

L'esperimento Mu2e e la ricerca della violazione del sapore leptonic



Stefano Di Falco
Consiglio di Sezione
Pisa, 18 Novembre 2024

L'esperimento Mu2e



Mu2e (si legge “Mu to e”) è un esperimento in costruzione al Fermilab di Chicago.

Il suo scopo principale è la scoperta della conversione di un **muone** in un **elettrone**

L'osservazione di questo processo, finora mai riuscita, sarebbe una prova inequivocabile dell'esistenza di **nuova fisica** al di là del Modello Standard che è stato finora utilizzato con successo per descrivere le interazioni delle particelle



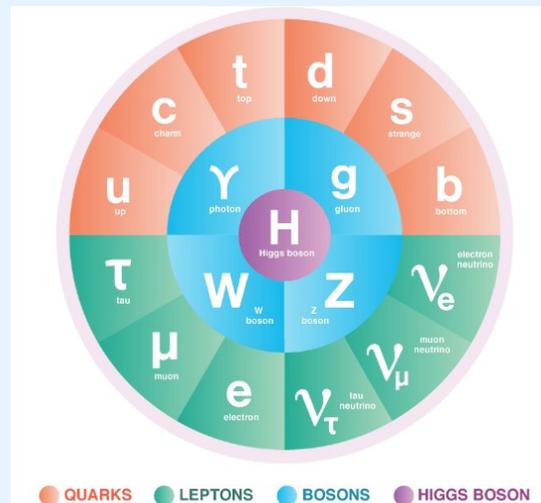
L'esperimento Mu2e



Mu2e (si legge “Mu to e”) è un esperimento in costruzione al Fermilab di Chicago.

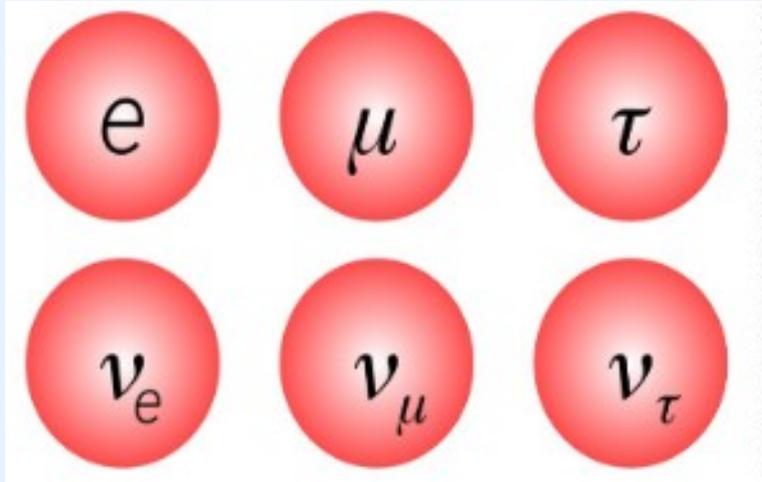
Il suo scopo principale è la scoperta della conversione di un **muone** in un **elettrone**

L'osservazione di questo processo, finora mai riuscita, sarebbe una prova inequivocabile dell'esistenza di **nuova fisica** al di là del Modello Standard che è stato finora utilizzato con successo per descrivere le interazioni delle particelle



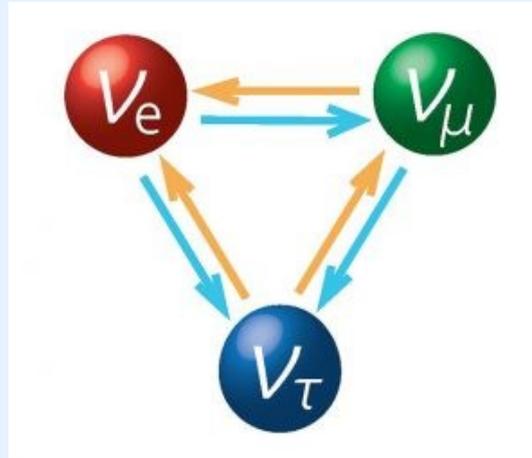
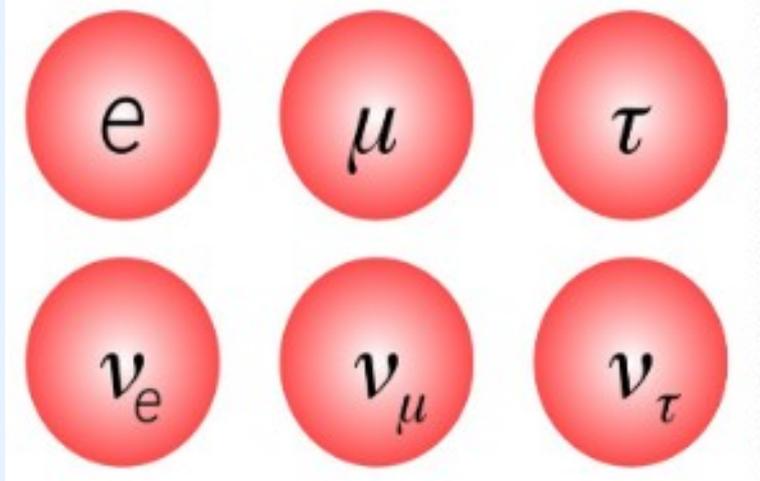
Sia il muone (μ) che l'elettrone sono **leptoni** (in contrapposizione ai quark che si trovano all'interno di protoni e neutroni)

Il sapore leptonico e la sua conservazione



Esistono 3 famiglie (*'sapori'*) di leptoni: **Elettone**(e), **Muone**(μ) e **Tau**(τ)
Il μ pesa ~ 200 volte più dell'elettone, il $\tau \sim 17$ volte più del μ

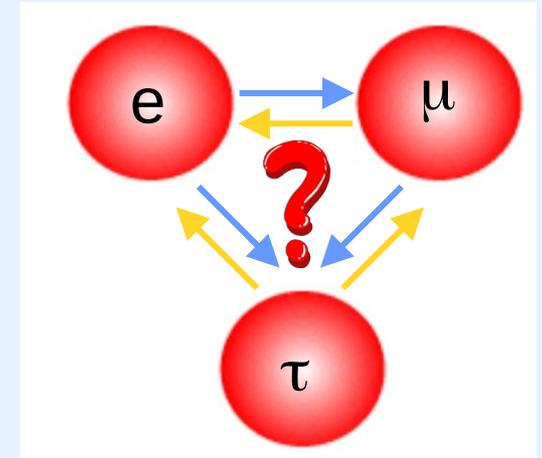
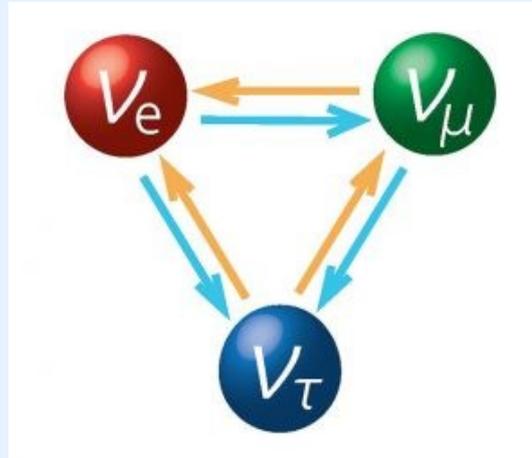
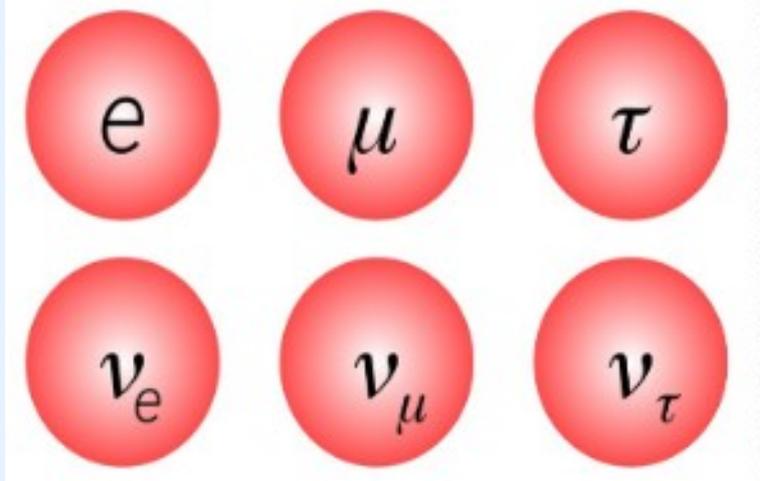
Il sapore leptonic e la sua conservazione



Esistono 3 famiglie (*'saponi'*) di leptoni: **Elettrone**(e), **Muone**(μ) e **Tau**(τ)
Il μ pesa ~ 200 volte piú dell'elettrone, il $\tau \sim 17$ volte piú del μ

Per ogni leptone carico esiste un corrispondente **neutrino**: ν_e, ν_μ, ν_τ
La massa dei neutrini è così piccola da non essere ancora stata misurata ma sappiamo che non è nulla perché abbiamo osservato che i neutrini possono **'oscillare'**, passando da una famiglia all'altra

Il sapore leptonic e la sua conservazione



Esistono 3 famiglie (*'sapori'*) di leptoni: **Elettone**(e), **Muone**(μ) e **Tau**(τ)
Il μ pesa ~ 200 volte più dell'elettone, il τ ~ 17 volte più del μ

Per ogni leptone carico esiste un corrispondente **neutrino**: ν_e , ν_μ , ν_τ
La massa dei neutrini è così piccola da non essere ancora stata misurata ma sappiamo che non è nulla perché abbiamo osservato che i neutrini possono **'oscillare'**, passando da una famiglia all'altra

Una simile oscillazione non è mai stata osservata per i leptoni carichi e non è prevista dal Modello Standard per cui si ha una legge empirica di **'Conservazione del sapore leptonic carico'**. La violazione di questa legge va sotto il nome di **'Violazione del sapore leptonic carico'**, in inglese **'Charged Lepton Flavor Violation' (CLFV)**

La ricerca della CLFV

Reaction	Present limit	C.L.	Experiment	Year	Reference
$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$	$< 4.2 \times 10^{-13}$	90%	MEG at PSI	2016	[48]
$\mu^+ \rightarrow e^+e^-e^+$	$< 1.0 \times 10^{-12}$	90%	SINDRUM	1988	[49]
$\mu^-Ti \rightarrow e^-Ti^\dagger$	$< 6.1 \times 10^{-13}$	90%	SINDRUM II	1998	[50]
$\mu^-Pb \rightarrow e^-Pb^\dagger$	$< 4.6 \times 10^{-11}$	90%	SINDRUM II	1996	[51]
$\mu^-Au \rightarrow e^-Au^\dagger$	$< 7.0 \times 10^{-13}$	90%	SINDRUM II	2006	[53]
$\mu^-Ti \rightarrow e^+Ca^*\dagger$	$< 3.6 \times 10^{-11}$	90%	SINDRUM II	1998	[52]
$\mu^+e^- \rightarrow \mu^-e^+$	$< 8.3 \times 10^{-11}$	90%	SINDRUM	1999	[54]
$\tau \rightarrow e\gamma$	$< 3.3 \times 10^{-8}$	90%	BaBar	2010	[55]
$\tau \rightarrow \mu\gamma$	$< 4.4 \times 10^{-8}$	90%	BaBar	2010	[55]
$\tau \rightarrow eee$	$< 2.7 \times 10^{-8}$	90%	Belle	2010	[56]
$\tau \rightarrow \mu\mu\mu$	$< 2.1 \times 10^{-8}$	90%	Belle	2010	[56]
$\tau \rightarrow \pi^0e$	$< 8.0 \times 10^{-8}$	90%	Belle	2007	[57]
$\tau \rightarrow \pi^0\mu$	$< 1.1 \times 10^{-7}$	90%	BaBar	2007	[58]
$\tau \rightarrow \rho^0e$	$< 1.8 \times 10^{-8}$	90%	Belle	2011	[59]
$\tau \rightarrow \rho^0\mu$	$< 1.2 \times 10^{-8}$	90%	Belle	2011	[59]
$\pi^0 \rightarrow \mu e$	$< 3.6 \times 10^{-10}$	90%	KTeV	2008	[60]
$K_L^0 \rightarrow \mu e$	$< 4.7 \times 10^{-12}$	90%	BNL E871	1998	[61]
$K_L^0 \rightarrow \pi^0\mu^+e^-$	$< 7.6 \times 10^{-11}$	90%	KTeV	2008	[60]
$K^+ \rightarrow \pi^+\mu^+e^-$	$< 1.3 \times 10^{-11}$	90%	BNL E865	2005	[62]
$J/\psi \rightarrow \mu e$	$< 1.5 \times 10^{-7}$	90%	BESIII	2013	[63]
$J/\psi \rightarrow \tau e$	$< 8.3 \times 10^{-6}$	90%	BESII	2004	[64]
$J/\psi \rightarrow \tau\mu$	$< 2.0 \times 10^{-6}$	90%	BESII	2004	[64]
$B^0 \rightarrow \mu e$	$< 2.8 \times 10^{-9}$	90%	LHCb	2013	[67]
$B^0 \rightarrow \tau e$	$< 2.8 \times 10^{-5}$	90%	BaBar	2008	[68]
$B^0 \rightarrow \tau\mu$	$< 2.2 \times 10^{-5}$	90%	BaBar	2008	[68]
$B \rightarrow K\mu e^\dagger$	$< 3.8 \times 10^{-8}$	90%	BaBar	2006	[65]
$B \rightarrow K^*\mu e^\dagger$	$< 5.1 \times 10^{-7}$	90%	BaBar	2006	[65]
$B^+ \rightarrow K^+\tau\mu$	$< 4.8 \times 10^{-5}$	90%	BaBar	2012	[66]
$B^+ \rightarrow K^+\tau e$	$< 3.0 \times 10^{-5}$	90%	BaBar	2012	[66]
$B_s^0 \rightarrow \mu e$	$< 1.1 \times 10^{-8}$	90%	LHCb	2013	[67]
$\Upsilon(1s) \rightarrow \tau\mu$	$< 6.0 \times 10^{-6}$	95%	CLEO	2008	[69]
$Z \rightarrow \mu e$	$< 7.5 \times 10^{-7}$	95%	LHC ATLAS	2014	[70]
$Z \rightarrow \tau e$	$< 9.8 \times 10^{-6}$	95%	LEP OPAL	1995	[71]
$Z \rightarrow \tau\mu$	$< 1.2 \times 10^{-5}$	95%	LEP DELPHI	1997	[72]
$h \rightarrow e\mu$	$< 3.5 \times 10^{-4}$	95%	LHC CMS	2016	[73]
$h \rightarrow \tau\mu$	$< 2.5 \times 10^{-3}$	95%	LHC CMS	2017	[74]
$h \rightarrow \tau e$	$< 6.1 \times 10^{-3}$	95%	LHC CMS	2017	[74]

Vista la possibilità di creare **fasci di muoni** di alta intensità e l'assenza di **canali di decadimento** competitivi a parte $\mu \rightarrow e\nu_\mu\bar{\nu}_e$ limiti più stringenti vengono dal settore delle conversioni $\mu \rightarrow e$

La ricerca della CLFV

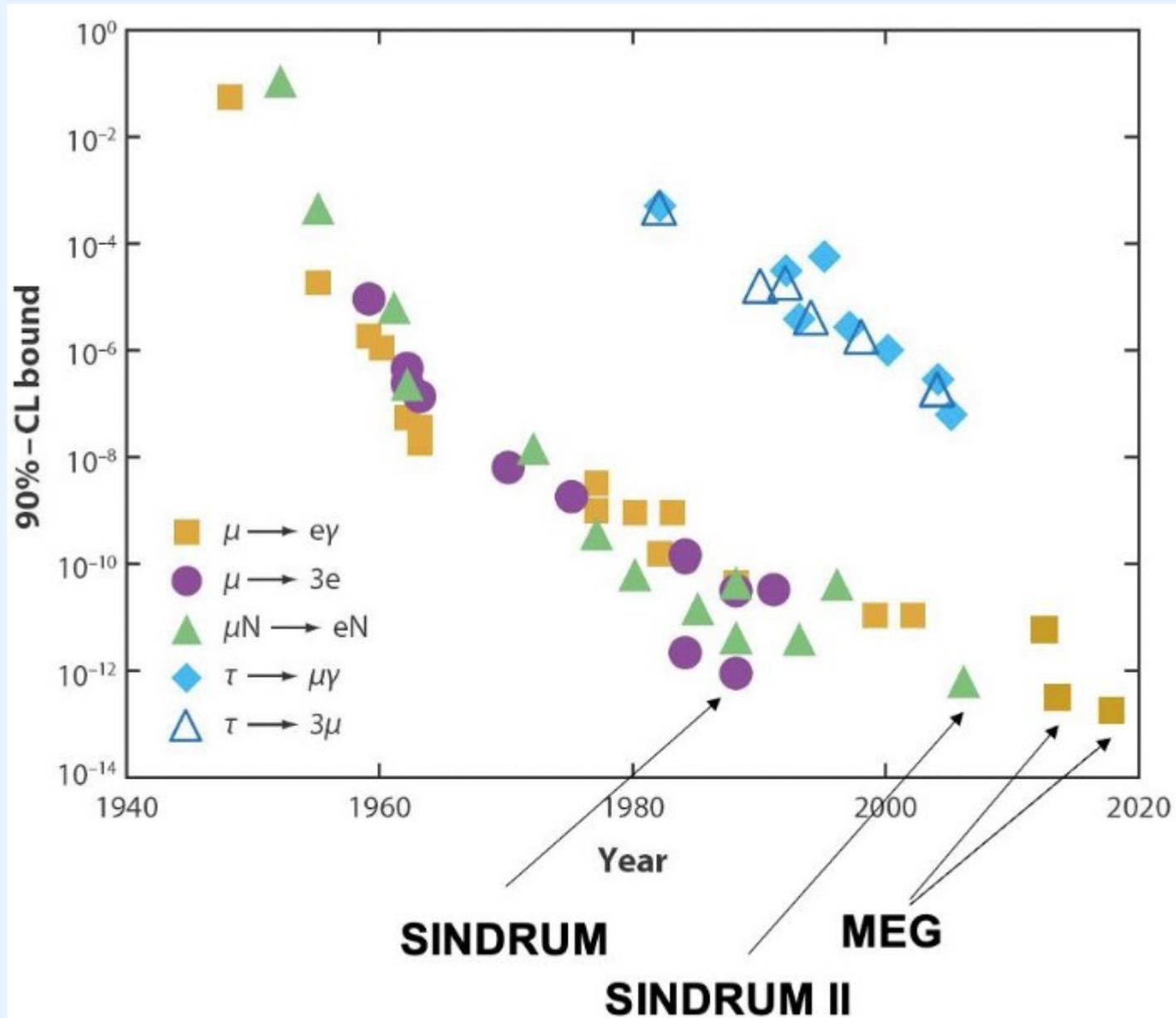
Reaction	Present limit	C.L.	Experiment	Year	Reference
$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$	$< 4.2 \times 10^{-13}$	90%	MEG at PSI	2016	[48]
$\mu^+ \rightarrow e^+e^-e^+$	$< 1.0 \times 10^{-12}$	90%	SINDRUM	1988	[49]
$\mu^-Ti \rightarrow e^-Ti^\dagger$	$< 6.1 \times 10^{-13}$	90%	SINDRUM II	1998	[50]
$\mu^-Pb \rightarrow e^-Pb^\dagger$	$< 4.6 \times 10^{-11}$	90%	SINDRUM II	1996	[51]
$\mu^-Au \rightarrow e^-Au^\dagger$	$< 7.0 \times 10^{-13}$	90%	SINDRUM II	2006	[53]
$\mu^-Ti \rightarrow e^+Ca^*^\dagger$	$< 3.6 \times 10^{-11}$	90%	SINDRUM II	1998	[52]
$\mu^+e^- \rightarrow \mu^-e^+$	$< 8.3 \times 10^{-11}$	90%	SINDRUM	1999	[54]
$\tau \rightarrow e\gamma$	$< 3.3 \times 10^{-8}$	90%	BaBar	2010	[55]
$\tau \rightarrow \mu\gamma$	$< 4.4 \times 10^{-8}$	90%	BaBar	2010	[55]
$\tau \rightarrow eee$	$< 2.7 \times 10^{-8}$	90%	Belle	2010	[56]
$\tau \rightarrow \mu\mu\mu$	$< 2.1 \times 10^{-8}$	90%	Belle	2010	[56]
$\tau \rightarrow \pi^0e$	$< 8.0 \times 10^{-8}$	90%	Belle	2007	[57]
$\tau \rightarrow \pi^0\mu$	$< 1.1 \times 10^{-7}$	90%	BaBar	2007	[58]
$\tau \rightarrow \rho^0e$	$< 1.8 \times 10^{-8}$	90%	Belle	2011	[59]
$\tau \rightarrow \rho^0\mu$	$< 1.2 \times 10^{-8}$	90%	Belle	2011	[59]
$\pi^0 \rightarrow \mu e$	$< 3.6 \times 10^{-10}$	90%	KTeV	2008	[60]
$K_L^0 \rightarrow \mu e$	$< 4.7 \times 10^{-12}$	90%	BNL E871	1998	[61]
$K_L^0 \rightarrow \pi^0\mu^+e^-$	$< 7.6 \times 10^{-11}$	90%	KTeV	2008	[60]
$K^+ \rightarrow \pi^+\mu^+e^-$	$< 1.3 \times 10^{-11}$	90%	BNL E865	2005	[62]
$J/\psi \rightarrow \mu e$	$< 1.5 \times 10^{-7}$	90%	BESIII	2013	[63]
$J/\psi \rightarrow \tau e$	$< 8.3 \times 10^{-6}$	90%	BESII	2004	[64]
$J/\psi \rightarrow \tau\mu$	$< 2.0 \times 10^{-6}$	90%	BESII	2004	[64]
$B^0 \rightarrow \mu e$	$< 2.8 \times 10^{-9}$	90%	LHCb	2013	[67]
$B^0 \rightarrow \tau e$	$< 2.8 \times 10^{-5}$	90%	BaBar	2008	[68]
$B^0 \rightarrow \tau\mu$	$< 2.2 \times 10^{-5}$	90%	BaBar	2008	[68]
$B \rightarrow K\mu e^\dagger$	$< 3.8 \times 10^{-8}$	90%	BaBar	2006	[65]
$B \rightarrow K^*\mu e^\dagger$	$< 5.1 \times 10^{-7}$	90%	BaBar	2006	[65]
$B^+ \rightarrow K^+\tau\mu$	$< 4.8 \times 10^{-5}$	90%	BaBar	2012	[66]
$B^+ \rightarrow K^+\tau e$	$< 3.0 \times 10^{-5}$	90%	BaBar	2012	[66]
$B_s^0 \rightarrow \mu e$	$< 1.1 \times 10^{-8}$	90%	LHCb	2013	[67]
$\Upsilon(1s) \rightarrow \tau\mu$	$< 6.0 \times 10^{-6}$	95%	CLEO	2008	[69]
$Z \rightarrow \mu e$	$< 7.5 \times 10^{-7}$	95%	LHC ATLAS	2014	[70]
$Z \rightarrow \tau e$	$< 9.8 \times 10^{-6}$	95%	LEP OPAL	1995	[71]
$Z \rightarrow \tau\mu$	$< 1.2 \times 10^{-5}$	95%	LEP DELPHI	1997	[72]
$h \rightarrow e\mu$	$< 3.5 \times 10^{-4}$	95%	LHC CMS	2016	[73]
$h \rightarrow \tau\mu$	$< 2.5 \times 10^{-3}$	95%	LHC CMS	2017	[74]
$h \rightarrow \tau e$	$< 6.1 \times 10^{-3}$	95%	LHC CMS	2017	[74]

Vista la possibilità di creare **fasci di muoni** di alta intensità e l'assenza di **canali di decadimento** competitivi a parte $\mu \rightarrow e\nu_\mu\bar{\nu}_e$ limiti più stringenti vengono dal settore delle conversioni $\mu \rightarrow e$

Per poter conservare l'energia e l'impulso è necessario che nel processo sia coinvolta oltre all'elettrone un'**altra particella**, un fotone (reale o virtuale) o un nucleo:

- $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ (MeGII)
- $\mu^+ \rightarrow e^+e^-e^+$ (Mu3e)
- $\mu^-N \rightarrow e^-N$ (COMET, Mu2e)

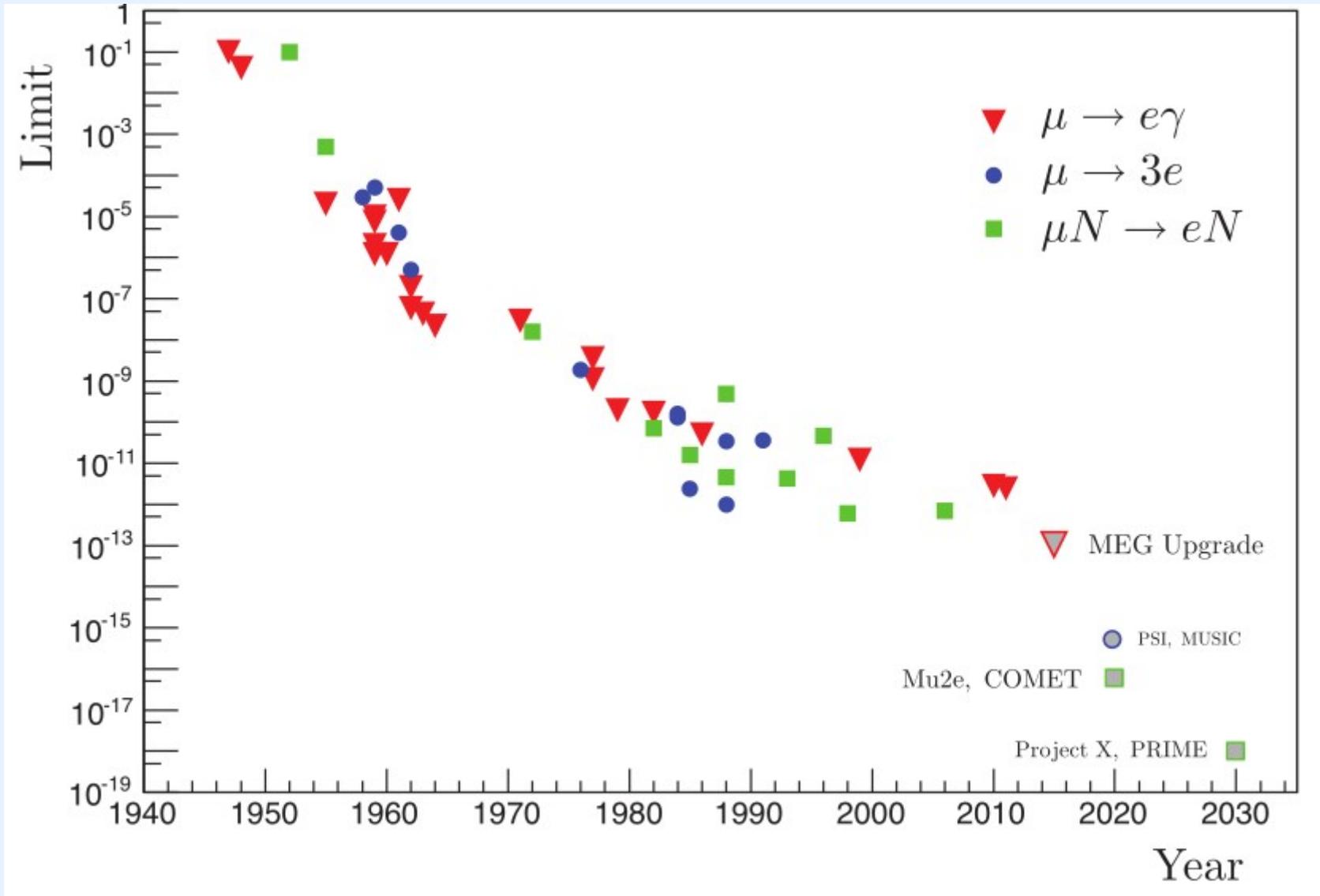
Storia sperimentale della ricerca della CLFV con i muoni



In 70 anni la sensibilità è aumentata di 12 ordini di grandezza

Proiezioni sulla ricerca di CLFV con i muoni nel 2014

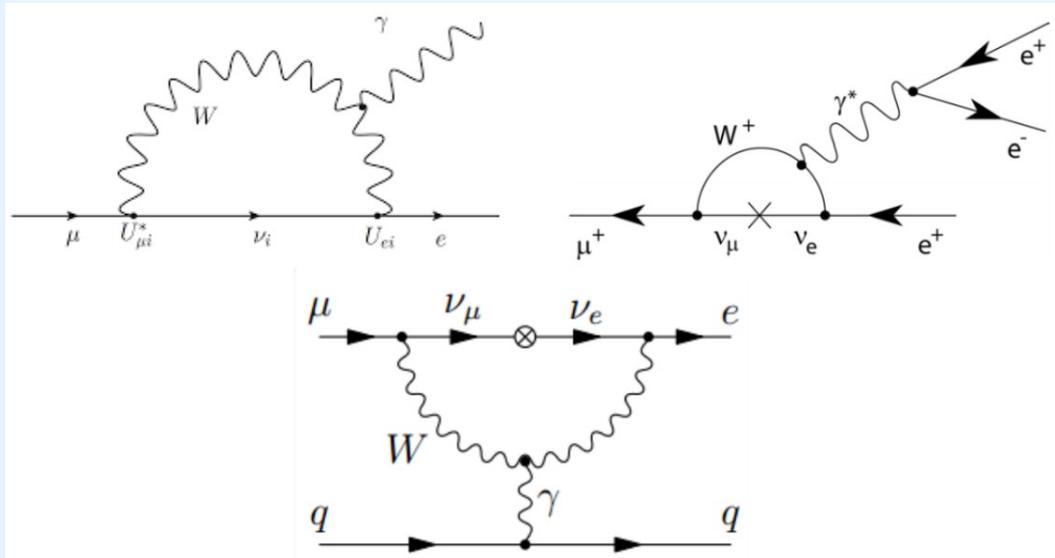
arXiv:1307.5787v3 [hep-ex] 13 Jan 2014



Legge di Hofstadter:

Per fare le cose ci vuole sempre più tempo di quello che si programma, anche se nella programmazione si tiene conto della legge di Hofstadter!

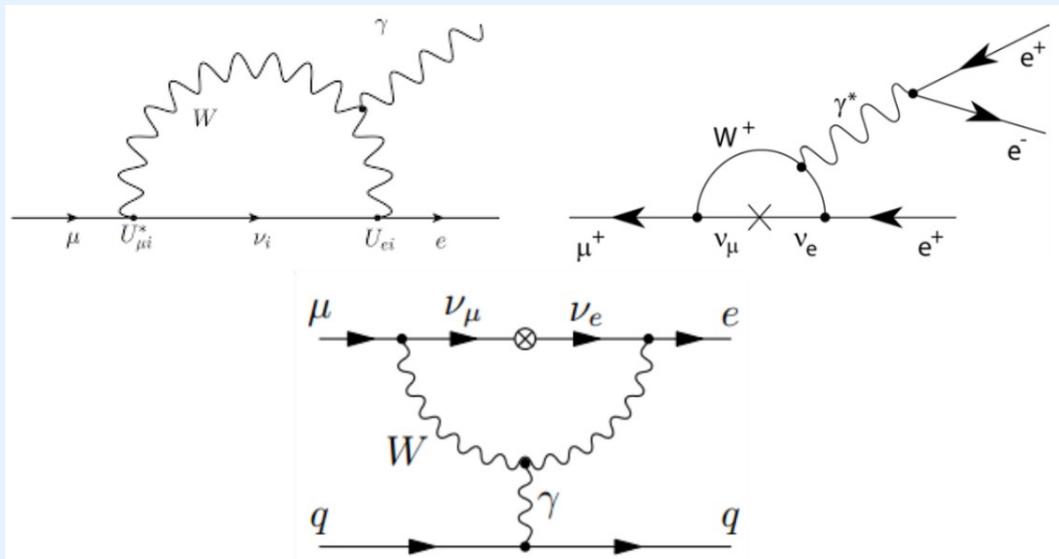
Possibilità di scoprire la CLFV secondo il Modello Standard



Anche estendendo il **Modello Standard** in modo da includere la massa dei neutrini la probabilità di CLFV attesa è **< 10⁻⁵³** !

$$\mathcal{B}(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{i1}^2}{M_W^2} \right|^2 \sim 10^{-54}$$

Possibilità di scoprire la CLFV secondo il Modello Standard



Anche estendendo il **Modello Standard** in modo da includere la massa dei neutrini la probabilità di CLFV attesa è **$< 10^{-53}$** !

$$\mathcal{B}(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{i1}^2}{M_W^2} \right|^2 \sim 10^{-54}$$

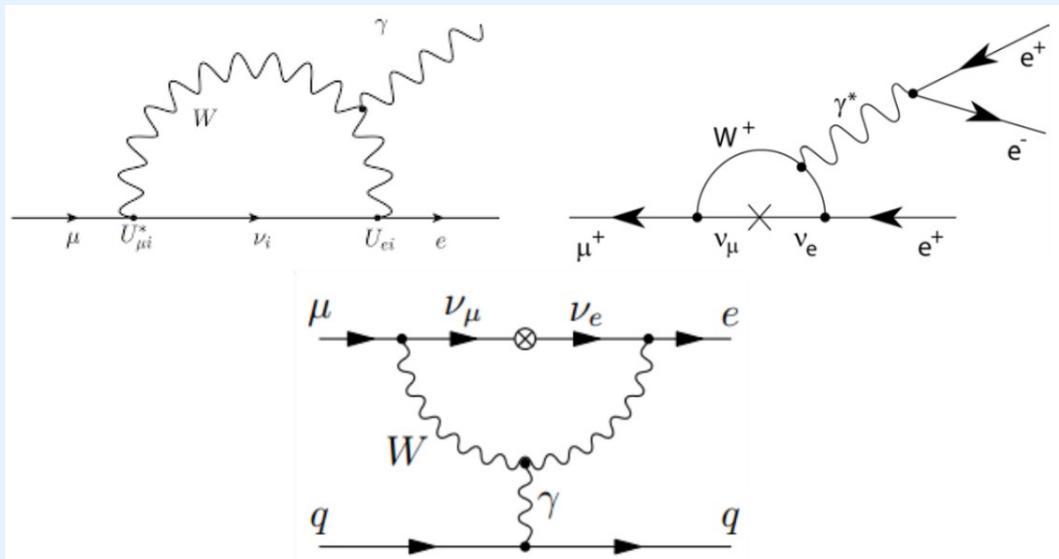
Per potere osservare un solo evento occorrerebbero almeno $10^{53} \mu$



La massa del muone è $105.65 \text{ MeV} \sim 2 \cdot 10^{-28} \text{ Kg}$

La massa di $10^{53} \mu$ è $\sim 2 \cdot 10^{25} \text{ Kg}$, cioè più di **3 volte la massa della Terra!!**

Possibilità di scoprire la CLFV secondo il Modello Standard



Anche estendendo il **Modello Standard** in modo da includere la massa dei neutrini la probabilità di CLFV attesa è **$< 10^{-53}$** !

$$\mathcal{B}(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{i1}^2}{M_W^2} \right|^2 \sim 10^{-54}$$

Per potere osservare un solo evento occorrerebbero almeno $10^{53} \mu$



La massa del muone è $105.65 \text{ MeV} \sim 2 \cdot 10^{-28} \text{ Kg}$

La massa di $10^{53} \mu$ è $\sim 2 \cdot 10^{25} \text{ Kg}$, cioè più di **3 volte la massa della Terra!!**

Possibilità di scoprire Nuova Fisica con la CLFV

Molte teorie oltre il Modello Standard ammettono probabilità $\mathcal{O}(10^{-15})$

Possono essere riassunte in una **lagrangiana effettiva**:

$$\mathcal{L}_{CLFV} = \underbrace{\frac{m_\mu}{(k+1)\Lambda^2} \bar{\mu}_R \sigma_{\mu\nu} e_L F^{\mu\nu}}_{\text{Interazioni di dipolo}} + \underbrace{\frac{k}{(1+k)\Lambda^2} \bar{\mu}_L \gamma_\mu e_L (\bar{u}_L \gamma^\mu u_L + \bar{d}_L \gamma^\mu d_L + \bar{e}_L \gamma^\mu e_L)}_{\text{Interazioni di contatto a quattro fermioni}} + \text{h.c.}$$

Dove Λ è la **scala di energia** a cui gli effetti della nuova fisica possono essere osservati e k è il peso relativo di termini delle interazioni di tipo **dipolo** (con fotoni o bosoni reali o virtuali) e di quelle di **contatto** tra quattro fermioni (non presenti in $\mu \rightarrow e\gamma$)

Possibilità di scoprire Nuova Fisica con la CLFV

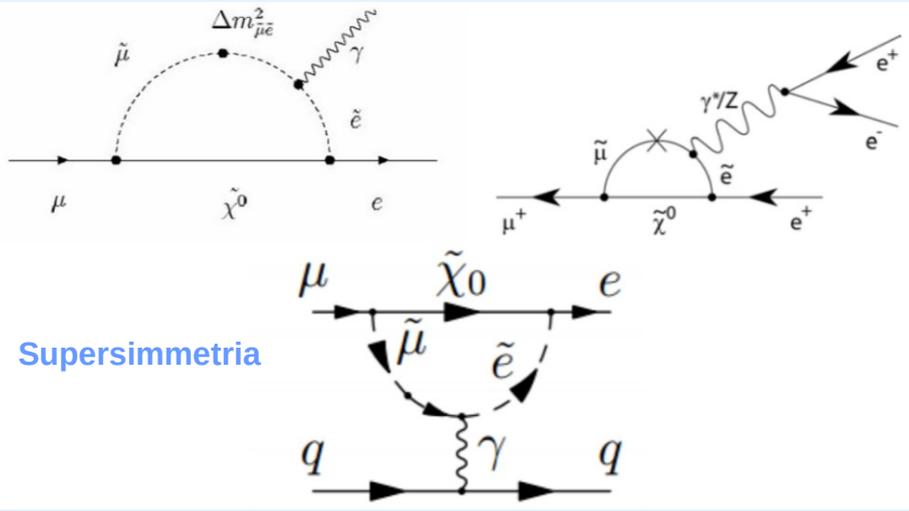
Molte teorie oltre il Modello Standard ammettono probabilità $O(10^{-15})$
 Possono essere riassunte in una **lagrangiana effettiva**:

$$\mathcal{L}_{CLFV} = \underbrace{\frac{m_\mu}{(k+1)\Lambda^2} \bar{\mu}_R \sigma_{\mu\nu} e_L F^{\mu\nu}}_{\text{Interazioni di dipolo}} + \underbrace{\frac{k}{(1+k)\Lambda^2} \bar{\mu}_L \gamma_\mu e_L (\bar{u}_L \gamma^\mu u_L + \bar{d}_L \gamma^\mu d_L + \bar{e}_L \gamma^\mu e_L)}_{\text{Interazioni di contatto a quattro fermioni}} + \text{h.c.}$$

Interazioni di dipolo

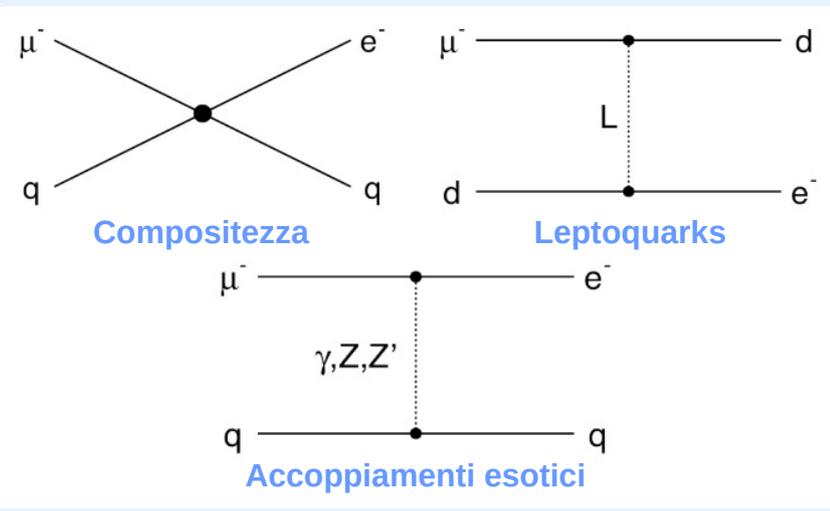
Interazioni di contatto a quattro fermioni

Dove Λ è la **scala di energia** a cui gli effetti della nuova fisica possono essere osservati e k è il peso relativo di termini delle interazioni di tipo **dipolo** (con fotoni o bosoni reali o virtuali) e di quelle di **contatto** tra quattro fermioni (non presenti in $\mu \rightarrow e\gamma$) → **Canali complementari!**



Supersimmetria

Interazioni di tipo dipolo



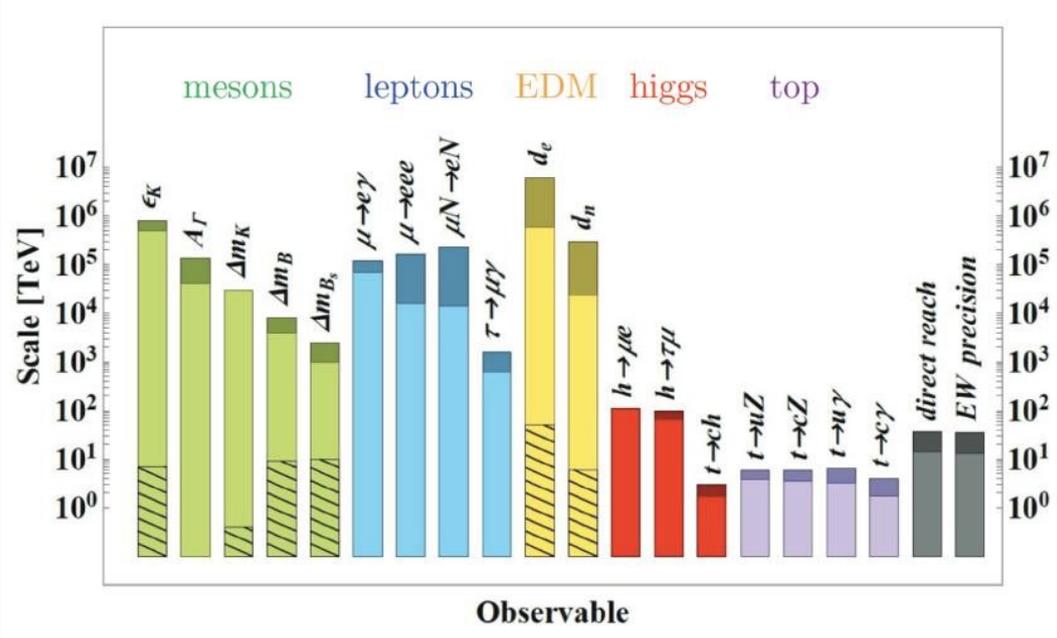
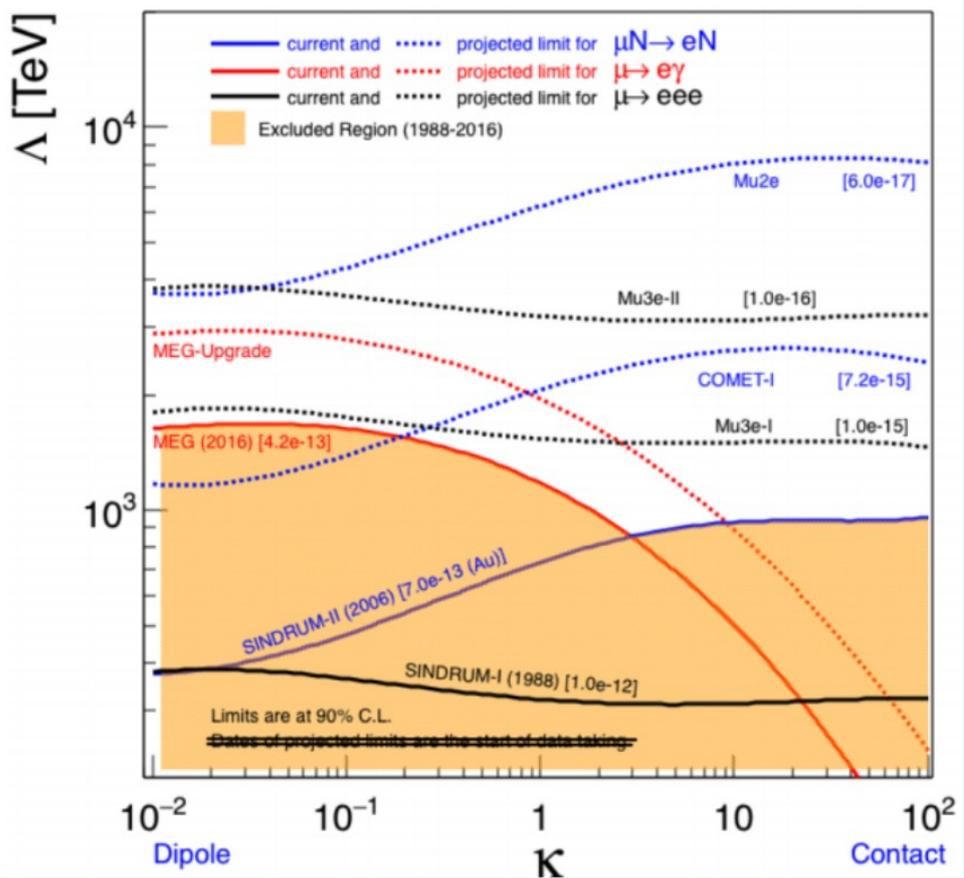
Compositezza

Leptoquarks

Accoppiamenti esotici

Interazioni di contatto a quattro fermioni

La CLFV come sonda di nuove scale di energia

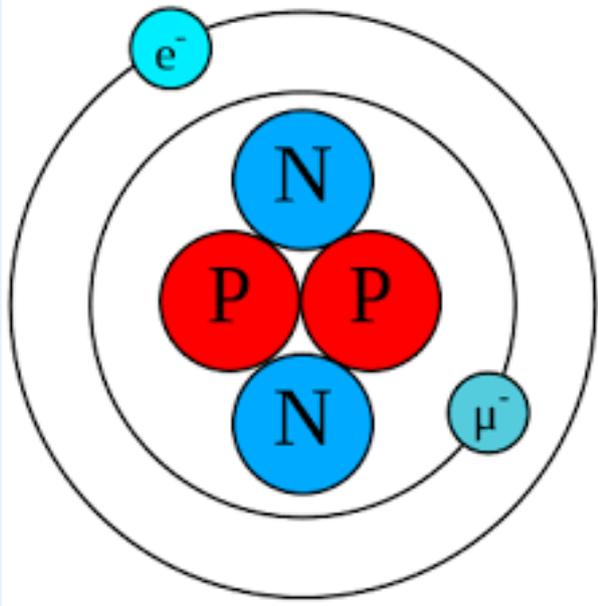


In chiaro le energie sondabili con gli esperimenti attuali, in scuro i margini di miglioramento

Con la ricerca di CLFV si potranno investigare scale di energia fino a **10⁵ TeV** non accessibili alle ricerche dirette con acceleratori

*Snowmass Report of the Frontier for Rare Processes and Precision Measurements arXiv 2210.04765

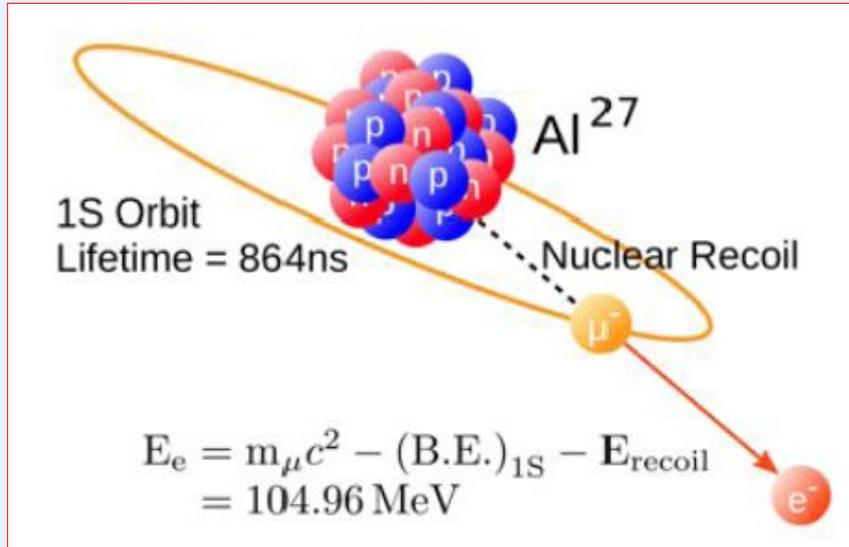
La ricerca di conversione $\mu \rightarrow e$ nel campo atomico



Quando un muone viene rallentato può essere catturato dal nucleo di un atomo vicino formando un **atomo muonico**

Il muone catturato decade velocemente allo stato fondamentale (1s) perdendo la sua eventuale polarizzazione

Limiti attuali e opportunità per il processo $\mu^-N \rightarrow e^-N$



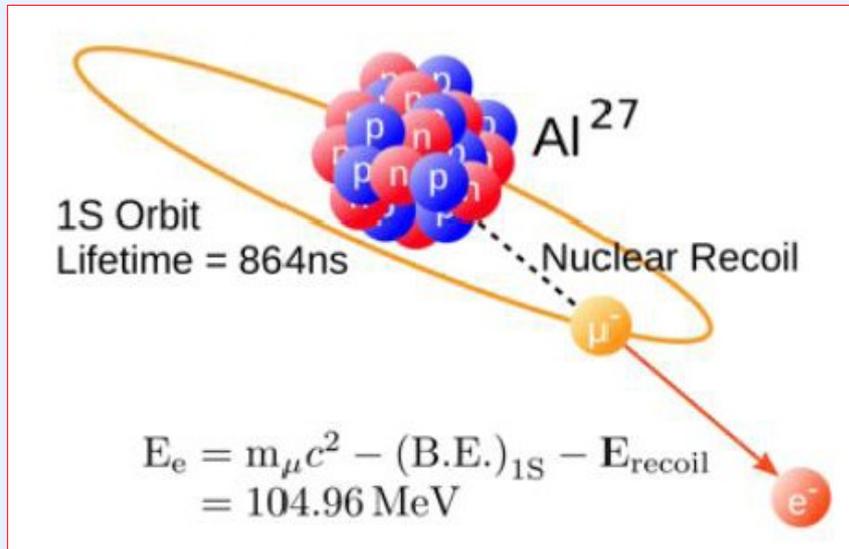
La **grandezza sperimentale** che si vuole misurare è:

$$R_{\mu e} = \frac{\Gamma(\mu^- + N \rightarrow e^- + N)}{\Gamma(\mu^- + N \rightarrow \text{all captures})}$$

L'attuale limite al 90% di livello di confidenza su questo rapporto è stato fissato nel 2006 dall'esperimento SINDRUM II al PSI usando un nucleo di oro*:

$$R_{\mu e} < 7 \cdot 10^{-13} \text{ (90\% CL)}$$

Limiti attuali e opportunità per il processo $\mu^-N \rightarrow e^-N$



La **grandezza sperimentale** che si vuole misurare è:

$$R_{\mu e} = \frac{\Gamma(\mu^- + N \rightarrow e^- + N)}{\Gamma(\mu^- + N \rightarrow \text{all captures})}$$

L'attuale limite al 90% di livello di confidenza su questo rapporto è stato fissato nel 2006 dall'esperimento SINDRUM II al PSI usando un nucleo di oro*:

$$R_{\mu e} < 7 \cdot 10^{-13} \text{ (90\% CL)}$$

L'obiettivo di **Mu2e** è di **migliorare** la sensibilità su questo rapporto un **fattore 10^4** raggiungendo valori **$O(10^{-17})$** , avendo così la possibilità di confermare i modelli di nuova fisica

Come ottenere un miglioramento di un fattore 10^4

Bisogna come sempre migliorare:

- l'errore statistico:

- produrre **più atomi muonici**
- aumentare l'**efficienza di rivelazione** degli elettroni

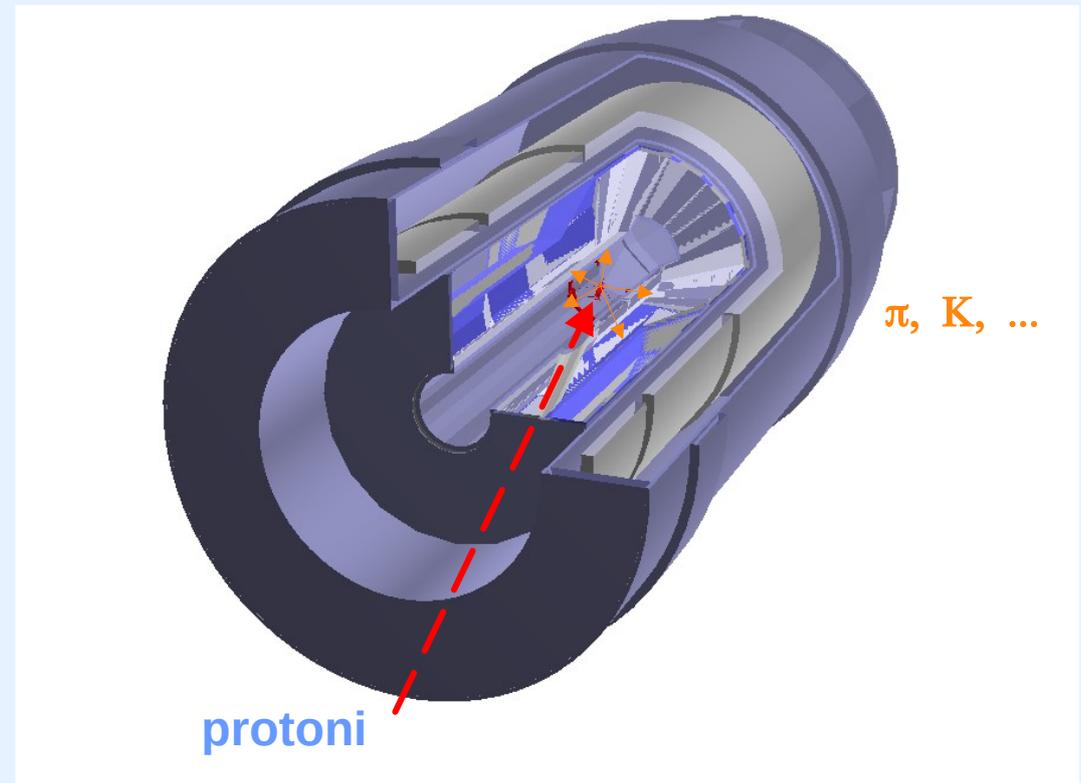
- l'errore sistematico:

- **calibrare accuratamente** la misura dell'impulso dell'elettrone
- **minimizzare** il numero di '**eventi di fondo**' che possono essere scambiati per conversioni di muoni in elettrone
- **minimizzare l'incertezza sul** contributo di questi eventi di **fondo** misurandolo se possibile con gli stessi dati dell'esperimento

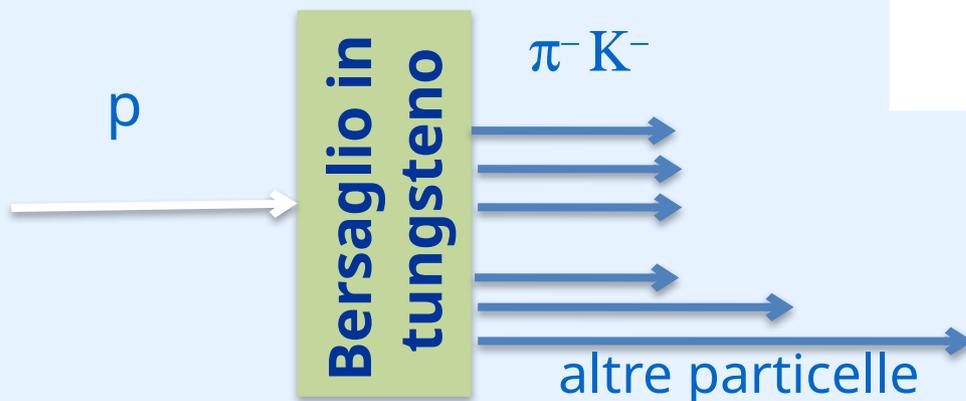
Come si fanno gli atomi muonici in Mu2e



1) Un **fascio di protoni** da 8 GeV prodotto dall'acceleratore del Fermilab viene mandato contro un bersaglio per produrre pioni e altre particelle



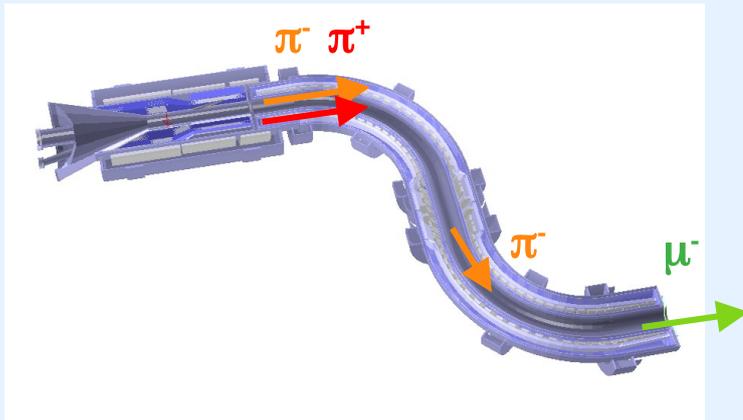
Produzione



Come si fanno gli atomi muonici in Mu2e

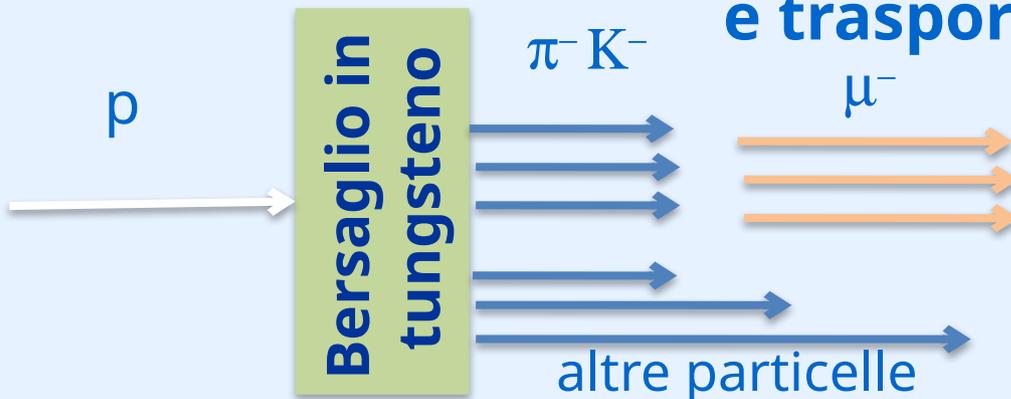
1) Un **fascio di protoni** da 8 GeV prodotto dall'acceleratore del Fermilab viene mandato contro un bersaglio per produrre pioni e altre particelle

2) I **pioni** prodotti vengono convogliati da un campo magnetico attraverso un **canale di decadimento** che ha lo scopo di dar loro il di decadere e di selezionare le particelle di **carica negativa** e **basso impulso**

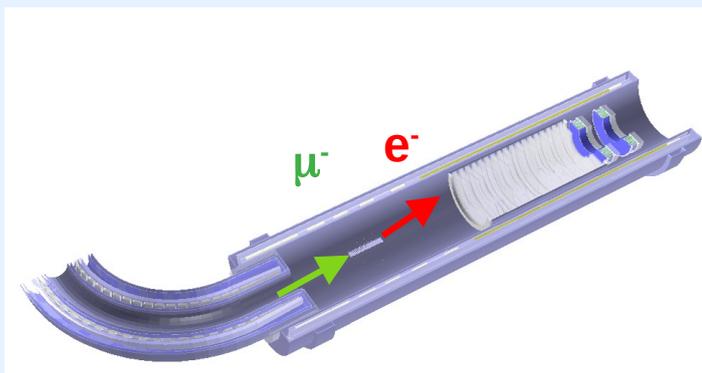
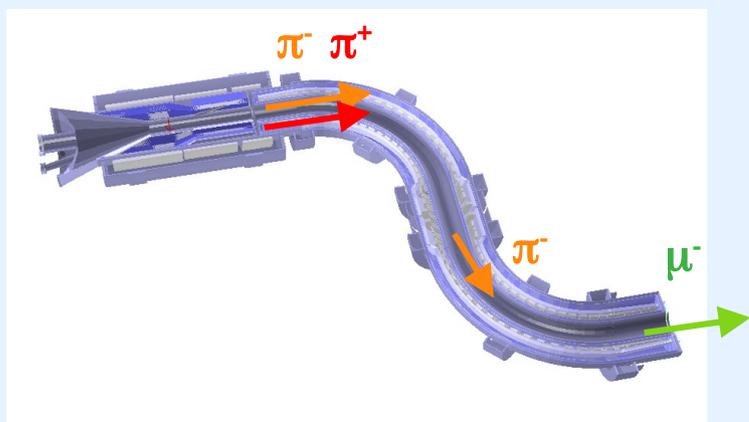


Produzione

Decadimento
e trasporto



Come si fanno gli atomi muonici in Mu2e



1) Un **fascio di protoni** da 8 GeV prodotto dall'acceleratore del Fermilab viene mandato contro un bersaglio per produrre pioni e altre particelle

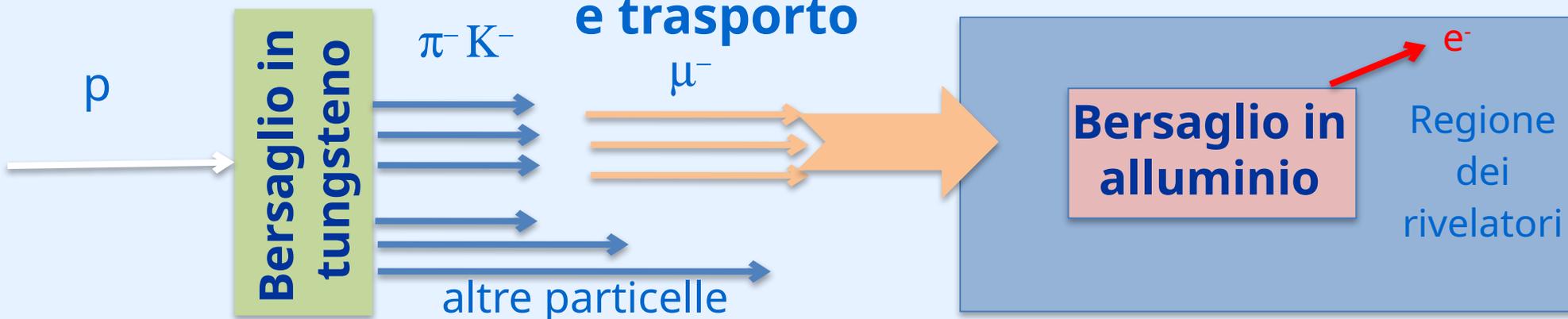
2) I **pioni** prodotti vengono convogliati da un campo magnetico attraverso un **canale di decadimento** che ha lo scopo di dar loro il di decadere e di selezionare le particelle di **carica negativa** e **basso impulso**

3) I **muoni** prodotti nel decadimento vengono catturati dall'alluminio dove eventualmente si convertono in **elettroni**

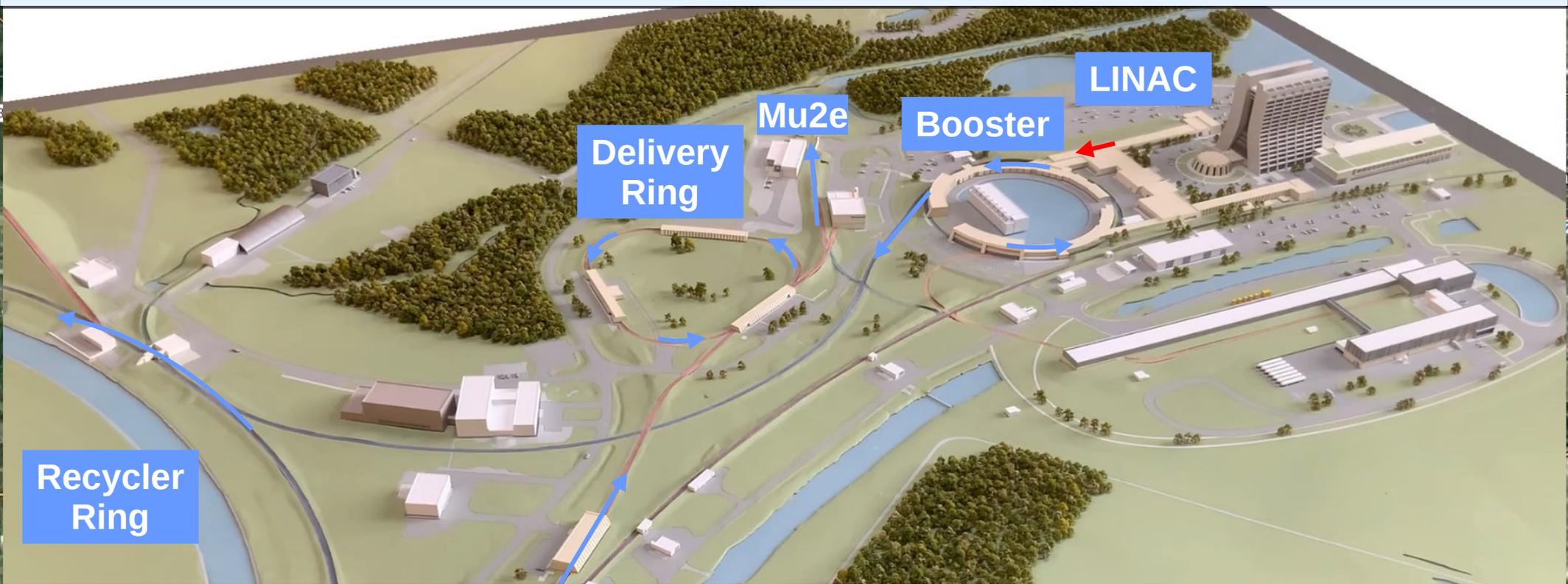
Produzione

**Decadimento
e trasporto**

Conversione e rivelazione



Quanti protoni produce Fermilab per Mu2e?



LINAC

Booster

Recycler Ring

Delivery Ring

Mu2e

Accelera i protoni a 800 MeV

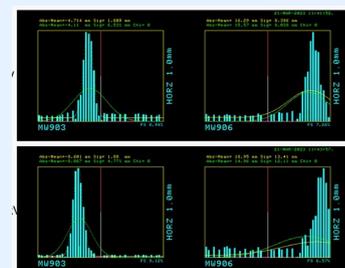
protoni a 8 GeV

Pacchetti di protoni
12 per Nova
4/8 per Mu2e

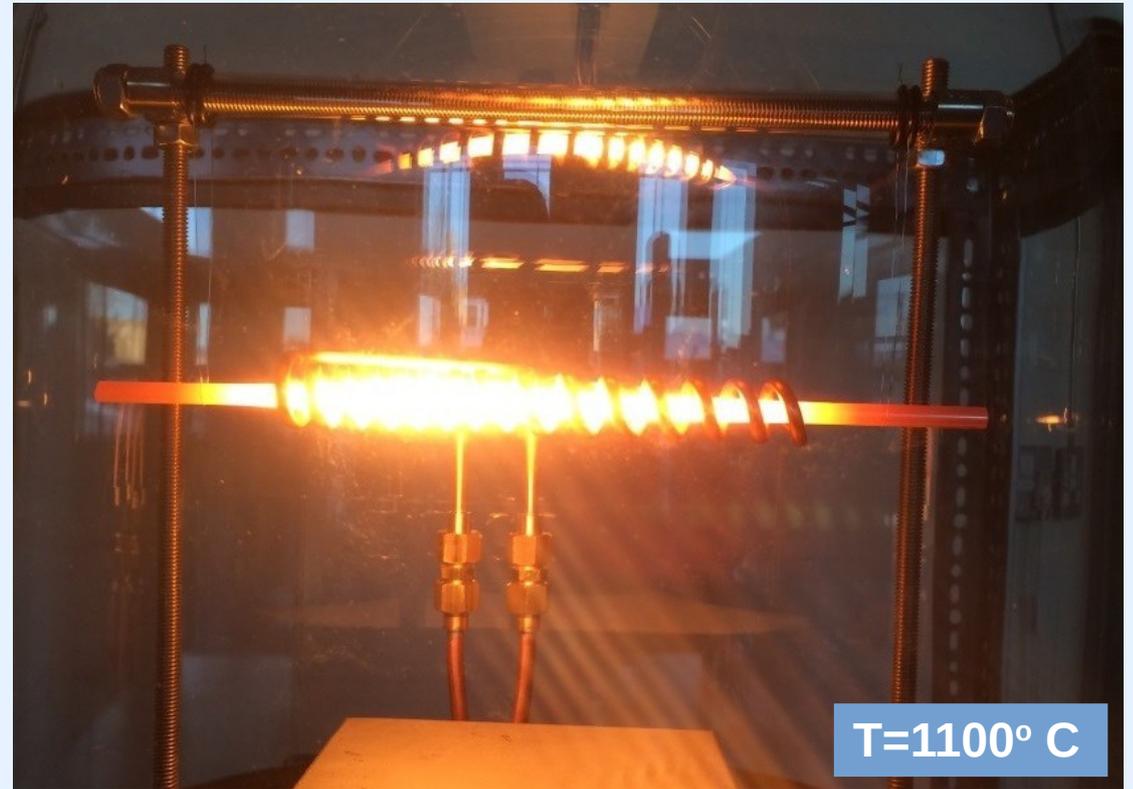
Impulsi ogni $1.7 \mu\text{s}$

$3.9 \cdot 10^7$ p/impulso ($\pm 50\%$)

In media $5.7 \cdot 10^{12}$ p/s



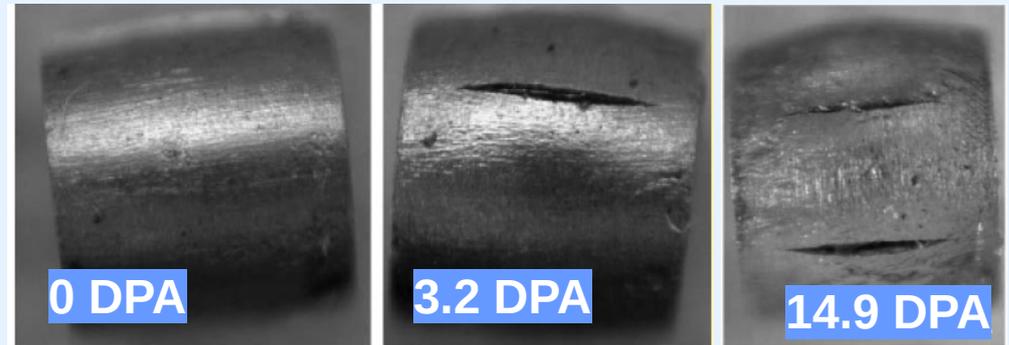
Controindicazioni legate all'intensità del fascio



Il bersaglio colpito dal fascio di protoni deve dissipare un enorme quantità di calore pur essendo nel vuoto di 10^{-4} Torr.

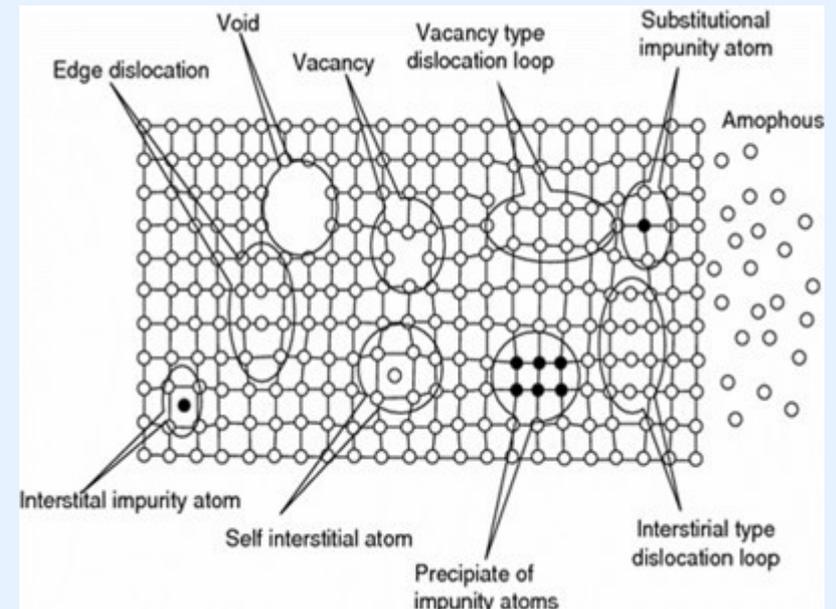
Il **tungsteno** ($T_{\text{fusione}} \sim 3400^{\circ}\text{C}$) è il materiale più indicato per resistere al calore. Una struttura segmentata che massimizza la superficie radiante può mantenere la temperatura entro **$\sim 1100^{\circ}\text{C}$** .

Controindicazioni legate all'intensità del fascio

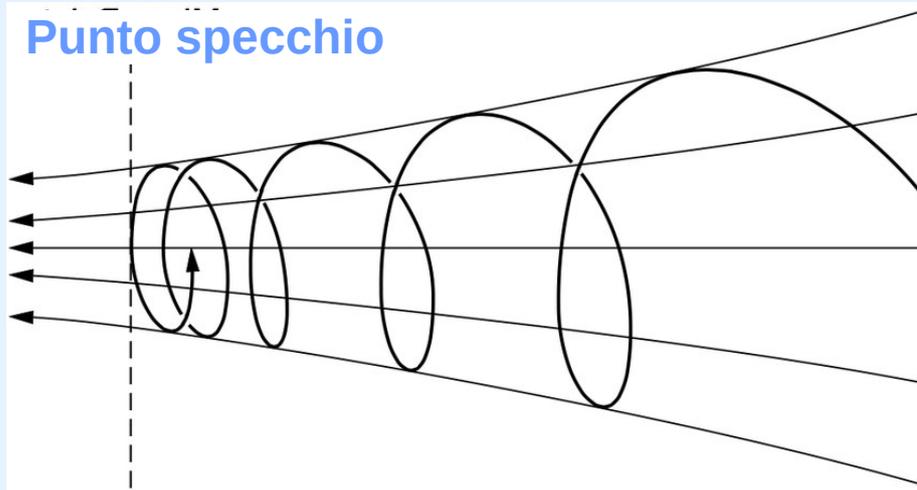


Danno strutturale prodotto dalla radiazione
(DPA=Displacements Per Atom)

E' sotto studio l'effetto della radiazione sul tungsteno: il dislocamento di atomi dal reticolo può alterare le proprietà meccaniche del bersaglio producendo crepe e provocandone la rottura



Come aumentare l'efficienza di raccolta



B_{max}

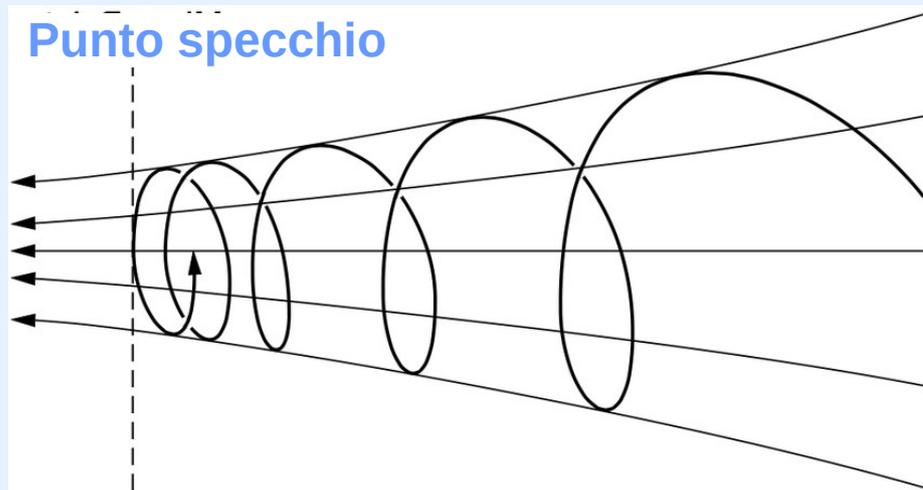
$$\theta_{crit} = \sqrt{\frac{B_{min}}{B_{max}}}$$

B_{min}

Una particella carica che si muove in un campo magnetico B costante segue una **traiettoria elicoidale**. Se B aumenta, per la conservazione dell'energia e del momento angolare la velocità longitudinale diminuisce. Se l'angolo di inclinazione della velocità rispetto a B è maggiore di θ_{crit} la particella si ferma e torna indietro (**'specchio magnetico'**)

Come aumentare l'efficienza di raccolta

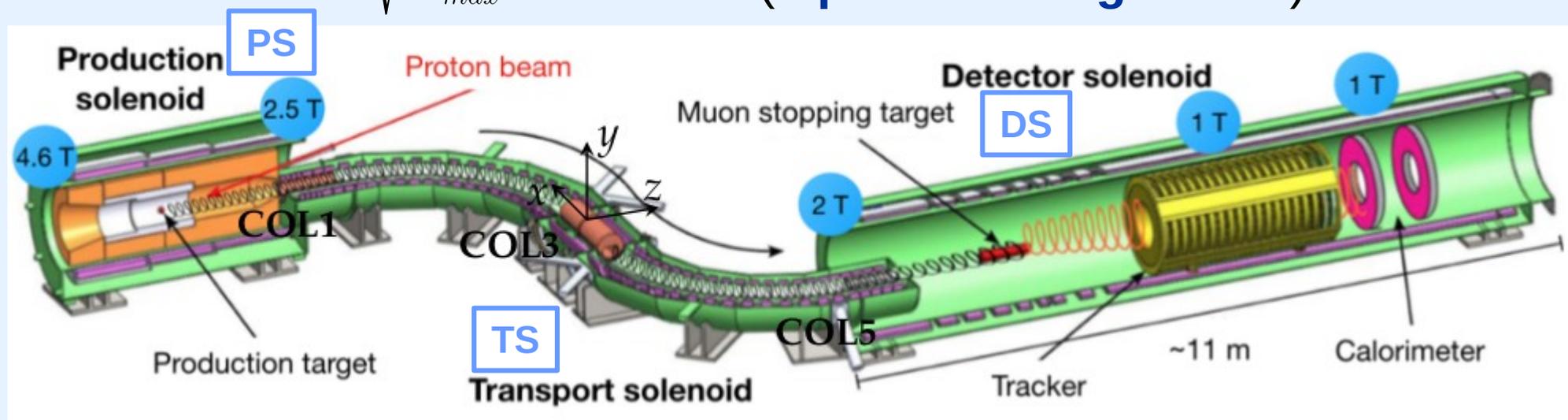
Una particella carica che si muove in un campo magnetico B costante segue una **traiettoria elicoidale**. Se B aumenta, per la conservazione dell'energia e del momento angolare la velocità longitudinale diminuisce. Se l'angolo di inclinazione della velocità rispetto a B è maggiore di θ_{crit} la particella si ferma e torna indietro ('**specchio magnetico**')



B_{max}

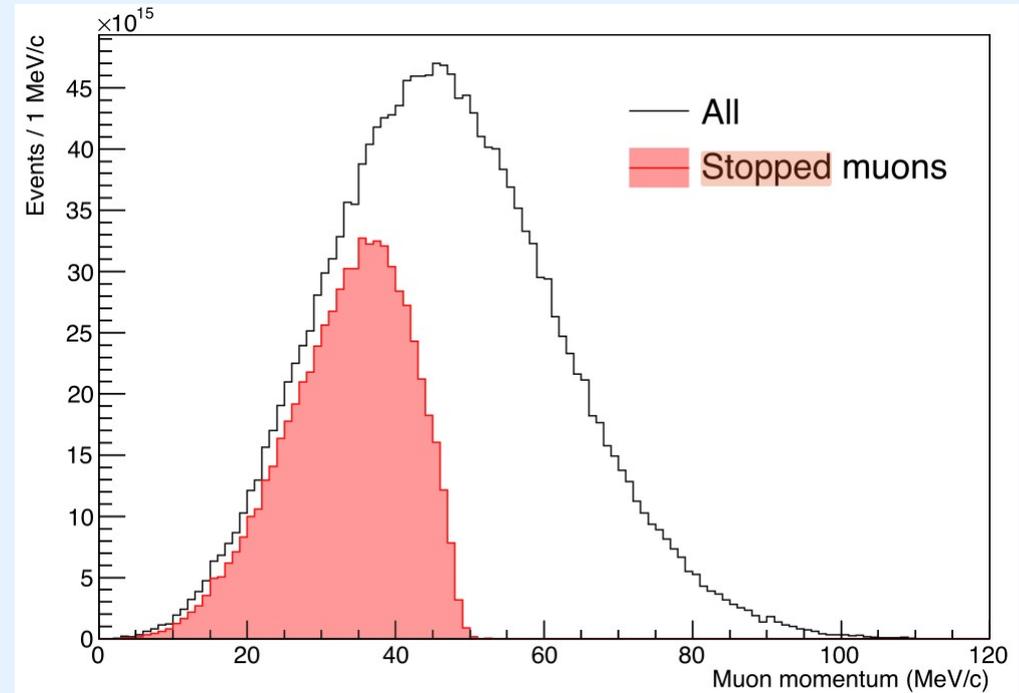
$$\theta_{crit} = \sqrt{\frac{B_{min}}{B_{max}}}$$

B_{min}



Mu2e usa l'effetto dello specchio magnetico sia per aumentare l'efficienza di raccolta sia dei π prodotti sia degli e^- da conversione

Quanti atomi muonici farà Mu2e?



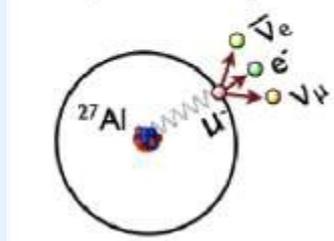
La probabilità che un muone che raggiunge il bersaglio di Al formi un atomo muonico è circa il 50% (~1,6 ogni 1000 protoni primari)

Mu2e produrrà 'tanti muoni quanto sono i **granelli di sabbia** sulle spiagge della Terra'!!

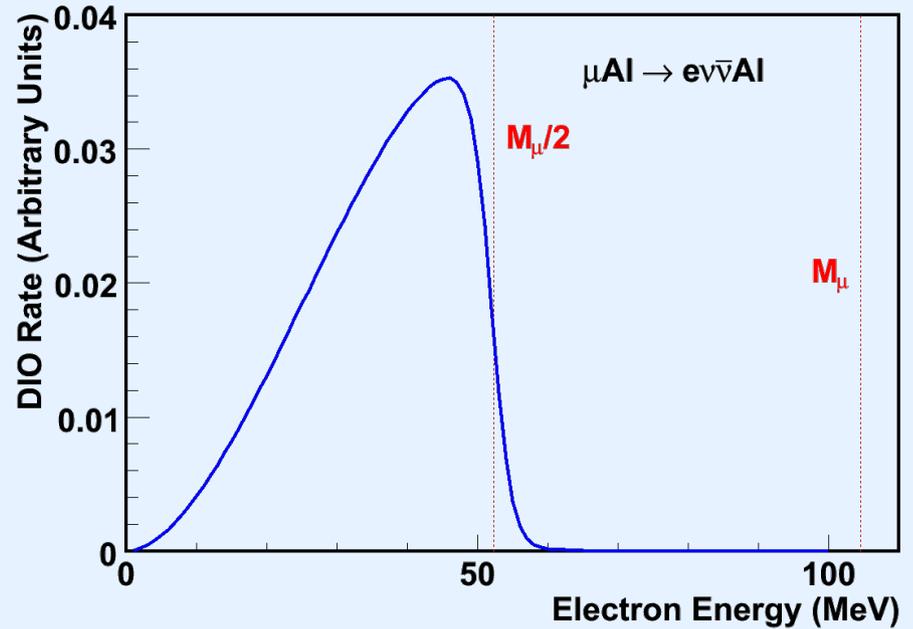
Le principali sorgenti di fondo in Mu2e: DIO

Decadimenti In Orbita (DIO)

Circa il 39% degli atomi muonici decade attraverso il consueto decadimento del muone:



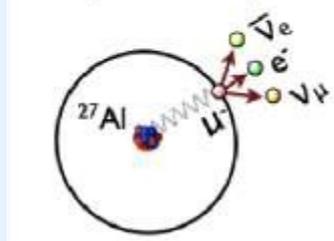
La presenza del nucleo fa sì che lo spettro dell'elettrone abbia una coda che raggiunge l'energia dell'elettrone da conversione ($E_{CE} \sim 105$ MeV).



Le principali sorgenti di fondo in Mu2e: DIO

Decadimenti In Orbita (DIO)

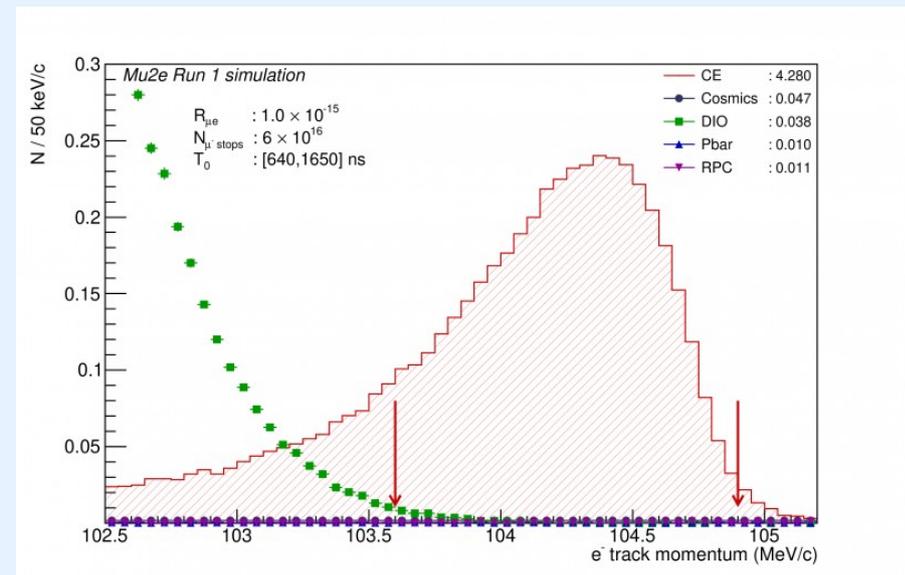
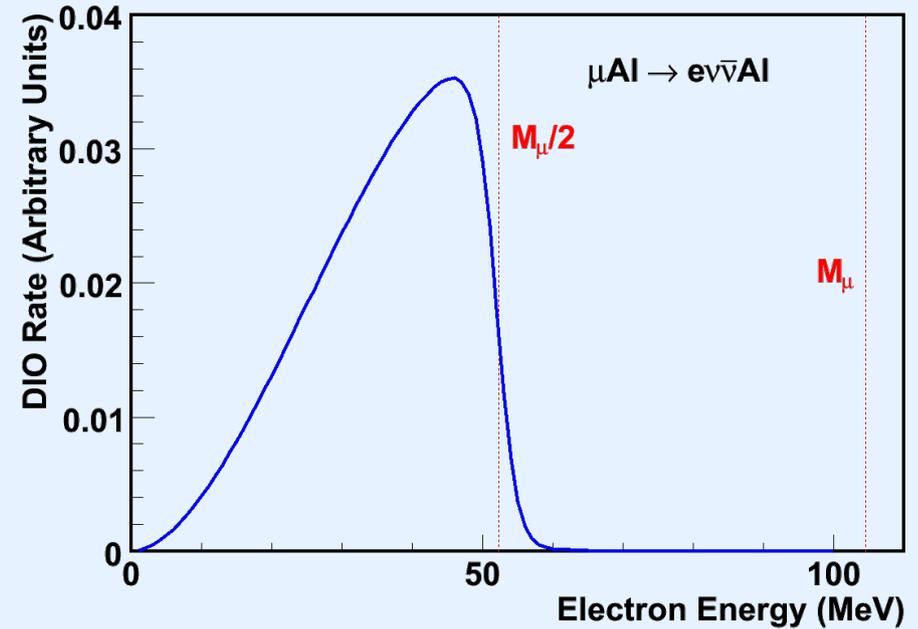
Circa il 39% degli atomi muonici decade attraverso il consueto decadimento del muone:



La presenza del nucleo fa sì che lo spettro dell'elettrone abbia una coda che raggiunge l'energia dell'elettrone da conversione ($E_{\text{CE}} \sim 105 \text{ MeV}$).

La parte finale dello spettro scende giù come $(E_{\text{CE}} - E)^5$

Per minimizzare il contributo di questo fondo è fondamentale avere un'ottima **risoluzione in impulso**



Il tracciatore di Mu2e



~21000 Straw tubes

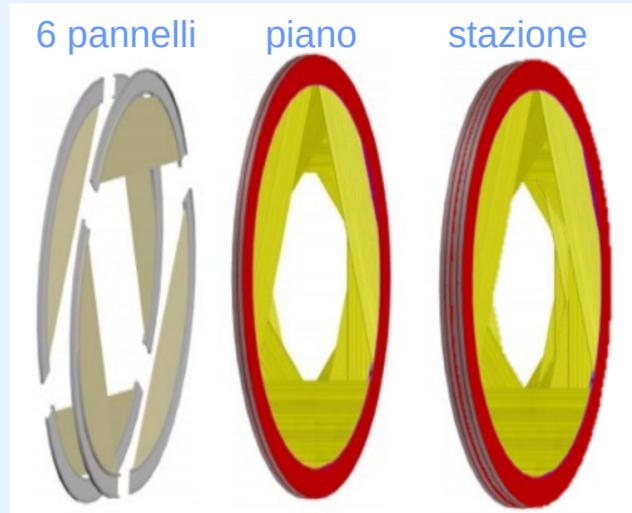
Diametro: 5 mm

Pareti: 15 μ m mylar

Gas: 80% Ar 20% CO₂

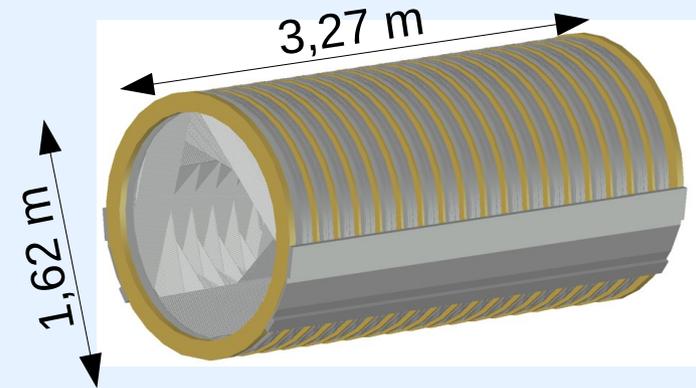
Fili: 25 μ m W @1450V

Lettura: ADC & TDC



Struttura del tracciatore

216 pannelli, 36 piani, 18 stazioni



Il tracciatore di Mu2e



~21000 Straw tubes

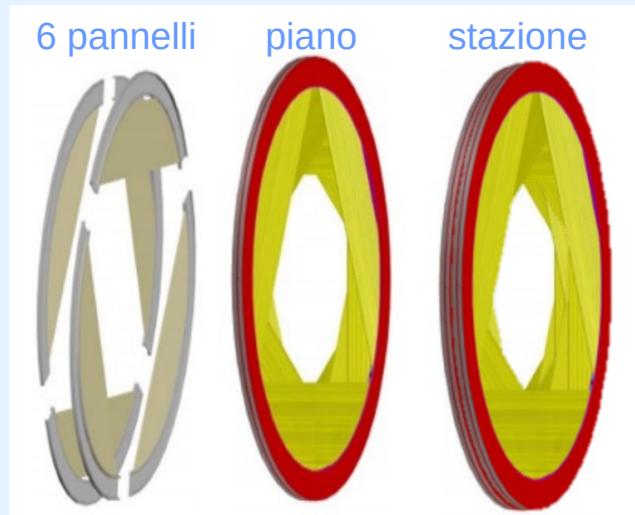
Diametro: 5 mm

Pareti: 15 μ m mylar

Gas: 80% Ar 20% CO₂

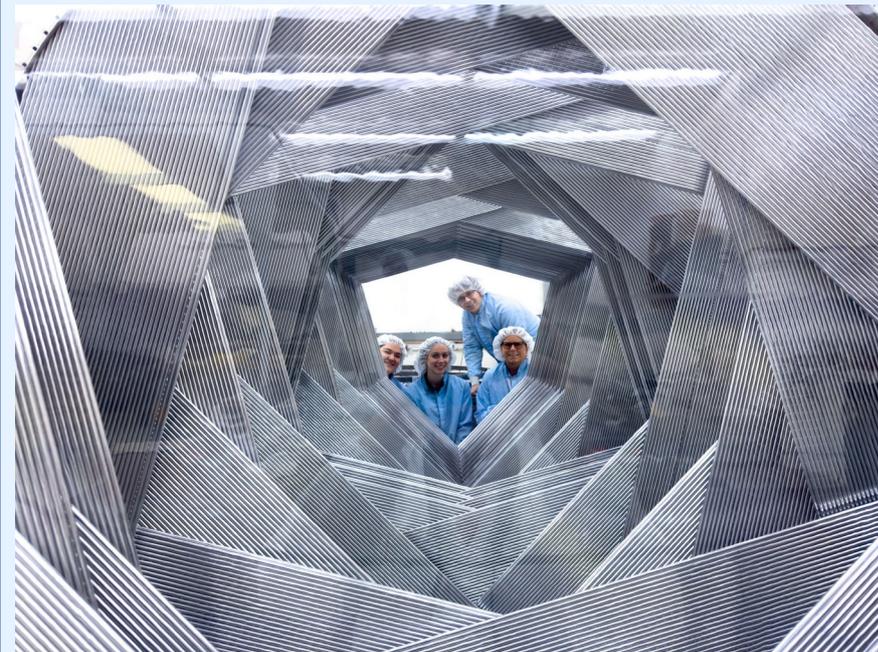
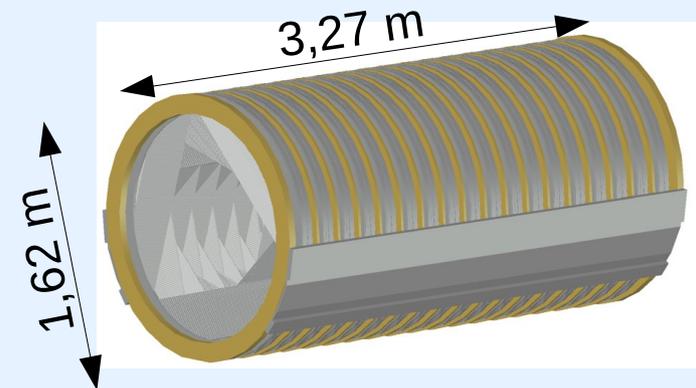
Fili: 25 μ m W @1450V

Lettura: ADC & TDC

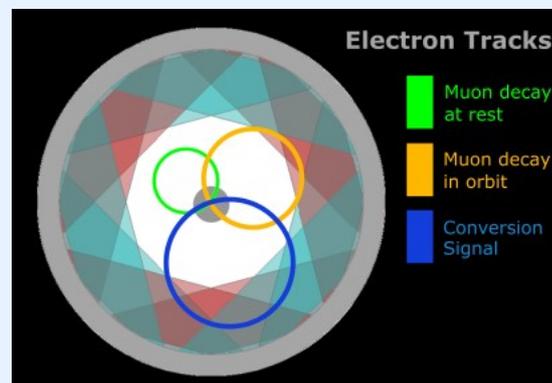


Struttura del tracciatore

216 pannelli, 36 piani, 18 stazioni



La **struttura super leggera** minimizza il multiplo scattering coulombiano, massimizzando la risoluzione in impulso



Il **buco centrale** lo rende insensibile alle particelle di basso impulso (>99% dei DIO)

Un insospettabile sabotatore

Dopo che tutti gli straw tubes sono stati testati per lungo tempo prima di essere assemblati nei pannelli, 7 pannelli hanno iniziato a perdere gas. Andando a investigarne la causa 13 fori del diametro di pochi mm sono stati trovati...

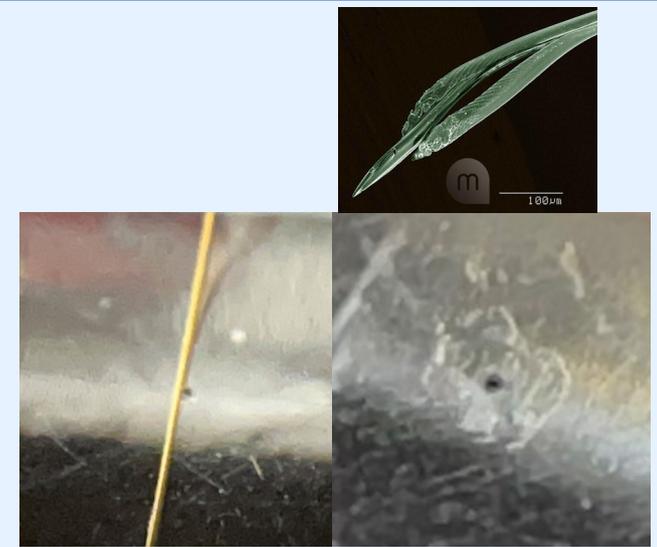
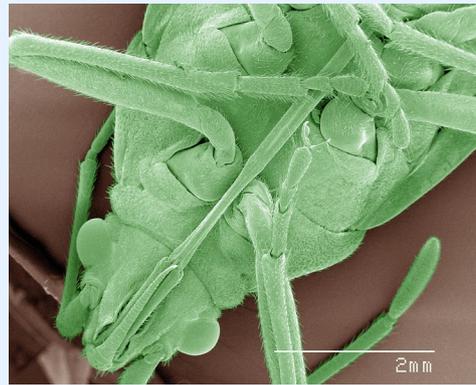


Straw tubes forati

Un insospettabile sabotatore

Dopo che tutti gli straw tubes sono stati testati per lungo tempo prima di essere assemblati nei pannelli, 7 pannelli hanno iniziato a perdere gas. Andando a investigarne la causa 13 fori del diametro di pochi mm sono stati trovati...

I responsabili sono stati identificati nelle cimici che infestano Fermilab! L'effetto è stato riprodotto in un piccolo allevamento appositamente creato. Si sta consultando degli entomologi per capire come evitare che risucceda!!



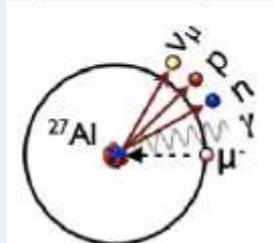
Straw tubes forati



Cimici e straw tubes

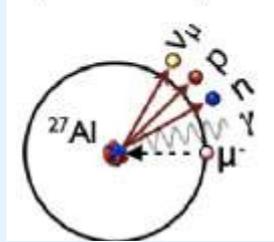
La radiazione prodotta dalle catture nucleari

Il 61% degli atomi muonici decade attraverso la cattura del muone nel nucleo, producendo particelle secondarie di diverso tipo (protoni, neutroni, fotoni,...):



La radiazione prodotta dalle catture nucleari

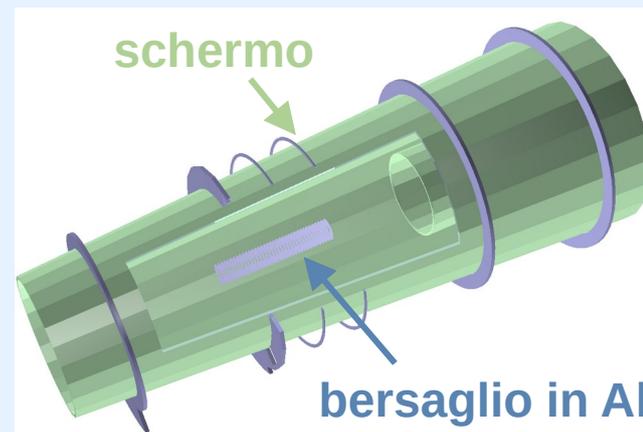
Il 61% degli atomi muonici decade attraverso la cattura del muone nel nucleo, producendo particelle secondarie di diverso tipo (protoni, neutroni, fotoni,...):



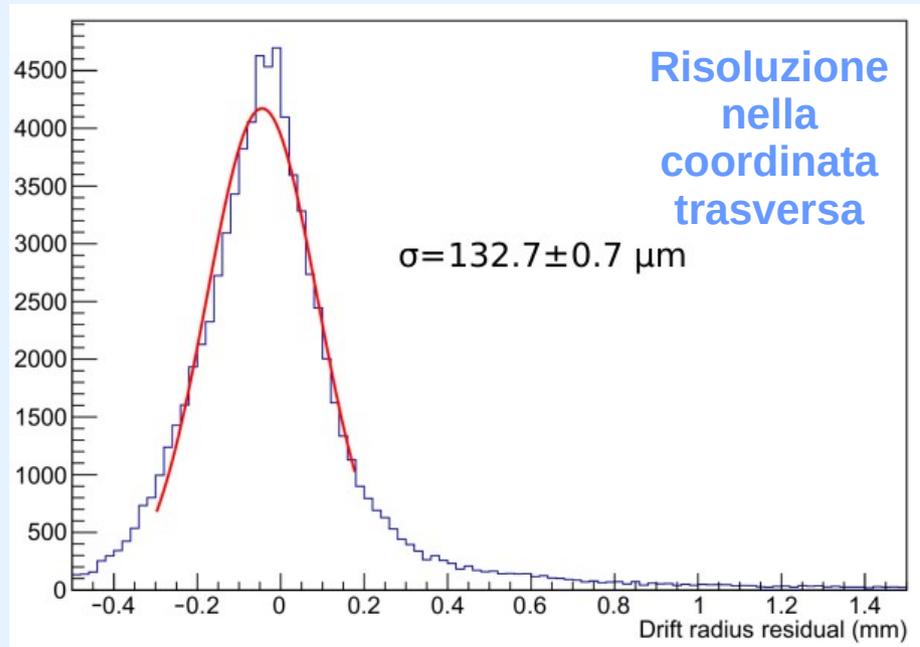
Pur non costituendo una sorgente diretta di fondo per gli elettroni da conversione queste particelle possono accecare il tracciatore con un elevato numero di hit spuri che si mescolano a quelli della traccia dell'elettrone da conversione.

Inoltre sono il contributo principale alla radiazione nell'area del DS che può danneggiare i rivelatori e l'elettronica.

L'effetto è stato mitigato schermando il bersaglio di alluminio con due strati di polietilene che assorbono o attenuano i prodotti secondari delle catture nucleari.

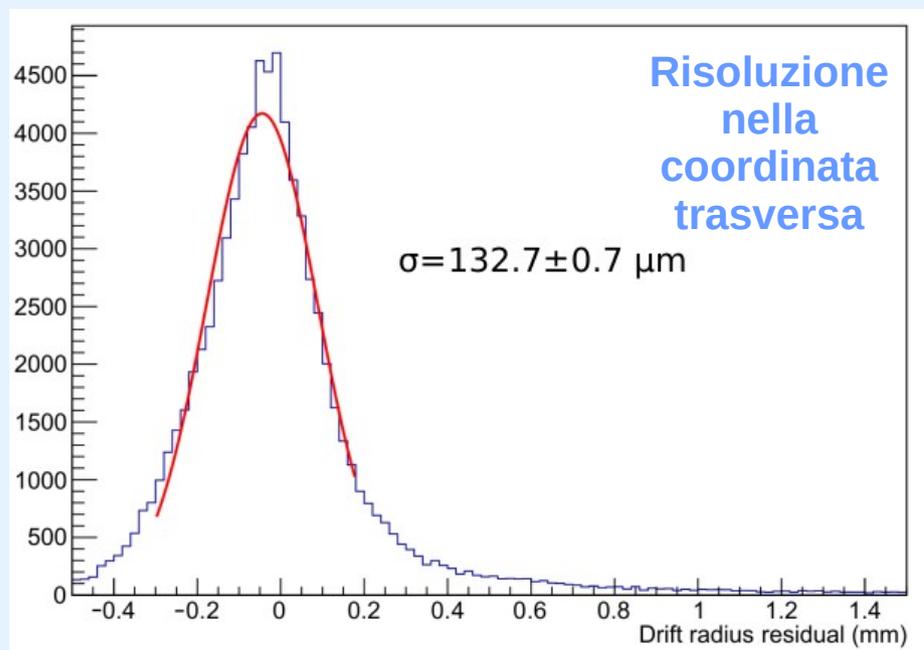


La risoluzione in impulso del tracciatore



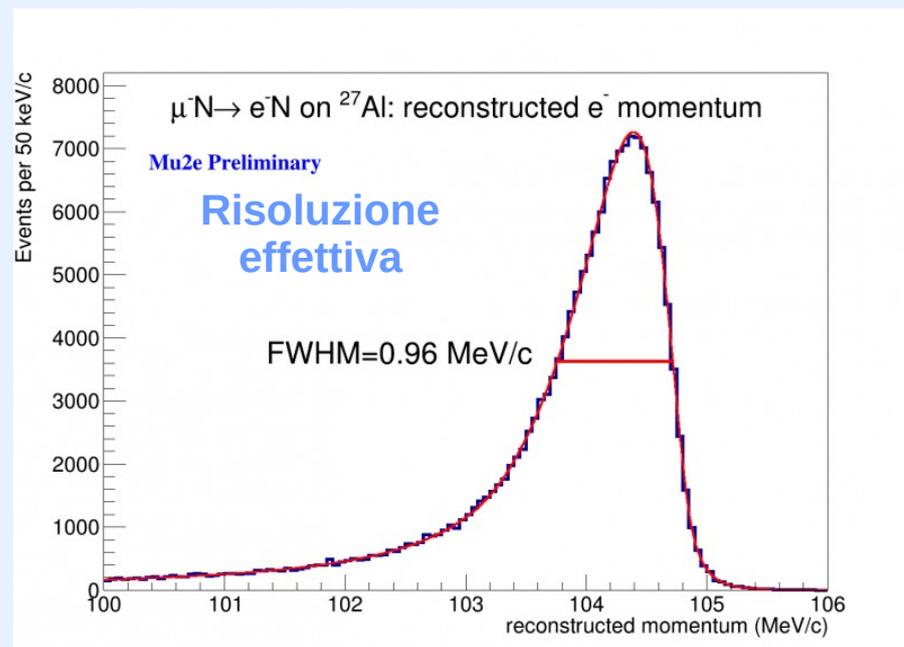
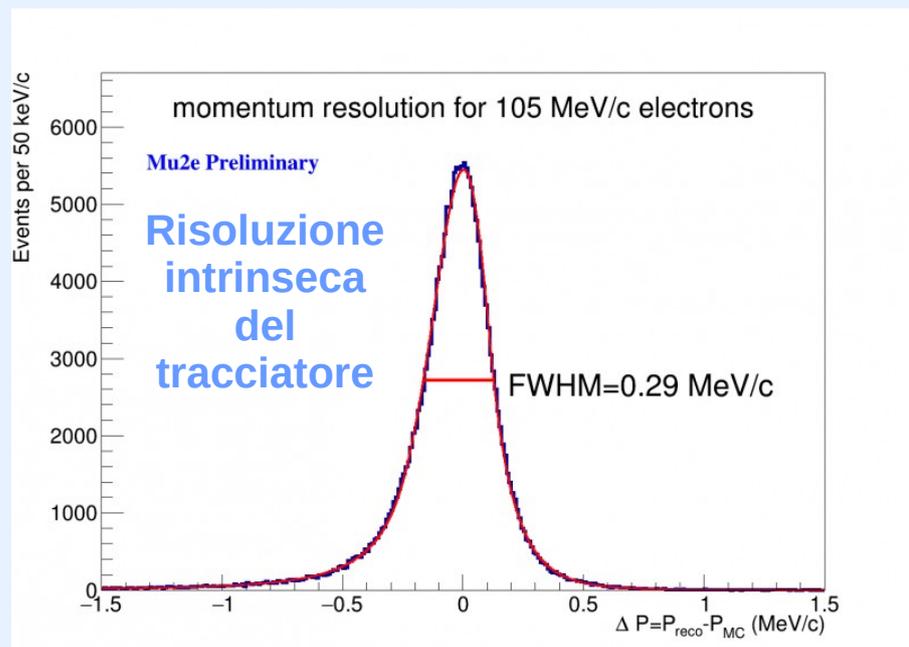
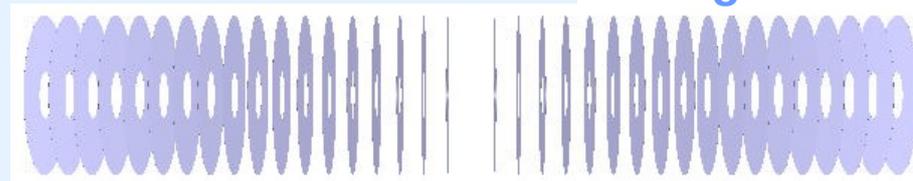
Il test sui moduli costruiti ha dato una risoluzione in posizione di $\sim 130 \mu\text{m}$.

La risoluzione in impulso del tracciatore

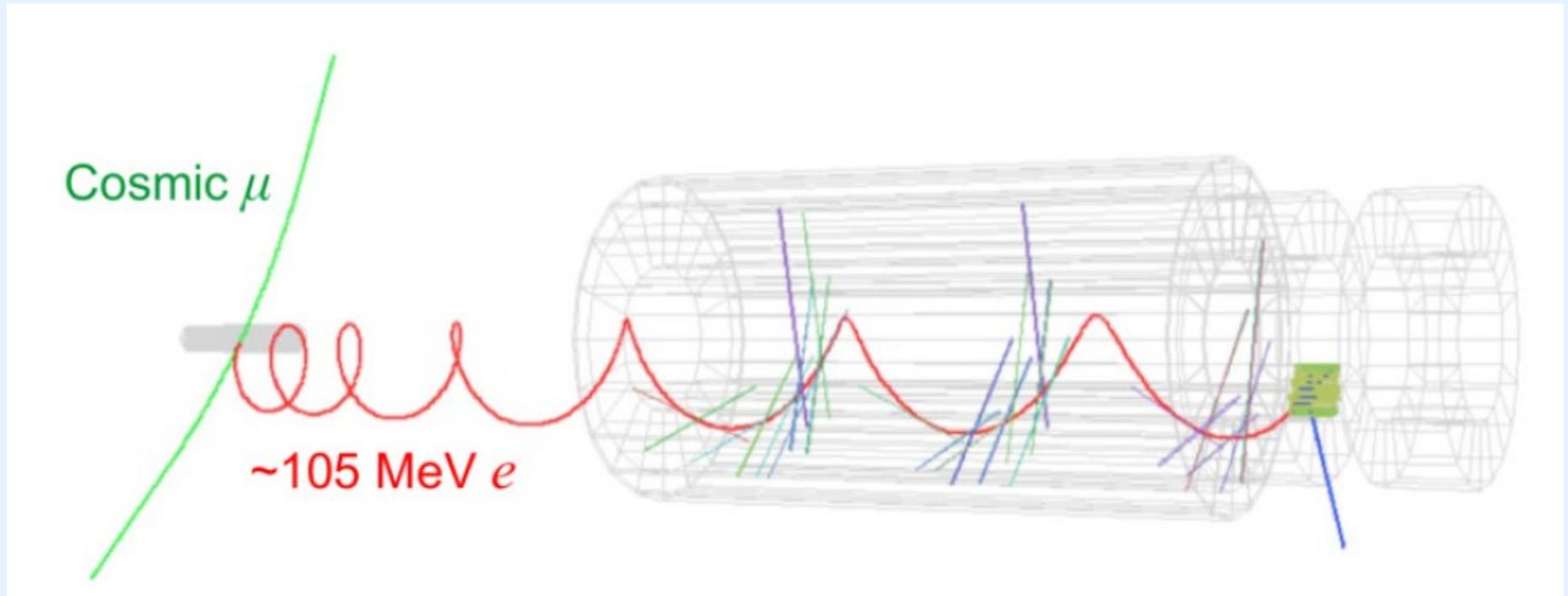


Il test sui moduli costruiti ha dato una risoluzione in posizione di $\sim 130 \mu\text{m}$. La **risoluzione in impulso** ottenuta dalla simulazione è **$< 1 \text{ MeV}/c$** . E' dominata dallo scattering multiplo sul bersaglio, sugli schermi e sul tracciatore

Bersaglio in Al

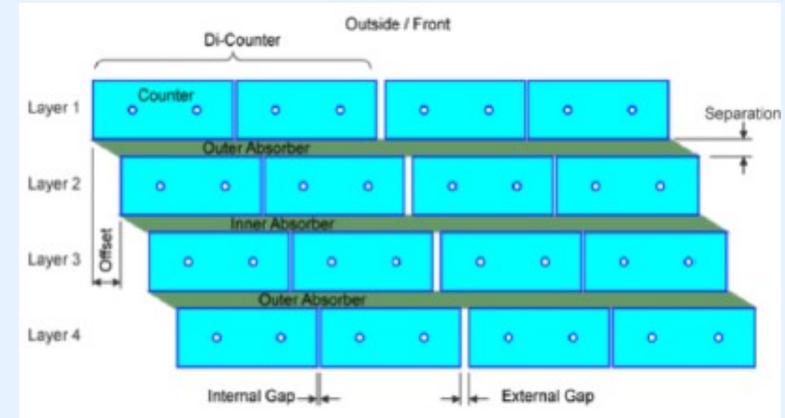
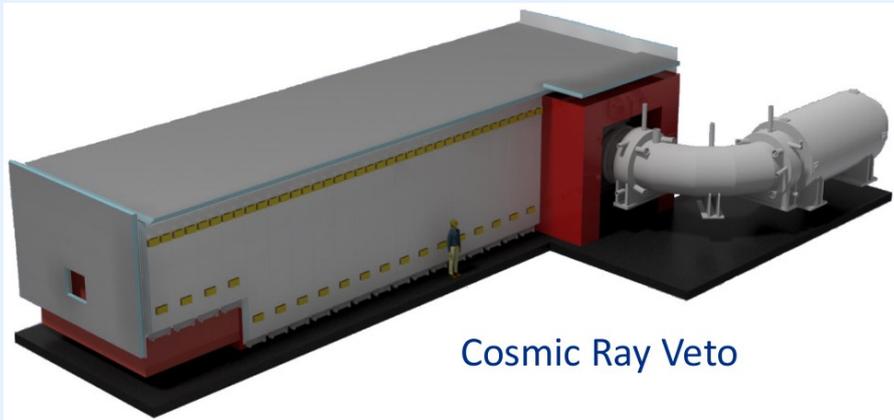


Il fondo più pericoloso: i raggi cosmici



Circa un muone cosmico al giorno produce un elettrone da 105 MeV interagendo con il bersaglio di alluminio: è un fondo irriducibile!

Il veto per i raggi cosmici

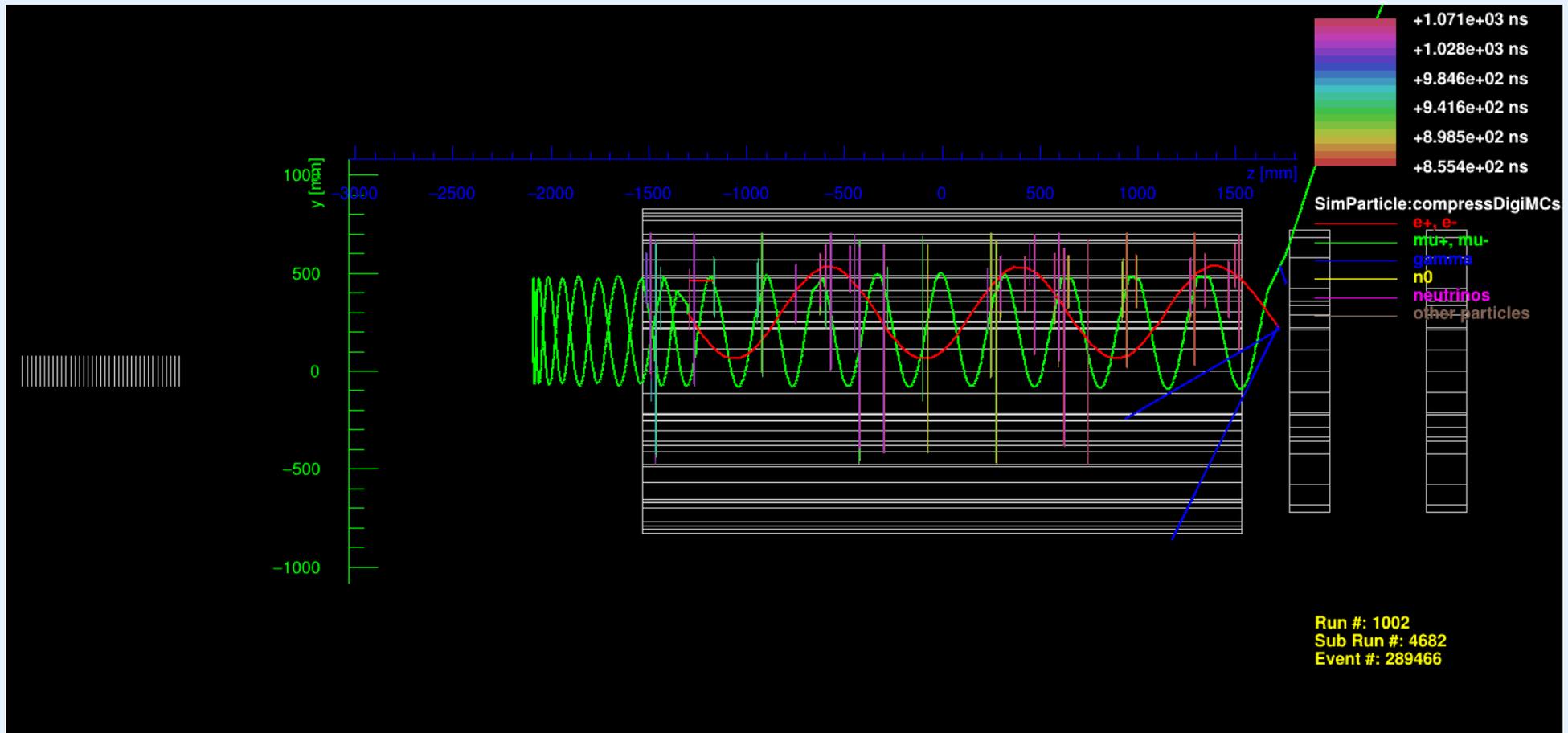


Il Detector solenoid e la seconda metà del Transport solenoid sono ricoperti da 4 pannelli di **scintillatori** che possono **identificare** il passaggio di **particelle cariche** con un'efficienza del **99,99%**

Tutti i moduli sono stati costruiti e sono sotto test a Fermilab

Dei blocchi di **cemento** che ricoprono tutto l'apparato fungono da **schermo** per i **neutroni**

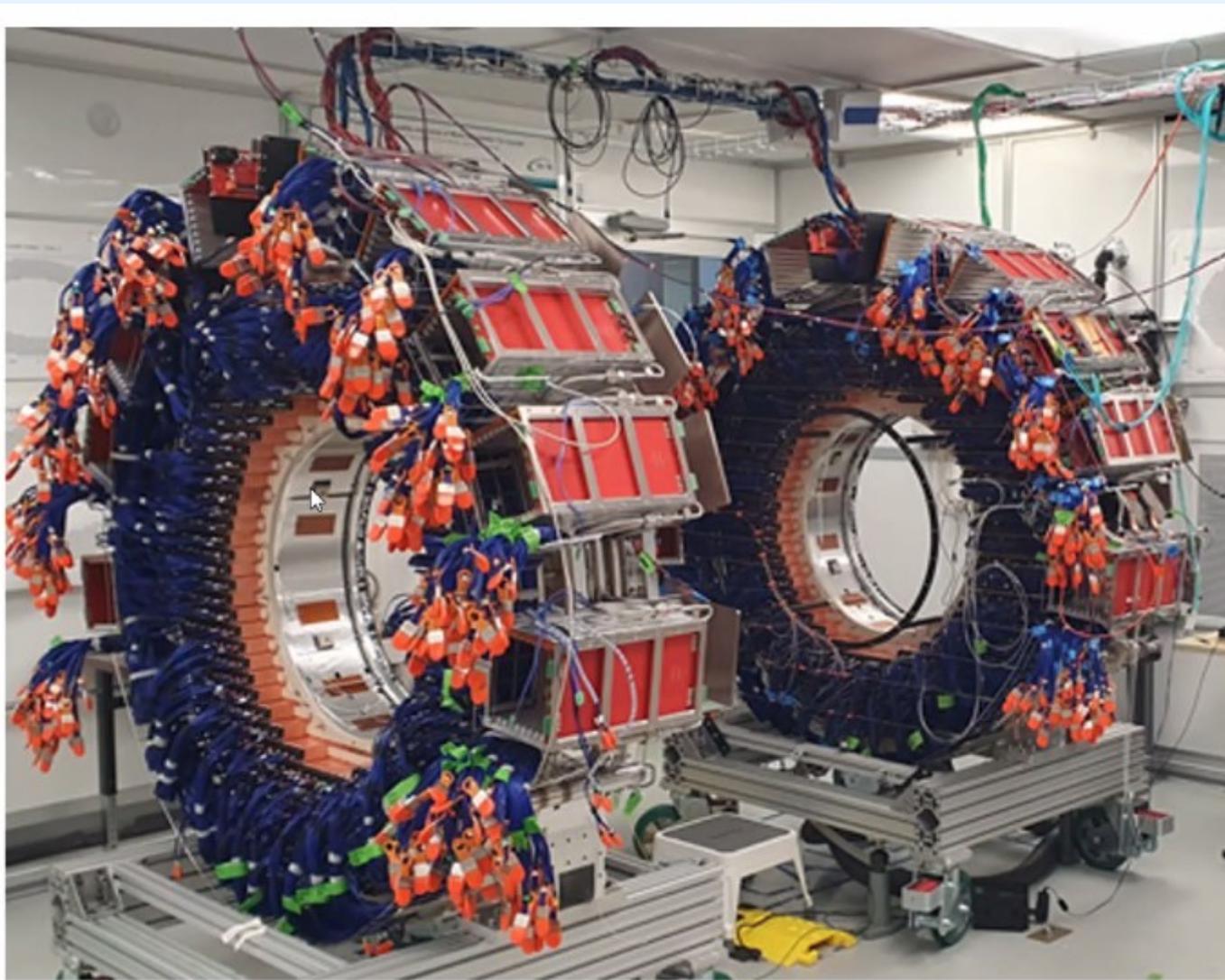
Il fondo residuo da raggi cosmici



Alcuni **muoni cosmici da 105 MeV/c** riescono comunque a bucare il sistema di veto passando dalla bocca del Transport Solenoid

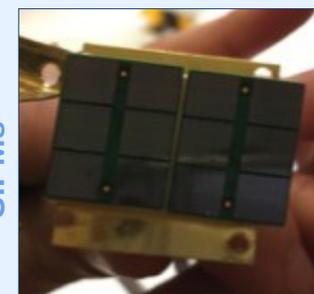
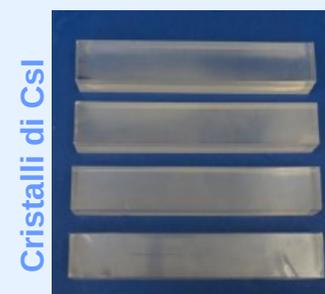
Per riconoscerli il tracciatore non basta: serve un **calorimetro**

Il calorimetro elettromagnetico di Mu2e (ECAL)

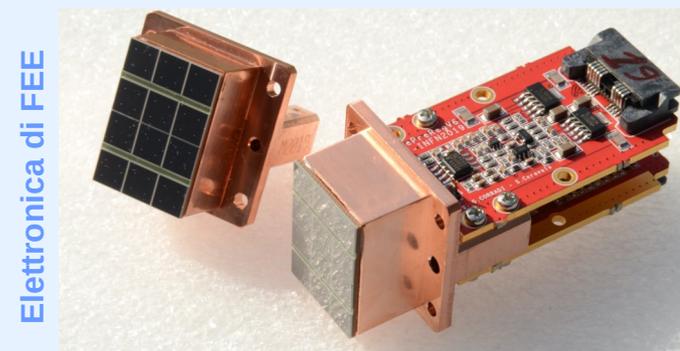


E' il **principale contributo** del gruppo italiano alla costruzione dell'esperimento

2 dischi di 674 cristalli di **CsI puro** letti da 2 **SiPM** (2x3) ciascuno

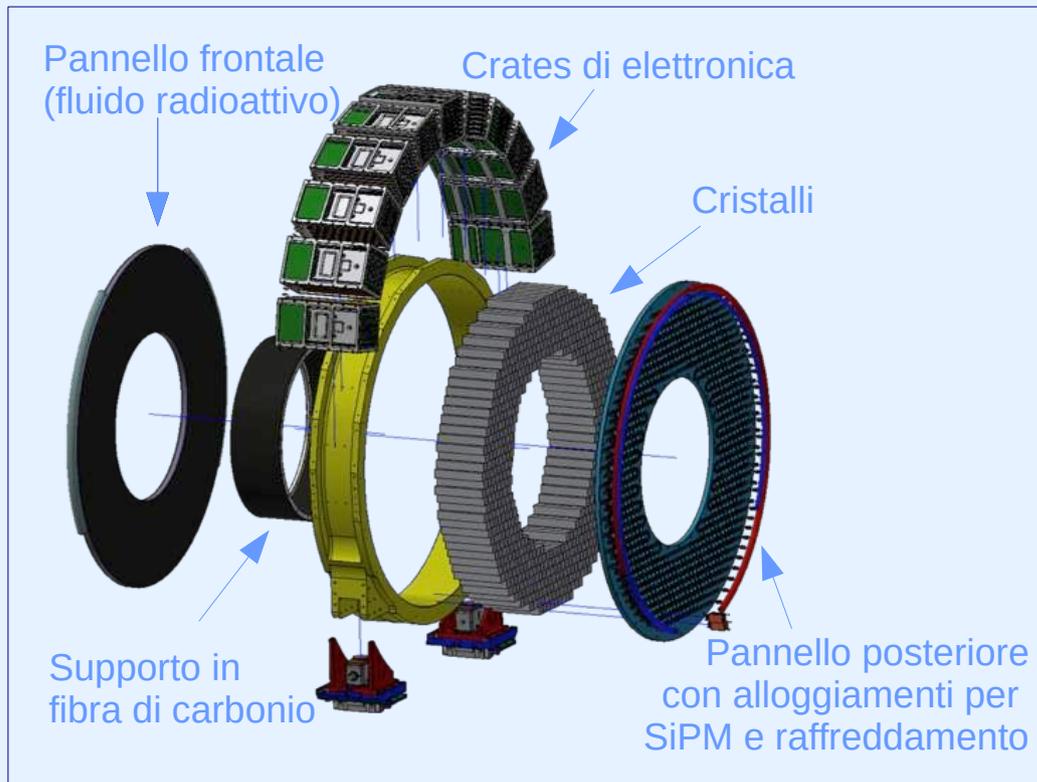


L'elettronica di Front End è dietro i SiPMs



Quella digitale e di controllo è nei crate intorno ai dischi

Contributi pisani alla costruzione dell'ECAL

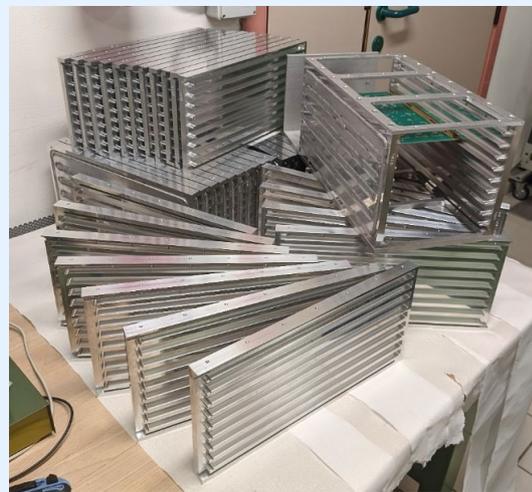


Contributi alla meccanica:

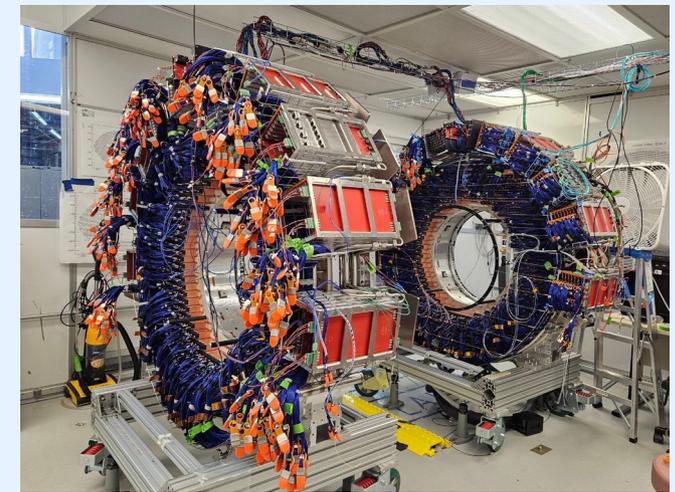
- Pannello posteriore per alloggiamento dei SiPM
- crates di elettronica
- supporto in fibra di carbonio
- qualifica dimensionale dei cristalli
- circuito di raffreddamento per i SiPMs e per i crates
- stazione di raffreddamento
- assemblaggio a Fermilab



Pannelli posteriori



Crates



Assemblaggio a Fermilab

Contributi pisani alla costruzione dell'ECAL



DIRAC



DIRAC con radiatore

Contributi all'elettronica:

- disegno e realizzazione delle schede digitizer (DIRAC) e per il monitor di temperatura e radiazione (TRAD)

Contributi pisani alla costruzione dell'ECAL



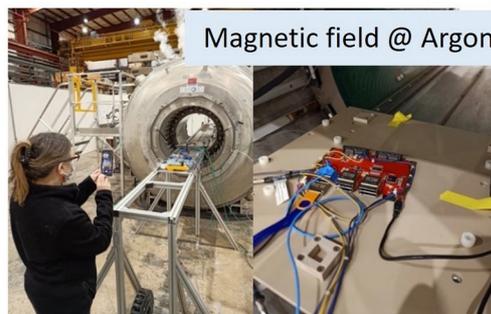
DIRAC



DIRAC con radiatore

Contributi all'elettronica:

- disegno e realizzazione delle schede digitizer (DIRAC) e per il monitor di temperatura e radiazione (TRAD)
- selezione e qualifica dei componenti:
 - termovuoto (10^{-4} Torr + test termici)
 - campo magnetico (1T)
 - radiazione ionizzante (12 kRad)
 - radiazione di neutroni ($3 \cdot 10^{12}$ n/cm²)



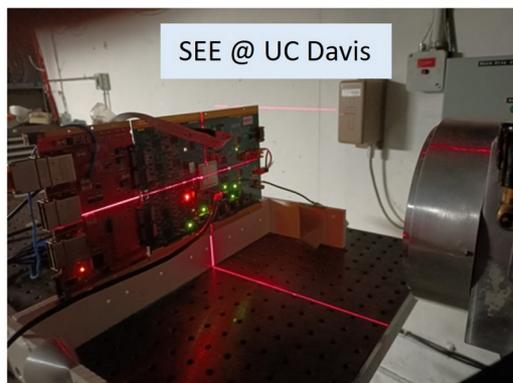
Magnetic field @ Argonne



Thermalvacuum



TID @ ENEA Calliope



SEE @ UC Davis



SEE @ CNAO



neutrons @ FNG



TID @ HZDR gELBE

Contributi pisani alla costruzione dell'ECAL

Contributi all'elettronica:

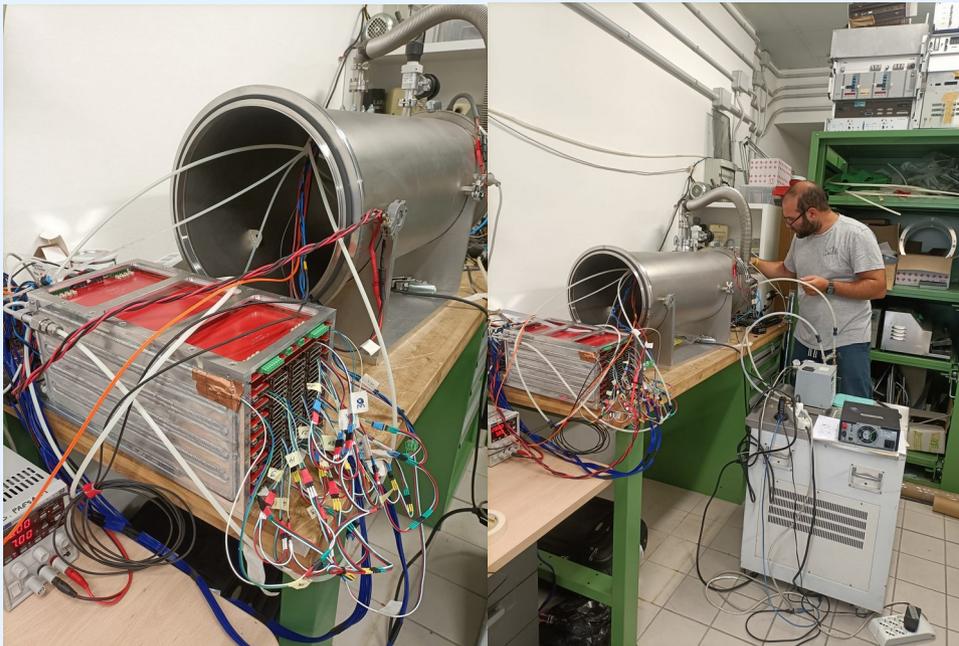
- test e qualifica della produzione



Contributi pisani alla costruzione dell'ECAL

Contributi all'elettronica:

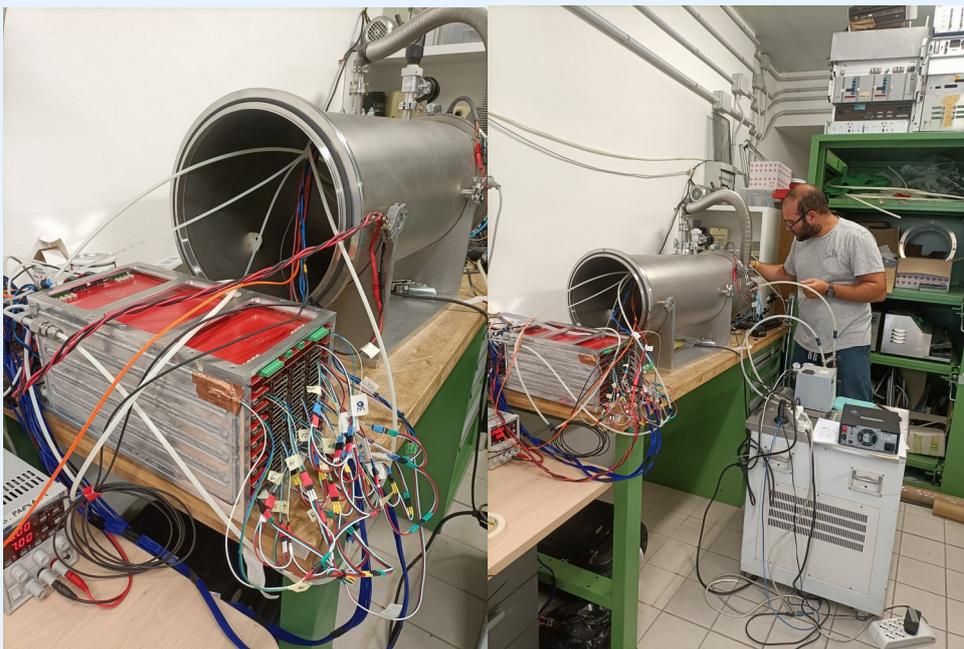
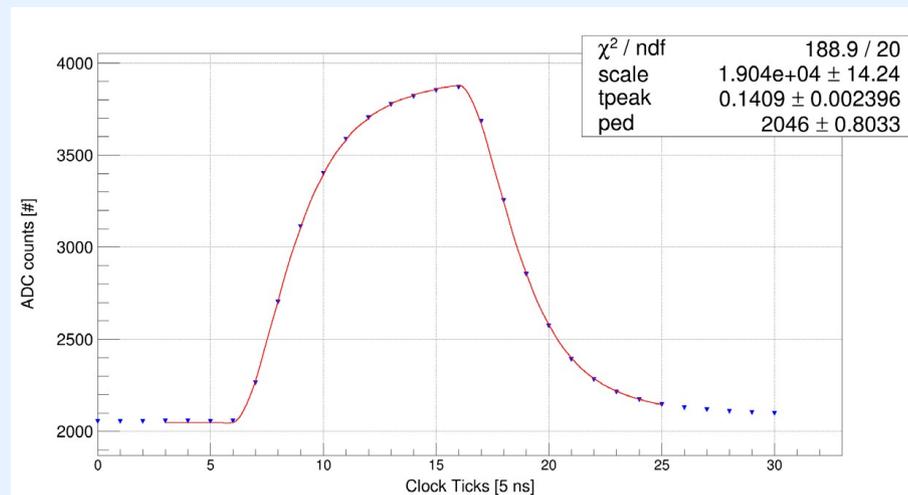
- test e qualifica della produzione
- test di integrazione con l'elettronica di Front-End (con impulsatore)



Contributi pisani alla costruzione dell'ECAL

Contributi all'elettronica:

- test e qualifica della produzione
- test di integrazione con l'elettronica di Front-End (con impulsatore)
- test di integrazione con il sistema di acquisizione dati dell'esperimento

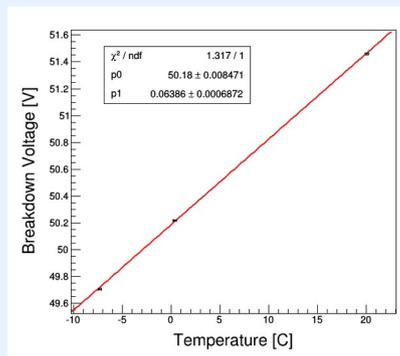
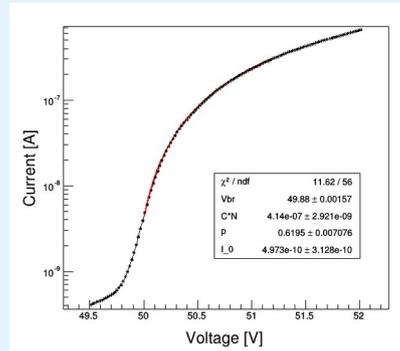
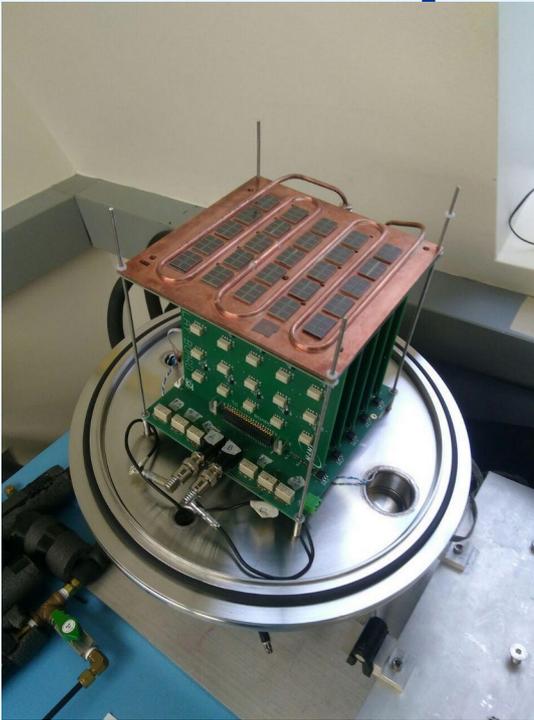


Contributi pisani alla costruzione dell'ECAL

Contributi al rivelatore:

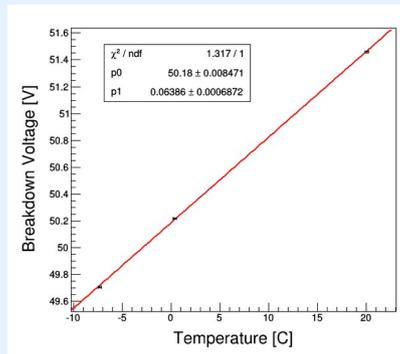
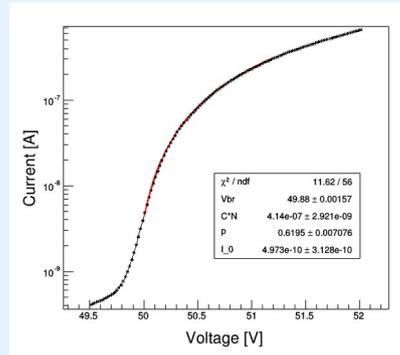
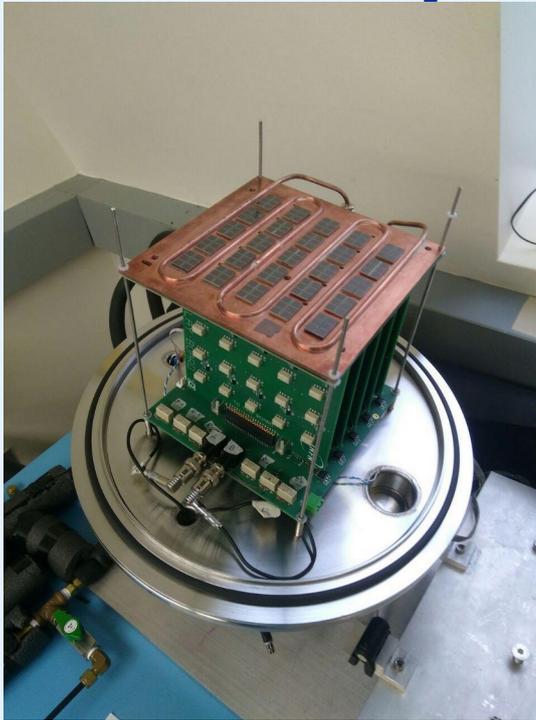
- test e qualifica dei 3000 SiPMs

Test di massa di 3000 SiPMs



Contributi pisani alla costruzione dell'ECAL

Test di massa di 3000 SiPMs



Contributi al rivelatore:

- test e qualifica dei 3000 SiPMs
- interfaccia per slow control

SiDET CALO PS DISPLAY

LOW VOLTAGE

Status	PS name	ON/OFF	
Err	LV1	LV OFF	STATUS
Err	LV2	LV OFF	STATUS
Err	LV3	LV OFF	STATUS
Err	LV4	LV OFF	STATUS
Err	LV5	LV OFF	STATUS
Err	LV6	LV OFF	STATUS
Err	LV7	LV OFF	STATUS
Err	LV8	LV OFF	STATUS
Err	LV9	LV OFF	STATUS
Err	LV10	LV OFF	STATUS

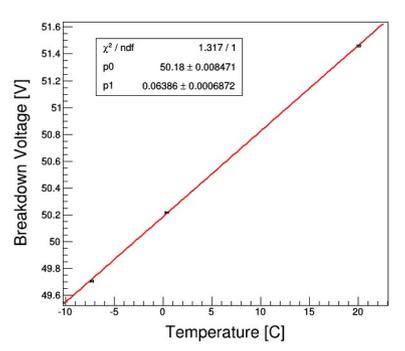
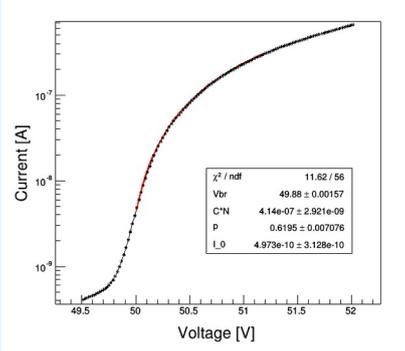
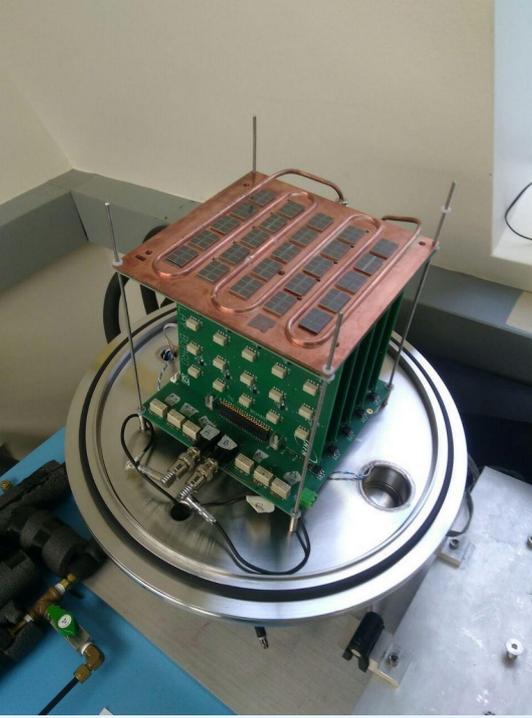
HIGH VOLTAGE

Status	PS name	ON/OFF	
Err	HV01	HV OFF	STATUS
Err	HV02	HV OFF	STATUS
Err	HV03	HV OFF	STATUS
Err	HV04	HV OFF	STATUS
Err	HV05	HV OFF	STATUS
Err	HV06	HV OFF	STATUS
Err	HV07	HV OFF	STATUS
Err	HV08	HV OFF	STATUS
Err	HV09	HV OFF	STATUS
Err	HV010	HV OFF	STATUS

Interfaccia per slow control

Contributi pisani alla costruzione dell'ECAL

Test di massa di 3000 SiPMs



Contributi al rivelatore:

- test e qualifica dei 3000 SiPMs
- interfaccia per slow control
- sistema di calibrazione laser



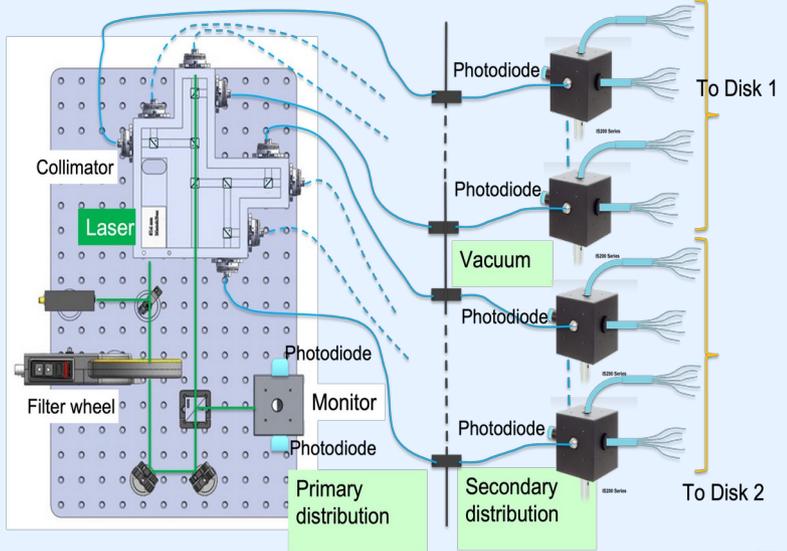
Sistema di calibrazione laser

SiDET CALO PS DISPLAY

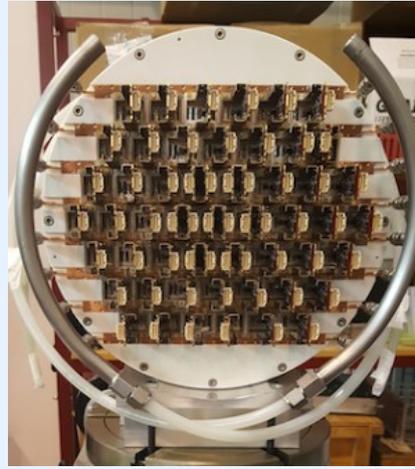
Status	PS name	ON/OFF
Err	LV1	LV OFF STATUS
Err	LV2	LV OFF STATUS
Err	LV3	LV OFF STATUS
Err	LV4	LV OFF STATUS
Err	LV5	LV OFF STATUS
Err	LV6	LV OFF STATUS
Err	LV7	LV OFF STATUS
Err	LV8	LV OFF STATUS
Err	LV9	LV OFF STATUS
Err	LV10	LV OFF STATUS

Status	PS name	ON/OFF
Err	HV01	HV OFF STATUS
Err	HV02	HV OFF STATUS
Err	HV03	HV OFF STATUS
Err	HV04	HV OFF STATUS
Err	HV05	HV OFF STATUS
Err	HV06	HV OFF STATUS
Err	HV07	HV OFF STATUS
Err	HV08	HV OFF STATUS
Err	HV09	HV OFF STATUS
Err	HV10	HV OFF STATUS

Interfaccia per slow control



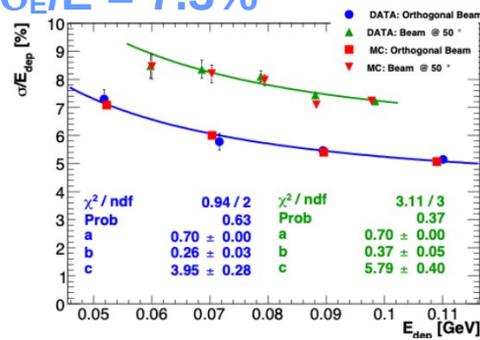
Contributi pisani alla costruzione dell'ECAL



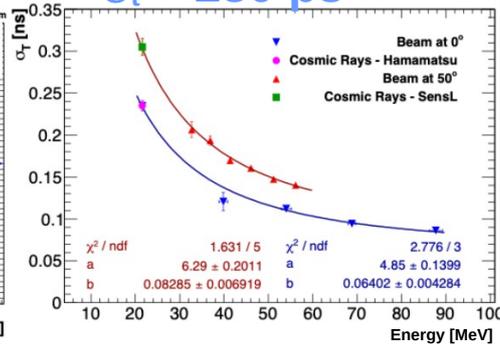
Contributi ai test dei prototipi:

- test beam a Frascati con il modulo 0 ($T=20^\circ\text{C}$, 51 cristalli, 102 SiPMs)
- caratterizzazione del modulo 0 con raggi cosmici

$\sigma_E/E = 7.3\%$



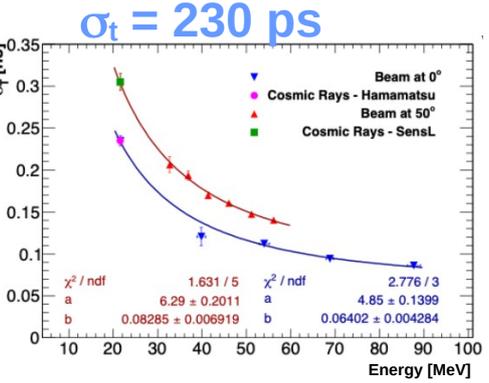
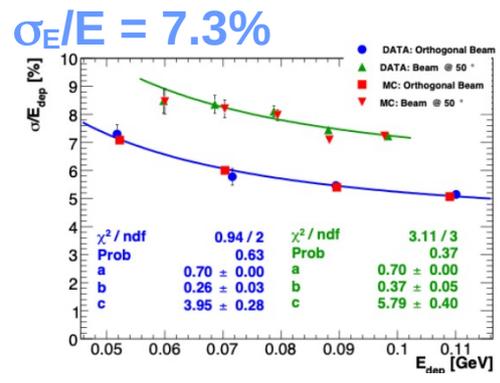
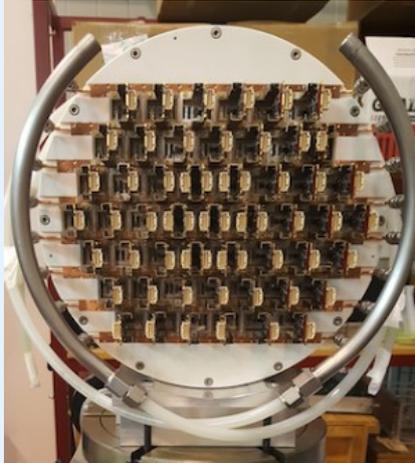
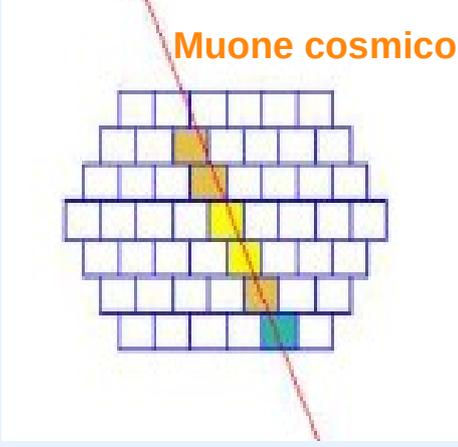
$\sigma_t = 230 \text{ ps}$



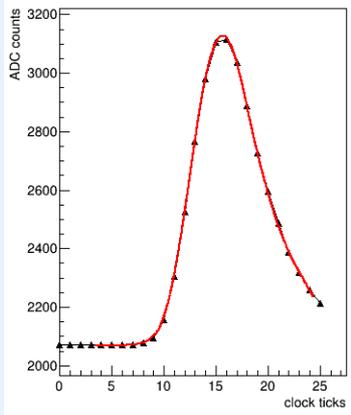
Contributi pisani alla costruzione dell'ECAL

Contributi ai test dei prototipi:

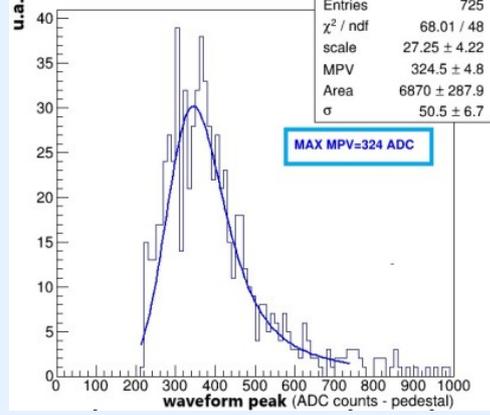
- test beam a Frascati con il modulo 0 (T=20° C, 51 cristalli, 102 SiPMs)
- caratterizzazione del modulo 0 con raggi cosmici



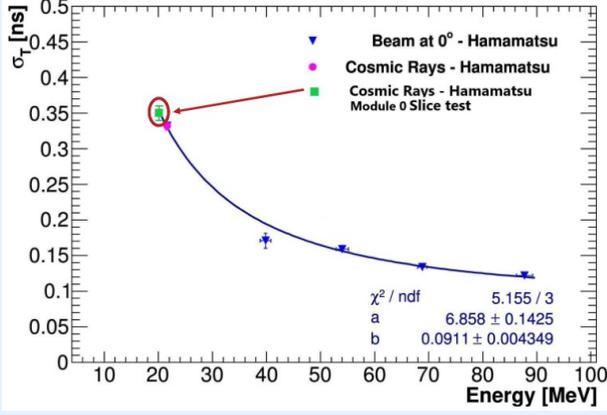
Template Fit



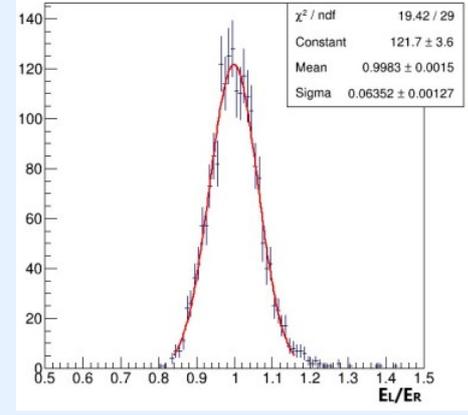
Energy scale



Risoluzione in tempo

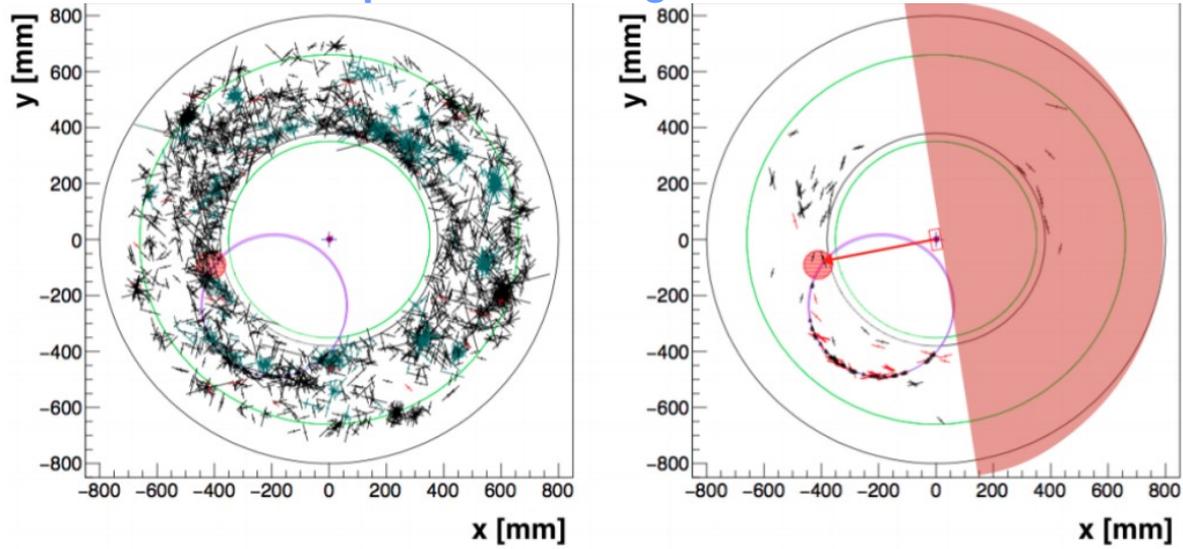


~20 Fotelettroni/MeV



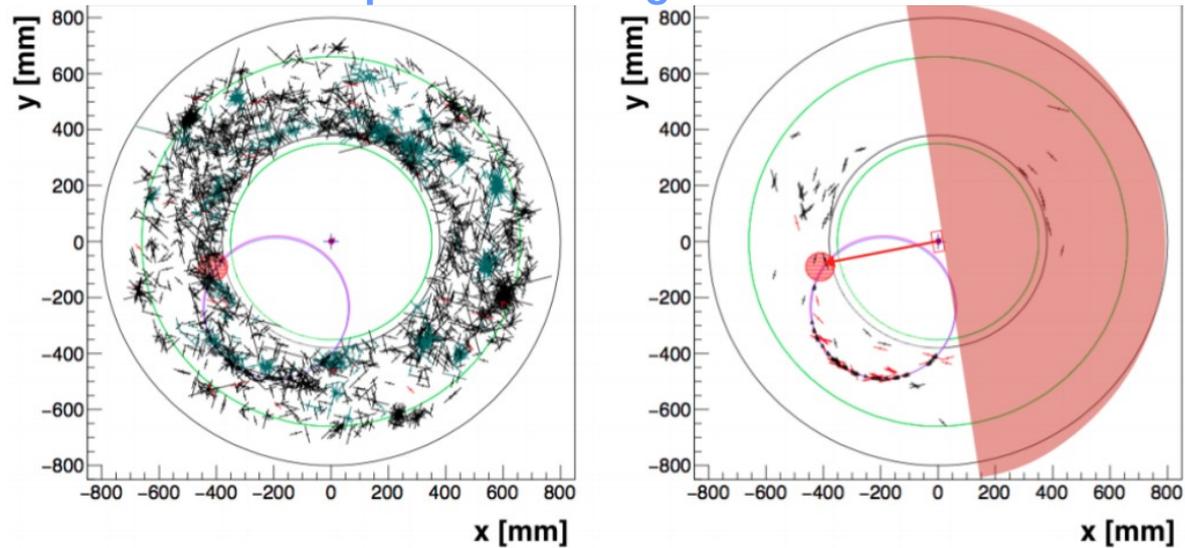
Contributi pisani all'analisi dei dati simulati

Miglioramento del pattern recognition
usando il deposito in energia del calorimetro

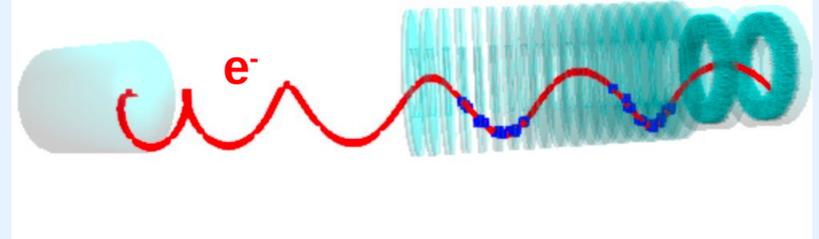


Contributi pisani all'analisi dei dati simulati

Miglioramento del pattern recognition
usando il deposito in energia del calorimetro

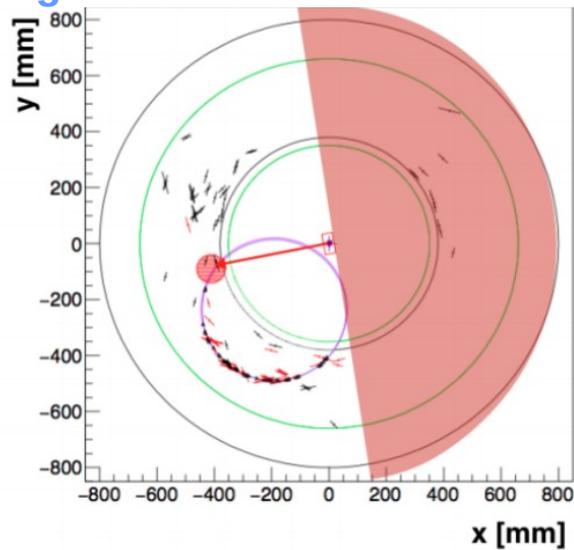
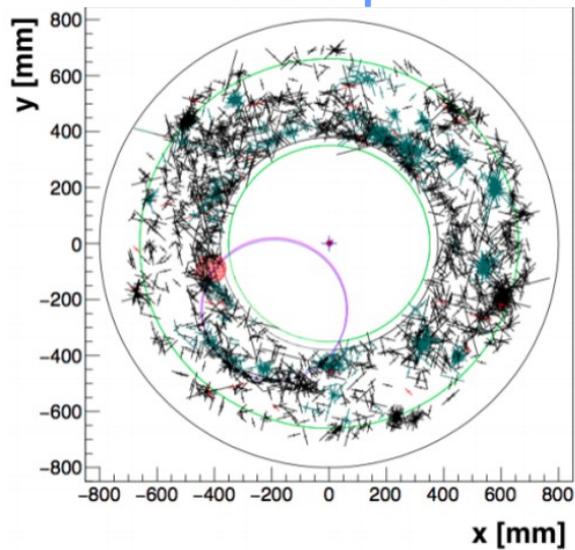


Event Display

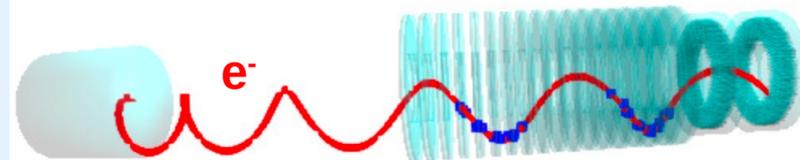


Contributi pisani all'analisi dei dati simulati

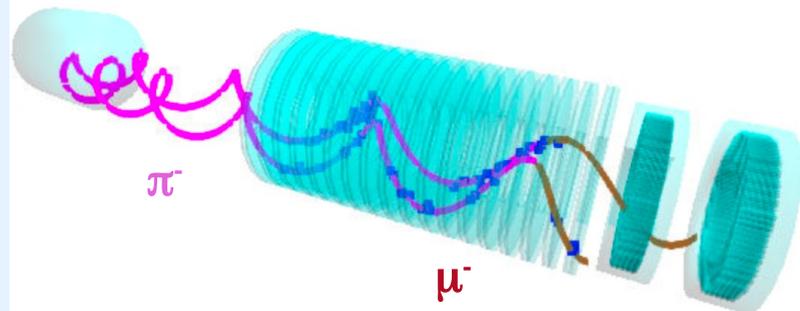
Miglioramento del pattern recognition
usando il deposito in energia del calorimetro



Event Display



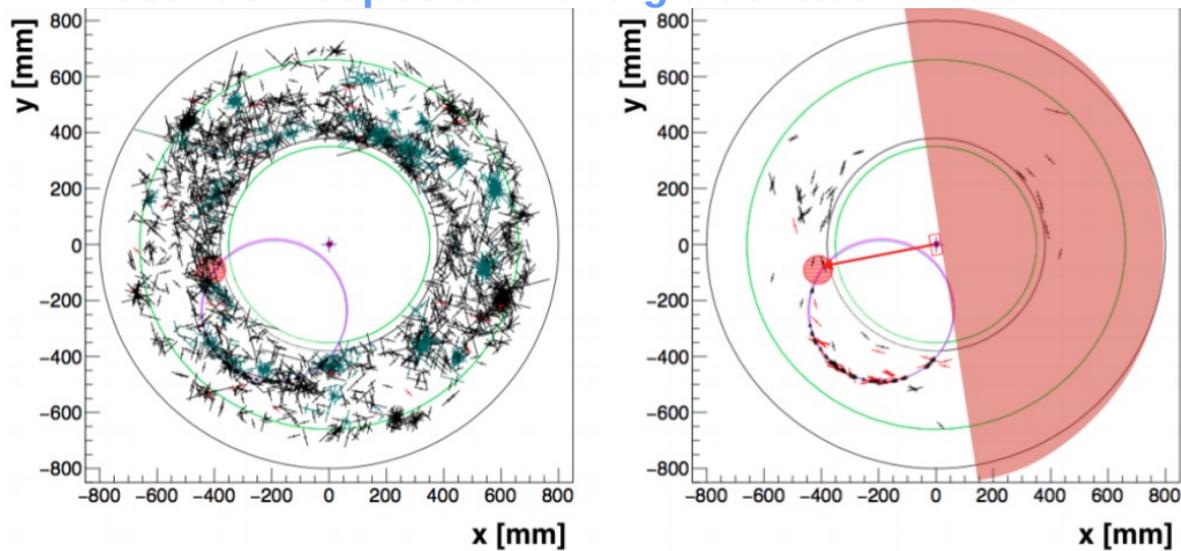
Ricostruzione di tracce multiple*



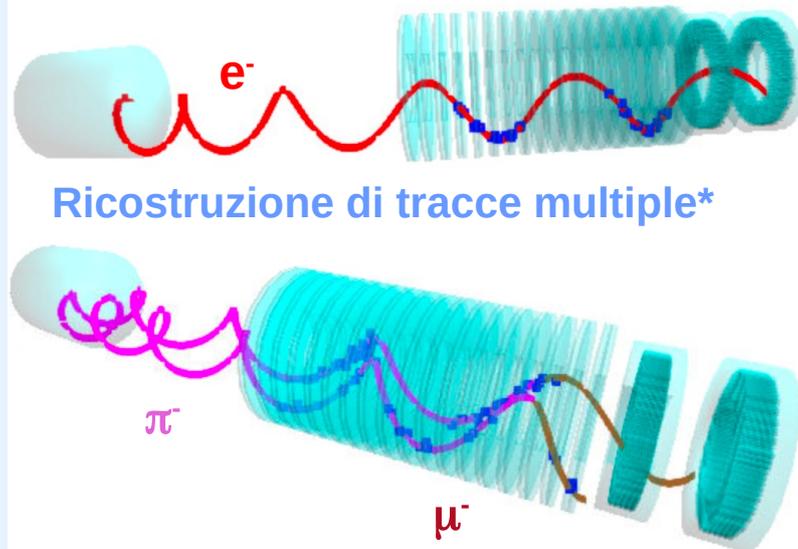
* Applicazioni: stima superiore al fondo da antiprotoni, ricostruzione delle conversioni dei fotoni

Contributi pisani all'analisi dei dati simulati

Miglioramento del pattern recognition
usando il deposito in energia del calorimetro

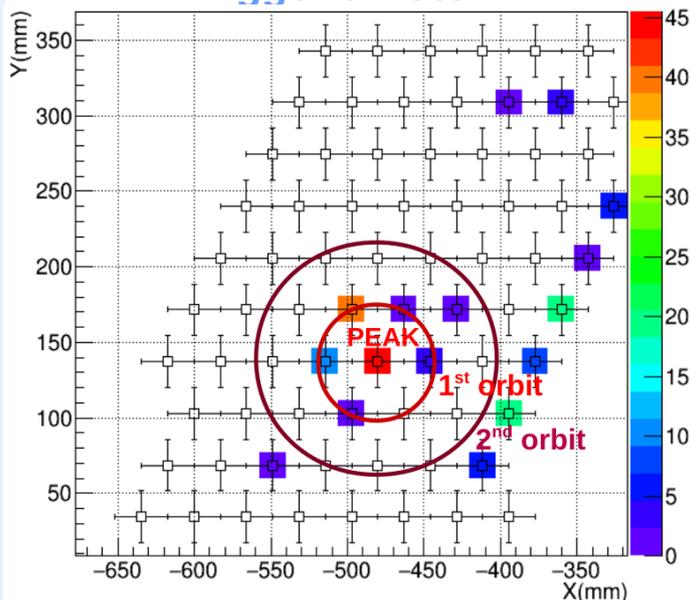


Event Display



Ricostruzione di tracce multiple*

Trigger di fotoni**

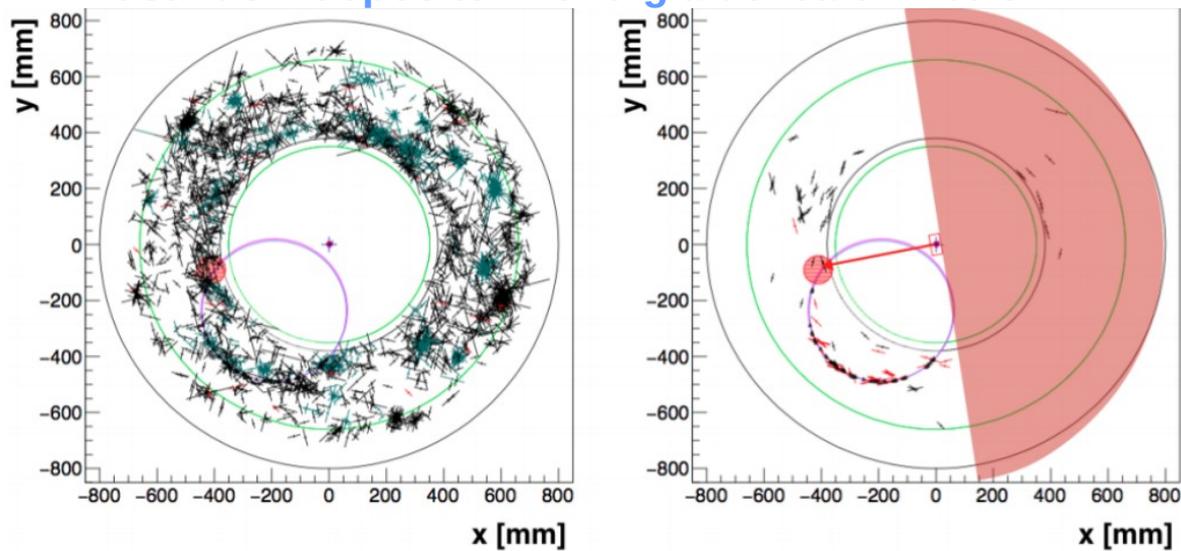


* Applicazioni: stima superiore al fondo da antiprotoni, ricostruzione delle conversioni dei fotoni

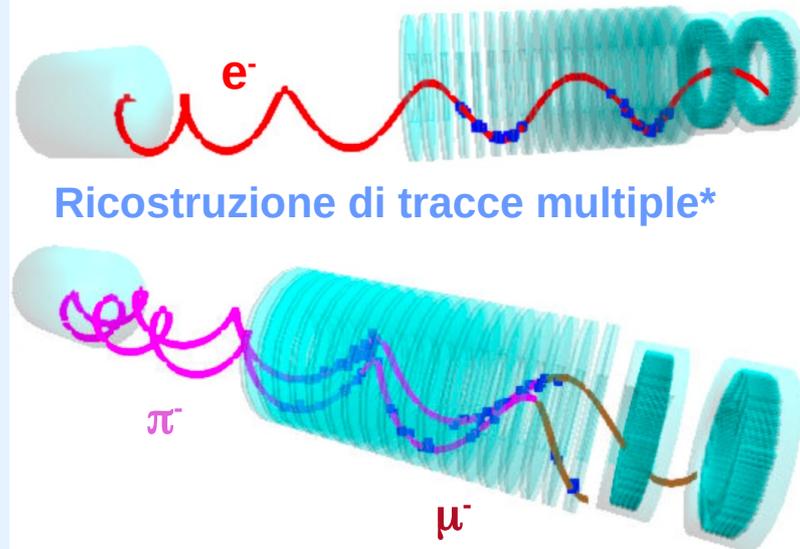
** Importanti per misurare lo spettro dei fotoni emessi dalle catture nucleari radiative di pioni e muoni

Contributi pisani all'analisi dei dati simulati

Miglioramento del pattern recognition
usando il deposito in energia del calorimetro

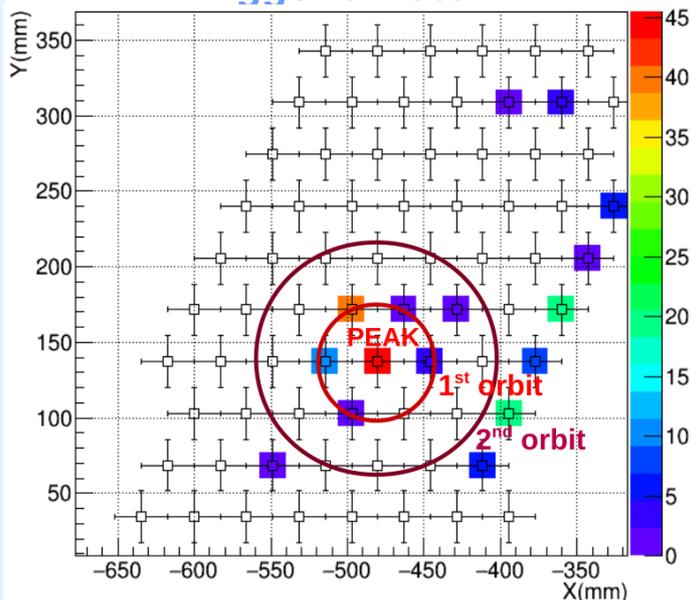


Event Display

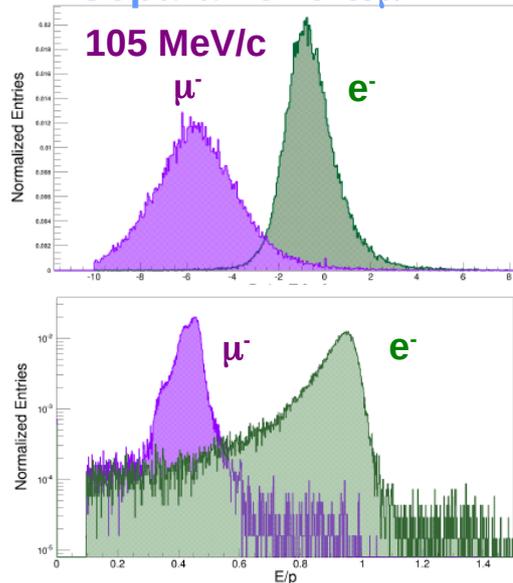


Ricostruzione di tracce multiple*

Trigger di fotoni**



Separazione e/μ



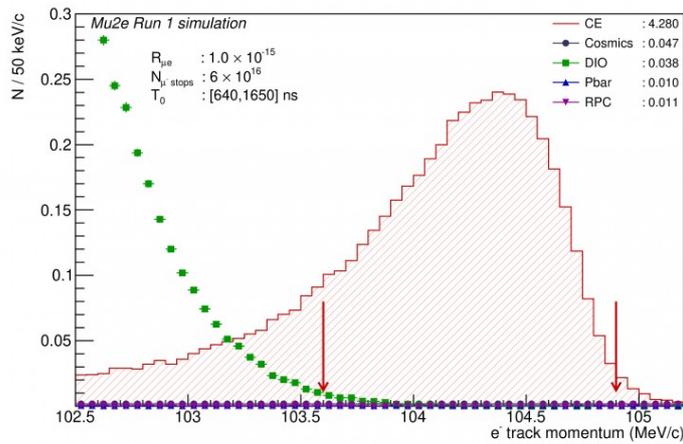
Grazie al calorimetro il fondo dei **muoni cosmici** diviene **trascurabile** rispetto a quello degli elettroni prodotti dalle interazioni dei raggi cosmici con l'apparato

* Applicazioni: stima superiore al fondo da antiprotoni, ricostruzione delle conversioni dei fotoni

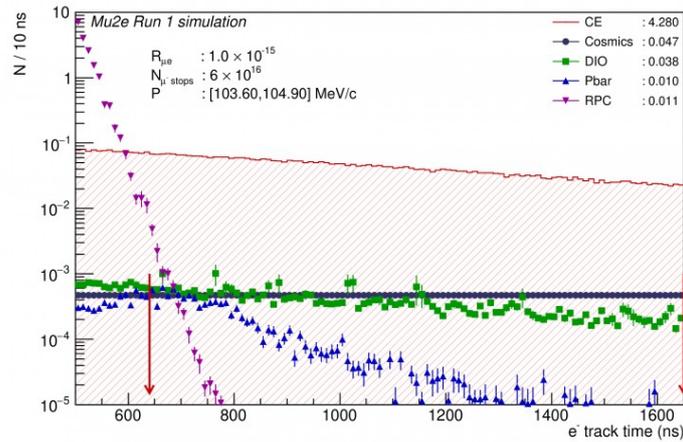
** Importanti per misurare lo spettro dei fotoni emessi dalle catture nucleari radiative di pioni e muoni

Studio della sensibilità di Mu2e dopo il Run 1*

Impulso della traccia



Tempo della traccia



Sensibilità per evento singolo (SES) e fondi attesi assumendo **$6 \cdot 10^{16}$ atomi muonici**

Channel	Mu2e Run I
SES	2.4×10^{-16}
Cosmic rays	0.046 ± 0.010 (stat) ± 0.009 (syst)
DIO	0.038 ± 0.002 (stat) $^{+0.025}_{-0.015}$ (syst)
Antiprotons	0.010 ± 0.003 (stat) ± 0.010 (syst)
RPC in-time	0.010 ± 0.002 (stat) $^{+0.001}_{-0.003}$ (syst)
RPC out-of-time ($\zeta = 10^{-10}$)	$(1.2 \pm 0.1$ (stat) $^{+0.1}_{-0.3}$ (syst)) $\times 10^{-3}$
RMC	$< 2.4 \times 10^{-3}$
Decays in flight	$< 2 \times 10^{-3}$
Beam electrons	$< 1 \times 10^{-3}$
Total	0.105 ± 0.032

Solo **0.1 eventi di fondo** attesi !!

Se $R_{\mu e} = 1.1 \cdot 10^{-15}$ si potrebbero osservare **5 eventi** di segnale e proclamare a **scoperta della CLFV!!**

In caso contrario si migliorerebbe il limite di Sindrum II di un fattore 1000:
 $R_{\mu e} < 6.2 \cdot 10^{-16}$ al 90% CL

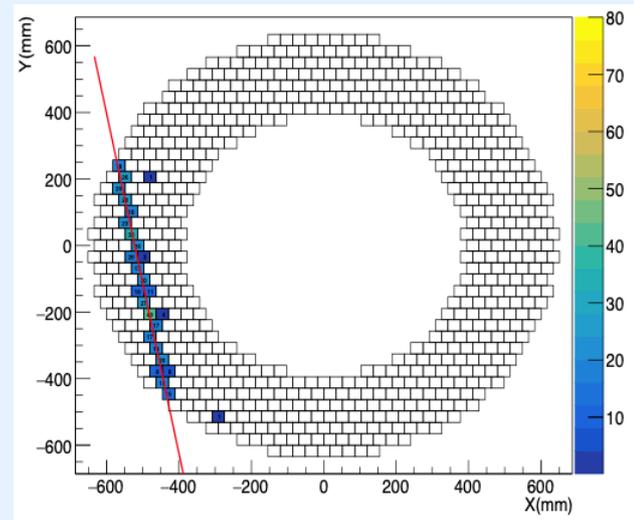
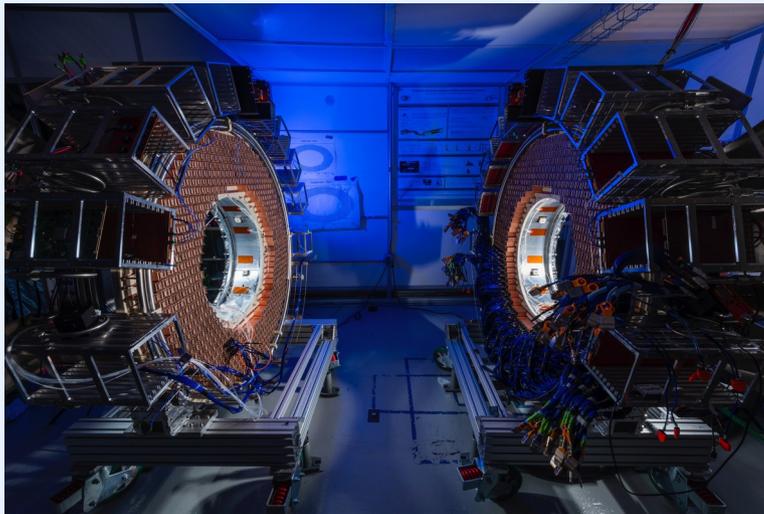
Prossimi passi

2025

2026



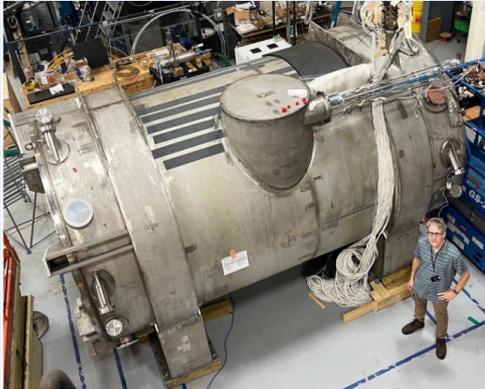
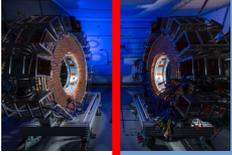
Test con
cosmici in
camera
pulita
(Nov '24-
Feb '25)



Prossimi passi

2025

2026



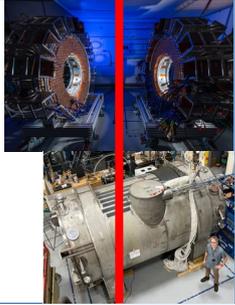
↑
Istallazione
del PS
(Dic '24)



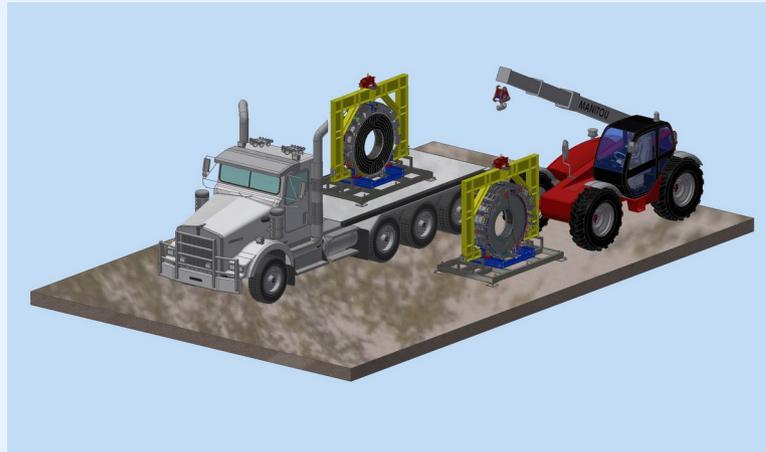
Prossimi passi

2025

2026



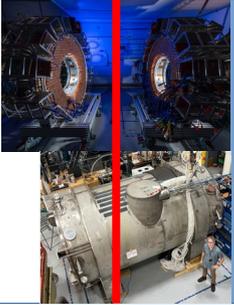
↑
Spostamento
dei dischi
del
calorimetro
(Feb '25)



Prossimi passi

2025

2026



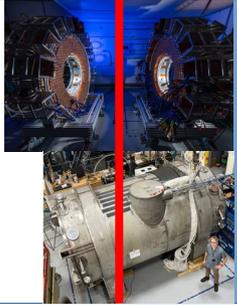
↑
Spostamento
del
tracciatore
(Apr '25)



Prossimi passi

2025

2026



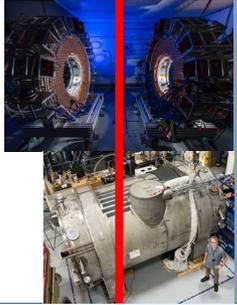
↑
Spostamento
del DS
(Mag '25)



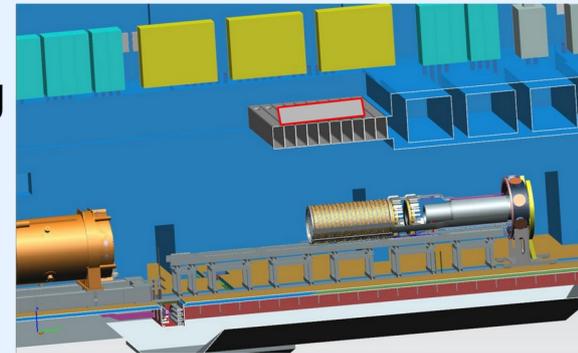
Prossimi passi

2025

2026



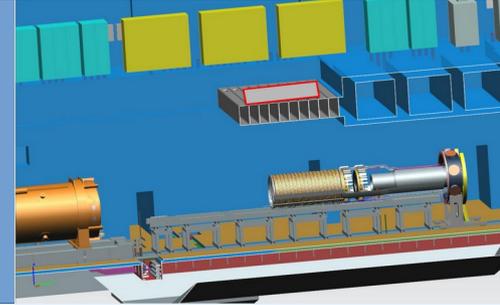
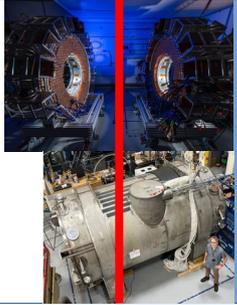
↑
Commissioning
con raggi
cosmici
(Lug -Dic '25)



Prossimi passi

2025

2026



2026

2027

2028

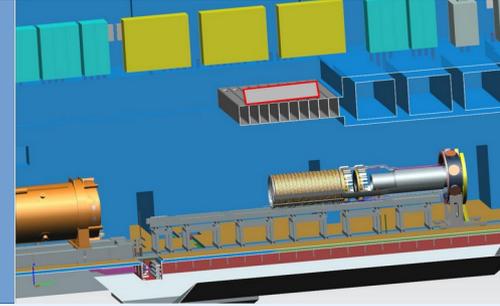
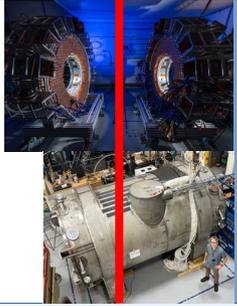
Mappa del campo magnetico
Commissioning con campo

Mu2e Run I

Prossimi passi

2025

2026



2026

2027

2028

Mappa del campo magnetico
Commissioning con campo

Mu2e Run I

2028

2029

2030

2031

2032

Shutdown (upgrade di PIP-II)

Mu2e Run II

Il gruppo Mu2e a Pisa (11,6 FTE)



Francesco Amanti



Giorgio Bellettini



Franco Cervelli

L4 Event Display



Namitha Chithirasreemadam



Riccardo Ciolini

da Gen '25



Lorenzo Crescimbeni



Francesco D'Errico

Resp. Naz.
L3 Simulazione



Stefano Di Falco



Simone Donati



Anna Driutti

L3 ECAL Laser



Carlo Ferrari

L3 DAQ



Antonio Gioiosa



Valerio Giusti



Hussain Kitagawa

L3 ECAL operation



Luca Morescalchi

L3 ECAL digitizer



Elena Pedreschi

L3 meccanica ECAL



Fabrizio Raffaelli



Alessandro Maria Ricci

Resp. Locale
L3 ECAL digitizer



Franco Spinella



Alessandra Toncelli

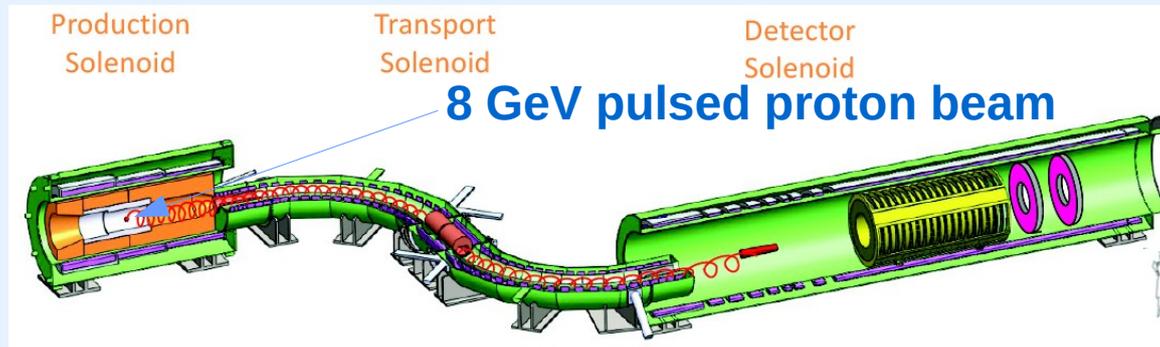
... + collaboratori !!

Grazie per l'attenzione!

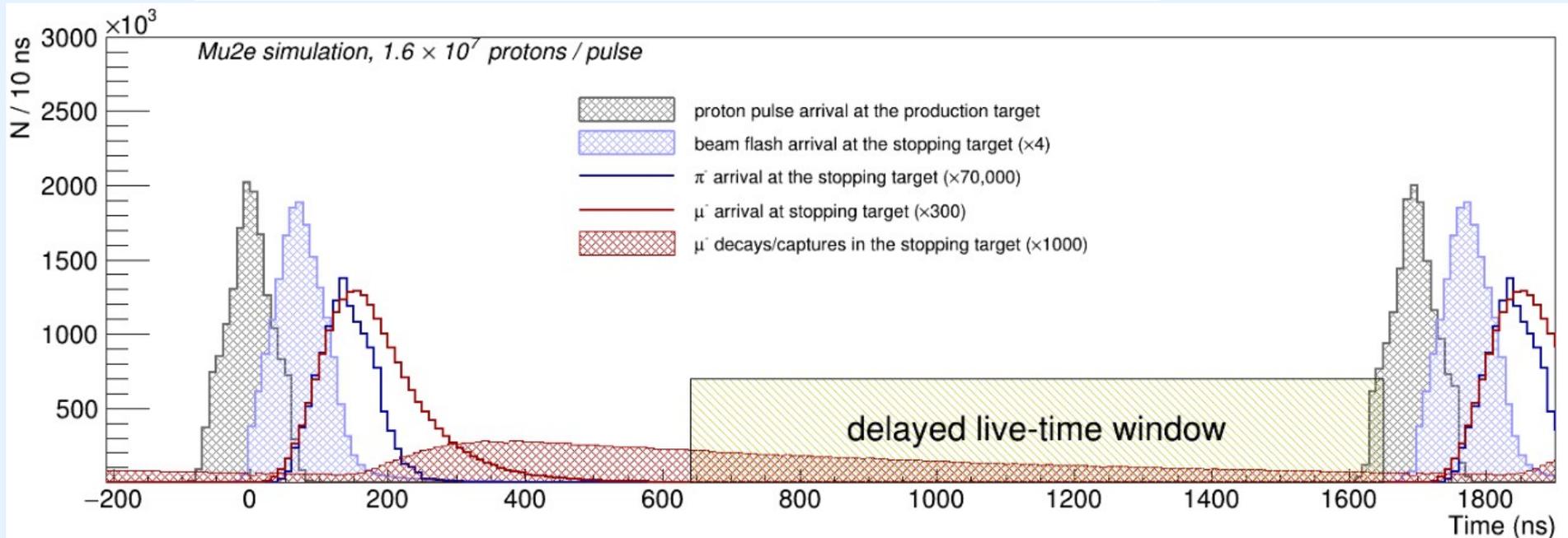


BACKUP

The pulsed proton beam structure



Full Beam intensity:
 $3.9 \cdot 10^7$ p/pulse
($\pm 50\%$)



Pulsed Proton Beam Structure:

Proton pulse period: **$1.695 \mu\text{s}$** $\sim 2\tau_{\mu}^{\text{Al}}$ ($\tau_{\mu}^{\text{Al}} = 864 \text{ ns}$)

Delayed analysis window to suppress prompt backgrounds

Out of bunch proton fraction (“extinction factor”) **$< 10^{-10}$**

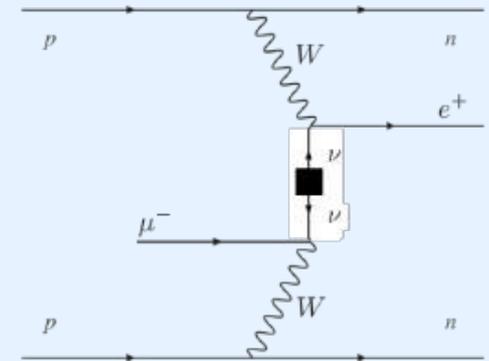
(measured by an extinction monitor downstream of the beam)

$\mu^- \rightarrow e^+$ expected sensitivity

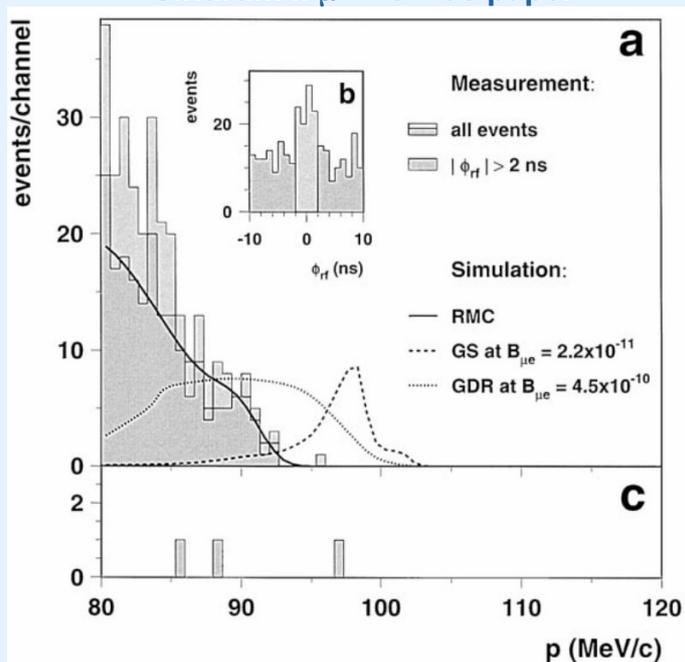
Mu2e will also be able to search for the CLFV and **lepton number violating** ($\Delta L=2$) process:

$$\mu^- N(A, Z) \rightarrow e^+ N(A, Z - 2)$$

The current limit on $R_{\mu e^+}$ is $1.7 \cdot 10^{-12}$ (Sindrum II '98).



Sindrum II $\mu^- \rightarrow e^+$ '98 paper



Also for this channel **if the error is dominated by signal statistics** Mu2e should achieve a factor 10^3 improvement in Run 1 and a factor 10^4 after Run 2

$\mu^- \rightarrow e^+$ possible limitation to sensitivity

Sindrum II $\mu^- \rightarrow e^-$ 2006 paper also shows the positron spectrum (not elsewhere published):

Positron spectrum shows an unexpected bump in the signal region

An a posteriori convolution of the signal with the Sindrum II momentum resolution, including energy losses, shows that the bump is not compatible with the signal (arXiv:2009.00214v1)

A possible explanation could be the Radiative Muon Capture (RMC) γ spectrum model.

The commonly used closure approximation:

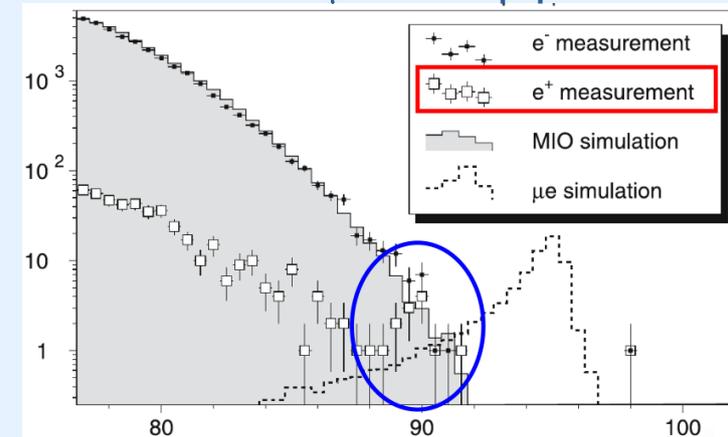
$$dN/dx \sim (1 - 2x + 2x^2) \cdot x \cdot (1 - x)^2, \quad x = k / k_{max}$$

assumes an end point k_{max} . TRIUMF data fit gives an end point lower than the kinematic limit.

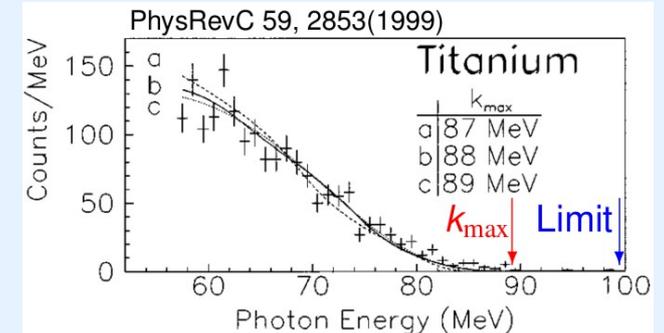
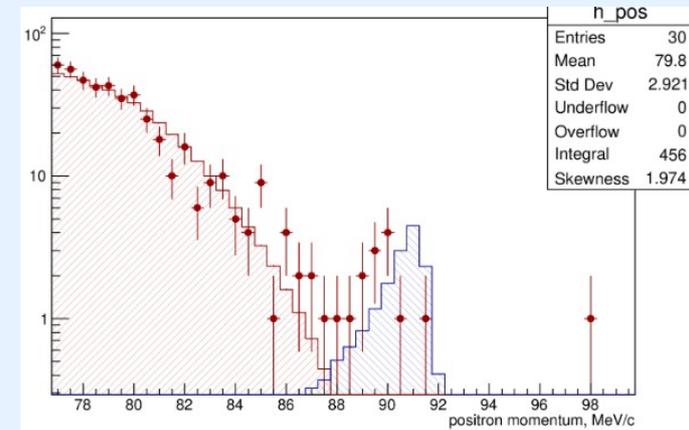
If the photon spectrum extends beyond k_{max} $\mu^- \rightarrow e^+$ sensitivity could be much worse.

RMC γ photon spectrum will be measured during Mu2e Run I.

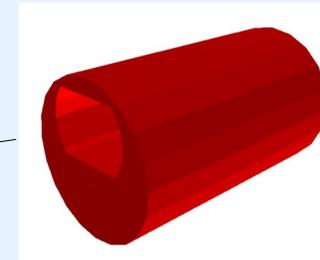
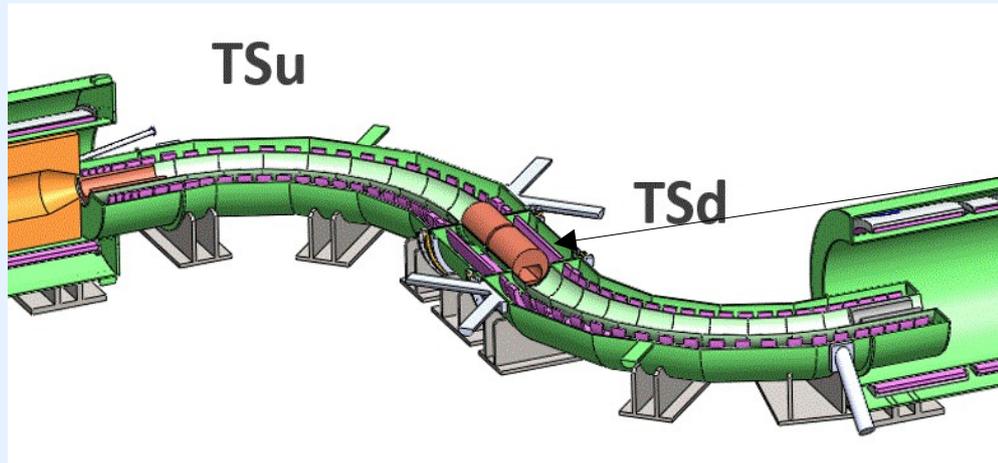
Sindrum II $\mu^- \rightarrow e^-$ 2006 paper



arXiv:2009.00214v1



The Mu2e transport solenoid (TS)

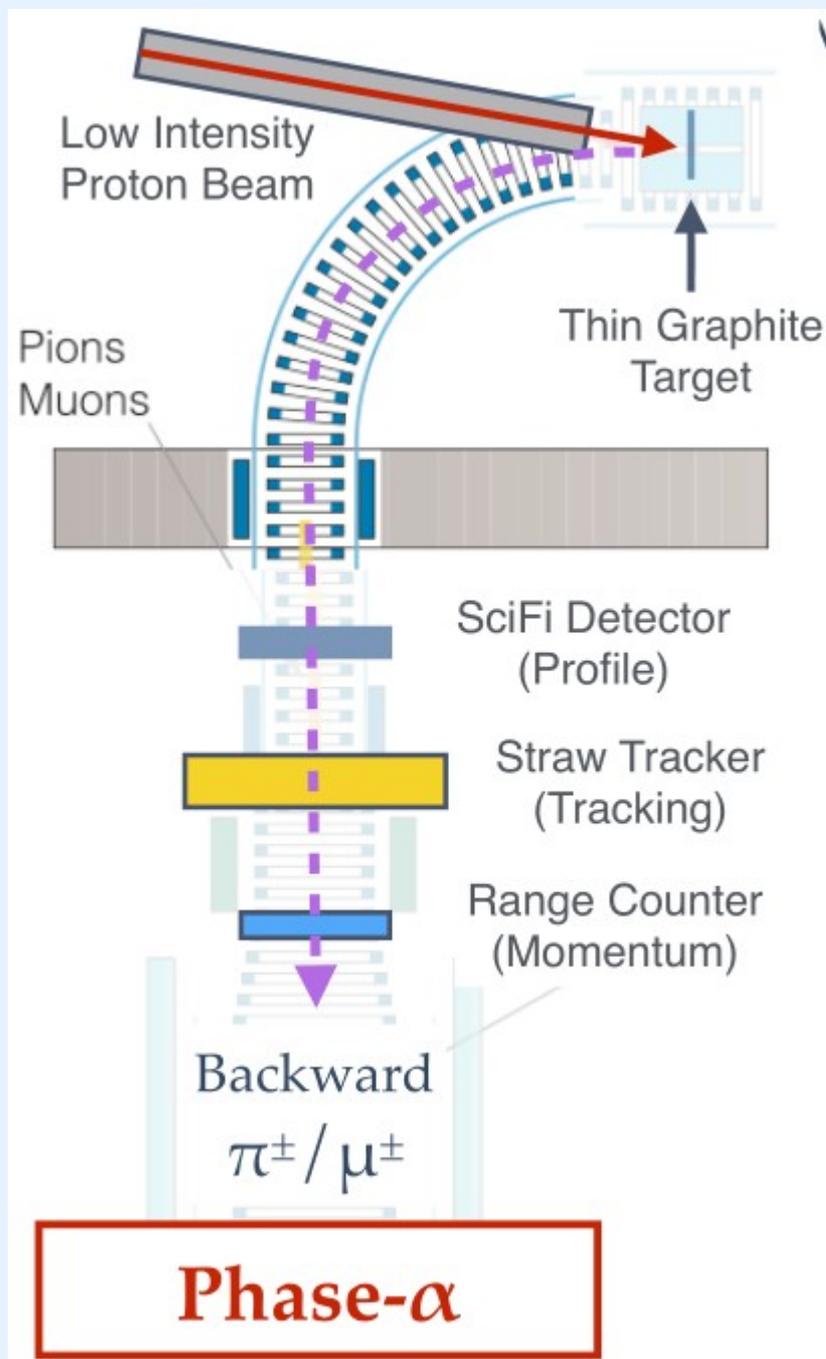


Swivel collimator

2) Transport solenoid:

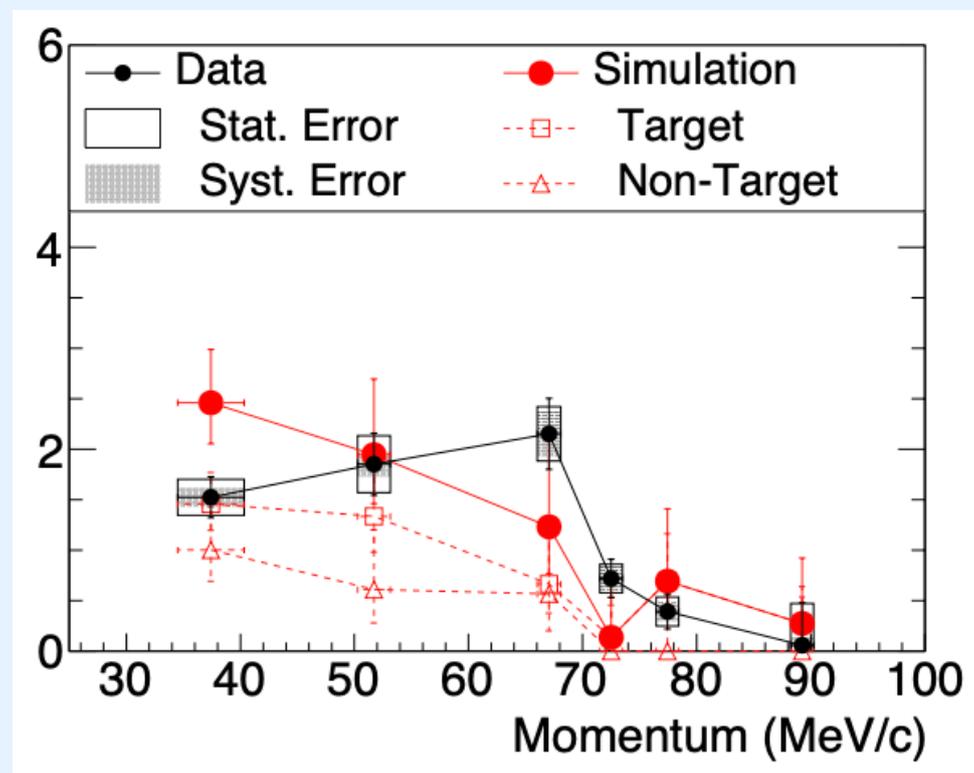
- small magnetic field gradient to avoid trapped particles
- internal swivel collimators to select $-/+$ particles of wanted momentum
- thin absorber windows to reduce antiproton background

COMET Phase α @ JPARC

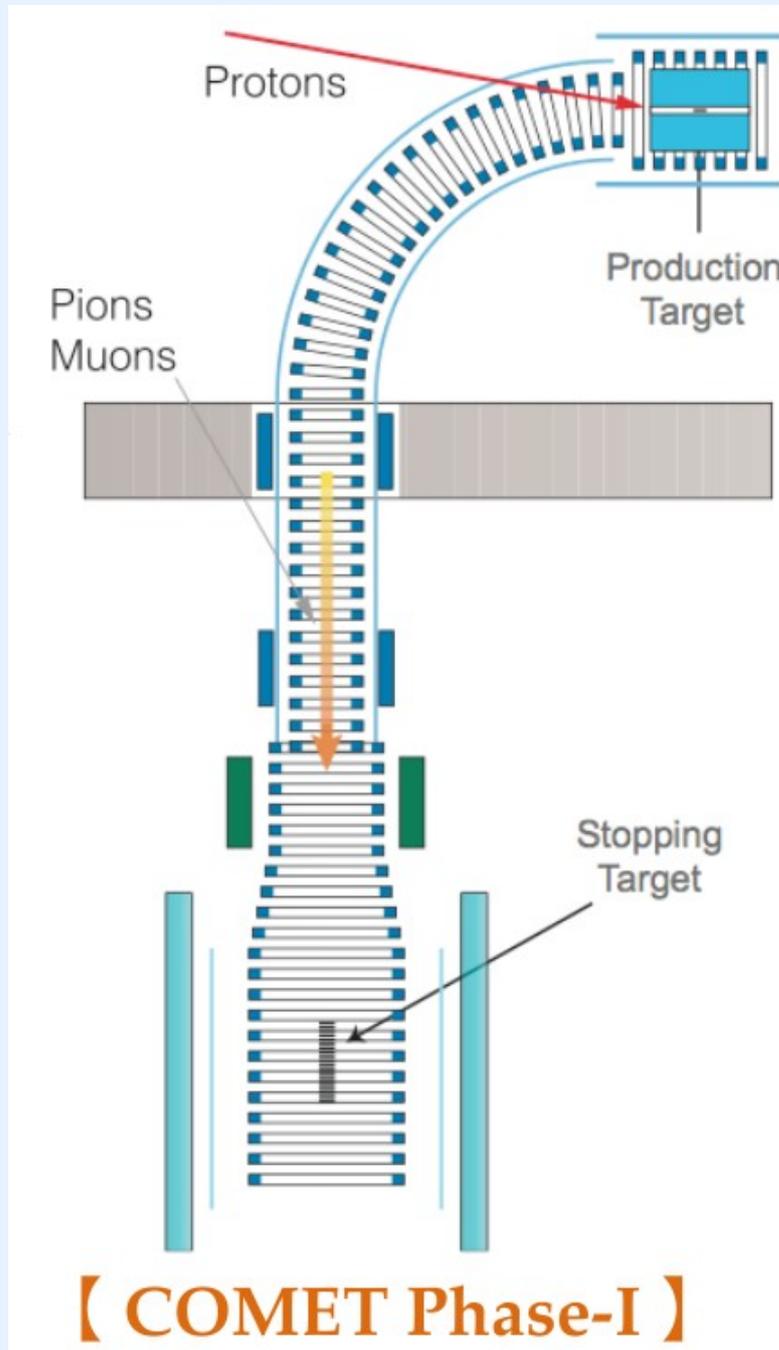


2023:

- Measure π/μ yield
- Validate transported π spectrum



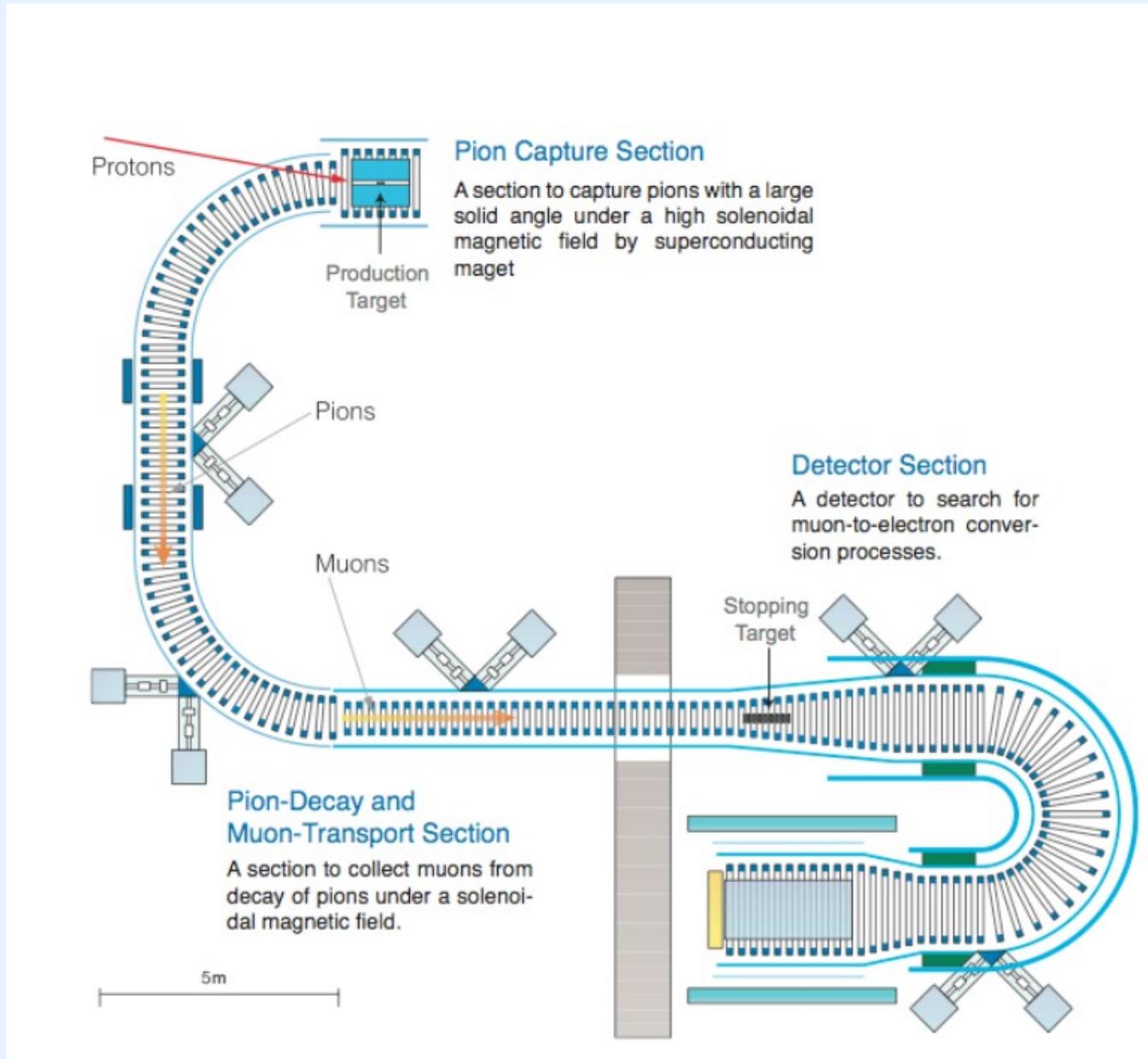
COMET Phase I @ JPARC



2025-2026:

- Construct up to first 90° bend and place detector.
- Perform direct beam measurement:
 - No backward σ_{π} data so far
 - No real BG data so far
- Perform μ -e Search with an intermediate sensitivity $O(10^{-15})$

COMET Phase II @ JPARC



2029(?):

- Complete all transport
- Perform μ -e search with a full sensitivity $O(10^{-17})$

Sensibilità alla scala di energia della nuova fisica

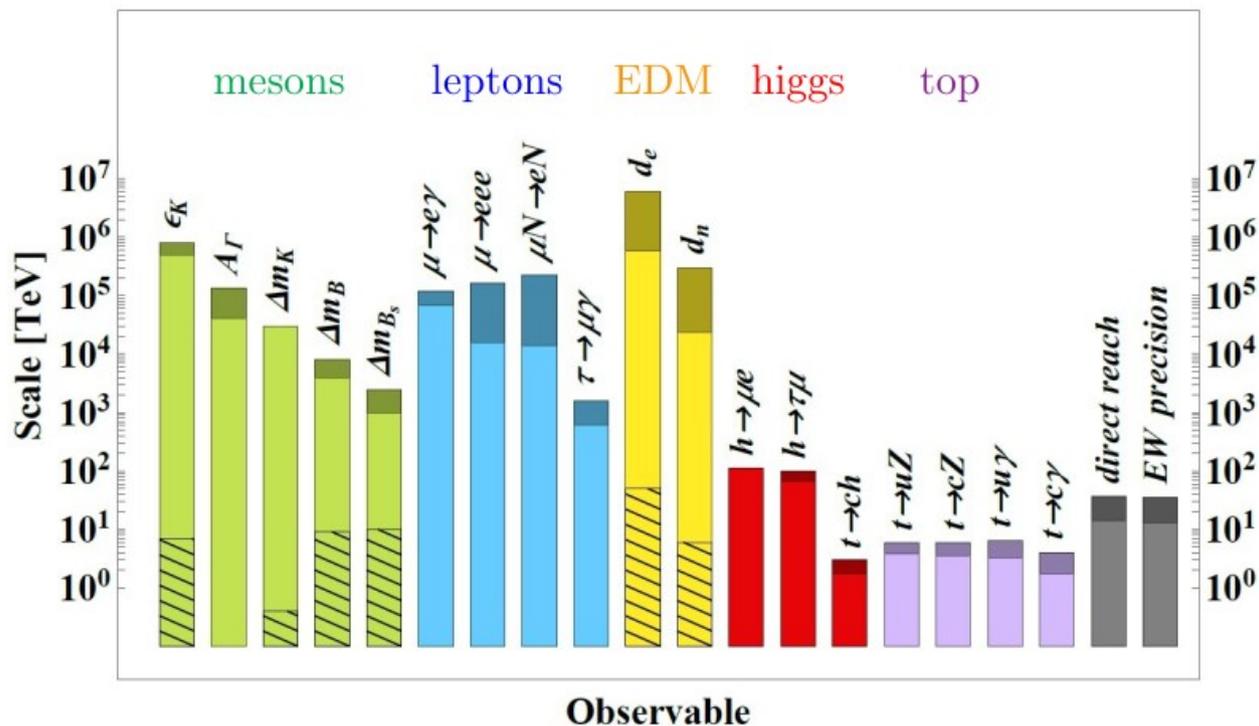


Figure 2: Scales of dimension-6 operators probed by various observables assuming unit couplings. The shaded regions show estimated future improvements, and the hatched regions show the scales probed in models with MFV flavor structure. (From Ref. [118].)

La Minimal Flavor Violation (MFV) corrisponde a una ‘minima ragionevole’ deviazione dal Modello Standard. Le teorie che la includono non prevedono segnali in molte delle osservabili mentre prevedono una sensibilità ridotta alle decine di TeV per gli altri.