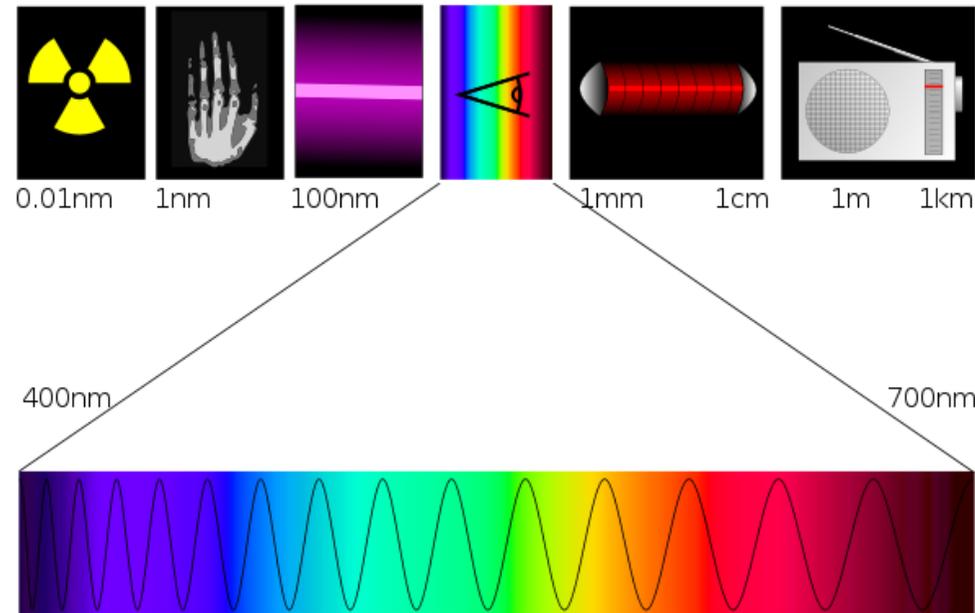


# Sulla velocità dei neutrini e quella della luce

Francesco Vissani  
INFN, Laboratori del Gran Sasso

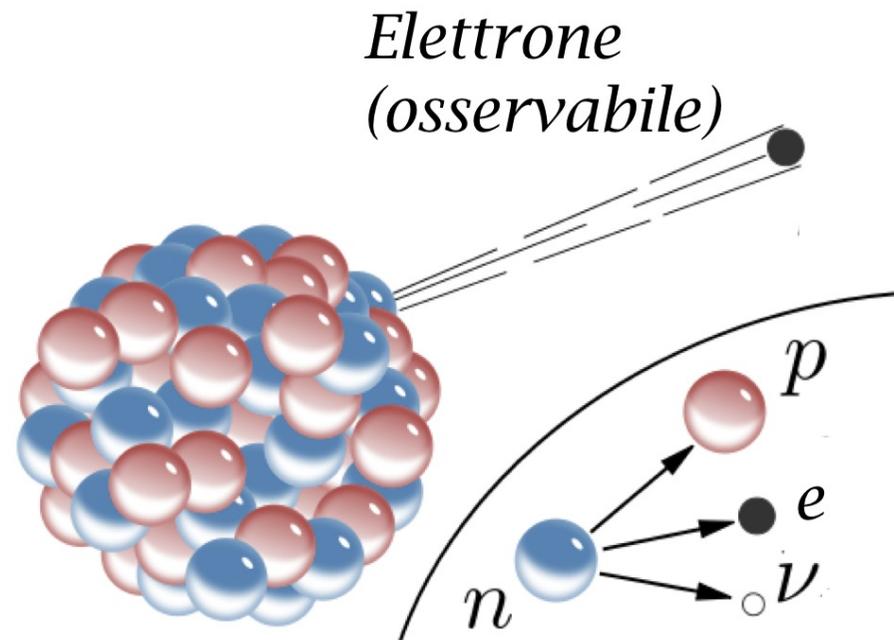
*Discutiamo perchè gli studi della velocità dei neutrini (di cui tutti abbiamo sentito parlare) hanno messo in grande agitazione i fisici. Approfittiamo dell'occasione per offrire una introduzione al significato che si attribuisce alla velocità della luce.*

Quando un fisico parla di “luce”, di solito si riferisce per estensione di termini a un qualsiasi tipo di radiazione elettromagnetica.



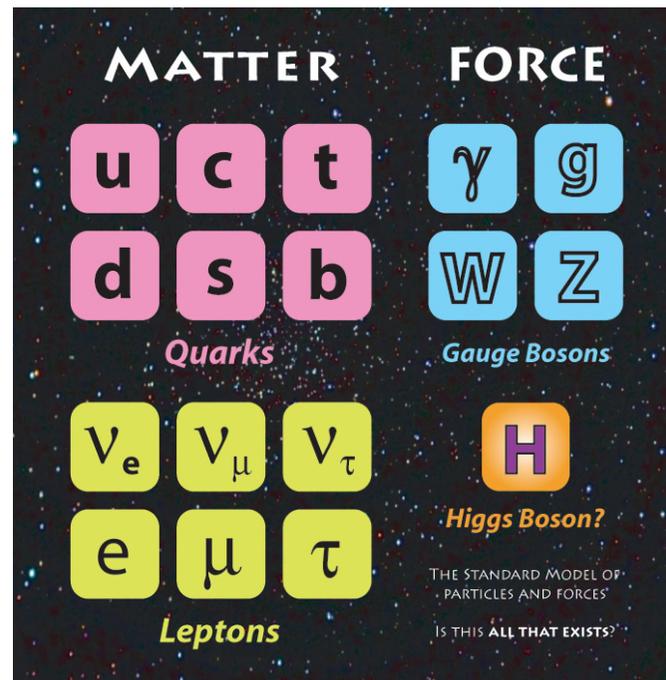
Inoltre, i fisici tengono a mente il fatto, che si considera assodato, che la luce è composta da certe particelle elementari, dette **fotoni**. Parleremo di questo, ed in particolare della velocità della luce – o se preferite dei fotoni.

Il **neutrino** è un' altra particella elementare, identificata negli anni '30 studiando i prodotti di decadimento di certi nuclei radioattivi come mostrato nella figura grande [ $\nu$ =neutrino,  $p$ =protone,  $n$ =neutrone,  $e$ =elettrone]



W. Pauli ne suggerì l'esistenza, per spiegare come mai il decadimento del neutrone producesse elettroni con varie energie, anzichè con energie fissate: un po' di energia era portata via dal neutrino (figura in basso a destra).

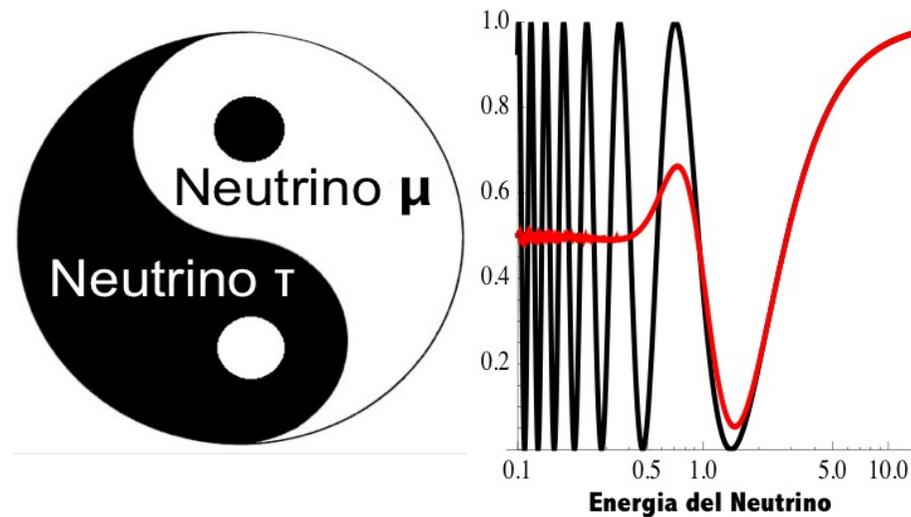
Oggi i neutrini sono annoverati tra le particelle elementari; appartengono alla classe dei 'leptoni', che non hanno interazioni forti con il nucleo atomico.



(Notare che ci sono 3 tipi di neutrino.) Da allora, vengono studiati con interesse e recentemente, sono addirittura **alla ribalta della cronaca**.

# LA STORIA IN BREVE

Alla fine degli anni 50 Bruno Pontecorvo descrisse un fenomeno, oggi noto come oscillazioni di neutrino. Se ne trovarono indizi dai neutrini solari. 15 anni fa, fu proposto un esperimento per verificarlo in laboratorio. Questa è la motivazione dell'esperimento tra CERN e Gran Sasso.



L'esperimento è ancora in corso; nel frattempo, un gruppo di ricercatori che partecipano a questo esperimento ha approfittato dei dati disponibili per misurare **la velocità dei neutrini**, ed il risultato ha sorpreso tutti.

A parte le difficoltà tecniche ci si limita ad applicare le cose che sapete

$$\text{velocità} = \frac{\text{spazio}}{\text{tempo}}$$

I ricercatori sostengono di avere misurato *correttamente e precisamente* le distanze ed i tempi di volo dei neutrini; da questo deducono che

LA VELOCITÀ DEI NEUTRINI SUPERA  
QUELLA DELLA LUCE, DI POCO PIÙ  
DI 2 PARTI SU 100.000.

Non era quello che ci aspettavamo!

Questo risultato è stato ottenuto dall'esperimento OPERA.

Gli studi sono stati iniziati e portati avanti con grande determinazione da Dario Autiero. La collaborazione li ha controllati, approvati e descritti in un 'preprint' (un lavoro scientifico) rilasciato nel Settembre scorso.

Il lavoro è stato sottoposto alla rivista JHEP perchè venga 'pubblicato' (cioè, messo agli atti). Intanto, è stato già citato da più di altri 200 lavori di commento, critica, o discussione ed ha attratto un enorme attenzione.



NATURE | NEWS FEATURE

## 365 days: *Nature's* 10

Ten people who mattered this year.

21 December 2011



### Dario Autiero: Relativity challenger

*The shy experimentalist whose team claims to have found faster-than-light neutrinos is happy for the work to stand or fall.*

By Nicola Nosengo

Dario Autiero can hardly keep track of his e-mails any more: hundreds keep pouring in from the media and his fellow physicists across the globe. "But the real problem is science amateurs," says Autiero, who works at the Institute of Nuclear Physics in Lyons, France. "They send e-mail upon e-mail saying that they had predicted it all."

Autiero has been at the centre of this media storm, scientific scepticism and amateur theorizing since 23 September, when he and his colleagues at the international Oscillation Project with Emulsion-Tracking Apparatus (OPERA) experiment announced results that seemed to remove a cornerstone of modern physics. At a seminar at CERN, the particle-physics laboratory near Geneva, Switzerland, and in a paper posted on the arXiv.org website (<http://lanl.arxiv.org/abs/1109.4897>), the OPERA team described how neutrinos — fundamental particles with no electrical charge and very low mass — seemed to make the 730-kilometre journey from

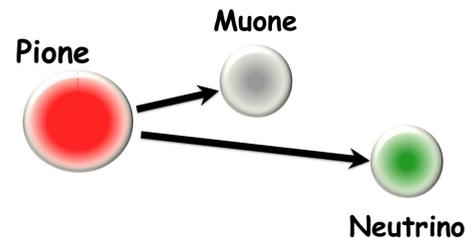


M. TREZZINI/EPA/CORBIS

# COME SI FA A SPEDIR NEUTRINI?

*Serve qualche trucco per produrli ed indirizzarli al destinatario.*

1. Un fascio di protoni di altissima energia collide con un bersaglio.
2. Le collisioni nucleari producono particelle instabili, come i **pioni**, che decadono in volo (in un tunnel) producendo neutrini.
3. I neutrini sono lanciati nella direzione originaria dei protoni.



*Possiamo pensare ad un missile a più stadi che lancia la navicella, cioè il neutrino; oppure pensate ad una moderna versione dell'esperimento di Marconi, dove invece delle onde radio, si usano neutrini.*



# CHE SUCCEDE NEL TUNNEL

## Proviamo a mettere giù qualche numero

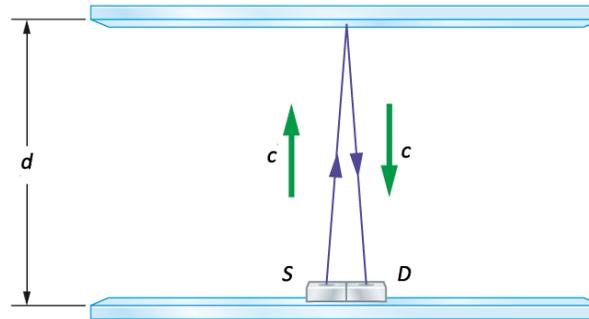
- Un pione vive in media solo un tempo di  $t = 25$  nanosecondi.
- Nelle condizioni di questo esperimento, i pioni viaggiano quasi alla velocità della luce,  $c$ .
- Ingenuamente, si potrebbe credere che viaggino al massimo qualche decina di metri prima di decadere

$$c \times t = (3 \times 10^8 \text{ m/sec}) \times (2,5 \times 10^{-8} \text{ sec}) = 7,5 \text{ metri}$$

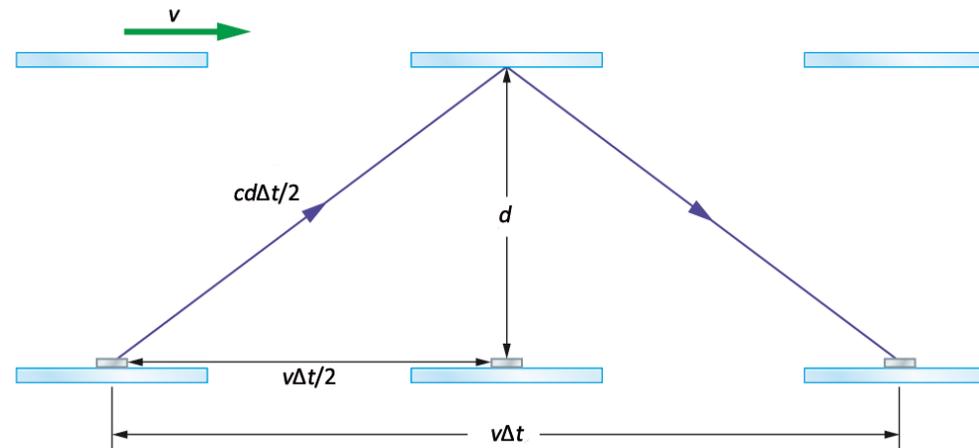
*QUIZ: allora perchè hanno dovuto scavare un tunnel di decadimento dei pioni di circa un kilometro?*



Con 2 specchi alla distanza  $d$ , costruiamo un “orologio a luce” che scandisce il tempo ogni  $\Delta t = 2d/c$  secondi:



$\Delta t$  cresce di  $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  quando l’orologio si muove con velocità  $v$ ,



proprio perchè la velocità della luce è una costante.

## *Risposta al QUIZ*

Partendo dal fatto che la velocità della luce è una costante, concludiamo che la vita del pione in moto si allunga di un fattore  $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ , che è più di 100 nel nostro caso.

Hanno dovuto fare un tunnel abbastanza lungo per dargli tempo di decadere – invece di schiantarsi contro una parete.

Si può dire che la progettazione del fascio di neutrini dal CERN è basata sulla ipotesi che le idee di Einstein siano corrette.

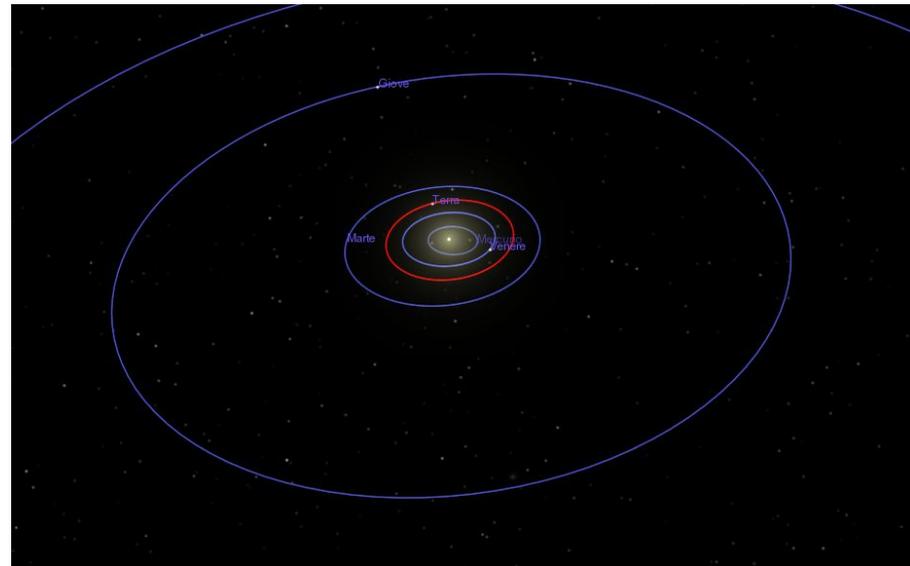
*Prima di proseguire, parliamo un po' della luce e di queste idee.*

# LA VELOCITÀ DELLA LUCE

## Il primo indizio

Misurando la durata delle orbite del satellite più interno di Giove, detto **Io**, l'astronomo danese Römer ricevette una sorpresa.

Infatti, durante un periodo dell'anno, *le orbite sono più veloci della media*, durante un altro periodo, più lente. Vediamo qualche numero: nelle prime 100 orbite, **Io** guadagna quasi 20 minuti sulla tabella di marcia; nelle successive orbite, li perde. (Un anno solare dura circa come 206 orbite di **Io**).



Come si spiega? Come può l'orbita terrestre influenzare quella di **Io**?

La spiegazione di Römer fu questa; durante la prima parte dell'anno, la Terra va incontro ad **Io**, e quindi la luce deve percorrere meno spazio; durante la seconda invece si allontana, e la luce impiega più tempo.

Quantitativamente

$$\text{velocità} = \frac{\text{spazio}}{\text{tempo}} = \frac{2 \times 150 \text{ milioni di } km}{16 \text{ min}} = 300 \text{ mila } \frac{km}{sec}$$

Questa fu la prima evidenza che la velocità della luce non fosse infinita.

*Naturalmente, Römer non fece i calcoli precisi; questa spiegazione fu contestata; chi lo contestò sostiene di avere misurato la velocità per primo; ecc. Ma questi dettagli li lascio volentieri agli storici, e comunque, nel 1600 i Nobel non venivano ancora assegnati.*

## La velocità della luce nelle equazioni di Maxwell

Le equazioni di Maxwell determinano il campo elettrico  $E$  e quello magnetico, visti come funzioni del tempo  $t$  e delle tre coordinate dello spazio  $x, y, z$ . Una configurazione importante è descritta da una funzione di una variabile

$$E(x, y, z, t) = f(x - c \cdot t)$$

Essa rappresenta un'onda che si propaga, con velocità  $c$ , lungo l'asse delle  $x$ .

Potete controllare che questa funzione soddisfa l'*equazione differenziale*

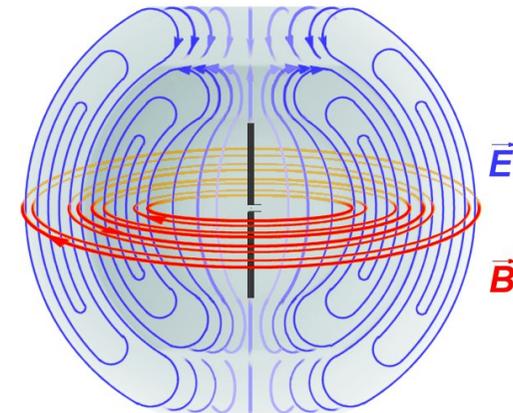
$$\left( \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2} - \frac{1}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} \right) E(x, y, z, t) = 0$$

che deriva dalle equazioni di Maxwell, lontano da cariche elettriche e correnti.

**Se le equazioni di Maxwell sono corrette, la velocità della luce è una costante.**

L'esistenza di una velocità di propagazione finita sembra ragionevole: se sposto improvvisamente una carica, modifico il campo nelle sue vicinanze, ma non quello lontano. La funzione dell'onda è proprio quella di trasportare l'informazione di quello che è successo sempre più lontano.

Le trasmissioni radio sono basate su considerazioni del genere. Quella mostrata qua accanto è l'onda che irradia da una carica che si muove su e giù (dipolo).



Da questo punto di vista, è naturale identificare queste onde con quelle radio, con la luce, con i raggi X ecc. La matematica diventa fisica!

Chi venne dopo Maxwell, non riusciva ad immaginare come facesse un'onda luminosa a propagarsi nel vuoto. Si pensava che le onde di luce increspavano una misteriosa sostanza detta "etere luminoso" che permeava tutto lo spazio, un po' come il suono si propaga nell'aria o come delle onde sulla superficie dell'acqua.



Quando però si provò a vedere se la velocità della luce si componeva con il moto della Terra, non si trovò nessun effetto. La velocità della luce era la stessa, in qualsiasi direzione si misurasse. Era la prova che l'etere (anche credendo che ci fosse) non la trascinava con sé ... ma allora a che serviva l'etere?

## Il problema secondo il punto di vista matematico

Ammettendo che la velocità della luce fosse costante (ovvero, che le equazioni di Maxwell fossero giuste in ogni sistema di riferimento in moto uniforme) non c'era scelta: bisognava modificare le leggi di trasformazione

$$\begin{cases} x' = x + v \cdot t \\ t' = t \end{cases}$$

perché portavano alla conclusione che la velocità della luce cambiasse, come si vede calcolando nelle nuove coordinate il campo dell'onda

$$E(x, y, z, t) = f(x - c \cdot t)$$

Lorentz trovò delle trasformazioni che lasciavano invariata la velocità della luce in ogni sistema di riferimento in moto uniforme

$$\begin{cases} x' = \gamma(x + vt) \\ t' = \gamma(t + v/c^2) \end{cases}$$

per trovare le quali si può partire da considerazione dimensionali e linearità.

La funzione adimensionale  $\gamma(v^2/c^2)$  risulta fissata dal richiedere che le trasformazioni nel sistema in moto con velocità  $-v$  siano le stesse, e si trova

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Lorentz pensava che fossero delle proprietà delle interazioni elettromagnetiche e non arrivò, come Einstein, a capirne il più profondo significato.

# LO SPAZIO TEMPO

## La velocità $c$ come semplice fattore di conversione

Un esempio di come si trasformano le coordinate per rotazioni spaziali

$$\begin{cases} x' = +\cos \theta x + \sin \theta y \\ y' = -\sin \theta x + \cos \theta y \end{cases}$$

dove  $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$  descrive un cerchio, ed  $x^2 + y^2 = x'^2 + y'^2$ .

Secondo Einstein, per le rotazioni nello spazio-tempo è molto simile

$$\begin{cases} x' = +\cosh \eta x + \sinh \eta (ct) \\ (ct') = +\sinh \eta x + \cosh \eta (ct) \end{cases}$$

dove  $\cosh^2 \eta - \sinh^2 \eta = 1$  descrive un'iperbole, e dove

$ct$  è una distanza

*Se ci chiedono “quando ci vediamo?” e noi rispondiamo “fra un miliardo di chilometri” invece di “fra poco meno di un ora” Einstein approverebbe.*

L'equazione che descrive la propagazione di un raggio di luce lungo l'asse delle  $x$  non cambia con queste trasformazioni:

$$(ct)^2 - x^2 = (ct')^2 - x'^2 = 0$$

Si identifica inoltre  $v/c = \tanh \eta$ .

Questo fatto è in completa analogia con quello che succede per le trasformazioni che descrivono le rotazioni, che lasciano invariata le distanze dall'origine:

$$x^2 + y^2 = x'^2 + y'^2$$

Lo spazio ed il tempo risultano inestricabilmente legati.

*Se volete anche sapere come funziona  $E = Mc^2$ , chiedetemelo please!*

# TORNIAMO AI NEUTRINI...

## Un dubbio

Nel 1987, fu vista una **supernova** a 170 mila anni luce da noi. Gli astronomi dissero a chi cercava i neutrini di vedere se ne avevano catturato qualcuno *qualche ora prima*. Seguendo Einstein, ci si aspettava che luce e neutrini si propagassero alla stessa velocità nel vuoto; ma la luce, prima di uscire dal centro della stella, doveva attraversarne il mantello. Il resto è storia (premio Nobel 2002).



*Ma se i neutrini fossero più veloci, avrebbero dovuto anticipare di*

$$(2.5 \times 10^{-5}) \times (1.7 \times 10^5) = 4 \text{ anni}$$

*e non di poche ore. Che significa allora l'accordo osservato?*

## Un altro dubbio

Abbiamo detto che i pioni si conformano alle previsioni da Einstein. Ma se l'energia dei neutrini **non rispetta** le previsioni di Einstein, anche le nostre aspettative su come si comporta il pioni, quando emette neutrini, subiranno dei contraccolpi. Sono effetti grandi o piccoli?

I calcoli che abbiamo da poco concluso presso il gruppo teorico del Gran Sasso dicono che questi effetti, in tutti i casi che sono stati proposti per tener conto dei risultati di OPERA, *sono troppo grandi*.

Abbiamo pubblicato quei calcoli proprio sulla rivista JHEP, per cercare il massimo del confronto.



RECEIVED: December 13, 2011

ACCEPTED: December 31, 2011

PUBLISHED: January 25, 2012

## Non-standard neutrino propagation and pion decay

---

**Massimo Mannarelli,<sup>a</sup> Manimala Mitra,<sup>a</sup> Francesco L. Villante<sup>a,b</sup>  
and Francesco Vissani<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*INFN — Laboratori Nazionali del Gran Sasso,  
Assergi (AQ), L'Aquila, Italy*

<sup>b</sup>*Università dell'Aquila, Dipartimento di Fisica,  
L'Aquila, Italy*

*E-mail:* [massimo@lngs.infn.it](mailto:massimo@lngs.infn.it), [manimala.mitra@lngs.infn.it](mailto:manimala.mitra@lngs.infn.it),  
[francesco.villante@lngs.infn.it](mailto:francesco.villante@lngs.infn.it), [francesco.vissani@lngs.infn.it](mailto:francesco.vissani@lngs.infn.it)

**ABSTRACT:** Motivated by the findings of the OPERA experiment, we discuss the hypothesis that neutrino propagation does not obey Einstein special relativity. Under a minimal set

JHEP01(2012)11

**UN FINALE TUTTO  
DA SCRIVERE !**

- ★ La velocità della luce è forse la grandezza più importante nella fisica contemporanea; essa descrive il legame inestricabile tra spazio e tempo.
- ★ Gli amici di OPERA sostengono che i neutrini la superano: se altri esperimenti lo proveranno, sarà una rivoluzione. Si son messi al lavoro anche altri esperimenti del Gran Sasso: Icarus, LVD e Borexino.
- ★ Nel frattempo, in molti cercano di capire il significato di questi risultati. Alcuni fisici teorici, tra cui un gruppo del Gran Sasso, sostengono che è molto difficile riconciliarli con le cose note.

*Chi vivrà, vedrà! Comunque, dall'anno prossimo toccherà alla vostra generazione: Vi faccio tanti auguri, il mondo è vostro, e fatevi valere. Ma permettetemi di concludere in tono scherzoso...*



A noi iscritti a fisica nell'anno 1983/84, non è andata poi così male.

Sulla base della mia esperienza, mi sentirei anche di suggerire, a quelli di voi che si sentono motivati, di iscriversi a questa facoltà.

Più di un terzo di noi si ritrova a lavorare nell'università, in istituti di ricerca di fisica, di economia, gli altri insegnano nelle scuole, chi preside, chi direttore, ecc.

E se anche non si trovasse il modo di diventare il fisico dell'anno, si potrà sempre ripiegare su una onesta carriera di astronauta :)

*Grazie per l'attenzione!*

COME EINSTEIN  
CAPÌ CHE  $E = Mc^2$

## Energia ed impulso della luce

Le equazioni di Maxwell prevedono che l'energia e l'impulso della luce siano legate dalla relazione

$$\text{Energia} = \text{Impulso} \times c$$

ben diversa da quella che conoscete, e che riguarda particelle lente:

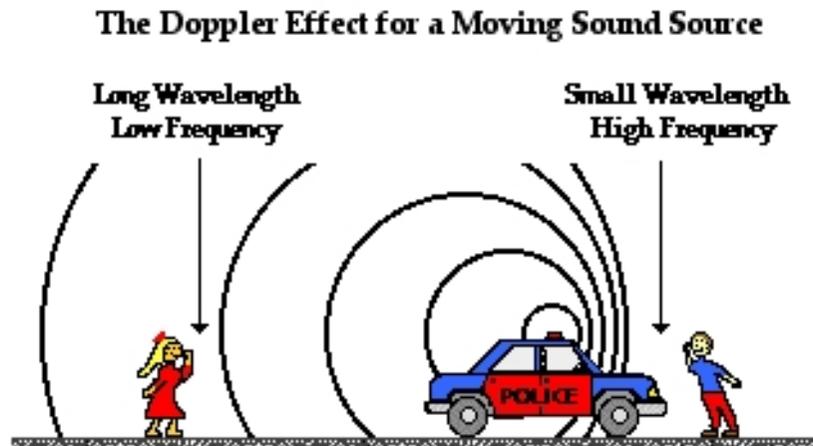
$$\text{Energia} = \frac{M v^2}{2}, \quad \text{Impulso} = M v \quad \Rightarrow \quad \text{Energia} = \frac{\text{Impulso}^2}{2 M}$$

La meccanica quantistica prescrive la relazione  $E = p \cdot c$  per i singoli quanti di luce (i fotoni). Si pensa che per ogni particella con una massa trascurabile, ad esempio, per il neutrino, si applichi la stessa relazione. Per lo stesso motivo, la velocità dei neutrini dovrebbe essere  $c$ .

## L'effetto Doppler vale anche per la luce

Se una sorgente di luce si **avvicina** a (o si **allontana** da) noi, la velocità è sempre quella; ma la frequenza  $\nu$ , l'energia e anche l'impulso della luce, si alzano (o abbassano) del fattore moltiplicativo

$$1 + \frac{v}{c} \quad \left( \text{oppure } 1 - \frac{v}{c} \right)$$



Vale il contrario per le lunghezze d'onda e per il periodo dell'onda.

## La dimostrazione del 1907

Consideriamo un oggetto di massa  $M$  che emette due raggi di luce in direzioni opposte con energia  $E/2$  ciascuno. L'impulso totale resta nullo, perchè gli impulsi dei due raggi  $p = E/(2c)$  sono uguali ed opposti.

Se questo avviene mentre l'oggetto si muove con velocità  $v$ , i raggi di luce subiscono l'effetto Doppler. La somma dei loro impulsi non sarà più zero

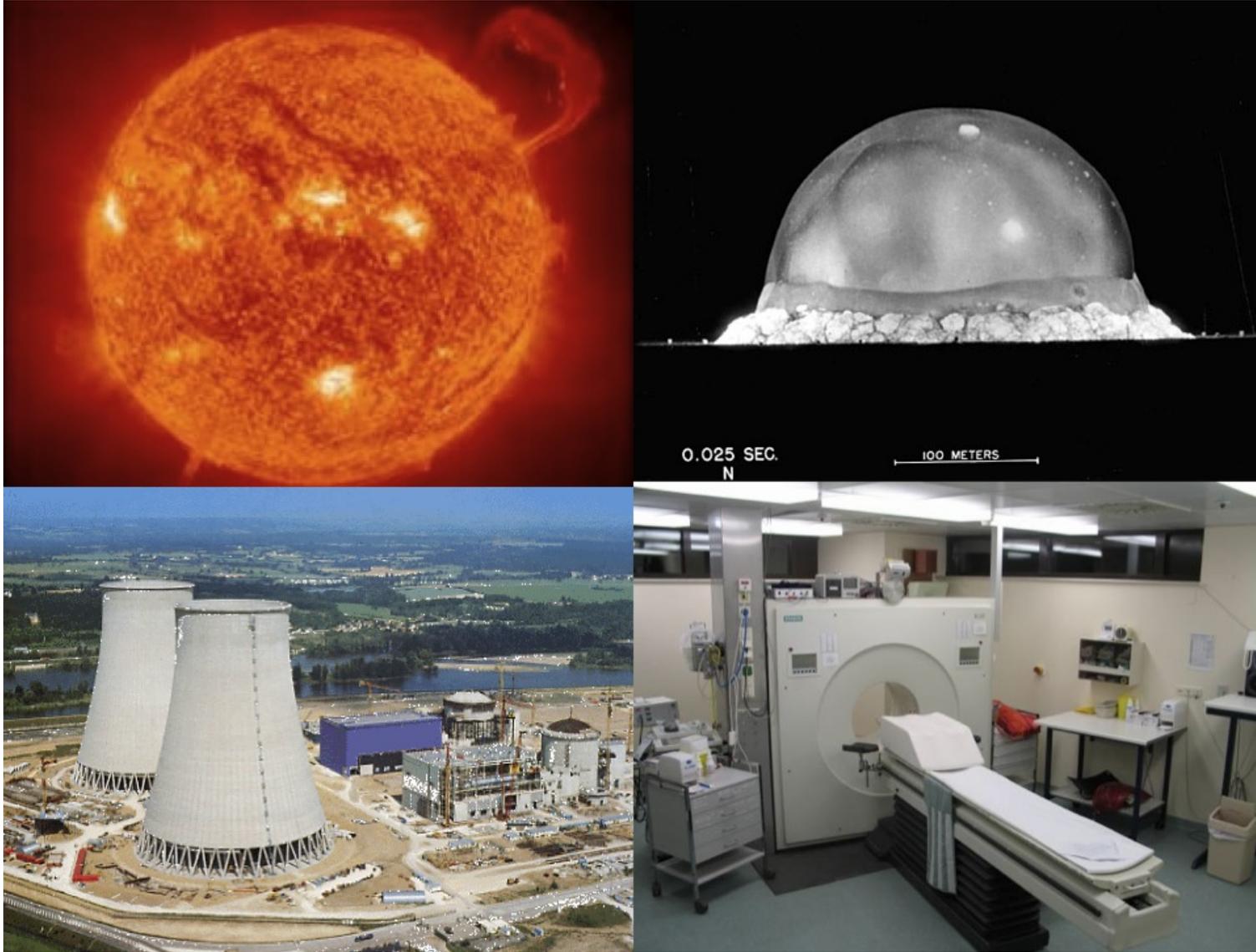
$$-\frac{E}{2c} \left(1 - \frac{v}{c}\right) + \frac{E}{2c} \left(1 + \frac{v}{c}\right) = \frac{E v}{c^2}$$

Siccome l'oggetto con massa ha velocità  $= v$  sia prima che dopo, per conservare l'impulso siamo costretti ad ammettere che la sua massa cambia:

$$Mv = M'v + \frac{E v}{c^2} = \left(M' + \frac{E}{c^2}\right) v$$

L'emissione di energia è accompagnata da una diminuzione di massa.

*All'epoca, A. Einstein aveva 28 anni.*



# PER I PIÙ CURIOSI

## Effetto Doppler e cosmologia

L'effetto Doppler ha innumerevoli applicazioni (dalla medicina all'astrofisica).

Una delle più emozionanti è la misura delle distanze in cosmologia: I corpi più lontani hanno degli spettri di emissione spostati verso il rosso (*red-shift*) e questo viene interpretato come un effetto di allontanamento cosmologico secondo la legge di Hubble

$$v = H_0 \cdot d$$

La costante  $H_0$  vale 70 km/sec/Mpc. Misurando la velocità  $v$  tramite l'effetto Doppler, si deduce la distanza dell'oggetto.

Per moti molto veloci, l'espressione mostrata deve essere un po' modificata.

## Prova della relazione $E = p \cdot c$

Un modo veloce per vederlo è considerare le relazioni per i quanti di luce proprie della meccanica quantistica:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Energia} = h \cdot \nu \quad [\text{Pauli}] \\ \text{Impulso} = \frac{h}{\lambda} \quad [\text{De Broglie}] \end{array} \right.$$

Il rapporto tra le due è  $\lambda \nu$  cioè la lunghezza d'onda per la frequenza, che è l'inverso del periodo,  $\nu = 1/T$ . Allora, la relazione desiderata equivale alla nota relazione

$$\lambda/T = c$$

che ricordiamo così: la velocità della luce è il rapporto tra la lunghezza d'onda ed il periodo di una oscillazione.

$$\text{P.S.: } \sin \left[ 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \right] = \sin \left[ \frac{(h\nu \cdot t - h/\lambda \cdot x)}{h/(2\pi)} \right] = \sin \left[ \frac{(Et - px)}{h/(2\pi)} \right]$$

Un esercizio interessante su questo è di capire la **pressione di radiazione**.

Ad esempio, il Sole irradia una potenza di circa  $\mathcal{P} = 1.5 \text{ kWatt/m}^2$  (cioè, 1500 Joule al secondo). La forza esercitata da un fotone è assorbito

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{1}{c} \frac{dE}{dt}$$

Quindi la forza esercitata da molti fotoni è proprio la somma delle singole forze, e la pressione complessiva è semplicemente  $\mathcal{P}/c$ .

Stimare a quale peso equivale la pressione del Sole quando siamo in spiaggia, e provare a progettare una ‘vela solare’ per voli ecologici nello spazio.

## La relazione generale tra energia, impulso e velocità

Proviamo la seguente relazione tra queste tre quantità

$$v = \frac{dE}{dp}$$

detta anche di Hamilton-Jacobi. Essa evidentemente vale sia per la luce che per le particelle lente, ma è molto più generale.

Infatti consideriamo una particella che aumenta la sua energia  $E$  di una piccola quantità  $dE$ , a causa di una forza  $F$  che agisce per una breve distanza  $dx$ ; siccome la forza è la derivata dell'impulso nel tempo, vale

$$dE = F dx = \frac{dp}{dt} dx = \frac{dx}{dt} dp = v dp$$

Quindi, quando il cammino della particella non viene parametrizzato più come funzione della coordinata  $x$  ma piuttosto come funzione dell'impulso  $p$ , si arriva alla relazione desiderata.

## Esiste un modo per avere neutrini superluminali?

La domanda è molto dibattuta e non sembra di facile soluzione. Un sentimento comune a molti, è che l'effetto di OPERA sembra molto grande.

Se uno si accontenta di una risposta qualsiasi, qualcosa si trova; se volete ve ne parlo alla lavagna.

Ma vorrei anche ricordarvi le famose parole che Einstein pronunciò nel 1921, quando emerse qualche indizio che il vento d'etere esistesse. Il suo commento fu *Il Signore è sottile, ma non malizioso*.

Una rozza parafrasi di quelle parole è che, se una teoria ha una sua bellezza e logica, dobbiamo essere cauti prima di gettarla alle ortiche, o anche di farlo per accettarne una brutta o mal formulata.