



# IFAE 2017

## XVI

### Incontri di Fisica delle Alte Energie

## L'esperimento Muon $g-2$

Anna Driutti

Università degli studi di Udine

(on behalf of the Muon  $g-2$  collaboration)

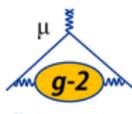
[<http://muon-g-2.fnal.gov>]

**Trieste, 19-21 aprile 2017**

Aula Magna Edificio H3

Università degli Studi di Trieste

via A. Valerio 12/2





# Il momento magnetico del muone

Il **muone** nel Modello Standard:

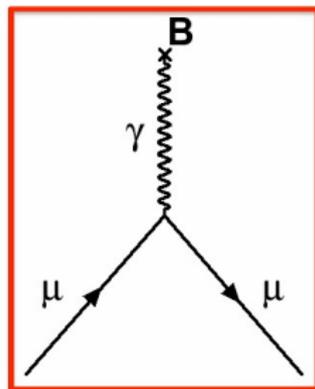
- è una particella puntiforme con spin 1/2;
- possiede un momento magnetico intrinseco:

$$\vec{\mu} = g \frac{q}{2m} \vec{s}$$

- nella teoria di Dirac  $g = 2$ , ma con i contributi degli effetti di ordine più alto (“loops”)  $g > 2$ .
- siamo interessati alla “anomalia” di  $g$  cioè:

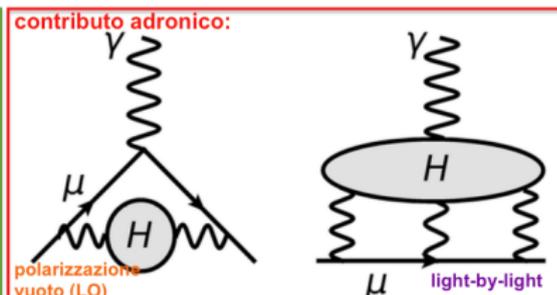
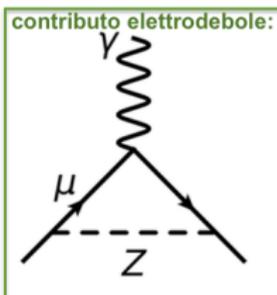
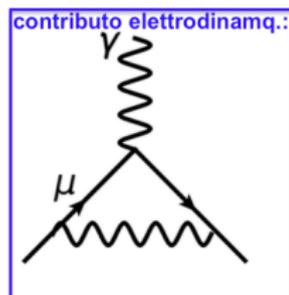
$$a_{\mu} = \frac{g - 2}{2}$$

- preferiamo  $a_{\mu}$  ad  $a_e$  perchè essendo  $m_{\mu} \gg m_e$  si ha maggiore sensibilità;
- $a_{\tau}$  sarebbe ancora meglio ma la particella tau ha un basso rate di produzione e decade velocemente.



# $a_\mu$ nel Modello Standard

$$a_\mu^{\text{SM}} = a_\mu(\text{QED}) + a_\mu(\text{EW}) + a_\mu(\text{Had}) = (116591802 \pm 49) \times 10^{-11}$$



**QED:** contributo con la minor incertezza, calcolato fino al 10° ordine (tutti i loops con  $\gamma$  ed  $\ell$ , 12672 diagrammi di Feynman);

**EW:** include  $W$ ,  $Z$  e Higgs loops, calcolato fino al 2° ordine e stimato con logs al 3°;

**Had** termine con maggior incertezza ( $q$  e  $g$  loops):

**HVP** da misure sperimentali:  $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ ;

**HLbL** calcolato, dipendente dal modello usato.

Val.±Err. ( $\times 10^{-11}$ )

**QED** 116584718.951  $\pm$  0.080

**EW** 153.6  $\pm$  1

**Had:**

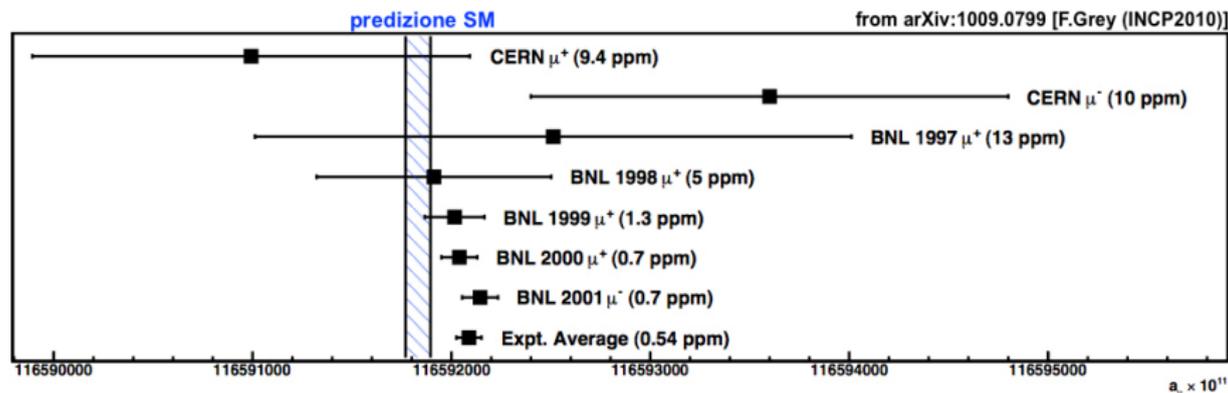
**HVP (lo)** 6949  $\pm$  43

**HVP (ho)** -98.4  $\pm$  0.7

**HLbL** 105  $\pm$  26

**SM Accuracy 0.42 ppm**

# Misure di $a_\mu$ : la storia



Attualmente la differenza tra valore sperimentale e la predizione teorica è:

$$a_\mu^{\text{Expt.}} - a_\mu^{\text{SM}} = (255 \pm 80) \times 10^{-11} \Rightarrow \text{differenza di } 3.2\sigma$$

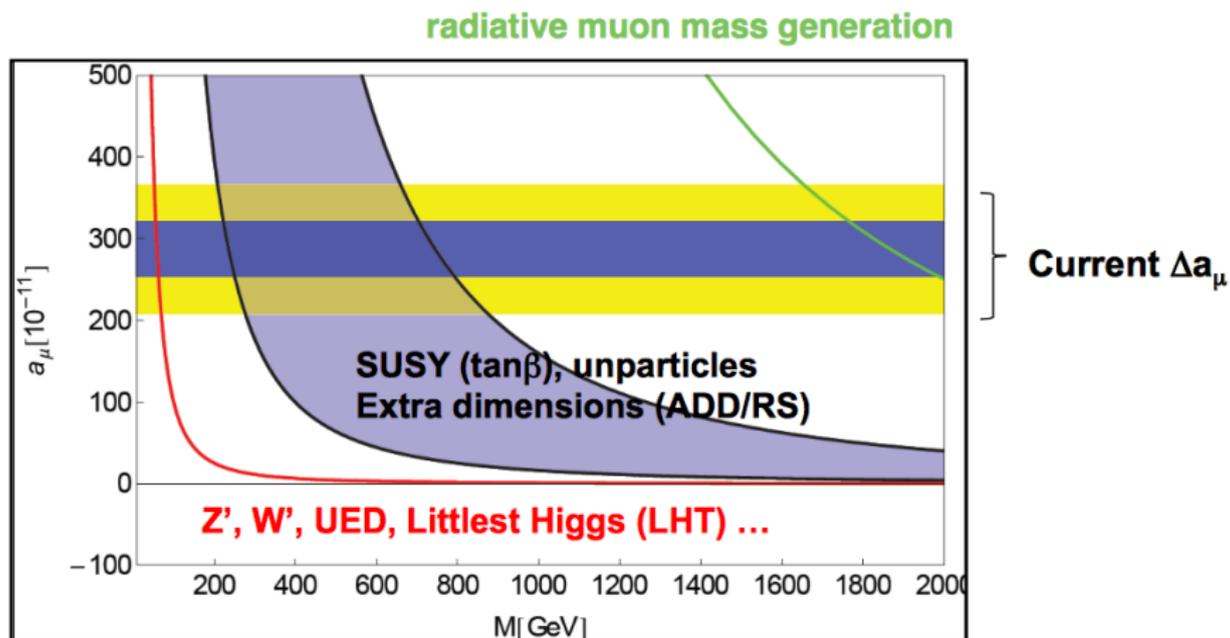
Errori nei calcoli teorici?

Incertezze sistematiche non incluse nel valore sperimentale?

Nuova fisica?

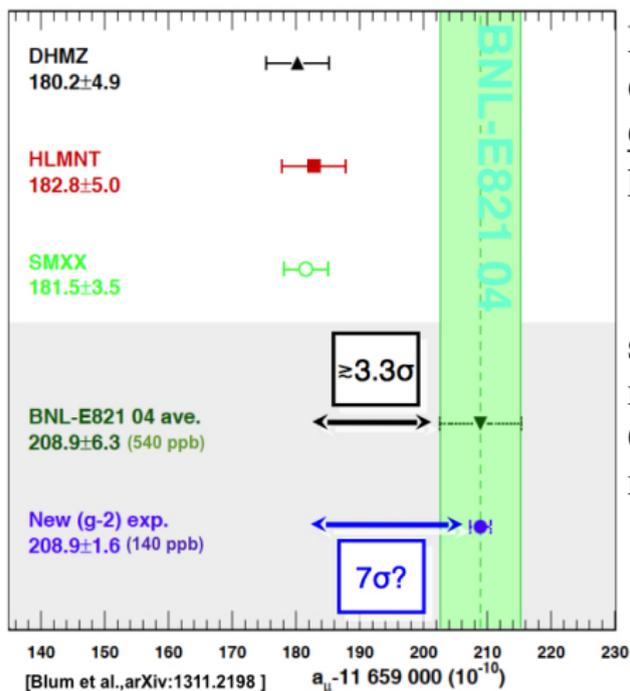
# Fisica oltre il Modello Standard

Se fosse nuova fisica sono possibili diverse spiegazioni: SUSY, dark photons...



D. Hertzog, Ann.Phys.2015 (image D. Stöckinger)

# Intento dell'esperimento g-2 a Fermilab



L'esperimento  $g-2$  a Fermilab si propone di ridurre l'incertezza sperimentale di circa un fattore 4 rispetto alla precedente misura fatta a BNL:

$$\delta(a_\mu)^{\text{esp.}} : 540 \text{ ppb} \rightarrow 140 \text{ ppb}$$

si prevede maggiore statistica ed una riduzione delle incertezze sistematiche. Ci si aspetta anche un miglioramento nell'incertezza della predizione teorica:

$$\delta(a_\mu)^{\text{theo.}} : 420 \text{ ppb} \rightarrow 310 \text{ ppb}$$

Se  $a_\mu$  rimane la stessa misurata a BNL:

$$a_\mu^{\text{FNAL}} - a_\mu^{\text{SM}} > 7\sigma$$

# La misura sperimentale

## 1. Produzione dei muoni polarizzati:

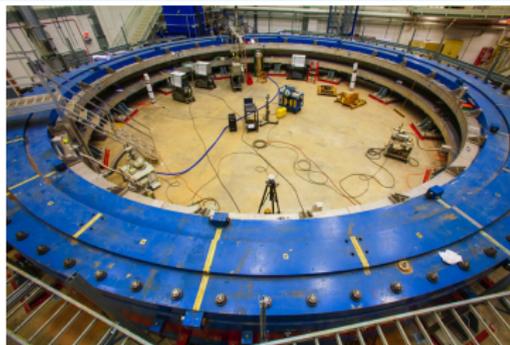
- **Recycler Ring:** i protoni da 8 GeV provenienti dal Booster vengono raggruppati in 4 gruppi più piccoli;
- **Target Station:** i protoni vengono fatti collidere su un bersaglio e le lenti di focalizzazione catturano i  $\pi^+$  con  $p = 3.1 \text{ GeV}/c$  ( $\pm 10\%$ ).
- **Beam Transfer and Delivery Ring:** nella prima parte (rettilineo) i muoni provenienti dal decadimento dei pioni vengono catturati, nella seconda (anello circolare) i protoni vengono rimossi.
- **Muon Campus:** arriva un fascio pulito di  $\mu^+$  polarizzato. Ci aspettiamo 21 volte la statistica di BNL.



# La misura sperimentale

## 2. Iniezione dei muoni nel ring

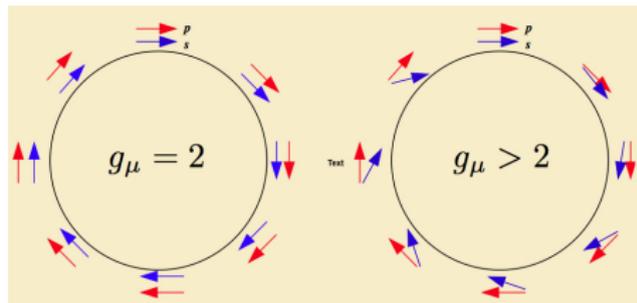
Anello di 14 m con campo magnetico uniforme di 1.45 T trasportato da BNL: “the Big Move”



3. consideriamo  $\vec{\omega}_a$  la differenza fra frequenza della precessione dello spin ( $\vec{\omega}_s$ ) e la frequenza di ciclotrone ( $\vec{\omega}_c$ )

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

*Note: A red line is drawn through the term  $\frac{1}{\gamma^2 - 1}$  with a red arrow pointing to a red '-0' below it. The term  $\frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c}$  is circled in red.*



che è proporzionale ad  $a_\mu$  se il contributo del campo E verticale di focalizzazione si cancella grazie al momento magico  $p_\mu = 3.094 \text{ GeV}/c \Rightarrow \gamma = 29.3$ . **Misurando  $\omega_a$  e B otteniamo  $a_\mu$ .**

## 4. La formula finale:

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

dove:

$\omega_a$  = frequenza di precessione anomala

$\omega_p$  = frequenza di Larmor  $\propto |\vec{B}|$

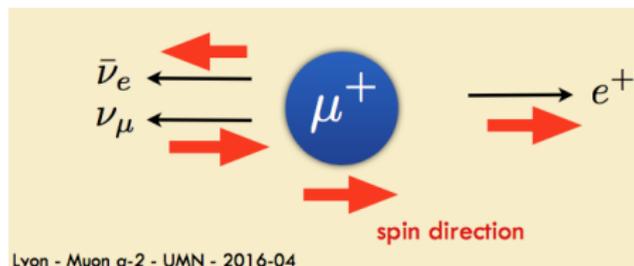
$\mu_{\mu}/\mu_p$  = rapporto tra momenti magnetici del  $\mu$  e del protone da esperimenti sulla struttura iperfina del muonio ( $\delta a_{\mu}$  25 ppb).

## 5. Budget Incertezze:

$\delta a_{\mu}$	BNL (ppb)	FNAL goal (ppb)
$\omega_a$ statistica	480	100
$\omega_a$ sistematica	180	70
$\omega_p$ sistematica	170	70
Totale	540	140

## Misura di $\omega_a$

$\omega_a$  si misura considerando che il decadimento del muone  $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e + \nu_\mu$ :

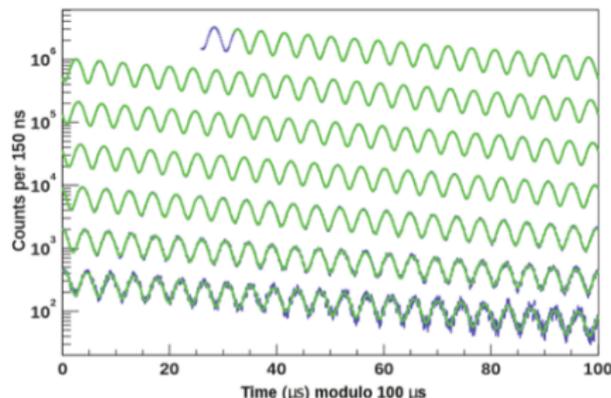


viola la conservazione della parità  $\Rightarrow e^+$  molto energetici sono emessi con spin parallelo a quello del  $\mu$ .

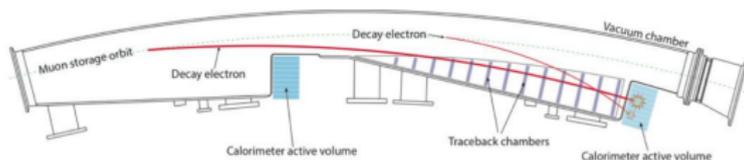
Contando il numero di  $e^+$  con  $E_{e^+} > E_{soglia}$  in funzione del tempo otteniamo la modulazione di  $\omega_a$ :

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

$E_{e^+}$  e  $t$  sono le osservabili misurate.



Gli  $e^+$  emessi dal decadimento del  $\mu$  curvano e colpiscono i detectors:

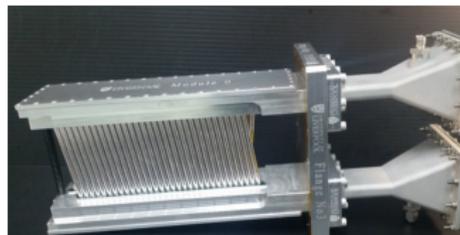


## 3 SISTEMI di TRACCIATORI

- 1500 canali di “straw trackers”;
- scopo monitorare la distribuzione spaziale del fascio.

## 24 CALORIMETRI

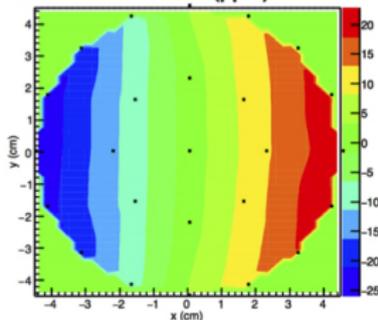
- matrici 6×9 di cristalli di  $\text{PbF}_2$  letti da SiPM (Hamamatsu);
- buona risoluzione spaziale e temporale;
- digitizzatori a 5 canali, 800 MHz e 12-bit di risoluzione;
- DAQ system (MIDAS)
- Sistema di calibrazione laser → **see Poster Section!**



# Misura di $\omega_p$

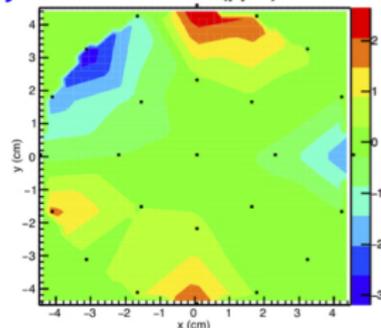
- $\omega_p$  è proporzionale al campo magnetico:  $\hbar\omega_p = 2\mu_p|B|$
- il campo magnetico viene mappato con la tecnica della NMR.

Oct 2015 B-field (ppm)

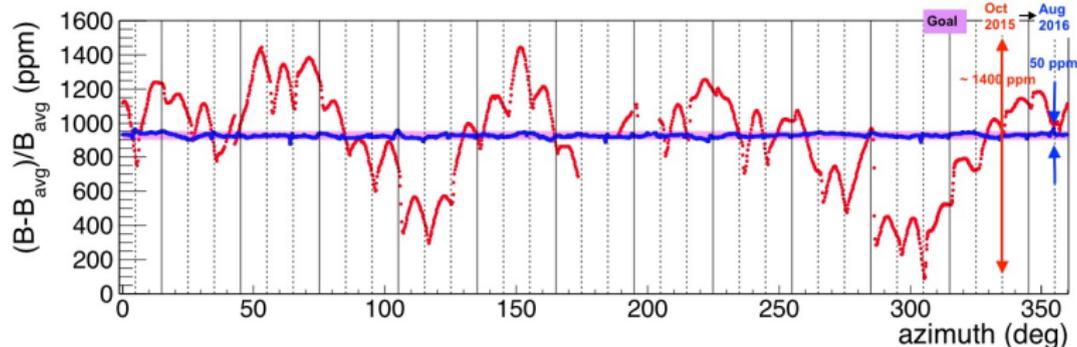


+/- 25 ppm

June 2016 B-field (ppm)



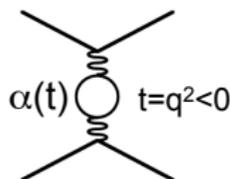
+/- 3 ppm (goal < 1 ppm)





## $a_\mu^{\text{HLO}}$ from space-like region

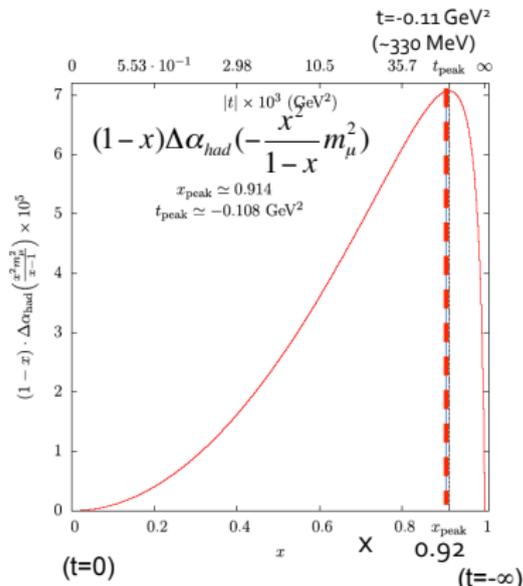
$$a_\mu^{\text{HLO}} = -\frac{\alpha}{\pi} \int_0^1 (1-x) \Delta\alpha_{\text{had}} \left( -\frac{x^2}{1-x} m_\mu^2 \right) dx$$



$$t = \frac{x^2 m_\mu^2}{x-1} \quad 0 \leq -t < +\infty$$

$$x = \frac{t}{2m_\mu^2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4m_\mu^2}{t}} \right); \quad 0 \leq x < 1;$$

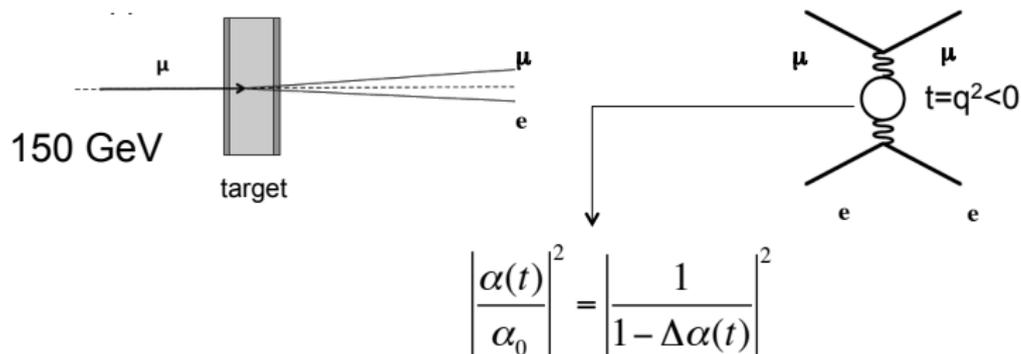
- $a_\mu^{\text{HLO}}$  is given by the integral of the curve (smooth behaviour)
- It requires a measurement of the hadronic contribution to the effective electromagnetic coupling in the space-like region  $\Delta\alpha_{\text{had}}(t)$  ( $t=q^2 < 0$ )
- It enhances the contribution from low  $q^2$  region (below  $0.11 \text{ GeV}^2$ )
- Its precision is determined by the uncertainty on  $\Delta\alpha_{\text{had}}(t)$  in this region



Courtesy of G.Venanzoni

Experimental approach:

High precision measurement of  $a_\mu^{\text{HLO}}$  with a 150 GeV  $\mu$  beam on Be target at CERN (through the elastic scattering  $\mu e \rightarrow \mu e$ )



For more details: “Measuring the leading hadronic contribution to the muon g-2 via  $\mu e$  scattering”, G. Abbiendi, C.M. Carloni Calame, U. Marconi, C. Matteuzzi, G. Montagna, O. Nicosini, M. Passera, F. Piccinini, R. Tenchini, L. Trentadue, G. Venanzoni, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.3, 139 (also poster session)

Courtesy of G.Venanzoni

- l'intento dell'esperimento  $g-2$  è **misurare  $a_\mu$  con estrema precisione:** 0.14 ppm;
- $g-2$  è un test di precisione dello **SM**: nuova fisica?
- l'inizio della **presa dati** è prevista per quest'anno e continuerà fino al 2020. **Primi risultati** sono attesi per il 2018.

## Sessione Poster:

- ① Measurement of the leading hadronic contribution to the muon  $g-2$  via space-like data
- ② The Calibration System of the muon  $g-2$  experiment at Fermilab

*Grazie per l'attenzione!*