



Fermilab Muon $g - 2$ Experiment: Current Status

Atanu Nath

(Collaborazione Muon $g - 2$)

Incontri di Fisica delle Alte Energie 2019

08 aprile 2019



Università degli Studi di Napoli Federico II





Che cos'è $g - 2$ e perché è importante?

Il momento magnetico $\vec{\mu}_\ell$ di un lepton ℓ di spin \vec{S}_ℓ , massa m_ℓ e carica e è

$$\vec{\mu}_\ell = g_\ell \frac{e}{2m_\ell} \vec{S}_\ell$$

L'equazione di Dirac dice $g_\ell = 2$, Ma sappiamo che non lo è ¹! La differenza è definita come:

anomalia:
$$a_\ell = (g_\ell - 2)/2$$

che proviene da quantum loops. Ma perché è così interessante?

- Perché può essere calcolata e misurata in modo molto preciso.
- E va come $\sim m_\ell^2/\Lambda_{scale}^2$, questa quantità è uno strumento eccellente per **testare il Modello Standard**, e anche per sondare la **nuova fisica**.

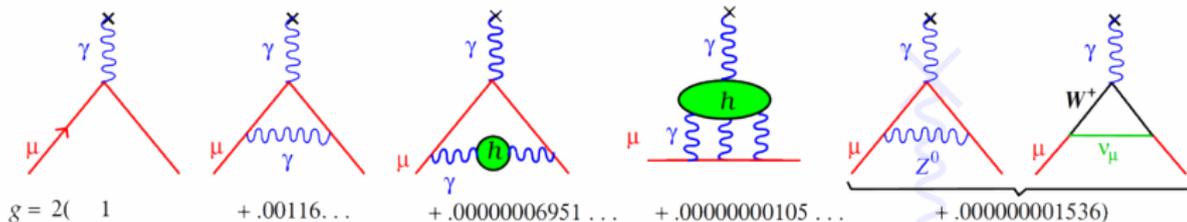
Ma ci sono delle sfide da affrontare...

¹Se fosse uguale, $2S_{1/2}$ e $2P_{1/2}$ di idrogeno sarebbero degenerati.



Sfide teoriche

I contributi all'anomalia vengono dai diagrammi:



QED

HVP

HLbL

Electroweak

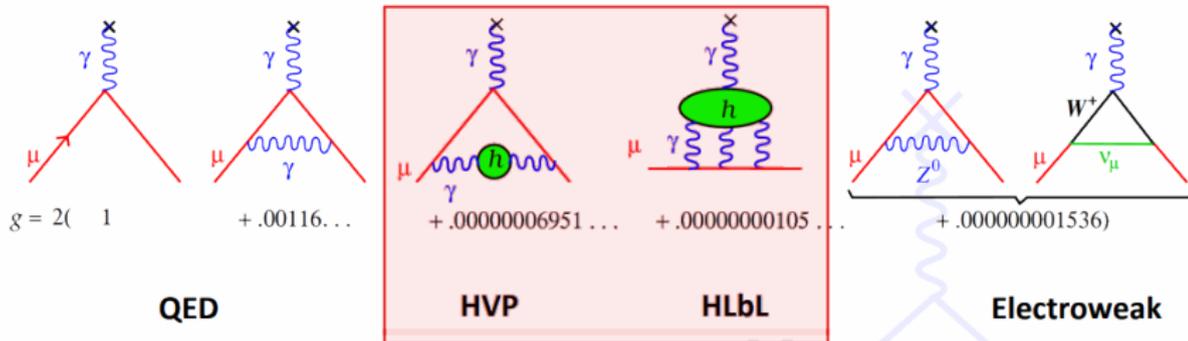
Ma...





Sfide teoriche

QCD presenta una complicazione:



I contributi adronici introducono **maggiori incertezze!** Nel tardo pomeriggio
Dott. R. Pilato (di MU-on-E) parlerà di questo.

Ma ancora, perché l'anomalia del muone è così intrigante?

Perché $g - 2$

Vediamo dove siamo oggi...

- Media mondiale di $a_\mu \times 10^{10}$:

sperimentale

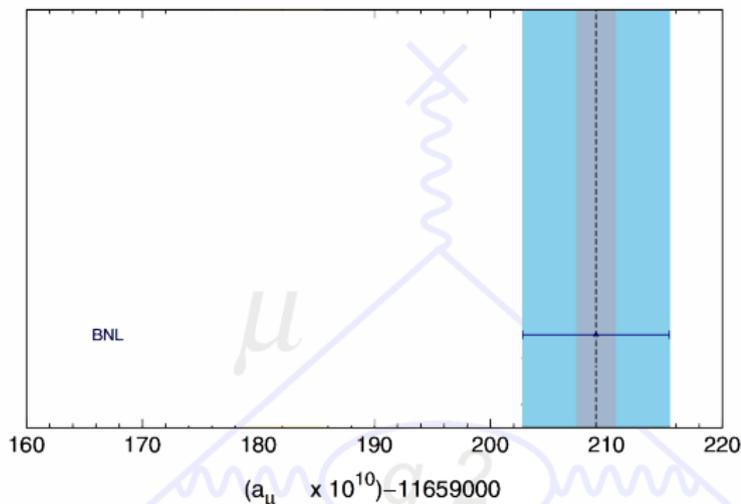
11659209(5.4)(3.3)

Teorico

11659182.04 \pm 3.6.

- Discrepanza di $\sim 3.7\sigma$ sigma.
- Fermilab punta a un miglioramento della precisione di **4 volte**.

Keshvarzi et al, Phys. Rev. D 97, 114025
(2018)





Perché $g - 2$

Vediamo dove siamo oggi...

- Media mondiale di $a_\mu \times 10^{10}$:

sperimentale

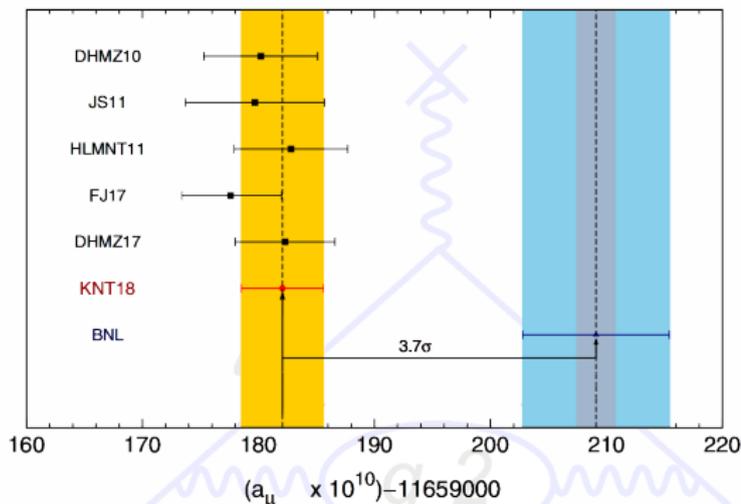
11659209(5.4)(3.3)

Teorico

11659182.04 \pm 3.6.

- Discrepanza di $\sim 3.7\sigma$ sigma.
- Questa non è una scoperta ma abbastanza intrigante.

Keshvarzi et al, Phys. Rev. D 97, 114025 (2018)





Perché $g - 2$

Vediamo dove siamo oggi...

- Media mondiale di $a_\mu \times 10^{10}$:

sperimentale

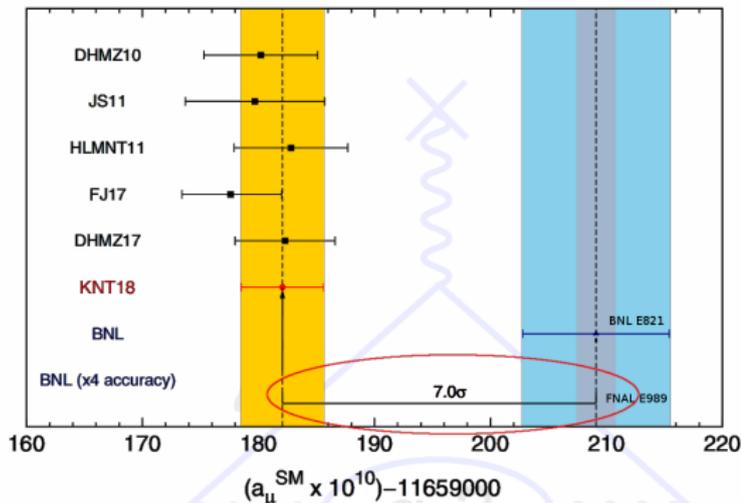
11659209(5.4)(3.3)

Teorico

11659182.04 \pm 3.6.

- Fermilab (E989) punta a un miglioramento della precisione di **4 volte** rispetto a BNL (821).
- Quindi se il valore centrale non cambia...

Keshvarzi et al, Phys. Rev. D 97, 114025 (2018)



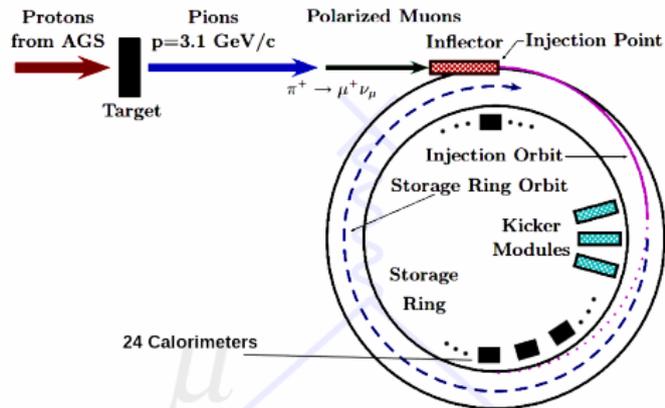
ci aspettiamo **7σ** , quindi è una scoperta di nuova fisica.



Panoramica dell'esperimento

Il principio di base è sempre lo stesso:

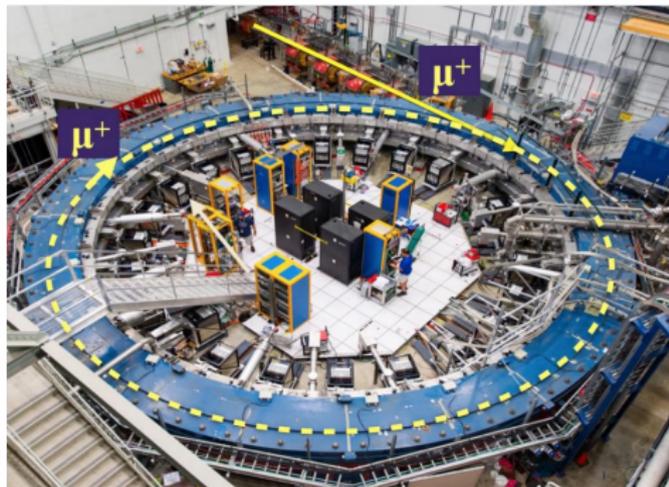
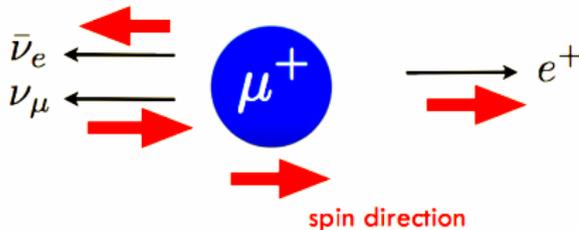
- I muoni polarizzati (spin lungo la direzione del impulso) ruotano all'interno dell'anello di accumulazione, in cui è presente un campo magnetico \vec{B} , e decadono in positroni.





"Lord of the rings"

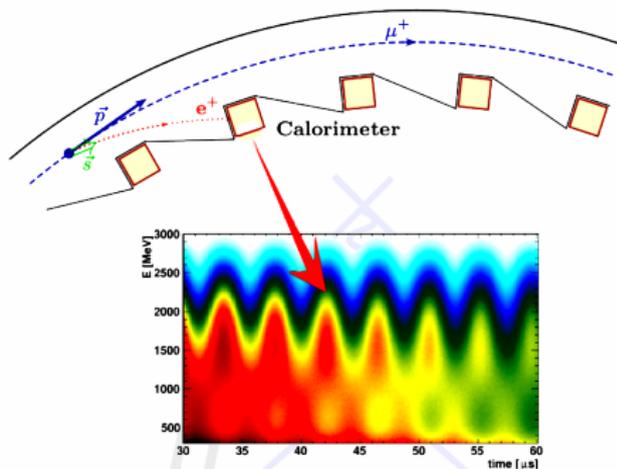
- A causa dell'interazione debole, i positroni di alta energia vengono emessi (prevalentemente) nella direzione dello spin del muone.





La precessione della direzione della emissione

- La precessione dello spin del muone (in campo \vec{B}) causa la precessione della direzione degli emissioni dei positroni.





Precessione... (Caso $g = 2$), Ricorda: $a_\mu = (g_\mu - 2)/2$

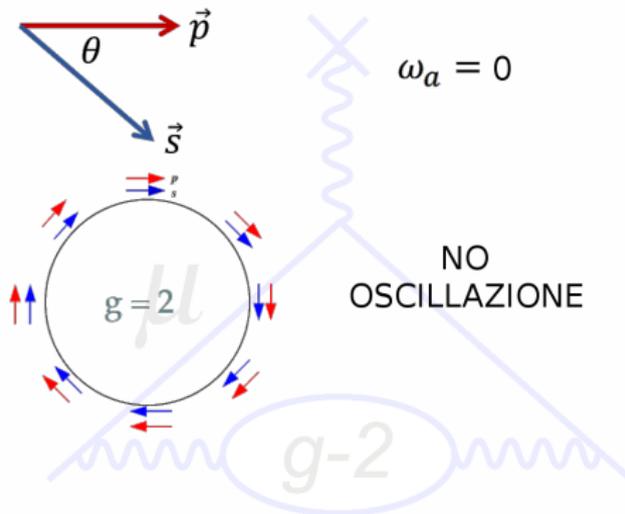
Frequenza del **ciclotrone** e del **Larmor**:

$$\vec{\omega}_C = -e\vec{B}/m_\mu\gamma, \quad \vec{\omega}_S = -g\frac{e\vec{B}}{2m_\mu} - (1 - \gamma)\frac{e\vec{B}}{m_\mu\gamma}$$

- E la differenza:

$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_S - \vec{\omega}_C = a_\mu \frac{e\vec{B}}{m_\mu}$$

- $g = 2$ implica **NO oscillazione** del numero di positroni rivelati.



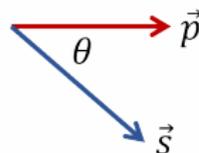


Precessione... (Caso $g > 2$), Ricorda: $a_\mu = (g_\mu - 2)/2$

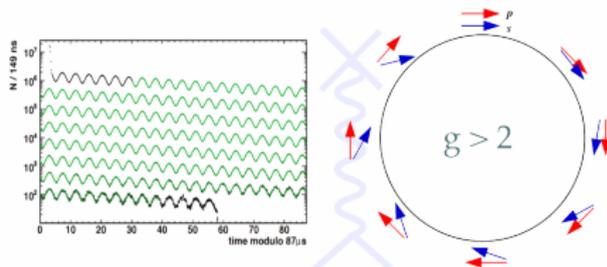
- **12° per giro**, ha bisogno di 30 giri per tornare allo stesso angolo:
- implica **$30 \times 149 \text{ ns} \simeq 4.5 \mu\text{s}$** .

$$\vec{\omega}_a = a_\mu \frac{e\vec{B}}{m_\mu}$$

- g maggiore di 2 implica un'**oscillazione** del numero di positroni rilevati.



$$\omega_a = \dot{\theta}$$



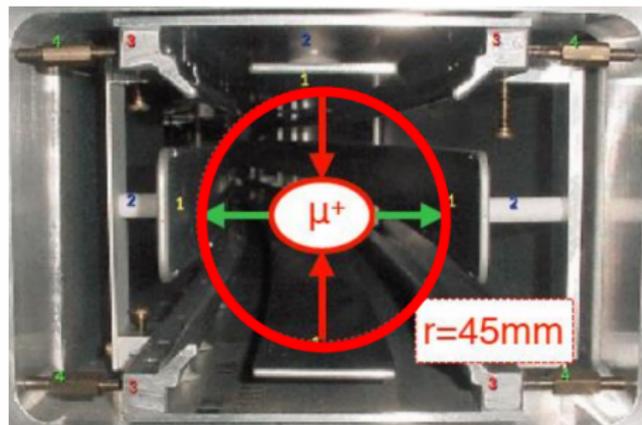
Ma la vita reale è un po' difficile!



Quads...

- C'è bisogno di un campo elettrico per la focalizzazione verticale del fascio ...
- ma implica un'equazione complicata!
- Ma c'è speranza ...

Focalizzazione verticale



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



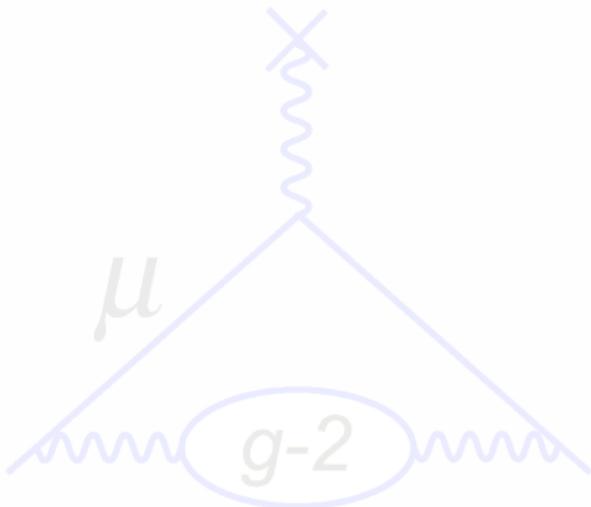
Impulso magico...

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

- Un valore specifico di γ (**29.3**) porta alla cancellazione del coefficiente del termine proporzionale campo elettrico, che corrisponde a un impulso specifico di **3.094 GeV/c** (è il famoso **Impulso magico**).

- B è misurato con la frequenza

NMR: $\omega_p = 2 \mu_p B$





Impulso magico...

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



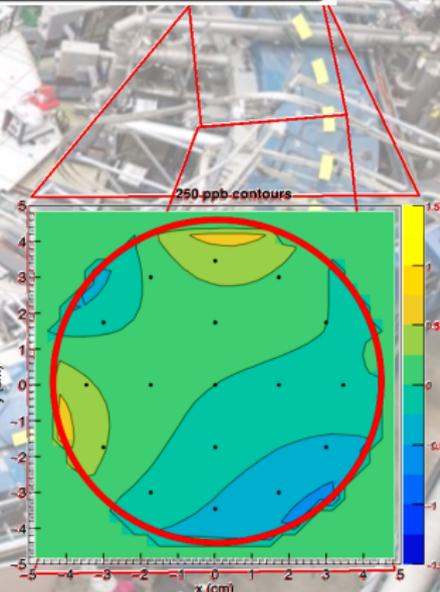
- Quindi, la formula finale è

$$a_\mu = \frac{m_\mu}{e|\vec{B}|} \omega_a$$

- B è misurato con la frequenza NMR:

$$\omega_p = 2 \mu_p B$$

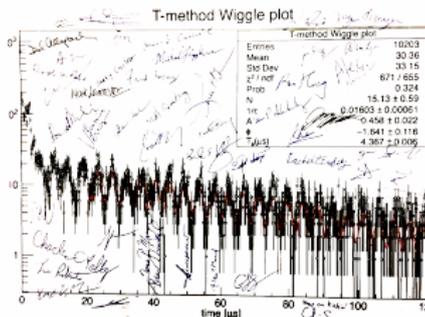
- $B < 1.5$ ppm (Target < 1 ppm)





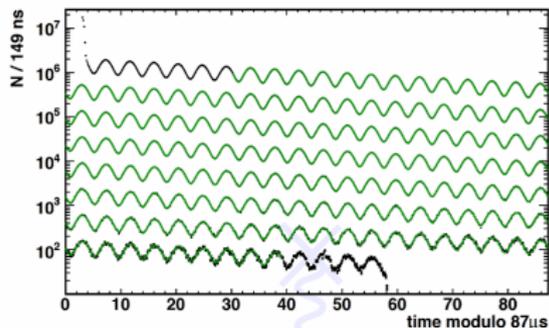
Estrazione di ω_a il famoso "wobble plot"

Prima misura di ω_a , 2017



$10^4 e^+$, 0.1% precisione.

60 ore di dati, 2018



$10^9 e^+$, 1.2 ppm.

"The Fit"

$$N(E, t) \propto e^{-t/\gamma\tau_\mu} [1 - A(E, t) \cos(\omega_a t + \phi)]$$

La conoscenza della **frequenza** implica la conoscenza dell'**anomalia**... **Però**...



Blinding

"Blinding" assoluto

- La frequenza del digitizzatore è stata modificata di una quantità (ΔR_α) nell'intervallo di ± 25 ppm.
- E questo spostamento è sconosciuto a tutti gli analizzatori.

"Blinding" relativo

- Esiste anche un altro tipo di spostamento (ΔR_p (privato)), diverso per gruppi diversi.
- Un gruppo non conosce il ΔR_p dell'altro gruppo, fino a una data decisa.

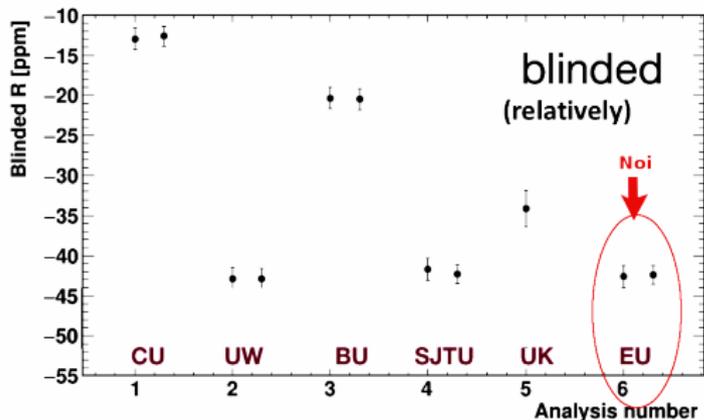
$$\omega_\alpha(R) = 2\pi 0.2291 \text{ MHz} \left[1 + (R - \Delta R_\alpha - \Delta R_p) \times 10^{-6} \right]$$



Stato attuale: "UN-Blinding Relativo" di Febbraio 2019

Prima del "UN-Blinding Relativo"

"Relative Un-Blinding"



Workshop di febbraio, 2019.

- Ricostruzioni indipendenti.
- Diversi metodi di "fitting".
- Diversi trattamenti degli effetti del rivelatore.

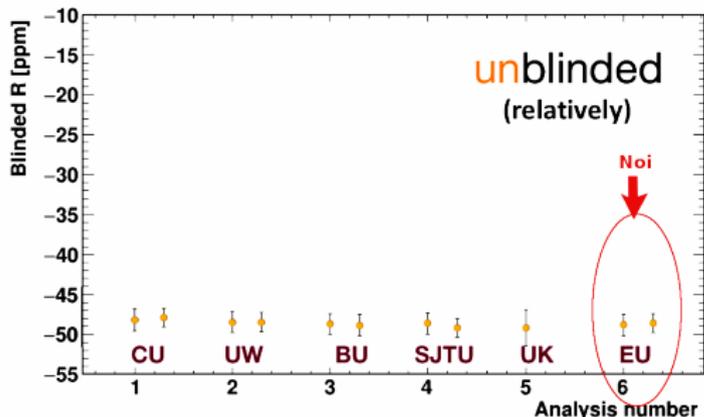
Facciamo "UN-Blinding (Relativo)"



Stato attuale: "UN-Blinding Relativo" di Febbraio 2019

Dopo il "UN-Blinding Relativo"

"Relative Un-Blinding"



Workshop di febbraio, 2019.

Sono tutti d'accordo con l'incertezza statistica consentita.

- Ricostruzioni indipendenti.
- Diversi metodi di "fitting".
- Diversi trattamenti degli effetti del rivelatore.



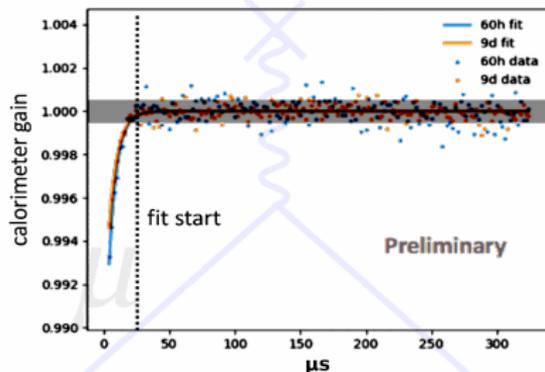
Sistematici e miglioramenti

L'obiettivo del Fermilab (E989) è **140 ppb**, rispetto a **540 ppb** di BNL (E821).

E989 obiettivi

Incertezze	Target
Incertezza Relativa al fascio	< 50 ppb
Muoni perduti	20 ppb
CBO	30 ppb
E-field e correzione di pitch	30 ppb
al rivelatore	< 50 ppb
Gain changes	20 ppb
Pileup	40 ppb
Totale	< 70 ppb

Gain Correction



Contributo italiano



Sistematici e miglioramenti

L'obiettivo del Fermilab (E989) è **140 ppb**, rispetto a **540 ppb** di BNL (E821).

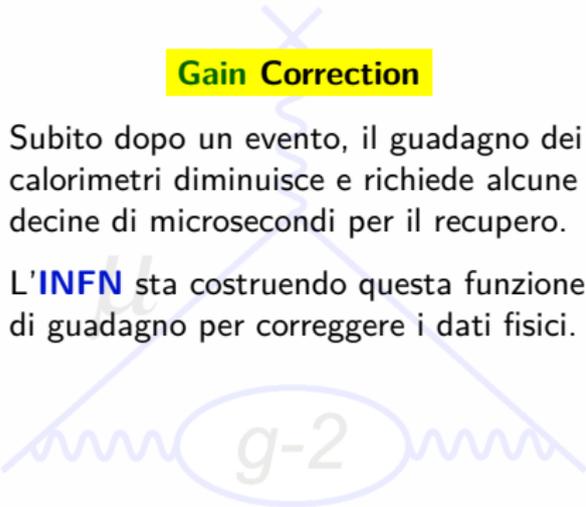
E989 obiettivi

Incertezze	Target
Incertezza Relativa al fascio	< 50 ppb
Muoni perduti	20 ppb
CBO	30 ppb
E-field e correzione di pitch al rivelatore	30 ppb
Gain changes	< 50 ppb
Pileup	20 ppb
Totale	40 ppb
	< 70 ppb

Gain Correction

Subito dopo un evento, il guadagno dei calorimetri diminuisce e richiede alcune decine di microsecondi per il recupero.

L'**INFN** sta costruendo questa funzione di guadagno per correggere i dati fisici.



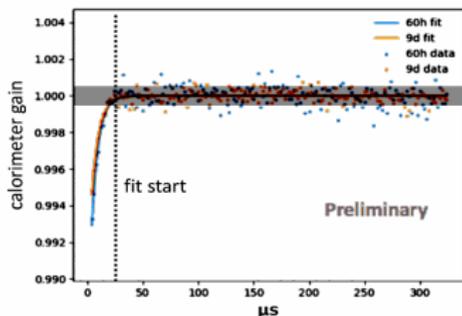


Systema di Calibrazione Laser Italiani

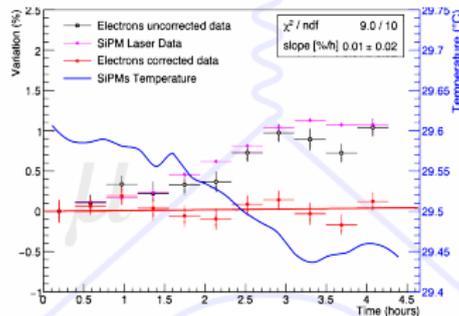
Mandiamo impulsi **laser** di energia **nota** al calorimetro durante le corse dei muoni (**In-Fill**) e anche quando **non c'è** il fascio (**Out-of-Fill**).

- Monitoriamo gli impulsi laser all'inizio (**Source Monitoring**)
- e anche alla fine poco prima che entrino nei calorimetri (**local Monitoring**).

Confrontiamo l'energia misurata dai calorimetri con i valori ottenuti dai monitor, e costruiamo **$24 \times 54 = 1296$** "funzioni di guadagno $G_i(E, t)$ " per **54** cristalli per calorimetro (**24**), gli analizzatori applicano questi ai dati positroni.



"In-Fill"



"Out-of-Fill"

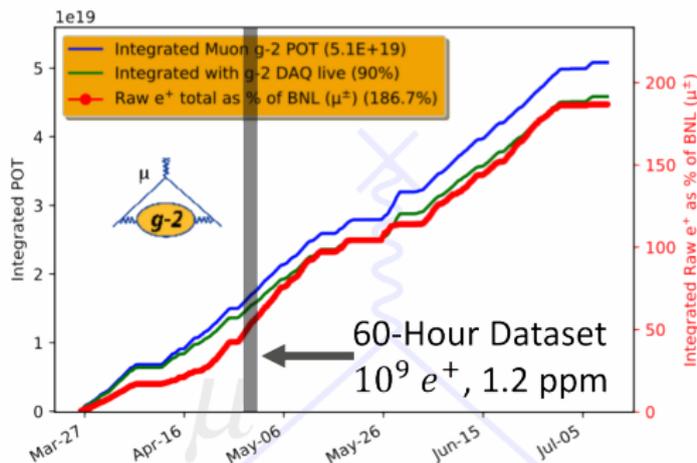


Status e programmi...

- Abbiamo superato la statistica del BNL.
- Analisi di tutto il Run-1 in corso.
- Revisione interna finale è previsto per questa estate all'Elba.
- Probabilmente alcuni risultati a settembre in FCCP (Capri)

$G_{-2a_\mu z i e^+}$

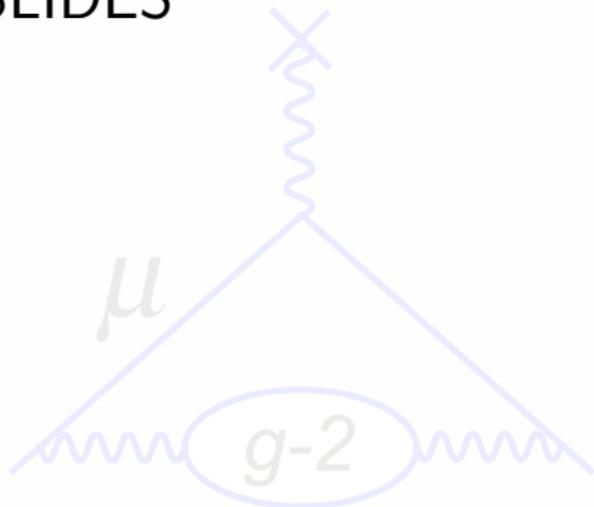
2018 status di Run-1



Credits: Some of the graphics were taken from Moriond 2019 (Fienberg)



BACKUP SLIDES





Collaborazione

E989 scientific collaboration



Domestic Universities

- Boston
- Cornell
- Illinois
- James Madison
- Kentucky
- Massachusetts
- Michigan
- Michigan State
- Mississippi
- Northern Illinois
- Regis
- UT Austin
- Virginia
- Washington

• National Labs

- Argonne
- Brookhaven
- Fermilab



Italy

- Frascati
- Molise
- Naples
- Pisa
- Roma 2
- Trieste
- Udine



China

- Shanghai



Germany

- Dresden



England

- Lancaster
- Liverpool
- University
College London



Korea

- CAPP/IBS
- KAIST



Russia

- JINR/Dubna
- Novosibirsk

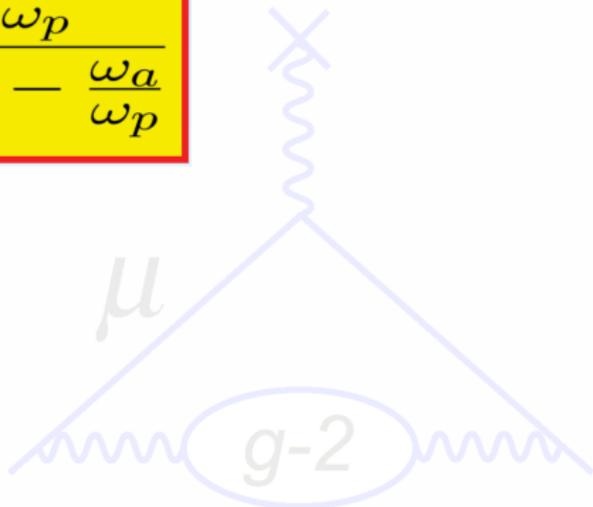
7 countries
35 institutions
~200 authors





Formula Finale

$$a_\mu = \frac{\frac{\omega_a}{\omega_p}}{\frac{\mu_\mu}{\mu_p} - \frac{\omega_a}{\omega_p}}$$





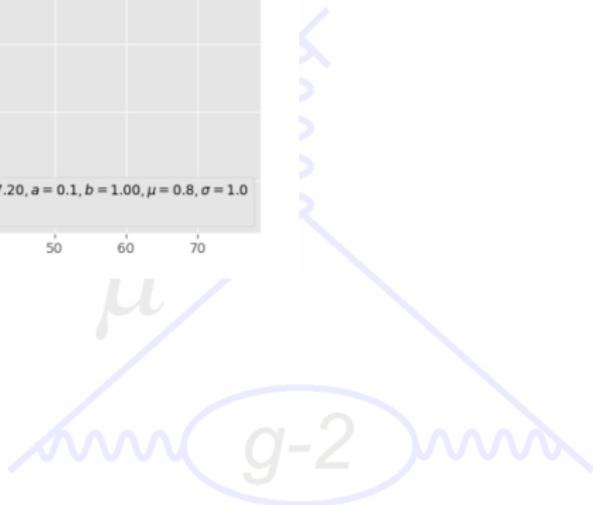
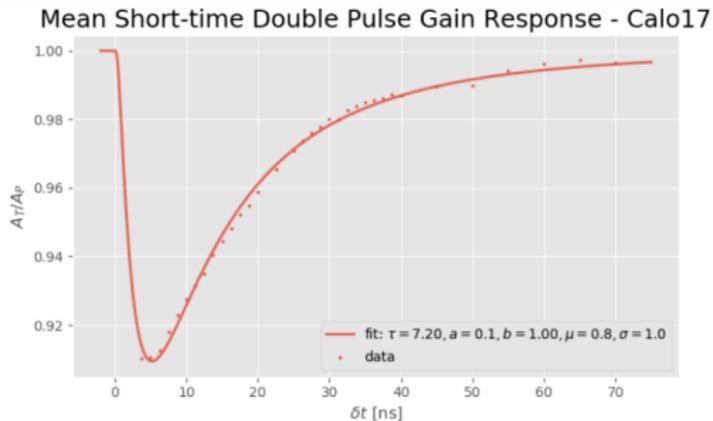
Migliormenti

Improving ω_a			
E821 Error	Size	Plan for the New $g-2$ Experiment	Goal
	[ppm]		[ppm]
Gain changes	0.12	Better laser calibration and low-energy threshold	0.02
Lost muons	0.09	Long beamline eliminates non-standard muons	0.02
Pileup	0.08	Low-energy samples recorded; calorimeter segmentation	0.04
CBO	0.07	New scraping scheme; damping scheme implemented	0.04
E and pitch	0.05	Improved measurement with traceback	0.03
Total	0.18	Quadrature sum	0.07



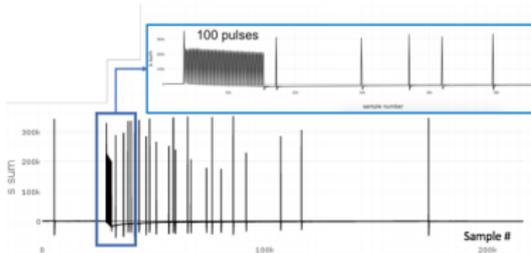


Termine Breve (Gain)

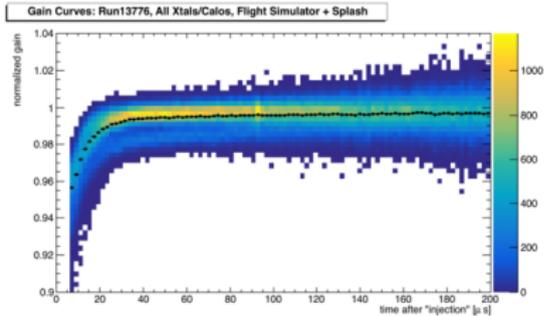




Termine Breve (Gain)



(a)



(b)

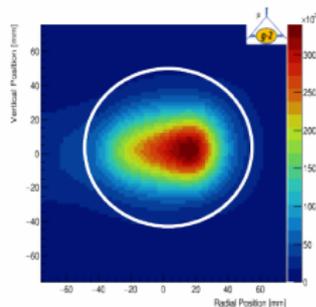
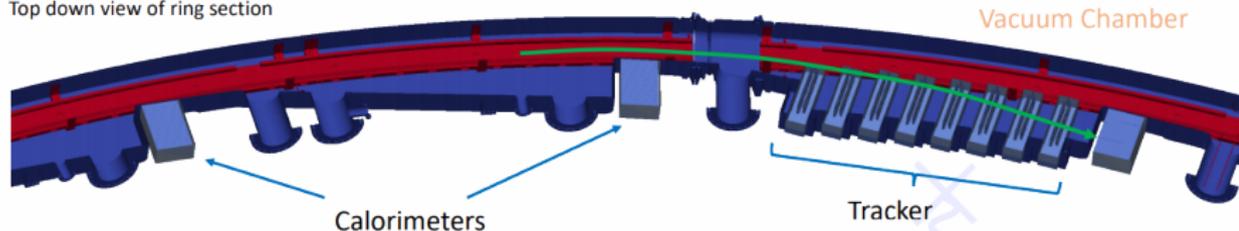




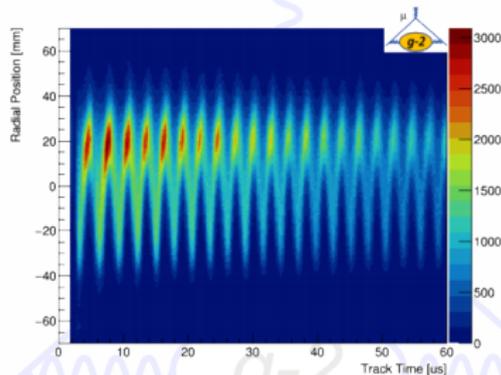
Trecker

Dynamics of the stored beam must be accounted for

Top down view of ring section



extrapolated decay vertices





Trecker's

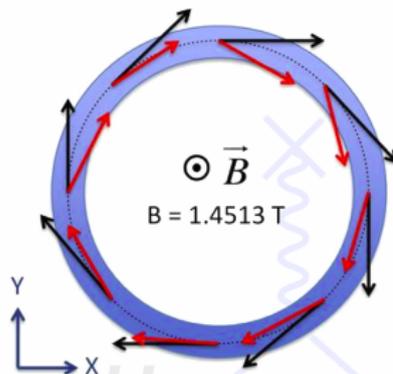
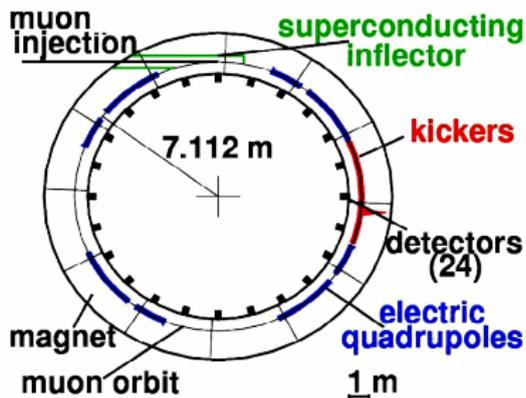
- ▶ assume 1 out of 10 supercycles is a calibration supercycle



- ▶ two laser pulses per fill, separated by $200 \mu\text{s}$ ($\gg \tau_{\text{recovery}}$)
 - ▶ position of the two pulses shifts by $2.5 \mu\text{s}$ every fill
 - ▶ laser pulses before and after fill nail the baseline
- ▶ < 100 pulses with $100 \mu\text{s}$ spacing in gaps between fills
 - ▶ to measure the long-term gain stability to 10^{-3}

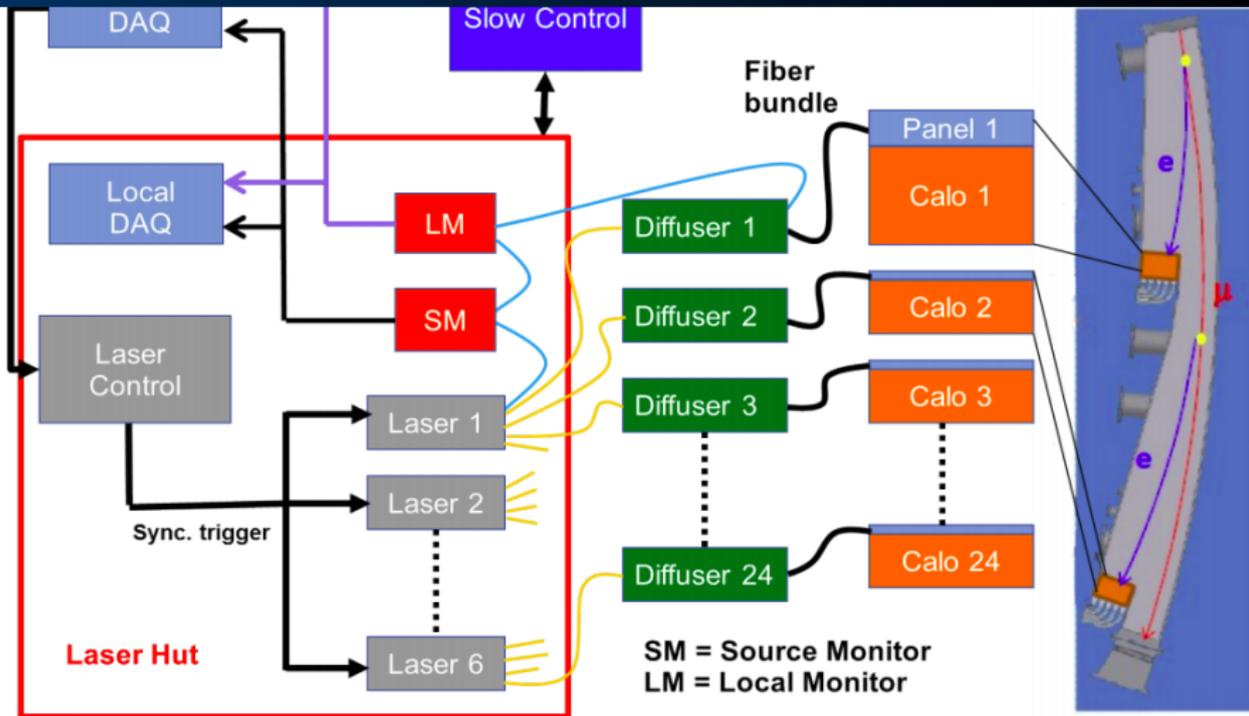


L'anello del accumulazione



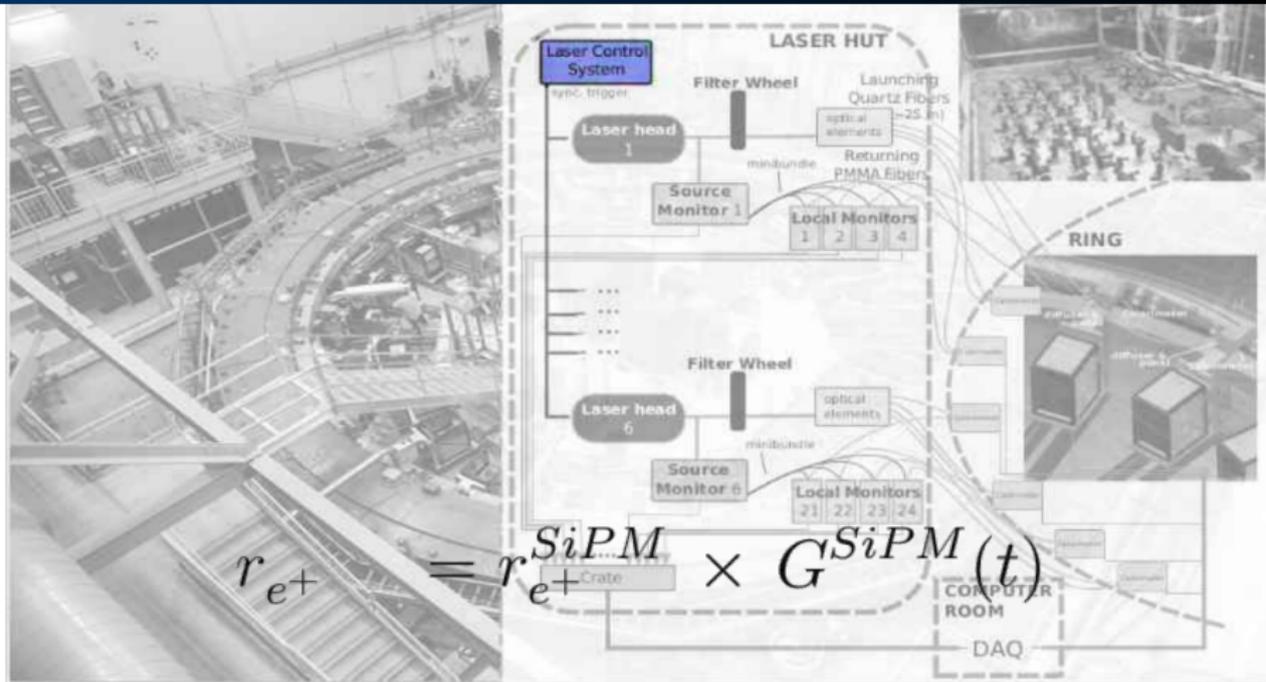


Sistema Calibrazione del Laser





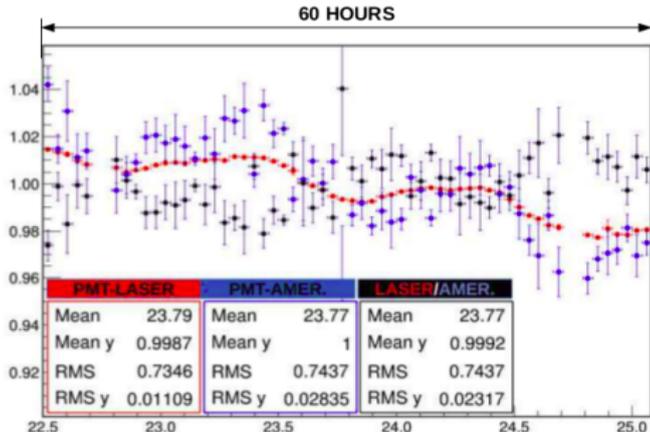
Gain Correzione



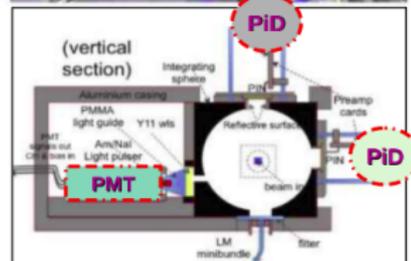
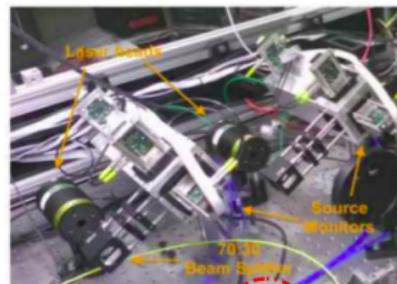


SM

Source Monitors × 6



- 1 PMT : receives laser light from **laser source** plus light generated by (*NaI*) an **americium** source.
 - **Laser/Americium** ~ the laser-source variation, which will be useful for the **long term** calibration.



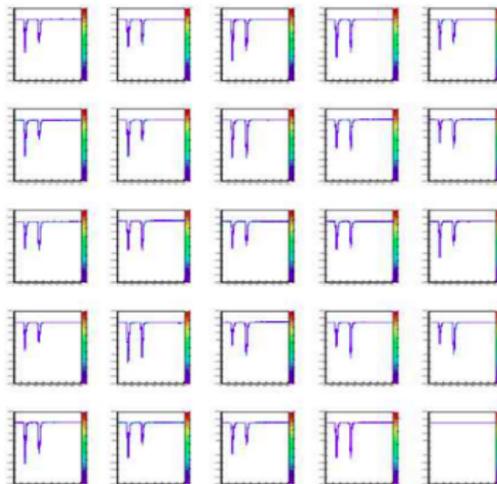
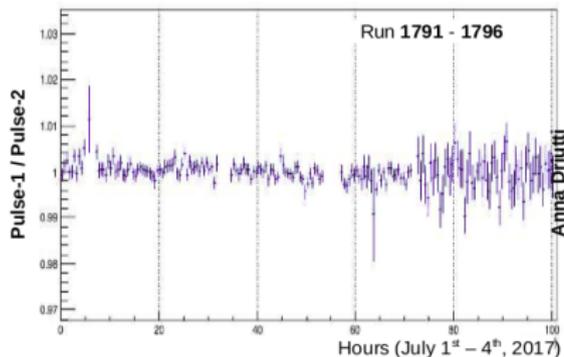


LM

Local monitors × 24

- **1 PMT (Plan of 2 actually)** : receives **laser pulses** directly from the **Source Monitors** (Pulse-1) as well as light coming back from the **calorimeters** (Pulse-2).

- **Pulse-1/Pulse-2** - stability of the Local Monitors.





TEMP

Corrections : SM

SM6: PIN1/PIN2 Temperature Correction

