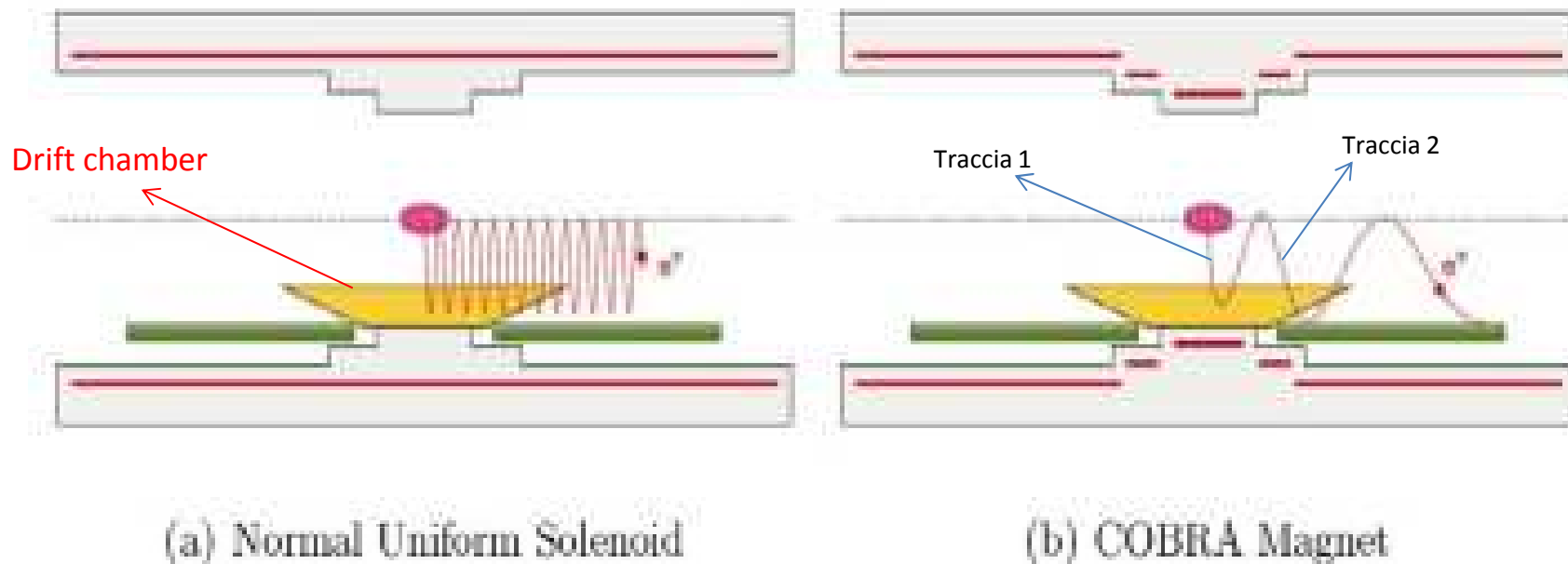
L'ESPERIMENTO MEG: Il positrone



Il momento e la direzione del positrone sono misurati per mezzo dello spettrometro COBRA (Constant - Bending – Radius) costituito da un magnete superconduttore con un gradiente di campo magnetico, un sistema di 16 camere a drift (DCH) e due scintillatori (timing-counter, TC)

Il campo magnetico, con valore massimo al centro (1.27 T) decrescente verso l'esterno (0.49 T), è disegnato in modo tale che i positroni emessi dal target con lo stesso momento seguano traiettorie con raggi di curvatura costanti indipendentemente dall'angolo di emissione.

L'ESPERIMENTO MEG: Il positrone



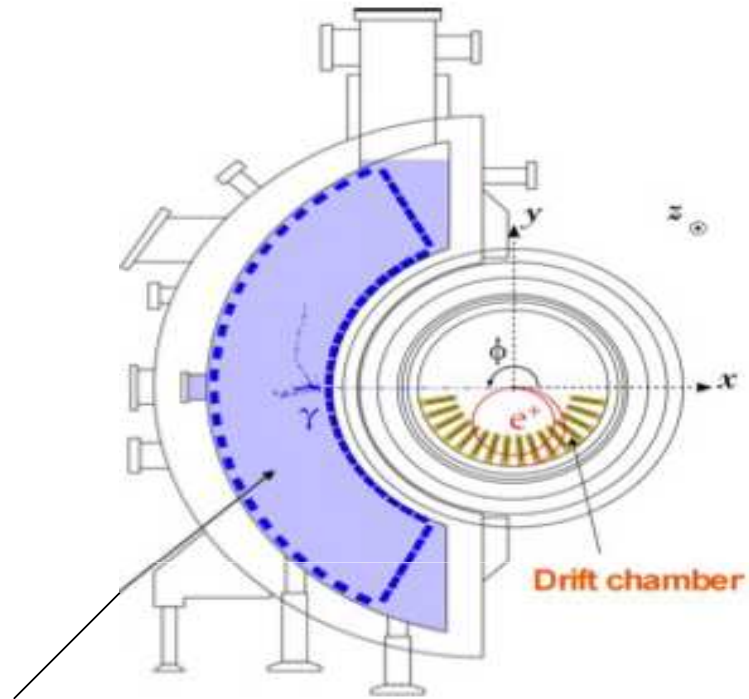
Meno perdita di energia con i minori passaggi nel detector.

Eliminazione più efficace del fondo rispetto a un campo uniforme → positroni di bassa energia vengono spazzati via meglio.

RISOLUZIONE

La traccia 1 e la traccia 2 descrivono la stessa particella con la stessa energia e la stessa direzione → la differenza tra le due tracce è data solo dalla risoluzione (se avessi risoluzione infinita non avrei differenze)

L'ESPERIMENTO MEG: Il fotone



- 900 litri di LXe:
- Risposta veloce
- Buon guadagno di luce
- Lunghezza di radiazione corta

Attenzione alle impurità : ossigeno e acqua

846 PMTs → energia, direzione e tempo del fotone

Meccanismo di scintillazione

Per eccitazione o ionizzazione si arriva alla produzione di un eccimero:



Fotoni di scintillazione

L'ESPERIMENTO MEG: Il fotone

La carica collezionata dà informazioni sull'energia del fotone prodotto dal decadimento → somma delle cariche raccolte dai PMT ricostruiscono l'energia.

Informazioni anche sulla posizione del fotone di conversione → la carica raccolta dipende dalla distanza. Infatti più lontana è la shower dal PMT più piccola sarà la luce e più piccola sarà la carica.

METODO DELLA MEDIA PESATA:

$$x_{fav} = \frac{\sum_i x_i Q_i}{\sum_i Q_i} \quad y_{fav} = \frac{\sum_i y_i Q_i}{\sum_i Q_i} \quad z_{fav} = \frac{\sum_i z_i Q_i}{\sum_i Q_i}$$

L'ESPERIMENTO MEG: Tempo relativo t_{ey}

Positrone e fotone sono creati simultaneamente

Informazioni temporali sul positrone sono date da scintillatori timing-counter posti a ciascuna estremità dello spettrometro.

Barre di scintillatori plastici con 128 fibre scintillanti e ogni barra ha alla fine una fitta maglia di tubi fotomoltiplicatori.

Informazioni temporali sul fotone sono date dai PMT nel detector a LXe.

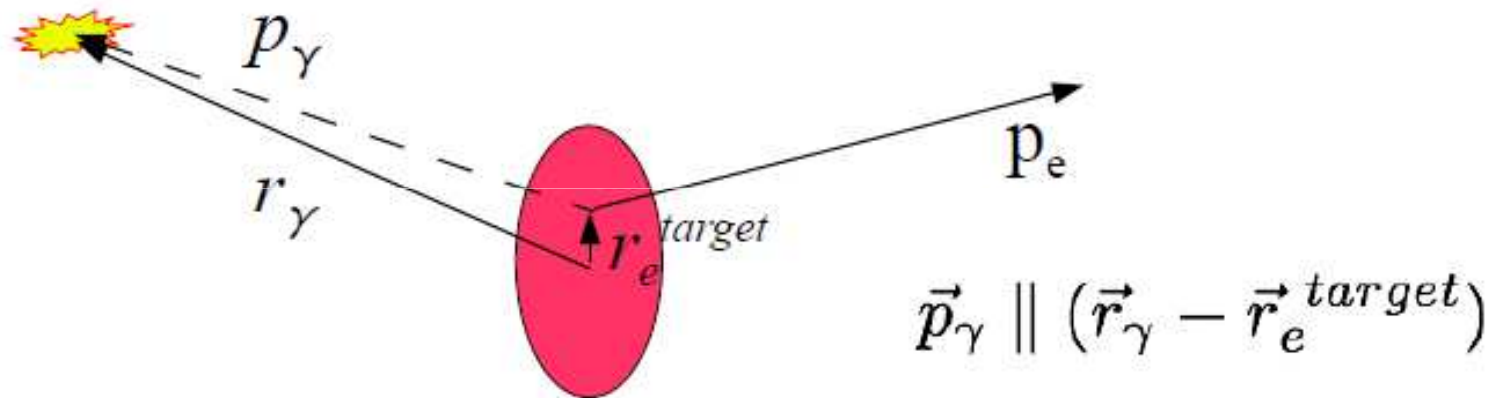
Il tempo del fotone misurato da ogni PMT sarà corretto per i vari ritardi (intrinseco del PMT e di ritardo per la digitalizzazione) e per il tempo di volo dal bersaglio al punto di conversione.

Contribution	resolution(ps) 2009/2010	Notes
T_y	~96/67	
XEC intrinsic	~38/36	- measured
DRS	~69/24	- measured - diff. boards improved vs 2009
other contributions (depth rec. uncert.)	~50 for both runs	
T_e	~107	
$T_{TC} + DRS$	~65	- measured
L_d/c	~75	- scaled from MC (factor 1.5)
TC calib	~40	- measured
T_{ey}	~144/126	sum of the above contributions

L'ESPERIMENTO MEG: Angolo relativo

La direzione del positrone e il vertice di decadimento sono determinati dalla proiezione del positrone sul bersaglio.

La direzione del fotone è definita come la linea che unisce il punto di conversione ricostruito nello LXe con il vertice del positrone associato.



La risoluzione dell'angolo tra le due particelle è stimata combinando la risoluzione della posizione del vertice nel detector del positrone e la risoluzione della posizione del fotone.

ANALISI DATI

Si utilizza il Principio di massima verosimiglianza

Costruisco la likelihood e la massimizzo

$$\mathcal{L}(N_{\text{sig}}, N_{\text{RMD}}, N_{\text{BG}}) = \frac{N^{N_{\text{obs}}} \exp^{-N}}{N_{\text{obs}}!} \prod_{i=1}^{N_{\text{obs}}} \left[\frac{N_{\text{sig}}}{N} S + \frac{N_{\text{RMD}}}{N} R + \frac{N_{\text{BG}}}{N} B \right],$$

N_{sig} numeri di $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ e S la sua PDF

N_{RMD} numero di decadimenti radiativi e R la sua PDF

N_{BG} Numeri di eventi del fondo accidentale e B la sua PDF

N_{obs} è definito come il numero totale di eventi visti nella finestra di analisi

$$N = N_{\text{sig}} + N_{\text{RMD}} + N_{\text{BG}}$$

S , R e B dipendono
dai 5 parametri
cinematici

ANALISI DATI: LE PDF

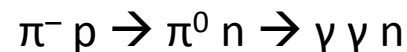
PDF del segnale:

Funzione dei 5 parametri cinetici: non è il prodotto delle 5 PDF, perché ci sono delle correlazioni tra i parametri.

$$S = S (E_e , E_\gamma , t_{e\gamma} , \theta_{e\mu} , \phi_{e\mu})$$

Si costruiscono le PDF dei parametri con dei metodi di calibrazione. Si mandano particelle di energia nota e si studia la risposta dei detector.

Per studiare la risposta dello LXe si utilizza il processo di scambio carica



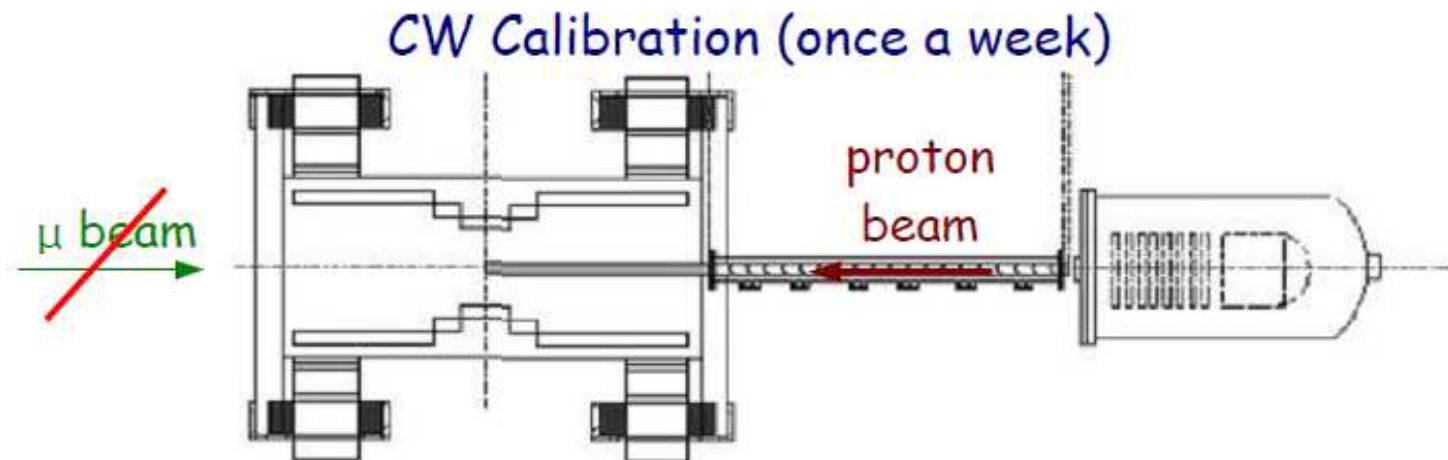
Vengono prodotti due fotoni di energia 83 MeV e 54.9 MeV (molto vicino all'energia del fotone prodotto nel decadimento del muone di 52.8 MeV) prodotti back-to-back. Sono rivelati uno dal calorimetro allo Lxe e l'altro da uno scintillatore di cristalli di NaI, ottenendo due linee di calibrazione per la scala di energia e l'uniformità.

ANALISI DATI: LE PDF

La PDF temporale invece è ricostruita studiando fotoni a bassa energia creati dalle reazione di protoni su un bersaglio di $\text{Li}_4\text{B}_4\text{O}_7$.

Si utilizzano protoni di energia compresa tra i $400 < T_p < 1000 \text{ KeV}$ prodotti con un acceleratore Cockcroft – Walton.

Fotoni di energia di $E_\gamma = 17.67 \text{ MeV}$ da ${}^7\text{Li}{}^8\text{Be}$ servono a monitorare la scala di energia del detector di LXe, mentre fotoni coincidenti da ${}^{11}\text{B}{}^{12}\text{C}$ ($E_\gamma = 4.4, 11.6 \text{ MeV}$) rivelati simultaneamente dal timing counter e dal detector di Xenon portano alla determinazione dell'offset delle barre TC.



RISOLUZIONI

In tabella: Andamento delle risoluzioni nei vari anni dal 1977 al 2008.

Laboratory	Year	ΔE_e	ΔE_γ	$\Delta t_{e\gamma}$ (<i>ns</i>)	$\Delta\theta_{e\gamma}$ (<i>mrad</i>)	Upper Limit.
TRIUMF	1977	10%	8.7%	6.7		3.6×10^{-9}
SIN	1980	8.7%	9.3%	1.4		1.0×10^{-9}
LANL	1982	8.8%	8%	1.9	37	1.7×10^{-10}
LANL	1988	8%	8%	1.8	87	4.9×10^{-11}
LANL	2002	1.2%	4.5%	1.6	15	1.2×10^{-11}
PSI	2008	0.7 – 0.9%	4%	0.15	17 – 20.5	$\approx 10^{-13}$

PERFORMANCE MEG OGGI

	2009	2010
Gamma E [σ_R , w>2cm – 63%]	1.9%	1.9%
Relative timing T_{ev} (RMD)	150ps	130ps
Positron E [Michel edge]	330 keV(82% core)	330 keV (79% core)
Positron θ	9.4 mrad	11.0 mrad
Positron ϕ [at zero]	6.7 mrad	7.2 mrad
Positron Z/Y	1.5/1.1(core) mm	2.0/1.1(core)mm
Gamma position	5(u,v)6(w) mm	5(u,v)6(w) mm
Trigger efficiency	91%	92%
Gamma efficiency	58%	59%
Positron efficiency	40%	34%
Muon stopping rate	$2.9 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$	$2.9 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$
DAQtime/real time	35/43 days	56/67 days

ANALISI DATI: LE PDF

La PDF del decadimento radiativo e del background

Estrapolo la PDF dalle zone fuori la **blinding box** →

È una procedura per esaminare i dati: gli eventi vicini alla regione del segnale sono “nascosti” (blind region) finchè tutte le procedure di analisi sono state completamente definite.

In questo caso usiamo una blinding region definita da

$$48 < E_\gamma < 58 \text{ MeV e } |t_{e\gamma}| < 1 \text{ ns}$$

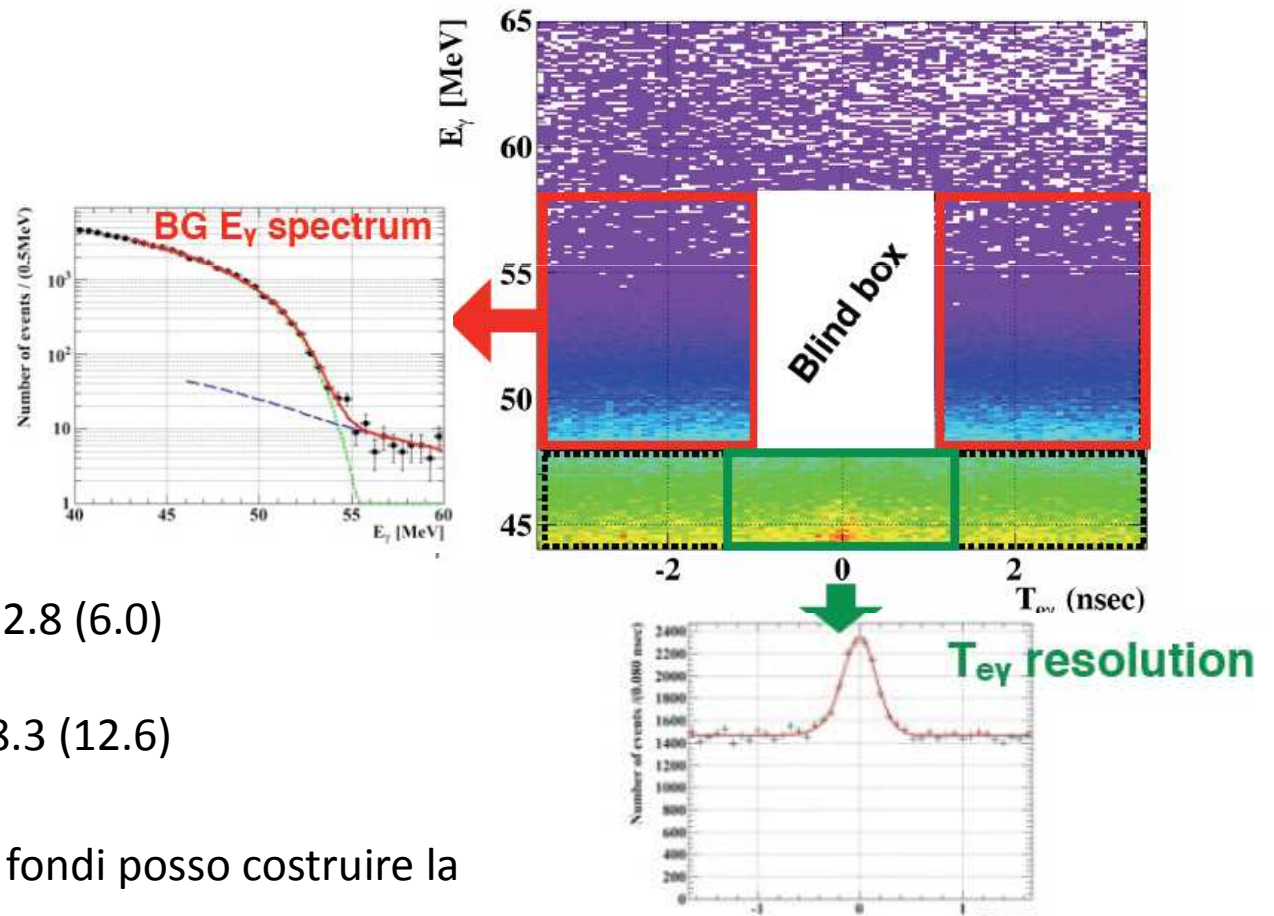
Fuori da questa regione quindi c'è solo fondo da cui possiamo estrapolare i valori medi che ci servono nella likelihood e le relative incertezze. Con i dati del 2009 (2010) si trova che

$$\langle N_{\text{RMD}} \rangle = 27.2 (52.2) \text{ con } \sigma_{\text{RMD}} = 2.8 (6.0)$$

e

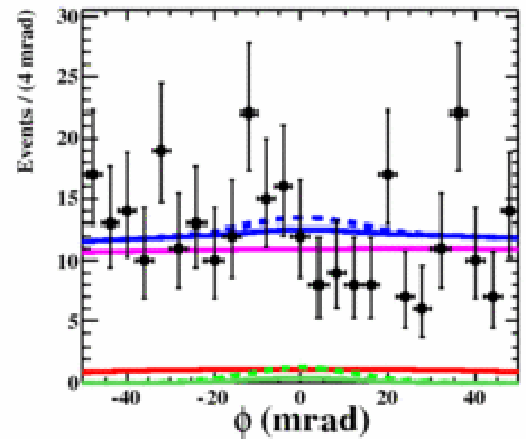
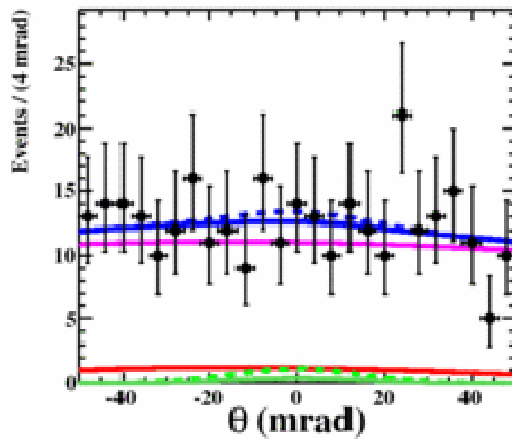
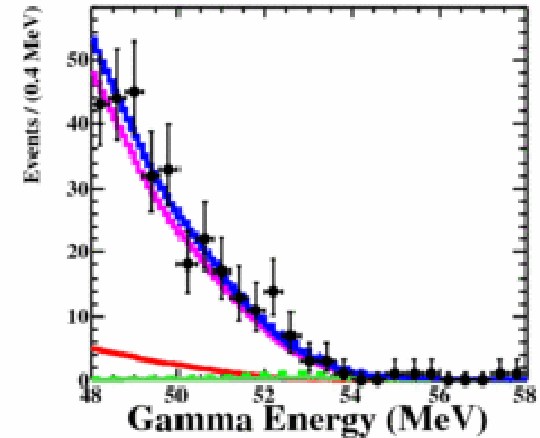
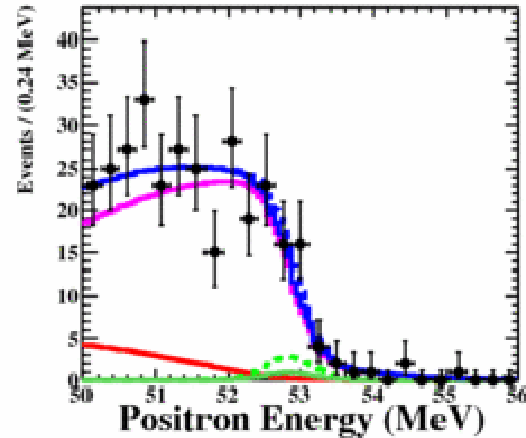
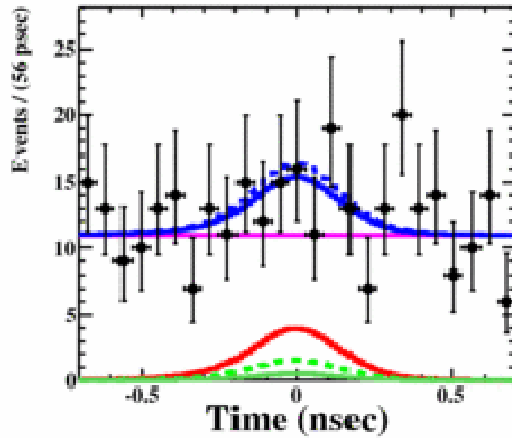
$$\langle N_{\text{BG}} \rangle = 270.9 (610.8) \text{ con } \sigma_{\text{BG}} = 8.3 (12.6)$$

Con le PDF del segnale e dei due fondi posso costruire la likelihood e calcolare il BR



FIT DEI DATI DEL 2009

Total
Accidental
Radiative
signal



Param	Best fit	MINOS [1.645 σ]
NSIG	3.4	+6.6 - 4.3
NBG	273	+12 -12
NRMD	26.9	+4.5 - 4.5

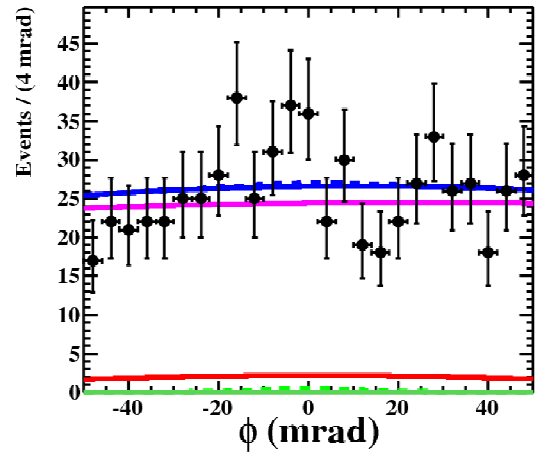
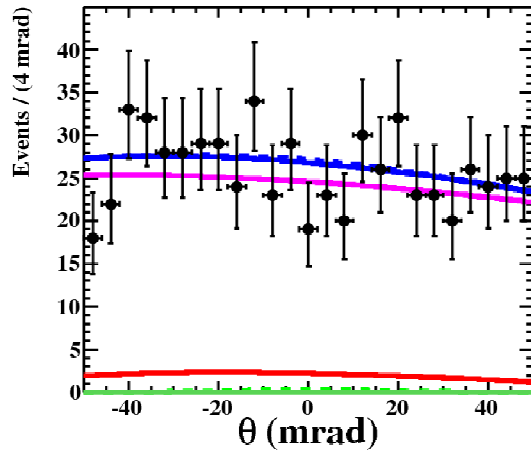
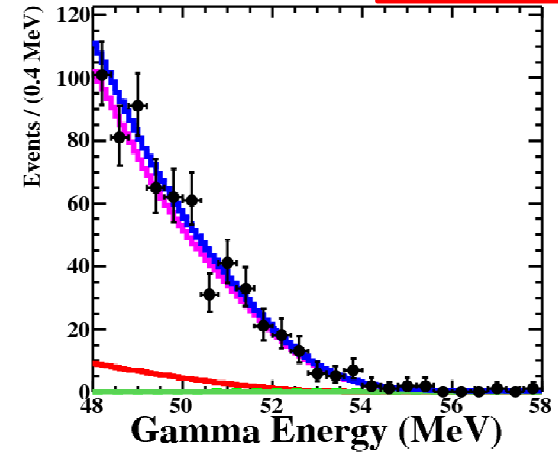
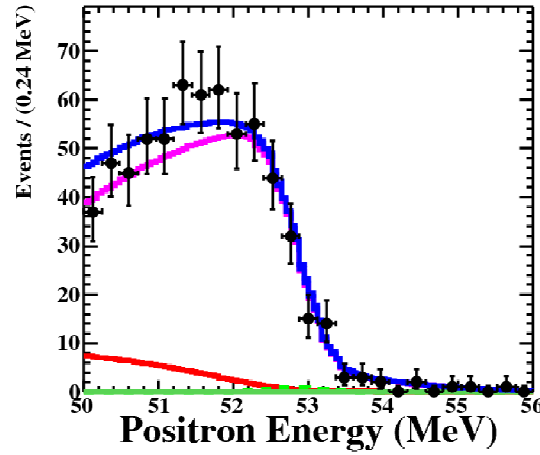
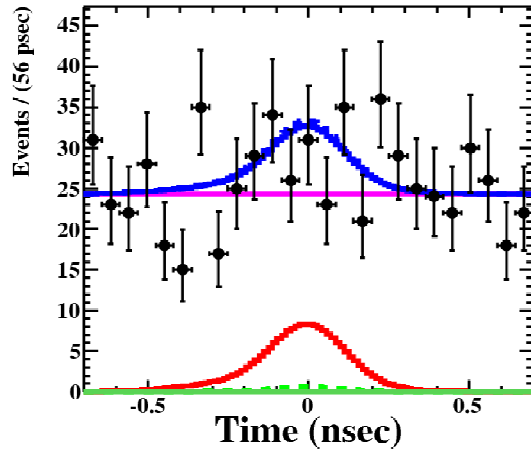
FIT DEI DATI DEL 2010

Total

Accidental

Radiative

Signal



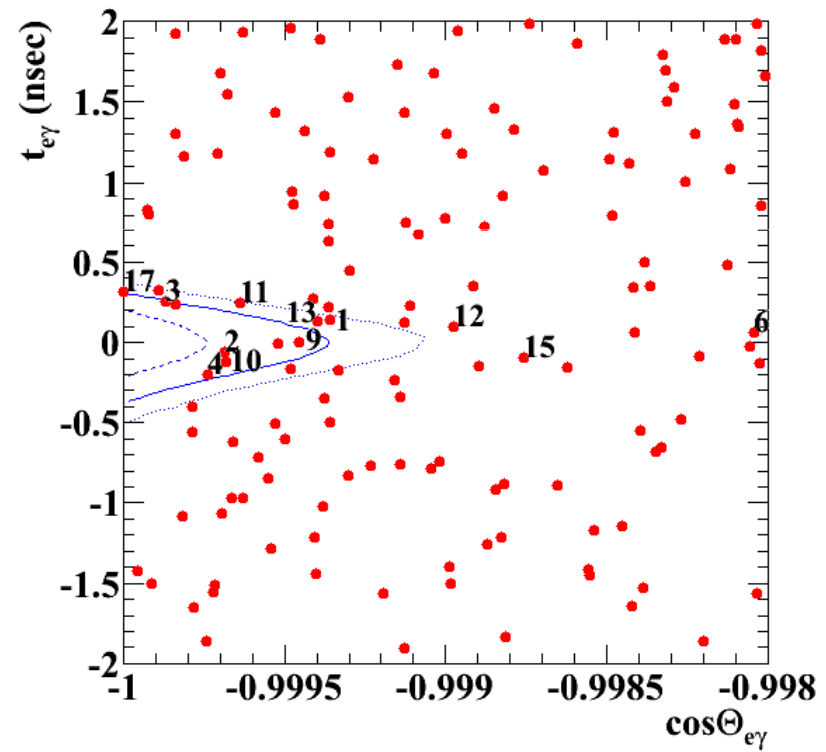
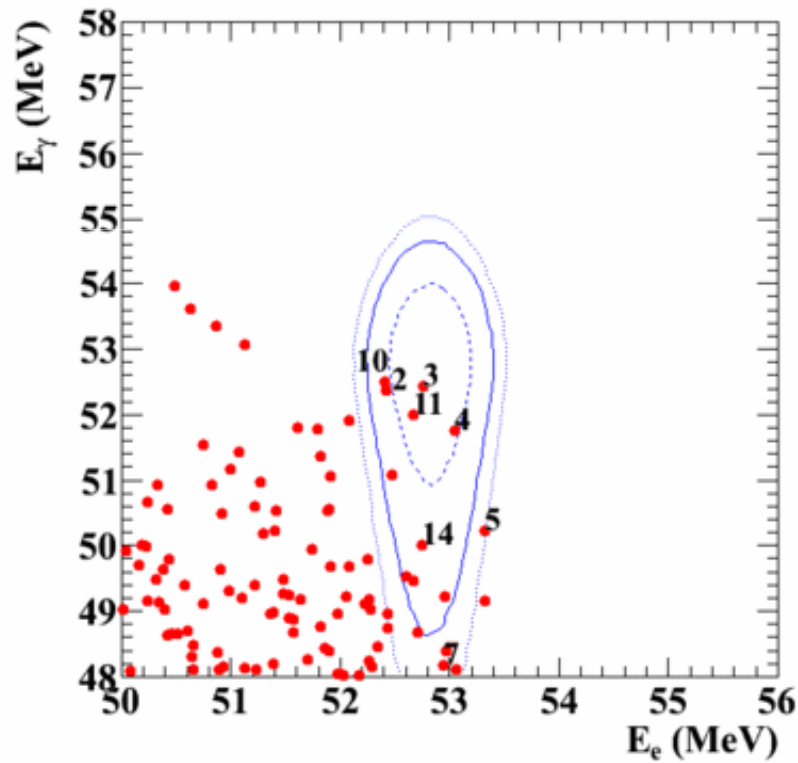
Param	Best fit	MINOS [1.645 σ]
NSIG	-2.2	+5.0 -1.9
NBG	609	+19 -19
NRMD	50.2	+9.2 -9.2

DISTRIBUZIONE DEGLI EVENTI 2009+2010

Ranking degli eventi

Selection: $|T_{ey}| < 0.278 \text{ ns}$; $\cos\Theta_{ey} < 0.9996$

$51 < E_\gamma < 55 \text{ MeV}$; $52.34 < E_e < 55 \text{ MeV}$



CONCLUSIONI

CALCOLO DEL BR

$$\text{BR}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) = \frac{N_{\text{sig}}}{N_{e\nu\bar{\nu}}} \times \frac{f_{e\nu\bar{\nu}}^E}{P} \times \frac{\epsilon_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{trig}}}{\epsilon_{e\gamma}^{\text{trig}}} \times \frac{A_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{TC}}}{A_{e\gamma}^{\text{TC}}} \times \frac{\epsilon_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{DCH}}}{\epsilon_{e\gamma}^{\text{DCH}}} \times \frac{1}{A_{e\gamma}^{\text{g}}} \times \frac{1}{\epsilon_{e\gamma}},$$

$N_{e\nu\bar{\nu}} = 11414$ numero di positroni “Michel” rivelati con energia compresa tra 50 – 56 MeV

P fattore di scala usato nel trigger per selezionare i positroni “Michel”

$f_{e\nu\bar{\nu}}^E = 0.101 \pm 0.006$ frazione dello spettro dei positroni “Michel” oltre i 50 MeV

$\epsilon_{e\gamma}^{\text{trig}} / \epsilon_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{trig}} = 0.66 \pm 0.03$ rapporto tra le efficienze del trigger tra il segnale e il decadimento Michel

$A_{e\gamma}^{\text{TC}} / A_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{TC}} = 1.11 \pm 0.02$ il rapporto tra le efficienze di matching DCH – TC tra il segnale e il Michel

$\epsilon_{e\gamma}^{\text{DCH}} / \epsilon_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{DCH}} = 1.02 \pm 0.005$ rapporto tra le efficienza per la DCH con eventi buoni e decadimenti Michel

$A_{e\gamma}^{\text{g}} = 0.98 \pm 0.005$ l'accettanza geometrica per il segnale dei fotoni dato il segnale di un positrone accettato.

$\epsilon_{e\gamma} = 0.63 \pm 0.04$ l'efficienza di ricostruzione del fotone.

CONCLUSIONI : MEG OGGI

$$BR(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) \leq 2.4 \times 10^{-12} \text{ (90\% C.L.)}$$

Upper limit calcolato dall'analisi di 1.8×10^{14} decadimenti combinando i dati raccolti nel 2009 e nel 2010.

La costruzione della likelihood è fatta con una blinding box (regione di analisi) compresa tra i seguenti valori:

$$48 < E_\gamma < 58 \text{ MeV}$$

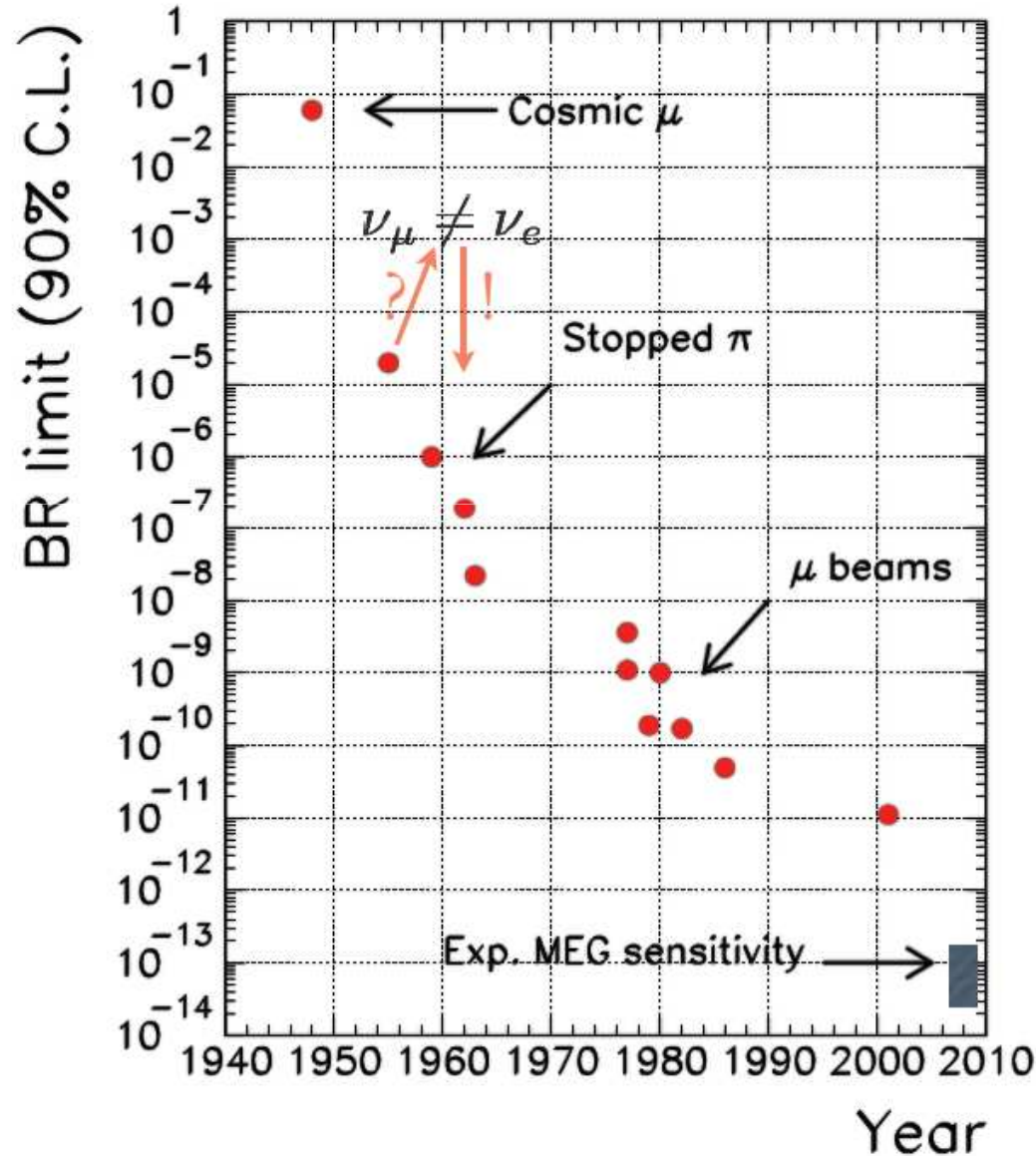
$$50 < E_e < 56 \text{ MeV}$$

$$|t_{e\gamma}| < 0.7 \text{ ns}$$

$$|\theta_{e\gamma}| < 50 \text{ mrad}$$

$$|\phi_{e\gamma}| < 50 \text{ mrad}$$

CONCLUSIONI : PROSPETTIVE FUTURE



L'esperimento MEG continua la presa dati con una sensibilità per il BR di circa 10^{-13} .

Con un upgrade della strumentazione ci si aspetta di arrivare a una sensibilità per il branching ratio inferiore a 10^{-13} nei prossimi anni.

The background of the slide is a classic marbled paper pattern, often used in book endpapers. It features a complex, organic design with swirling, cell-like shapes in shades of light beige, cream, and pale grey. The overall effect is a dense, textured, and somewhat abstract pattern.

GRAZIE DELL'ATTENZIONE