

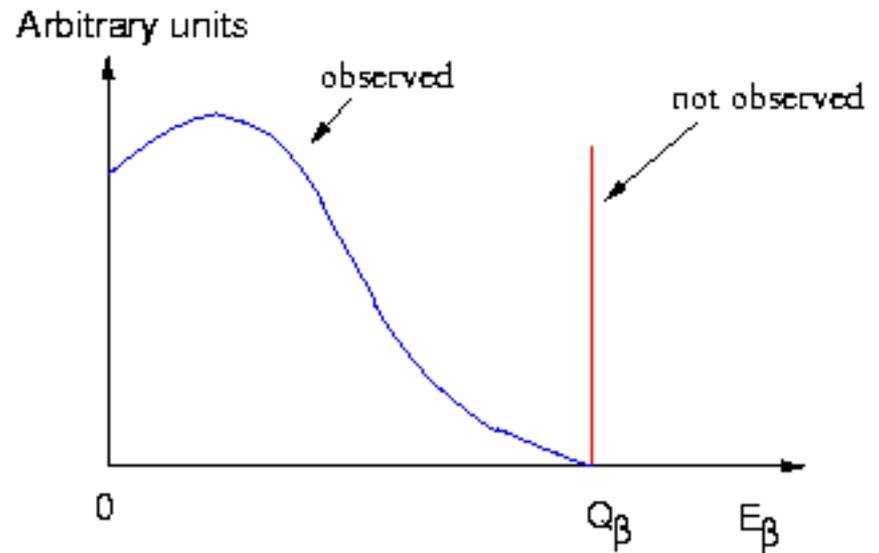
IL Decadimento β e la scoperta del neutrino

1911 Lise Meitner e Otto Hahn



Problema: col decadimento β , si osservava emissione di elettroni con uno spettro continuo.

Se si fosse trattato di un decadimento in due corpi in cui un nucleo X emette un elettrone trasformandosi in un altro nucleo Y gli elettroni avrebbero dovuto essere monocromatici



$$E_{\beta} = \frac{m_X^2 - m_Y^2 + m_e^2}{2m_Y}$$

Decadimento del neutrone

$$Z^A \rightarrow (Z+1)^A + \beta^- + \nu$$

$$E = (M_Z^A - M_{Z+1}^A)c^2$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \Rightarrow 0.7823 \text{ MeV}$$

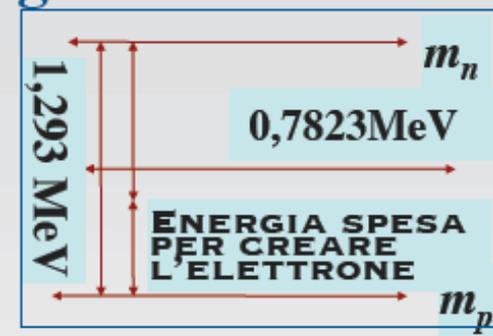
⊖	$m_n = 939.5656 \text{ MeV}$
⊕	$m_p = 938.2723 \text{ MeV}$
⊖	$m_e = 0.510999 \text{ MeV}$

Assumiamo inizialmente che il decadimento coinvolga come prodotti soltanto un protone e un elettrone. L'elettrone, molto più leggero, trasporta via la maggior parte dell'energia cinetica. Sarà una particella relativistica, il protone no. Il bilancio energetico è

$$0.7823 \text{ MeV} = E_e^{cin} + \frac{1}{2m_p} p_p^2$$

Nel sistema di riposo del neutrone, la conservazione del momento richiede:

$$p_e = -p_p$$



Facendo i conti si trova che l'energia cinetica dell'elettrone richiesta dallo **schema di decadimento a due particelle** fornisce i valori:

$$E_e = 0.7819 \text{ MeV}$$

$$p_e = 1.188 \text{ MeV}$$

Contraddizione

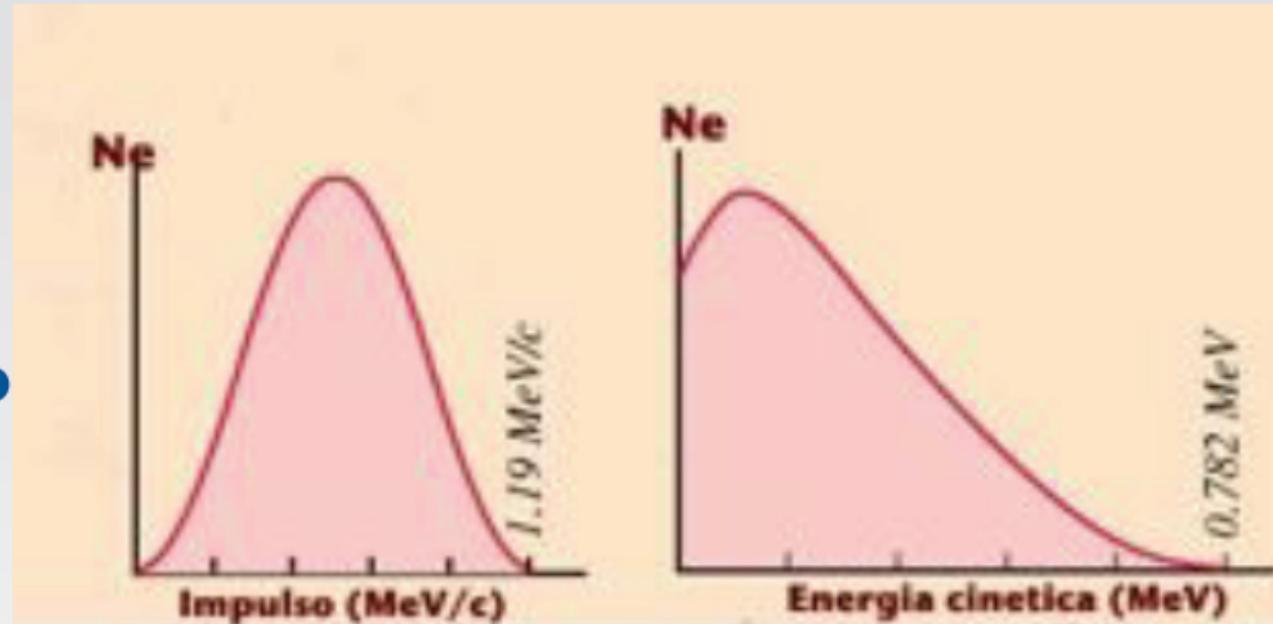
$$E_e = 0.7819 \text{ MeV}$$

$$p_e = 1.188 \text{ MeV/c}$$

Nell'ipotesi di decadimento a due corpi, l'impulso e l'energia risultano fissati a questi due valori.

Ma la natura non segue questo schema a giudicare dalle distribuzioni dell'impulso e dell'energia osservate per gli elettroni.

L'esperienza mostra che l'elettrone è emesso con un'energia che varia da zero a E_e .



Bohr era giunto a proporre che in questo caso l'energia non fosse esattamente conservata.

La soluzione di questo problema fu trovata da Pauli: nel decadimento beta non viene solamente emesso un elettrone, ma anche una seconda particella che sfugge alla rivelazione.

Le due particelle emesse si suddividono l'energia a disposizione, questo può avvenire con proporzioni differenti, di modo che l'energia conferita all'elettrone non sia univocamente determinata.

La seconda particella doveva essere neutra, altrimenti sarebbe facilmente rilevata tramite il suo potere ionizzante, non poteva essere un fotone, poiché i dati sperimentali sembravano escluderlo.

Si doveva trattare di una particella interamente nuova

I dubbi di W. Pauli

«Care Signore e Signori radioattivi, sono giunto a una disperata via di uscita [...] per salvare la legge della statistica e la legge dell'energia. Vale a dire la possibilità che possano esistere nel nucleo particelle elettricamente neutre, che chiamerò neutroni, che hanno spin $1/2$ e soddisfano il principio di esclusione [...] La massa dei neutroni dovrebbe essere dello stesso ordine di grandezza della massa degli elettroni [...] Lo spettro ! continuo diventerebbe allora comprensibile assumendo che nel decadimento ! un neutrone venga emesso insieme all'elettrone, in modo che la somma delle energie del neutrone e dell'elettrone rimanga costante. Non oso per ora pubblicare nulla su questa idea e mi rivolgo a voi confidenzialmente, cari radioattivi, con la domanda di come si possa fornire la prova sperimentale di questo neutrone, nel caso dovesse avere un potere di penetrazione uguale o circa dieci volte maggiore rispetto a quello di un raggio ". [...] Ammetto che la mia via di uscita può apparire piuttosto improbabile a priori poiché se questi neutroni esistono li avremmo forse già visti da tempo. Ma solo chi osa riesce vincitore»

(Pauli ai fisici riuniti a Tübingen 4/12/30)

Primo Convegno di fisica nucleare Roma - 1931

Gli elettroni confinati nel nucleo per giustificare fenomeni come il decadimento β e la diffusione anomala di raggi γ ed altri processi radiativi di alta energia sembravano perdere una serie di “diritti” ormai consolidati, come quello di essere dotati di spin.

«Gli elettroni nucleari mostrano una incredibile passività», notava Bohr: «Siamo indotti a considerare la cattura o l’espulsione di un elettrone da parte di un nucleo semplicemente come la morte o la creazione, rispettivamente, dell’elettrone come entità meccanica. Non possiamo quindi sorprenderci se questi processi non dovessero obbedire a principi come le leggi di conservazione dell’energia e dell’impulso, la cui formulazione si basa essenzialmente sull’idea di particelle materiali».

(N. Bohr, Atomic Stability and Conservation Laws).

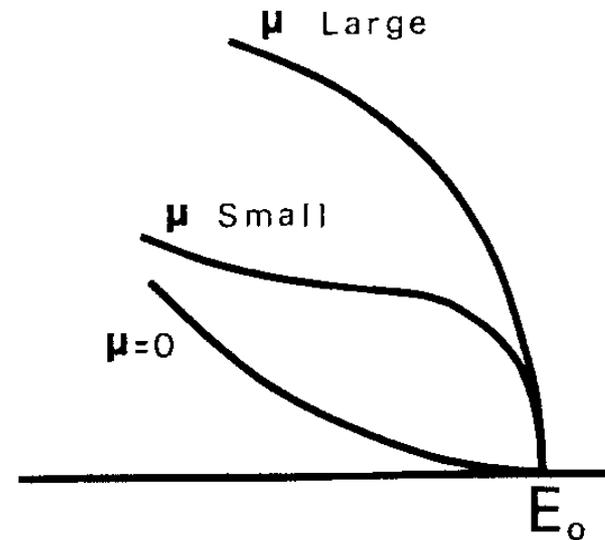
I primi modelli di nucleo con neutroni: Heisenberg, Wigner, Majorana

Gli elettroni diventano ospiti imbarazzanti nel nucleo, ma nonostante la scoperta del neutrone non significa che subito venga messo da parte il modello e-p. Ancora è difficile rinunciare all'idea che nei processi beta gli elettroni vengano fuori dai nuclei se non si trovano già là.

Nonostante la natura puramente fenomenologica di questi primi modelli di nucleo, dopo la scoperta del neutrone il soggetto era ormai abbastanza lanciato. Tuttavia rimaneva il mistero non risolto del tipo di interazione responsabile del decadimento ! (le uniche note: elettromagnetica e la gravitazionale).

Un periodo interessante:

- 1931 Fermi propone il nome di neutrino
- 1932 Chadwick scopre il neutrone. Elaborazione dei primi modelli nucleari
- 1933 viene definita la struttura del nucleo e si apre la strada ad un'interpretazione del decadimento β che non assuma che le particelle emesse fossero inizialmente contenute nel nucleo
- 1933 Fermi e Perrin propongono lo studio dell'end-point dello spettro per mettere in evidenza effetti di massa del neutrino.



VII Convegno di Solvay - 1933



Photo Benjamin Coeprie

28, avenue Louise, Bruxelles

	H. A. KRAMERS		H. F. MOTT	G. GAMOW	P. BLACKETT		M. COSTYS		Aug. PICCARD	
	E. STAHEL	P. A. M. DIRAC		J. ERRERA			O. D. ELLIS		E. O. LAWRENCE	
E. HENRIOT	F. JOLIOT	W. HEISENBERG	E. T. S. WALTON	P. DEBYE	B. CARRERA	W. BOTHE	Ed. BAUER	J. E. VERSCHAFFELT	J. D. COCKROFT	L. ROSENFELD
F. PERRIN		E. FERMI		M. S. ROSENBLUM	W. PAULI	E. HERZEN	R. FEIERLS			
E. SCHRÖDINGER	M ^{lle} I. JOLIOT	N. BOHR	A. JOFFÉ	M ^{lle} CURIE	O. W. RICHARDSON	Lord RUTHERFORD	M. de BROGLIE	M ^{lle} L. MEITHER	J. CHADWICK	
				P. LANGEVIN		Th. DE DONDER	L. de BROGLIE			

Absents : A. EINSTEIN et Ch.-Eug. GUYE

Così, durante il convegno Solvay sui nuclei atomici, a Bruxelles nell'ottobre 1933, ebbe luogo una chiarificazione generale...Ormai era evidente che, sulla base di questa concezione della struttura nucleare, i neutrini, come ora venivano chiamati, dovevano essere fermioni per conservare la statistica nel decadimento beta. Inoltre Ellis ci mise al corrente di un nuovo esperimento effettuato dal suo studente W. J. Henderson, che stabiliva un limite superiore netto allo spettro beta e ne consolidava l'interpretazione. Alla luce delle nuove circostanze, le mie precedenti precauzioni nel differire la pubblicazione ora apparivano non necessarie. Alla fine della relazione di Heisenberg comunicai le mie idee sul neutrino”.

(W. Pauli, “On the earlier and more recent history of the neutrino”, 1956)

Riassumendo:

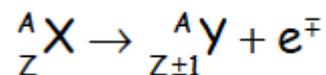
Il decadimento beta è una trasformazione nucleare in cui si verifica l'emissione di un elettrone negativo o positivo.

Nei primi studi sulla radioattività esisteva una certa confusione circa l'origine di questi elettroni e si pensava, fino al 1933, che essi fossero permanentemente presenti nel nucleo: ad esempio il nucleo di $^{14}_7\text{N}$ era immaginato come costituito da 14 protoni e da 7 elettroni, così da avere una massa pari a 14 volte quella del protone ed una carica positiva pari a quella di 7 protoni.

Un forte argomento contro questa assunzione viene da:

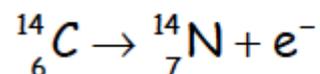
- a) principio di conservazione dell'energia;
- b) principio di conservazione del momento angolare;
- c) principio di indeterminazione.

a) Se il cambiamento di stato del sistema fosse:



cioè un decadimento in due corpi, l'elettrone avrebbe una ben definita energia. Mentre in effetti l'elettrone presenta uno spettro energetico continuo che va da energia zero all'energia massima compatibile con la trasformazione.

b) prendiamo per esempio la ipotetica trasformazione:



Il momento angolare del nucleo ${}^{14}_6 C$ è $J=0$, quello del ${}^{14}_7 N$ è $J=1$ (e comunque per A pari devono essere interi). il momento angolare intrinseco (spin) dell'elettrone è invece $J=1/2$. Allora lo stato iniziale ha momento angolare intero, lo stato finale ha momento angolare semi-intero (somma di un J intero, di uno semi-intero, e di un eventuale momento angolare orbitale del sistema ${}^{14}_7 N$ - elettrone, comunque intero).

Analogamente, per nuclei con A dispari: ${}^3_1 H \rightarrow {}^3_2 He + e^{-}$

Poiché i momenti angolari di ${}^3_1\text{H}$ ed ${}^3_2\text{He}$ sono semi-interi (1/2), il momento angolare iniziale è semi-intero, mentre quello finale è intero (somma di due J semi-interi, più un eventuale momento angolare orbitale del sistema ${}^3_2\text{He}$ - elettrone, comunque intero).

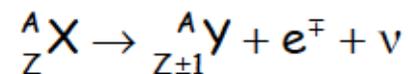
c) Nell'ipotesi che gli elettroni facciano parte dei nuclei, essi, racchiusi in una sfera di raggio $R = 10^{-12}$ cm, in base al principio di indeterminazione dovrebbero avere una distribuzione di momento che si estende fino a $p_{\max} = \hbar/R = 20$ MeV/c e quindi (trascurando la massa a riposo dell'elettrone, pari a 0.511 MeV/c²) una energia cinetica $T_{\max} = 20$ MeV. Per tenere legato entro il nucleo un elettrone con tale energia non è sufficiente la forza di attrazione coulombiana. Infatti l'energia potenziale coulombiana:

$$V_c = -\frac{Ze^2}{R} = -\frac{Ze^2}{r_0 A^{1/3}} \quad \text{per } Z=6 \text{ ed } A=14 \text{ vale: } V_c = -2.6 \text{ MeV. E' quindi necessaria una}$$

ulteriore energia potenziale negativa (attrattiva), di origine nucleare, che in valore assoluto deve essere maggiore dell'energia cinetica: e il valore di 20 MeV per elettrone sarebbe molto maggiore del potenziale attrattivo medio per nucleone dovuto

all'interazione nucleare (7-8 MeV). Non vi è assolutamente evidenza, anzi vi è una forte evidenza del contrario, che vi sia una così forte interazione tra elettrone e nucleone. Dopo la scoperta del neutrone, il decadimento beta e tutti i fatti ad esso connessi vennero spiegati con l'ipotesi del neutrino di Pauli (1931) che portò alla teoria di Fermi del 1934.

L'ipotesi di Pauli è che la trasformazione sia data da:



dove la particella ν (neutrino) è neutra per la conservazione della carica, ha spin semi-intero per la conservazione del momento angolare, ed ha massa a riposo molto piccola per la conservazione dell'energia (altrimenti la massima energia dell'elettrone emesso dovrebbe dipendere dalla massa del neutrino).

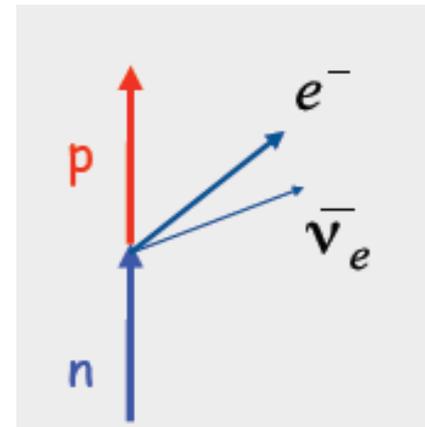
La forma dello spettro energetico della emissione beta può essere ricavata abbastanza semplicemente studiando in qual modo l'energia a disposizione nella transizione può essere ripartita tra la particella beta ed il neutrino.

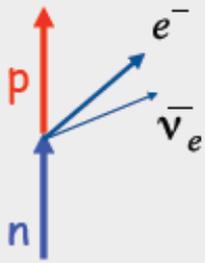
La teoria di Fermi



Secondo Fermi il decadimento beta del nucleo è dovuto a un nuovo tipo di interazione tra i quattro fermioni implicati nel processo di decadimento beta. Questa interazione causa la trasformazione di un neutrone nel nucleo in un protone con la simultanea produzione di una coppia elettrone-neutrino.

Il modello più semplice consisteva nell'assumere una interazione puntiforme con una costante di accoppiamento g . Fermi assume quindi che l'interazione sia proporzionale alla sovrapposizione della funzione d'onda delle particelle presenti negli stati iniziali e finali, nello stesso punto dello spazio.





L'analogia con l'elettrodinamica

Al centro della teoria c'è quindi la seguente interazione fondamentale

$$n \rightarrow p + e^{-} + (\text{anti})\nu$$

Fermi introduce l'ipotesi che questo processo sia del tutto analogo a quello in cui un protone emette un fotone

$$p \rightarrow p + \gamma$$

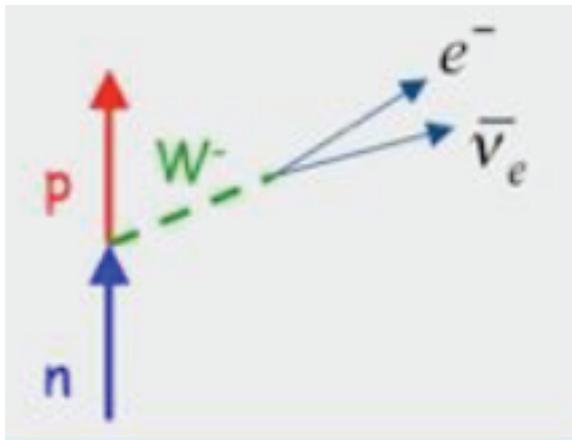
Al fotone emesso corrisponde la coppia elettrone-neutrino

$$\gamma \Leftrightarrow (e^{-}, \nu)$$

Il protone funziona come un'antenna radio: la transizione del protone da uno stato quantico di energia più alta a uno di energia inferiore attiva una corrente elettrica che causa l'emissione di onde elettromagnetiche, i fotoni. Nella visione di Fermi la trasformazione di un neutrone in un protone attiva un nuovo tipo di corrente, oggi chiamata corrente debole, che causa la creazione della coppia elettrone-neutrino. L'interazione debole è quindi, secondo Fermi, una interazione diretta tra correnti deboli.

L'interazione debole non ha alcun analogo classico, ma Fermi usa la sua convinzione che la elettrodinamica quantistica sia un prototipo generale delle teorie di campo:

formula perciò una teoria delle interazioni deboli che sfrutta per quanto possibile questa analogia. Questa idea è avallata dai risultati che appaiono molto soddisfacenti. Per un fenomenologo come Fermi questo è il risultato migliore che si potesse attendere.



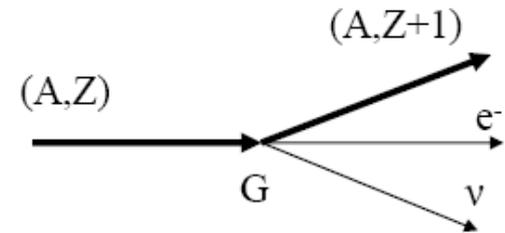
Da lì in poi la teoria delle interazioni deboli acquisterà progressivamente un assetto sempre migliore, inglobando al momento opportuno sia la non conservazione della parità che la riformulazione basata sui bosoni intermedi W e Z_0 .

Riassumendo :

1934 teoria di Fermi:

Ipotesi del neutrino, ν + teoria di Dirac (anti- ν)

Il decadimento β^- è riconducibile alla trasformazione di un neutrone in un protone



Questo processo può essere trattato come un'interazione puntiforme tra 4 fermioni (teoria di Dirac)



Il punto di partenza è la regola d'oro di Fermi, che fornisce la probabilità di transizione per unità di tempo:

$$\omega = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \langle f | H | i \rangle \right|^2 = \rho \frac{2\pi}{\hbar} \left| M_{if} \right|^2 \rho$$

In meccanica quantistica la regola d'oro serve a calcolare la probabilità di transizione per unità di tempo (dovuta ad una perturbazione) da un autostato di energia E fissata ad un continuo di autostati energetici. Il sistema transisce, sotto l'effetto della perturbazione H , dall'autostato $|i\rangle$ (stato iniziale del nucleo) di una Hamiltoniana H_0 (nel nostro caso H_0 descrive il nucleo), ad un insieme continuo di stati finali $|f\rangle$ (stato finale del nucleo, più elettrone e neutrino uscenti). ρ rappresenta la densità degli stati finali, cioè il numero di stati quantici per unità di energia

Per usare tale formula occorre conoscere l'espressione dell'elemento di matrice M_{if} tra gli stati iniziale e finale e la densità degli stati finali $\rho = dN/dW$, essendo W l'energia totale a disposizione.

Poichè ad ogni transizione corrisponde l'emissione di una particella beta, la grandezza ω coincide evidentemente con la costante di decadimento λ definita in genere per i decadimenti radioattivi.

Naturalmente si può valutare la probabilità di transizione per unità di tempo per emissione di elettroni con quantità di moto compresa tra p_e e $p_e + dp_e$:

$$d\omega(p_e) = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{if}|^2 \frac{d^2N}{dW dp_e} dp_e$$

Si vedrà che la densità degli stati finali determina completamente la forma dello spettro beta, essendo l'elemento di matrice nelle transizioni permesse una costante indipendente dall'energia degli elettroni.

L'elemento di matrice, per definizione, ha la seguente forma:

$$M_{if} = \int \psi_{fin}^* H \psi_{in} d\tau$$

dove H è l'operatore che rappresenta la transizione (perturbativa) e l'integrale è esteso al volume interessato.

La funzione d'onda $\psi_{in} = u_i$ descrive il nucleo prima del decadimento.

La funzione d'onda $\psi_f = u_f \psi_e \psi_\nu$ è il prodotto della funzione d'onda del nucleo nello stato finale per le funzioni d'onda dell'elettrone e del neutrino.

Nella teoria di Fermi viene fatta l'ipotesi che l'operatore H abbia la forma:

$$H = g \cdot \delta(\mathbf{r}_e - \mathbf{r}) \cdot \delta(\mathbf{r}_\nu - \mathbf{r})$$

$\delta(x)$ è la funzione di Dirac;

\mathbf{r}_e è un vettore di posizione associato all'elettrone;

\mathbf{r}_ν un analogo vettore associato al neutrino e \mathbf{r} è associato al nucleone che decade.

$\delta(\mathbf{r}_e - \mathbf{r})$ è la densità di probabilità che elettrone e nucleone si trovino a distanza $\mathbf{r}_e - \mathbf{r}$;

$\delta(\mathbf{r}_\nu - \mathbf{r})$ è la densità di probabilità che neutrino e nucleone si trovino a distanza $\mathbf{r}_\nu - \mathbf{r}$.

La speciale dipendenza di H dalle coordinate esprime l'ipotesi che il raggio di azione dell'interazione sia nullo, cioè elettrone, neutrino e nucleone **interagiscono solo quando sono sovrapposti, o a contatto.**

La giustificazione qualitativa di tale ipotesi è data dal fatto che nel decadimento beta del neutrone isolato l'interazione si manifesta solo per distanze molto piccole, inferiori alle dimensioni del neutrone stesso.

g è una costante che misura l'intensità dell'interazione. Il suo valore non è noto a priori e viene determinato sulla base di dati sperimentali. Esso ha un ruolo simile a quello dato dalla carica elettrica nel potenziale coulombiano.

Dall'ipotesi di raggio d'azione nullo per H, segue che elettrone e neutrino, una volta emessi dal nucleo, sono particelle in moto libero, se si prescinde dall'interazione coulombiana fra elettrone e nucleo finale, che invece ha raggio d'azione infinito.

Trascurando la parte di spin e, per ora, l'interazione coulombiana dell'elettrone uscente con il nucleo, le funzioni d'onda dell'antineutrino e dell'elettrone possono essere descritte come onde piane:

$$\psi_e(\mathbf{r}) = V^{-1/2} \exp(i\mathbf{k}_e \cdot \mathbf{r}) \quad \psi_\nu(\mathbf{r}) = V^{-1/2} \exp(i\mathbf{k}_\nu \cdot \mathbf{r})$$

dove V è il volume di normalizzazione delle funzioni d'onda:

$$\int \psi_e^*(\mathbf{r}) \psi_e(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = 1 \quad e \quad \int \psi_\nu^*(\mathbf{r}) \psi_\nu(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = 1$$

Inoltre, per energie dell'elettrone uscente dell'ordine del MeV, $\beta \approx 1$ e quindi $p_e \approx m_e c$.

$$\text{Pertanto: } k = \frac{p}{\hbar} = \frac{m_e c}{\hbar} = \frac{m_e c^2}{\hbar c} = \frac{0.51}{198} = 2.51 \cdot 10^{-3} \text{ fm}^{-1}$$

il prodotto $\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$, per valori di r dell'ordine di qualche fermi (raggio nucleare), è quindi molto minore dell'unità, e si può scrivere:

$$\exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) = 1 + i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \dots$$

dove addirittura il secondo termine è trascurabile. Pertanto: $\psi_e(\mathbf{r}) \cdot \psi_\nu(\mathbf{r}) = 1/V$
e l'elemento di matrice si scrive:

e l'elemento di matrice si scrive:

$$M_{if} = \frac{g}{V} \int u_f^* u_i d\mathbf{r} = \frac{g}{V} S_{if}$$

Per quanto riguarda il valore numerico di S_{if} , notiamo che, quanto maggiore è il grado di sovrapposizione tra stato nucleare iniziale e finale, quanto più S_{if} è prossimo all'unità (varrebbe uno per funzioni d'onda identiche, in quanto $\int \psi^* \psi d\mathbf{r} = 1$).

Il numero di stati in cui l'elettrone ha quantità di moto compresa nell'intervallo tra p_e e p_e+dp_e e conseguentemente il neutrino nell'intervallo compreso tra p_v e dp_v è dato da:

$$d^2N = dn_e dn_v = \left(\frac{4\pi V}{(2\pi\hbar)^3} p_e^2 dp_e \right) \cdot \left(\frac{4\pi V}{(2\pi\hbar)^3} p_v^2 dp_v \right) = \frac{16\pi^2 V^2}{(2\pi\hbar)^6} p_e^2 dp_e p_v^2 dp_v$$

La quantità:

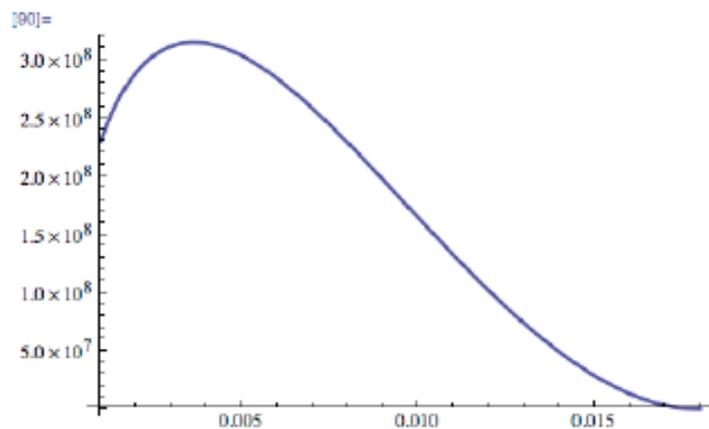
$$\frac{d^2N}{dW} = \frac{d^2N}{dW dp_e} dp_e = \frac{16\pi^2 V^2}{(2\pi\hbar)^6} \frac{1}{c^3} (W - E_e)^2 p_e^2 dp_e$$

rappresenta proprio la densità degli stati finali per i quali l'elettrone ha una quantità di moto compresa tra p_e e p_e+dp_e quando l'energia totale è compresa tra W e $W+dW$.

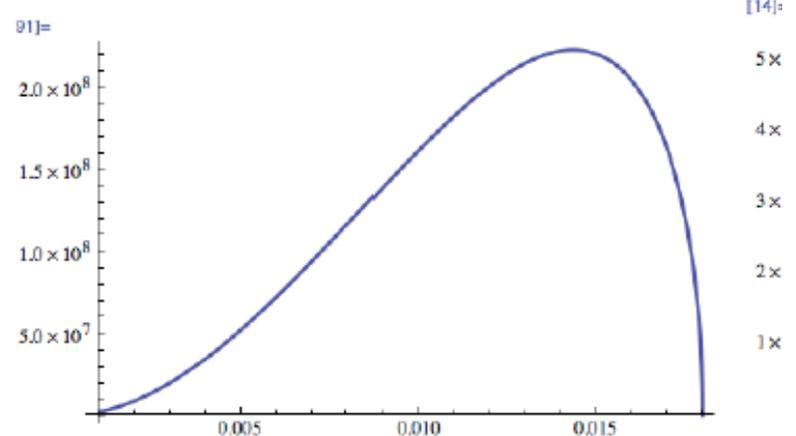
Si può poi ricavare la densità degli stati finali che da cui dipende la forma delle spettro energetico degli elettroni:

$$\frac{dN}{dp_e} = \frac{16\pi^2 V^2}{(2\pi\hbar)^6 c^3} (W - E_e)^2 p_e^2$$

$$\frac{dN}{dE_e} = \frac{dN}{dp_e} \frac{dp_e}{dE_e} = \frac{16\pi^2 V^2}{(2\pi\hbar c)^6} (W - E_e)^2 E_e \sqrt{E_e^2 - m_e^2 c^4}$$



spettro beta del ^3H



spettro neutrini del ^3H

La massa dei neutrini

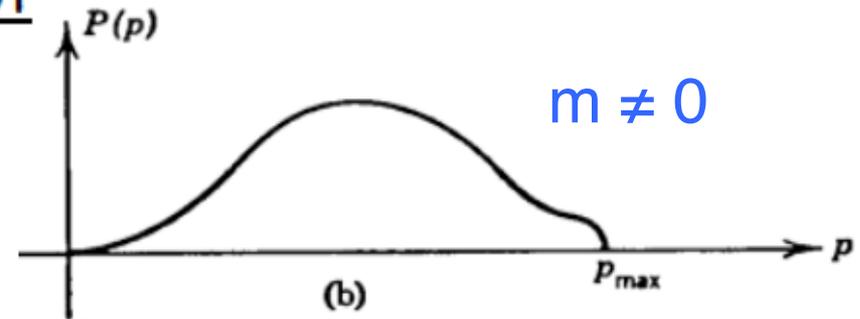
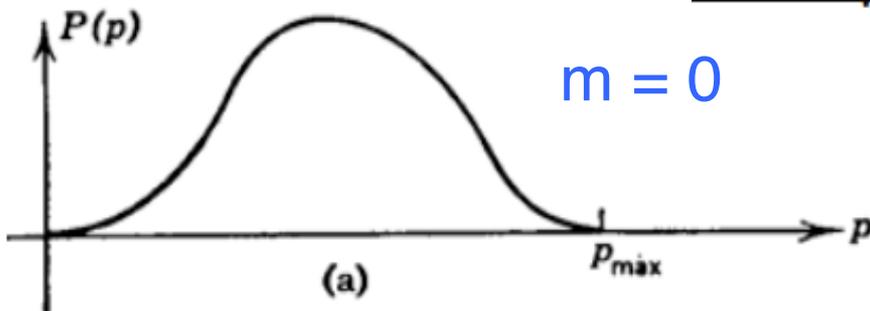
La formula che fornisce la densità degli stati finali si può riscrivere:

$$\omega(p_e) dp_e = C(W - E_e)^2 p_e^2 dp_e$$

La distribuzione, nel caso di $m_\nu \neq 0$, diviene invece:

$$\omega(p_e) dp_e = C(W - E_e) \sqrt{(W - E_e)^2 - m_\nu^2 c^4} \cdot p_e^2 dp_e$$

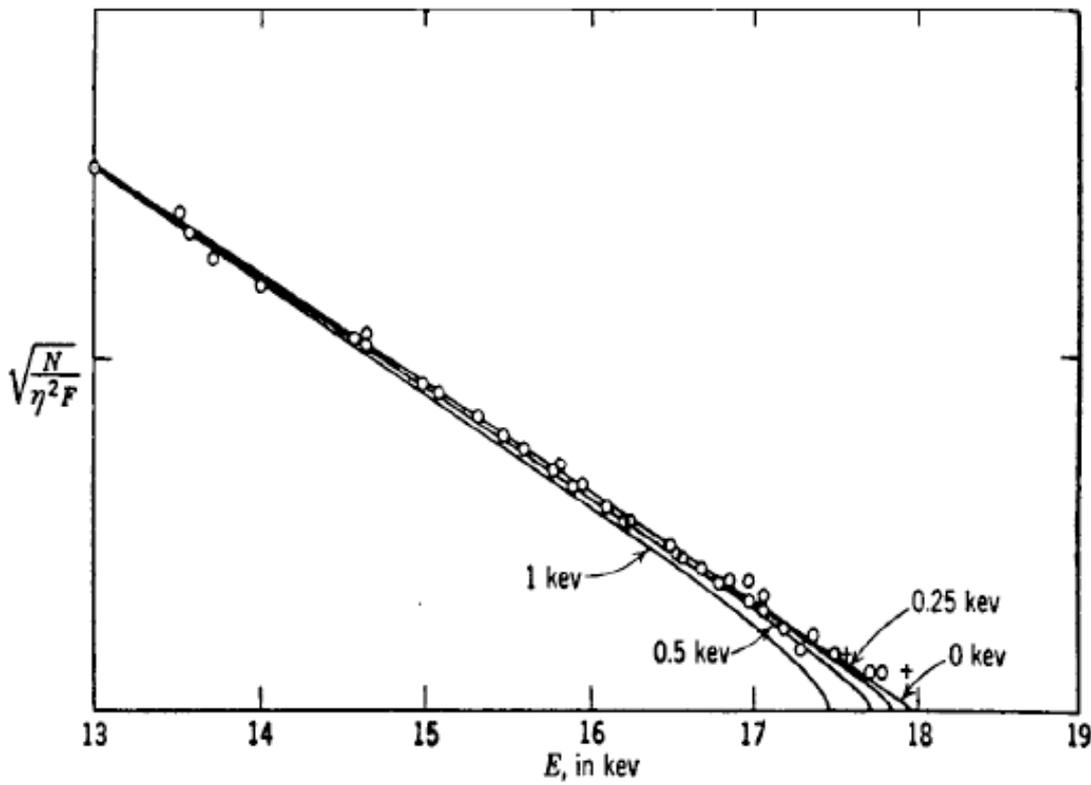
Kurie-plot



Si dimostra facilmente che la tangente alla curva nel punto $p=p_{\max}$ è uguale a zero nel caso di $m_\nu = 0$, mentre è infinita nel caso di $m_\nu \neq 0$.

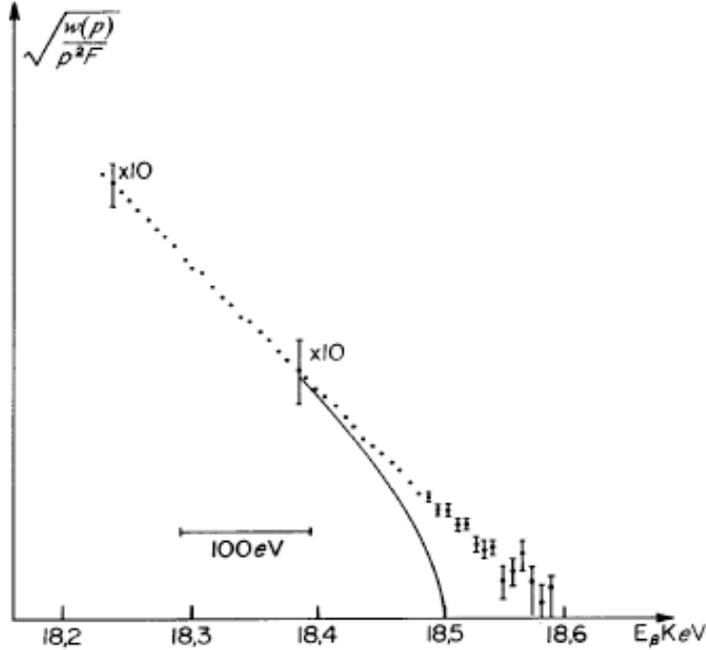
Ovviamente, essendo $m_\nu \approx 0$, gli spettri energetici sperimentali, a causa degli errori di misura, non permettono di misurare la pendenza della curva: si ricorre pertanto al plot di Kurie.

Occorre però aprire una parentesi. Nella trattazione fatta non si è tenuto conto della attrazione (o repulsione) coulombiana subita dall'elettrone (positrone) da parte del nucleo.



come la testa dello spettro è influenzata dal valore della massa del neutrino

Ad esempio, dal Kurie plot del decadimento beta del ^3H si è ricavato per la massa del neutrino il seguente intervallo di valori: $14 \text{ eV} < m_\nu < 46 \text{ eV}$ (con un livello di confidenza del 99%).



Plot di Kurie del ^3H

La linea continua corrisponderebbe ad una massa del neutrino pari a 100 eV.

Teoria di Fermi: altre reazioni previste

Nel 1934 Frédéric Joliot e Irène Curie producono artificialmente un isotopo radioattivo che decade emettendo un positrone e^+ (antiparticella dell'elettrone) secondo la catena:



dove il neutrino non era visibile (problema conservazione energia).

la trasmutazione di un protone in un neutrone $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
è energeticamente proibita per protoni liberi

→ Scoperta radioattività artificiale

Cattura elettronica

La cattura elettronica accade quando un nucleo assorbe uno dei suoi elettroni orbitanti (e^-) trasformando un protone (p^+) del nucleo in un neutrone (n); come risultato si ottiene l'emissione di un neutrino (ν_e), è sostanzialmente una reazione simile al decadimento β

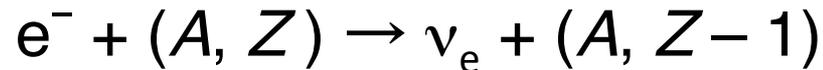


avviene se la differenza di energia tra i due nuclei è minore di $2m_e = 1.022 \text{ MeV}$.

Reazioni tipiche:

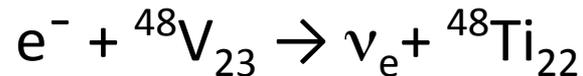


Cattura di un elettrone atomico da un protone del nucleo:



calcolata da [Gian Carlo Wick \(1934\)](#) implica la conservazione di carica, numero leptonic e numero barionico

Osservata per la prima volta nel [1936 da Luis Alvarez](#) nella reazione

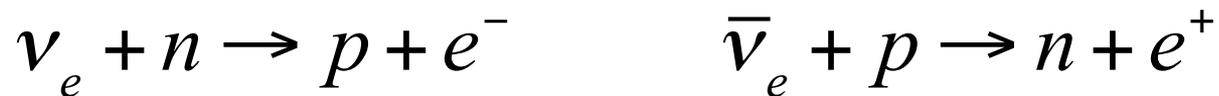


Questo tipo di reazione si rivela misurando il fotone (raggio X) emesso nella transizione di un elettrone atomico da un'orbita esterna all'orbita non più occupata dall'elettrone catturato dal nucleo.

L. Alvarez - Premio Nobel per la Fisica 1968

Decadimento β inverso

Il decadimento β inverso avviene quando un neutrino colpisce un nucleo atomico e nella collisione viene creato un elettrone o un positrone, con scomparsa del neutrino incidente e modifica della carica elettrica del nucleo di ± 1 .



La sezione d'urto fu calcolata per la prima volta nel 1934 da Bethe e Peierls usando la teoria di Fermi

$$\sigma(\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+) = \frac{G^2}{\pi} |M|^2 \frac{p^2}{v_i v_f}$$

Risultato del calcolo con E in MeV:

$$\sigma(\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+) \approx 10^{-43} E^2 \text{ cm}^2$$

Probabilità d'interazione di una particella in uno spessore T di materia:

$$P = 1 - \exp(-T / \lambda)$$

Percorso libero medio in cm pari ad alcuni anni luce !

$$\lambda = \frac{A}{N_A \rho \sigma} \cong 10^{19} \text{ cm}$$

A : massa molare (g)
 N_A : numero di Avogadro
 ρ : densità (g / cm³)
 σ : sezione d'urto (cm²)

Hans Bethe: “e' proprio una gran sfortuna che la probabilita' di disintegrazione di nuclei da parte dei neutrini sia cosi' trascurabilmente piccola, poiche' la disintegrazione e' la sola manifestazione dei neutrini liberi che possa essere prevista con certezza.”

1938 : Scoperta della fissione dell' Uranio

(L. Meitner, O. Hahn, F. Strassmann, O.R. Frisch)

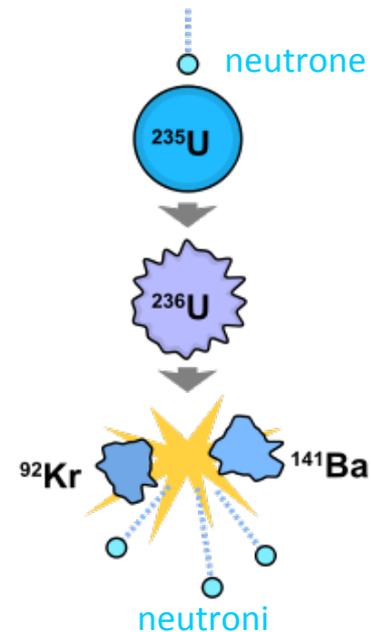
Reazione esotermica (energia media emessa:
 $E \sim 200 \text{ MeV} / \text{fissione}$)

1942 – 1946: Applicazioni (principalmente militari) della fissione

I neutroni emessi permettono lo sviluppo di una reazione a catena:

Reazione divergente (in massa critica di $^{235}\text{U}_{92}$ puro > 95%) → Bomba atomica

Reazione controllata → reattori nucleari → produzione di energia



Sorgenti di neutrini sulla terra

I reattori Nucleari sono sorgenti intense, isotrope di neutrini da decadimento β dei frammenti di fissione

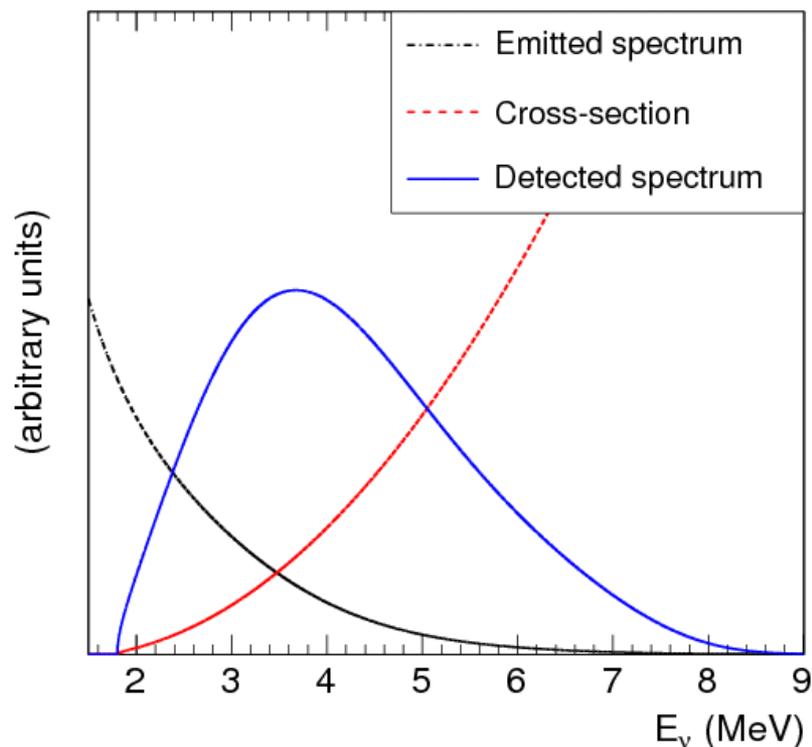
Ogni reazione di fissione produce in media 200MeV
In un reattore termico da 3 GW avvengono

$$(3 \times 10^9) / (2 \times 10^8 \times 1.6 \times 10^{-19}) \sim 10^{20} \text{ reazioni di fusione/sec}$$

Nella reazione di fissione indotta da neutroni termici su U-235 i due frammenti hanno tipicamente $A=94$ e $A=140$. Per raggiungere la curva di stabilita' (Zr-94 e Ce-140) bisogna passare da 92 a 98 protoni e quindi avvengono 6 decadimenti β producendo 6 antineutrini per reazione ovvero 6×10^{20} al sec.

- I neutrini portano via tipicamente 1.6 MeV ciascuno ovvero il 6% dell'energia
- Oltre ai neutrini prodotti dalla catena di fissione dell'U-235 se ne hanno dalle catene dell'U-238, del Pu-239 e del Pu-241
- Si ha quindi uno spettro con diverse componenti
- Questo, convoluto per la sezione d'urto di interazione del neutrino (rosso), fornisce lo spettro osservato (blu)

→ Max intorno a 4 MeV



Bruno Pontecorvo

Marina di Pisa, 22.08.1913 - Dubna, Russia, 24.09.1993



Бруно Понтекорво

- Nasce da una famiglia benestante di fede ebraica, non praticante (il 4° di 8 figli). Il padre, Massimo, è proprietario di una fiorente industria tessile (espropriata nel 1938 dalle leggi razziali fasciste).
- All'età di 18 anni è ammesso al 3° anno di fisica presso l'Università di Roma, e lavora con Fermi agli esperimenti sulla radioattività indotta dai neutroni lenti.
- Nel 1936 si trasferisce a Parigi nel laboratorio dei coniugi Joliot-Curie. Simpatizza con l'ideologia comunista. Conosce una studentessa svedese, Marianne Nordblom, dalla quale avrà tre figli.
- Nel 1940, in seguito all'invasione della Francia da parte delle truppe tedesche, fugge negli Stati Uniti attraverso la Spagna. Impiegato da una compagnia petrolifera in Oklahoma, brevetta un metodo di introspezione di pozzi petroliferi basato sull'uso di neutroni lenti.
- Nel 1943 si trasferisce al Laboratorio di Chalk River (Canada), dove lavora allo sviluppo di reattori nucleari, ed anche allo studio dei raggi cosmici e dei neutrini.
- 1948: riceve la cittadinanza britannica e viene chiamato al Centro di Ricerche Nucleari di Harwell (Gran Bretagna).
- 1950: viene nominato Professore all'Università di Liverpool. Tuttavia, prima di cominciare il primo anno accademico (1950 – 51), durante una vacanza in Italia scompare con la famiglia senza lasciar traccia.
- 1955: riappare ufficialmente in pubblico nel centro di ricerche JINR di Dubna (URSS) (l'equivalente del CERN per i paesi del blocco comunista).

1946: Pontecorvo propone di rivelare i neutrini prodotti dai reattori nucleari osservando la reazione



(Il rapporto interno del Laboratorio di Chalk River PD – 205 che descrive la proposta viene dichiarato “documento segreto” dalla Commissione per l’Energia Atomica degli U.S.A perchè si teme che possa servire a potenze straniere ostili per misurare la potenza de reattori nucleari in funzionamento negli Stati Uniti)

Metodo proposto:

- Installazione di un recipiente di grande volume (qualche m³) riempito di C₂Cl₄ (un liquido generalmente usato come smacchiatore) presso un reattore nucleare;
- Ogni 3 – 4 settimane, far bollire il liquido, raccogliere il vapore (che dovrebbe contenere atomi di ³⁷Ar₁₈) in contatori proporzionali;
- Misurare la cattura elettronica $e^- + {}^{37}\text{Ar}_{18} \rightarrow {}^{37}\text{Cl}_{17} + \text{neutrino}$ (vita media 49 giorni) mediante la rivelazione dei raggi X / elettroni emessi dall’atomo eccitato di ³⁷Cl₁₇ nel ritornare allo stato fondamentale.

Il sito di Savannah

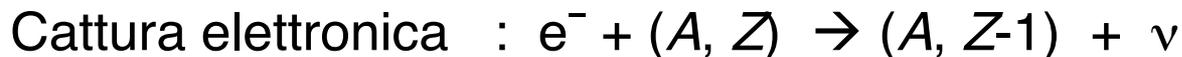
- Alvarez persuase l'Atomic Energy Commission a prevedere una sala sperimentale in prossimità del reattore in costruzione (per produrre Trizio per la bomba H) a Savannah River
- Si rese poi conto che il fondo da raggi cosmici sarebbe stato troppo alto e abbandonò il progetto
- Peraltro la reazione radiochimica di Pontecorvo ed Alvarez era sensibile ai neutrini e non agli anti-neutrini...

1954: Il fisico americano Raymond Davis installa un recipiente contenente 3 800 litri di C_2Cl_4 a prossimità di uno dei reattori del Centro Nucleare di Savannah River, ma non rivela alcun segnale della presenza di atomi di $^{37}A_{18}$ dopo un'esposizione di qualche settimana.

1958: Risultato negativo confermato da un secondo esperimento con 11 400 litri di C_2Cl_4 .

Questo risultato negativo suggerisce che i neutrini prodotti dai reattori (da decadimenti β^- dei prodotti di fissione) non producono elettroni nelle collisioni con i nuclei di $^{37}Cl_{17}$.

L'interpretazione più plausibile: i reattori non producono neutrini, ma antineutrini (particelle distinte dai neutrini)

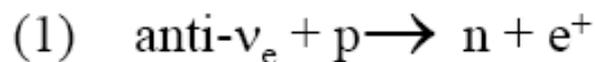


Reines e Cowan

- Reines e Cowan (Los Alamos Laboratory) decisero invece di sfruttare il decadimento beta inverso con la reazione indotta dagli antineutrini su protoni.
- Dopo avere abbandonato l'idea iniziale di usare un'esplosione nucleare installarono il loro rivelatore al reattore di Hanford (1953), per poi spostarsi a Savannah River (1956)

F. Reines - Premio Nobel per la Fisica 1995

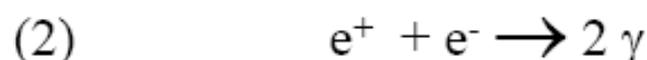
La rivelazione di antineutrini, cioè dei prodotti di loro interazioni, fu effettuata per la prima volta nel 1956, osservando un processo che è sostanzialmente l'inverso del decadimento β del neutrone e che ancora oggi rappresenta il modo classico di studio di queste particelle :



Il positrone, la particella leggera dello stato finale, porta con sé (quasi) tutta l'energia disponibile nel processo, la sua energia cinetica essendo $T_e = E_\nu + m_p - m_n - m_e = E_\nu - 1.8 \text{ MeV}$

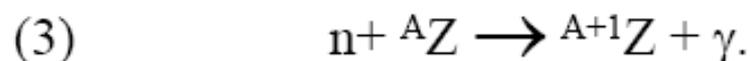
Il processo è dunque possibile per antineutrini con $E_\nu > 1.8 \text{ MeV}$.

Nel bersaglio, il positrone rallenta e annichila su un elettrone,



e si ha quindi un primo segnale, due fotoni in direzioni opposte e ciascuno con $E = m_e$

Il neutrone viene rallentato dagli urti fino ad energie termiche (in tempi Δt dell'ordine di decine di μs in un liquido); se nel bersaglio è presente un assorbitore di neutroni A_Z , può essere identificato dal γ emesso mediante la cattura:



La presenza del γ di cattura ritardato rispetto al segnale dell'annichilazione è caratteristica e distintiva dell'interazione dell'antineutrino: si hanno molti conteggi di fondo (dovuti a cosmici e/o radioattività naturale) corrispondenti a (2) o (3), ma molti di meno se si richiede sia (2) che (3).

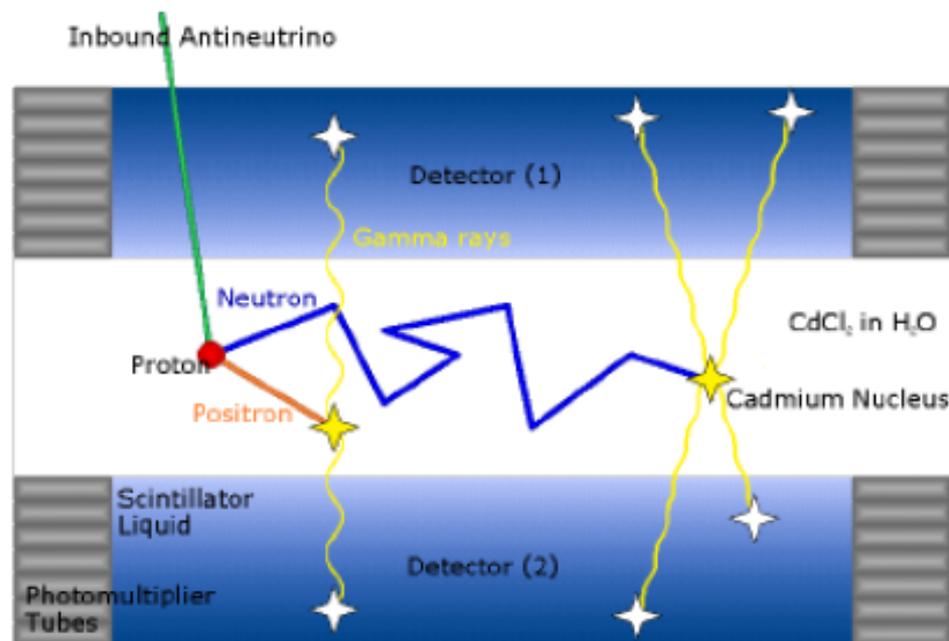
Metodo sperimentale

Come sorgente di anti- ν_e usavano i nuclei instabili prodotti mediante reazioni di fissione in un reattore nucleare (in cui si producono - in media - 6 anti- ν_e per ciascuna fissione). Lo spettro energetico è continuo, con un massimo intorno a 6 MeV. Fuori dal nocciolo di un reattore di potenza si hanno flussi $\Phi \approx 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Come bersaglio usavano 200 litri di acqua contenente un numero $N_p \approx 10^{28}$ di protoni "liberi" cioè in atomi di ^1H , bersaglio per la reazione (1)

Nell'acqua era dissolto un sale di Cadmio, un nucleo con grossa sezione d'urto per cattura di neutroni, in modo da poter rivelarli mediante (3)

Il bersaglio era circondato da scintillatore liquido cui erano accoppiati dei fotomoltiplicatori, per rivelare i 2 γ di annichilazione (2) e il γ di cattura (3)



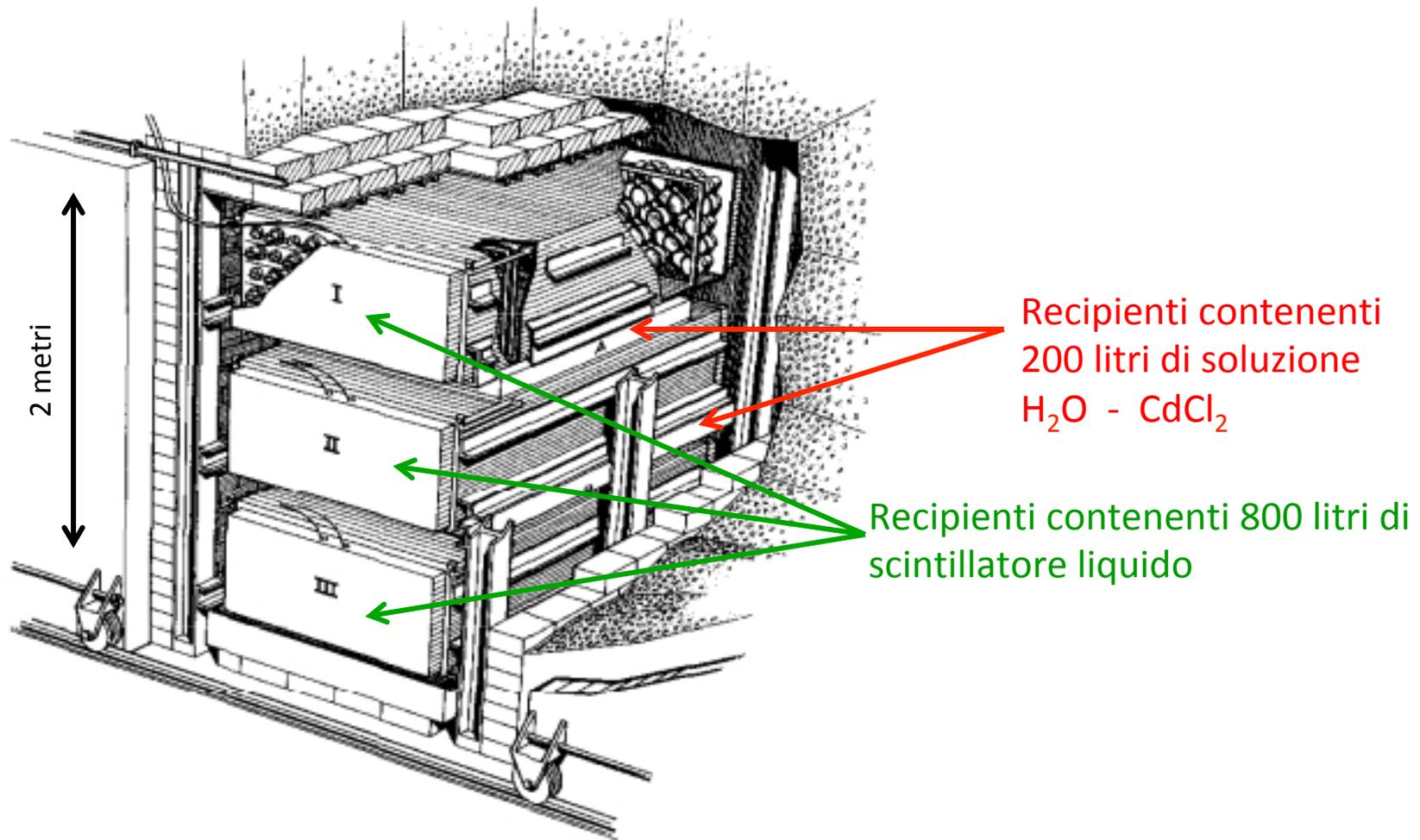
Il rivelatore era situato a una dozzina di metri dal nocciolo del reattore e una dozzina di metri sotto terra, per avere uno schermo dai raggi cosmici

Reines e Cowan, selezionavano gli eventi in cui compariva sia (2) che (3). Dai dati possiamo ricavare la sezione d'urto σ di (1), poiché $\nu = \epsilon \Phi \sigma N_p$:

$$\sigma = \nu / \epsilon \Phi N_p \approx 10^{-43} \text{ cm}^2_{48}$$

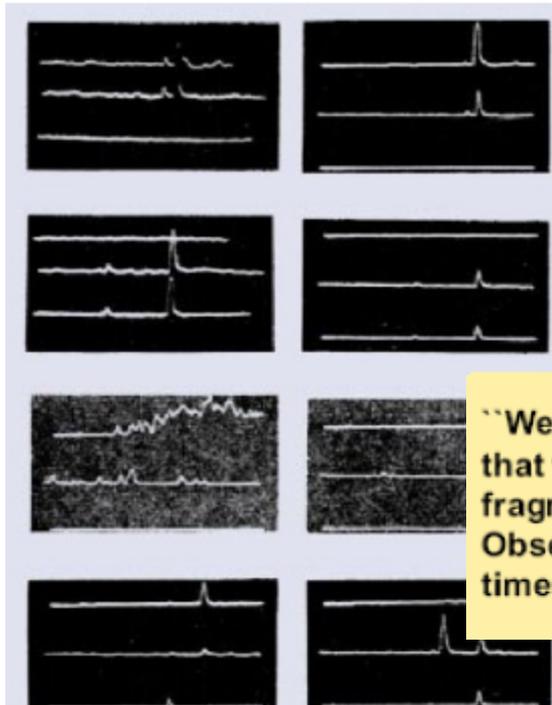
IL RIVELATORE DI ANTINEUTRINI AL REATTORE DEL CENTRO NUCLEARE DI SAVANNAH RIVER

progettato e costruito da Frederic Reines e Clyde Cowan nel 1955

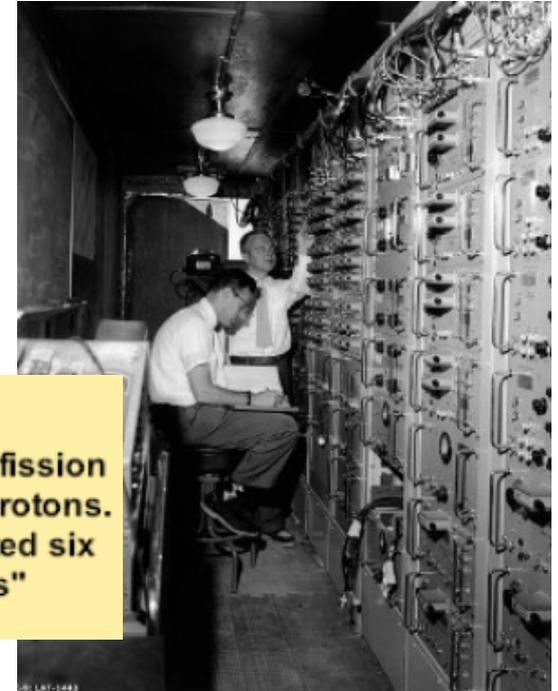


LA RIVERLAZIONE DEGLI ANTINEUTRINI

- Rivelazione dei due raggi γ prodotti dall'annichilazione dei positroni:
$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$
- Rivelazione dei raggi γ ritardati ($\sim 10 \mu\text{s}$) prodotti dalla cattura del neutrone

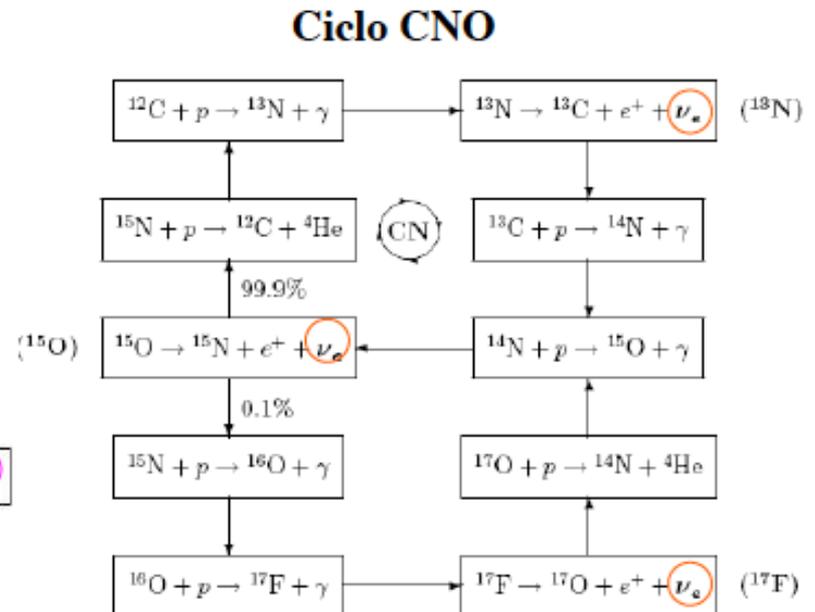
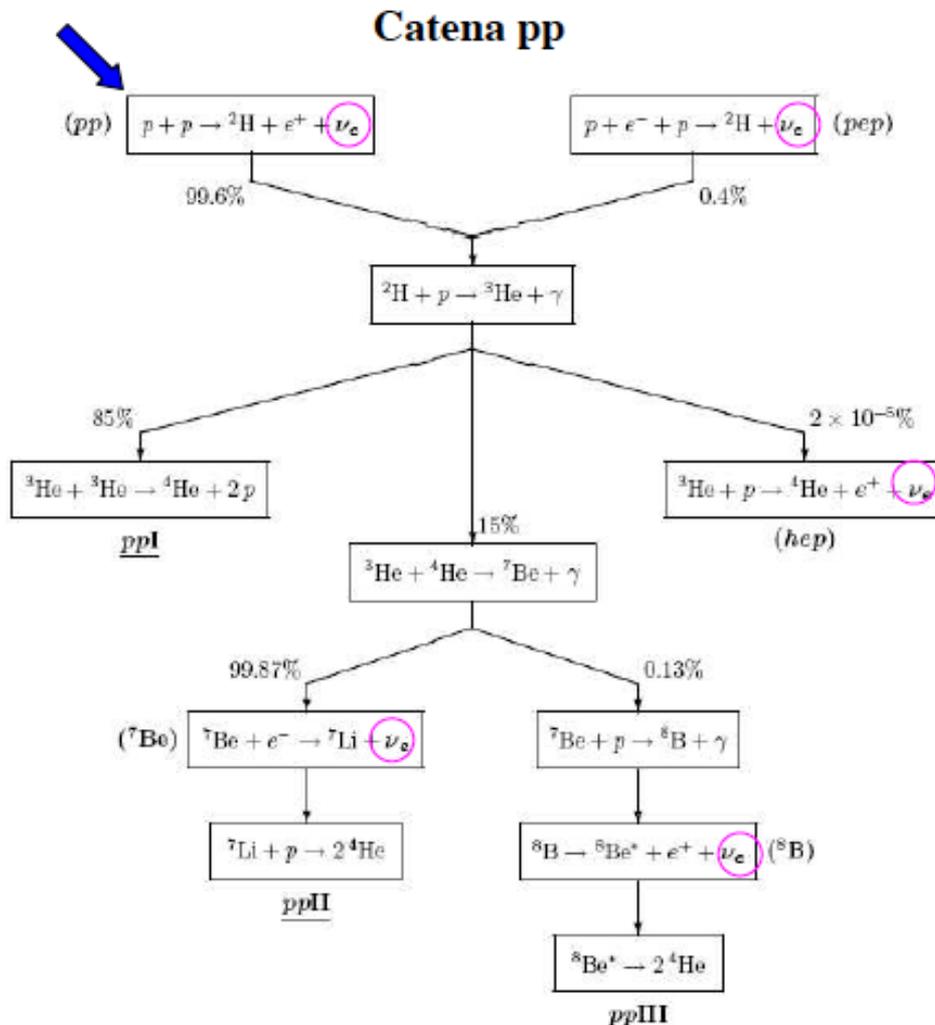


“We are happy to inform you that we have definitely detected neutrinos from fission fragments by observing inverse beta decay of protons. Observed cross section agrees well with expected six times ten to minus forty-four square centimeters”



Primi risultati pubblicati nel luglio 1956; risultati finali nel 1960
Frequenza eventi con reattore in funzionamento : 2.9 ± 0.2 / ora

Reazioni di fusione nucleare nel sole



Il ciclo CNO rende conto solo dell'1.6% di produzione dell'energia all'interno del Sole
 \Rightarrow importanza trascurabile

Il problema dei neutrini solari

NEUTRINI SOLARI : unico strumento, oltre all'analisi delle oscillazioni di pressione solari (eliosismologia), per studiare l'interno del sole e verificare i processi di produzione di energia termonucleare nelle stelle

Caratteristiche generali dei neutrini solari :

ν_e prodotti per interazione debole nei processi di fusione nucleare

Energia media ~ 1 MeV

Flusso sulla Terra $\sim 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$\sigma \sim 10^{-45} \text{ cm}^2$

→ Rivelatori di grande massa e a grande profondità per essere schermati dai raggi cosmici

Solar Neutrino Problem (SNP): deficit osservato di ν_e rispetto alla predizione dei modelli standard solari (SSM)

scoperta : Homestake

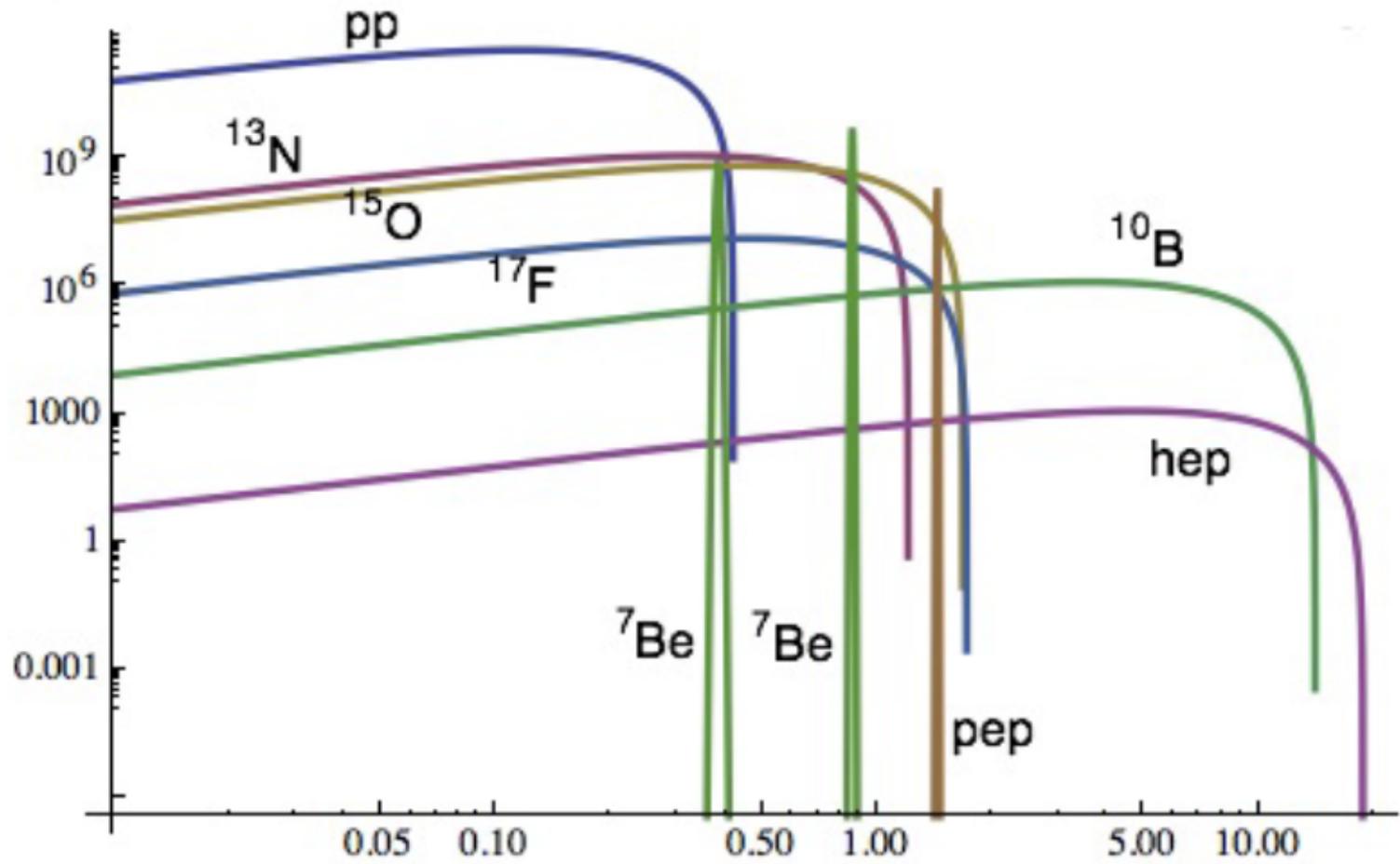
conferma : Kamiokande, GALLEX/GNO,SAGE,
Super-Kamiokande

soluzione :SNO



OSCILLAZIONE DEI NEUTRINI

Spettro energetico neutrini dal sole



spettro neutrini solari

- **Esperimenti radiochimici** : il principio di questi esperimenti è la reazione : ${}^A_Z Z + \nu_e \rightarrow {}^A_{Z+1} (Z+1) + e^-$ in cui il nucleo figlio è instabile e decade con una vita media “ragionevole”.

La rate di produzione del nucleo figlio è

$$R = N \int \Phi(E) \sigma(E) dE$$

Φ : flusso dei neutrini solari

N : numero di atomi bersaglio

σ : sezione d'urto della reazione precedente

Dati $\Phi \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, $\sigma \sim 10^{-45} \text{ cm}^2$, per ottenere un evento al giorno sono necessari circa 10^{30} atomi bersaglio

⇒ Grandi rivelatori di centinaia di tonnellate

In questi esperimenti le informazioni di tempo, direzione ed energia (eccetto il limite inferiore, dato dalla soglia del rivelatore) del neutrino incidente vengono perse.

Introduzione di un'unità di misura utile per basse rate di eventi :

1 SNU (Solar Neutrino Unit):

10^{-36} catture per atomo bersaglio per secondo

- **Esperimenti in tempo reale** : si dividono in due tipi principali:

Water Cherenkov : permettono la rivelazione di neutrini a partire dall'osservazione delle tracce dei leptoni carichi relativistici prodotti dalle interazioni dei neutrini.

Se $v_{\text{particella}} > c/n$ in un mezzo con indice di rifrazione n , la particella emette luce Cerenkov in un cono intorno alla direzione di moto con angolo di apertura θ t.c $\cos\theta = c/nv$ e spettro dato da :

$$\frac{d^2 N_\gamma}{d\lambda dx} = 2\pi\alpha z^2 \left[1 - \left(\frac{c}{n(\lambda)v} \right)^2 \right] \lambda^{-2}$$

N : num.fotoni

λ : lungh.onda dei fotoni

x : coord.lungo la traccia

z : carica della particella in unità di e

ACQUA : $n \sim 1.33 \Rightarrow \theta \sim 41^\circ$ per particelle relativistiche , $\sim 340 \gamma/\text{cm}$ con $\lambda = (300\div 600) \text{ nm}$: rivelabili con PMT. Con tempo di arrivo sui PMT → determinazione del punto di interazione del ν , della direzione della traccia del leptone carico prodotto e della sua energia.

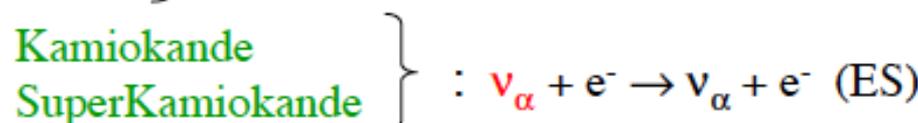
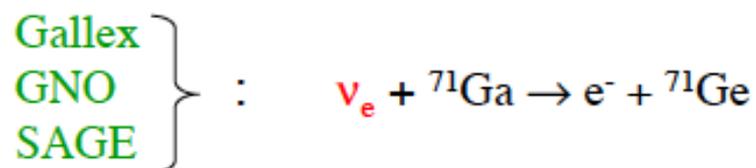
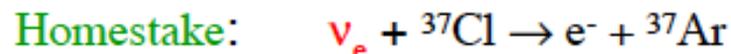
Soglia: \sim qualche MeV ⇒ sono sensibili solo a neutrini da ${}^8\text{B}$

Scintillatori : es. tipico BOREXINO: scattering elastico ν - e con soglia $< \text{MeV}$. La rivelazione della luce di scintillazione permette di mantenere l'informazione sull'energia ma non quella sulla direzione degli e^- diffusi.

Gli esperimenti: schema generale

Soglie :

- Esperimenti storici



Radiochimici

non in tempo reale

non spettro

0.814 MeV

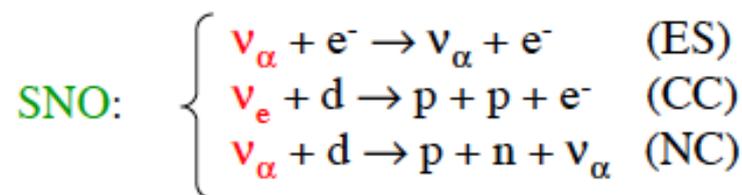
0.233 MeV

Čerenkov

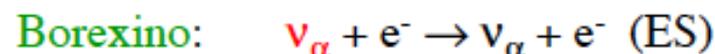
tempo reale e spettro
ma solo ${}^8\text{B}$

7.5-5.5 MeV (spe)

- Esperimenti di nuova generazione

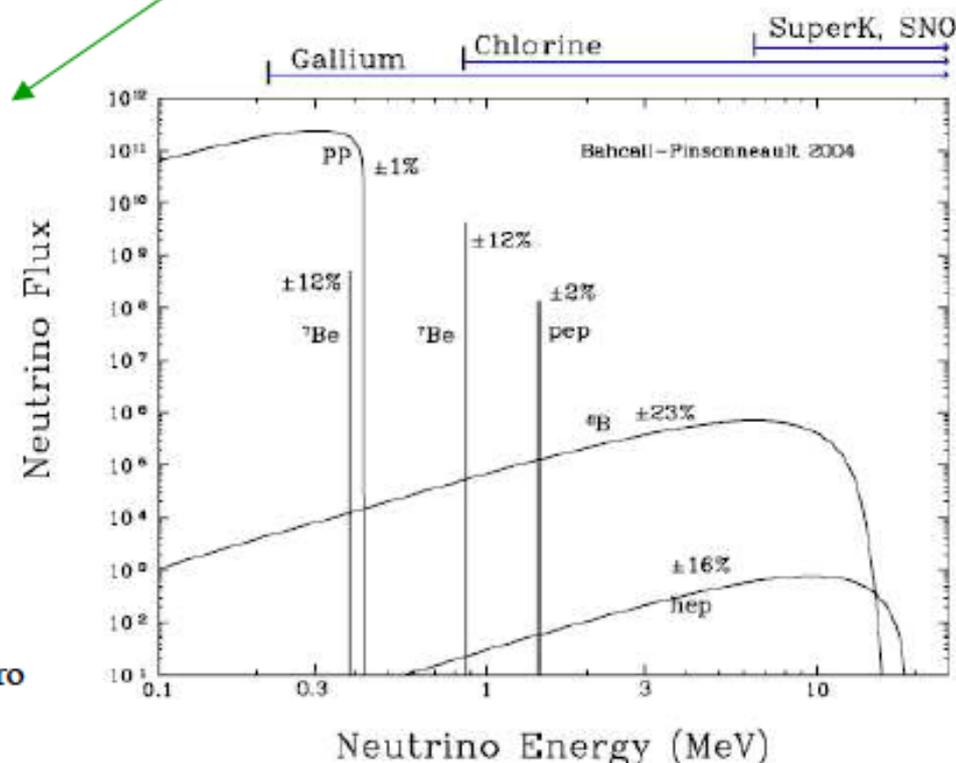


Soglia: 6.75 MeV (spe)



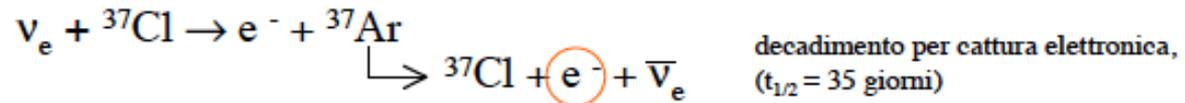
~0.25 MeV (spe)

Scintillatore
tempo reale e spettro
 ${}^7\text{Be}$



HOMESTAKE

Situato nell'omonima miniera del South Dakota a 1.5 km di profondità, è il primo esperimento di rivelazione dei neutrini solari. Fu realizzato da Davis a partire dal 1970 ed è rimasto in presa dati fino al 1994. Le reazioni utilizzate per rivelare i neutrini sono :



Soglia energetica: 0.814 MeV \Rightarrow permette di rivelare i neutrini solari da tutte le reazioni eccetto pp.

Il bersaglio è costituito da una cisterna di 615 tonnellate di tetracloroetilene (C_2Cl_4), contenente 2.2×10^{30} nuclei dell'isotopo ${}^{37}\text{Cl}$. Dopo un tempo di presa dati parziale da uno a circa tre mesi, l'argon veniva estratto dalla soluzione mediante metodi chimici (da cui "esperimento radiochimico"), purificato e inserito in contatori proporzionali miniaturizzati, in grado di rivelare gli elettroni di 2.82 keV emessi per effetto Auger.

Num. medio di atomi di ${}^{37}\text{Ar}$ previsti al giorno : ~ 0.5 (fondo da raggi cosmici : $0.047 {}^{37}\text{Ar}$ al giorno)
 \longrightarrow in 2 mesi : ~ 30 **MA** misurati ~ 16 a causa di : decadimenti prima dell'estrazione, efficienza di raccolta 90%

RISULTATO FINALE

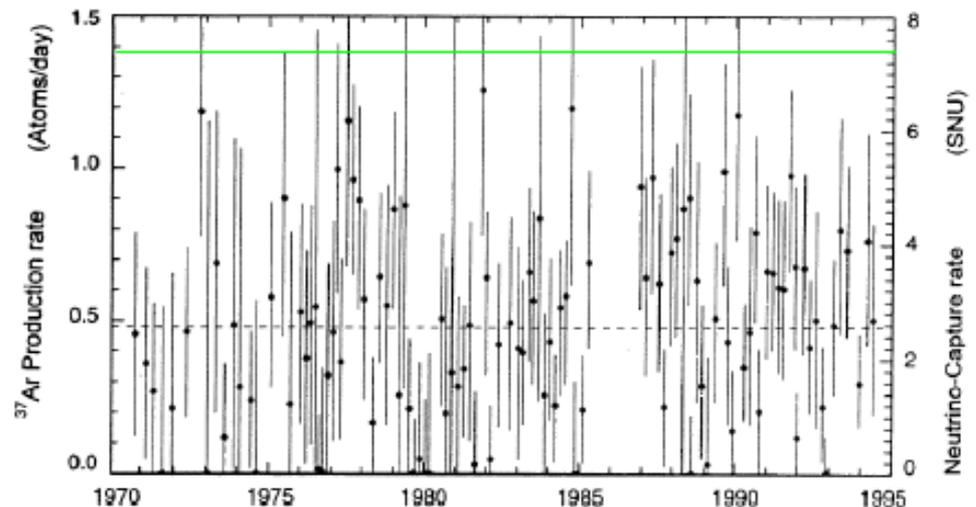
$$R_{\nu}^{\text{spe}} = (2.56 \pm 0.23) \text{ SNU}$$



$$R_{\nu}^{\text{th}} = (8.1 \pm 1.2) \text{ SNU} \quad [\text{BS05}]$$

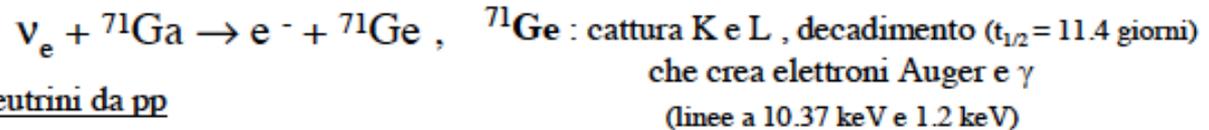


Deficit di 2/3 nella rate:
nascita del **Solar Neutrino Problem**



Galex, GNO e Sage

Il primo è un esperimento realizzato in due fasi (1991-1997 e poi fino al 2003) situato presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso, il secondo nasce da una collaborazione russo-americana e opera negli anni 1990-2004 in un laboratorio sotterraneo vicino Baksan in Russia. Entrambi gli esperimenti si basano su



Soglia: 0.233 MeV \Rightarrow anche neutrini da pp

Come in Homestake, il decadimento del ${}^{71}\text{Ge}$ viene rivelato da contatori proporzionali che rivelano gli elettroni Auger. Il bersaglio nel caso di GALLEX/GNO è cloruro di gallio in soluzione (GaCl_3), per SAGE gallio metallico liquido.

GALLEX/GNO

$$R_{\nu}^{\text{spe}} = (69 \pm 5) \text{ SNU}$$



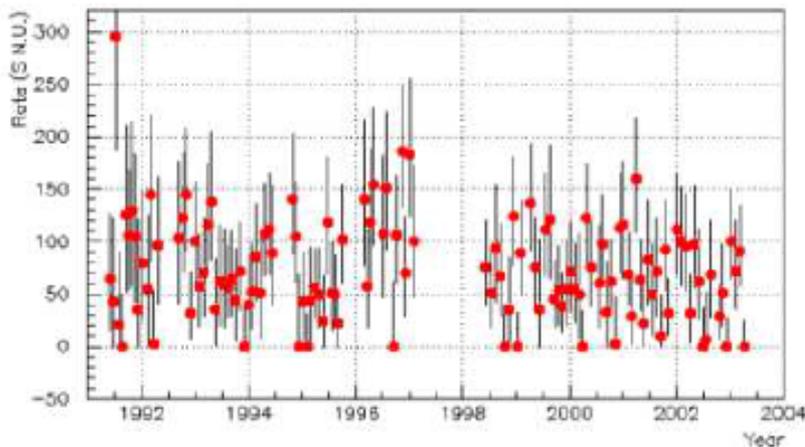
$$R_{\nu}^{\text{th}} = (126 \pm 9) \text{ SNU}$$



SAGE

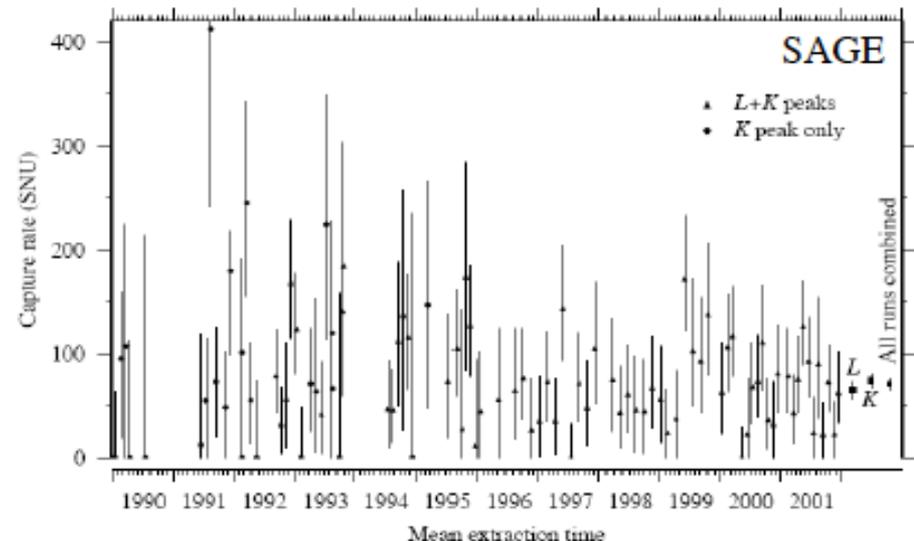
$$R_{\nu}^{\text{spe}} = (67 \pm 5) \text{ SNU}$$

conferma del SNP



GALLEX
65 solar runs

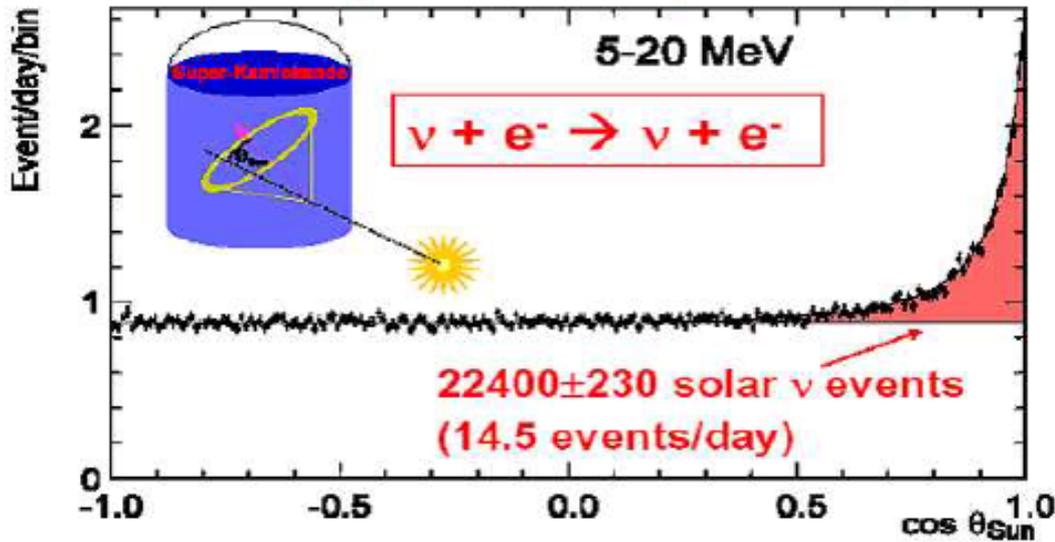
GNO
58 solar runs



Kamiokande e superKamiokande

SK

May 31, 1996 – July 13, 2001 (1496 days)



θ_{SUN} è l'angolo tra la direzione di rinculo dell'elettrone ricostruita e la direzione del Sole, che è ovviamente la direzione di incidenza dei neutrini solari. La larghezza del picco da ν solare è dovuta allo scattering multiplo dell'elettrone di rinculo e alla risoluzione angolare del rivelatore.

Kamiokande

[BP00]

SK

$$\Phi_{\nu}^{\text{spe}} = (2.80 \pm 0.38) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \longleftrightarrow \Phi_{\nu}^{\text{th}} = (5.05 \pm 0.20) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \longleftrightarrow \Phi_{\nu}^{\text{spe}} = (2.35 \pm 0.10) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Risultati finali

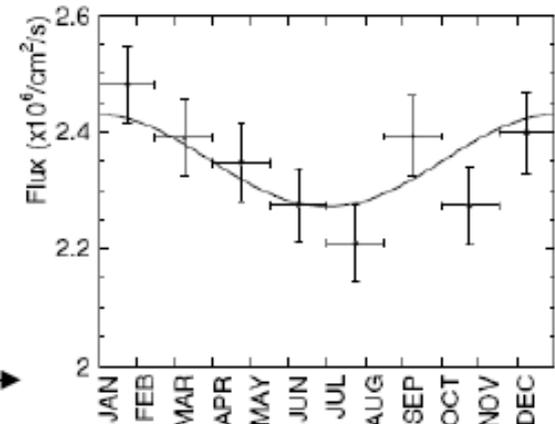
per flusso di ν da ${}^8\text{B}$

SNP non risolto

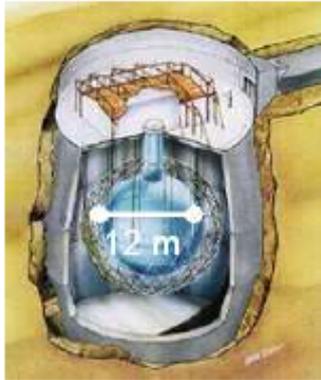
NOTE :

- 1) primi esperimenti in assoluto a confermare l'emissione di neutrini da parte del sole (grazie all'informazione della direzione della particella incidente).
- 2) misura dell'asimmetria tra i flussi rivelati di giorno e di notte (i ν misurati di notte devono attraversare uno spessore di materia più grande di quelli rivelati di giorno) compatibile con lo zero; misura della variazione temporale del flusso dei neutrini solari in accordo con la variazione stagionale dovuta all'eccentricità dell'orbita della Terra

...ci torneremo



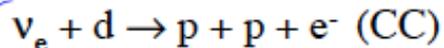
SNO



Il Sudbury Neutrino Observatory (SNO) è un esperimento situato nella miniera di Creighton (Canada) a 2092 m di profondità che, operando dal 1999 al 2006, ha dato finalmente una soluzione al SNP, in favore dell'ipotesi di oscillazione dei neutrini.

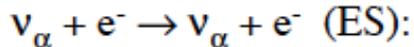
Il bersaglio è costituito da un contenitore sferico acrilico di 12 metri di diametro contenente 1 kton di acqua pesante D_2O pura al 99.92%. Una matrice di 9456 PMT è montata su una struttura a sfera geodetica ed è utilizzata per rivelare la radiazione Čerenkov nel bersaglio; matrice e bersaglio sono immersi in un ambiente di H_2O ultra pura al fine di ottenere uno schermo contro la radiazione di fondo. (μ cosmici: 65/giorno)

Reazioni possibili in SNO:

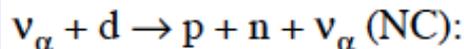


L'energia del neutrino viene trasferita in gran parte all'elettrone. La luce Čerenkov emessa dall'elettrone è proporzionale all'energia del neutrino incidente.

Solo ν_e : misure del flusso di ν_e



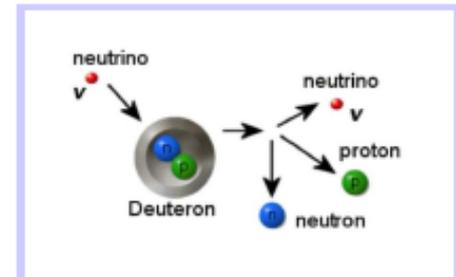
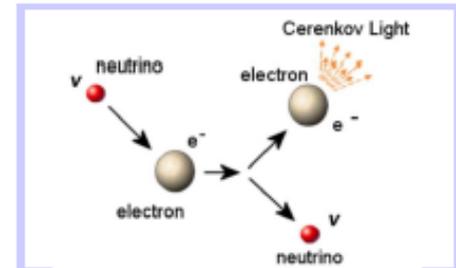
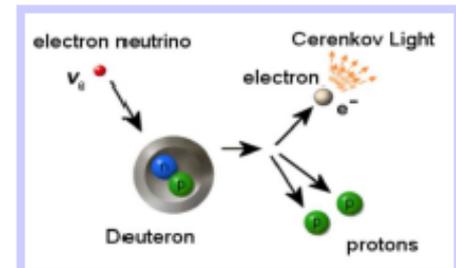
Come in SK, la reazione è sensibile a tutti i sapori dei neutrini ma quello elettronico domina di un fattore 6.5 nella sez. d'urto. L'energia dello stato finale viene scambiata tra il neutrino e l'elettrone (luce Čerenkov).



Nella reazione viene liberato un neutrone e catturato da un altro nucleo. Questo nucleo emetterà raggi gamma rivelabili con i PMT.

Ugualmente sensibile a tutti i sapori dei neutrini: misura del flusso totale di neutrini solari 8B

Soglia $\sim 6.5 \text{ MeV} \Rightarrow \nu$ da 8B



SNO

L'esperimento è stato diviso in 3 fasi, per migliorare la misura della reazione NC :

Fase 1 (1999/2001) : Il neutrone finale della reazione NC è stato rivelato tramite la reazione:



Fase 2 (2001/2003) : 2 ton di NaCl aggiunte all'acqua pesante per rivelare il neutrone finale dalla reazione:



In questo modo: migliore efficienza di cattura del n ($\sigma \sim 0.5 \text{ mb} \rightarrow 44 \text{ b}$); maggiore en. dei $\gamma \Rightarrow$ misura migliore rispetto al fondo; isotropia dei $\gamma \Rightarrow$ migliore distinzione eventi NC da eventi CC (luce Cerenkov)

Fase 3 (2004/2006) : Rimozione di NaCl e aggiunta di una matrice di contatori proporzionali riempiti di ${}^3\text{He}$ all'interno della vasca di D_2O : ${}^3\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{H} + p$. La sez. urto del processo di cattura del neutrone è ancora maggiore \Rightarrow ulteriore miglioramento



Risultati :

Già dalla prima fase è stato confermato il deficit di neutrini solari elettronici e contemporaneamente una misura di NC compatibile con le predizioni teoriche per il flusso dei neutrini solari:

SNP dovuto a transizioni di sapore dei neutrini

Dati finali :

$$\Phi_{\text{CC}}(\nu_e) = (1.76 \pm 0.06) \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \quad \text{deficit } \nu \text{ elettronico}$$

$$\Phi_{\text{ES}}(\nu_\alpha) = (2.39 \pm 0.24) \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

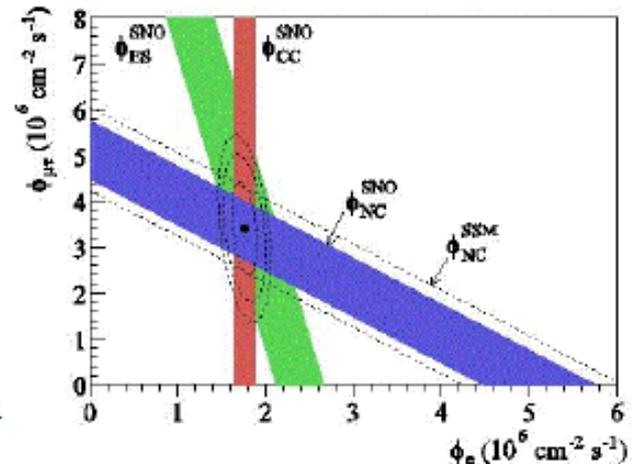
$$\Phi_{\text{NC}}(\nu_\alpha) = (5.09 \pm 0.44) \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \quad \nu \text{ di tutti i sapori}$$



$$\Phi^{\text{th}}(\nu_\alpha) = (5.05 \pm 0.80) \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

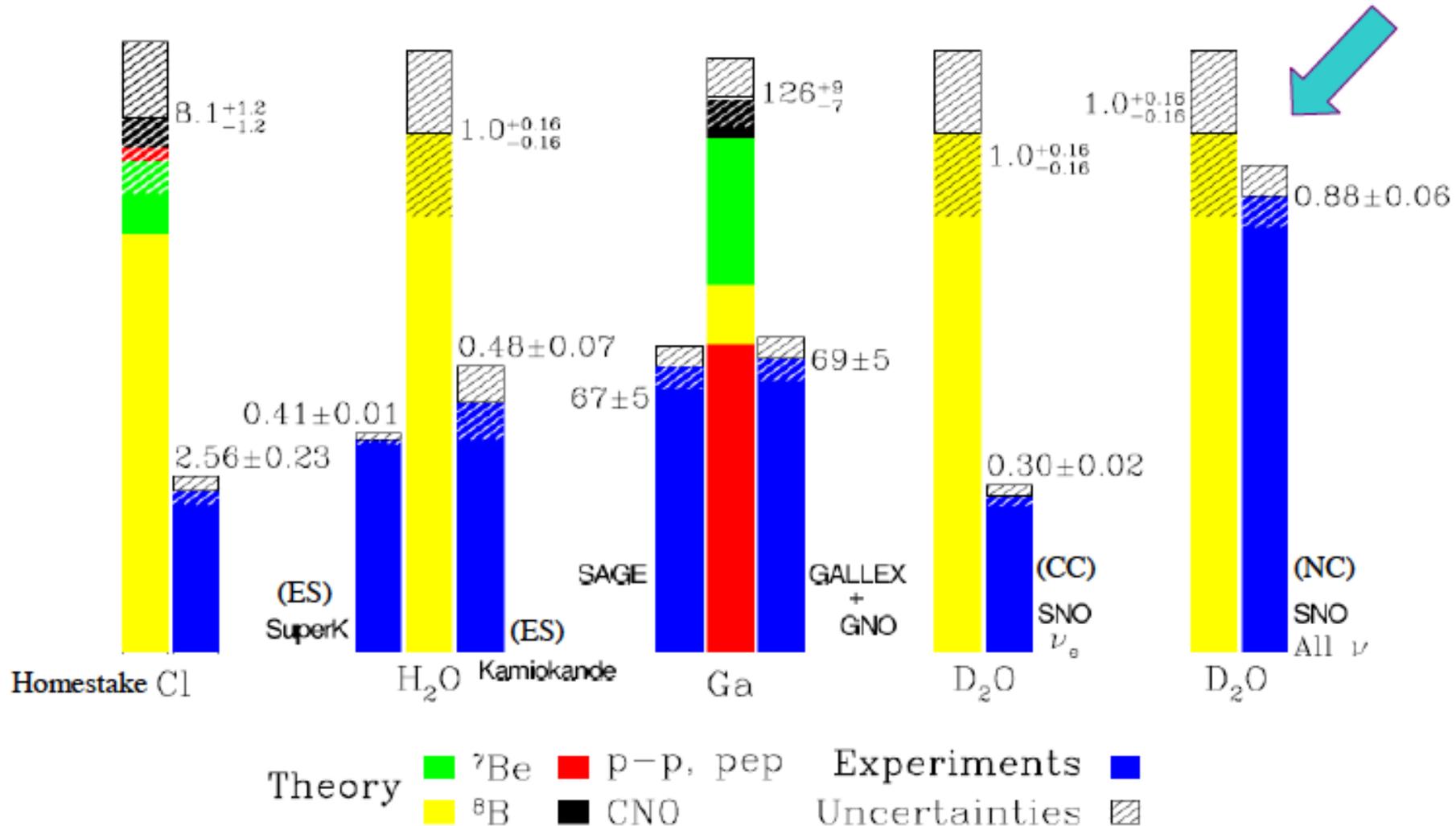
$$\Phi_{\text{NC}}(\nu_\alpha) - \Phi_{\text{CC}}(\nu_e) = \Phi(\nu_{\mu\tau}) = (3.33 \pm 0.64) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\Phi(\nu_{\mu\tau}) \sim (\Phi_{\text{ES}}(\nu_\alpha) - \Phi(\nu_e)) / 0.16 = (3.93 \pm 0.39) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



NOTA : Come SK, SNO ha misurato un'asimmetria giorno-notte di neutrini solari compatibile con lo zero e una variazione annuale del flusso compatibile con la modulazione dovuta all'eccentricità dell'orbita terrestre.

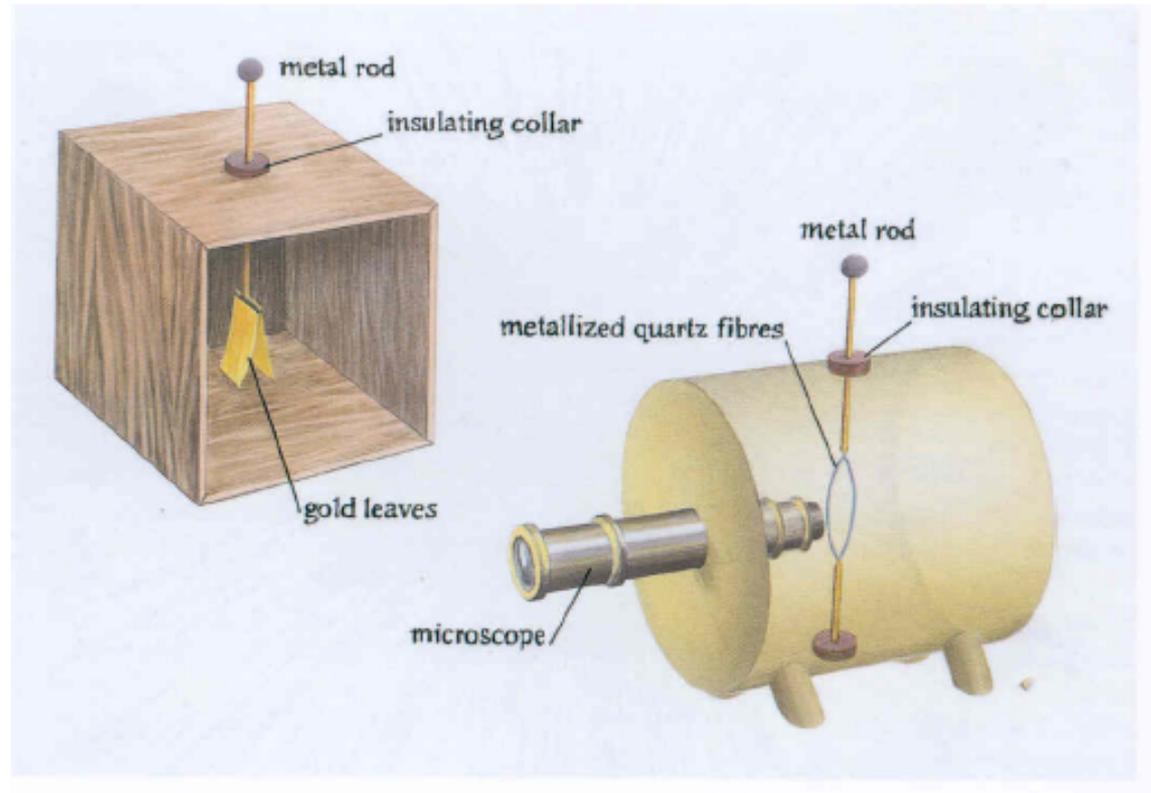
Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Serenelli 2005 [BS05(OP)]



Raggi cosmici

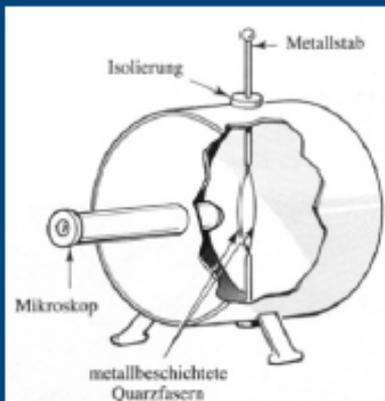
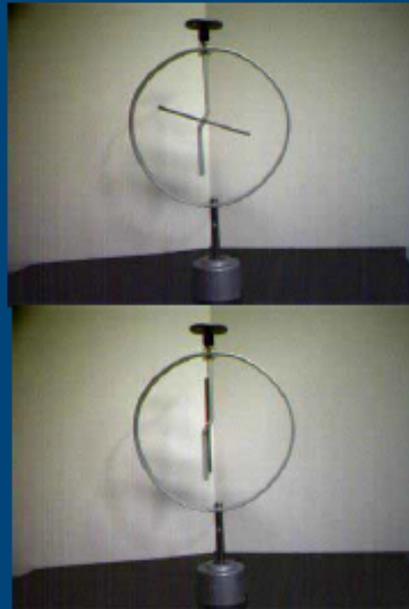
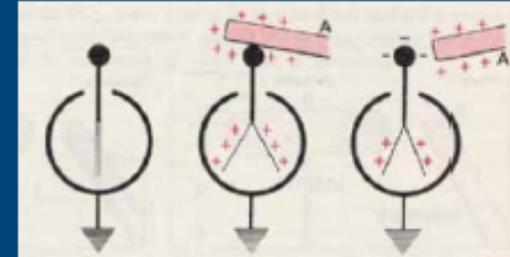
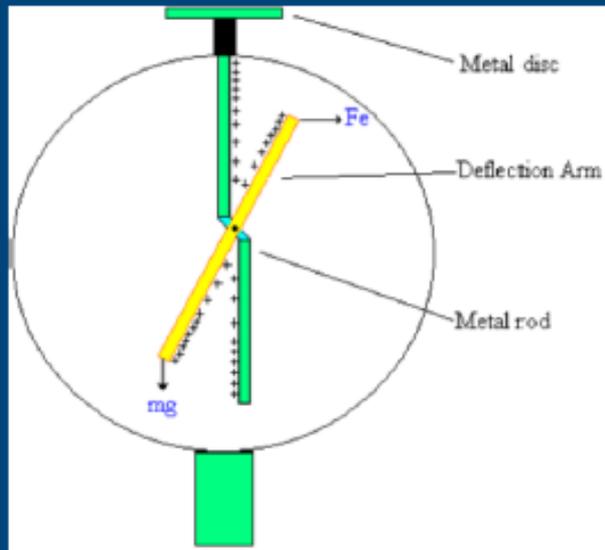
La scoperta dei raggi cosmici

Le radiazioni emesse da sostanze radioattive venivano rivelate all'inizio del XX secolo mediante elettroscopi, che rivelavano la presenza di agenti ionizzanti.



Elettroscopio – fine '800

Permette la scoperta
della ionizzazione
dell'aria



Anche quando non c'era alcuna sostanza radioattiva nelle vicinanze, gli elettroscopi tuttavia si scaricavano, indicando una qualche forma di radiazione.

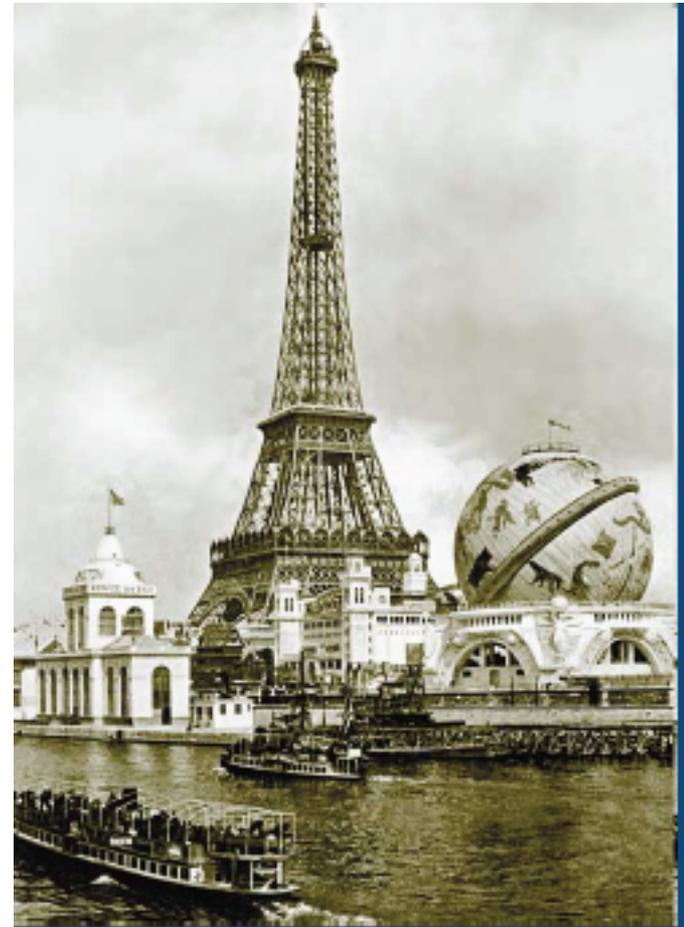
Questa era presente ovunque, anche sul mare (lontano dalle rocce), o in presenza di schermi.

L'origine di questa radiazione era sconosciuta all'inizio del 1900.



Il primo indizio:

Nel 1910 Theodor Wulf, un prete gesuita, portò degli elettroscopi sulla Torre Eiffel, misurando una quantità di radiazioni maggiore del previsto. Egli fece l'ipotesi che questa radiazione fosse di origine extraterrestre, proponendo di fare delle misure a bordo di palloni aereostatici per verificare questa ipotesi.



7 agosto 1912

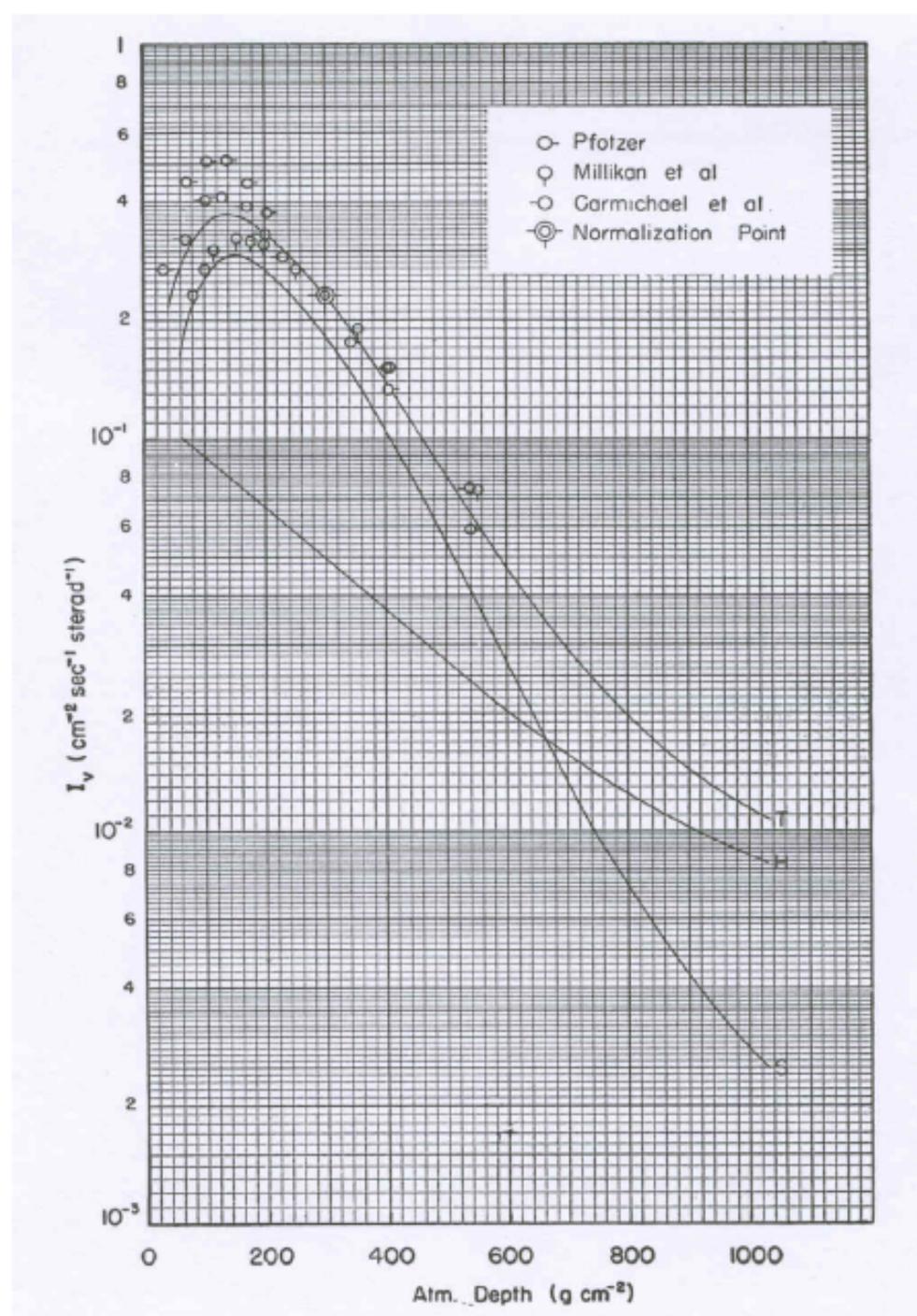
Nascita della Fisica dei Raggi Cosmici.

Victor Franz Hess effettuò un volo in pallone raggiungendo i 5.350 metri di altezza. Portava un elettroscopio a fibre di quarzo e un microscopio con scala graduata per misurare l'intensità della radiazione ambientale e notò che essa diminuiva lentamente con l'altezza fino a stabilizzarsi verso i 700 metri.

A partire dai 1500 metri di quota il segnale riprendeva a crescere fino ad arrivare, a 5.000 metri, a una intensità doppia di quella a terra. Inoltre, in successivi voli, trovò che il segnale aveva valori molto simili sia di giorno che di notte.



Gli esperimenti di Hess
mostrarono che l'intensità
della radiazione effettivamente
cresceva con l'altezza, specie
al di sopra di 1000 m,
raggiungendo a 5000 m un
valore 3-5 volte maggiore di
quello a livello del mare.



- La conclusione fu che doveva esistere una fonte di radiazione notevole, con origine nello spazio esterno alla Terra, radiazione che penetrava nell'atmosfera terrestre, e diminuiva di intensità con lo spessore attraversato.
- Fino a quella data per compiere degli esperimenti era necessario compiere materialmente, in più persone, queste ascensioni in pallone per effettuare le misure.
- Il gruppo di Millikan a metà degli anni 1920 sviluppò degli elettrometri capaci di registrare misure senza bisogno di operatori umani, estendendo le misure con palloni senza equipaggio fino a grandi altezze.



Un italiano dimenticato: Domenico Pacini



L'interpretazione generale comunque era che la radiazione ionizzante che scaricava gli elettroscopi fosse sostanzialmente di origine terrestre, convinzione che però venne subito messa in dubbio da **Pacini**, che all'epoca lavorava presso l'ufficio centrale di Meteorologia e Geodinamica (poi diventato professore di Fisica sperimentale presso l'Università di Bari).

Confrontando i risultati di una serie di esperimenti svolti sulla superficie terrestre e del mare a bordo del cacciatorpediniere "Fulmine" e poi sviluppando una nuova tecnica per misure sottomarine, Pacini arrivò alla conclusione che *"esista nell'atmosfera una sensibile causa ionizzante, con radiazioni penetranti, indipendente dall'azione diretta delle sostanze radioattive del terreno"*. La Nota che ha per titolo *"La radiazione penetrante alla superficie ed in seno alle acque"* [D. Pacini, Nuovo Cim. VI/3 (1912) 93] è un documento prezioso e rappresenta un punto di svolta negli studi sull'origine di questo misterioso fenomeno.

Un italiano dimenticato: Domenico Pacini



Pacini, che aveva raggiunto le sue importanti conclusioni un anno prima di Hess, in una lettera datata 6 marzo 1920 lo contattò per lamentarsi della mancanza di citazioni verso gli esperimenti italiani.

Lettera a Hess: “... ho potuto vedere alcune Sue pubblicazioni sui fenomeni elettro-atmosferici da Lei Spedite al direttore del R. Ufficio Centrale di Meteorologia e Geodinamica (...) Mentre devo farle in proposito i miei complimenti per la chiarezza con cui espone in forma semplice lo stato della importante questione, mi duole che non siano stati citati affatto i lavori italiani su questo argomento, lavori a cui spetta senza dubbio la priorità, per quanto si riferisce alla previsione delle importantissime conclusioni a cui sono successivamente pervenuti il Gockel, Ella stessa, signor Hess, ed il Kolhörster; e tanto più me ne duole, in quanto, nelle mie pubblicazioni, io non ho mai dimenticato parlare e citare chi di dovere...”.

Hess e Pacini

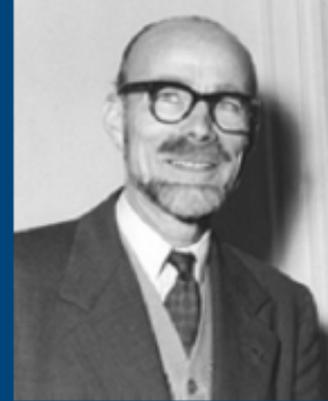


Victor Hess

La risposta di Hess fu immediata e cortese: *“Caro professore, la sua importante lettera datata 6 marzo è stata per me particolarmente preziosa perché mi ha dato l’opportunità di ristabilire i nostri legami che, purtroppo, sono stati interrotti durante la guerra. (...) Il mio breve saggio “Die Frage der durchdring. Strahlung ausserterrestrischen Ursprunges” è una relazione ad una conferenza pubblica, e non ha quindi alcuna pretesa di completezza. Dal momento che riporta le misure del primo pallone, non ho fornito una spiegazione approfondita delle sue misure di mare, che mi sono ben note. Quindi la prego di scusarmi per la mia scortese omissione, che era veramente lontana dai miei scopi [...]”*

Intanto però nel 1936 il Premio Nobel per la scoperta dei raggi cosmici fu assegnato a Victor Franz Hess e a Carl David Anderson.

Pierre Auger



Nel 1938 **Pierre Auger e Roland Maze** dimostrano che contatori Geiger-Muller posti a diversi metri l'uno dall'altro registrano contemporaneamente l'arrivo di particelle da raggi cosmici, indicando così che esse sono particelle secondarie provenienti da una sorgente comune.

E' la conferma definitiva dell'esistenza degli sciami atmosferici estesi (Extensive Air Shower, EAS)



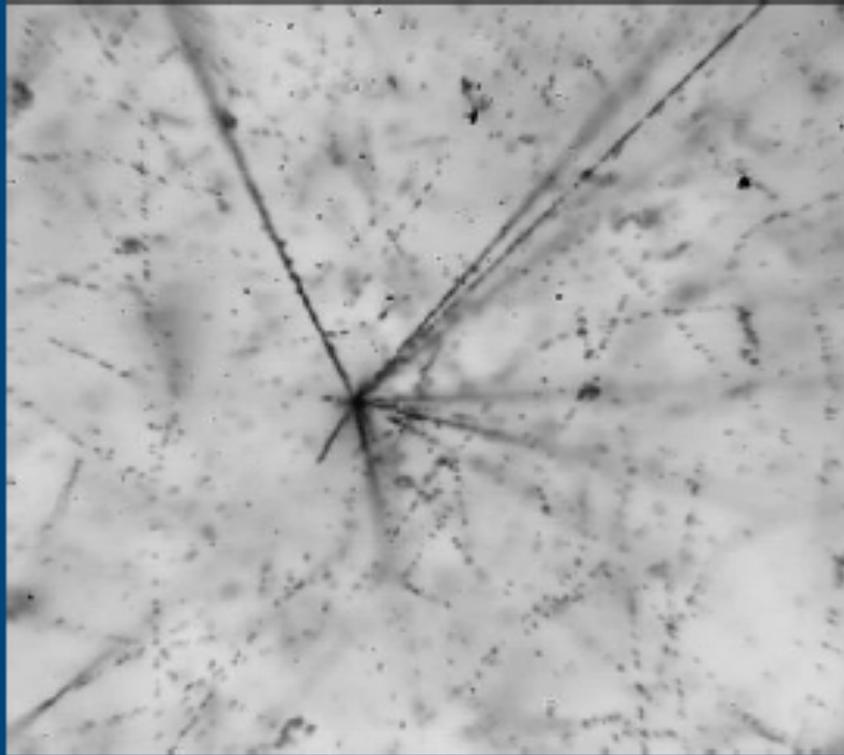
La collisione di particelle primarie di alta energia con le molecole dell'aria produce una cascata di particelle secondarie che arriva fino alla quota di osservazione.

Registrando coincidenze tra contatori distanziati fino a 200 metri, Auger concluse che gli sciami osservati arrivavano fino a una energia di 10^{15} eV, energia strabiliante per quei tempi in cui il limite di energia osservato era solo di pochi MeV.

Raggi cosmici

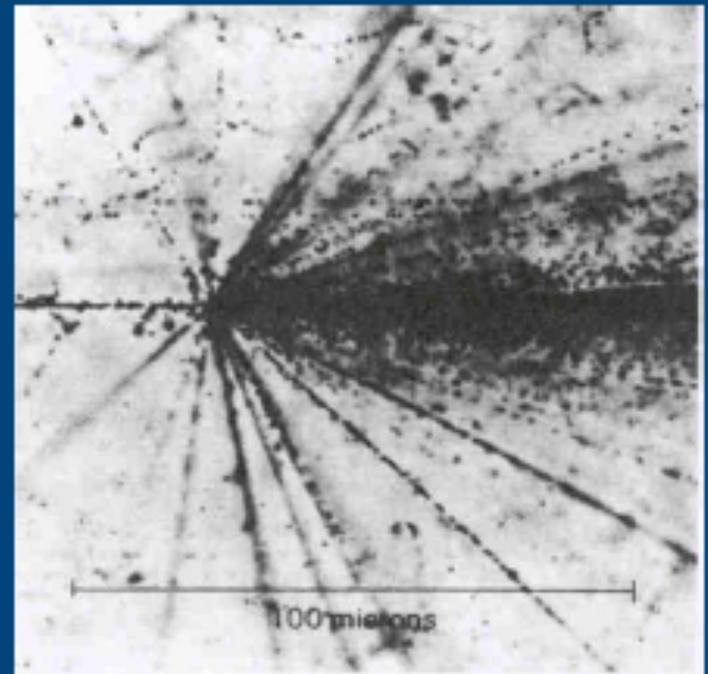
- Negli anni dal 1937 ai primi anni '50 una serie ulteriore di osservazioni condotte con camera a nebbia in vari luoghi mostrarono evidenza di altre particelle prodotte dalla radiazione cosmica, dando luogo ad una “giungla” di particelle, tra cui quelle dotate del numero quantico di stranezza
- Negli anni tra il 1930 e il 1940 le osservazioni con le camere a nebbia avevano chiarito che la radiazione cosmica a livello del mare era costituita da elettroni, positroni e muoni.
- Era anche chiaro che queste particelle erano il prodotto secondario dell'interazione della radiazione primaria con l'atmosfera

Le emulsioni nucleari



Esse inoltre permettevano di ricostruire anche eventi di interazioni molto complesse con un gran numero di particelle secondarie.

L' utilizzo di emulsioni nucleari aprì la via alla identificazione di particelle di vita media molto breve, avendo una precisione di pochi micron.



Queste emulsioni vennero portate dapprima in alta montagna, evidenziando l'esistenza di altre particelle, tra cui il pione



Successivamente le emulsioni vennero portate a grandi altezze per mezzo di palloni.

Esse permisero così di ricostruire l'interazione del nucleo primario con un nucleo dell'atmosfera e il successivo sviluppo dello sciame di particelle secondarie da essa generato.

- I risultati ottenuti mediante le emulsioni nucleari mostrarono che la radiazione primaria era costituita in buona parte da nuclei atomici che si muovevano alla velocità della luce.

In massima parte: **protoni (86 %)** **He (12 %)** nuclei più pesanti

Protone (nucleo) entra nell'atmosfera; prima o poi interagisce con un nucleo dell'aria

Interazione forte \Rightarrow mesoni π , mesoni K (e poco altro)

Distanza media tra due collisioni = distanza di interazione

(in aria $\lambda_0 \approx 750$ m, dipendente da p e T)

I pioni carichi

decadono $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ $\tau = 26$ ns

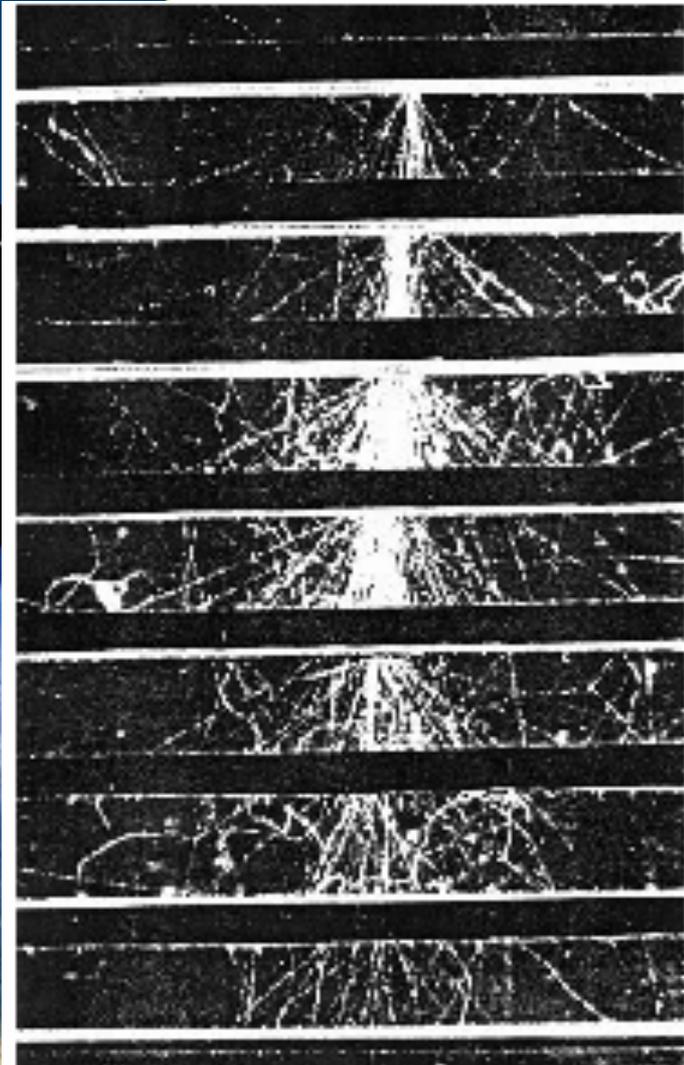
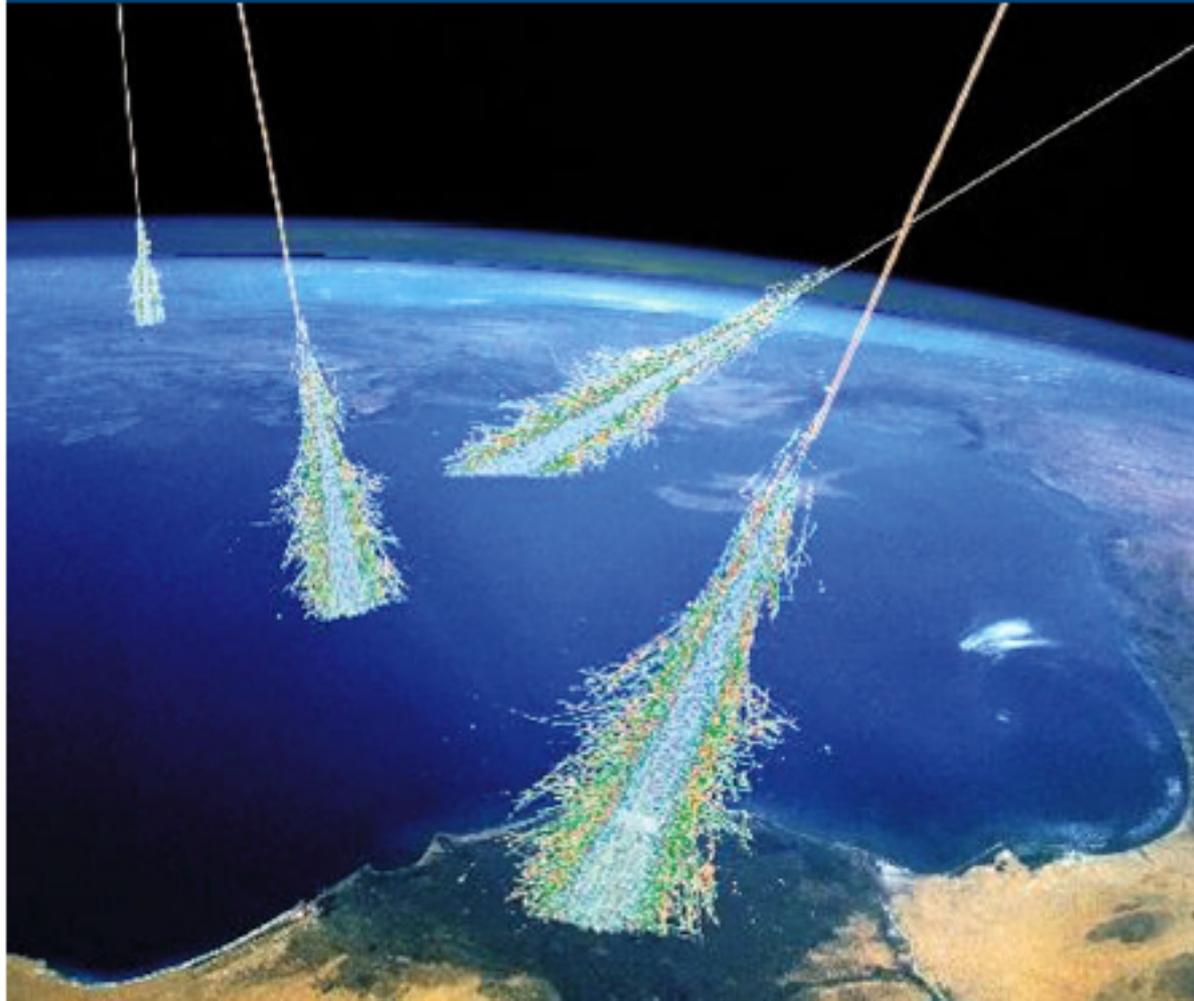
$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$ $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$ $\tau = 2$ μ s

Scendendo nell'atmosfera la percentuale di μ cresce

Ci sono anche π^0 $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ che decadono

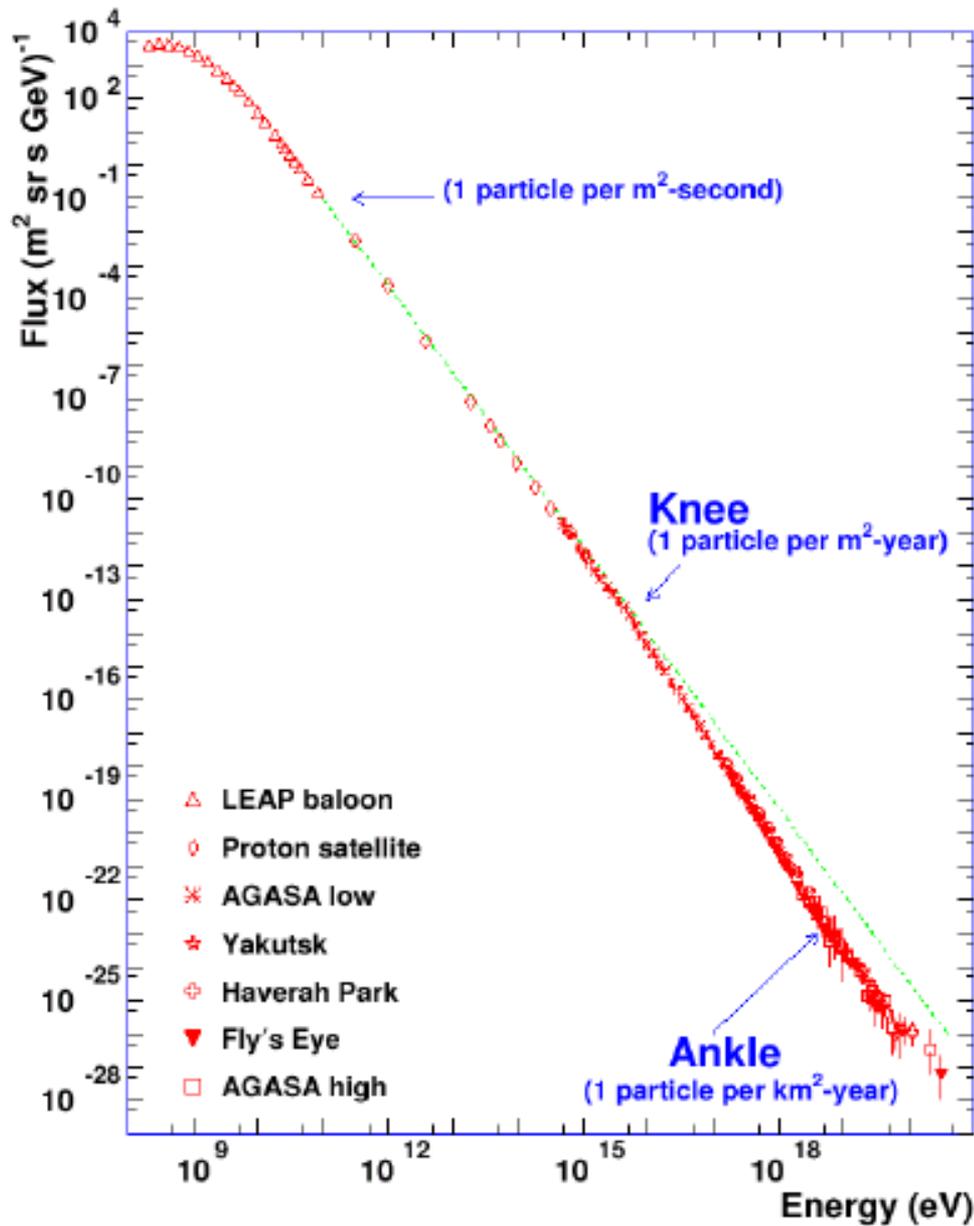
Lo sciame adronico ha sempre una componente
elettromagnetica

Gli sciami atmosferici



Cloud chamber image of an electromagnetic shower.
Pb plates, each 1.27 cm thick

Lo spettro energetico



Il flusso

