

# Il mistero dei muoni: perché arrivano sulla terra e cosa c'entra la relatività del tempo e dello spazio?

Carlo Cosmelli, Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma

Abbiamo un problema, un grosso problema, con i muoni. Da tutto lo spazio arrivano verso la terra i raggi cosmici che, appena entrano negli strati superiori dell'atmosfera, producono moltissimi muoni. I muoni sono delle particelle instabili che "vivono" circa 2,2 microsecondi. Cioè dopo circa 2,2  $\mu\text{s}$  decadono, in genere in un elettrone e in una coppia neutrino-antineutrino. Il "circa" 2,2  $\mu\text{s}$  sta ad indicare che il fenomeno del decadimento è un fenomeno statistico, qualcuno decade in più tempo, qualcuno in meno, ma "in media" dopo un tempo  $t=2,2 \mu\text{s}$ , chiamato vita media, la metà di essi è decaduta, non c'è più.

Ed ecco il problema: questi muoni sono velocissimi, la loro velocità è quasi uguale a quella della luce, è il 99,92% di quella della luce, cioè  $v \cong c$ . Con questo dato possiamo calcolare quanto viaggiano nell'atmosfera prima di disintegrarsi: è facile, prima di decadere percorrono circa una distanza  $s=660 \text{ m}^1$ . Ma sulla terra ne arrivano più della metà! E l'atmosfera ha uno spessore di circa 15 km, cioè 15'000 metri, **come fanno quindi ad arrivare sulla Terra attraversando 15'000 metri di atmosfera, se "muoiono" dopo 660 metri?** Ecco il problema! E non abbiate paura: tutti i calcoli fatti sono giusti...

**Da quando avete cominciato a leggere questo brano il vostro corpo è stato attraversato da circa 5000 muoni**, mentre secondo le teorie della fisica classica, cioè secondo il calcolo che abbiamo appena fatto, questo non sarebbe dovuto succedere.

Quindi? La soluzione sta nel fatto che abbiamo usato le formule ed i concetti della fisica classica, che in molti casi, quando gli oggetti sono molto veloci, non funziona. Il fatto è che avremmo dovuto usare la teoria della Relatività, e prendere in considerazione la relatività del tempo. Perché il problema è che il "tempo", cioè la durata di un evento, non è una grandezza assoluta ed immutabile, come pensavano Newton, Galileo e tutti i fisici fino al 1905. Ma la cosa è sottile.

E allora cerchiamo di capirci qualcosa.

Tutte le volte che si parla di Relatività si parla della relatività dello spazio, del tempo, o dello spazio-tempo. Ma cosa vuol dire? Prendiamo la relatività del tempo. C'è chi pensa a orologi più lenti o più veloci, ognuno con il suo orologio che se poi ci incontriamo non riusciamo mai a sapere che ore sono perché gli altri orologi mi danno un'ora differente. In parte è vero, ma il fatto è che non si tratta solo di un "cambio di orologi", quello che succede è che, se osserviamo degli eventi, dei fatti che succedono e che vengono osservati e misurati da persone in moto "relativo" (ecco il nocciolo, per vedere l'effetto devo avere **sistemi che si muovono uno rispetto all'altro**), quello che cambia e che diventa relativo è la realtà che stiamo osservando, quello che vediamo, ciò che ci circonda. Quindi non è solo un problema legato a degli immaginari osservatori dotati di orologi, quello che viene modificato è il mondo, la natura, tutto l'universo.

Tutto questo è vero sempre, ma diventa apprezzabile solo se queste velocità "relative" sono molto ma molto alte, diciamo vicine alla velocità della luce (300'000 km/s). Se gli oggetti sono più lenti non ce ne accorgiamo.

Riprendiamo allora quei muoni che in questo momento, arrivando dagli strati superiori dell'atmosfera, stanno attraversando il nostro corpo.

---

<sup>1</sup> Il calcolo è questo:  $s = v \cdot t_0 = c \cdot t_0 = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \cong 660 \text{ m}$

Secondo la fisica "classica" questi muoni sulla Terra non ci dovrebbero arrivare proprio, ma in realtà ci arrivano, NON è una impressione! E' un fatto.

Facciamo qualche conto, così si capisce meglio come funziona, forse.

Quello che dice Albert è che un evento che accade in un luogo, visto da un osservatore che sta fermo in quel luogo avrà una certa durata  $t_0$ , e questo è quello che si chiama il tempo "proprio" dell'evento. Tanto per fissare le idee  $t_0$  può essere il tempo di decadimento, o di vita media, del nostro muone. Quando sta (quasi) fermo misuro una vita media di  $2,2 \mu s$ . Ed anche lui (il muone) misura questa durata. Se avesse al polso un orologio fatto partire alla sua nascita, in media decadrebbe (morirebbe ☹) quando l'orologio segna  $2,2 \mu s$ .

Ma **se questo muone va molto veloce**, per esempio rispetto alla Terra, per me che sto sulla Terra, il tempo di decadimento "nel mio sistema", quindi sulla Terra, è più grande, **c'è una dilatazione del tempo**. Questa dilatazione dipende da quanto la velocità dell'oggetto che si muove è vicina a quella della luce. Per il muone atmosferico il tempo si dilata di circa 25 volte<sup>2</sup>. E' veramente tanto.

Questo vuol dire che, per me che sto sulla Terra, il suo tempo di decadimento è diventato  $t = t_0 \cdot 25 = 55 \mu s$ .

E in questo tempo quanta strada – in media- può fare il muone?

E' facile  $s = v \cdot t = 3 \cdot 10^8 \cdot 55 \cdot 10^{-6} \cong 16 km$ . Ecco perché molti dei muoni (circa il 40%) arrivano sulla Terra.

**Il tempo, cioè la durata di un evento, è relativo al sistema in cui avviene l'evento, che lo si osservi o no.** Questo è importante: non è un problema mio e dei miei orologi. Nello "spazio" in cui il muone si muove (cioè l'atmosfera) i suoi tempi si dilatano e **LA REALTA' E' DIFFERENTE** da quella che calcolerei con la fisica classica di Newton.

Ed ora vediamo qualcosa di un po' più difficile: vediamo la stessa cosa dalla parte del muone, cioè di un osservatore che stia a cavallo del muone.

Il muone - NEL SUO SISTEMA - sta fermo, quindi vive  $2,2 \mu s$ ; come fa a giustificare il fatto che riesce ad arrivare sulla Terra?

Qua ci viene in aiuto l'altra parte della relatività, quella che riguarda la relatività dello spazio.

A.E. dice che una certa lunghezza  $L$ , misurata in un sistema in cui  $L$  sta ferma (per esempio lo spessore dell'atmosfera), si accorcia se la guardo da un sistema in movimento rispetto ad essa.

Quindi il muone vede lo spessore dell'atmosfera ( $L=15 km$ ) più corto. Di quanto? Del famoso fattore  $\gamma$  (lo stesso della nota 2). Quindi per il muone l'atmosfera non è spessa  $15 km$ , ma  $15 km/25 = 600 m$ . Ecco perché, non tutti, ma una buona parte dei muoni riesce ad attraversarla.

Con il che abbiamo messo d'accordo tutti. Dalla Terra si vede un muone con la vita più lunga, dal muone si vede l'atmosfera più corta. Tutto sembra relativo, ma in realtà è tutto coerente, qualunque osservatore vede la stessa cosa. Io che sto sulla Terra vedo i muoni che arrivano e che mi attraversano il corpo, i muoni che stanno per aria vedono la Terra e me stesso e entrano entro di me. E la cosa essenziale è che questo è l'unico sistema che permette di calcolare esattamente quello che succede: la teoria della relatività, una teoria semplice e senza contraddizioni.

Certo, dobbiamo accettare il fatto che se incontriamo qualcuno che si muove a velocità vicine a quelle della luce ci dobbiamo ricordare che i nostri tempi ed i nostri spazi andranno calcolati

---

<sup>2</sup> Questo fattore, chiamato  $\gamma$ , viene dal calcolo  $\gamma = \left[ 1 - \frac{v^2}{c^2} \right]^{-1/2} = 25$ , se  $v=0,9992 c$ .

in modo diverso da quelli che calcolerà lui. Altrimenti non ci tornerà più nulla, ma sia chiaro, sono i conti che non ci tornano, la realtà è quella che è, fortunatamente.

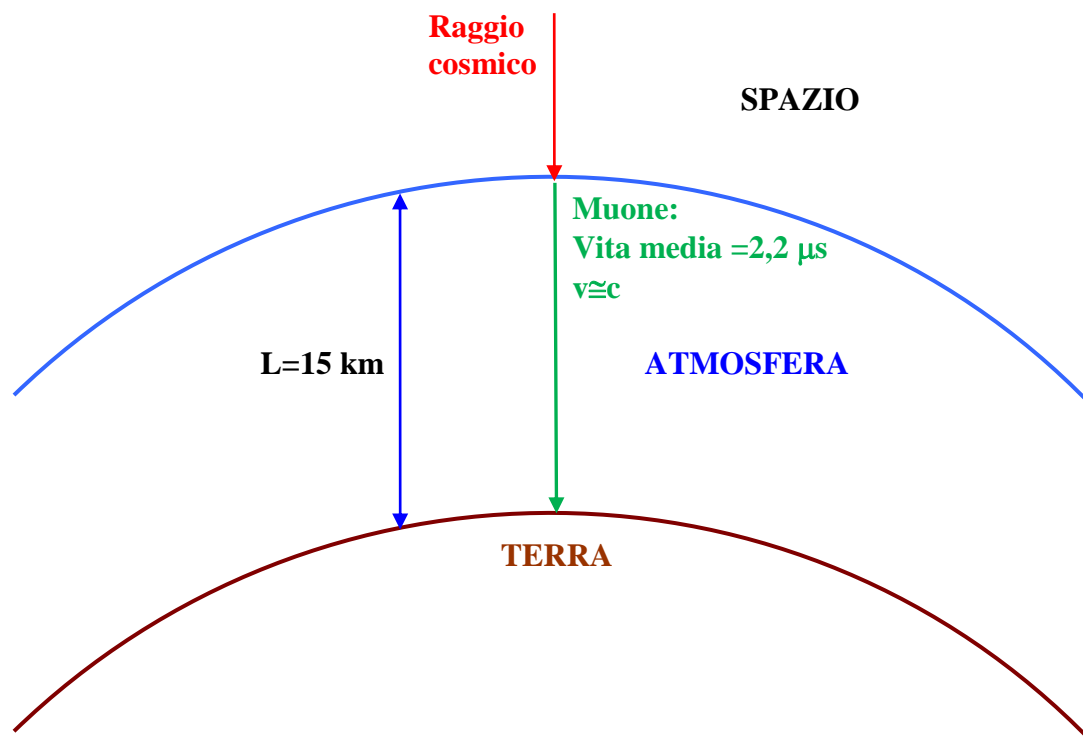


Figura 1. I muoni e la dilatazione del tempo

Il fatto sperimentale: circa la metà dei muoni prodotti dai raggi cosmici arriva sulla Terra.

Le varie interpretazioni:

☹ **Fisica Classica:** Il muone ha vita media di  $2,2 \mu\text{s}$  (valore assoluto), può quindi percorrere in media  $660 \text{ m}$  → Non può arrivare sulla Terra.

☺ **Relatività** (punto di vista della Terra): il muone ha una vita media di  $2,2 \mu\text{s}$ ; rispetto alla Terra si muove a velocità  $c$ . La sua vita media si dilata quindi di 25 volte, diventa  $55 \mu\text{s}$  e può quindi percorrere circa  $16 \text{ km}$  → molti muoni arrivano sulla Terra.

☺ **Relatività** (punto di vista del muone): il muone ha una vita media di  $2,2 \mu\text{s}$ , è in movimento rispetto alla Terra e all'atmosfera, che vede "accorciata" di un fattore 25, quindi la vede spessa circa  $600 \text{ m}$  → in media molti muoni riescono ad attraversarla e ad arrivare sulla Terra

Fattori di dilatazione/contrazione  $\gamma$  per vari sistemi con velocità V rispetto al laboratorio

Oggetto	V(km/ora)	V(m/s)	beta= V/c		$\gamma$
Laboratorio	0	0	0		1
Concorde	2 400	667	2,2E-06		1,0000000000
Aereo X15	7 300	2 028	6,8E-06		1,0000000000
Satellite GPS	13 600	3 778	1,3E-05		1,0000000001
Terra/Sole	108 000	30 000	1,0E-04		1,0000000050
Sole/galassia	900 000	250 000	8,3E-04		1,0000003472
	1.000.000	300 000	1,0E-03		1,0000005000
		3.000.000	1,0%		1,00005
		30.000.000	10%		1,005
		90.000.000	30%		1,048
		150.000.000	50%		1,2
	936.000.000	260.000.000	<b>86,7%</b>		<b>2,0</b>
			94,1%		3,0
			95,0%		3,2
			97,0%		4,1
			98,0%		5,0
			99,0%		7,1
			<b>99,5%</b>		<b>10,0</b>
			99,80%		15,8
			99,85%		18,3
			99,90%		22,4
<b>Muoni atmosferici</b>			<b>99,92%</b>		<b>25,0</b>
			99,97%		40,8
			99,99%		70,7
			<b>99,995%</b>		<b>100</b>
			99,999%		224
			99,9998%		500
			99,999900%		707
<b>Protoni LHC - CERN</b>		299 792 455	<b>99,999999%</b>		<b>7071</b>
<b>Luce nel vuoto</b>		<b>299 792 458</b>			$\infty$

	Distanza da Roma (km)	tempo luce
New York	7000	23 ms
Luna	384400	1,3 s
Sole	149600000	8,3 minuti
Alfa centauri		4,4 anni
Via Lattea - diametro		100'000 anni
Gruppo locale - 70 galassie		10 milioni
Ammasso della Vergine - 1500 galassie		60 milioni
z8_GND_5296		30 miliardi