

Esperimenti momento magnetico g-2

Studente: Ivan Angelozzi
Relatore: Prof. Cesare Bini
8-6-10

Introduzione

L'anomalia del momento magnetico è data da:

$a=(g-2)/2$, dove g indica il fattore di Landè.

Per il muone e gli altri leptoni l'anomalia differisce da zero a causa delle correzioni radiative.

L'anomalia muonica è circa 4×10^4 più sensibile di quella elettronica a particelle pesanti fuori dal Modello Standard.

Il valore dell'anomalia muonica è stato valutato nel corso dei decenni da vari esperimenti.

Fattore g

Il momento di dipolo magnetico per una particella con carica elementare di spin 1/2 è: $\vec{\mu} = g_s \left(\frac{q}{2m} \right) \vec{s}$,

Un campo magnetico esterno esercita una coppia di torsione sul momento magnetico che tende ad allineare la polarizzazione con la direzione del campo.

Si verifica la precessione dei momenti magnetici attorno alla direzione del campo magnetico.

L'equazione di Dirac (1928) stabilisce il momento magnetico dell'elettrone: $g=2$.

Anomalia

Possiamo dividere il momento magnetico in due termini: $\mu = (1 + a) \frac{q\hbar}{2m}$

La prima correzione radiativa (one loop correction) calcolata da Schwinger è: $a_e = \alpha/(2\pi) \simeq 0.00116$

Le correzioni radiative sono dovute a tre contributi: QED, adroni, elettrodeboli.

Quello adronico non può essere calcolato con precisione, portando un termine di incertezza sulla predizione del Modello Standard.

Precessione

$\vec{\omega}_S = -\frac{qg\vec{B}}{2m} - \frac{q\vec{B}}{\gamma m}(1 - \gamma)$, indica la frequenza di precessione dello spin. All'interno di un magnete i muoni si muovono in orbite quasi circolari, i vettori di spin precedono rispetto a quelli dei momenti.

Il vettore del momento di un muone ruota con la frequenza di ciclotrone $\vec{\omega}_C = -\frac{q\vec{B}}{m\gamma}$.

La precessione dello spin rispetto al momento dà la frequenza (indipendente dal momento del muone)

$$\vec{\omega}_a = \vec{\omega}_S - \vec{\omega}_C = -\left(\frac{g-2}{2}\right)\frac{q\vec{B}}{m} = -a_\mu\frac{q\vec{B}}{m}.$$

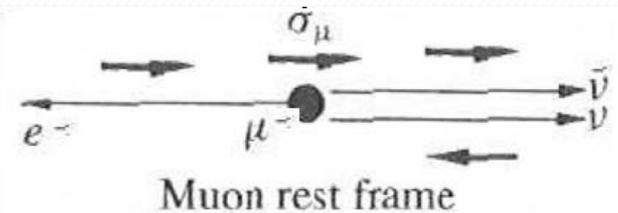
Logica degli esperimenti

I muoni ottenuti dal decadimento del pione vengono iniettati in un anello.

Dal decadimento del muone in $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$ e $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$ si ottengono informazioni sulla direzione dello spin del muone.

A E'_{\max} (nel sistema di riferimento del muone) l'elettrone viene emesso con il momento antiparallelo alla direzione dello spin del muone.

Il calorimetro elettromagnetico misura l'energia rilasciata dagli elettroni.

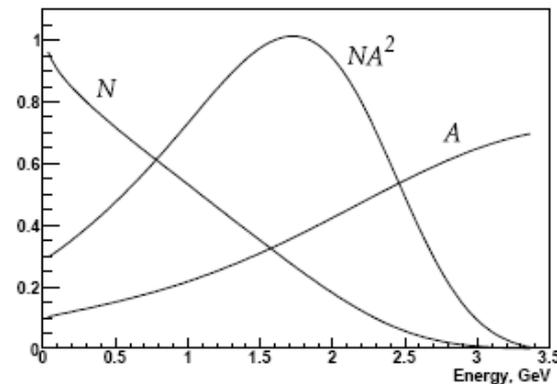
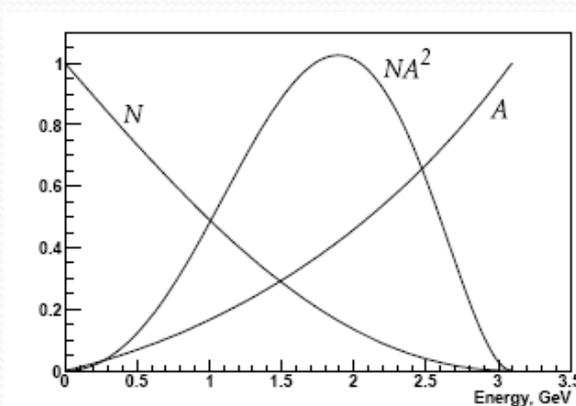


Fattore di merito

Dal decadimento del muone, valutiamo la figura di merito statistica NA^2 dove N indica il numero di elettroni di decadimento e A l'asimmetria (legata alla direzione degli elettroni di decadimento).

È la quantità da massimizzare per diminuire l'incertezza statistica. La soglia di energia ottimale è 1,7-1,8 GeV.

La figura a destra valuta anche l'accettanza del detector e la risoluzione di energia.



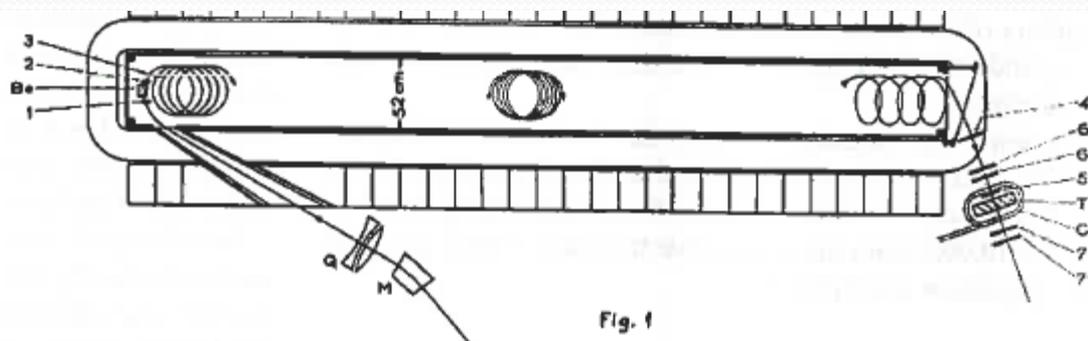
Cern I

1961: muoni altamente polarizzati di 90 MeV/c iniettati in un magnete lungo 6 metri.

Perdita energia, muoni intrappolati nel campo. Gradiente trasverso curva la

traiettoria dell'orbita verso destra.

Si ottiene un'incertezza di α_{μ} dello 0,4% (muone come elettrone pesante, statistica di Fermi-Dirac).



Cern II

Utilizza un muon storage ring a 1,28 GeV/c.

Focus verticale raggiunto con gradienti magnetici.

N.B. Campo magnetico non uniforme; è necessario conoscere l'esatta posizione dei muoni nello storage ring. Ogni bunch è fatto da 10^{12} protoni che colpiscono il bersaglio producendo pioni.

Uno su mille produce stored muon (100 stored muons per bunch di protoni). Polarizzazione 26%.

Valore anomalia: $a_{\mu} = (11661.6 \pm 3.1) \times 10^{-7}$ (0.27%)

Cern III

Notevoli miglioramenti:

$\pi \rightarrow \mu$ usato per deviare i muoni in un'orbita stabile; prodotti muoni al 95% di polarizzazione.

- Focus elettrostatico:

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

Con $\gamma_{\text{magic}} = 29.3$ ($p_\mu = 3.09 \text{ GeV}/c$), il campo elettrico non contribuisce. Non è necessario un campo gradiente; garantisce un campo B uniforme.

Storage ring ha un diametro di 14 metri (40 C-magneti).

Si ottiene una precisione su a_μ di 7,3 ppm.

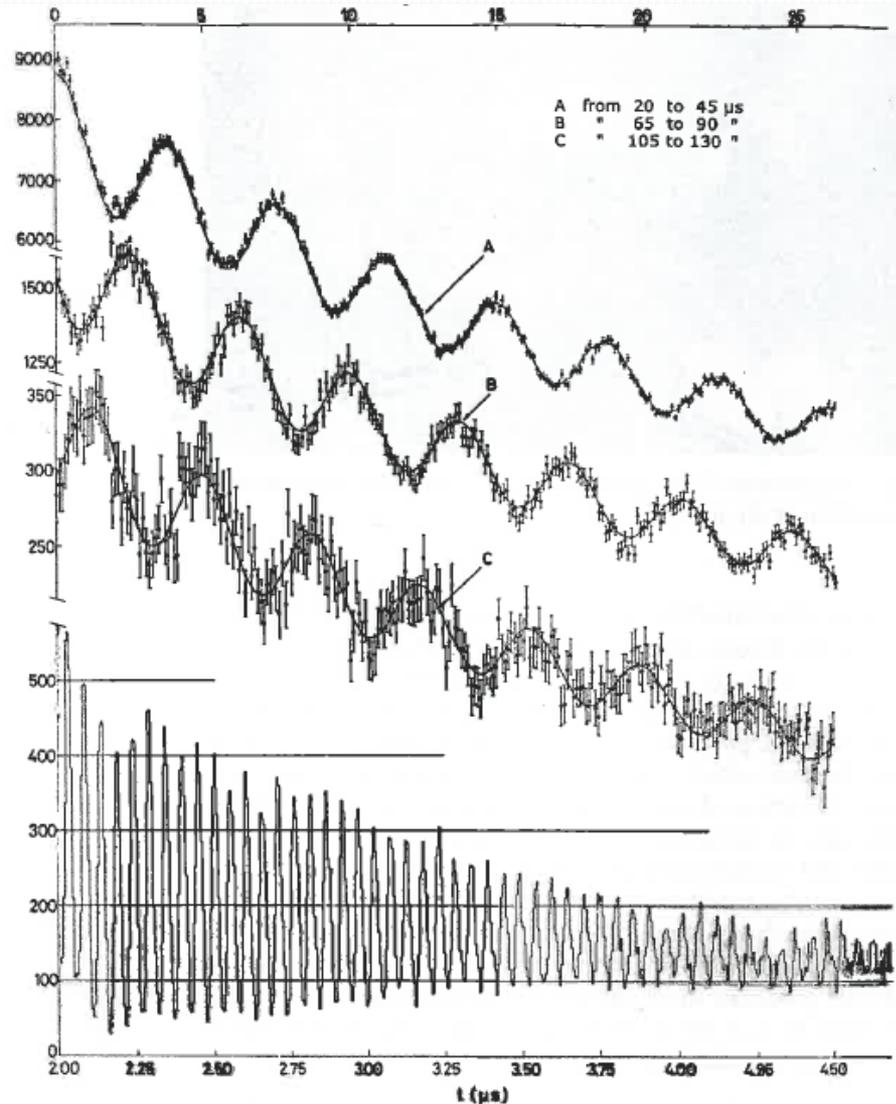
Fit

Decadimento esponenziale
con precessione g-2.

Storage ring 5 metri,
vita media muoni $27 \mu\text{s}$.

La curva in basso indica la
frequenza dell'orbita dalla
quale si ricava il raggio.

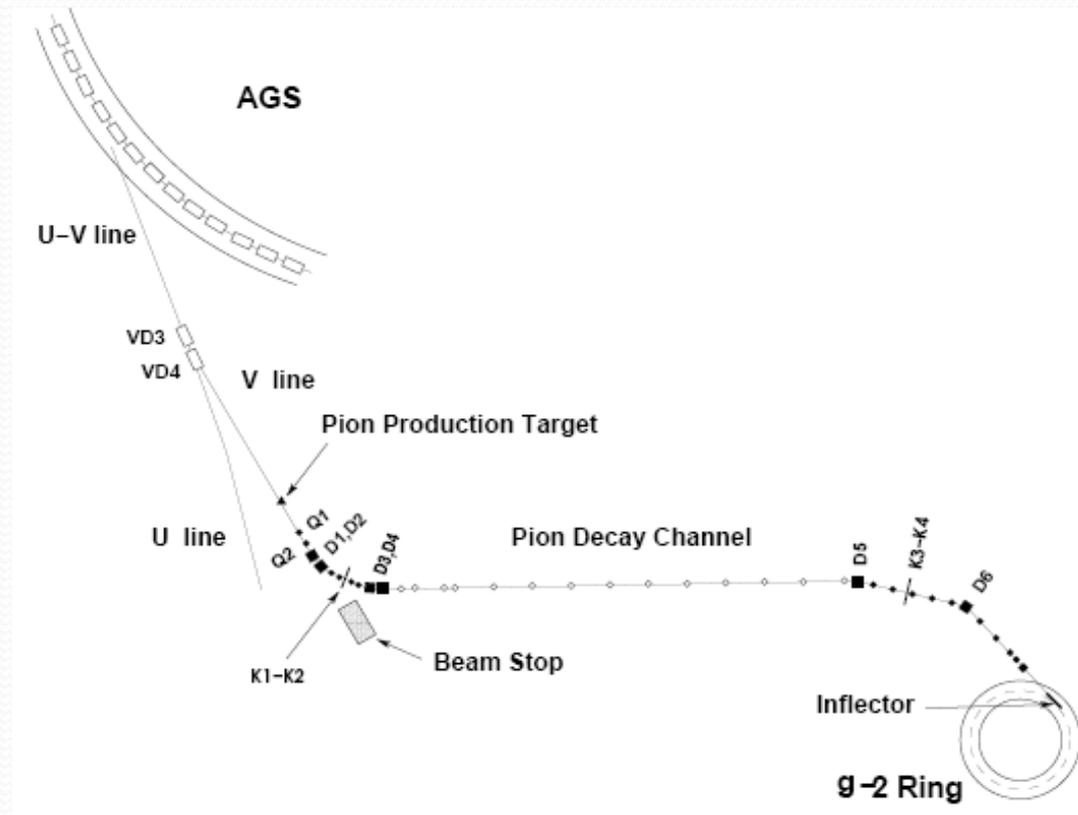
Dati ottenuti da Cern II.



E 821 (Brookhaven)

1984 (AGS)

Beam primario di protoni; target per la produzione di pioni.
Selezionato momento 3,115 GeV/c; muoni dal decadimento del pione.
Muoni a 3,094 GeV/c (magic momentum) con polarizzazione media del 95%.



Novità E821

Diverse sfide:

- Campo uniforme nello storage ring
- Storing injected muon beam
- Miglioramento misure energia

Progressi:

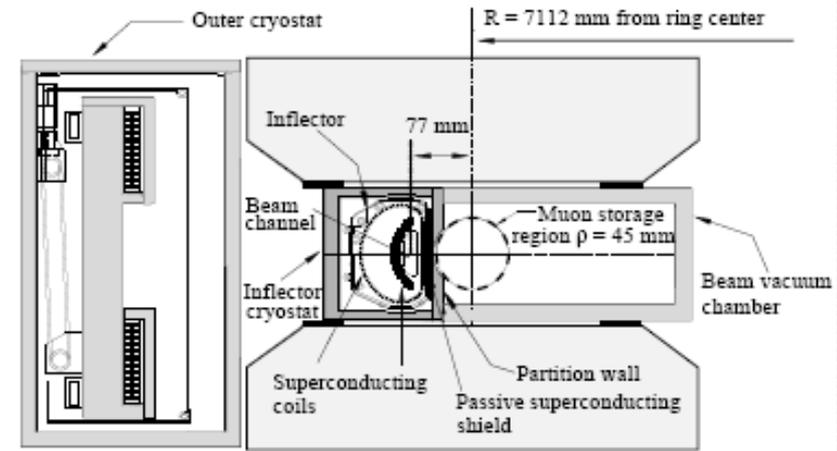
- Superconducting inflector;
- Kicker su muoni condotti in orbita stabile dal campo magnetico.
- Iniezione muoni (riduzione background).

Inflector magnet

E' costruito per cancellare l'effetto del campo magnetico consentendo al beam di arrivare indeflesso alla storage region. All'uscita il centro del

beam iniettato si trova a 77 mm dal centro dell'orbita.

Il flusso magnetico è contenuto all'interno del volume dell'inflector grazie alla distribuzione di un conduttore sulla superficie esterna dell'inflector.

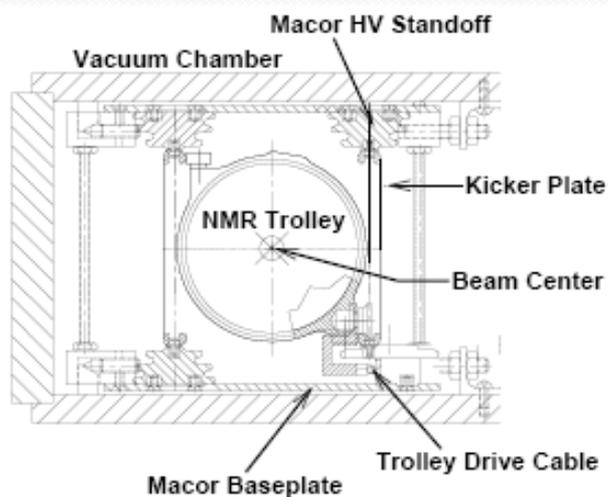


Fast muon kicker

Il kicker viene utilizzato per stabilizzare l'orbita del muone all'interno dello storage ring.

Il kick sul beam iniettato avviene nei primi giri: periodo del ciclotrone (149 ns), larghezza dell'impulso del kicker (400 ns). L'efficienza di iniezione varia fra 3 e 5%; quella di storage aumenta con l'iniezione di

muoni rispetto ai pioni per un flusso di protoni.



Storage ring

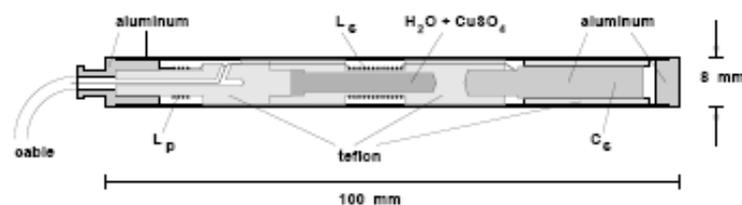
E' costruito come un C-magnete continuo di 12 settori separati da gap minime. Il tentativo di uniformare il campo è affidato alla forma e alle proprietà magnetiche del ferro. Il campo è eccitato da spire superconduttrici con un diametro dell'orbita di 14 m.

L'obiettivo è quello di raggiungere 1 ppm per l'uniformità del campo nel ring.



Misura campo magnetico

Il campo magnetico è misurato tramite le sonde NMR.



Questo avviene misurando la precessione dello spin del protone nel campione rispetto al campo magnetico; da qui si ricava il valore di ω_s tramite la relazione

$\lambda = \omega_s / \omega_p = \mu_\mu / \mu_p$. La calibrazione del campo si effettua utilizzando la formula: $\omega_\mu / \omega_s = a_\mu / (1 + a_\mu)$

Calorimetria

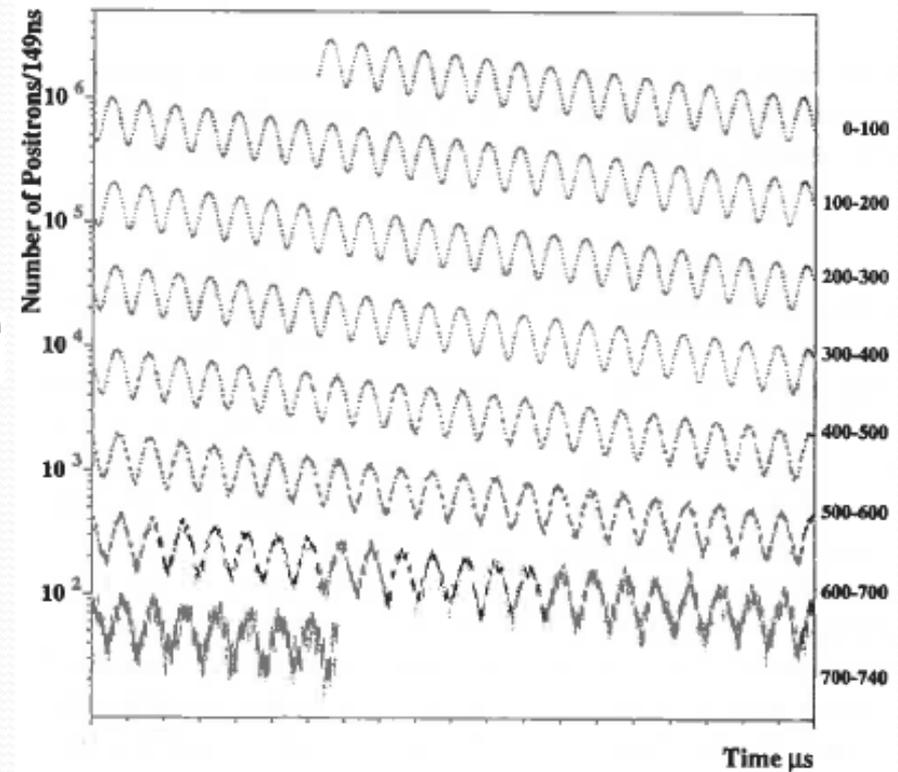
I calorimetri elettromagnetici sono la fonte principale di dati per la frequenza di precessione.

- Il sistema di detector massimizza l'accettanza degli elettroni ad alta energia (87% a 2,3 GeV).
- I calorimetri sono formati da fibre scintillanti incastonate in una matrice di piombo. Le dimensioni sono 22,5 x 14 x 15 cm; fra il 93 e il 96% delle energie fra 1 e 3 GeV vengono depositate nel calorimetro ($X_0 = 1,14$ cm).
- La risoluzione in energia è $\sigma(E)/E \approx 10\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$

Fit Brookhaven

1999: precessione del muone su $740 \mu\text{s}$ con vita media dilatata a $64 \mu\text{s}$.

Valore di $a_\mu = 1,165,920.2 \times 10^{-9}$ con un errore di $1,34 \text{ ppm}$, $2,6 \sigma$ oltre la predizione teorica.



Brookhaven vs Cern

Quantity	E821	CERN
Magnet	Superconducting	Room Temperature
Yoke Construction	Monolithic Yoke	40 Separate Magnets
Magnetic Field	1.45 T	1.47 T
Magnet Gap	180 mm	140 mm
Stored Energy	6 MJ	
Field mapped in situ?	yes	no
Central Orbit Radius	7112 mm	7000 mm
Averaged Field Uniformity	± 1 ppm	± 10 ppm
Muon Storage Region	90 mm Diameter Circle	120×80 mm ² Rectangle
Injected Beam	Muon	Pion
Inflector	Static Superconducting	Pulsed Coaxial Line
Kicker	Pulsed Magnetic	$\pi \rightarrow \mu \nu_\mu$ decay
Kicker Efficiency	$\sim 4\%$	125 ppm
Muons stored/fill	10^4	350
Ring Symmetry	Four-fold	Two-fold
$\sqrt{\beta_{\max}/\beta_{\min}}$	1.03	1.15
Detectors	Pb-Scintillating Fiber	Pb-Scintillator "Sandwich"
Electronics	Waveform Digitizers	Discriminators
Systematic Error on B-field	0.17 ppm	1.5 ppm
Systematic Error on ω_a	0.21 ppm	Not given
Total Systematic Error	0.28 ppm	1.5 ppm
Statistical Error on ω_a	0.46 ppm	7.0 ppm
Final Total Error on a_μ	0.54 ppm	7.3 ppm

Conclusioni

Sperimentale: $a_\mu = 11659208.0 \times 10^{-10}$ (0,54 ppm)

Valore teorico: $a_\mu = 11659160 \times 10^{-10}$ (0,57 ppm)

Il valore più recente dell'anomalia muonica

migliora di un fattore 13
gli esperimenti del Cern.

L'errore finale ha una
componente statistica
(0,46 ppm) e una
sistematica (0,28 ppm).

