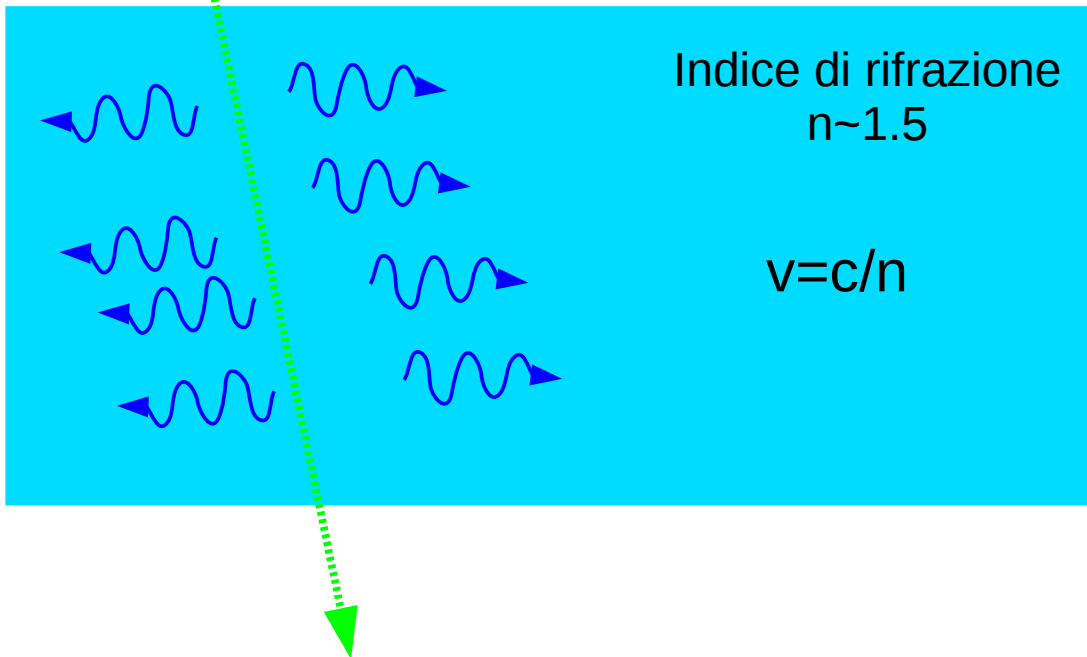


Stage Estivi LNF
Claudio Gatti

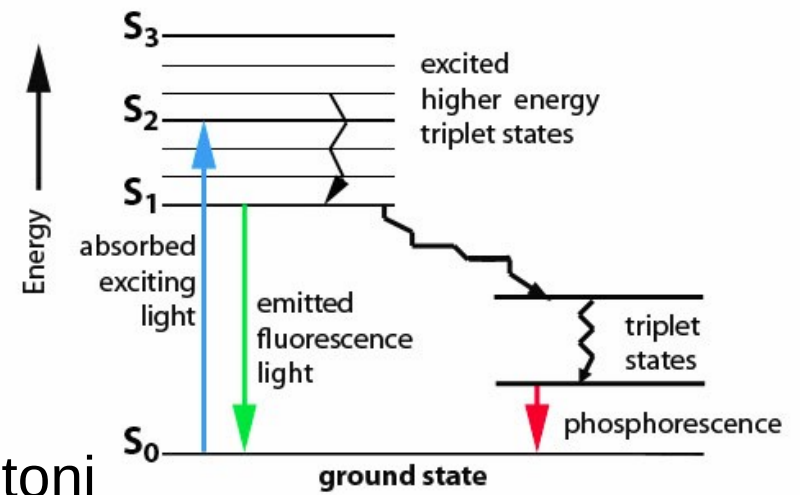


Scintillatori plastici

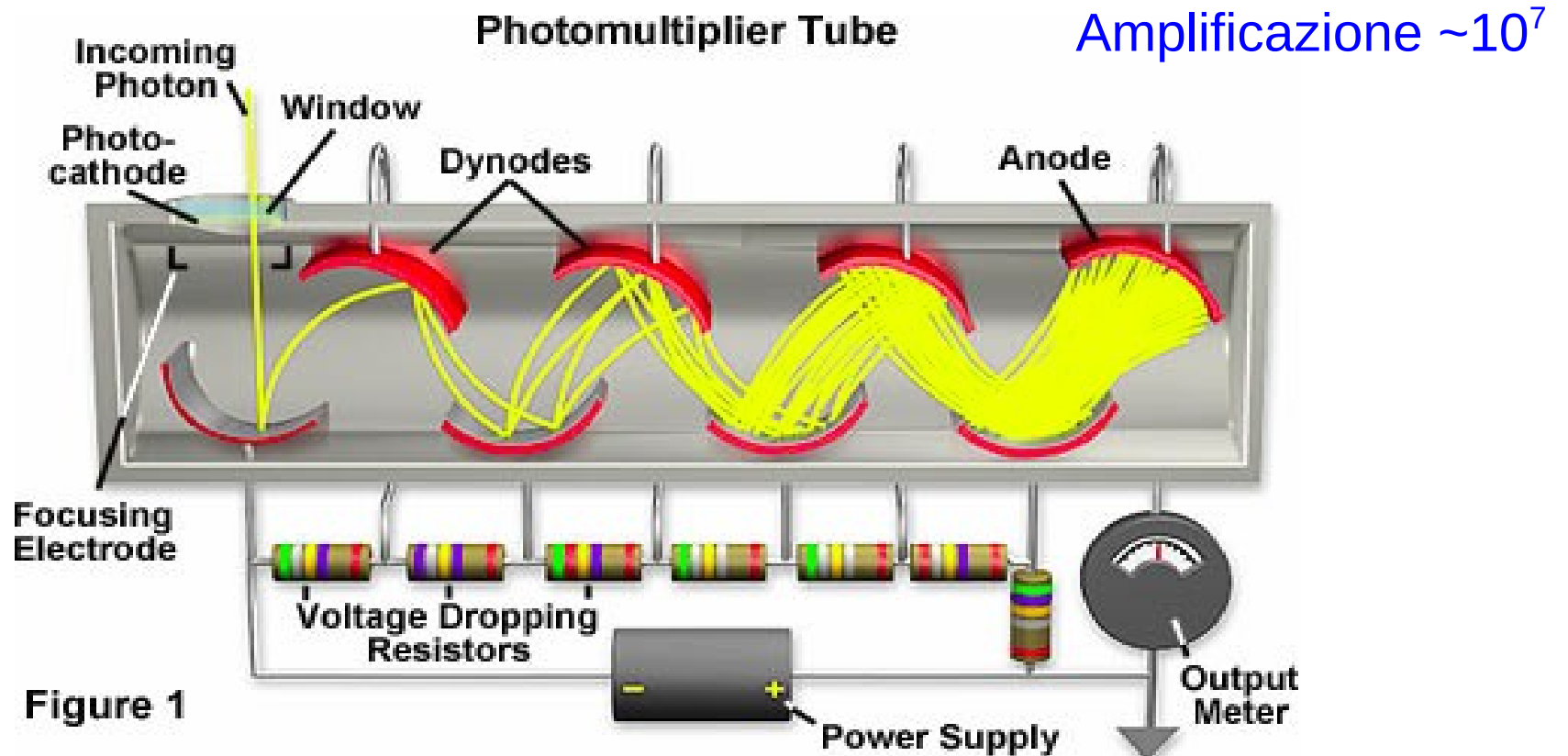
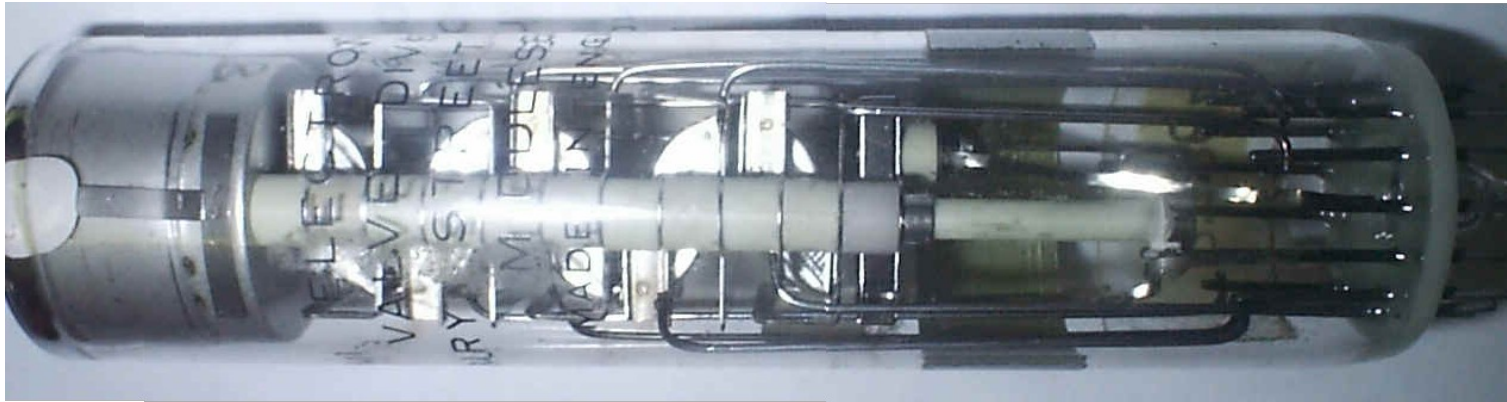
Una particella carica che attraversa un materiale scintillante, eccita il moto vibrazionale delle molecole che, diseccitandosi, emettono luce visibile. Circa **1 fotone ogni 100 eV** depositati.



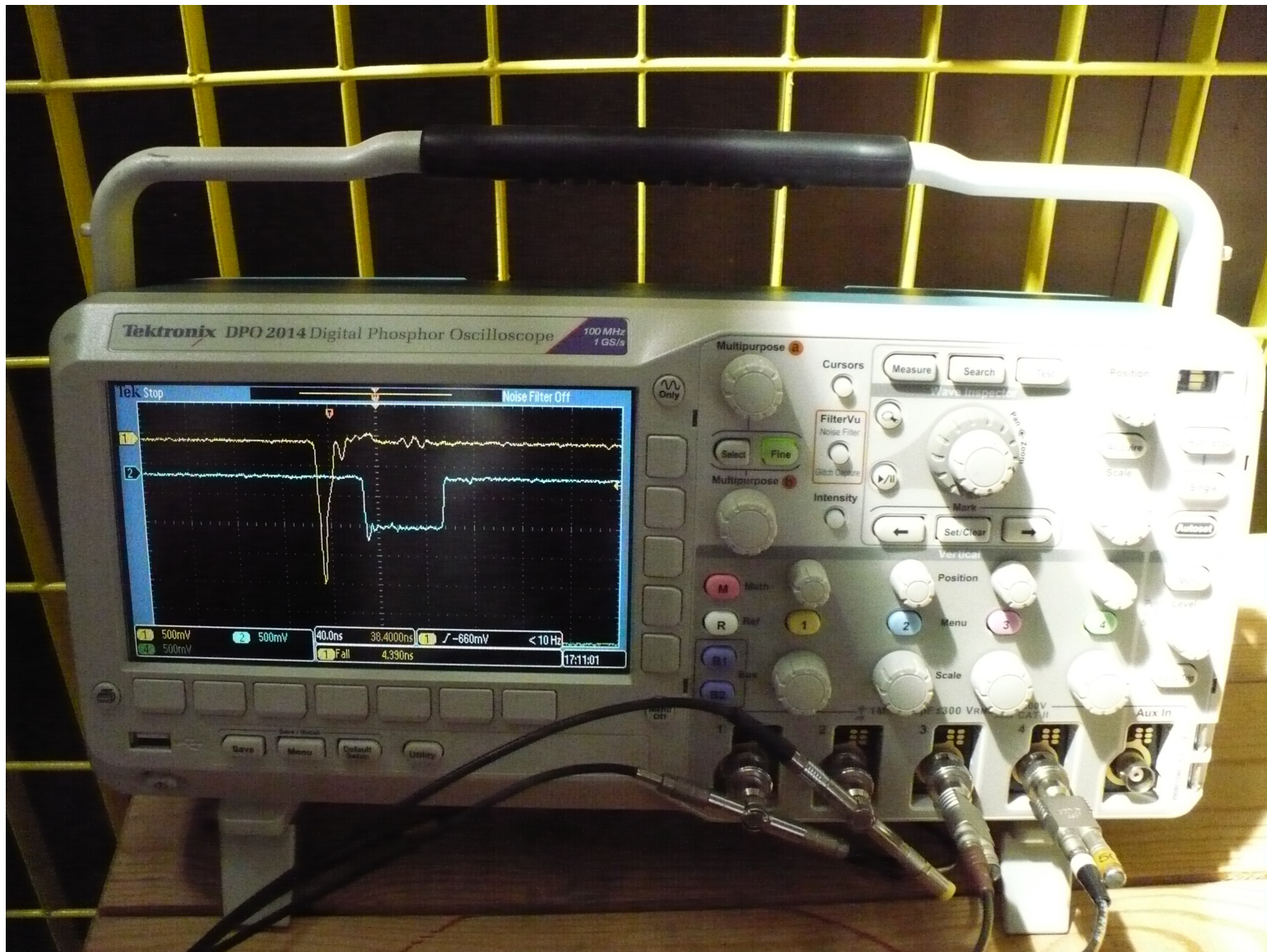
$$dE/dx \sim 2 \text{ MeV/cm} \Rightarrow 2 \text{ MeV}/100 \text{ eV} \sim 20000 \text{ fotoni}$$



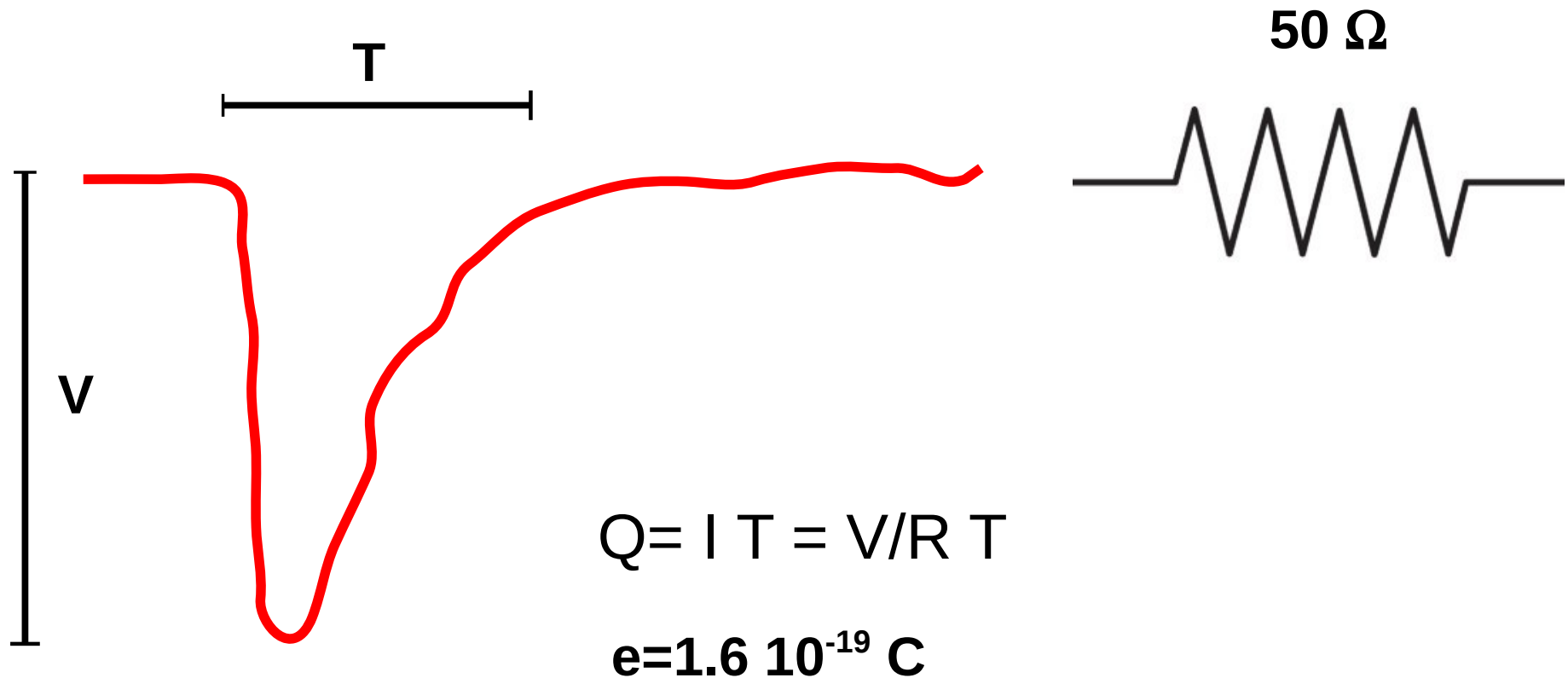
I fototubi



Osservazione dei segnali da scintillatori all'oscilloscopio



CARICA RACCOLTA



Numero totale di elettroni: $N_e = Q/e$

Quanti fotoni (fotoelettroni) N_{ph} ci aspettiamo?

A che fattore di amplificazione corrisponde N_e/N_{ph} ?

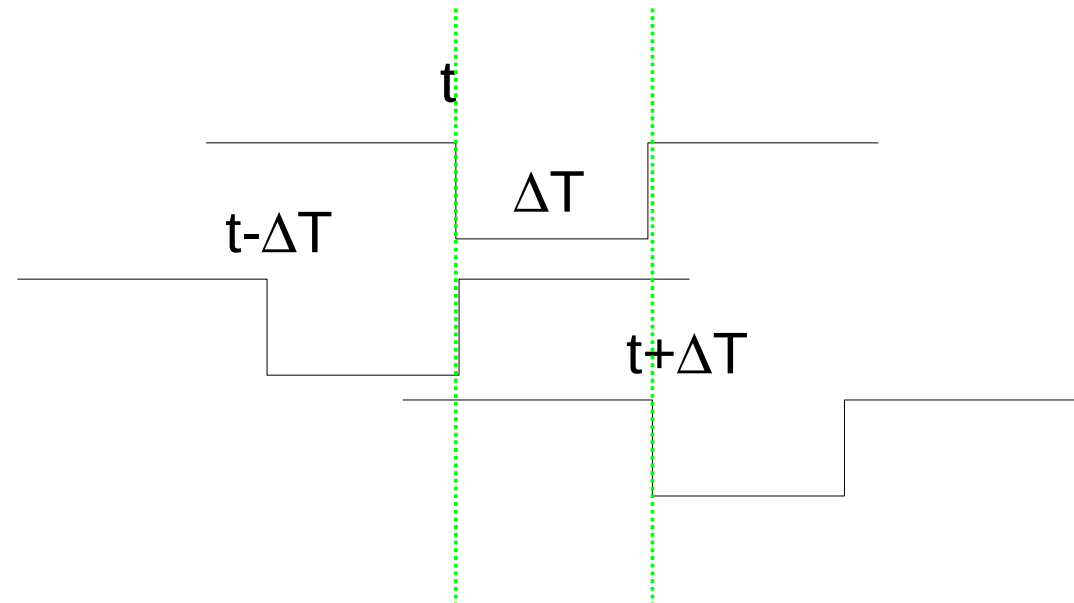
Coincidenze accidentali

A causa di fluttuazioni termiche si hanno segnali spuri dai fototubi. Per questo i conteggi in singola sono maggiori delle coincidenze.

$$\nu_{\text{noise}} \sim 100 \text{ Hz}$$

$$\Delta T = 70 \text{ ns}$$

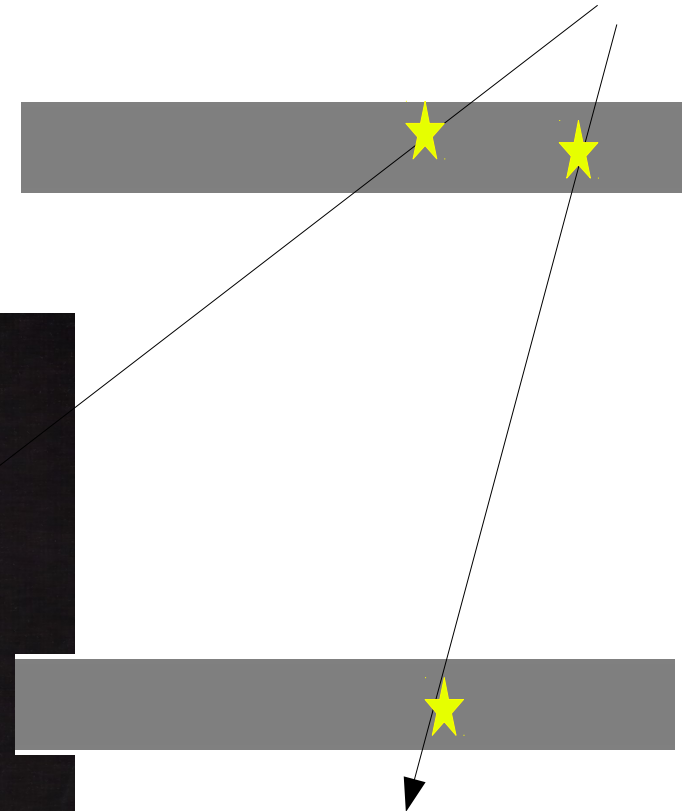
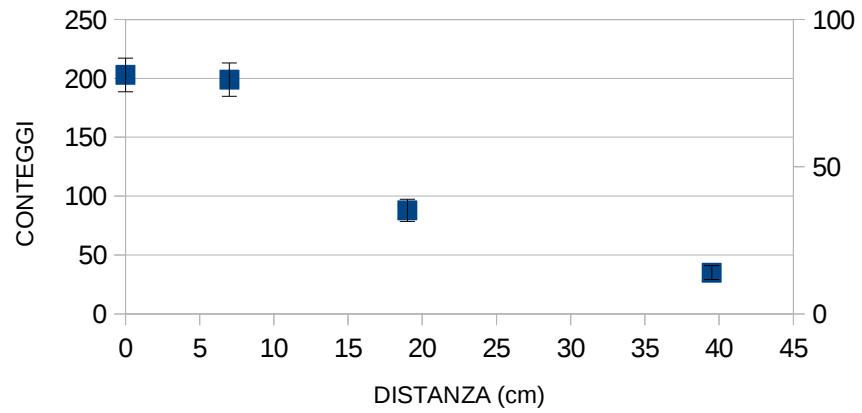
$$\nu_{\text{fake}} = \nu_{\text{noise}}^2 2\Delta T = 1.4 \text{ mHz}$$



Se abbiamo coincidenze a circa 1 Hz allora **non possono essere dovute a eventi casuali di rumore elettrico!** La coincidenza ci garantisce che stiamo veramente contando il passaggio di particelle ionizzanti.

ACCETTANZA GEOMETRICA

ACCETTANZA



STIMA DELL'ERRORE SUI CONTEGGI

Calcolo dell'errore

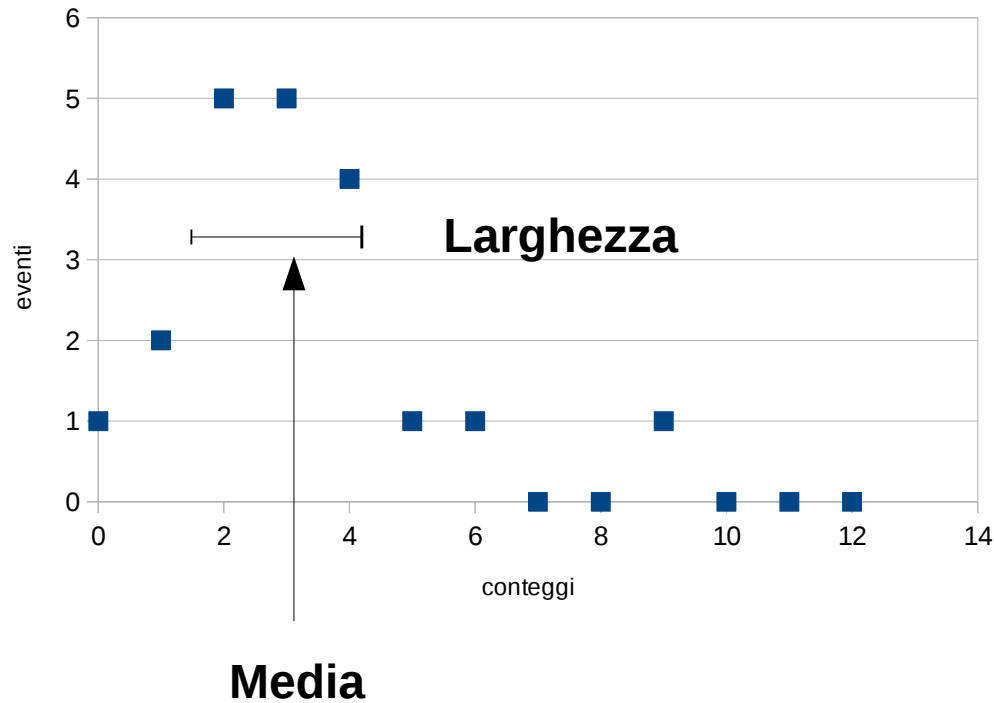
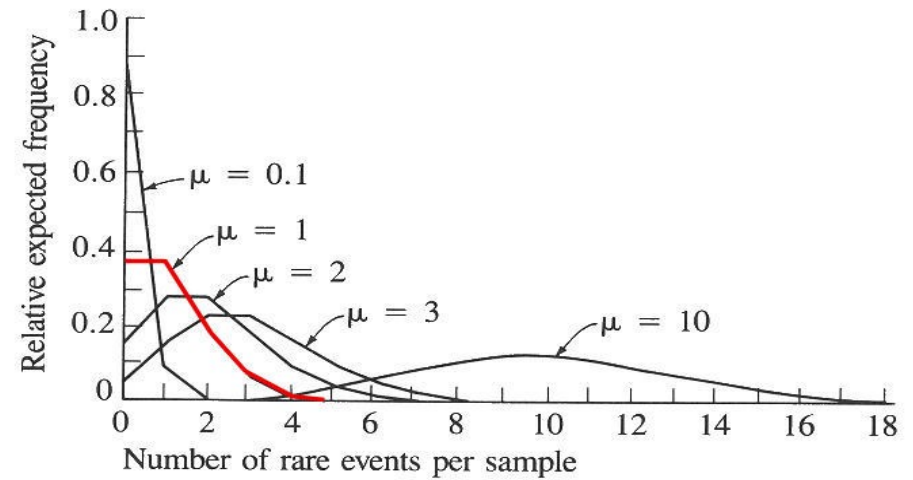
I conteggi seguono la statistica di Poisson.
Se si contano N eventi in un tempo T,
l'errore aspettato sui conteggi è pari a $\sqrt{N}$.

La stima della frequenza è

$v = N/T$ con errore $\sqrt{N}/T$.

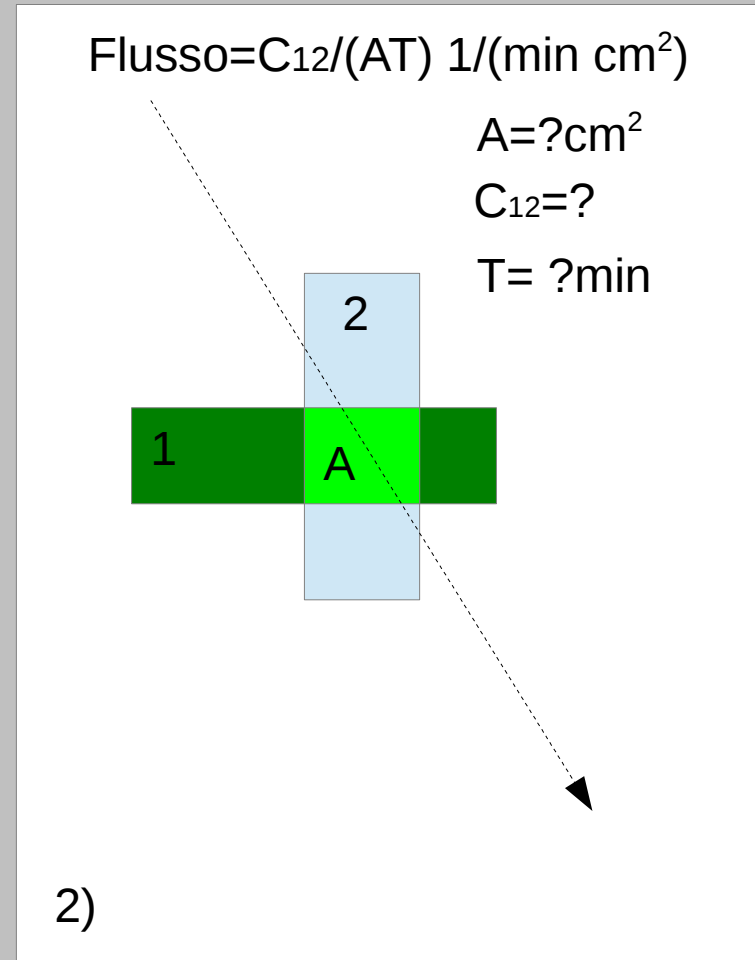
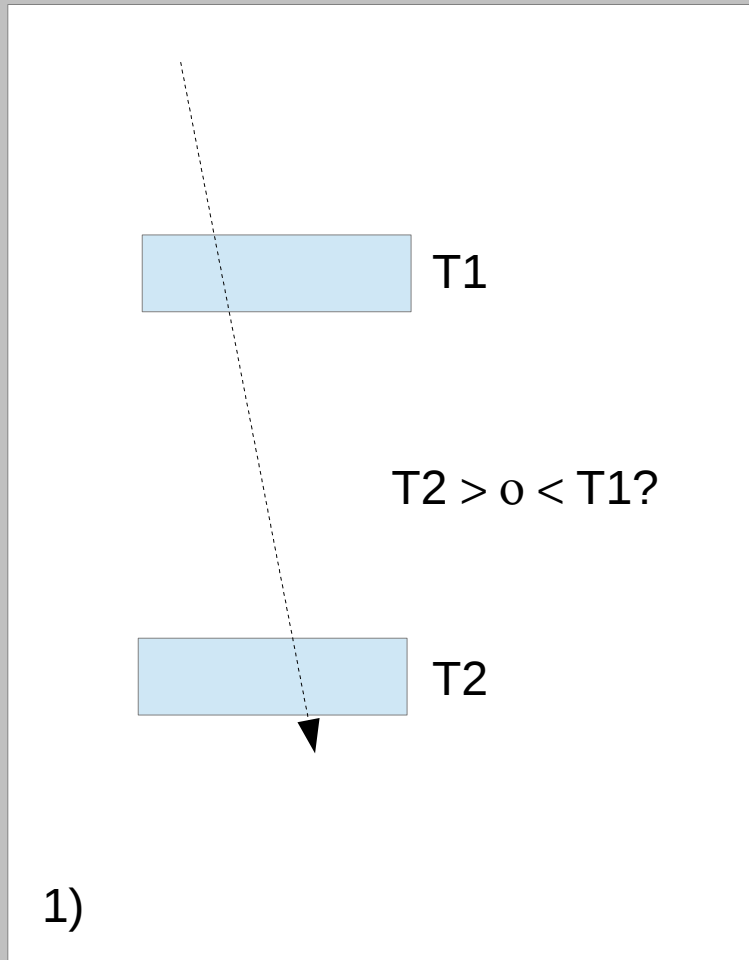
Con 100 conteggi si ha una stima

$\Delta v/v = 10/100 = 10\%$



Prendere una serie di conteggi per 10 s (20 o 30 misure) e fare la distribuzione con un foglio di calcolo. Verificare che la semi-larghezza è circa la radice quadrata del valor medio.

- 1) Verificare che le particelle osservate vengono dall'alto
- 2) Misurare il flusso di particelle al minuto e cm^2



Time = 2 h

- 1) La radiazione cosmica al livello del mare è composta da una singola particella o da uno sciame?
- 2) Con che frequenza si hanno sciame?
- 3) Che estensione hanno?

Frequenza ν (1/min)

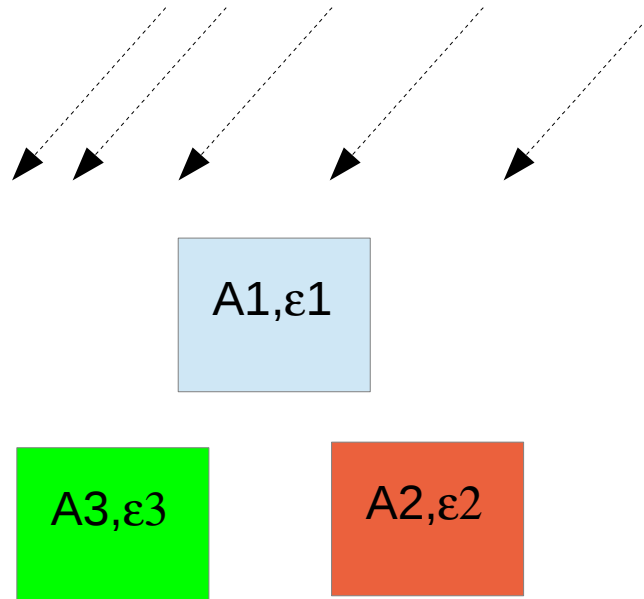
Densità ρ (1/m²)

A Area

ϵ efficienza

T tempo

C coincidenze



Se $A\rho \ll 1$

$$C_{12} = A_1 A_2 \epsilon_1 \epsilon_2 \rho^2 \nu T$$

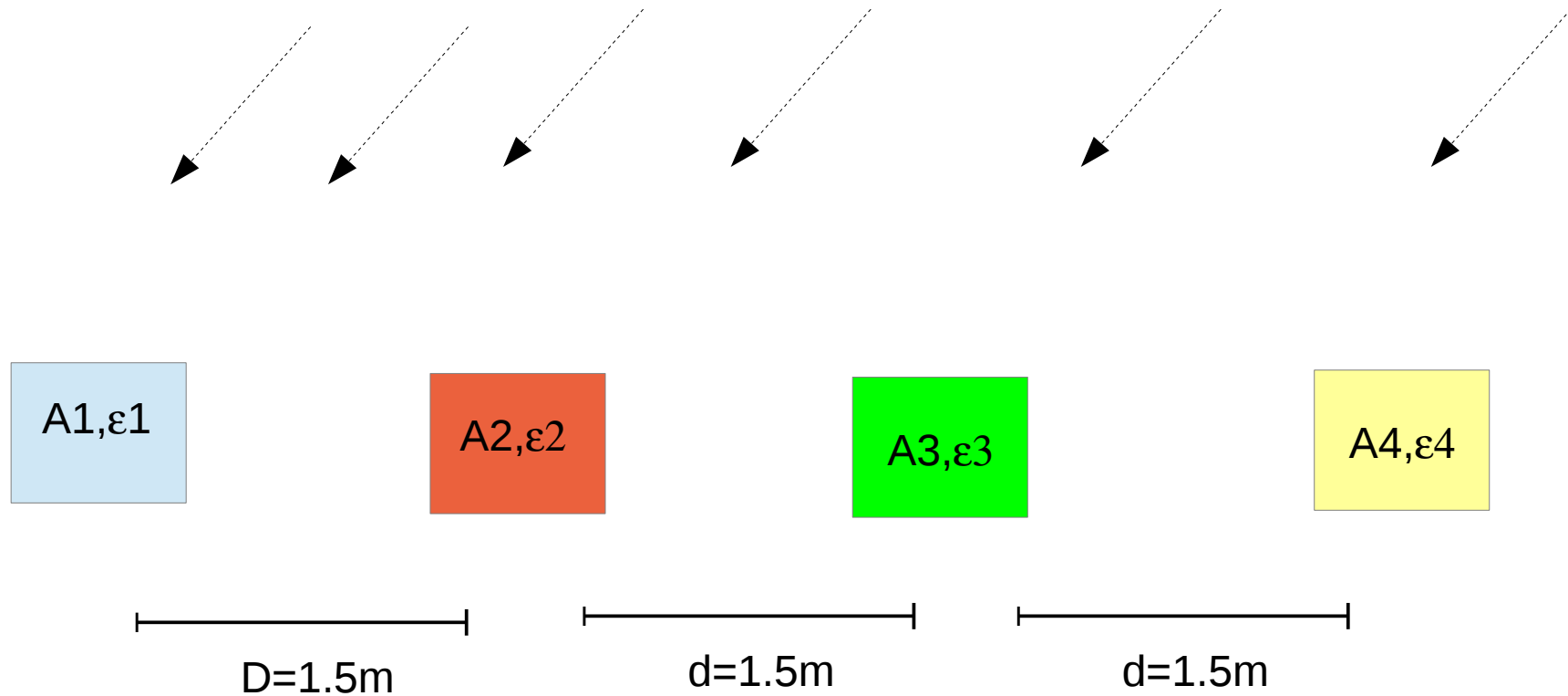
$$C_{123} = A_1 A_2 A_3 \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3 \rho^3 \nu T$$

$$\rho = C_{123}/C_{12} \cdot 1/(A_3 \epsilon_3)$$

$$\nu = C_{12}/(A_1 A_2 \epsilon_1 \epsilon_2 \rho^2 T)$$

Time=2 h

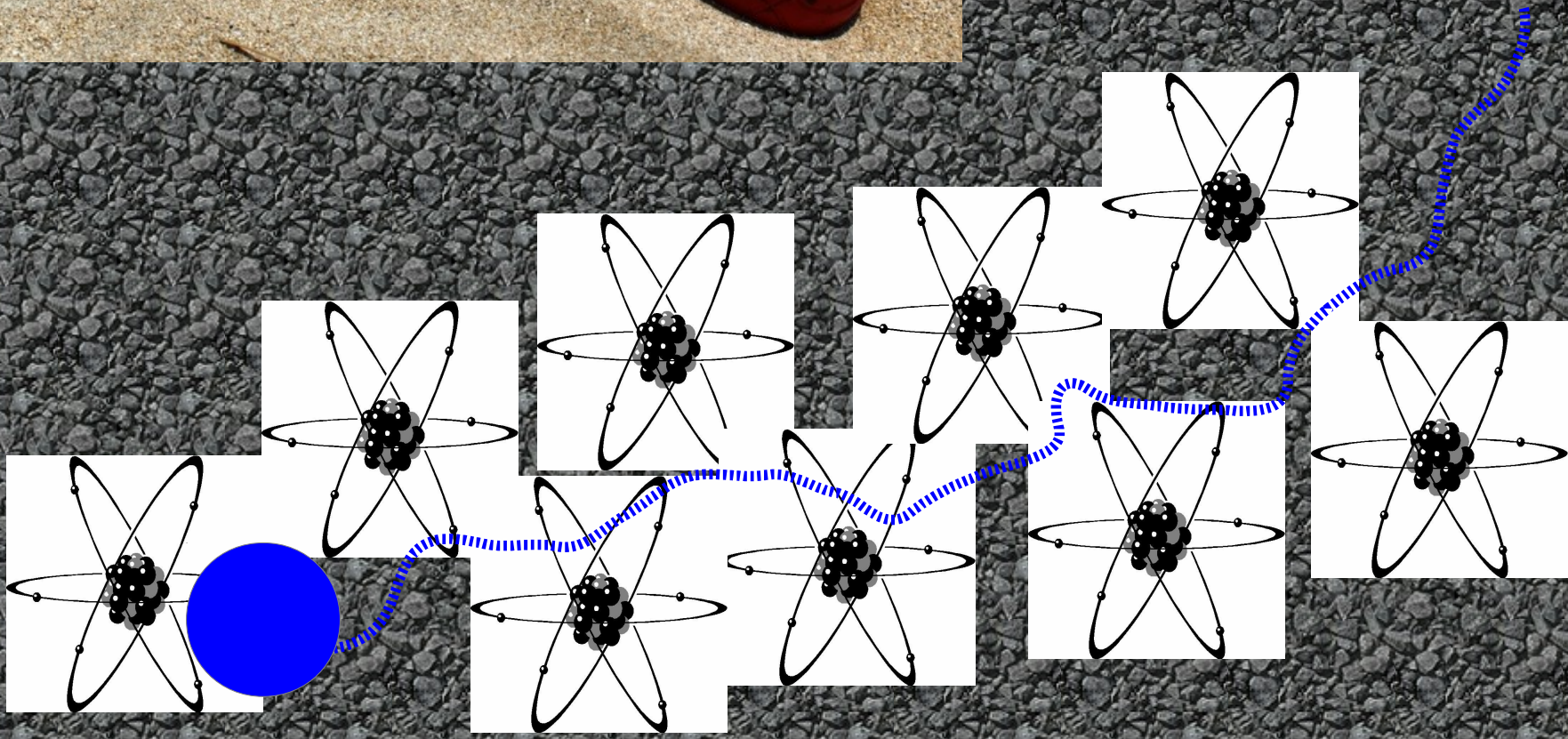
- 1) La radiazione cosmica al livello del mare è composta da una singola particella o da uno sciame?
- 2) Con che frequenza si hanno sciame?
- 3) Che estensione hanno?

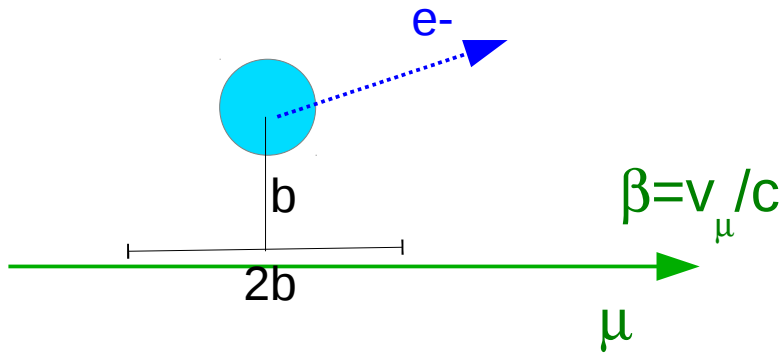


Time=12 h



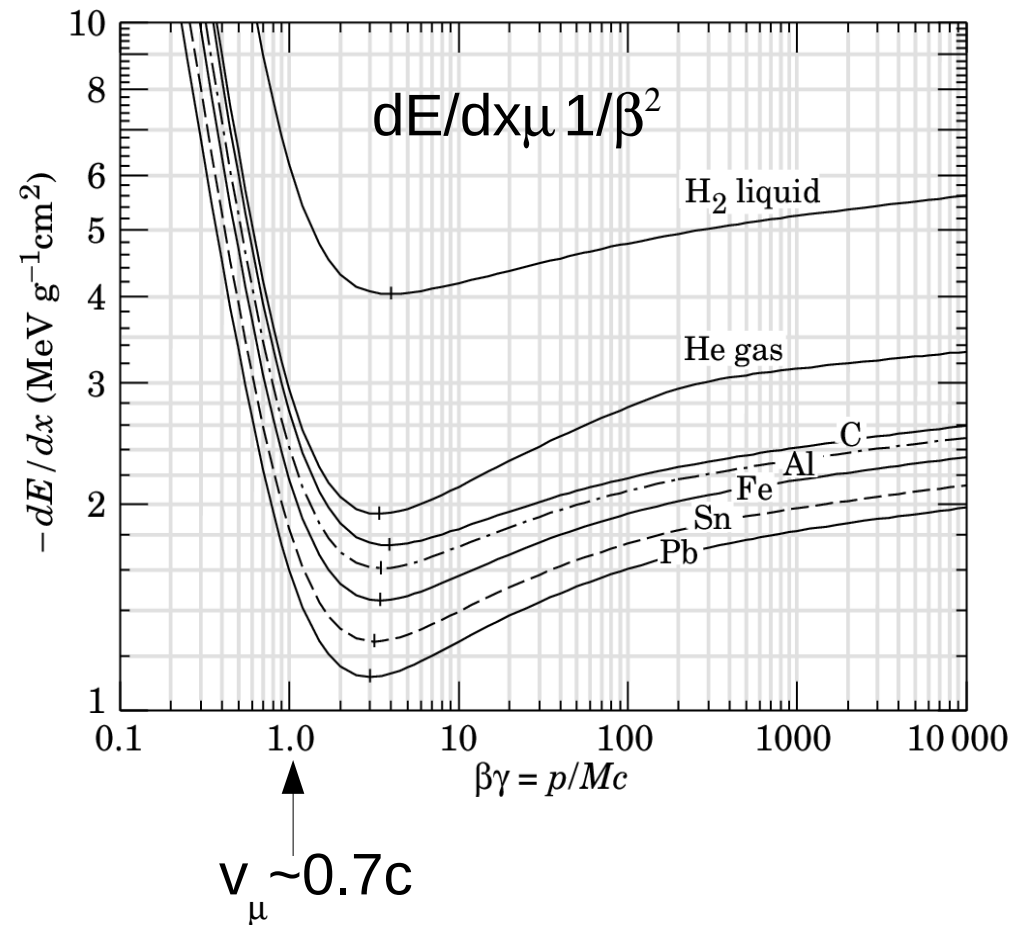
Un particella carica ($M > m_e$) viene frenata dagli elettroni che incontra, come le bocce dai granelli di sabbia.





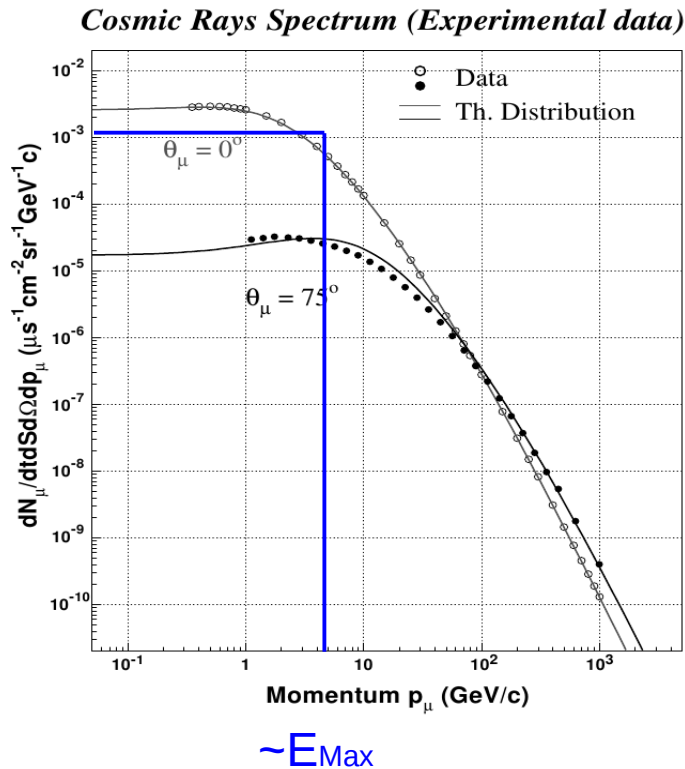
$$m_e v_e = F \Delta t = e E 2b / v_\mu$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} m_e v_e^2 = \frac{1}{v_\mu^2}$$

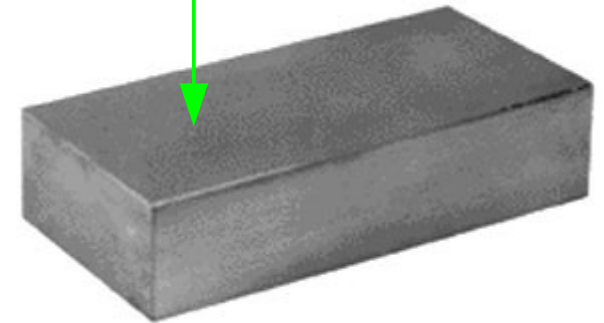


La particella μ urta gli elettroni della materia che la circonda trasferendogli impulso ($dp = Fdt$). Se b è la minima distanza dall'elettrone, allora la maggior parte dell'impulso viene trasferita quando la particella transita in una regione lunga $2b$ attorno al punto di minimo approccio. Quindi il trasferimento di impulso avviene in un tempo $\Delta t = 2b/v_\mu$. Ne deriva che l'energia acquistata dall'elettrone (e quindi persa dalla particella μ) è proporzionale a $1/v_\mu^2$.

Qual'è l'energia caratteristica dei raggi cosmici?



5 cm



$$\Delta E = (dE/dx)_{Pb} \rho h = 1.122 \times 11.35 \times 5 = 64 \text{ MeV}$$

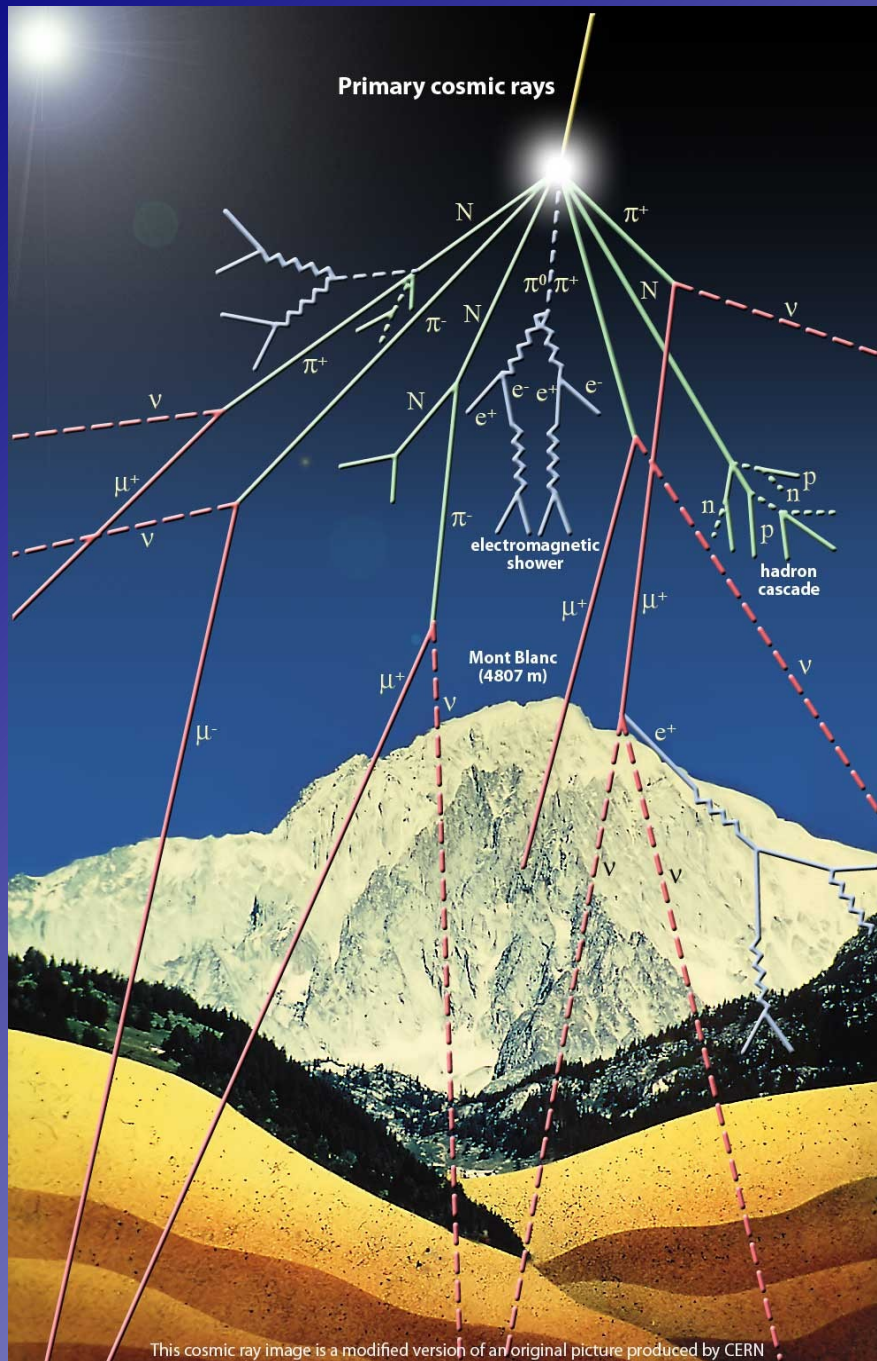
Le particelle con $E < \Delta E$ si fermano nel piombo, in particolare se ne fermano all'incirca:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta E}{E_{Max}}.$$

Misurando la frazione $\Delta N/N$ possiamo stimare E_{Max} :

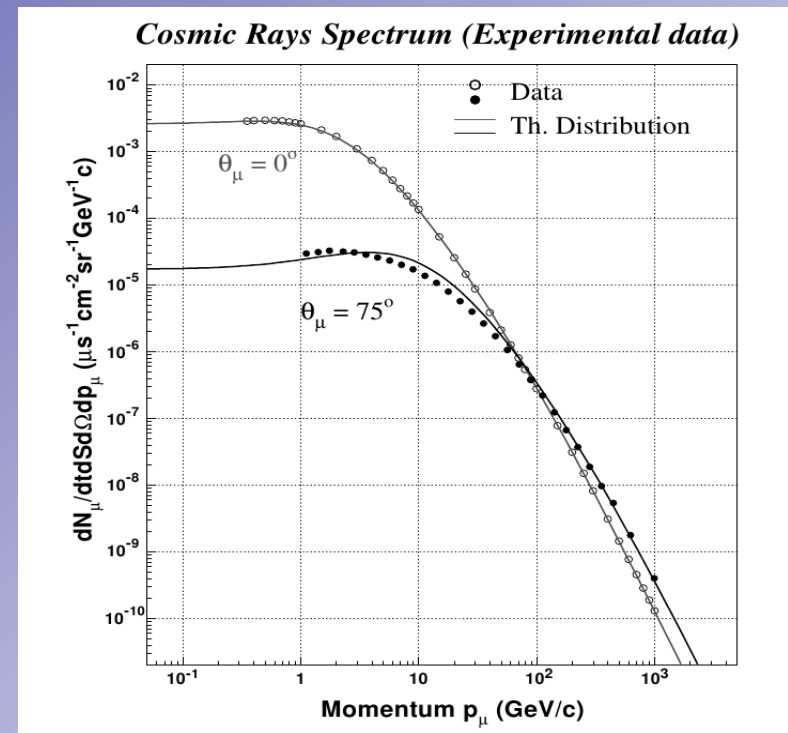
$$E_{Max} = \Delta E \times N / \Delta N = 64 \text{ MeV} / (?)\%$$

I Raggi Cosmici



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

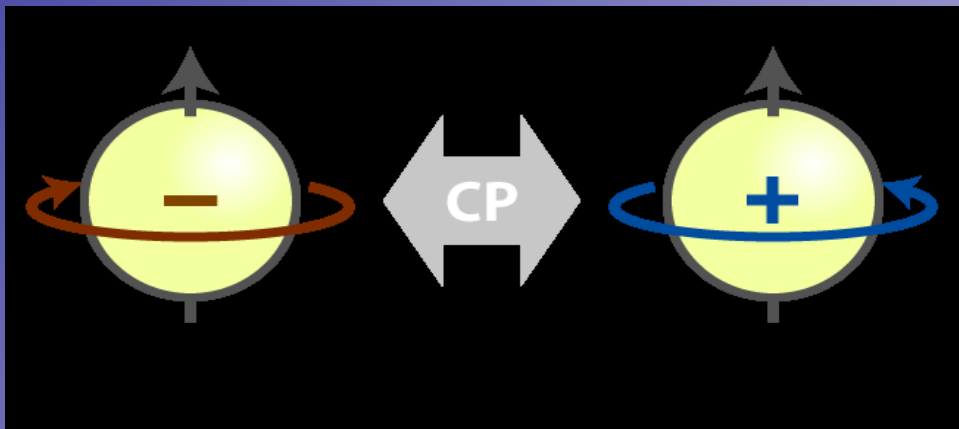
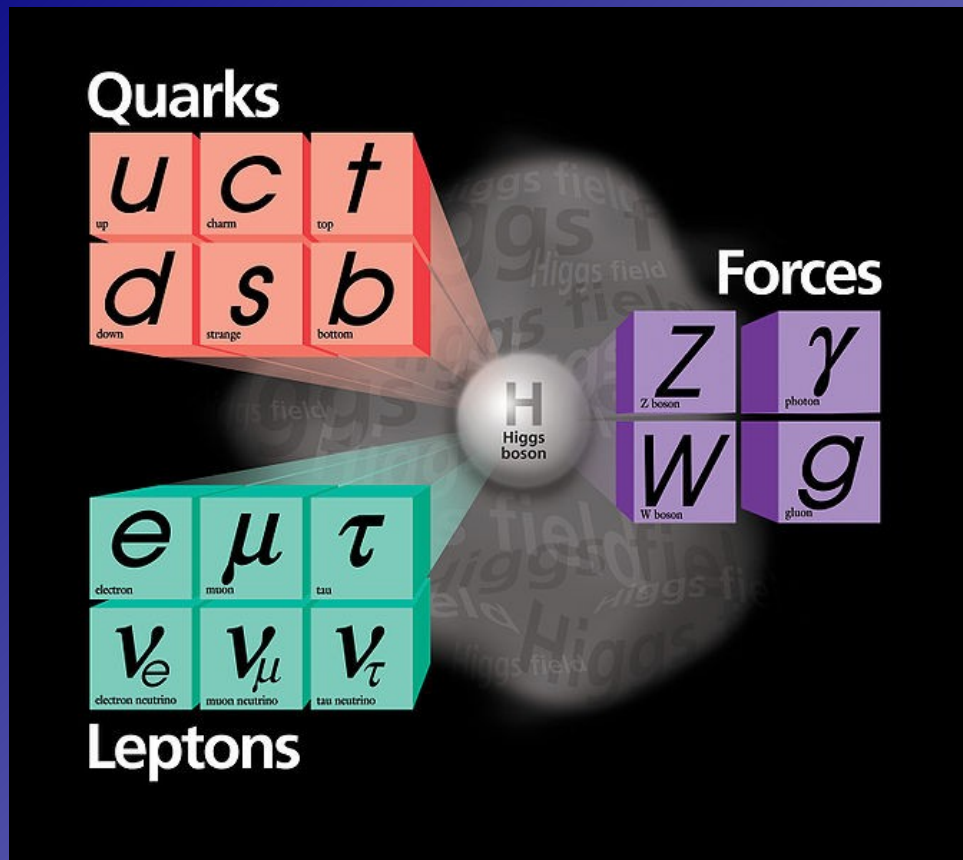
I muoni sono prodotti in abbondanza negli sciami adronici creati negli urti con l'atmosfera dei raggi “cosmici” primari provenienti dallo spazio.



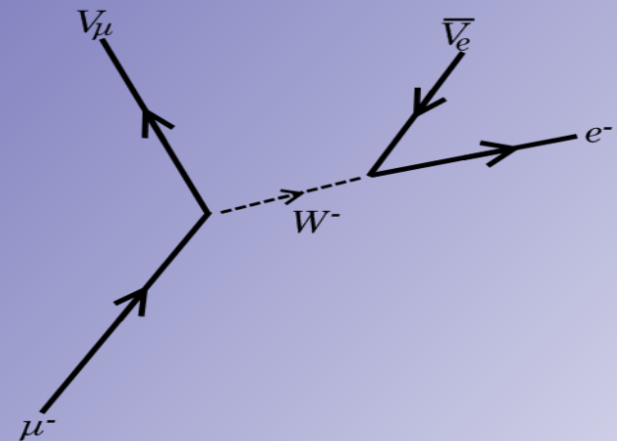
$$\text{Energia Totale Sciame} \sim E_{\text{Max}} R^2 \rho$$

Stima molto rozza, in realtà a terra arriva 10% particelle e la componente soft ha energie pari a circa 100 MeV.

Il Muone

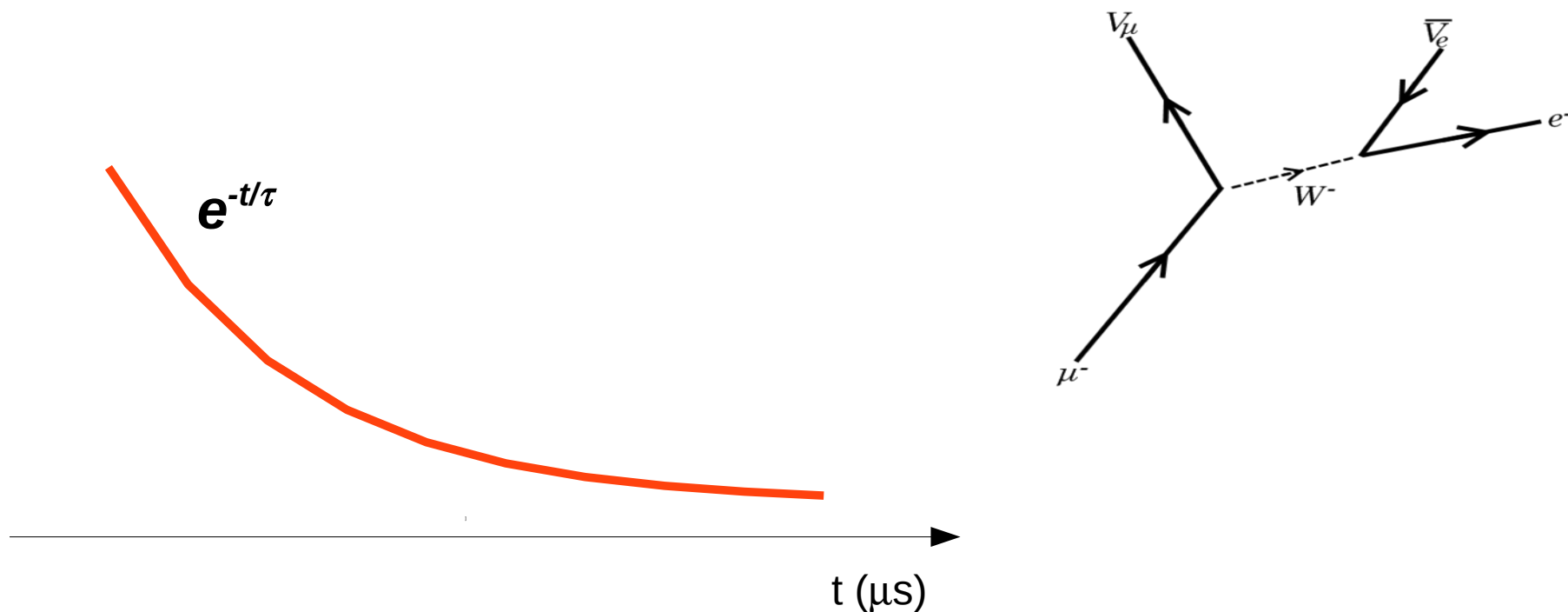


Il muone è una particella elementare simile all'elettrone ma con massa 200 volte maggiore (105 MeV). Il muone **non è una particella stabile!** Al contrario dell'elettrone infatti si trasforma (decade) in un elettrone e due neutrini con un tempo caratteristico (vita media) di circa 2.2 μs ($1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$).



Come l'elettrone, anche il muone ha carica negativa (μ^-) mentre la sua **antiparticella** ha carica positiva (μ^+).

Il decadimento del μ



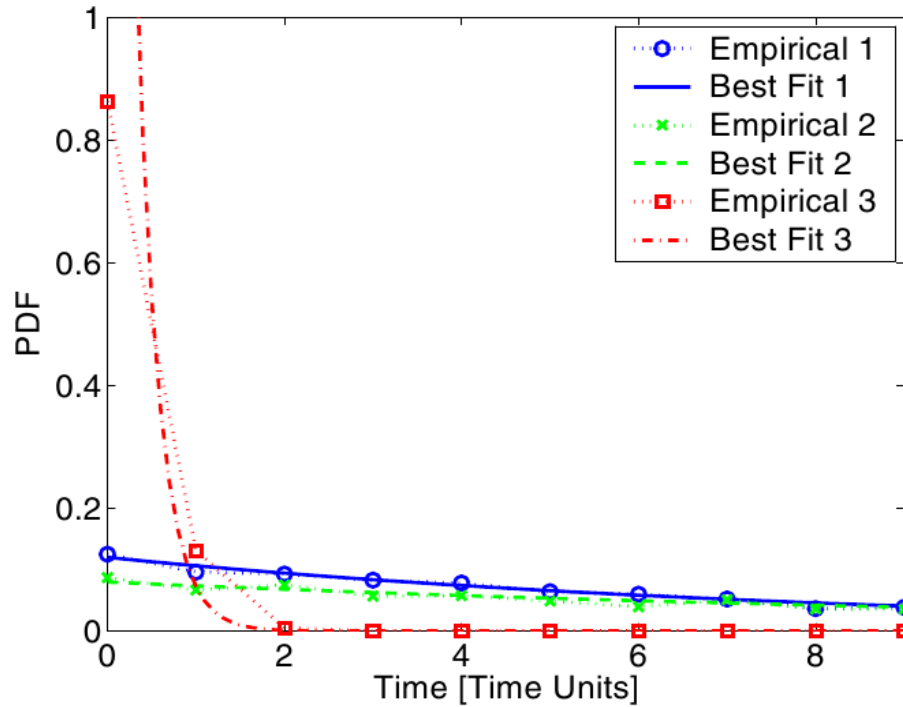
Il muone ha **in ogni istante** una probabilità $\Delta t/\tau$ di decadere, nell'intervallo di tempo Δt successivo, in un elettrone e due neutrini, dove τ è la sua **vita media** ($\sim 2.2 \mu\text{s}$). La probabilità che **non** decada (*sopravviva*) al tempo $t=\Delta t$ è: $(1-\Delta t/\tau)$. Che sopravviva al tempo $t=2\Delta t$: $(1-\Delta t/\tau)^2$; $t=3\Delta t$: $(1-\Delta t/\tau)^3$ etc. etc..

In generale per $t=N\Delta t$:

$$p(t)=(1-t/N\tau)^N \Rightarrow e^{-t/\tau}$$

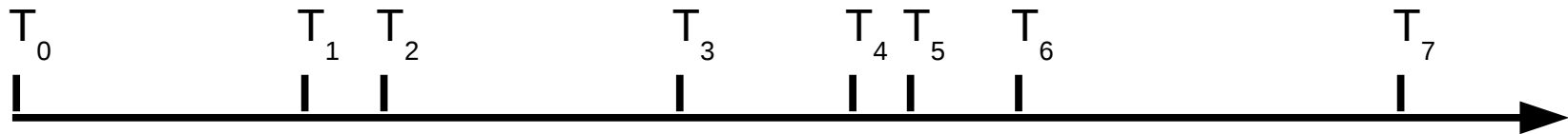
Processi poissoniani

Tempo di arrivo tra due chiamate in una rete di telefoni cellulari.



Il processo poissoniano descrive come si distribuiscono nel tempo eventi che si verificano con una frequenza costante ν . In un intervallo di tempo t la probabilità che si verifichino n eventi è pari a:

$$P_n(\nu t) = \frac{(\nu t)^n}{n!} e^{-\nu t}$$

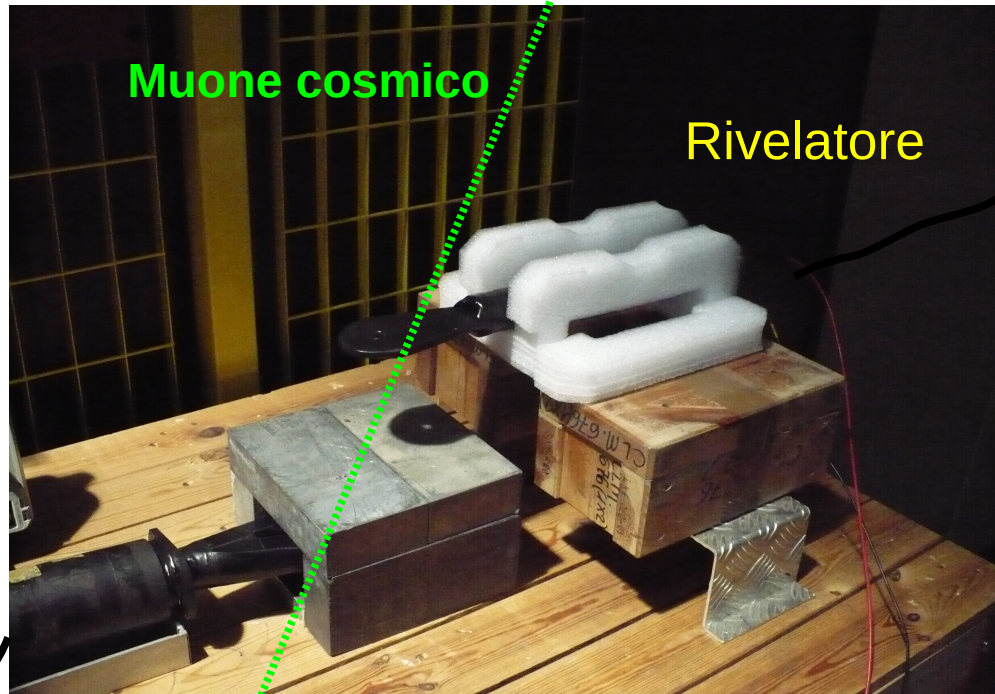


Probabilità che l'evento 1 avvenga un tempo T_1 dopo l'evento 0 ($T_0=0$):

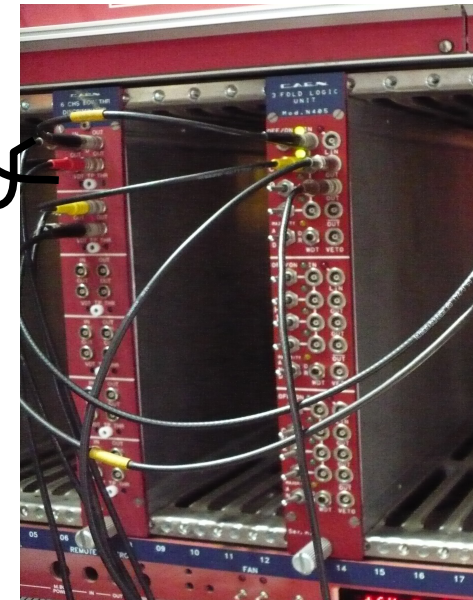
- probabilità che ci siano 0 eventi tra T_0 e T_1 : $e^{-\nu T_1}$
- probabilità di avere un evento al tempo T_1 in un intervallo dT : νdT

$$\rightarrow p(T_1) dT = e^{-\nu T_1} \nu dT$$

Misura della distanza temporale tra due cosmici consecutivi

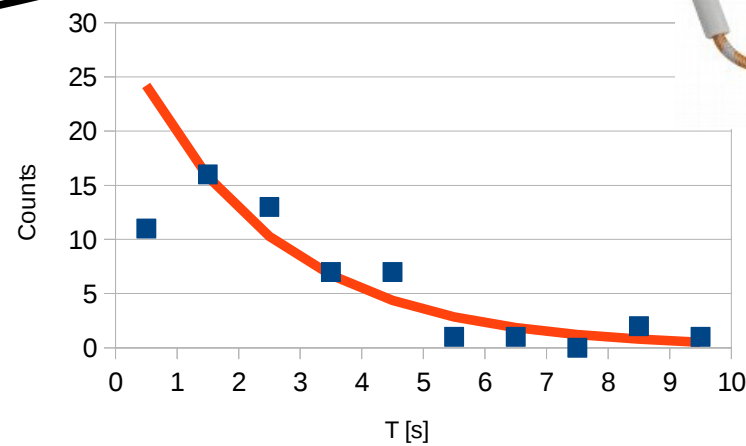


Elettronica di lettura



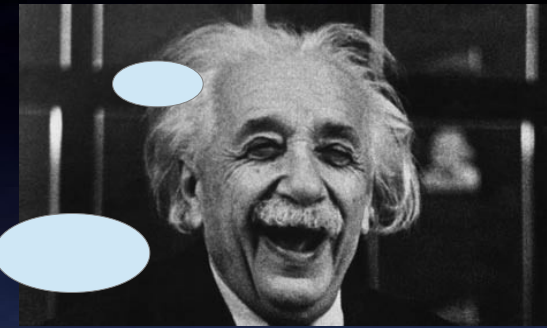
Cavo lemo

Poisson



■ Data
— NO e-t/t

La dilatazione dei tempi propri



μ

$h=10 \text{ km}$

Tempo di volo:

$$T=10 \text{ km}/c=33 \mu\text{s} \sim 15\tau$$

Probabilità di sopravvivenza:

$$e^{-T/\tau} = 3 \times 10^{-7} = 0.0000003$$

Il tempo per il muone scorre più lentamente del nostro di un fattore pari alla sua energia diviso la sua massa: $T_{\mu} = T/\gamma$ dove $\gamma = E/m_{\mu}$.

Per $E \sim 3 \text{ GeV}$ ($m_{\mu} = 105 \text{ MeV}$): $\gamma = 3/0.105 \sim 29$

$$e^{-T/\gamma\tau} = e^{-33/(29 \times 2.2)} = 0.6 \Rightarrow 60\% \text{ di sopravvivenza!}$$

$$c \sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$



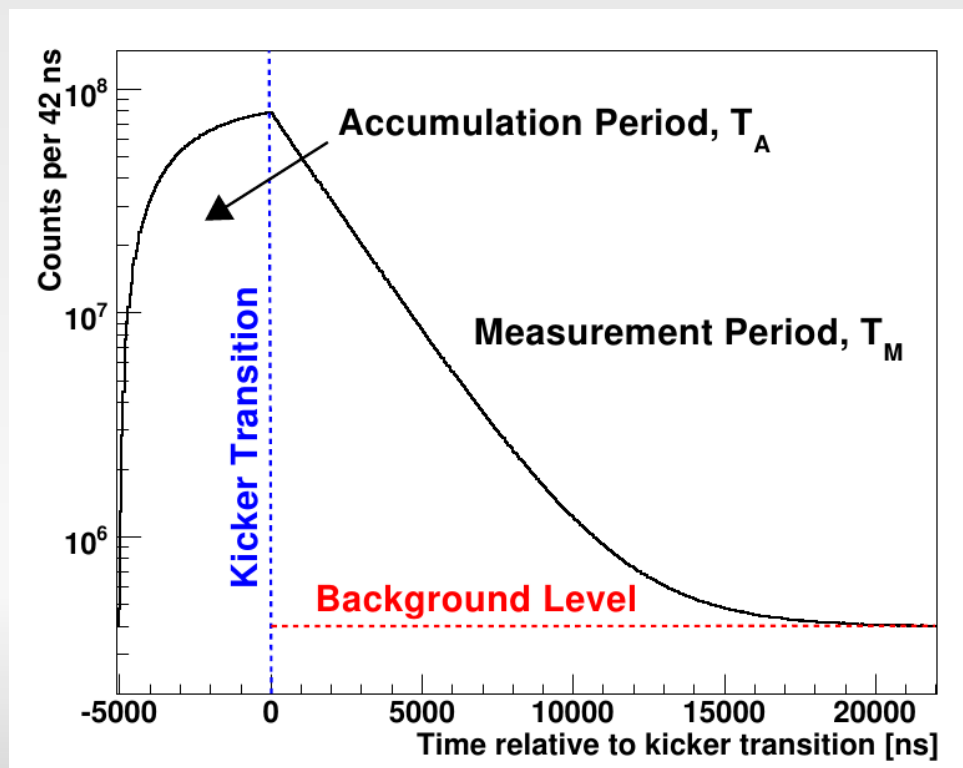
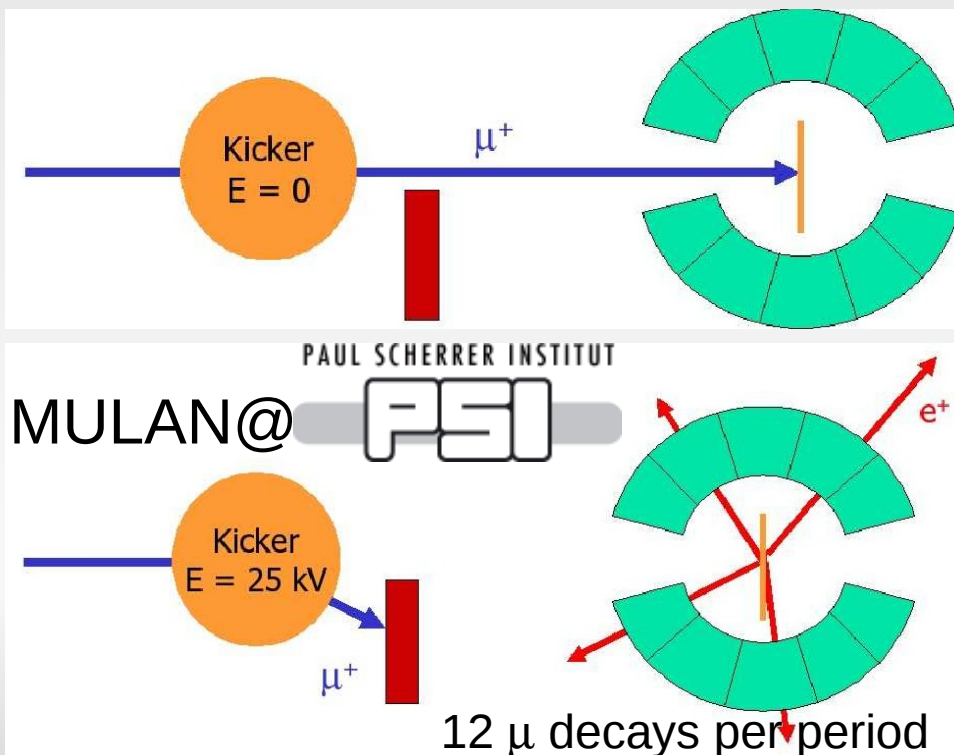
La Vita Media del Muone

<http://pdg.lbl.gov/2012/listings/rpp2012-list-muon.pdf>

μ MEAN LIFE τ

Measurements with an error $> 0.001 \times 10^{-6}$ s have been omitted.

VALUE (10^{-6} s)	DOCUMENT ID	TECN	CHG	COMMENT
2.1969811 $\pm$ 0.0000022 OUR AVERAGE				ArXiv:1010.0991v2
2.1969803 $\pm$ 0.0000022 ~2 ps!!!	WEBBER	11	CNTR +	Surface μ^+ at PSI



La Costante di Fermi

<http://pdg.lbl.gov/2012/reviews/rpp2012-rev-standard-model.pdf>

The Fermi constant, $G_F = 1.1663787(6) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$, is derived from the muon lifetime formula***,

$$\frac{\hbar}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3} F(\rho) \left[1 + H_1(\rho) \frac{\hat{\alpha}(m_\mu)}{\pi} + H_2(\rho) \frac{\hat{\alpha}^2(m_\mu)}{\pi^2} \right], \quad (10.6)$$

where $\rho = m_e^2/m_\mu^2$, and where

Spazio fasi $F(\rho) = 1 - 8\rho + 8\rho^3 - \rho^4 - 12\rho^2 \ln \rho = 0.99981295,$ (10.7a)

Correzioni radiative $H_1(\rho) = \frac{25}{8} - \frac{\pi^2}{2} - \left(9 + 4\pi^2 + 12 \ln \rho \right) \rho$
 $+ 16\pi^2 \rho^{3/2} + \mathcal{O}(\rho^2) = -1.80793,$ (10.7b)

$$H_2(\rho) = \frac{156815}{5184} - \frac{518}{81}\pi^2 - \frac{895}{36}\zeta(3) + \frac{67}{720}\pi^4 + \frac{53}{6}\pi^2 \ln 2$$
$$- (0.042 \pm 0.002)_{\text{had}} - \frac{5}{4}\pi^2 \sqrt{\rho} + \mathcal{O}(\rho) = 6.64, \quad (10.7c)$$

$$\hat{\alpha}(m_\mu)^{-1} = \alpha^{-1} + \frac{1}{3\pi} \ln \rho + \mathcal{O}(\alpha) = 135.901 \quad (10.7d)$$

μ MAGNETIC MOMENT ANOMALY

The parity-violating decay of muons in a storage ring is observed. The difference frequency ω_a between the muon spin precession and the orbital angular frequency $(e/m_\mu c)\langle B \rangle$ is measured, as is the free proton NMR frequency ω_p , thus determining the ratio $R = \omega_a/\omega_p$. Given the magnetic moment ratio $\lambda = \mu_\mu/\mu_p$ (from hyperfine structure in muonium), $(g-2)/2 = R/(\lambda - R)$.

$$\mu_\mu / (e\hbar/2m_\mu) - 1 = (g_\mu - 2)/2$$

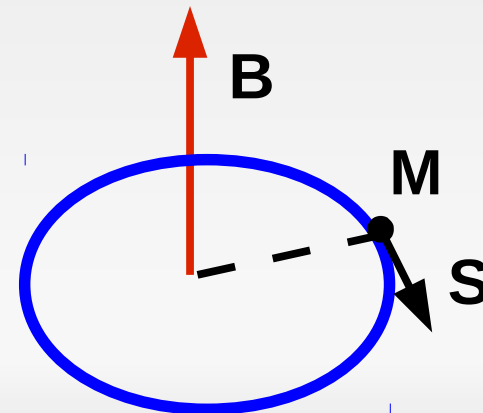
VALUE (units 10^{-10})	DOCUMENT ID	TECN	CHG	COMMENT
11659208.9 ± 5.4 ± 3.3	⁷ BENNETT 06	MUG2		Average μ^+ and μ^-

$$\mu = -\frac{geS}{2M}$$

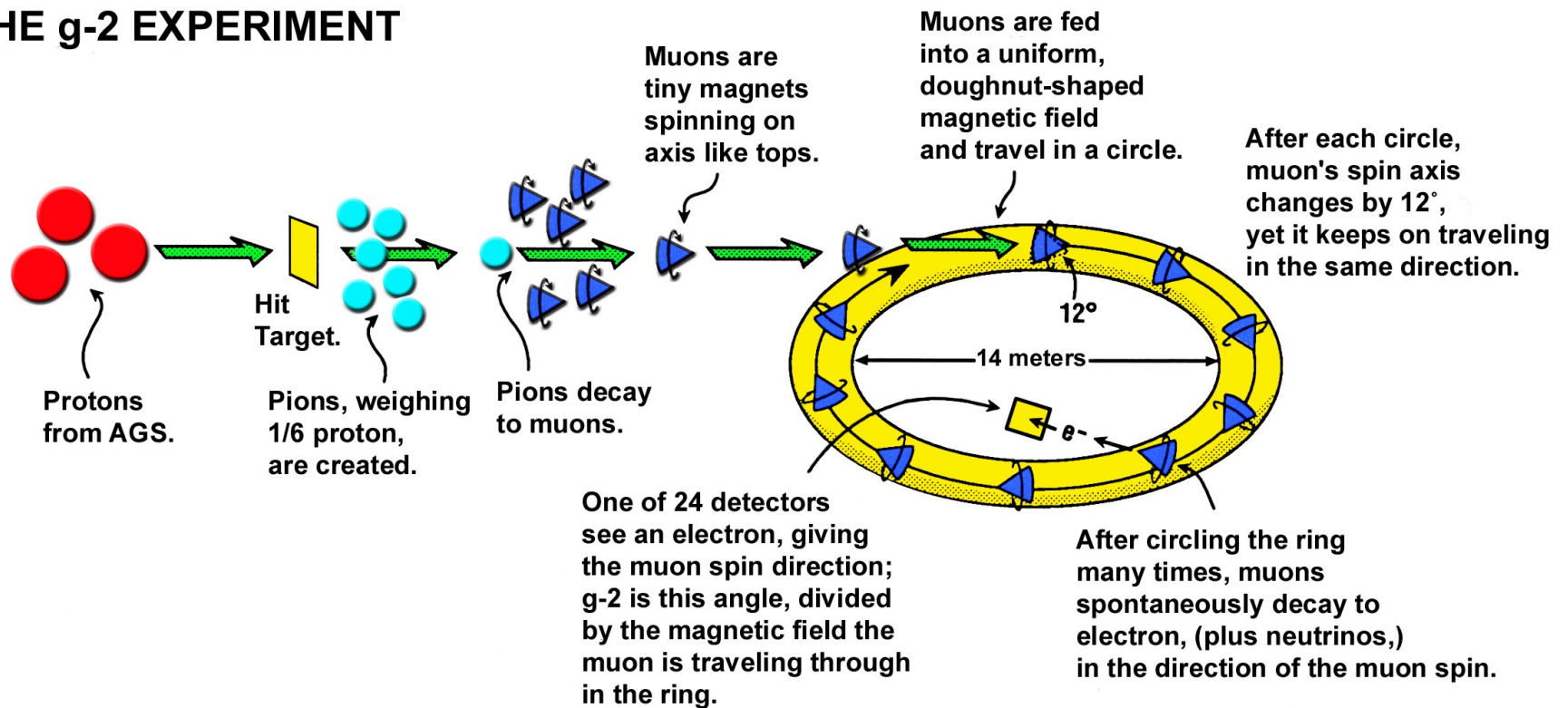
$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \mu \wedge B$$

$$P = eBR$$

$$\omega_{prec} - \omega_{cycl} = \frac{eB}{2M}(g-2)$$



LIFE OF A MUON: THE g-2 EXPERIMENT



LFV

μ^- DECAY MODES

μ^+ modes are charge conjugates of the modes below.

Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level
------	--------------------------------	------------------

Lepton Family number (LF) violating modes

Γ_4	$e^- \nu_e \bar{\nu}_\mu$	LF	$[c] < 1.2$	%	90%
Γ_5	$e^- \gamma$	LF	< 2.4	$\times 10^{-12}$	90%
Γ_6	$e^- e^+ e^-$	LF	< 1.0	$\times 10^{-12}$	90%
Γ_7	$e^- 2\gamma$	LF	< 7.2	$\times 10^{-11}$	90%

MEG@
PAUL SCHERRER INSTITUT
PSI

