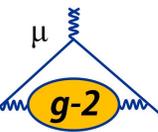


# *Il primo risultato all'esperimento Muon g-2 al Fermilab*

*E. Bottalico - SIF 2021 - 13 Settembre 2021*

*[elia.bottalico@phd.unipi.it](mailto:elia.bottalico@phd.unipi.it)*





- **Storia della misura**
- **Come si misura il g-2 del Muone?**
  - Perché si misura  $a_\mu = \frac{g-2}{2}$  ?
- **Analisi dei dati Run1:**
  - Frequenza di precessione  $\omega_a$ ;
  - Misura di campo magnetico  $\omega_p$ ;
- **Risultato della misura Run1**
- **Prospettive future**



CERN III 1969-79

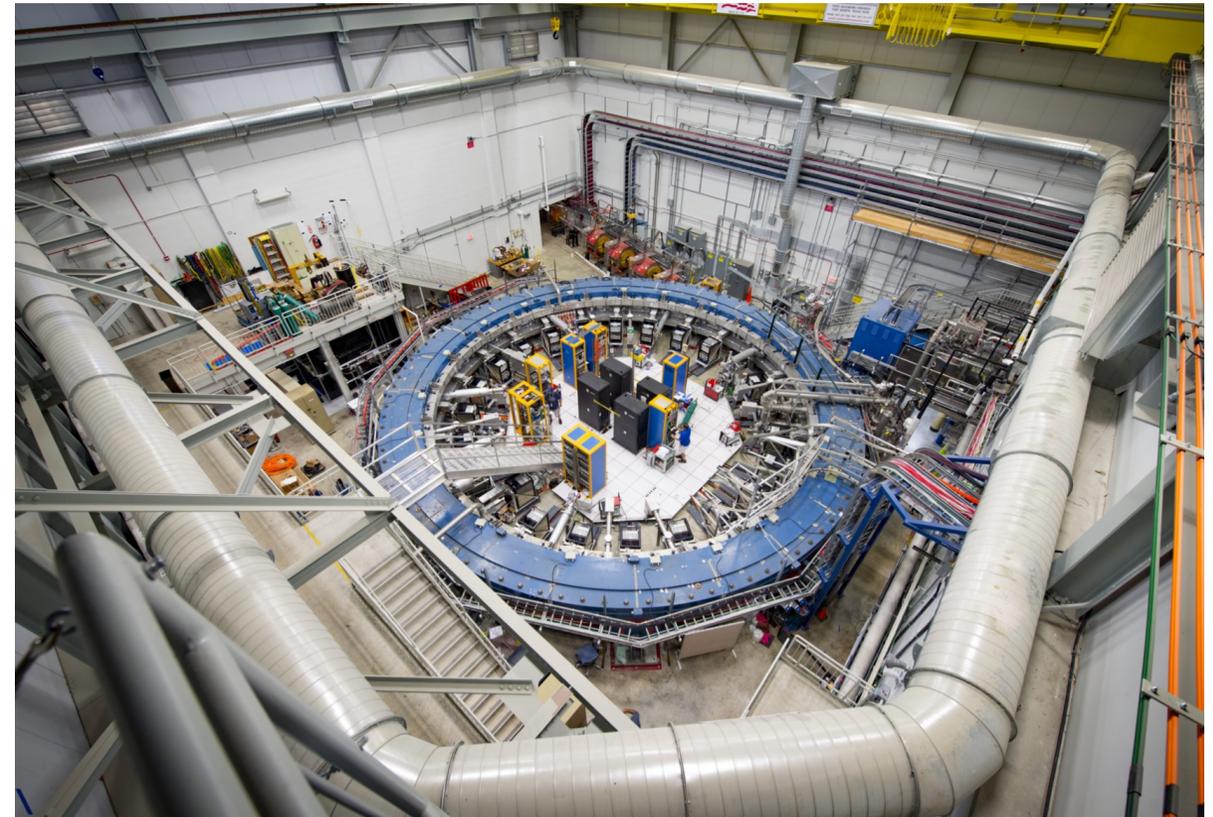
BNL (E821) 1996-2006



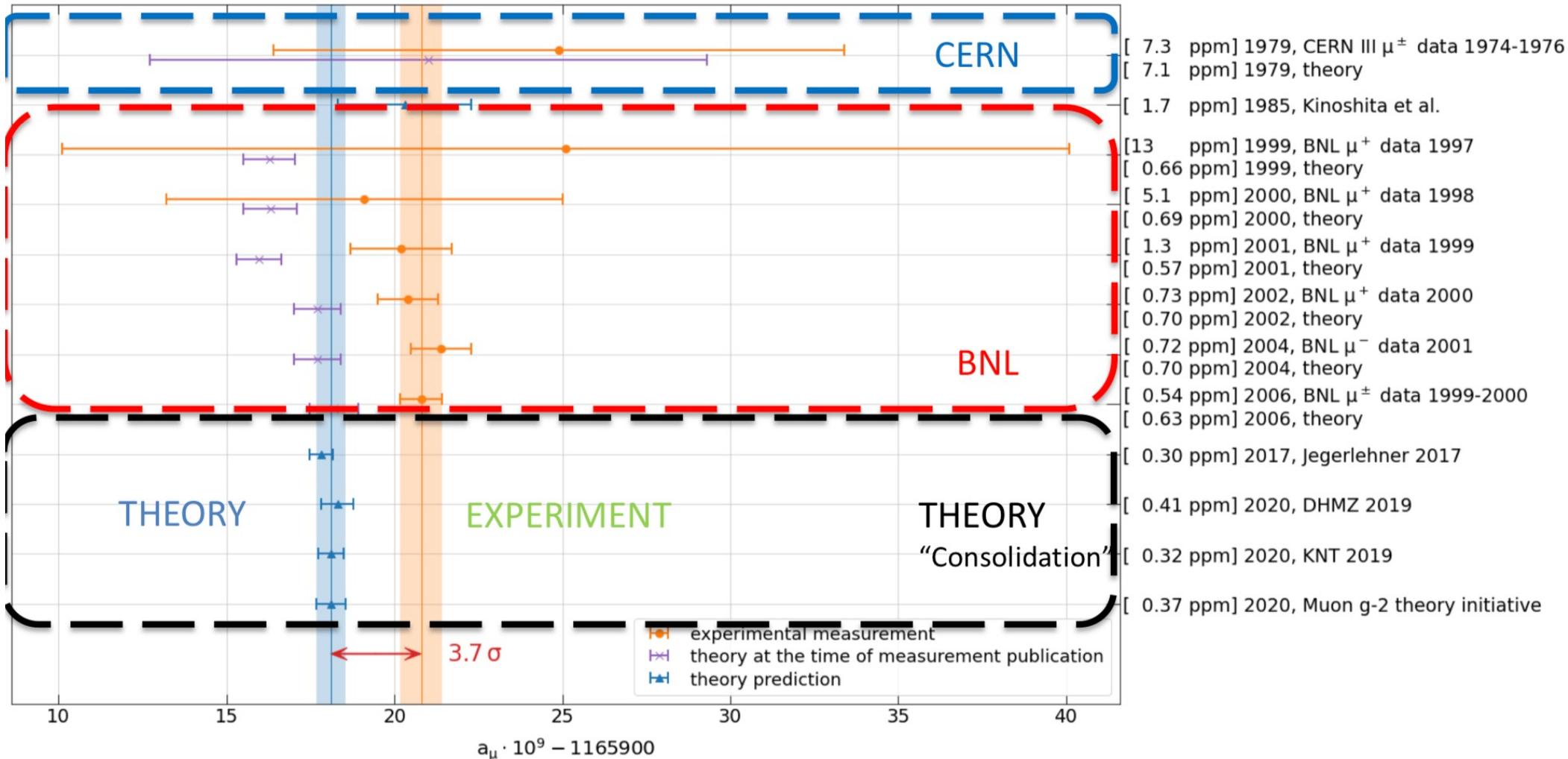


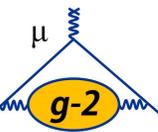


Fermilab (E989) 2013 – in corso



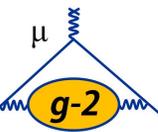
La storia della misura del  $g-2$  del Muone trova le sue radici nella serie dell'esperimenti al CERN





- L'esperimento Muon g-2 al Fermilab (E989) ha come scopo la misura dell'anomalia magnetica del muone  $a_{\mu} = \frac{g_{\mu}-2}{2}$  alla precisione di progetto di 140 parti per miliardo (ppb).
- Tale precisione ottenibile dalla somma in quadratura di un contributo statistico e uno sistematico di uguale valore (100 ppb), permetterebbe di migliorare di un fattore 4 la precisione attuale di 540 ppb, dell'esperimento E821 a BNL.

# Che cosa è il g-2 del Muone?



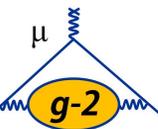
Il momento magnetico intrinseco di una particella dotata di spin è:

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

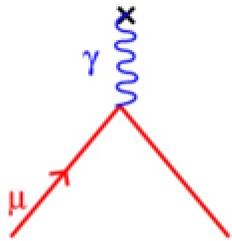
Il fattore  $g$  (*giromagnetico*) definisce l'accoppiamento dello spin al campo magnetico:

- $g = 1$  nella teoria classica;
- $g = 2$  nella teoria quantistica di Dirac
- $g = 2.00233\dots$  nella teoria quantistica di campo.

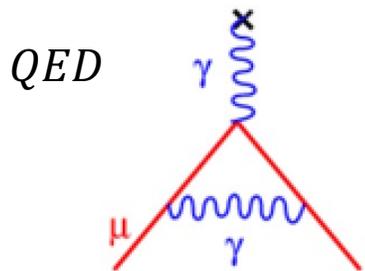
# Perché $g \neq 2$ ?



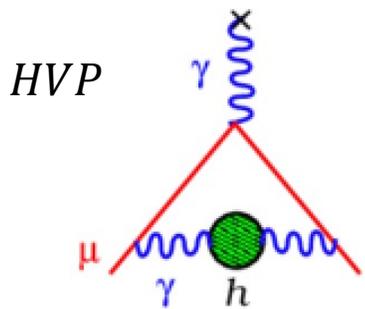
La risposta risiede nella polarizzazione del vuoto:



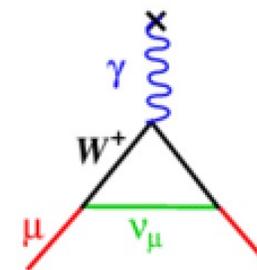
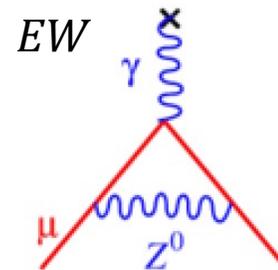
$g = 2$  (Dirac 1928)



$g = 2 + 0.0023316 \dots$  (1° ordine, Schwinger 1948 – QED contributo maggiore  $\sim 14000$  diagrammi)

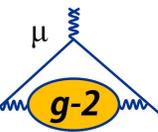


$g = \dots + 0.00000013878$  +



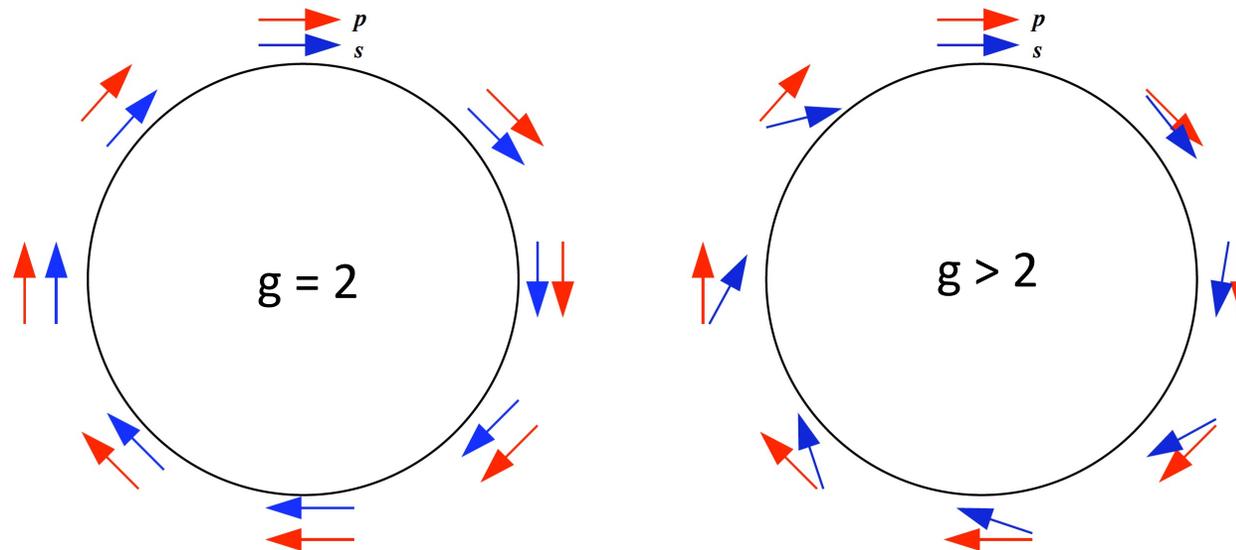
$g = \dots + 0.00000000307$

# Perché si misura $a_\mu = \frac{g-2}{2}$ ?

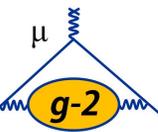


- Per ottenere una precisione tanto alta iniettiamo i muoni in un campo magnetico di 1.45 T.
- Qui lo spin del muone comincia a precedere rispetto alla direzione dell'impulso:

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



# Come è possibile tale precisione?

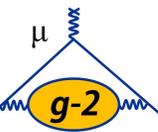


- 4 sono i principi fisici che permettono di raggiungere una precisione così alta:

## 1. *Muoni altamente polarizzati (95%)*

- Possibile grazie al decadimento debole del pione  $\nu \longleftrightarrow \pi^+ \longleftrightarrow \mu^+$

# Come è possibile tale precisione?



- 4 sono i principi fisici che permettono di raggiungere una precisione così alta:

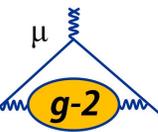
## 1. Muoni altamente polarizzati (95%)

➤ Possibile grazie al decadimento debole del pione  $\nu \rightleftharpoons \pi^+ \rightleftharpoons \mu^+$

## 2. Frequenza di precessione proporzionale a (g-2)

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

# Come è possibile tale precisione?



- 4 sono i principi fisici che permettono di raggiungere una precisione così alta:

## 1. Muoni altamente polarizzati (95%)

- Possibile grazie al decadimento debole del pione

- 4 sono i principi fisici che permettono di raggiungere una precisione così alta:
- 1. *Muoni altamente polarizzati (95%)*
  - Possibile grazie al decadimento debole del pione
- 2. *Frequenza di precessione proporzionale a (g-2)*
  - $\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c = \left(\frac{g-2}{2}\right) \cdot \frac{e\vec{B}}{m}$
- 3. *Impulso magico  $P_\mu = 3.094 \text{ GeV}/c$ :*
  - $\vec{\omega}_a = \frac{e}{m} [a_\mu \vec{B} - (a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1}) (\vec{\beta} \times \vec{E})]$

## 2. Frequenza di precessione proporzionale a (g-2)

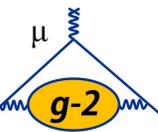
- $$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c = \left(\frac{g-2}{2}\right) \cdot \frac{e\vec{B}}{m}$$

## 3. Impulso magico $P_\mu = 3.094 \text{ GeV}/c$ :

- $$\vec{\omega}_a = \frac{e}{m} \left[ a_\mu \vec{B} - \left( a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) (\vec{\beta} \times \vec{E}) \right]$$

$$\gamma = \sqrt{1 + \frac{1}{a_\mu}} \sim 29.3$$

# Come è possibile tale precisione?



- 4 sono i principi fisici che permettono di raggiungere una precisione così alta:

## 1. Muoni altamente polarizzati

➤ Possibile grazie al decadimento debole del pione  $\nu \longleftrightarrow \pi^+ \longleftrightarrow \mu^+$

## 2. Frequenza di precessione proporzionale a $(g-2)$

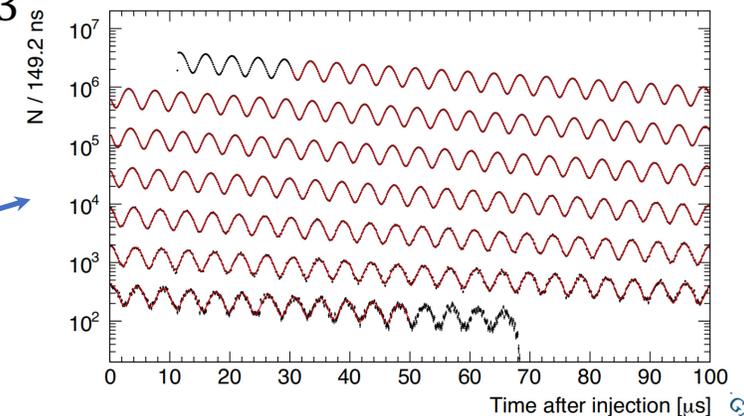
➤ 
$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c = \left(\frac{g-2}{2}\right) \cdot \frac{e\vec{B}}{m}$$

## 3. Impulso magico $P_\mu = 3.094 \text{ GeV}/c$ :

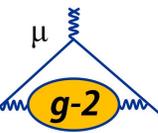
➤ 
$$\vec{\omega}_a = \frac{e}{m} \left[ a_\mu \vec{B} - \left( a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) (\vec{\beta} \times \vec{E}) \right]$$

$$\gamma = \sqrt{1 + \frac{1}{a_\mu}} \sim 29.3$$

## 4. I positroni emessi preferibilmente lungo la direzione dello spin del muone



# Estrazione $a_\mu$ (semplificata)



- L'anomalia magnetica  $a_\mu$  si ottiene dalla misura di due quantità:

$$a_\mu = \frac{\omega_a}{\tilde{\omega}'_p} \frac{\mu_p m_\mu g_e}{\mu_e m_e 2}$$

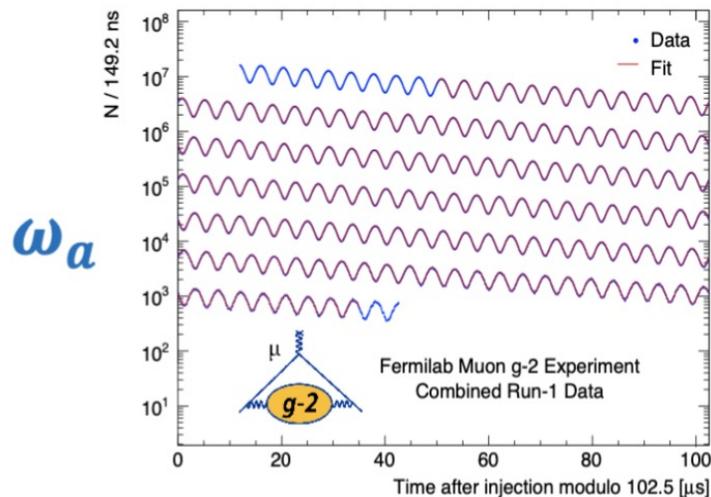
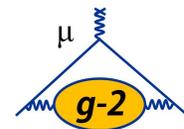
Rapporto misurato in Muon g-2 al Fermilab:

$$R' = \frac{\omega_a}{\tilde{\omega}'_p}$$

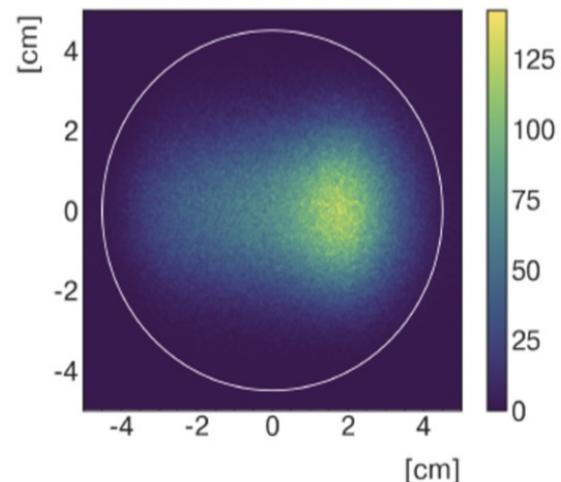
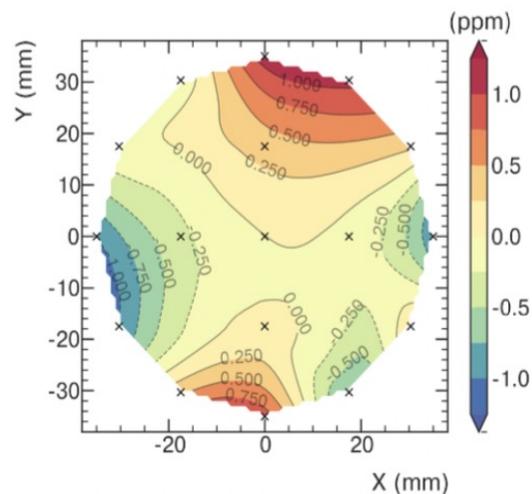
Quantità misurate con altissima precisione in altri esperimenti

$\tilde{\omega}'_p$  rappresenta il campo magnetico espresso come la frequenza di Larmor del protone (in un campione d'acqua) pesata per la distribuzione del fascio nell'anello.

# Estrazione $a_\mu$ (semplificata)



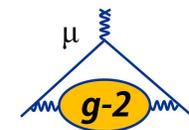
$$R'_\mu = \frac{\omega_a}{\tilde{\omega}'_p(T)} =$$



$$\tilde{\omega}'_p = \omega_p \otimes M(x, y, t)$$

Muons [arb]

# Estrazione $a_\mu$



Nella forma estesa del rapporto valori centrali di  $\omega_a$  e  $\omega_p$  devono essere corretti per:

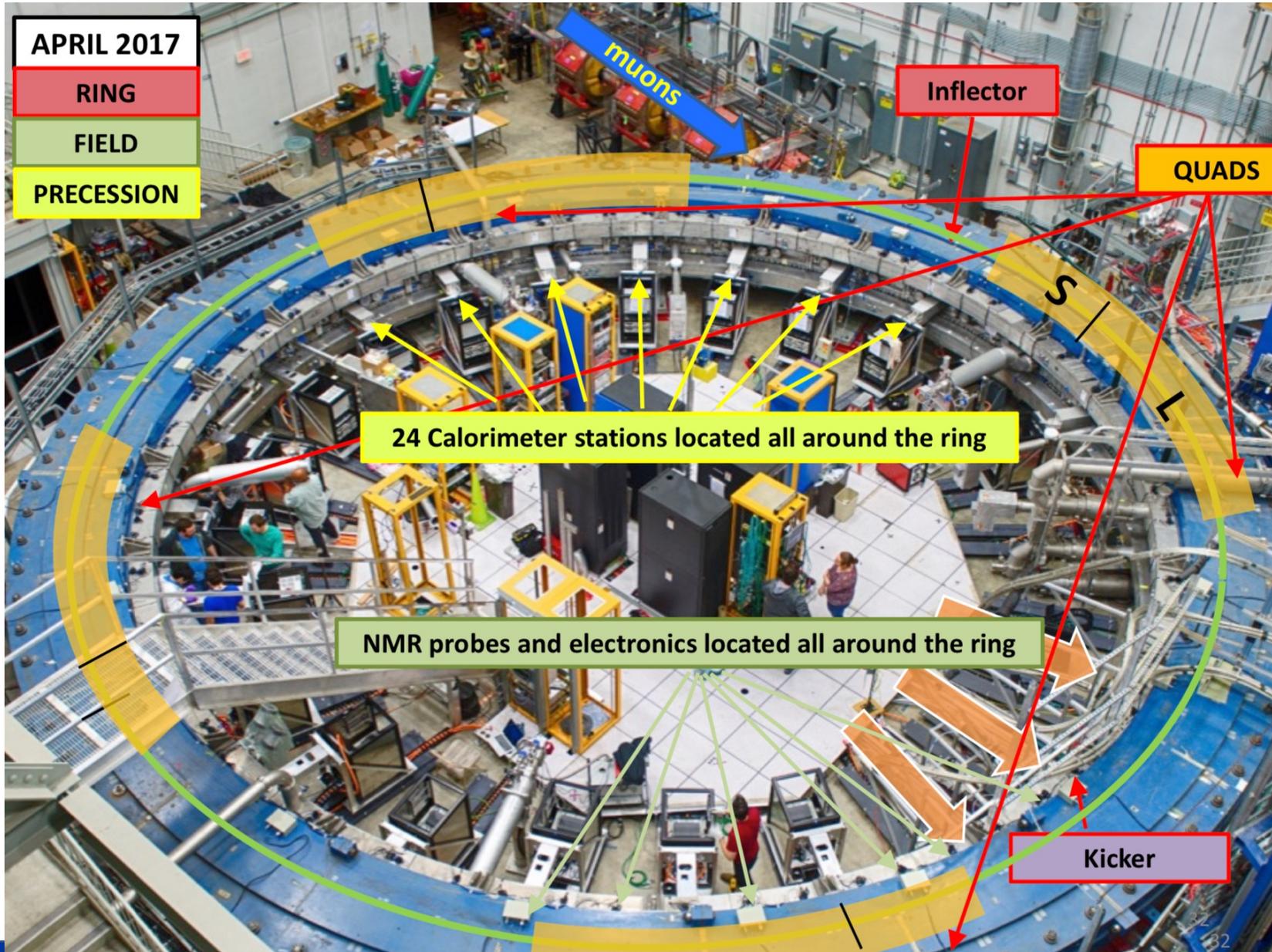
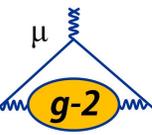
Correzioni di dinamica di fascio

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

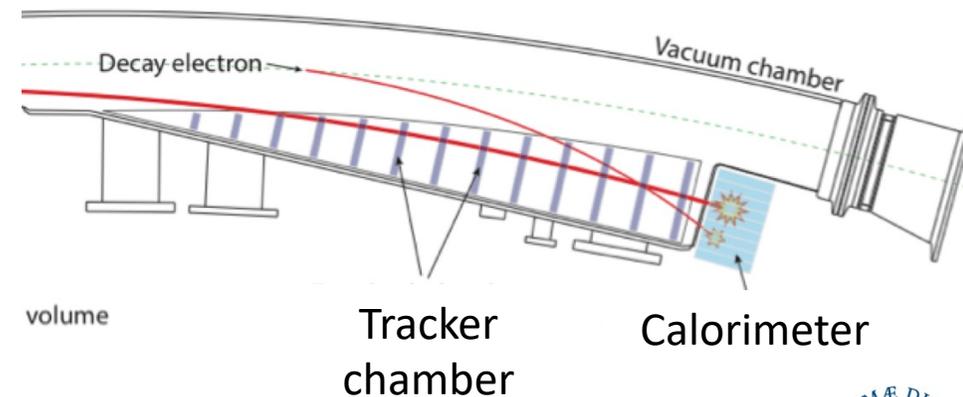
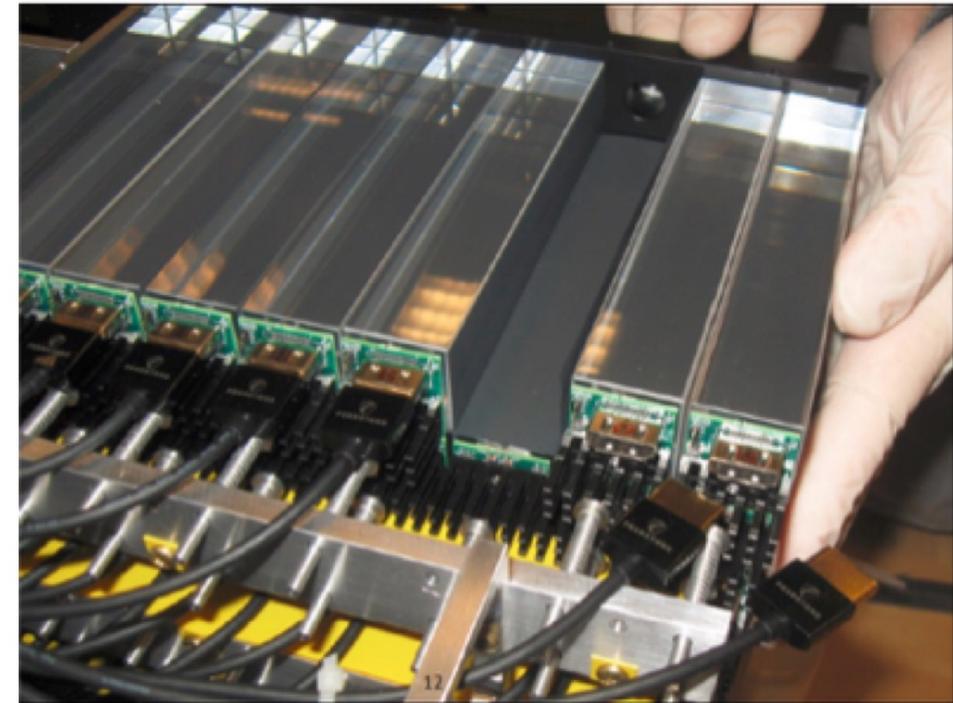
Correzioni di campo magnetico transiente

Queste correzioni sono state ottenute durante l'analisi di Run1.  
Alcune di queste, come  $C_{pa}$  e  $B_k$  sono inedite rispetto a BNL.

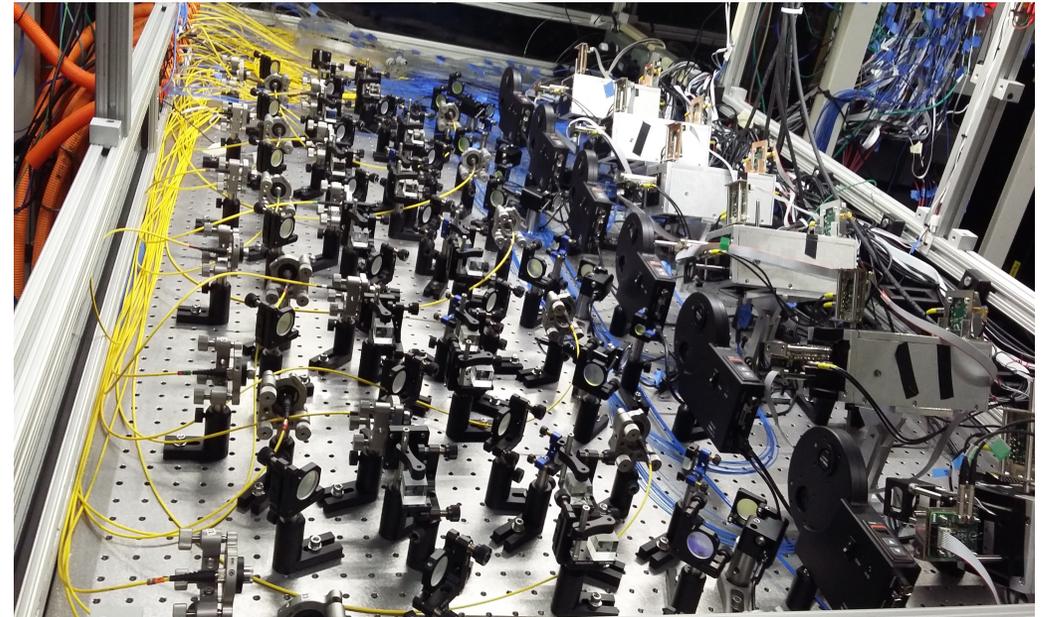
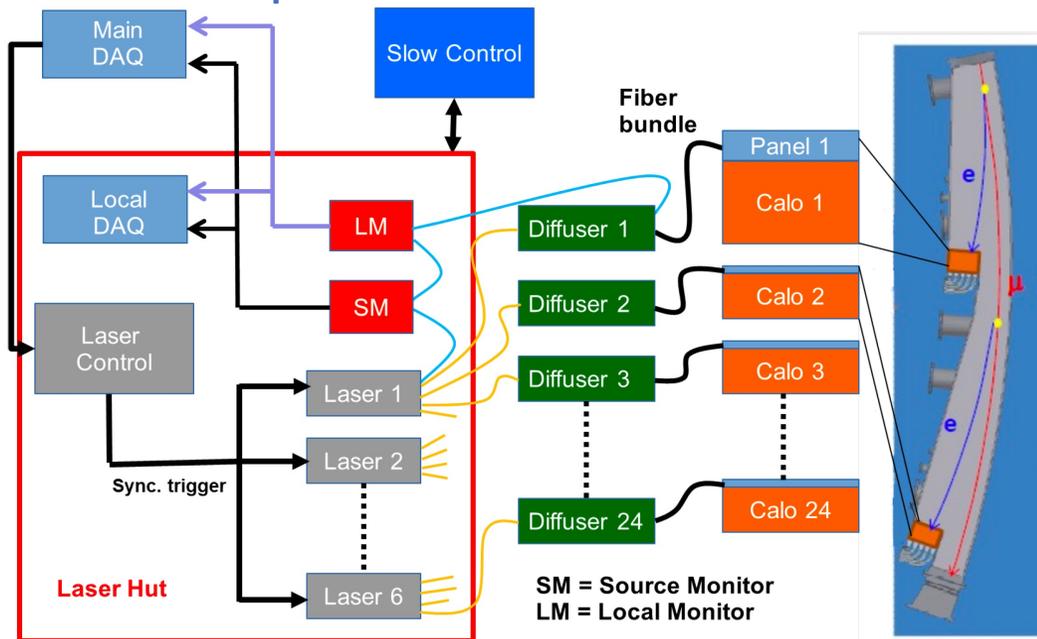
# Ring



- **24 calorimetri elettromagnetici:**
  - 54 cristalli di PbF<sub>2</sub> (9 colonne x 6 righe) letti da 54 SIPMs (240x240pixel).
  - Cristalli di 14 cm, 15  $X_0$ .
  - La luce Cherenkov più rapida dello sciame (durata segnale ~nanoseconds).
  - Un **Sistema di calibrazione Laser**, permette la calibrazione in tempo ed energia dei SIPMs
- **Due tracciatori a straw tubes.**



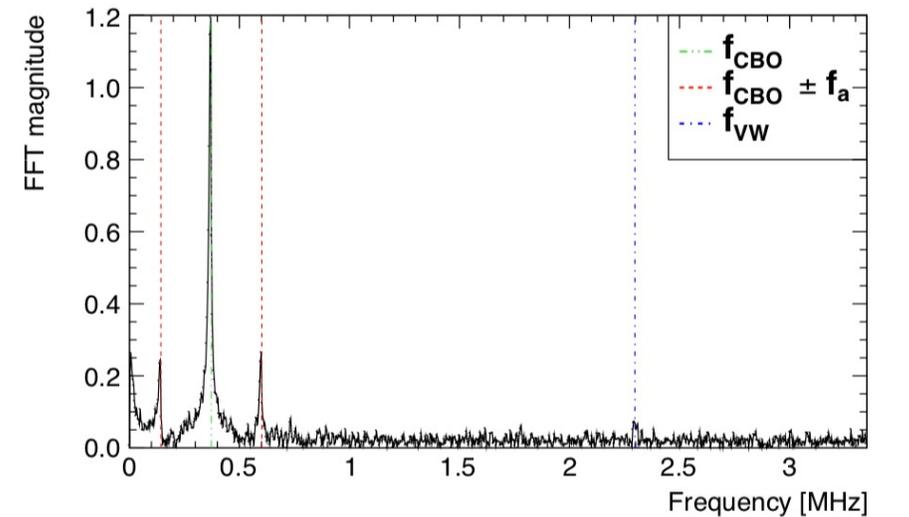
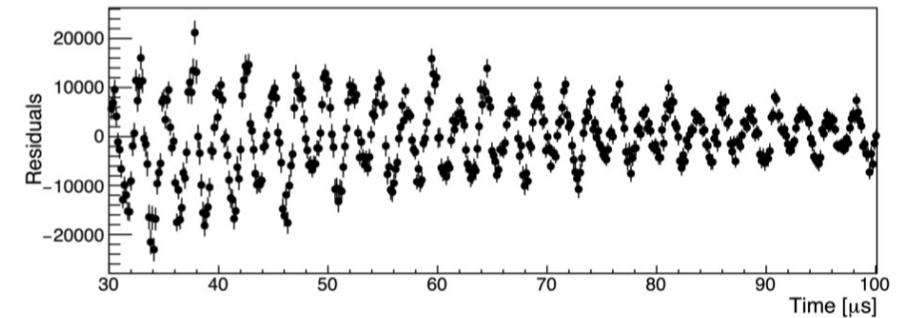
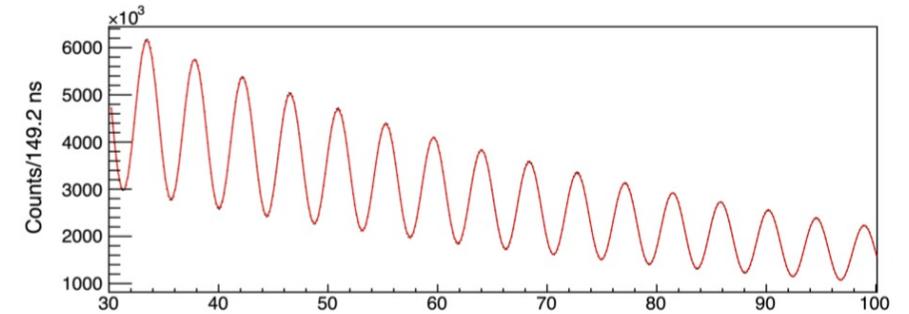
- Un Sistema Laser di altissima precisione è stato costruito per correggere la risposta del SiPM dalle fluttuazione di guadagno.
- L'esperimento E989 necessita di una continua calibrazione dei calorimetri al 0.04% nella scala temporale del *fill* dei muoni e un monitoraggio delle correzioni sulla scala delle ore al di sotto del per mille.



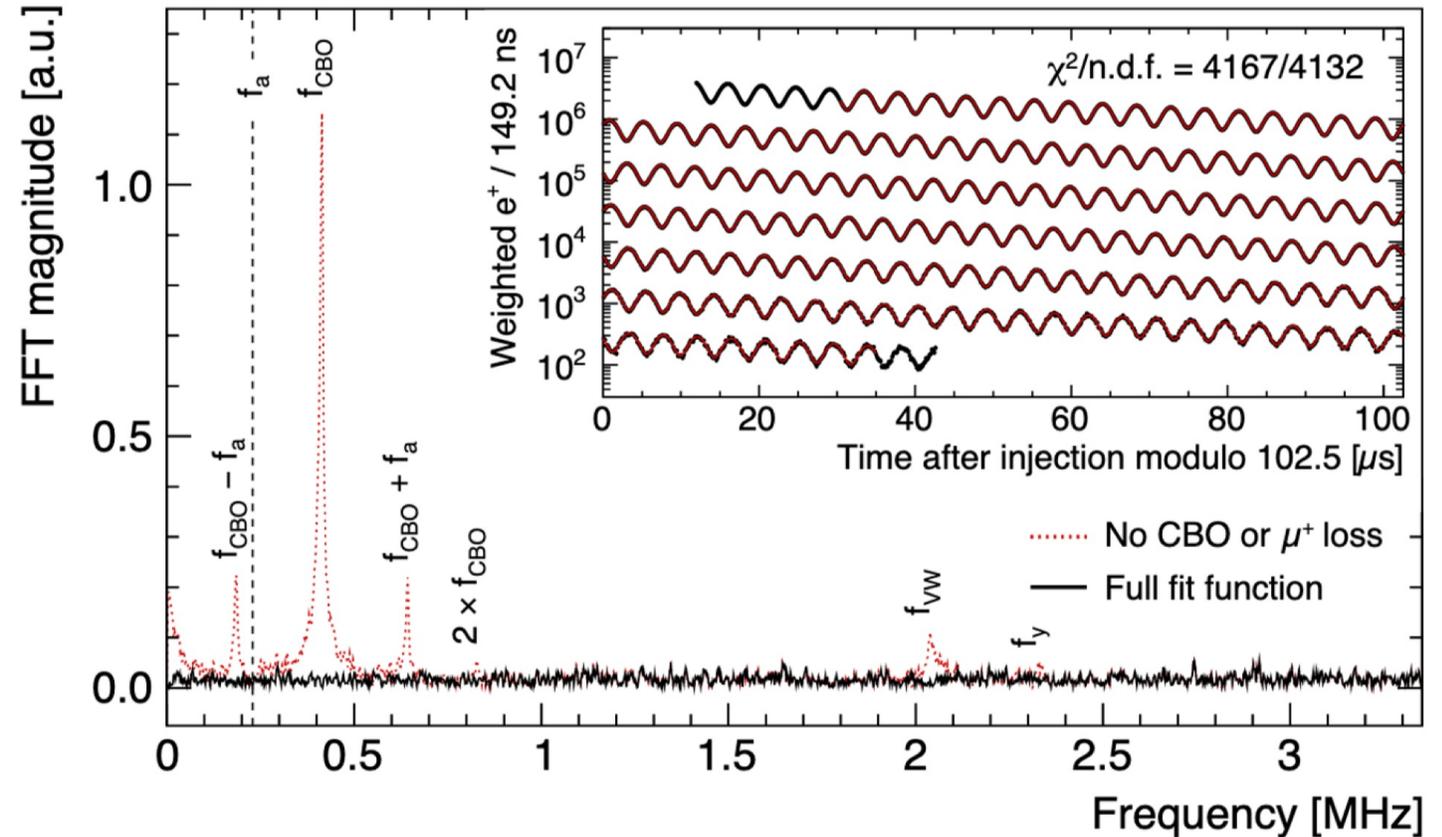
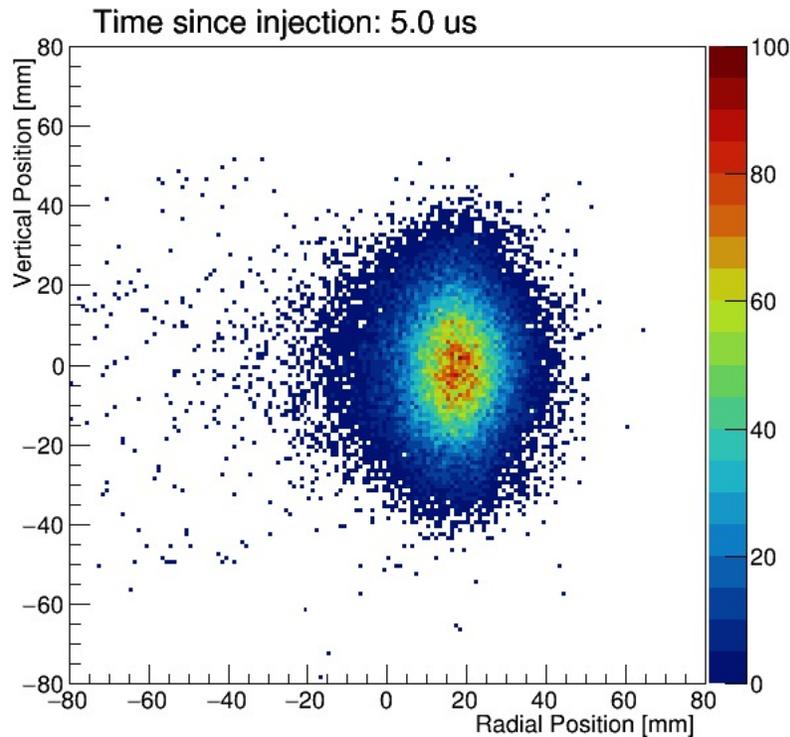
- Il numero di positroni emessi nel decadimento dei muoni nell'anello è modulato dalla frequenza di precessione:

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

- Si osserva però la presenza di numerose frequenze nelle FFT dei residui, dovute alle oscillazioni di dinamica di fascio.



- A causa del moto del fascio, la funzione descritta si complica fino a contenere 22 parametri, tenendo conto di ogni frequenza presente.



- Il moto del fascio non solo induce delle modulazioni nel numero di positroni osservati, ma introduce delle variazioni all'interno del *fill* a cui  $\omega_a$  è sensibile.
- Correggiamo per questi effetti, introducendo 4 correzioni al numeratore della formula:

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

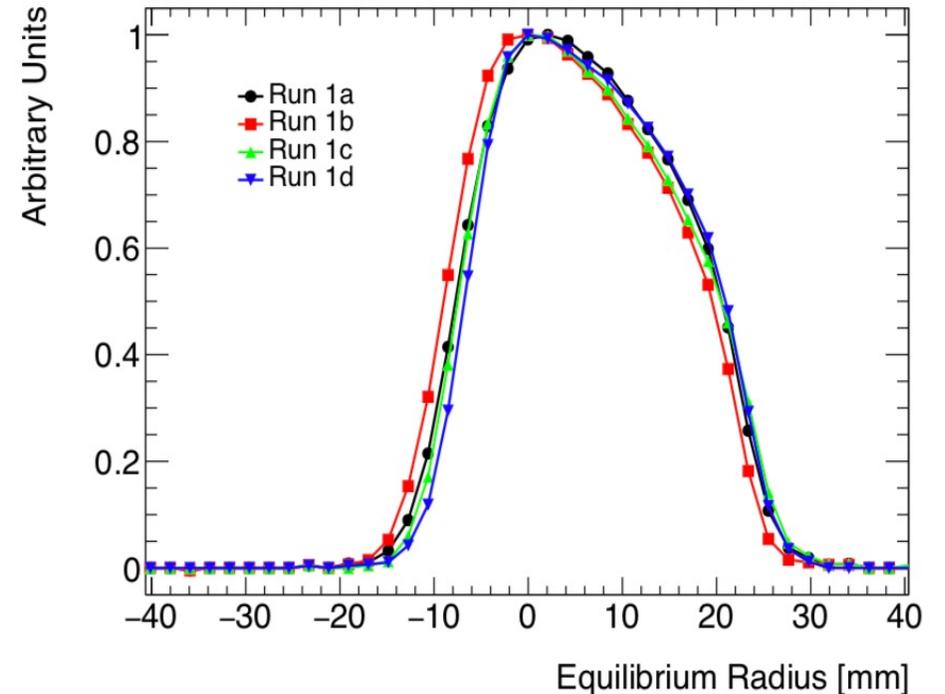
Considerando l'espressione più complessa di come lo spin varia nel campo magnetico:

$$\vec{\omega}_a = \frac{e}{m} \left[ a_\mu \vec{B} - \left( a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) (\vec{\beta} \times \vec{E}) - a_\mu \left( \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) (\vec{\beta} \cdot \vec{B}) \vec{\beta} \right]$$

$C_e$ : La correzione di campo elettrico

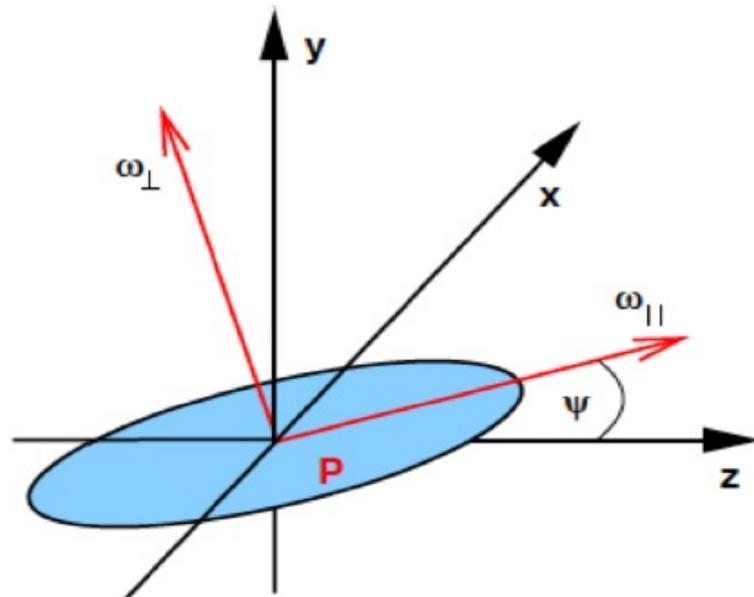
$C_e = 2n(1 - n)\beta^2 x_e^2 / R_0^2$  è dovuta alla distribuzione del raggio di equilibrio.

$$C_e \sim 450 \text{ ppb}$$



Considerando l'espressione più complessa di come lo spin varia nel campo magnetico:

$$\vec{\omega}_a = \frac{e}{m} \left[ a_\mu \vec{B} - \left( a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) (\vec{\beta} \times \vec{E}) - a_\mu \left( \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) (\vec{\beta} \cdot \vec{B}) \vec{\beta} \right]$$



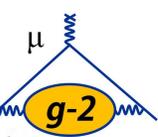
$$C_p \sim 200 \text{ ppb}$$

$C_p$  : La pitch correction

$$C_p = n \langle A_y^2 \rangle / 4R_0^2$$

dipende dalle oscillazioni verticali di betatrone ( $A_y$ ).

# Correzioni di fascio ad $\omega_a$ : $C_{lm}$



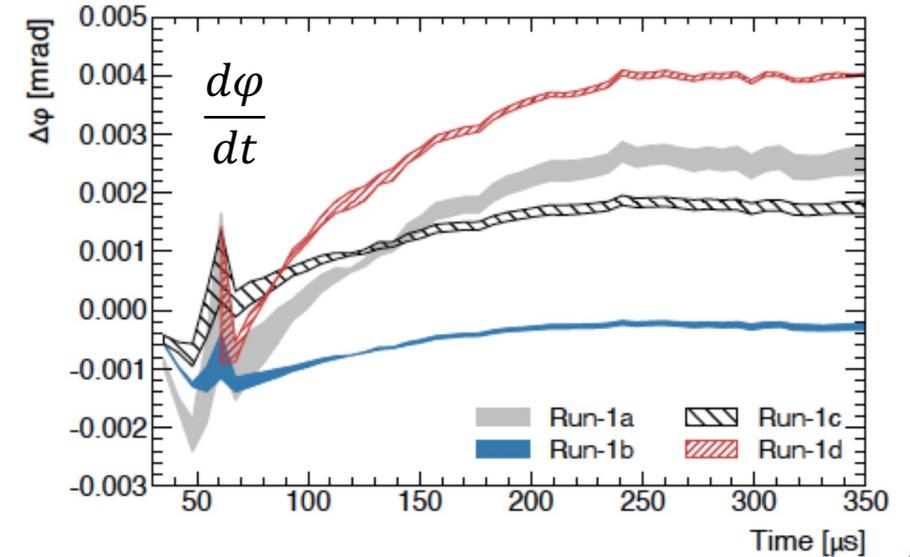
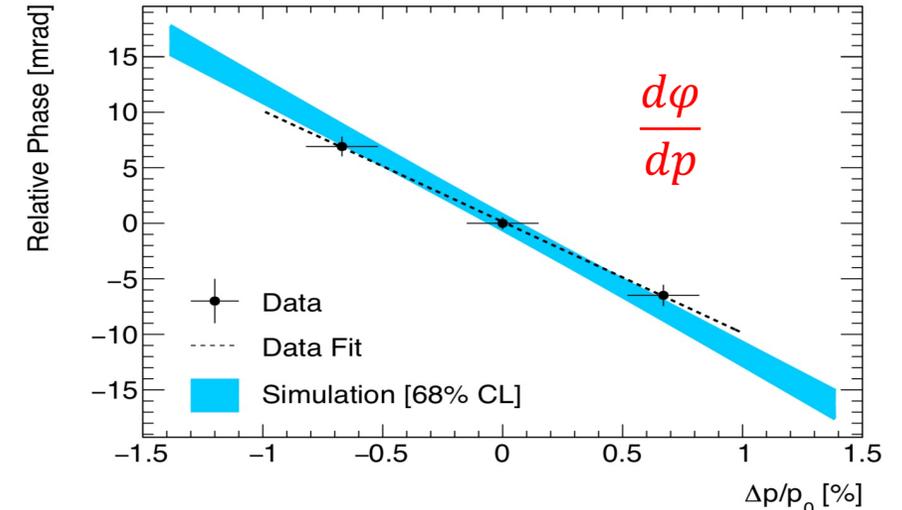
$C_{lm}$ : descrive l'effetto indotto sulla fase di  $\omega_a$  a causa della perdita di muoni durante il *fill*. Ciò è dovuto a:

1. Muoni con **momento** diverso che hanno **fase** diversa;
2. Il numero di muoni persi varia in funzione del momento.

$$\Delta\omega_a = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d\varphi}{dp} \cdot \frac{dp}{dt}$$

$$C_{lm} < 20 \text{ ppb}$$

$$d\varphi_0/dp = (-10.0 \pm 1.6) \text{ mrad}/(\% \Delta p/p_0)$$



$C_{pa}$ : è un effetto di accettazione di fase. È dovuto a:

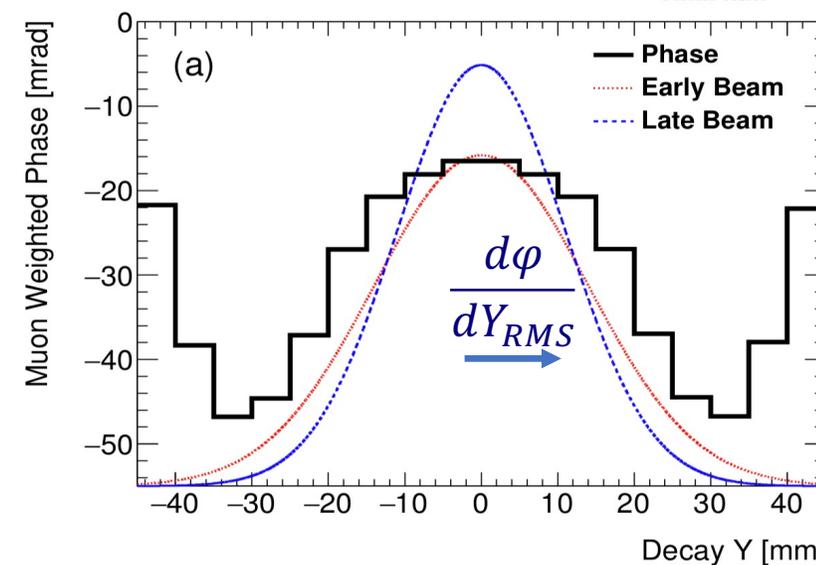
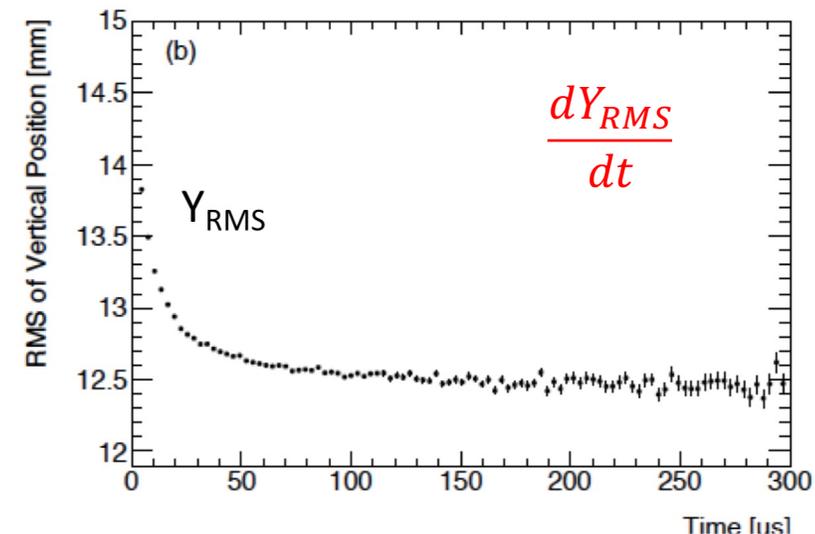
1. Variazione di fascio all'interno del *fill*;
2. Fase misurata in funzione delle coordinate di decadimento.

$$\Delta\omega_a = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dY_{RMS}}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dY_{RMS}}$$

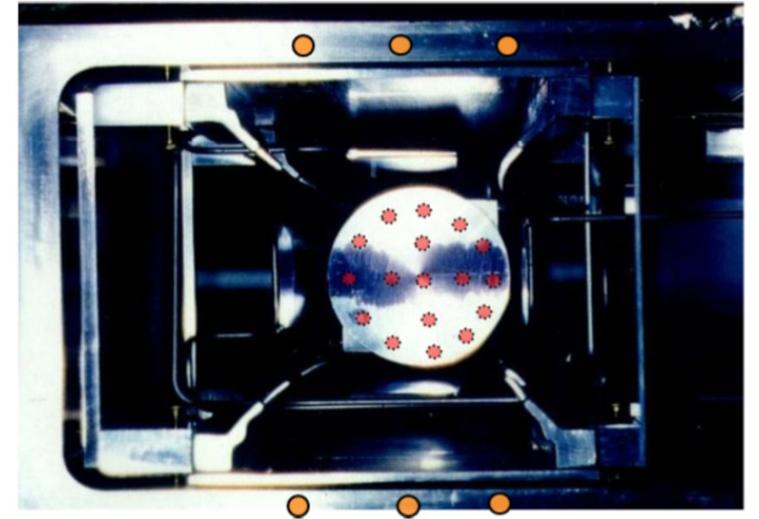
L'effetto in Run1 è maggiore a causa dei *broken resistors*

$$C_{pa} \sim 180 \text{ ppb}$$

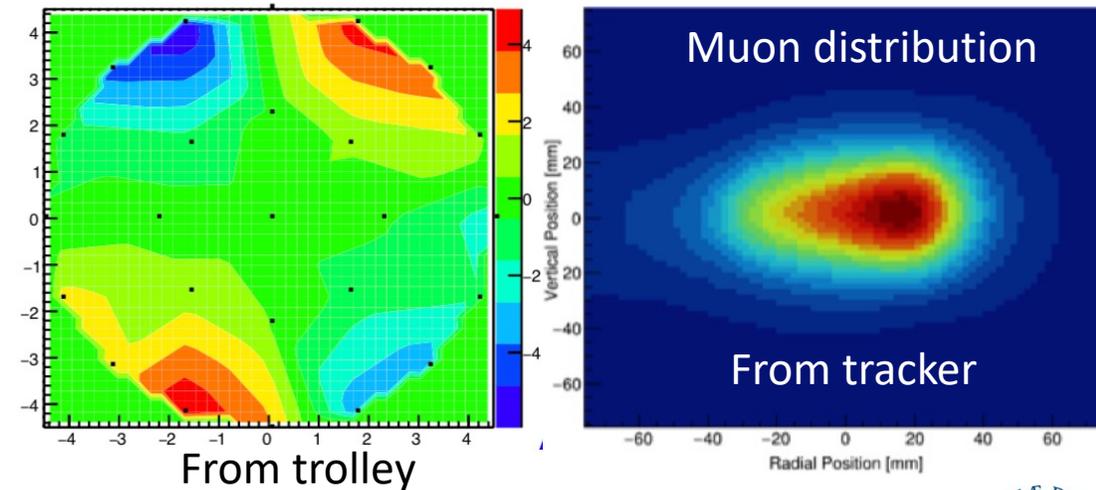
Ci aspettiamo sia ridotto in Run2 ( $\sim 50\text{ppb}$ )



- Il campo magnetico è misurato da:
  - 378 sonde fisse attorno all'anello;
  - 17 sonde a risonanza magnetica trasportate lungo l'anello da un trolley.
  - Il tracker misura la distribuzione dei muoni nell'anello.
  - La mappa del campo viene pesata con la distribuzione dei muoni, per ottenere il campo effettivo subito dalle particelle.



Field map



- Ricordando la formula precedente, 2 sono le correzioni associate al campo magnetico:

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

- Dove:

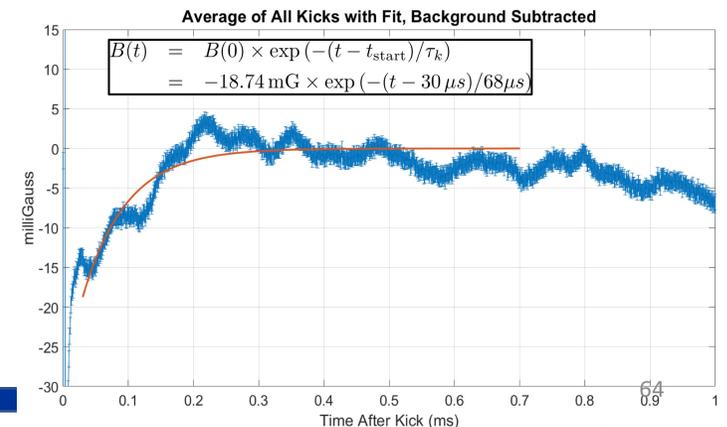
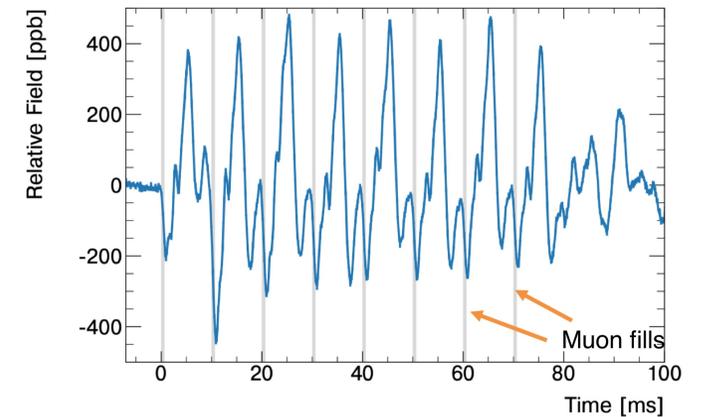
- $B_q$  è dovuta alle vibrazioni dei piatti nei quadrupoli elettrici, che inducono variazioni nel campo.

$$B_q \sim 20 \text{ ppb}$$

- $B_k$  è dovuta al campo transiente dei kicker (pari a 150 ns) che introduce delle eddy current durante il fill.

$$B_k \sim 30 \text{ ppb}$$

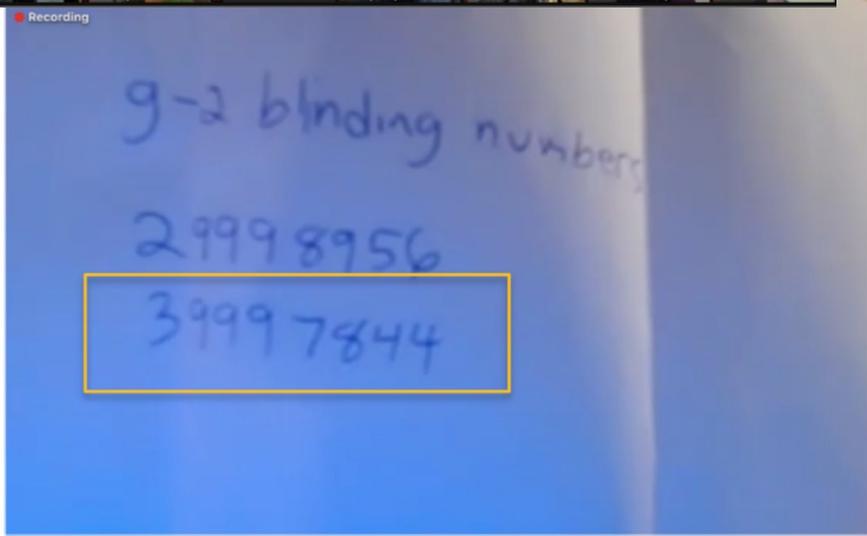
Quad Plates inside Vacuum Chamber



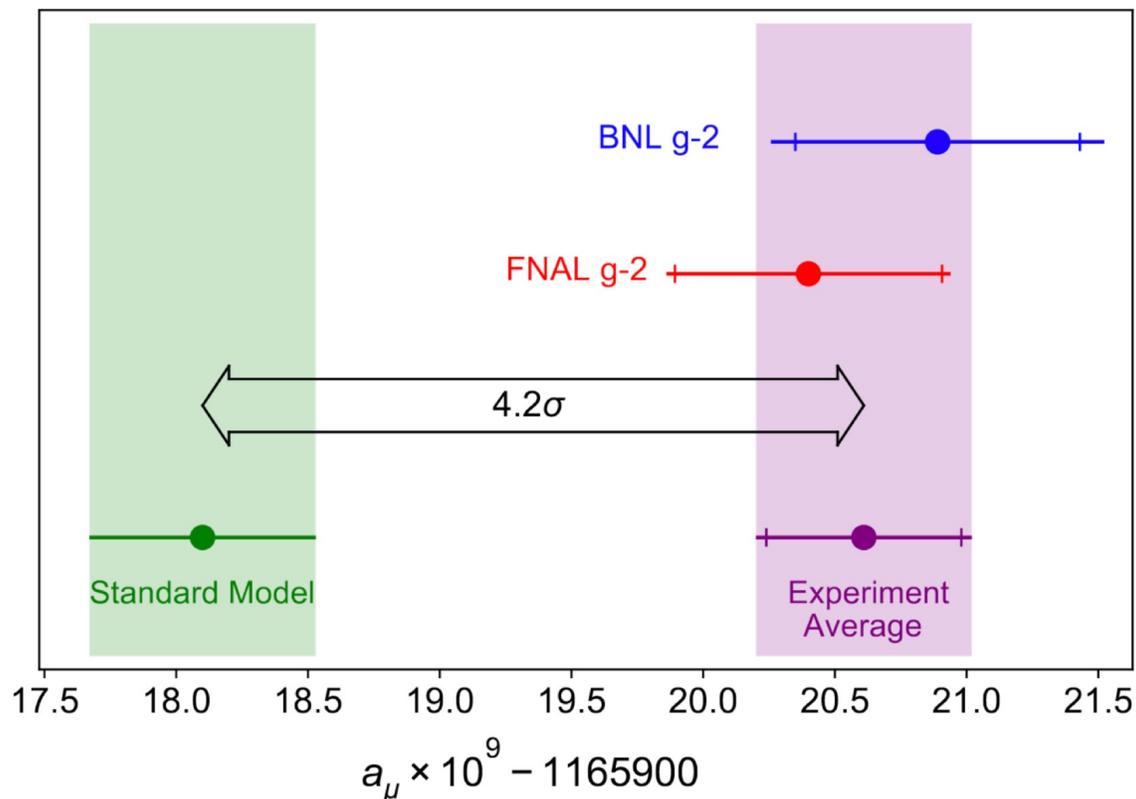




- Il 25 Febbraio l'unblinding della misura è stato fatto durante un meeting zoom con circa 200 persone connesse.

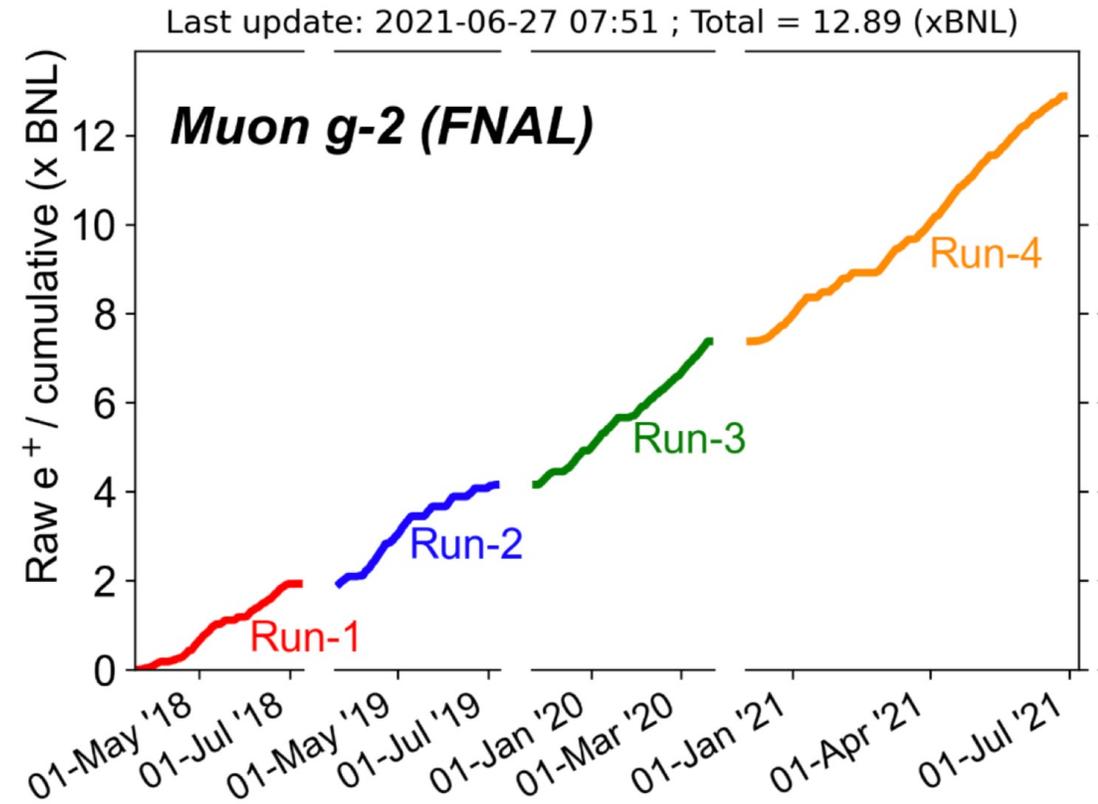


- Il 7 Aprile 2021 è stato annunciato il primo risultato della collaborazione di E989.
- Tale risultato non solo ha confermato il risultato precedente, ma ha portato la discrepanza con la teoria a  $4.2\sigma$



	Correction Factor [ppb]	Uncertainty [ppb]
$\omega_a$ (stat.)	—	434
$\omega_a$ (syst.)	—	56
$f_b/f_0$	—	2
$C_e$	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
$\mu'_p(34.7^\circ C)/\mu_e$ [PCK77]	—	10
$m_\mu/m_e$ [LAMPF-99; CD-2018]	—	22
$g_e/2$ [HFG08]	—	0
Total Systematic	—	157
Total Fundamental Factors	—	25
Total	544	461

- Run1 è circa il 6% del budget totale di E989
- Quest'anno è terminato Run4 raggiungendo in totale ~13 BNL (E821) di statistica.
- A Novembre 2021 è atteso l'inizio di Run 5, al termine del quale ci aspettiamo di avere ~18 BNL.
- Si programma un'ulteriore acquisizione, Run 6, nel 2022/23, con  $\mu^-$  per test di CPT, al termine del quale raggiungeremo 21 BNL



# Grazie per l'attenzione

Per qualsiasi domanda:  
[elia.bottalico@phd.unipi.it](mailto:elia.bottalico@phd.unipi.it)

The Theory Initiative is a group of experimental and theoretical physicists which worked to obtain a blessed calculation of the  $a_\mu$  value.

Since in March 2020 no Lattice QCD groups reached a comparable error with traditional way to compute  $a_\mu$ , the Theory Initiative group decided to not include such estimations in the final value.

In April 7 BMW group published a paper on Nature with a brand-new impressive precision result on  $a_\mu$  calculation using Lattice QCD technology.

