

Misura dell'anomalia muonica e confronto con le predizioni teoriche

Corso di Fisica Nucleare e Subnucleare II

Studentessa: **Silvia Biondi**

Tutor: **Prof. Cesare Bini**

12.06.12

Problematica

Il **rapporto giromagnetico** lega il momento magnetico e lo spin di una particella elementare:

$$\vec{\mu}_s = g\left(\frac{e}{2m}\right)\vec{S}$$

Nella teoria di Dirac: $g=2$

MA

→ i rapporti g delle particelle con spin $\frac{1}{2}$ non sono esattamente 2 a causa di correzioni radiative

Definiamo un **momento magnetico anomalo**:

$$a = \frac{(g - 2)}{2}$$

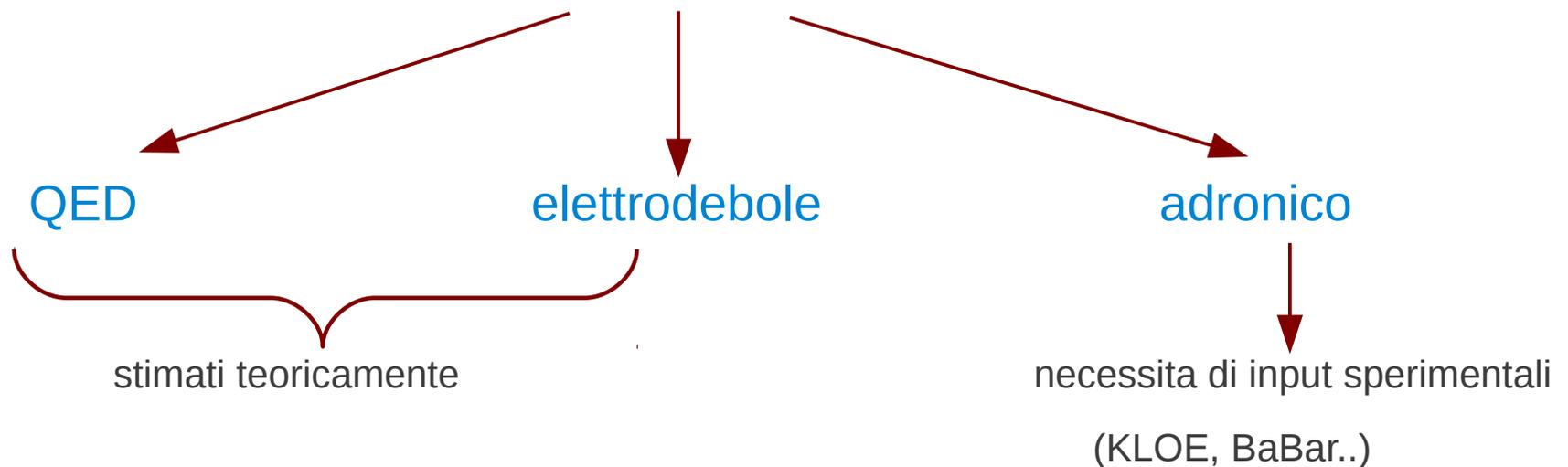
Primo approccio

Un po' di storia:

- 1957-1959 Nevis
- 1961 CERN 1
- 1968 CERN 2
- 1974-1979 CERN 3
- 1999-2001 E821

Si misura l'**anomalia magnetica** del muone

Si confronta con il valore di aspettazione teorico che risente di tre principali contributi:



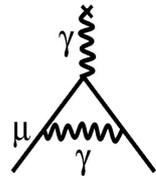
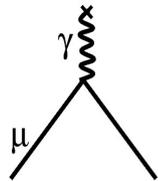
Outline

Passaggi chiave

- Trattazione teorica della problematica
- Descrizione dell'apparato sperimentale
- Cinematica del fascio
- Strategia di misurazione
- Dati sperimentali
- Analisi e risultati raggiunti
- Conclusioni e possibilità future

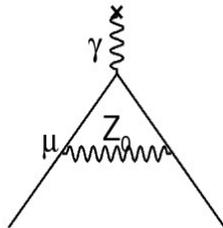
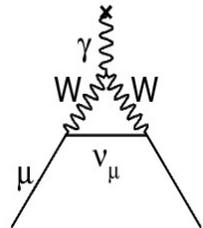
Contributi

- **QED:** include i loop fotonici e leptonici, è calcolato analiticamente fino al 3° ordine.



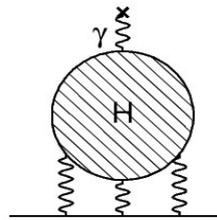
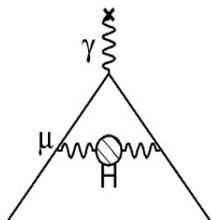
$$a_{\mu}^{QED} = 116\,584\,706(2) \times 10^{-11}$$

- **ELETTRODEBOLE:** include i contributi dati dai bosoni Z e W e dal bosone di Higgs, si considera fino al 2° ordine.



$$a_{\mu}^{weak} = 151(4) \times 10^{-11}$$

- **ADRONICO:** include i loop di quark e gluoni. Dato che non si può calcolare con la QCD perturbativa, c'è la necessità di misure sperimentali.



$$a_{\mu}^{Had} = 6945(62) \times 10^{-11}$$

vacuum
polarization

light-by-light
scattering

Contributo adronico

Viene calcolato come integrale di dispersione:

$$a_{\mu}^{hadronic} = \left(\frac{\alpha m_{\mu}}{3\pi}\right)^2 \int_{4m_{\pi}^2}^{\infty} \frac{ds}{s^2} K(s) R(s)$$

fattore cinematico
dipendente dall'energia nel
centro di massa

privilegia energie più
basse, dato che i fotoni di
irraggiamento sono poco
energetici

$$R(s) = \frac{e^{+}e^{-} \rightarrow \text{Hadrons}}{e^{+}e^{-} \rightarrow \mu^{+}\mu^{-}}$$

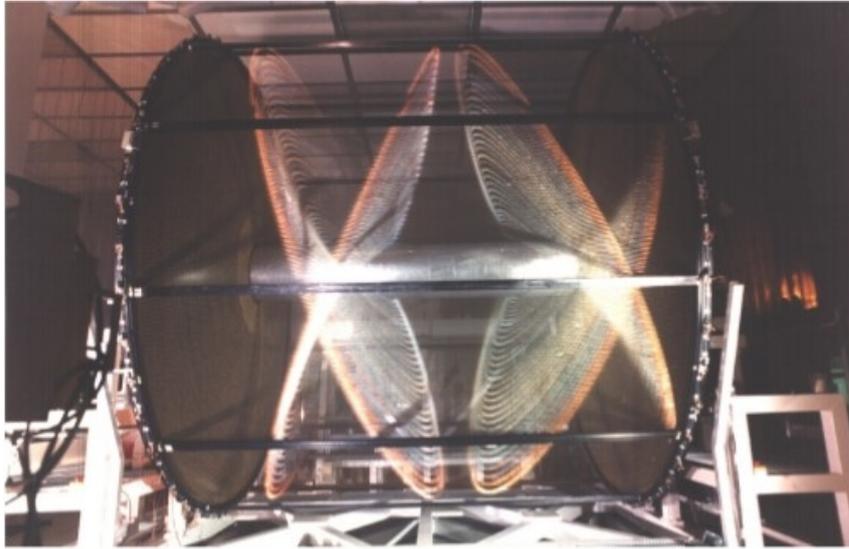
a **KLOE** (BaBar e altri) si è misurata la sezione d'urto
dell'interazione

$$\sigma_{e^{+}e^{-} \rightarrow \pi^{+}\pi^{-}}$$

per stimare con precisione il contributo adronico

ci sarà un'incertezza sperimentale su questo contributo

KLOE



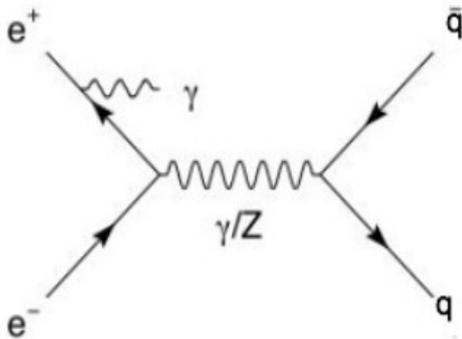
Misura la sezione d'urto

$$\sigma_{e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-}$$

in quanto è il fenomeno dominante a basse energie.

Opera a **DAΦNE**, il collisore e^+e^- di Frascati, che lavora ad un'energia del centro di massa fissa pari alla massa del mesone Φ (1020 MeV).

Quindi, invece di fare una misura della sezione d'urto al variare di \sqrt{s} , si sfrutta il fenomeno del **ritorno radiativo**:

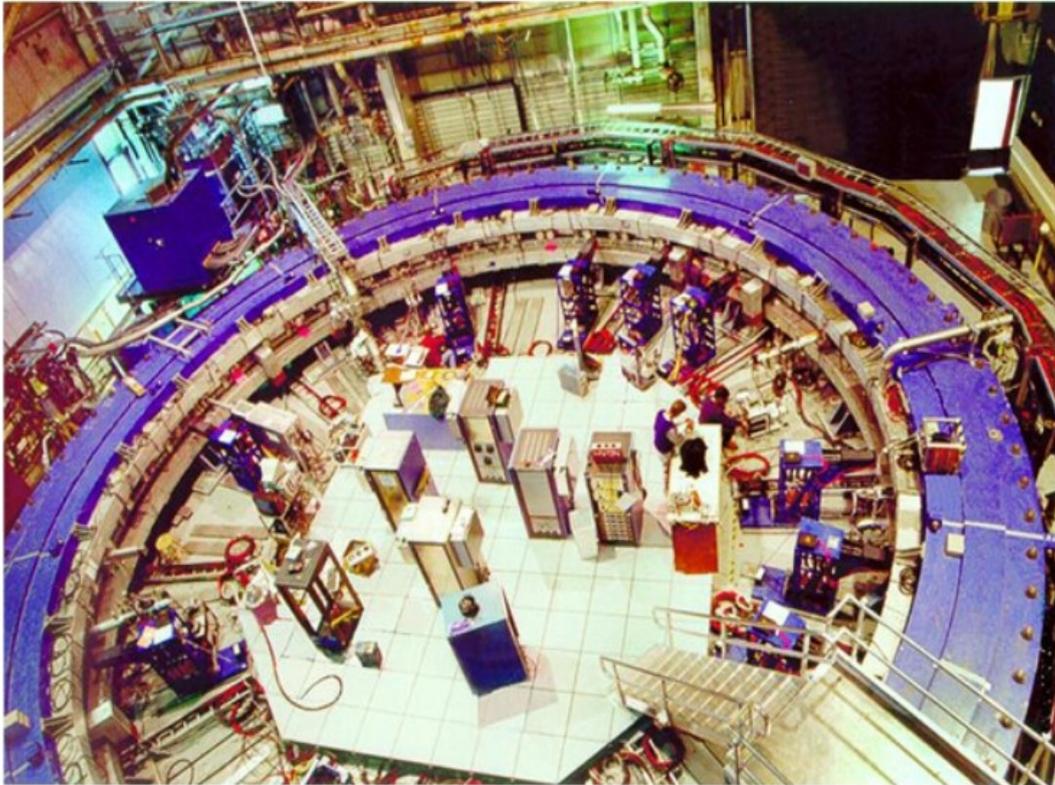


Si misura la sezione d'urto del processo

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$$

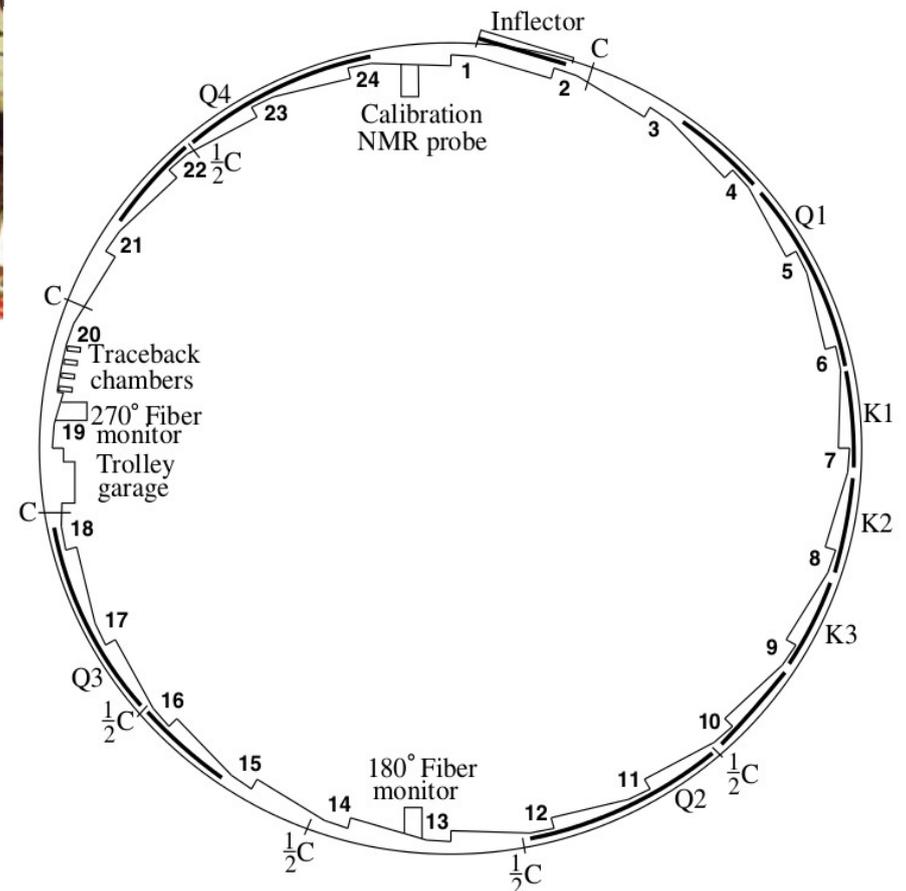
in funzione della massa invariante dei due pioni.

Apparato sperimentale



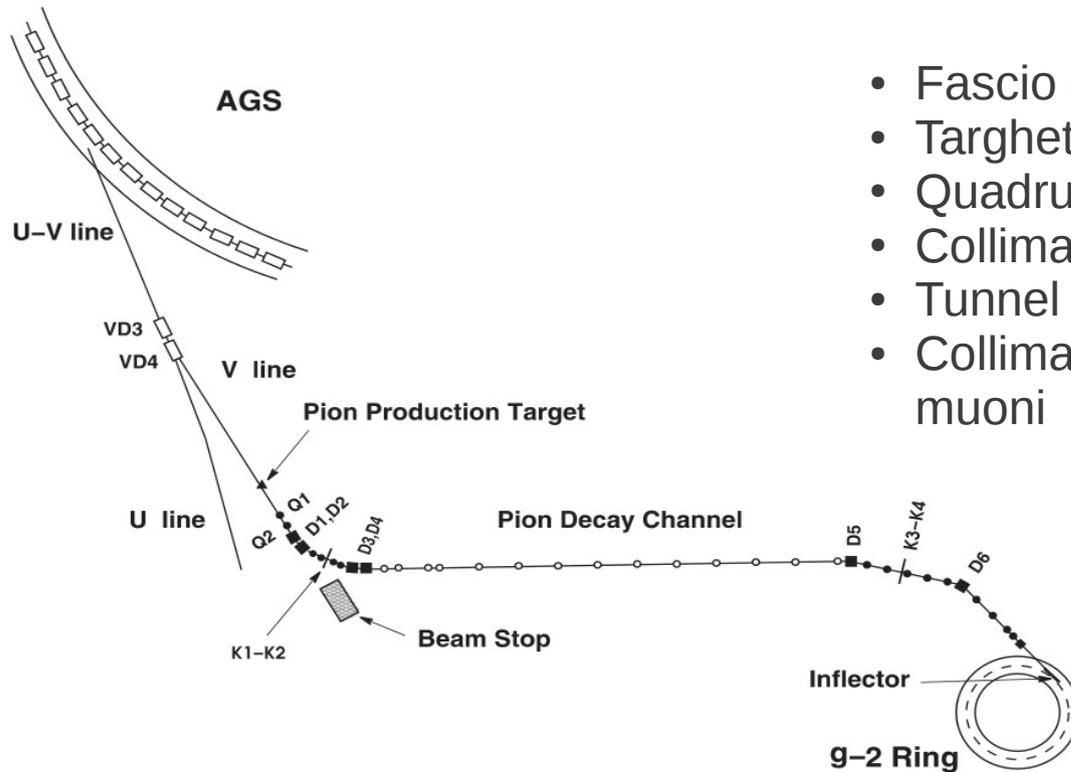
Storage Ring di E821

Lavora con fasci che arrivano da acceleratore AGS di Brookhaven



- Magnete di 700 tonnellate
- Bobine da 14m di diametro per il campo magnetico
- 24 calorimetri elettromagnetici
- Inflector all'entrata del fascio
- 4 quadrupoli elettrostatici
- 3 kicker
- Collimatori del fascio

Informazioni sul fascio



- Fascio di protoni dall'AGS
- Targhetta (nickel) di produzione dei pioni
- Quadrupoli per focalizzare
- Collimatori per selezionare l'impulso
- Tunnel di decadimento dei pioni (74m) → muoni
- Collimatori per selezionare l'impulso "magico" dei muoni

Parametri del fascio

Parameter	Value
(g-2) Frequency	$f_a \sim 0.23 \times 10^6 / s$
Muon Lifetime	$\gamma\tau = 64.4 \mu s$
Muon kinematics	$p_\mu = 3.094 \text{ GeV}/c$ $\gamma_\mu = 29.3$
Cyclotron Period	$\tau_{cyc} = 149 \text{ ns}$
Central Radius	$\rho = 7112 \text{ mm} \text{ — } (280'')$
Magnetic Field	$B = 1.4513 \text{ T}$
Storage Aperture	9.0 cm circle
In one lifetime:	432 revolutions around ring

- Fascio di AGS contiene 12 bunch di p ognuno con intensità $\sim 7 \times 10^{12}$ p
- Intensità totale: $\sim 60 \times 10^{12}$ protoni
- B misurato con la tecnica NMR
- $\sim 10^4$ muoni per pacchetto di protoni

Cinematica del muone (1)

I muoni provenienti dal decadimento dei pioni sono sempre **polarizzati**

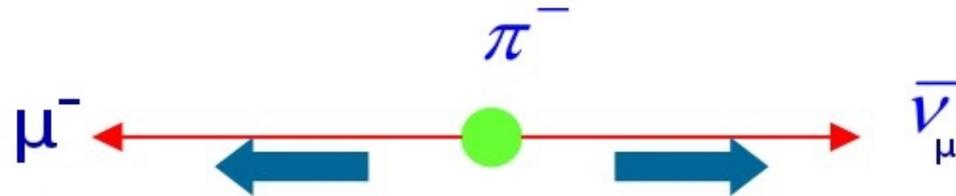


dalla conservazione del momento angolare totale deve essere che

↓

}

$\left\{ \begin{array}{l} \mu^- \text{ elicità} = +1 \\ \mu^+ \text{ elicità} = -1 \end{array} \right.$



In E821 vengono usati muoni prodotti in avanti nel sistema di riferimento del pione
(quindi μ^- con spin parallelo all'impulso, μ^+ con spin antiparallelo)

Nell'esperimento si scelgono:

{

Impulso medio dei pioni:

$p_\pi \approx 3.15 \text{ GeV}/c$

{

Intervallo di impulsi dei muoni prodotti:

$0 < p_\mu < 3.15 \text{ GeV}/c$

Cinematica del muone (2)

Il vettore di spin di una particella che si muove trasversalmente al campo magnetico uniforme ha un **moto di precessione** relativo al vettore impulso

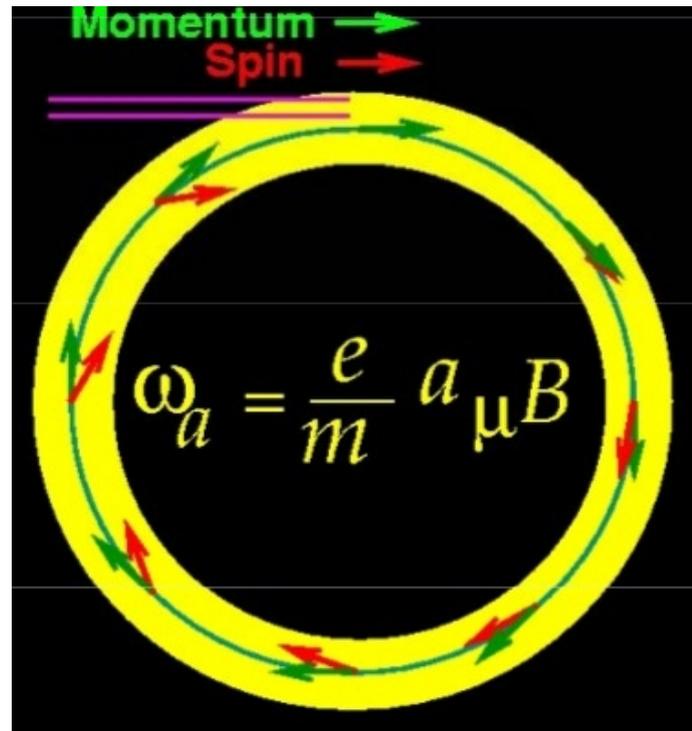
$$\omega_a = \omega_s - \omega_c = \frac{e}{m} a_\mu B$$

direttamente proporzionale all'anomalia magnetica del muone

Frequenza di **precessione dello spin** nel campo magnetico

Frequenza di **ciclotrone** con cui la particella gira nell'acceleratore

$$\omega_s = \frac{geB}{2m} + (1 - \gamma) \frac{eB}{m\gamma}$$



$$\omega_c = \frac{(eB)}{(m\gamma)}$$

Cinematica del muone (3)

Per collimare il fascio, su di esso agisce anche un campo elettrico (quadrupolo elettrostatico) quindi, la formula della precessione è **relativistica**

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

=0 se $\gamma = 29.3$.

in questo modo E non causa un'ulteriore precessione



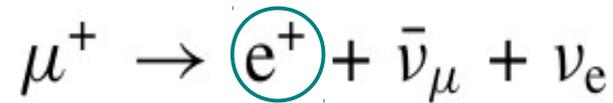
Impulso dei muoni corrispondente al valore "magico" è:

$$p_\mu = 3.094 \text{ GeV}/c$$

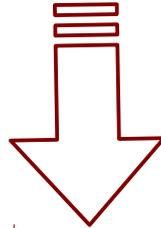
Muoni con questo impulso e aventi una **polarizzazione media del 95%** vengono separati dai pioni energetici, che sono rimasti nel fascio, dalla seconda coppia di collimatori.

Strategia di misurazione

Dopo un certo numero di giri il muone decade spontaneamente



I positroni a più alta energia sono emessi preferenzialmente paralleli alla direzione dello spin del muone (nel sist. di rif. del muone).



Possiamo misurare la frequenza della precessione dello spin contando il numero di positroni al di sopra di una certa soglia (1.8 GeV) in funzione del tempo

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

fattore di normalizzazione

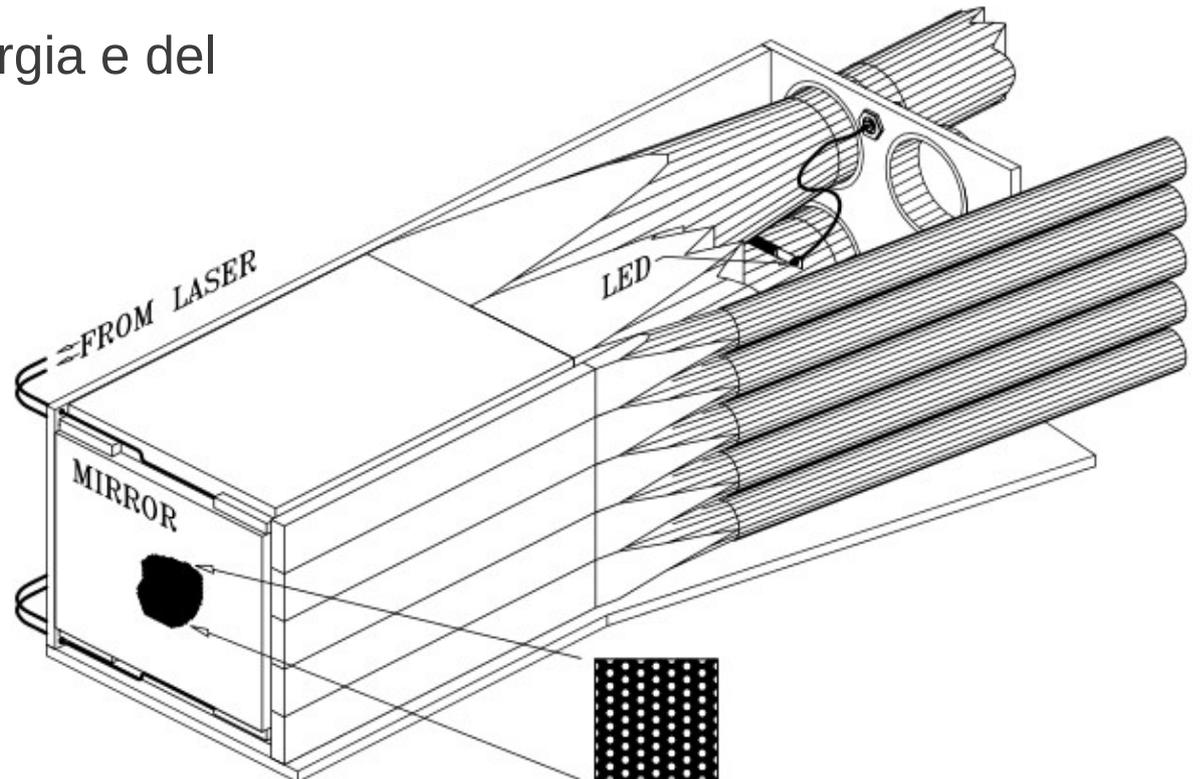
asimmetria

fase

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

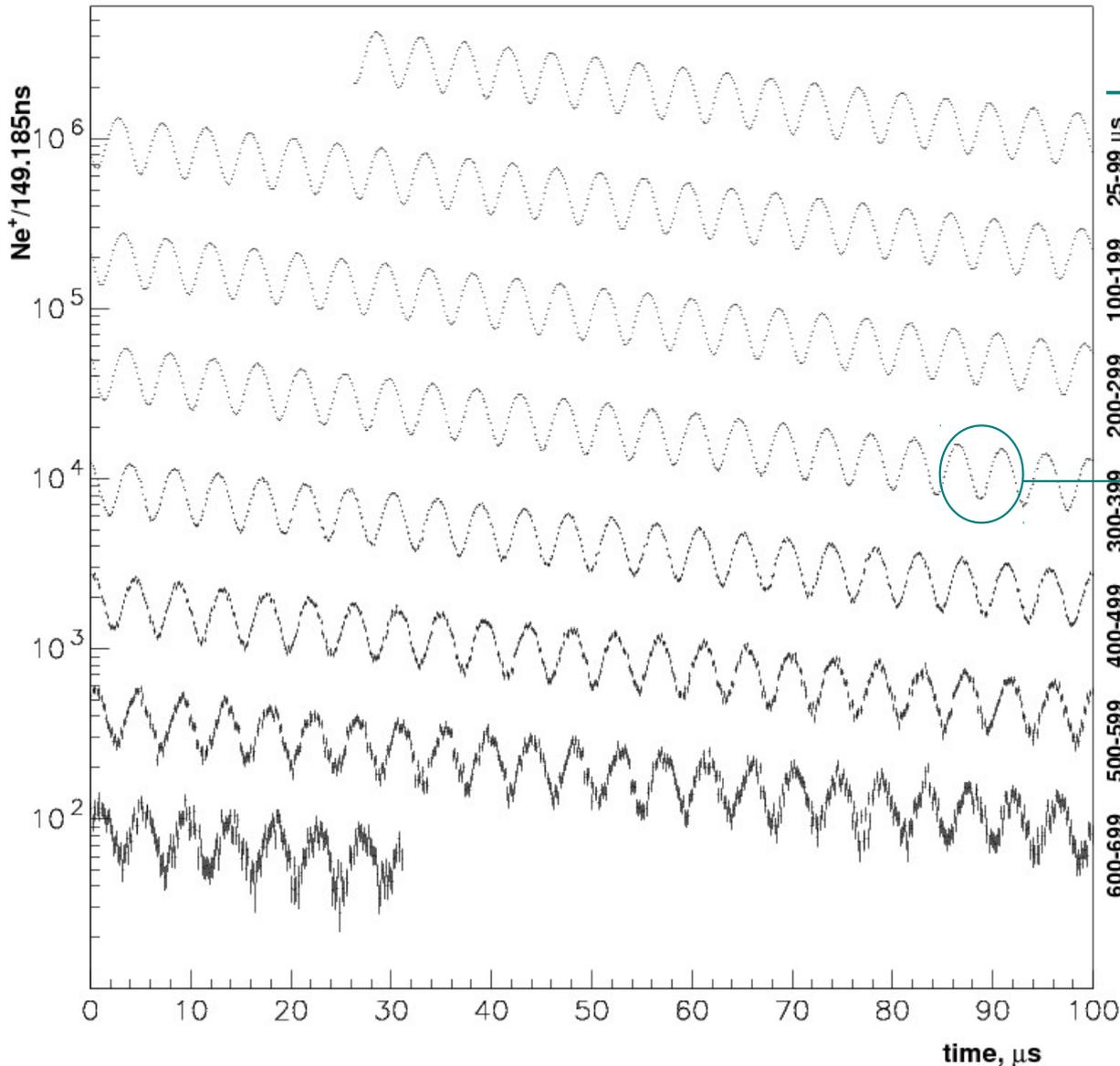
Calorimetri

- A campionamento: fibre scintillanti di 1 mm di diametro in una matrice di piombo
- Dimensioni: 22.5 (raggio) x 14 (altezza) x 15 (profondità) cm
- $X_0=1.14$ cm , $R_m=2.5$ cm => profondità di 13 X_0 , cioè dal 96% al 93% dell'energia viene depositata per elettroni da 1 GeV a 3 GeV
- La risoluzione in energia è $\sigma(E)/E \approx 10\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$.
- Sono 24 e sono posti lungo la circonferenza dell'anello di accumulazione adiacenti al raggio interno e le fibre sono orientate lungo la direzione radiale nell'anello
- Forniscono la misura dell'energia e del tempo di arrivo degli elettroni



Risultati sperimentali

1,388.5 million e^+ ($E > 1.8$ GeV, 1999 data)



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

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

Verso la fine della presa dati c'è
poca statistica, quindi molte più
fluttuazioni

Analisi (1)

Analisi “cieca”: offset arbitrario nei dati



se non si conosce non si può determinare a_μ

E821 misura $R = \omega_a / \omega_p$, non direttamente l'anomalia magnetica.



rapporto tra la frequenza di precessione e quella del protone libero (di Larmor)

Sapendo che ω_a è proporzionale all'anomalia ed utilizzando il metodo della NMR si determina:

$$a_\mu = \frac{R}{(\lambda - R)}$$



$$\lambda = \mu_\mu / \mu_p$$

rapporto tra i momenti magnetici del muone e del protone

Analisi (2)

- **ERRORI SISTEMATICI** su ω_a

- Elettroni con piccoli impulsi possono essere persi
- Due elettroni con impulsi sovrapposti possono simulare uno singolo di più alta energia

$\sigma_{\text{syst}} \omega_a$	1999 (ppm)	2000 (ppm)	2001 (ppm)
Pile-up	0.13	0.13	0.08
AGS background	0.10	0.01	‡
Lost muons	0.10	0.10	0.09
Timing shifts	0.10	0.02	‡
<i>E</i> -field and pitch	0.08	0.03	‡
Fitting/binning	0.07	0.06	‡
CBO	0.05	0.21	0.07
Gain changes	0.02	0.13	0.12
Total for ω_a	0.3	0.31	0.21

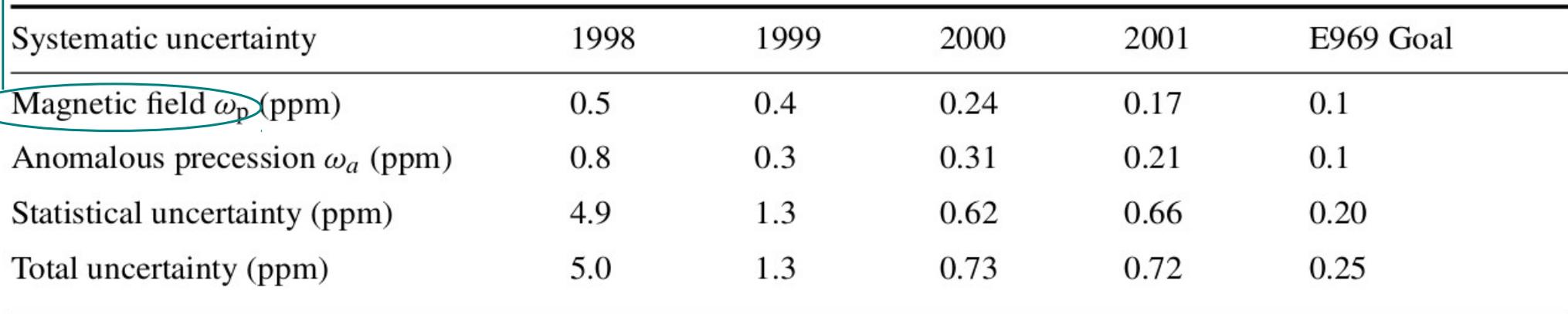
Valore complessivo di
0.11

Algoritmo veloce e stabile
(deadtime < 3 ns)

Analisi (3)

- **ERRORI SISTEMATICI e STATISTICI**

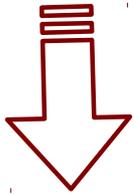
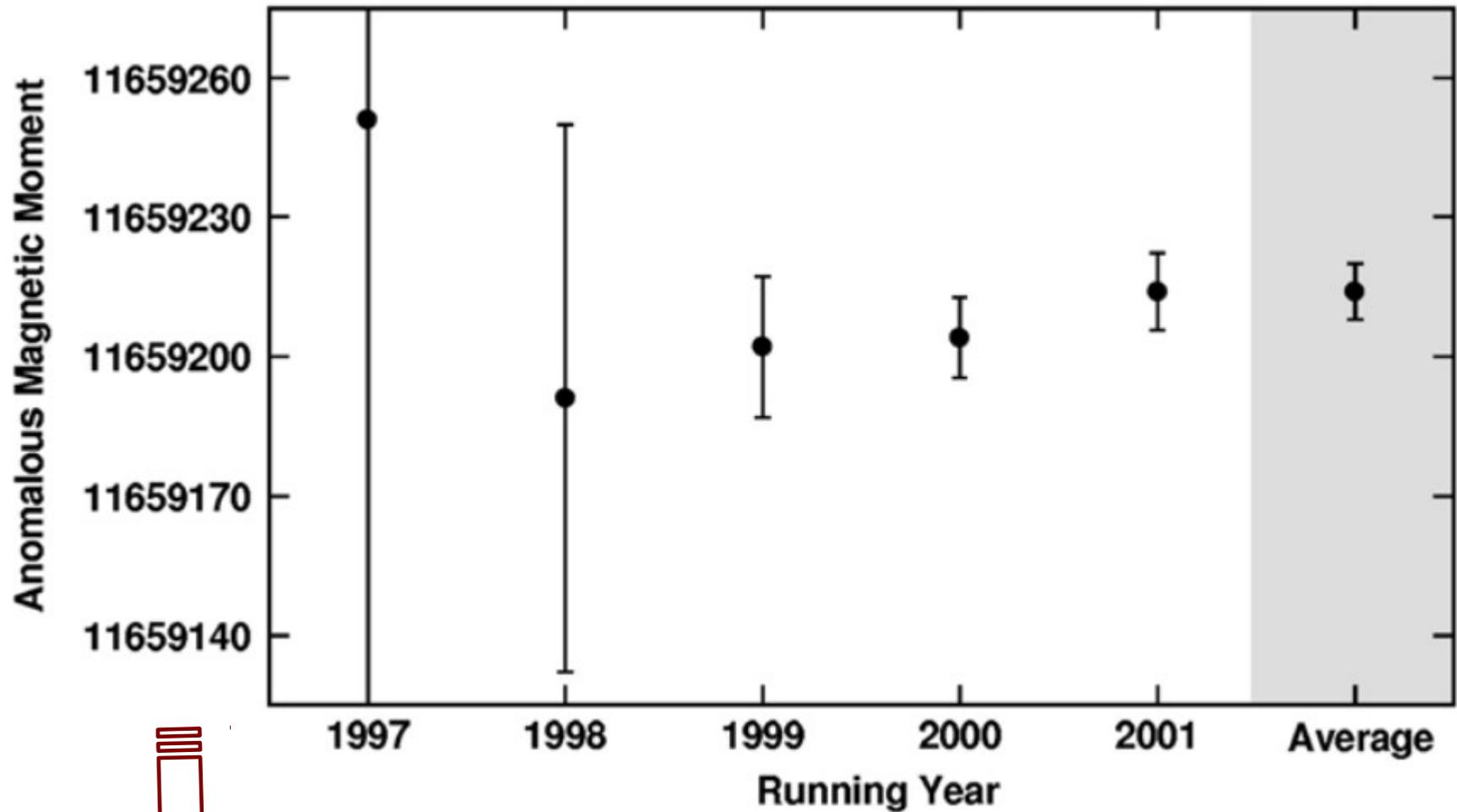
quasi campo di dipolo puro,
ma l'incertezza sulla sua misura (con NMR) è determinante



Systematic uncertainty	1998	1999	2000	2001	E969 Goal
Magnetic field ω_p (ppm)	0.5	0.4	0.24	0.17	0.1
Anomalous precession ω_a (ppm)	0.8	0.3	0.31	0.21	0.1
Statistical uncertainty (ppm)	4.9	1.3	0.62	0.66	0.20
Total uncertainty (ppm)	5.0	1.3	0.73	0.72	0.25

E969 richiede un miglioramento modesto
rispetto a quelli raggiunti nel corso degli anni da E821

Risultati



$$\left\{ \begin{array}{l} a_{\mu}^{\text{SM}} = 116\,591\,785 (61) \times 10^{-11} \\ a_{\mu}^{\text{exp}} = 116\,592\,080 (63) \times 10^{-11} \end{array} \right.$$

Discrepanza di circa 3.4σ



ipotesi di nuova fisica

Conclusioni e possibilità future

★ Cosa possiamo concludere?

- **E821**: “c'è una nuova fisica oltre questo punto e questo influisce sul fattore g del muone a un certo livello”
- Le misure non dicono come potrebbe esistere una nuova fisica
- Sono state ipotizzate alcune possibilità: supersimmetria, struttura interna del muone, struttura interna dei bosoni W.

★ Cosa si può fare?

- **E969**: progressi in errori sistematici e statistici per migliore precisione nella misura sperimentale dell'anomalia
- Possibilità di progressi nella misura della sezione d'urto $\sigma_{e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-}$ per migliorarne la precisione (dato il grande peso dell'incertezza del contributo adronico sul valore teorico dell'anomalia)