

La misura di precisione del $g-2$ del muone

19° Incontri di Fisica delle Alte
Energie (IFAE2023)
Catania | 12-14 Aprile 2023

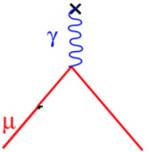
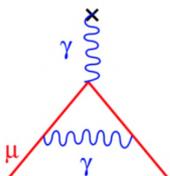
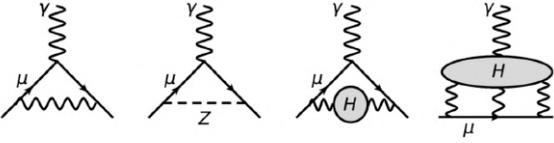
Paolo Girotti (INFN Pisa)
per conto della collaborazione Muon $g-2$

Il g-2 del muone

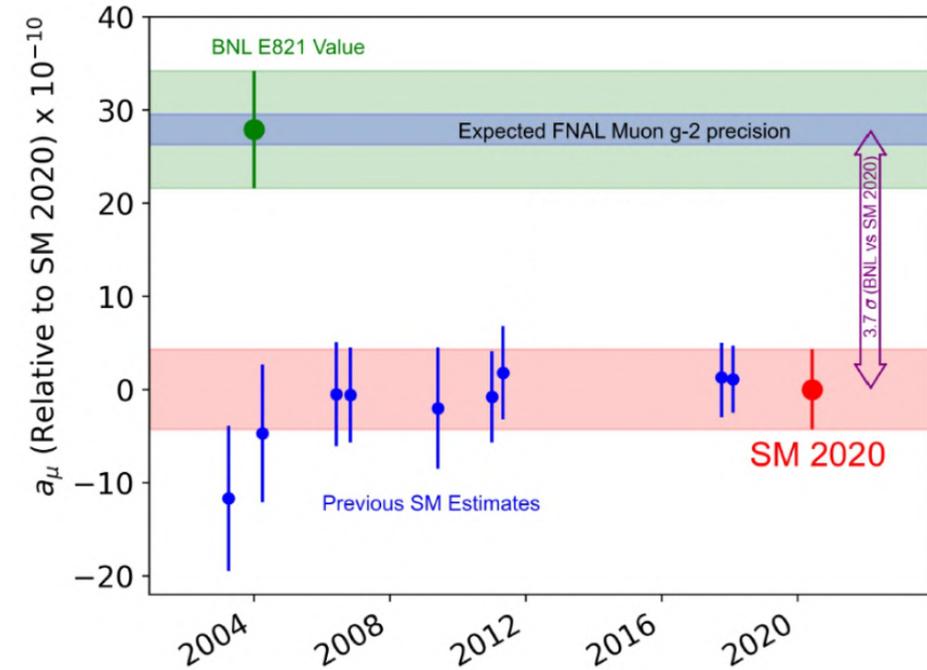
$$\vec{\mu} = g \frac{q}{2m} \vec{S}$$

Anomalia magnetica

$$a_\mu \equiv \frac{g - 2}{2}$$

- Il fattore adimensionale g codifica tutte le possibili interazioni virtuali tra il muone e il campo magnetico
- Livello albero: $g=2$ ($a_\mu=0$) \longrightarrow 
- Primo contributo QED: $a_\mu=0.00116$ \longrightarrow 
- Tutta la fisica: $a_\mu=0.00116592061(41)$ [0.35 ppm] \longrightarrow 
- Una discrepanza tra la misura sperimentale e la previsione teorica potrebbe essere un segno della presenza di interazioni BSM

Motivazione



- a_μ misurato presso Brookhaven National Lab (BNL E821, 2006)
- a_μ (Exp) = 0.00116592089 ± 63 (540 ppb)
- a_μ (Th) = 0.00116591810 ± 43 (368 ppb)
- Discrepanza di **3.7σ**
- Obiettivo dell'esperimento Muon g-2 presso **Fermilab**: ridurre l'errore sperimentale di un fattore **4** fino alla precisione finale di 140 ppb



Come misurare g-2

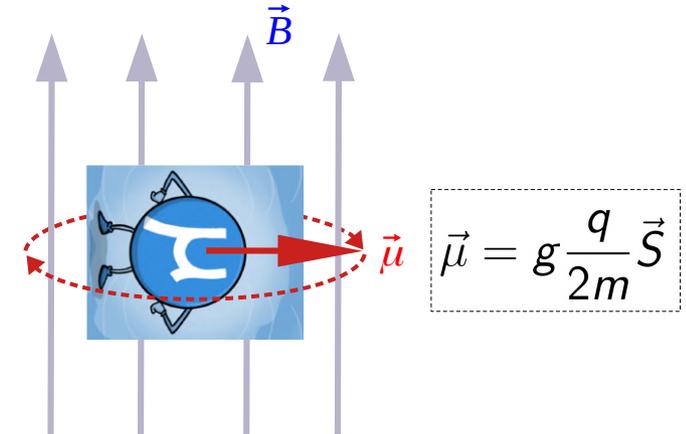
Frequenza di precessione dello spin

$$\vec{\omega}_s = -\frac{ge\vec{B}}{2m} - (1 - \gamma)\frac{e\vec{B}}{m\gamma}$$

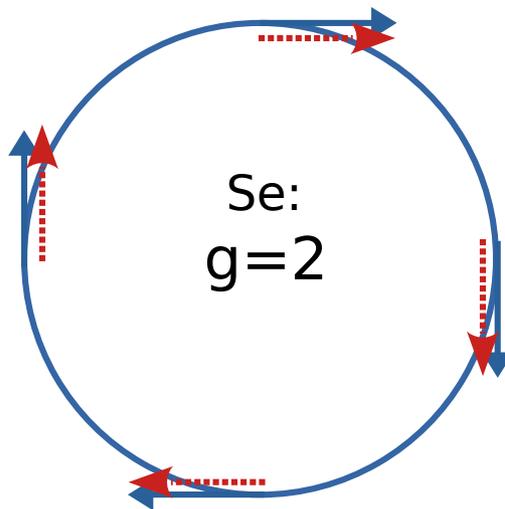
Frequenza di ciclotrone

$$\vec{\omega}_c = -\frac{e\vec{B}}{m\gamma}$$

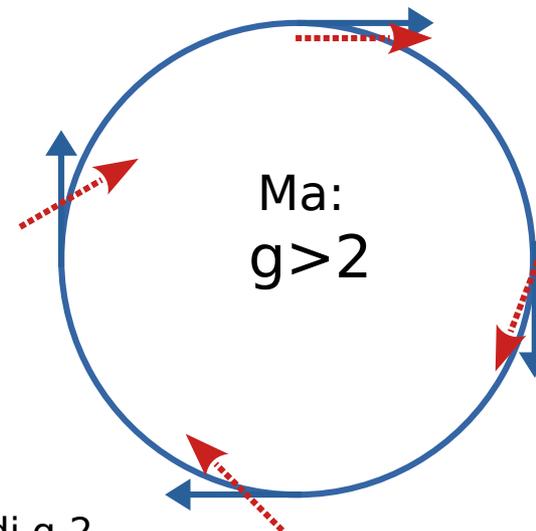
$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c = -\left(\frac{g-2}{2}\right)\frac{e\vec{B}}{m} \equiv -a_\mu \frac{e\vec{B}}{m}$$



Le interazioni virtuali del muone con il vuoto si manifestano in una differenza tra la frequenza di precessione dello spin e la frequenza di ciclotrone



Momento Spin



Come misurare g-2

$$\vec{\omega}_a = a_\mu \frac{e\vec{B}}{m} \longrightarrow a_\mu = \frac{\omega_a}{\tilde{\omega}'_p(T_r)} \frac{\mu'_p(T_r) m_\mu g_e}{\mu_e m_e 2}$$

Costanti conosciute con sufficiente precisione da altri esperimenti (25 ppb)

Come misurare g-2

$$\vec{\omega}_a = a_\mu \frac{e\vec{B}}{m} \longrightarrow a_\mu = \frac{\omega_a}{\tilde{\omega}'_p(T_r)} \frac{\mu'_p(T_r) m_\mu g_e}{\mu_e m_e 2}$$

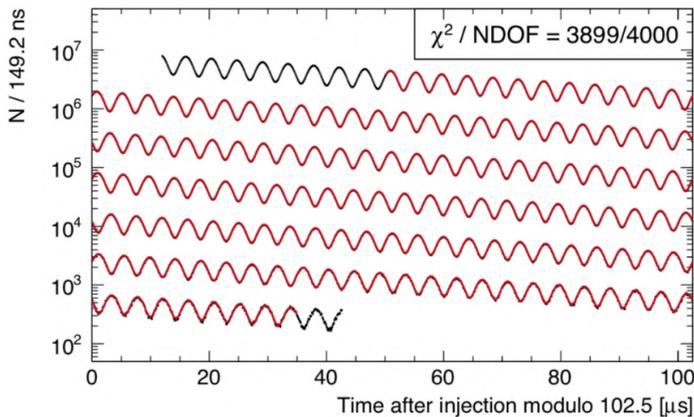
Costanti conosciute con sufficiente precisione da altri esperimenti (25 ppb)

$$a_\mu \propto \frac{f_{clock} \omega_a^m (1 + C_e + C_p + C_{ml} + C_{pa})}{f_{calib} \langle \omega'_p(x, y, \phi) \times M(x, y, \phi) \rangle (1 + B_k + B_q)}$$

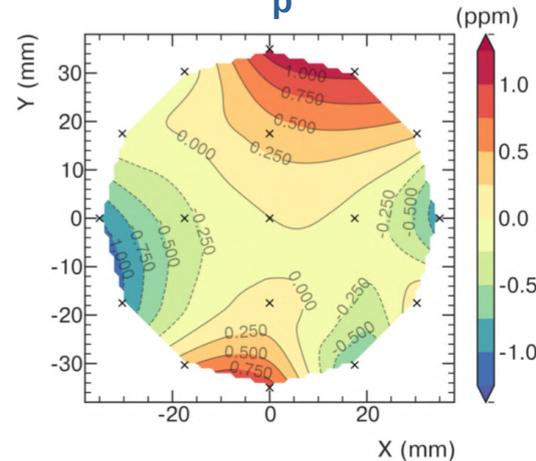
Tre misure chiave:

- ω_a : Frequenza di precessione anomala del muone
- ω_p : Frequenza di precessione di Larmor dei protoni (misura di B)
- ρ_r : Distribuzione del fascio

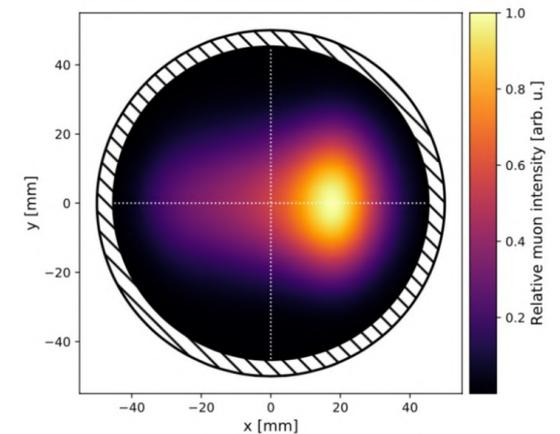
ω_a



ω_p

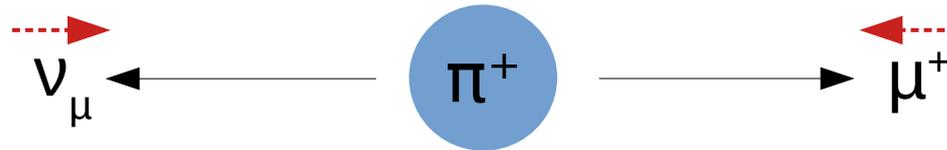


$\rho(r)$

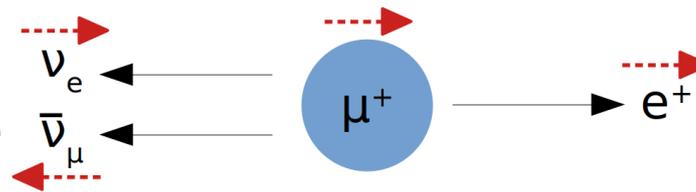


Due regali dalla natura

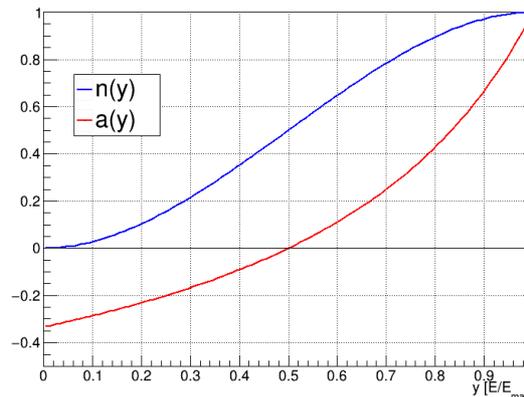
- Il pione ha spin 0 e decade in un muone e un neutrino ($\sim 99.99\%$)
- La violazione di parità del decadimento debole impone che il neutrino abbia elicità sinistrorsa
- Fascio accelerato \rightarrow i muoni ad alto momento sono **fortemente polarizzati**



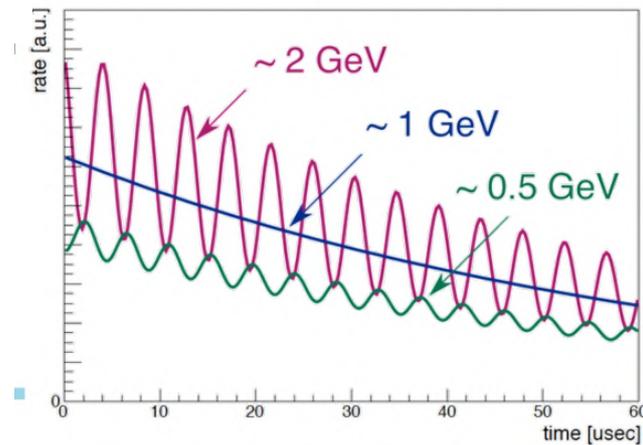
- Violazione di parità \rightarrow positroni ad alta energia sono emessi preferibilmente nella direzione dello spin del muone



- **Asimmetria** osservata nel laboratorio come un'oscillazione del numero di positroni osservati in funzione del tempo



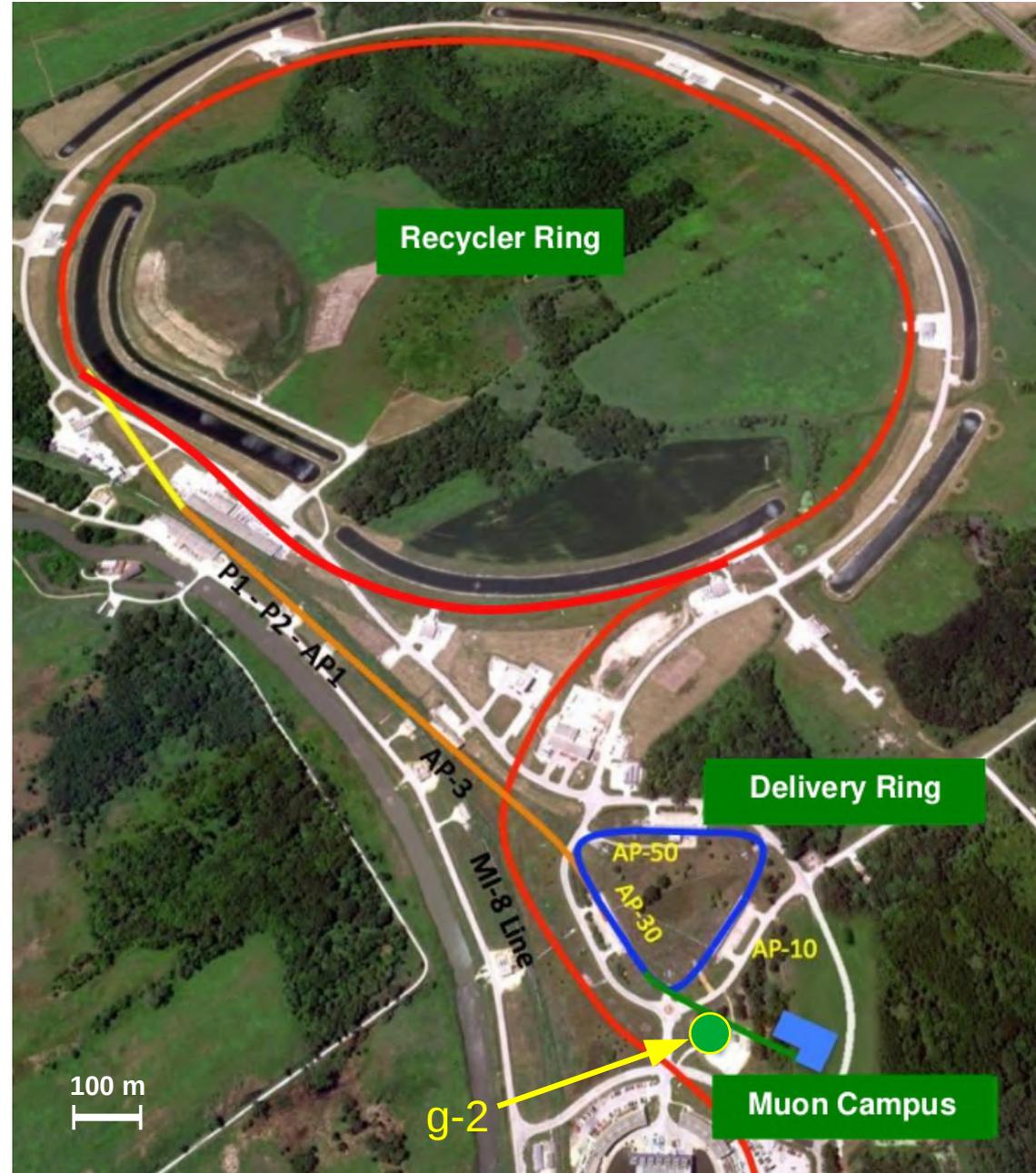
$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau} (1 + A \cos(\omega_a t + \varphi))$$



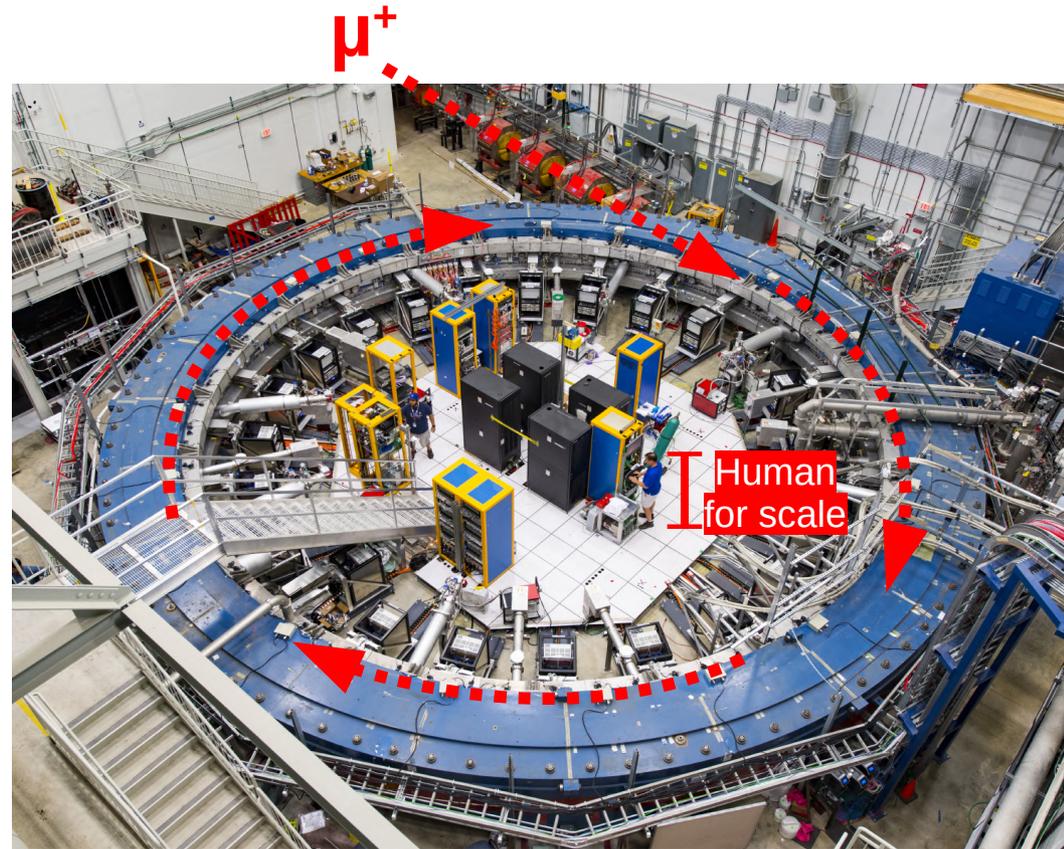
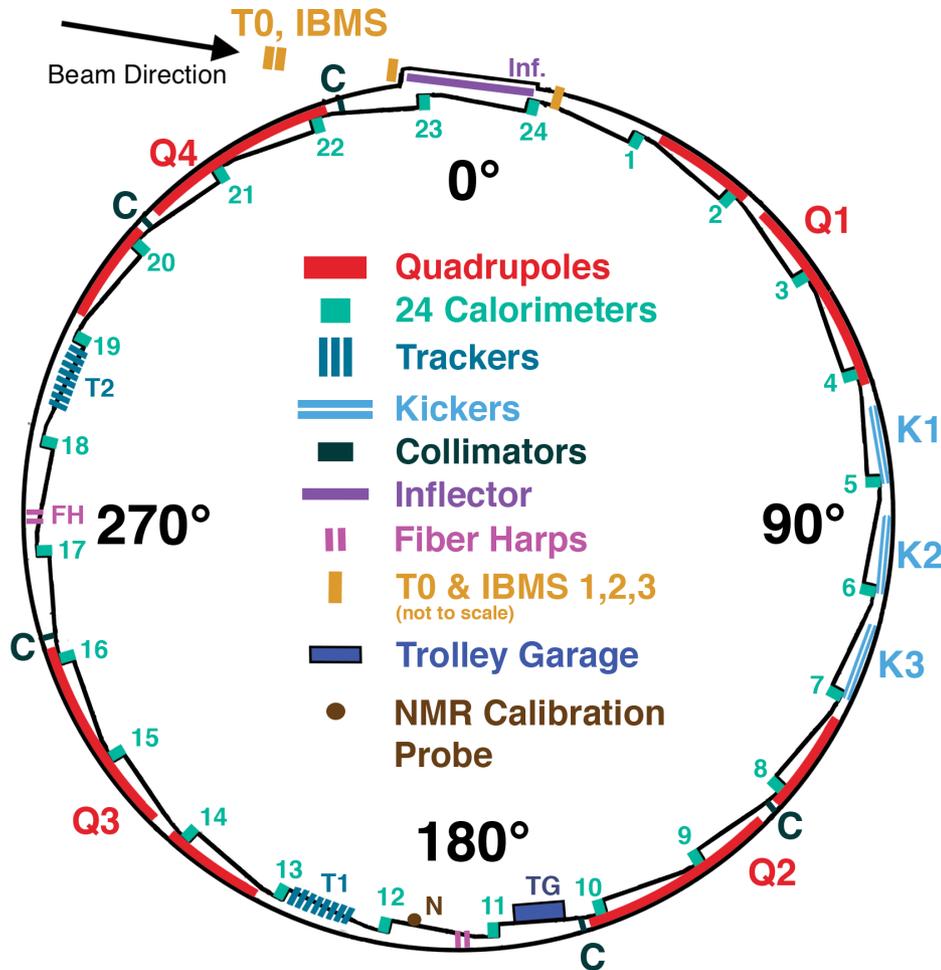
Fascio



- 16 gruppi di 10^{12} protoni @8 GeV vengono **accelerati** e consegnati attraverso il **recycler ring** ogni 1.4 s
- Ogni gruppo colpisce una **targhetta** fissa di Inconel® (NiCrFe)
- I pioni positivi sono estratti dall'interazione e decadono circolando nel **delivery ring**
- Un fascio puro di muoni polarizzati entra nell'**anello g-2**

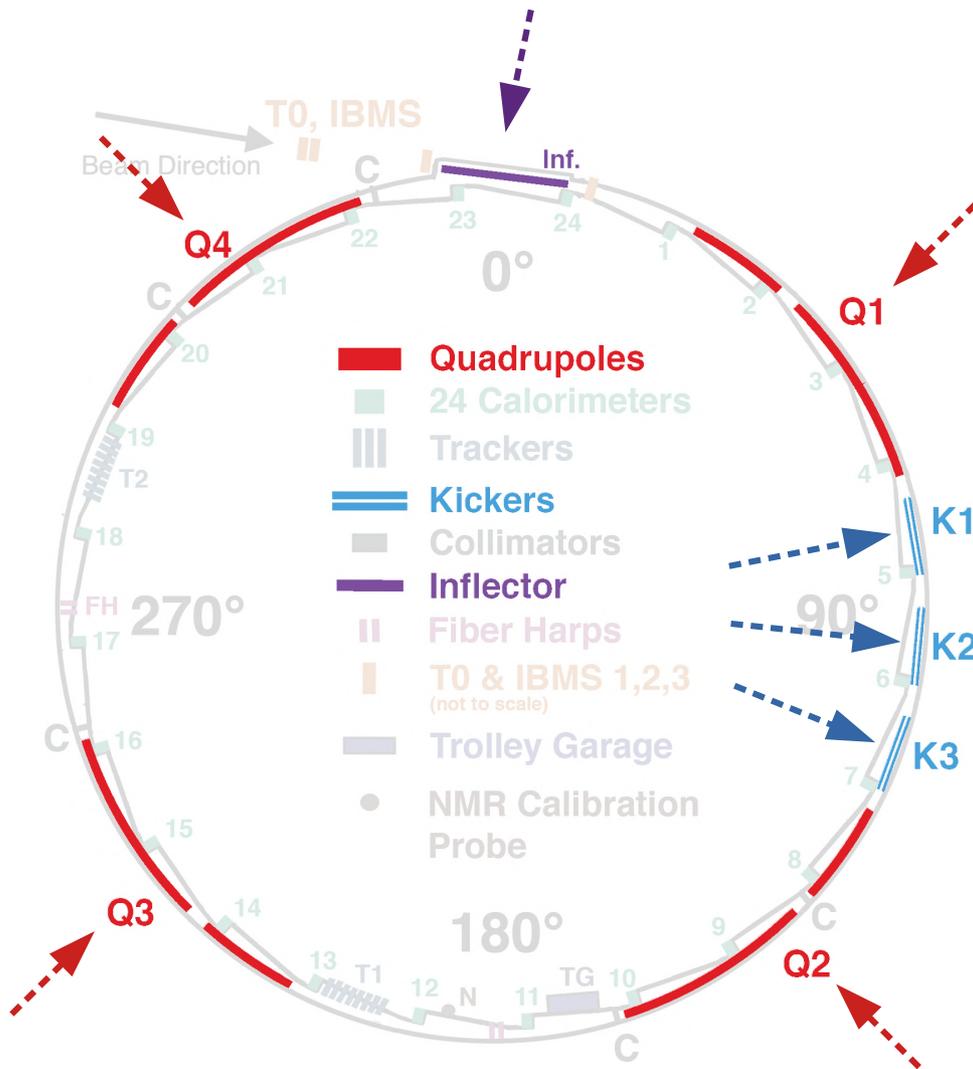


Esperimento Muon g-2



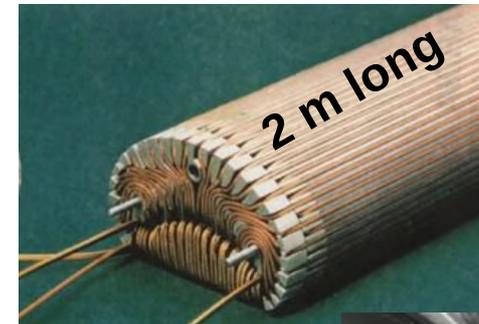
Sala sperimentale MC-1 @Fermilab

Iniezione del fascio

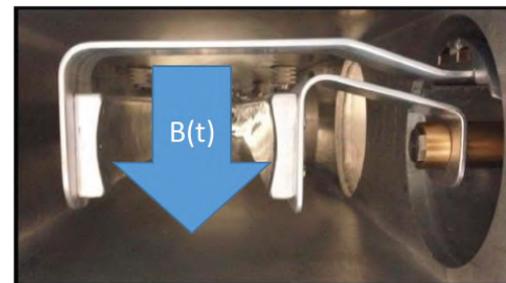


- **Inflettore** superconduttore spostato di ~ 8 cm rispetto all'orbita nominale
- 3 **kicker** magnetici veloci operati alla corrente di ~ 4 kA per ~ 200 ns
- 8 **quadrupoli** elettrostatici di alluminio alla tensione di 13.8 kV per il foccheggiamento verticale

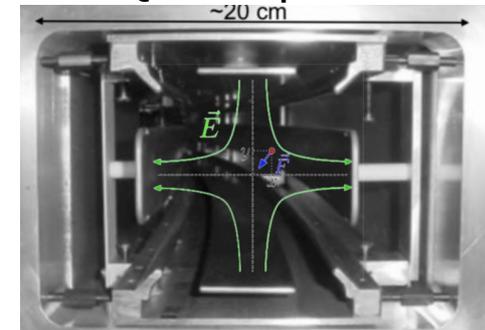
Inflettore



Piastre kicker



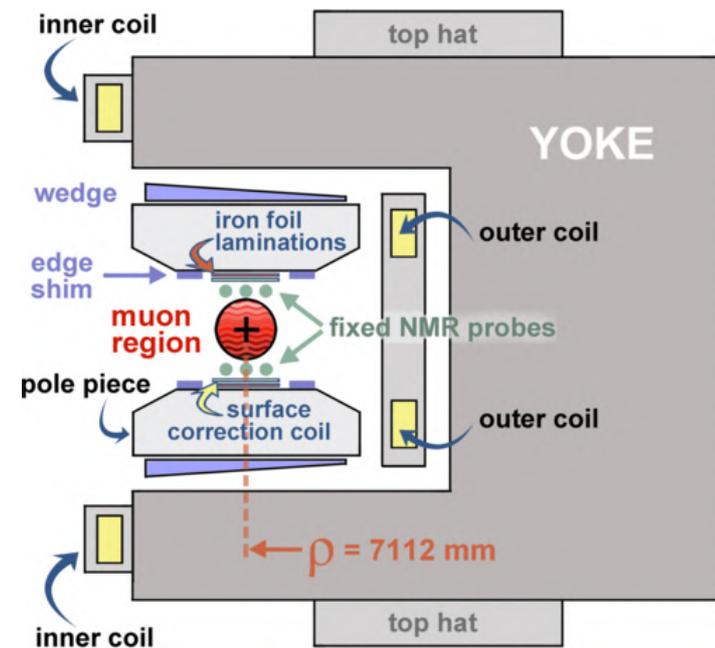
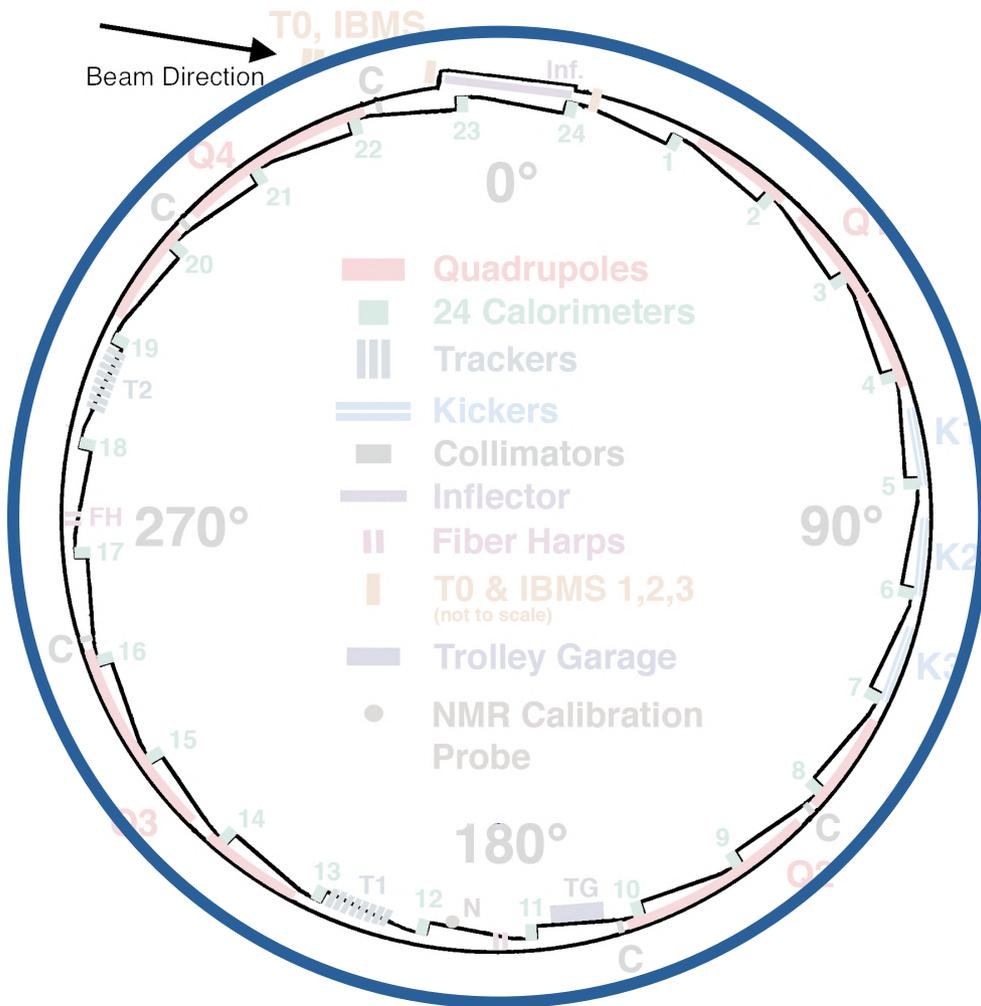
Quadrupoli



<https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165597>

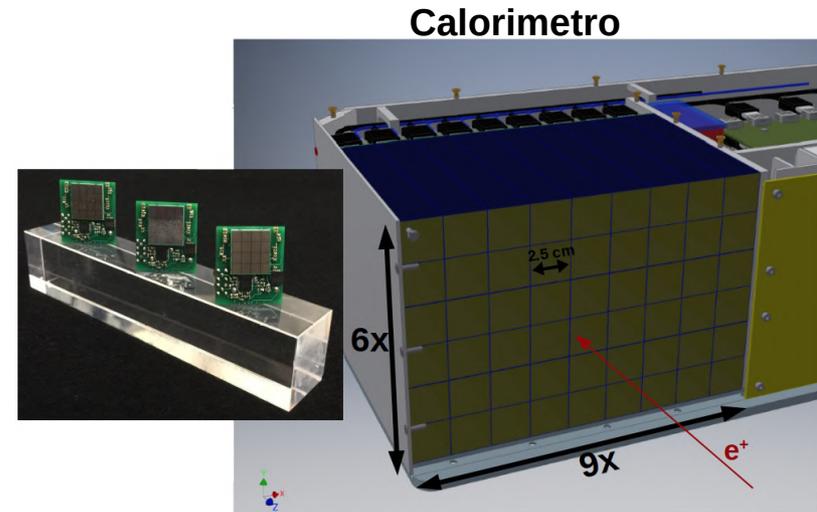
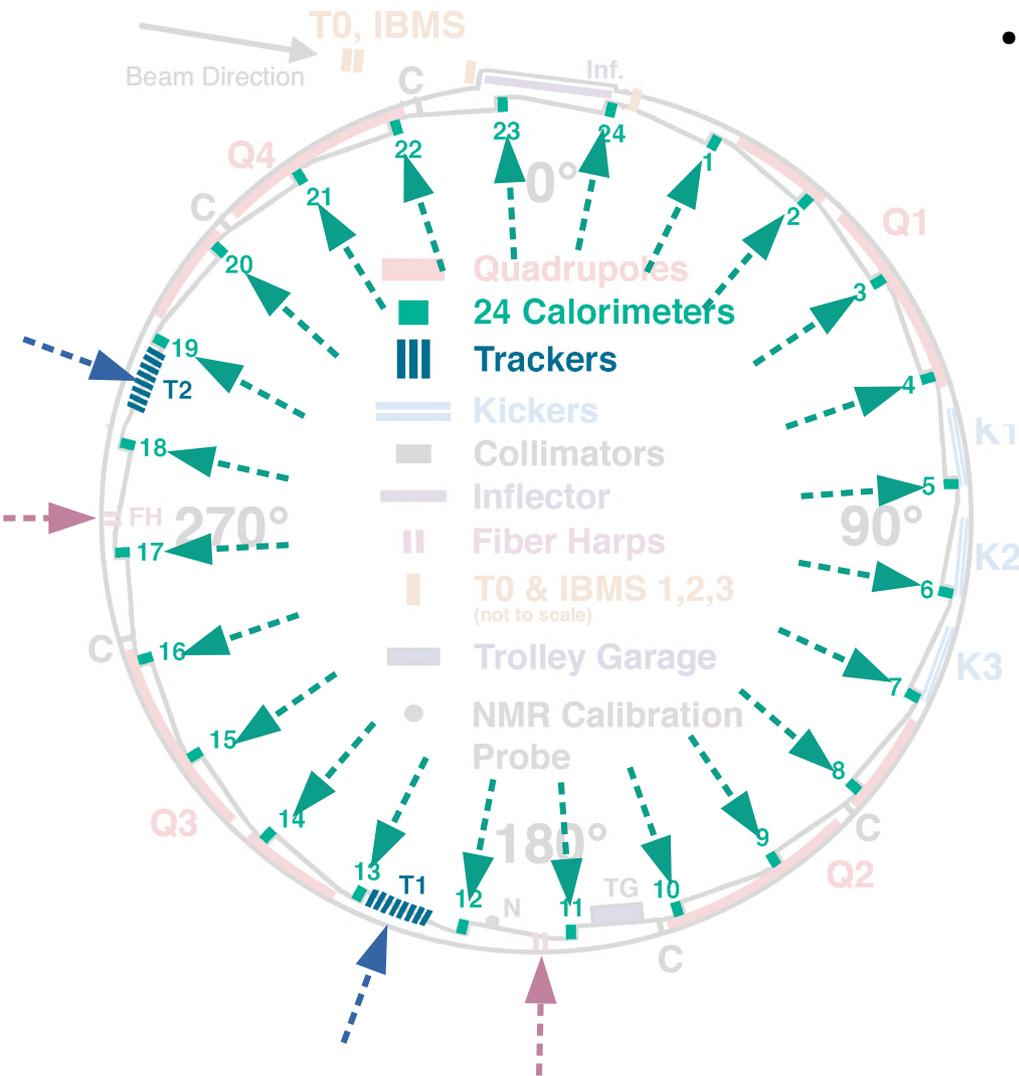
Magnete

- **Magnete** superconduttore raffreddato a ~ 5 K con elio liquido
- Campo magnetico verticale altamente uniforme di **1.45 T** con un raggio di 7.112 m
- Schermato passivamente e stabilizzato attivamente, per un'omogeneità superiore a 14 ppm RMS lungo l'intero angolo di azimuth

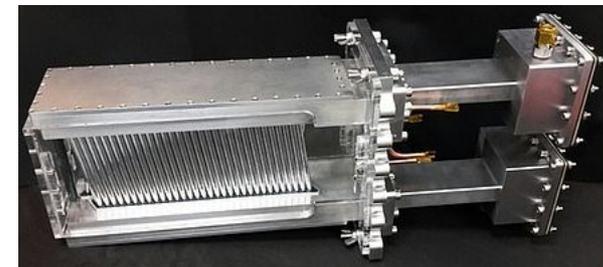


Rivelatori

- 24 **calorimetri** elettromagnetici per la misura dell'energia e del tempo di arrivo dei positroni
- 2 **tracciatori** per estrapolare la posizione del vertice di decadimento e misurare la distribuzione del fascio

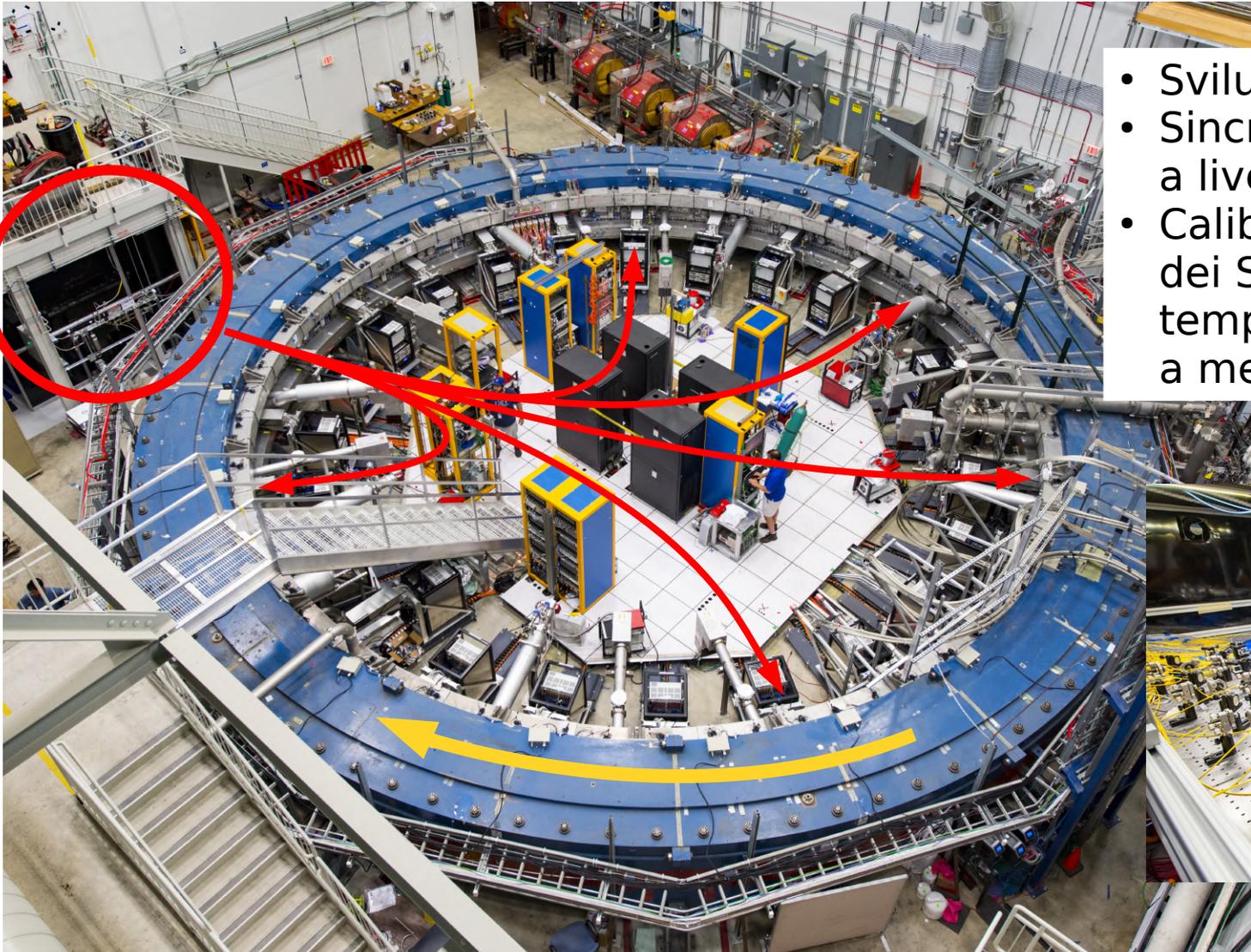


Modulo di tracciatore



Sistema di calibrazione laser

<https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/11/P11025>

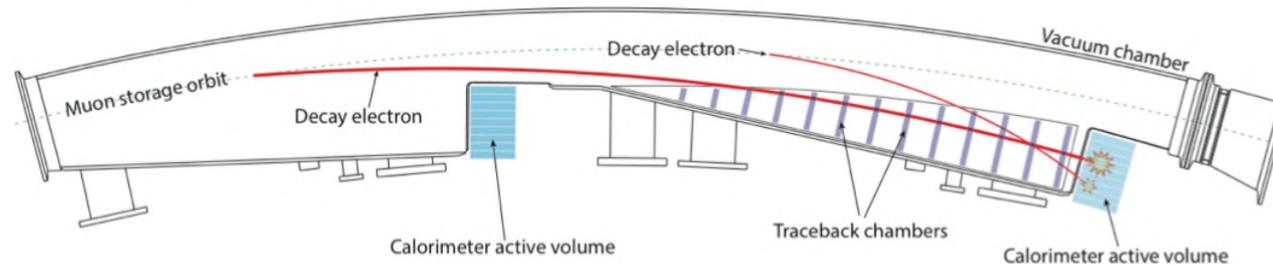


- Sviluppato da **INFN-INO**
- Sincronizzazione temporale a livello di ~ 50 ps
- Calibrazione del guadagno dei SiPMs su scale temporali da 10^{-9} s a 10^{+7} s a meglio di 0.1%

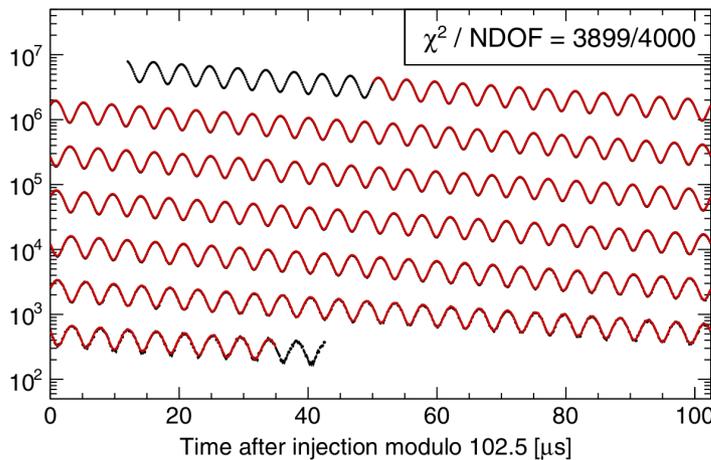


Misura di ω_a

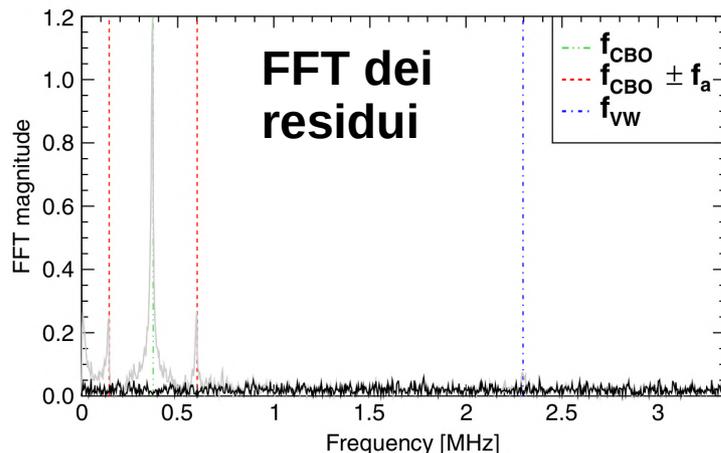
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.072002>



Run-1



- I positroni sopra 1 GeV sono conteggiati in funzione del tempo e pesati secondo l'asimmetria $A(E)$
- Istogramma fittato con funzione a 22 parametri
 - Precessione dello spin e movimenti di fascio
- Nessuna frequenza osservata nella FFT dei residui



$$N(t) = N e^{-t/\tau_\mu} [1 + A \cdot \cos(\omega_a t - \phi + \phi_{BO}(t))] \cdot$$

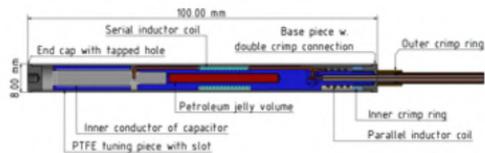
- Precessione anomala
- $\cdot (1 + A_{CBO} \cos(\omega_{CBO} t - \phi_{CBO}) e^{-t/\tau_{CBO}})$ → Oscillazione di betatrone orizz.
- $\cdot (1 + A_{VW} \cos(\omega_{VW} t - \phi_{VW}) e^{-t/\tau_{VW}})$ → Larghezza verticale
- $\cdot (1 + A_{2CBO} \cos(\omega_{2CBO} t - \phi_{2CBO}) e^{-t/\tau_{2CBO}})$ → Larghezza orizzontale
- $\cdot (1 + A_y \cos(\omega_y t - \phi_y) e^{-t/\tau_y})$ → Oscillazione verticale
- $\cdot (1 - k_{LM} \int_0^t L(t') e^{t'/\tau_\mu} dt')$ → Muoni persi

Misura di B

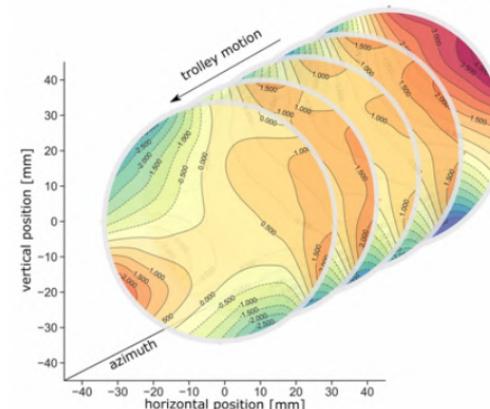
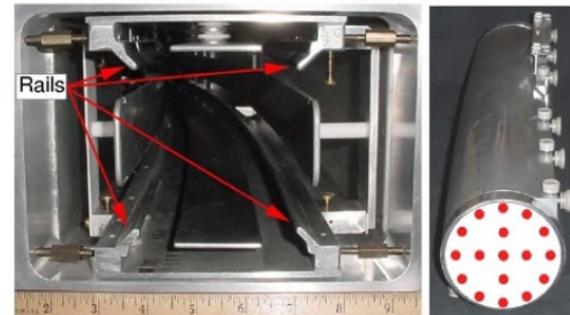
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.103.042208>

- Intensità del campo magnetico misurata in termini della precessione dei protoni ω_p con delle sonde a Risonanza Magnetica Nucleare (NMR)
- Campo monitorato continuamente attorno alla regione di accumulazione e misurato periodicamente al suo interno

378 sonde fisse per il monitoraggio continuo

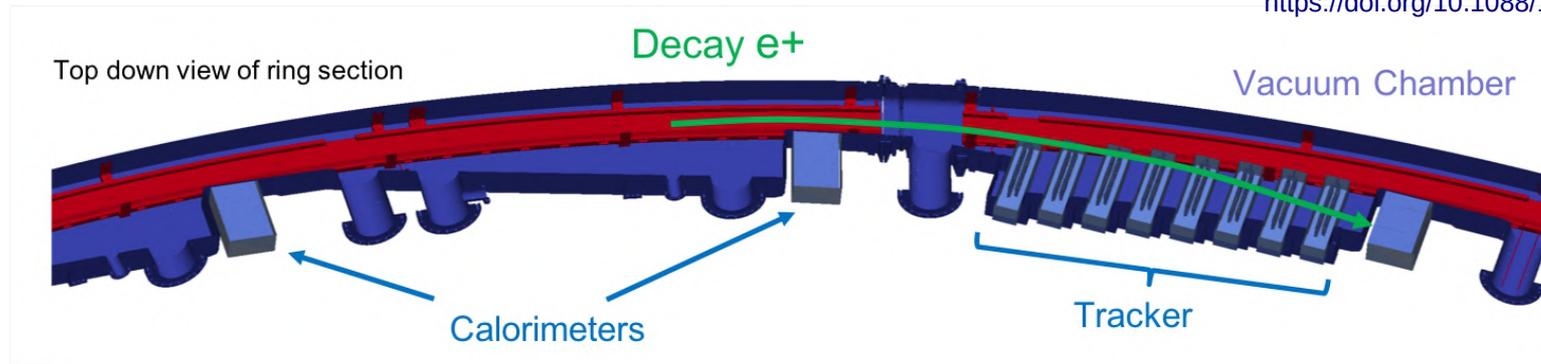


17 sonde mobili per una mappatura 3D ogni ~3 giorni

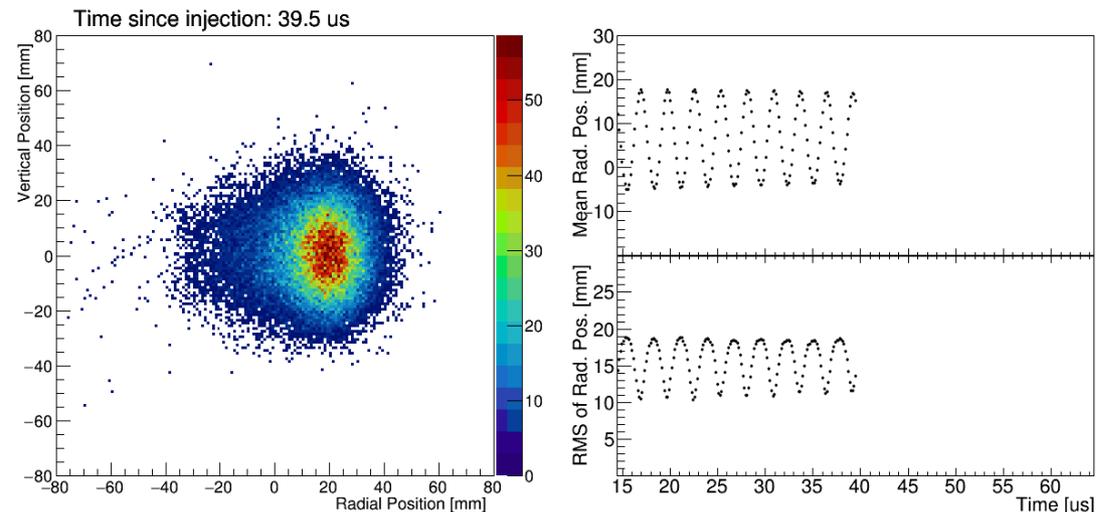
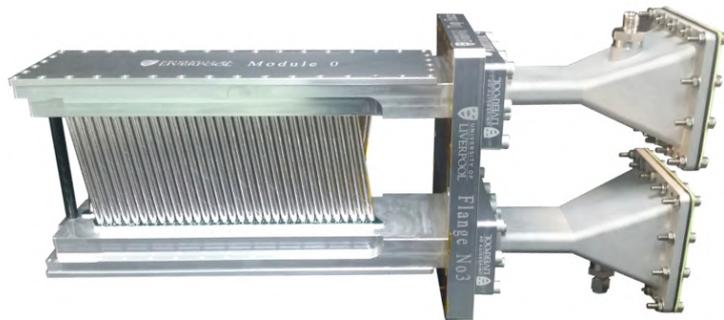


Misura di fascio

<https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/02/P02035>



- Due tracciatori a 180° e 270° ricostruiscono la traccia dei positroni per estrapolare il vertice di decadimento nella regione di accumulazione
- La distribuzione del fascio di muoni è poi estrapolata lungo l'intero angolo di azimuth dell'anello mediante una simulazione Geant4
- La coincidenza di segnale tra calorimetro e tracciatore è usata per identificare muoni e positroni

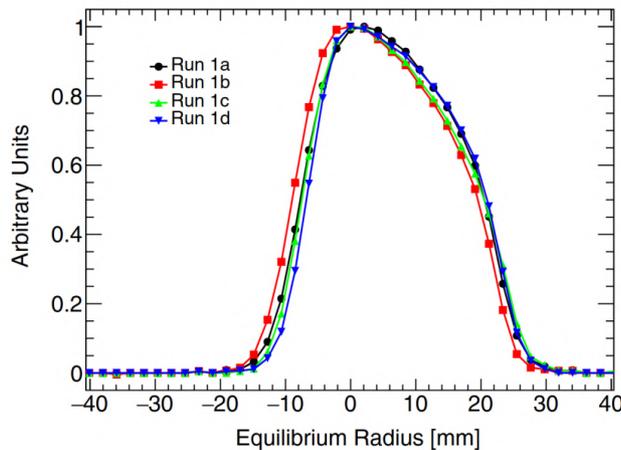


Correzioni

<https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.044002>

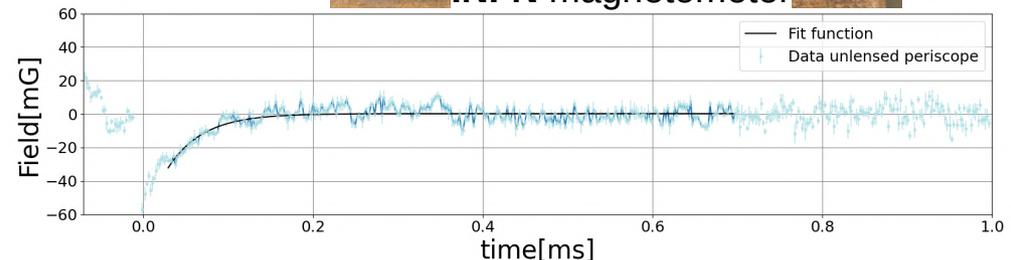
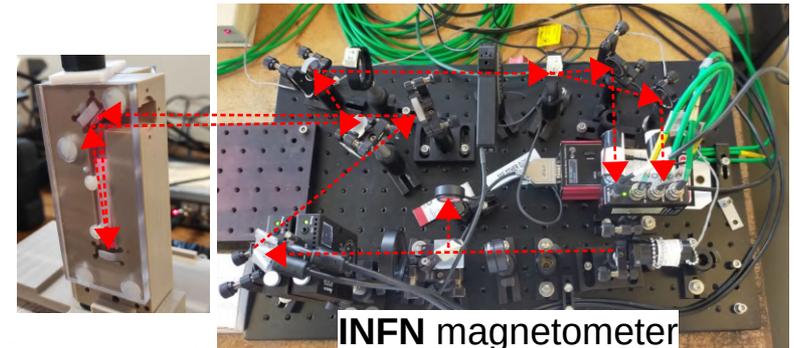
$$a_\mu \propto \frac{f_{clock} \omega_a^m (1 + C_e + C_p + C_{ml} + C_{pa})}{f_{calib} \langle \omega'_p(x, y, \phi) \times M(x, y, \phi) \rangle (1 + B_k + B_q)}$$

- C_e : correzione di campo elettrico
- Effetto residuo di E su ω_a
 - Correzione di ~ 480 ppb per il Run-1
 - Misurata tramite analisi di ciclotrone



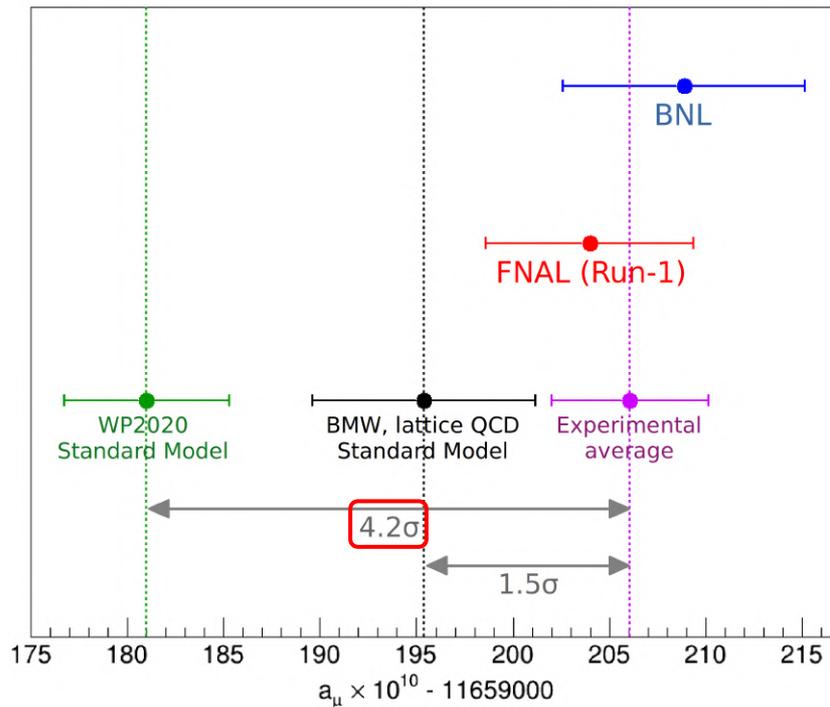
$$C_e \approx 2n(1-n)\beta_0 \frac{\langle x_e^2 \rangle}{R_0^2}$$

- B_k : correnti parassite dei kickers
- Indotte sulle piastre dal *kick* (200 ns)
 - Di lunga durata, 200 μ s
 - Misurata tramite magnetometri Faraday



Risultato del Run-1

- Valore di ω_a calcolato dalla media di 4 analisi indipendenti
- Analisi in cieco sul lato hardware e software
- Valore finale di a_μ del Run-1 → 462 ppb (434 ppb statistico, 157 ppb sistematico)



$$a_\mu \text{ (FNAL)} = 116\,592\,040(54) \times 10^{-11} \text{ (0.46 ppm)}$$

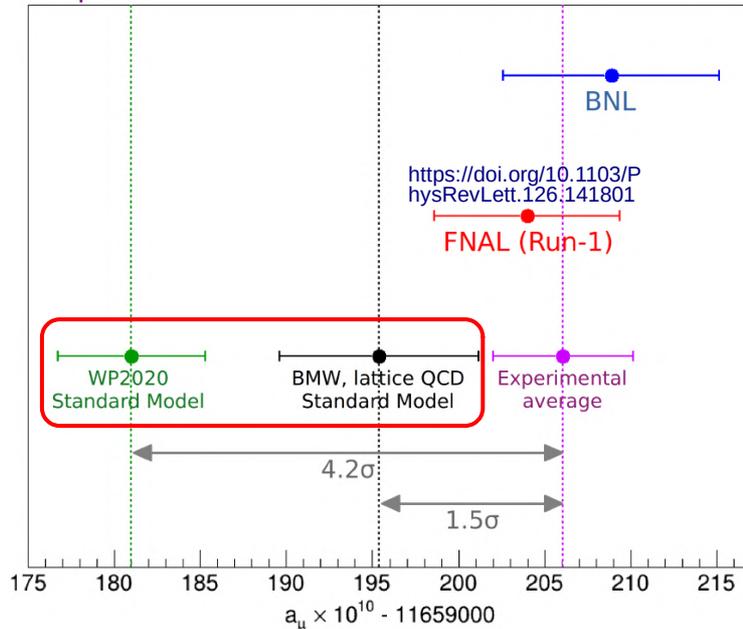
$$a_\mu \text{ (World avg)} = 116\,592\,061(41) \times 10^{-11} \text{ (0.35 ppm)}$$

$$a_\mu \propto \frac{f_{clock} \omega_a^m (1 + C_e + C_p + C_{ml} + C_{pa})}{f_{calib} \langle \omega'_p(x, y, \phi) \times M(x, y, \phi) \rangle (1 + B_k + B_q)}$$

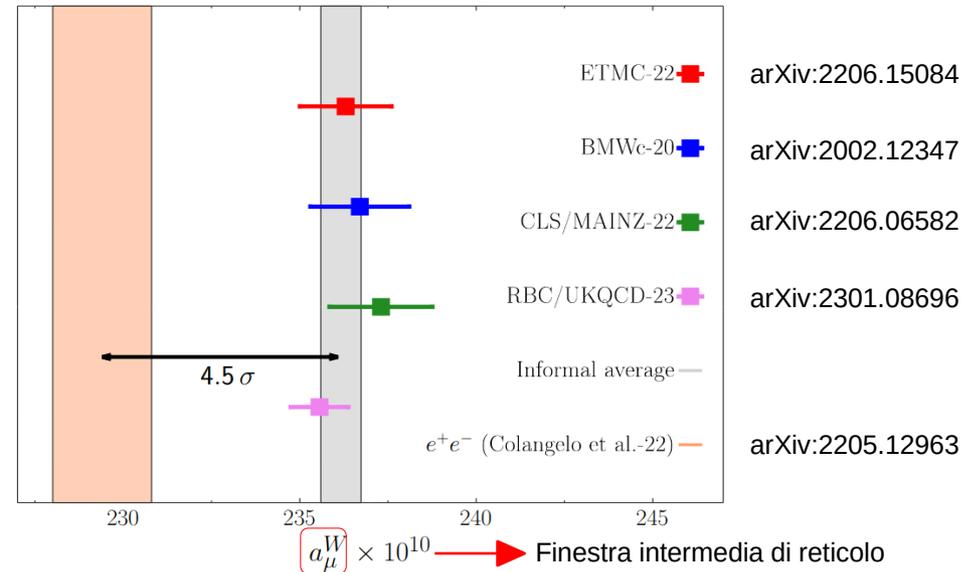
Quantity	Correction [ppb]	Uncertainty [ppb]
ω_a (statistical)	-	434
ω_a (systematic)	-	56
C_e	489	53
C_p	180	13
C_{ml}	-11	5
C_{pa}	-158	75
$f_{calib} \langle \omega'_p(x, y, \phi) \cdot M(x, y, \phi) \rangle$	-	56
B_q	-17	92
B_k	-27	37
μ'_p/μ_e	-	10
m_μ/m_e	-	22
g_e	-	0
Total systematic	-	157
Total external factors	-	25
Total	544	462

Stato della teoria

a_μ (Exp) = 116 592 061(41) $\times 10^{-11}$ (0.35 ppm)



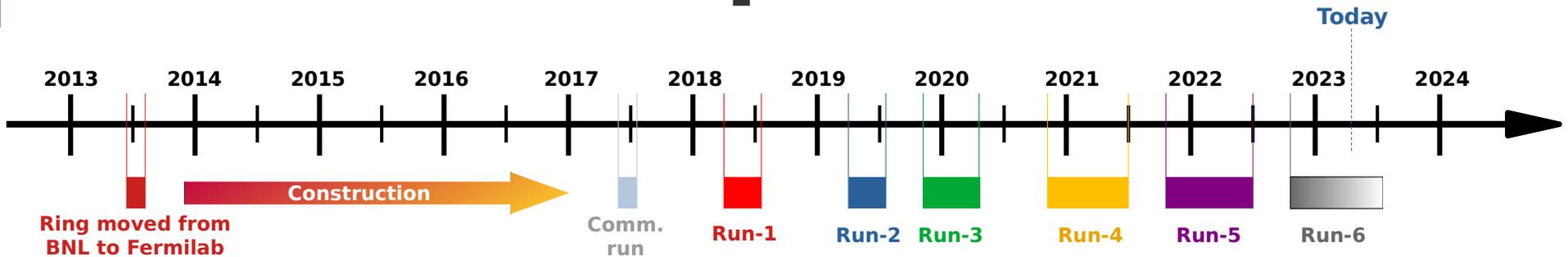
Picture from <https://agenda.infn.it/event/32931/contributions/187824/>



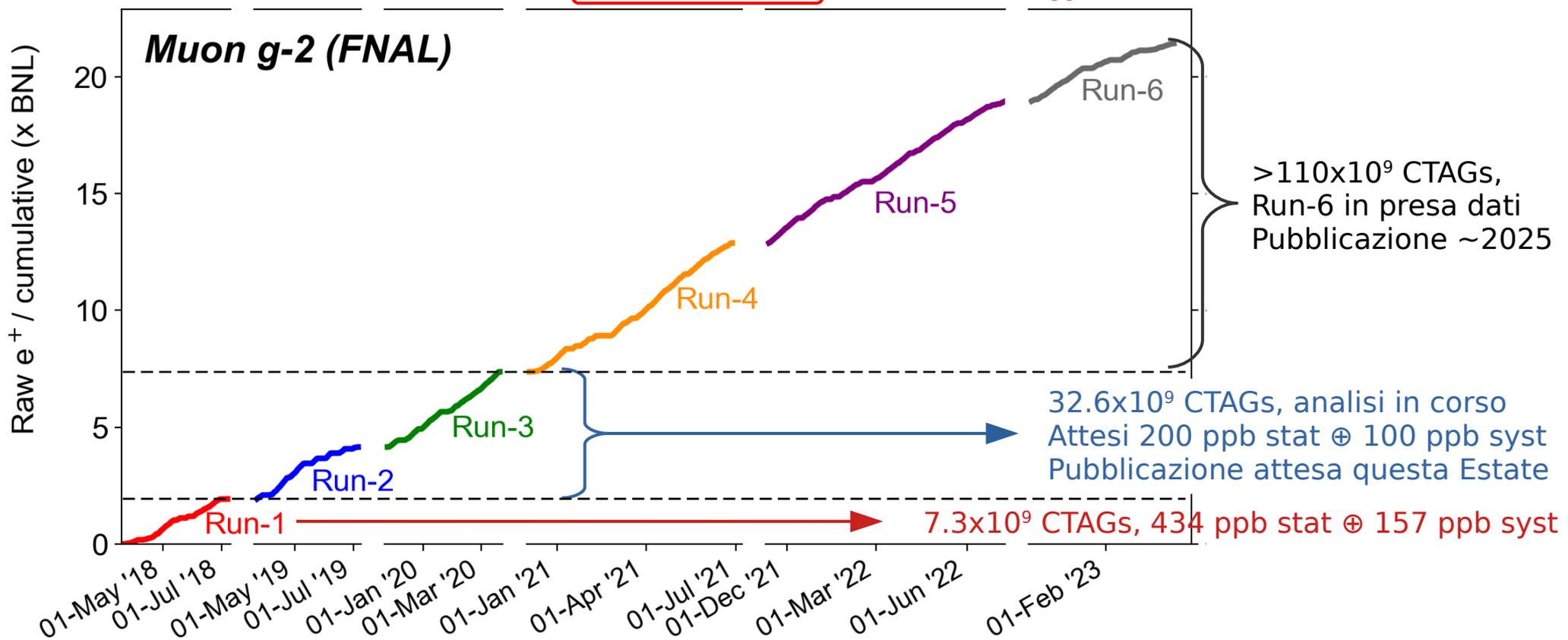
- Misura del Run-1 pubblicata il 7 Aprile 2021
 - In accordo con la misura di BNL (2006). Tensione di **4.2 σ** tra la media globale e la previsione teorica della Theory Initiative (WP2020)
- Nuovi calcoli di precisione del contributo adronico a_μ (HVP-LO) basati su reticolo (**Lattice-QCD**) sono ora in tensione con la previsione basata sui dati di sezione d'urto $\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{adroni})$ tramite la relazione di dispersione:

$$a_\mu^{HVP} = \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 \int_{4m_\pi^2}^{\infty} \frac{ds}{s} \frac{\sigma_{e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}}(s)}{\sigma_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-}(s)} K(s)$$

Stato dell'esperimento



Last update: 2023-04-11 11:16 ; Total = 21.43 (xBNL) **Goal di 21xBNL raggiunto il 27 Febbraio 2023**



Conclusioni

- L'esperimento Muon g-2 presso Fermilab conduce una misura di alta precisione che coinvolge molti aspetti di fisica e ingegneristici
- Pubblicazione del Run-1 di notevole successo, con una precisione di 460 parti per miliardo, che conferma la misura di BNL
- A partire dal Run-2, miglioramenti riguardanti sia l'hardware che l'analisi permettono di ridurre numerose incertezze sistematiche
- Una pubblicazione con precisione 2x è prevista per questa Estate
- Insieme ai Run-4/5/6 siamo sulla buona strada per raggiungere l'obiettivo finale di 140 ppb con una pubblicazione finale nel 2025
- Nuove tensioni sulla previsione teorica del contributo adronico di a_μ
- Dopo 75 anni la fisica del g-2 continua ad essere un tema caldo

Thank you for listening!