



Stato di g-2 al Fermilab

Michele Iacovacci, 16 Gennaio 2025 – Riunione annuale GR1-Na

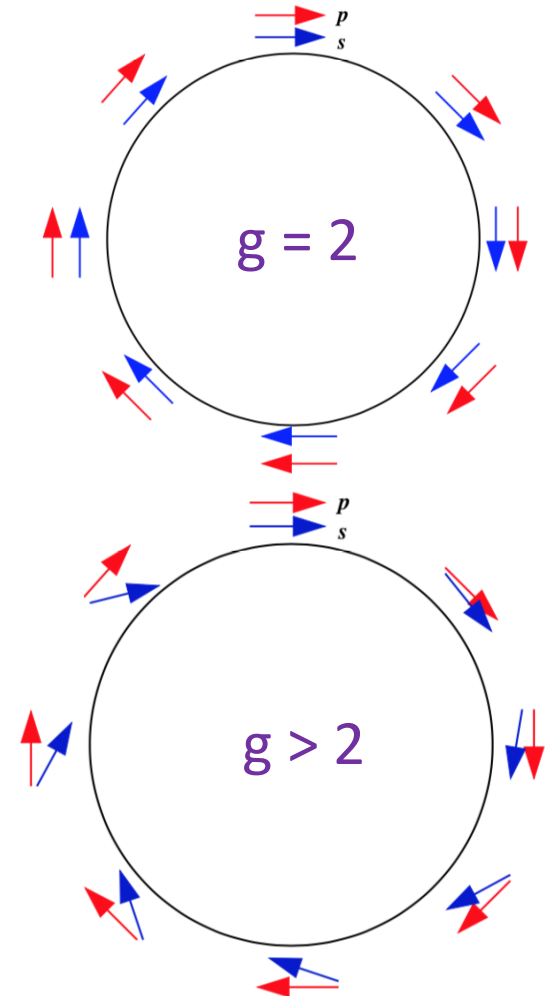


Perché un anello di accumulazione con B uniforme?

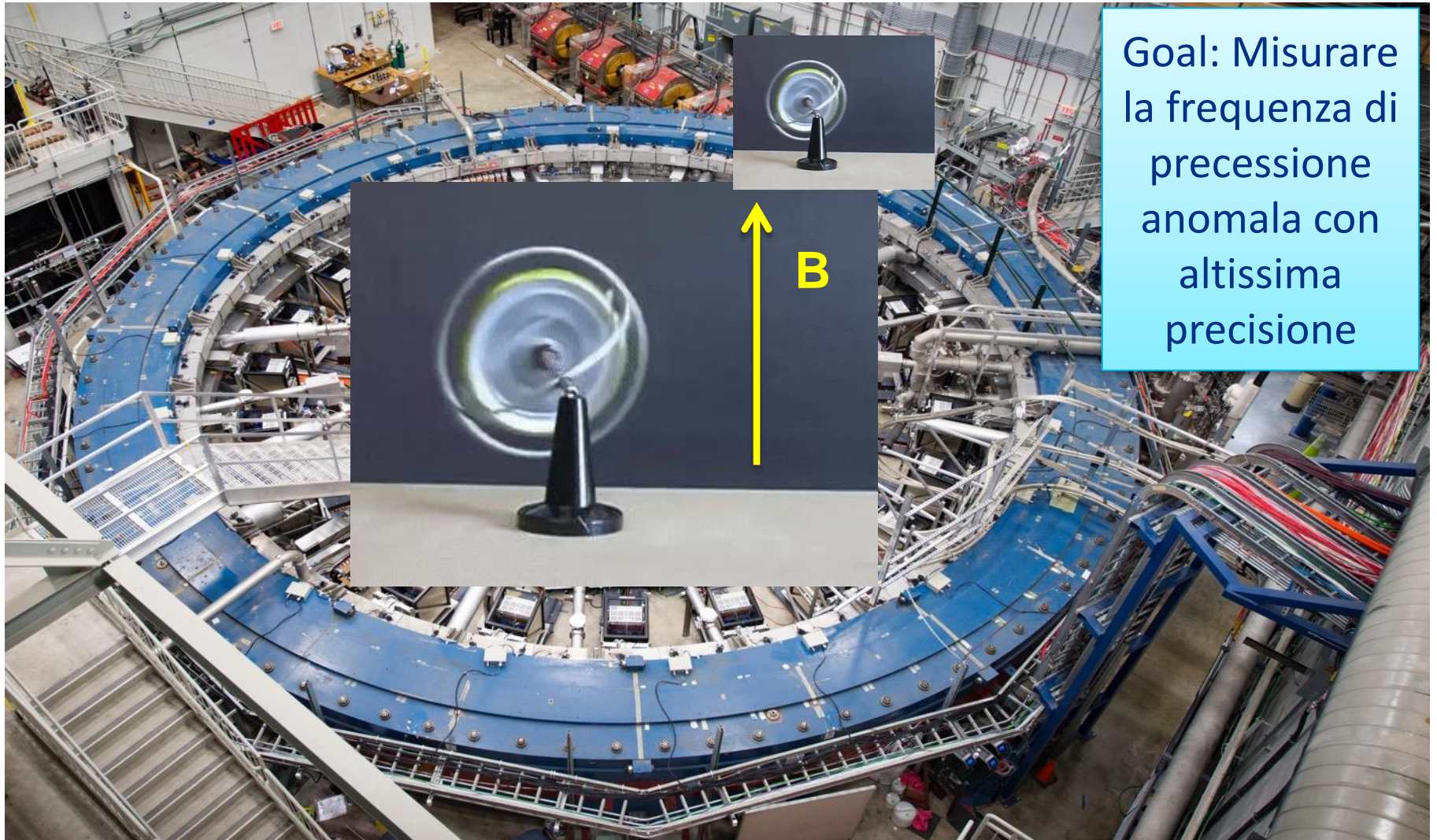
- Il muone con momento \mathbf{p} (freccia rossa) e spin \mathbf{s} (freccia blu) subisce la rivoluzione del ciclotrone e la precessione di spin in un campo magnetico B (si assume che \mathbf{s} e \mathbf{p} siano perpendicolari a B)
- La differenza tra le velocità angolari della precessione di spin ω_S e rivoluzione ciclotrone ω_c è

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

- Se $g = 2$ esattamente, i vettori di spin e momento rimarrebbero bloccati insieme $\rightarrow \omega_a = 0$
- Invece lo spin precede più velocemente e, alle condizioni del Fermilab, fa una rotazione aggiuntiva di 12° per giro. Dopo circa 30 giri si riallinea all'impulso.



Magnete di BNL a Fermilab

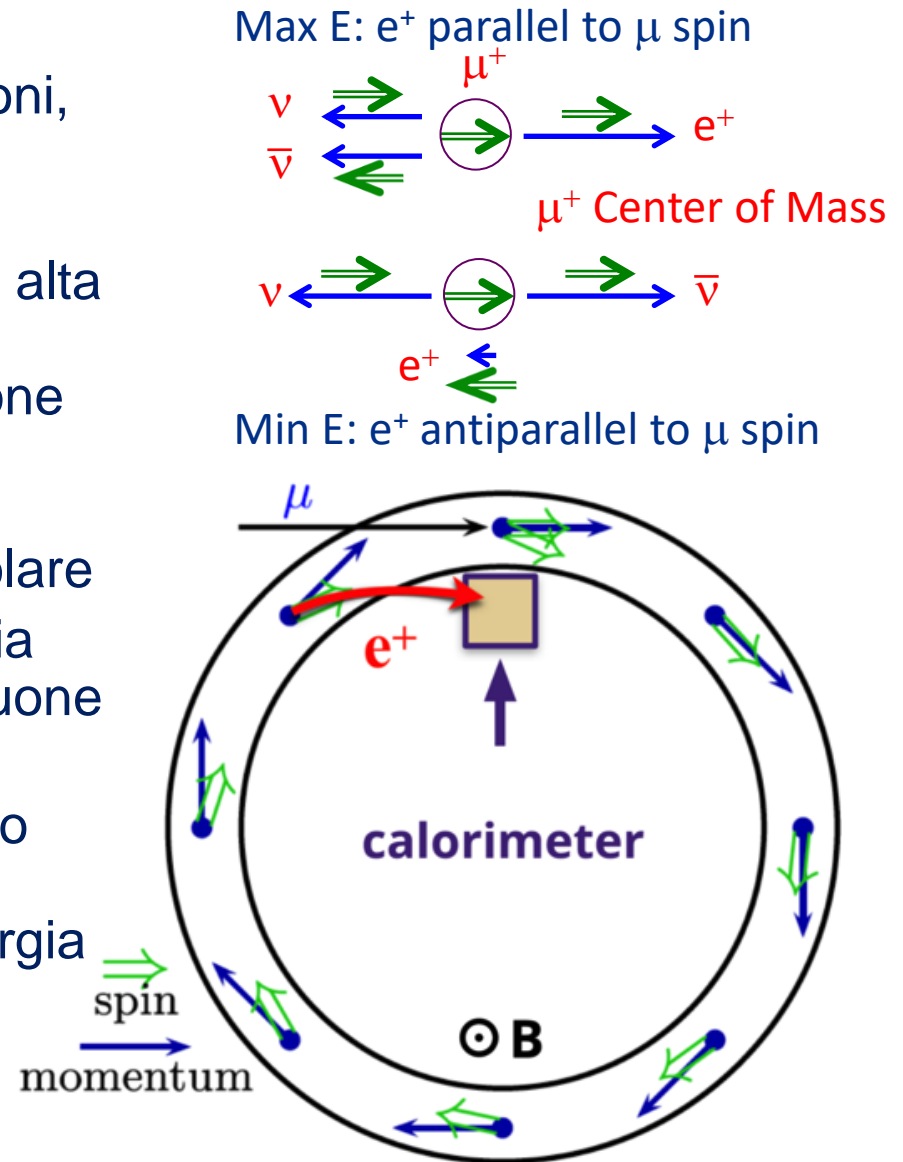


Goal: Misurare la frequenza di precessione anomala con altissima precisione

Misurare a_μ rende l'esperimento 800 volte più sensibile di un esperimento che misuri g !

Come misuriamo lo spin del muone

- Muoni polarizzati quasi al 100%, provenienti dal decadimento di pioni, vengono iniettati nell'anello di accumulazione
- I muoni decadono ed i positroni di alta energia sono emessi preferenzialmente lungo la direzione dello spin del muone a causa dell'elicità dei neutrini e della conservazione del momento angolare
- Misurare gli elettroni di alta energia equivale a misurare lo spin del muone al momento del decadimento
- Calorimetri in posizione fissa lungo l'anello di accumulazione (raggio interno dell'anello) misurano l'energia il tempo di arrivo dei positroni di decadimento

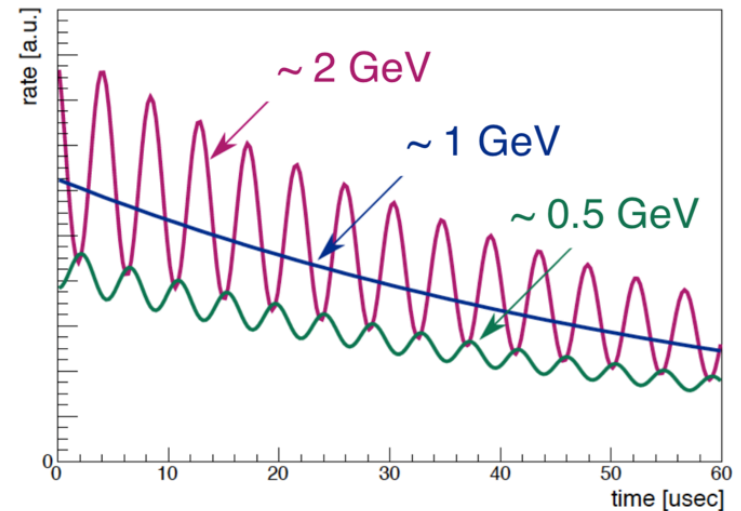
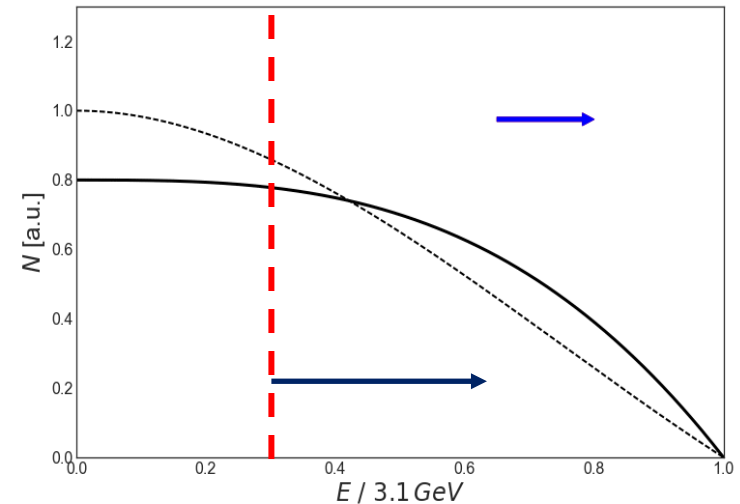


Cosa vedono i calorimetri

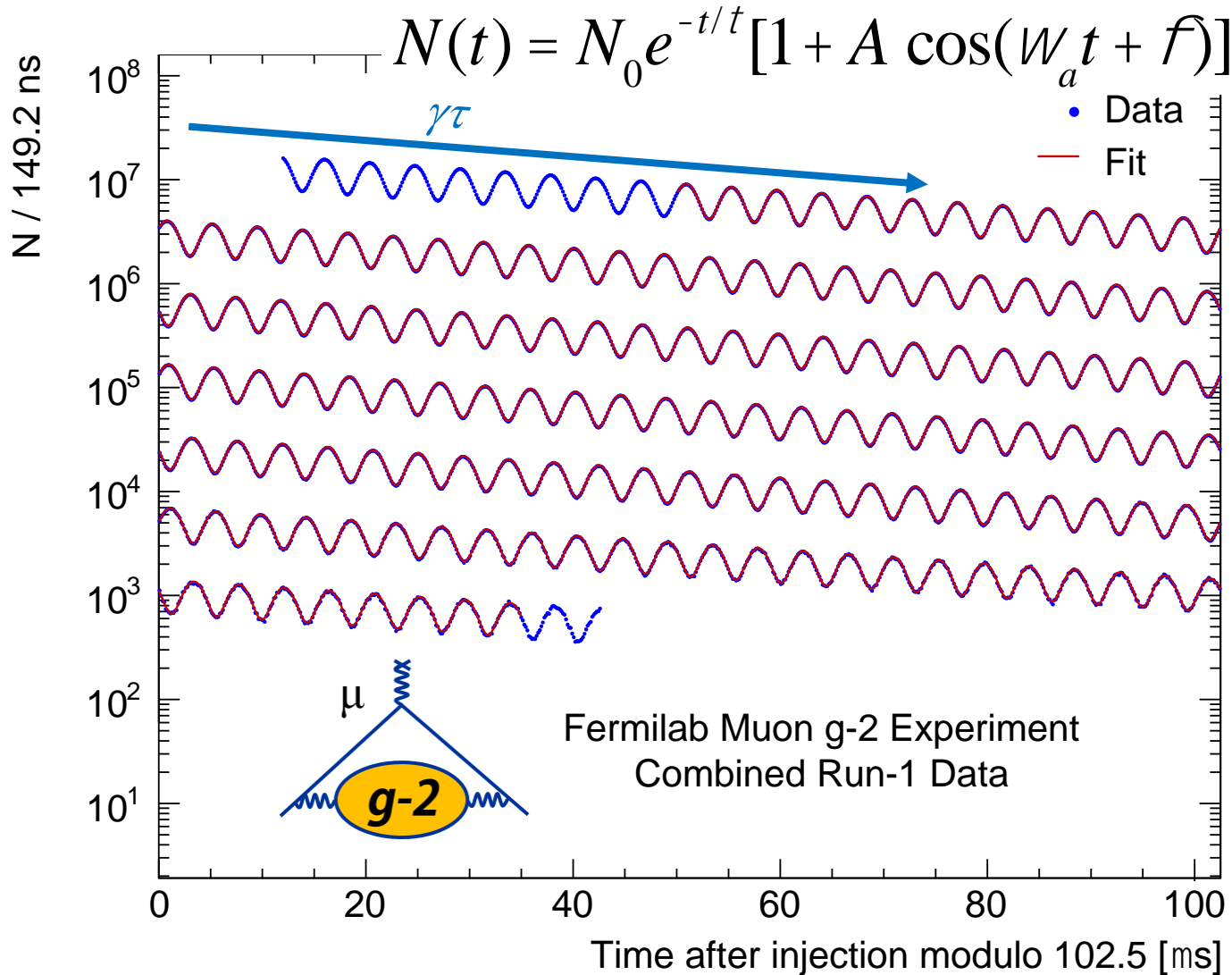
- Il numero di positroni visti dai calorimetri è modulato dalla frequenza di precessione anomala

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau} \left(1 + A \cos(W_a t + j) \right)$$

- L'ampiezza della modulazione dipende dall'energia di soglia del positrone: l'asimmetria $A(E_{\text{thr}})$ può essere positiva, nulla o negativa



Run1 Wobble Plot - Figura di merito



- Statistica del RUN1
 $8.2 \times 10^9 e^+$

- $\gamma\tau_\mu = 64.4 \mu\text{s}$
- $\omega_a : \tau_a = 4.37 \mu\text{s}$
- $\omega_c : \tau_c = 149 \text{ ns}$

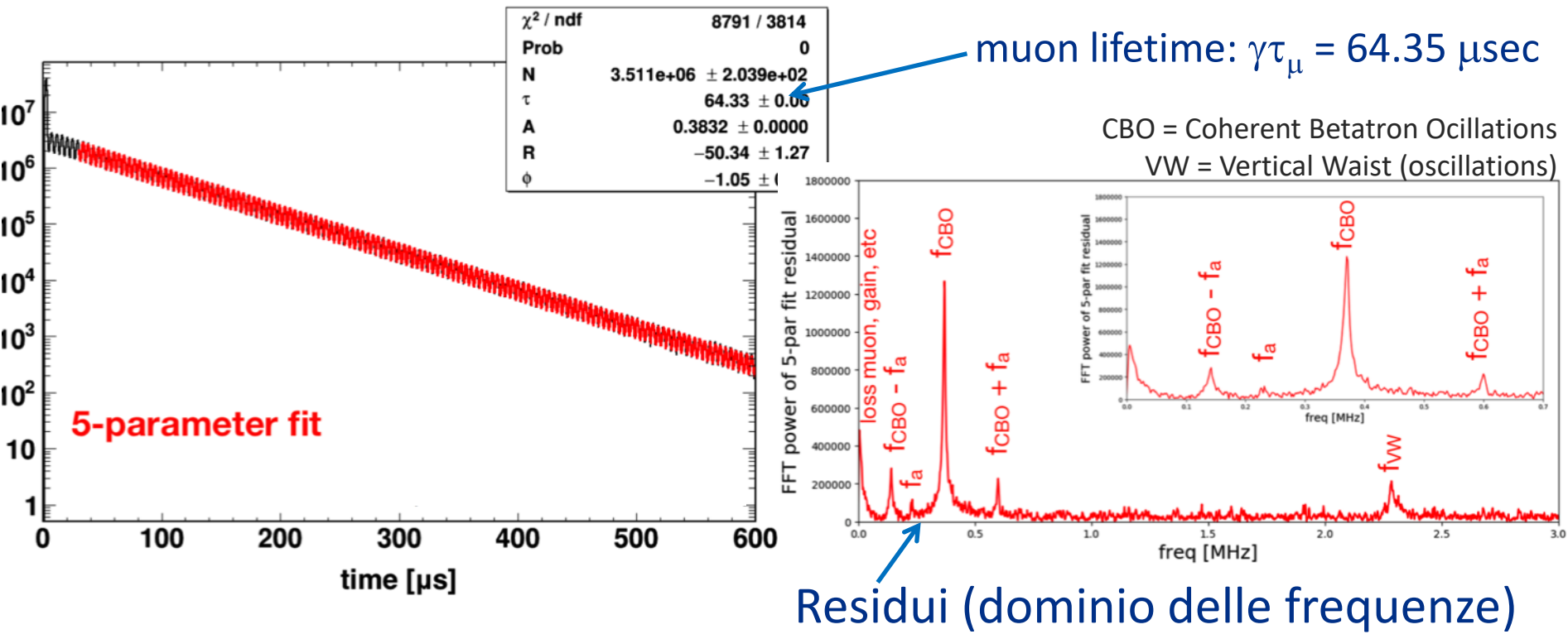
- decadimento esponenziale modulato dalla precessione dello spin
- l'asse x "si avvolge" ogni $100 \mu\text{s}$ per un totale di $\sim 700 \mu\text{s} \rightarrow \sim 11$ volte il tempo di vita del muone

Misura di ω_a : fit a 5 parametri

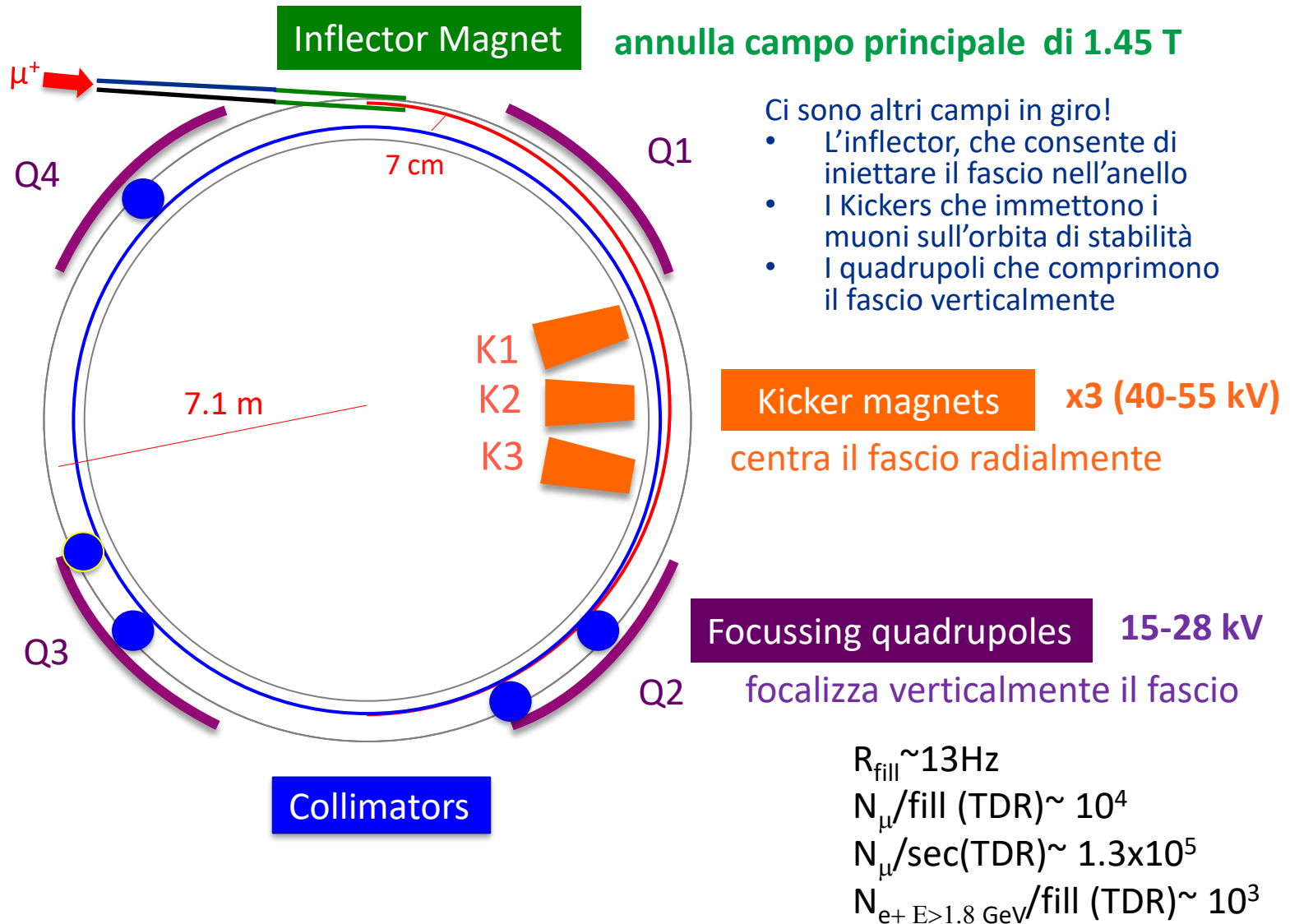
- Si parte con:

$$N_{ideal}(t) = N_0 \exp(-t/\tau_\mu) [1 + A \cos(\omega_a t + \varphi)]$$

- Questa funzione è chiaramente non adeguata, infatti si osservano risonanze ben definite nei residui



Cos'altro manca?



L'equazione per l'anomalia si complica un pò...

- È necessario tener conto del campo elettrico dei quadrupoli
- Il campo elettrico stesso induce una precessione dello spin
 - Si può ridurre scegliendo $\gamma = 29.3$, “il momento magico”

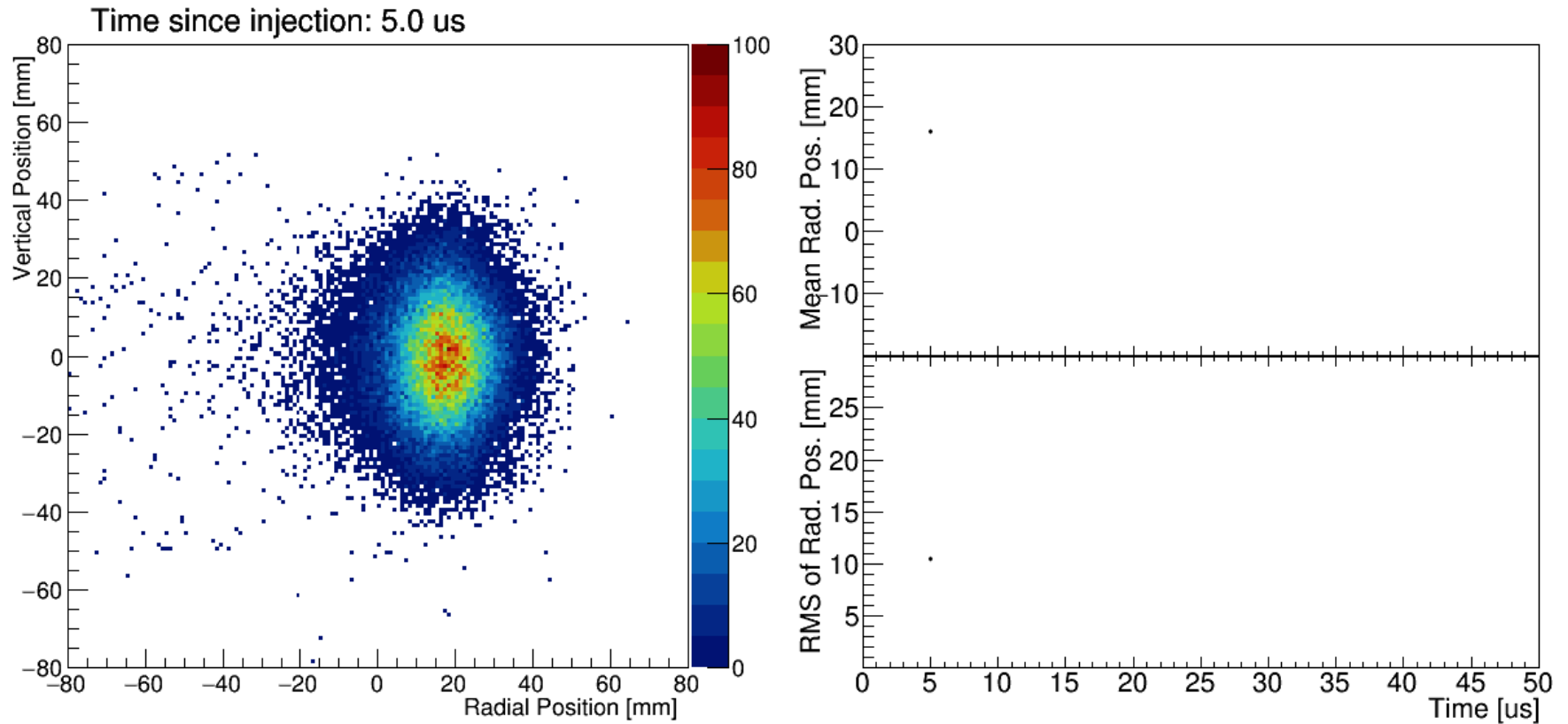
$$\vec{\omega}_a \equiv \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c = -\frac{q}{m_\mu} \left[a_\mu \vec{B} - a_\mu \left(\frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) (\vec{\beta} \cdot \vec{B}) \vec{\beta} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} \right]$$

Pitch correction

Electric field correction
0, for $\gamma = 29.3$,
 $v = 99.94\% c$

- Quindi il fascio di muoni si muove sia verticalmente che orizzontalmente
 - In sincronia all'inizio \rightarrow oscillazioni coerenti di betatrone (CBO)
 - Il movimento di betatrone porta a una correzione della frequenza poiché i muoni non sempre viaggiano perpendicolarmente al campo magnetico
- Di questi effetti va tenuto conto sia per l'accettanza dei calorimetri che per le perturbazioni ad ω_a

Visualizzare la CBO con I tracciatori



La funzione completa di fit a 22 parametri

ω_y, ω_{VW} vertical oscillations

$\omega_{CBO}, \omega_{2CBO}$ radial oscillations

$$N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} (1 + A \cdot A_{BO}(t) \cos(\omega_a t + \phi \cdot \phi_{BO}(t))) \cdot N_{CBO}(t) \cdot N_{VW}(t) \cdot N_y(t) \cdot N_{2CBO}(t) \cdot J(t)$$

$$A_{BO}(t) = 1 + A_A \cos(\omega_{CBO}(t) + \phi_A) e^{-\frac{t}{\tau_{CBO}}}$$

$$\phi_{BO}(t) = 1 + A_\phi \cos(\omega_{CBO}(t) + \phi_\phi) e^{-\frac{t}{\tau_{CBO}}}$$

$$N_{CBO}(t) = 1 + A_{CBO} \cos(\omega_{CBO}(t) + \phi_{CBO}) e^{-\frac{t}{\tau_{CBO}}}$$

$$N_{2CBO}(t) = 1 + A_{2CBO} \cos(2\omega_{CBO}(t) + \phi_{2CBO}) e^{-\frac{t}{2\tau_{CBO}}}$$

$$N_{VW}(t) = 1 + A_{VW} \cos(\omega_{VW}(t)t + \phi_{VW}) e^{-\frac{t}{\tau_{VW}}}$$

$$N_y(t) = 1 + A_y \cos(\omega_y(t)t + \phi_y) e^{-\frac{t}{\tau_y}}$$

Rosso = parametri liberi

Blue = parametri fissi

$$J(t) = 1 - k_{LM} \int_{t_0}^t \Lambda(t) dt$$

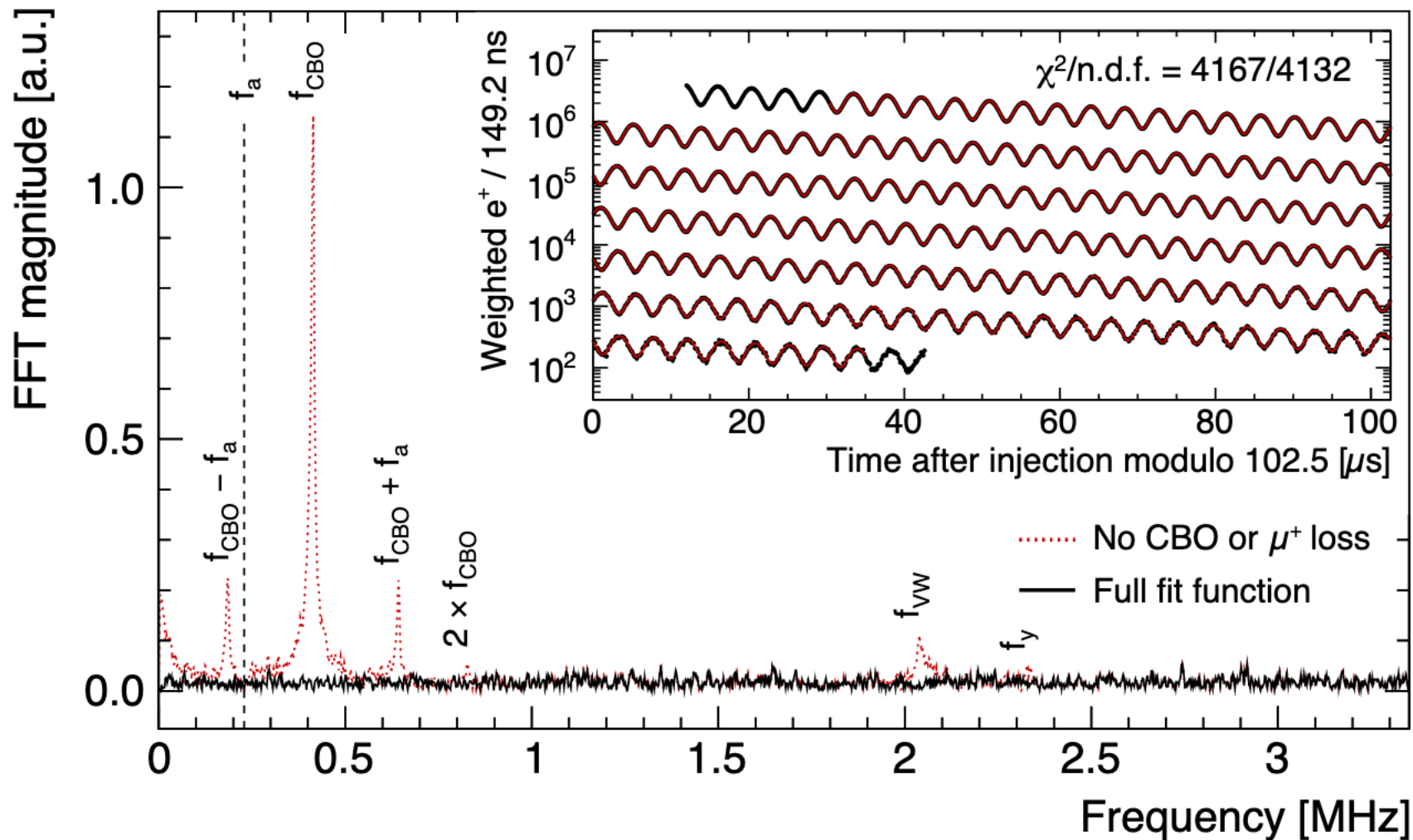
Muoni persi (μ che colpiscono i collimatori)

$$\omega_{CBO}(t) = \omega_0 t + A e^{-\frac{t}{\tau_A}} + B e^{-\frac{t}{\tau_B}}$$

$$\omega_y(t) = F \omega_{CBO}(t) \sqrt{2\omega_c / F \omega_{CBO}(t) - 1}$$

$$\omega_{VW}(t) = \omega_c - 2\omega_y(t)$$

Fit finale



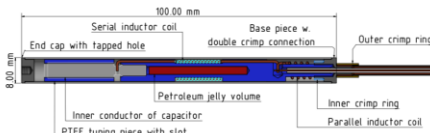
Necessario B a < 100 ppb per determinare a_{μ}

$$\omega_a = \omega_s - \omega_c = a_{\mu} \frac{eB}{mc}$$

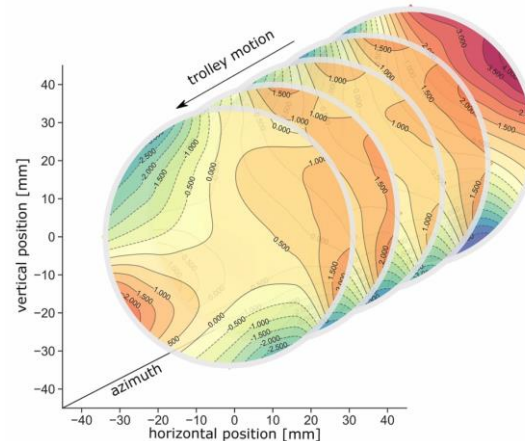
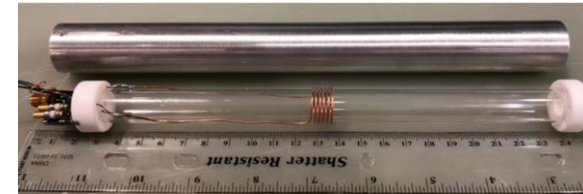
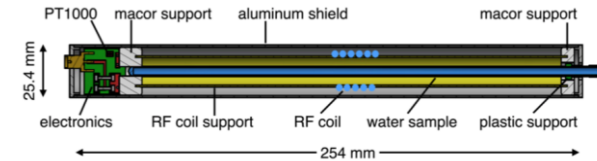
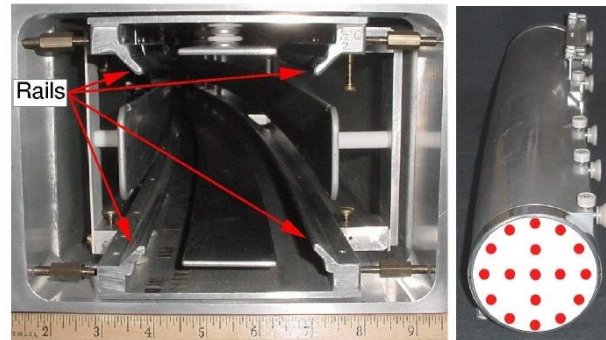
Si utilizza la NMR per trovare il campo B in termini di frequenza di precessione protonica ω_p (comagnetometer)

Le sonde del carrello sono calibrate con sonde esterne assolute

378 sonde fisse controllano 24/7



Un carrello con 17 sonde NMR mappa il campo ogni 3 giorni



Le sonde assolute tutte cross-calibrate al magnete di test di ANL

Quello che noi misuriamo

$$a_\mu = \frac{\omega_a}{\tilde{\omega}'_p(T_r)} \frac{\mu'_p(T_r)}{\mu_e(H)} \frac{\mu_e(H)}{\mu_e} \frac{m_\mu}{m_e} \frac{g_e}{2}$$

Ci affidiamo ad altri per e/m e calibrazione assoluta in H₂O

ω_a : la precessione anomala dello spin

$\tilde{\omega}'_p(T_r)$: frequenza di precessione di protoni in acqua a temperatura T_r ottenuta mappando il campo e pesandolo con la distribuzione dei muoni

Obiettivo: 140 ppb =
100 ppb (stat) \oplus 100 ppb (syst)

$\tilde{\omega}'_p(T)$ Proton Larmor precession frequency in a spherical water sample. Temperature dependence known to < 1ppb/°C.
[Metrologia 13, 179 \(1977\)](#), [Metrologia 51, 54 \(2014\)](#),
[Metrologia 20, 81 \(1984\)](#)

$\frac{\mu_e(H)}{\mu'_p(T)}$ Measured to 10.5 ppb accuracy at T = 34.7°C
[Metrologia 13, 179 \(1977\)](#)

$\frac{\mu_e}{\mu_e(H)}$ Bound-state QED (exact)
[Rev. Mod. Phys. 88 035009 \(2016\)](#)

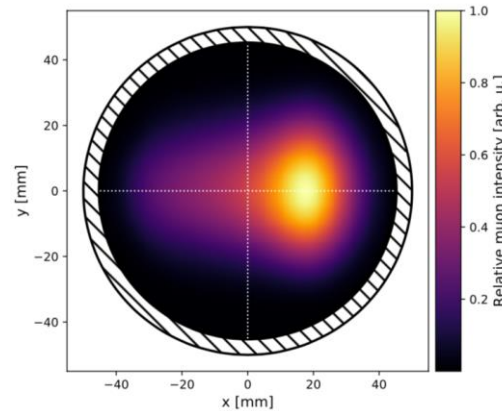
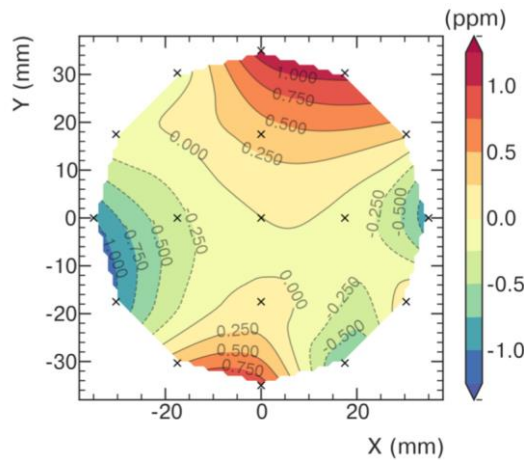
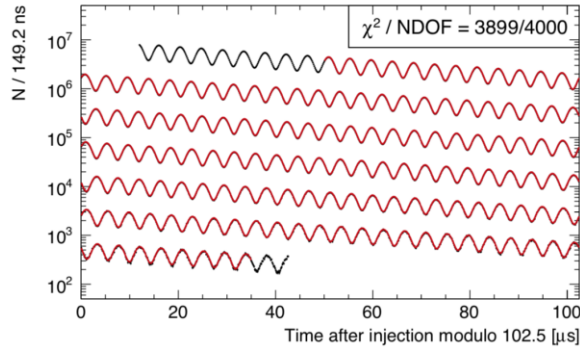
$\frac{m_\mu}{m_e}$ Known to 22 ppb from muonium hyperfine splitting
[Phys. Rev. Lett. 82, 711 \(1999\)](#)

$\frac{g_e}{2}$ Measured to 0.28 ppt
[Phys. Rev. A 83, 052122 \(2011\)](#)

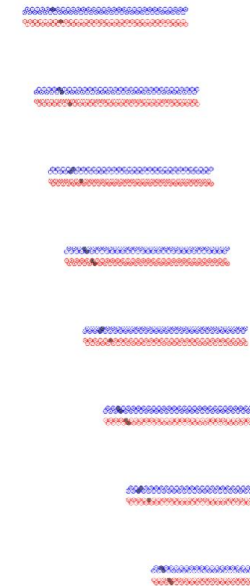
All < 25 ppb

Il 'grande' quadro dell'analisi

$$\frac{\omega_a}{\omega_p \otimes \rho(r)} \Rightarrow$$



*Tutto dai dati effettivi di Run 1



- *In vacuo* 2 stazioni traccianti di straw tubes misurano la distribuzione spaziale e altre proprietà del fascio di muoni (CBO, distribuzione di p)

... e senza dimenticare le correzioni:

$$\frac{\omega_a}{\tilde{\omega}_p} = \left(\frac{f_{\text{clock}} \omega_a (1 + C_e + C_p + C_{\text{ml}} + C_{\text{pa}})}{(1 + B_{\text{QT}} + B_{\text{Eddy}}) f_{\text{field}} \omega_p \otimes \rho(\mathbf{r})} \right)$$

E-field & pitch corrections
Muon loss & phase acceptance corrections

Field transients
Field calibration

- Ognuno di questi termini è stato studiato in modo estremamente dettagliato.

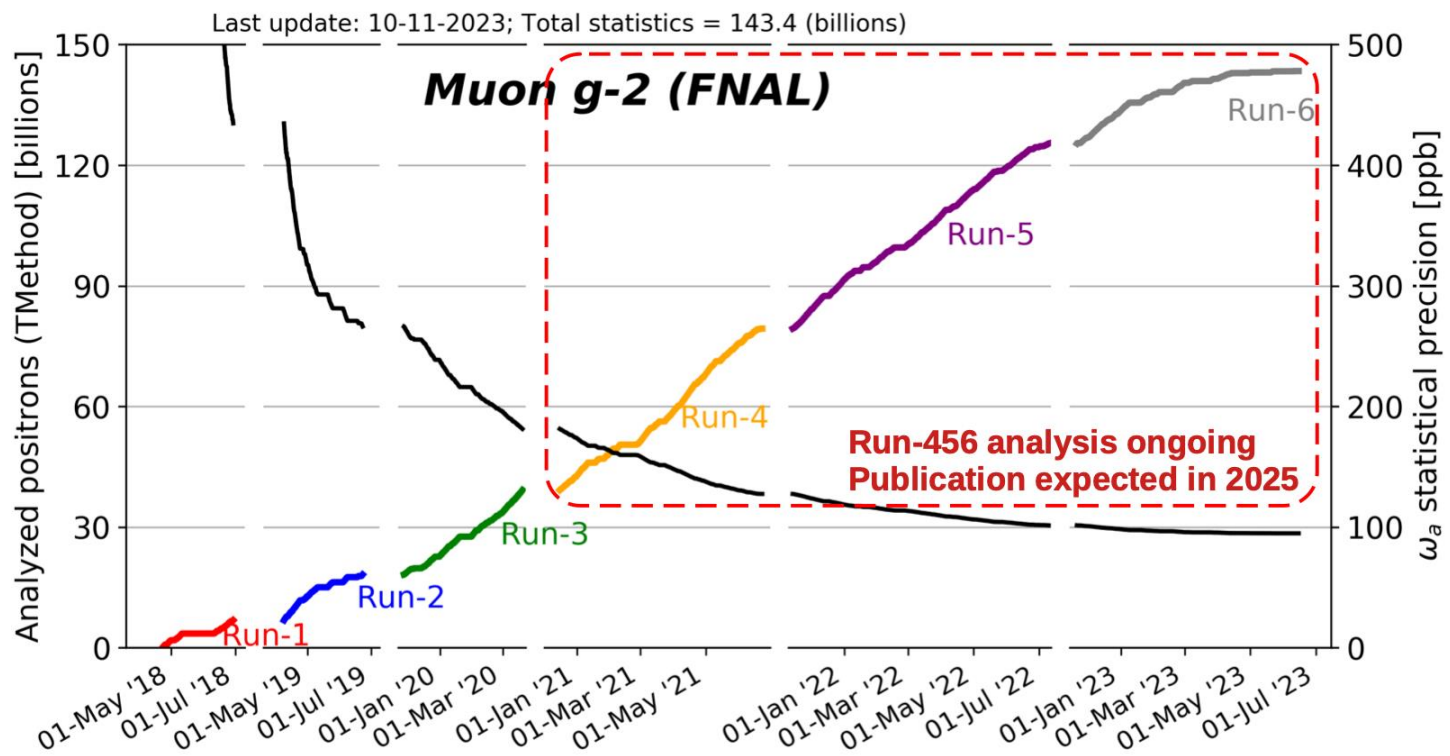
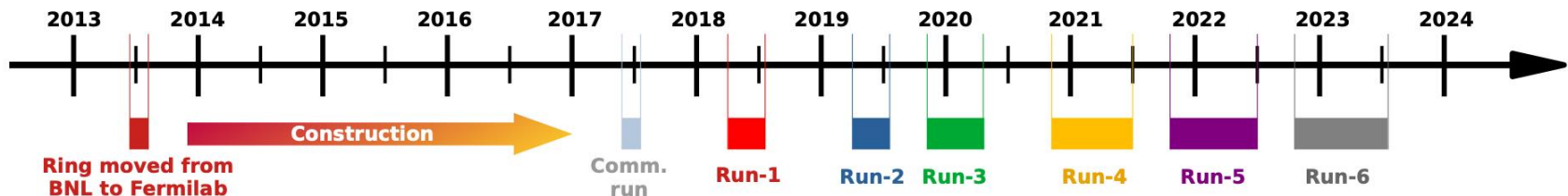
L'analisi viene eseguita 'a la cieca'

$$\frac{\omega_a}{\tilde{\omega}_p} = \left(\frac{f_{\text{clock}} \omega_a (1 + C_e + C_p + C_{\text{dd}} + C_{\text{ml}} + C_{\text{pa}})}{(1 + B_{\text{QT}} + B_{\text{Eddy}}) f_{\text{field}} \omega_p \otimes \rho(\mathbf{r})} \right)$$

- f_{clock} è la frequenza a cui batte l'orologio dell'esperimento
 - Orologio di precisione, stabile a livello di ppt
- Per l'intera durata dell'analisi la frequenza dell'orologio è stata tenuta nascosta a tutta la collaborazione
 - Joe Lykken e Greg Bock (Direzione FNAL) si fermano ogni settimana per controllare l'orologio
 - 2 buste contenenti il valore di f_{clock} sono state conservate in segreto fino al completamento dell'analisi fisica, pronte per essere aperte (25 febbraio) a conclusione dell'analisi 'alla cieca'.



Muon g-2 Operation



05/09/24

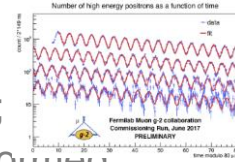
P. Girotti | Muon g-2 Experiment

60

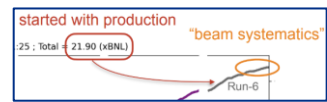
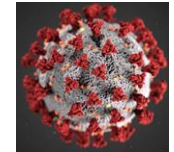
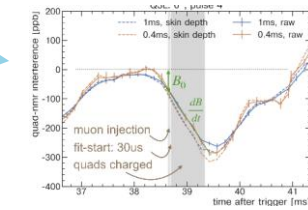
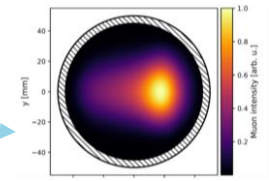
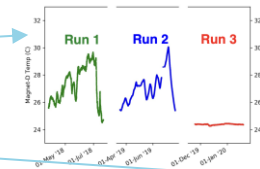
Muon g-2 Operation

2017 – 2023: The Running Years (goal is 21x BNL stats)

- **2017:** 38 days of commissioning;
 - Everything “works” but very low muon storage rate;
 - “Where have all the Muons gone?” → Task Force formed
- **2018:** Run1 – some rough spots
 - 2/32 bad quad resistors
 - Unstable hall temp wild; field and detector gains impacted
 - Kicker sparks → storage well off center
- **2019:** Run2 – improvements; temp smoothed a bit, still need better kick
 - Discovered “Quad-Transient” effect ! yikes
- **2020:** Run3 – HVAC upgrade! Kicker better; **COVID !!!!**
- **2021:** Run4 – Kicker finalized; long stable run, 5.5 BNLs
- **2022:** Run5 – RF -> reduced CBO;
- **2023:** Run6 – ~~Negative Muons!~~; well actually μ^+ & lots of (important) systematics runs



1/70th of design rate!



D. Hertzog - Fermilab– 12 December 2024

Run 1 - 4 articoli su PR il 7 Aprile 2021 (>1700 citazioni)

Beam dynamics corrections to the Run-1 measurement of the muon anomalous magnetic moment at Fermilab

PRAB

T. Albahri,³⁰ A. Anastasi,¹⁰ K. Badgley,⁷ S. Baeßler,^{36, a} I. Bailey,^{17, b} V. A. Baranov,¹⁵ E. Barlas-Yucel,²⁸
 T. Barrett,⁶ F. Bedeschi,¹⁰
 T. Bowcock,³⁰ G. Cantatore,¹³
 A. Chapelain,⁶ S. Charity,⁷
 J. D. Crnkovic,³⁴ S. Dabaja,¹⁰
 A. Driutti,^{26, 29} V. N. Dugin,¹⁷
 A. Fiedler,²⁰ A. T. Fiedler,^{10, b} M. D. Gabbani,^{10, b} M. D. Giovanetti,¹³ P. S. Hacıomeroglu,⁵ T. D. W. Hertzog,³⁷ G. Heske,⁴⁸ M. Iacovacci,^{9, k} M. Incagli,^{11, 14} M. D. Kelton,²⁹ A. Keshavarzi,⁷ O. Kim,¹⁵ K. R. N. Kuchinskiy,¹⁵ K. R. Li,^{22, e} I. Logashenko,^{4, g} B. MacCoy,³⁷ R. Madrak,⁷ W. M. Morse,³ J. Mott,^{2, 7} G. M. Piacentino,^{25, p} B. Quinn,³⁴ N. Raha,¹⁰ S. R. N. Ramachandran,¹ D. Stöckinger,²⁸ G. Sweetmore,³¹ D. A. Swartz,⁴⁰ K. Thomson,³⁰ V. Tishchenko,³ G. Venanzoni,¹⁰ T. Walton

Magnetic Field Measurement and Analysis for the Muon $g-2$ Experiment at Fermilab

PRA

T. Albahri,³⁹ A. Anastasi,^{11, a} K. Badgley,⁷ S. Baeßler,^{47, b} I. Bailey,^{19, c} V. A. Baranov,¹⁷ E. Barlas-Yucel,³⁷
 T. Barrett,⁶ F. Bedeschi,¹¹ M. Berz,²⁰ M. Bhattacharya,⁴³ H. P. Binney,⁴⁸ P. Bloom,²¹ J. Bono,⁷ E. Botalico,^{11, 32}
 T. Bowcock,³⁹ G. Cantatore,¹³
 A. Chapelain,⁶ S. Charity,⁷
 L. Cotrozzi,^{11, 32} J. D. Crnkovic,³⁷
 R. Di Stefano,^{10, 30} A. Driutti,²⁶
 C. Ferrari,^{11, 14} M. Fertl,⁴⁸
 C. Gabbani,^{11, 14} M. D. Galea,¹⁵ P. G. K. L. Giovanetti,¹⁵ P. S. Hacıomeroglu,⁵ T. D. W. Hertzog,³⁷ G. Heske,⁴⁸ M. Iacovacci,^{10, 31} M. Incagli,^{11, 14} M. D. Kelton,²⁹ A. Keshavarzi,⁷ O. Kim,¹⁵ K. R. N. Kuchinskiy,¹⁵ K. R. Labe,⁶ J. LaBouffere,¹⁰ I. Logashenko,^{4, g} A. Lorente Sastre,^{4, h} R. Madrak,⁷ K. Makino,²⁰ J. Mott,^{2, 7} A. Nath,^{10, 31} R. N. Pilato,^{11, 32} K. T. Pitts,³⁷ N. Raha,¹¹ S. Ramachandran,¹ C. Schlesier,³⁷ A. Schreyer,¹⁰ M. Sorbara,^{12, 33} D. Stöckinger,²⁸ G. Sweetmore,⁴⁰ D. A. Swartz,⁴⁰ K. Thomson,³⁹ V. Tishchenko,³ G. Venanzoni,¹¹ T. Walton

Measurement of the anomalous precession frequency of the muon in the Fermilab Muon $g-2$ experiment

PRD

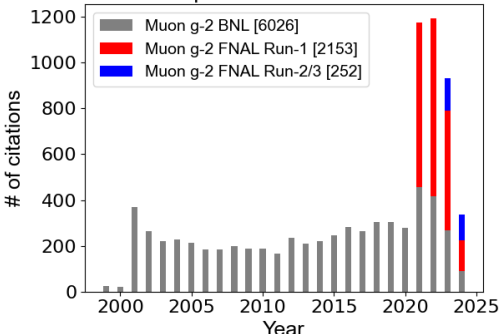
T. Albahri,³⁹ A. Anastasi,^{11, a} A. Anisenkov,^{4, b} K. Badgley,⁷ S. Baeßler,^{47, c} I. Bailey,^{19, d} V. A. Baranov,¹⁷
 E. Barlas-Yucel,³⁷ T. Barrett,⁶ P. Bloom,²¹ J. Bono,⁷ E. Botalico,^{11, 32} R. Chakraborty,³⁸ S. D. Cauz,^{35, 8} R. Corradi,⁹ S. E. Chupp,⁴² S. Corrodi,¹ L. Cotrozzi,^{11, 32} G. Di Sciascio,¹² R. Di Stefano,^{10, 30} B. Drendel,⁷ A. Driutti,^{26, 29} V. N. Dugin,¹⁷ M. Eads,²² M. Farooq,⁴² R. Fatemi,³⁸ C. Ferrai,^{11, 32} J. Fry,⁴⁷ C. Gabbani,^{11, 14} M. D. Galati,^{11, 32} S. Ganguly,^{37, 7} A. Garcia,⁴⁸ D. E. Gastler,² J. George,⁴¹ L. K. Gibbons,⁶ A. Gioiosa,^{29, 11} K. L. Giovanetti,¹⁵ P. Girotti,^{11, 32} W. Gohn,³⁸ T. Goringe,³⁸ J. Grange,^{1, 42} S. Grant,³⁶ F. Gray,²⁴ S. Hacıomeroglu,⁵ D. Hahn,⁷ T. Halewood-Leagas,³⁹ D. Hampai,⁹ F. Han,³⁸ E. Hazen,² J. Hempstead,⁴⁸ S. Henry,⁴⁴ A. T. Herrod,^{39, d} D. W. Hertzog,⁴⁸ G. Heske,⁴⁸ A. Hibbert,³⁹ Z. Hodge,⁴⁸ J. L. Holzbauer,⁴³ K. W. Hong,⁴⁷ R. Hong,^{1, 38} M. Iacovacci,^{10, 31} M. Incagli,¹¹ C. Johnstone,⁷ J. A. Johnstone,⁷ P. Kammel,⁴⁸ M. Kargiantoulakis,⁷ M. Karuza,^{13, 45} J. Kaspar,⁴⁸ D. Kawall,⁴¹ L. Kelton,³⁸ A. Keshavarzi,⁴⁰ D. Kessler,⁴¹ K. S. Khaw,^{27, 26, 48, e} Z. Khechadorian,⁶ N. V. Khomutov,¹⁷ B. Kiburg,⁷ M. Kiburg,⁷ O. Kim,^{15, 5} S. C. Kim,⁶ Y. I. Kim,⁵ B. King,^{39, a} N. Kinnaird,² M. Korostelev,^{19, d} I. Kourbanis,⁷ E. Kraegeloh,⁴² V. A. Krylov,¹⁷ A. Kuchibhotla,³⁷ N. A. Kuchinskiy,¹⁷ K. R. Labe,⁶ J. LaBounty,⁴⁸ M. Lancaster,⁴⁰ M. J. Lee,⁵ S. Lee,⁵ S. Leo,³⁷ B. Li,^{26, 1, e} D. Li,^{26, 8} L. Li,^{26, e} I. Logashenko,^{4, b} A. Lorente Campos,³⁸ A. Lucà,⁷ G. Lukicov,³⁶ G. Luo,²² A. Lusiani,^{11, 25} A. L. Lyon,⁷ B. MacCoy,⁴⁸ R. Madrak,⁷ K. Makino,²⁰ F. Marignetti,^{10, 30} S. Mastroianni,¹⁰ S. Maxfield,³⁹ M. McEvoy,²² W. Merritt,⁷ A. A. Mikhailichenko,^{6, a} J. P. Miller,² S. Miozzi,¹² J. P. Morgan,⁷ W. M. Morse,³ J. Mott,^{2, 7} E. Motuk,³⁶ A. Nath,^{10, 31} D. Newton,^{39, h} H. Nguyen,⁷ M. Oberling,¹ R. Osofsky,⁴⁸ J.-F. Ostiguy,⁷ S. Park,⁵ G. Pauletta,^{35, 8} G. M. Piacentino,^{29, 12} R. N. Pilato,^{11, 32} K. T. Pitts,³⁷ B. Plaster,³⁸ D. Počanić,⁴⁷ N. Pohlman,²² C. C. Polly,⁷ M. Popovic,⁷ J. Price,³⁹ B. Quinn,⁴³ N. Raha,¹¹ S. Ramachandran,¹ E. Ramberg,⁷ N. T. Rider,⁶ J. L. Ritchie,⁴⁶ B. L. Roberts,² D. M. Rubin,⁶ L. Santi,^{35, 8} D. Sathyan,² H. Schellman,^{23, i} C. Schlesier,³⁷ A. Schreckenberger,^{46, 2, 37} Y. K. Semertzidis,^{5, 18} Y. M. Shatunov,⁴ D. Shemyakin,^{4, b} M. Shenk,²² D. Sim,³⁹ M. W. Smith,^{48, 11} A. Smith,³⁹ A. K. Soha,⁷ M. Sorbara,^{12, 33} D. Stöckinger,²⁸ J. Stapleton,⁷ D. Still,⁷ C. Stoughton,⁷ D. Stratakis,⁷ C. Strohmman,⁶ T. Stuttard,³⁶ H. E. Swanson,⁴⁸ G. Sweetmore,⁴⁰ D. A. Swartz,⁴⁰ M. J. Syphers,^{22, 7} D. A. Tarazona,²⁰ T. Teubner,³⁹ A. E. Tewsley-Booth,⁴² K. Thomson,³⁹ V. Tishchenko,³ N. H. Tran,² W. Turner,³⁹ E. Valetov,^{20, 19, 27, d} D. Vasilkova,³⁶ G. Venanzoni,¹¹ V. P. Volnykh,¹⁷ T. Walton,⁷ M. Warren,³⁶ A. Weisskopf,²⁰ L. Welty-Rieger,⁷ M. Whitley,³⁹ P. Winter,¹ A. Wolski,^{39, 4} M. Wormald,³⁹ W. Wu,⁴³ and C. Yoshikawa⁷

Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm

PRL

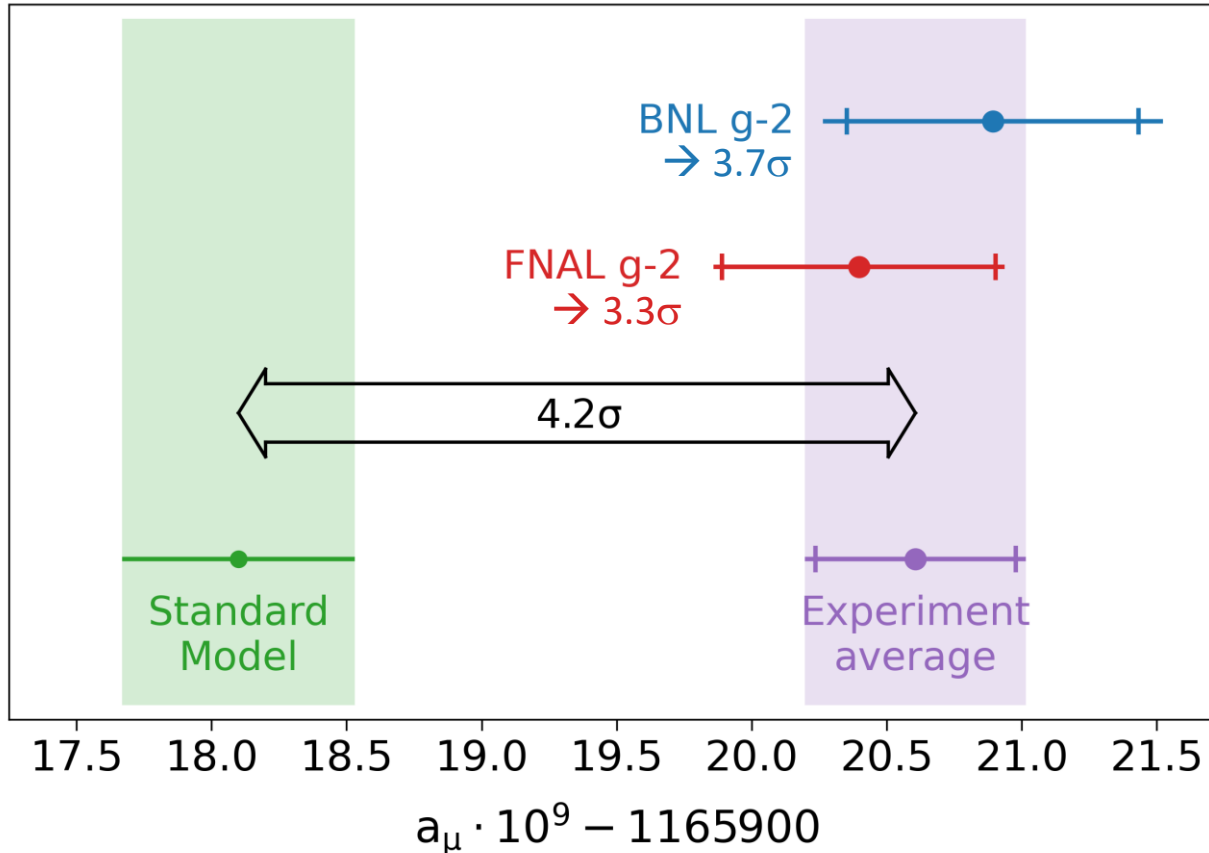
B. Abi,⁴⁴ T. Albahri,³⁹ S. Al-Kilani,³⁶ D. Allspach,⁷ L. P. Alonzi,⁴⁸ A. Anastasi,^{11, a} A. Anisenkov,^{4, b} F. Azfar,⁴⁴ K. Badgley,⁷ S. Baeßler,^{47, c} I. Bailey,^{19, d} V. A. Baranov,¹⁷ E. Barlas-Yucel,³⁷ T. Barrett,⁶ E. Barzi,⁷ A. Basti,^{11, 32} F. Bedeschi,¹¹ A. Behnke,²² M. Berz,²⁰ M. Bhattacharya,⁴³ H. P. Binney,⁴⁸ R. Bjorkquist,⁶ P. Bloom,²¹ J. Bono,⁷ E. Botalico,^{11, 32} T. Bowcock,³⁹ D. Boyden,²² G. Cantatore,^{13, 34} R. M. Carey,² J. Carroll,³⁹ B. C. K. Casey,⁷ D. Cauz,^{35, 8} S. Ceravolo,⁹ R. Chakraborty,³⁸ S. P. Chang,^{18, 5} A. Chapelain,⁶ S. Chappa,⁷ S. Charity,⁷ R. Chislett,³⁶ J. Choi,⁵ Z. Chu,^{26, e} T. E. Chupp,⁴² M. E. Convery,⁷ A. Conway,⁴¹ G. Corradi,⁹ S. Corrodi,¹ L. Cotrozzi,^{11, 32} J. D. Crnkovic,^{3, 37, 43} S. Dabagov,^{9, f} P. M. De Lurgio,¹ P. T. Debevec,³⁷ S. Di Falco,¹¹ P. Di Meo,¹⁰ G. Di Sciascio,¹² R. Di Stefano,^{10, 30} B. Drendel,⁷ A. Driutti,^{26, 29} V. N. Dugin,¹⁷ M. Eads,²² N. Eggert,⁶ A. Epps,²² J. Esquivel,⁷ M. Farooq,⁴² R. Fatemi,³⁸ C. Ferrai,^{11, 32} M. Fertl,^{48, 16} A. Fiedler,²² A. T. Fienberg,⁴⁸ A. Fioretti,^{11, 14} D. Flay,⁴¹ S. B. Foster,² H. Friedsam,⁷ E. Frlez,⁴⁷ N. S. Froemming,^{48, 22} J. Fry,⁴⁷ C. Fu,^{26, e} C. Gabbani,^{11, 14} M. D. Galati,^{11, 32} S. Ganguly,^{37, 7} A. Garcia,⁴⁸ D. E. Gastler,² J. George,⁴¹ L. K. Gibbons,⁶ A. Gioiosa,^{29, 11} K. L. Giovanetti,¹⁵ P. Girotti,^{11, 32} W. Gohn,³⁸ T. Goringe,³⁸ J. Grange,^{1, 42} S. Grant,³⁶ F. Gray,²⁴ S. Hacıomeroglu,⁵ D. Hahn,⁷ T. Halewood-Leagas,³⁹ D. Hampai,⁹ F. Han,³⁸ E. Hazen,² J. Hempstead,⁴⁸ S. Henry,⁴⁴ A. T. Herrod,^{39, d} D. W. Hertzog,⁴⁸ G. Heske,⁴⁸ A. Hibbert,³⁹ Z. Hodge,⁴⁸ J. L. Holzbauer,⁴³ K. W. Hong,⁴⁷ R. Hong,^{1, 38} M. Iacovacci,^{10, 31} M. Incagli,¹¹ C. Johnstone,⁷ J. A. Johnstone,⁷ P. Kammel,⁴⁸ M. Kargiantoulakis,⁷ M. Karuza,^{13, 45} J. Kaspar,⁴⁸ D. Kawall,⁴¹ L. Kelton,³⁸ A. Keshavarzi,⁴⁰ D. Kessler,⁴¹ K. S. Khaw,^{27, 26, 48, e} Z. Khechadorian,⁶ N. V. Khomutov,¹⁷ B. Kiburg,⁷ M. Kiburg,⁷ O. Kim,^{15, 5} S. C. Kim,⁶ Y. I. Kim,⁵ B. King,^{39, a} N. Kinnaird,² M. Korostelev,^{19, d} I. Kourbanis,⁷ E. Kraegeloh,⁴² V. A. Krylov,¹⁷ A. Kuchibhotla,³⁷ N. A. Kuchinskiy,¹⁷ K. R. Labe,⁶ J. LaBounty,⁴⁸ M. Lancaster,⁴⁰ M. J. Lee,⁵ S. Lee,⁵ S. Leo,³⁷ B. Li,^{26, 1, e} D. Li,^{26, 8} L. Li,^{26, e} I. Logashenko,^{4, b} A. Lorente Campos,³⁸ A. Lucà,⁷ G. Lukicov,³⁶ G. Luo,²² A. Lusiani,^{11, 25} A. L. Lyon,⁷ B. MacCoy,⁴⁸ R. Madrak,⁷ K. Makino,²⁰ F. Marignetti,^{10, 30} S. Mastroianni,¹⁰ S. Maxfield,³⁹ M. McEvoy,²² W. Merritt,⁷ A. A. Mikhailichenko,^{6, a} J. P. Miller,² S. Miozzi,¹² J. P. Morgan,⁷ W. M. Morse,³ J. Mott,^{2, 7} E. Motuk,³⁶ A. Nath,^{10, 31} D. Newton,^{39, h} H. Nguyen,⁷ M. Oberling,¹ R. Osofsky,⁴⁸ J.-F. Ostiguy,⁷ S. Park,⁵ G. Pauletta,^{35, 8} G. M. Piacentino,^{29, 12} R. N. Pilato,^{11, 32} K. T. Pitts,³⁷ B. Plaster,³⁸ D. Počanić,⁴⁷ N. Pohlman,²² C. C. Polly,⁷ M. Popovic,⁷ J. Price,³⁹ B. Quinn,⁴³ N. Raha,¹¹ S. Ramachandran,¹ E. Ramberg,⁷ N. T. Rider,⁶ J. L. Ritchie,⁴⁶ B. L. Roberts,² D. M. Rubin,⁶ L. Santi,^{35, 8} D. Sathyan,² H. Schellman,^{23, i} C. Schlesier,³⁷ A. Schreckenberger,^{46, 2, 37} Y. K. Semertzidis,^{5, 18} Y. M. Shatunov,⁴ D. Shemyakin,^{4, b} M. Shenk,²² D. Sim,³⁹ M. W. Smith,^{48, 11} A. Smith,³⁹ A. K. Soha,⁷ M. Sorbara,^{12, 33} D. Stöckinger,²⁸ J. Stapleton,⁷ D. Still,⁷ C. Stoughton,⁷ D. Stratakis,⁷ C. Strohmman,⁶ T. Stuttard,³⁶ H. E. Swanson,⁴⁸ G. Sweetmore,⁴⁰ D. A. Swartz,⁴⁰ M. J. Syphers,^{22, 7} D. A. Tarazona,²⁰ T. Teubner,³⁹ A. E. Tewsley-Booth,⁴² K. Thomson,³⁹ V. Tishchenko,³ N. H. Tran,² W. Turner,³⁹ E. Valetov,^{20, 19, 27, d} D. Vasilkova,³⁶ G. Venanzoni,¹¹ V. P. Volnykh,¹⁷ T. Walton,⁷ M. Warren,³⁶ A. Weisskopf,²⁰ L. Welty-Rieger,⁷ M. Whitley,³⁹ P. Winter,¹ A. Wolski,^{39, 4} M. Wormald,³⁹ W. Wu,⁴³ and C. Yoshikawa⁷

Last updated on 2024-06-01



Risultato RUN1

$$a_\mu(\text{SM}) = 0.00116591810(43) \rightarrow 368 \text{ ppb}$$



- Individual tension with SM
 - BNL: 3.7σ
 - FNAL: 3.3σ

$$a_\mu(\text{Exp}) - a_\mu(\text{SM}) = 0.00000000251(59) \rightarrow 4.2\sigma$$

Sistematiche del Run 1

Quantity	Correction Terms (ppb)	Uncertainty (ppb)
ω_a^m (statistical)	–	434
ω_a^m (systematic)	–	56
C_e	489	53
C_p	180	13
C_{ml}	-11	5
C_{pa}	-158	75
$f_{\text{calib}} \langle \omega_p(x, y, \phi) \times M(x, y, \phi) \rangle$	–	56
B_k	-27	37
B_q	-17	92
$\mu'_p(34.7^\circ)/\mu_e$	–	10
m_μ/m_e	–	22
$g_e/2$	–	0
Total systematic	–	157
Total fundamental factors	–	25
Totals	544	462

- 462 ppb errore complessivo
 - 434 ppb statistico
 - 157 ppb sistematico
 - 25 ppb CODATA inputs
- Risultati del Run 1 sono ampiamente dominati dall'errore statistico
- 157 ppb errore sistematico
 - Circa la metà di BNL
 - Non ancora a 100 ppb

Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.20 ppm

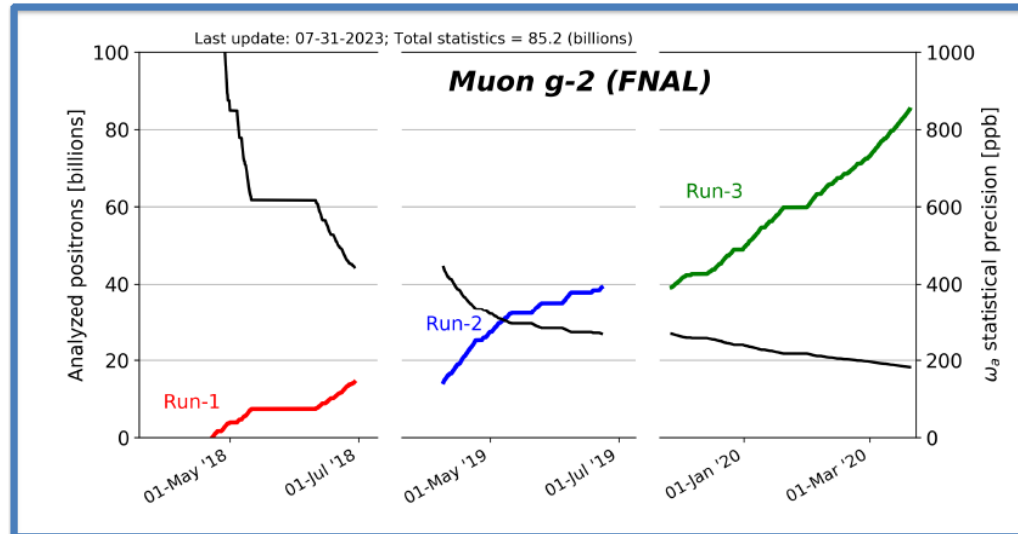
D. P. Aguillard³³, T. Albahri³⁰, D. Allspach⁷, A. Anisenkov^{4,a}, K. Badgley⁷, S. Baeßler^{35,b}, I. Bailey^{17,c},
L. Bailey²⁷, V. A. Baranov^{15,d}, E. Barlas-Yucel²⁸, T. Barrett⁶, E. Barzi⁷, F. Bedeschi¹⁰, M. Berz¹⁸,
M. Bhattacharya⁷, H. P. Binney³⁶, P. Bloom¹⁹, J. Bono⁷, E. Bottalico³⁰, T. Bowcock³⁰, S. Braun³⁶,
M. Bressler³², G. Cantatore^{12,e}, R. M. Carey², B. C. K. Casey⁷, D. Cauz^{26,f}, R. Chakraborty²⁹, A. Chapelain⁶,
S. Chappa⁷, S. Charity³⁰, C. Chen^{23,22}, M. Cheng²⁸, R. Chislett²⁷, Z. Chu^{22,g}, T. E. Chupp³³, C. Claessens³⁶,
M. E. Convery⁷, S. Corrodi¹, L. Cotrozzi^{10,h}, J. D. Crnkovic⁷, S. Dabagov^{8,i}, P. T. Debevec²⁸, S. Di Falco¹⁰,
G. Di Sciascio¹¹, B. Drendel⁷, A. Driutti^{10,h}, V. N. Duginov^{15,d}, M. Eads²⁰, A. Edmonds², J. Esquivel⁷

Detailed report on the measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.20 ppm

D. P. Aguillard³³, T. Albahri³⁰, D. Allspach⁷, A. Anisenkov^{4,a}, K. Badgley⁷, S. Baeßler^{35,b}, I. Bailey^{17,c},
L. Bailey²⁷, V. A. Baranov^{15,*}, E. Barlas-Yucel²⁸, T. Barrett⁶, E. Barzi⁷, F. Bedeschi¹⁰, M. Berz¹⁸,
M. Bhattacharya⁷, H. P. Binney³⁶, P. Bloom¹⁹, J. Bono⁷, E. Bottalico^{30,d}, T. Bowcock³⁰, S. Braun³⁶,
M. Bressler³², G. Cantatore^{12,e}, R. M. Carey², B. C. K. Casey⁷, D. Cauz^{26,f}, R. Chakraborty²⁹, A. Chapelain⁶,
S. Chappa⁷, S. Charity³⁰, C. Chen^{23,22}, M. Cheng²⁸, R. Chislett²⁷, Z. Chu^{22,g}, T. E. Chupp³³, C. Claessens³⁶,
M. E. Convery⁷, S. Corrodi¹, L. Cotrozzi^{10,h}, J. D. Crnkovic⁷, S. Dabagov^{8,i}, P. T. Debevec²⁸, S. Di Falco¹⁰,
G. Di Sciascio¹¹, B. Drendel⁷, A. Driutti^{10,h}, V. N. Duginov^{15,d}, M. Eads²⁰, A. Edmonds², J. Esquivel⁷

Risultato Run 2+3: Statistica

Number of e^+
with $E > 1$ GeV
 $t > 30 \mu\text{s}$

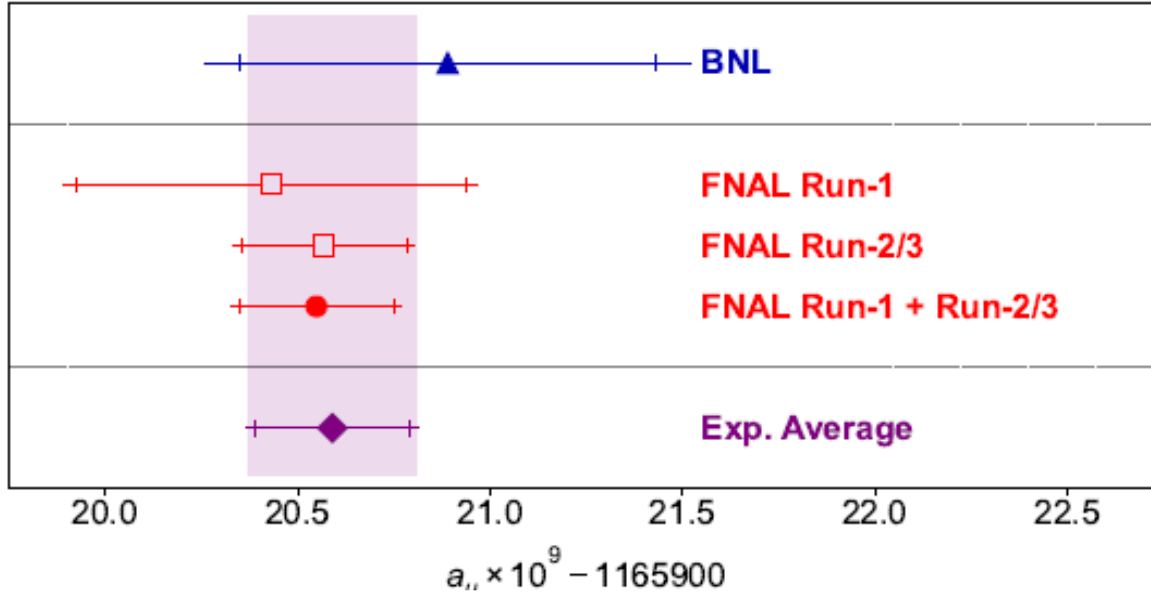


Dataset	Statistical Error [ppb]
Run-1	434
Run-2/3	201
Run-1 + Run-2/3	185

Factor 4.7 more data
in Run-2/3 than Run-1

Risultato Run 2+3

$$a_{\mu}(\text{FNAL; Run-2/3}) = 0.00\ 116\ 592\ 057(25) \text{ [215 ppb]}$$



- Ottimo accordo con Run-1 e BNL!
- Incertezza più che dimezzata a 215 ppb
- Entrambi i valori FNAL dominati dall'errore statistico
- Si assume sistematica non correlata e si combina...

Run	$\omega_a/2\pi$ [Hz]	$\tilde{\omega}'_p/2\pi$ [Hz]	$\mathcal{R}'_{\mu} \times 1000$
Run-1			3.7073004(17)
Run-2	229077.408(79)	61790875.0(3.3)	3.7073016(13)
Run-3a	229077.591(68)	61790957.5(3.3)	3.7072996(11)
Run-3b	229077.81(11)	61790962.3(3.3)	3.7073029(18)
Run-2/3			3.70730088(79)
Run-1/2/3			3.70730082(75)

TABLE II. Measurements of ω_a , $\tilde{\omega}'_p$, and their ratios \mathcal{R}'_{μ} multiplied by 1000. The Run-1 value has been updated from [1] as described in the text.

$$a_{\mu} = \frac{\omega_a}{\tilde{\omega}'_p(T_r)} \frac{\mu'_p(T_r)}{\mu_e(H)} \frac{\mu_e(H)}{\mu_e} \frac{m_{\mu}}{m_e} \frac{g_e}{2}$$

$$\mathcal{R}'_{\mu} = \omega_a / \tilde{\omega}'_p(T_r), \text{ where } T_r = 34.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Run 2/3 - Correzioni e sistematica

Quantity	Correction (ppb)	Uncertainty (ppb)
ω_a^m (statistical)	...	201
ω_a^m (systematic)	...	25
C_e	451	32
C_p	170	10
C_{pa}	-27	13
C_{dd}	-15	17
C_{ml}	0	3
$f_{\text{calib}} \cdot \langle \omega'_p(\vec{r}) \times M(\vec{r}) \rangle$...	46
B_k	-21	13
B_q	-21	20
$\mu'_p(34.7^\circ)/\mu_e$...	11
m_μ/m_e	...	22
$g_e/2$...	0
Total systematic for \mathcal{R}'_μ	...	70
Total external parameters	...	25
Total for a_μ	622	215

Incertezza totale **215 ppb**

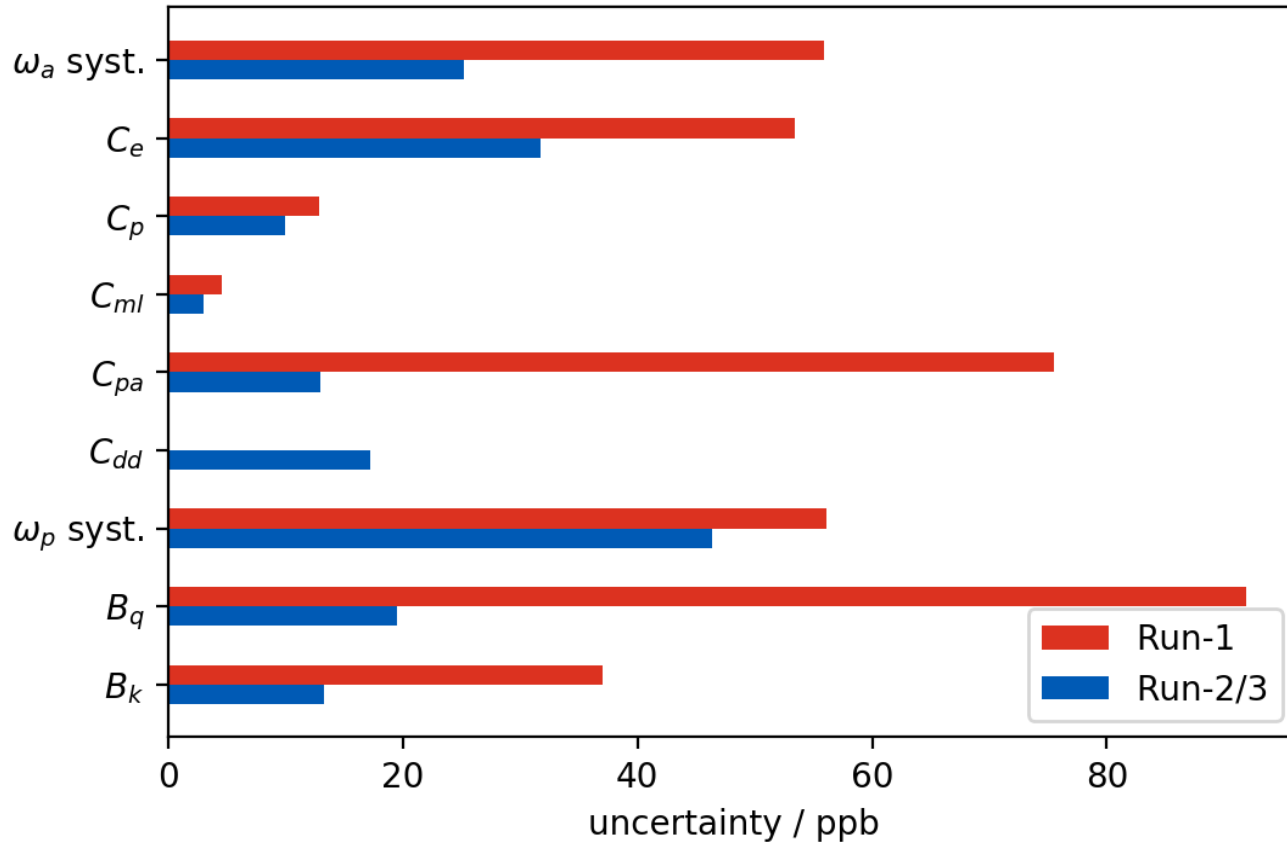
[ppb]	Run-1	Run-2/3	Ratio
Stat.	434	201	2.2
Syst.	157	70	2.2

All'incirca uguale
miglioramento su Stat. e
Syst. : Stat. ancora
dominante

Sistematica a 70 ppb già inferior ai 100 ppb di progetto!

Run 2+3 e Run1: Sistematiche a confronto

$a\mu(\text{FNAL}; \text{Run-2/3}) = 0.00\ 116\ 592\ 057(25)$ [215 ppb]

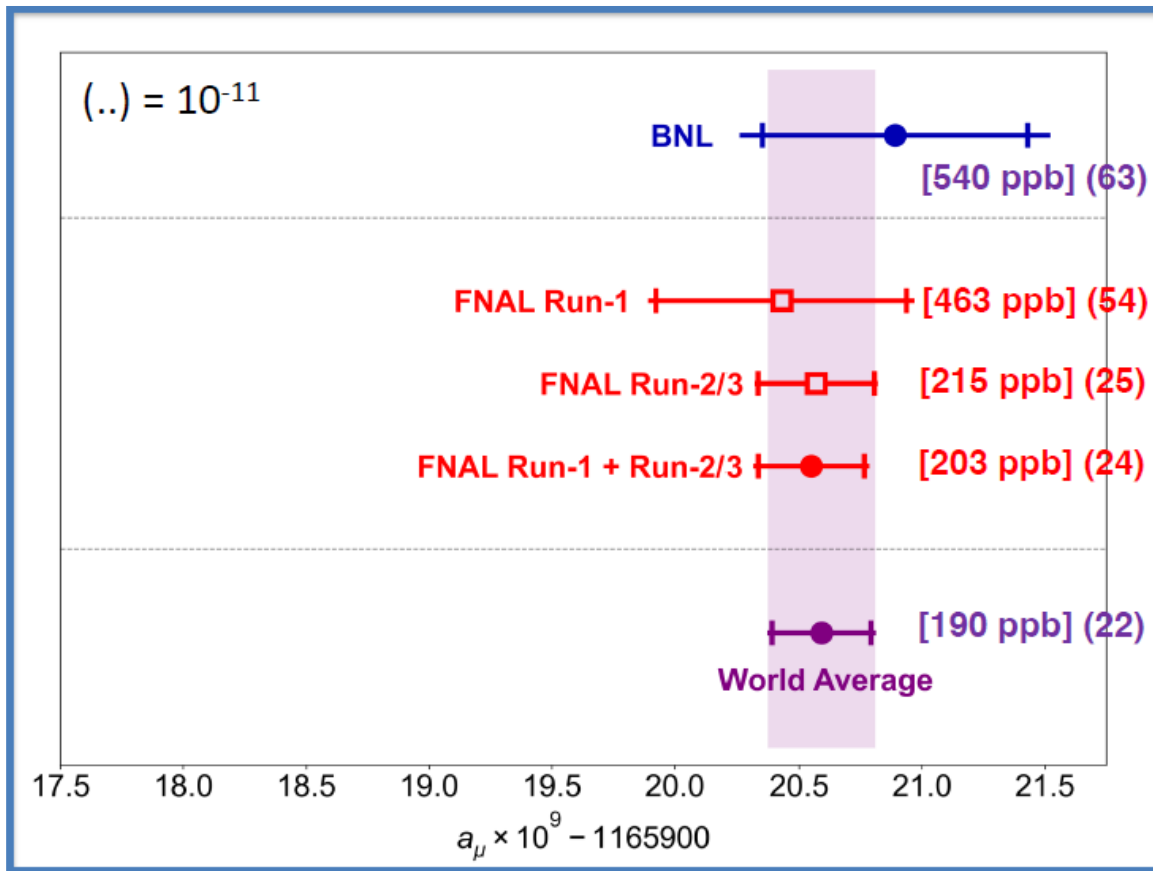


Risultato Run 2+3 e Combinazioni

$$a_{\mu}(\text{FNAL}; \text{Run-2/3}) = 0.00116\ 592\ 057(25) \text{ [215 ppb]}$$

$$a_{\mu}(\text{FNAL}; \text{Run 1+2+3}) = 0.00116\ 592\ 055(24) \text{ [203 ppb]}$$

$$a_{\mu}(\text{Exp}) = 0.00116592059(22) \text{ [190 ppb]}$$



- Combinazione FNAL : **203 ppb** incertezza
- Entrambi FNAL e BNL dominati dall'errore statistico
- World Average **dominato dal valore di FNAL**

Confronto con Predizioni SM (2023)

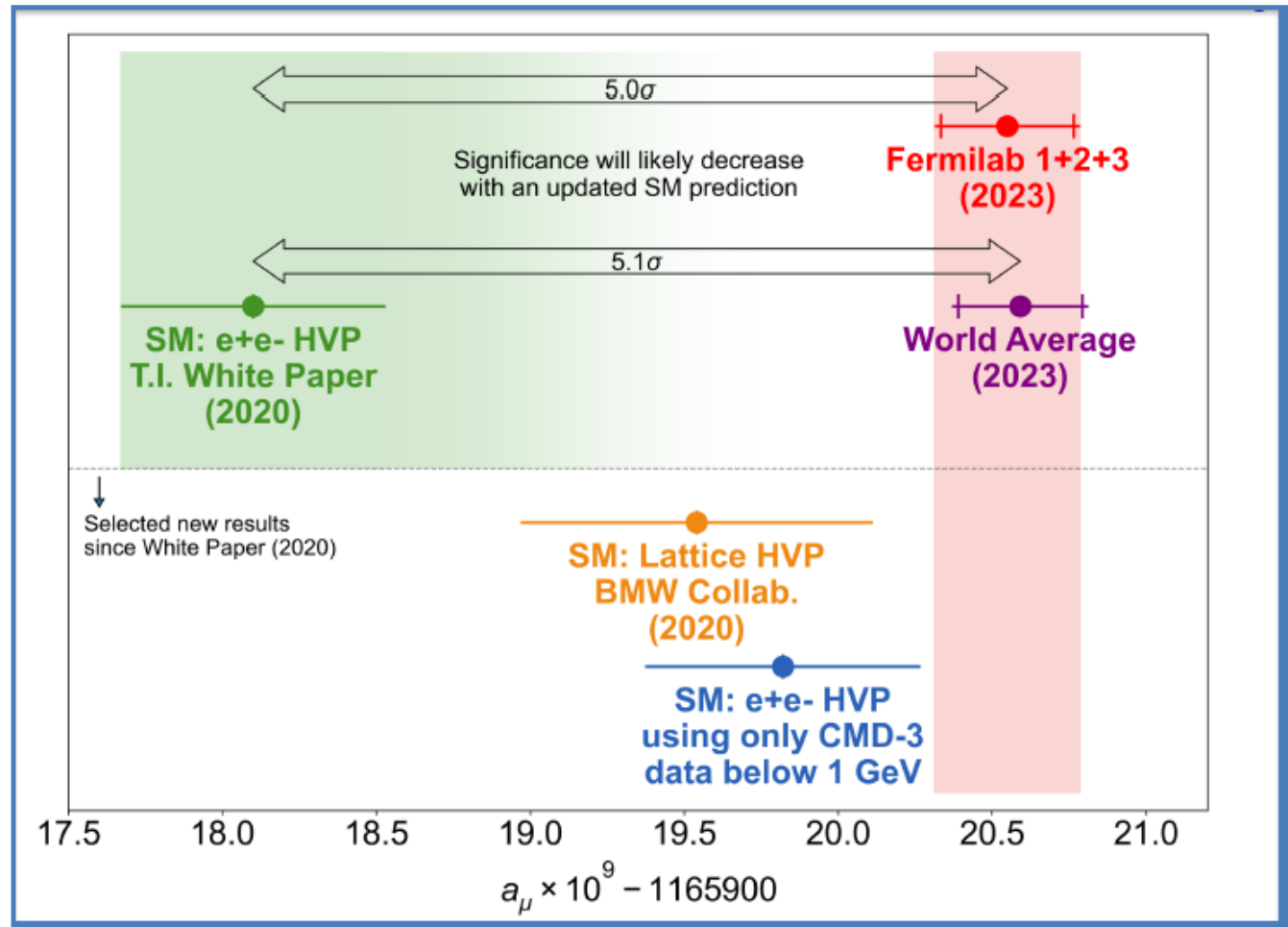
Theory Initiative
(WP20):

T. Aoyama et al.
Phys. Rept. 887
(2020)

HVP based on e+e-
hadronic cross
section data

BMW Coll. (2020):
HVP stimato su
Lattice QCD,
Incertezza 0.4 ppm

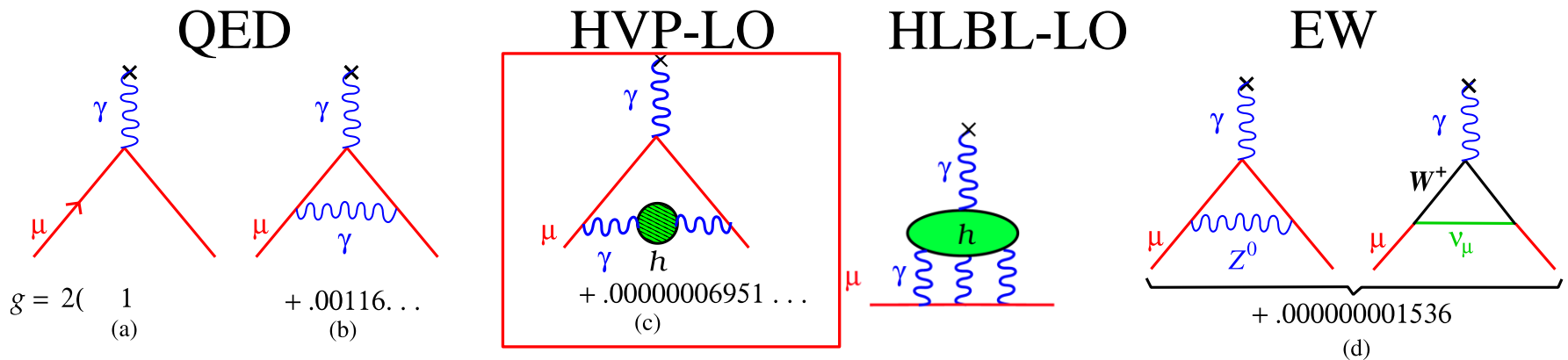
CMD3 Esp.
HVP based on e+e-
hadronic cross
section data



... è chiaro che qualcosa va capita!!!

Correzioni radiative SM

- Tutte le forze del Modello Standard contribuiscono a a_μ
- I contributi QED e Weak sono ben compresi.
- Il contributo adronico di ordine più basso è purtroppo in uno stato «non definito»



Contributi QED ed EW hanno errore circa 0.1×10^{-11} e 1×10^{-11} Sorprendentemente il contributo adronico HLBL è abbastanza ben noto e condiviso ($92(19) \times 10^{-11}$).
 Problema è HVP-LO

Calcolo HVP: Metodo dispersivo (e+e-)

$$a_{\mu}^{\text{HVP,LO}} = \frac{\alpha^2}{3\pi^2} \int_{s_{th}}^{\infty} \frac{K(s)}{s} R(s) ds$$

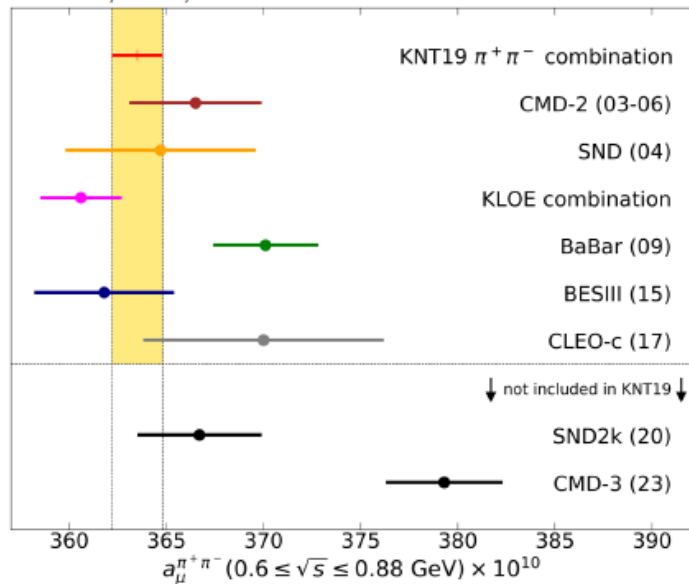
Hadronic R-ratio
(Data Driven)

$$K(s) \sim 1/s$$

$$R(s) = \frac{\sigma^0(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \text{hadrons})}{4\pi\alpha^2/3s}$$

- Calcolato dai dati per $\sigma(e+e- \rightarrow \text{adroni})$
- Utilizza i dati di diversi esperimenti di 20+ anni
- 1/s pesa fortemente a bassa energia: 73% da canale $\pi + \pi^-$

Keshavarzi, Nomura, Teubner: Priv. Comm.



- Dati provenienti da **CMD-2, SND, KLOE, BaBar, BESIII e CLEO-C** sono stati inclusi nel WP20

$$a_{\mu}^{\text{HVP;LO}} = 6931 (40) \times 10^{-11} (0.6\%) \text{ (wp20)}$$

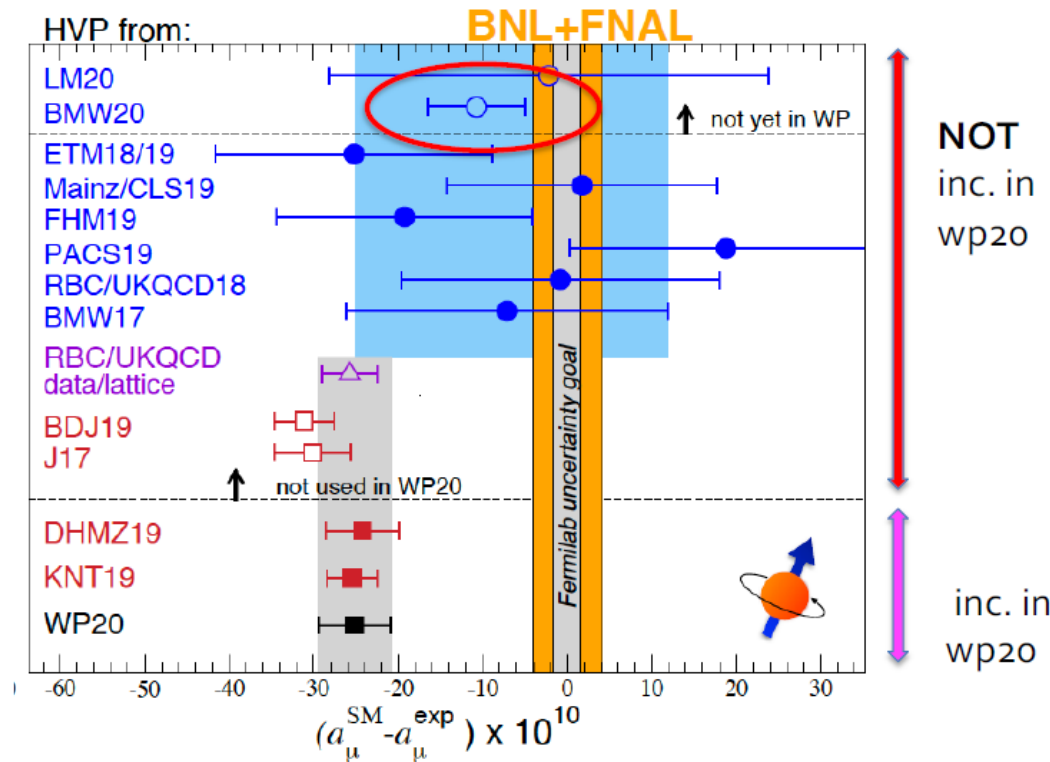
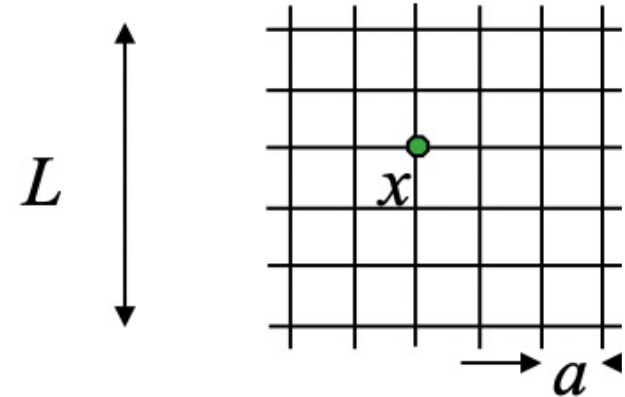
- New results from **SND2k** and **CMD-3 after wp20**
- **CMD-3** is different from all the other data

Calcolo di HVP sul reticolo

- Calcolo «ab-initio» dell'HVP sul reticolo

G. Colangelo et al.

<https://arxiv.org/pdf/2203.15810.pdf>



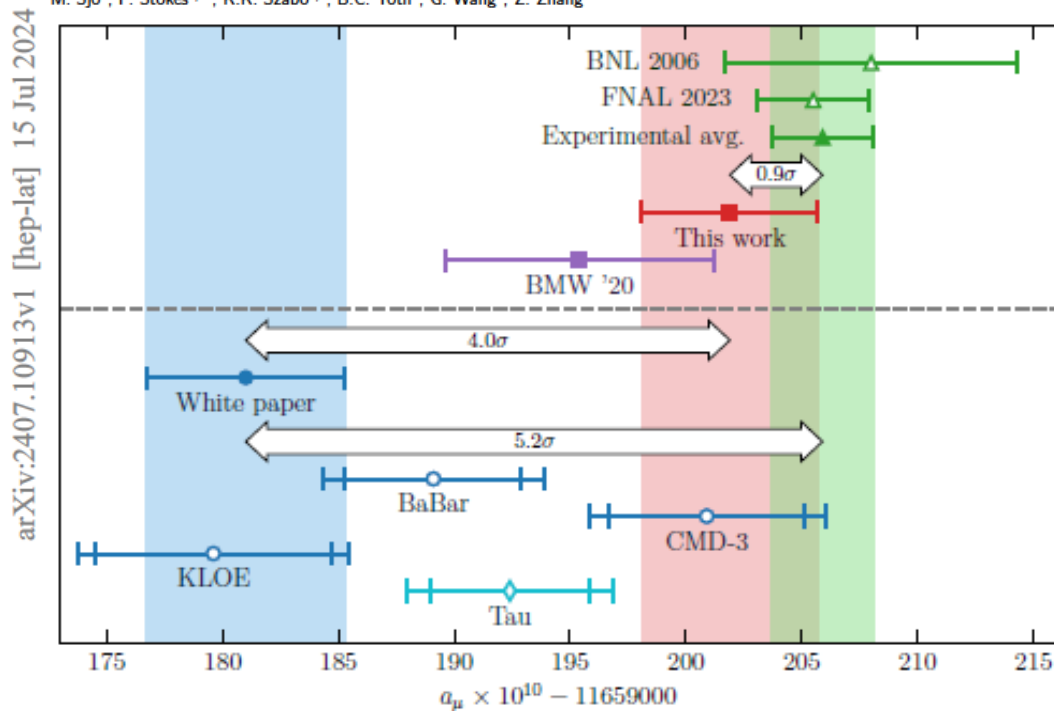
- Tutti i calcoli sul reticolo non sono stati inclusi in WP20

- BMW è/era l'unico risultato con alta precisione elevata e più vicino al risultato sperimentale (w.m.a.)

Novità dal Reticolo

High precision calculation of the hadronic vacuum polarisation contribution to the muon anomaly

A. Boccaletti^{1,2}, Sz. Borsanyi¹, M. Davier³, Z. Fodor^{1,4,5,2,6,7,*}, F. Frech¹, A. Gérardin⁸, D. Giusti^{2,9}, A.Yu. Kotov², L. Lellouch⁸, Th. Lippert², A. Lupo⁸, B. Malaescu¹⁰, S. Mutzel^{8,11}, A. Portelli^{12,13}, A. Risch¹, M. Sjö⁸, F. Stokes^{2,14}, K.K. Szabo^{1,2}, B.C. Toth¹, G. Wang⁸, Z. Zhang³



Stessa precisione della predizione WP20: 0.37 ppm!

$$a_\mu(\text{WP20}) = 0.00116591810(43) [0.37 \text{ ppm}]$$

Conclusioni

Il Confronto continua con:

- Rianalisi Dati Esperimenti $e+e^-$
- Studio di altri canali di annichilazione $e+e^- \rightarrow \dots$
- Riconsiderazione delle correzioni radiative
- Più e nuovi risultati dal calcolo sul reticolo con precisione che consente confronto con valore sperimentale (FNAL+BNL)

In attesa di:

- Fermilab $\sim 0,1$ pp -- misura di a_μ nel 2025
- J-PARC: metodica completamente diversa per la misura di a_μ
- Nuovi Risultati su reticolo per a_μ LO-HVP
- a_μ da RBC/UKQCD e Mainz
- Nuova analisi BABAR
- Nuova analisi KLOE
- Nuovi dati e analisi BES III, BELLE-II, CMD-3, SND-2k
- MUonE @ CERN per misura HVP space-like

Muon g-2 Collaboration

(The Muon $g - 2$ Collaboration)

¹Argonne National Laboratory, Lemont, IL, USA

²Boston University, Boston, MA, USA

³Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, USA

⁴Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia

⁵Center for Axion and Precision Physics (CAPP) / Institute for Basic Science (IBS), Daejeon, Republic of Korea

⁶Cornell University, Ithaca, NY, USA

⁷Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL, USA

⁸INFN Gruppo Collegato di Udine, Sezione di Trieste, Udine, Italy

⁹INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, Frascati, Italy

¹⁰INFN, Sezione di Napoli, Napoli, Italy

¹¹INFN, Sezione di Pisa, Pisa, Italy

¹²INFN, Sezione di Roma Tor Vergata, Roma, Italy

¹³INFN, Sezione di Trieste, Trieste, Italy

¹⁴Istituto Nazionale di Ottica - Consiglio Nazionale delle Ricerche, Pisa, Italy

¹⁵Department of Physics and Astronomy, James Madison University, Harrisonburg, VA, USA

¹⁶Institute of Physics and Cluster of Excellence PRISMA+,

Johannes Gutenberg University Mainz, Mainz, Germany

¹⁷Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

¹⁸Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Republic of Korea

¹⁹Lancaster University, Lancaster, United Kingdom

²⁰Michigan State University, East Lansing, MI, USA

²¹North Central College, Naperville, IL, USA

²²Northern Illinois University, DeKalb, IL, USA

²³Northwestern University, Evanston, IL, USA

²⁴Regis University, Denver, CO, USA

²⁵Scuola Normale Superiore, Pisa, Italy

²⁶School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China

²⁷Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China

²⁸Institut für Kern- und Teilchenphysik, Technische Universität Dresden, Dresden, Germany

²⁹Università del Molise, Campobasso, Italy

³⁰Università di Cassino e del Lazio Meridionale, Cassino, Italy

³¹Università di Napoli, Napoli, Italy

³²Università di Pisa, Pisa, Italy

³³Università di Roma Tor Vergata, Rome, Italy

³⁴Università di Trieste, Trieste, Italy

³⁵Università di Udine, Udine, Italy

³⁶Department of Physics and Astronomy, University College London, London, United Kingdom

³⁷University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA

³⁸University of Kentucky, Lexington, KY, USA

³⁹University of Liverpool, Liverpool, United Kingdom

⁴⁰Department of Physics and Astronomy, University of Manchester, Manchester, United Kingdom

⁴¹Department of Physics, University of Massachusetts, Amherst, MA, USA

⁴²University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA

⁴³University of Mississippi, University, MS, USA

⁴⁴University of Oxford, Oxford, United Kingdom

⁴⁵University of Rijeka, Rijeka, Croatia

⁴⁶Department of Physics, University of Texas at Austin, Austin, TX, USA

⁴⁷University of Virginia, Charlottesville, VA, USA

⁴⁸University of Washington, Seattle, WA, USA

Department of Energy (USA)
National Science Foundation (USA)
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Italy)
Science and Technology Facilities Council (UK)
Royal Society (UK)
European Union's Horizon 2020
National Natural Science Foundation of China
MSIP, NRF and IBS-R017-D1 (Republic of Korea)
German Research Foundation (DFG)



Fine



Credits:

C. Polly – Fermilab

G. Venanzoni – Pisa

R. Lee – Boston

D. Hertzog - Washington

A. Nath – Napoli