

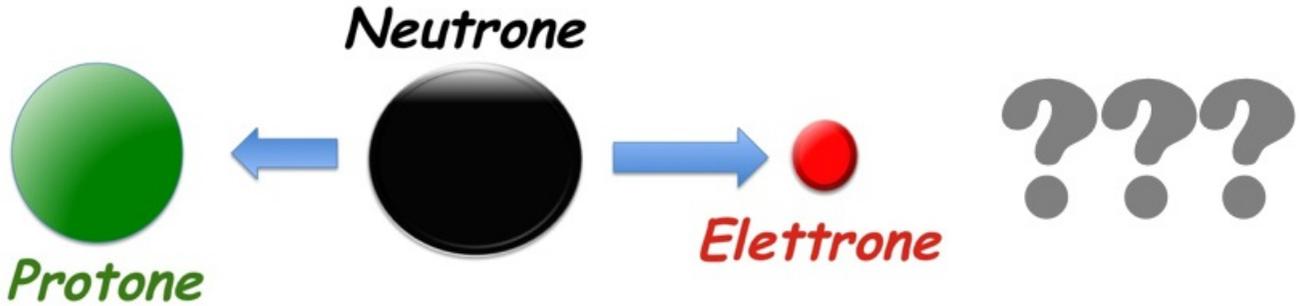
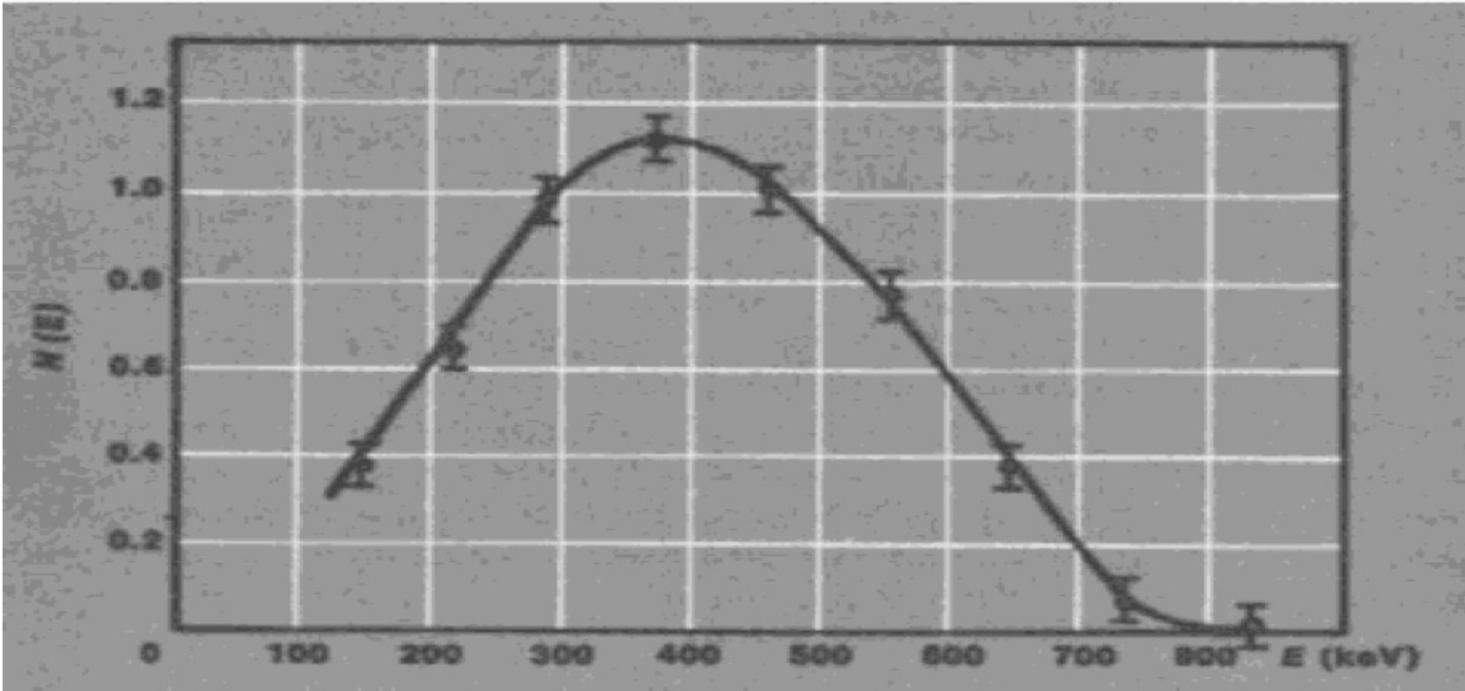
Cosa sappiamo sui neutrini?

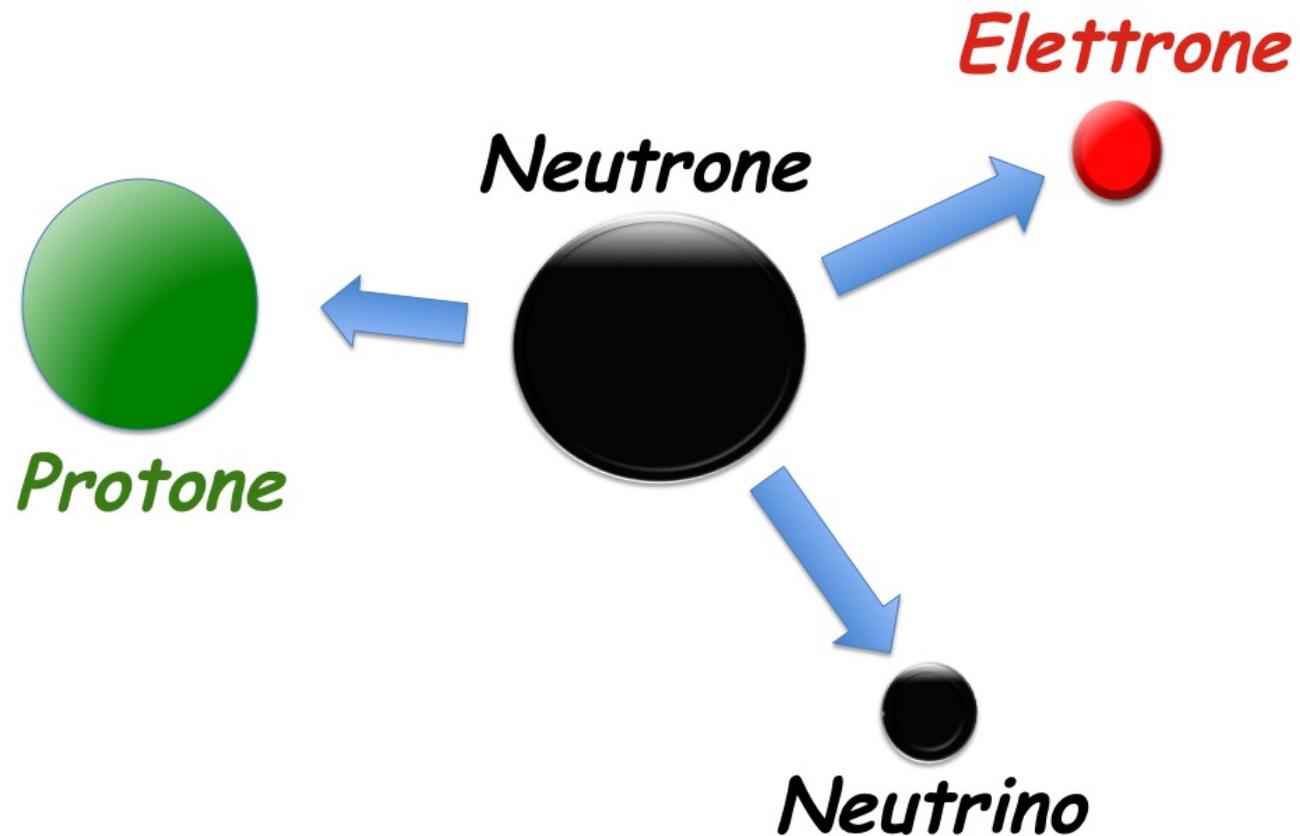
Francesco Vissani
INFN, Gran Sasso

In questo seminario, toccheremo alcuni degli aspetti curiosi dei neutrini, ricordando cosa sono e come si vedono. Parleremo di Terra e Sole, quali sorgenti naturali di neutrini. Discuteremo in cosa consiste il fenomeno delle oscillazioni. Esamineremo le ragioni per cercare una speciale transizione nucleare, in cui vengono creati elettroni.

Commentiamo i recenti studi sulla velocità dei neutrini.

COME È INIZIATA

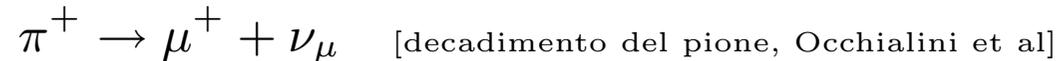




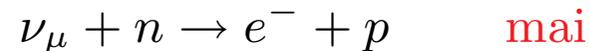
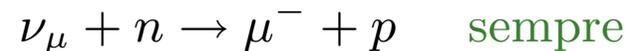
Introducendo una particella fantasma Pauli salva la conservazione della energia—e anche quella del momento angolare (1930).

Una domanda che sorse era (1) se ci fosse solo un neutrino oppure (2) se anche il muone ed il tau (le copie più pesanti dell'elettrone) fossero associati ad un loro neutrino.

La risposta era **la due**, in quanto un neutrino prodotto da un muone,

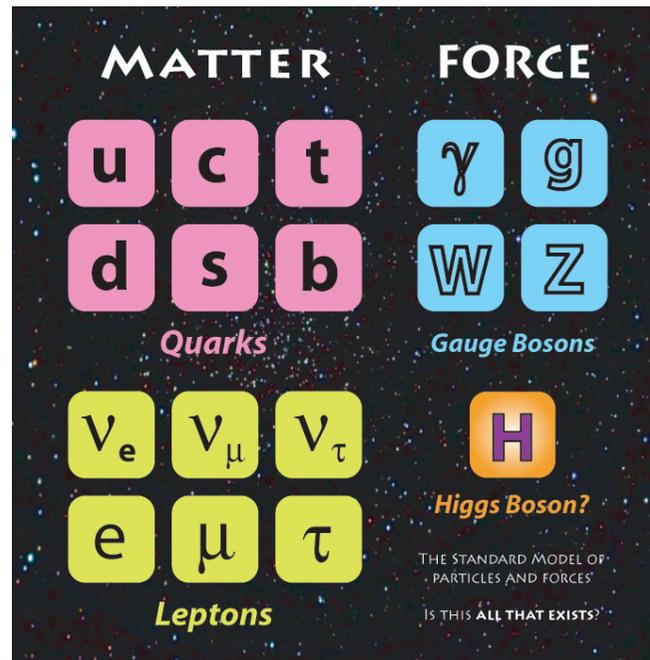


ha un comportamento ben noto nelle interazioni. Per esempio,



Il numero di fermioni di un certo tipo (elettronico, ad es.) resta invariato in tutte le reazioni note. Magari un elettrone diventa un neutrino elettronico, si produce una coppia e^+e^- , ma per es. non accade che $\mu^+ + e^- \rightarrow \mu^- + e^+$, che varia sia il numero di muoni che quello di elettroni.

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 famiglie di particelle, e in particolare 3 tipi di neutrino. C'è un forte parallelismo tra leptoni e quark (le particelle che compongono i protoni e neutroni). Poi ci sono le forze....

Interazioni deboli

A questo punto, conviene riprendere il filo storico. Poco dopo Pauli, Fermi propone di descrivere le interazioni con emissione di elettroni e *di neutrini*, tramite l'energia di interazione

$$H \sim \hbar^3 G/c \int d^3x \Psi_p^*(x) \Psi_n(x) \Psi_e^*(x) \Psi_\nu(x)$$

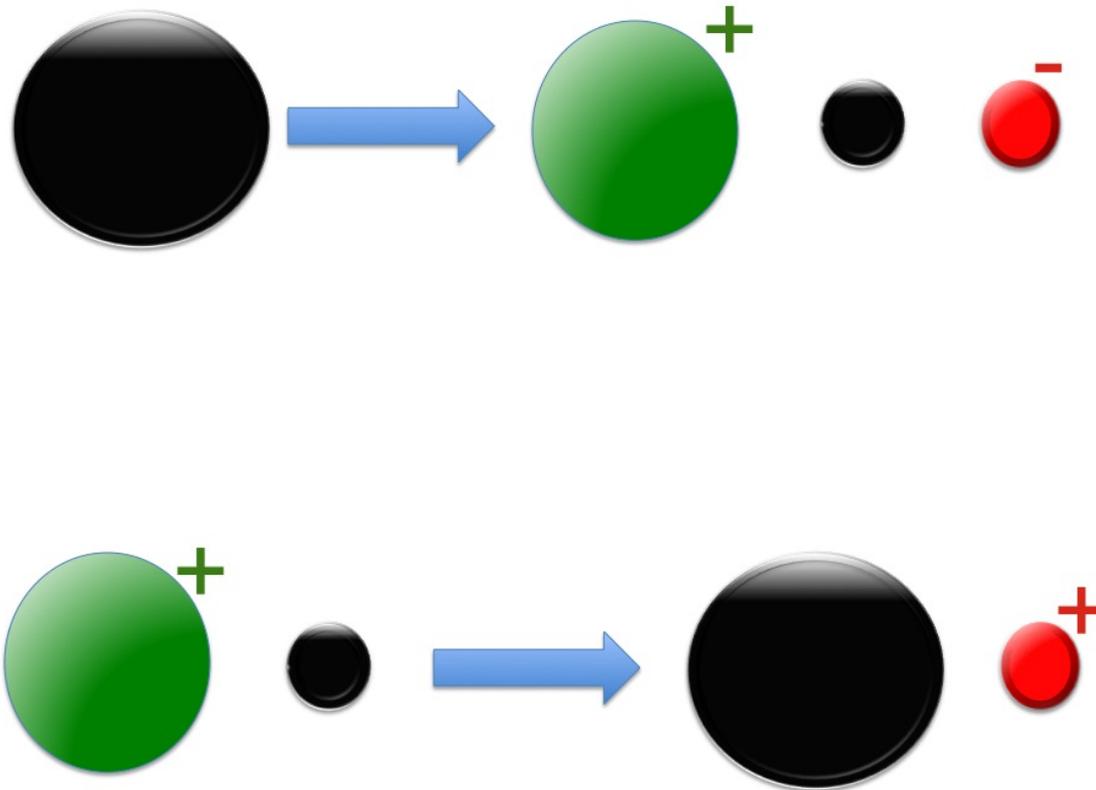
Il valore approssimato della costante a fattore è

$$G = \frac{10^{-5}}{M^2}$$

M è la massa del protone o del neutrone, siccome $M_n \sim M_p$.

Tali interazioni sono dette “deboli” in quanto i decadimenti con emissione di elettroni sono molto lenti; difatti, la costante è molto piccola. (Oggi capiamo il motivo: la particella W , che media le interazioni, ha una grossa massa)

Ma anche senza sapere questo, si conosceva la stretta relazione tra i decadimenti e le interazioni, entrambi regolati dalla costante G .



Notate le cariche elettriche e la comparsa di un elettrone positivo, detto antielettrone o positrone. Deve accadere se si cambia lato della reazione!

Da qui, si stima l'interazione coi neutrini tramite considerazioni dimensionali

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma \propto G^2 \times E^2 \quad [\sigma = \text{sezione d'urto}] \\ 1/\tau \propto G^2 \times E^5 \quad [\tau = \text{vita media, con } dP = dt/\tau] \end{array} \right.$$

dove E è l'energia caratteristica, per esempio la differenza di massa tra neutrone e protone, oppure la massa dell'elettrone. (come esercizio, mettere i fattori \hbar e c)

La lunghezza $\sqrt{\sigma}$ risulta meno di un **decimilionesimo** di quella del nucleo. È il lavoro di Bethe e Peierls, pubblicato su Nature – quello di Fermi viene rifiutato.

La loro conclusione “questo dimostra che non vedremo mai un neutrino” sembra ragionevole, ma viene contraddetta dai fatti di lì a 20 anni.

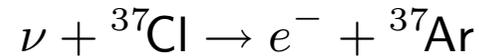
RIVELAZIONE DI NEUTRINI



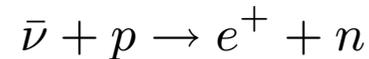
Bruno Pontecorvo concepisce il modo di rivelare neutrini che servirà per rivelare i primi neutrini dal sole alla fine degli anni 60.

Un metodo diverso porta Reines e Cowan a rivelare i primi eventi da reattore; è il 1956, e dopo quasi 40 anni viene loro conferito il Nobel.

Diamo tre esempi di reazioni per rivelare neutrini; quella di Pontecorvo



quella di Bethe e Peierls, usata da Reines e Cowan



ed infine, una reazione che viene spesso utilizzata



Notate che ho dato per scontato che neutrino ν ed antineutrino $\bar{\nu}$ son diversi. È un fatto che, nelle interazioni, i neutrini fanno elettroni e gli antineutrini fanno antielettroni; ma lo discuteremo meglio dopo.

Sono i prodotti di reazione che rendono i neutrini “visibili”.

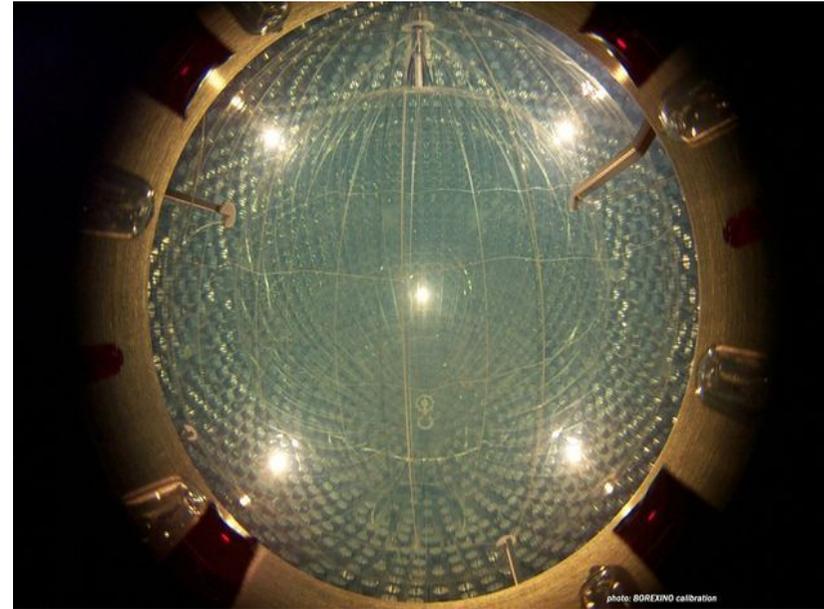
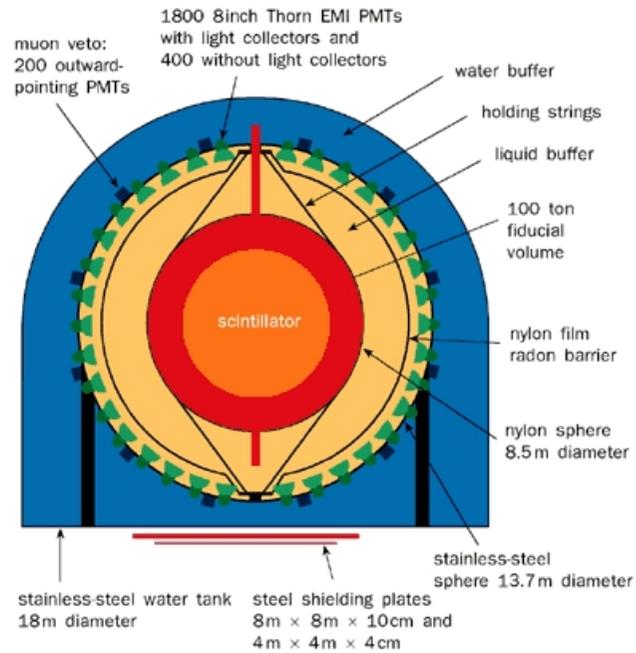


Figura 1: *Il rivelatore Borexino del laboratorio del Gran Sasso Italia). Lo scintillatore ultrapuro permette l'osservazione di particelle di energia molto bassa, elettroni o positroni, prodotte da interazioni di neutrini o antineutrini.*

Borexino osserva bene i $\bar{\nu}$: il neutrone prodotto in $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$ può essere visto grazie a $n + p \rightarrow D + \gamma(2.2 \text{ MeV})$.

Antineutrini dalla radioattività terrestre

I decadimenti di ^{232}Th e ^{238}U danno origine ad antineutrini [Eder 66; Marx 69].

Il primo tipo è 4 volte più abbondante; però gli antineutrini della seconda hanno più energia, e i tassi di reazione sono simili.

Un primo indizio è stato ottenuto in Giappone nel 2005, 2008, in condizioni di fondo alto, anche per effetto dei reattori nucleari.

Dal 2009, le prime osservazioni 'pulite' sono state ottenute da Borexino, che sta consolidando le basi della nostra conoscenza dei geo-neutrini.

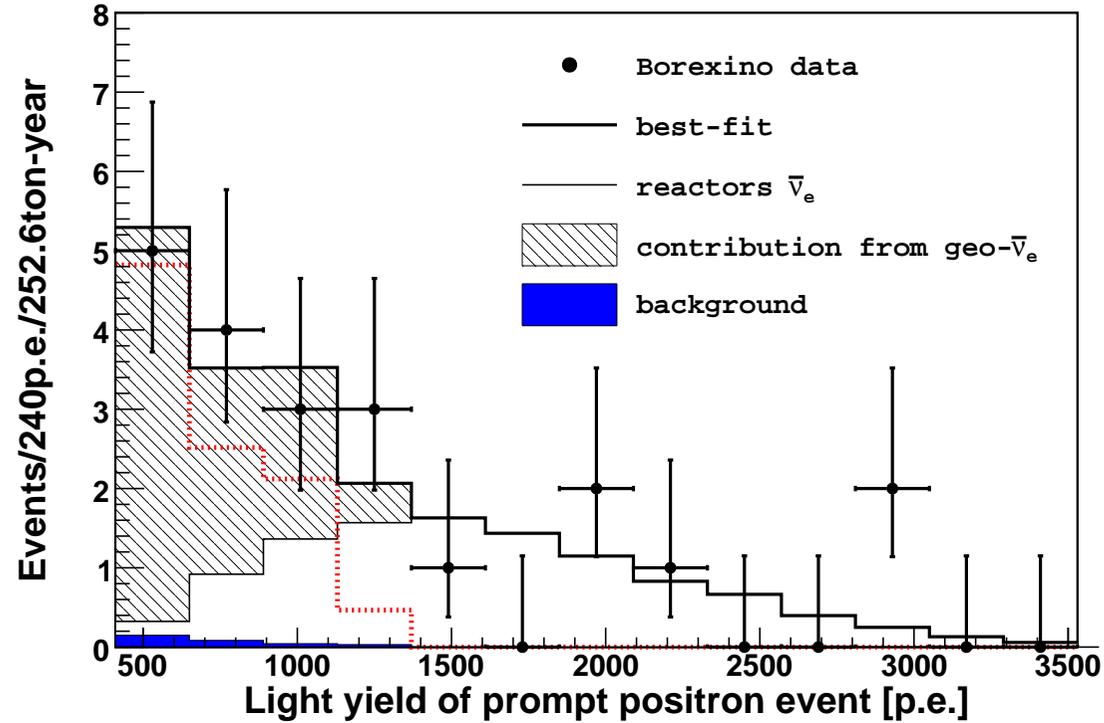


Figura 2: Il segnale è dovuto in simili proporzioni a reattori lontani e radioattività terrestre; la seconda componente domina alle basse energie.

Con dati futuri, si dovrebbero distinguere ^{232}Th e ^{238}U .

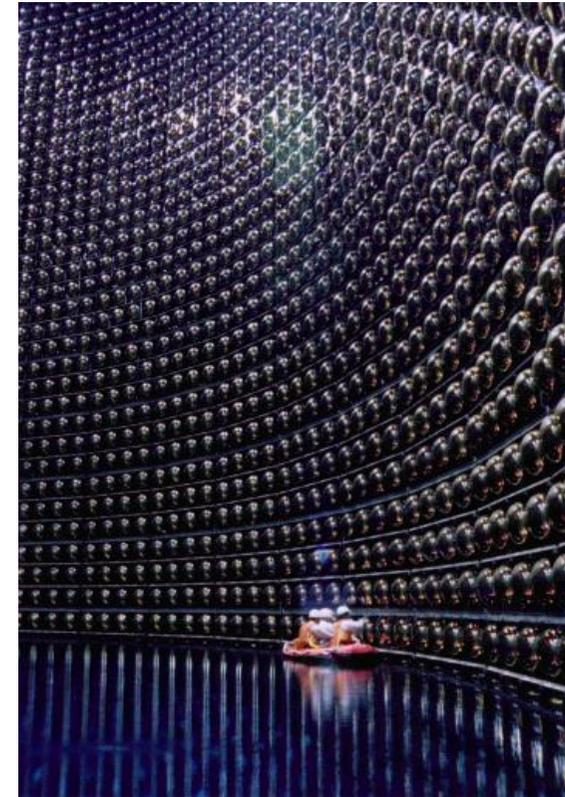
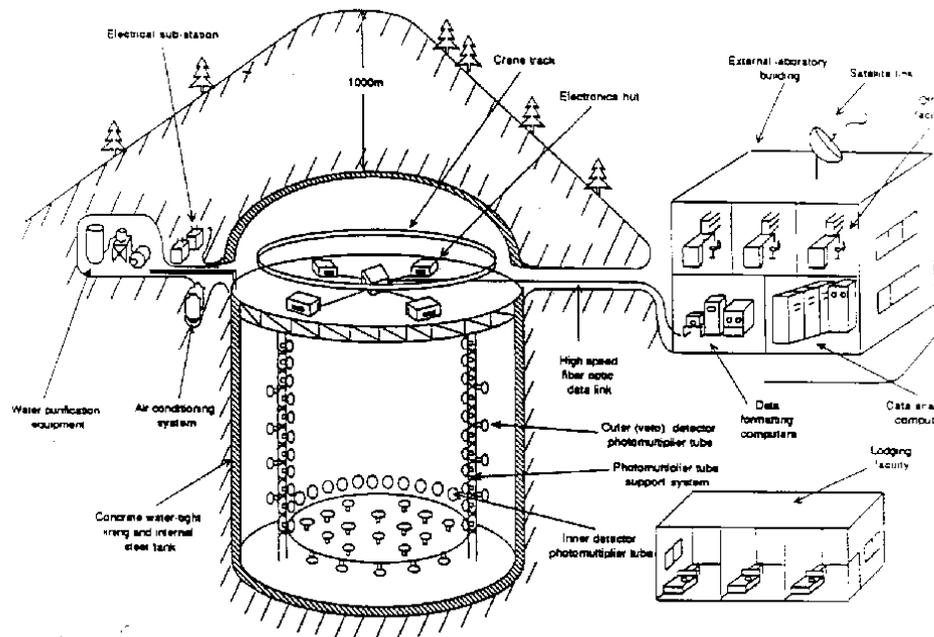
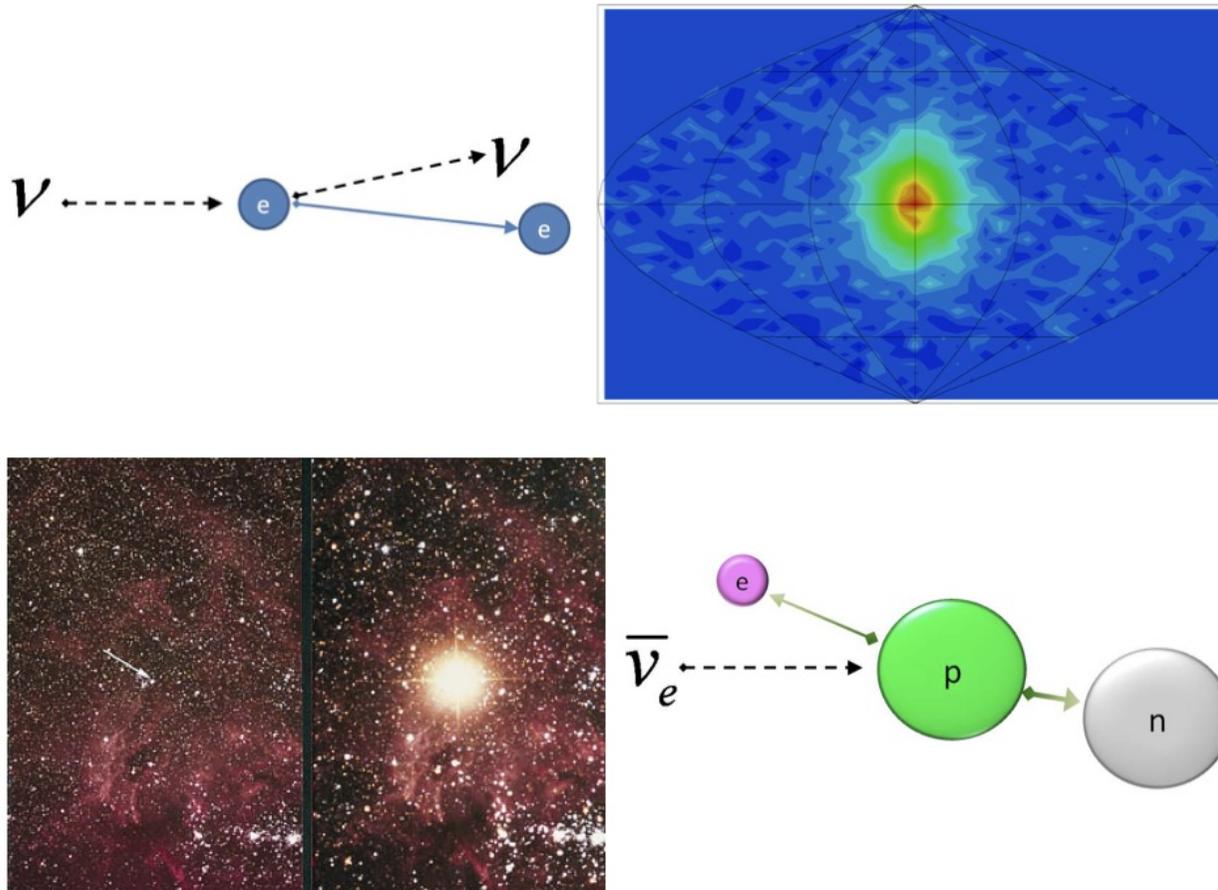


Figura 3: Il rivelatore giapponese Super-Kamiokande è enorme: 50 kton of H_2O . Rivela le particelle cariche prodotte dai neutrini grazie alla loro radiazione Čerenkov.

Sono visibili gli elettroni o antielettroni con energia cinetica > 10 volte la massa a riposo (che come si sa, equivale ad energia, $E = mc^2$).

Le osservazioni di neutrini solari e da supernova sono le ragioni del Nobel 2002 al precursore di Super-Kamiokande.



Per capir le ragioni di tanto interesse, è divertente fare un passo indietro.

PREISTORIA DELLA COMPrensIONE DEL SOLE

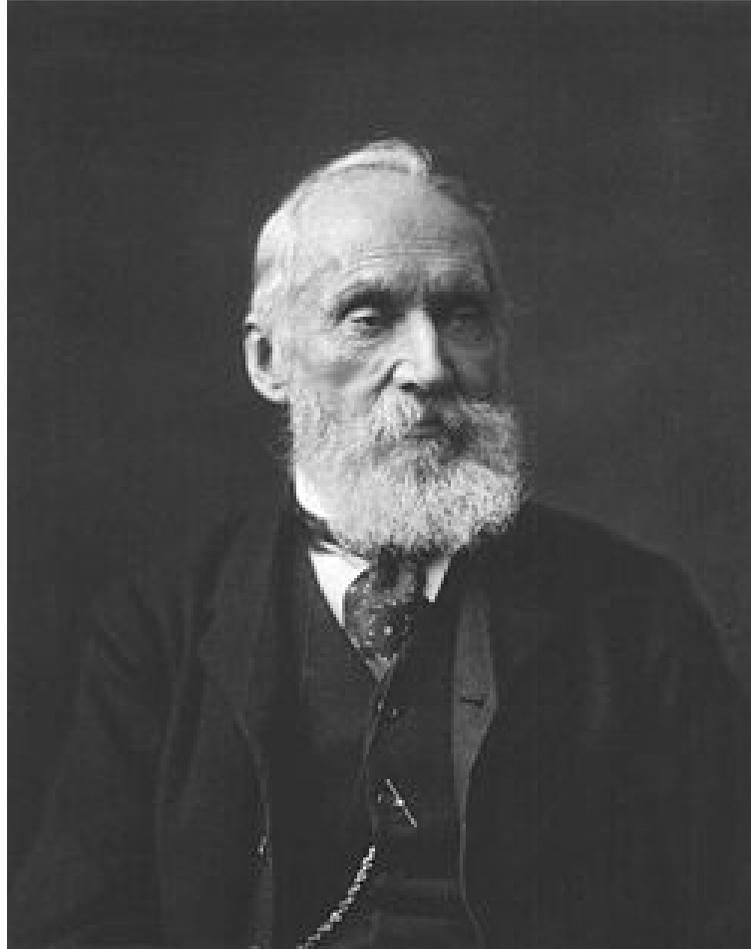


Figura 4: Uno dei più grandi fisici di tutti i tempi, Lord Kelvin, attribuiva un ruolo importantissimo a meteoriti e comete: pensava fossero la ragione della energia del Sole.



Figura 5: *Kelvin sarebbe stato gratificato di sapere che nel 1994, la cometa Shoemaker-Levy si schiantò su Giove con la potenza di 10000 bombe atomiche; sopra vediamo un immagine ottenuta con un telescopio sensibile all'infrarosso.*

Cosa sosteneva Lord Kelvin?

Leggiamo insieme le sue parole:

Si può a malapena dubitare che qualche forma della teoria delle meteoriti sia la vera e completa spiegazione del calore solare, quando si considerino le seguenti ragioni:

- 1) Non ci sono altre spiegazioni naturali concepibili, se non l'azione chimica.*
- 2) La teoria chimica è insufficiente, poichè l'azione chimica più efficiente che conosciamo basterebbe solo per 3000 anni.*
- 3) Non c'è difficoltà a raggiungere 20 milioni di anni con la teoria delle meteoriti.*

E proseguiva criticando sprezzante **quelli** che sostenevano che la Terra fosse molto piu' vecchia:

Cosa dovremmo pensare quindi di quelli che credono che la Terra abbia almeno 300 milioni di anni, che servirebbero per "denudare gli strati geologici dello Weald"?

I bersagli dei suoi strali erano i geologi ma anche Charles Darwin, che (sulla base delle sue idee sull'evoluzione) aveva osato scrivere che Terra e Sole dovessero essere molto più vecchie di quanto Lord Kelvin sostenesse.

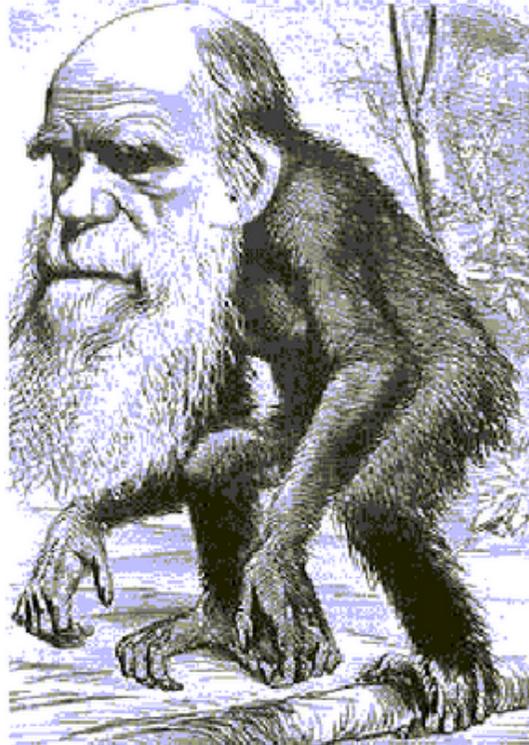
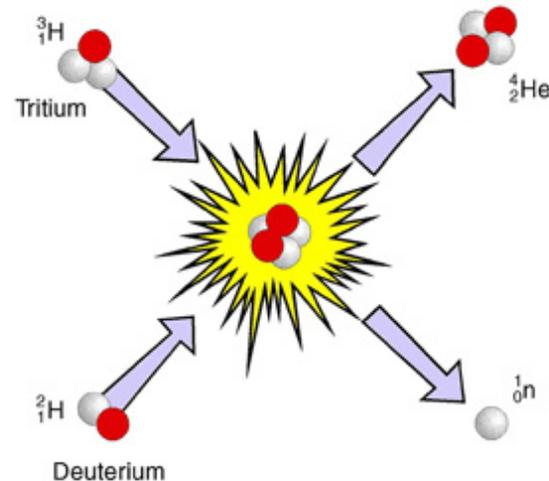


Figura 6: Una eloquente caricatura di Darwin, della stessa epoca storica. Il naturalista, intimidito dall'autorità di Lord Kelvin, preferì evitare di ripetere quella affermazione nelle edizioni dell' "Origine delle specie" successive alla prima.

Ma Darwin aveva proprio ragione!

La vera sorgente di energia del Sole sarebbe stata scoperta solo più tardi:



Un esempio di reazione di fusione nucleare in grado di produrre energia. Ci sono varie catene di reazioni nucleari, il cui effetto è la trasformazione di idrogeno in elio. Tra i sottoprodotti, luce e neutrini; questi ultimi permettono di monitorare le reazioni.

Nel nucleo del sole, ad una temperatura di 15 milioni di gradi, 4 nuclei di idrogeno si fondono in un nucleo di elio producendo energia, 2 anti- elettroni (=positroni) e 2 neutrini, che riveliamo al Gran Sasso.

IL PROBLEMA DEI NEUTRINI SOLARI

Sin dall'inizio risultava che i neutrini solari osservati sono $1/3$ dei previsti.

C'erano varie attitudini verso questo risultato

- 1. Non mi interessa; non è fisica fondamentale, nè astronomia moderna.*
- 2. I modelli solari sono sbagliati.*
- 3. Le misure sono sbagliate.*
- 4. La fisica delle particelle è sbagliata.*

Molto interessante è che la linea di pensiero che riteniamo corretta, l'ultima, era quella meno frequentata.

Di nuovo, **Bruno Pontecorvo** ne era stato il fondatore. Egli aveva suggerito che i neutrini elettronici, prodotti al centro del Sole, potessero trasformarsi in neutrini di altro tipo (1957-1969).

Era stato chiarito, anche grazie ai contributi dei colleghi giapponesi (dal 1962 in poi) che questo era possibile se i neutrini avevano massa. Infatti, se

$$|\nu_e\rangle = \cos\theta|\nu_1\rangle + \sin\theta|\nu_2\rangle$$

e siccome le particelle con data massa si comportano come onde di De Broglie

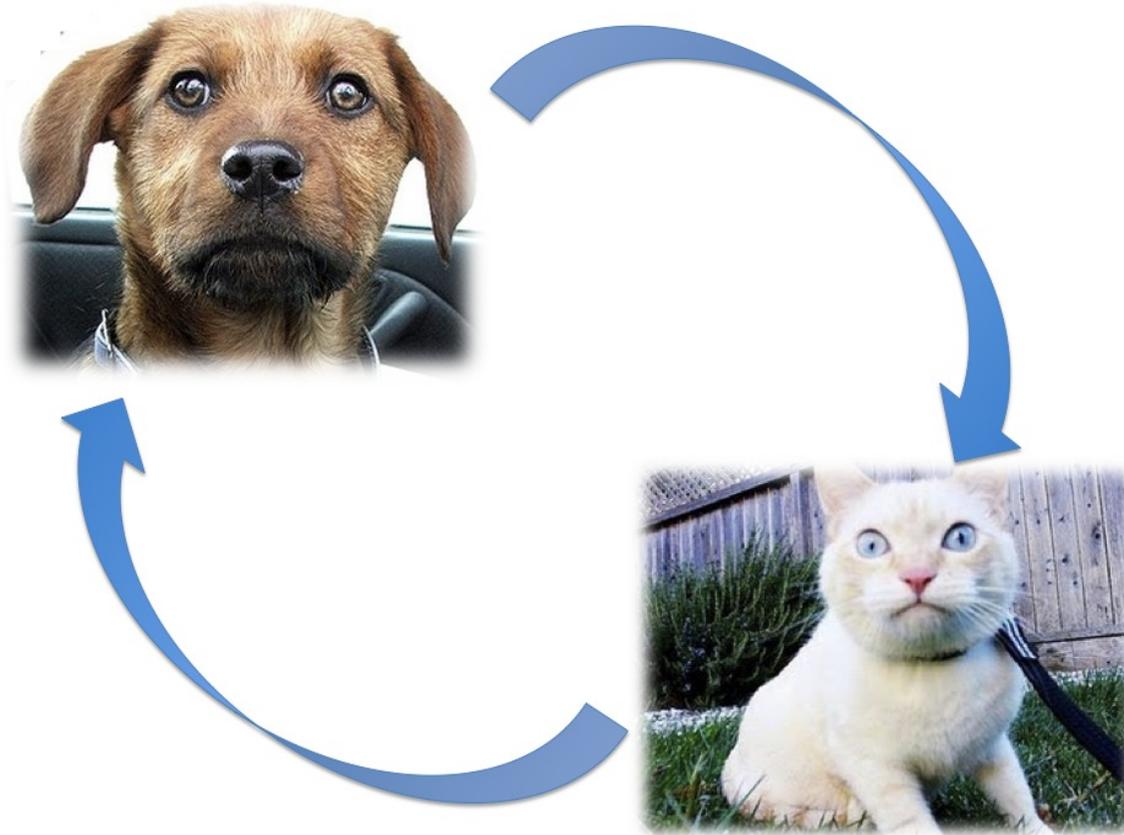
$$|\nu_i, t\rangle = e^{-i t E_i / \hbar} |\nu_i\rangle \text{ con } E_i = \sqrt{(pc)^2 + (m_i c^2)^2}$$

capiamo che a causa dello sfasamento tra $|\nu_1, t\rangle$ e $|\nu_2, t\rangle$, abbiamo

$$|\langle\nu_e|\nu_e, t\rangle| < 1$$

La probabilità che un neutrino elettronico resti tale decresce, mentre aumenta la probabilità che diventi di tipo muonico oppure tau.

Un analogo classico di questo fenomeno?



Nessuna speranza, le oscillazioni sono un processo strettamente attinente alla meccanica quantistica (stati sovrapposti, fasi quantistiche, ecc)

La soluzione del mistero dei neutrini solari

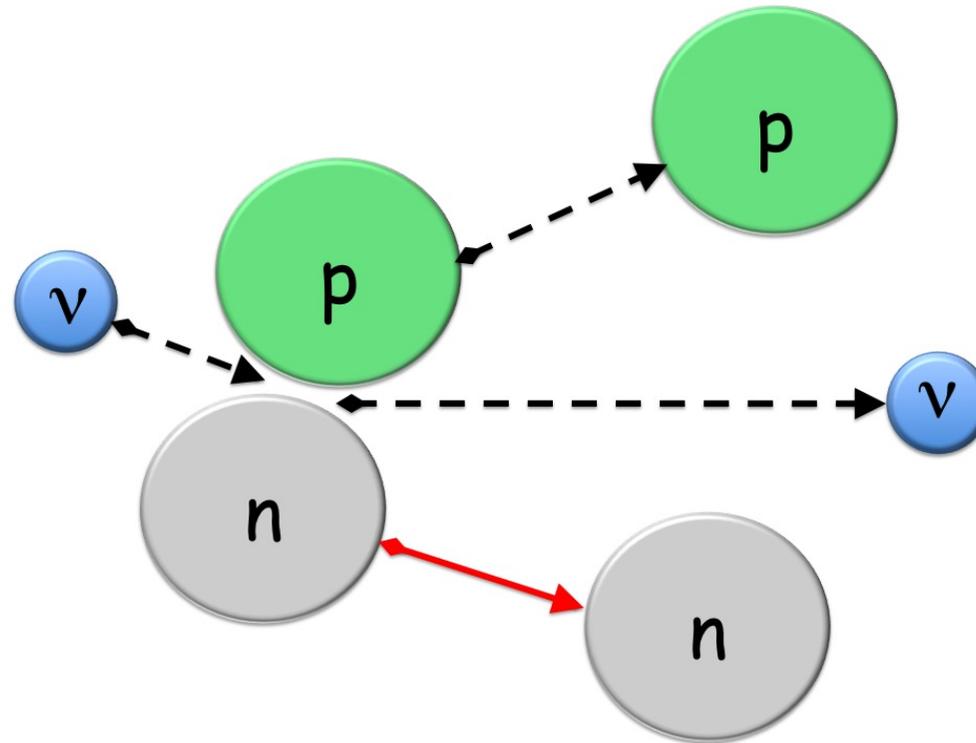
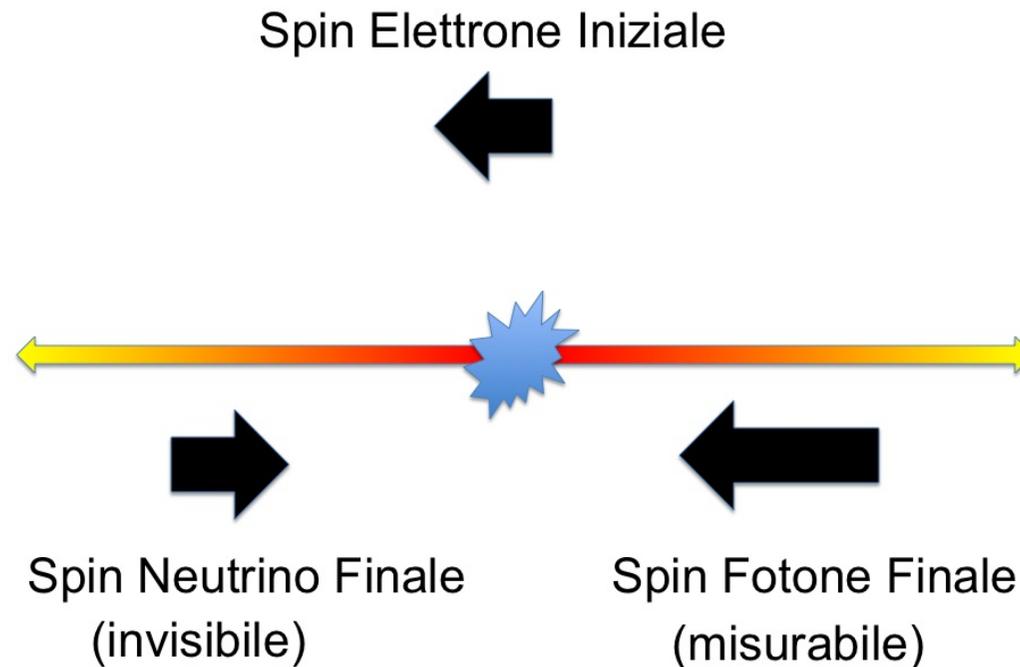


Figura 7: *La reazione di dissociazione del deuterio, insensibile al tipo di neutrino, ha permesso al rivelatore canadese SNO di validare il modello solare di Bahcall e pertanto di concludere che i neutrini elettronici non scompaiono, ma si trasformano.*

UNA BUFFA PROPRIETÀ DEI NEUTRINI

Goldhaber (1957) mostrò che lo spin del neutrino, che in grandezza eguaglia quello dell'elettrone, è sempre orientato in direzione opposta al moto.



Si usa $Eu + e \rightarrow Sm^ + \nu_e$ seguita da $Sm^* \rightarrow Sm + \gamma$; Eu e Sm hanno spin zero. Il Sm finale è quasi a riposo, allora il fotone può essere assorbito da Sm .*

IL CONTRIBUTO DI MAJORANA

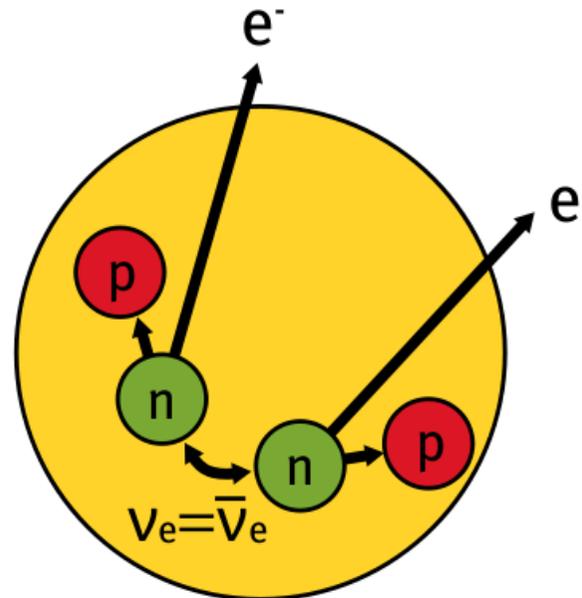
La differenza tra un elettrone e^- e la sua antiparticella e^+ è già chiara nel simbolo; uno ha carica elettrica negativa, ed uno positiva.

Ma per un neutrino, che è neutro, quanto è stringente la distinzione? È possibile che il neutrino, come il fotone, si identifichi con la sua antiparticella?

Risposta: esiste un tipo di massa (detto di Majorana) che mette in comunicazione neutrino ed antineutrino. In questo caso, per usare il gergo della meccanica quantistica, gli 'autostati di massa' sono composti da ν e $\bar{\nu}$.^a

^aLe proporzioni della mistura son via via più simili al diminuire della energia cinetica del neutrino. Per grandi energie cinetiche, abbiamo dei puri stati di neutrino (spin ed impulso antiparalleli, vedi esperimento di Goldhaber) o antineutrino (risp., paralleli).

La massa di Majorana renderebbe possibile una transizione nucleare in cui il nucleo aumenta la carica di due unità $(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e$

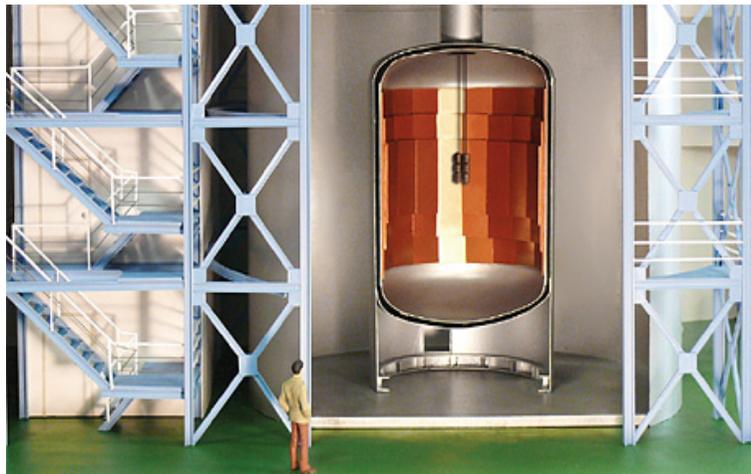


Sembra innocua, ma sarebbe un esempio di transizione in cui si **creano** 2 costituenti della materia ordinaria, cioè 2 elettroni. Sotto questa luce, sarebbe altrettanto sconvolgente quanto $p \rightarrow e^+ + \gamma$, che mostrerebbe che la materia che conosciamo è instabile e soggetta a trasformazioni.

Difatti, abbiamo già visto che, nel mondo delle particelle elementari, le reazioni di creazione e quelle di distruzione sono strettamente collegate.

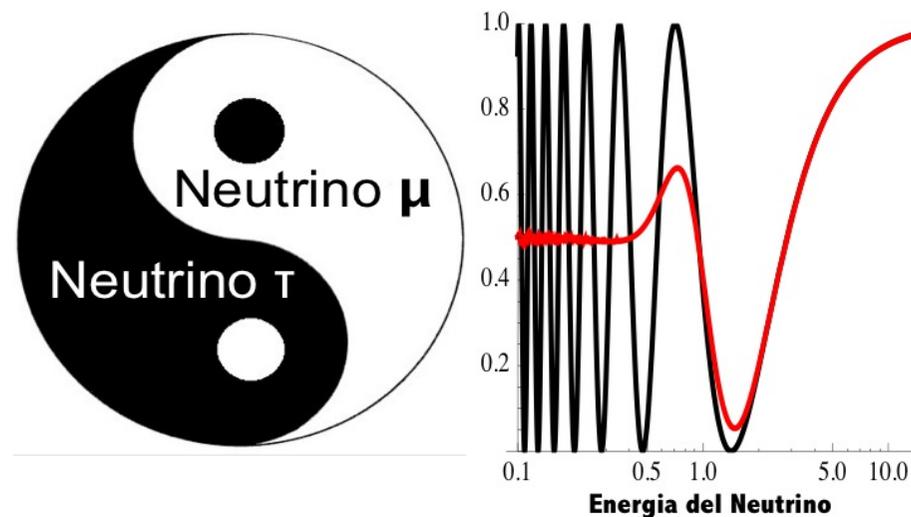
Quella reazione non solo segnalerebbe della fisica nuova, ma potrebbe addirittura offrirci una chance di affrontare la domanda di Sakharov (1969), e cioè: perchè l'universo è fatto di materia anzichè di antimateria?

Al laboratorio del Gran Sasso, un esperimento di 10 anni fa sostiene di averla vista; sono appena partiti dei nuovi esperimenti, che presto lo verificheranno.



L'ESPERIMENTO CERN-GRAN SASSO

Qual'è la motivazione originaria dell'esperimento tra CERN e Gran Sasso? La verifica in laboratorio di un certo tipo di oscillazioni di neutrino.



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

A parte le difficoltà tecniche hanno applicato la solita definizione

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

I ricercatori hanno sostenuto di aver misurato *correttamente e precisamente* le distanze ed i tempi di volo dei neutrini, deducendo che

**la velocità dei neutrini supera
quella della luce, di poco più
di 2 parti su 100.000.**

Non era proprio 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



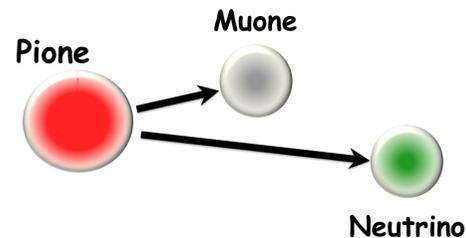
M. TREZZINI/EPA/CORBIS

Camerino, 29 Febbraio, 2012

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

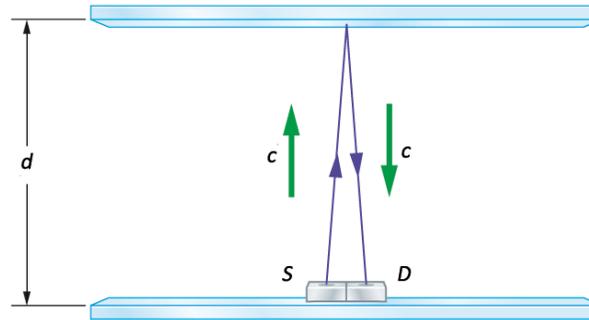
- Un pione vive in media solo un tempo di $t = 25$ nanosecondi.
- Nelle condizioni di questo esperimento, i pioni viaggiano quasi alla velocità della luce, c .
- Ingenuamente, si potrebbe credere che viaggino al massimo qualche decina di metri prima di decadere

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

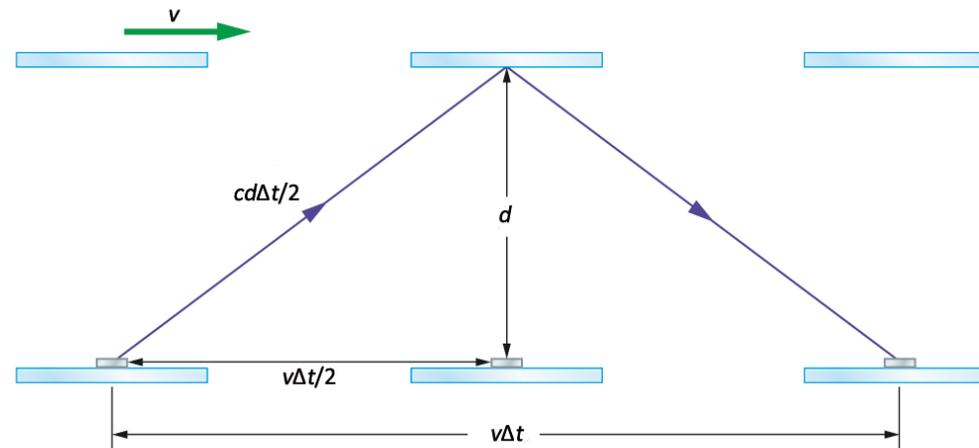
QUIZ: allora perchè hanno dovuto scavare un tunnel di decadimento dei pioni di circa un kilometro?



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



Quando l’orologio si muove con velocità v , Δt cresce di $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$



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.

Pertanto, 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.

I DUBBI DI QUESTI MESI

Un primo 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 pione, 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,^a Manimala Mitra,^a Francesco L. Villante^{a,b}
and Francesco Vissani^a**

^a*INFN — Laboratori Nazionali del Gran Sasso,
Assergi (AQ), L'Aquila, Italy*

^b*Università dell'Aquila, Dipartimento di Fisica,
L'Aquila, Italy*

E-mail: massimo@lngs.infn.it, manimala.mitra@lngs.infn.it,
francesco.villante@lngs.infn.it, 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)1

Un ulteriore dubbio

Quando, nel 1987, fu vista una **super-nova** a 170 mila anni luce da noi, gli astronomi misero in allarme i cacciatori di neutrini. Chiesero di controllare se, *qualche ora prima*, ne fosse stato catturato qualcuno. Pensavano infatti che la luce fosse rallentata mentre attraversava il mantello della stella; ma che poi, nel vuoto, luce e neutrini viaggiassero alla stessa velocità. Il resto è storia.



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 tremendo dubbio

Pochi giorni fa, i colleghi di OPERA hanno annunciato che forse le misure non erano così precise come credevano.

Non lo trovo sconvolgente; è già successo molte volte in passato che un risultato che sembrava solido non ha retto a successive verifiche.

Onore al merito a chi ha cercato e trovato l'inghippo, e per fortuna che quel lavoro non è ancora pubblicato! Ma forse un po' più di cautela sarebbe stata utile, sia da parte loro, sia da parte di vari colleghi teorici.

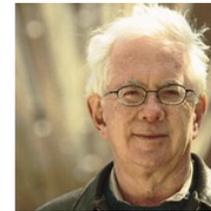
INVECE DI UNA CONCLUSIONE

Nei mesi scorsi, ho sentito parlare di neutrini extradimensionali, relatività deformata, interazioni esotiche con la materia. Non dividevo l'esigenza di avvanzarli, forse non li capisco abbastanza.

PRO



CON



e vari altri di cui non si trovano
le foto sul web: Gonzalez-Mestres,
Strumia, Bi, ecc ecc

NB 1) Le pubblicazioni su rivista sono venute soprattutto dalla colonna di destra. 2) Alcune posizioni sono cambiate negli ultimi giorni.

Perchè penso che l'entusiasmo sia una bella cosa, ma da solo non basta.

Quando penso a tutte le cose belle che abbiamo imparato e stiamo imparando, sui neutrini per esempio; o quando penso a chi ha contribuito a queste conoscenze, uomini come Einstein, Dirac, Feynman, Fermi, Pontecorvo, Majorana ... sono ancora più convinto che ci voglia molto altro, molto di più.

Certo, sbagli ne facciamo tutti, ne hanno fatti anche loro. È proprio di noi uomini, ma mica aspiriamo a far errori :)

Per queste considerazioni, e anche al fine di concludere con un sorriso, vi propongo una mia rivisitazione dei versi della Divina Commedia, quelli dove Beatrice spiega il concetto tomista di libero arbitrio.

PONETE AI QUANTI FISSO PENSAMENTO,
SAPPIATE CHE C'È ALBERT CHE VI GUIDA;
QUESTO VI BASTI A VOSTRO SALVAMENTO.

SE MALA CUPIDIGIA ALTRO VI GRIDA,
UOMINI SIATE, E NON PECORE MATTE,
CHÉ GALILEO DAL CIEL DI VOI NON RIDA.

NON FATE COM' AGNEL CHE LASCIA IL LATTE
DE LA SUA MADRE, E SEMPLICE E LASCIVO
CONTRO LA SERPE A DANNO SUO COMBATTE.

PER GLI SFEGATATI

Come si potrebbe procedere (per chi lo volesse assolutamente fare)

Fare proposte ben formulate, per capire se sono giuste o sbagliate.

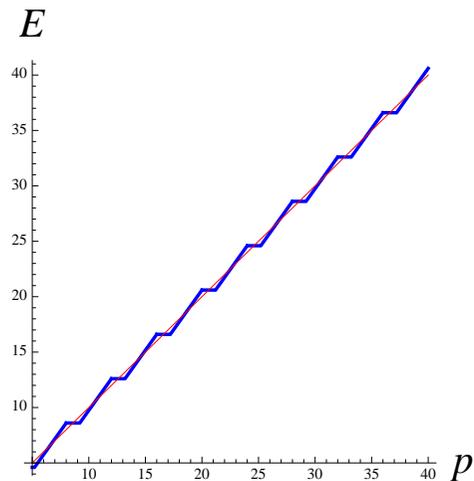


Figura 8: *Regola di dispersione per i neutrini (in blu) che implica che la gran parte di essi sono superluminali, $dE/dp > c$, come servirebbe per spiegare OPERA*

Nessuno la prende seriamente^a e spero neanche voi; ma nel caso, vi cedo il copyright.

^a Questa è la reazione di tutti i colleghi con cui ne ho discusso, inclusi A Bettini, P Colangelo, F Guerra, A Ianni, P Lipari, M Mannarelli, P Migliozzi, M Mitra, F Nesti, G Pagliaroli, A Polosa, N Redington, M Sioli, A Smirnov, A Strumia, F Villante, L Votano.