

Stato dell'esperimento MEG II

Marco Chiappini

INFN Pisa

per la Collaborazione MEG II

16 Settembre 2020



106° CONGRESSO NAZIONALE
SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

14-18 settembre 2020



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



Sommario

➤ Introduzione

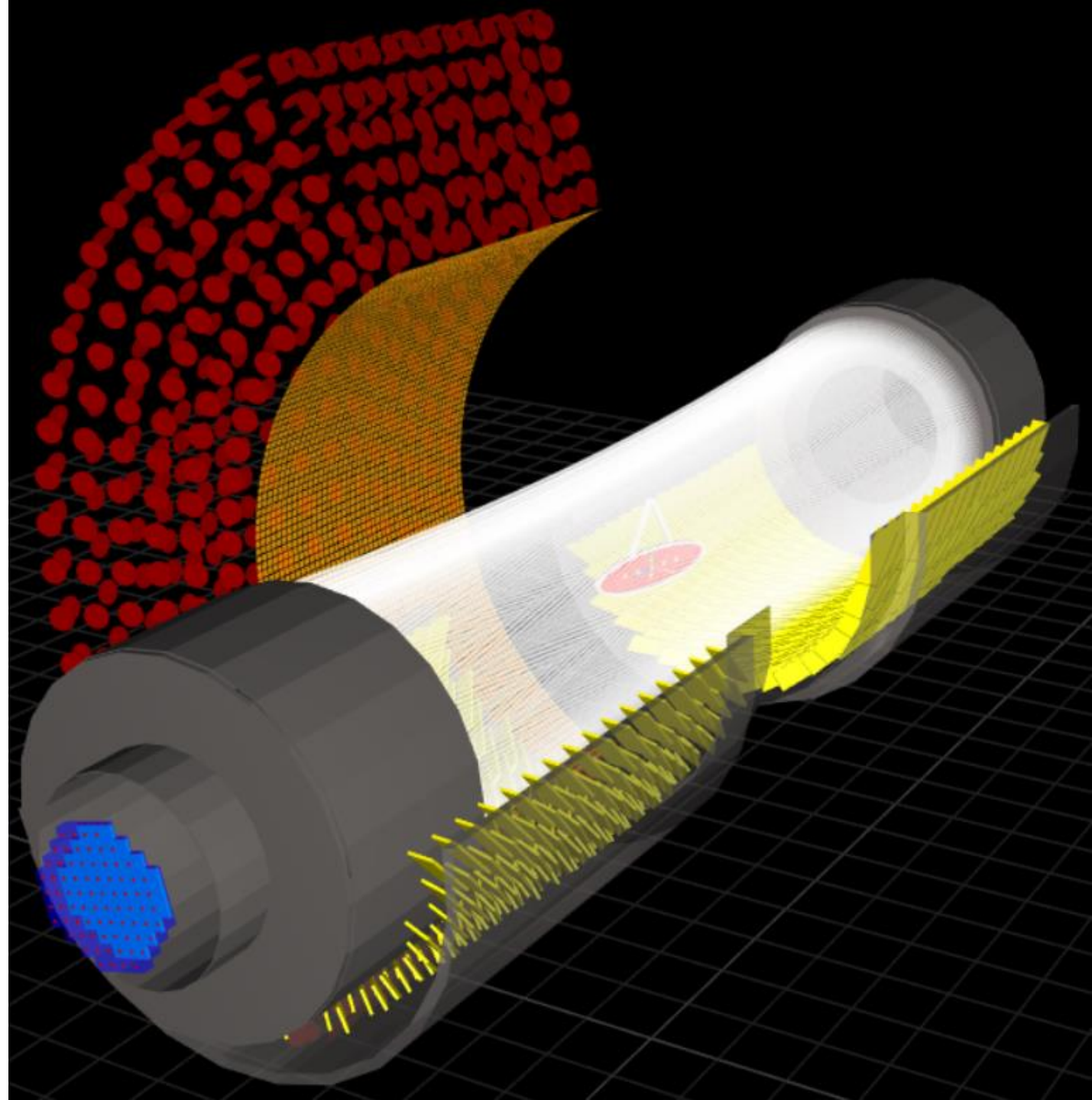
- Violazione del sapore leptonic
- Il decadimento $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$
- Motivazioni dell'upgrade

➤ L'esperimento MEG II

- Camera a deriva (CDCH)
- Misuratore di tempo dei e^+ a pixel di scintillatore (pTC)
- Rivelatore a Xenon liquido (LXe)
- Rivelatore aggiuntivo di VETO per identificare e^+ di bassa energia (RDC)
- Trigger e DAQ (TDAQ)

➤ Difficoltà lungo la strada

➤ Conclusioni e stato attuale



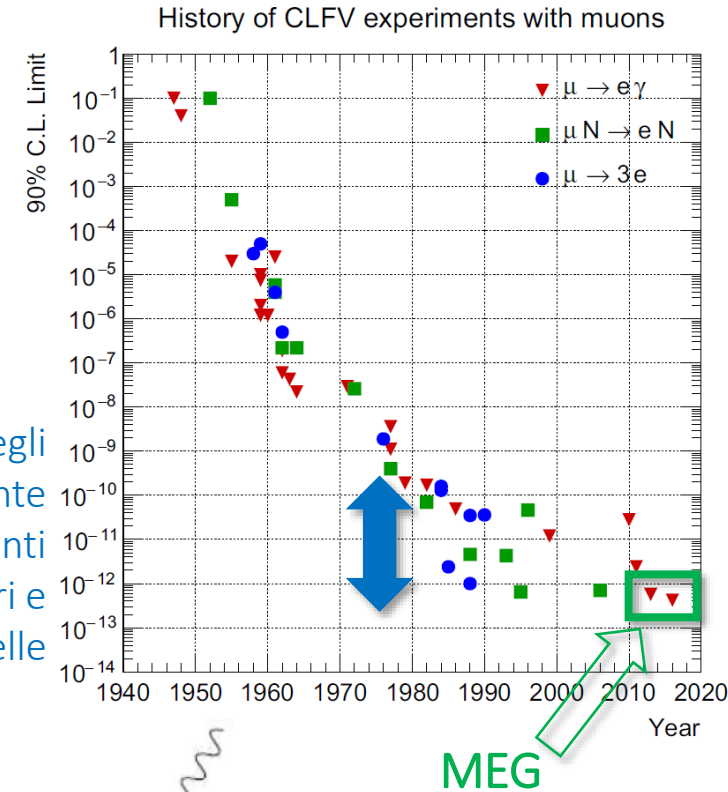
Violazione del sapore leptonic

- Processi di violazione del sapore leptonic (LFV) sperimentalmente osservati per leptoni neutri
- Oscillazioni dei neutrini $\nu_l \rightarrow \nu_{l'}$



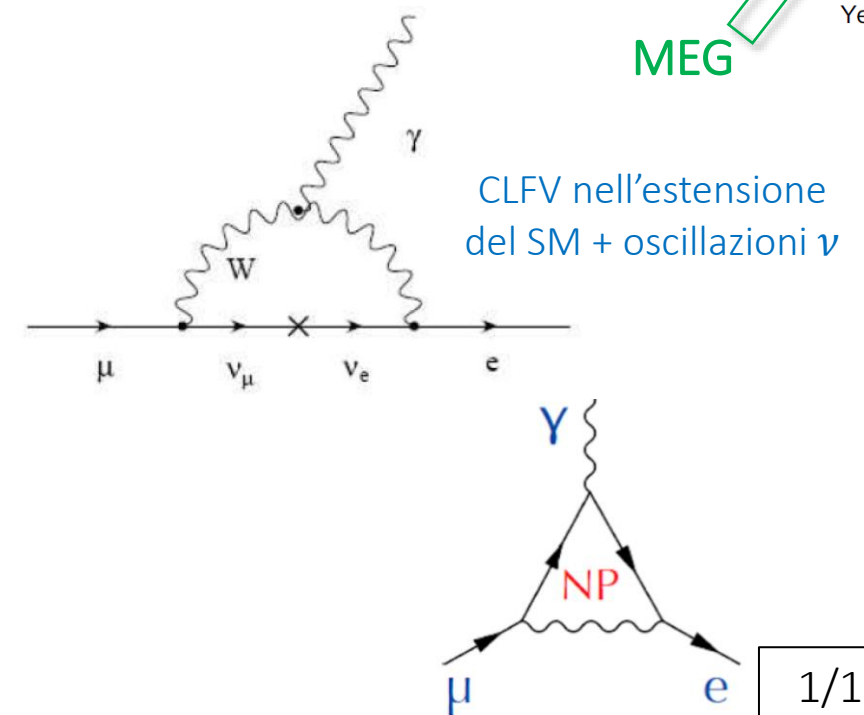
- LFV per leptoni carichi (CLFV): $l \rightarrow l' ???$
- Se trovata \rightarrow prova definitiva di Nuova Fisica (NP)

3 ordini di grandezza negli ultimi 35 anni principalmente ottenuti con miglioramenti tecnologici nei rivelatori e fasci di particelle



- Estensione del Modello Standard (SM) + oscillazioni $\nu \rightarrow l \rightarrow l' \checkmark$
 - Ma non osservabili sperimentalmente: m_ν piccola $\rightarrow BR < 10^{-50}$
- Teorie oltre SM (SUSY-GUT) prevedono particelle e interazioni aggiuntive
 - CLFV rara ma predetta ad un livello osservabile ($BR \approx 10^{-(14 \div 15)}$)
- In questo contesto l'esperimento MEG rappresenta lo stato dell'arte nella ricerca del decadimento CLFV $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$
 - Risultato finale basato sulla statistica completa raccolta durante il periodo di presa dati 2009-2013 al Paul Scherrer Institut (PSI)
 - $BR(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 4.2 \times 10^{-13}$ (90% C.L.)
 - Limite superiore migliore al Mondo

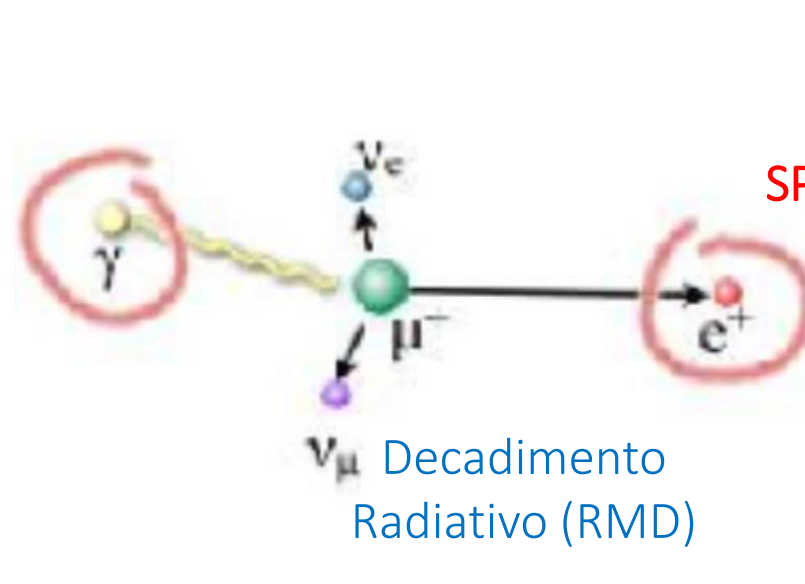
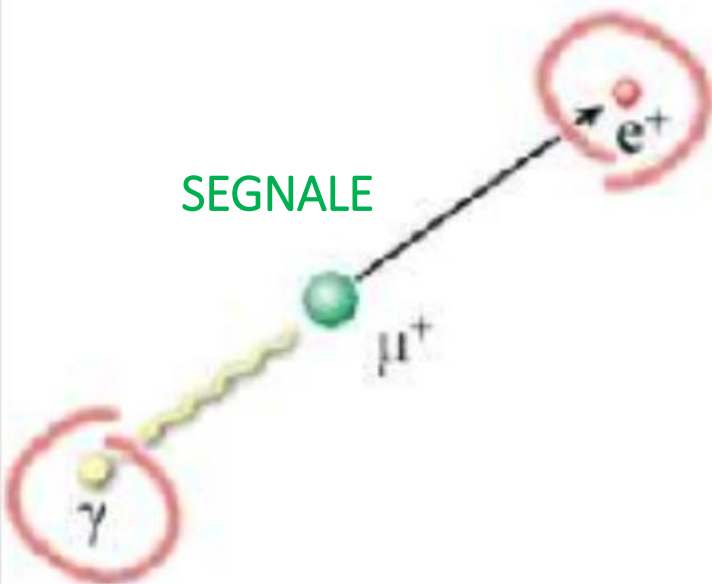
[European Physics Journal C \(2016\) 76:434](#)



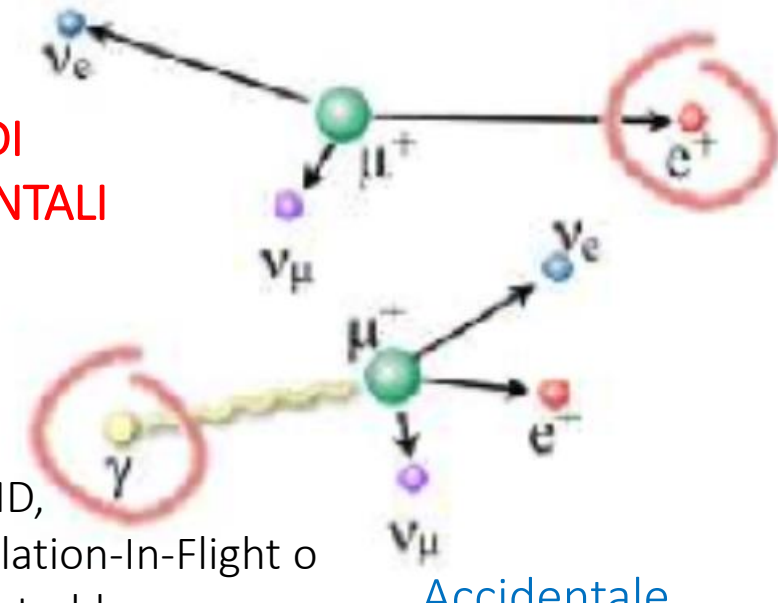
Il decadimento $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$

Variabili cinematiche

$$E_e, E_\gamma, t_{e\gamma}, \theta_{e\gamma}$$



FONDI
SPERIMENTALI



Decadimento
Radiativo (RMD)

Da RMD,
Annihilation-In-Flight o
bremsstrahlung

Accidentale

- Al PSI c'è il fascio continuo di muoni più intenso al Mondo: $R_\mu \approx 10^8$ Hz
- μ^+ con $p = 28$ MeV/c arrestati in un bersaglio sottile (PE, 205 μm) con inclinazione di 20.5°
- Decadimento μ^+ a riposo: cinematica a 2 corpi
- $E_\gamma = E_e = 52.8$ MeV
- $\theta_{e\gamma} = 180^\circ$
- $t_{e\gamma} = 0$ s

- $E_\gamma < 52.8$ MeV
- $E_e < 52.8$ MeV
- $\theta_{e\gamma} < 180^\circ$
- $t_{e\gamma} = 0$ s

- $E_\gamma < 52.8$ MeV
- $E_e < 52.8$ MeV
- $\theta_{e\gamma} < 180^\circ$
- $t_{e\gamma} = \text{flat}$

- $BKG_{ACC} \propto R_\mu \Delta E_e \Delta t_{e\gamma} \Delta E_\gamma^2 \Delta \theta_{e\gamma}^2 \rightarrow$ DOMINANTE ad alto flusso di μ^+
- $BKG_{RMD} \approx 10\% \times BKG_{ACC}$



Motivazioni dell'upgrade di MEG

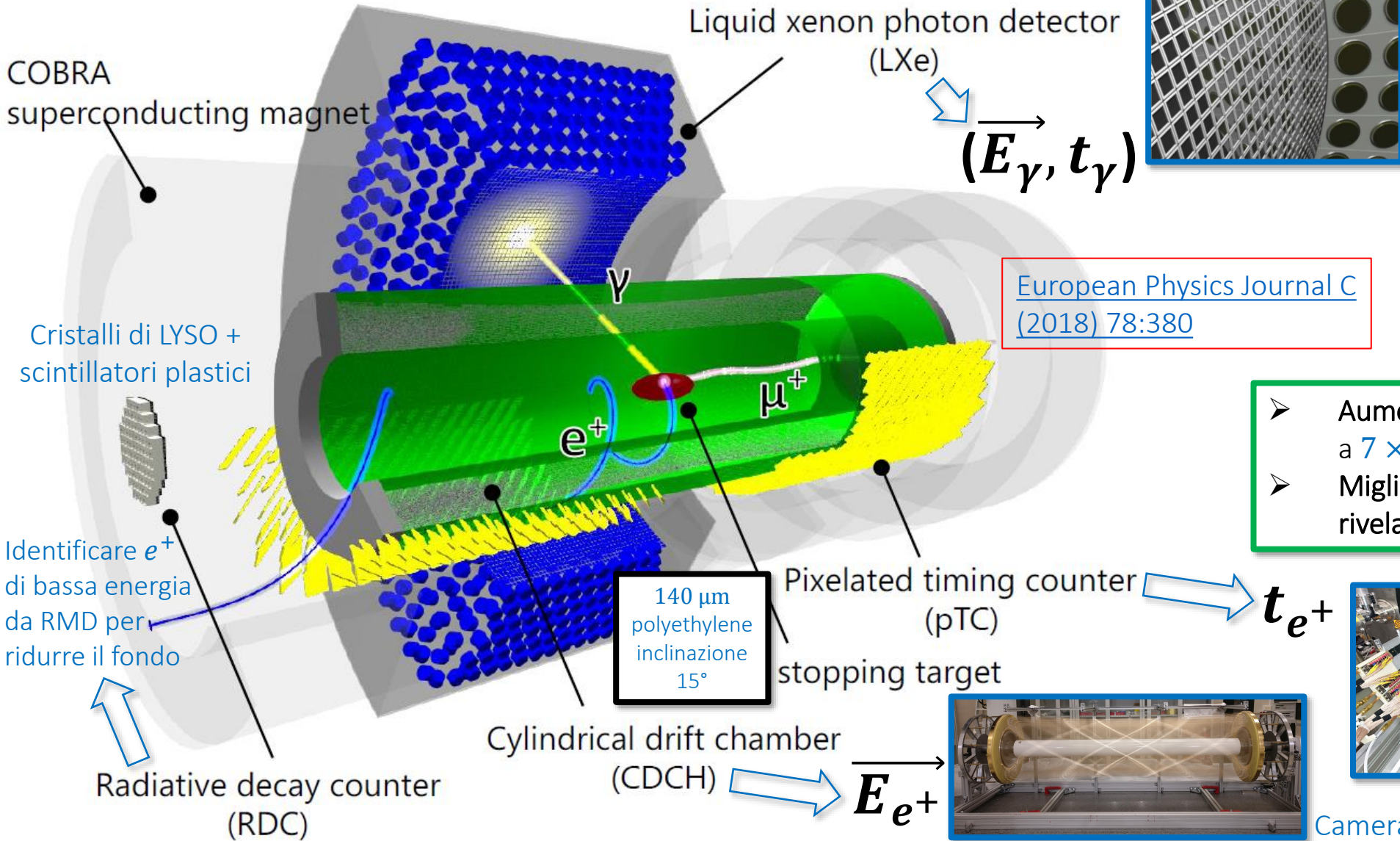
- Analisi dei dati dal 2009 al 2011: $BR(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) < 5.7 \times 10^{-13}$ (90% C.L.) Phys. Rev. Lett. 110, 201801 (2013)
 - Miglioramento del 36% con il risultato finale di MEG
 - Statistica più che raddoppiata: $N_\mu^{2009-2011} \approx 3.5 \times 10^{14} \rightarrow N_\mu^{2009-2013} \approx 7.5 \times 10^{14}$
- La sensibilità di MEG non aumenta più linearmente con i dati raccolti
 - Limitata dalle risoluzioni nella misura delle variabili cinematiche dei 2 prodotti di decadimento
- Upgrade (MEG II) dell'apparato sperimentale attualmente in fase di commissioning al PSI dopo la fase di costruzione

Variabile	Design (MEG)	Ottenuta (MEG)	Prevista (MEG II)
ΔE_e (keV)	200	380	90
$\Delta\theta_e, \Delta\varphi_e$ (mrad)	5, 5	9, 9	6, 5.5
Efficienza _e (%)	90	40	65
ΔE_γ (%)	1.2	1.7	1.0
Δ Posizione _{γ} (mm)	4	5	< 3
$\Delta t_{e\gamma}$ (ps)	65	120	85
Efficienza _{γ} (%)	> 40	60	70

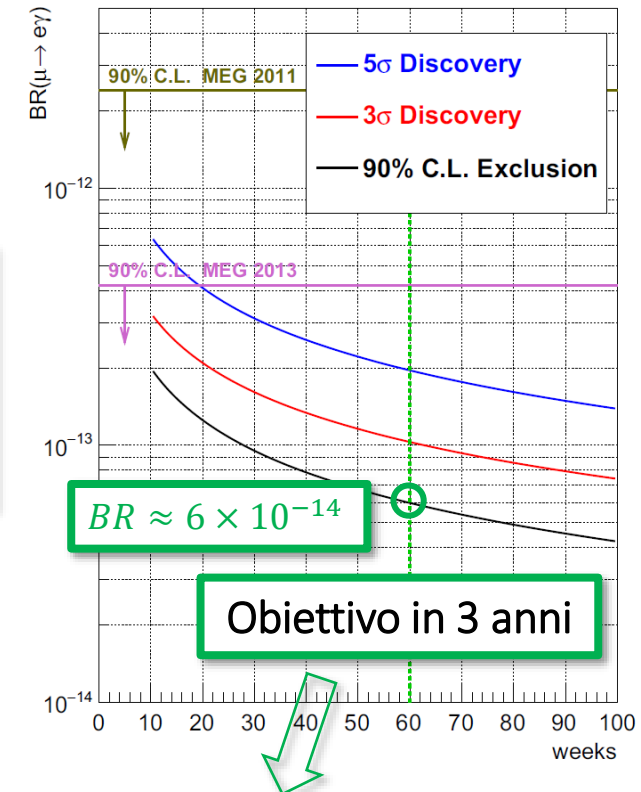
Variabili del positrone

- Ottenute da una simulazione Monte Carlo ad alta statistica (100k eventi di segnale + fondi) dell'intero apparato sperimentale di MEG II
- Usando gli algoritmi di ricostruzione più aggiornati
 - Ancora margini di miglioramento

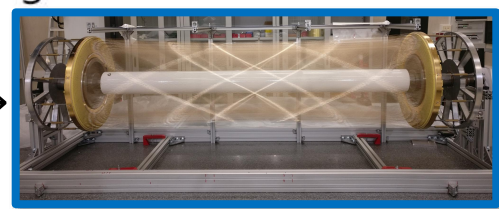
L'esperienza MEG II



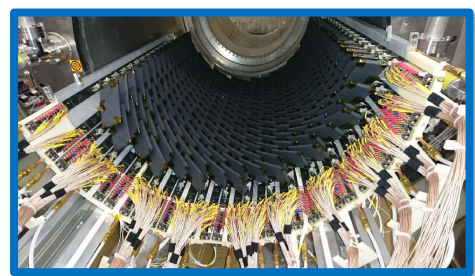
[European Physics Journal C \(2018\) 78:380](#)



- Aumentando lo stopping rate dei μ^+ fino a $7 \times 10^7 \mu^+/s$ (fattore $\times 2$)
- Migliorando le figure di merito dei rivelatori (fattore $\times 2$)

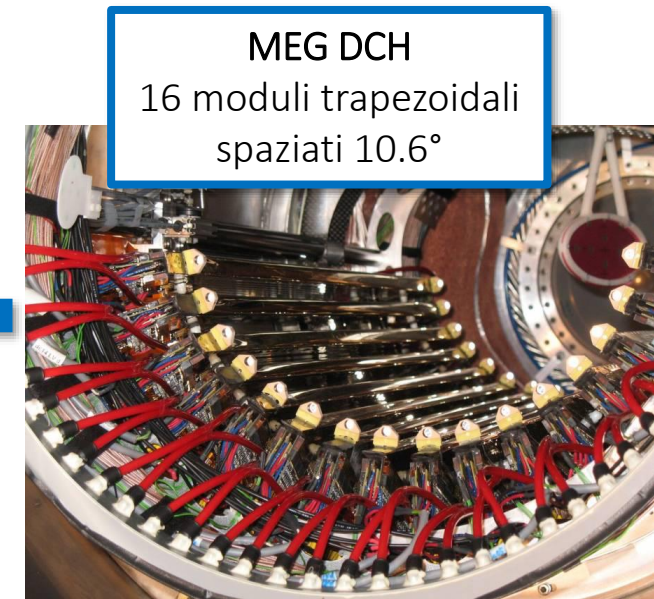
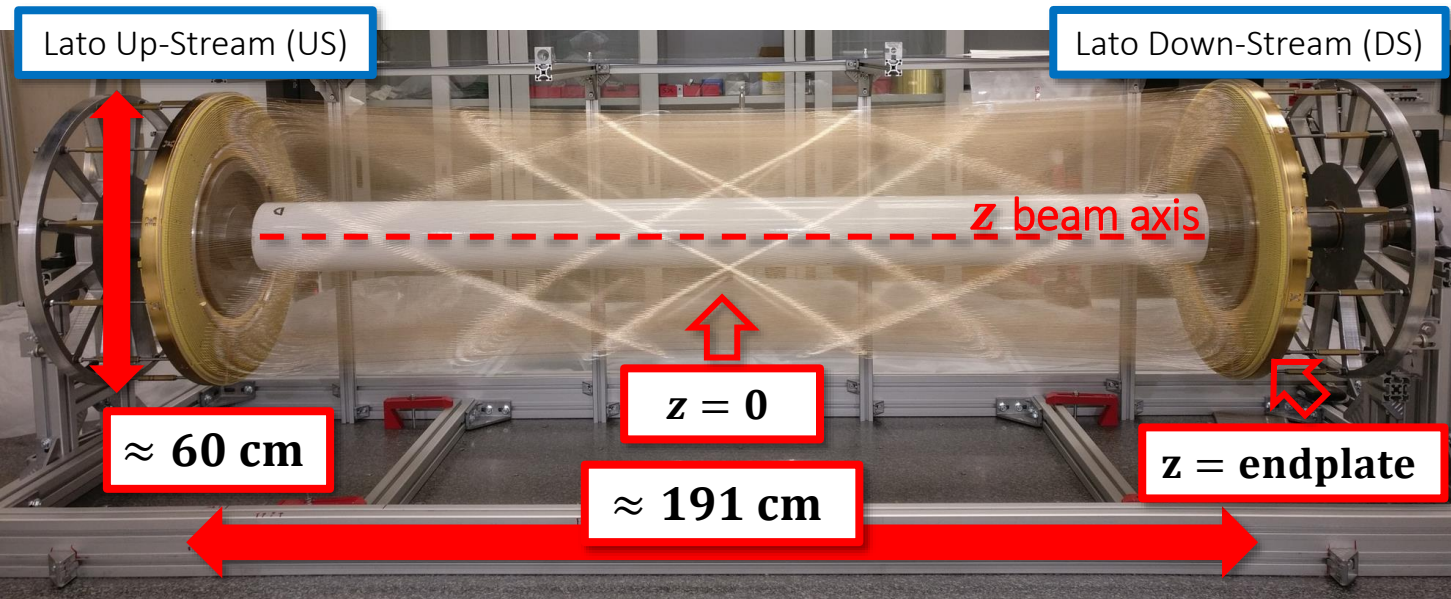


Camera a deriva cilindrica



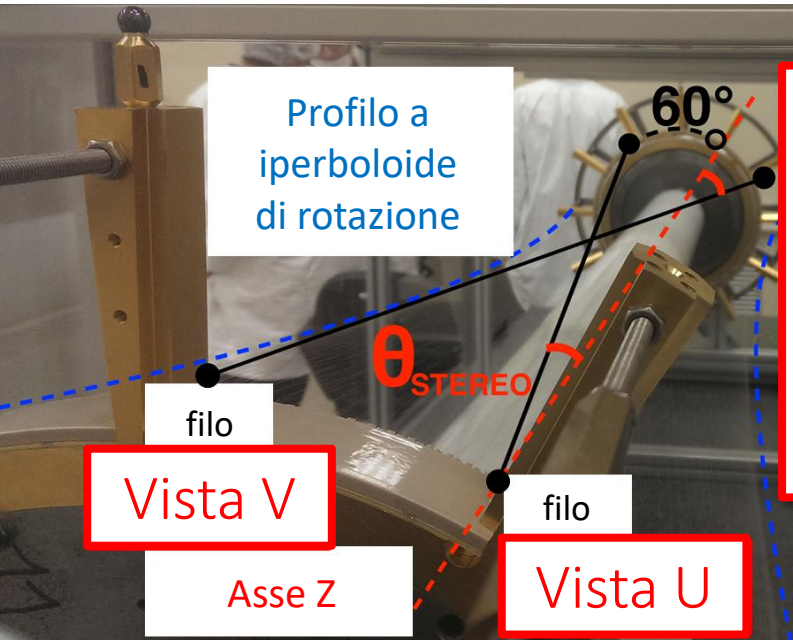
Piastrelle di scintillatore plastico lette da SiPM

La nuova camera a deriva cilindrica (CDCH)



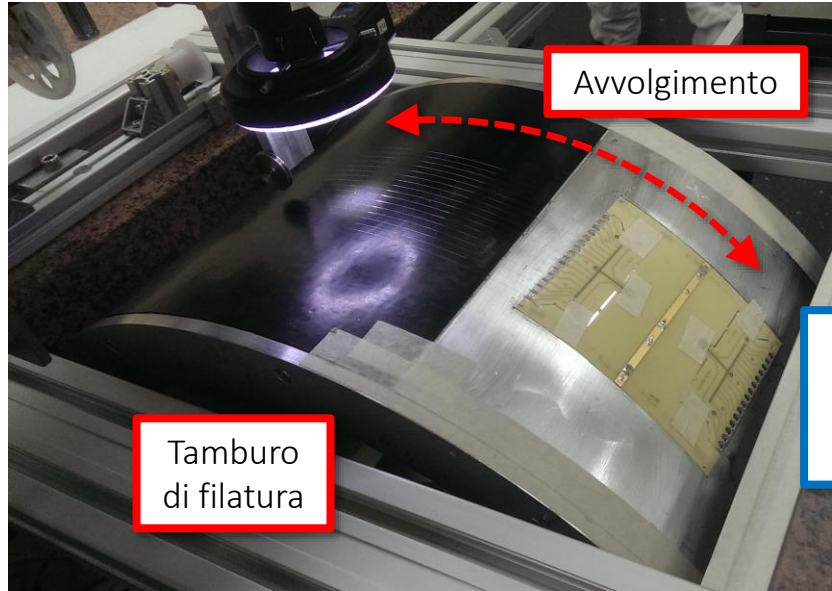
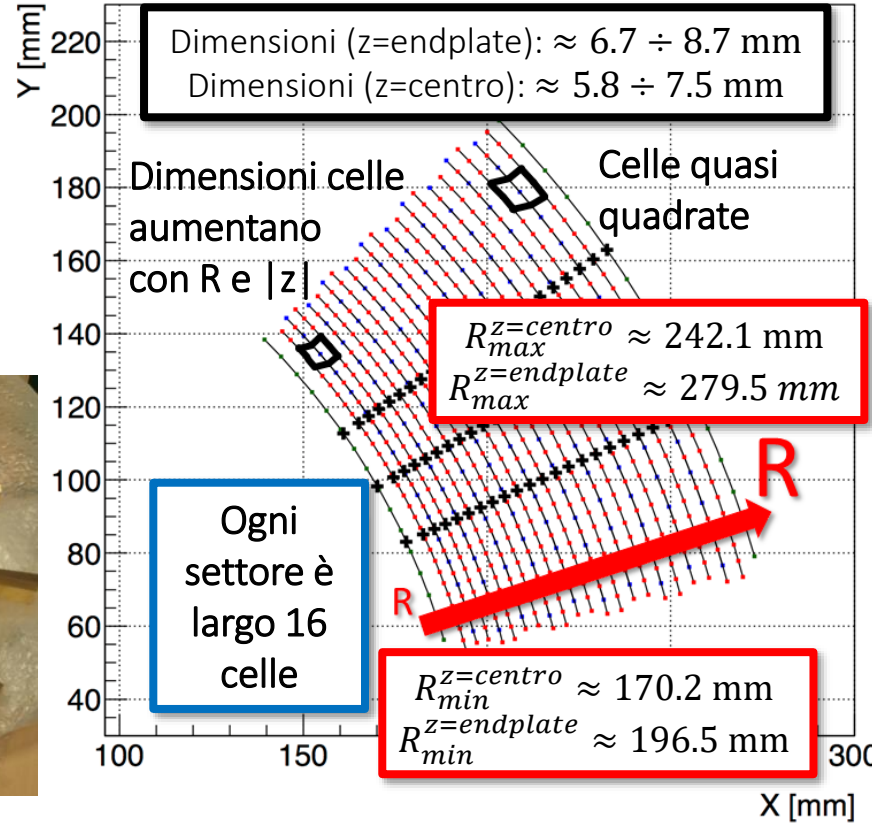
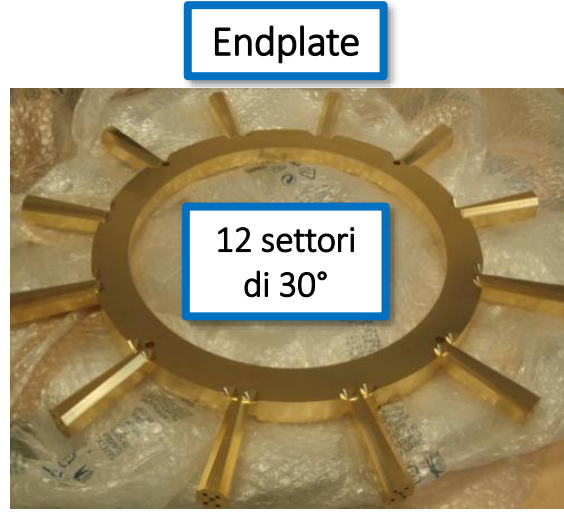
- Cylindrical Drift Chamber (CDCH): volume unico estremamente trasparente riempito con una miscela di gas He:Isobutano 90:10
 - 9 strati concentrici di 192 celle definite da 11904 fili
 - Celle di piccole dimensioni (\sim pochi mm): occupancy di ≈ 1.5 MHz/cella al centro di CDCH
 - Alta densità di elementi sensibili : 4 volte il numero di hit delle camere a deriva di MEG (DCH) e tracciamento e^+ fino al pTC
- Lunghezza di radiazione totale $1.5 \times 10^{-3} X_0$ ($< 1.7 \times 10^{-3} X_0$ delle DCH di MEG)
 - Minimizzazione MCS e riduzione γ di fondo (bremsstrahlung e Annihilation-In-Flight)
- Risoluzione di singolo hit (misurata con prototipi): $\sigma_{hit} < 120 \mu\text{m}$
- Densità di fili estremamente alta (12 fili/ cm^2) \rightarrow no tecnica classica con fili ancorati agli endplate
 - CDCH è la prima camera a deriva progettata e costruita in modo modulare

Design e filatura



Geometria stereo dei fili per la misura della coordinata Z degli hit

- $\theta_{stereo} \approx 6^\circ \div 8.5^\circ$ al crescere di R

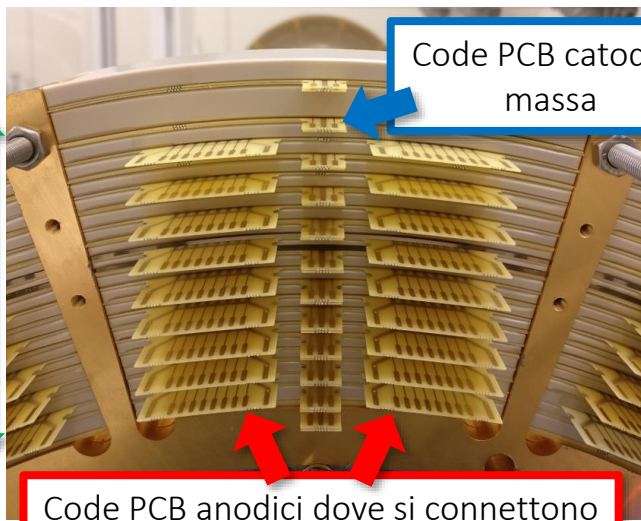


- Fili anodici: 20 μm W placcato Au
- Fili catodici: 40/50 μm Al placcato Ag
- Fili di guardia: 50 μm Al placcato Ag

I fili sono saldati alle due estremità sulle pad di 2 PCB che sono poi montati nei settori degli endplate

Struttura meccanica

Pila completa di PCB e spaziatori in un settore

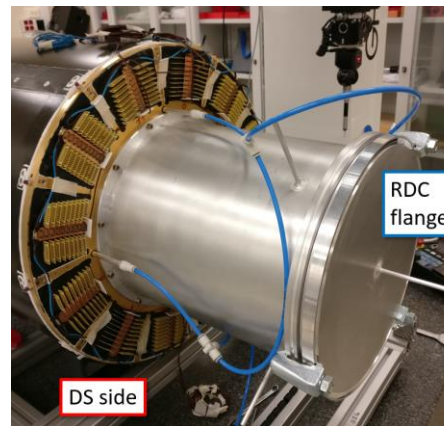


Code PCB catodici: massa

Code PCB anodici dove si connettono le schede di FE: HV + segnali

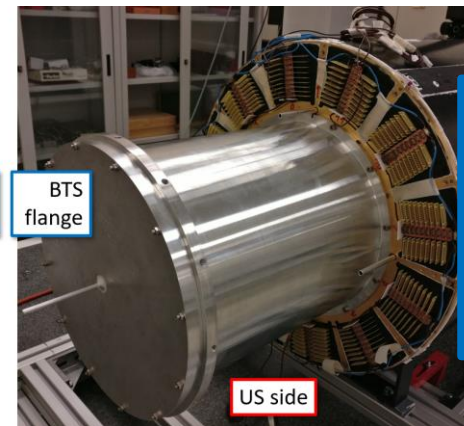
Foglio di Mylar alluminato con spessore di $20\ \mu\text{m}$ a raggio interno

- Separazione volume interno (fascio + bersaglio) riempito con Elio puro da volume CDCH (He:Isobutano 90:10)



RDC flange

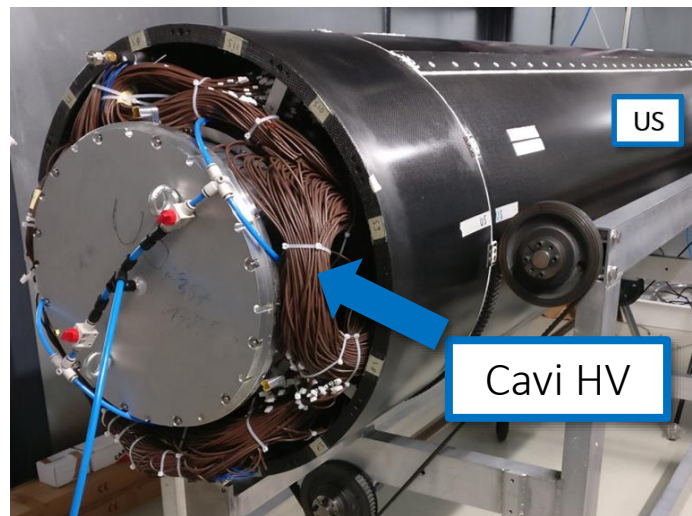
DS side



BTS flange

US side

Estensioni di Alluminio per connettere CDCH alla linea di fascio



US

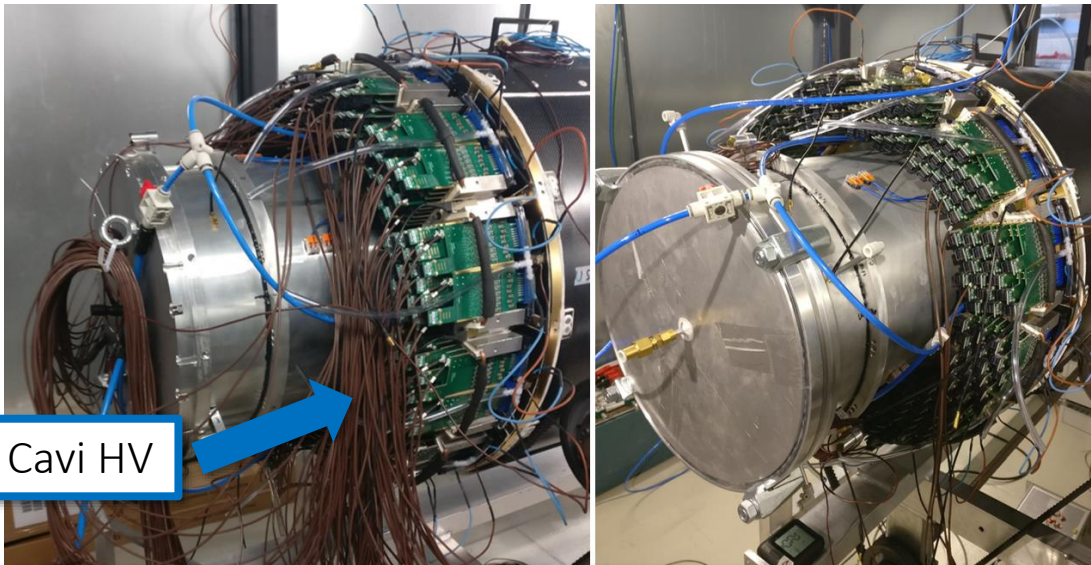
Cavi HV



DS

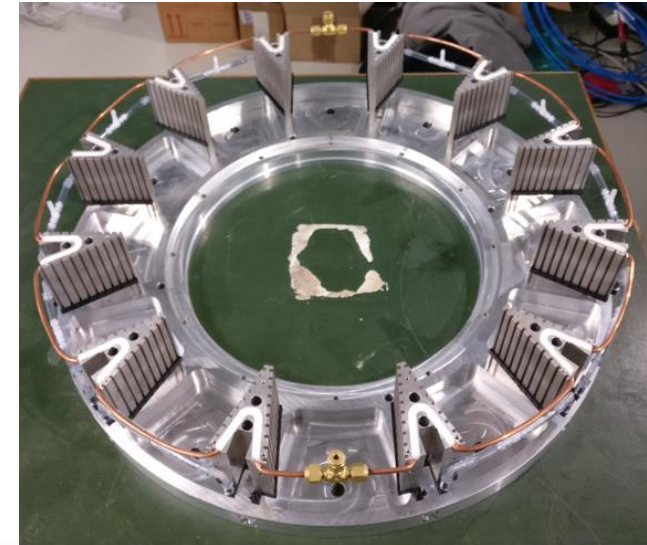
- Struttura esterna in **fibra di carbonio** con funzione strutturale + tenuta della miscela di gas
- La meccanica di CDCH si è rivelata stabile e adeguata a sostenere i run di presa dati di MEG II

Elettronica di lettura



Cavi HV

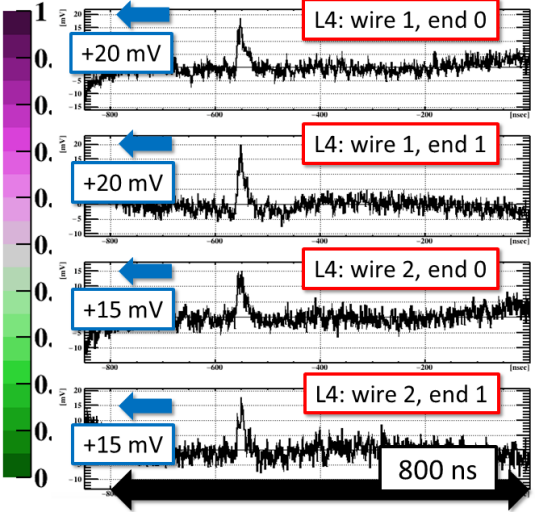
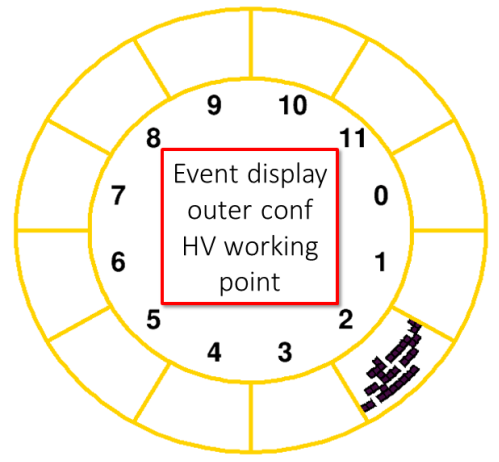
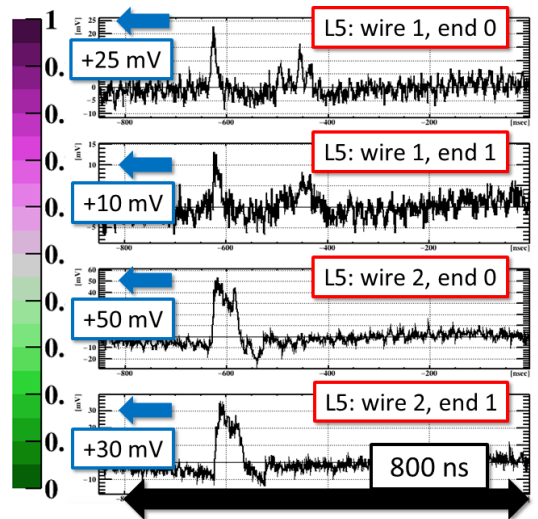
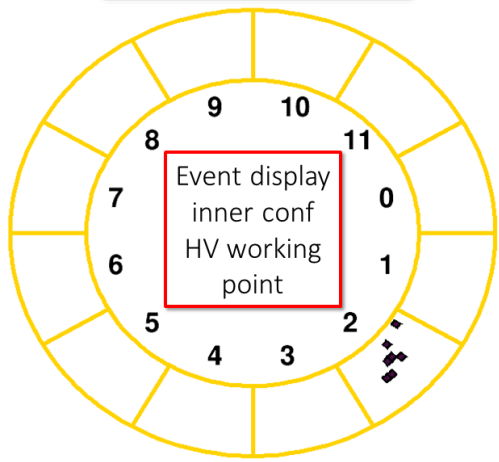
- 216 schede di FE per lato
 - 8 canali differenziali ciascuna per la lettura dei segnali da 8 celle
 - Doppio stadio di amplificazione a bassi rumore e distorsione
 - Grande banda passante vicino a 1 GHz
 - Per riuscire a distinguere i singoli cluster di ionizzazione e migliorare la misura della distanza di deriva (tecnica del cluster timing)
- Lettura dai due lati di CDCH e HV fornita dal lato US



- Sistema di raffreddamento dell'elettronica integrato nei supporti delle schede di FE
 - Consumo di corrente per ogni canale di 60 mA a 2.5 V
 - Potenza totale dissipata di circa 300 W/endplate
- Flusso di aria secca dentro gli endcap per evitare condensazione di acqua sull'elettronica di lettura e pericolosi gradienti di temperatura

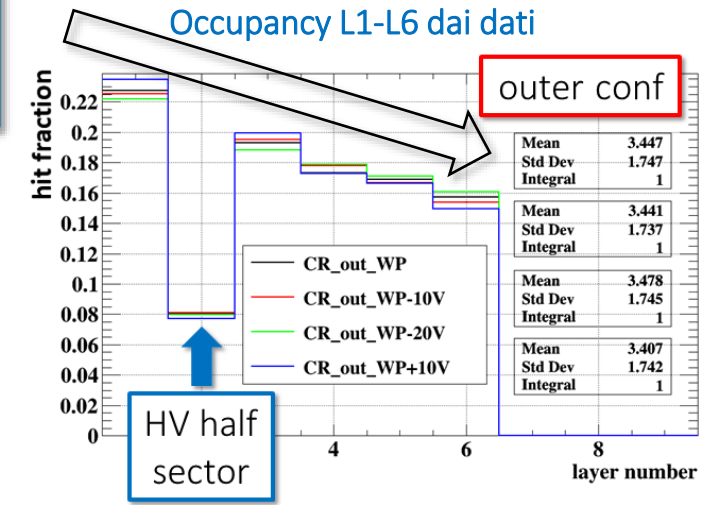
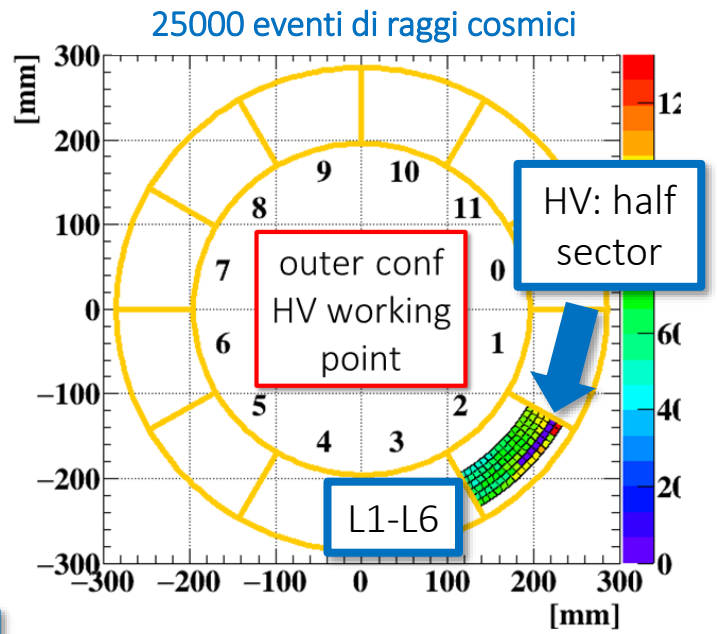
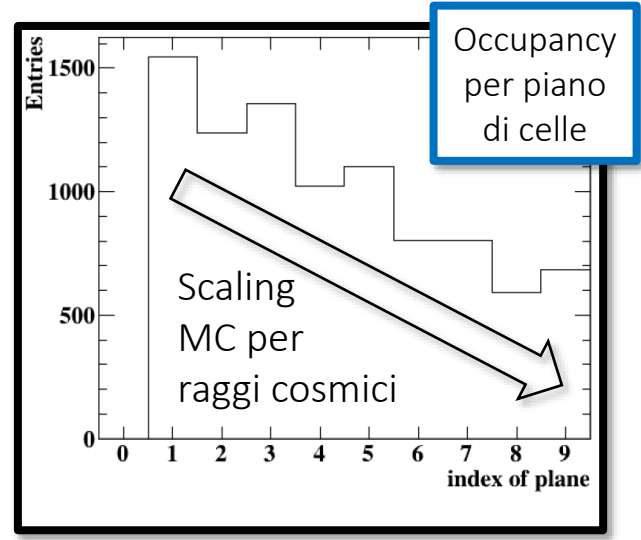
Primi dati raccolti

Raggi cosmici



Numero di canali di acquisizione limitato a 192 (6 piani di celle in un settore) per run 2018 e 2019

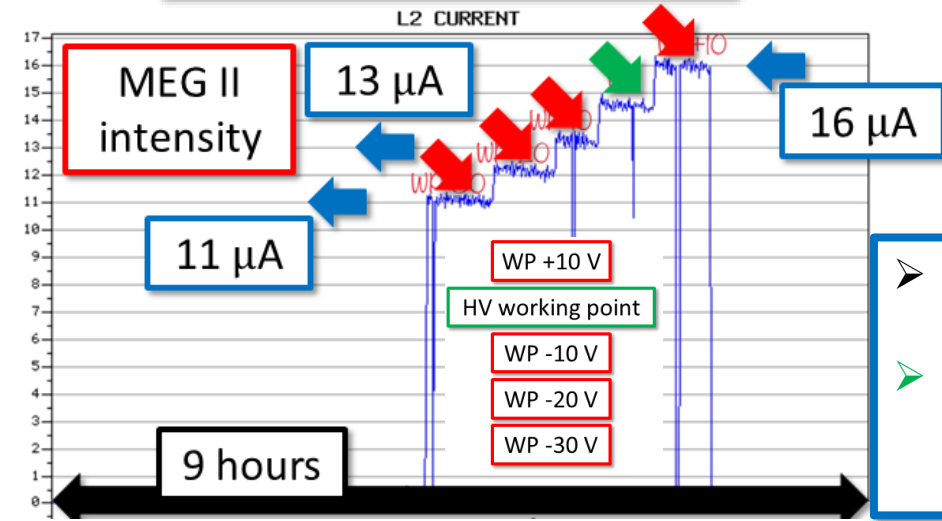
- Configurazione interna (L4-L9)
- Configurazione interna (L1-L6)



- Scaling del numero di hit dai piani esterni (L1) ai piani interni (L6) in accordo fra dati e MC
- Testate diverse configurazioni di HV intorno al punto di lavoro stimato da simulazioni dedicate sul guadagno del gas con la configurazione delle celle di CDCH

Primi studi di guadagno

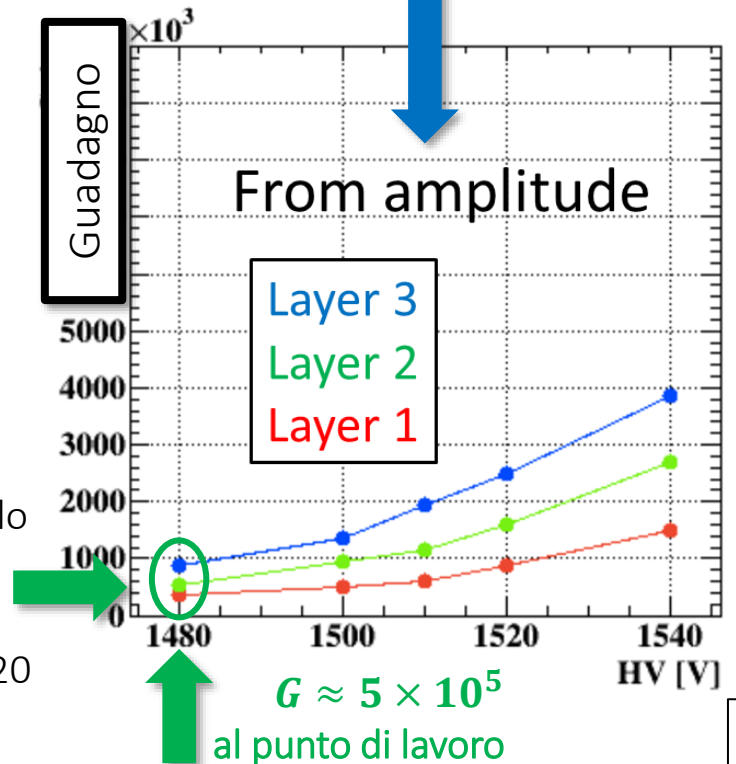
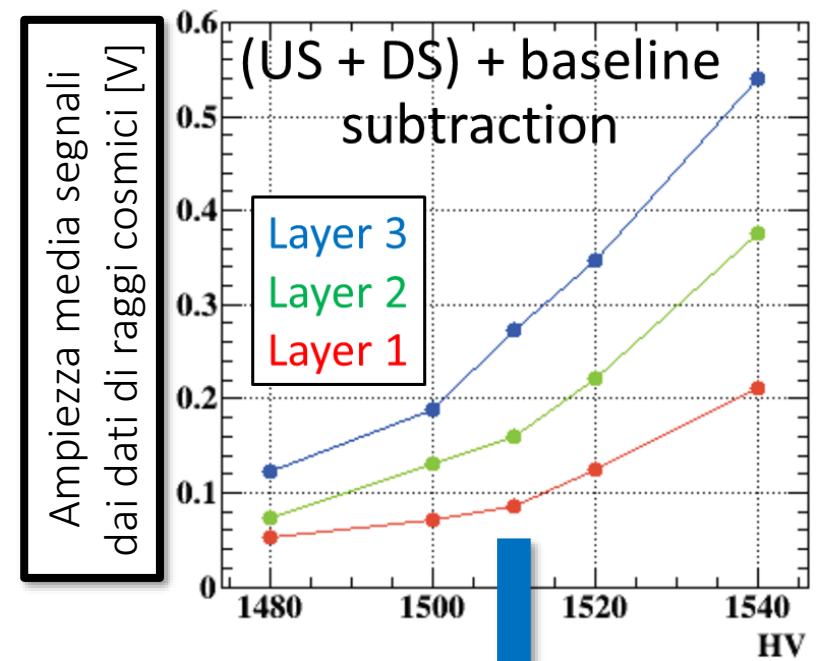
Corrente letta con fascio di μ^+ all'intensità finale di MEG II



➤ Esempio di curva di guadagno per il L2
 ➤ ~ andamento esponenziale nella corrente all'aumentare dell'HV come aspettato

Ampiezza media dei segnali convertita nel guadagno efficace del gas G

- Per mezzo di simulazioni dei cluster di ionizzazione e la risposta dello stadio di amplificazione dell'elettronica di FE
- Curve di guadagno calibrate in accordo con le simulazioni
 - Ulteriori studi più approfonditi durante il run di presa dati 2020

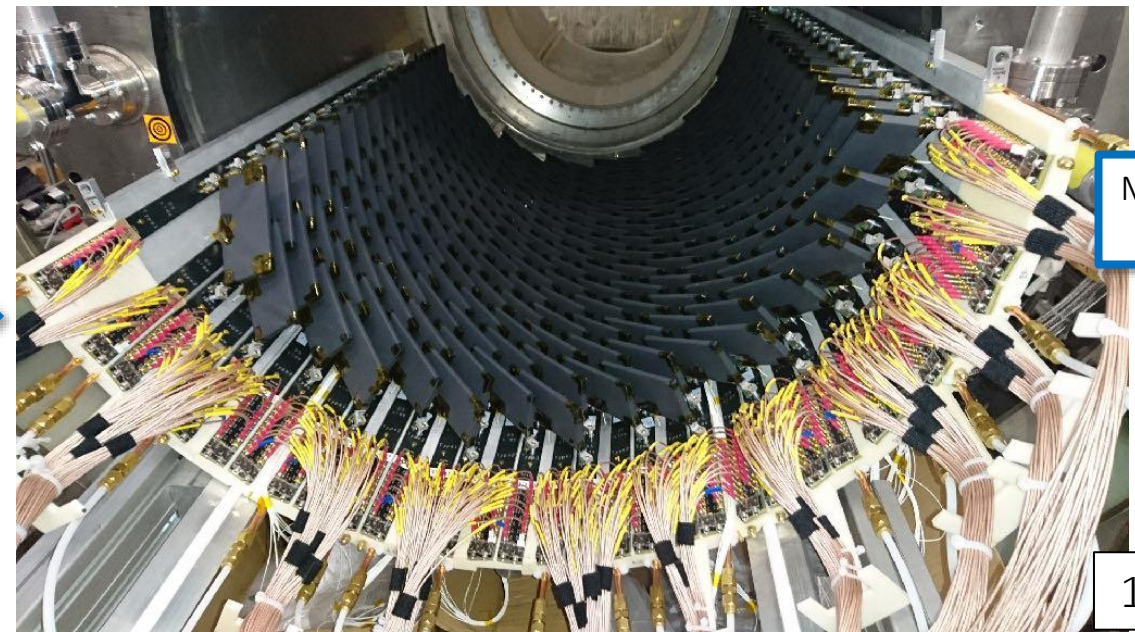


Il nuovo Timing Counter a pixel (pTC)

- Una misura molto precisa della coincidenza temporale $e^+\gamma$ è una delle chiavi di MEG II per sopprimere il fondo accidentale (dominante)
- Il nuovo pixelated TC (pTC) deve misurare il tempo di arrivo di e^+ da ≈ 50 MeV con una risoluzione temporale $\sigma_t \approx 30$ ps ad alto rate (qualche MHz)
- pTC basato su un design innovativo per superare le limitazioni del TC di MEG
 - Scintillatori plastici veloci
 - Buona σ_t del singolo contatore grazie alle piccole dimensioni
 - Pile-up sotto controllo
 - Grande segmentazione: 256×2 piastrelle al posto di 15×2 barre di scintillatore
 - Il tempo del e^+ è misurato da molti contatori per migliorare significativamente la risoluzione temporale finale
 - Flessibilità nella configurazione del rivelatore per massimizzare l'efficienza di rivelazione e la molteplicità di hit



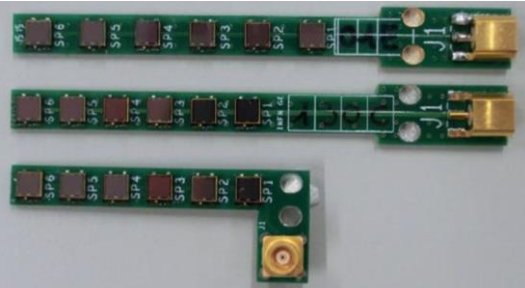
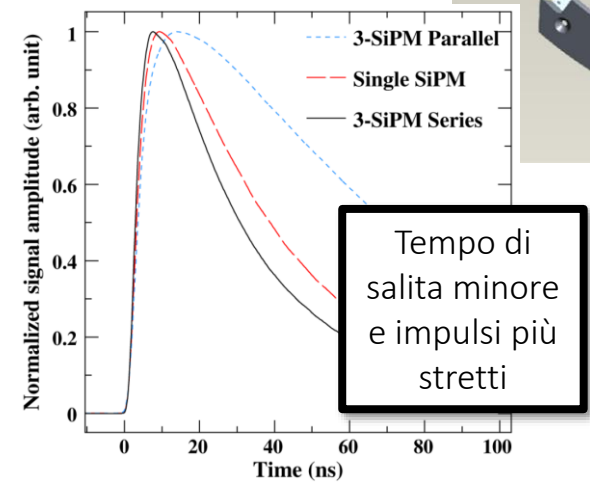
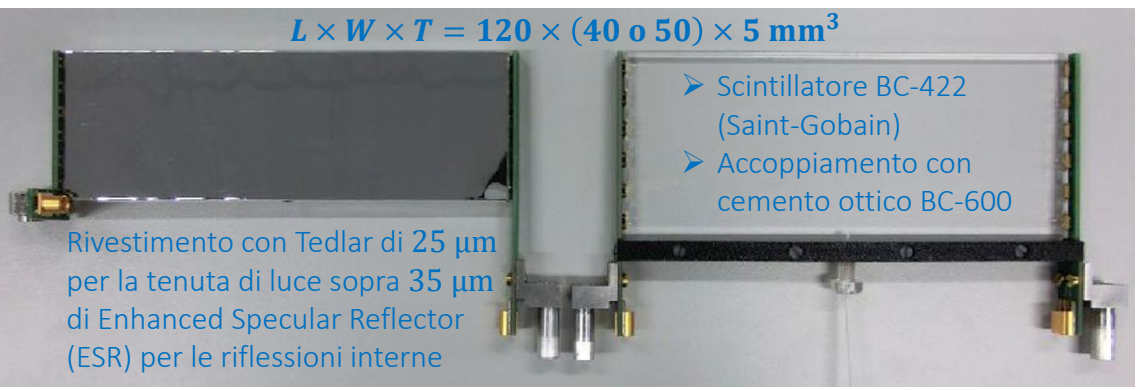
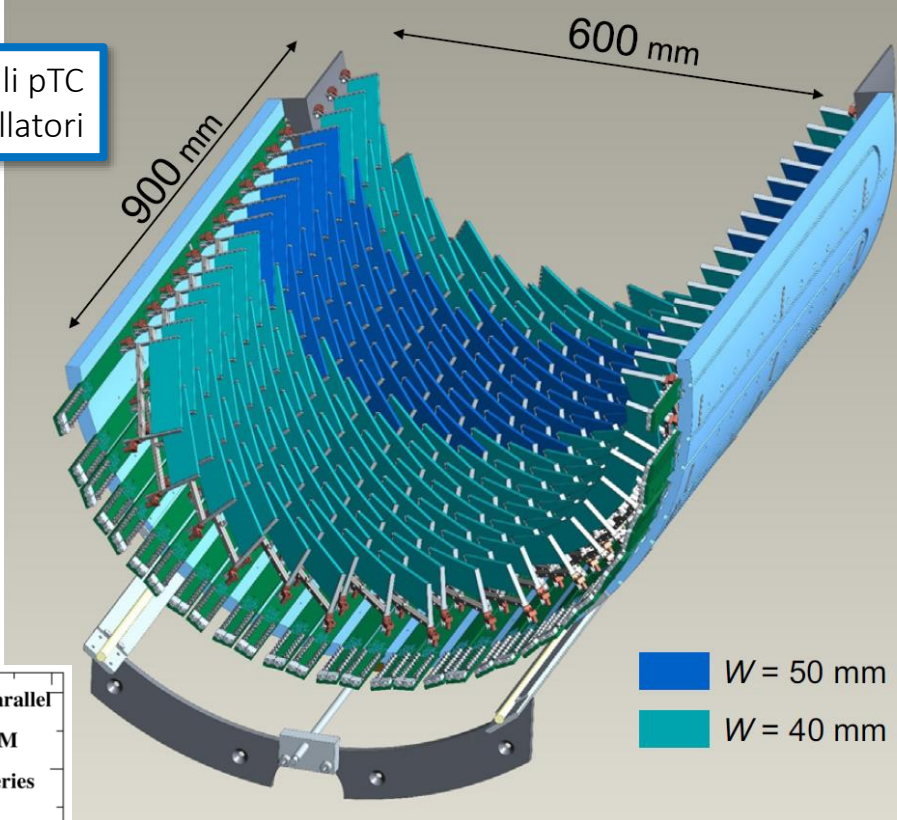
Letture con Photo-Multipliers (PMT)



Design

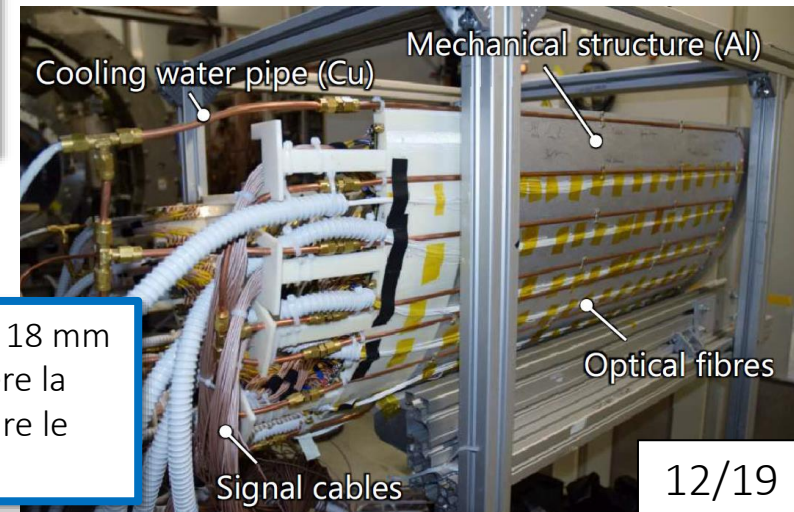
- 2 moduli semi-cilindrici posti US e DS rispetto al bersaglio in aria nello spazio fra la camera e il magnete COBRA
 - Copertura angolare completa per il e^+ quando il γ punta al LXe
 - $23 < |z| < 116.7 \text{ cm}$, $-165.8^\circ < \phi < +5.2^\circ$
- 256 contatori per modulo: 16 ogni 5.5 cm in z and 16 ogni 10.3° in ϕ
 - Girati di 45° per essere \approx perpendicolari alle traiettorie dei e^+
- Ciascun contatore è uno scintillatore ultra-veloce letto da Silicon Photo-Multiplier (SiPM)

Uno dei 2 moduli pTC con 256 scintillatori



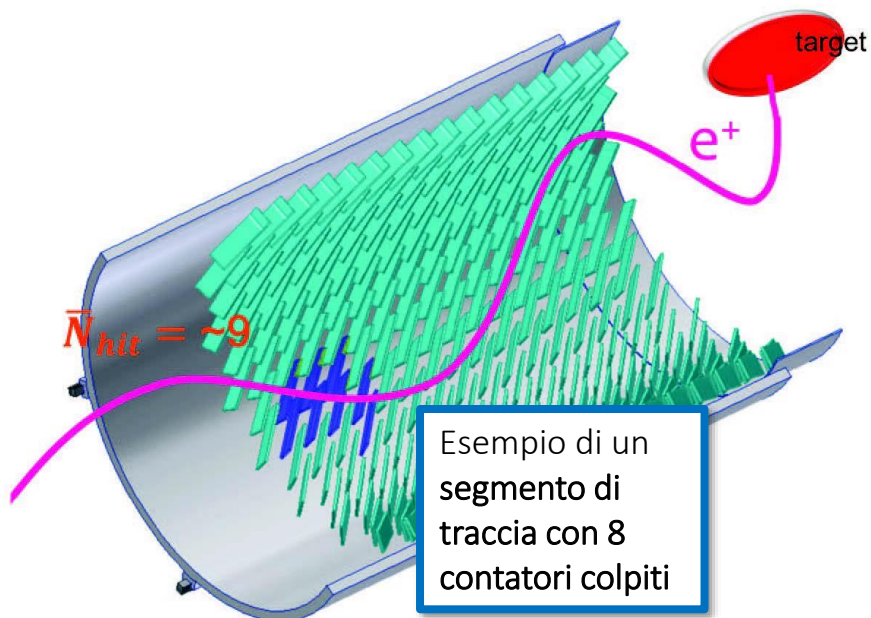
PCB con 6 SiPM (ASD) per lato connessi in serie
 ➤ Diminuzione capacità totale del sensore

- Struttura meccanica di Alluminio spessa 18 mm
- Sistema di raffreddamento per mantenere la temperatura inferiore a 20°C e ottimizzare le prestazioni dei SiPM



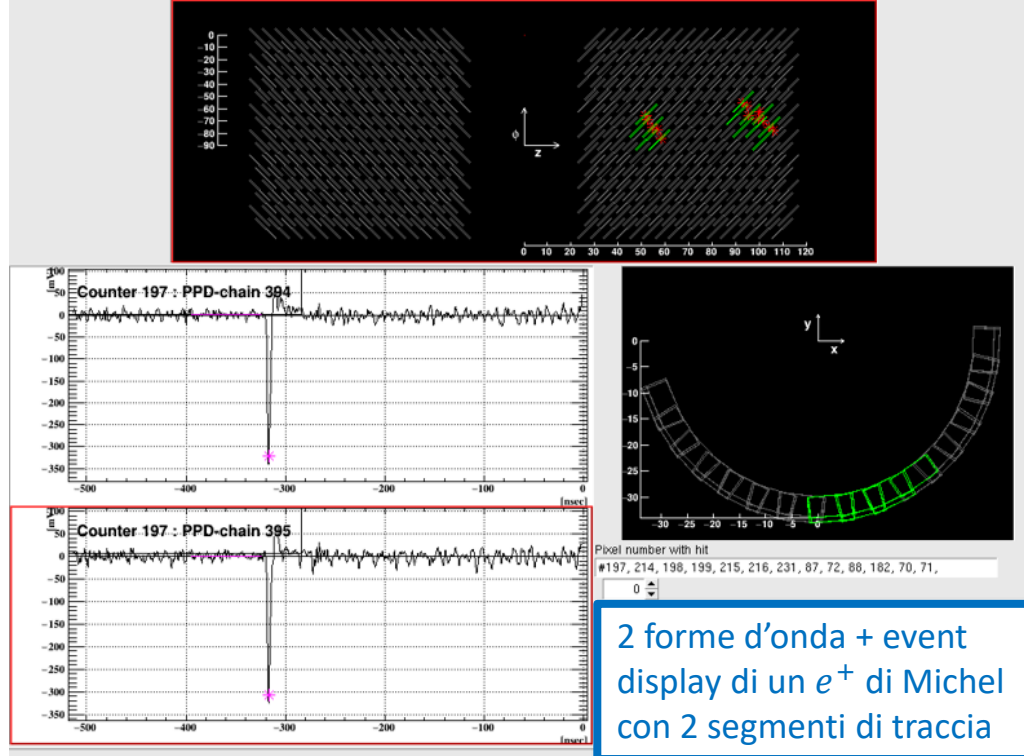
Prestazioni

- Run di presa dati con e^+ di Michel sono stati effettuati a partire dal 2015
 - Moduli completi dal run 2017
 - Testati entrambi i moduli (US + DS) inseriti dentro COBRA
- Misura della risoluzione temporale con la configurazione finale di fascio di μ^+ di MEG II
 - Singolo contatore: $\sigma_t^{SINGLE} \approx 93 \text{ ps}$
 - Numero medio di contatori colpiti: $\overline{N_{HIT}} \approx 9 \rightarrow \sigma_t(\overline{N_{HIT}}) \approx 31 \text{ ps}$
- I dati hanno dimostrato che il pTC può raggiungere le prestazioni richieste da MEG II
 - Miglioramento σ_t di un fattore $\times 2$ rispetto al TC di MEG ($\sigma_t^{MEG} \approx 70 \text{ ps}$)

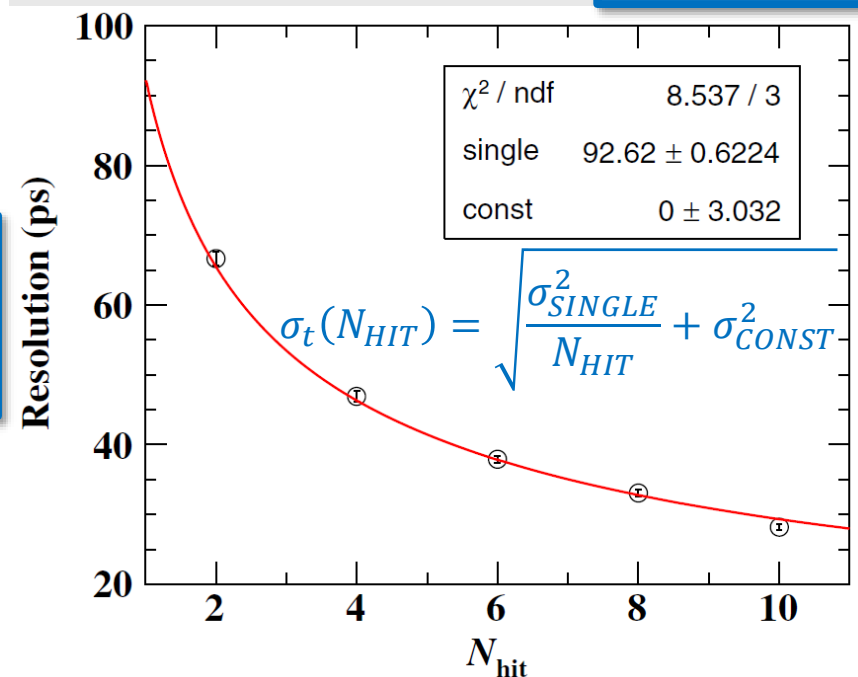


Esempio di un segmento di traccia con 8 contatori colpiti

Dati sperimentali
risoluzione temporale
in funzione del numero
di contatori colpiti

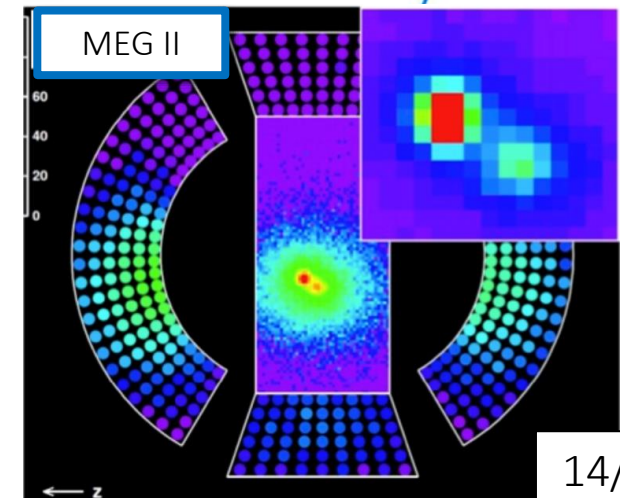
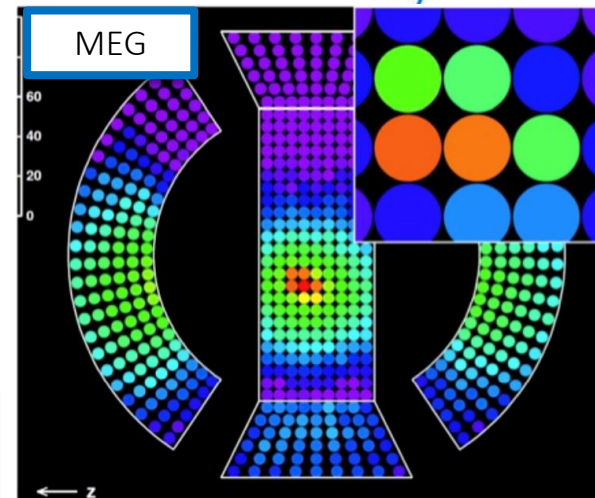
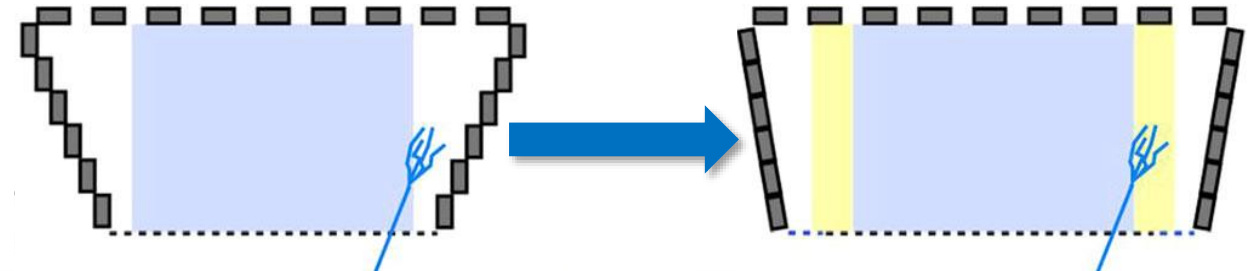
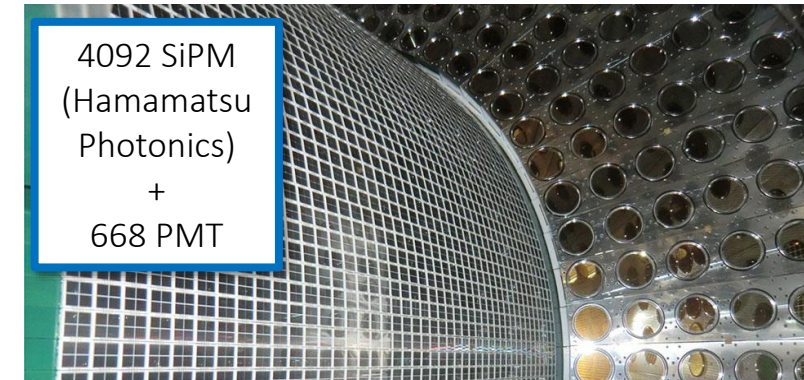
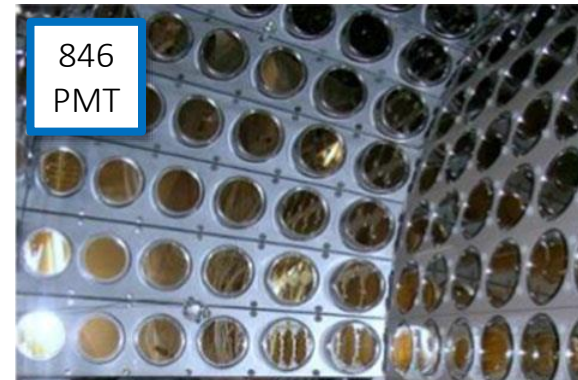


2 forme d'onda + event display di un e^+ di Michel con 2 segmenti di traccia



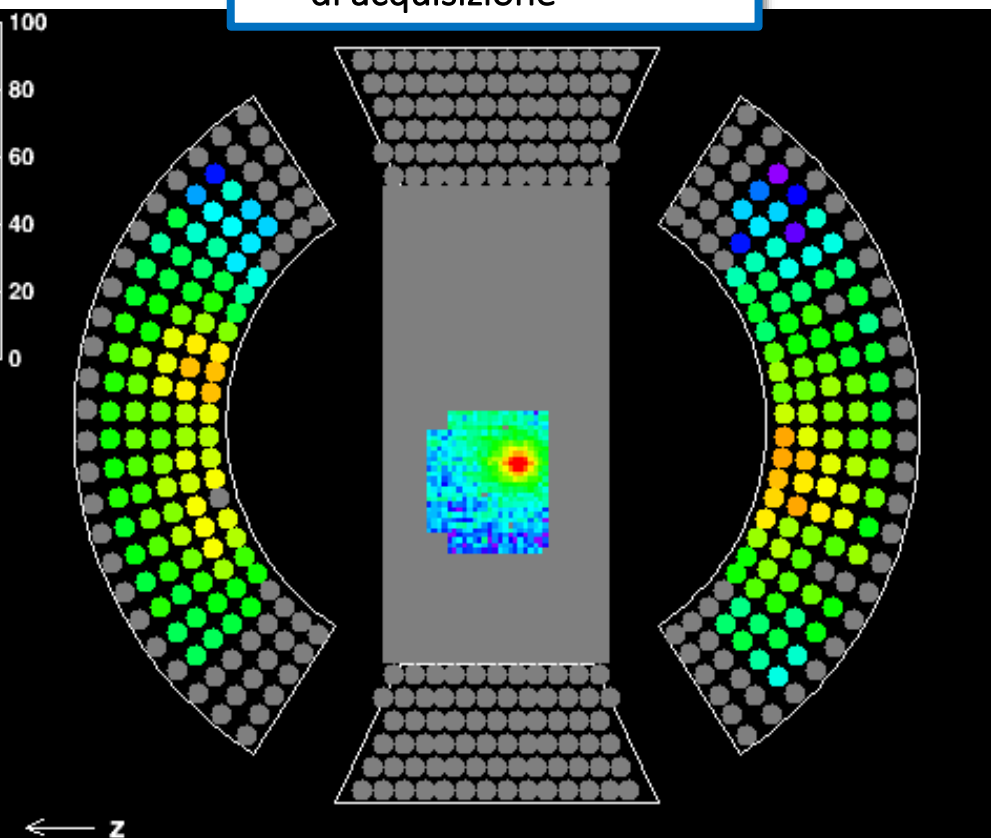
Il rinnovato rivelatore a Xenon liquido (LXe)

- Con 900 litri il LXe di MEG è il più grande rivelatore a Xenon liquido al mondo
- Il LXe aggiornato ha il compito di **misurare l'energia, il tempo e la posizione dei γ** con un miglioramento delle risoluzioni di un fattore $\times 2$ rispetto a MEG per sopprimere gli eventi di fondo in MEG II
- Chiavi dell'ammodernamento
 - Sostituzione di 216 PMT da 2" nella faccia di ingresso dei γ incidenti con 4092 SiPM con area attiva di $12 \times 12 \text{ mm}^2$
 - Risoluzioni spaziale ($\sim \text{mm}$) e in energia ($\sim 1\%$) migliorata grazie all'uniformità nella raccolta della luce
 - Meno materiale incontrato dai γ : efficienza di rivelazione più alta del 9%
 - Accettazione migliorata in z del 10% per lato grazie alla nuova disposizione dei PMT nelle facce laterali
- Il criostato rimane quello di MEG

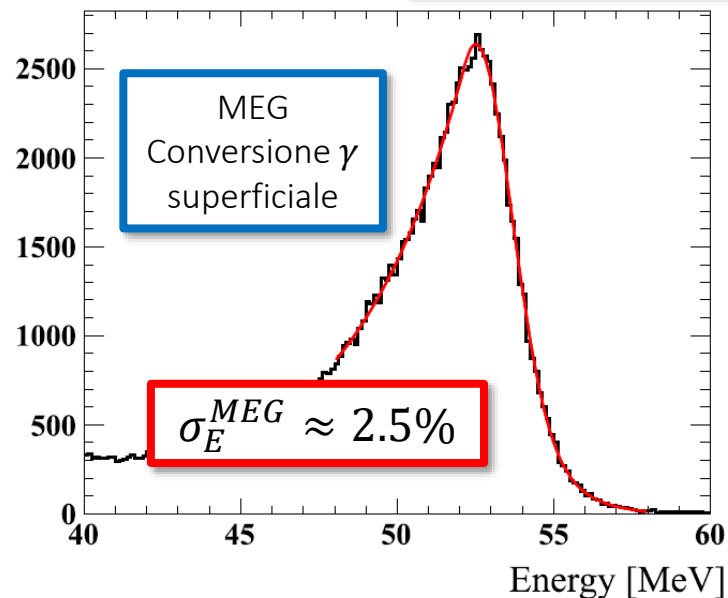


Prestazioni

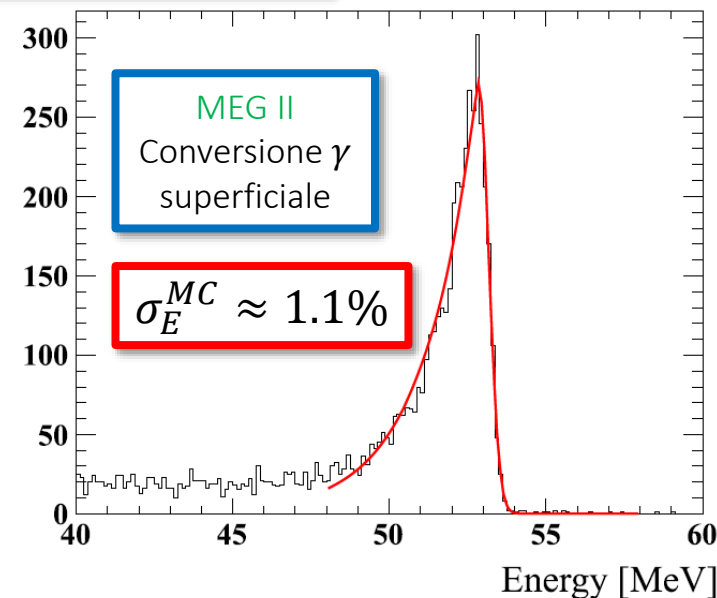
- Evento di Michel dai dati raccolti con fascio di μ^+
- Numero limitato di canali di acquisizione



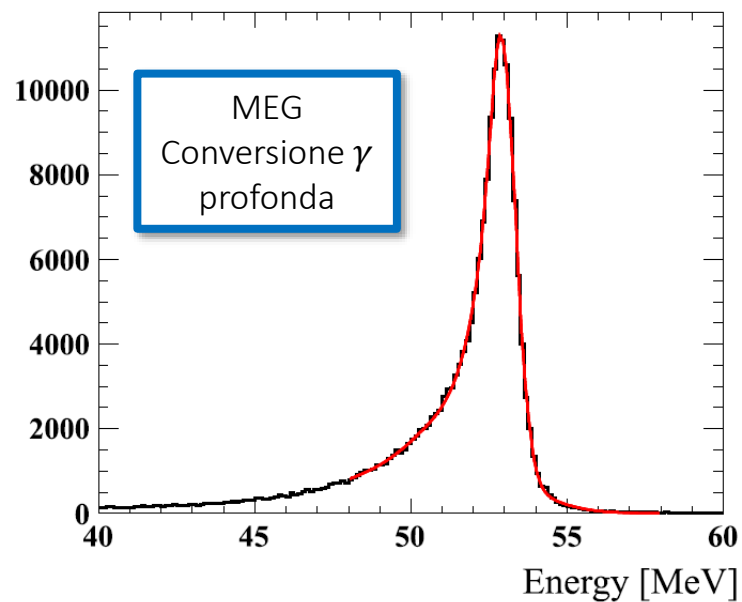
Studio MC sulla risoluzione in energia



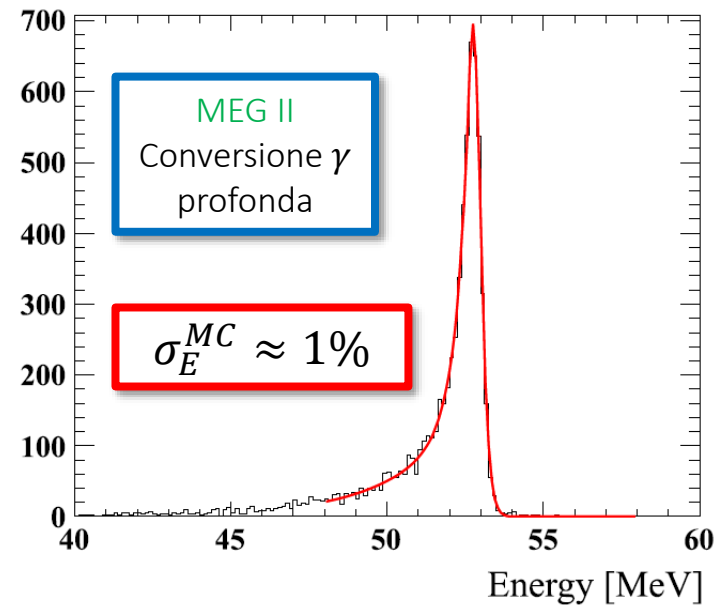
(a) MEG ($w < 2$ cm)



(b) MEG II ($w < 2$ cm)

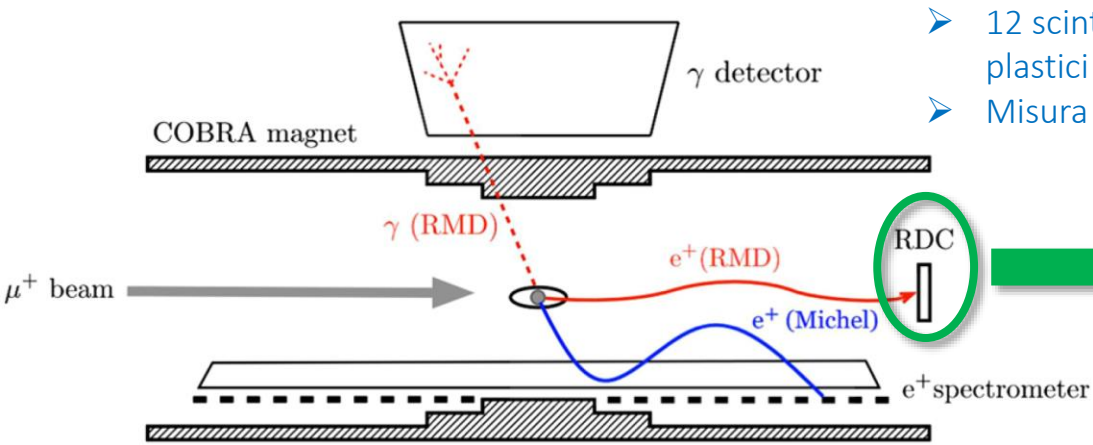


(c) MEG ($w \geq 2$ cm)

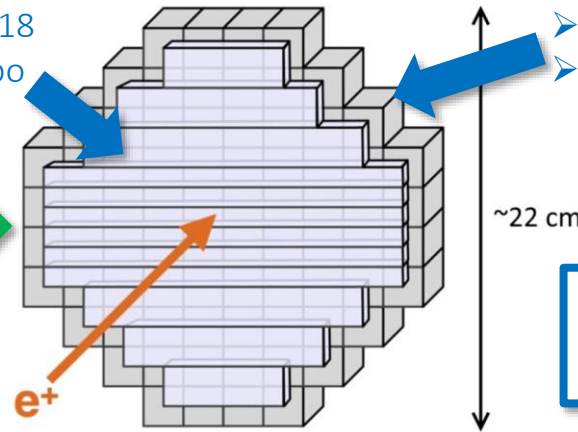


(d) MEG II ($w \geq 2$ cm)

Il Radiative Decay Counter (RDC)

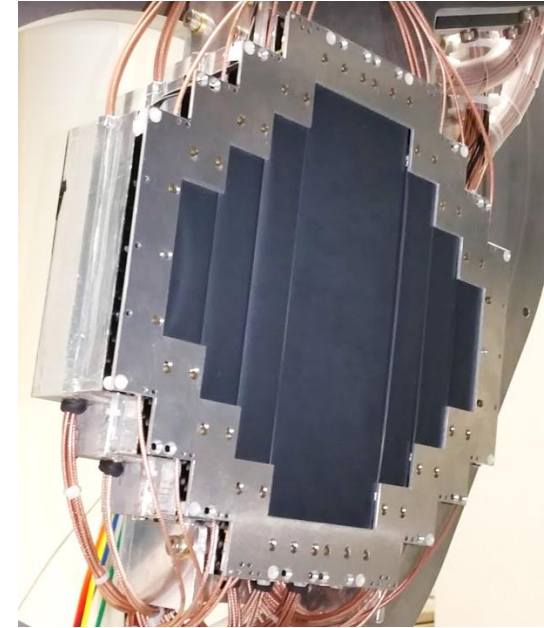


- 12 scintillatori plastici BC-418
- Misura tempo

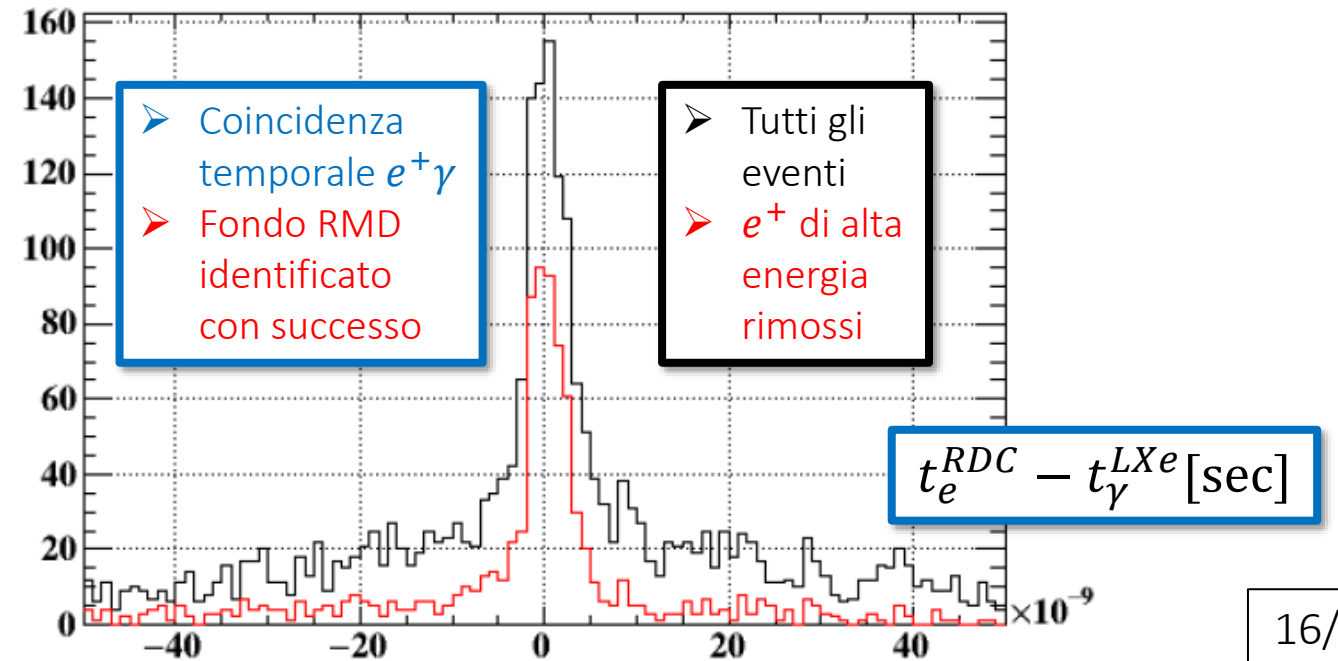


- 76 cristalli LYSO
- Misura energia

Lettura con SiPM

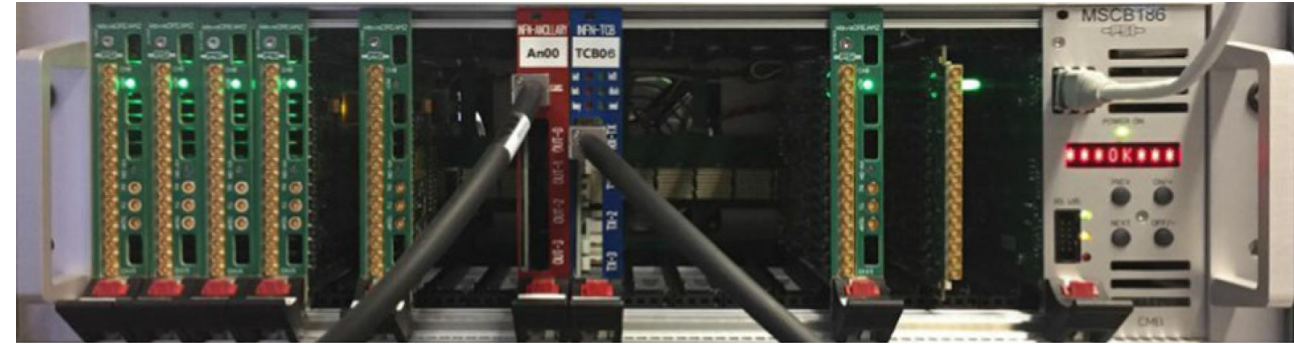


- Rivelatore di VETO aggiuntivo per identificare e^+ di bassa energia (1-5 MeV) in coincidenza temporale con γ di alta energia (> 48 MeV) da RMD o AIF in modo da **escludere tali eventi dal campione di candidati $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$**
- Prestazioni attese: $\sigma_t \approx 100$ ps, $\sigma_E \approx 8\%$
- Riduzione del fondo e miglioramento nella sensibilità di MEG II fino al 15%



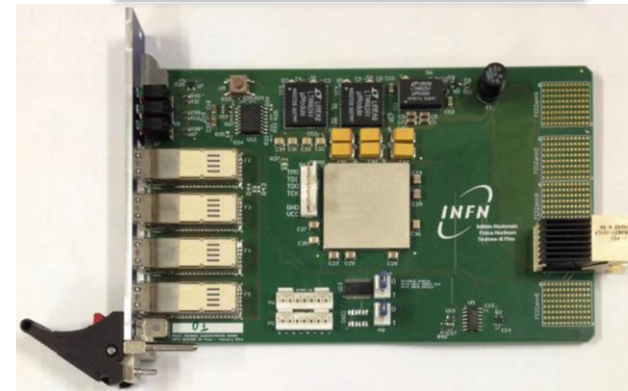
Trigger e DAQ (TDAQ)

- La riprogettazione dei rivelatori per MEG II ha portato ad un incremento di quasi un fattore $\times 3$ nel numero dei canali di lettura
 - ~ 9000 in totale
- Integrazione delle funzionalità di Trigger e Acquisizione dati in un unico sistema: **WaveDAQ**
 - 37 crate nel sistema finale
 - Ciascuno può alloggiare 16 WDB: 256 canali
 - + 1 TCB per il **processamento dati online** + distribuzione del clock e del segnale di trigger
 - + 1 **Data Concentrator Board (DCB)** per la **gestione/formattazione dati**
- **Necessità di acquisire l'intera forma d'onda** (come in MEG) per la soppressione del fondo offline
 - Campionamento a $1 \div 2$ GSPS
 - Digitalizzazione con ADC a 80 MHz per l'esecuzione dei complessi algoritmi di trigger all'interno della FPGA integrata
 - **Stima energia γ (E_γ) + coincidenza temporale $e^+ \gamma$ ($t_{e\gamma}$)**
 - Risoluzioni online
 - $\Delta E_\gamma \approx 1.5\%$ (miglioramento > fattore $\times 2$)
 - $\Delta t_{e\gamma} < 1$ ns (miglioramento > fattore $\times 3$)
 - **Rate di trigger finale 10 Hz** con efficienza di selezione ~ 1
- **Produzione TCB completata**
- **Produzione di massa finale WDB attesa da fine 2020/prima metà 2021**
 - DCB a seguire



Trigger Concentrator Board
(TCB)

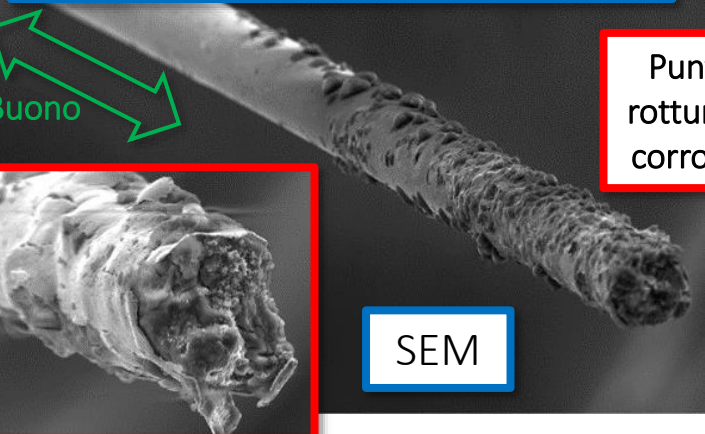
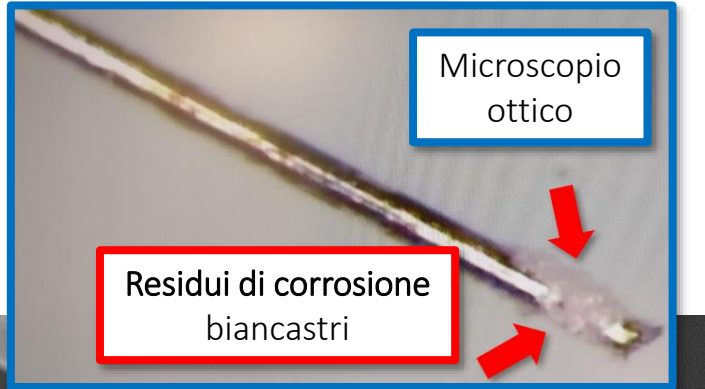
WaveDREAM Board
(WDB)



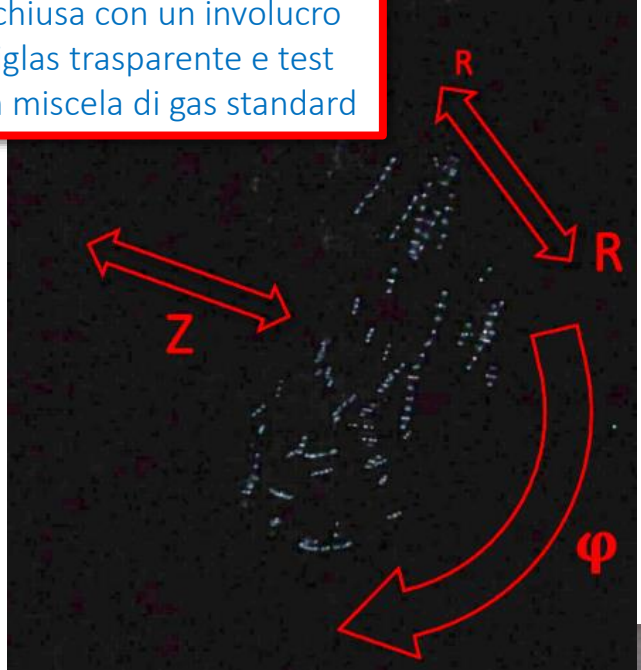
Scheda WaveDREAM (WDB)

- **16 canali con guadagno variabile (0.5 \div 100)**, stadio di **shaping programmabile** e alimentazione per i SiPM
- **Comparatori** per le misure temporali
- **Campionamento analogico forme d'onda a 1 \div 5 GSPS** con chip dedicato (**DRS4** = Domino Ring Sampler 4)

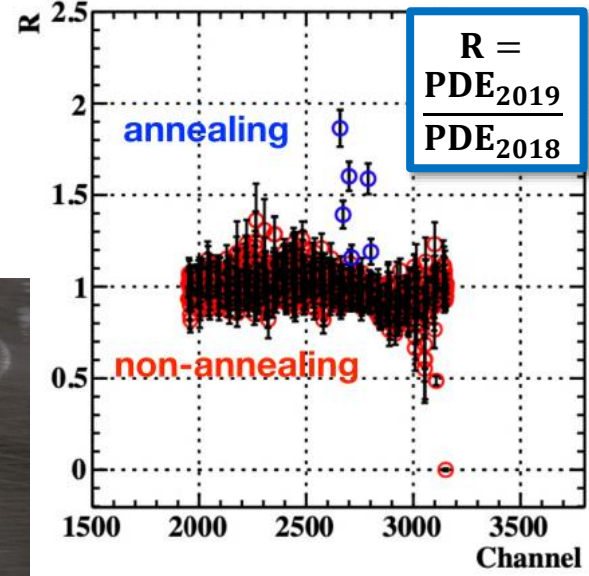
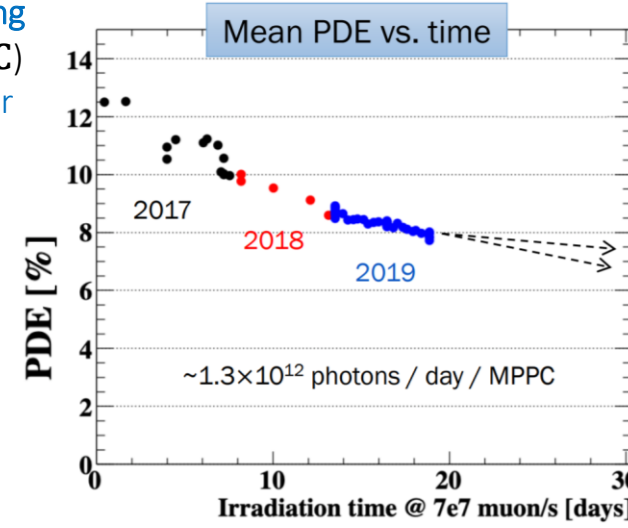
Difficoltà lungo la strada



- Una delle regioni di scarica fotografata al buo
- CDCH chiusa con un involucro di plexiglas trasparente e test HV con miscela di gas standard



- Nel rivelatore LXe è stato osservato che l'efficienza di rivelazione dei fotoni (Photon Detection Efficiency - PDE) si riduce con un fattore ~0.08% per 1 ora di fascio
- Probabile causa il danneggiamento superficiale dei SiPM dai γ VUV
- Una procedura di annealing (riscaldamento 45 ÷ 70°C) sembra essere efficace per ripristinare la PDE

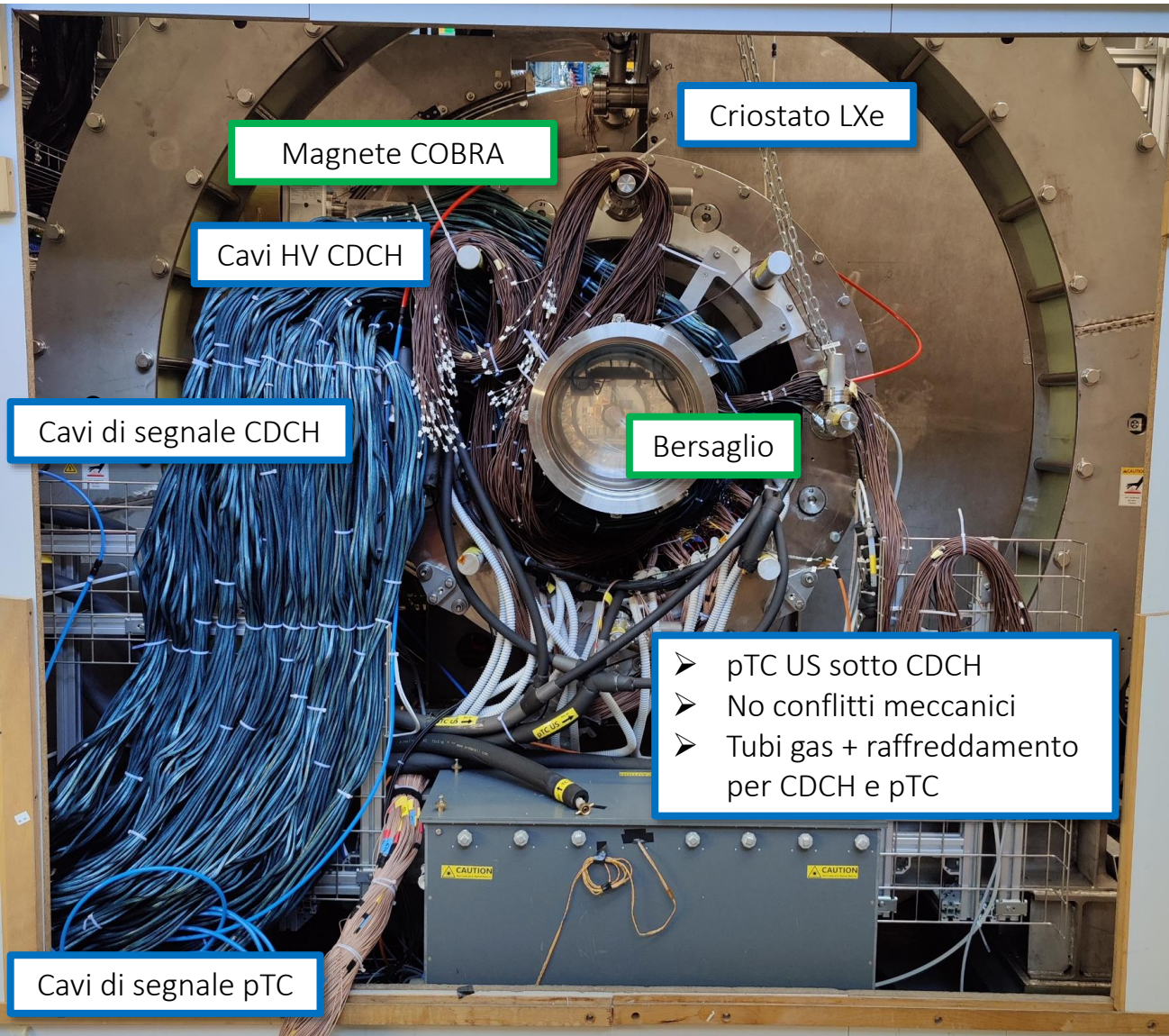


- Rottura fili di Alluminio in presenza di umidità: 40 ÷ 65%
- Rimossi con successo tutti i fili rotti ed eliminato potenziali altri fili danneggiati extra allungando CDCH per poi ritornare alla lunghezza di lavoro
- Mantenendo CDCH in atmosfera completamente secca (flusso di Azoto o Elio) non abbiamo avuto rotture dovute alla corrosione da più di 2 anni

- Correnti anomale sono state osservate durante la presa dati
- Indagini hanno evidenziato delle regioni con scariche a corona in corrispondenza di depositi biancastri sui fili
- Ulteriori indagini sono in corso per capirne l'origine



Conclusioni e stato attuale



- L'esperimento MEG II ha completato la fase di costruzione e aggiornamento dei rivelatori e si trova attualmente nella fase di commissioning al PSI
- Difficoltà e sfide si sono presentate lungo la strada
 - Alcune sono state risolte e altre nuove sono sotto investigazione
- L'integrazione di tutti i rivelatori di MEG II è stata testata durante i run ingegneristici 2018 e 2019
 - Primi test pTC nel 2015
 - Primi test LXe nel 2017
 - Integrazione CDCH dal 2018
 - pTC e RDC pronti per i run di fisica
 - CDCH e LXe ancora in fase di commissioning
- Oggi i rivelatori sono in fase di preparazione al run ingegneristico 2020 di Ottobre-Novembre e le operazioni stanno andando avanti nei tempi previsti
 - Verifica stabilità CDCH
 - Misure della risoluzione del LXe da eventi di calibrazione con fascio di π^- (scambio carica): $\pi^-p \rightarrow \pi^0n$ con $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
 - Ultimo anno con un numero di canali di acquisizione limitato
- Primo run di fisica atteso nel 2021

**GRAZIE PER
L'ATTENZIONE**