

---

# METODOLOGIE SPERIMENTALI IN FISICA E ASTROFISICA DELLE PARTICELLE

---

F.-L. Navarra

Febbraio-Marzo 2018

1a parte A

# Programma

## ■ 1a parte

- Alcune proprietà fondamentali dei muoni (e dei neutrini) rilevanti (o meno) per un uso applicato.
- Utilizzo di muoni cosmici per radiografie e tomografia nel campo della sicurezza, dell'archeologia, della geofisica e del controllo ambientale.

## ■ 2a parte

- Reattori pilotati da acceleratori, un nuovo approccio alla produzione di energia col nucleare e alla soluzione del problema delle scorie.

# Questo modulo vs Lab. Fis. Nucl. Sub. e Fis. delle Particelle

- Vita media del  $\mu$ : si discutono due esperimenti che hanno realizzato di recente misure di precisione di  $\tau_\mu$
- Perdita di energia e m.s. di  $\mu$  nella materia: si utilizzano gli andamenti e tipici valori numerici necessari a capire la radiografia con i  $\mu$
- Strumentazione usata negli esperimenti e nelle applicazioni (camere a fili, scintillatori, SiPM etc.)
- $G_F$ , conservazione del numero leptonico, decadimenti rari

# High Energy Physics è nota per il bosone di Higgs: 2012-... un successo del LHC

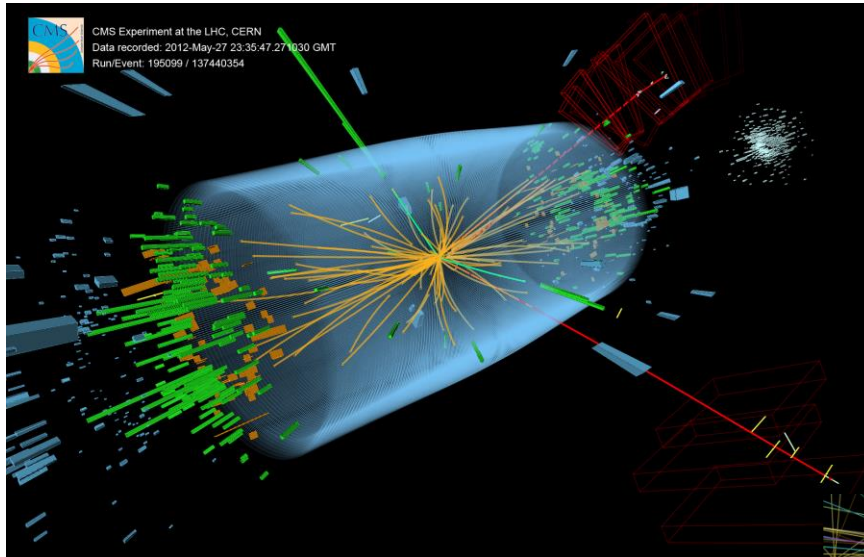
- 2012 discovery of a Brout-Englert-Higgs-like boson (BEH) by ATLAS and CMS using 7 and 8 TeV pp data (announced on 4 July 2012)
- 8 October 2013 NP awarded to Francois Englert and Peter Higgs for their 1964 papers on the BEH mechanism
- Spring 2018, LHC will resume at 13 TeV and ... you may follow it any time on Twitter, now Year End Technical Shutdown (YETS)



now CERN DG



Senza i  $\mu$  la scoperta del bosone di Higgs sarebbe stata impossibile (o almeno ritardata)



muons are everywhere,  
including the «golden»  
Higgs' decays,  $H \rightarrow ZZ^*$

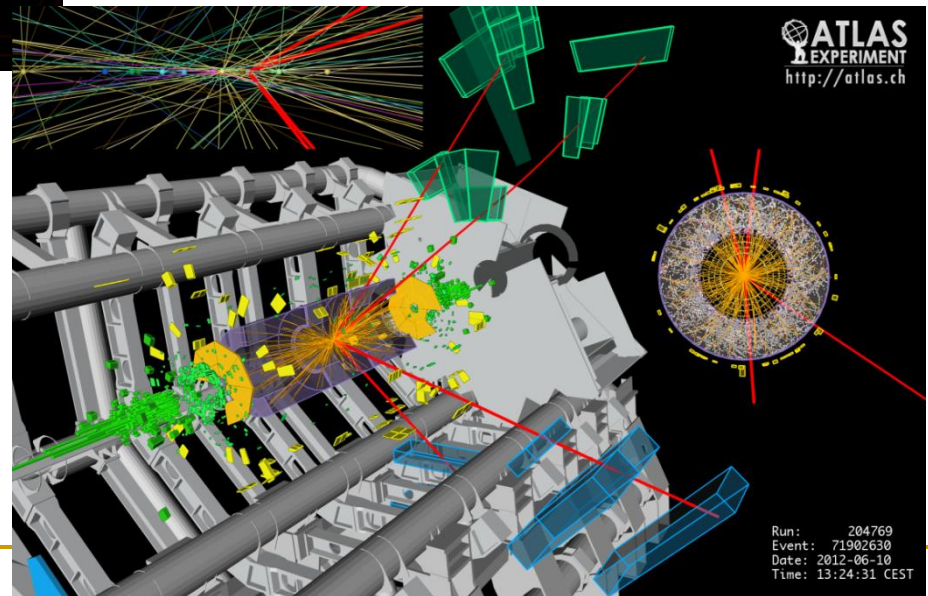
**Higgs candidate:**

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$

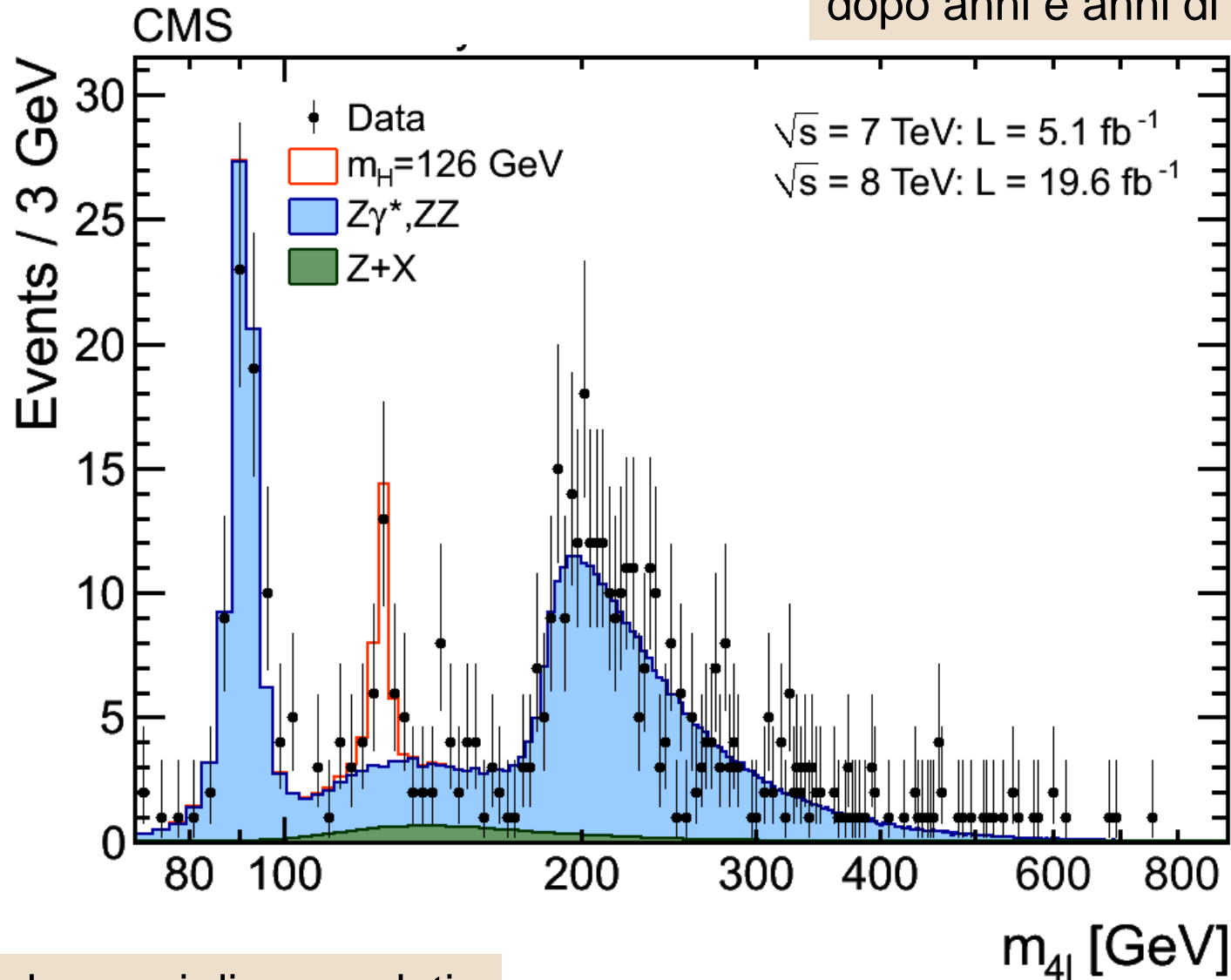
**Higgs candidate:**

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$

(yet muons are just  
the heavy brothers  
of electrons)



un'accumulazione di  $\mu$  ed e  
dopo anni e anni di caccia



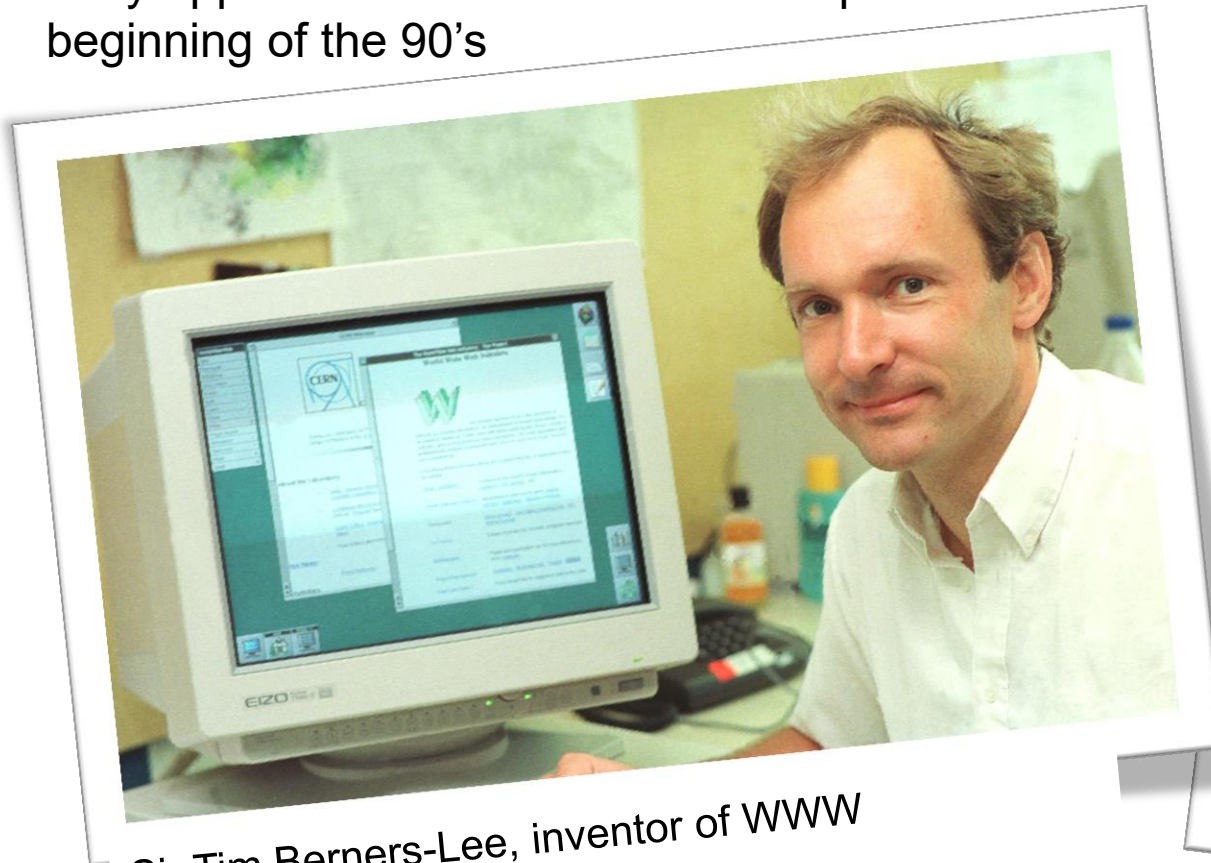
due anni di presa dati,  
2011(12) a 7(8) TeV

# Ma HEP non è solo Higgs: alcuni spin-off

- Hadron therapy for otherwise untreatable tumors
- Positron-Emission-Tomography (PET)
- Medical Imaging
- Free Electron Laser
- → The World Wide Web (released royalty free by CERN)
- Grid-Computing
- NeuroBayes - Neuronal Bayesian statistics for economy
- →  $\mu$  radiography/tomography
- Superconducting magnets, high vacuum, low temperatures (on a large scale)
- Training, international collaboration (science brings nations together, CERN, SESAME ...)
- → Accelerator Driven Systems

# Applications: e.g. the World Wide Web!

Tim: a physicist from Oxford, working at CERN on accelerator (PS, LEP) controls in the 1980s; early applications of WWW to LEP experiments beginning of the 90's



Sir Tim Berners-Lee, inventor of WWW  
Technology prize, 2004 (Fi)

The WWW proposal (1989):  
Network + Hypertext:, developed with the Large Hadron Collider (LHC) project in mind

Software released freely by CERN in April 1993

Free for everybody ever since, exponential growth



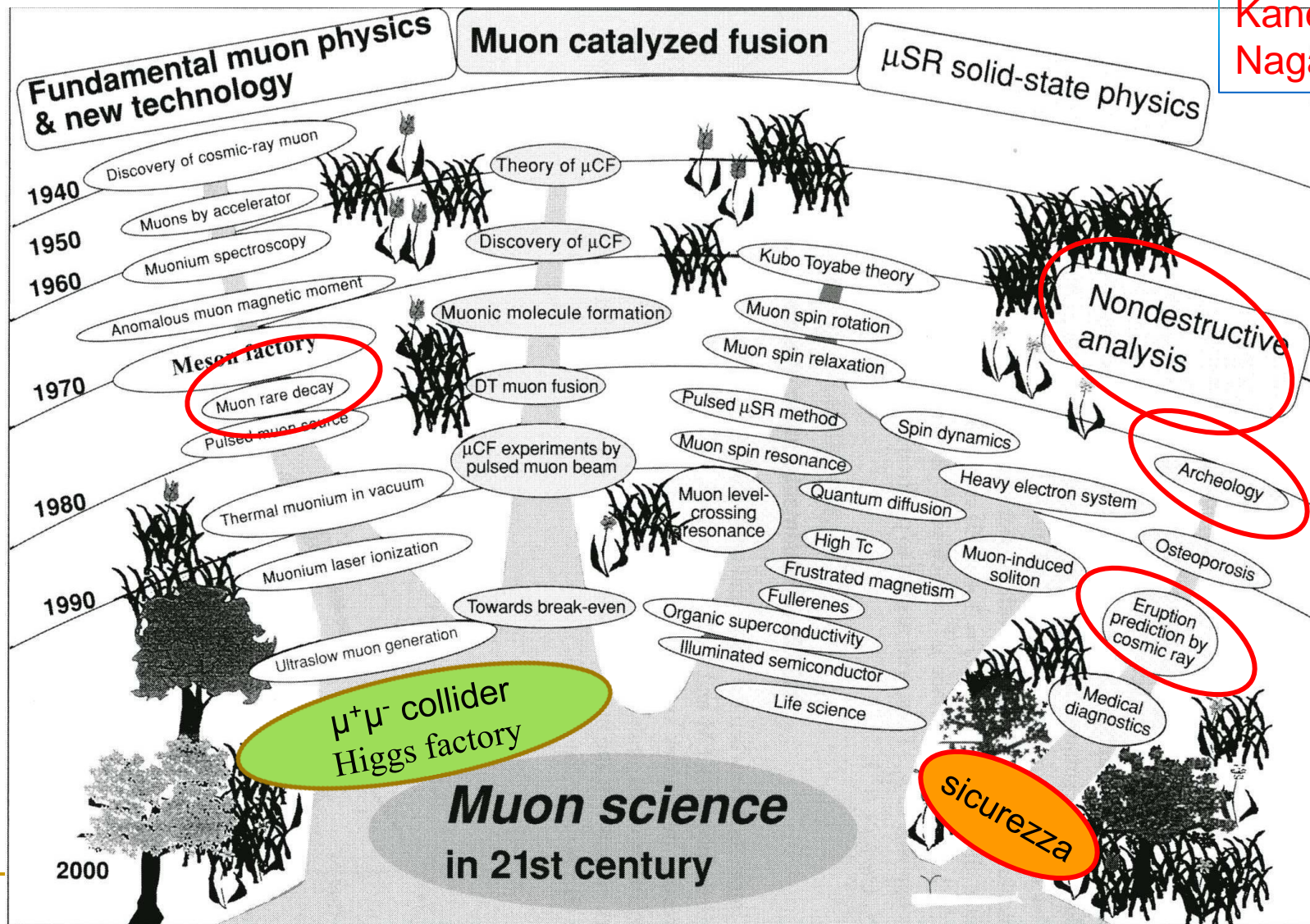


# Fisica fondamentale ed applicata con i $\mu$

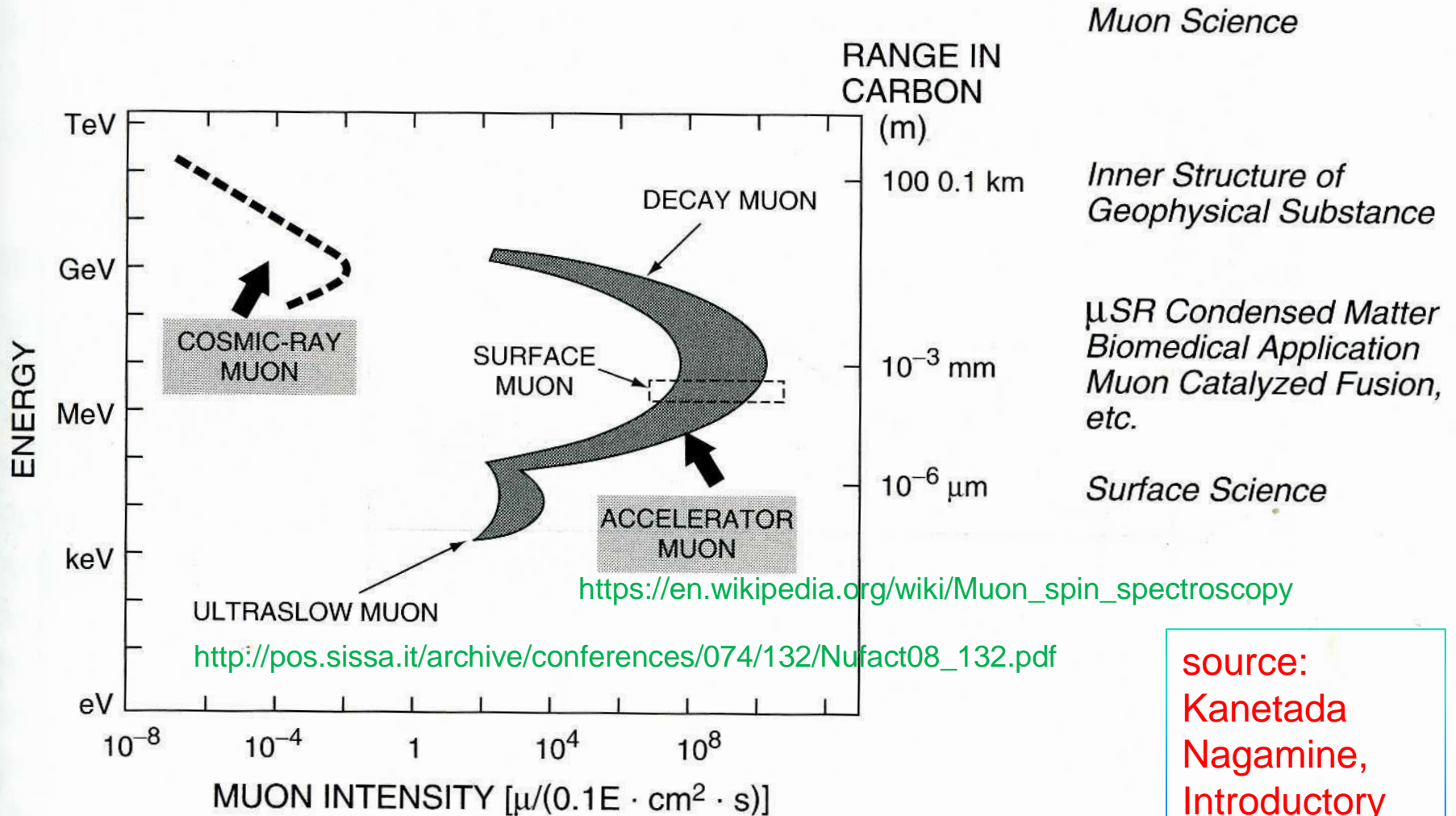
- dal 1937-38 (Anderson&Neddermeyer, scoperta del  $\mu$  nei raggi cosmici) in poi, progressi in quattro direzioni (pur non sapendo il perché del  $\mu$ ):
  - fisica fondamentale e nuova tecnologia
  - fusione catalizzata da muoni
  - muonSpinRotation e fisica dello stato solido
  - analisi non distruttiva (muografia)
- S.H. Neddermeyer and C.D. Anderson, Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles, Phys. Rev. **51** (1937) 884; Nature of Cosmic-Ray Particles, Rev. Mod. Phys. **11** (1939) 191.

# Che cosa si può fare con i muoni

source:  
Kanetada  
Nagamine



# E, range e intensità delle sorgenti di $\mu$

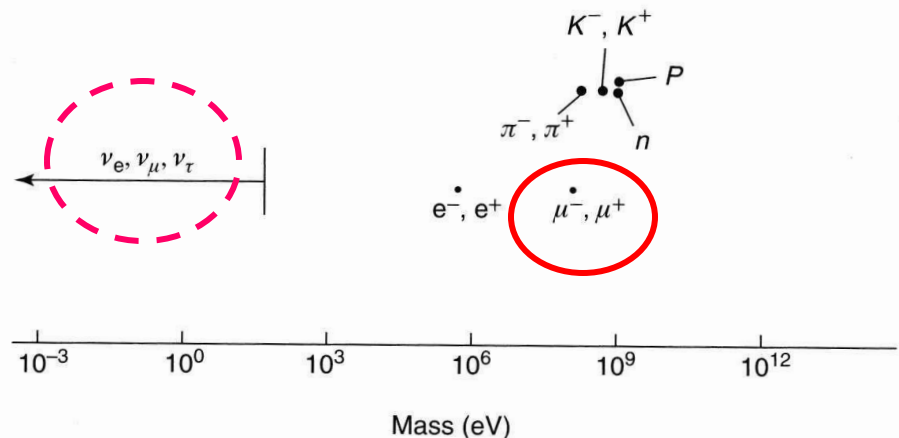
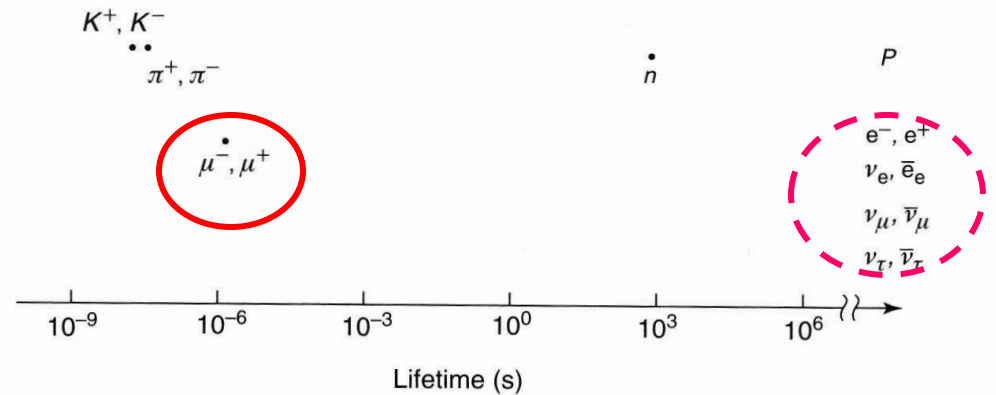


# Muoni (e neutrini) in una frase

- I muoni sono particelle instabili con due tipi di cariche elettriche ( $\mu^+$ ,  $\mu^-$ ) che hanno spin  $\frac{1}{2}$ , una massa intermedia fra quella del p e quella dell'e ( $\frac{1}{9} m_p$ ,  $207 m_e$ ), una vita media di  $\sim 2.2 \mu\text{s}$  e non hanno interazioni forti.
- I neutrini appaiono in tre sapori ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ), non hanno carica elettrica, hanno spin  $\frac{1}{2}$ , massa molto piccola ( $\ll m_e$ ), ma non nulla (oscillano fra un sapore e l'altro, Lepton Flavour Violation (LFV)), interagiscono molto poco con la materia e negli esperimenti sia a bassa che ad alta energia, esclusi quelli dedicati alla loro rivelazione, appaiono come energia mancante.

# Vite medie e masse di varie particelle elementari

- Il muone ha la seconda più lunga vita media, dopo il n, fra le particelle instabili (i neutrini sono stabili) ed ha la seconda più piccola massa fra tutte le particelle elementari dopo l'e (escludendo i neutrini)



# Qualche proprietà dei $\mu$ (e $\nu$ )

## ■ $\mu^\pm$

- $m = (105.6583715 \pm 0.0000035) \text{ MeV}$

- $\tau = (2.1969811 \pm 0.0000022) 10^{-6} \text{ s}$

- interazioni: e.m. e debole

- un  $e^\pm$  pesante (“E questo chi lo ha ordinato?”, I.I. Rabi),  
**diverso da  $e^\pm$  rispetto alla perdita di energia**

- energia critica (Radiaz. = Ioniz.)  $\epsilon_\mu$  – diverse centinaia di GeV, dipende da Z → **particella penetrante**

## ■ $\nu_{e,\mu,\tau}$ (anche anti)

- $m \ll 1\text{-}2 \text{ eV}$ , interazione debole → **molto penetrante**

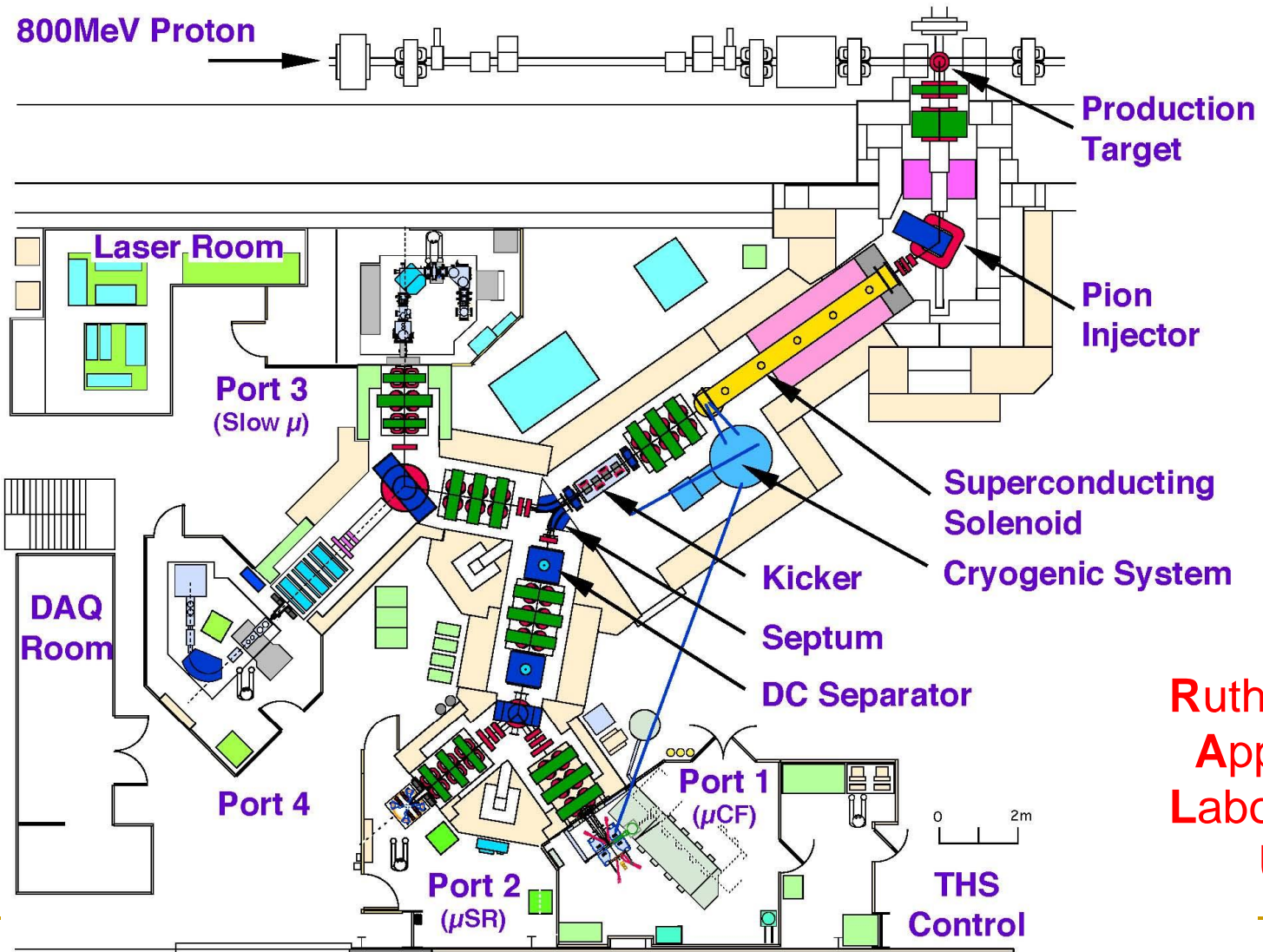
- $\sigma_\nu \sim 0.67 10^{-38} E_\nu(\text{GeV}) \text{ cm}^2$  [CC,  $\nu_\mu$ ; 0.33  $\text{antiv}_\mu$ ]  
(bersagli isoscalari,  $E = 30\text{-}200 \text{ GeV}$ )

# Misure di precisione con acceleratori

- fasci di  $\mu^+$  sono disponibili a PSI (590 MeV cyclotron, 1.3 MW p beam), TRIUMPH (520 MeV cycl.), J-PARC (3 GeV Rapid Cycling Synchrotron 1 MW), ISIS<sup>(\*)</sup> (800 MeV p sync.), RIKEN-RAL ( $\mu$  facility, uses ISIS beam), [FNAL (8 GeV p sync.) for the expt. Mu2e, 2019]
- vita media del  $\mu^+$
- ricerca dei decadimenti rari del  $\mu$  e di ChargedLFV, e.g.  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ ,  $M(\mu^+e^-) \rightarrow \bar{M}$

(\*) Isis è il nome di una dea egiziana ed il nome locale del Tamigi (non è un acronimo)

# e.g. RIKEN-RAL facility at ISIS



Rutherford  
Appleton  
Laboratory,  
UK



$\tau_\mu$ : input per il MS

correzioni di QED e QCD

$$1/\tau_\mu = G_F^2 m_\mu^5 (1 + \Delta q) / (192 \pi^3)$$



Enrico Fermi

**fine structure constant**

$$\alpha = 1/137.035\,999\,76\,(50)(0.004\text{ ppm})$$

PDG2014:  $\alpha = 1/137.035999139(31)$

**Fermi constant**

$$G_F = 1.16639(2) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} \text{ (17 ppm)}$$

MuLan2013:  $G_F = 1.1663787(6) \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$

**Z-boson mass**

$$M_Z = 91.1876(21) \text{ GeV}/c^2 \text{ (23 ppm)}$$

(LEP)

vita media  
del  $\mu^+$

(nelle box stato al 2007; oggi 2018:  $\alpha$  0.23 ppb;  $G_F$  0.5 ppm;  $M_Z$  invariato)

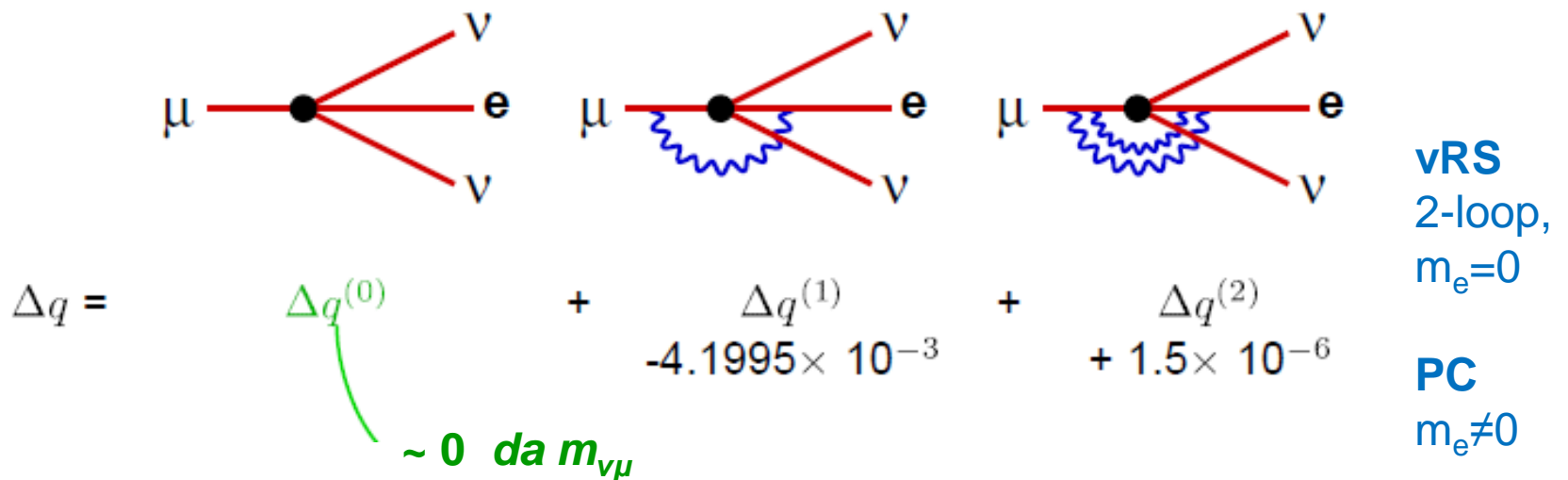
# Dalla vita media del muone a $G_F$

$$\frac{1}{\tau_\mu} = \Gamma_\mu = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192 \pi^3} (1 + \Delta q)$$

0.13 ppm

T. van Ritbergen and R.G. Stuart, Phys. Rev. Lett. 82, 488 (1999)  
 A.Pak and A. Czarnecki, Phys. Rev. Lett. 100, 241807 (2008)

Incertezza  
teorica ( $G_F$ )  
0.3 ppm  
0.14 ppm



# Stato sperimentale dell'errore sulla vita media del $\mu^+$

Year	Author	errore	$N_\mu$	
2011	Webber <i>et al.</i>	$\pm 2.2$ ps	$10^{12}$	
2008	Barczyk <i>et al.</i>	$\pm 35$ ps	$10^{10}$	4 $10^{11}$ still to be published
2007	Chitwood <i>et al.</i>	$\pm 24$ ps	:	
1984	Bardin <i>et al.</i>	$\pm 66$ ps	:	
1984	Giovanetti <i>et al.</i>	$\pm 60$ ps	$10^9$	
1974	Balandin <i>et al.</i>	$\pm 80$ ps	:	
1973	Duclos <i>et al.</i>	$\pm 300$ ps	$10^8$	
1972	Williams & Williams <i>et al.</i>	$\pm 800$ ps	:	( $\mu^-$ )
1963	Meyer <i>et al.</i>	$\pm 2000$ ps	$10^6$	
1962	Lundy	$\pm 4000$ ps	:	
1936	Anderson and Neddermeyer	discovery	1	

# I due esperimenti recenti per la misura di $\tau_\mu$ ( $\mu^+$ ) – sistematiche diverse

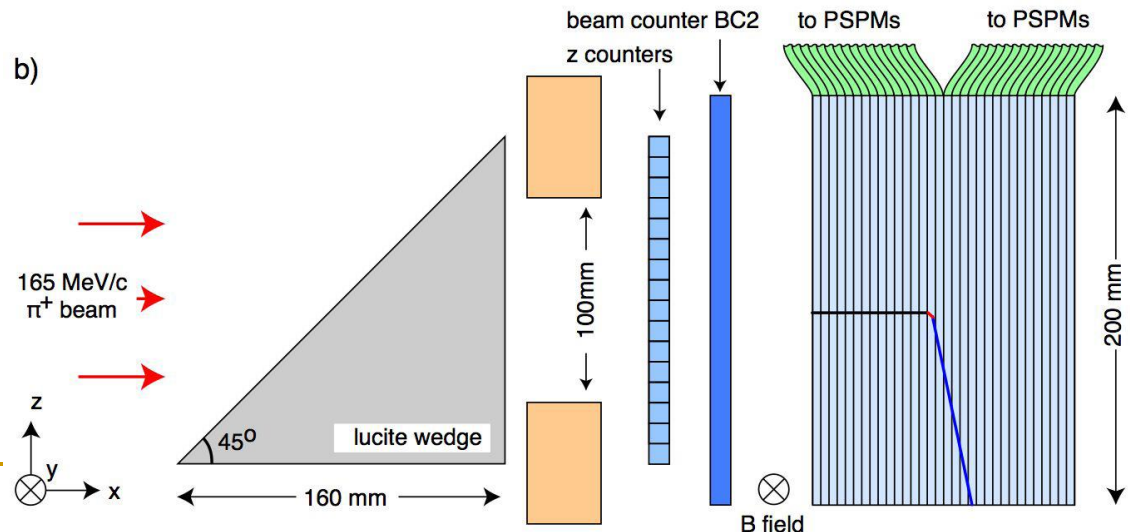
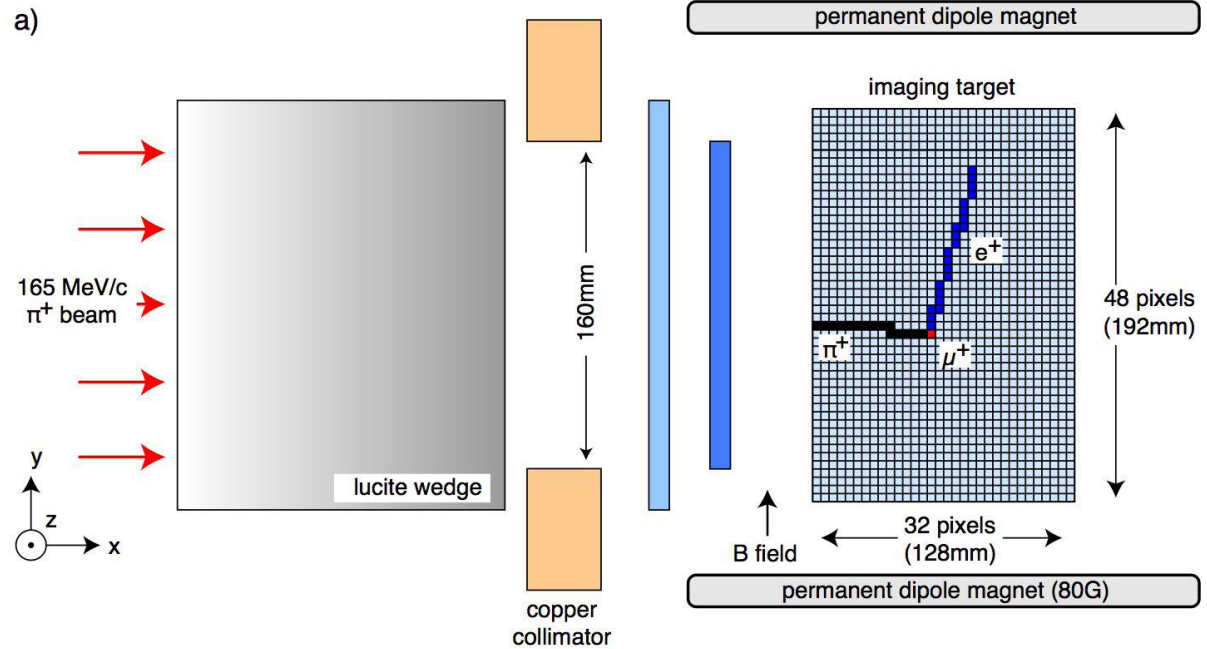
- FAST (obiettivo: 2 ppm; realizzato finora: 16 ppm) – fascio DC, catena  $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$  identificata evita di selezionare  $\mu$  del fascio (polarizzati),  $\pi$  (spin 0) decade a riposo producendo  $\mu$  con direzioni di polarizzazione isotrope; (gran parte dei) dati ancora da finire di analizzare
- MuLan (obiettivo: 1 ppm; realizzato: 1 ppm) – fascio pulsato, per 5  $\mu\text{s}$  si «carica» la sorgente, poi si lascia decadere  $\rightarrow$  necessario il controllo degli effetti della polarizzazione dei  $\mu$  e del pile-up degli eventi

# Misure recenti della vita media del $\mu^+$ /FAST

- Esperimento FAST (Fibre Active Scintillator Target) al PSI di Villigen/Zurigo
- obiettivo una misura di  $\tau_{\mu^+}$  con 2 ppm di incertezza ( $G_F$  con 1 ppm) – raggiungibili 5 ppm – pubblicati 16 ppm
- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu}$  (DC,  $p = 165$  MeV/c, 80%  $\pi^+$ , 14.%  $e^+$ , 5.5%  $\mu^+$ ) seguito da  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_{\mu} + \nu_e$  a riposo
- i  $\pi$  si fermano nel bersaglio (attivo, 32x48 pixel, barrette scintillatore plastico 4x4x200 mm<sup>3</sup>) dopo aver perso tutta l'energia – il bersaglio circonda a  $4\pi$  il  $\mu$  che decade (per essere indipendenti dalla polarizzazione del  $\mu$ ) – c'è comunque un campo magnetico dipolare per misurare  $P_{\mu}$
- lettura delle barrette con fibre WLS e Hamamatsu H6568-10 PositionSensitivePMT

# FAST

- l'assorbitore a cuneo distribuisce i punti di arresto dei  $\pi^+$  uniformemente
- si registrano i tempi di decadimento della catena  $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$  usando CAEN V767 multihit TDC (da  $-8 \mu\text{s}$  a  $+22 \mu\text{s}$  rispetto al  $\pi$ -stop)
- trigger LV2 ( $\pi \rightarrow \mu$  decay), 30 kHz, in totale  $\sim 4 \cdot 10^{11}$  eventi ( $\sim 10^{10}$  pubblicati)



# Il rivelatore

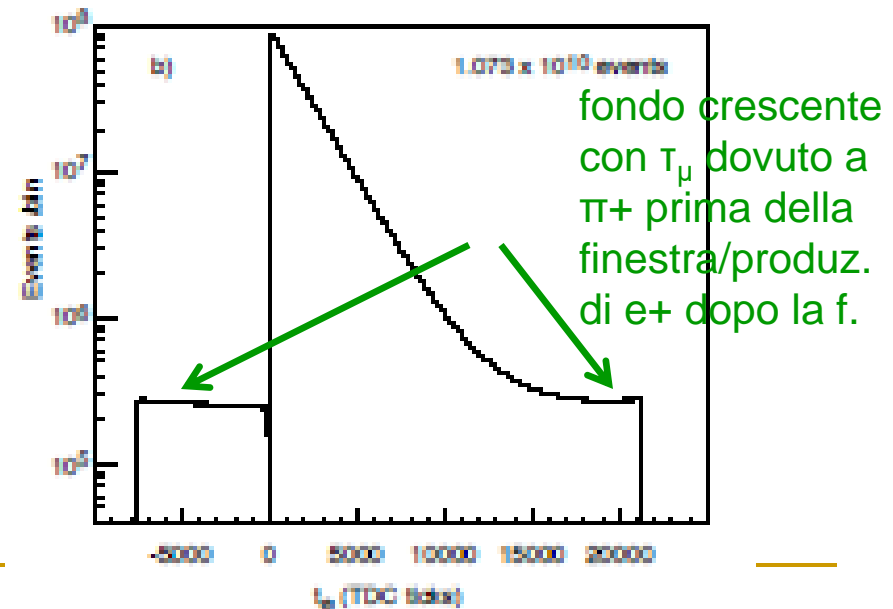
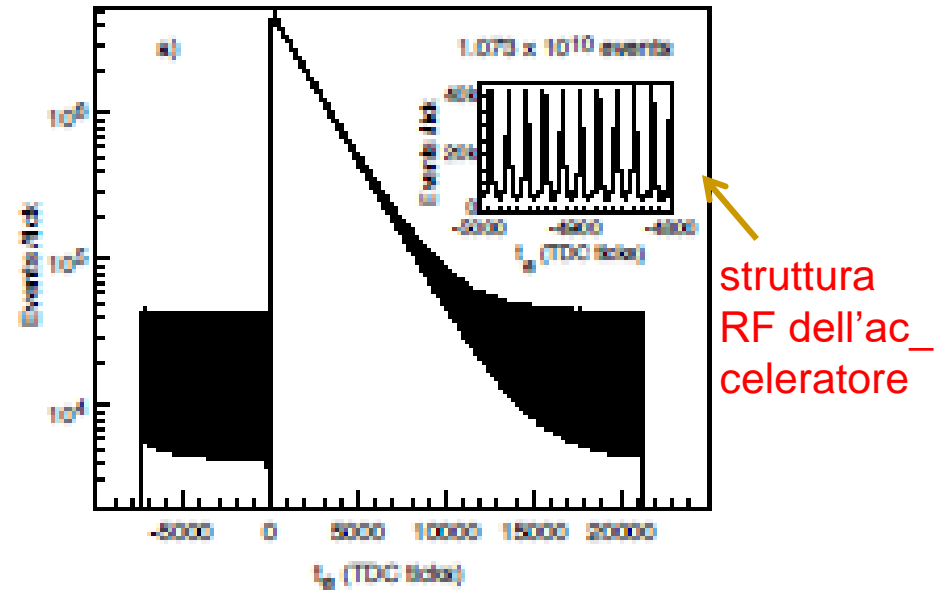
la lettura delle barrette è mappata in modo particolare per distribuire (e minimizzare) gli effetti sistematici dovuti a problemi locali (variazione di efficienza etc.)



- bersaglio:  
32x48 =  
1536 pixel,  
ciascuno  
letto con 2  
fibre WLS

# FAST/2

- per la misura finale LV2 deve operare ad 1 MHz,  $\sim 7$  TB/g di dati  $\rightarrow$  l'analisi è fatta online accumulando 1200 istogrammi separati di vita media (informazioni per la misura e lo studio dei sistematici)
- trasferimento dati dai 4 crates VME a 20 MB/s a 4 PCs per il DAQ, poi ad una farm di PCs per l'analisi attraverso un Gigabit ethernet switch
- scala dei tempi: Rb atomic clock 30 MHz ( $\sim 0.5$  ppm)
- il fondo a tempi  $-vi$  è dovuto a perdita di un  $e^+$  e coincidenza con un falso  $e^+$  (struttura del fascio visibile nell'inserto)



a) bin  $\sim 1.04$  ns; b) bin integrato su 19 ns (periodo acceleratore)

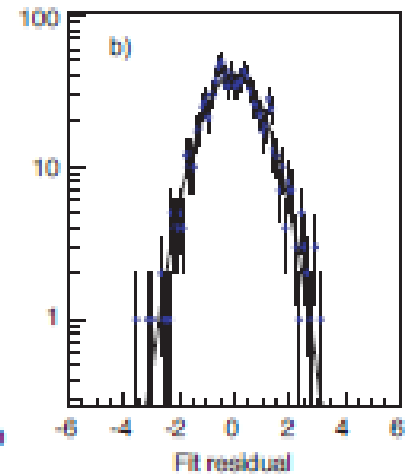
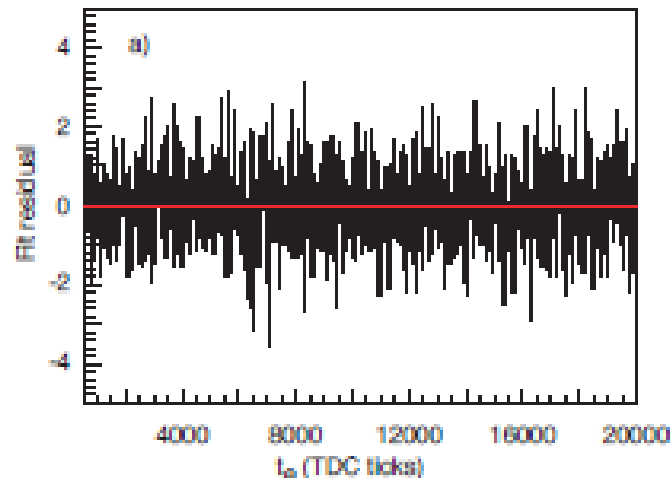


# FAST/3

- fit  $N(t_e) = f_{\text{TDC}}(t_e) (\mathbf{A}e^{-t_e/\tau_\mu} + \mathbf{B}e^{t_e/\tau_\mu} + \mathbf{C})$  per tempi  $+vi$   
 $f_{\text{TDC}}$  – non linearità del TDC
  - A** segnale di decadimento del  $\mu$  (96.82%)
  - B** fondo correlato crescente ( $\pi$  del fascio) (0.002%)
  - C** fondo scorrelato (3.15%)
- $\tau_{\mu^+} = [2.197083 (32) (15)] \mu\text{s}$  (stat) (sist)

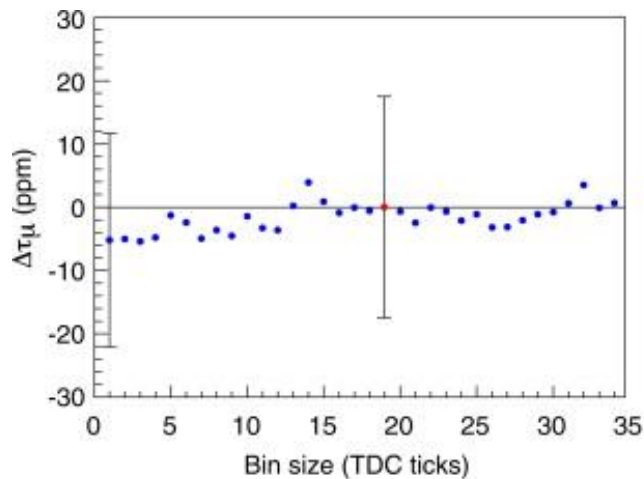
in grassetto  
i parametri  
fittati

- (a) residui del fit vs  $\tau_\mu$  in  $\sigma$   
(b) istogramma del numero di residui vs il loro valore, che mostra un perfetto andamento gaussiano  $\mu = -0.001 \pm 0.031$ ,  $\sigma = 1.003 \pm 0.022$ ,  $\chi^2/n_{\text{dof}} = 68.3/77$ ,  $p = 75\%$

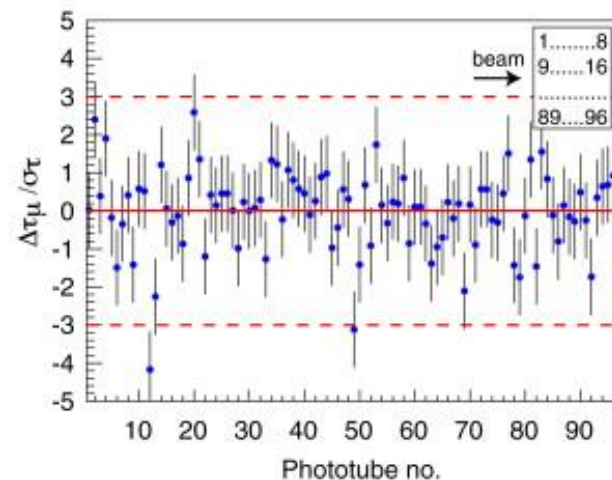


# FAST/4 – alcuni sistematici

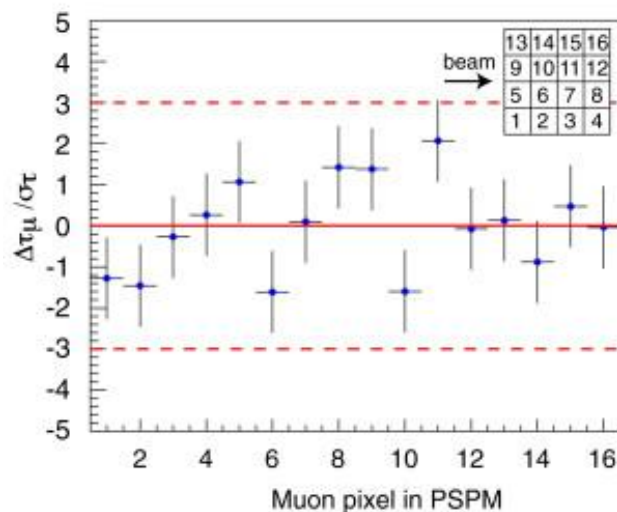
$\tau_\mu$  in funzione di vari parametri: (a) bin size (il punto a 19 tick del TDC è quello usato per il fit nominale di  $\tau_\mu$ , l'errore statistico è mostrato solo per il caso non-ribinnato e per quello ribinnato con la RF), (b) PSPM che contiene il  $\pi$ -stop, (c) posizione del  $\mu$  nel PSPM, (d) posizione del  $\mu$  relativa ad un  $\pi$ -stop in un particolare pixel (pixel 5)



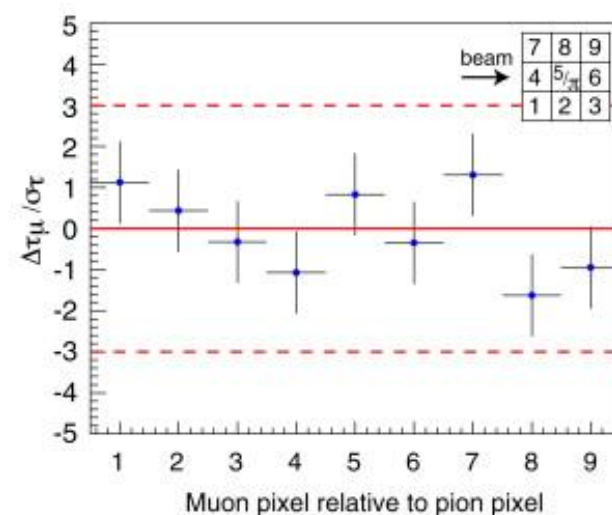
(a)



(b)



(c)



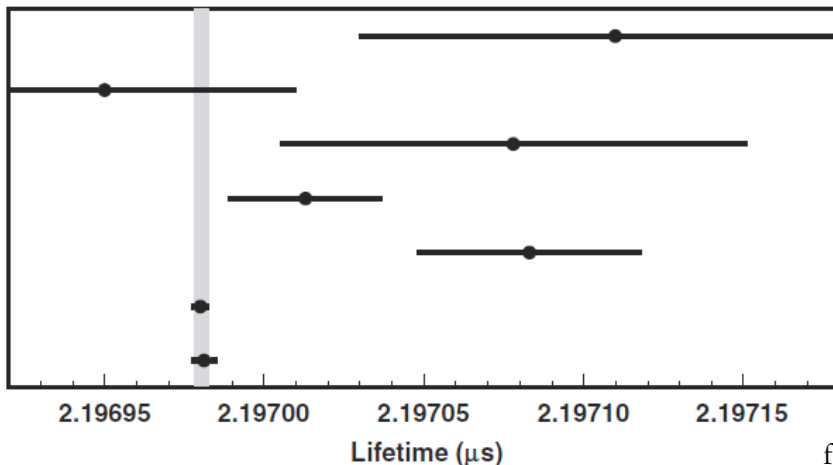
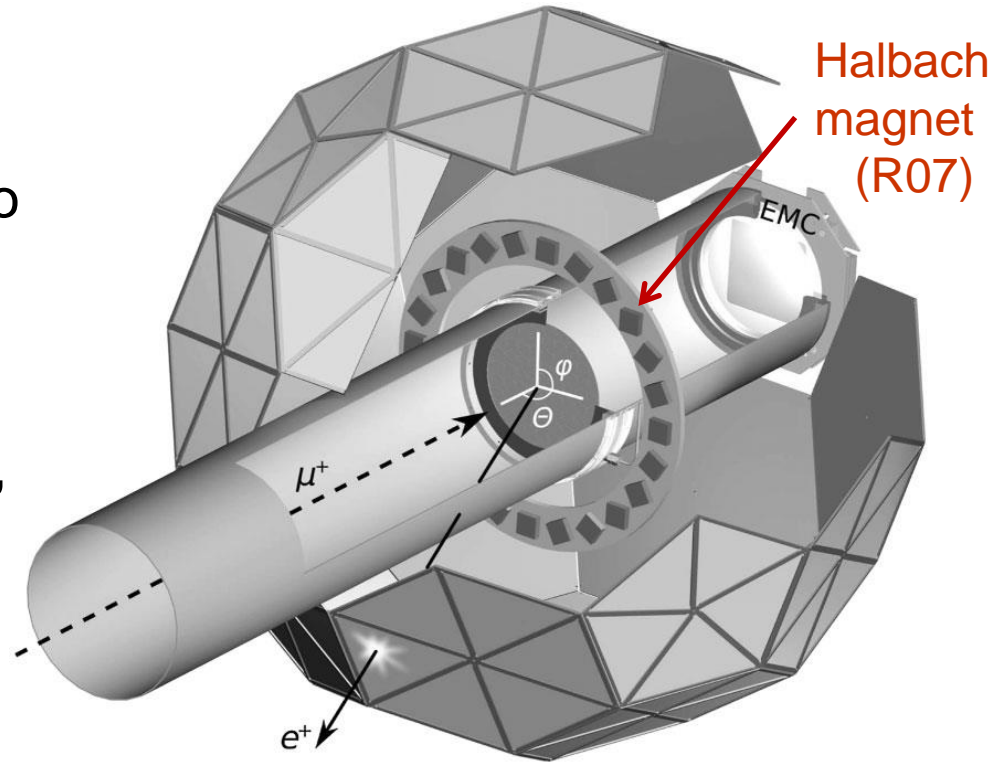
(d)

# MuLan

si fermano i  $\mu$  in un fascio pulsato al PSI e si misura il t di decadimento (bersagli di AK-3 ferromagnetico, 0.4 T, run2006, e  $\text{SiO}_2$  con  $B=0.013$  T, Halbach magnet, run2007)

170 tile scintillatori triangolari (x2)

$1.6 \cdot 10^{12}$   $\mu$  a  $10^7$   $\mu/s$

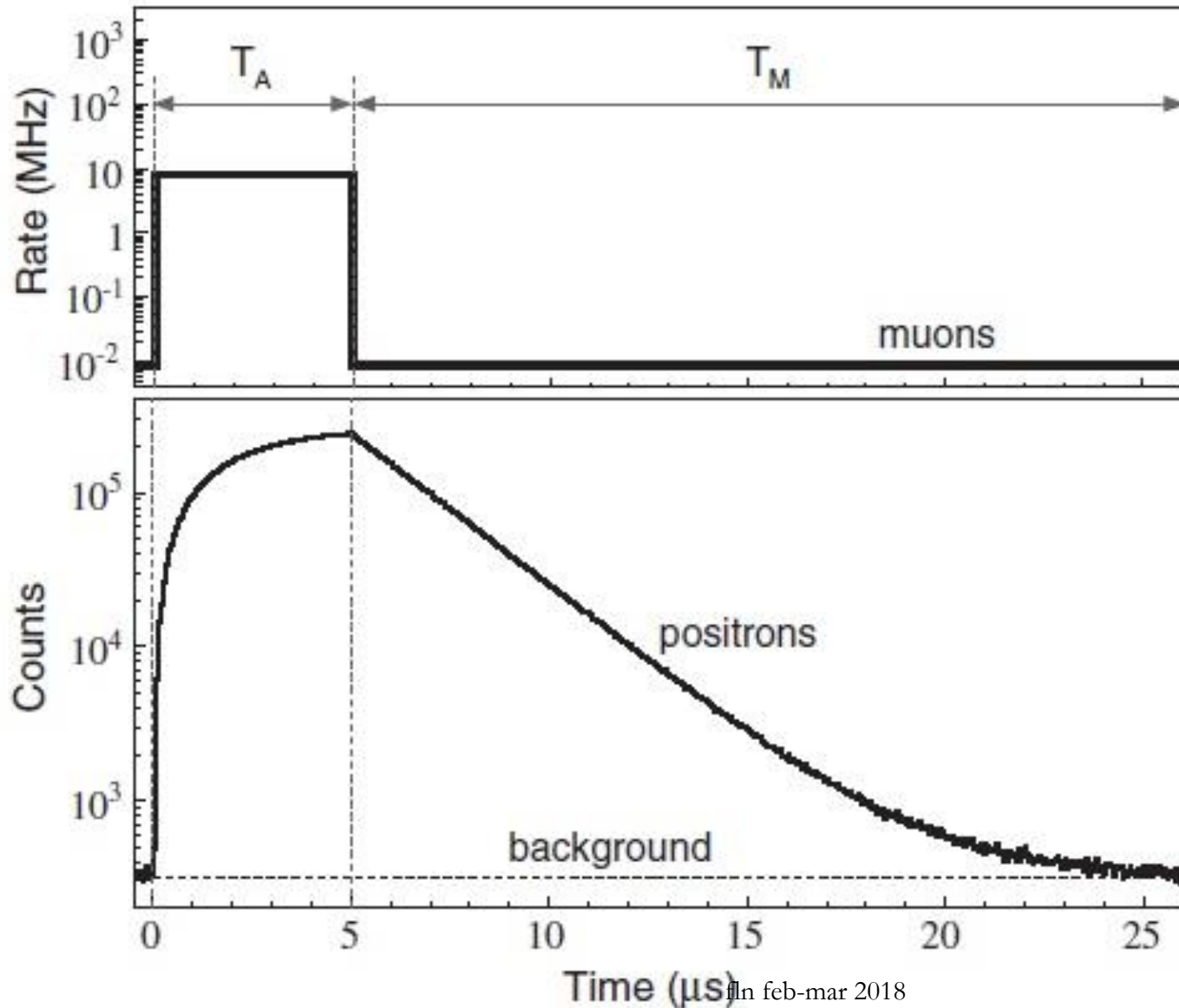


fln feb-mar 2018

set-up il piú possibile simmetrico (per evitare effetti dovuti alla polarizzazione)

sfasamento dell'insieme di  $\mu$  nei bersagli (precessione,  $\nu_\mu = 0.135$  GHz/T (R06),  $\nu_M = 13.9$  GHz/T ( $\text{SiO}_2$ , R07, paramagn.  $\mu^+e^-$  formation, precesses faster) <sup>27</sup>

# MuLan/2 – principio della misura



tecnica del fascio  
pulsato

T<sub>A</sub> accumulazione  
dei  $\mu$  (con fascio):  
5  $\mu$ s – si crea la  
«sorgente»

T<sub>M</sub> misura del  
decadimento del  $\mu$   
(senza fascio):  
22  $\mu$ s – la si lascia  
decadere

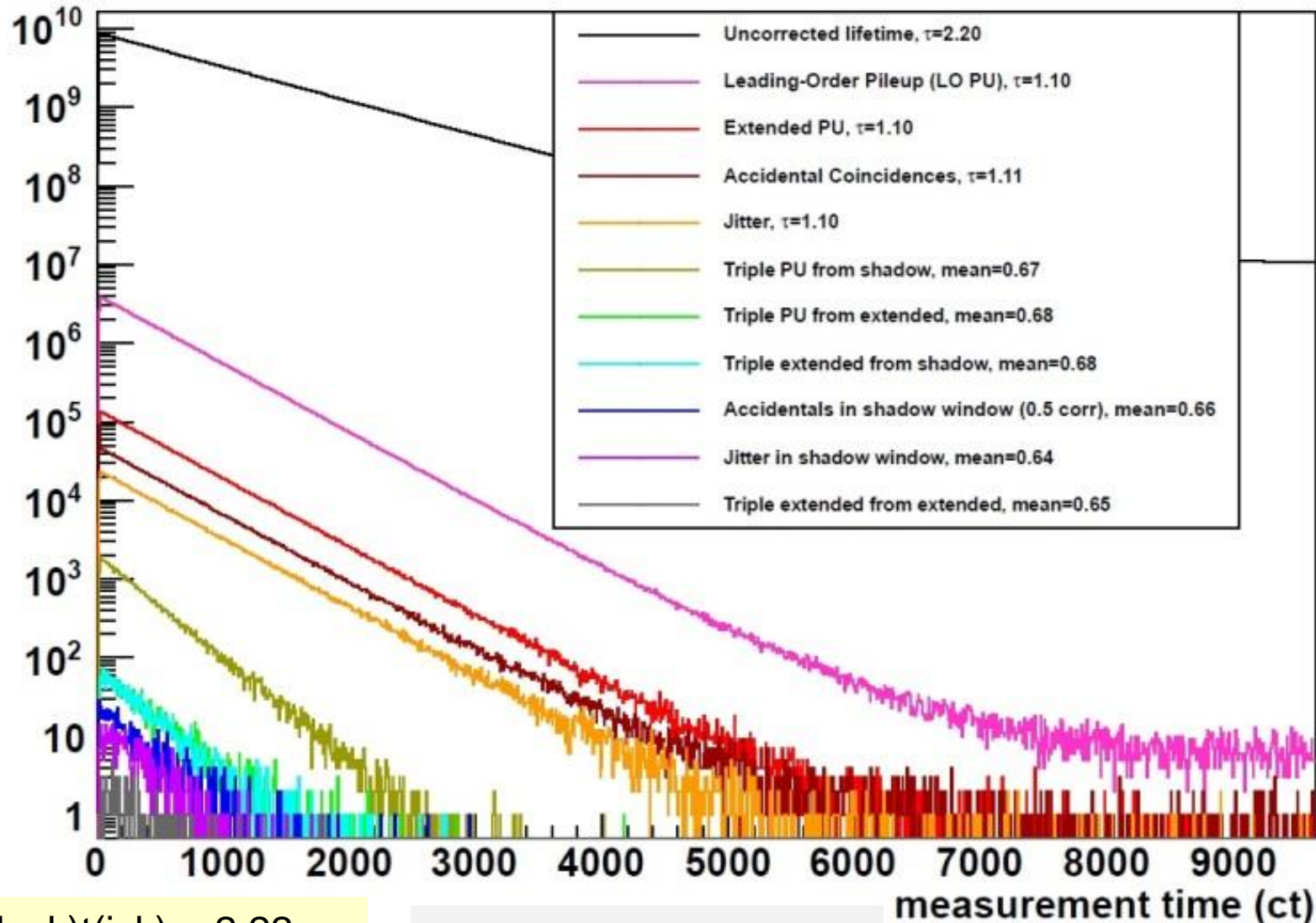
in alto: tempi di  
arrivo dei  $\mu^+$

in basso: tempi di  
arrivo degli  $e^+$

# MuLan correzioni per il PileUp

ad es.  $\text{leading\_order\_PU} = e^{-t/\tau} * f * e^{-t/\tau} \sim e^{-2t/\tau}$  con  $f = f(\text{ADT})$

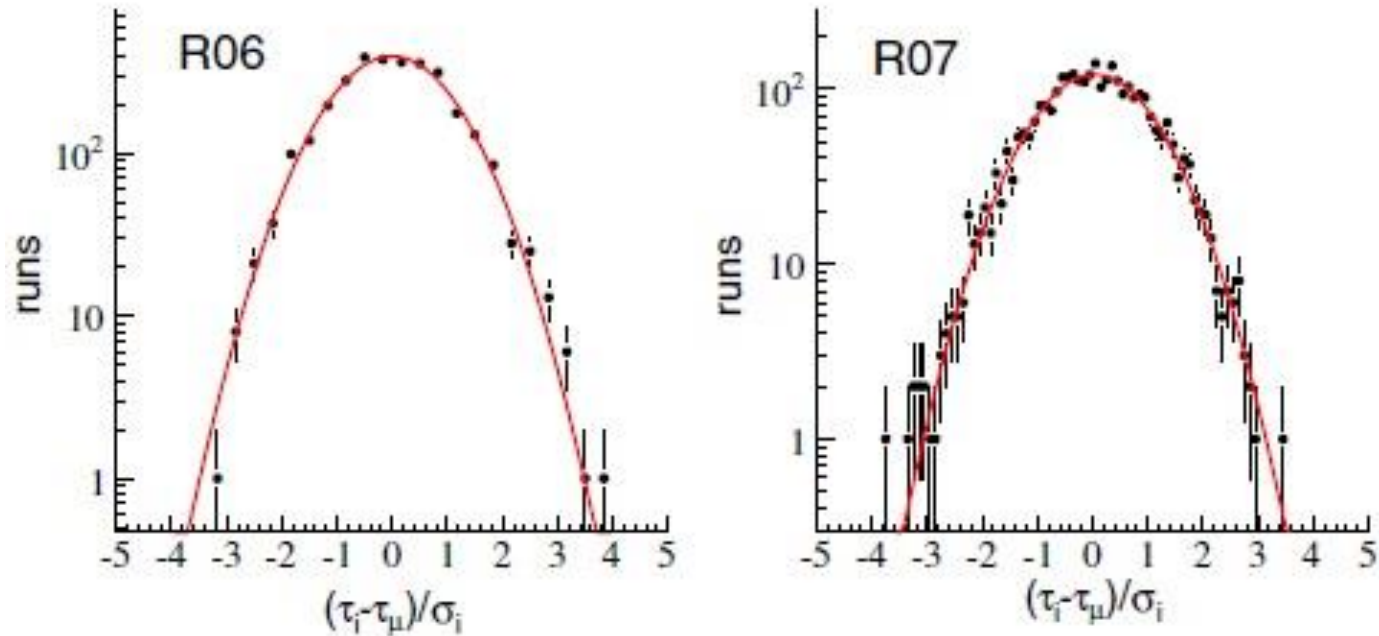
A(rtif)D(ead)T(ime) = 6 ct



1 c(lock)t(ick) = 2.22 ns

(non mostrato a lezione)

# MuLan consistenza delle misure



The distribution of the normalized deviations of the fitted lifetimes from the individual runs from the final result. The data points are the run-by-run results and the solid curve is a least squares fit to a Gaussian distribution. The left panel is the AK-3 data set (2006) and the right panel is the quartz data set (2007).

# Bibliografia – misure recenti di $\tau_{\mu^+}$

- MuLan Collaboration: D.M. Webber et al. Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 041803; V. Tishchenko et al., Phys. Rev. **D87** (2013) 052003. The mean life of  $\mu^+$  was measured to a precision of 1 ppm using a low-energy, pulsed muon beam stopped in a ferromagnetic target (and, as a cross-check, in a quartz target), which was surrounded by a scintillator detector array. The result,  $\tau_{\mu^+} = 2.1969803(22) \mu\text{s}$ , is **much more precise** (1 ppm) **than the previous world average**. The new value determines the Fermi constant  $G_F = 1.1663787(6) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$  (0.5 ppm). The difference wrt previous WA is  $\approx 3 \sigma$ .
- FAST Collaboration: A. Barczyk et al., Phys. Lett. **B663** (2008) 172-180 An initial measurement of the  $\mu^+$  lifetime to a precision of 16 parts per million (ppm) was performed with the FAST detector at the Paul Scherrer Institute. The result is  $2.197083(32)(15) \mu\text{s}$ , where the first error is statistical and the second is systematic. The muon lifetime determines the Fermi constant,  $G_F = 1.166352(9) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$  (8 ppm).

# Decadimenti rari del $\mu$ e CLFV

- Il  $\mu$  potrebbe essere la chiave del mistero del flavour, osservando la ChargedLFV in alcuni decadimenti rari del  $\mu^+$  in  $e^+$  senza neutrini, oppure nella conversione di  $\mu$  in altri leptoni carichi, visto che LFV è già osservata con i  $\nu$  che oscillano fra i vari sapori
- CLFV può essere osservata anche con  $\tau$  (i limiti sono peggiori che non con i  $\mu$ , perché l'intensità delle sorgenti di  $\tau$  è inferiore, però gli effetti potrebbero essere maggiori)



# Decadimenti rari del $\mu$ (CLFV): limiti sperimentali

Canale	UL(90%CL)	Anno	Esp./Lab.
$\mu^+ \rightarrow e + \gamma$	$1.2 \cdot 10^{-11}$	2002	MEGA/LAMPF
	$4.2 \cdot 10^{-13}$	2016	MEG/PSI
$\mu^+ \rightarrow e + e + e^-$	$1.0 \cdot 10^{-12}$	1988	SINDRUM I/PSI
$\mu + e^- \rightarrow \mu^- + e^+$	$8.3 \cdot 10^{-11}$	1999	MACS/PSI
$\mu^- \text{-Ti} \rightarrow e^- \text{-Ti}$	$4.3 \cdot 10^{-12}$	1993	SINDRUM II/PSI
$\mu^- \text{-Ti} \rightarrow e + \text{Ca}^*$	$3.6 \cdot 10^{-11}$	1998	“
$\mu^- \text{-Pb} \rightarrow e^- \text{-Pb}$	$4.6 \cdot 10^{-11}$	1998	“
$\mu^- \text{-Au} \rightarrow e^- \text{-Au}$	$7 \cdot 10^{-13}$	2006	“

# CLFV limiti sperimentali (W. Marciano et al. 2008)

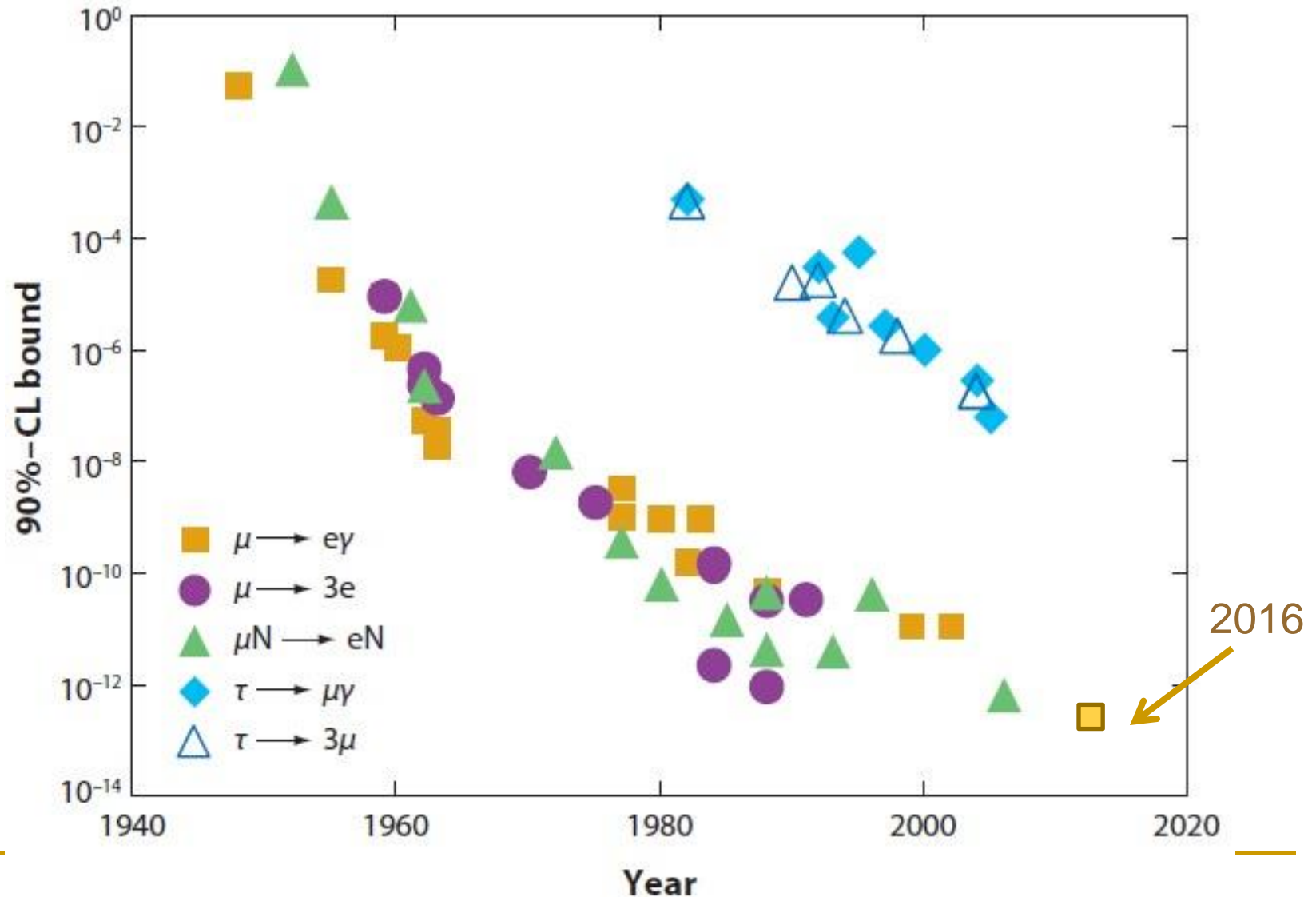
Reaction	Current bound	Reference	Expected	Possible
$\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma)$	$<1.2 \times 10^{-11}$	28	$2 \times 10^{-13}$	$2 \times 10^{-14}$
$\mathcal{B}(\mu^\pm \rightarrow e^\pm e^+ e^-)$	$<1.0 \times 10^{-12}$	37	–	$10^{-14}$
$\mathcal{B}(\mu^\pm \rightarrow e^\pm \gamma \gamma)$	$<7.2 \times 10^{-11}$	92	–	–
$R(\mu^- \text{Au} \rightarrow e^- \text{Au})$	$<7 \times 10^{-13}$	15	–	–
$R(\mu^- \text{Al} \rightarrow e^- \text{Al})$	–		$10^{-16}$	$10^{-18}$
$\mathcal{B}(\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm \gamma)$	$<5.9 \times 10^{-8}$	Table 2		$\mathcal{O}(10^{-9})$
$\mathcal{B}(\tau^\pm \rightarrow e^\pm \gamma)$	$<8.5 \times 10^{-8}$	Table 2		$\mathcal{O}(10^{-9})$
$\mathcal{B}(\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm \mu^+ \mu^-)$	$<2.0 \times 10^{-8}$	Table 2		$\mathcal{O}(10^{-10})$
$\mathcal{B}(\tau^\pm \rightarrow e^\pm e^+ e^-)$	$<2.6 \times 10^{-8}$	Table 2		$\mathcal{O}(10^{-10})$
$Z^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$	$<1.7 \times 10^{-6}$	90		
$Z^0 \rightarrow e^\pm \tau^\mp$	$<9.8 \times 10^{-6}$	90		
$Z^0 \rightarrow \mu^\pm \tau^\mp$	$<1.2 \times 10^{-5}$	91		
$K_L^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$	$<4.7 \times 10^{-12}$	74		$10^{-13}$
$D^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$	$<8.1 \times 10^{-7}$	78		$10^{-8}$
$B^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$	$<9.2 \times 10^{-8}$	79		$10^{-9}$

PDG2016  
<4.2 10<sup>-13</sup>

<4.4 10<sup>-8</sup>  
<3.3 10<sup>-8</sup>  
<2.1 10<sup>-8</sup>  
<2.7 10<sup>-8</sup>

Data from current experimental bounds, expected improvements from existing or funded experiments, and possible long-term advances.

CLFV limiti sperimentali [W. Marciano et al., Ann. Rev. Nucl. Part. Sci 58 (2008) 315]



# $M \rightarrow \text{anti}M$ (th)

Muonium Antimuonium Conversion Spectr.  
 experiment: L. Willmann et al.,  
 Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 49-52

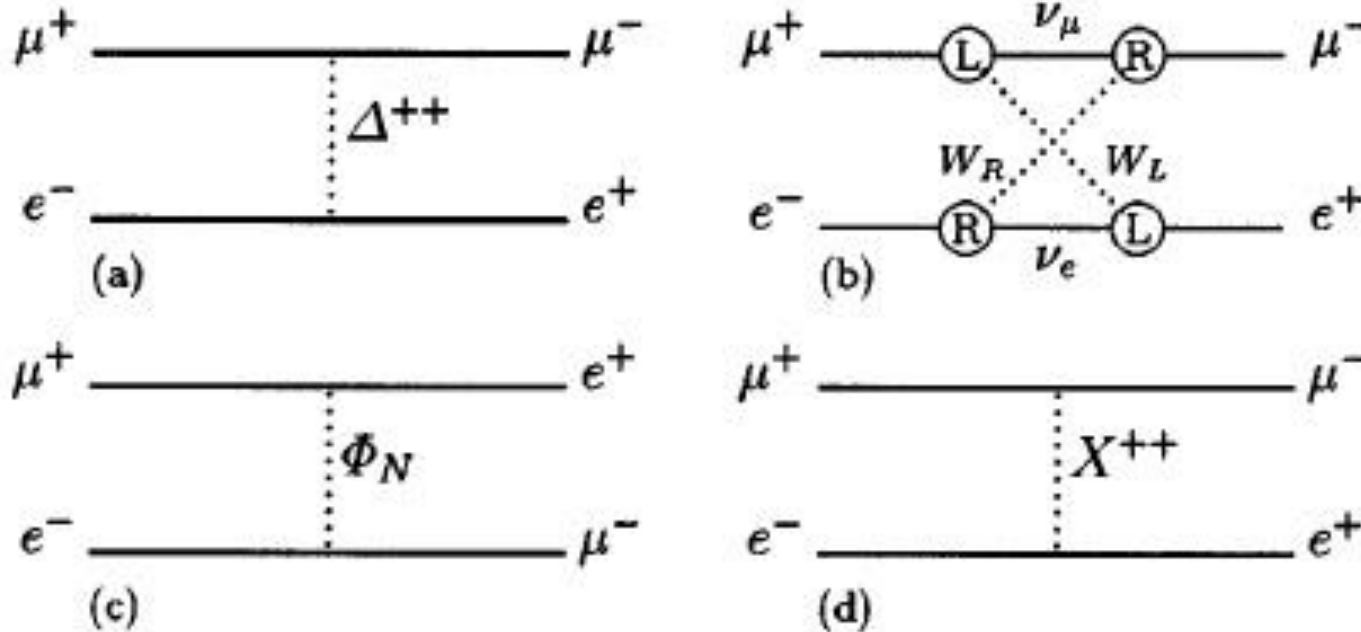


FIG. 1. Muonium-antimuonium conversion in theories beyond the standard model. The interaction could be mediated, e.g., by (a) doubly charged Higgs boson  $\Delta^{++}$  [3,4], (b) heavy Majorana neutrinos [3], (c) a neutral scalar  $\Phi_N$  [5], e.g., a supersymmetric  $\tau$ -sneutrino  $\tilde{\nu}_\tau$  [6,7], or (d) a bileptonic flavor diagonal gauge boson  $X^{++}$  [8,9].

# Conversione muonio-antimuonio (1999)

■ The MACS apparatus at PSI searching for  $M(\mu^+e^-)$ -antiM conversion. The signature requests the energetic  $e^-$  from the  $\mu^-$  decay of antiM in a magnetic spectrometer in coincidence with the atomic shell  $e^+$ , which is accelerated and magnetically guided onto a microchannel plate (MCP), and at least one annihilation photon in a CsI calorimeter.

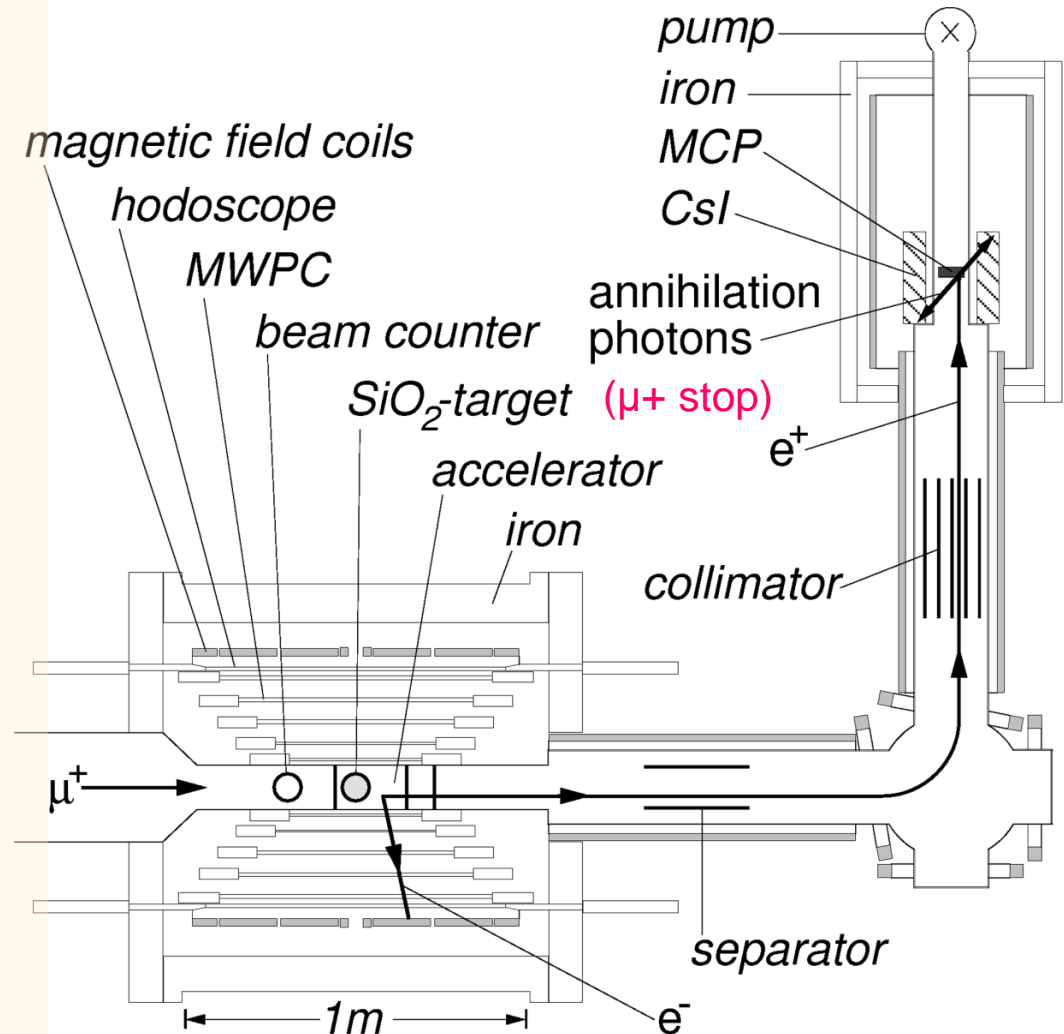
■ 26 MeV/c  $\mu$ ;  $8 \cdot 10^6 \mu/s$

■ 1730 h run;  $5.6 \cdot 10^{10} M$

■ beam scintillator  $280 \mu m$

■ expect. bckgd  $\sim 2$  evts

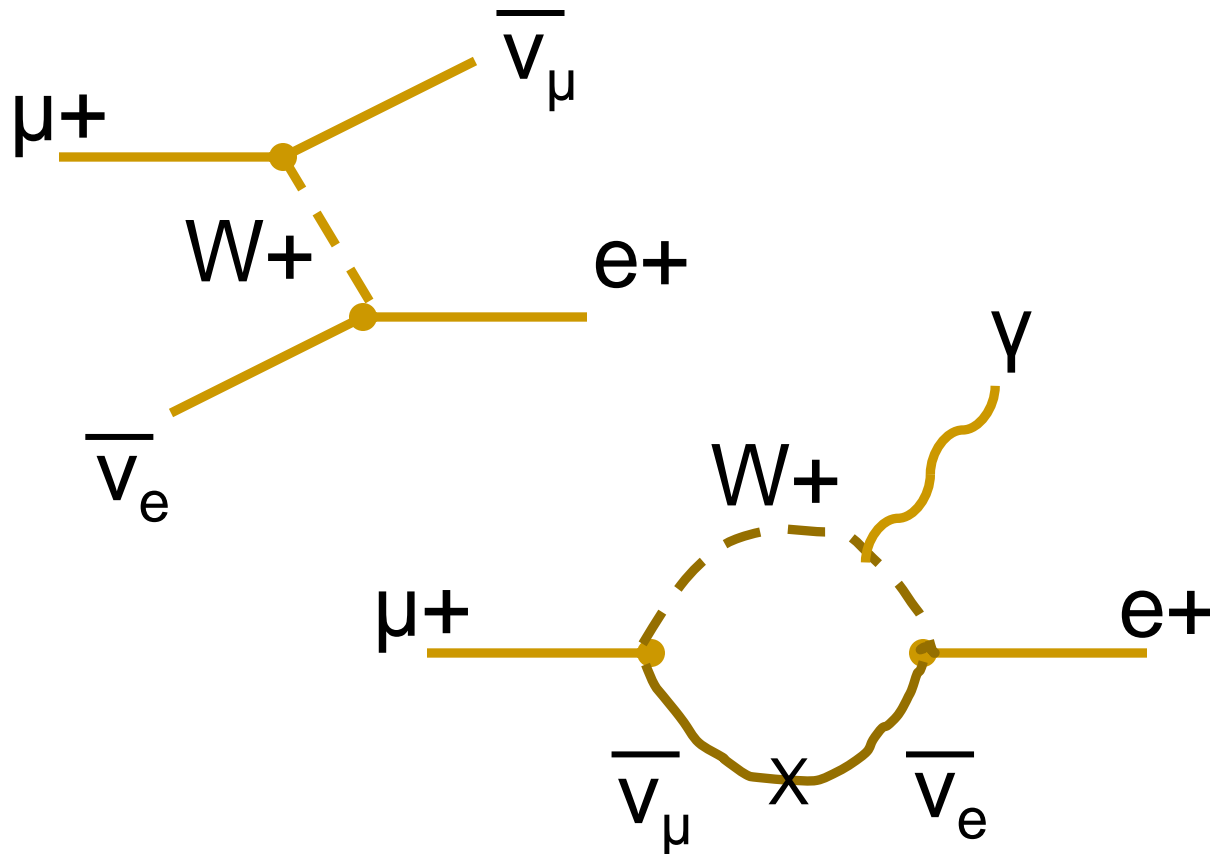
■ limit  $< 8.3 \cdot 10^{-11}$  (90% CL)



# Decadimenti rari del $\mu$ ( $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ , CLFV)

- SM: introducendo masse e mixing dei neutrini il processo è permesso, ma  $BR \sim (\Delta m_{ij}^2/M_W^2)^2 \leq 10^{-51}$  – troppo piccolo per una misura (cfr con  $b \rightarrow s \gamma$ ,  $BR \sim 10^{-4}$ , grazie alla grande massa del top) – discorso simile per  $\mu^- N \rightarrow e^- N$
- BSM: SUSY, GUT & teorie con extra dimensioni predicono BR nell'intervallo  $10^{-12}$ - $10^{-14}$ , misurabile
  - Barbieri, Hall, Strumia NPB 445 (1995) 219
  - Hisano, Noumura, Yanagida PLB 437 (1998) 351
  - Raidal et al. Eur.Phys.J. C57 (2008) 13

# Michel decay vs $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ in SM



# $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ , considerazioni sperimentali

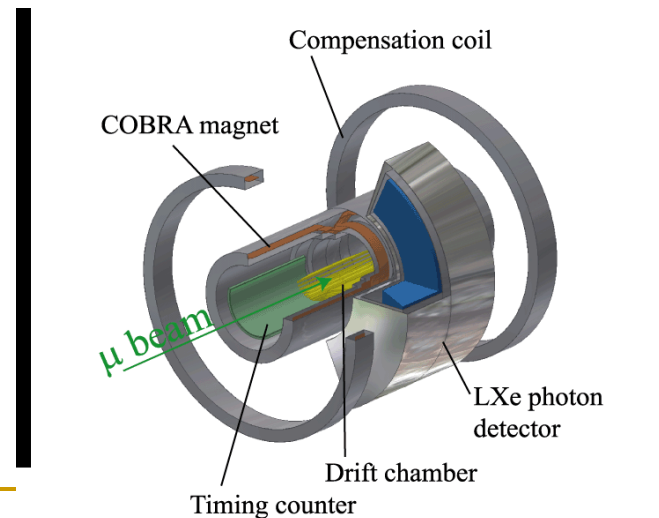
- $\mu^+$  a riposo, decadimento a due corpi, segnature
  - $\gamma$  ed  $e^+$  collineari
  - $E_\gamma = E_{e^+} = m_\mu/2 = 52.8 \text{ MeV}$
  - $t_\gamma = t_{e^+}$ 
    - tracciamento preciso
    - calorimetria superba ( $\Delta E=1.2\%$ ,  $\Delta t=65\text{ps}$ ,  $\Delta x \approx 4\text{mm}$ ; protot.)
    - ottimo timing
- fondi
  - Radiative Michel Decay  $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_e \bar{\nu}_\mu \gamma$  con  $\bar{\nu}_e \bar{\nu}_\mu$  poco energetici (irriducibile)
  - accidentali fra un MD normale e un RMD (limite sperimentale attuale)



# Ricerca di decadimenti rari del muone: $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ (esperimento MEG)

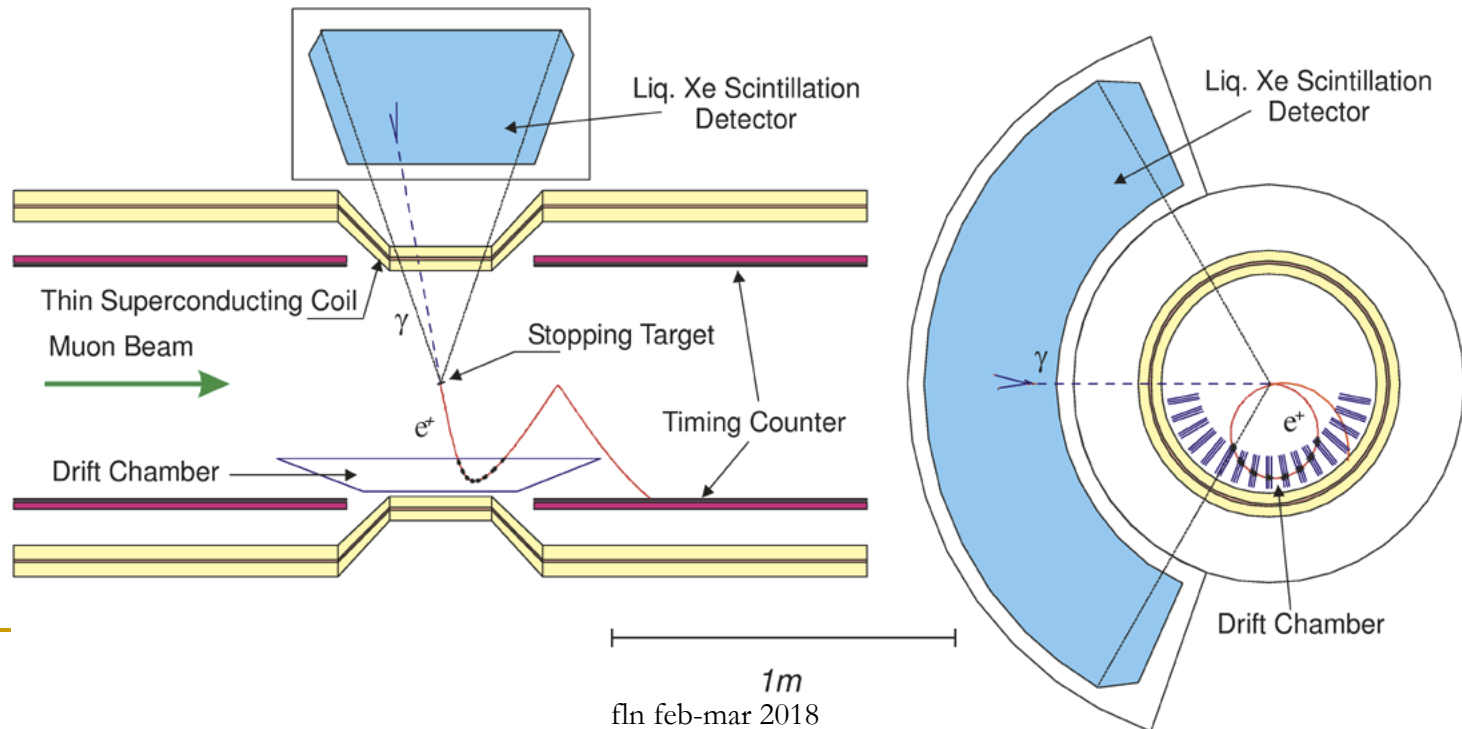


- Fascio di  $\mu$  al PSI,  $\pi E5$ , surface  $\mu$ , 26 MeV/c, alta intensità
- Calorimetro a LXe per il fotone (900 lt,  $\lambda=178$  nm)
- Camera a drift per l' $e^+$  (1%)
- Magnete superconduttore, cavo di NbTi/Cu
- stop rate  $3 \times 10^7$  Hz, totale  $3.6$  [ $3.9$ ]  $10^{14}$   $\mu$  2009-11 [2012-13]
- obiettivo  $BR < 2 \times 10^{-13}$



# MEG set-up

- The magnetic field (COBRA, COnstant Bending RAdius) is shaped such that positrons are quickly swept out of the tracking region thus minimizing the load on the detectors. The cylindrical 0.9 m<sup>3</sup> single-cell LXe detector is viewed from all sides by 846 UV-sensitive PMTs immersed in the LXe allowing the reconstruction of photon energy, time, conversion point and direction and the efficient rejection of pile-up signals

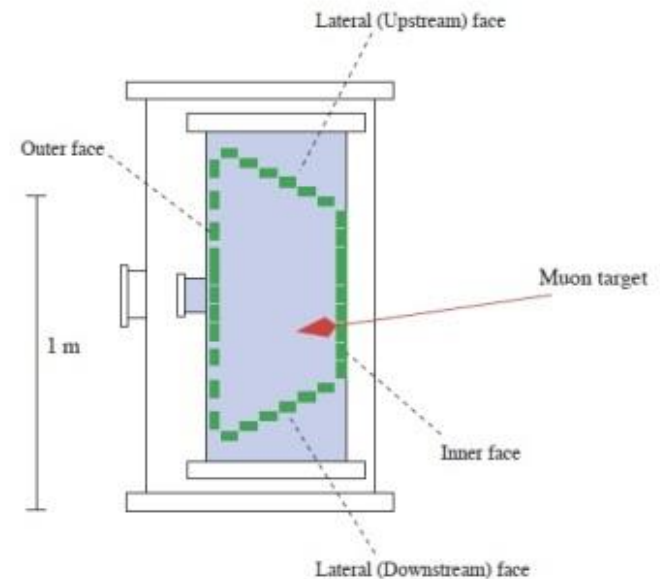
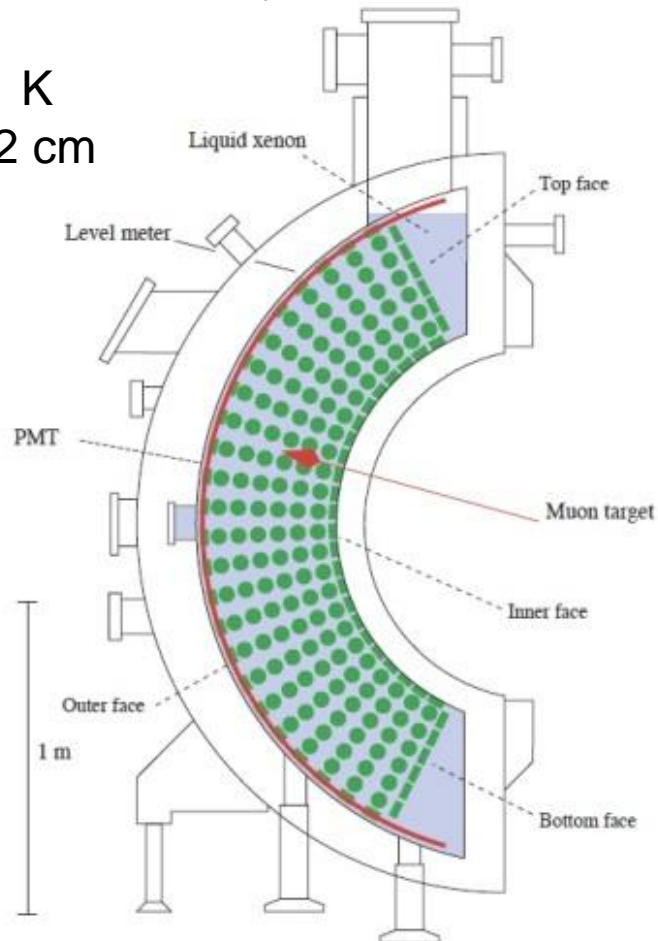


# Liquid Xe calorimeter

no radioactive isotopes  
high Z (54) and density  
2.953 kg/l  
b.p. 165.1 K  
 $X_0 = 2.872$  cm

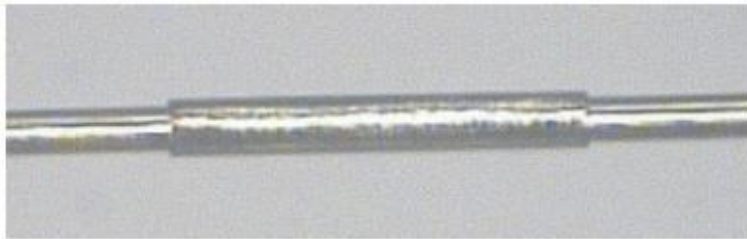
costo: LXe 800 \$/kg = 2400 \$/l →  
2.1 M\$ (prezzo del 2007, grandi  
quantità), 900 l → 2.66 t

very good scintillator: 46 ph/keV  
 $\lambda = 175$  nm

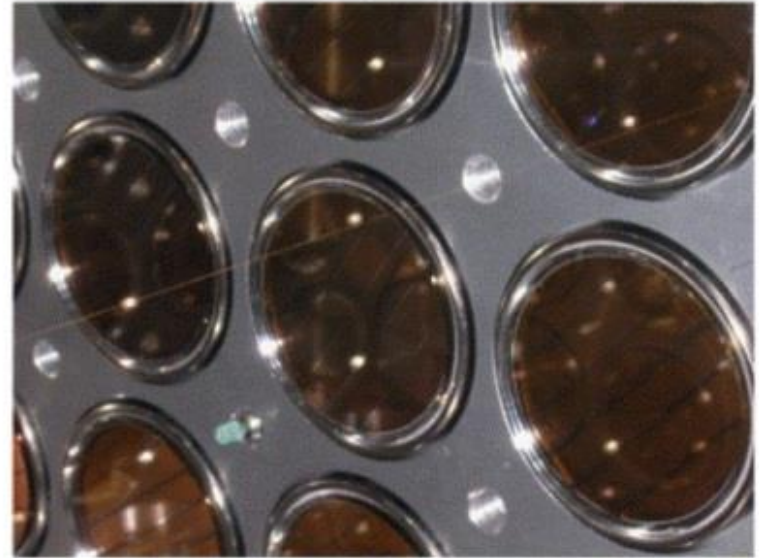


# Liquid Xe calorimeter

Special PMTs that work at LXe temperature (-110 °C), persist under high pressures and are sensitive to the VUV scintillation light of



LXe ( $\lambda \approx 178$  nm) have been developed in collaboration with Hamamatsu Photonics.

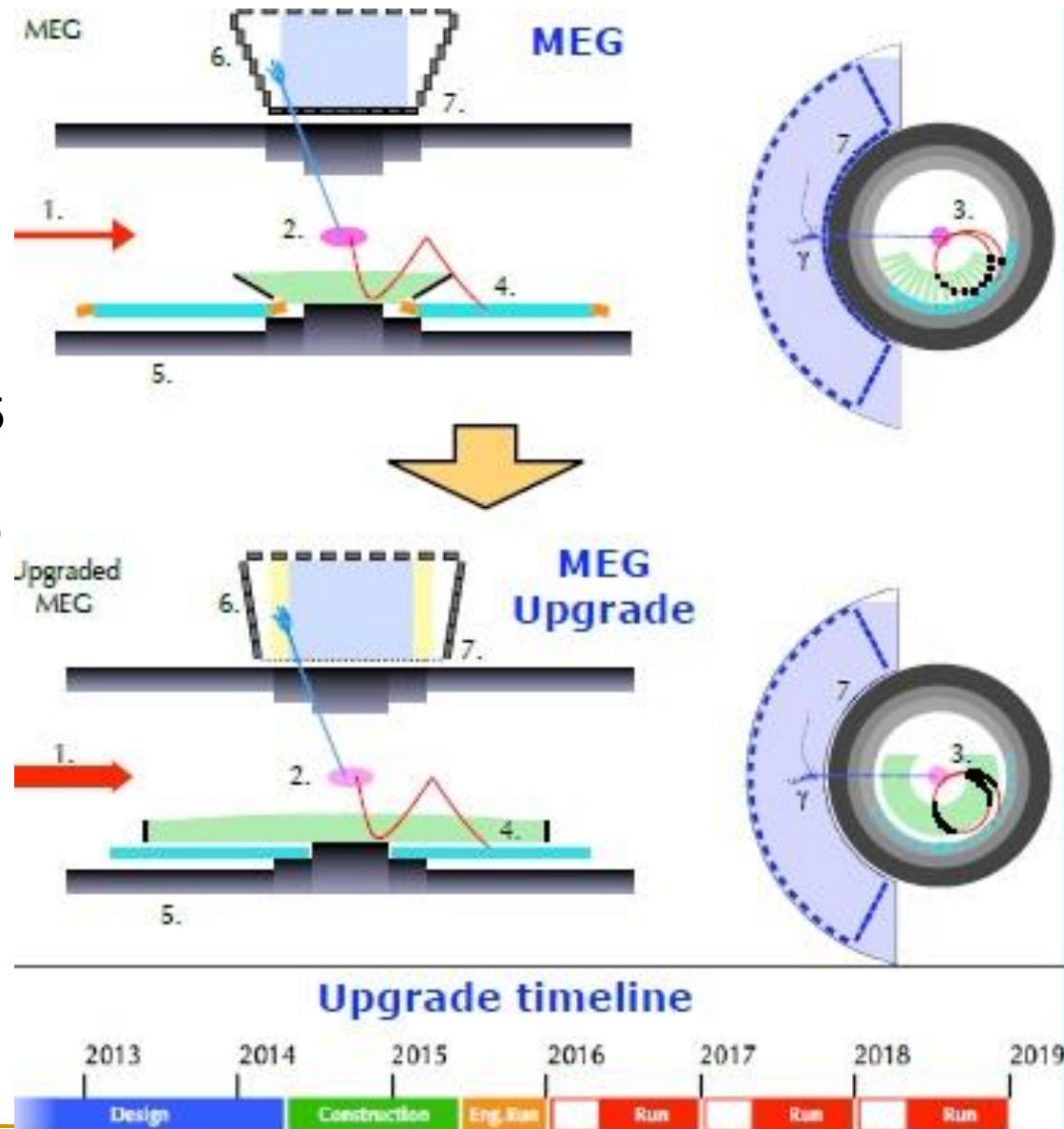


**Figure 5.**  $^{241}\text{Am}$  alpha source deposited on 100- $\mu\text{m}$  gold-plated tungsten wire (left) and source wire fixed on photomultiplier holder in second prototype (right).

Larger LXe detectors (for Dark Matter search, underground labs): XENON1T (LNGS 2200 kg, Columbia... Bologna...), LUX350 (Sanford 370 kg), both dual phase, l and g, measure also ionization charge, XMASS (Kamioka 835 kg) only scintillation light

# MEG upgrade

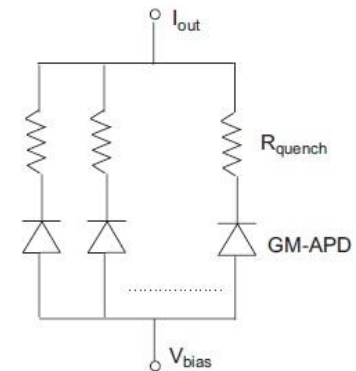
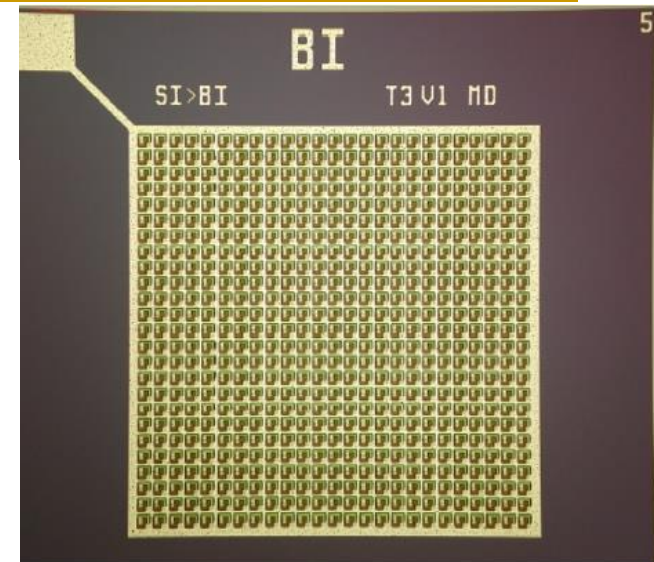
- con i dati 2012-13 il fondo diviene dominante
- nuovo obiettivo (2019) BR  $\sim 5 \cdot 10^{-14}$
- più alta intensità del fascio (1)
- bersaglio attivo, sottili fibre scintillanti, 250  $\mu\text{m}$ , lette da SiPM (2)
- DC con configurazione a fili con angolo stereo (3,4)
- nuovi contatori di timing pixellati, ad alta risoluzione, letti da SiPM (5)
- LXe letto con UV-SiPM (6,7)



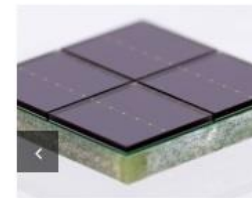
# SiliconPM

diodi a valanga (APD) in modalità Geiger, sviluppati in Russia fine anni 90 – in Italia, FBK-INFN, AdvanSiD e STMicroelectronics - Giappone, Hamamatsu (MPCC, Multi-PixelPhotonCounter) – SensL (USA)

- $A \sim 1 \times 1, 2 \times 2, 3 \times 3 \text{ mm}^2$   
pixel min  $20 \times 20$  max  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$
- Elevata PDE ( $> \text{PMT}$ ), limitata dalla geom. dei pixel (spazi morti)
- Elevato guadagno  $10^5$ - $10^6$
- Risoluzione singolo ph.el.
- Buona risoluzione temporale
- Bassa HT di alimentazione  $\sim 30$ - $80 \text{ V}$
- Insensibili a B fino a 4 T
- Spesso usati per leggere fibre WLS (1 mm diam.)
  
- Rumore termico statistico (dark current/count) proporz. ad A  $\rightarrow$  si può raffreddare, ma compare afterpulsing
- Danno da radiazioni: sensibili ai p, meno sensibili ai  $\gamma$



J-Series eStore Highlights



ArrayJ-60035-4P-BGA

\$198.00

non proprio cheap!

# Caratteristiche SiPM/MPCC

Nuovo vs vecchio modello di MPPC Hamamatsu per misure di precisione

3x3 mm<sup>2</sup>, 50 μm pixels a 25 °C in funzione di  $(V_{\text{breakdown}} +) V_{\text{overvoltage}}$

guadagno → 3 · 10<sup>6</sup>

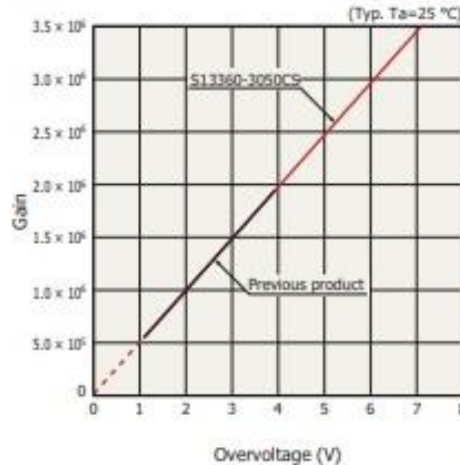
PDE → 55%

cross talk → 10%

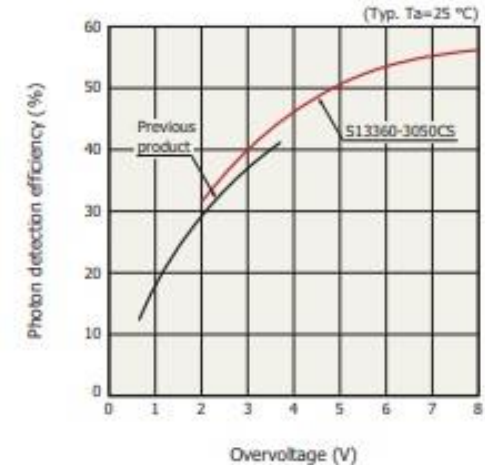
dark count → 1 MHz

Guad., PDE, ct dipendono dalla geometria dei pixel (e da come sono separati)

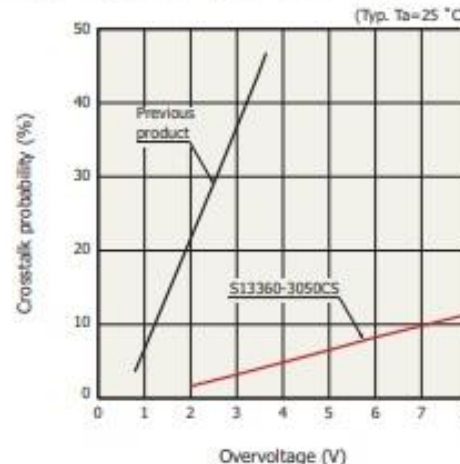
Gain vs. overvoltage



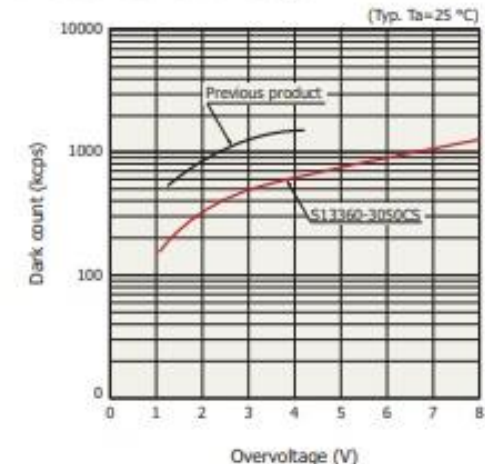
Photon detection efficiency vs. overvoltage



Crosstalk probability vs. overvoltage



Dark count vs. overvoltage

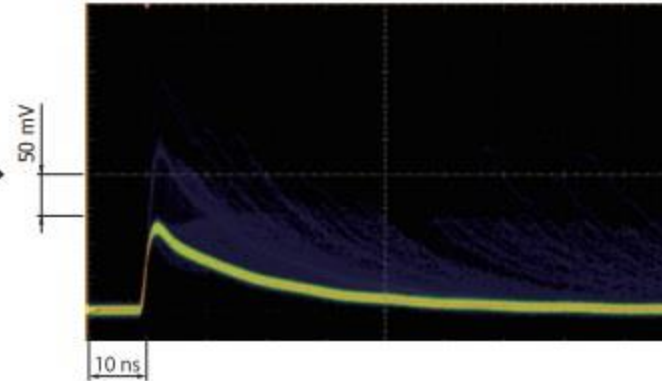
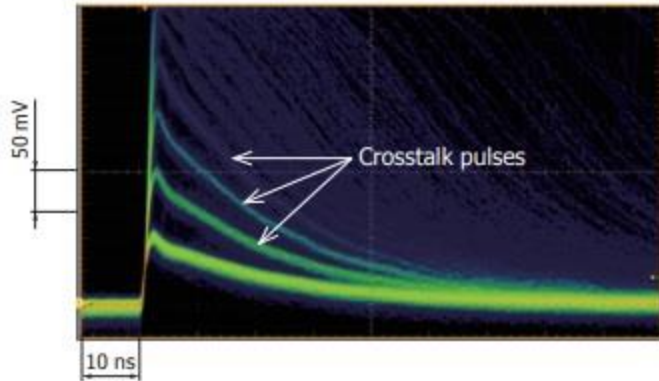


# Caratteristiche SiPM/MPPCC - 2

The pixel that detects photons may affect other pixels, making them produce pulses separate from output pulses. This phenomenon is called crosstalk. The MPPC for precision measurement employs a structure that suppresses the occurrence of crosstalk. This has drastically reduced crosstalk in comparison with previous products (rate of occurrence reduced from 44% to 3%).

Previous product (3 × 3 mm, 50 μm pitch)

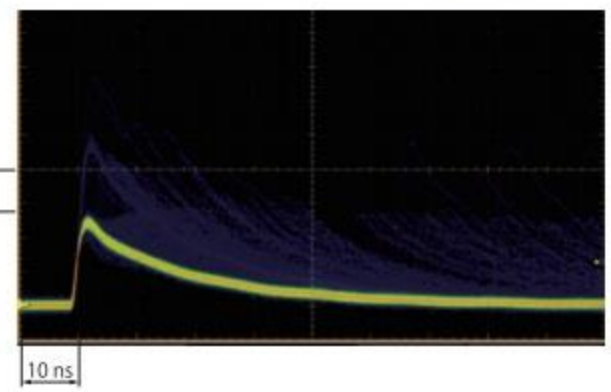
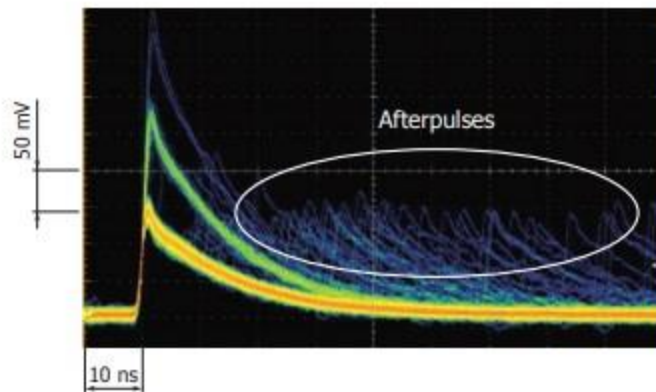
S13360-3050CS (3 × 3 mm, 50 μm pitch)



While an MPPC detects photons, delayed signals may be output separately from the output pulses. These signals are called afterpulses. The MPPC for precision measurement provides low afterpulses.

Previous product (3 × 3 mm, 50 μm pitch)

S13360-3050CS (3 × 3 mm, 50 μm pitch)

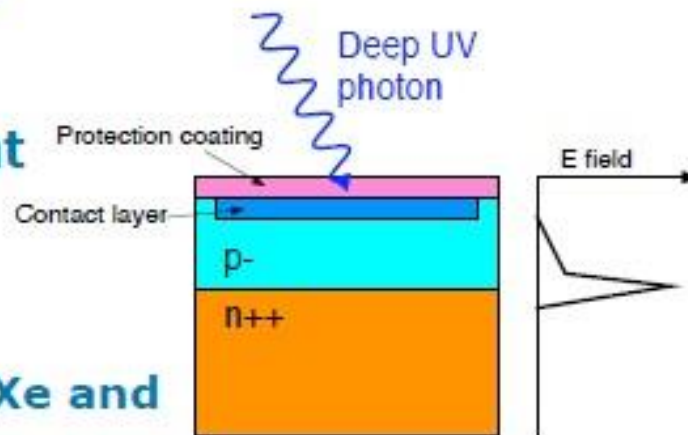




# UV-enhanced MPPC

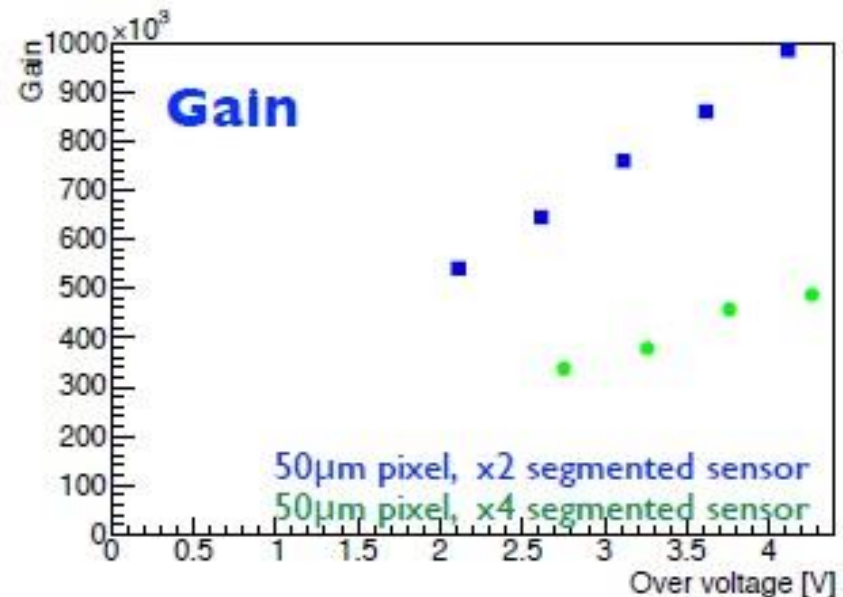
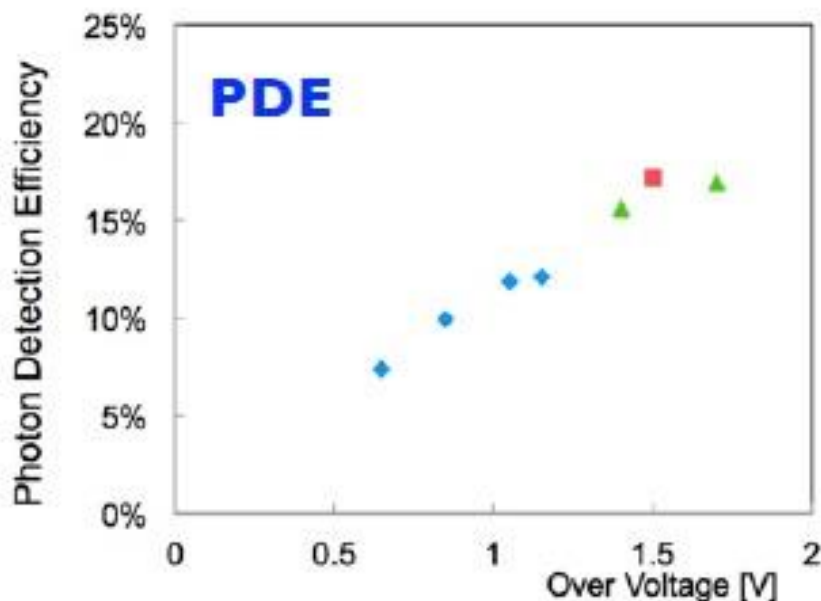
MEG  
upgrade

- Commercial SiPM is NOT sensitive to LXe scintillation light in VUV range ( $\sim 175\text{nm}$ ).
- UV-enhanced MPPC is under development in collaboration with Hamamatsu Photonics.
- Requirements
  - Photon detection efficiency (PDE) ( $> 10\%$ )
  - Large sensitive area ( $\sim 12 \times 12\text{mm}^2$ )
  - Single photon counting capability
  - Fast signal (fall time  $< 50\text{ns}$ )
- Improving sensitivity to VUV light
  - Remove protection coating
  - Thinner contact layer
  - Optimize optical matching bw/ LXe and Si (refractive index, AR coating)



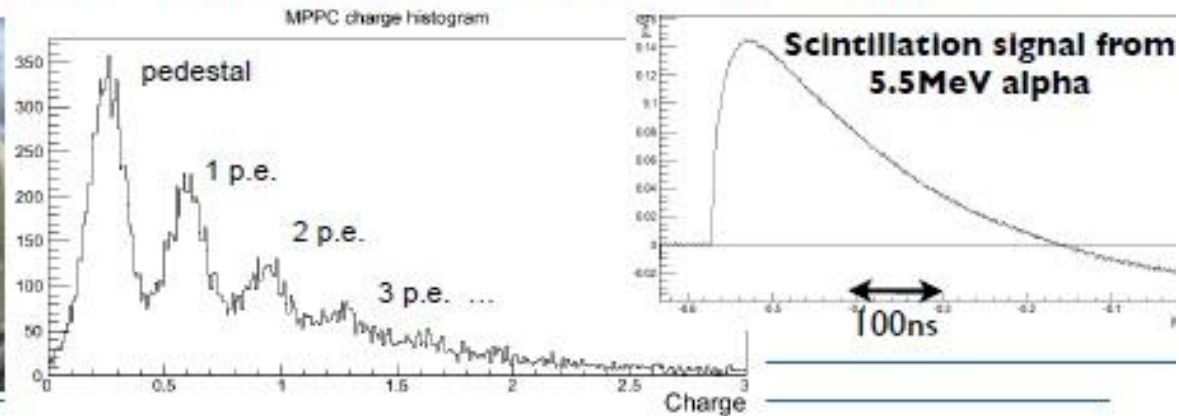
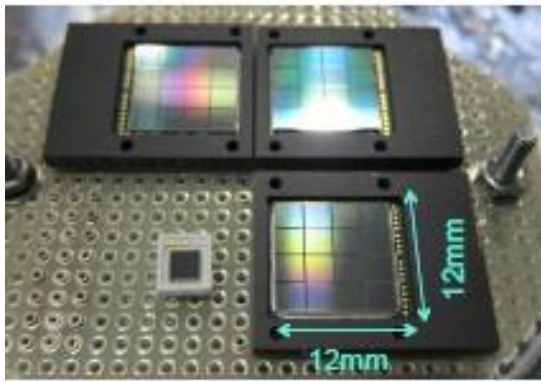
# UV-MPPC Performance

- Development of UV-MPPC is in good shape.
- LXe scintillation light is successfully detected by prototypes of UV-enhanced MPPC.
- Best prototypes already show **PDE~15%** and **gain>5×10<sup>5</sup>**, which more or less fulfill our requirement.



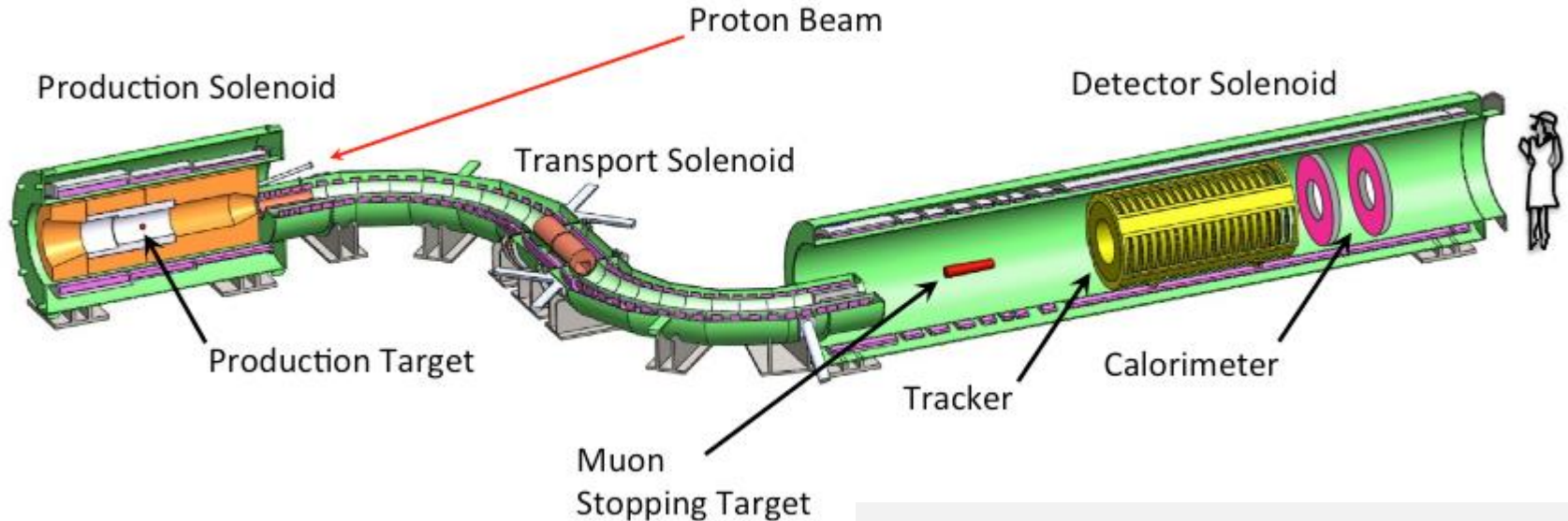
# UV-MPPC Performance

- Full size prototype successfully tested in LXe.
  - Active area:  $12 \times 12 \text{mm}^2$  ( $\leftrightarrow \leq 3 \times 3 \text{mm}^2$  for commercial MPPC)
  - 50 $\mu\text{m}$  pixel pitch, 57600 pixels.
- Single photoelectron peak is clearly resolved.
- Dark count rate is quite low ( $\sim 750 \text{Hz}$ ) at LXe temp.
- World's largest VUV-sensitive SiPM with single photon counting capability!
- Long signal tail ( $\sim 200 \text{ns}$ ) due to large sensor capacitance would be an issue ( $\rightarrow$  pileup in high rate environment). (\*)



# Mu2e (FNAL, 2019-...) $\mu^- \text{Al} \rightarrow e^- \text{Al}$

- 8 GeV p su un bersaglio di W,  $\pi$  e K prodotti sono guidati verso un Transport Solenoid (-vi, 50 MeV/c), anti-p assorbiti, poi  $\mu^-$  stop target (Al) in un Detector Solenoid con straw-tracker (15  $\mu\text{m}$  mylar metallizzato, riempite di  $\text{ArCO}_2$ ) e calorimetro a CsI puro ( $\lambda = 310 \text{ nm}$ , UV-extended SiPM) per l' $e^-$  (105 MeV)



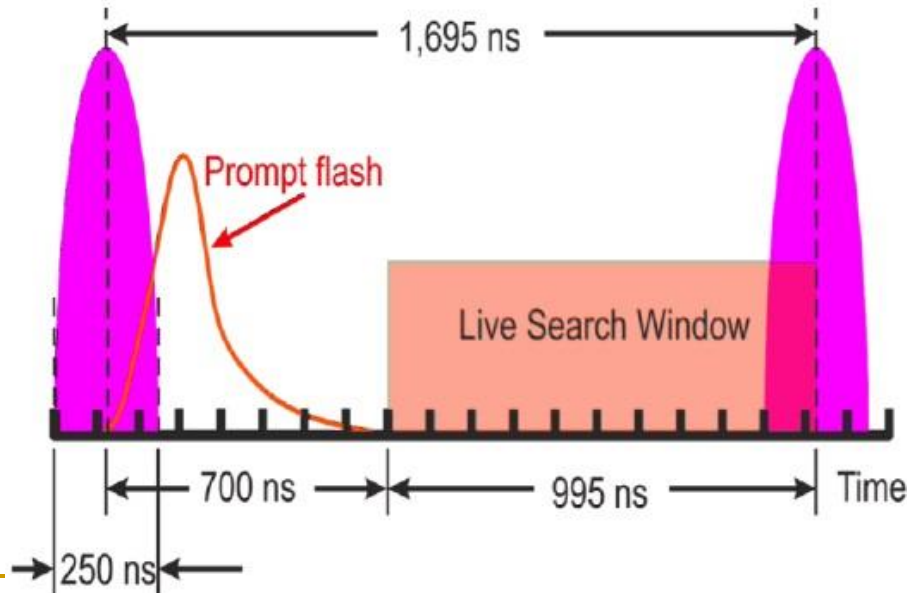
obiettivo  $< 6 \cdot 10^{-17}$  in 3 anni

fln feb-mar 201

C'è un veto, non mostr., per sopprimere i CR al 99.99%, 1 ev di fondo in 3 anni

# Mu2e/2

- fascio di p 8 GeV pulsato, 250 ns ogni 1.7  $\mu$ s,  $3 \cdot 10^7$  p – si sfrutta la differenza fra la vita media del  $\mu$ -Al (muonic Al), 864 ns, e il fondo pronto di  $\pi$ - radiative decays,  $\mu$ - decays in flight ed e- del fascio: la finestra per la ricerca è ritardata di 700 ns, fondo trascurabile – la frazione di p fuori dal bunch deve essere  $< 10^{-10}$



# Perdita di energia e range dei $\mu$ in vari materiali, scattering multiplo

- Ref. (spesso)
  - <http://pdg.lbl.gov/2017/reviews/rpp2017-rev-passage-particles-matter.pdf>
  - <http://pdg.lbl.gov/2017/reviews/rpp2017-rev-cosmic-rays.pdf>
- energie interessanti per la radiografia con muoni cosmici
  - $\sim 5$  GeV (scattering multiplo, piccole strutture)
  - $\sim 50$  GeV (assorbimento, archeologia)
  - $> 500$  GeV (assorbimento, geofisica)



# -dE/dx di particelle pesanti in vari materiali

$$-dE/dx = K z^2 Z/A 1/\beta^2 \cdot$$

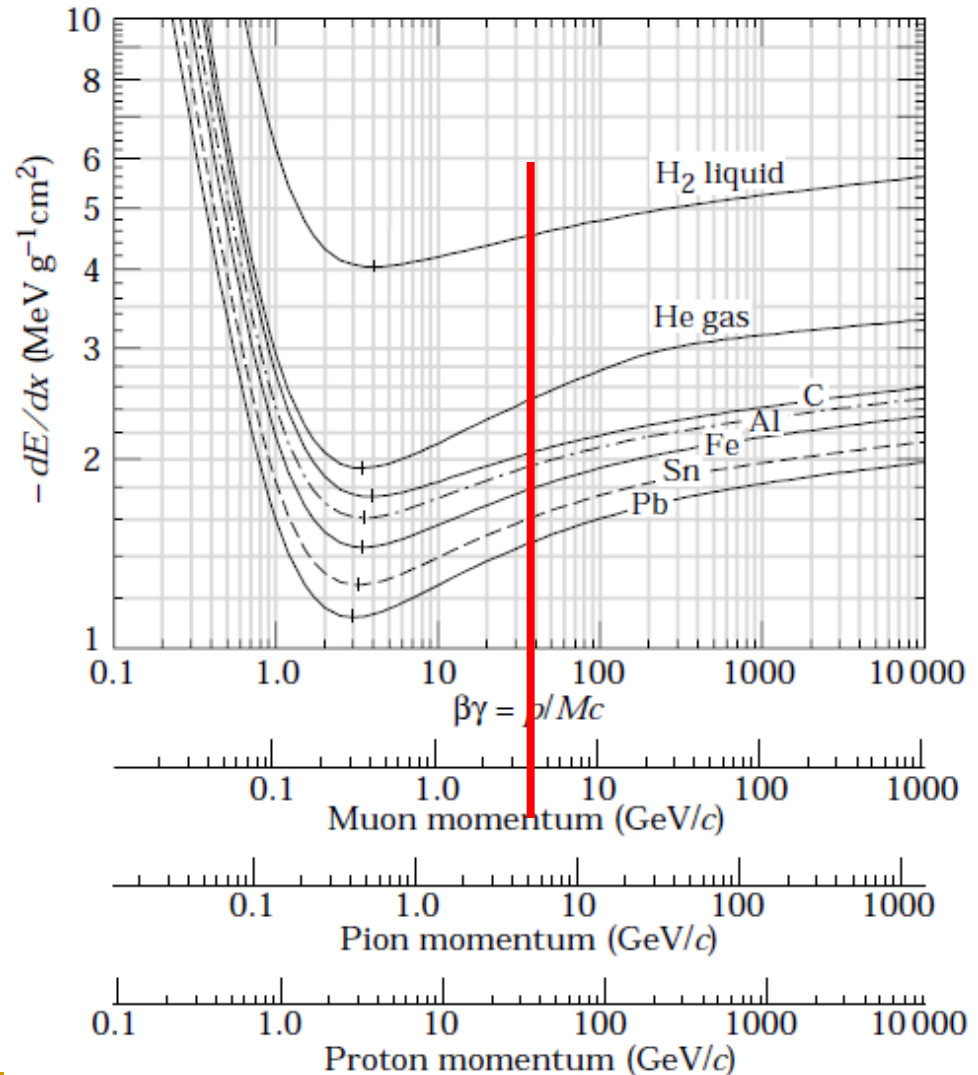
$$\cdot \left[ \frac{1}{2} \ln(2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}/I^2) - \beta^2 - \delta(\beta\gamma)/2 \right] \text{ MeVg}^{-1}\text{cm}^2$$

valida per  $0.1 \leq \beta\gamma \leq 1000$  e  $Z$  intermedio entro qualche %,  $K = 0.307 \text{ MeVmole}^{-1}\text{cm}^2$ ,  $A$  - massa atomica g/mole;

$$dE/dx_{\min} \sim 2.35 - 0.28 \ln(Z) \quad [Z > 6]$$

Non sono inclusi effetti radiativi, rilevanti per  $\mu$  in Fe per  $E \geq 100 \text{ GeV}$ , in roccia standard per  $E \geq 600\text{-}700 \text{ GeV}$  ( $A = 22 \text{ g/mole}$ ,  $Z = 11$ ,  $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$ )

$\langle E_\mu \rangle \sim 3\text{-}4 \text{ GeV}$ , muoni cosmici sulla superficie della terra  $\rightarrow dE/dx > dE/dx_{\min}$





# Perdita di energia/3

- parametrizzazione di Gaisser&Stanev per i  $\mu$  (in roccia std)

$$\langle dE/dx \rangle = a(E_\mu) + b(E_\mu)E_\mu \quad (1)$$

con  $a$  e  $b$  funzioni del materiale e (deboli, ~logaritmiche) di  $E_\mu$ , rispettivamente ionizzazione e radiazione  $\rightarrow$  energia critica  $\varepsilon_\mu = a(\varepsilon_\mu)/b(\varepsilon_\mu)$  eg circa 660 GeV nella roccia

Muon range  $R$  and energy loss parameters calculated for standard rock

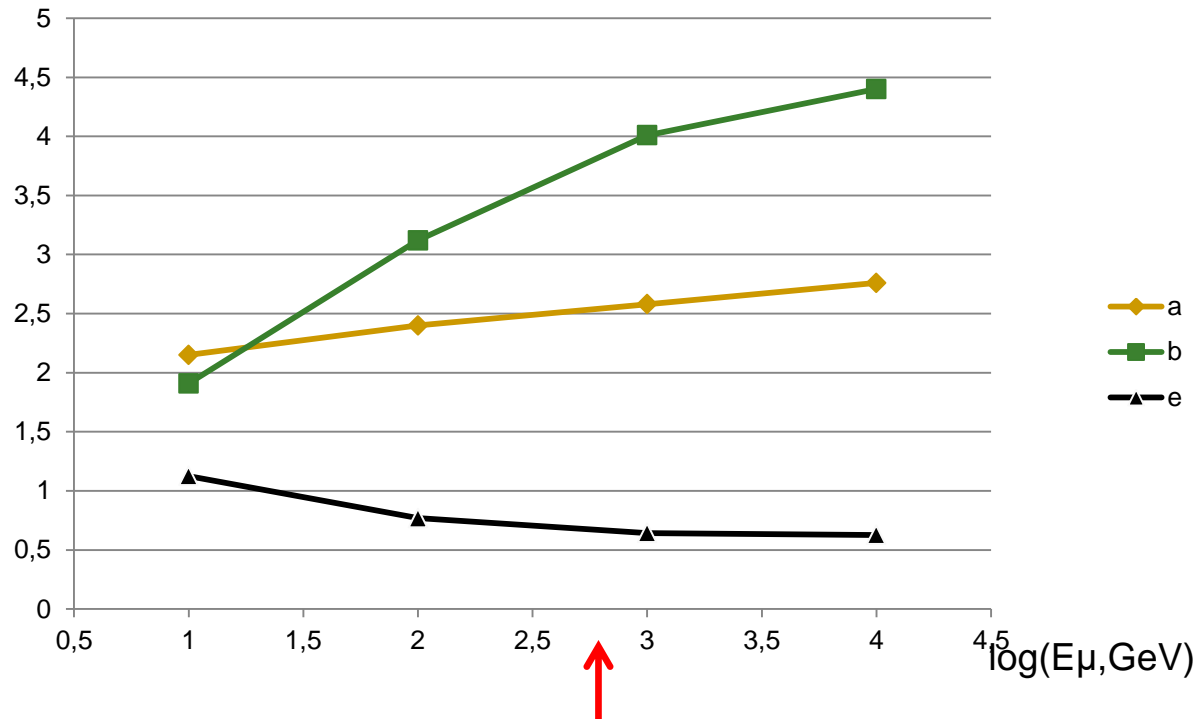
$E_\mu$ (GeV)	$R$ (km.w.e)	$a$ (MeV g <sup>-1</sup> cm <sup>2</sup> )	$b$ (10 <sup>-6</sup> g <sup>-1</sup> cm <sup>2</sup> )	$\varepsilon_\mu$ /GeV
10	0.05	2.15	1.91	
100	0.41	2.40	3.12	769
1000	2.42	2.58	4.01	643
10,000	6.30	2.76	4.40	

Range is given in km-water-equivalent. = 10<sup>6</sup> kg m<sup>-2</sup> = 10<sup>5</sup> g cm<sup>-2</sup>

altra par.:  $dE/dx = (1.888 + 0.077 \ln(E_\mu/m_\mu)) + 3.9E_\mu) 10^{-6} \text{ TeV cm}^2/\text{g} \quad (2)$

ionizzazione
bremms

$$a, b, \varepsilon_\mu = a/b$$



657 GeV

$$a(E) = 1.97 + 0.201 \cdot \log(E)$$

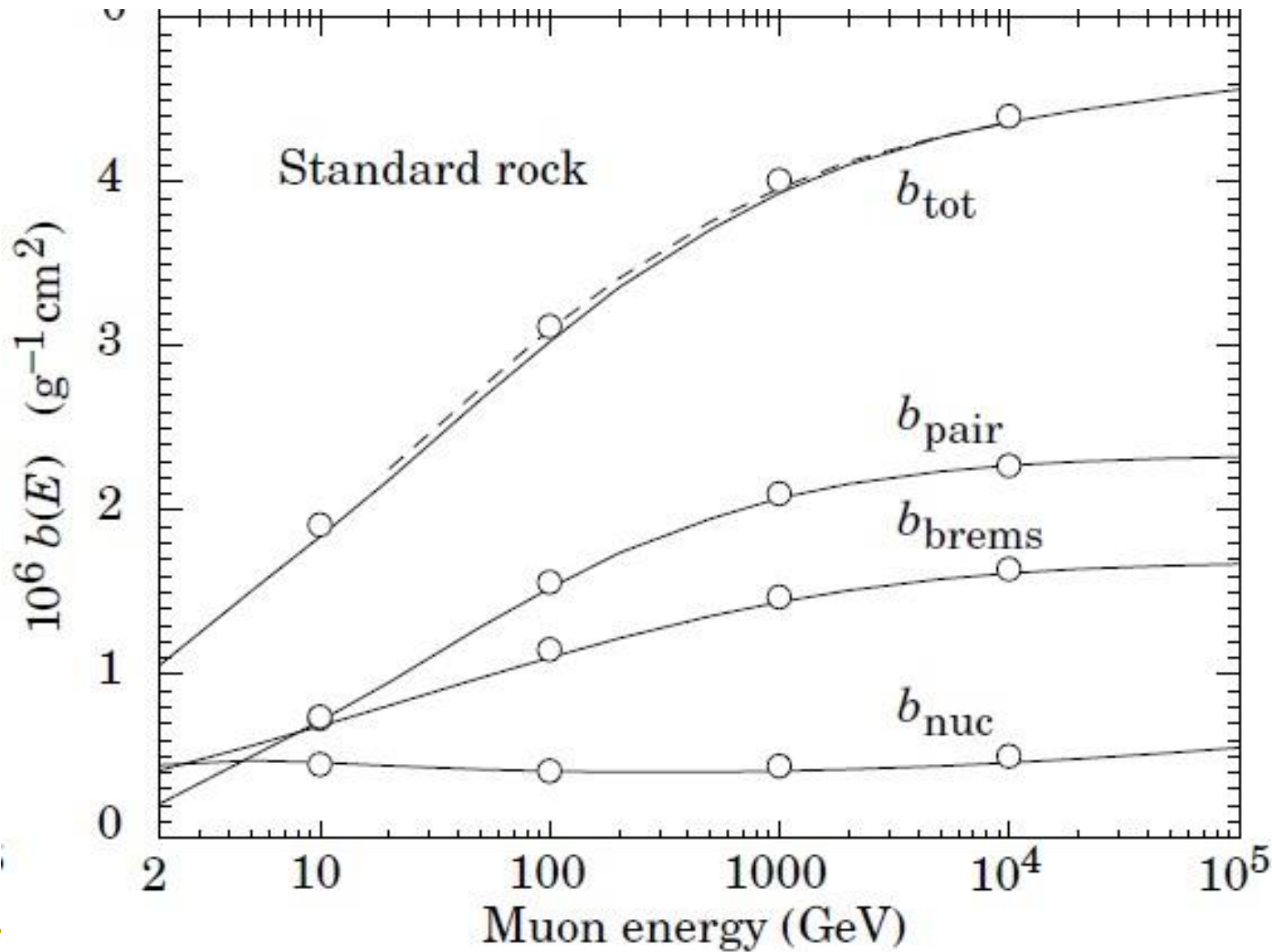
$$b(E) = [0.245 + 1.861 \cdot \log(E) - 0.0851 \cdot (\log(E))^2] / 1000$$

$$\varepsilon_\mu = a(\varepsilon_\mu) / b(\varepsilon_\mu) = 1000 \cdot (a' + a'' \log(\varepsilon_\mu)) / (b' + b'' \log(\varepsilon_\mu) + b''' (\log(\varepsilon_\mu))^2)$$

$$= 657 \text{ GeV}$$

# $b(E)$

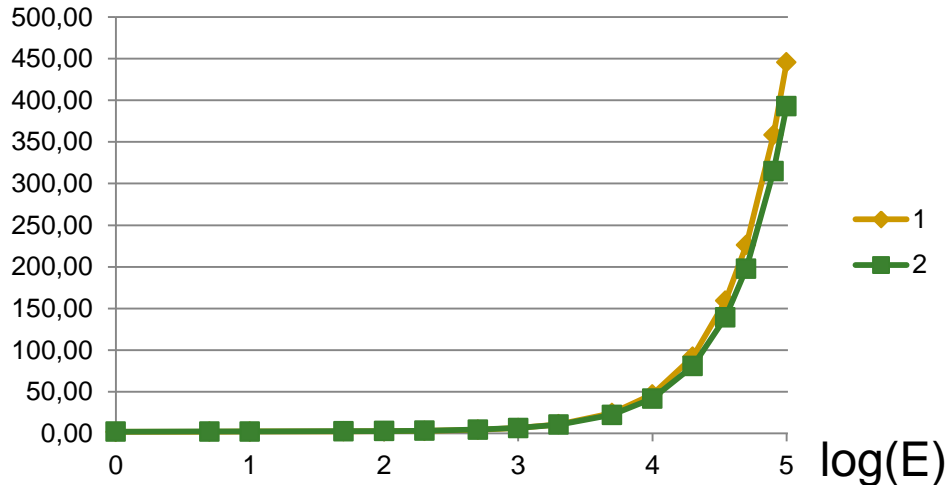
- Groom, Mohkov, Striganov
- - - Lohmann, Kopp, Voss
- o Gaisser, Stanev



# Perdita di energia/4

confronto fra le parametrizzazioni,  $\mu$  in roccia,  $dE/dx$  in  $\text{MeV cm}^2/\text{g}$

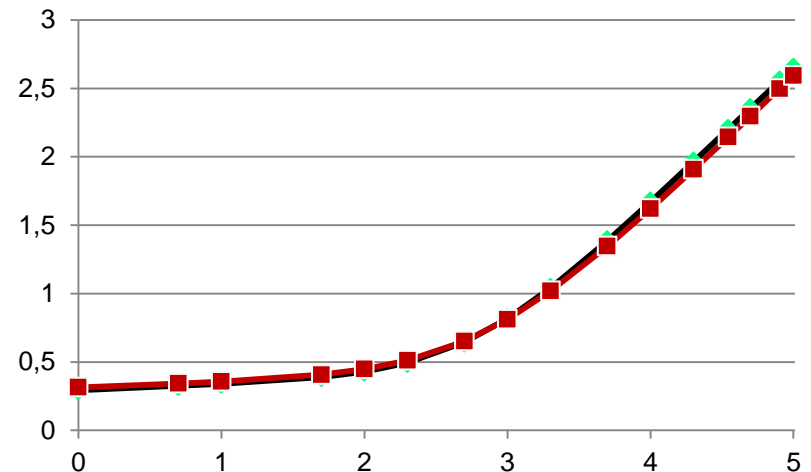
$dE/dx$  ( $\text{MeV g}^{-1}\text{cm}^2$ )



differenze 2/1: da +4% a  
bassa E a -12% ad alta  
E, identiche a ~1 TeV

indistinguibili  
in scala log-log

$\log[dE/dx$  ( $\text{MeV g}^{-1}\text{cm}^2$ )]



integrando la formula (2) per la perdita di energia si ottiene il range

$$X = 2.5 \cdot 10^5 \ln(1.56E_{\mu} + 1) \text{ g/cm}^2 \quad [E \text{ in TeV}]$$

ossia per 1 TeV,  $X = 2.35 \cdot 10^5 \text{ g/cm}^2 = 0.9 \text{ km di roccia}$  ( $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$ )

[con la (1) si ha 2.42, ~ lo stesso]

# Range di particelle cariche pesanti

Grosso modo, assumendo il minimo:

$$\text{Fe } \rho = 8 \text{ g/cm}^3$$

$$-dE/dx|_{\min} = 1.45 \text{ MeV}/(\text{g cm}^{-2})$$

$$1 \text{ m Fe} \Rightarrow 800 \text{ g/cm}^2 \cdot 1.45 = 1160 \text{ MeV}$$

$$\text{roccia std } \rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$$

$$-dE/dx|_{\min} = 1.69 \text{ MeV}/(\text{g cm}^{-2})$$

$$1 \text{ m r} \Rightarrow 265 \text{ g/cm}^2 \cdot 1.69 = 450 \text{ MeV}$$

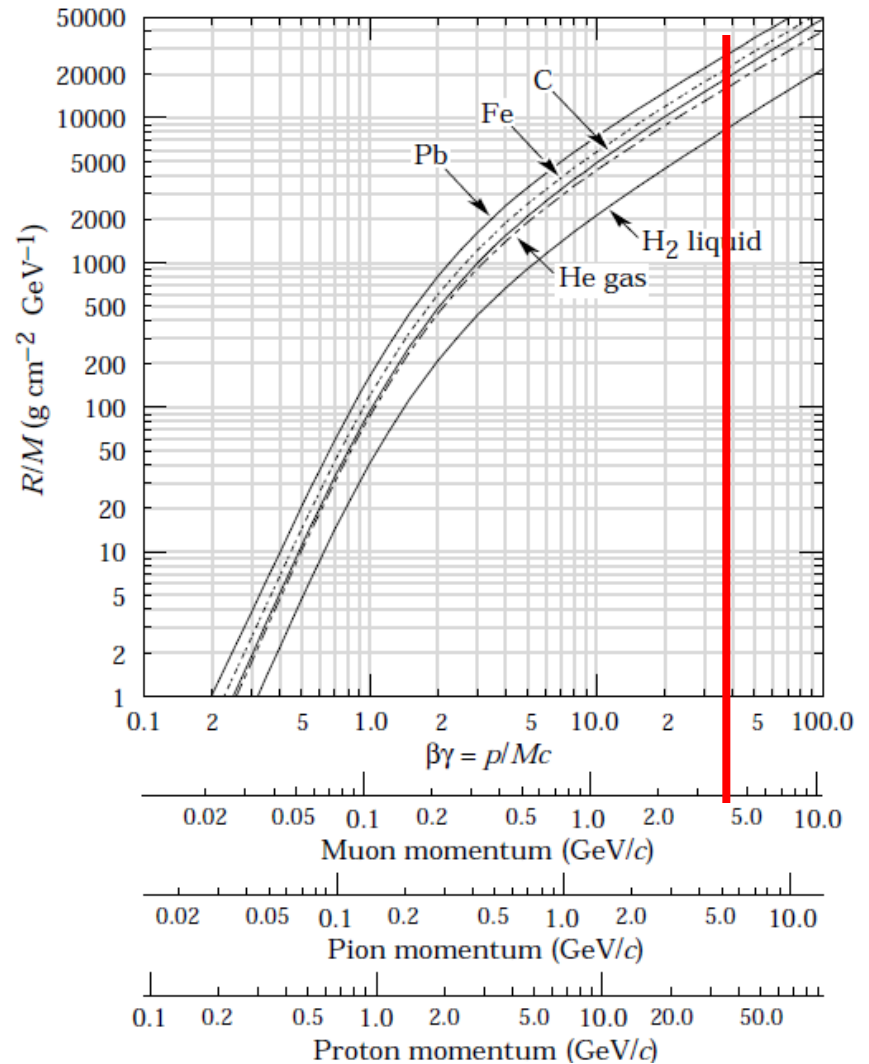
in realtà già a 1(4) GeV pde 7(20)%  
maggiore in r [9(24)% in Fe], bisogna  
integrare lo stopping power

$$R = \int_0^{E_\mu} dE_\mu / \langle dE/dx \rangle$$

per  $\langle E_\mu \rangle \sim 4 \text{ GeV}$ , i  $\mu$  penetrano

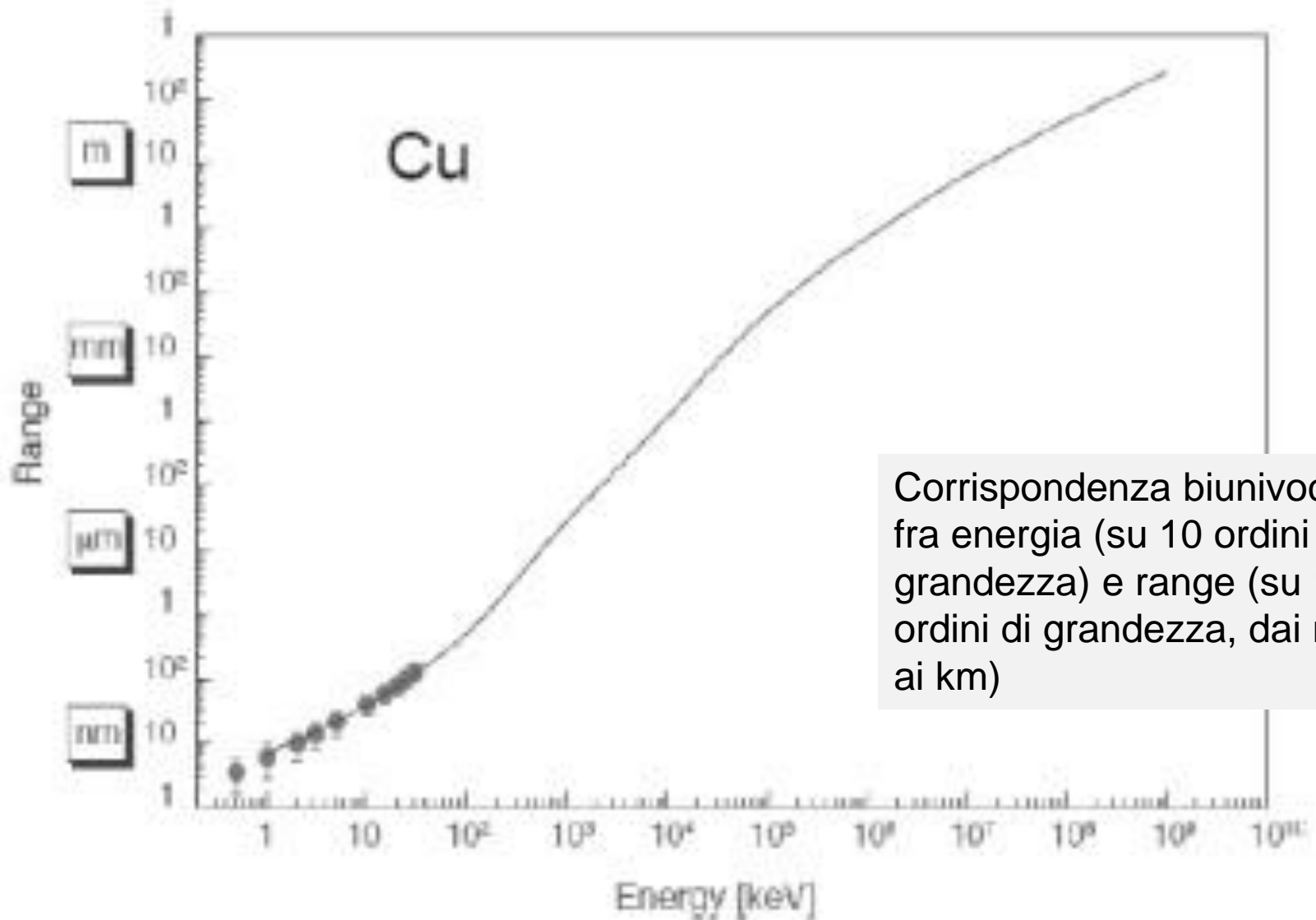
$\sim 2400 \text{ g cm}^{-2}$  di Fe = 3 m

$\sim 2100 \text{ g cm}^{-2}$  di r = 8 m



la pde nell'atm, 1 kg/cm<sup>2</sup>, è  $\sim 2.5 \text{ GeV}$  per  $\mu$  di 6 GeV  $\rightarrow \langle E_\mu \rangle \sim 3-4 \text{ GeV}$

# Range dei $\mu$ in rame



Corrispondenza biunivoca fra energia (su 10 ordini di grandezza) e range (su 12 ordini di grandezza, dai nm ai km)

# Scattering multiplo coulombiano

- per angoli piccoli si ha lo scattering à la Rutherford,  $\sim 1/\theta^4$ , e, tenuto conto dello screening degli  $e^-$  e dell'estensione finita del nucleo, si ottiene per l'angolo quadratico medio (nello spazio) per unità di spessore attraversato (a parte termini correttivi,  $\sim \log$ ) – la distribuzione è gaussiana (solo in 1a approx) + code (Molière)

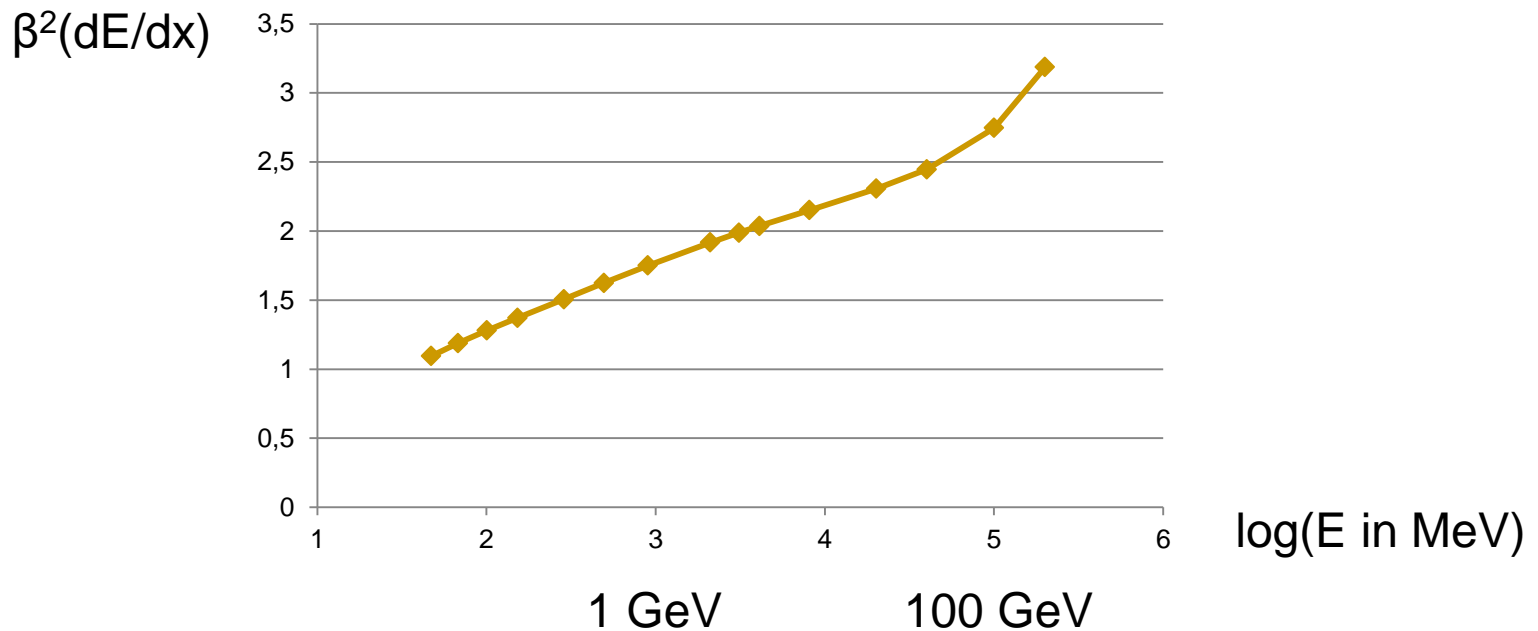
$$\frac{d\langle\vartheta^2\rangle_{av}}{dx} = \vartheta_s^2 = \left(\frac{E_s}{\beta cp}\right)^2 \frac{1}{X_0} \quad \text{con } E_s = (4\pi/\alpha)^{1/2} m_e c^2 = 21.2 \text{ MeV}$$

$$\langle\theta^2\rangle_{av} = x\vartheta_s^2 = \left(\frac{E_s}{\beta cp}\right)^2 \frac{x}{X_0} \quad x \text{ piccolo, niente perd. di ener.}$$

$$\begin{aligned} \langle\theta^2\rangle_{av} &= \left(\frac{E_s}{c}\right)^2 \frac{1}{X_0} \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{\beta^2 \left(-\frac{dp}{dx}\right)} \frac{dp}{p^2} = \left(\frac{E_s}{c}\right)^2 \frac{1}{X_0} \frac{p_2 - p_1}{p_1 p_2} \frac{1}{\beta^2 \left(-\frac{dp}{dx}\right)} \\ &= \left(\frac{E_s^2}{c^2 p_1 p_2}\right) \frac{x}{X_0} \quad \text{includendo la perd. di ener. } [\beta^2(-dE/dx) \approx \text{cost}] \end{aligned}$$

# m.s. con perdita di energia

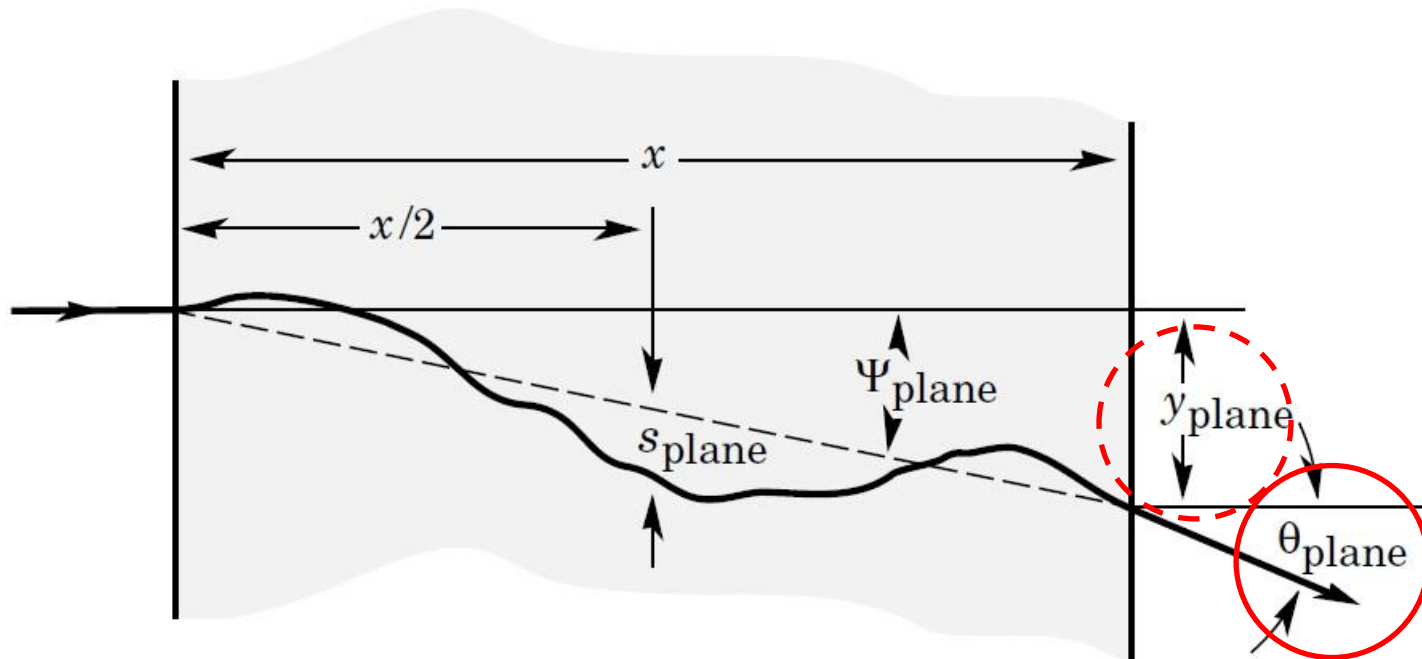
- validità dell'approssimazione  $\beta^2(-dE/dx) \approx \text{cost.}$



- angoli tipici per 1  $X_0$ :  $\theta = (E_s/\beta cp) = 0.021/p(\text{GeV}/c)$



# Scattering multiplo coulombiano/2



distrib. angol.:  $dN \sim 1/(2\pi x \theta_s^2) \exp(-\theta^2/(2x\theta_s^2)) d\Omega$

$$\langle \theta^2 \rangle = \langle \theta_y^2 \rangle + \langle \theta_z^2 \rangle = 2 \langle \theta_y^2 \rangle$$

$$\langle \psi_{\text{plane}}^{\text{rms}} \rangle = 1/\sqrt{3} \langle \theta_{\text{plane}}^{\text{rms}} \rangle$$

$$\langle y_{\text{plane}}^{\text{rms}} \rangle = 1/\sqrt{3} x \langle \theta_{\text{plane}}^{\text{rms}} \rangle$$

$$\langle s_{\text{plane}}^{\text{rms}} \rangle = 1/(4\sqrt{3}) x \langle \theta_{\text{plane}}^{\text{rms}} \rangle$$

y, z: indipendenti,  
stesse distribuzioni

# Scattering multiplo coulombiano/3

- consideriamo l'angolo proiettato sui piani xy (e xz), si ha  $\theta^2 = \theta_y^2 + \theta_z^2 = 2\theta_y^2$ ; si può mostrare che la probabilità di avere un angolo fra  $\theta_y$  e  $\theta_y + d\theta_y$  ed uno spostamento fra  $y$  e  $y + dy$  è data da

$$P(x, y, \theta_y) = 2\sqrt{3}/\pi \cdot 1/(\theta_s^2 x) \exp[-4/(\theta_s^2 x) \cdot (\theta_y^2 - 3y\theta_y/x + 3y^2/x^2)]$$

e le distribuzioni integrate su  $y$  e  $\theta_y$  sono (ad es. usando l'Integratore di Mathematica)

$$Q(x, \theta_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} dy P(x, y, \theta_y) = 2/\sqrt{\pi} \cdot 1/(\theta_s x^{1/2}) \exp(-\theta_y^2/(\theta_s^2 x))$$

$$S(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\theta_y P(x, y, \theta_y) = 2\sqrt{(3/\pi)} \cdot 1/(\theta_s x^{1/2}) \exp(-3y^2/(\theta_s^2 x^3))$$

$$\langle \theta_y^2 \rangle_{av} = \frac{1}{2} \theta_s^2 x$$

$$\langle y^2 \rangle_{av} = \frac{1}{2} \theta_s^2 x^3 / 3 = \langle \theta_y^2 \rangle_{av} x^2 / 3$$

vedi ad es. B. Rossi and K.F. Greisen, Rev. Mod. Phys. **13** (1941) 240



# Un fascio gratuito di particelle: i $\mu$ dei Raggi Cosmici

- disponibili ovunque sulla terra
- 😊 ■ disponibili sempre 24/7
- non implicano una produzione addizionale di radiazioni

ma

- ☹ ■ intensità, spettro di energia, distribuzione angolare non sono aggiustabili, dipendono da dove ci si trova

# Muons (and Neutrinos) are the Main Component of Cosmic Rays at the Earth's Surface and Below

- Primary cosmic rays interact in upper atmosphere

- Mainly high energy protons
- Showers of  $\pi$ 's/K's created
- Decay within 10's - 1000's meters or collide with nuclei in air

$$\langle h \rangle \sim 16 \text{ km}$$

$$\lambda_{\text{int}} \sim 90 \text{ g/cm}^2$$

$$c\tau_{\pi} = 7.8 \text{ m}$$

$$c\tau_K = 3.7 \text{ m}$$

- Muons are produced in decays of  $\pi$ /K

- Do *not* have nuclear interactions
- Lifetime much longer than  $\pi$ /K and dilated by relativity

$$c\tau_{\mu} = 660 \text{ m}$$

$$(E_{\mu} = 4 \text{ GeV}) \gamma c\tau_{\mu} = 25 \text{ km}$$

- Approximate muon rate at Earth's surface (**horizontal**)

$$\sim 1 \text{ cm}^{-2}\text{min}^{-1}$$

# Spettro dei mu cosmici in superficie

Intensità verticale della  
componente dura al liv. mare

$$I_v = 70 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$$

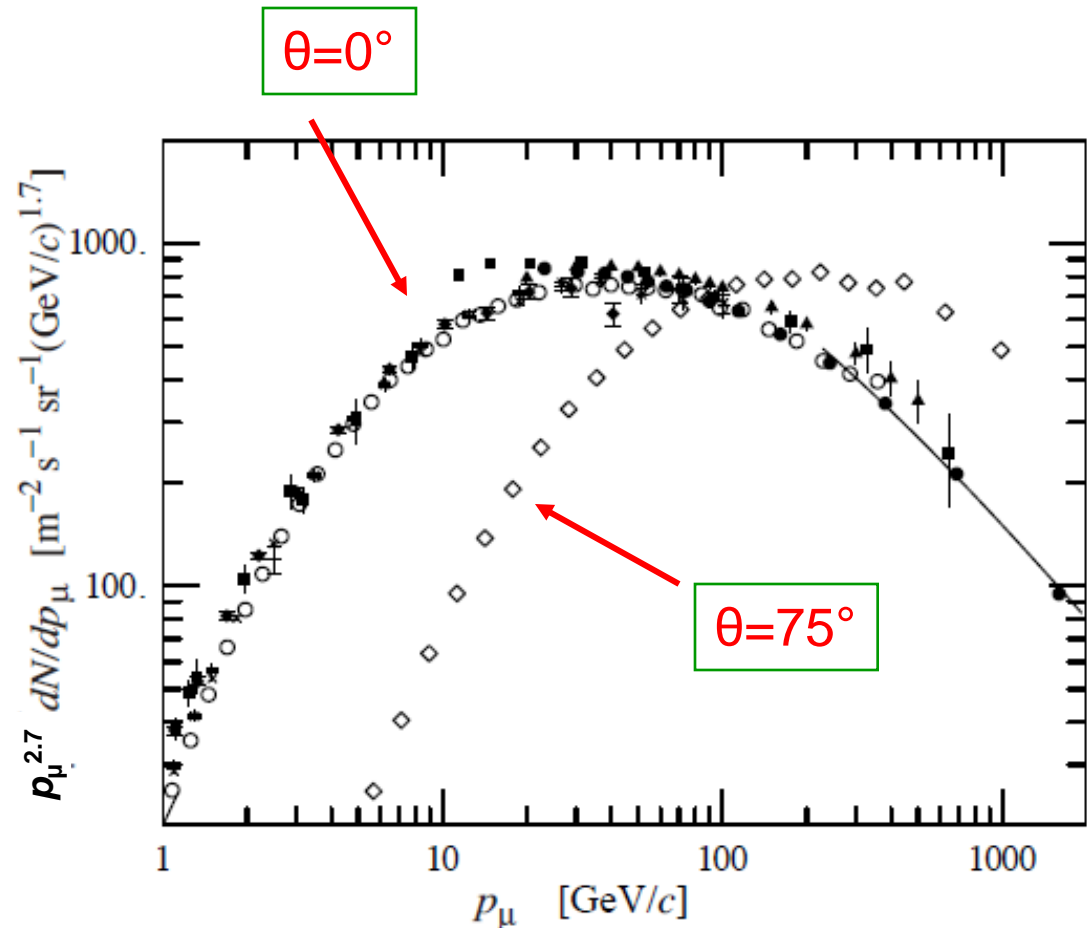
Al liv.mare  $\langle E_\mu \rangle \sim 4 \text{ GeV}$

Lo spettro è piatto sotto  
1 GeV, diventa gradualmente  
più ripido a 10-100 GeV  
poiché lo spettro dei primari  
 $\sim E^{-2.7}$  e asintoticamente  
diventa 1 potenza più ripido  
(molto oltre 1 TeV)

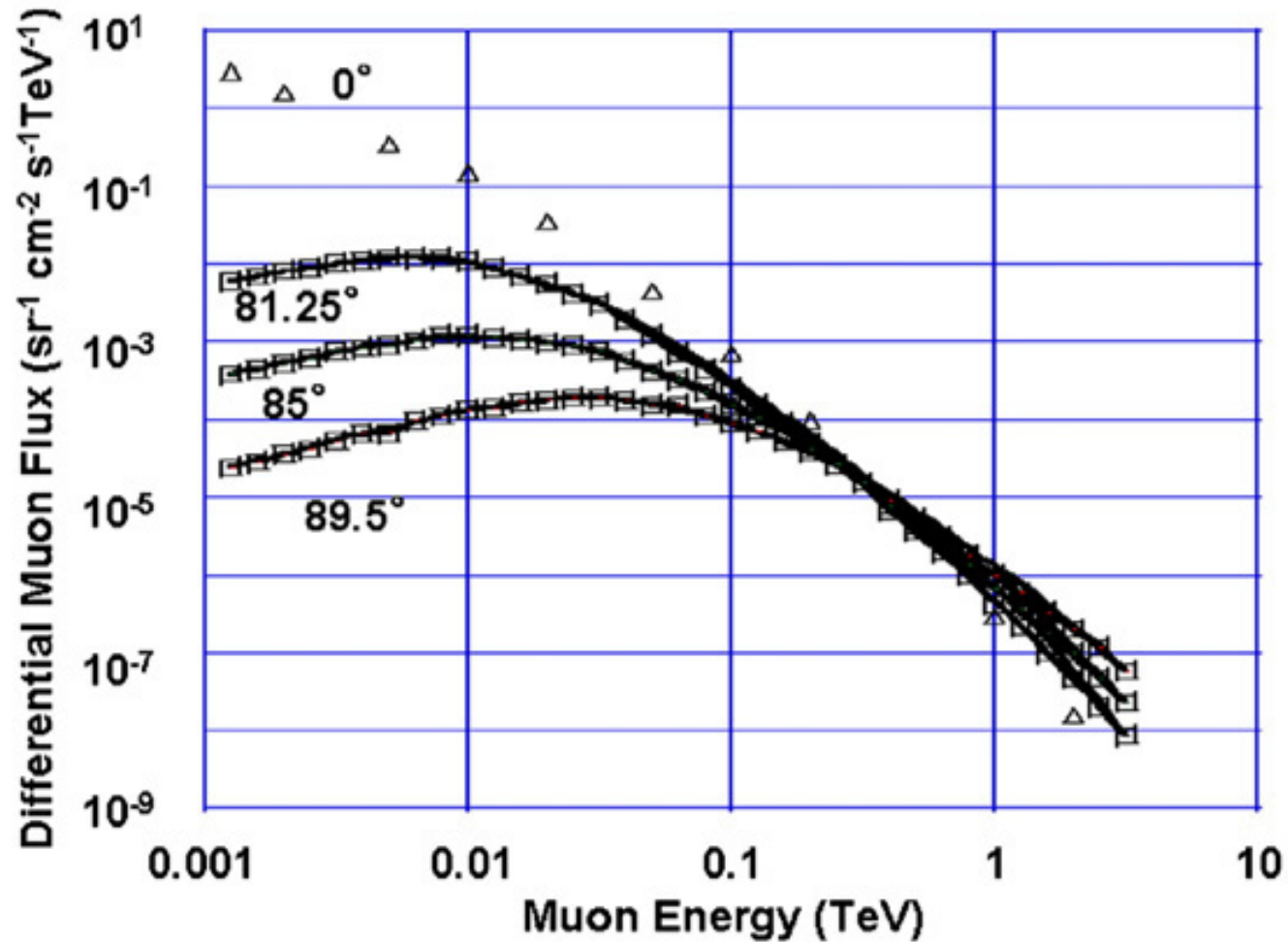
La distribuzione angolare va  
come  $\cos^2\theta$  per  $E_\mu$  bassa e

cambia in  $1/(1+aE_\mu\cos\theta)$  per  $E_\mu \gg \epsilon_\pi = 115 \text{ GeV}$  [param. di Gaisser]  
e  $\theta < 70^\circ$  con  $\theta$  zenith (rispetto alla verticale)

[a 115 GeV la probabilità di interagire dei  $\pi$  uguaglia quella di decadere]



# Spettro dei mu cosmici/2; angoli grandi

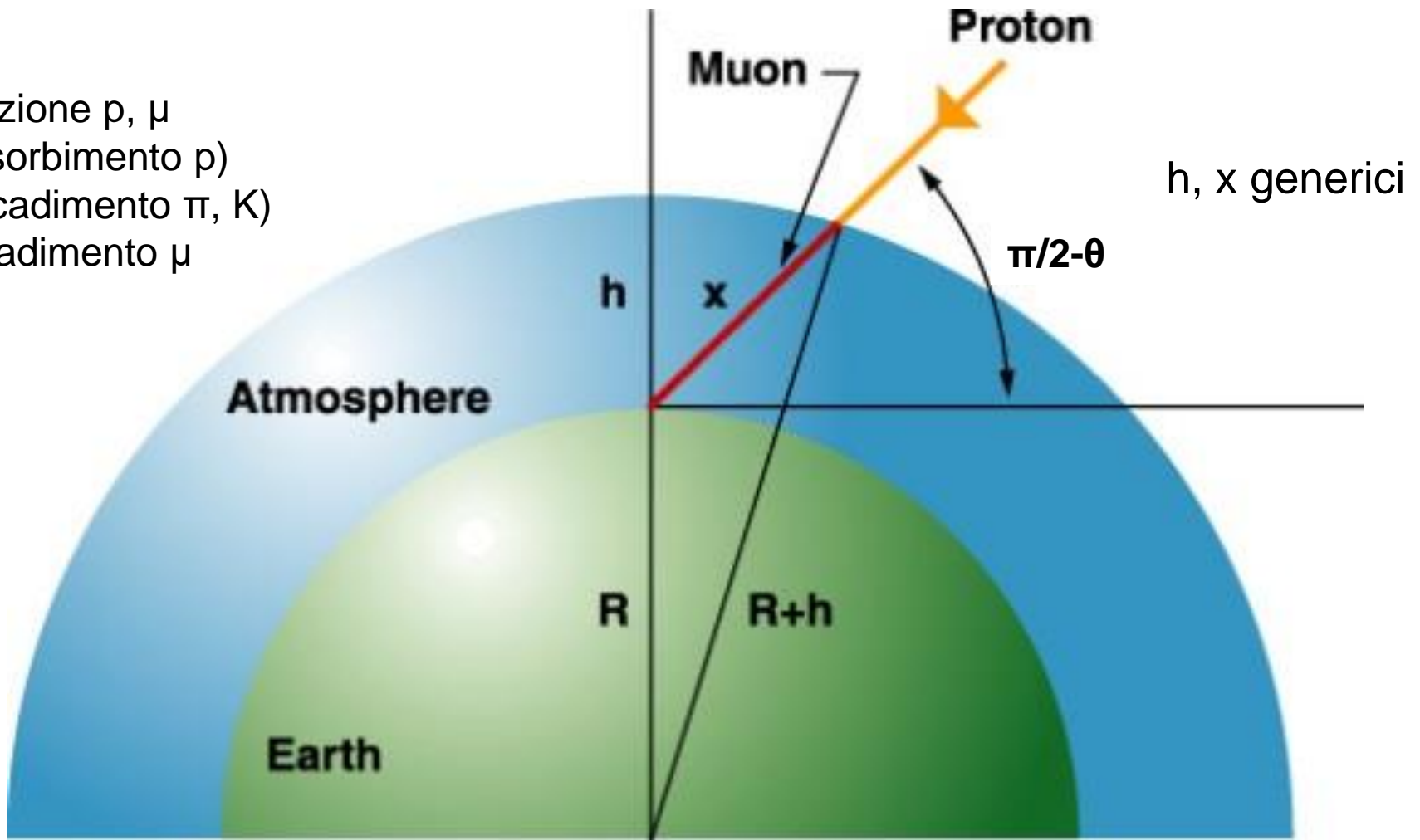


1 cm<sup>-2</sup>TeV<sup>-1</sup> = 10 m<sup>-2</sup>GeV<sup>-1</sup>  
cfr pagina precedente

DEIS, Allkofer et al. 1981

# Semplice modello per i muoni cosmici

direzione  $p, \mu$   
 (assorbimento  $p$ )  
 (decadimento  $\pi, K$ )  
 decadimento  $\mu$



$$(R+h)^2 = R^2 + x^2 - 2Rx \cos(\pi-\theta); \quad x = -R\cos\theta + \sqrt{([R\cos\theta]^2 + [2Rh + h^2])}$$



# Intensità dei cosmici

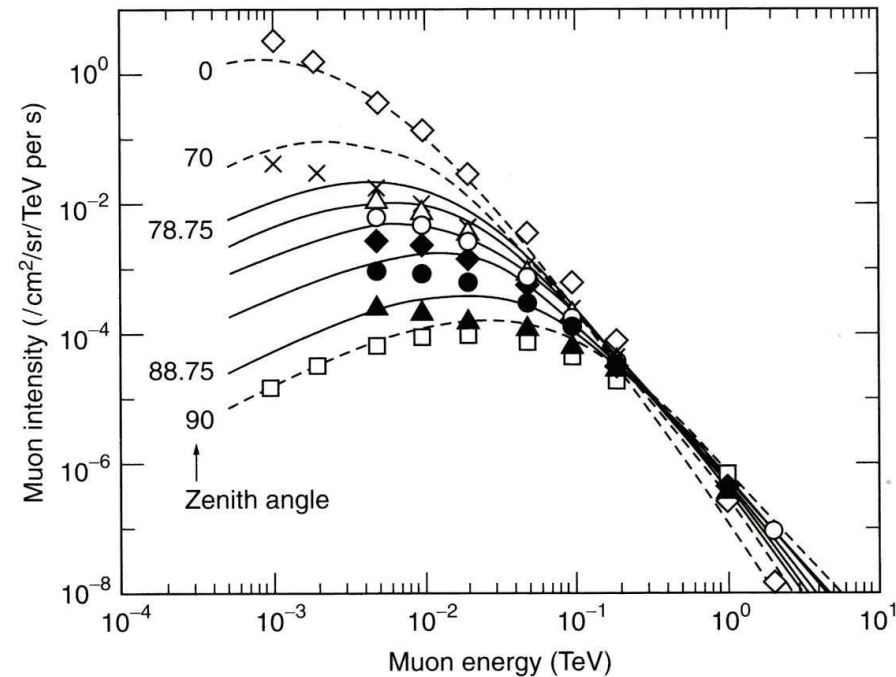
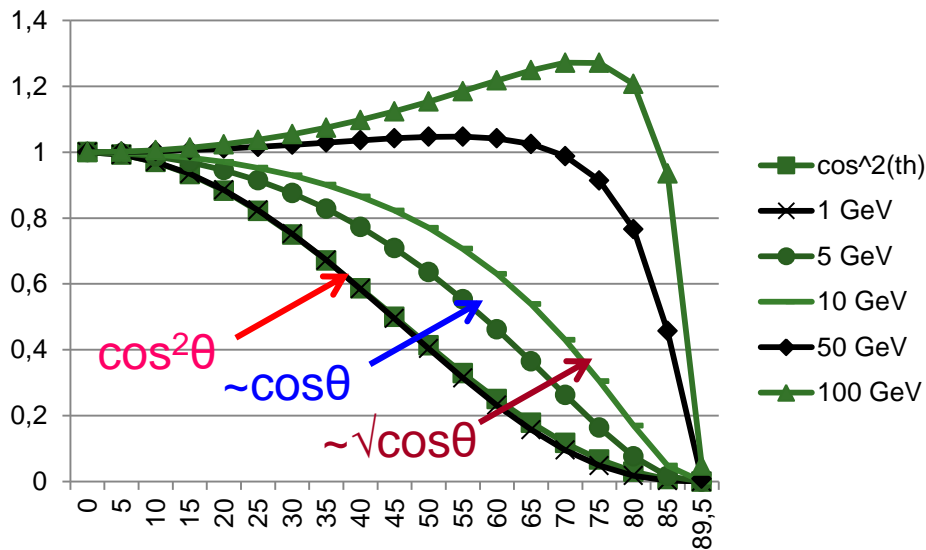
$$I(E, \theta) = \frac{dN(E', \theta)}{dE'} = 1.2 \times 10^{-6} E'^{-2.7} (\text{TeV}) \times$$

$$\times \left[ \frac{0.9}{1 + \frac{E' \cos \theta}{E_\pi}} + \frac{0.1}{1 + \frac{E' \cos \theta}{E_K}} \right] \dots (\text{s}^{-1}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{TeV})$$

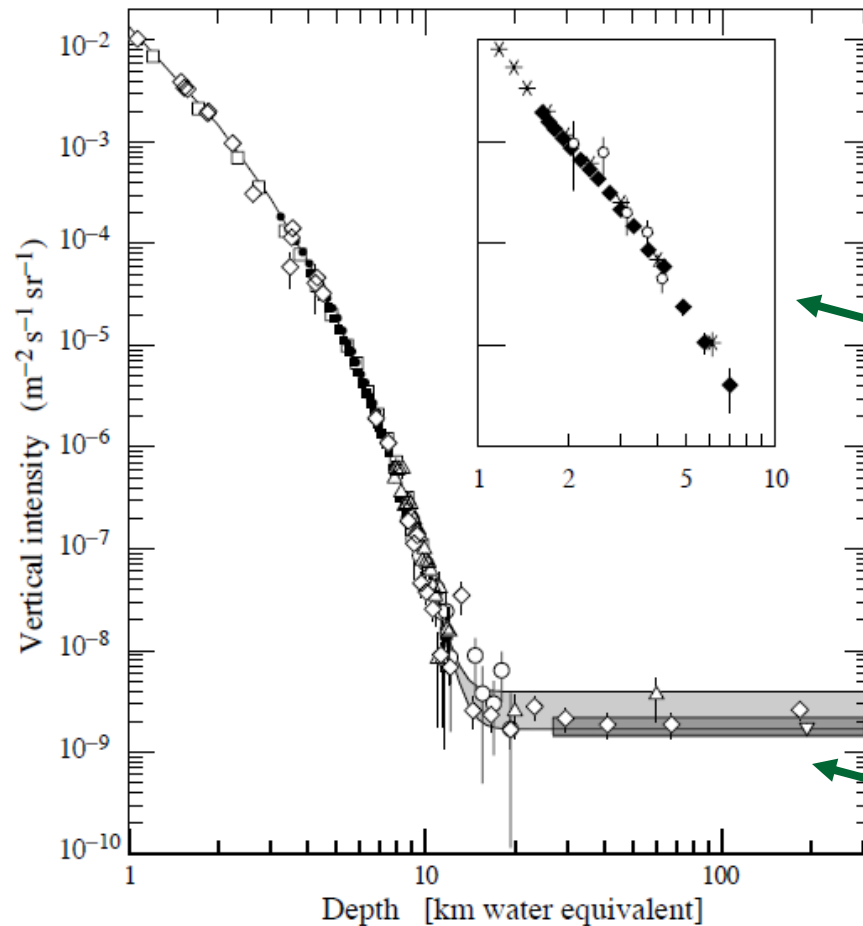
- $E_\pi = 0.092 \text{ TeV}$ ,  $E_K = 0.54 \text{ TeV}$  [param. Adair&Kasha]
  - $E' = E + \Delta E_{\text{air}}/\cos\theta$  ( $L_0=1.013 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\Delta E_{\text{air}} = 0.0026 \text{ TeV}$ )
  - $x/h = [(R^2 \cos^2 \theta + 2Rh + h^2)^{1/2} - R \cos \theta]/h$  ( $\theta \sim 90^\circ$ ,  $x \sim 29h$ )
- $R$  – raggio terra,  $h$  – <altezza> produzione  $\mu \approx 16\text{-}17 \text{ km}$   
 (i  $\mu$  orizzontali hanno + tempo x decadere  $\rightarrow$  spettro + duro)
- $L_d = 6200 E(\text{TeV}) \text{ km}$  decadimento
  - $N_\mu(E_c, \theta) = \int_{E_c}^\infty I(E, \theta) dE$  N con  $E > E_c$

# Intensità dei raggi cosmici a grande angolo

- la parametrizzazione (Adair&Kasha, 1976) è indistinguibile da  $\cos^2\theta$  a bassa  $E$ , va come  $\cos\theta$  a  $\sim 5$  GeV ed è molto più piatta ad alta  $E$  (a sx, curve vs  $\theta$  normalizzate a 1 a  $\theta = 0^\circ$ ; a dx curve assolute vs  $E_\mu$  a  $0^\circ$  e grande angolo)



# Intensità verticale dei $\mu$ cosmici vs lo spessore di roccia



1 km.w.e. =  $10^5 \text{ g cm}^{-2}$   
di roccia standard  
~ 400 m

misure in acqua e ghiaccio  
– minore perdita radiat. di E  
→ minore pendenza (alta E)

interazioni CC di  $\nu_\mu$   
 $E_\mu > 2 \text{ GeV}$  – linea  
superiore,  $\mu$  orizzontali,  
linea inferiore  $\mu$  verticali  
verso l'alto

# Muoni nelle caverne di LHC

- a ~100 m sotto la superficie del suolo (profondità delle caverne degli esperimenti ATLAS e CMS a LHC), l'intensità dei  $\mu$  cosmici è ridotta di un fattore circa 100 rispetto alla superficie della terra
- i  $\mu$  cosmici sono stati usati per la calibrazione dei rivelatori quando si stava aspettando l'acceleratore (e sono tuttora usati, per es. adesso durante il YETS)
- si possono ottenere radiografie dei volumi (dei vuoti) vicino alle caverne
- misure di cosmici a ~60-100-170 m di profondità sono state fatte precedentemente all'epoca di LEP da L3, DELPHI e ALEPH

10 ms of cosmics

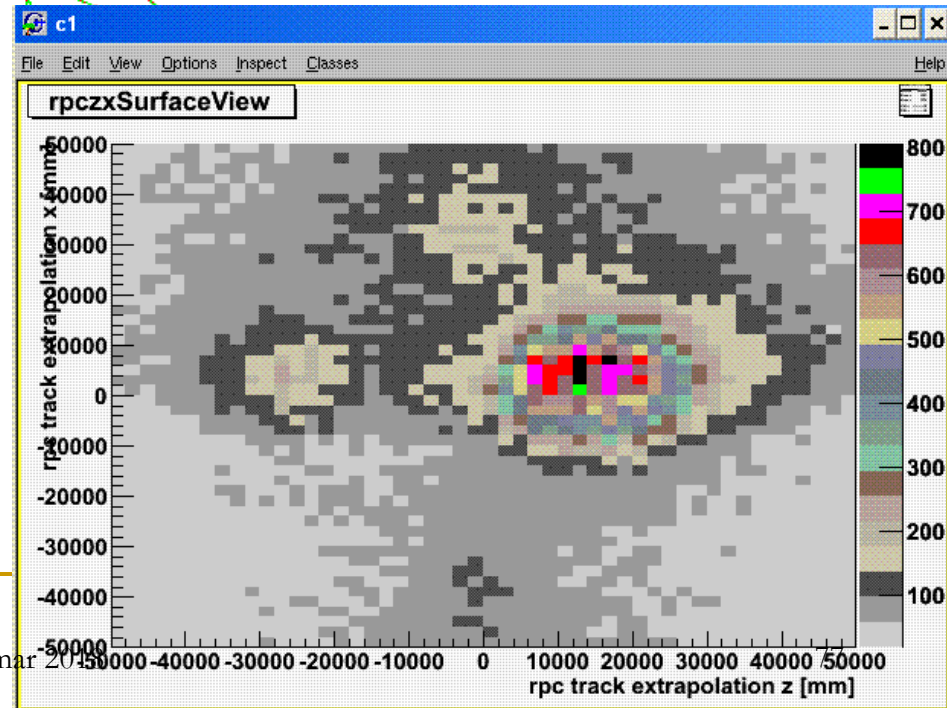
Simulated cosmics flux in the ATLAS cavern



Cosmics data:

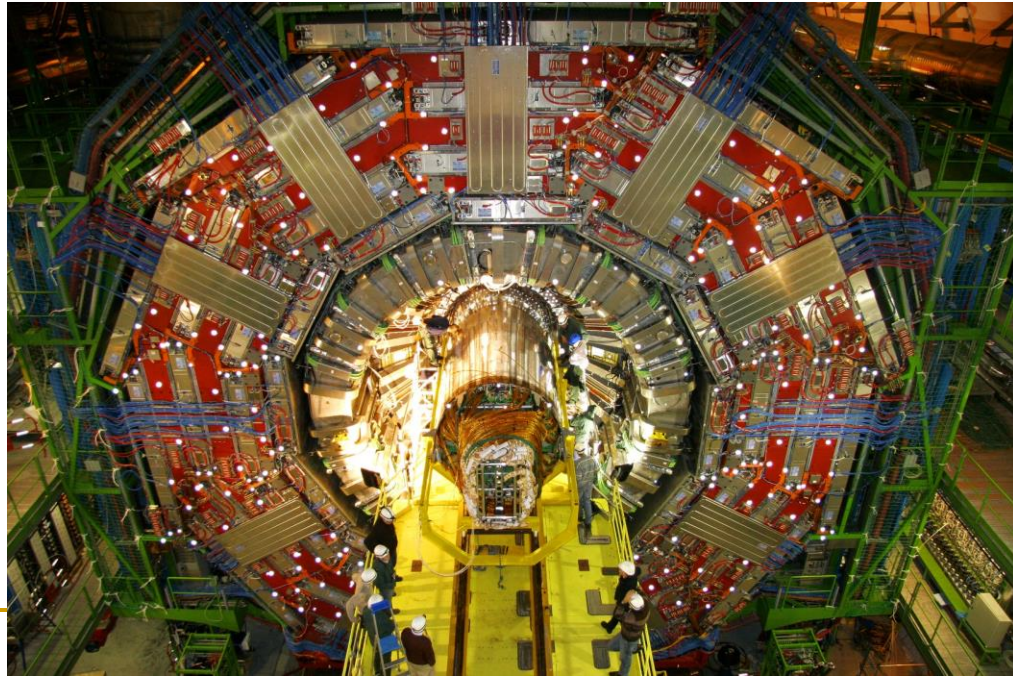
Muon impact points extrapolated to surface as measured by Muon Trigger chambers (RPC)

Rate ~100 m below ground:  
~ O(100 Hz)



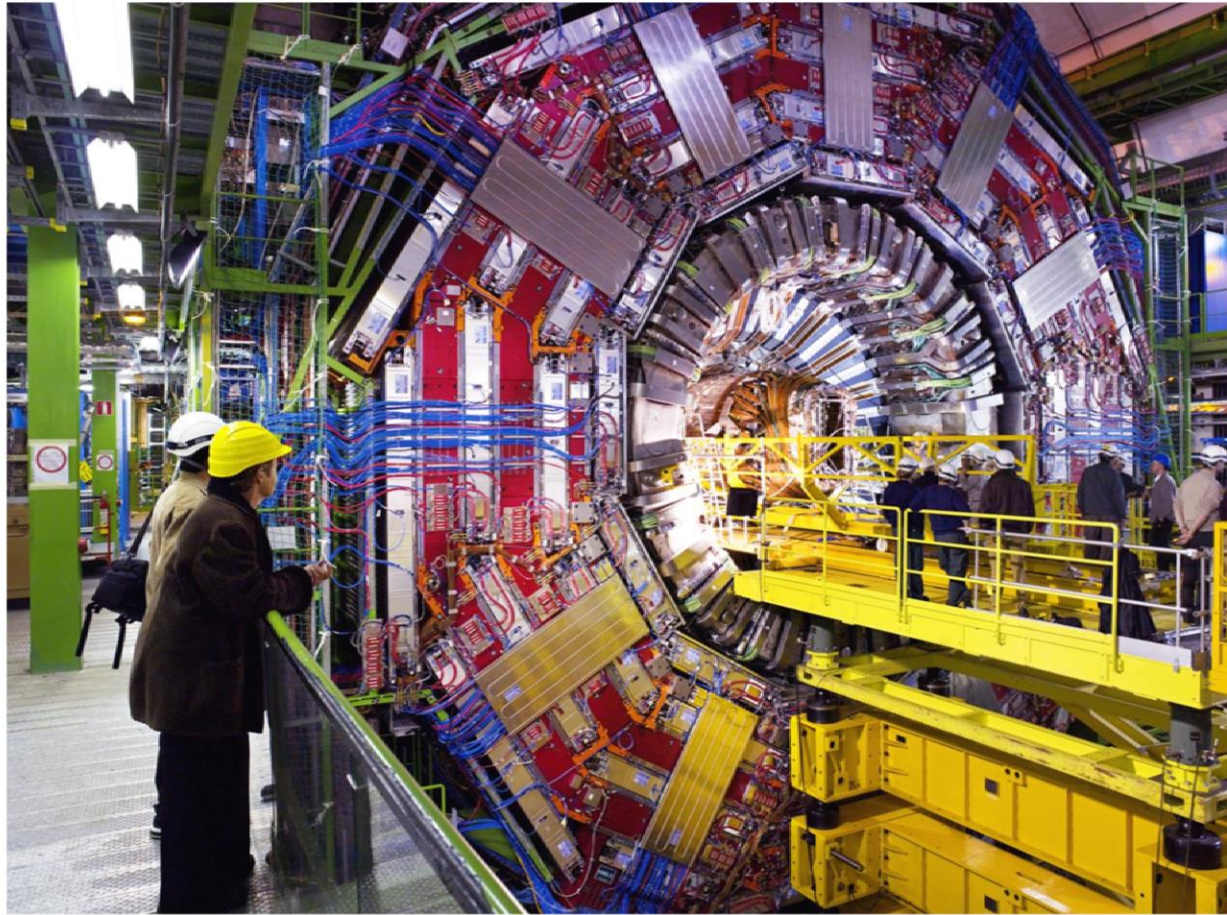
# Compact Muon Solenoid a LHC

- una torre di Pisa orizzontale (stessa  $m$ ,  $\neq l$ )
- $d = 15\text{ m}$ ,  $l = 22\text{ m}$ , 135 Mcanali di rivelazione
- Si pixels (124 M); Si tracker; ECAL ( $\text{PbWO}_4$ ); HCAL (brass + scintillator); 3.8 T magnet;  $\mu$  gas detectors, barrel (DT, RPC), end caps (CSC, RPC, GEM)

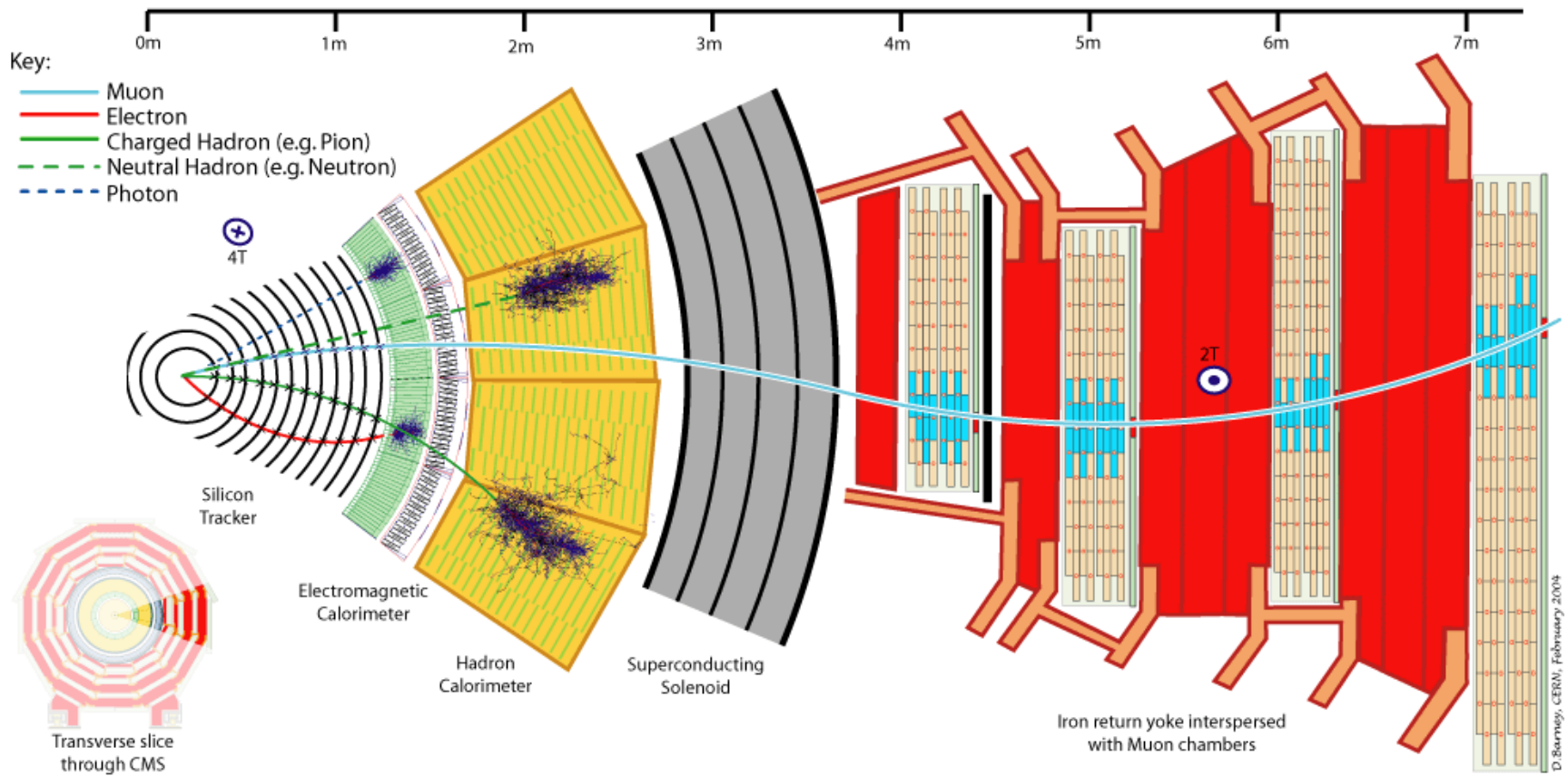


III TCD-mar 2010

# CMS durante la prima installazione della parte centrale



# La rivelazione di particelle in CMS

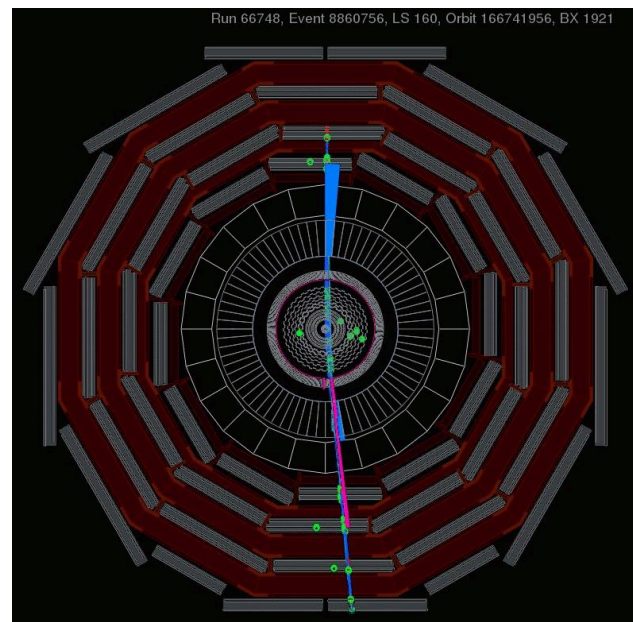




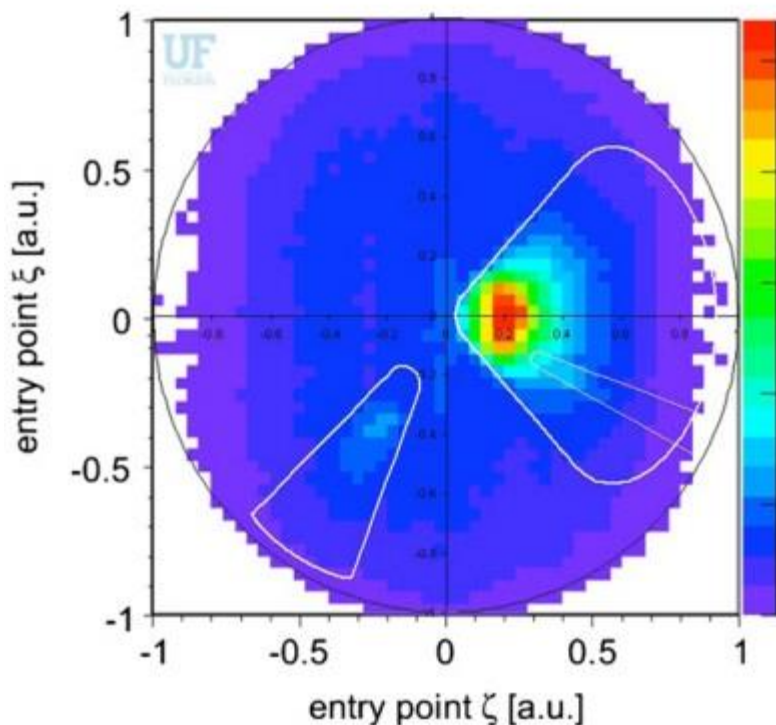
# $\mu$ cosmici: CMS ott08 ... pre e/o senza-LHC

- a circa 100 m di profondità,  $\sim 100$ - $200$  Hz nel barrel di CMS
- CosmicRaysAtFourTesla (CRAFT)
- $B = 3.8$  T

- dal centro
  - pixels
  - strips
  - ECAL
  - HCAL
  - criostato
  - DT/RPC



CRAFT - GLBMuons1LegBarrelOnly

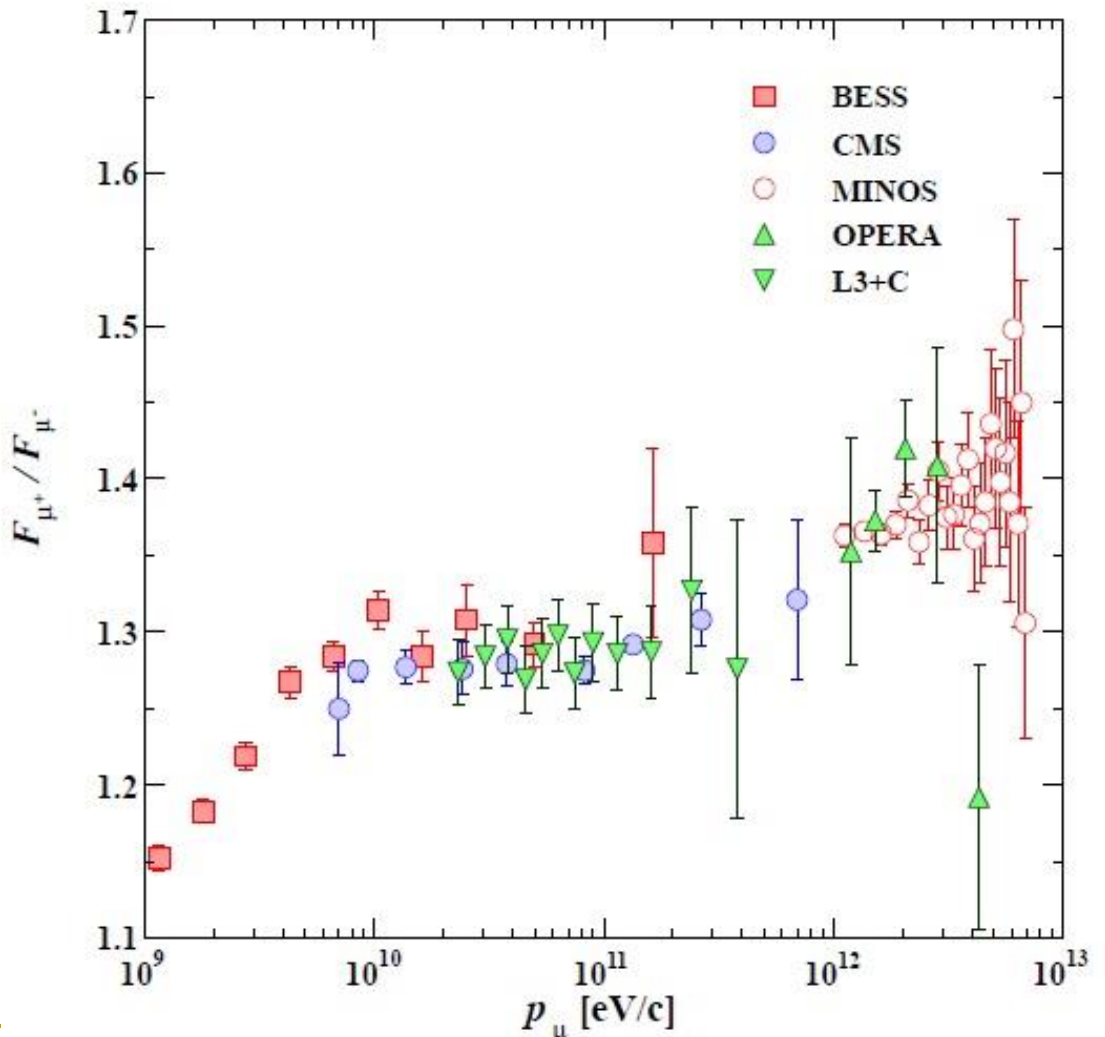
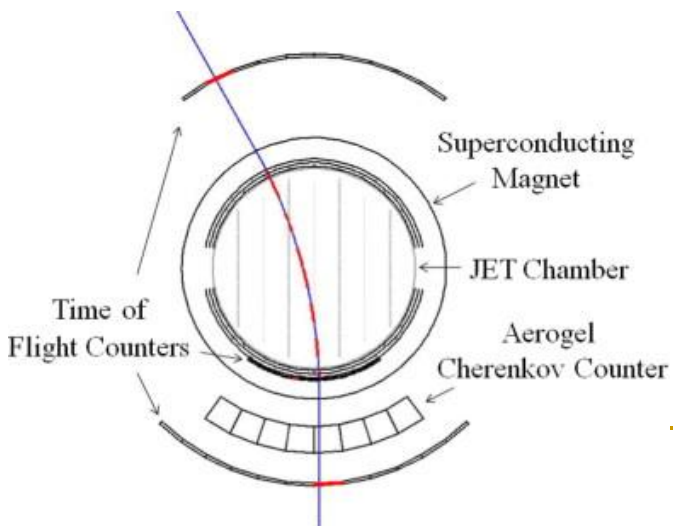


Cosmici (DT/barrel) estrapolati alla superficie

Si vede il pozzo principale e l'ombra di due pozzi più piccoli usati per l'accesso di personale/materiale

# Misure con raggi cosmici a CMS

- Muon charge ratio vs  $p_\mu$ : eccesso di  $\pi^+$  su  $\pi^-$  e di  $K^+$  su  $K^-$  ( $p > n$ );  $R \uparrow$ :  $K \uparrow$  ad alta  $E$
- BESS Balloon Experiment with Superconducting Solenoid



---

- Fine della 1a parte A