

**Il magnetismo del muone apre su nuova fisica  
oltre il Modello Standard.  
Il contributo di Trieste ai recenti risultati di  
"Muon g-2".**

G. Cantatore - Università e INFN Trieste  
Collaborazione "Muon g-2"

# Cover story...



## L'esperimento "Muon g-2"

- breve introduzione
- l'apparato sperimentale

## Il gruppo italiano dell'INFN

- il sistema di calibrazione laser
  - il contributo Trieste/Udine

## Il risultato del "Run 1"

- significato
- cosa aspettarsi ora

# Muon g-2 collaboration



## USA

- Boston
- Cornell
- Illinois
- James Madison
- Kentucky
- Massachusetts
- Michigan
- Michigan State
- Mississippi
- North Central
- Northern Illinois
- Regis
- Virginia
- Washington

## USA National Labs

- Argonne
- Brookhaven
- Fermilab



## China

- Shanghai Jiao Tong



## Germany

- Dresden
- Mainz



## Italy

- Frascati
- Molise
- Naples
- Pisa
- Roma Tor Vergata
- Trieste
- Udine



## Korea

- CAPP/IBS
- KAIST



## Russia

- Budker/Novosibirsk
- JINR Dubna



## United Kingdom

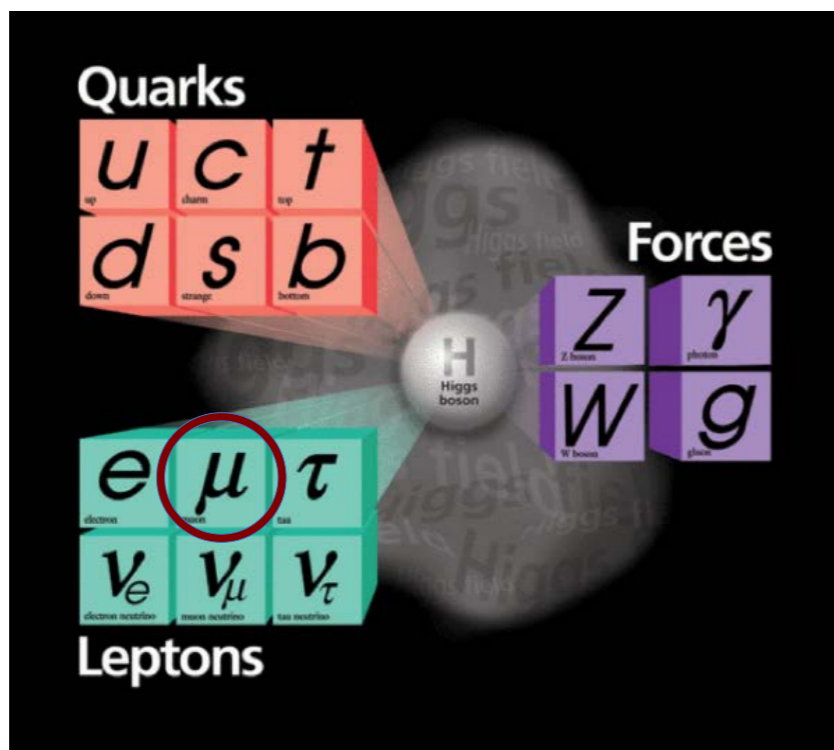
- Lancaster/Cockcroft
- Liverpool
- Manchester
- University College London



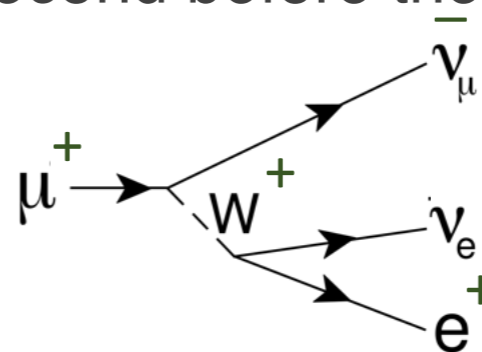
>200 collaborators  
35 Institutions  
7 countries

# What are muons?

Fundamental building blocks of the Standard Model



- Similar to electrons
  - Same charge
  - Same spin properties
- Important differences
  - 200x more massive
  - Unstable, live  $\sim 2$  millionths of a second before they decay

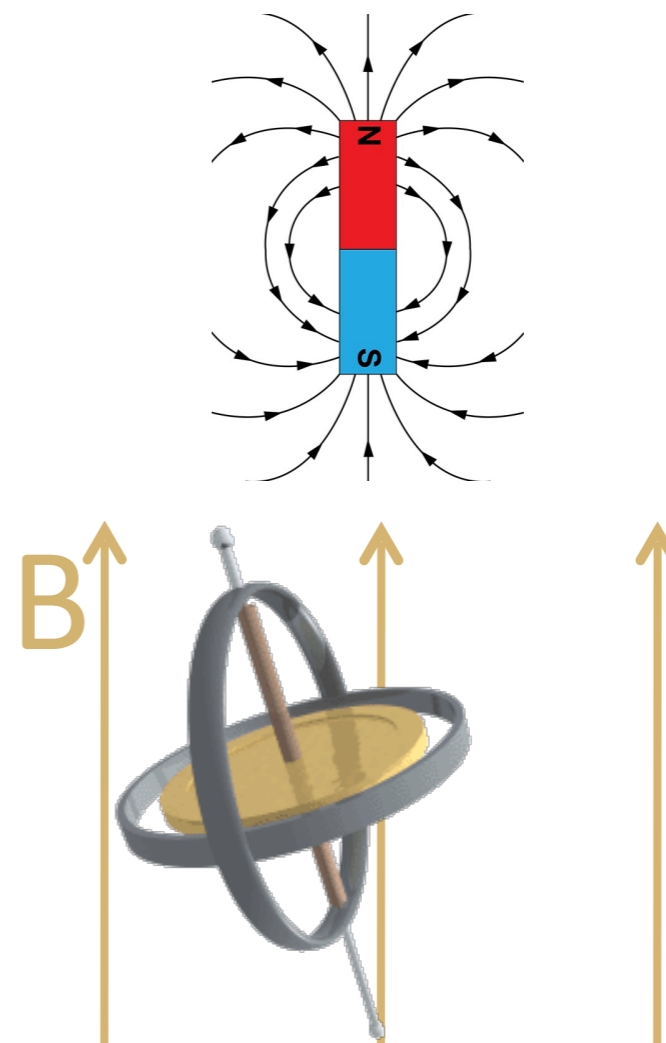


# Muon g-2 measures the muon's magnetic moment

- Because of their spin & charge, muon's act like little bar magnets and have a magnetic moment,  $\mu$
- Like a bar magnet, they feel a torque when placed in a magnetic field

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}, \quad U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

- That torque causes the muon spin to precess around the magnetic field at a rate that increases or decreases depending on the strength of  $\mu$  &  $B$

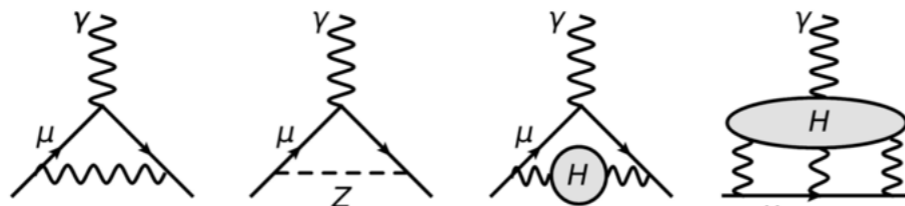


# The g-factor

- The strength of the magnetic moment can be written in terms of fundamental constants and an overall coefficient called the g-factor 
$$\vec{\mu} = g \frac{e}{2m} \vec{S}$$
- $g = 1$ 
  - This was the classical expectation around 1900
- $g = 2$ 
  - Folding in relativistic quantum mechanics, the expectation was shown to be 2 by Thomas and predicted by Dirac's wave equation
- As you can guess from the experiment name, Muon g-2, there is more to the story...

# The anomalous magnetic moment, $a_\mu$

- Particles are never truly alone, constantly surrounded by an entourage of other particles blinking in and out of existence
- What particles? All of them!

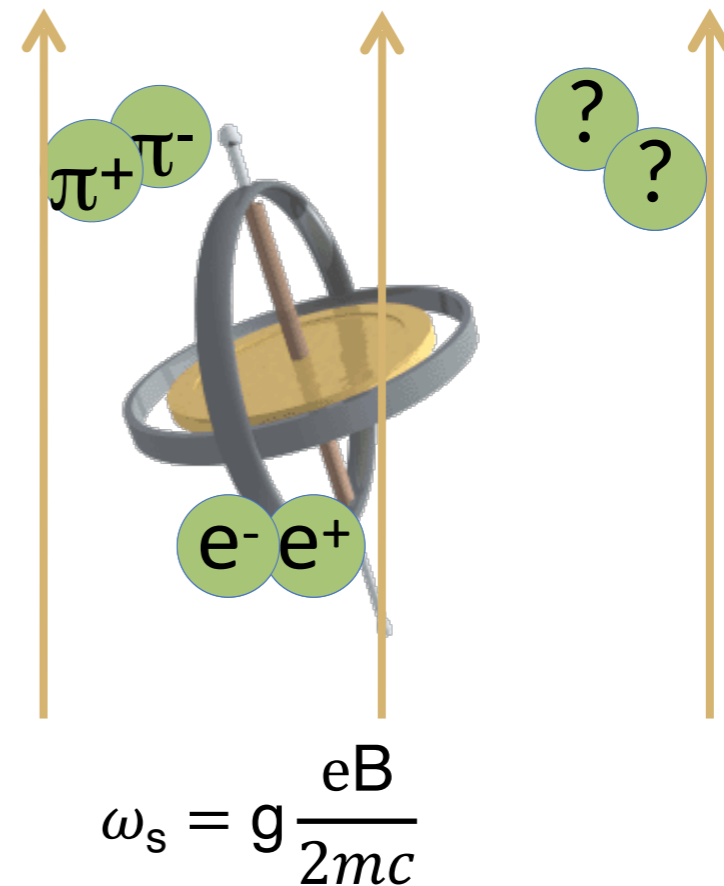


$$a_\mu(\text{SM}) = 0.00116591810(43)$$

368 parts per billion (ppb)

- The anomalous magnetic moment,  $a_\mu$ , is the interesting part

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



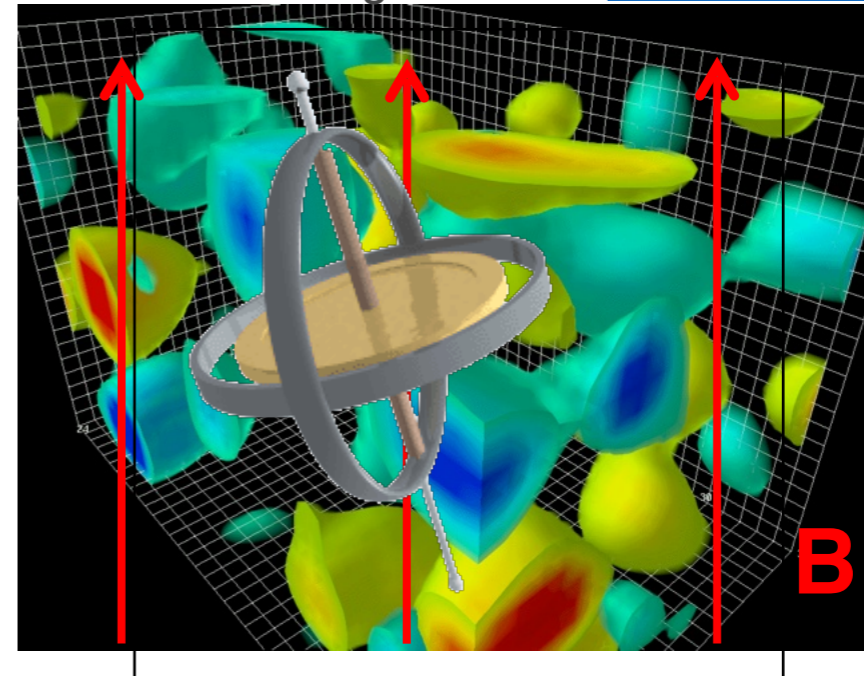


# New physics search

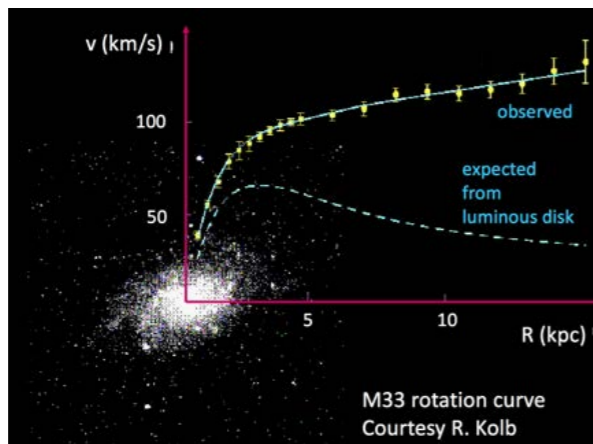
- Measuring the precession tells us the muon magnetic moment
- The high precision allows us to 'see' if new particles or forces are contributing to the anomaly!

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

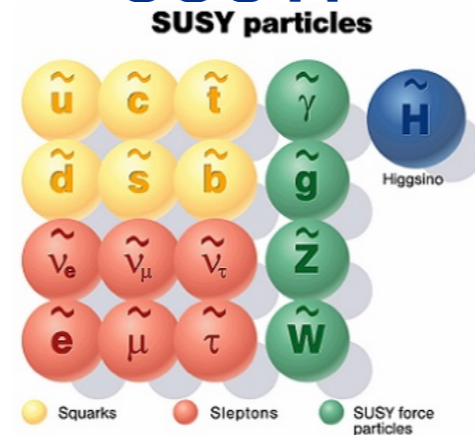
Image Credits: [Derek Leinweber](#)



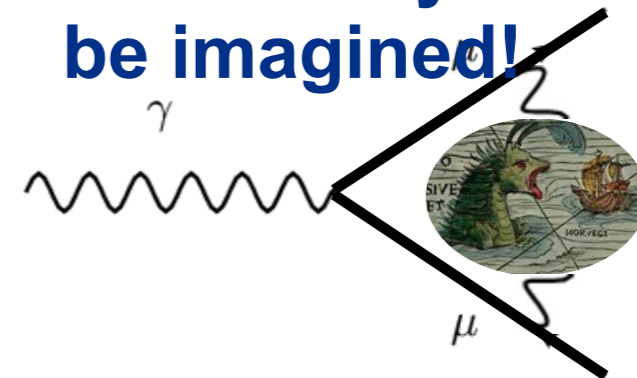
## Dark matter!



## SUSY!

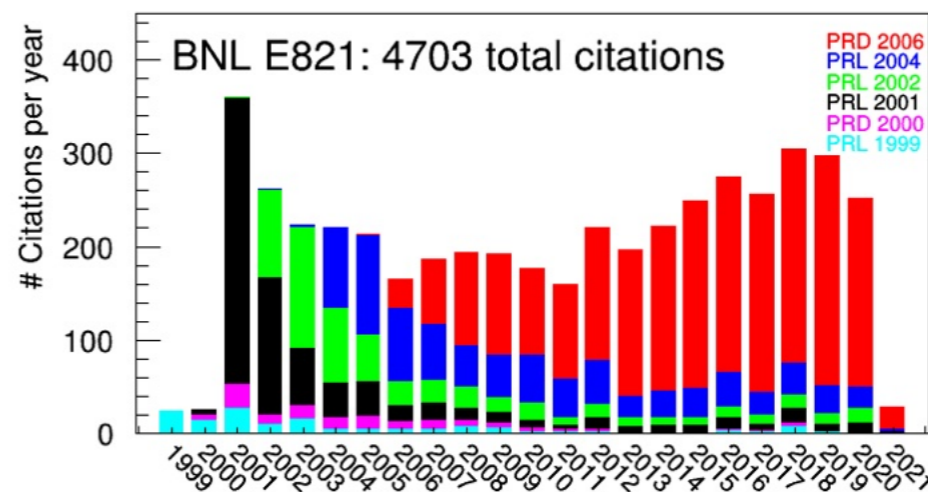
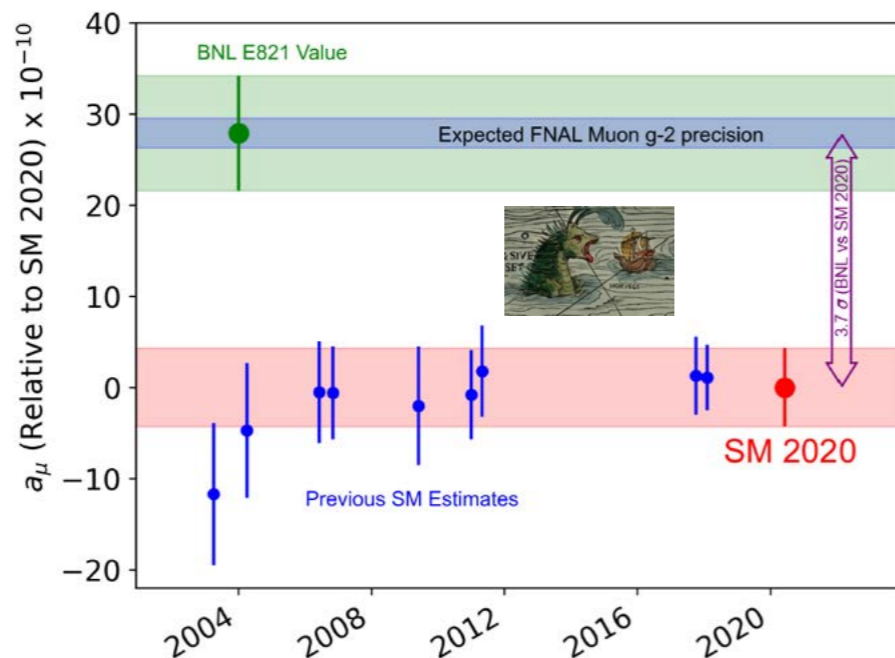


## Monsters yet to be imagined!



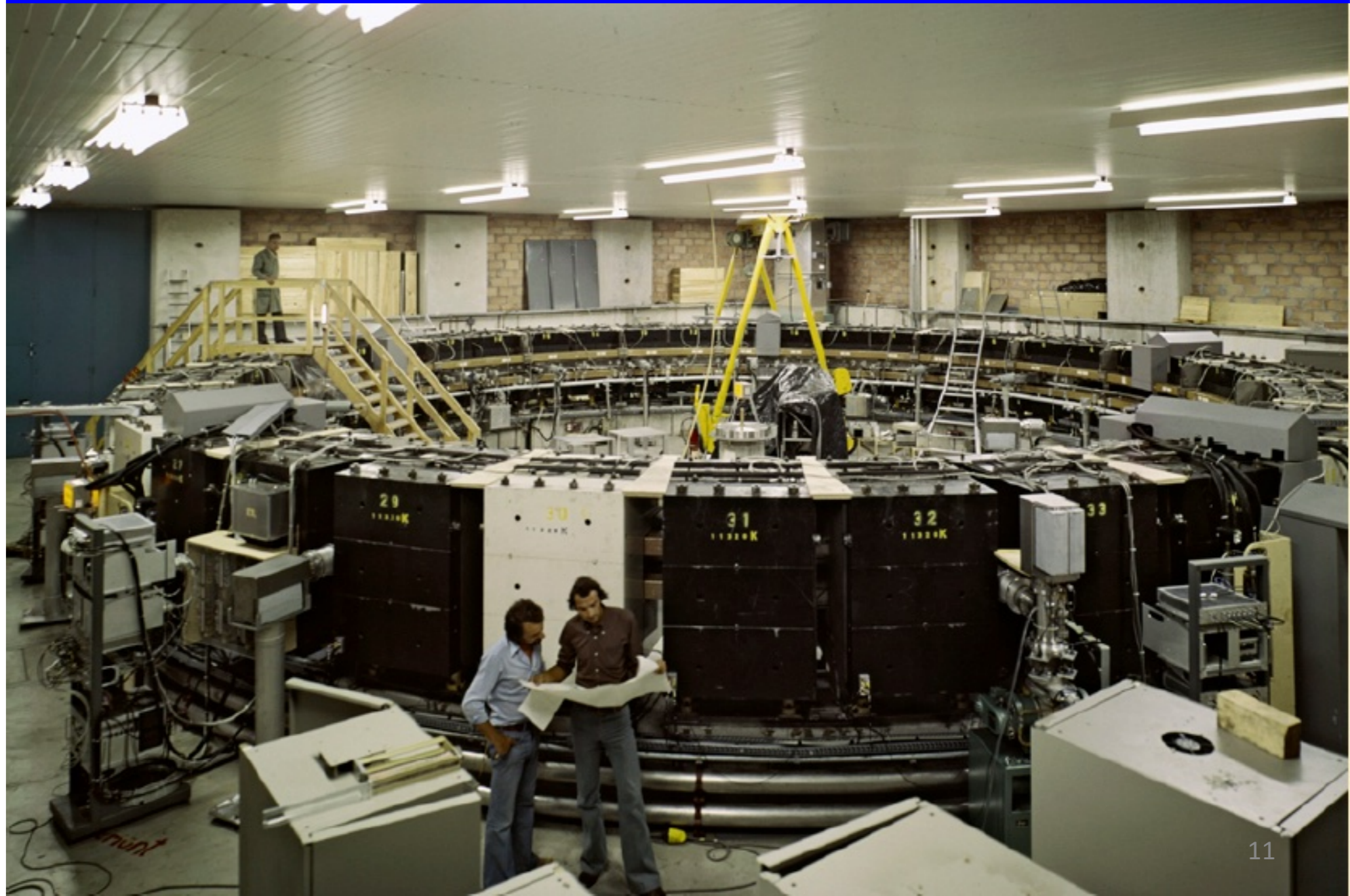
# A hint of new physics

- $a_\mu$  last measured 20 years ago at Brookhaven National Lab (BNL) where an interesting  $2.7\sigma$  hint of new physics was discovered
  - Has grown to  $3.7\sigma$  with improvements in theory  $a_\mu = \frac{g-2}{2}$

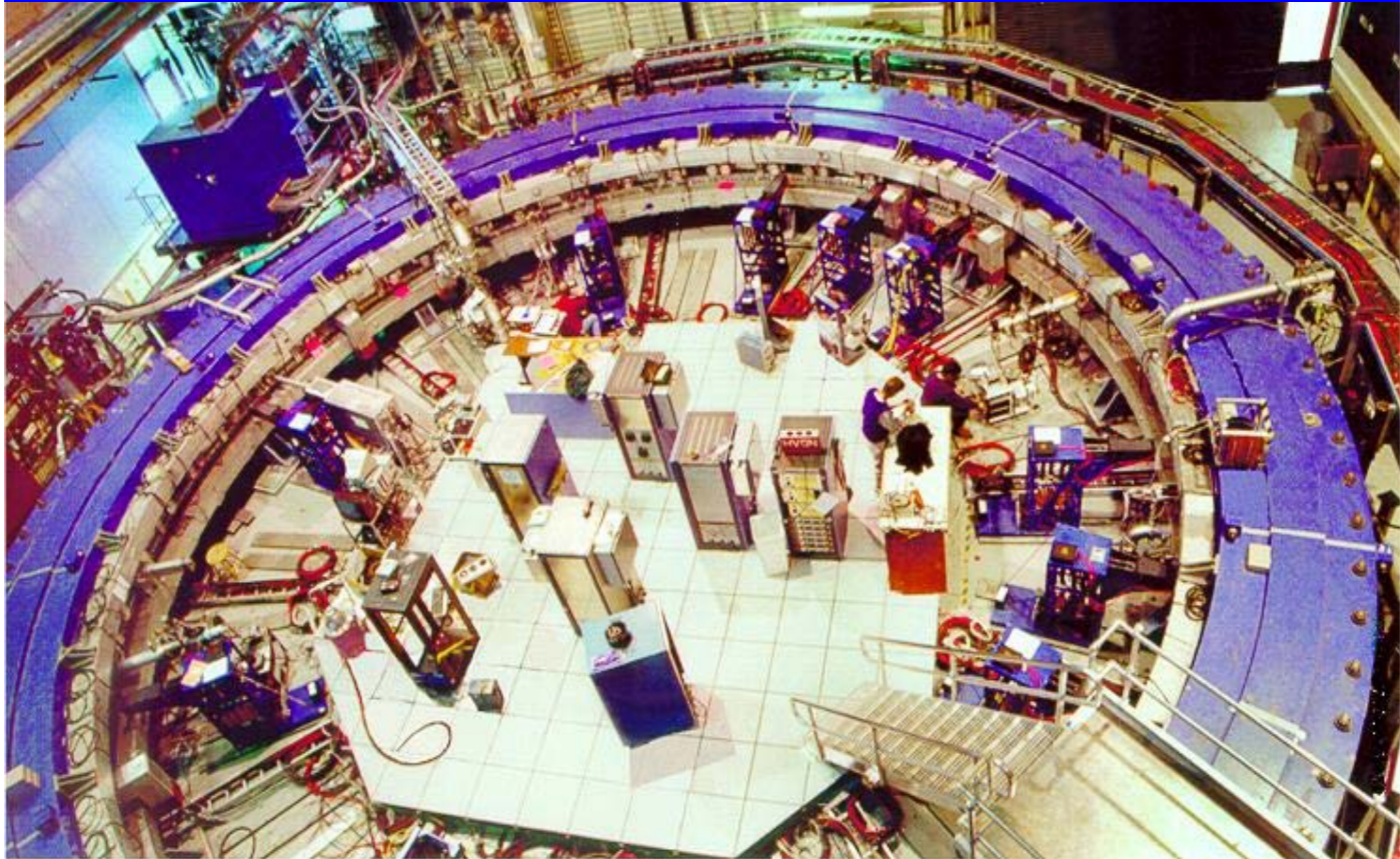


- The difference has intrigued physicists for years

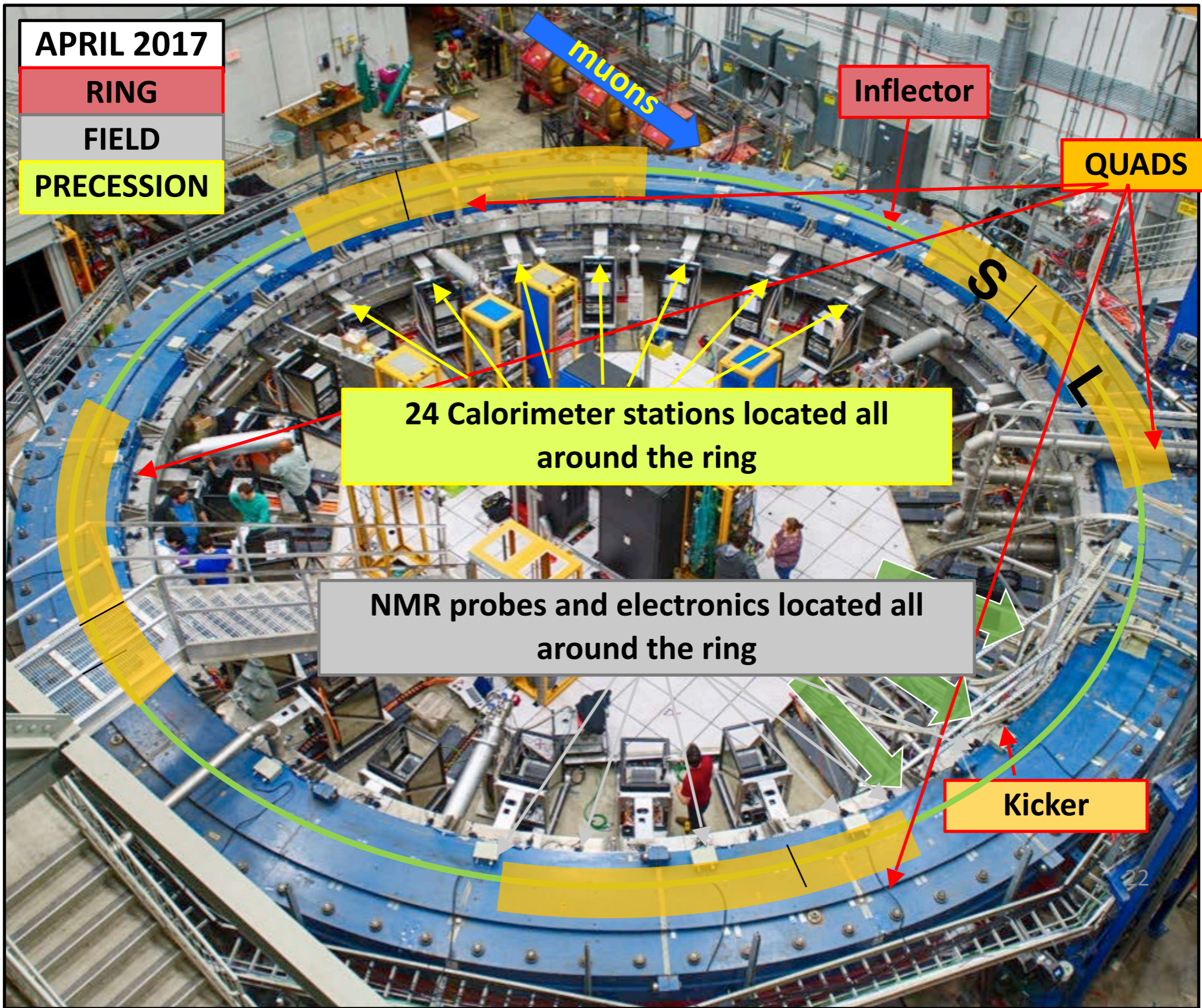
# G-2 muon experiment at CERN (Seventies)



# G-2 muon experiment at Brookhaven (2000's)



G. Venanzoni, CERN Seminar, 8 April 2021



APRIL 2017  
RING  
FIELD  
PRECESSION

muons

Inflector

QUADS

24 Calorimeter stations located all around the ring

NMR probes and electronics located all around the ring

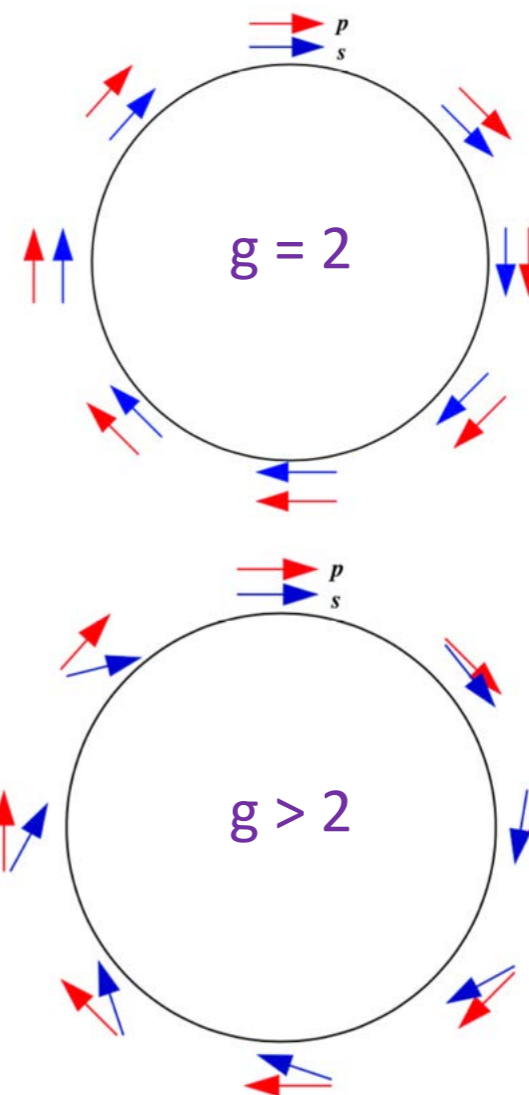
Kicker

## Why use a storage ring?

- We store bunches of  $\sim 10000$  muons every tenth of a second that are nearly 100% polarized
- The rate that the muon spin rotates,  $\omega_s$ , with respect to the cyclotron frequency,  $\omega_c$ , is given by

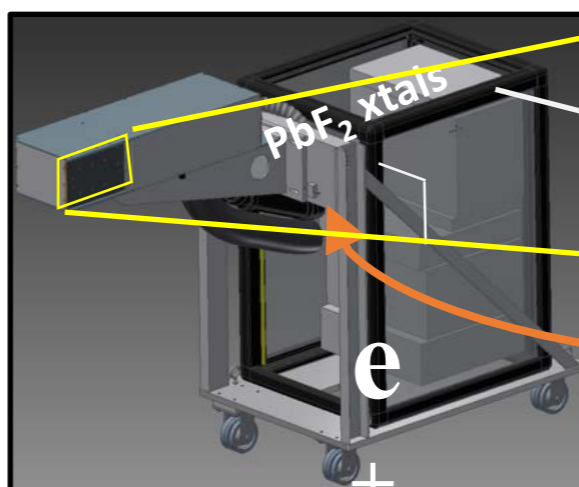
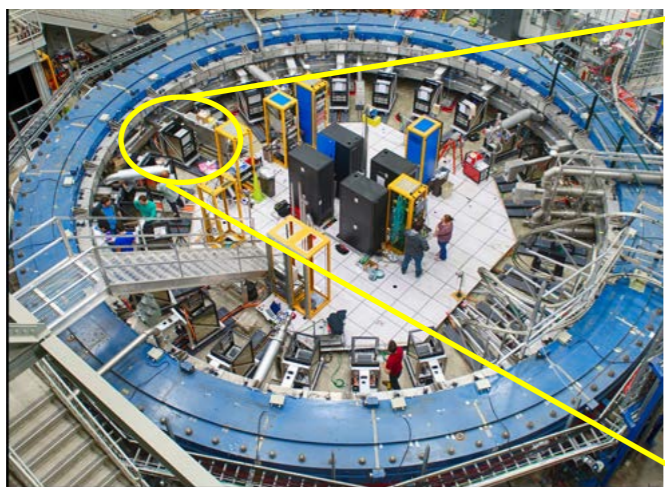
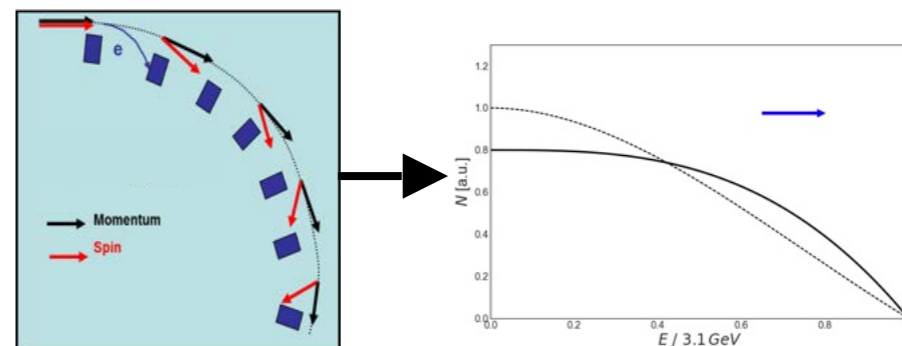
$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c = - \left( \frac{g_\mu - 2}{2} \right) \frac{q\vec{B}}{m} = -a_\mu \frac{q\vec{B}}{m}$$

- If  $g = 2$  exactly, the spin and momentum vectors would remain locked together  $\rightarrow \omega_a = 0$



# Why use a storage ring?

- Parity violation in muon decay  $\rightarrow$  high energy decay positrons are preferentially emitted in the muon spin direction
- Measure the energy spectrum with detectors around the inside of the ring

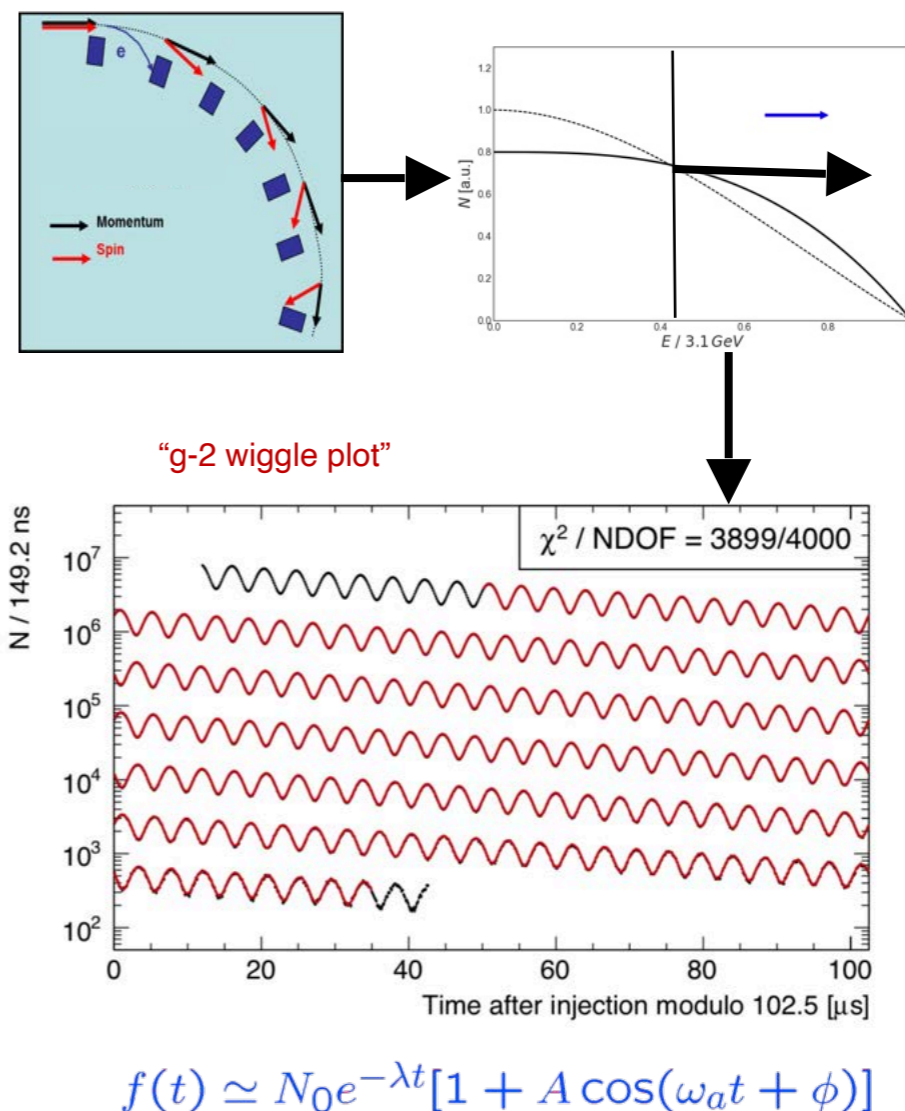


# Why use a storage ring?

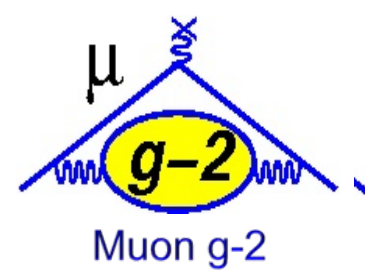
- Parity violation in muon decay  $\rightarrow$  high energy decay positrons are preferentially emitted in the muon spin direction
- Measure the energy spectrum with detectors around the inside of the ring
- By observing the rate the energy spectrum fluctuates up and down, we measure  $\omega_a \rightarrow a_\mu$  directly

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

- 800x more sensitive than an expt at rest, which measures  $g$ !







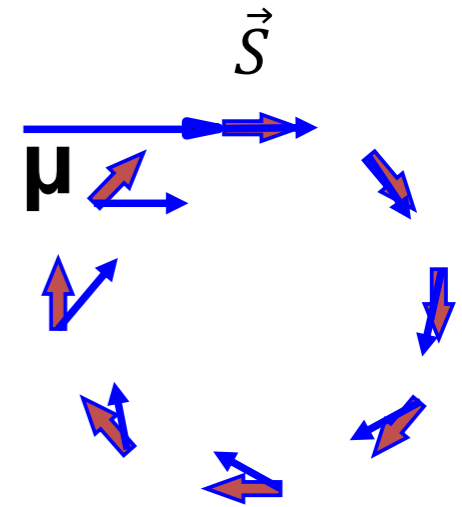
## 1) Polarized muons

~95% polarized for forward decay



## 2) Precession proportional to (g-2)

$$\omega_a = \omega_{spin} - \omega_{cyclotron} = \left( \frac{g-2}{2} \right) \frac{eB}{mc} \quad a_\mu = (g-2)/2$$

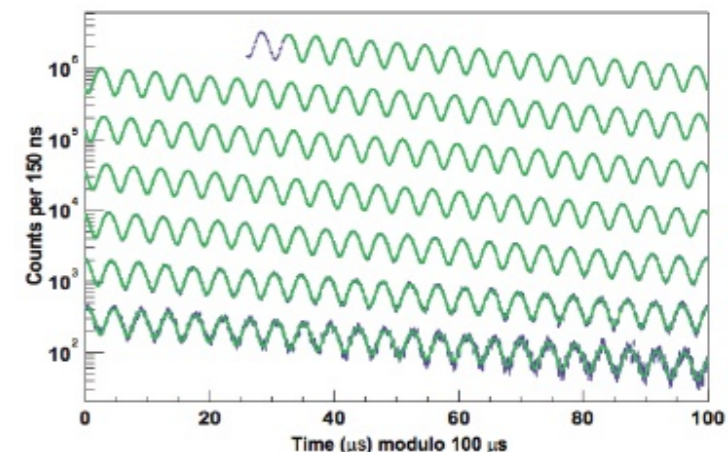


## 3) $P_\mu$ magic momentum = 3.09 GeV/c

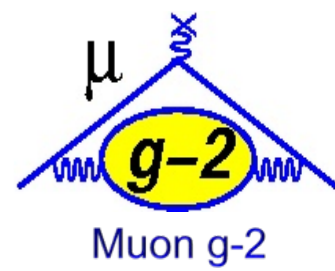
$$\vec{\omega}_a = \frac{e}{mc} \left[ a_\mu \vec{B} - \left( a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \vec{\beta} \times \vec{E} \right]$$

## 4) Decay $e^+$ emitted preferably in spin direction of the muon

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$$

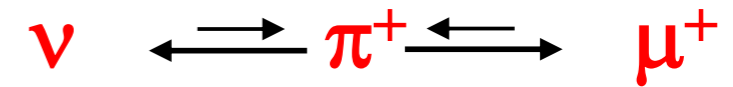


# Key ingredients



## 1) Polarized muons

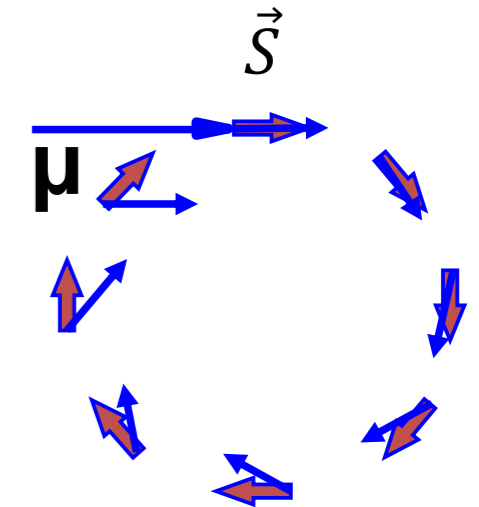
~95% polarized for forward decay



## 2) Precession proportional to (g-2)

$$\omega_a = \omega_{spin} - \omega_{cyclotron} = \left( \frac{g-2}{2} \right) \frac{eB}{mc}$$

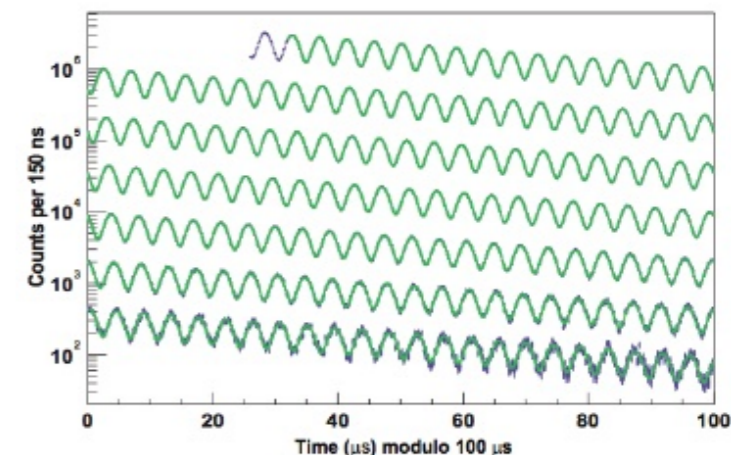
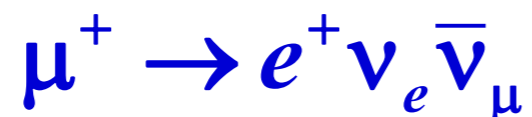
Measure 2 quantities  $a_\mu = (g-2)/2$



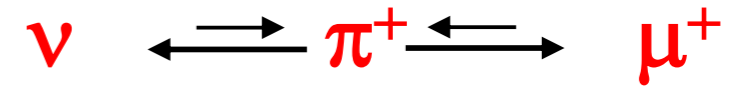
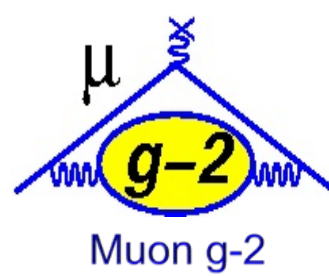
## 3) $P_\mu$ magic momentum = 3.09 GeV/c

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

## 4) Decay $e^+$ emitted preferably in spin direction of the muon



# Key ingredients



## 1) Polarized muons

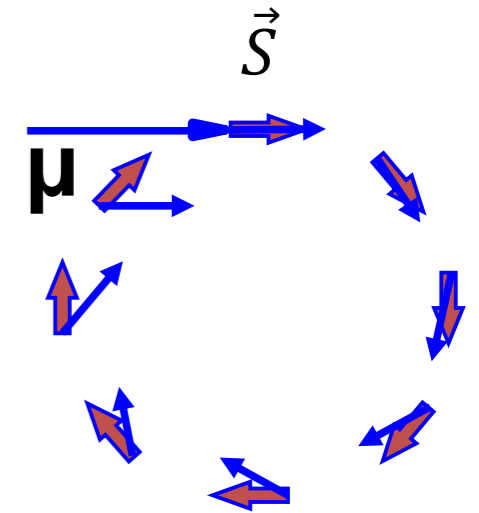
~97% polarized for forward decay

## 2) Precession proportional to (g-2)

$$\omega_a = \omega_{spin} - \omega_{cyclotron} = \left( \frac{g-2}{2} \right) \frac{eB}{mc}$$

Measure 2 quantities

$a_\mu = (g-2)/2$

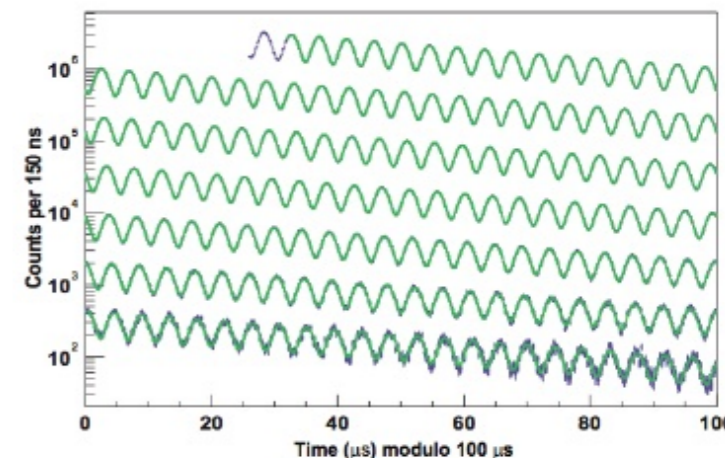
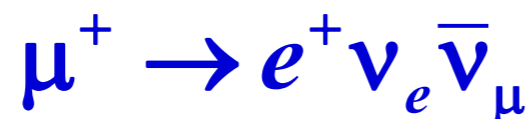


## 3) $P_\mu$ magic momentum = 3.09 GeV/c

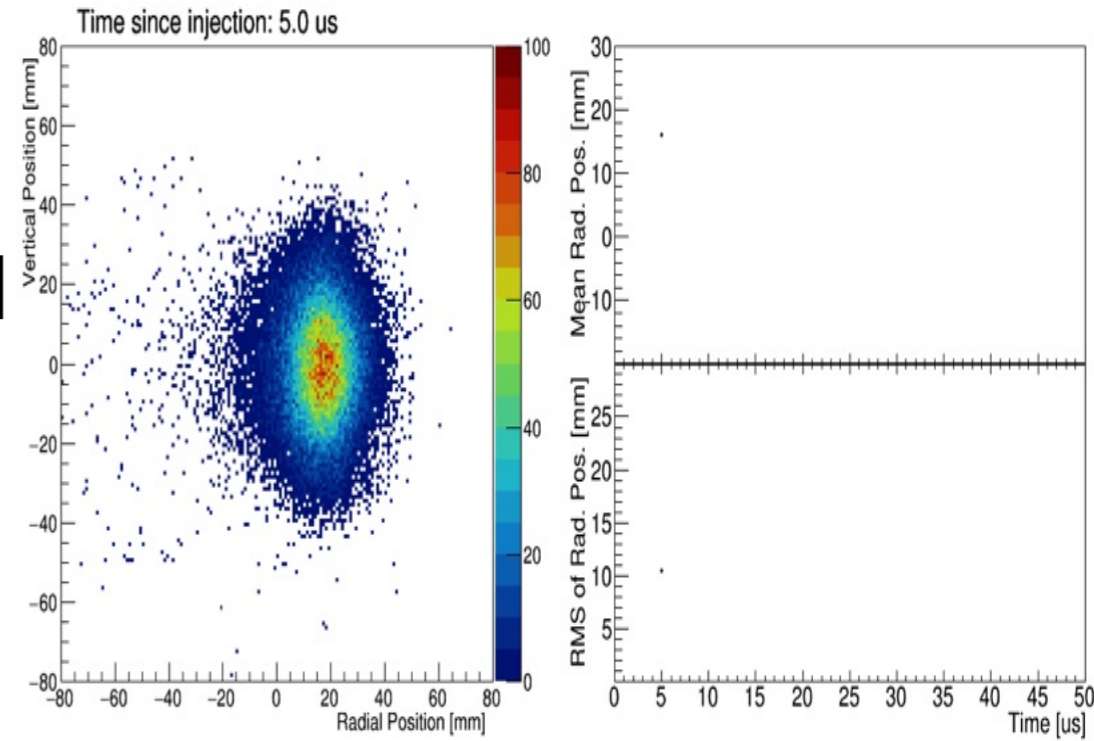
$$\vec{\omega}_a = \frac{e}{mc} \left[ a_\mu \vec{B} - \left( a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \vec{\beta} \times \vec{E} \right]$$

$E$  field doesn't affect muon spin when  $\gamma = 29.3$

## 4) Decay $e^+$ emitted preferably in spin direction of the muon



- The muon beam oscillates and breathes as a whole
- The full equation is more complex and corrections due to radial (x) and vertical (y) beam motion are needed



$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c =$$

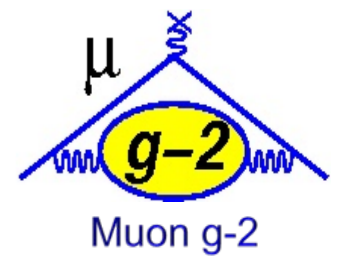
$$= -\frac{e}{mc} \left[ a_\mu \vec{B} - \left( a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \vec{\beta} \times \vec{E} - a_\mu \left( \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) (\vec{\beta} \cdot \vec{B}) \vec{\beta} \right]$$

- Running at  $\gamma_{\text{magic}} = 29.3$  ( $p = 3.094$  GeV/c) this coefficient is null
- Because of momentum spread ( $< 0.2\%$ )  $\rightarrow$  **E-field Correction**

- Vertical beam oscillation  $\rightarrow$  **Pitch correction**

We will come back to these corrections in the following

# Extracting $a_\mu$ (simplified)



By expressing B in terms of the precession frequency  $\omega_p'$  of a proton shielded in a spherical water sample:

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

External (precise) data

$$B = \frac{\hbar \omega_p'}{2\mu_p'}$$

$$e = \frac{4m_e \mu_e}{\hbar g_e}$$

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

ratio of muon to proton precession  
in the same magnetic dipole field

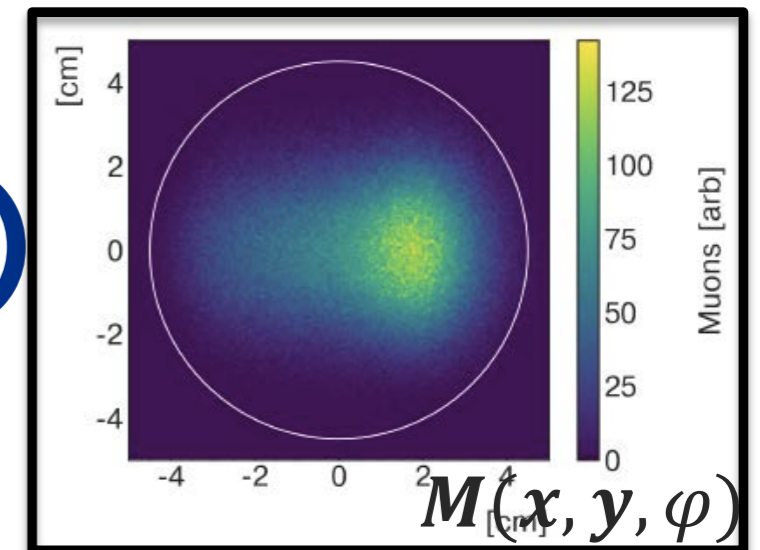
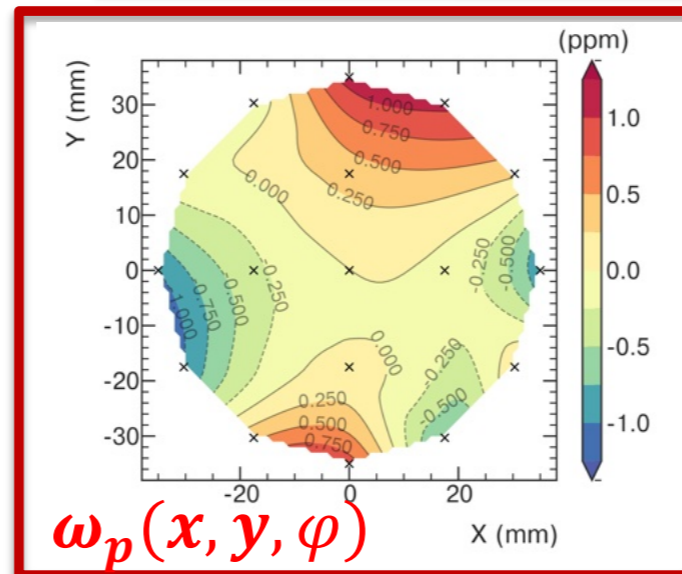
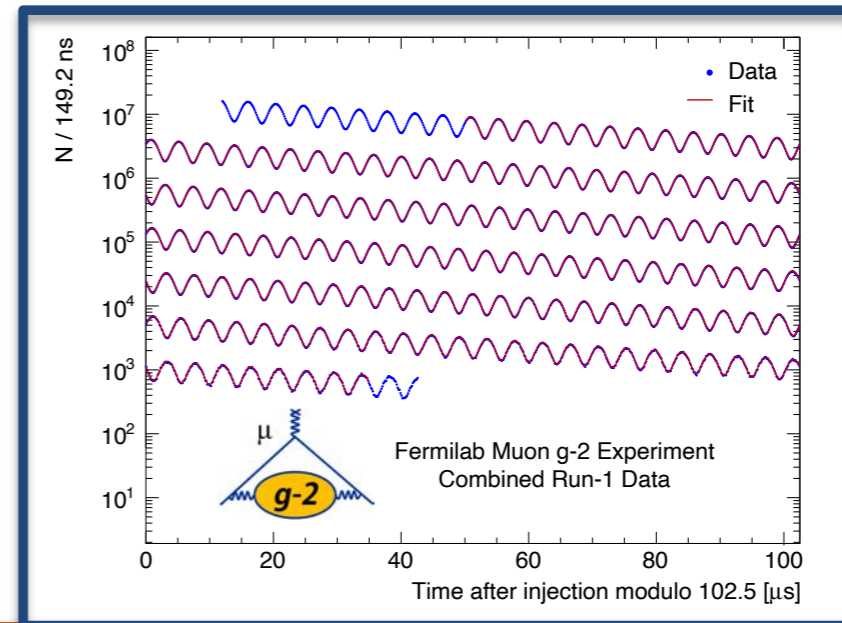
$\tilde{\omega}_p'$  = Proton Larmor precession frequency **weighted for the muon distribution**

# Extracting $a_\mu$ (simplified)

$\omega_a$  = muon spin precession respect to momentum (in B field)

$\omega_a$

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



$$\tilde{\omega}_p' = \omega_p'(x, y, \varphi) \otimes M(x, y, \varphi)$$

$\omega_p$  = proton precession frequency

M = muon spatial (and time) distribution

# But wait, there's more...

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

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

Field transients
Field calibration

- Every one of these terms has been studied in extraordinary detail. How much?

# The analysis is performed 'blind'

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

- $f_{\text{clock}}$  is the frequency that our clock ticks
  - Precision timepiece, stable at ppt level
- Throughout the entire analysis the clock frequency is kept secret from all collaborators
  - Joe Lykken and Greg Bock (FNAL Directorate) stop in each week to check on the clock
  - Secret envelopes kept until physics analysis is complete and ready to be revealed (Feb 25)





## Responsabilità principali del gruppo Italiano INFN in Muon g-2

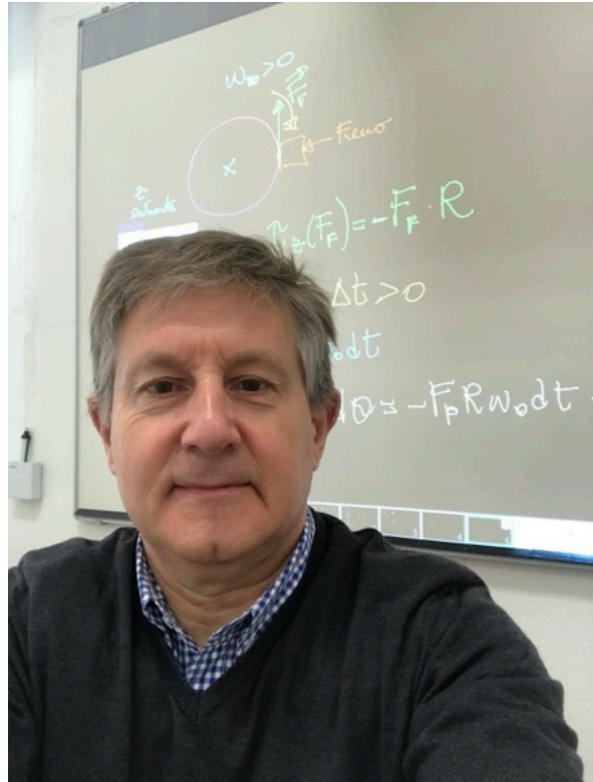
- il sistema di calibrazione laser: progetto, costruzione e operazione (\*)
- ~~analisi dati Run 1 e seguenti~~ ⇒ prossimo seminario...
  - **Contributo INFN Trieste/Udine**
    - “PiTs frame” - primo prototipo del sistema di diffusione dei calorimetri “PiTs frame” (\*\*)
    - “Source Monitor” ⇒ calibrazione assoluta degli impulsi laser (\*)
    - “Local Monitor” ⇒ controllo di stabilità della distribuzione (\*)

(\*) <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/11/P11025>

(\*\*) <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/P09014>



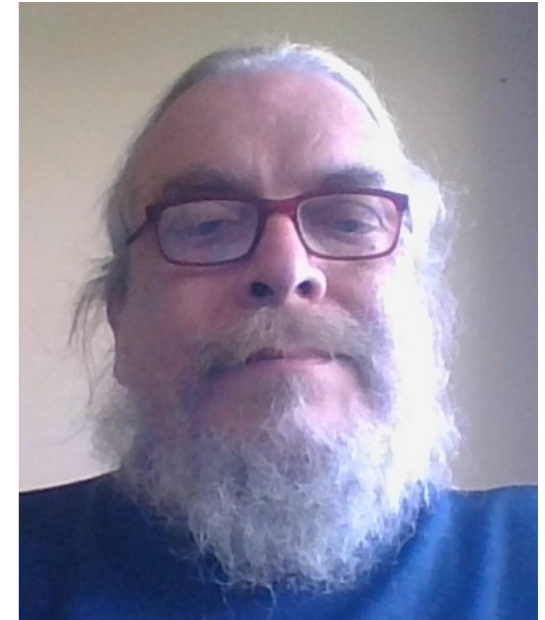
**Anna Driutti**



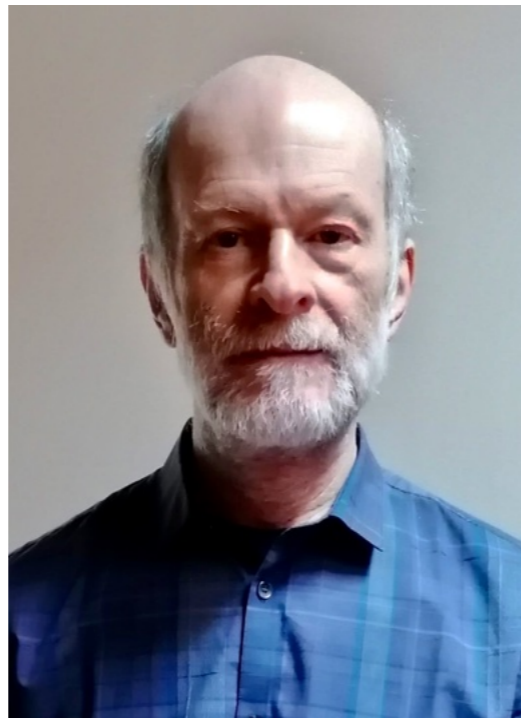
**Giovanni Cantatore**



**Marin Karuza**



**Lorenzo Santi**



**Diego Cauz**



**Giovanni Pauletta**

Il sistema di calibrazione laser è un componente molto importante di Muon g-2, era praticamente assente nell'esperimento precursore al Brookhaven National Laboratory (BNL)

## Esperimento

### precursore a BNL (2001)

### Muon g-2 a FNAL

Table 5.2: The largest systematic uncertainties for the final E821  $\omega_a$  analysis and proposed upgrade actions and projected future uncertainties for data analyzed using the  $T$  method. The relevant Chapters and Sections are given where specific topics are discussed in detail.

Category	E821 [ppb]	E989 Improvement Plans	Goal [ppb]	Chapter & Section
Gain changes	120	Better laser calibration low-energy threshold	20	16.3.1
Pileup	80	Low-energy samples recorded calorimeter segmentation	40	16.3.2
Lost muons	90	Better collimation in ring	20	13.10
CBO	70	Higher $n$ value (frequency)		
$E$ and pitch	50	Better match of beamline to ring Improved tracker	< 30	13.9
		Precise storage ring simulations	30	4.4
Total	180	Quadrature sum	70	

dal "TDR" di Muon g-2

Il principio è del sistema è semplice

- impulsi laser di ampiezza calibrata con un "source monitor" che integra una sorgente di  $^{241}\text{Am}$  per avere un riferimento assoluto
- gli impulsi vengono distribuiti ai cristalli dei calorimetri da una rete di fibre ottiche monitorate da un "local monitor"
- gli impulsi laser illuminano i cristalli attraverso un "diffusore" secondo varie modalità permettendo di correggere le variazioni del guadagno dei SiPM dei calorimetri

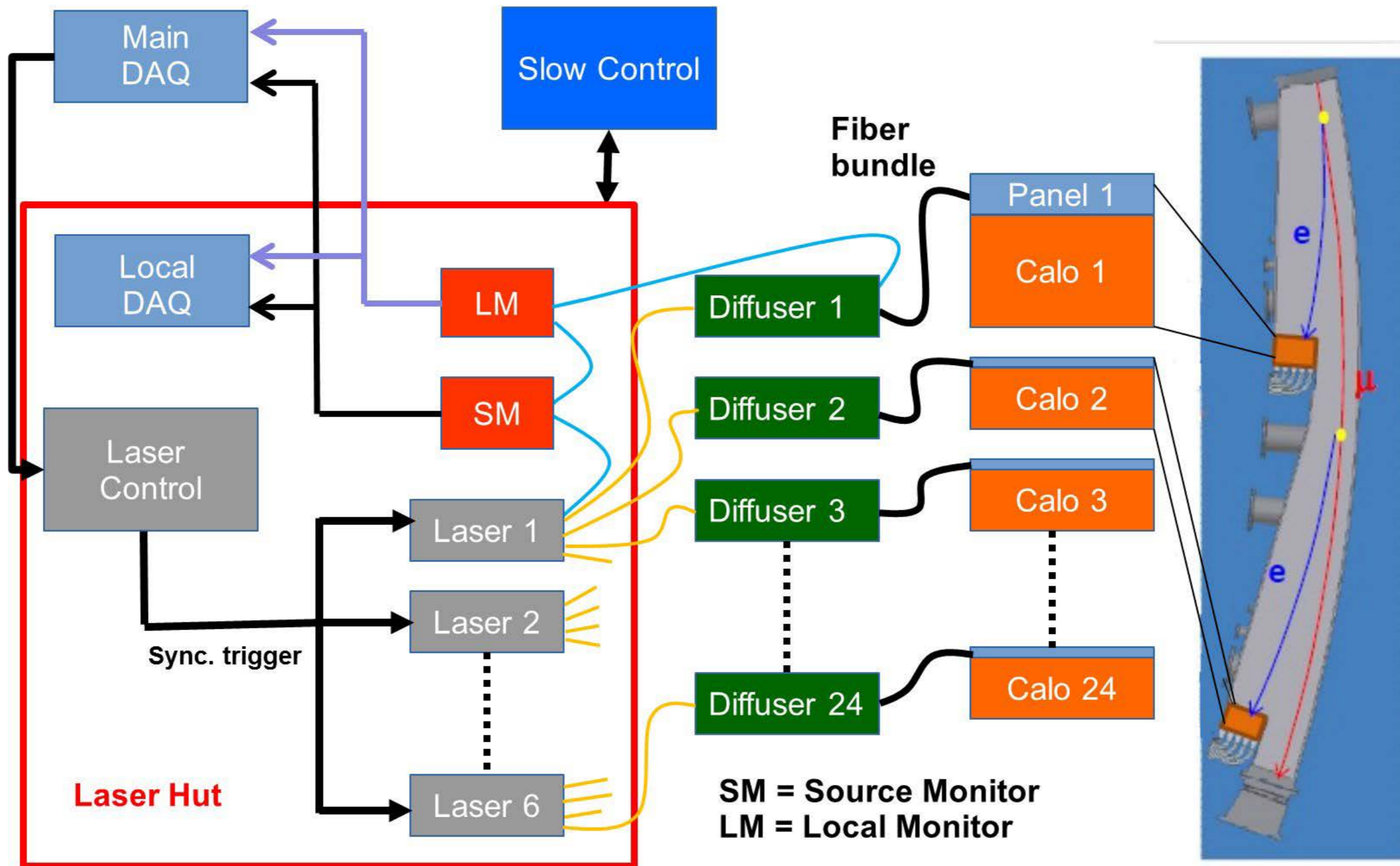
## Specifiche principali

- monitoraggio e calibrazione continua dei calorimetri al livello dello 0.04% sulla scala dei tempi di un singolo "fill" di muoni (700  $\mu$ s)
- monitoraggio e correzione del guadagno su un intero run (diverse ore di misura) al livello  $<10^{-3}$
- sincronizzazione di calorimetri, contatore integrale del fascio ("TO counter") e monitor di posizione del fascio ("Fiber Harps")

## Soluzioni adottate

- impulsi laser inviati simultaneamente ai  $54 \times 24 = 1296$  cristalli dei calorimetri
- distribuzione su rete di fibre ottiche multimodo
- monitoraggio degli impulsi e della rete di distribuzione
- elettronica dedicata di controllo e temporizzazione

# Schema del sistema laser



## Teste laser

- generano impulsi a 405 nm controllabili da un trigger

## Diffusori

- distribuiscono uniformemente la luce su ogni singolo cristallo dei calorimetri

## Source Monitor

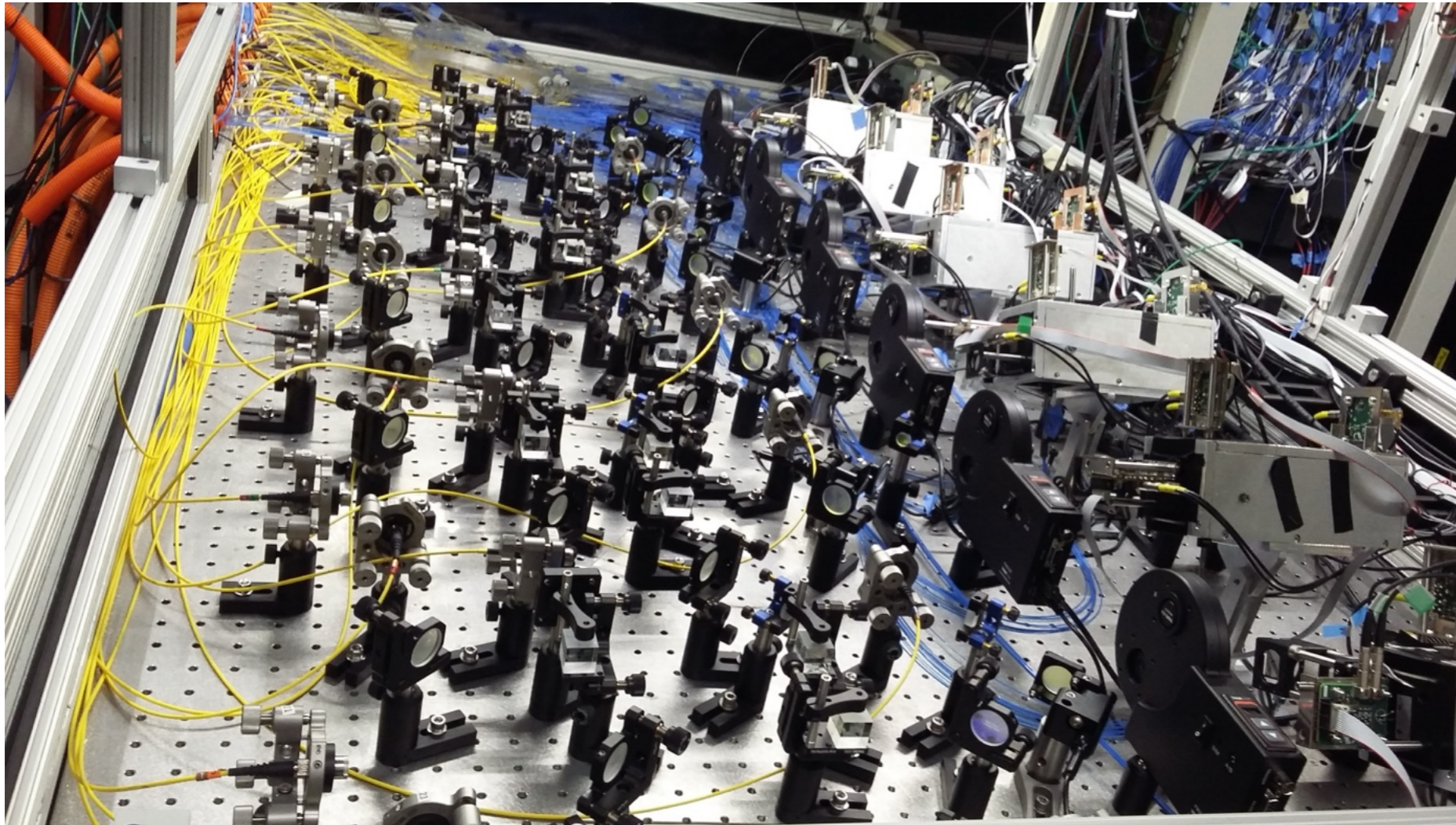
- confronta l'ampiezza degli impulsi laser con il segnale di riferimento di una sorgente radioattiva per correggere le fluttuazioni di ampiezza

## Local Monitor

- controlla la stabilità del sistema di distribuzione usando il riferimento del SM

## Elettronica

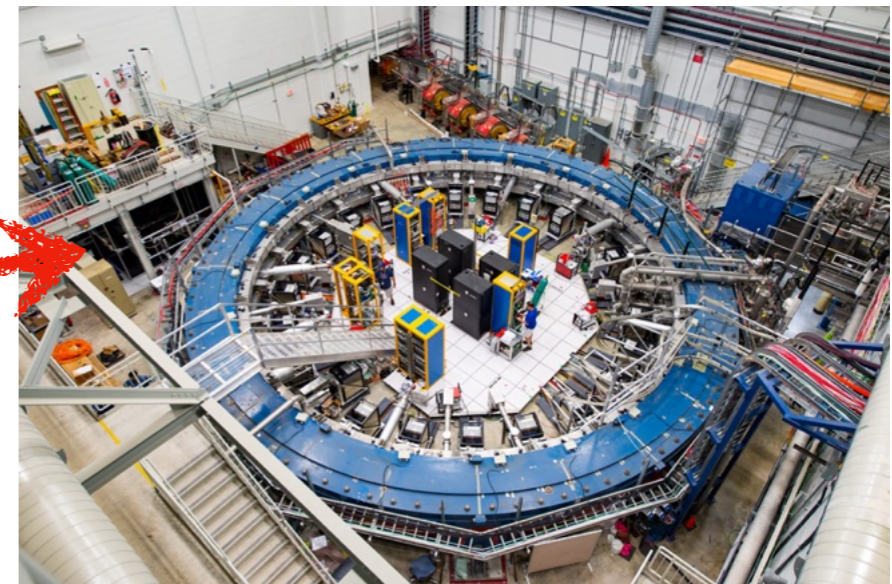
- si interfaccia con il trigger del fascio e pilota gli impulsi laser
- acquisisce localmente i segnali del sistema laser



Banco ottico



"Laser Hut"





# Sorgente Laser

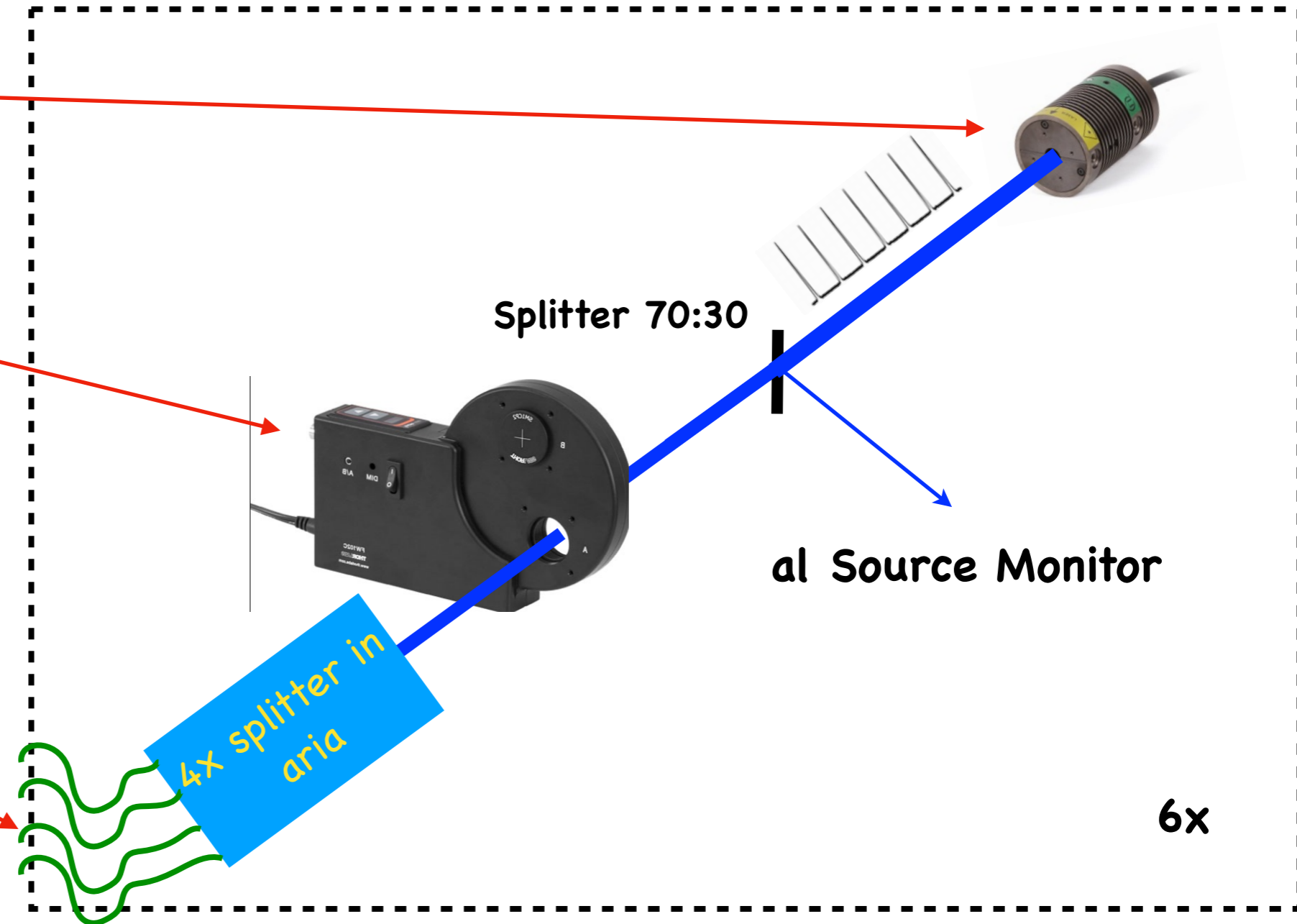
Controllore triggerabile delle  
teste laser (Picoquant Sepia PDL  
828)



Testa laser impulsata, 700 pJ/  
impulso, 600 ps (FWHM)  
(Picoquant, mod. LDH-P-C-405M)

Ruota portafiltri motorizzata  
(Thorlabs, mod. FW212CWNEB)

4 fibre ottiche "di lancio" da 25  
m, in silicio, diametro 400  $\mu$ m  
(Polymicro, mod. FDP400440480)



Il **diffusore**, uno per ciascuno dei 24 calorimetri, ha il compito di raccogliere la luce dalla fibra di lancio e di illuminare uniformemente i 54 cristalli del rivelatore

Due soluzioni

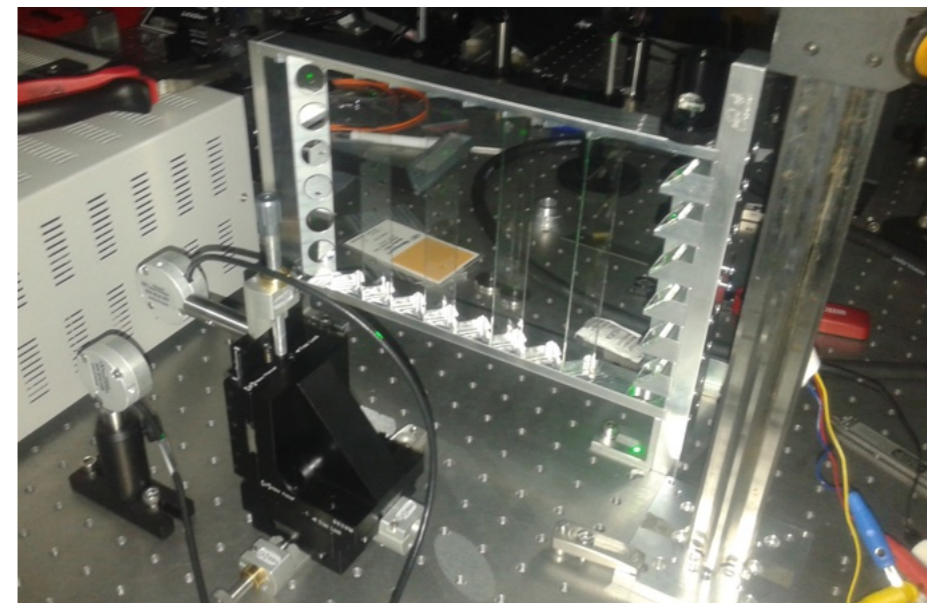
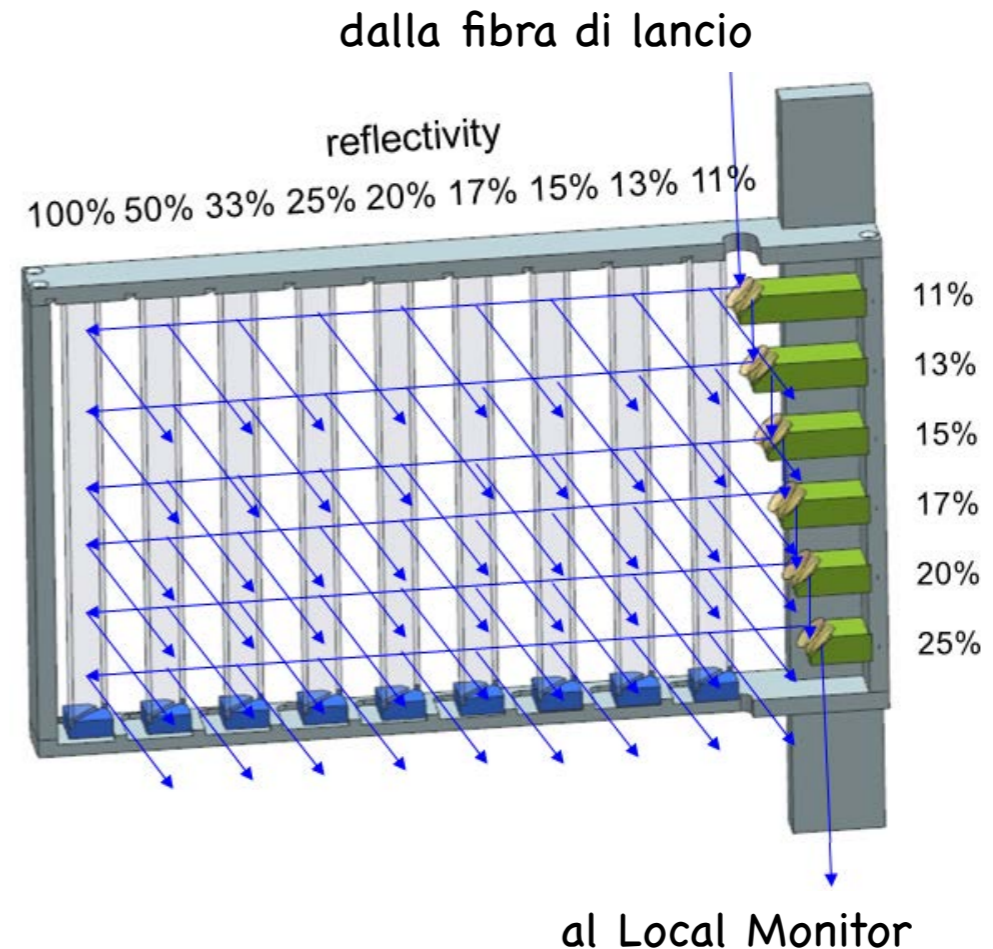
- griglia di specchi e beamsplitter - "PiTs frame"
- fascio di fibre e griglia di prismi

Adottata la seconda per semplicità costruttiva

Primo prototipo di diffusore, detto "Pisa-Trieste frame"

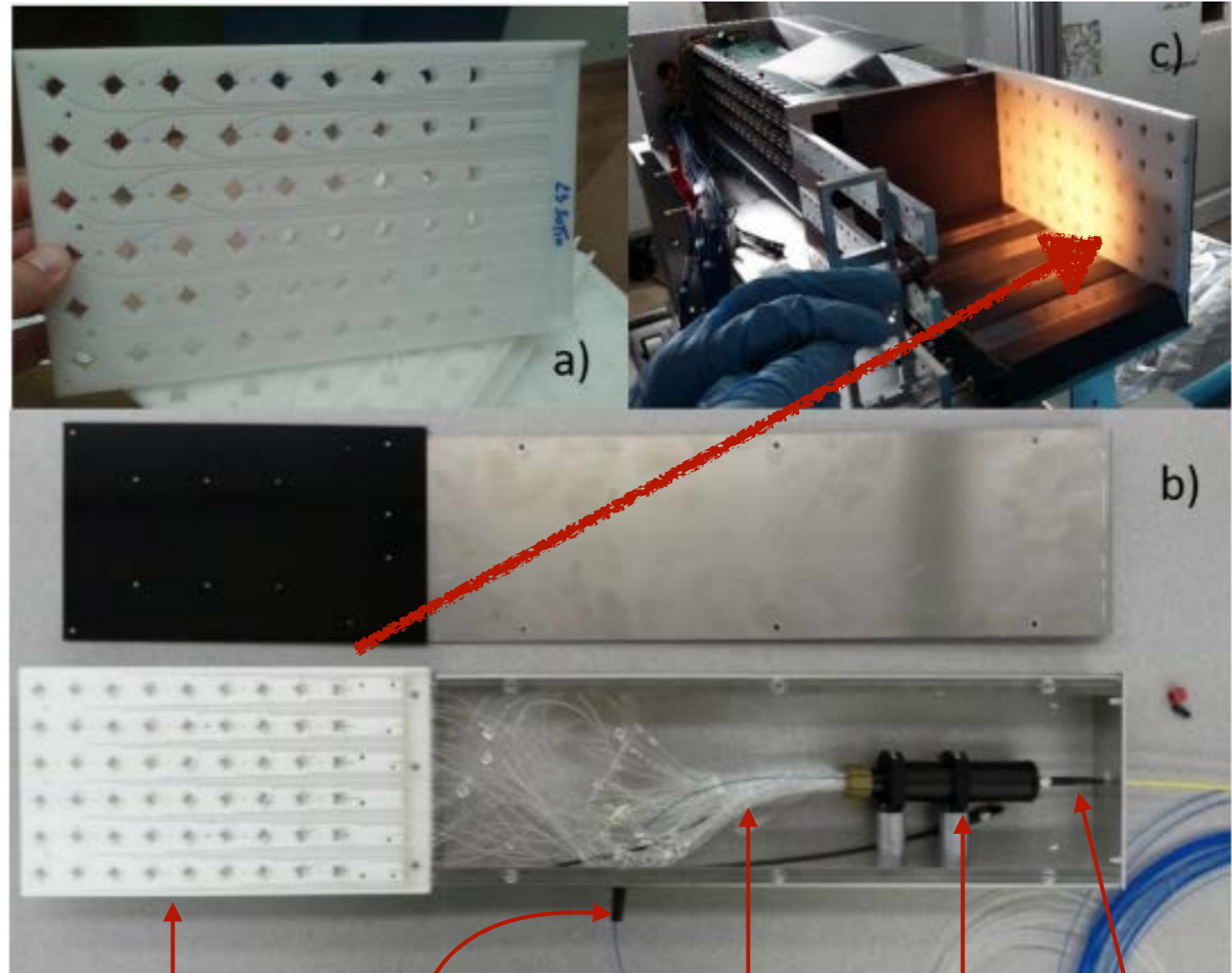
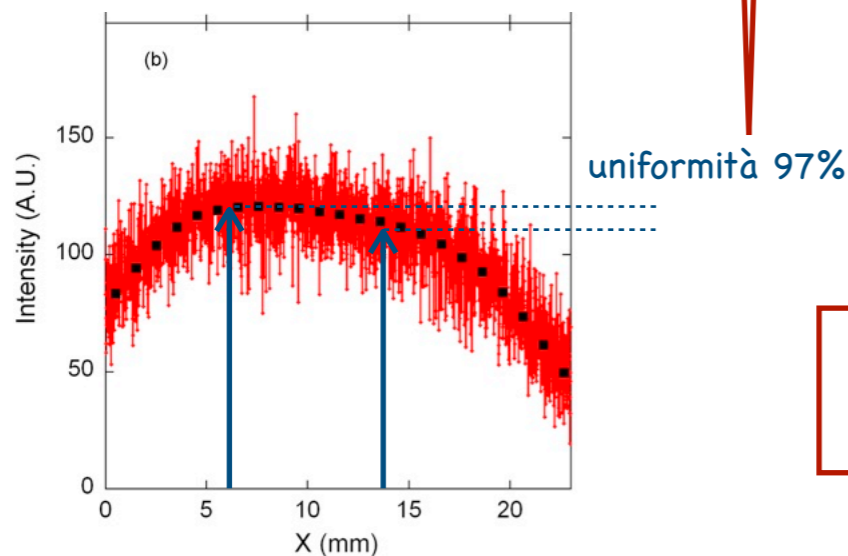
- montato su una cornice sottile (2 cm)
- la fibra di lancio illumina una colonna di beamsplitter a riflettività crescente
- i fasci riflessi illuminano una griglia di beamsplitter rettangolari, pure di riflettività crescente, che illuminano i cristalli del calorimetro
- il fascio trasmesso ritorna al Local Monitor

Compatto ed efficiente, ma delicato da assemblare.



## Soluzione adottata per il diffusore

- la luce dalla fibra di "lancio" passa attraverso un diffusore che uniforma il profilo del fascio da gaussiano a piatto
- un fascio di 54 fibre + 2 di "ritorno" raccoglie la luce del diffusore e la trasmette a un pannello di distribuzione
- un sottile pannello di Delrin, con 54 mini-prismi riflettenti a 90°, devia la luce verso i cristalli del calorimetro
- le due fibre di "ritorno", una in silicio ed una in PMMA, riportano la luce al Local Monitor



pannello in Delrin  
con 54 mini-prismi

fascio di fibre

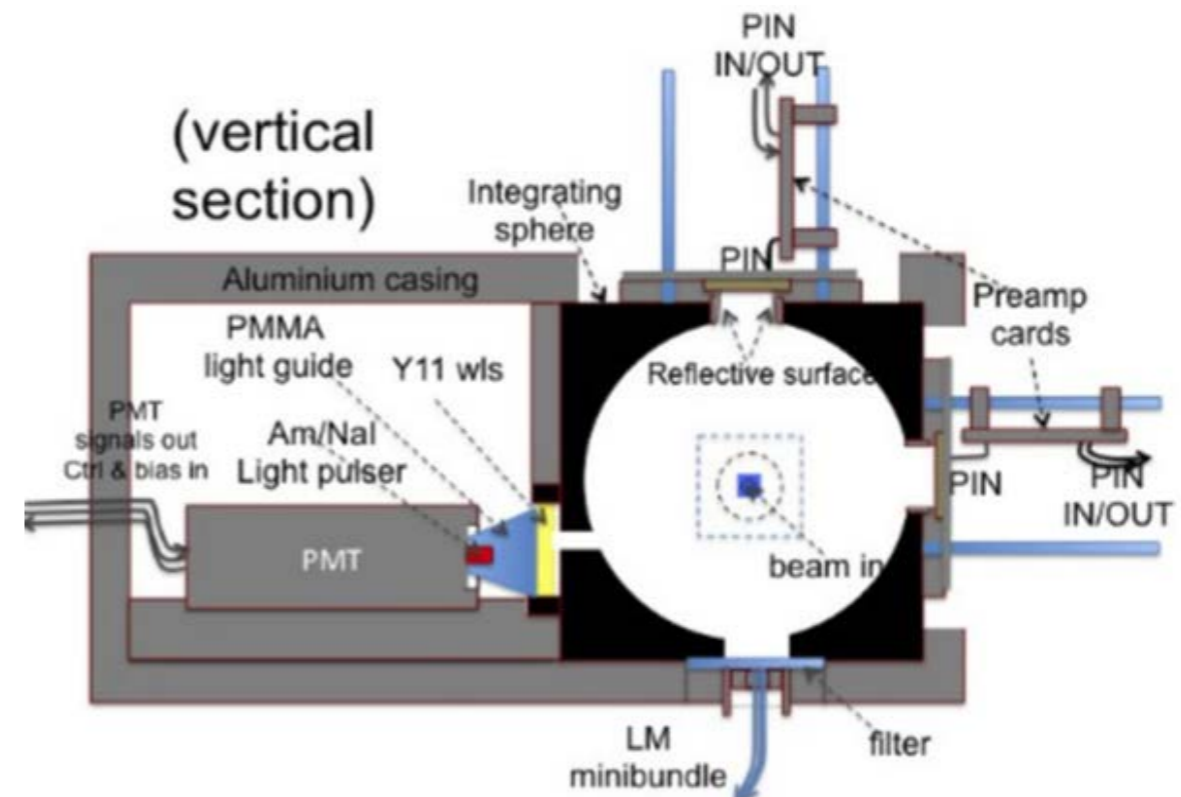
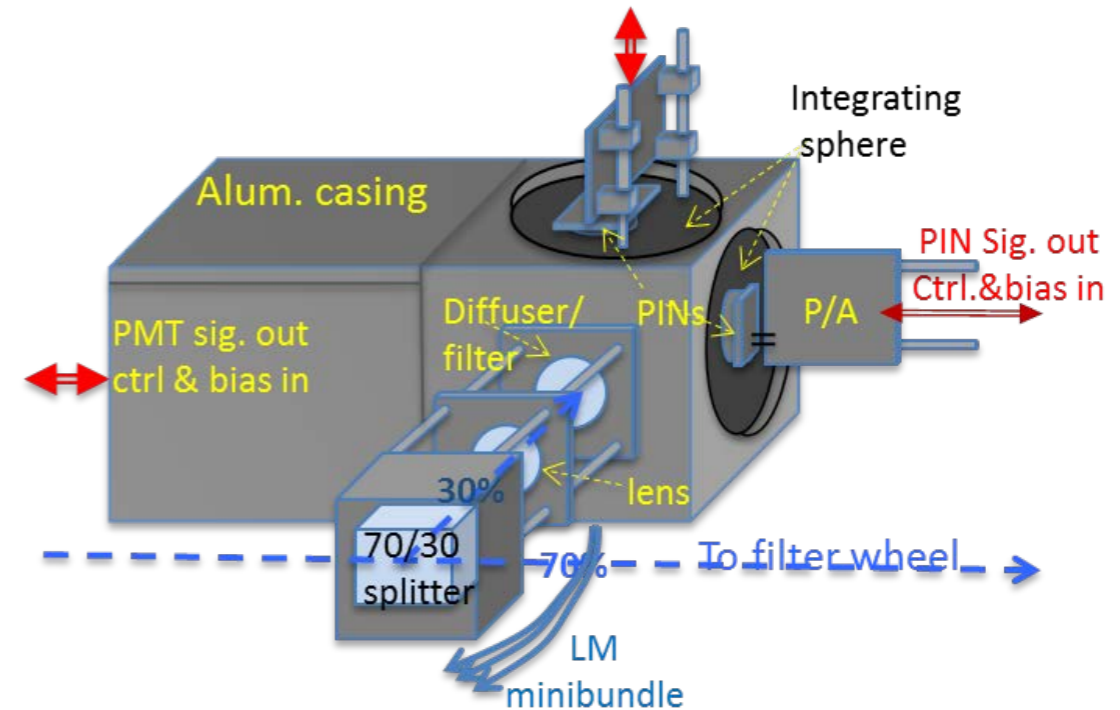
diffusore

fibra di lancio

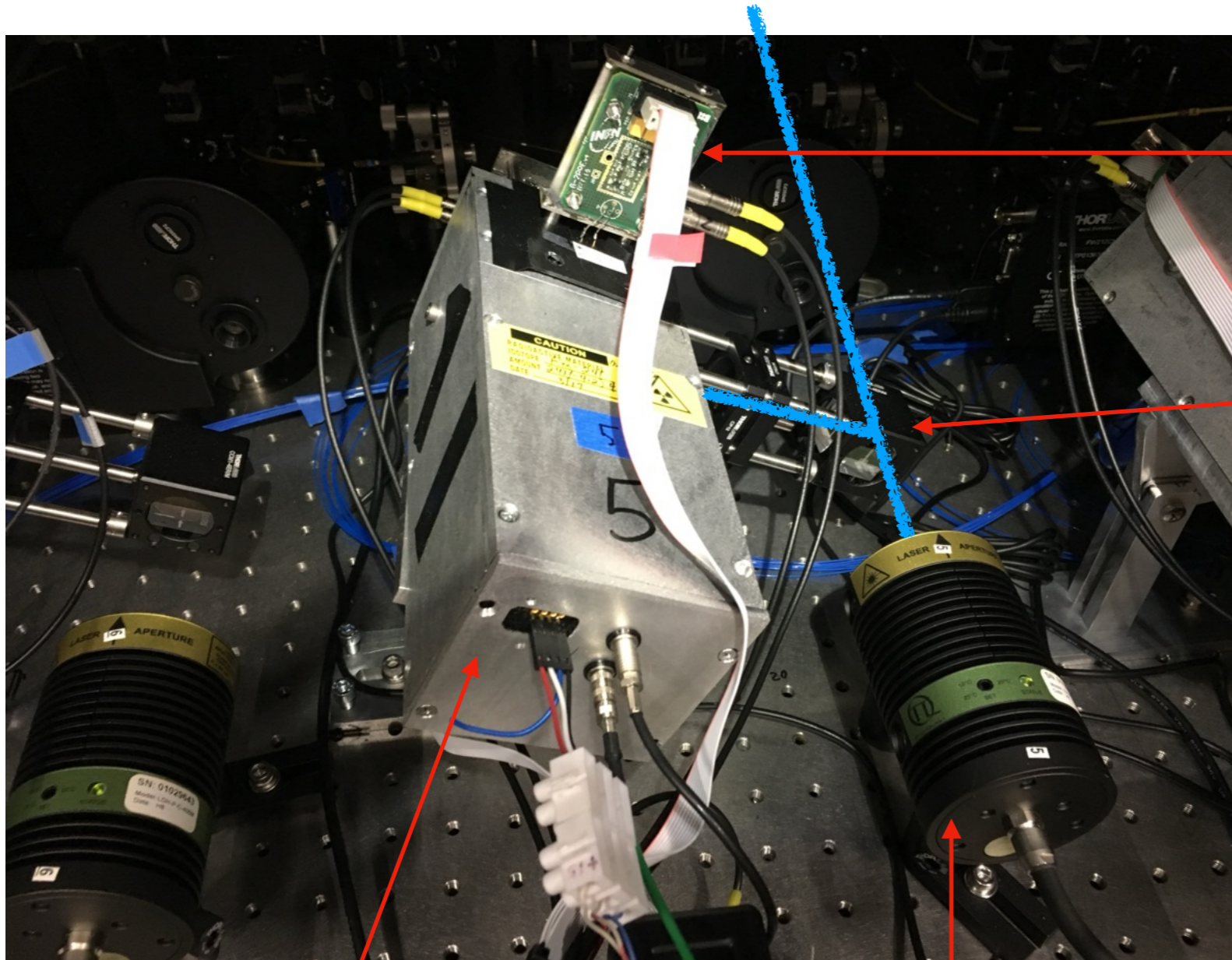
fibre di ritorno

Il Source Monitor ha il compito di monitorare la stabilità della sorgente laser. In totale 6 SM, uno per ognuna delle teste laser.  
Ciascun SM:

- preleva il 30% dell'intensità del laser e utilizza una sfera integratrice in ingresso per eliminare le fluttuazioni in puntamento
- le 4 uscite della sfera sono inviate a
  - 2 fotodiodi PIN
  - un tubo PMT accoppiato ad uno scintillatore NaI
  - una fibra che porta il segnale di riferimento al Local Monitor
- contiene una sorgente di  $^{241}\text{Am}$  a bassa attività per la calibrazione assoluta del segnale del PMT



# Source Monitor: immagini

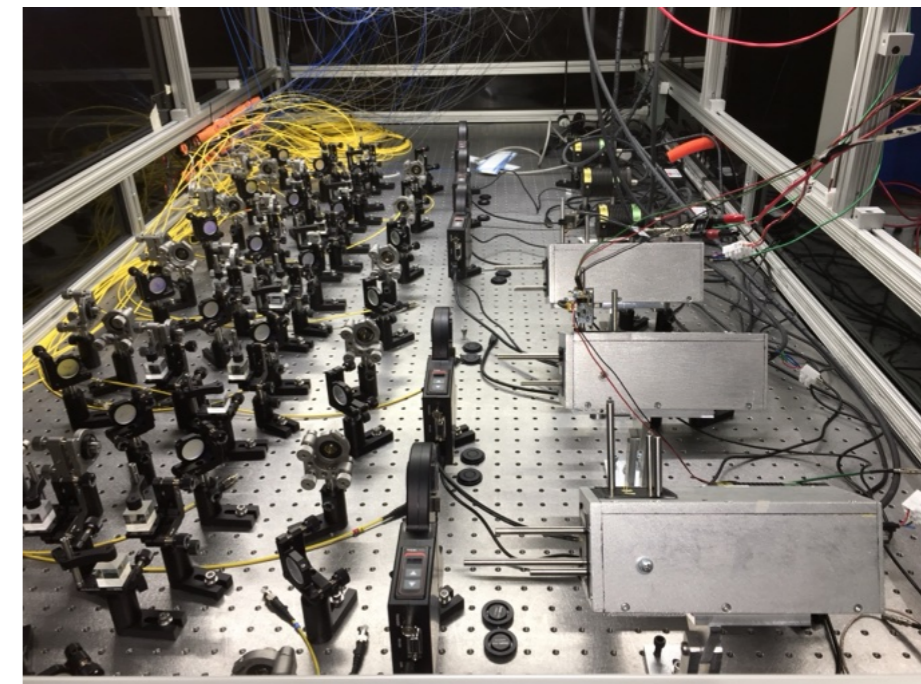


preamplificatore  
dei fotodiodi PIN

beam-splitter  
di ingresso al  
SM

contenitore  
del SM

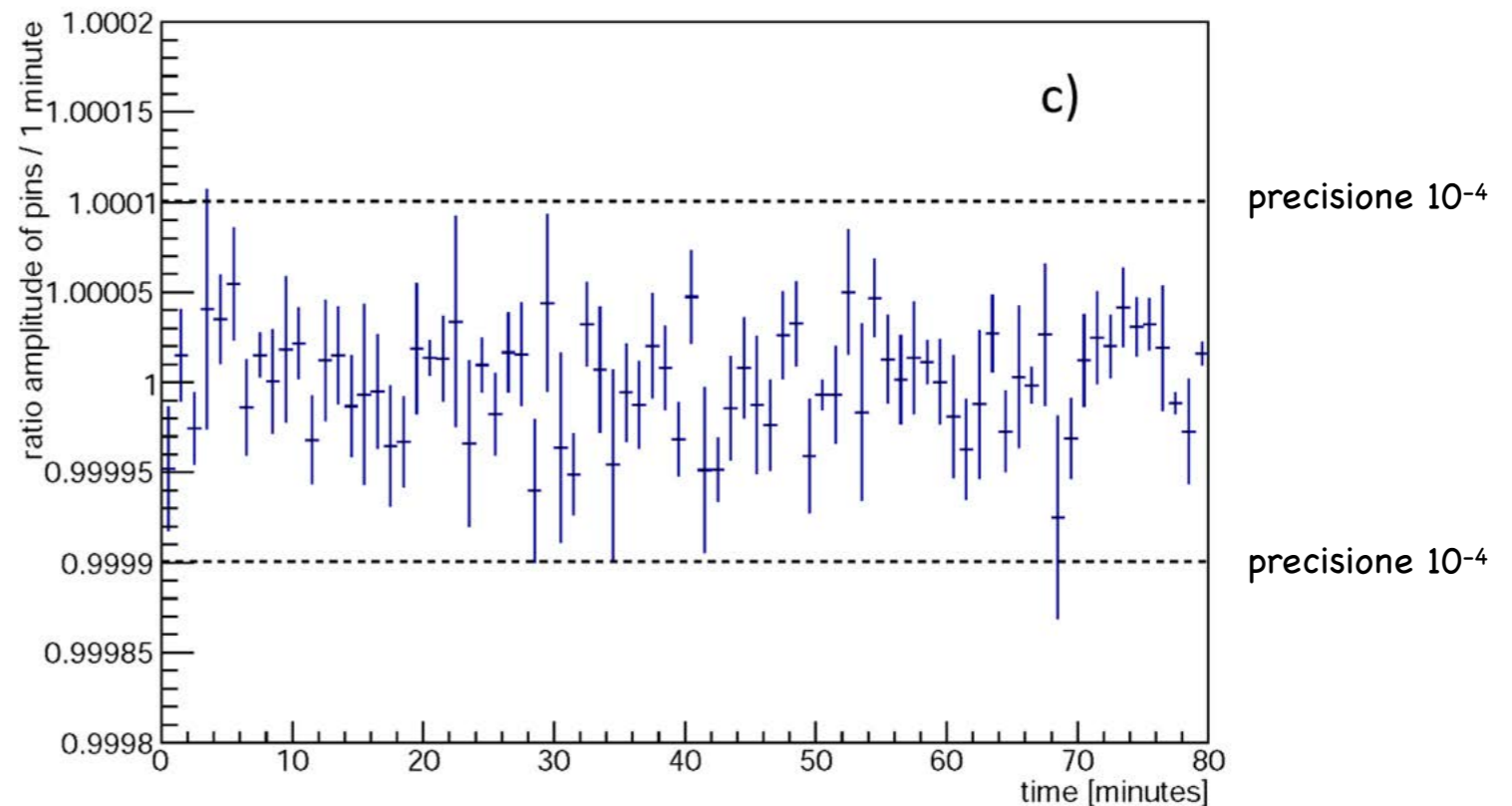
testa laser



banco ottico del sistema di calibrazione laser a Muon g-2, sono visibili 3 dei 6 SM

I fotodiodi PIN generano circa  $10^6$  (fotoelettroni)/(impulso laser) corrispondenti ad un precisione statistica di  $10^{-3}$  (0,1%) per impulso, che sale a 0.3% se si tiene conto dell'elettronica di lettura. Con 100 impulsi (0.02 s alla frequenza di 5 kHz, usata nei run di calibrazione) si raggiunge una precisione  $<0.04\%$

Data la risoluzione del PMT (2.6%), per ottenere una precisione statistica confrontabile occorrono circa  $10^4$  impulsi (2 s)



Andamento temporale del rapporto tra i segnali dei due diodi PIN (SM1). Ogni punto è la media di 3000 misure. Le variazioni sono dovute essenzialmente alla temperatura (0.1%/°C)

Il Local Monitor serve a tenere sotto controllo la stabilità della rete di fibre ottiche (lunghezze di decine di metri) che portano gli impulsi laser dalla Laser Hut ai calorimetri nell'anello magnetico.

## Componenti principali

- 2x24 fibre ottiche di "ritorno", 2 per calorimetro (una in Si ed una in PMMA)
- 6 fibre dai SM con i segnali di riferimento
- 2x24 tubi PMT che leggono i segnali delle fibre
- elettronica di front-end (amplificatore-formatore) e di alimentazione HV

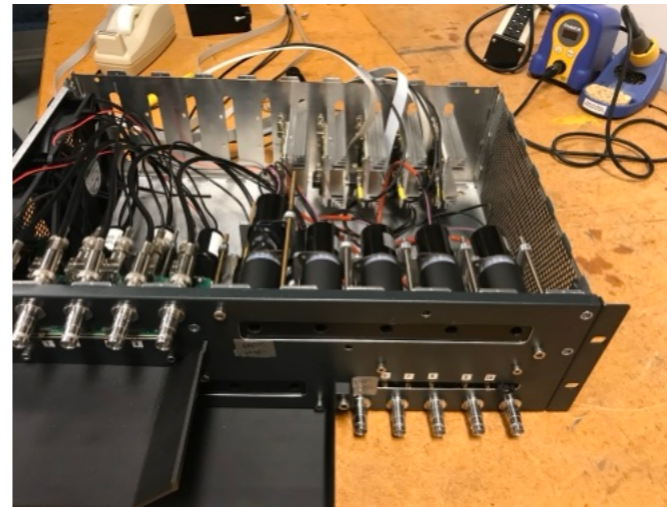


## Due Local Monitor

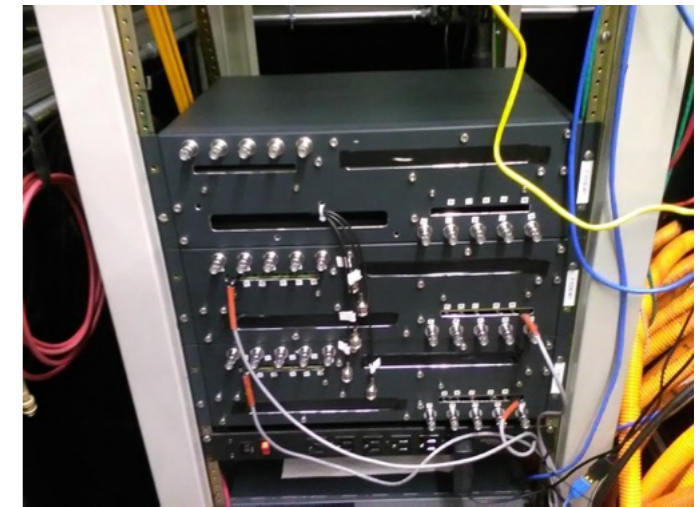
- principale (LM1): monitora 24 fibre di ritorno in Si
- ridondante (LM2): monitora 24 fibre di ritorno in PMMA

I "banchi" di PMT e l'elettronica sono posizionati nella Laser Hut, dove arrivano le fibre di "ritorno" dall'anello

Ciascun canale del Local Monitor confronta il segnale della fibra di ritorno con il segnale di riferimento inviato dal SM

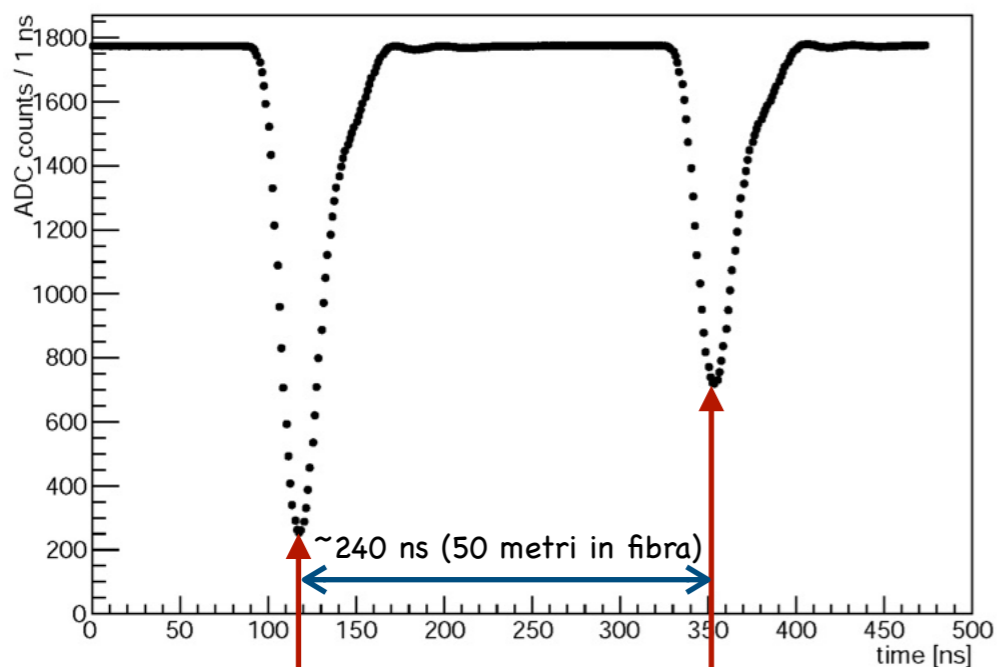


PMT del LM e schede di elettronica di front-end in fase di montaggio



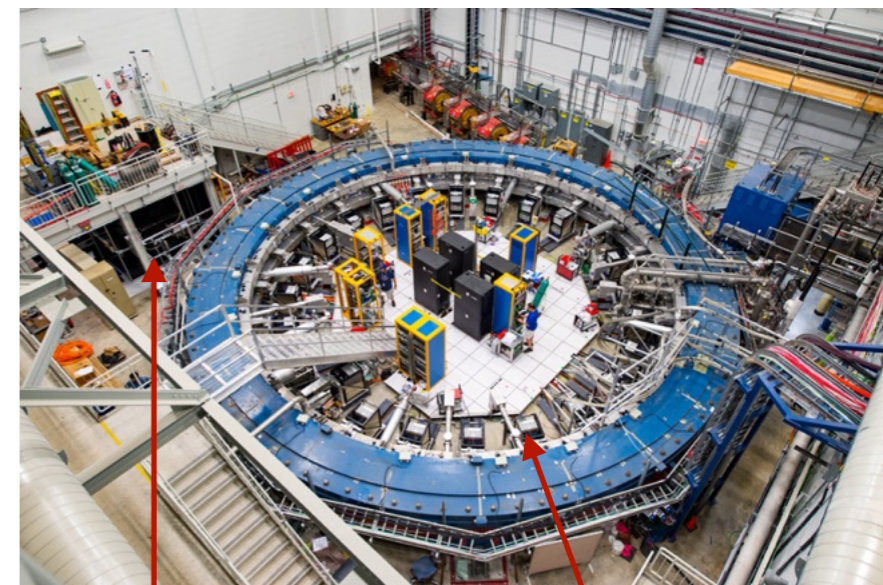
Scatole schermate dei PMT del LM posizionate sul rack all'interno della Laser Hut

Tipica traccia di un PMT del LM



Segnale di riferimento del SM

Segnale fibra di ritorno



Laser Hut

calorimetri

Muon g-2 DQM Run 13593 Event 672 2018-03-15 01:13:44 100% of events processed Subsystem ▾

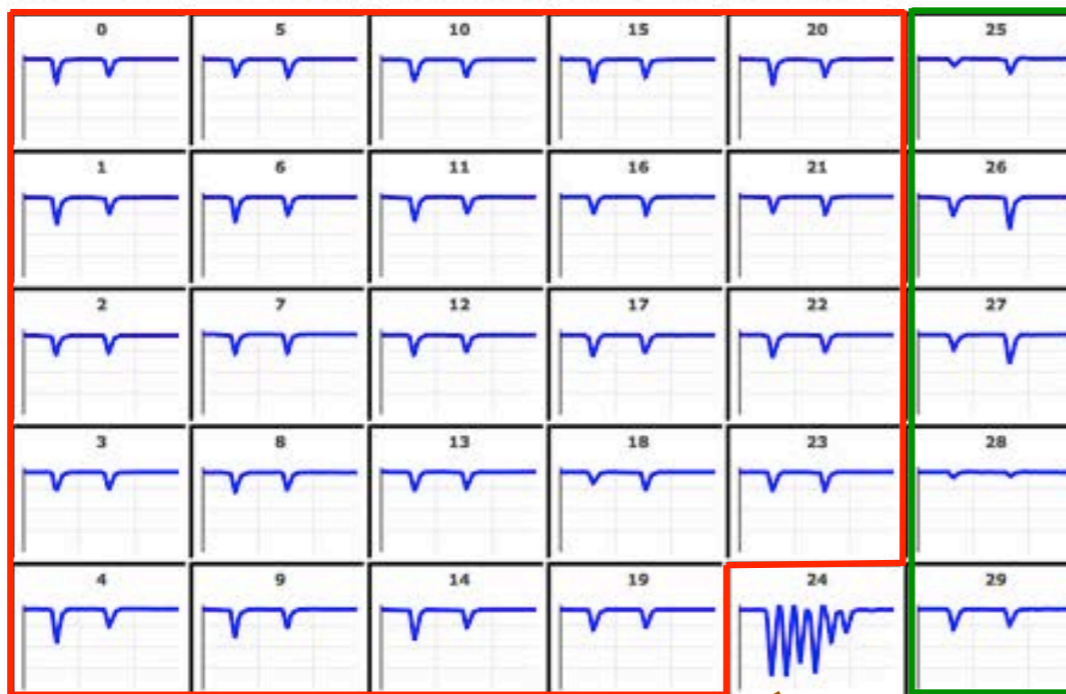
current laser mode: 1, standard mode Connected

## Laser Crate 25 Muon Fill summary plots

Laser Fill view Laser Slow Control **Laser 1** Laser 2 Laser 3 Laser 4 Laser 5 Laser 6

NUMBER 13593 EVENT 671 N. LM ISLANDS (for each channel)3 N. SM ISLANDS (for each channel)3

LOCAL MONITORS click on channel to select the trace

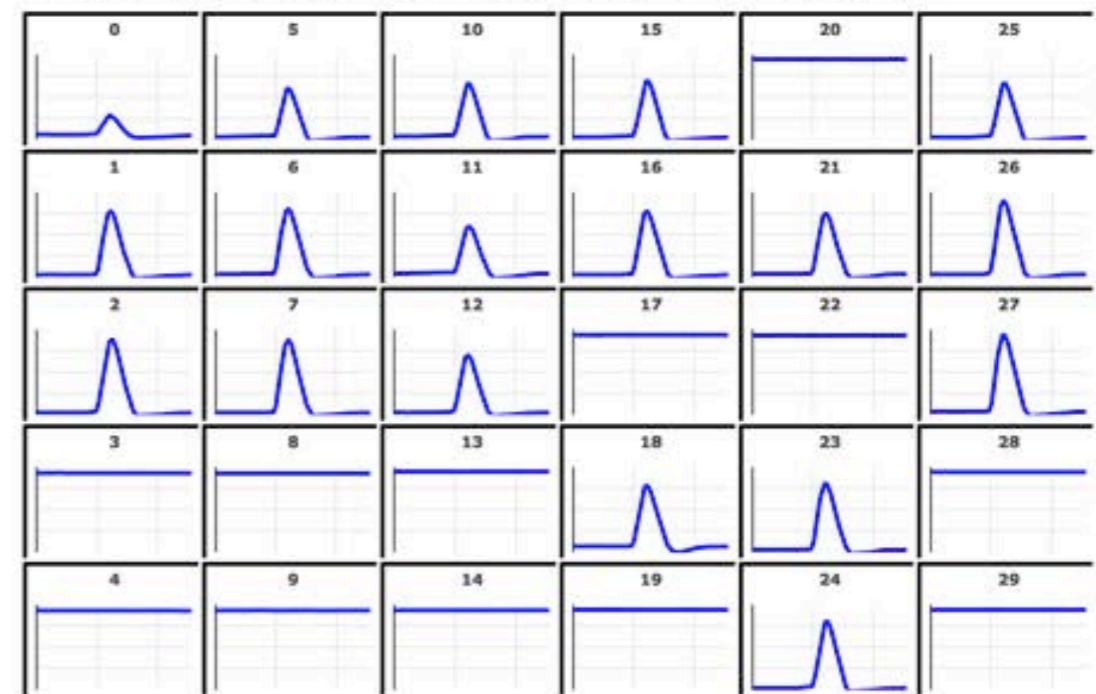


24 LOCAL MONITORS

5 REDUNDANT  
OLD MONITORS

SPECIAL PMT (see later)

SOURCE MONITORS click on channel to select the trace



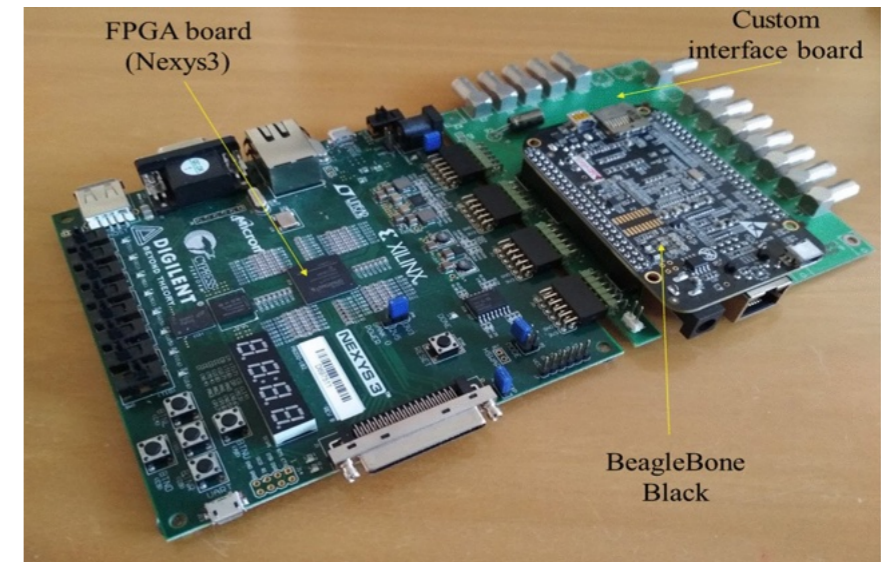
6(X3) SOURCE MONITORS

G. Venanzoni, CSN1, 22 Maggio 2018

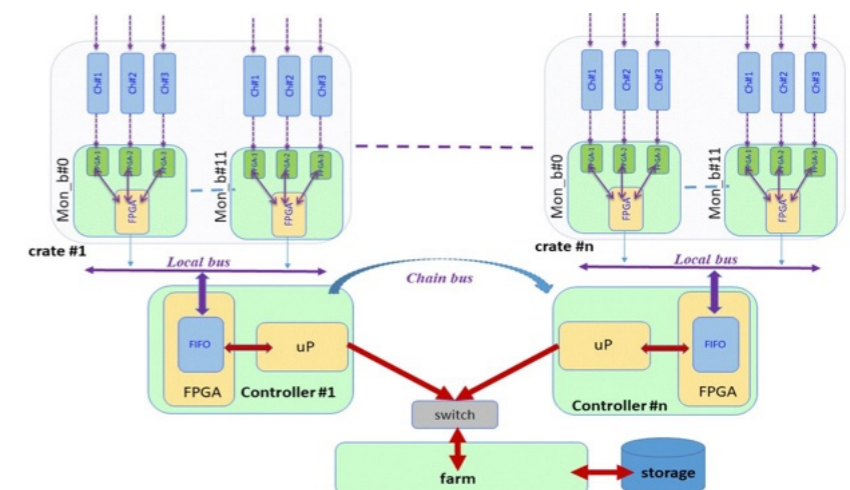
19

L'elettronica di controllo del sistema di calibrazione laser è stata sviluppata appositamente per questo scopo. Consiste in (schematicamente):

- Laser Control Board (LCB)
  - gestisce i trigger dei laser e la sincronizzazione con i trigger di fascio
  - può essere programmata per varie modalità di calibrazione, incluso il modo "flight simulator"
- Monitoring Board
  - elabora i segnali, controlla i Source Monitor, acquisisce i dati localmente e li invia anche alla DAQ principale dell'esperimento



Vista della Laser Control Board



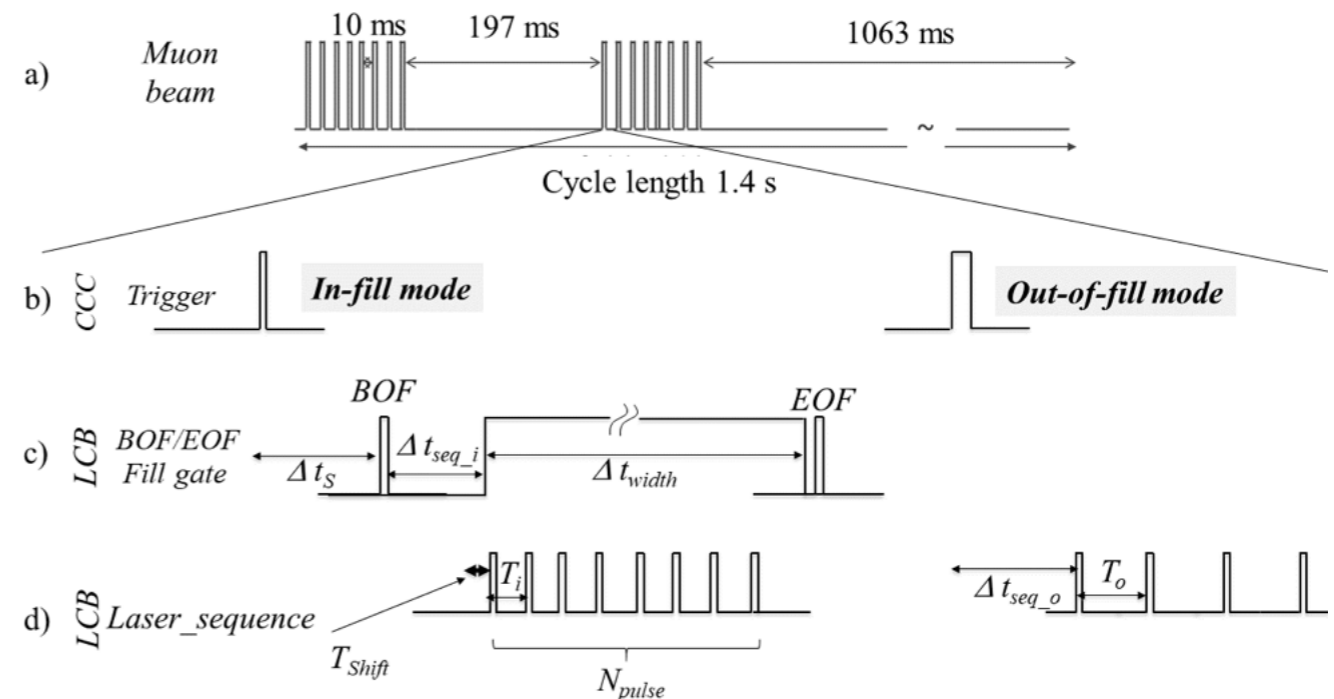
Schematica dell'acquisizione dati locale gestita dalla Monitoring Board

Il sistema di calibrazione laser viene fatto funzionare in diverse modalità

- standard (con fascio)
  - correzione del guadagno dei calorimetri e riferimento temporale per la sincronizzazione di diversi rivelatori e DAQ principale
- double-pulse (senza fascio)
  - test della risposta dei calorimetri a due o più particelle consecutive
- gain calibration (senza fascio)
  - equalizzazione del guadagno dei 1296 SiPM dei calorimetri
- flight simulator (senza fascio)
  - simulazione delle variazioni di guadagno in un "fill" dovute all'alto rateo di decadimento di positroni

## Correzioni di guadagno con fascio presente

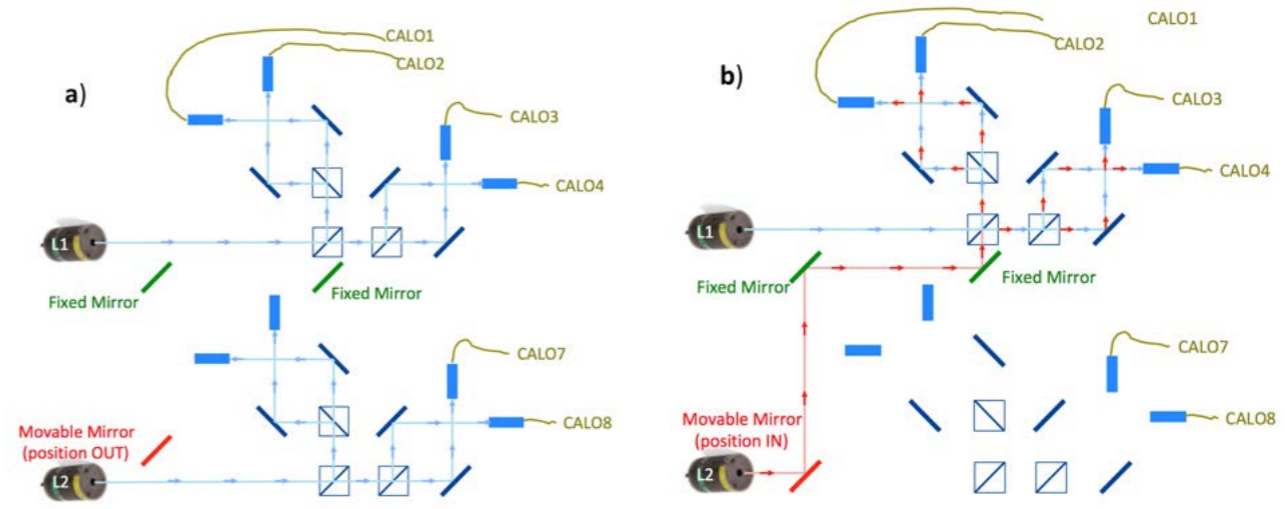
- I muoni arrivano in pacchetti di 8 "fill" lunghi 700  $\mu\text{s}$  (a 100 Hz)
- Dopo il trigger del "in-fill", il sistema invia un impulso di sincronizzazione (impulso BOF = SYNC)
  - gli impulsi BOF=SYNC e EOF sono inviati a tutti i 1296 cristalli dei calorimetri e permettono di ricostruire i segnali con la precisione temporale di  $\sim 30$  ps
- Parte una serie di impulsi laser "in-fill" (IFP) - muoni presenti
  - campionare la risposta dei SiPM durante il fill e correggere le variazioni di guadagno
- Finito il "fill" (impulso EOF) il sistema aspetta il trigger di fascio "out-of-fill" e invia 4 impulsi (OoFP) - muoni non presenti
  - correzione della risposta dei SiPM su tempi più lunghi, per tenere conto anche delle fluttuazioni ambientali (temperatura in particolare)



Nel modo "double-pulse" (con fascio assente) si inviano due impulsi laser consecutivi a tutti i cristalli dei calorimetri

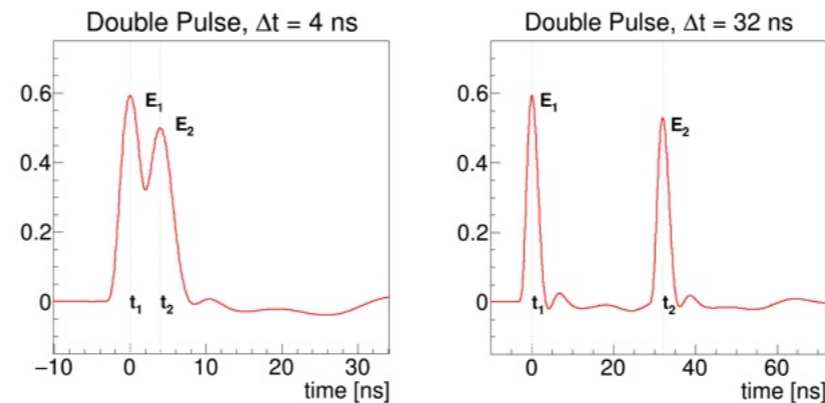
- controllare la risposta dei SiPM a due o più particelle consecutive
- da studi precedenti si è visto che il guadagno dei SiPM non è piatto in funzione del tempo, ma ha una struttura con due tempi caratteristici
  - "short term" ( $\sim 20$  ns), dovuto alla risposta dei SiPM
  - "long term" ( $\sim 20$   $\mu$ s), dovuto al tempo di recupero degli alimentatori
- "short-term" double pulse (STDP)
  - si inviano ai cristalli due impulsi consecutivi separati da un ritardo programmabile (0-80 ns)
- "long-term" double pulse (LTDP)
  - si invia una "cascata" iniziale di impulsi ravvicinati, per simulare l'arrivo simultaneo di molte particelle, seguita da un impulso di test ritardato (0-250  $\mu$ s)

Schema ottico dell'apparato per il "double pulse"



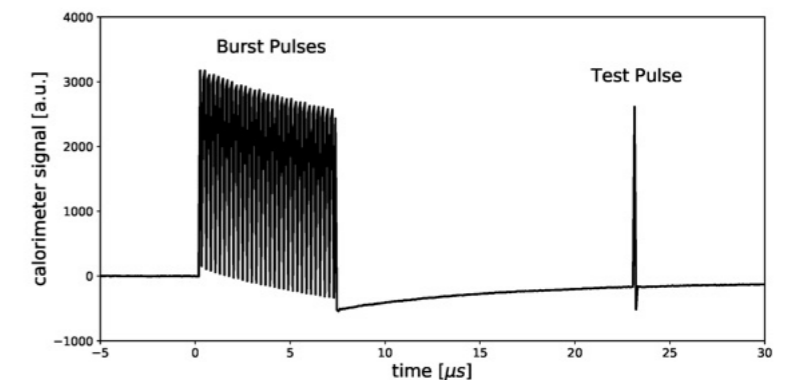
Funzionamento **standard**: specchio mobile a controllo remoto **OUT**

Funzionamento **double pulse**: specchio mobile a controllo remoto **IN**



Esempi di segnali STDP con diversi ritardi

Esempio di segnale LTDP



Nel modo "gain calibration" (con fascio assente) il sistema laser si usa per equalizzare i guadagni dei 1296 SiPM dei 24 calorimetri.

## Per ogni SiPM

- si registrano migliaia di impulsi laser inviati a intensità e frequenza di ripetizione costanti
- si estraggono la media  $M$  e la varianza  $\sigma^2$  della distribuzione degli integrali degli impulsi
- variando l'intensità degli impulsi (diverse posizioni della ruota portafiltri) si ottiene la dipendenza di  $\sigma^2$  da  $M$  (che risulta lineare)
- dalla pendenza del grafico  $\sigma^2 - M$  si ottiene per ogni SiPM la costante di calibrazione del guadagno  $G_{pe}$  ( $M$  è proporzionale al numero di fotoelettroni)

Distribuzione degli impulsi laser ad intensità fissata

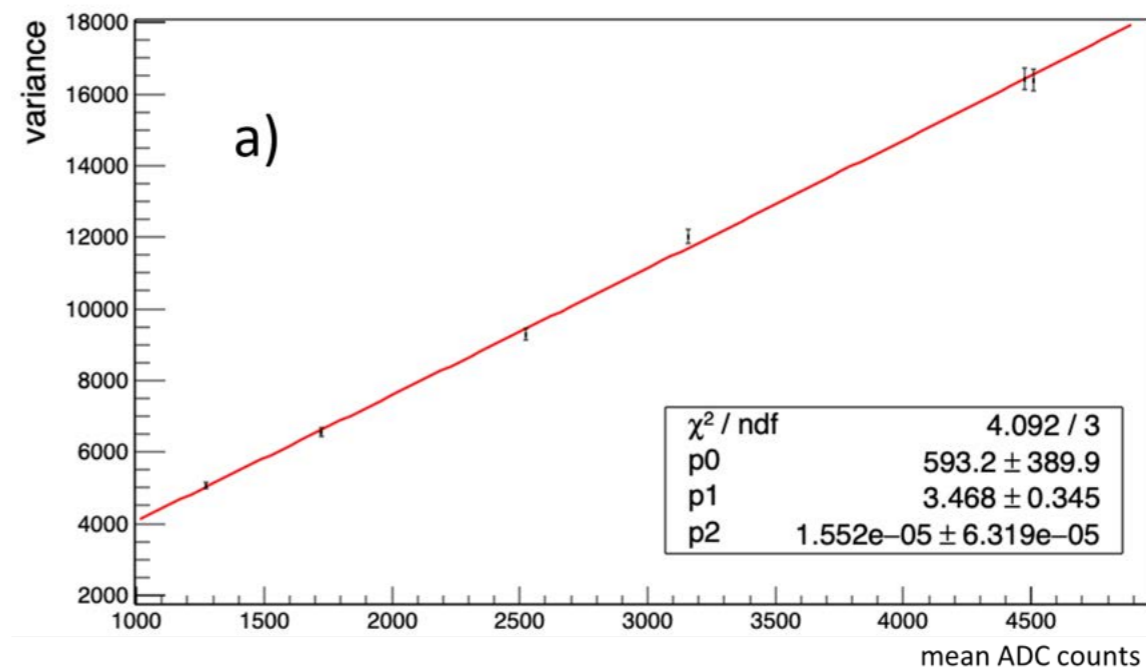
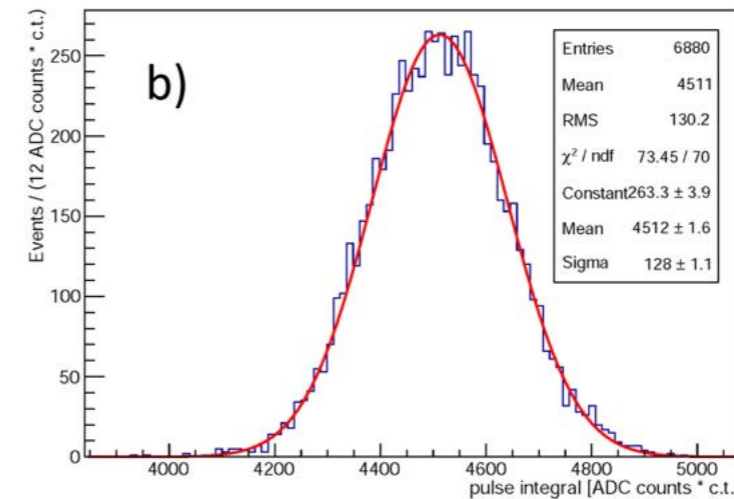
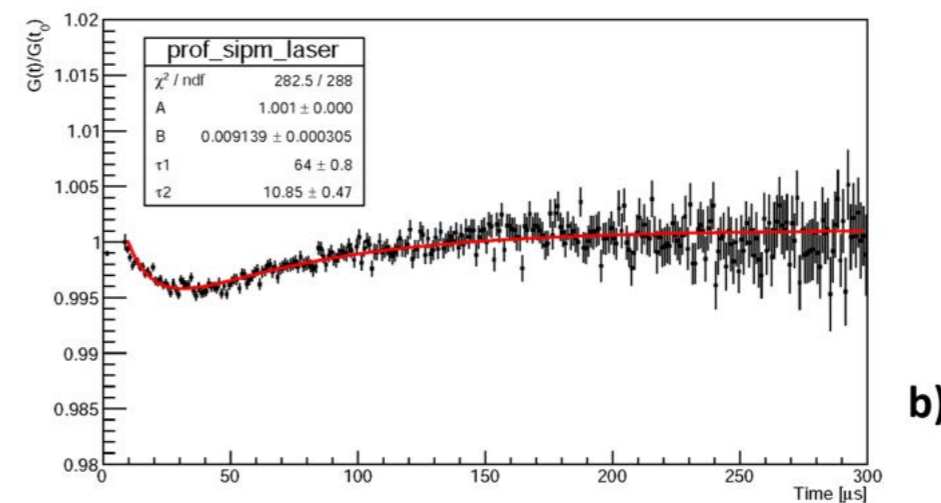
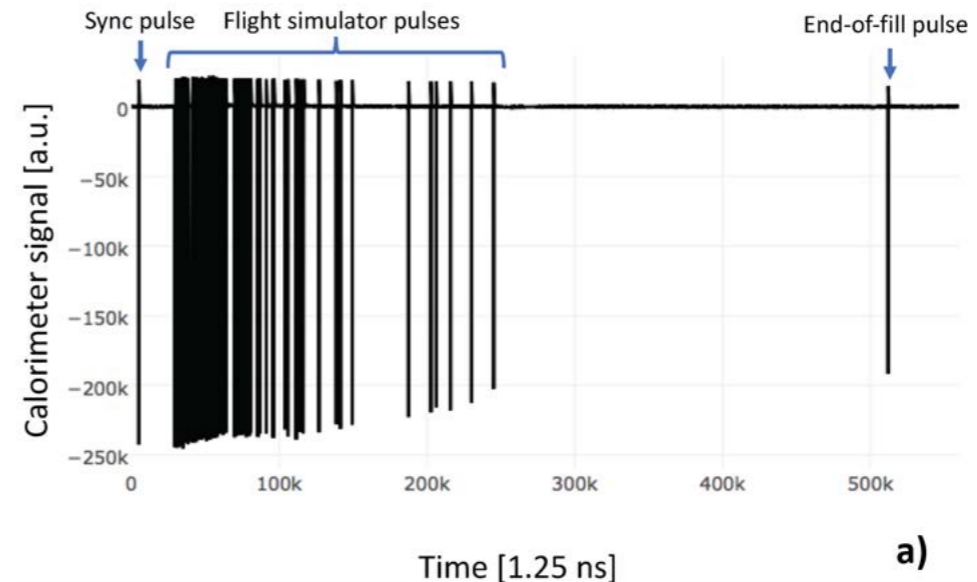


Grafico di  $\sigma^2$  in funzione di  $M$  per diverse posizioni della ruota portafiltri. La pendenza del fit lineare dà la costante  $M/G_{pe}$

Il guadagno dei SiPM è influenzato anche dall'alto rateo di positroni di decadimento durante un fill.

- Il modo "flight simulator" (fascio assente) permette al sistema di generare un treno di impulsi laser ad ampiezza decrescente esponenzialmente che simula il rateo dei positroni di decadimento
- un fit ai dati ottenuti permette di caratterizzare la funzione di guadagno dei SiPM



Esempio di funzione di guadagno ottenuta dal "flight simulator" con il fit (in rosso) ai dati (in nero) della curva

dove

$$\frac{G(t)}{G_0} = A - B \left( e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2} \right)$$

$G_0$  = guadagno di riferimento OoF

$\tau_1$  = costante tempo di decadimento dei muoni

$\tau_2$  = costante tempo di recupero dei SiPM

A ( $\sim 1$ ) = rapporto dei guadagni all'inizio del pacchetto di impulsi

B = fattore perdita di guadagno



La correzione globale al guadagno dei calorimetri ottenuta dal sistema di calibrazione laser si distingue in tre tipi di correzioni

- OoFG - out-of-fill gain correction
  - correzione alle derive di lungo periodo
- IFG - in-fill gain correction
  - spostamenti sistematici dovuti all'iniezione di muoni
- STDP - Short-Time-Double-Pulse correction
  - effetti su tempi dell'ordine dei ns dovuti a impulsi consecutivi

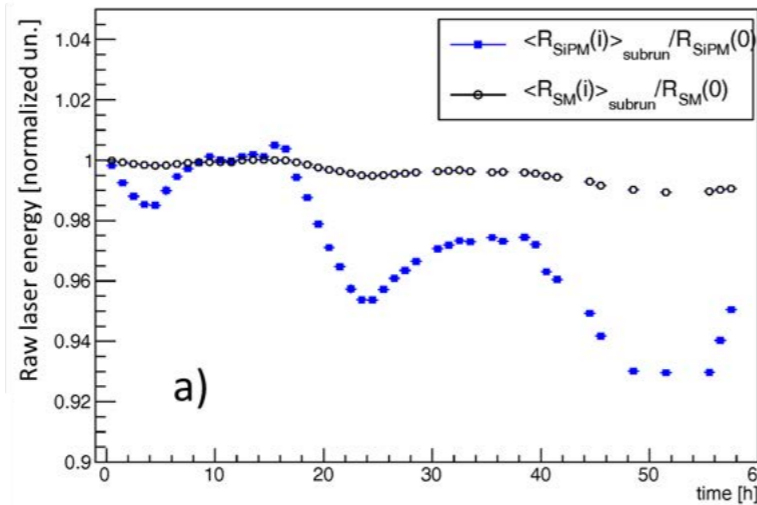
Queste correzioni vengono applicate a tutti i 1296 SiPM dei calorimetri di Muon g-2

La causa principale delle derive del guadagno su tempi lunghi (~secondi) è riconducibile a effetti di temperatura  
Fattore di correzione:

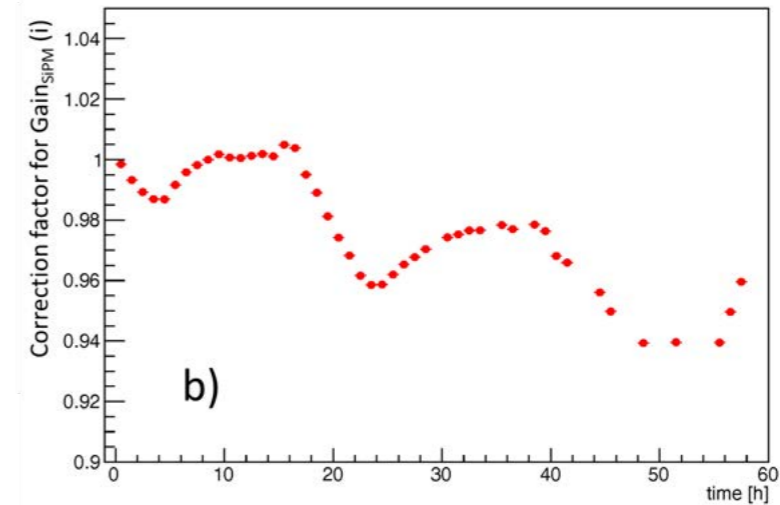
$$G_{\text{SiPM}}(i) = \frac{\langle R_{\text{SiPM}}(i) \rangle_{\text{subrun}}}{R_{\text{SiPM}}(0)} \cdot \frac{R_{\text{SM}}(0)}{\langle R_{\text{SM}}(i) \rangle_{\text{subrun}}}$$

1 subrun = 5 s

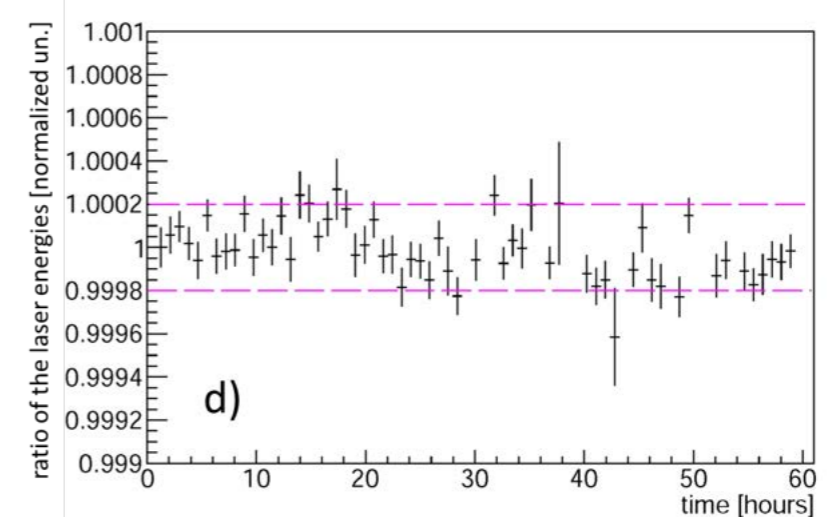
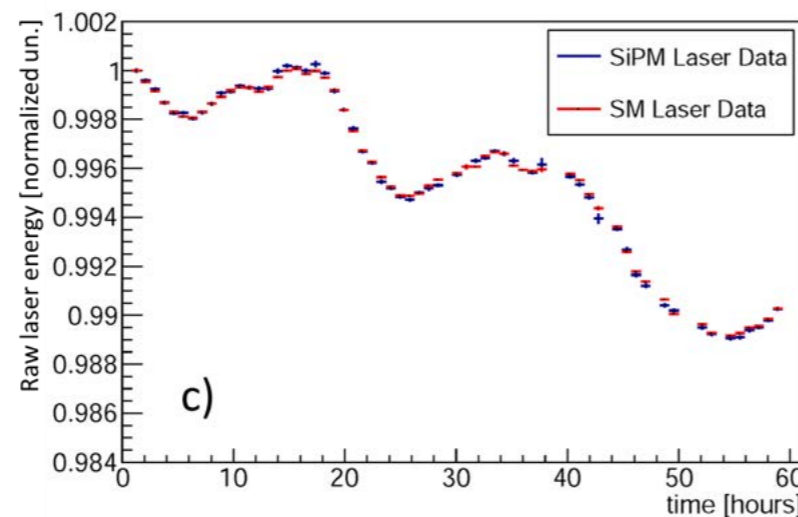
Fattori di correzione



$G_{\text{SiPM}}$



Rapporto

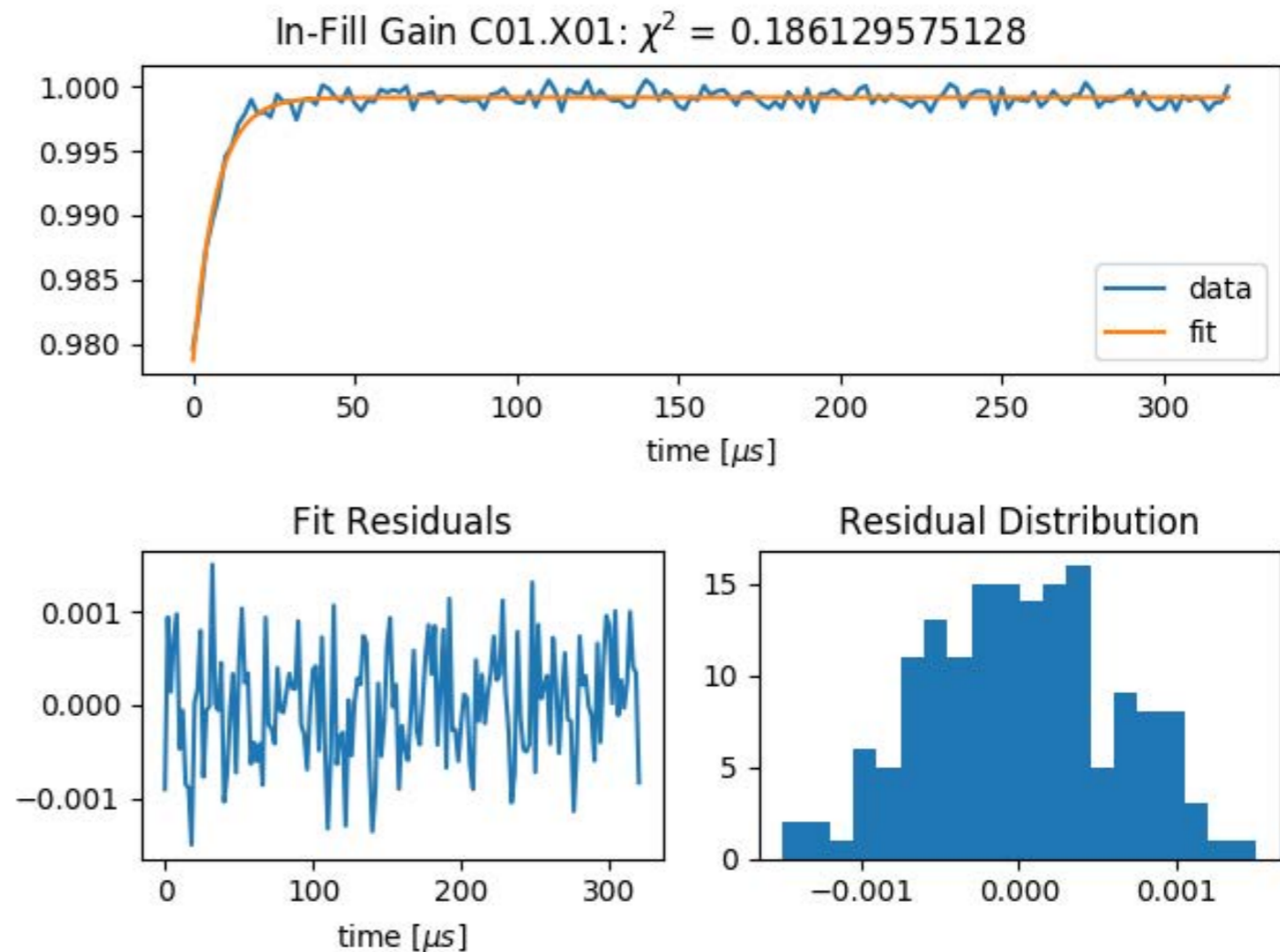


**Eccede le specifiche!**

Energie dei SiPM corrette con  $G_{\text{SiPM}}$   
Energie del SM = 5 s

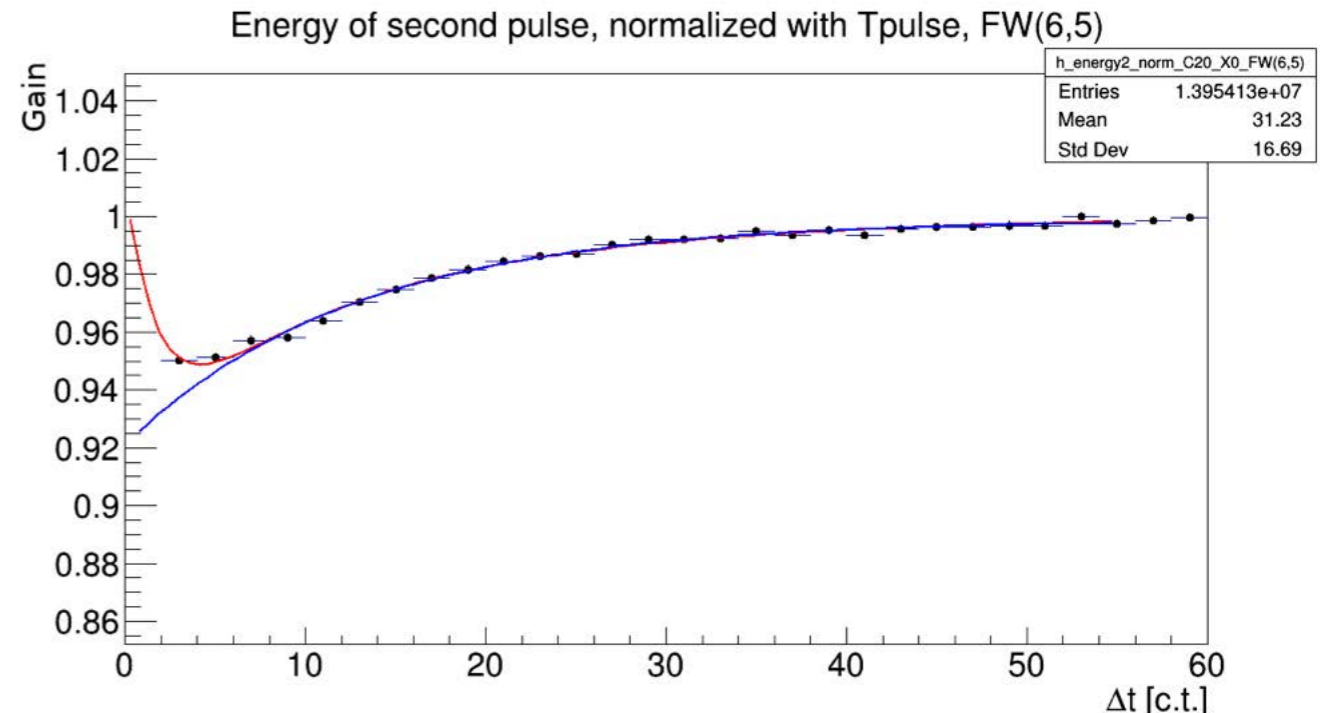
Dopo la correzione OoFG la  
calibrazione diventa sensibile agli  
effetti "in-fill"

Con gli impulsi "in-fill" il sistema  
campiona il guadagno dei SiPM  
durante il fill e un fit esponenziale ai  
dati dà la funzione di guadagno con  
una precisione di qualche  $10^{-4}$



## Serie di run dedicati SDTP

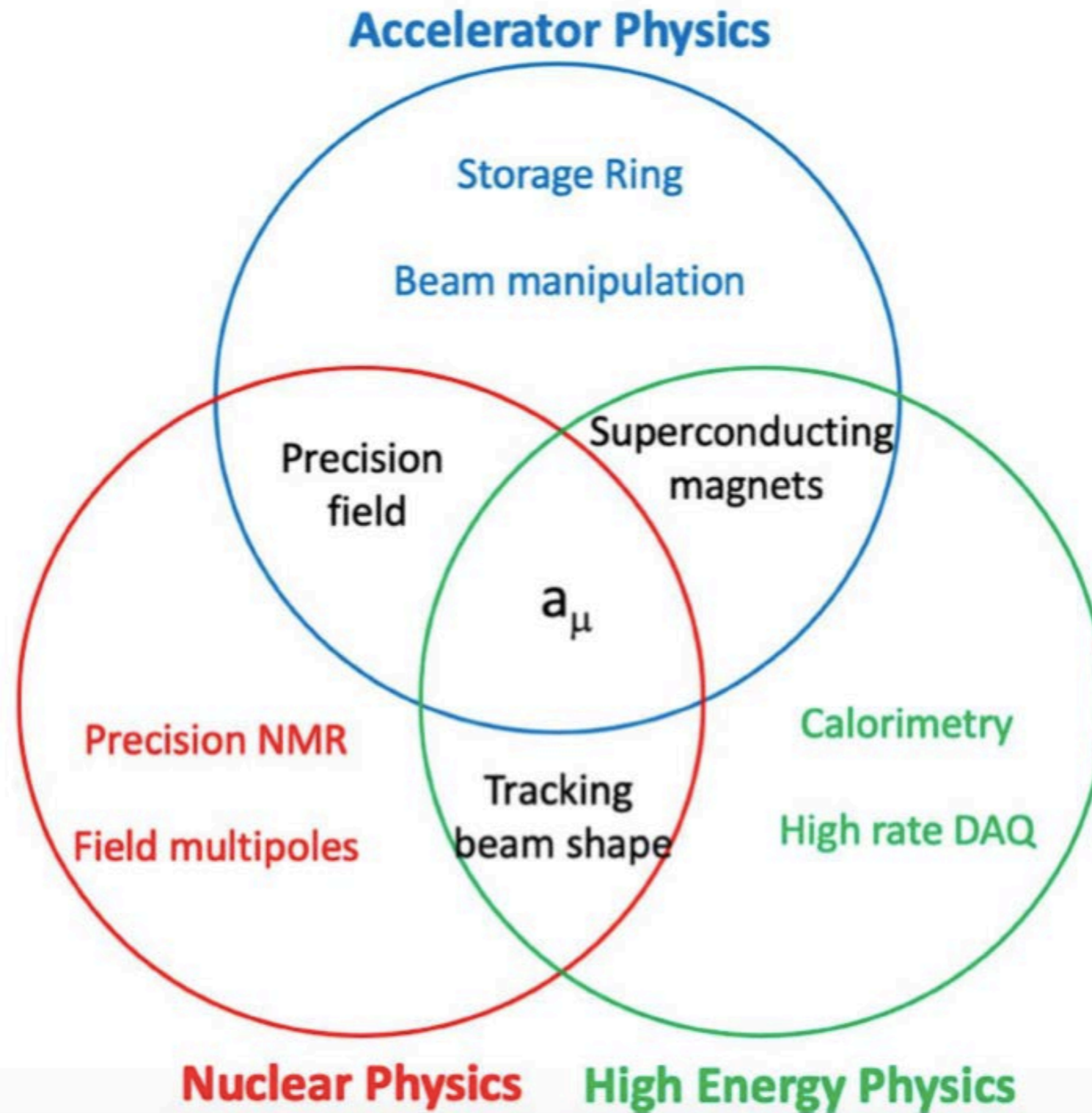
- si imposta una combinazione di energie  $E_1$  ed  $E_2$  per i due impulsi utilizzando le ruote portafiltro
- si scansiona un serie di ritardi, 5 minuti di misura ciascuno -  $O(10^3)$  impulsi registrati
- durante la presa dati "standard" si esegue, una volta la settimana, una sequenza "double-pulse" di circa un'ora  $\Rightarrow$  finora nessun effetto osservato al livello di precisione richiesta
- un'analisi dedicata può però evidenziare effetti di ordine superiore
  - dipendenza dall'energia dei parametri della funzione di guadagno
  - due possibili modelli
    - esponenziale
    - lognormal
  - al momento nessuna differenza in pratica tra i due modelli perchè il comportamento dei SiPM a tempi molto brevi non è noto



Esempio di curva di guadagno di un SiPM dopo una sequenza STDP  
 nero - dati sperimentali  
 rosso - fit lognormal  
 blu - fit esponenziale

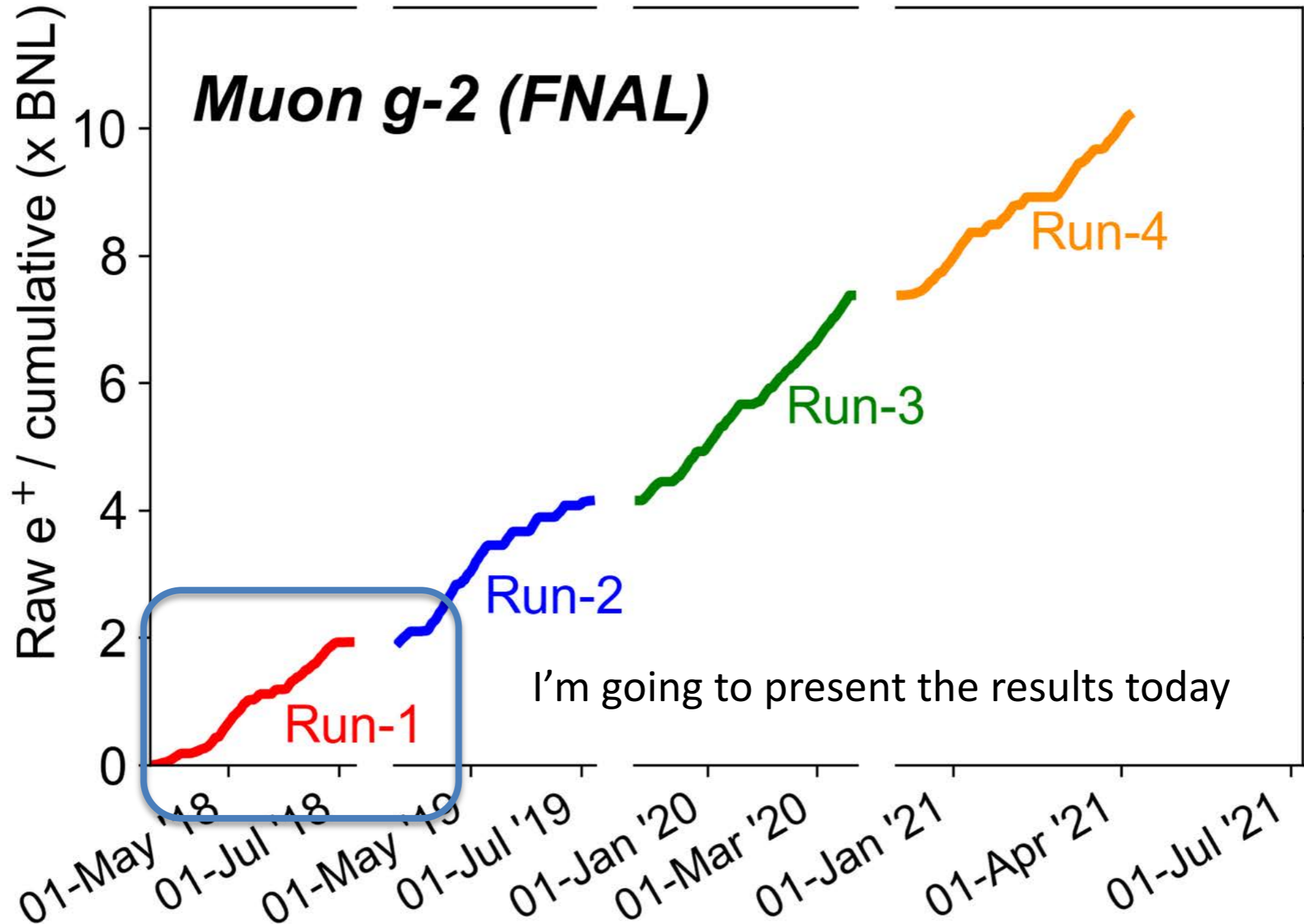
lognormal  $G(\Delta t) = 1 - a \cdot e^{-\frac{1}{2}[\log^2(\Delta t/\tau)]/[\log^2(t_M/\tau)]}$

esponenziale  $G(\Delta t; i, E_1, E_2) = 1 - a(i, E_1, E_2) \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau(i, E_1, E_2)}}$



We have collected plenty of data over the last 3 years:

Last update: 2021-04-06 09:28 ; Total = 10.20 (xBNL)



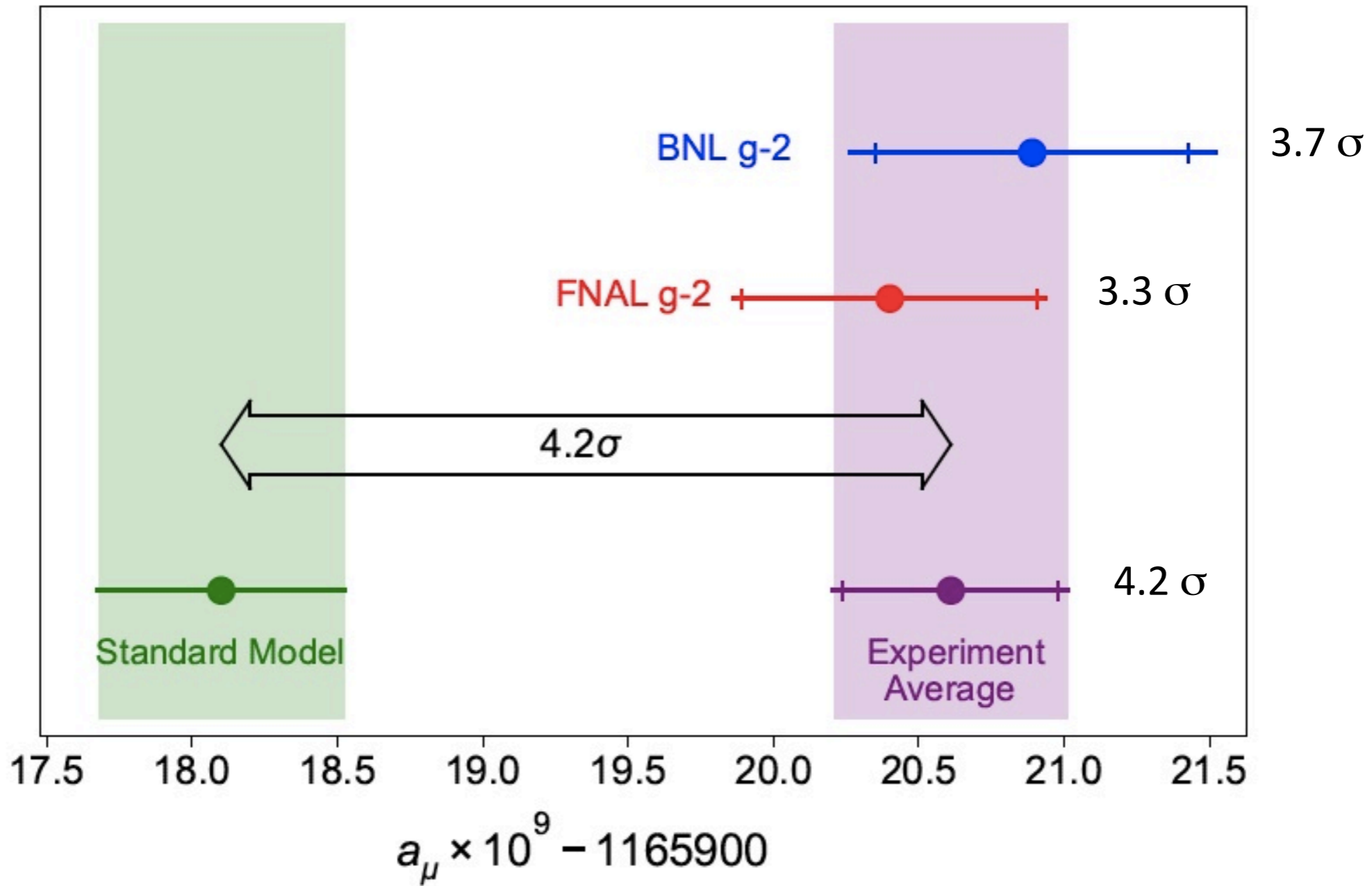
calibrazione laser



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

434 ppb stat  $\oplus$  157 ppb syst error

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

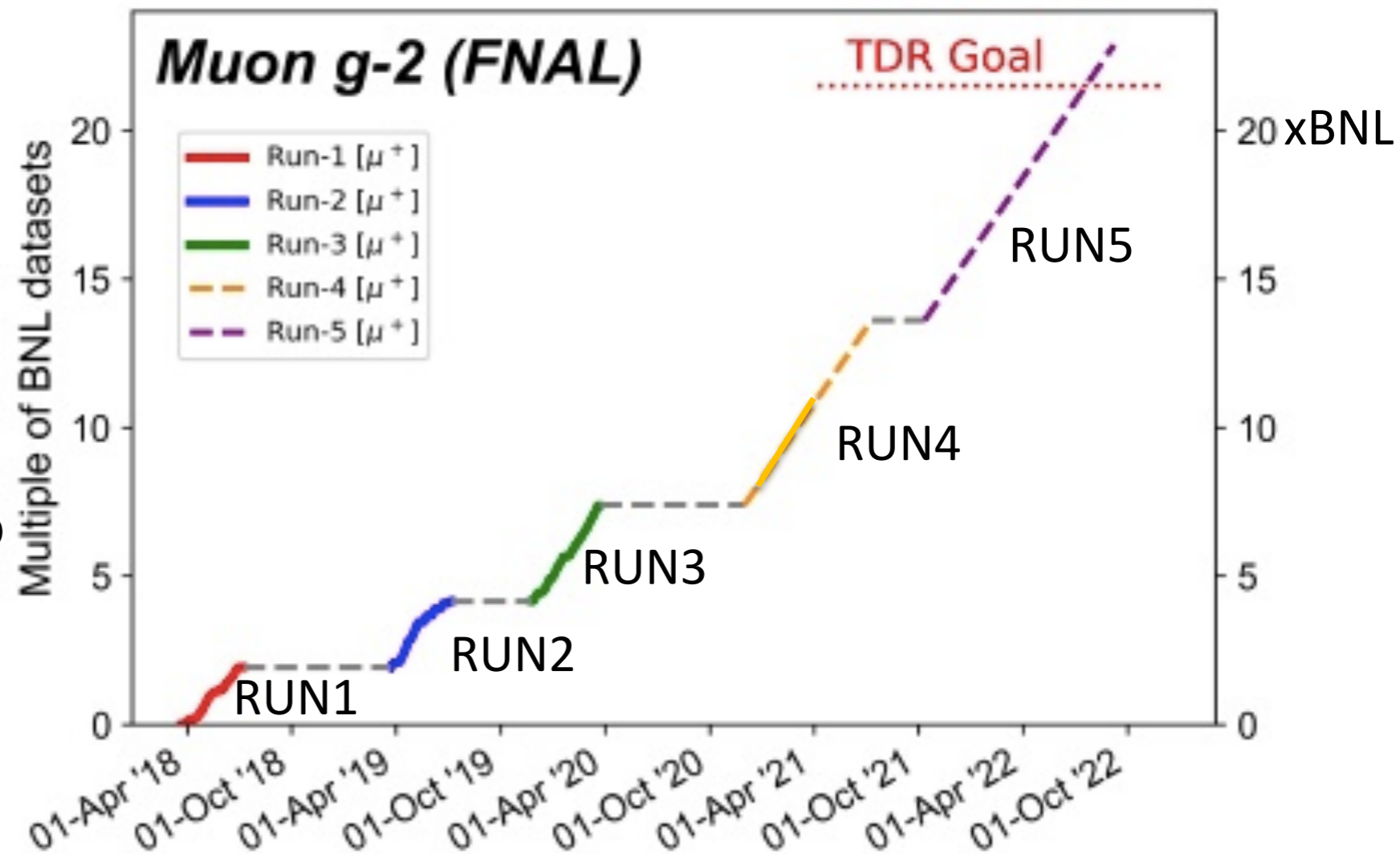


**Per approfondire**

- <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.072002>
- <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.141801>
- <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.103.042208>



- RUN<sub>1</sub> is only 6% of the final dataset
- Analysis of RUN<sub>2/3</sub> (expect an improvement of a factor  $\sim 2$  in precision)
- RUN<sub>4</sub> (November 2020-July 2021) is expected to bring the statistics to  $\sim 13$  BNL
- RUN<sub>5</sub> in 2021-2022 should allow to achieve the  $\times 20$  BNL project goal



Muon g-2 ha presentato i risultati del suo primo run di misura al Fermilab

**Il valore dell'anomalia giromagnetica del muone, ottenuto con grandissima precisione è**

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

- **il risultato conferma, con migliore precisione, la precedente misura ottenuta a BNL**
- **la discrepanza combinata con la predizione del Modello Standard sale a  $4.2\sigma$**

I prossimi due run, già eseguiti ed in corso di analisi, potrebbero migliorare la precisione di un fattore 2. Ulteriori guadagni verranno dai Run 4 (in corso) e Run 5. Discrepanza a  $5\sigma$ ? Ci sono buone speranze!

**L'INFN ha dato un contributo chiave a questo importante risultato e il gruppo italiano, inclusi i ricercatori Trieste/Udine, è ancora in prima fila: nella presa dati, nell'analisi e nei miglioramenti dell'apparato**

Isidor Isaac Rabi, Nobel-prize winning Hungarian-American physicist,  
on the discovery of the muon (1934)

“Who ordered that?”



The New York Times

**JOURNALISM  
LIKE NO OTHER.**

**OFFER EXTENDED:**  
Subscribe for €0.50 a week.

**VIEW OFFER**

## *Quotation of the Day: A Particle's Tiny Wobble Could Upend the Known Laws of Physics*



April 7, 2021

“What monsters might be lurking there?”

[CHRIS POLLY](#), a physicist at the Fermi National Accelerator Laboratory in Illinois, referring to mounting evidence that tiny subatomic particles called muons seem to disobey the known laws of physics.

A version of this article appears in print on April 8, 2021, Section A, Page 3 of the New York edition with the headline: Quote of the Day. [Order Reprints](#) | [Today's Paper](#) | [Subscribe](#)

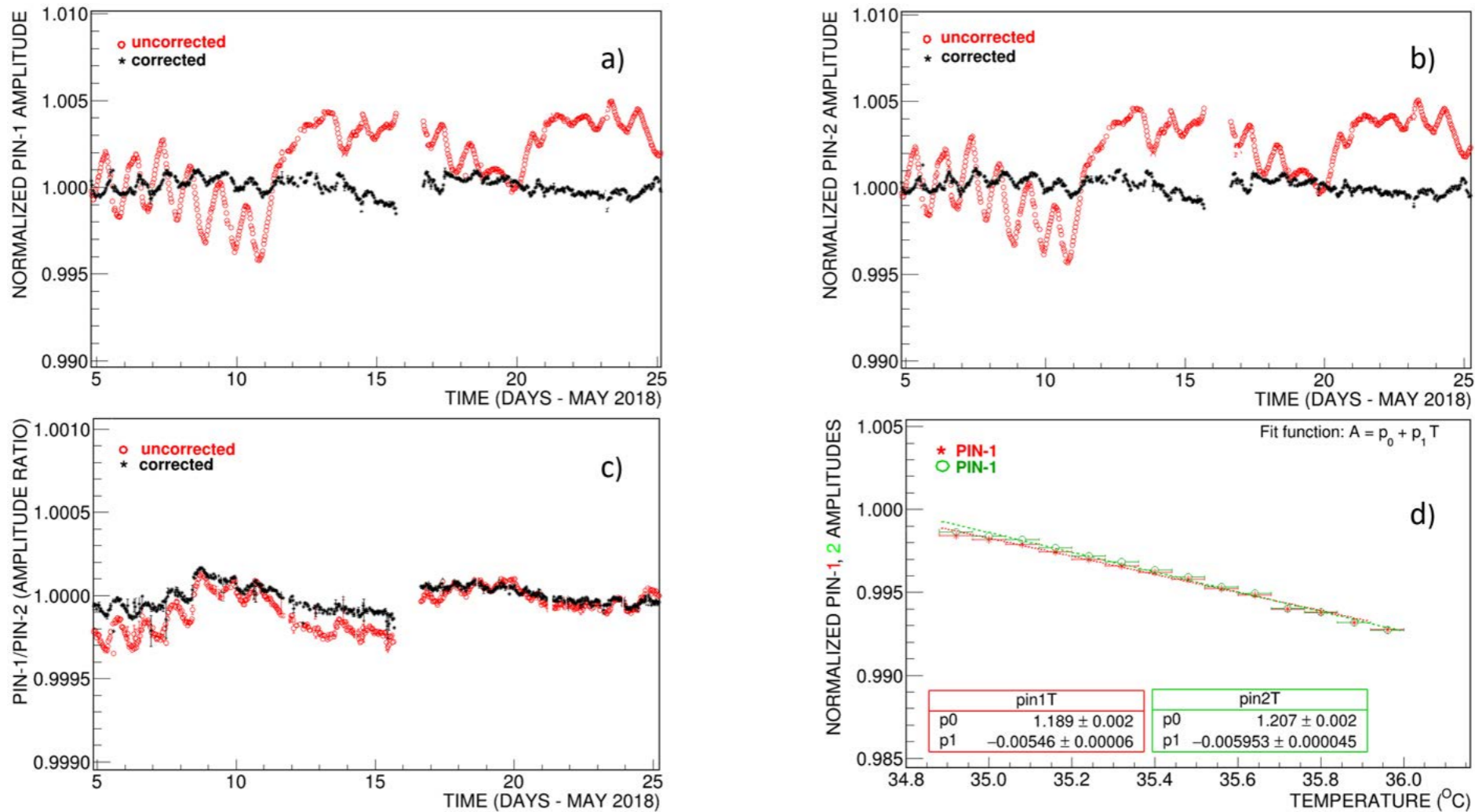


Enrico Fermi, Nobel-prize winning  
Italian-American physicist,

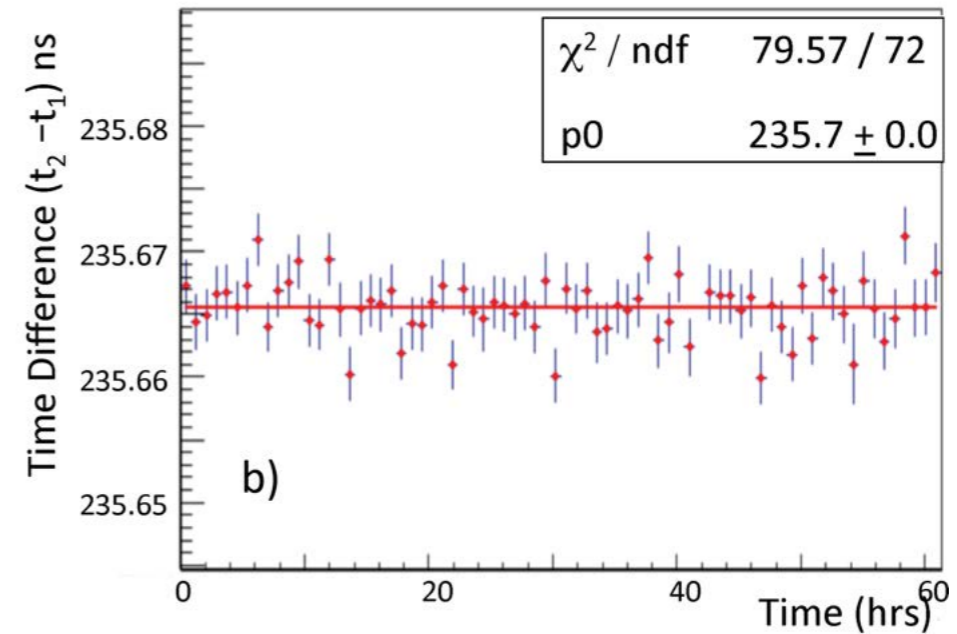
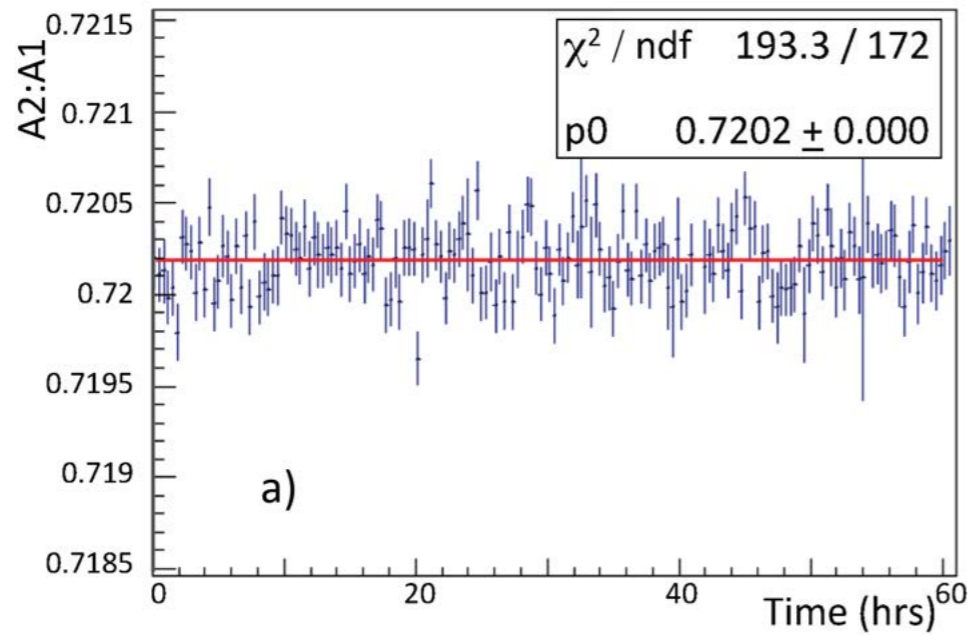


“Before I came here I was confused about  
this subject. Having listened to your lecture  
I am still confused. But on a higher level. ”

## BACKUP



**Figure 19.** Plots assessing the stability of the Source Monitor versus temperature changes in a two-week period. Upper panel: (a) and (b) the SM PIN1 and PIN2 signals, respectively, before and after temperature corrections. Lower panel: in (c) PIN1 to PIN2 ratio before and after temperature corrections; in (d) PINs temperature dependence for the same data set. The relation between the two quantities is almost linear, therefore a linear correction is applied to the data to compensate for this effect. The final stability is better than 0.2% for the single PIN and  $10^{-4}$  for the ratio.

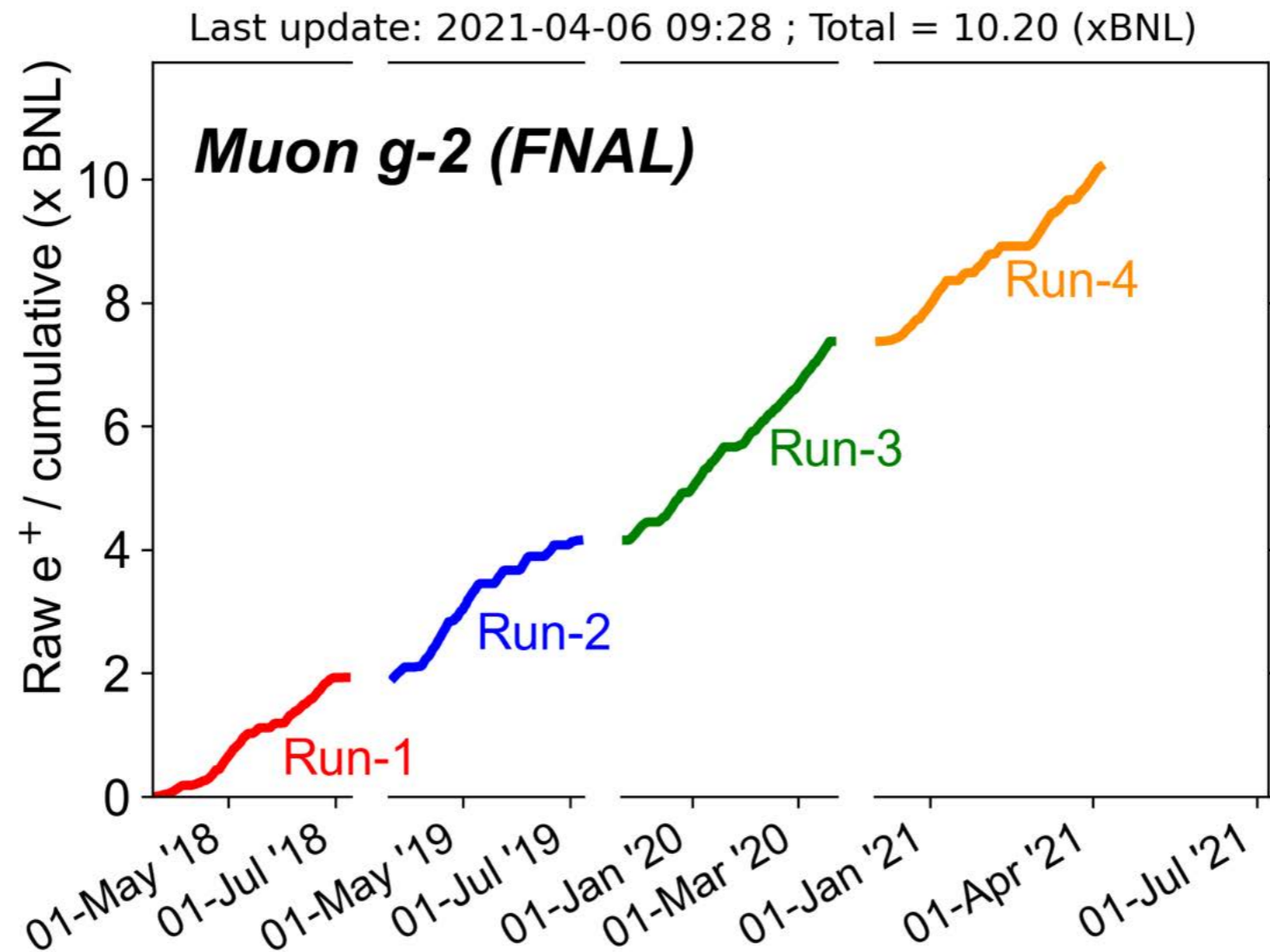


**Figure 20.** Performance of the Local Monitor: in (a) ratio of amplitudes of the delayed LM peak to the respective SM peak for one particular LM channel and, in (b), arrival time differences between delayed LM and SM pulses for the same channel.



# E989 collected data

We have collected plenty of data over the last 3 years:



# $a_\mu$ : Unblinding

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

434 ppb stat  $\oplus$  157 ppb syst error

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

## Systematics (numerator)

Source	Uncertainty
Frequency Standard	1 ppt
Frequency Synthesizers	0.1 ppb
Digitization Frequency	2 ppb
Total Systematic	2 ppb

Data Set	Run-1a	Run-1b	Run-1c	Run-1d
$C_{pa}$	-184	-165	-117	-164
Stat. uncertainty	23	20	15	14
Tracker & CBO	73	43	41	44
Phase maps	52	49	35	46
Beam dynamics	27	30	22	45
Total uncertainty	96	74	60	80

$R(\omega_a)$ with detailed systematics categories [ppb]				
Total systematic uncertainty	65.2	70.5	54.0	48.8
Time randomization	14.8	11.7	9.2	6.9
Time correction	3.9	1.2	1.1	1.0
Gain	12.4	9.4	8.9	4.8
Pileup	39.1	41.7	35.2	30.9
Pileup artificial dead time	3.0	3.0	3.0	3.0
Muon loss	2.2	1.9	5.2	2.4
CBO	42.0	49.5	31.5	35.2
Ad-hoc correction	21.1	21.1	22.1	10.3

\*Run 1  $\omega_a$  data analyzed in four subsets

	1a	1b	1c	1d
$C_p$ (ppb)	176	199	191	166
Statistical uncertainty	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Tracker alignment/reco.	11.0	12.3	12.0	10.7
Tracker res. & acc. removal	3.3	3.9	3.7	3.0
Azimuthal avg. & calo. acc.	1.0	1.3	2.2	1.1
Amplitude fit	1.2	0.4	1.0	2.9
Quad alignment/voltage	4.4	4.4	4.4	4.4
<b>Systematic uncertainty</b>	<b>12.4</b>	<b>13.7</b>	<b>13.6</b>	<b>12.3</b>

Data Set	Run-1a	Run-1b	Run-1c	Run-1d
$C_{ml}$	-14	-3	-7	-17
Phase-momentum	2	0	1	3
Form of $l(t)$	2	0	1	1
$f_{loss}$ function	2	1	2	2
Linear sum ( $\sigma_{C_{ml}}$ )	6	2	4	6

	1a	1b	1c	1d
$C_e$ (ppb)	471	464	534	475
Statistical uncertainty	0.4	0.5	0.4	0.2
Fourier method	8.4	13.4	14.4	3.9
Momentum-time correlation	52	52	52	52
Quad alignment/voltage	6.4	6.4	6.4	6.4
Field index	1.7	1.5	1.7	4.0
<b>Systematic uncertainty</b>	<b>53</b>	<b>54</b>	<b>54</b>	<b>53</b>

## Systematics (denominator)

run-1 (substructure)	77.4 ppb
azimuthal shape*	7.6 ppb
skin depth	12.6 ppb
frequency extraction (0.4/1ms)	4.6 ppb
Q3L: fit, position	1.5 ppb
repeatability	13.3 ppb
drift	10.2 ppb
radial dependency	4.4 ppb
2 <sup>nd</sup> 8-pulses	14.0 ppb
<b>total</b> -15.0 ppb	<b>81.7 ppb</b>

Source	Uncertainty (ppb)
Temperature	15 – 28
Configuration	22
Trolley	25
Fixed Probe Production	<1
Fixed Probe Baseline	8
Tracking Drift	22 – 43
<b>Total</b>	<b>43 – 62</b>

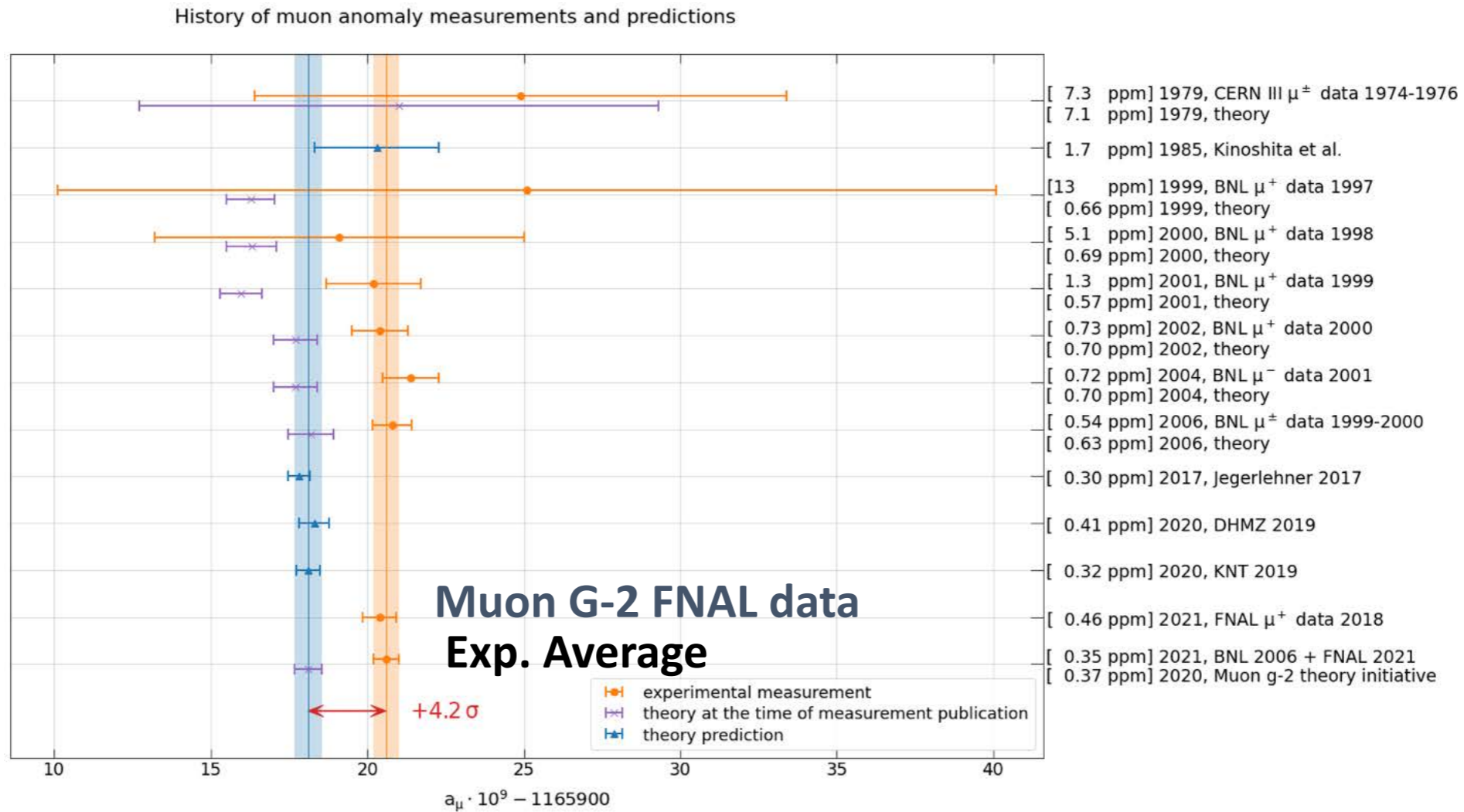
PROBE	Calibration Coefficients		
	Value (Hz)	Stat (Hz)	Syst (Hz)
1	90.81	0.38	2.02
2	84.21	0.65	1.18
3	95.02	0.53	2.19
4	86.03	0.25	1.28
5	92.96	0.51	1.10
6	106.24	0.46	1.35
7	116.64	0.96	1.61
8	76.39	0.60	1.21
9	83.52	0.23	1.64
10	24.06	1.39	1.26
11	177.55	0.22	1.99
12	110.85	0.44	1.73
13	122.89	2.08	1.93
14	77.11	0.53	1.88
15	74.82	1.06	1.59
16	20.35	0.44	2.94
17	172.12	1.23	1.96
<b>AVG</b>		<b>0.70</b>	<b>1.70</b>

Quantity	Symbol	Value	Unit
Diamagnetic Shielding T dep	$(1/\sigma)d\sigma/dT$	-10.36(30)	ppb/°C
Bulk Susceptibility	$\delta_b$	-1504.6 ± 4.9	ppb
Material Perturbation	$\delta_s$	15.2 ± 13.3	ppb
Paramagnetic Impurities	$\delta_p$	0 ± 2	ppb
Radiation Damping	$\delta_{RD}$	0 ± 3	ppb
Proton Dipolar Fields	$\delta_d$	0 ± 2.3	ppb

**Run-1 Estimate:**  
 **$B_K = -27.4 \pm 37$  ppb**

Dataset	correction [ppb]				uncertainty [ppb]			
	1a	1b	1c	1d	1a	1b	1c	1d
1. Tracker and calo effects	-	-	-	-	9.2	13.3	15.6	19.7
2. COD effects	1.6	1.5	1.7	1.4	5.2	4.7	5.2	4.9
3. In-fill time effects	-1.9	-2.3	-1.2	-4.1	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>-0.3</b>	<b>-0.8</b>	<b>0.5</b>	<b>-2.7</b>	<b>10.6</b>	<b>14.1</b>	<b>16.5</b>	<b>20.3</b>

# Updated g-2 history (April 8 2021)



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

G. Venanzoni, CERN Seminar, 8 April 2021

# Muon g-2/EDM experiment at J-PARC

HOME

INFORMATION

COLLABORATION

LINKS

INTERNAL

