

10 giugno 2010

Fisica Nucleare e Subnucleare II

MEG: $\mu \rightarrow e \gamma$

Analisi dei dati raccolti nel 2008 per l'estrazione
del Branching Ratio del decadimento $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$

Daniel Salerno

Tutors:

Gianluca Cavoto

Cecila Voena

Indice

- 1 Introduzione teorica
- 2 Set-up sperimentale
- 3 Selezione degli eventi e risoluzione
- 4 Analisi dei dati

Introduzione teorica



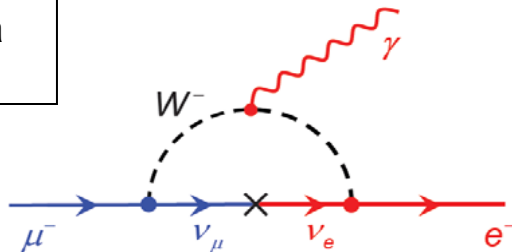
Violazione del sapore leptonic

Modello standard

- Sapore leptonic conservato
- Aggiungendo oscillazioni dei ν
 - ▶ Decadimento ancora troppo raro

$$\Gamma(\mu \rightarrow e\gamma) \approx \underbrace{\frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3}}_{\mu - \text{decay}} \underbrace{\left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)}_{\gamma - \text{vertex}} \underbrace{\sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27\Delta m^2}{M_W^2}\right)}_{\nu - \text{oscillation}}$$

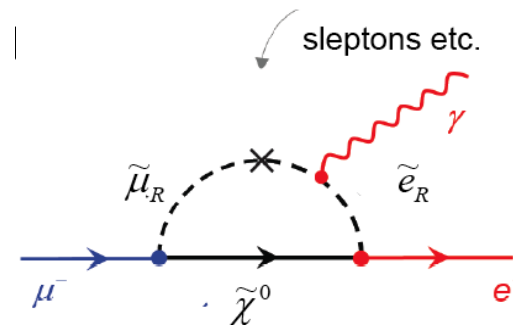
Probabilità
relativa
 $\sim 10^{-55}$



Oltre il modello standard

- Supersimmetria
- Teoria della grande unificazione
 - ▶ Violazione del sapore leptonic è più accessibile

$$\text{BR}(\mu \rightarrow e\gamma) = 10^{-14} - 10^{-11}$$



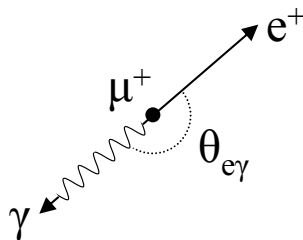
Finora nessun osservazione della violazione del sapore leptonic (carico)

- MEG cerca di osservare il decadimento $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ o mettere un limite superiore sul BR

Decadimento $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$

Cinematica

- Muone in quiete
 - ▶ $E_\mu = m_\mu = 105.66 \text{ MeV}$
- Stato finale a 2 corpi
 - ▶ $E_e = E_\gamma = \frac{1}{2}m_\mu = 52.8 \text{ MeV}$
 - ▶ $t_{e\gamma} = 0 \text{ sec}$
 - ▶ $\theta_{e\gamma} = \pi$



Background

- Decadimento radiativo
 - ▶ $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \gamma$ (raro)
 - ▶ Bassa energia dei neutrini, alta energia del fotone
- Coincidenze accidentali
 - ▶ e^+ da decadimento Michel
 - $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$ (BR ≈ 1)
 - ▶ γ da vari processi
 - Decadimento radiativo
 - Annichilazione $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$
 - Bremsstrahlung $e^+N \rightarrow e^+N\gamma$

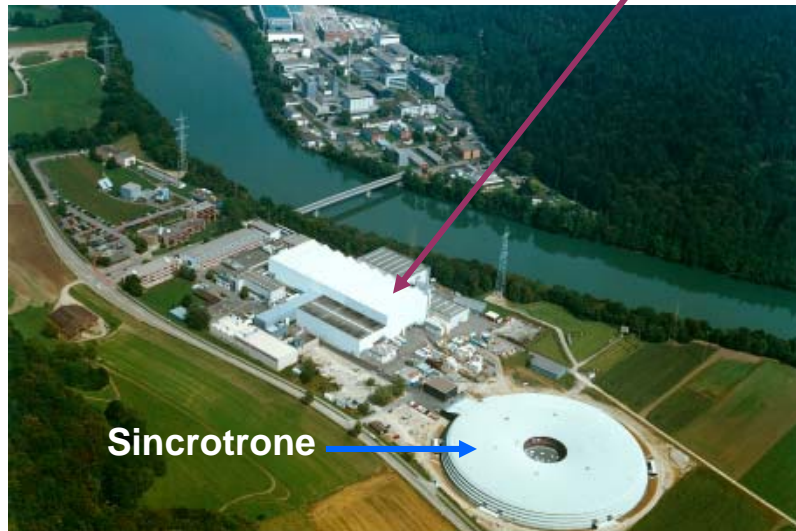
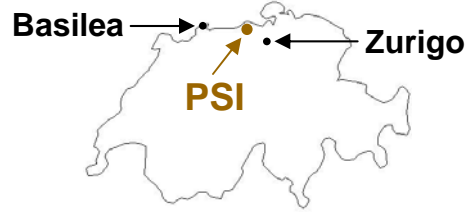
Set-up sperimentale



Paul Scherrer Institute

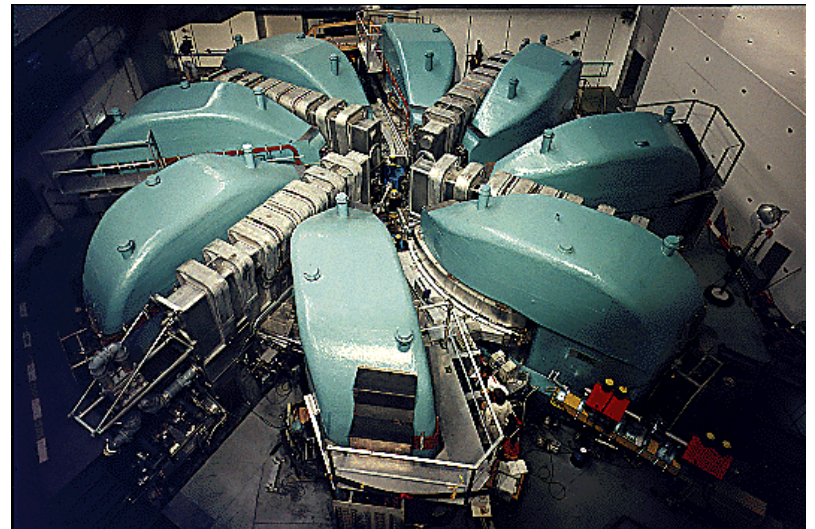
Paul Scherrer Institute

- Si trova a Villigen in Svizzera



590 MeV ciclotrone di protoni

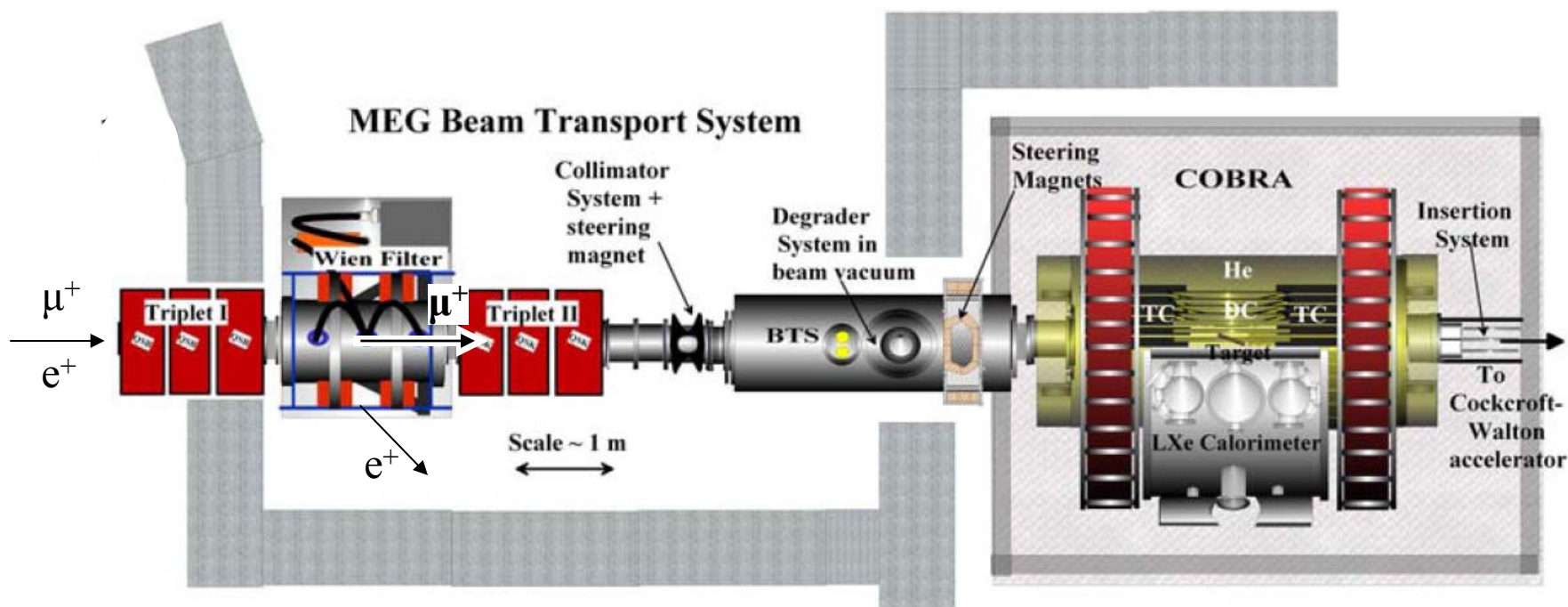
- $\pi E5$ beam line
- Produce muoni di $\sim 28 \text{ MeV}/c$
 - ▶ $p + C \rightarrow \pi^\pm + X \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu + X$
 - ▶ Contaminati con e^\pm



$\pi E5$ Beam Line

Schema del sistema di trasporto

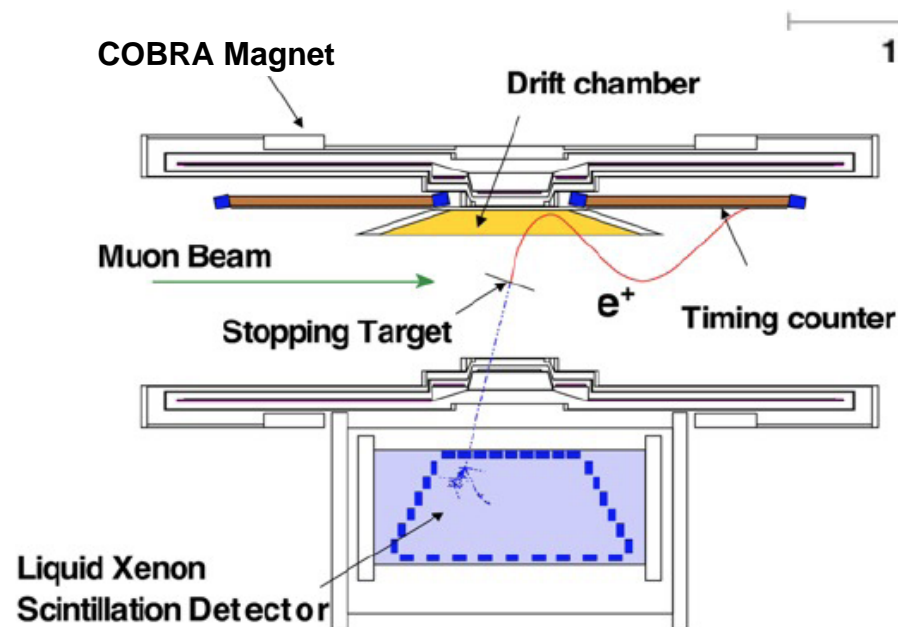
- Rate: $3 \times 10^7 \mu^+ / s$
- Wien Filter separa μ / e
- Bersaglio polietilene 18 mg/cm^2



Rivelatori

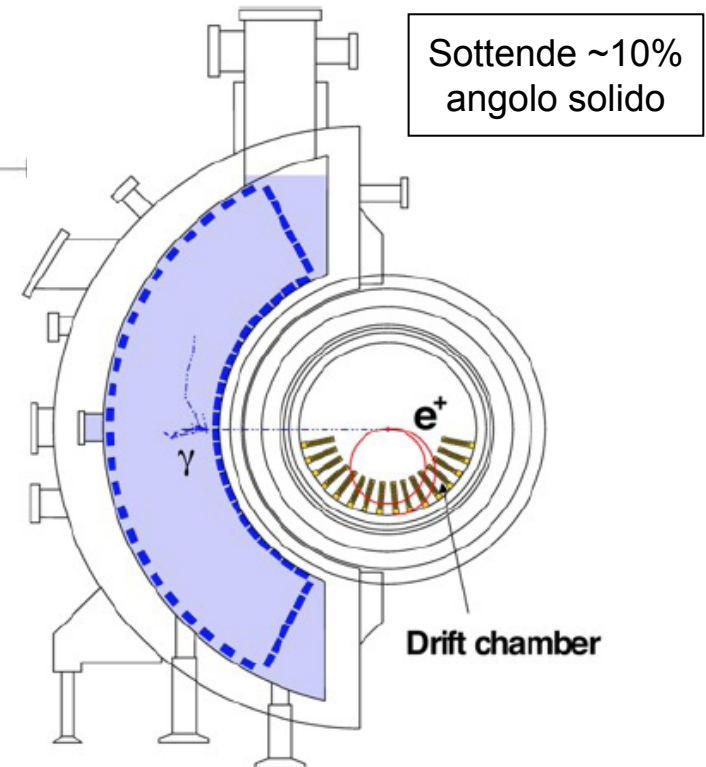
Spettrometro del positrone

- Magnete superconduttore con gradiente di campo
- Camere a deriva di bassa massa
- Contatore fatto di barre scintillanti per la misura del tempo di volo



Calorimetro del fotone

- 900 litri di Xenon liquido (LXe)
- 846 fotomoltiplicatori



Selezione degli eventi e risoluzione



Raccolta dei dati

Periodo d'acquisizione

- Dati raccolti tra settembre e dicembre 2008
- $\sim 9.5 \times 10^{13}$ muoni fermati nel bersaglio

Trigger

- Cinematica del segnale
 - ▶ Energia dal fotone intorno a 52.8 MeV
 - ▶ Tempo relativo intorno a zero
 - ▶ Fotone e positrone grossomodo back-to-back
- Rate tipico per eventi del tipo segnale 5Hz
- Rate totale del DAQ 6.5Hz
- Tempo vivo 84%

Selezione off-line

- Riduzione dei dati a 16% degli eventi registrati
 - ▶ Tempo del segnali del fotone vicino a quello del positrone
 - ▶ Almeno una traccia rivelata per il positrone
- Eventi dentro il “blinding-box” nascosti ($\sim 0.2\%$ degli eventi)
 - ▶ E_γ e $t_{e\gamma}$ dentro un range predefinito (che include il segnale)
- Eventi fuori dal blinding-box analizzati per calibrazione e per studiare il fondo

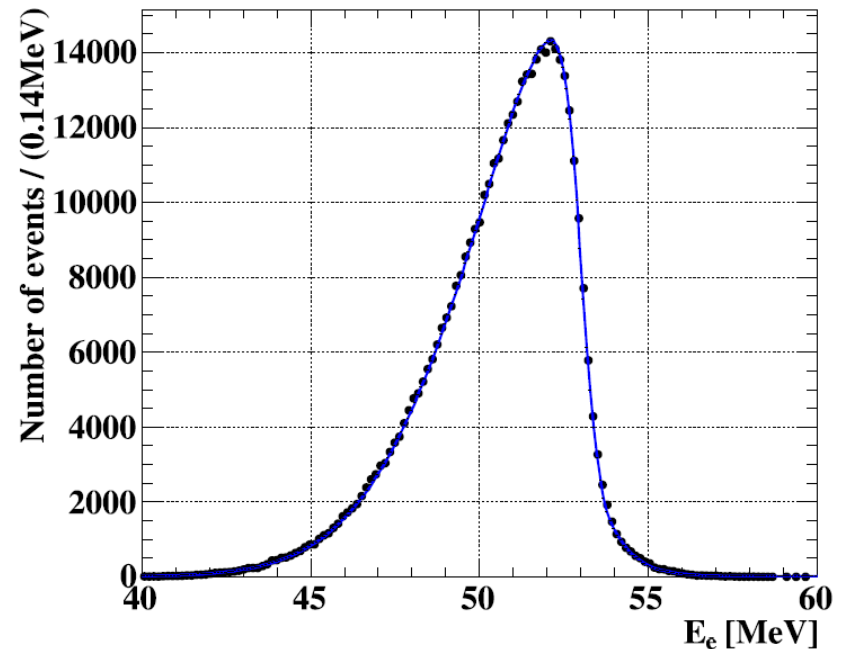
- Un evento candidato $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ e caratterizzato da:
 - ▶ Energie del fotone e positrone: E_e e E_γ
 - ▶ Tempo relativo tra fotone e positrone: $t_{e\gamma}$
 - ▶ Angoli tra le due particelle: $\theta_{e\gamma}$ e $\phi_{e\gamma}$

Energia del positrone

Scala e risoluzione

- Decadimento Michel
 - ▶ Limite dello spettro a 52.8 MeV
- Funzione di fit dipende da:
 - ▶ Spettro teorico di Michel
 - ▶ Efficienza del rivelatore
 - Dipendente dall'energia
 - ▶ Funzione di risposta
 - Positroni monoenergetici
 - Ben descritta da 3 gaussiane (1 picco e 2 code)
- Risoluzioni
 - ▶ ~0.4 MeV picco centrale (60%)
 - ▶ ~1.1 e ~2.0 MeV per le code

Spettro di decadimento Michel



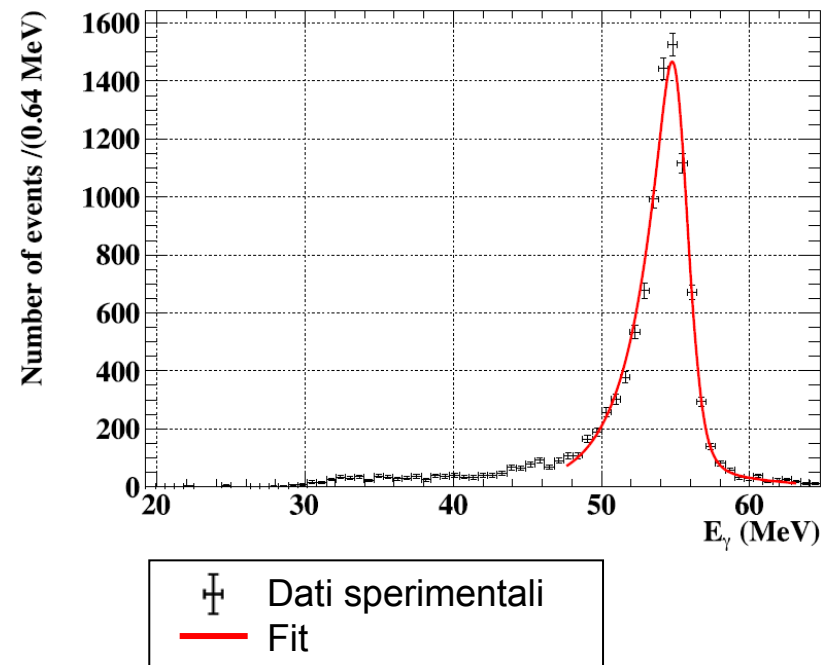
● Dati sperimentali
— Fit

Energia del fotone

Scala e risoluzione

- Decadimento pione “charge-exchange”
 - ▶ $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n \rightarrow \gamma \gamma n$
 - ▶ Fotoni monoenergetici selezionati dagli estremi dello spettro: 55 e 83 MeV
- Scala controllata con fotoni di 17.6 MeV da ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$
- Risoluzione $\Delta E/E \sim 6\%$ (FWHM)

Spettro di fotoni di 55 MeV



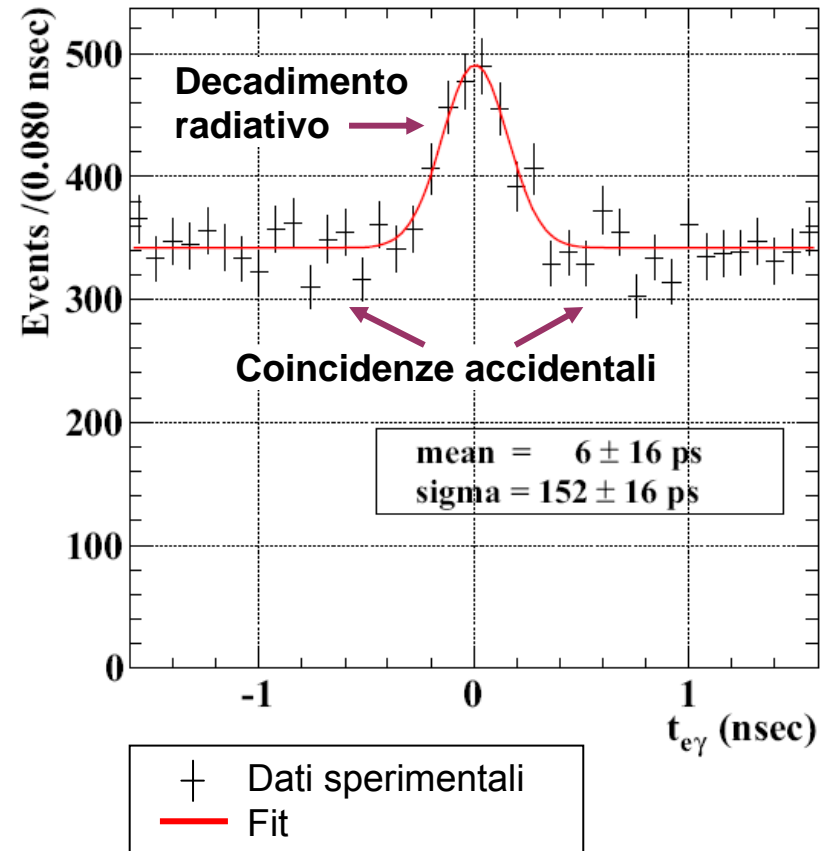
Asimmetrico perché qualche fotone converte prima di raggiungere il volume sensibile del LXe

Tempo relativo

Scala e risoluzione

- Misurato dal decadimento radiativo
 - ▶ Con $40 < E_\gamma < 45$ MeV
- Tenendo conto del:
 - ▶ Tempo di volo dell'elettrone
 - Lunghezza dalla traccia misurata dallo spettrometro
 - ▶ Distanza attraversata dal fotone
 - Dal bersaglio al rivelatore
- Risoluzione $\sigma_{t_{e\gamma}} \sim 150$ ps

Spettro del fondo

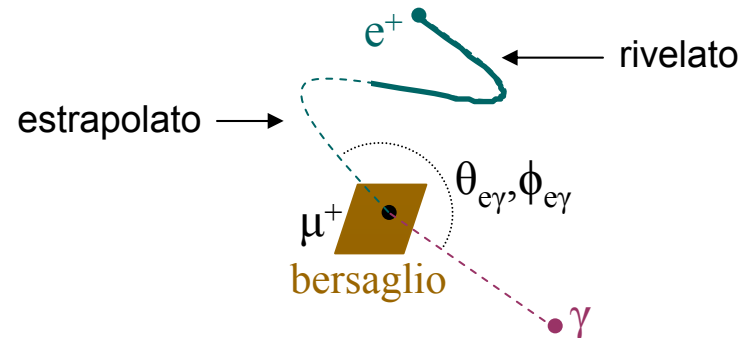


Angolo relativo

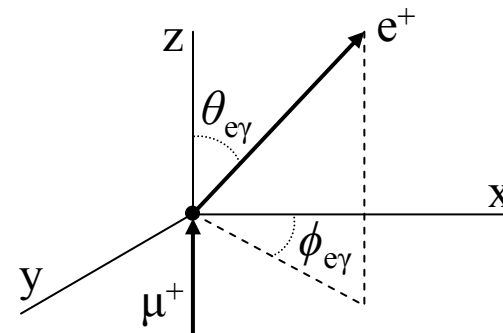
Scala e risoluzione

- Posizione e direzione del positrone (al bersaglio)
 - ▶ Proiezione della traccia rivelata nello spettrometro
- Direzione del fotone
 - ▶ Retta tra la posizione del positrone al bersaglio e posizione del fotone nel rivelatore
 - Distribuzione di luce nel rivelatore
- Risoluzione $\sigma_{\theta_{e\gamma}} = 21 \text{ mrad}$
 $\sigma_{\phi_{e\gamma}} = 14 \text{ mrad}$

Posizione e direzione



Definizione degli angoli



Analisi dei dati



Il numero di eventi $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$

Analisi del fondo e ottimizzazione degli algoritmi



I dati dentro il blinding-box vengono aggiunti agli altri dati



Fit di massimo verosimiglianza dentro la finestra di analisi

- $46 \text{ MeV} < E_\gamma < 60 \text{ MeV}$
- $50 \text{ MeV} < E_e < 56 \text{ MeV}$
- $|t_{e\gamma}| < 1 \text{ ns}$
- $|\theta_{e\gamma}| < 100 \text{ mrad}$
- $|\phi_{e\gamma}| < 100 \text{ mrad}$

1189 eventi

Funzione di verosimiglianza

$$\mathcal{L}(N_{\text{sig}}, N_{\text{rad}}, N_{\text{acc}}) = \frac{\overbrace{N^{N_{\text{obs}}} e^{-N}}^{\text{Dist. Poisson}}}{N_{\text{obs}}!} \prod_{i=1}^{N_{\text{obs}}} \left[\frac{N_{\text{sig}}}{N} S + \frac{N_{\text{rad}}}{N} R + \frac{N_{\text{acc}}}{N} A \right]$$

- $N_{\text{sig}} \Rightarrow$ decadimenti $\mu \rightarrow e\gamma$
- $N_{\text{rad}} \Rightarrow$ decadimenti radiativi
- $N_{\text{acc}} \Rightarrow$ coincidenze accidentali
- $N = N_{\text{sig}} + N_{\text{rad}} + N_{\text{acc}}$
- N_{obs} = numero di eventi nella finestra di analisi (= 1189)
- S = PDF di $\mu \rightarrow e\gamma$
- R = PDF di decadimento radiativo
- A = PDF di coincidenze accidentali

Calcolo delle PDF

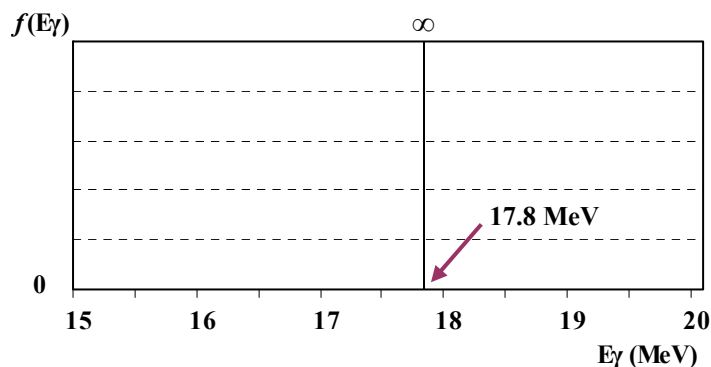
$$f(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x})_{\text{teorica}} * \text{risoluzione} \times \varepsilon_{\text{selezione}}$$

- $S = f(E_\gamma) \cdot f(E_e) \cdot f(t_{e\gamma}) \cdot f(\theta_{e\gamma}) \cdot f(\phi_{e\gamma})$
 - ▶ 5 osservabili sono indipendenti
- $R = f(t_{e\gamma}) \cdot f(E_\gamma, E_e, \theta_{e\gamma}, \phi_{e\gamma})$
 - ▶ 4 osservabili sono correlati
- A = prodotto degli spettri di fondo degli 5 osservabili
 - ▶ Precisamente misurati

Esempio: PDF generica

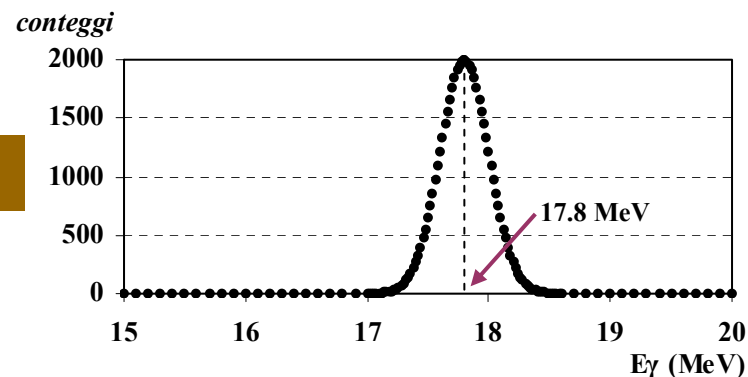
PDF teorica

1



Risoluzione

2



Efficienza di selezione

3

$$\mathcal{E}_{\text{selezione}} = 50\% - 100\%$$

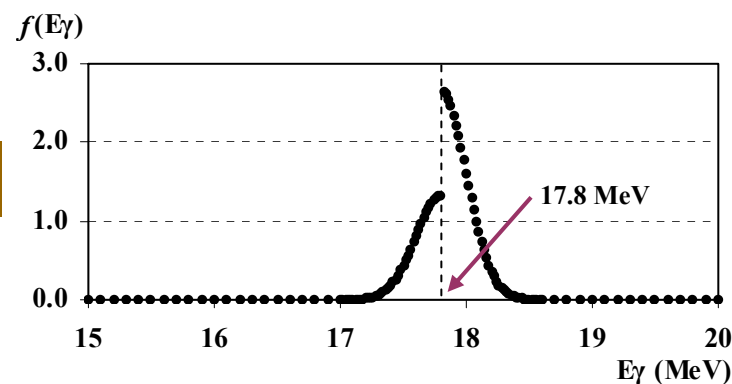
- 50% - 100% degli eventi vengono triggerati a seconda dell'energia

Esempio (non-realistico)

- 50% degli eventi con $E_\gamma \leq 17.8$ MeV e 100% degli eventi con $E_\gamma > 17.8$ MeV

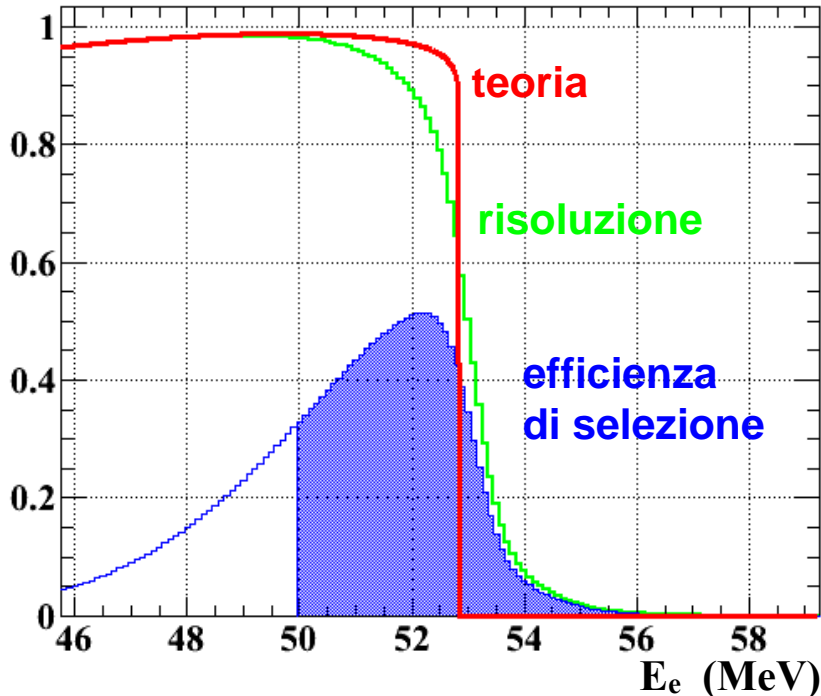
PDF risultante

4



Contribuiti alle PDF

Contribuiti alla PDF per E_e



Definizione delle varie PDF

Segnale ($\mu \rightarrow e\gamma$)

- E_γ : simulazione Monte-Carlo del segnale
- E_e : fit della limite di Michel (3 gaussiane)
- $\theta/\phi_{e\gamma}$: π + risoluzione dai dati
- $t_{e\gamma}$: dal decadimento radiativo (gaussiana)

Decadimento Radiativo

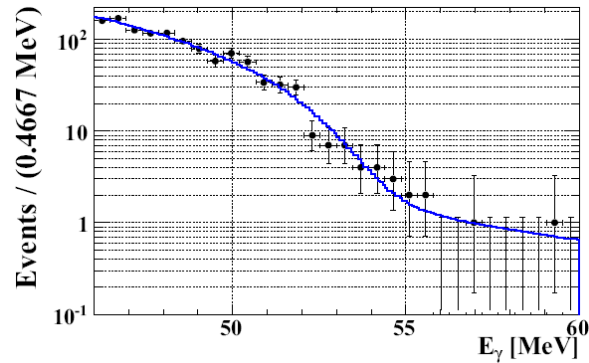
- $E_e, E_\gamma, \theta/\phi_{e\gamma}$: 3D istogramma da una simulazione Monte-Carlo tenendo conto della risoluzione e dell'accettanza
- $t_{e\gamma}$: singola gaussiana con la stessa risoluzione del segnale

Coincidenze accidentali

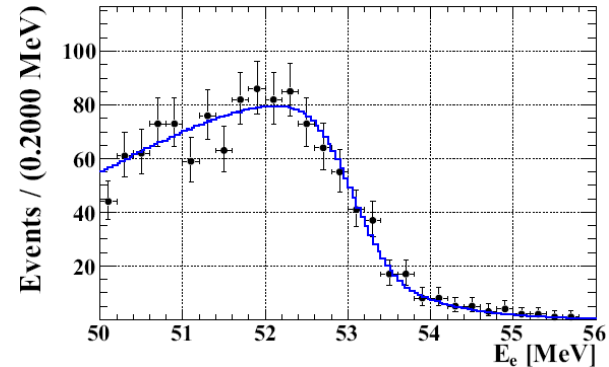
- E_γ : fit dei dati ($t_{e\gamma}$ fuori dal blinding-box)
- E_e : dai dati sperimentali
- $\theta/\phi_{e\gamma}$: fit dei dati ($t_{e\gamma}$ fuori dal blinding-box)
- $t_{e\gamma}$: uniforme

Distribuzioni degli eventi

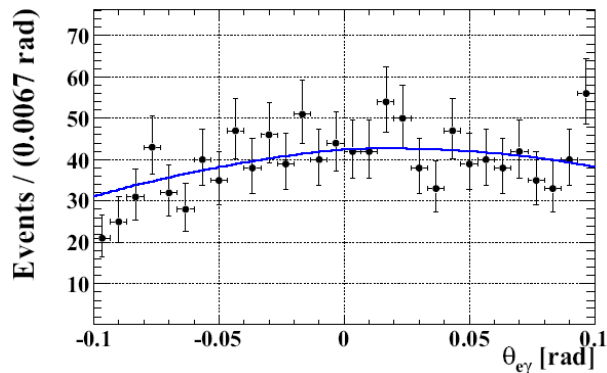
Energia del fotone



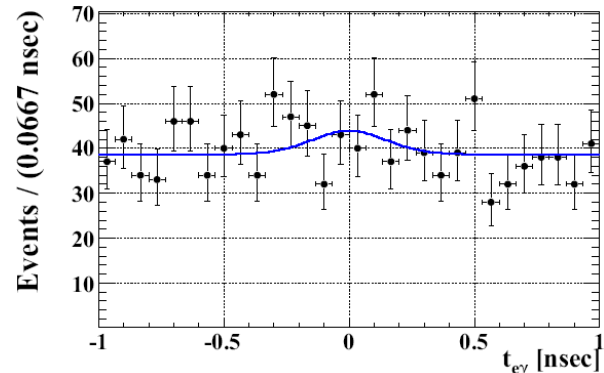
Energia dell'elettrone



Angolo tra il fotone e l'elettrone



Tempo relativo



■+■ Dati sperimentali — Fit del funzione di verosimiglianza

Risultati dei fit di likelihood

Usando un livello di confidenza di 90%, si è trovato:

- $N_{\text{sig}} < 14.7$
 - ▶ Dalla funzione di verosimiglianza, il numero atteso di N_{sig} insieme col suo sigma include zero a 90% C.L.
 - ▶ L'osservazione è compatibile con zero eventi di segnale

Il numero osservato di eventi di decadimento radiativo:

- $N_{\text{rad}} = 25^{+17}_{-16}$

Calcolo del Branching Ratio

- BR = decadimenti $\mu \rightarrow e\gamma$ / decadimenti total

Assumendo
 $\text{BR}(\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu}) \approx 1$

- BR = decadimenti $\mu \rightarrow e\gamma$ / decadimenti Michel

- Numero osservato = numero vero x efficienza

▶ Quindi, numero vero = numero osservato / efficienza

- Un evento viene rivelato solo se il fotone è rivelato

▶ Bisogna dividere tutto per l'efficienze di rivelazione del fotone

$$\text{BR}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) = \frac{N_{\mu \rightarrow e\gamma}}{N_{\text{totale}}} = \frac{N_{\text{sig}}}{N_{\text{Michel}}} \times \frac{1}{\epsilon_{\gamma}} \times \frac{1}{\epsilon_{\mu \rightarrow e\gamma}} \times \epsilon_{\text{Michel}}$$

Diagrammatic annotations for the equation above:
- "Numeri veri" points to $N_{\mu \rightarrow e\gamma}$
- "Numeri osservati" points to N_{sig}
- "Efficienze" points to ϵ_{γ} , $\epsilon_{\mu \rightarrow e\gamma}$, and ϵ_{Michel}

Risultato del Branching Ratio

$$\text{BR}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) = \underbrace{\frac{N_{\text{sig}}}{N_{e\nu\bar{\nu}}}}_{\text{Numeri rivelati}} \times \underbrace{\frac{f_{e\nu\bar{\nu}}^E}{P}}_{\text{Fattore di rivelazione}} \times \underbrace{\frac{\varepsilon_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{trig}}}{\varepsilon_{e\gamma}^{\text{trig}}} \times \frac{A_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{TC}}}{A_{e\gamma}^{\text{TC}}}}_{\text{Efficienza segnale \& Michel}} \times \underbrace{\frac{\varepsilon_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{DCH}}}{\varepsilon_{e\lambda}^{\text{DCH}}}}_{\text{Efficienza fotone}} \times \frac{1}{A_{e\lambda}^g} \times \frac{1}{\varepsilon_{e\gamma}}$$

N_{sig} = numero di eventi $\mu \rightarrow e\gamma$ (dal fit di likelihood)

$N_{e\nu\bar{\nu}} = 11414$ numero di positroni Michel rivelati con $50 \text{ MeV} < E_e < 56 \text{ MeV}$

$f_{e\nu\bar{\nu}}^E = 0.101 \pm 0.006$ frazione dello spettro di Michel sopra 50 MeV

$P = 10^7$ prescaling fattore di selezione del trigger per i positroni Michel

$\varepsilon_{e\gamma}^{\text{trig}} / \varepsilon_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{trig}} = 0.66 \pm 0.03$ rapporto tra le efficienze dei trigger (segnale vs Michel)

$A_{e\gamma}^{\text{TC}} / A_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{TC}} = 1.11 \pm 0.02$ rapporto tra le efficienze di *matching* dei rivelatori del positrone

$\varepsilon_{e\lambda}^{\text{DCH}} / \varepsilon_{e\nu\bar{\nu}}^{\text{DCH}} = 1.02 \pm 0.005$ rapporto tra le efficienze di ricostruzione e accettazione del e^+

$A_{e\lambda}^g = 0.98 \pm 0.005$ accettazione geometrica per il fotone dato un segnale accettato del positrone

$\varepsilon_{e\gamma} = 0.63 \pm 0.04$ efficienza di ricostruzione e accettazione del fotone

Conclusioni

- Il limite sul branching ratio del decadimento $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ è:
 - ▶ $\text{BR}(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) \leq 2.8 \times 10^{-11}$ (90% C.L.)
 - ▶ Con una sensibilità di 1.3×10^{-11}
- Questo risultato non è soddisfacente
 - ▶ È più alto del limite attuale trovato a MEGA in 1999
 - $\text{BR}(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) \leq 1.2 \times 10^{-11}$ (90% C.L.)
- Si può migliorare il risultato:
 - ▶ Aumentando il numero di dati (tempo d'acquisizione)
 - ▶ Aumentando l'efficienza dei vari rivelatori / trigger / DAQ
 - ▶ Migliorando la risoluzione dei rivelatori
- L'obiettivo di MEG è di ottenere una sensibilità di circa 10^{-13}