

Il sistema di calibrazione laser dell'esperimento g-2 al Fermilab

Eleonora Rossi

**Società Italiana di Fisica
102° Congresso Nazionale
Padova, 26-30 settembre 2016**

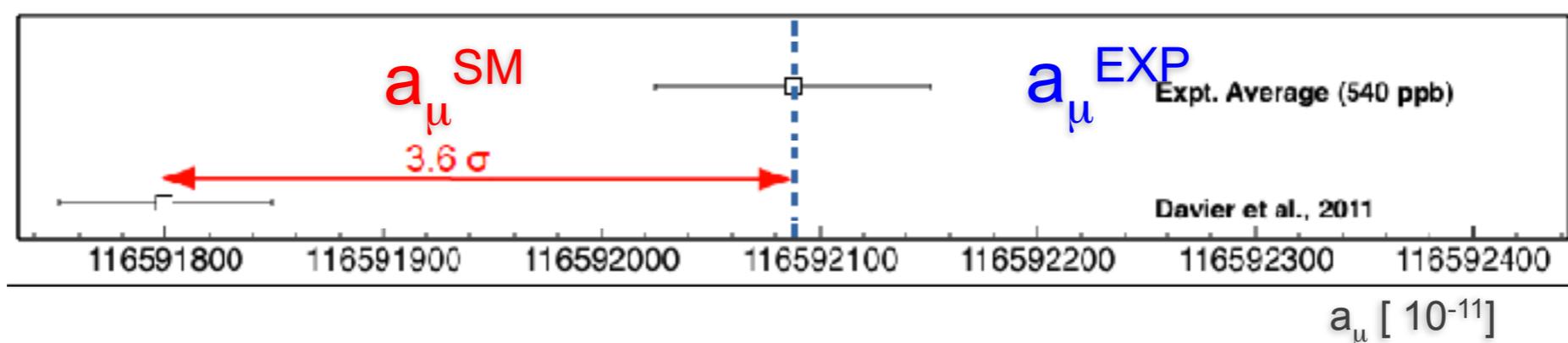
Sommario

- ❖ Obiettivo dell'esperimento g-2 al Fermilab
- ❖ Procedura sperimentale
- ❖ Il sistema di calibrazione laser

Obiettivi dell'esperimento g-2 al Fermilab

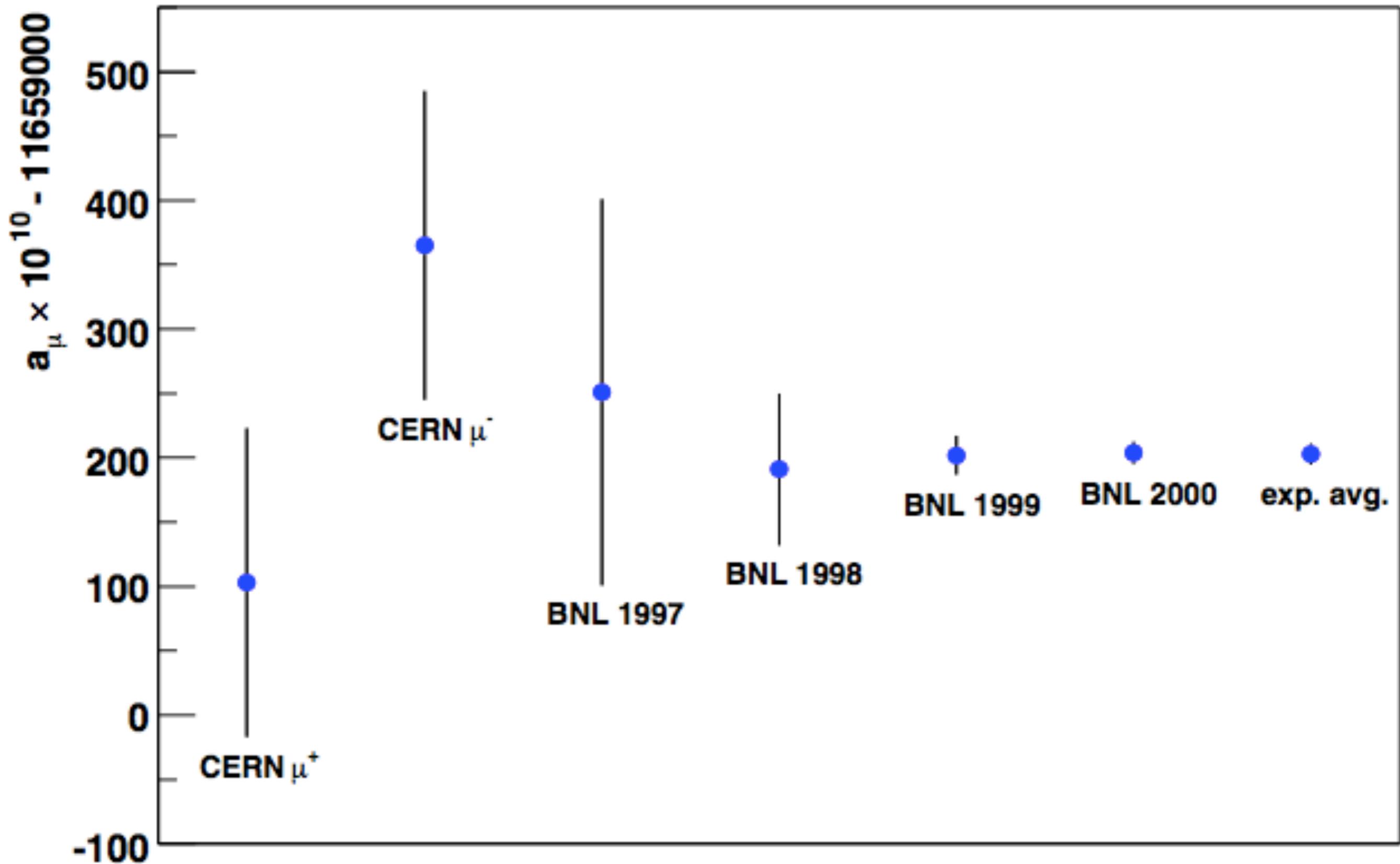
La precedente misura dell'anomalia magnetica a_μ , effettuata dall'esperimento E821 a Brookhaven nel 2001, ha mostrato una discrepanza con la previsione teorica del Modello Standard. Combinando l'errore statistico e quello sistematico si ottiene un errore totale sperimentale di 0.54 ppm.

$$\Delta a_\mu(E821 - SM) = (287 \pm 80) \times 10^{-11} > 3\sigma$$

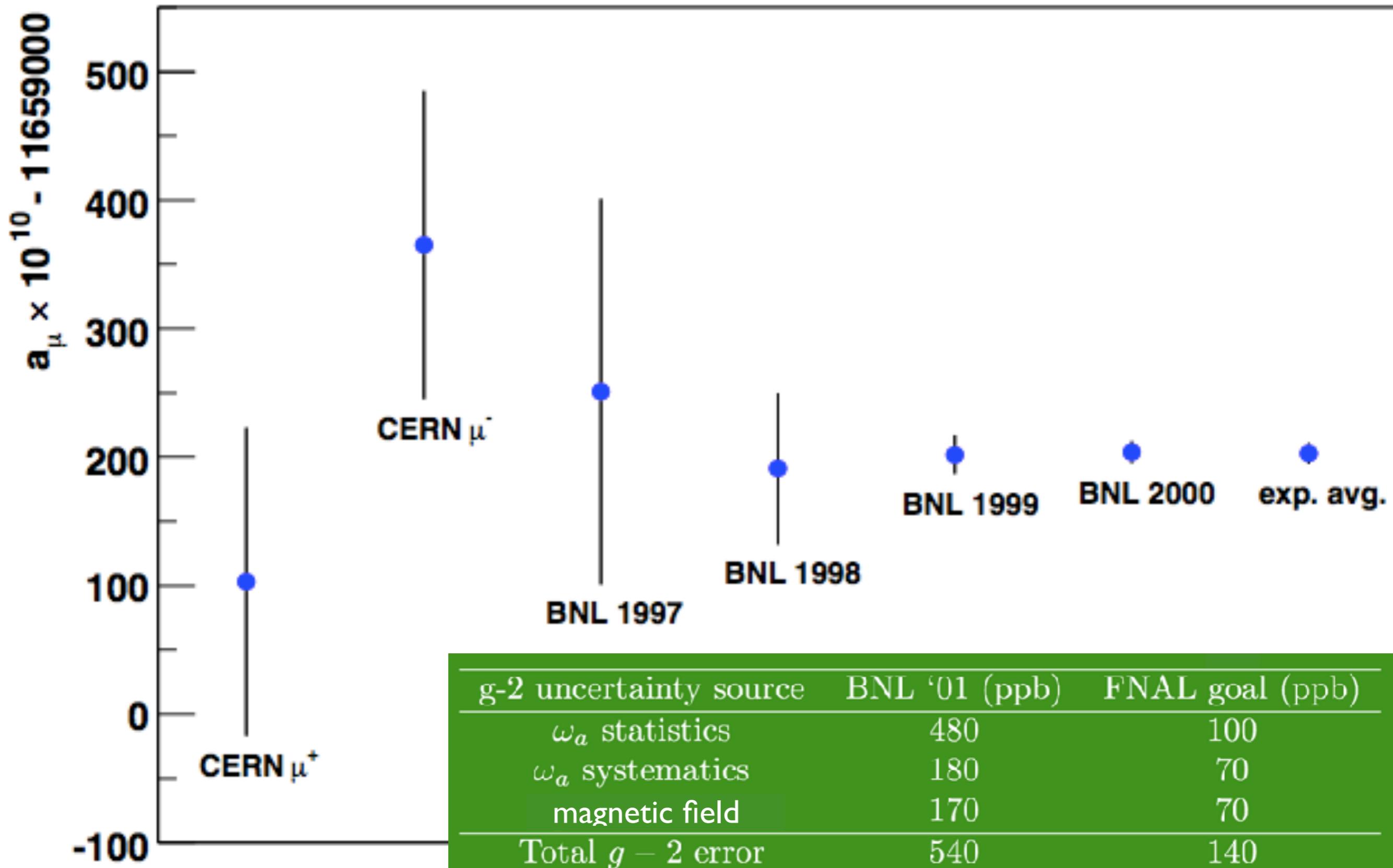


L'obiettivo del nuovo esperimento g-2 consiste nel migliorare la precisione della misura su a_μ di un fattore 4, riducendo l'errore a 0.14 ppm, valore paragonabile all'errore di 0.4 ppm associato alla piu' accurata previsione del Modello Standard.

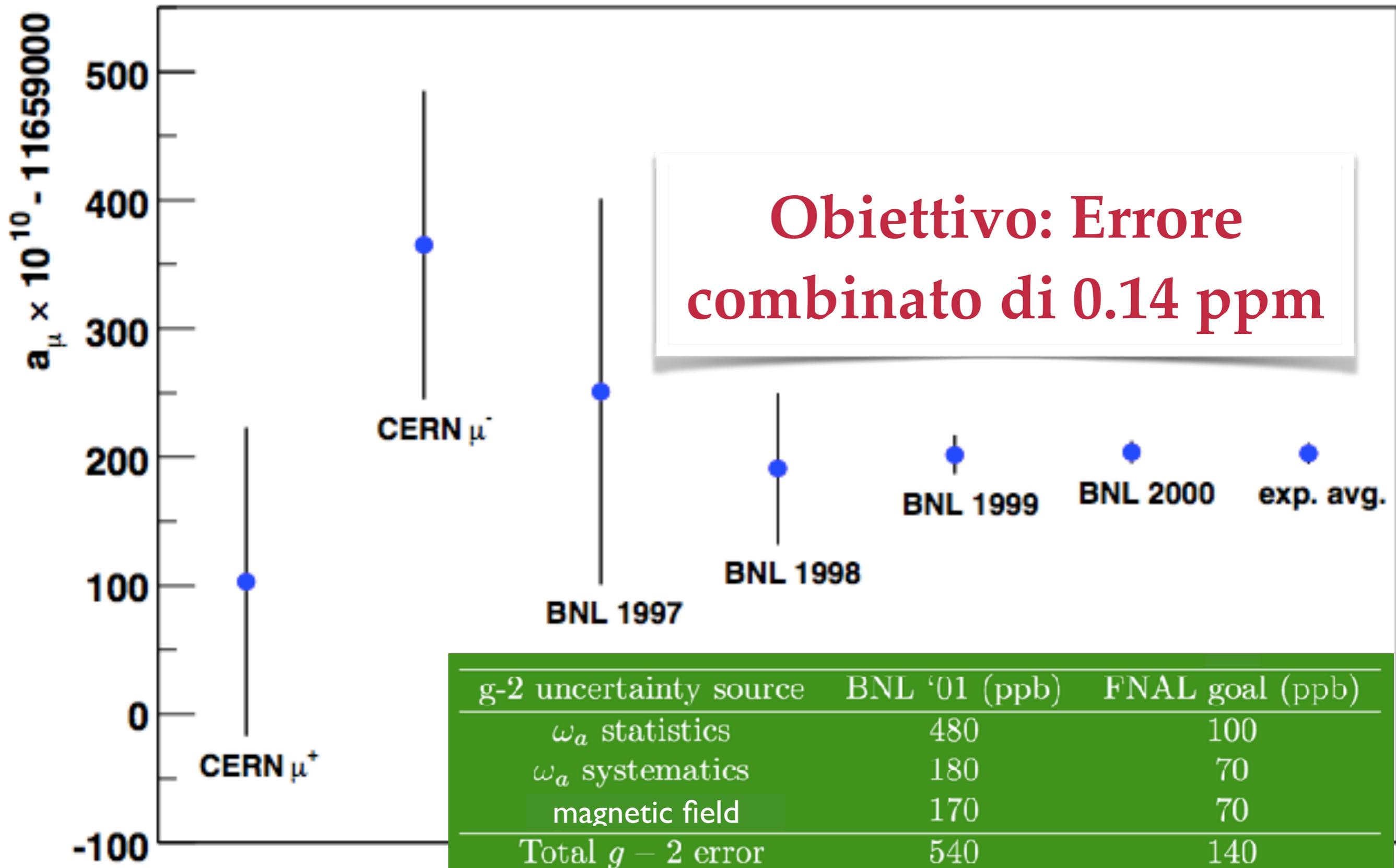
Obiettivi dell'esperimento g-2 al Fermilab



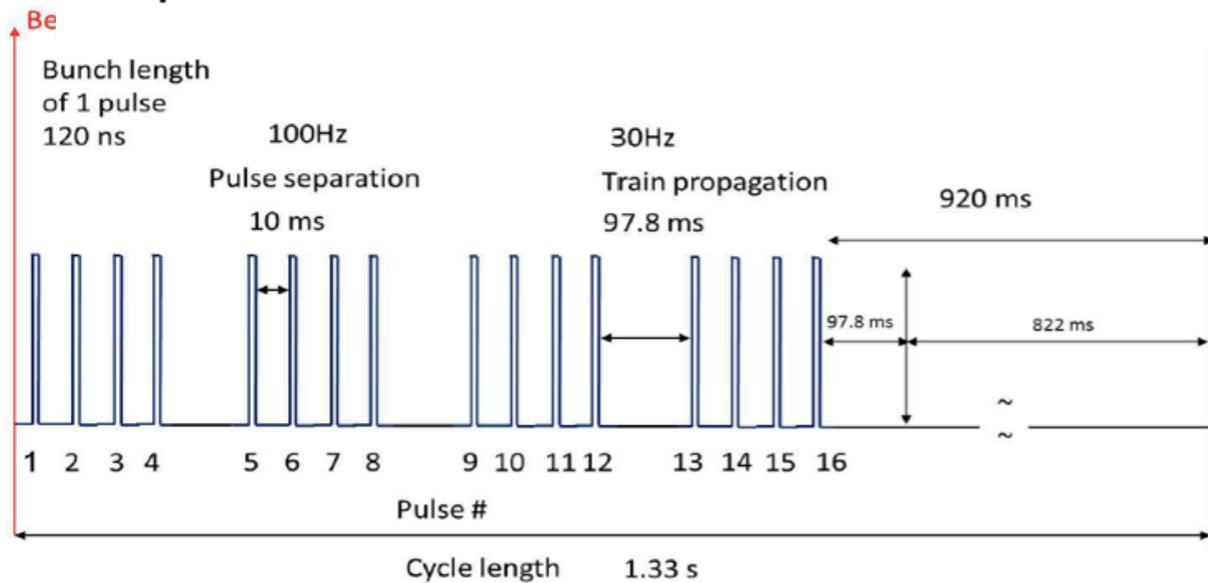
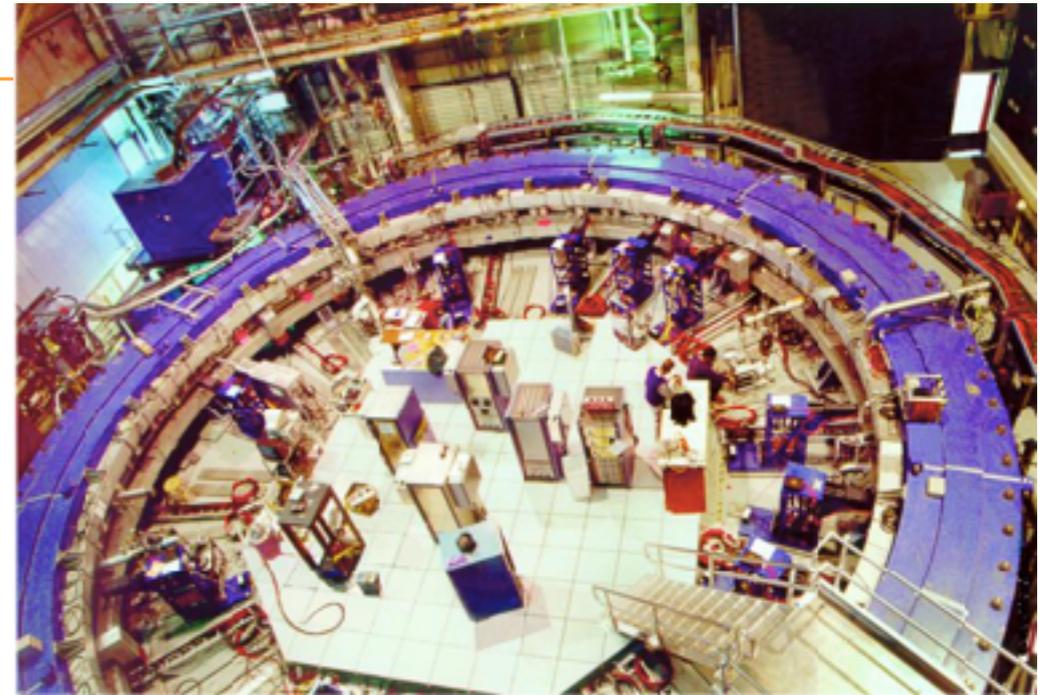
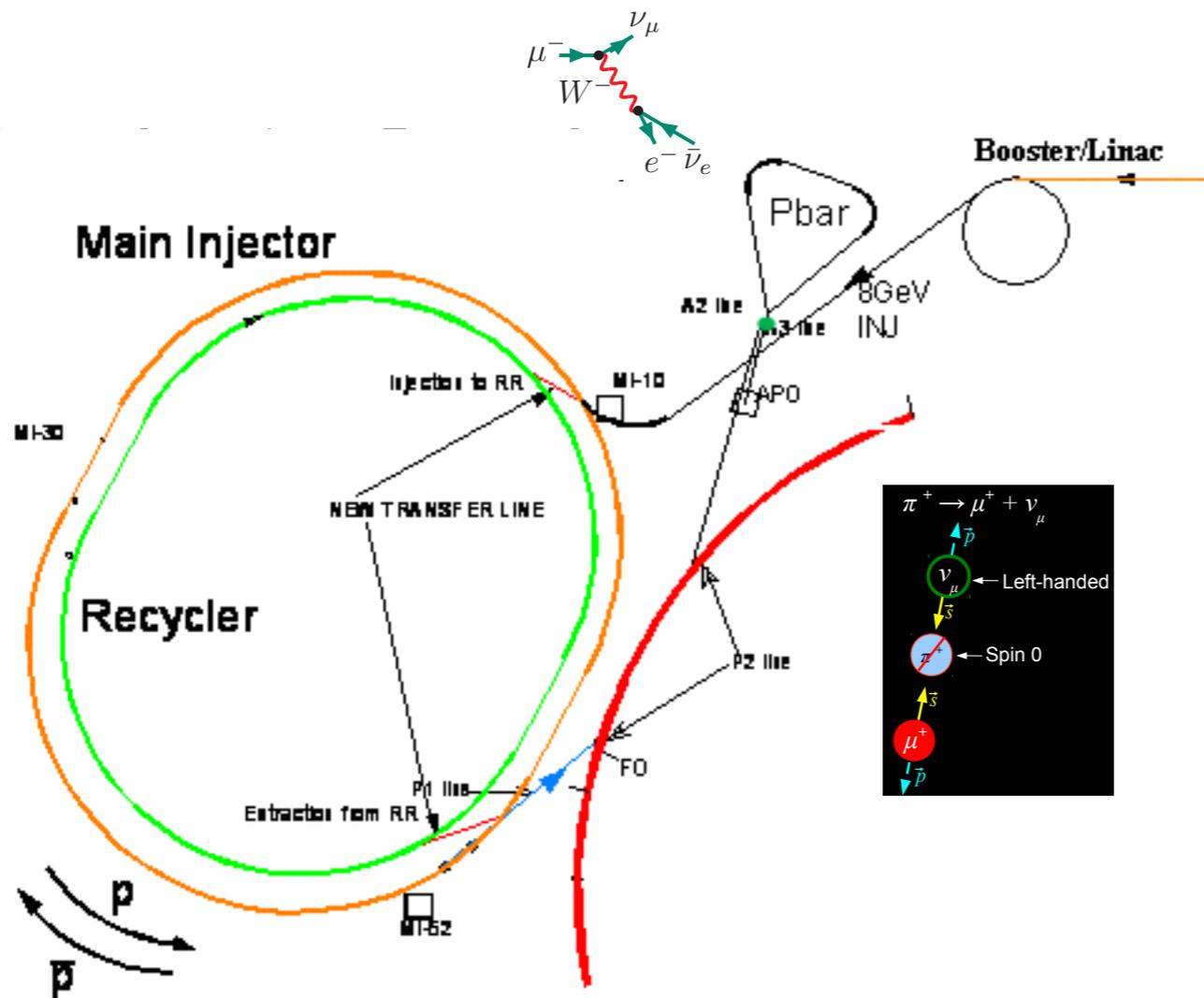
Obiettivi dell'esperimento g-2 al Fermilab



Obiettivi dell'esperimento g-2 al Fermilab



Procedura sperimentale



Incertezze sistematiche

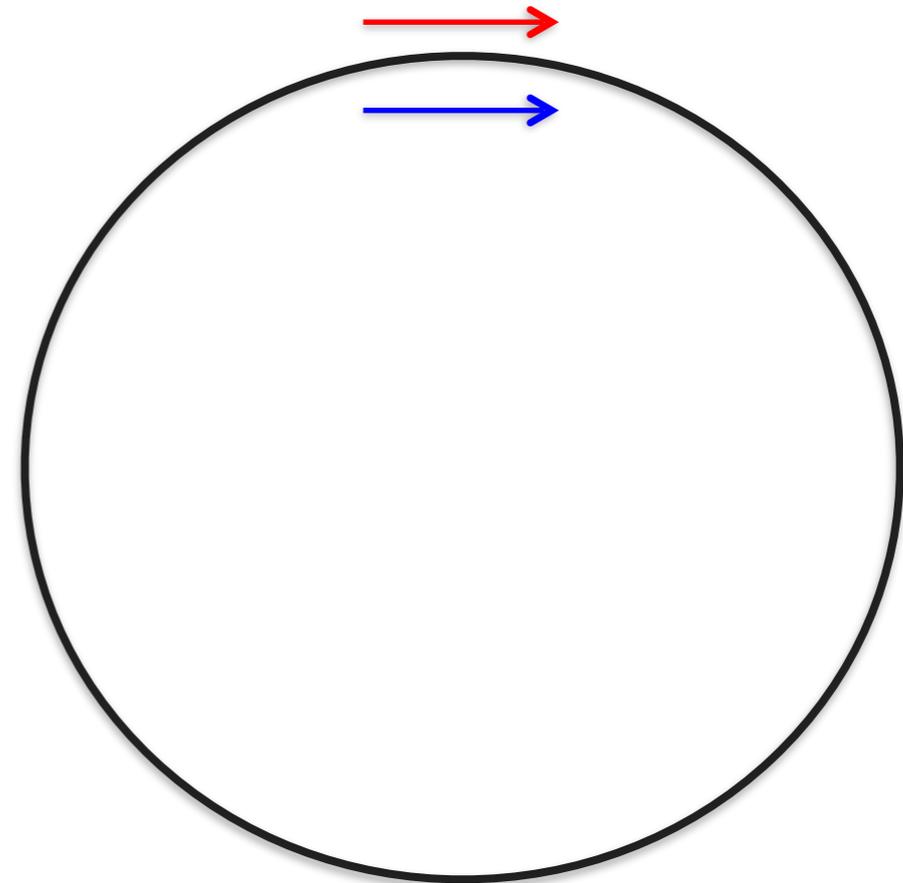
	F821 [ppb]	F989 Improvement Plans	Goal [ppb]
Gain changes	120	Better laser calibration low-energy threshold	20
Pileup	80	Low-energy samples recorded calorimeter segmentation	40
Lost muons	90	Better collimation in ring	20
CBO	70	Higher n value (frequency) Better match of beamline to ring	< 30
E and pitch	50	Improved tracker Precise storage ring simulations	30
Total	180	Quadrature sum	70

Frequenza anomala

Frequenza anomala

1. Fascio di muoni polarizzati dal decadimento del pione;

→ momentum
→ spin



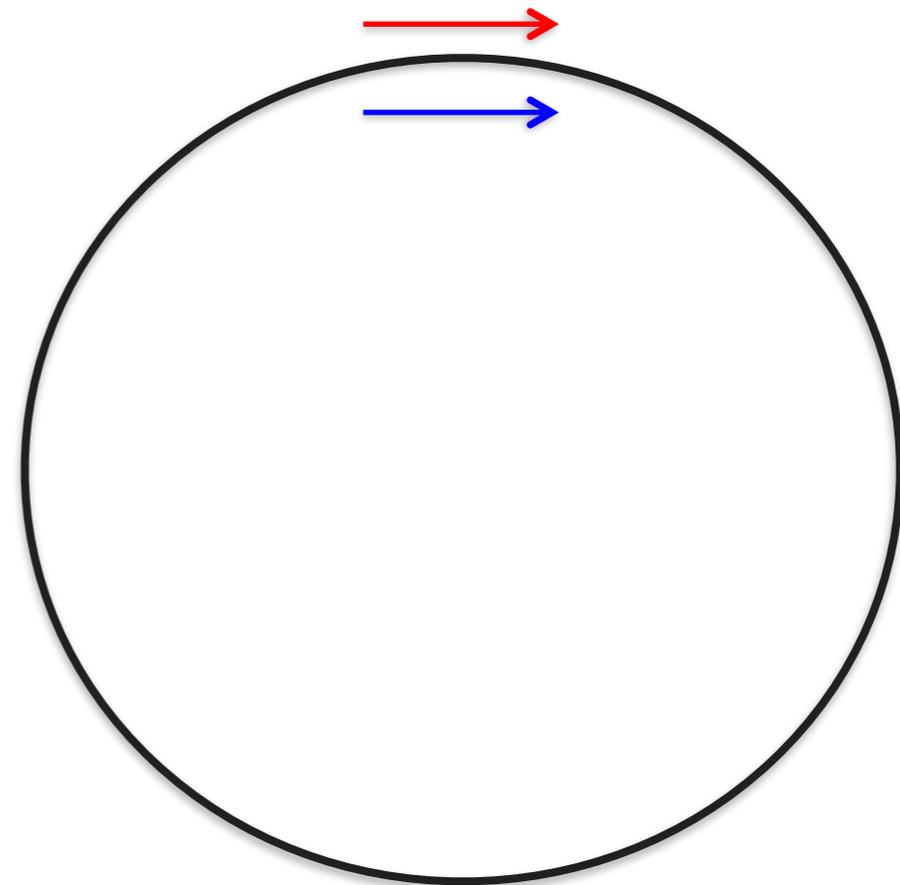
Frequenza anomala

1. Fascio di muoni polarizzati dal decadimento del pione;

2. Frequenza di ciclotrone:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_c = \frac{eB}{\gamma mc}$$

→ momentum
→ spin



Frequenza anomala

1. Fascio di muoni polarizzati dal decadimento del pione;

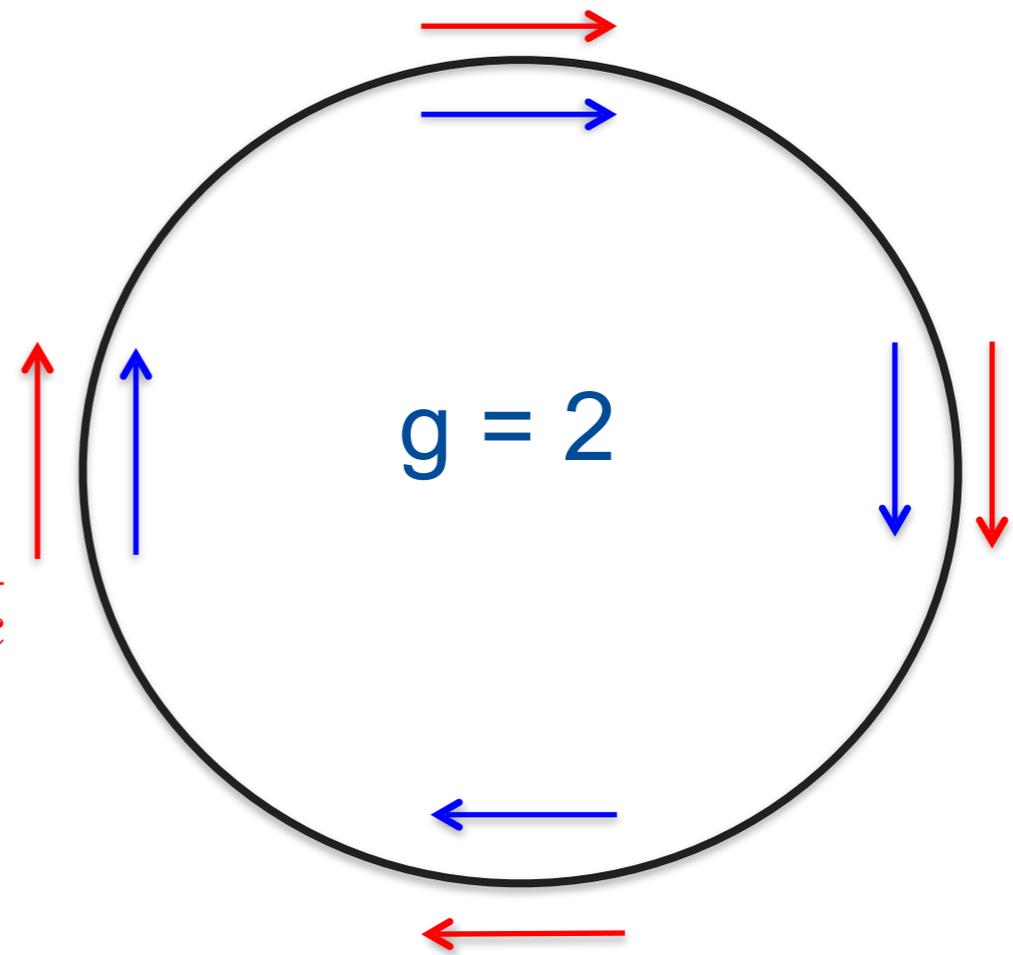
2. Frequenza di ciclotrone:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_c = \frac{eB}{\gamma mc}$$

3. Frequenza di precessione dello spin:

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_s = \frac{geB}{2mc} + (1 - \gamma) \frac{eB}{\gamma mc}$$

→ momentum
→ spin



Frequenza anomala

1. Fascio di muoni polarizzati dal decadimento del pione;

2. Frequenza di ciclotrone:

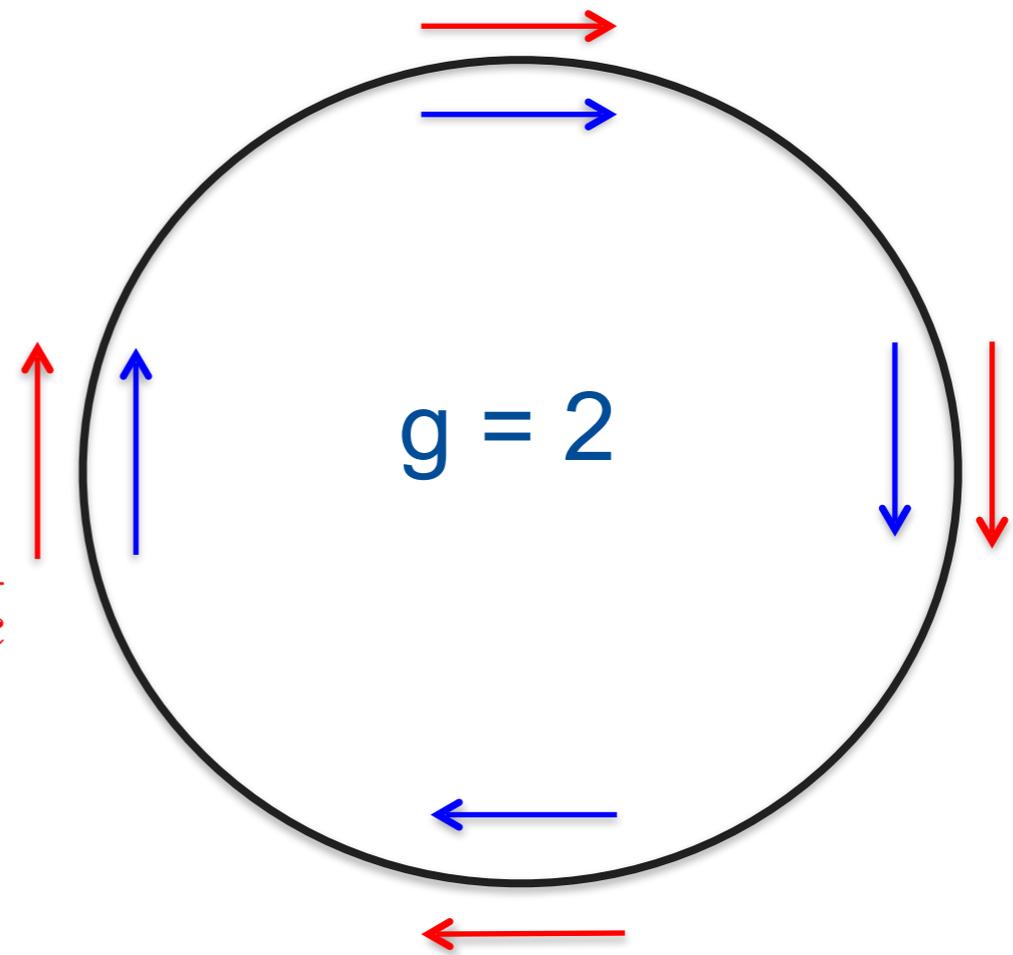
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_c = \frac{eB}{\gamma mc}$$

3. Frequenza di precessione dello spin:

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_s = \frac{geB}{2mc} + (1 - \gamma) \frac{eB}{\gamma mc}$$

$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c \neq 0$$

→ momentum
→ spin



Frequenza anomala

1. Fascio di muoni polarizzati dal decadimento del pione;

2. Frequenza di ciclotrone:

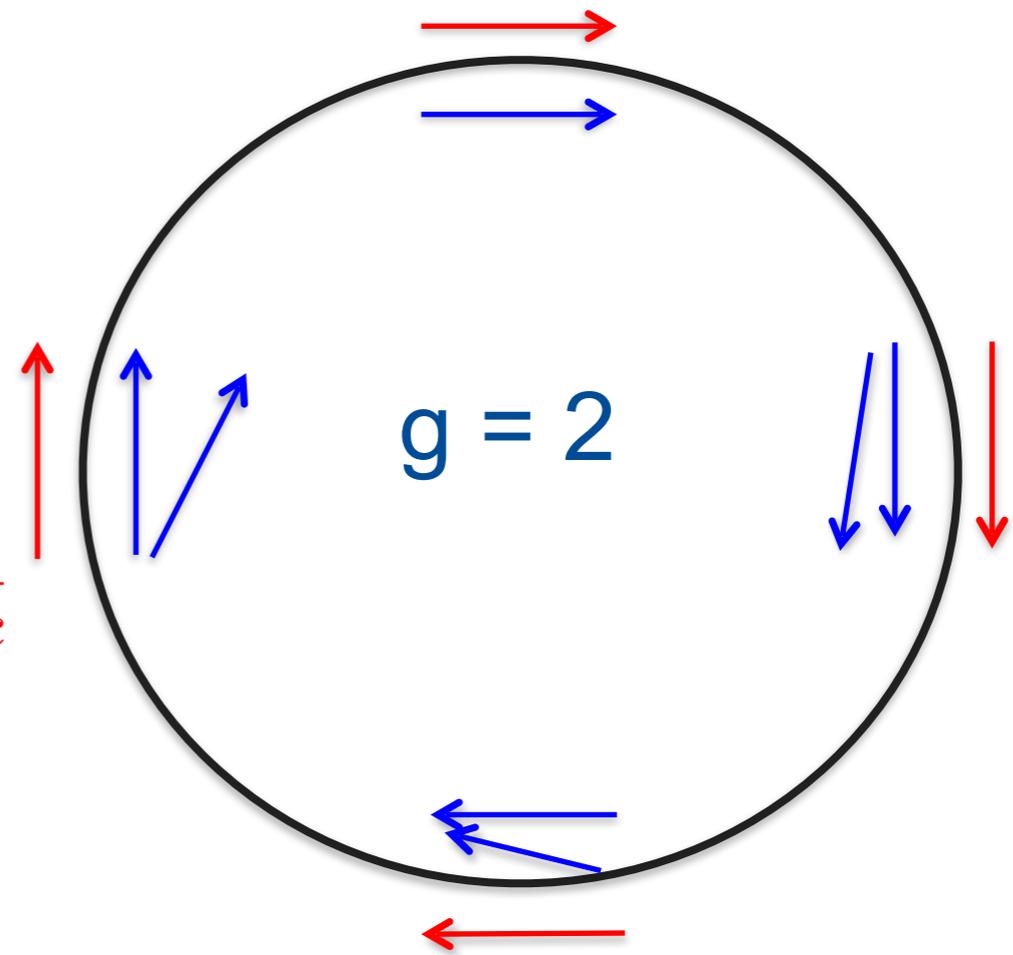
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_c = \frac{eB}{\gamma mc}$$

3. Frequenza di precessione dello spin:

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_s = \frac{geB}{2mc} + (1 - \gamma) \frac{eB}{\gamma mc}$$

$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c \neq 0$$

→ momentum
→ spin



Frequenza anomala

1. Fascio di muoni polarizzati dal decadimento del pione;

2. Frequenza di ciclotrone:

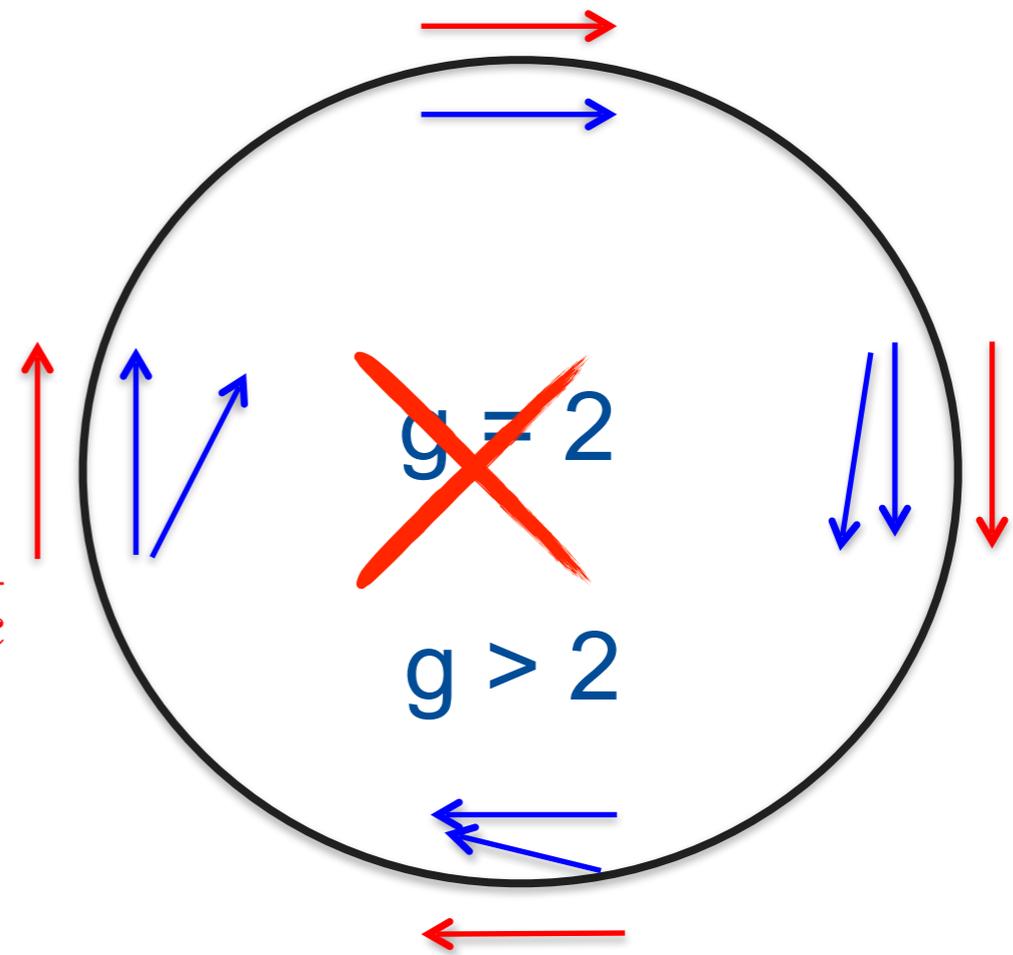
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_c = \frac{eB}{\gamma mc}$$

3. Frequenza di precessione dello spin:

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_s = \frac{geB}{2mc} + (1 - \gamma) \frac{eB}{\gamma mc}$$

$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c \neq 0$$

→ momentum
→ spin



Frequenza anomala

1. Fascio di muoni polarizzati dal decadimento del pione;

2. Frequenza di ciclotrone:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_c = \frac{eB}{\gamma mc}$$

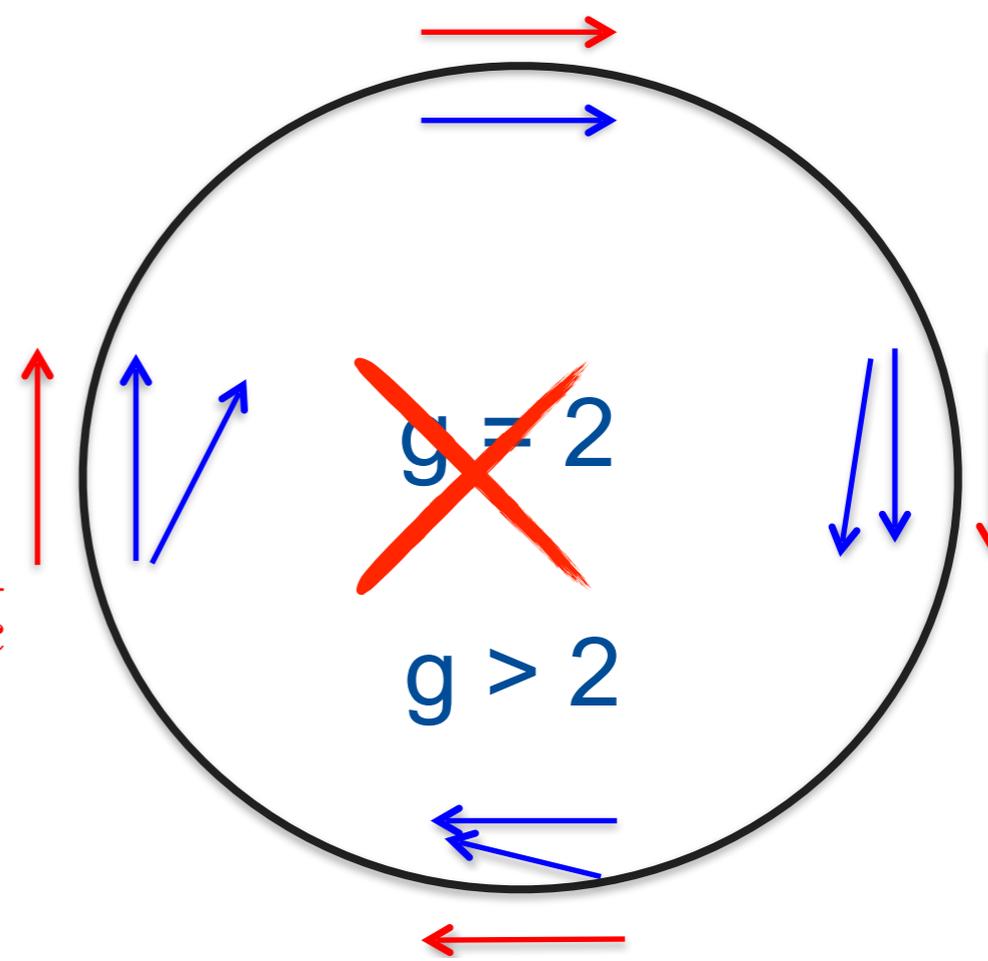
3. Frequenza di precessione dello spin:

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_s = \frac{geB}{2mc} + (1 - \gamma) \frac{eB}{\gamma mc}$$

$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c \neq 0$$

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

→ momentum
→ spin



Frequenza anomala

1. Fascio di muoni polarizzati dal decadimento del pione;

→ momentum
→ spin

2. Frequenza di ciclotrone:

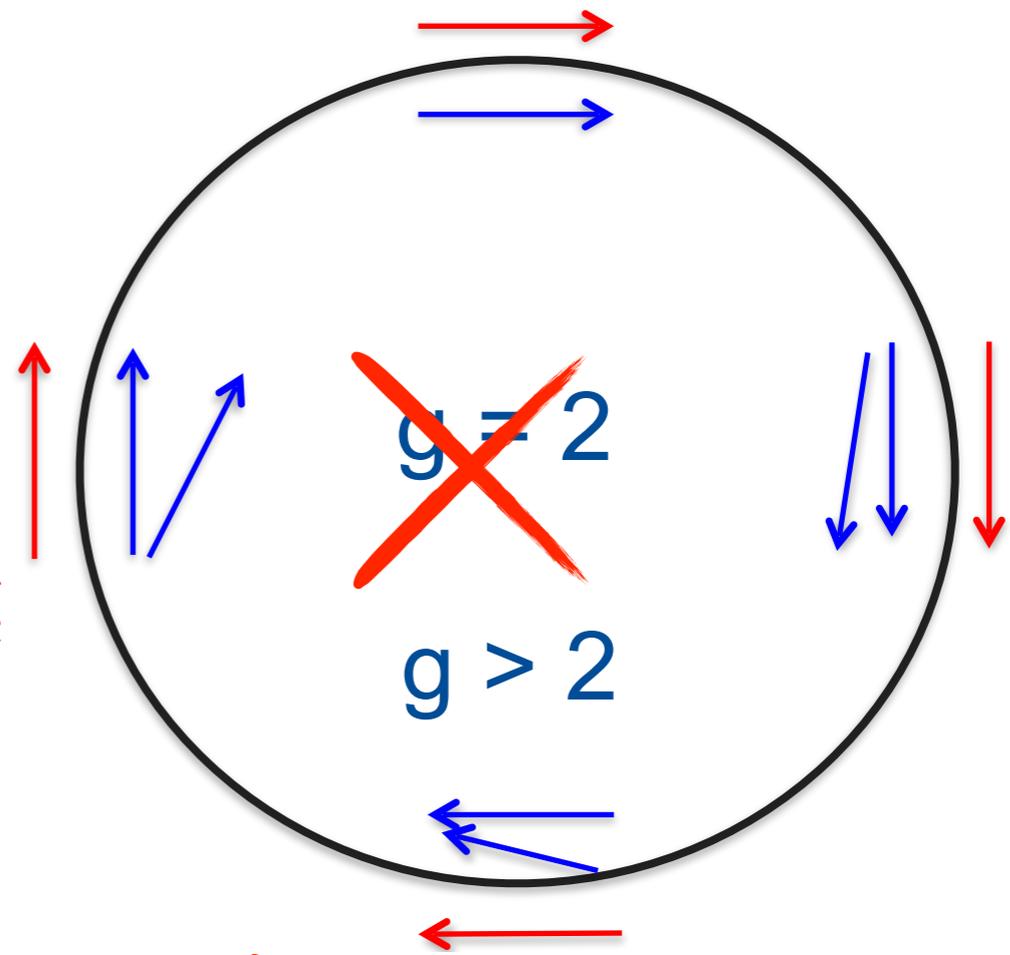
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_c = \frac{eB}{\gamma mc}$$

3. Frequenza di precessione dello spin:

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_s = \frac{geB}{2mc} + (1 - \gamma) \frac{eB}{\gamma mc}$$

$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c \neq 0$$

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



Moto longitudinale del muone

Frequenza anomala

1. Fascio di muoni polarizzati dal decadimento del pione;

→ momentum
→ spin

2. Frequenza di ciclotrone:

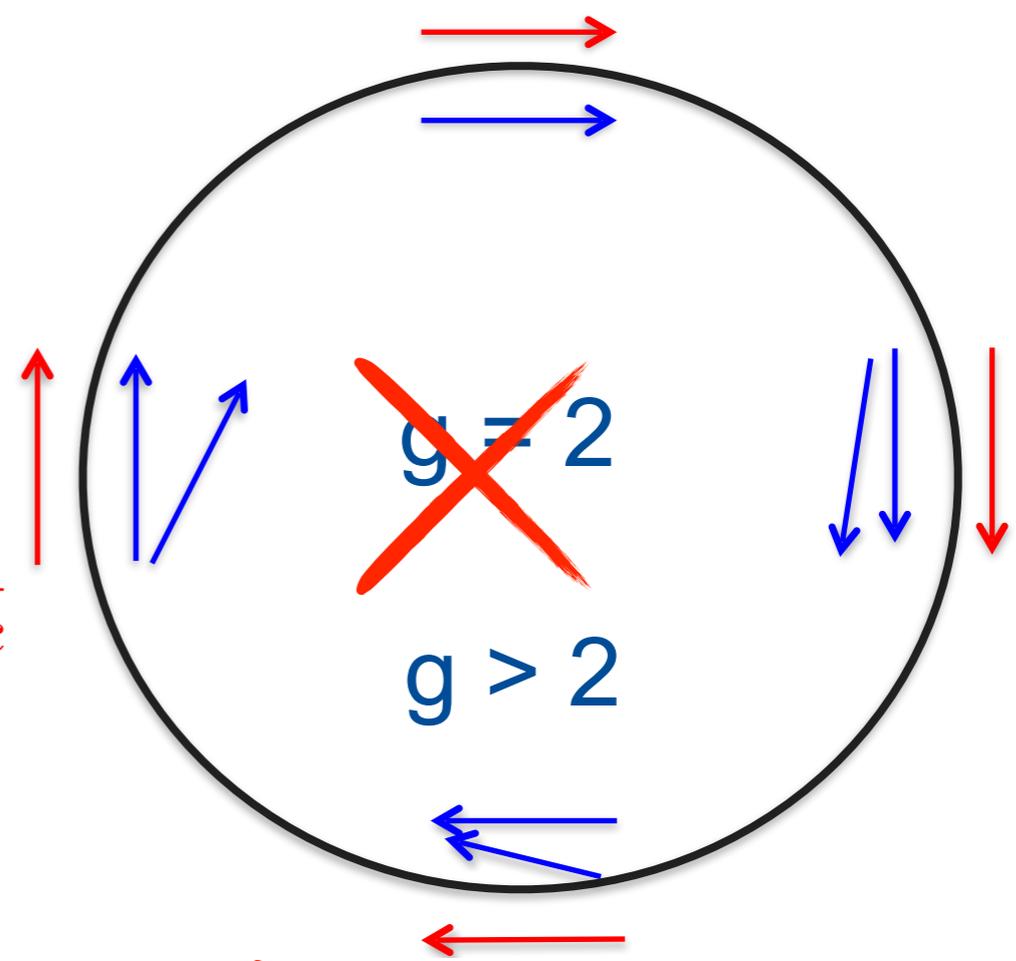
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_c = \frac{eB}{\gamma mc}$$

3. Frequenza di precessione dello spin:

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_s = \frac{geB}{2mc} + (1 - \gamma) \frac{eB}{\gamma mc}$$

$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c \neq 0$$

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



Se questi termini si pongono uguali

Moto longitudinale del muone

Frequenza anomala

1. Fascio di muoni polarizzati dal decadimento del pione;



2. Frequenza di ciclotrone:

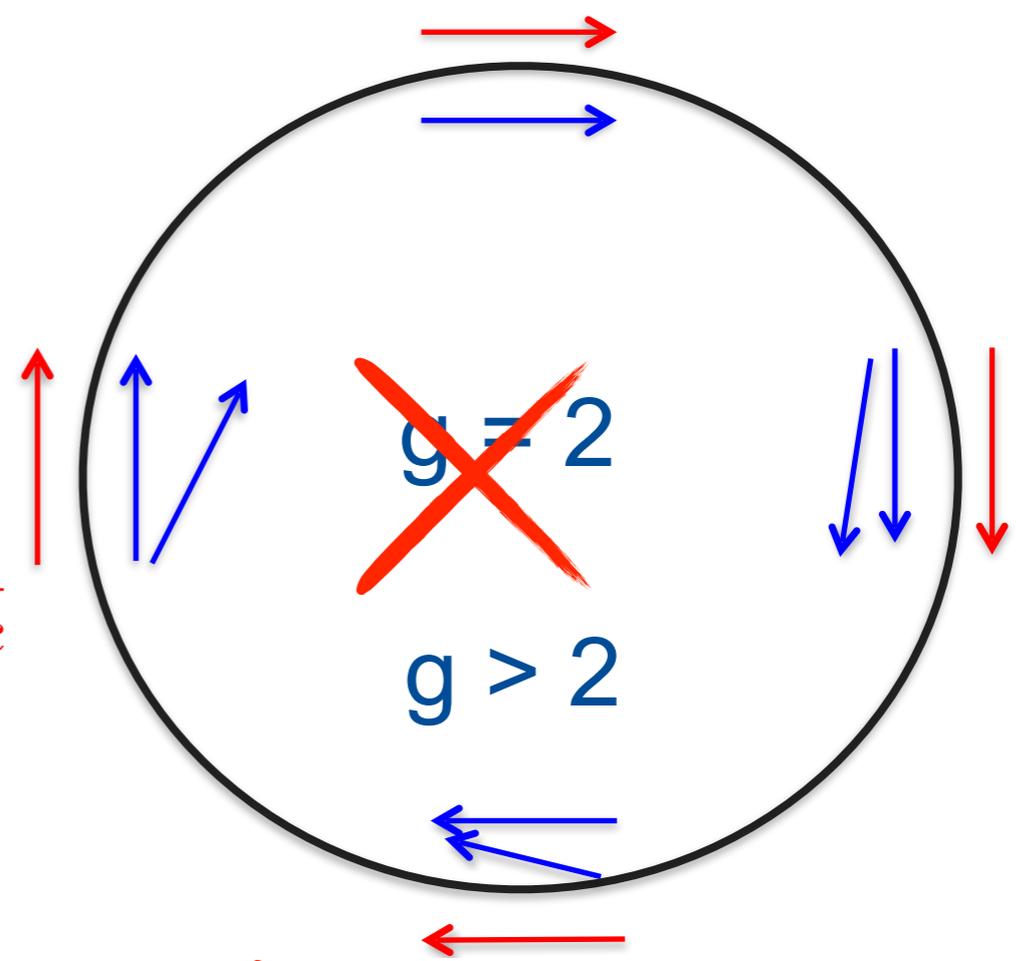
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_c = \frac{eB}{\gamma mc}$$

3. Frequenza di precessione dello spin:

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_s = \frac{geB}{2mc} + (1 - \gamma) \frac{eB}{\gamma mc}$$

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

$$p_\mu = 3.09 \text{ GeV}/c$$



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

Se questi termini si pongono uguali

Moto longitudinale del muone

Frequenza anomala

1. Fascio di muoni polarizzati dal decadimento del pione;

→ momentum
→ spin

2. Frequenza di ciclotrone:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e\vec{v} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_c = \frac{eB}{\gamma mc}$$

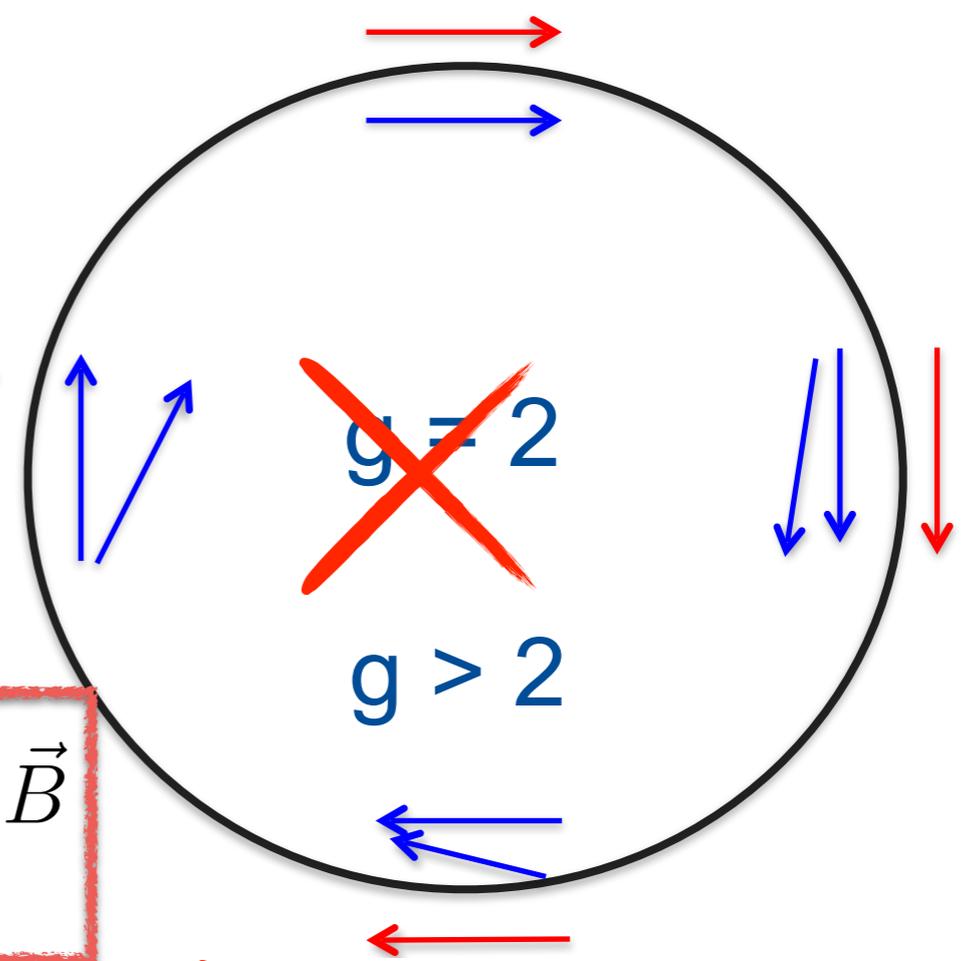
3. Frequenza di precessione dello spin:

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{\mu} \times \vec{B} \Rightarrow \omega_s = \frac{geB}{2mc} + (1 - \gamma) \frac{eB}{\gamma mc}$$

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

$$p_\mu = 3.09 \text{ GeV}/c$$

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



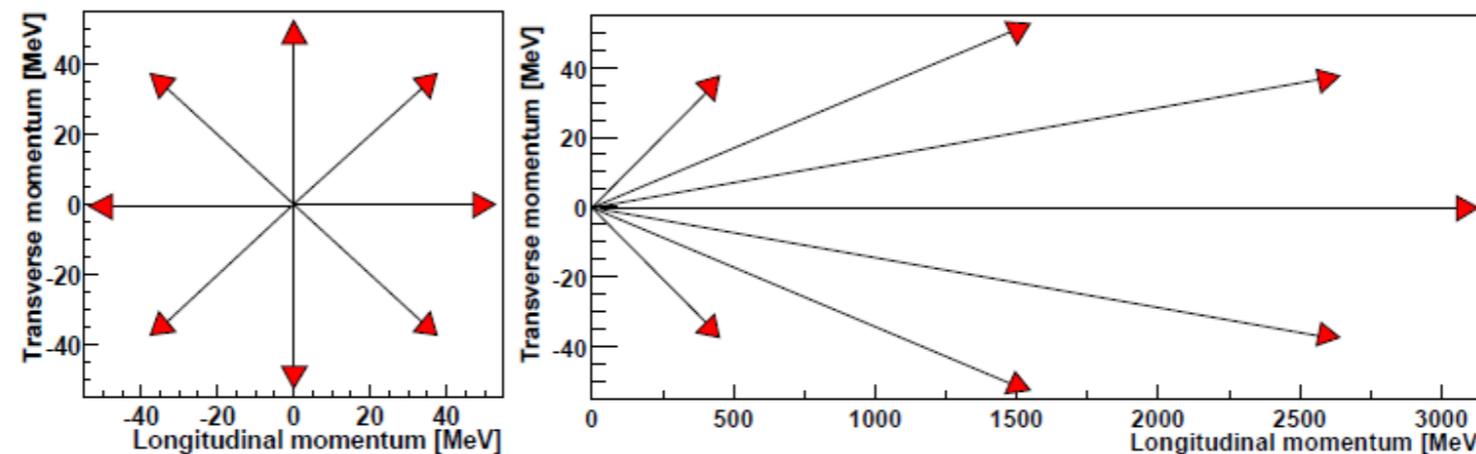
$$\vec{\omega}_a = \frac{e}{mc} \left(a_\mu \vec{B} - \left(a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \vec{\beta} \times \vec{E} - a_\mu \frac{\gamma}{\gamma + 1} (\vec{\beta} \cdot \vec{B}) \vec{\beta} \right)$$

Se questi termini si pongono uguali

Moto longitudinale del muone

Frequenza anomala

La violazione della parità nel decadimento del muone unita all'effetto del boost di Lorentz fa sì che, sopra una certa soglia sull'energia nel sistema del laboratorio che corrisponde alla selezione di un range di angoli nel sistema di riferimento del muone, la direzione dei positroni decaduti tenda a seguire la direzione dello spin del muone.

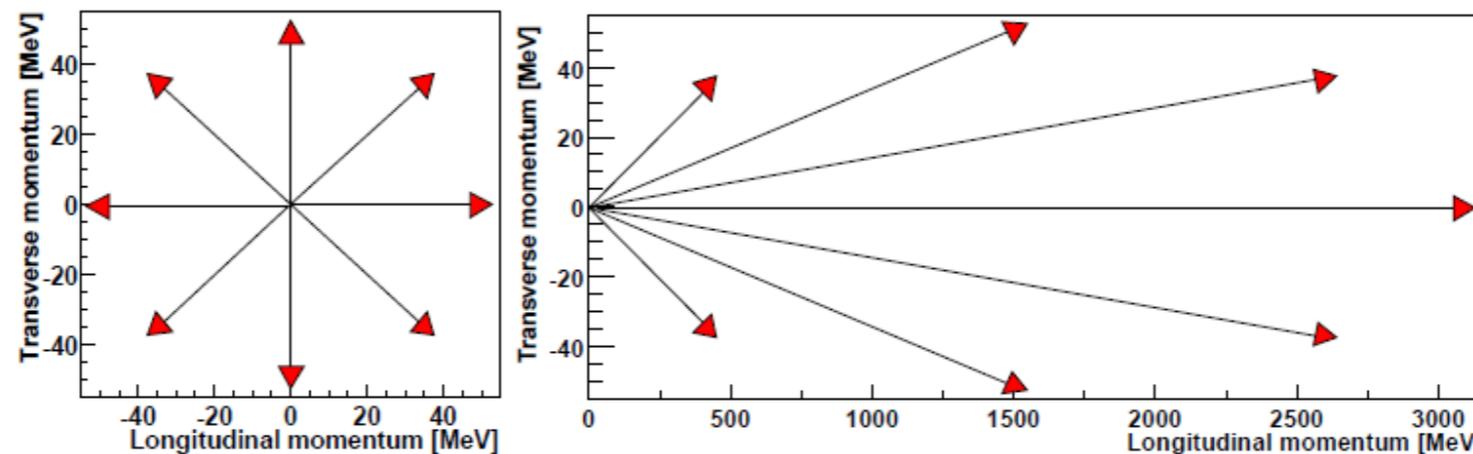


Il numero di particelle rivelate oltre questa soglia in funzione del tempo decresce esponenzialmente ma oscilla con frequenza ω_a .

In assenza di qualsiasi rumore di fondo dovuto a strumenti, lo spettro del decadimento della popolazione di muoni è descritto dalla seguente forma funzionale:

Frequenza anomala

La violazione della parità nel decadimento del muone unita all'effetto del boost di Lorentz fa sì che, sopra una certa soglia sull'energia nel sistema del laboratorio che corrisponde alla selezione di un range di angoli nel sistema di riferimento del muone, la direzione dei positroni decaduti tenda a seguire la direzione dello spin del muone.



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

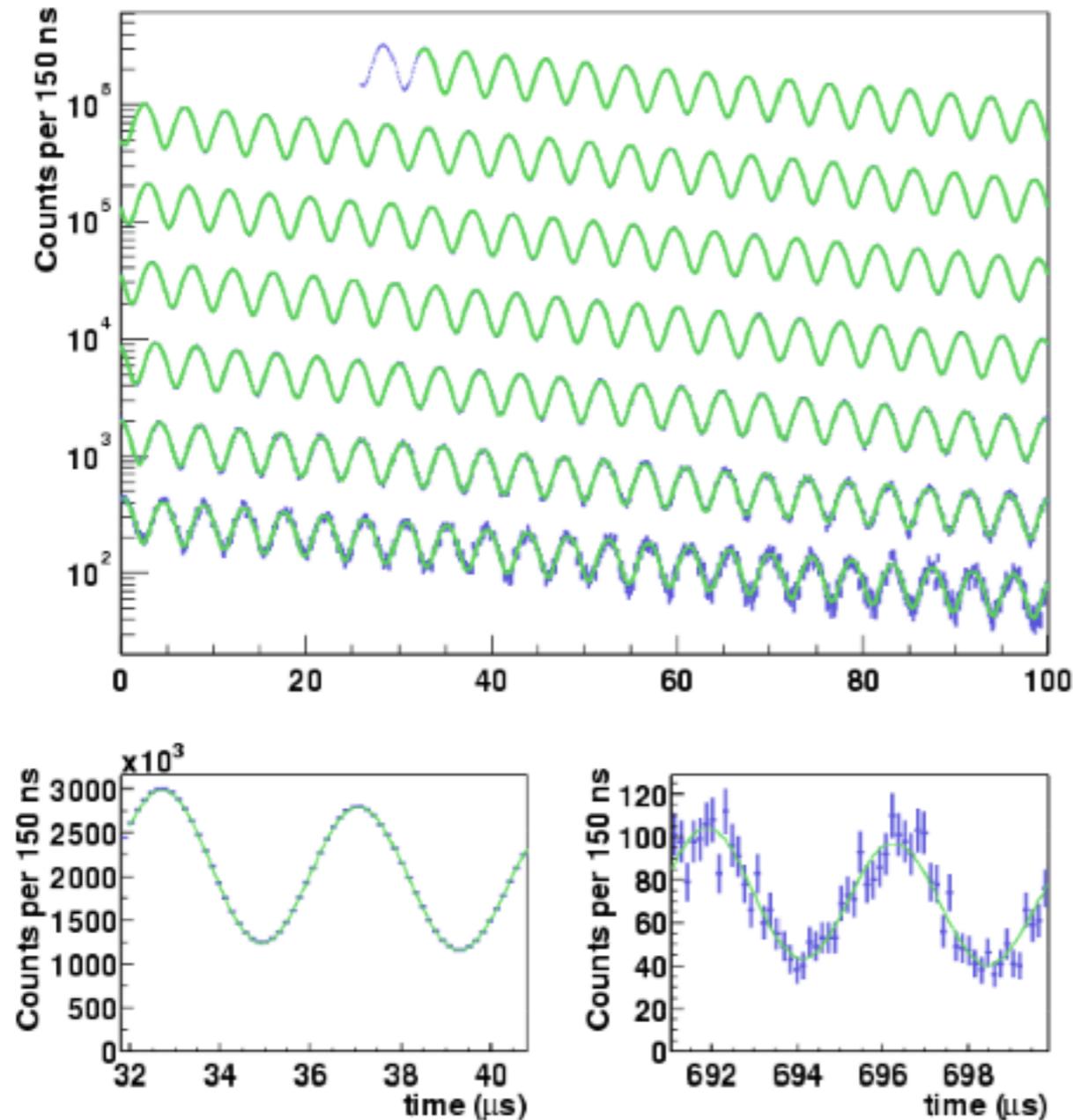
fattore di normalizzazione

asimmetria

fase

Lo spettro temporale fa vedere la vita media del muone modulata dalla frequenza di precessione dello spin.

Frequenza anomala



Si vede chiaramente
 l'andamento esponenziale
 della vita media del muone
 modulato dalla precessione
 di spin

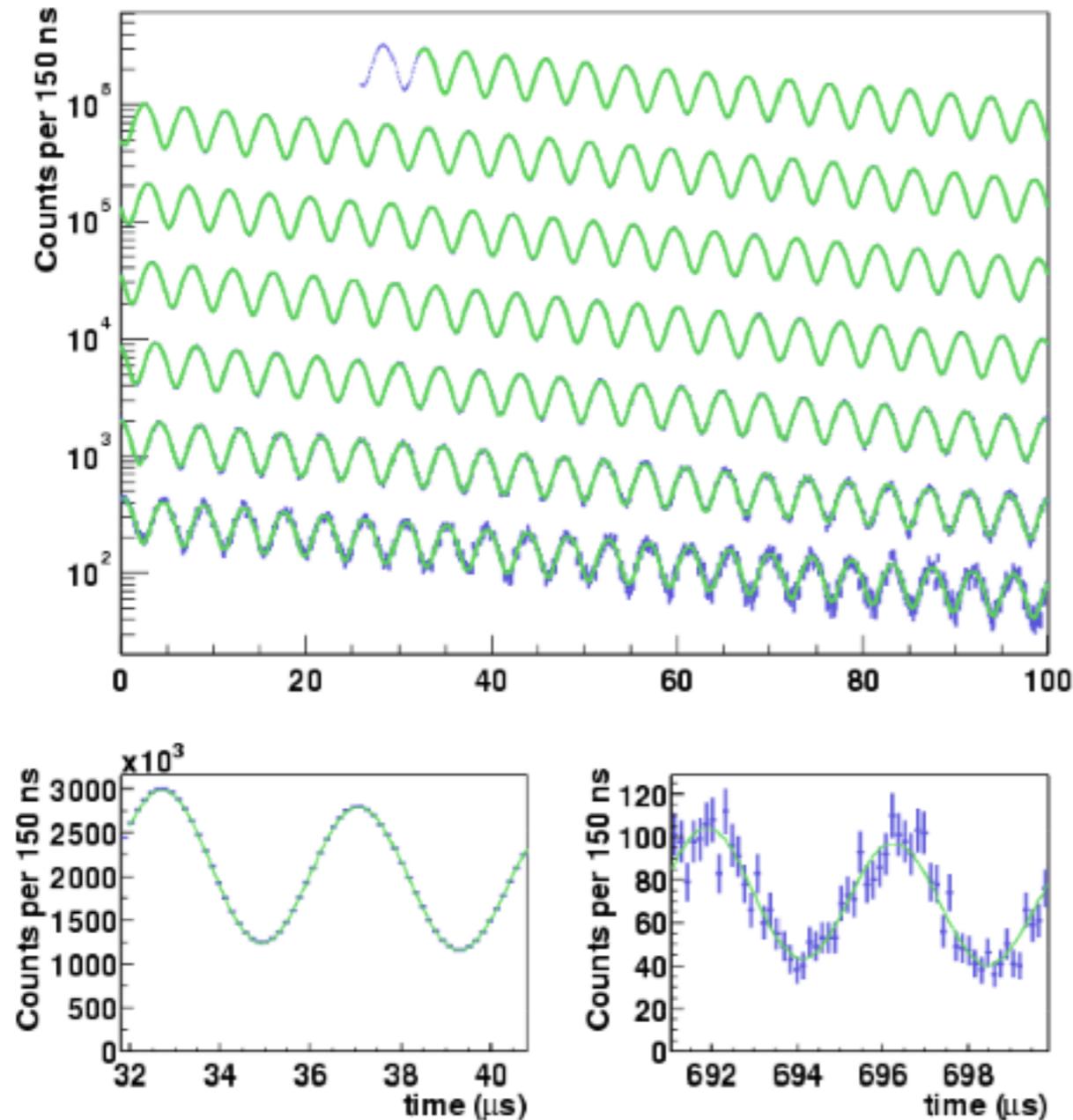
I picchi sono separati dal periodo
 di ciclotrone di circa 149 ns

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

fattore di normalizzazione
asimmetria
fase

Lo spettro temporale fa vedere la vita media del muone modulata
 dalla frequenza di precessione dello spin.

Frequenza anomala



Si vede chiaramente
 l'andamento esponenziale
 della vita media del muone
 modulato dalla precessione
 di spin

I picchi sono separati dal periodo
 di ciclotrone di circa 149 ns

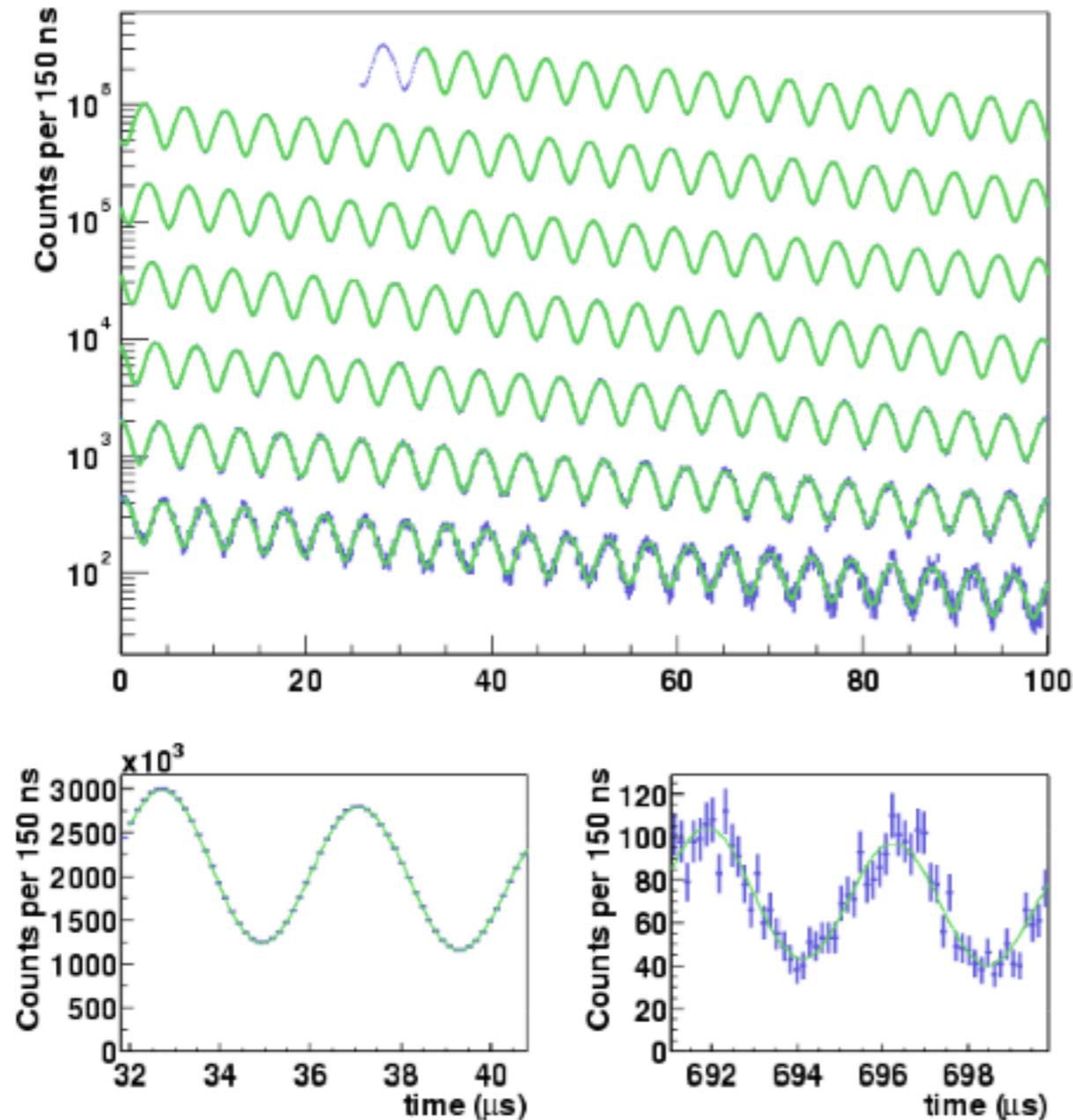
$$N(t) = N_0 e^{-t/\gamma\tau} (1 + A \cos(\omega_a t + \phi))$$

fattore di normalizzazione
asimmetria
fase

Lo spettro temporale fa vedere la vita media del muone modulata
 dalla frequenza di precessione dello spin.

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

Frequenza anomala



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

$$a_\mu = \left(\frac{m}{e} \right) \frac{\vec{\omega}_a}{\vec{B}}$$

$$\hbar\omega_p = 2\mu_p |\vec{B}|$$

Si vede chiaramente l'andamento esponenziale della vita media del muone **modulato dalla precessione di spin**

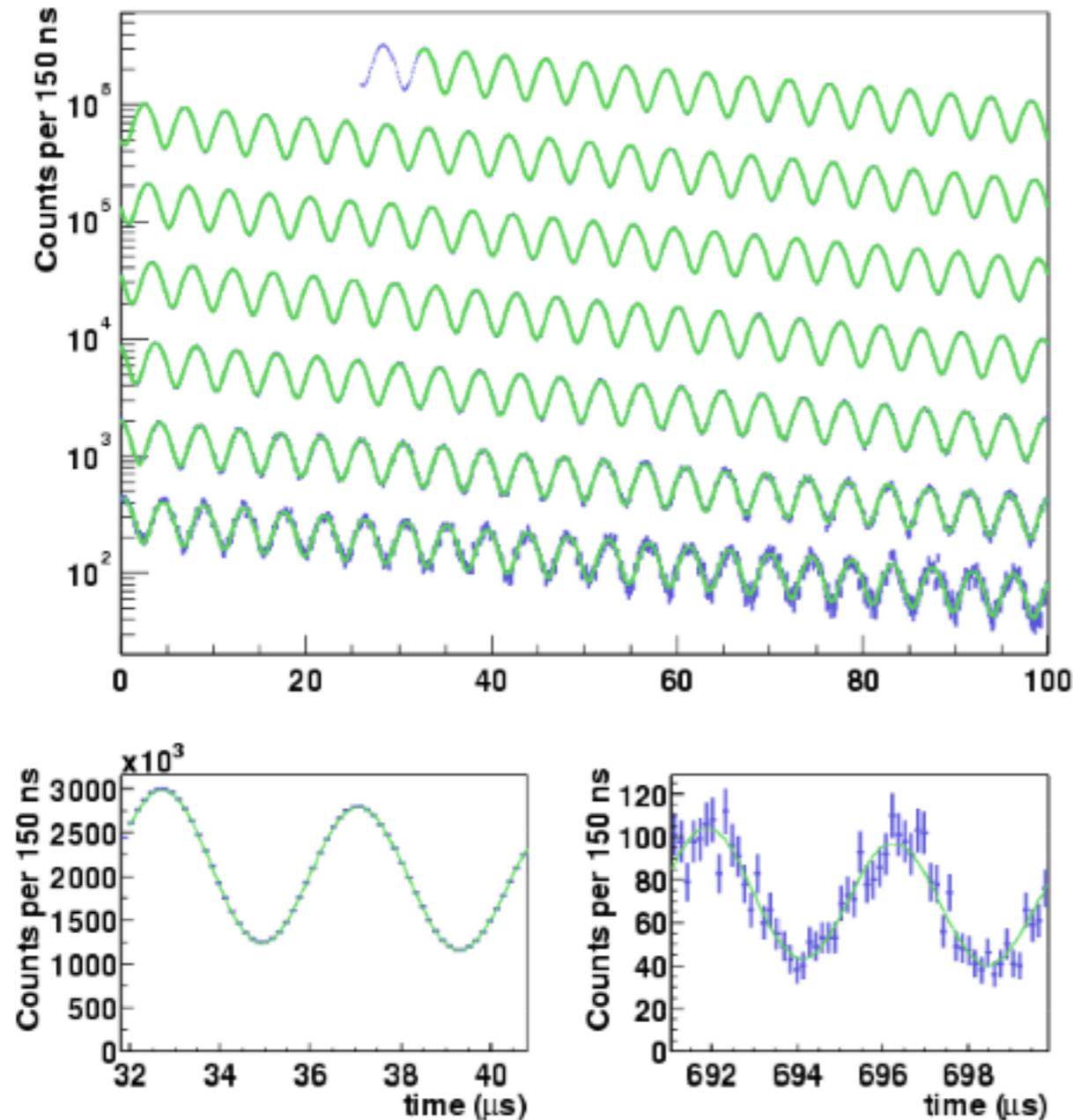
I picchi sono separati dal periodo di ciclotrone di circa **149 ns**

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

fattore di normalizzazione
asimmetria
fase

Lo spettro temporale fa vedere la vita media del muone modulata dalla frequenza di precessione dello spin.

Frequenza anomala



Si vede chiaramente
 l'andamento esponenziale
 della vita media del muone
 modulato dalla precessione
 di spin

I picchi sono separati dal periodo
 di ciclotrone di circa 149 ns

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

fattore di normalizzazione
asimmetria
fase

Lo spettro temporale fa vedere la vita media del muone modulata
 dalla frequenza di precessione dello spin.

Per raggiungere la
 precisione richiesta devono
 essere rivelati 1.8×10^{11}
 positroni con $E > 1.8$ GeV

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

Sistema di calibrazione

Per poter verificare la totale stabilita' in guadagno del sistema, G, verra' impiegato un sistema di calibrazione laser che ha come obiettivo quello di monitorare le fluttuazioni di guadagno dei fotorivelatori del calorimetro, per tenere le incertezze sistematiche dovute al guadagno a circa 0.02 ppm.

La soluzione proposta sta nel mandare un **impulso di riferimento**, leggerlo con il rivelatore e vedere come questo risponde; la difficolta' sta nel farlo a questa precisione.

Necessita' di controllare le fluttuazioni:

- a **breve termine**, ovvero nell'arco di **700 μ s (tempo di un fill)**, che dipendono dal fascio (rate di muoni, positroni che possono causare sovra/sotto tensione;

$$\frac{\delta G}{G} < 0.1\%$$

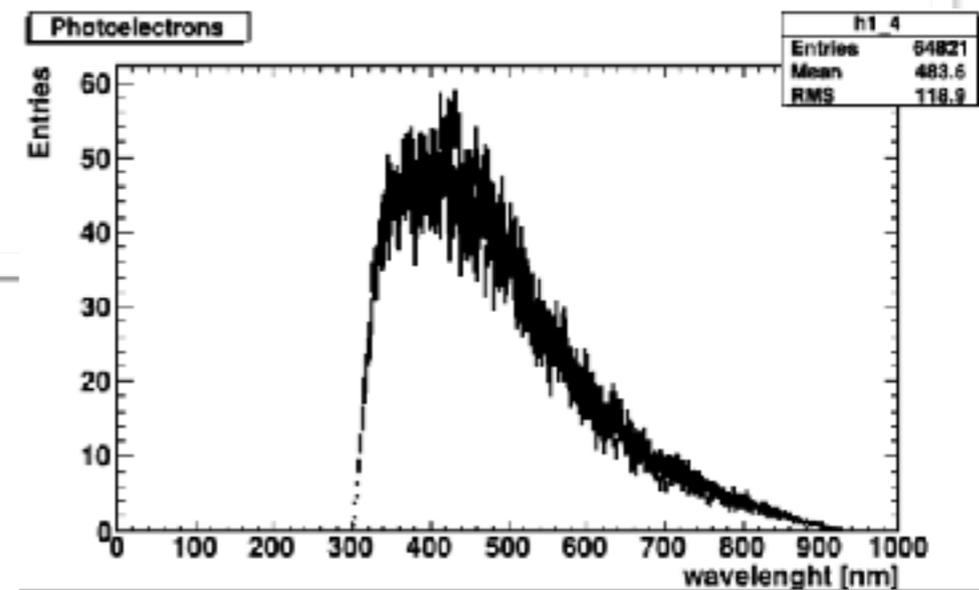
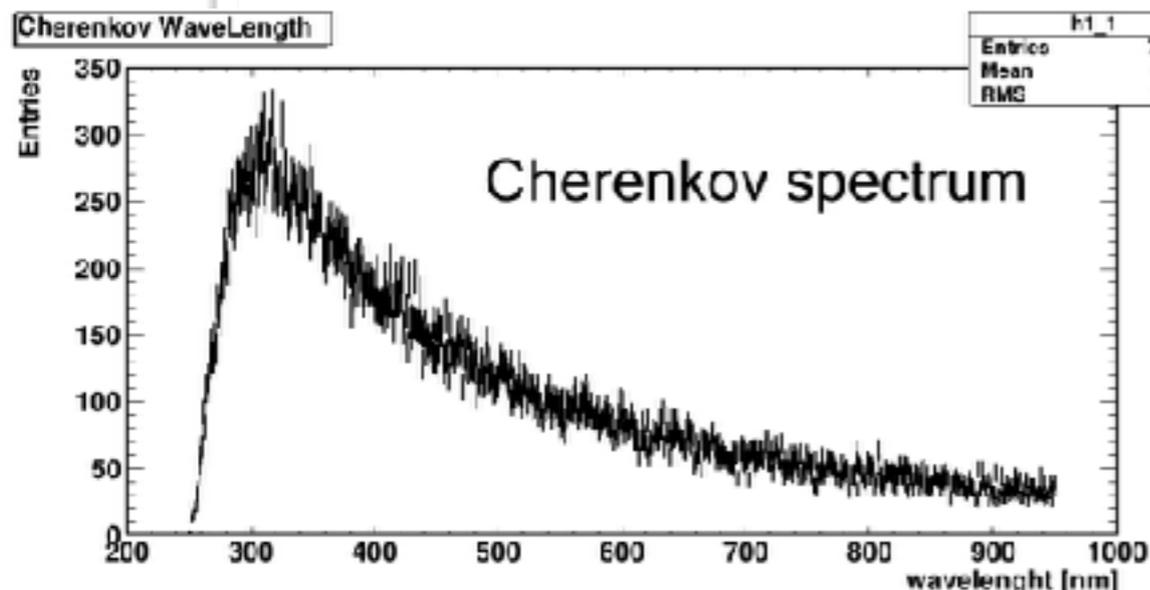
- a **lungo termine**, ovvero nell'arco di ore, che dipendono da condizioni esterne (temperatura, drift giorno/notte,...).

$$\frac{\delta G}{G} < 1\%$$

Sistema di calibrazione

La lunghezza d'onda della luce impulsata deve trovarsi all'interno del range di accettazione del rivelatore determinato dalla convoluzione della densità spettrale della luce Cherenkov emessa dagli elettroni nel cristallo con la curva di trasmissione del cristallo e con il valore dell'efficienza quantica (Q.E.) del rivelatore il cui picco si ha, per i SiPM, intorno ai 420 nm.

$$\lambda = 405 \text{ nm}$$



Sistema di calibrazione

La frequenza di ripetizione dell'impulso deve essere dell'ordine della decina di kHz; miglior compromesso fra la necessita' di avere una buona statistica, la necessita' di evitare gli effetti di saturazione del sistema di acquisizione e di sovrapposizione dei segnali positrone-laser.

Sistema di calibrazione

L'energia luminosa degli impulsi di calibrazione deve essere della stessa intensita' dell'energia depositata dagli elettroni nel cristallo, circa 1-2 GeV; questo corrisponde ad un energia per impulso su ogni cristallo in ciascuna stazione di circa 0.01 pJ.

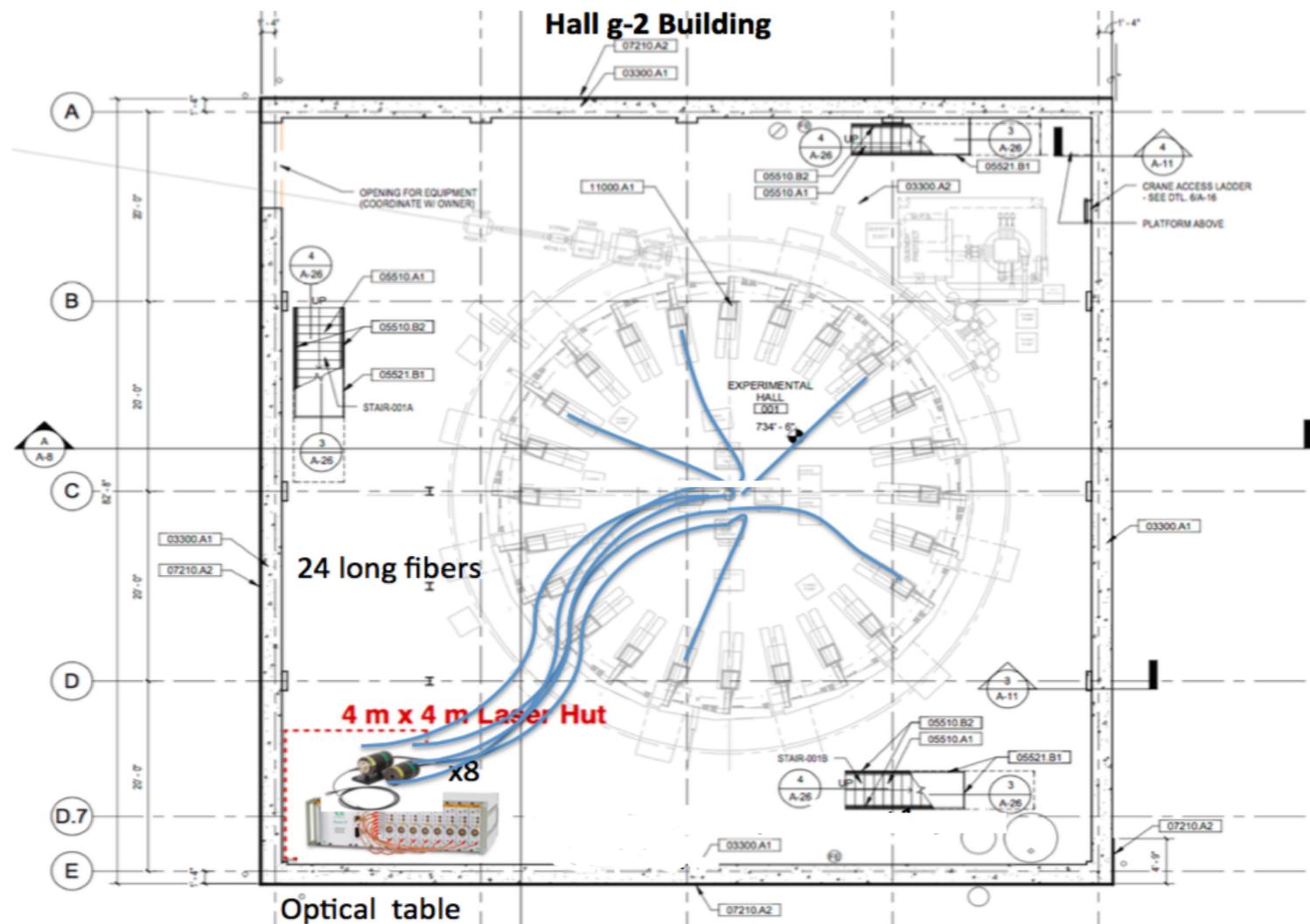
$$E_{pulse}^{crystal} = N_{\gamma} \times E_{\gamma} = N_{\gamma} \times h \frac{c}{\lambda} = 2 \cdot 10^4 \times 6.6 \cdot 10^{-34} [J \cdot s] \times \frac{3 \cdot 10^8 [m \cdot s^{-1}]}{400 \cdot 10^{-9} [m]} = 0.01 pJ$$

$$E_{pulse}^{TOT} = \frac{24 \times 54 \times E_{pulse}^{crystal}}{T} = \frac{24 \times 54 \times 0.01 pJ}{T} = \frac{13 pJ}{T}$$

Fattore di trasmissione
che include tutte le
perdite lungo il
cammino ottico

Sistema di calibrazione

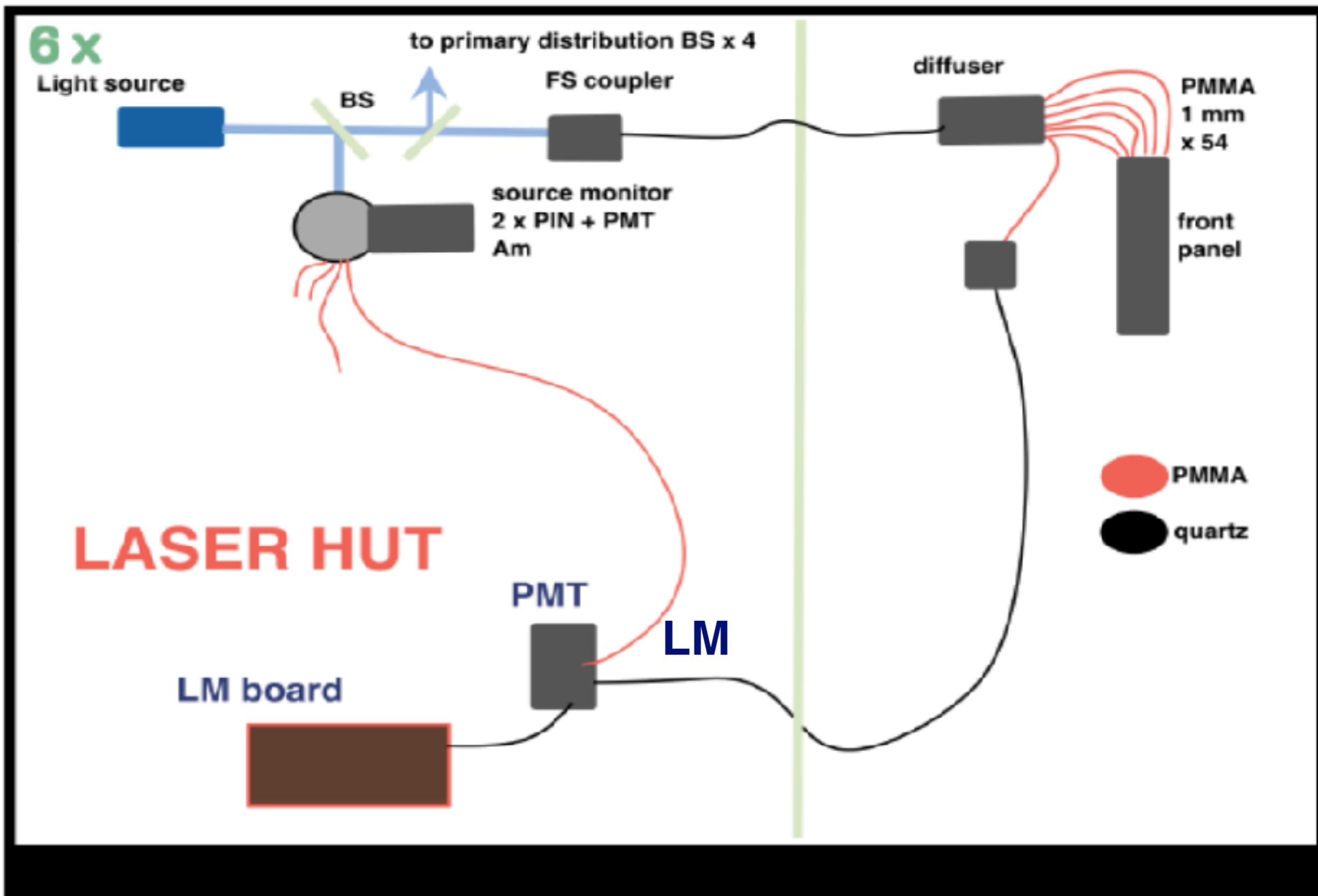
La sorgente di luce e tutta la sua elettronica di controllo devono essere poste all'esterno dell'anello, per evitare possibili perturbazioni elettromagnetiche del campo locale indotte dai flussi di corrente utilizzati per eccitare il laser. E' necessario includere nel design della geometria punti di distribuzione primari e secondari.



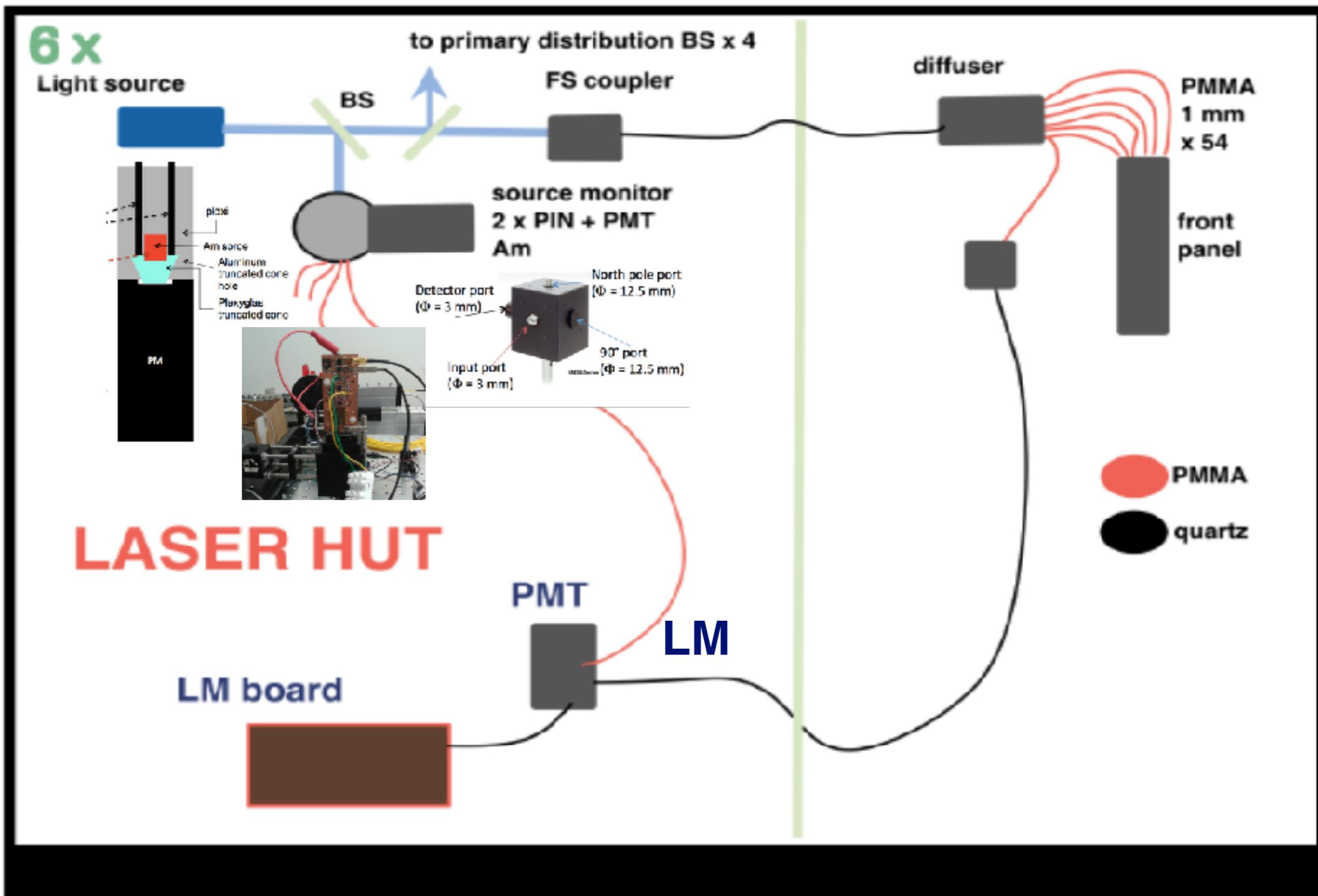
Sistema di calibrazione

Le fibre di silice (20 dB/km di attenuazione a 400 nm) sono la migliore soluzione per lunghi percorsi di distribuzione ed in termini di resistenza contro la solarizzazione o altri effetti di invecchiamento, dovuti agli alti valori di intensita' di luce trasportata. Per i bundle di fibre piu' corti, dove l'intensita' di luce e' ridotta di almeno un ordine di grandezza, possono essere prese in considerazione fibre di PMMA (200 db/km di attenuazione a 400 nm).

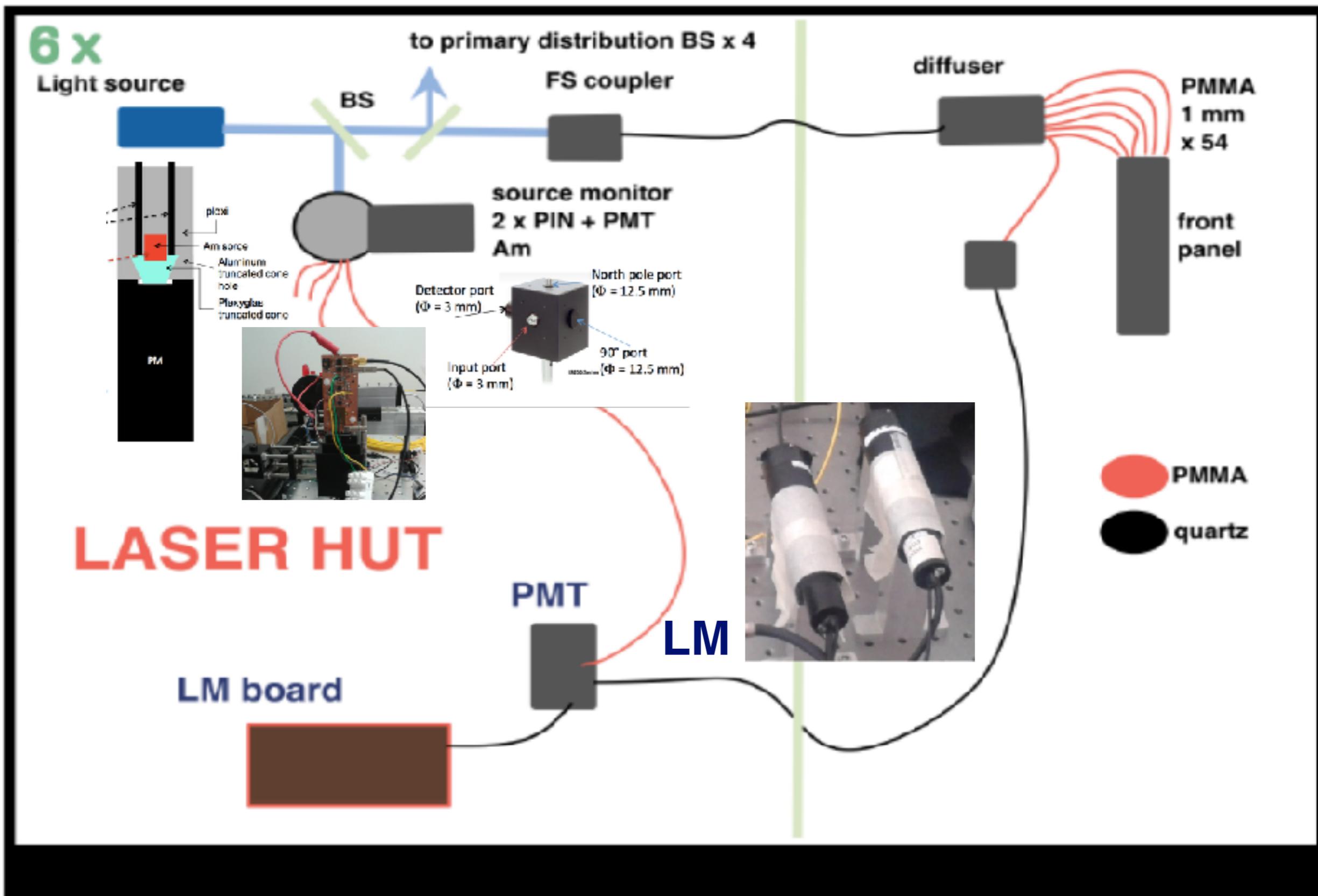
Sistema di calibrazione



Sistema di calibrazione



Sistema di calibrazione



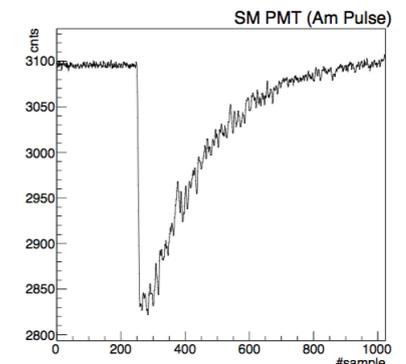
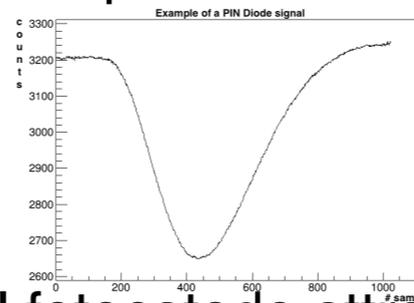
Source Monitor

Posto nei pressi della sorgente laser, misura il valore assoluto della luce laser inviata al sistema di distribuzione. Per ottimizzare la stabilità vengono usati i seguenti espedienti:

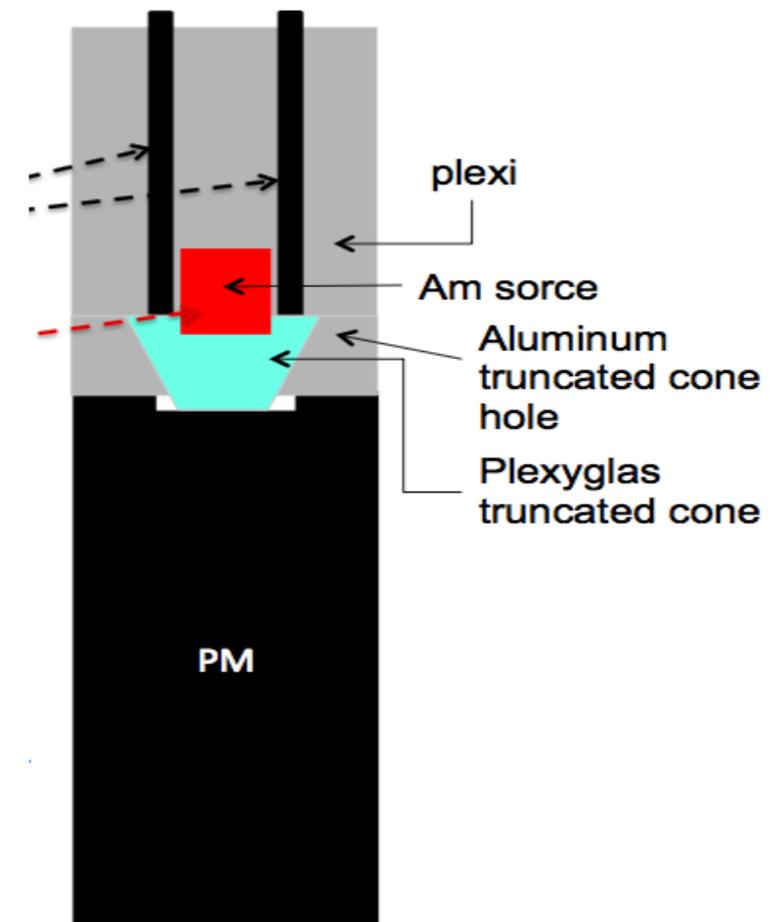
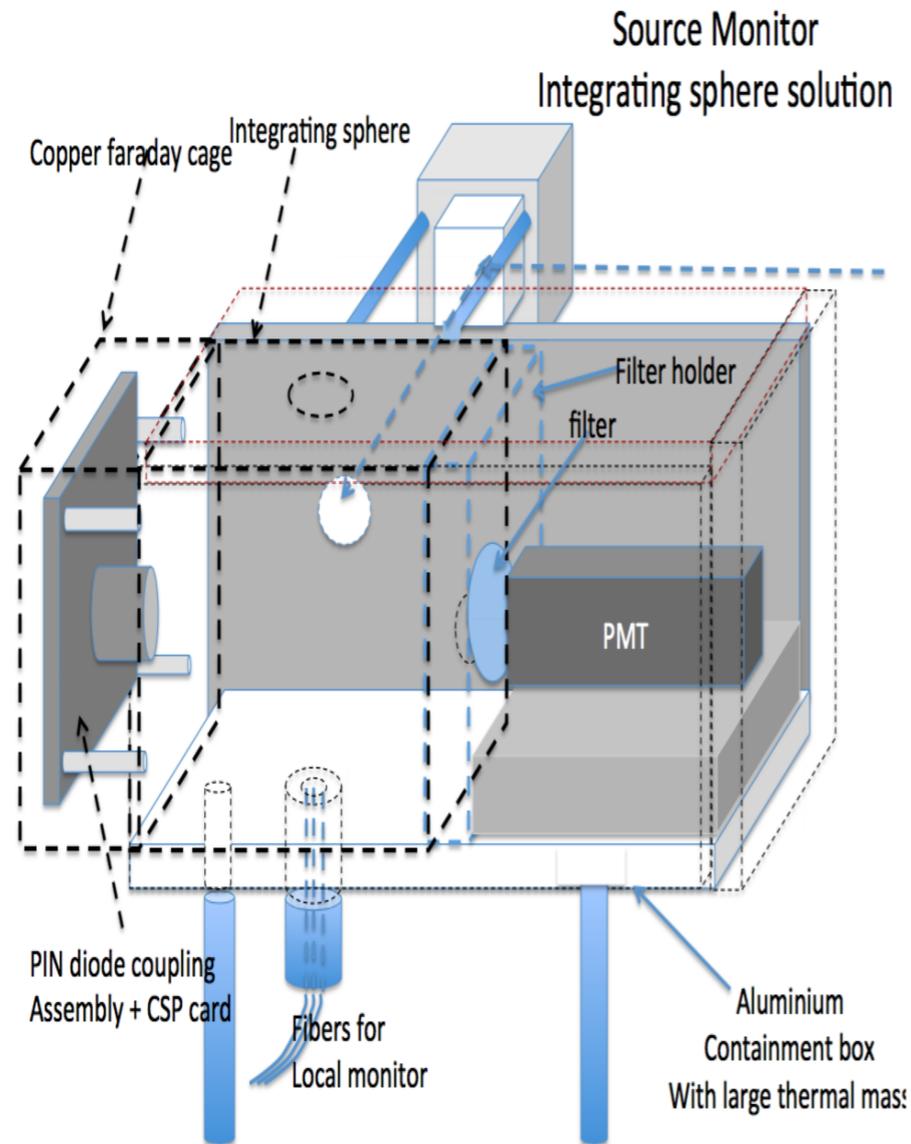
- ❖ vengono impiegati 2 PIN Diode per ogni Source Monitor, molto più stabili dei SiPM alle variazioni del bias e della temperatura;
- ❖ viene usato un sistema ridondante, con 3 fotorivelatori per ogni monitor (2 PIN+1 PMT);
- ❖ viene incorporata una sorgente radioattiva per la calibrazione assoluta (sorgente di Americio 241).

Il PMT vede allo stesso tempo:

- ❖ gli impulsi laser trasmessi dalla sfera al fotocatodo attraverso delle fibre;
- ❖ gli impulsi emessi da una sorgente di Americio 241: questo segnale ha la funzione di riferimento assoluto e può essere usato per correggere possibili instabilità nel guadagno del PMT. Dal momento che il PMT ed il PIN Diode vedono lo stesso segnale laser, questa serve anche a controllare la stabilità dei PIN Diode in un intervallo di tempo sufficiente ad accumulare la statistica richiesta.



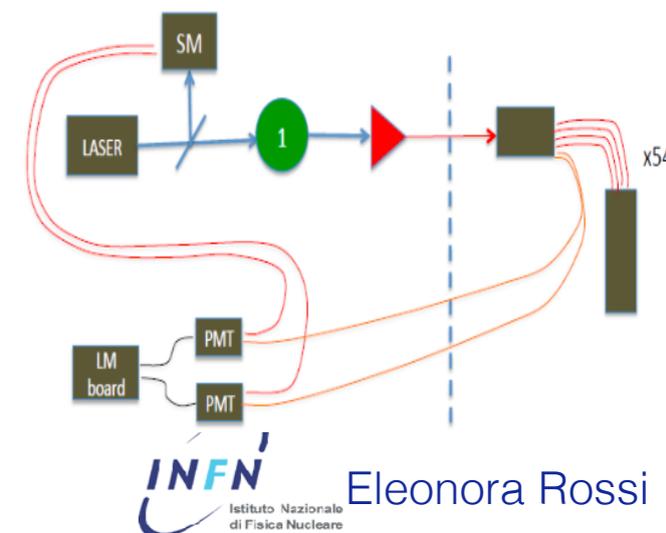
Source Monitor



Local Monitor

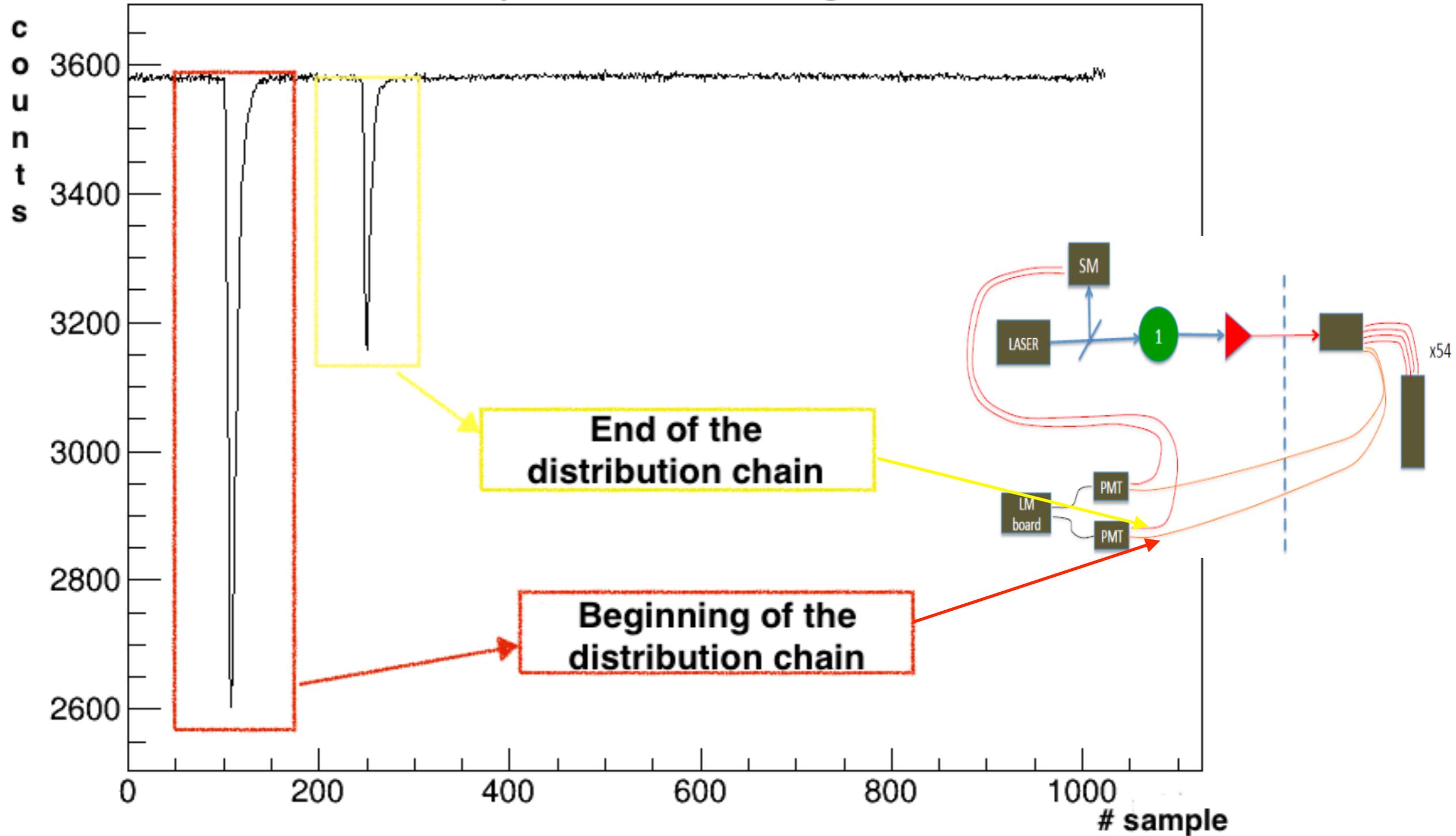
Il Source Monitor fornisce il segnale di riferimento al Local Monitor attraverso delle fibre ottiche. La funzione del LM è quella di monitorare e correggere le instabilità introdotte dalla catena di distribuzione della luce. È un sistema ridondante composto da due PMT. Ogni PMT riceve due segnali attraverso due fibre: la prima fibra arriva dal Source Monitor e fornisce il segnale di riferimento della sorgente mentre la seconda fibra arriva direttamente dal bundle che porta la luce ai cristalli del calorimetro.

I due impulsi sono ben separati temporalmente da circa 250 ns, intervallo temporale sufficiente a risolvere due impulsi di luce. Il vantaggio di questo setup sta nel fatto che il guadagno dei PMT può considerarsi costante durante questa scala temporale e due impulsi possono essere direttamente paragonati: il rapporto del secondo impulso sul primo è una misura diretta della stabilità della catena di distribuzione. Una calibrazione assoluta può essere fornita riferendo questi segnali al Source Monitor di ciascuna sorgente laser.



Local Monitor

Example of Local Monitor signals



Conclusioni

- ❖ l'obiettivo del nuovo esperimento g-2 al Fermilab e' ambizioso ma puo' essere raggiunto grazie all'ottimizzazione dei rivelatori e del sistema di calibrazione;
- ❖ il sistema di calibrazione e' in grado di monitorare e correggere variazioni dell'intensita' del laser fino allo 0.01%. Variazioni nella catena di distribuzione possono essere corrette allo stesso livello su una scala temporale piu' lunga: i fattori di correzione da applicare durante l'analisi si ottengono dai segnali del Local Monitor;
- ❖ simulazioni sulle fluttuazioni del guadagno sono in atto;
- ❖ l'installazione del sistema al Fermilab e' gia' cominciata.

Grazie per la
vostra attenzione

