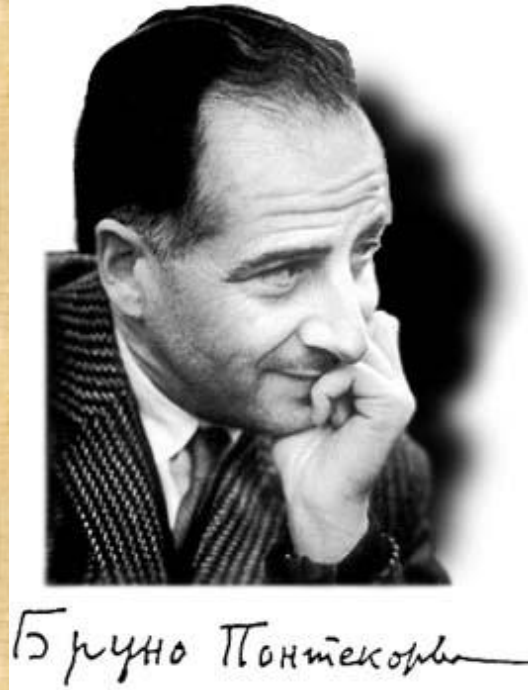


# Bruno Pontecorvo a cento anni dalla nascita



Inaugurazione Pianeta Galileo 2013  
Firenze, 23/11/2013

Rino Castaldi  
INFN-Pisa  
([rino.castaldi@pi.infn.it](mailto:rino.castaldi@pi.infn.it))

# Nel centenario della nascita, una mostra a Pisa su Bruno Pontecorvo

Dal 9 Novembre al 22 Dicembre, 2013  
presso "La Limonaia", vicolo del Ruschi 4.

"Da Pisa a Mosca, un lungo viaggio  
attraverso storia e scienza"

<http://www.pontecorvopisa.it/>

Siete tutti invitati a questa mostra,  
dove potrete trovare molti documenti  
originali sulla vita di Bruno Pontecorvo.

Ringrazio gli organizzatori della mostra ed in modo  
particolare V.Cavasinni, M.M.Massai, G. Spandre ed  
E.Volterrani per avermi permesso di consultare alcuni  
documenti della mostra e per l'aiuto che mi hanno dato  
nel preparare questa presentazione.

È nostro desiderio poter continuare a studiare la vita  
di Bruno Pontecorvo e possibilmente creare a Pisa una  
mostra permanente su questo grande scienziato pisano.

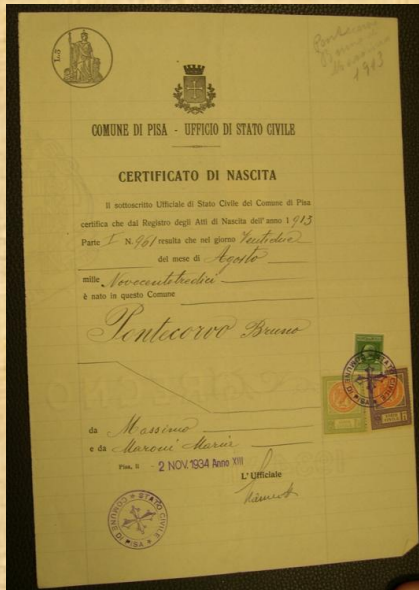
**BRUNO PONTECORVO**  
A CENTO ANNI DALLA NASCITA

vev  
mu

DA PISA A MOSCA, UN LUNGO VIAGGIO ATTRAVERSO STORIA E SCIENZA  
LA LIMONAIA DI PALAZZO RUSCHI VICOLO DEL RUSCHI 4 PISA  
DAL 9 NOVEMBRE AL 22 DICEMBRE 2013

INAUGURAZIONE VENERDI 8 NOVEMBRE ORE 17

# I primi anni a Pisa



Bruno nasce a Marina di Pisa il 22 agosto del 1913 da Massimo Pontecorvo e Maria Maroni. I Pontecorvo hanno otto figli, tutti nati a Pisa: Guido nel 1907, Paolo nel 1909, Giuliana nel 1911, Bruno nel 1913, Gilberto detto Gillo nel 1919, Laura, nel 1921, Anna nel 1924, Giovanni nel 1926.



Massimo Pontecorvo  
e Maria Maroni

Bruno, fin da piccolo, studia con profitto ed è un abile sportivo; ama giocare a tennis, nuotare e praticare sport all'aria aperta.



Bruno da bambino

*"I miei genitori, conservatori, erano assai autoritari e avevano opinioni definite (che celavano) su ognuno di noi, opinioni che io ho conosciuto origliando e facendo deduzioni: secondo loro Guido era il più intelligente dei fratelli, Paolo il più serio, Giuliana la più colta, Bruno il più buono ma il più limitato, come era dimostrato dai suoi occhi, buoni ma non intelligenti.. A questa opinione soprattutto, io credo, devo la mia timidezza, un complesso di inferiorità che ha pesato su me per quasi tutta la vita."*  
[Bruno Pontecorvo, "Una nota autobiografica", Enciclopedia della Scienza e della Tecnica, 1988/89 (Arnoldo Mondadori Editore)]



# I primi anni a Pisa

A Pisa Bruno frequenta il Liceo Classico "Galileo Galilei" e, dopo la maturità, presa a soli sedici anni, si iscrive alla facoltà di Ingegneria dove frequenta con profitto il biennio.

*A me però non piaceva il disegno, cosicché, terminato il biennio, decisi di abbandonare gli studi di ingegneria e di iscrivermi al terzo anno di fisica. Mio fratello Guido affermava con autorità: "Fisica! Vuol dire che devi andare a Roma. Lì ci sono Fermi e Rasetti!"*

[Bruno Pontecorvo, "Una nota autobiografica"]



Foto tessera universitaria



I Pontecorvo abitano in una villa in Via Bonanno a due passi dalla torre pendente.



Bruno e il comunismo visto da Misha Bilenky

*"Voglio sottolineare adesso l'influenza che ebbe sulla mia formazione il profondo amore di mio padre per la giustizia. Ecco un episodio tipico e divertente. Mio padre aveva molto rispetto per un certo Danilo, un operaio che lavorava nella fabbrica Pontecorvo e che all'inizio del fascismo organizzò uno sciopero. In relazione a questo, si recò da mio padre un gerarca (una persona che finì poi ministro degli Interni della Repubblica di Salò) - Guido Buffarini Guidi - il quale volle sapere chi erano i "caporioni" dello sciopero. Al rifiuto di mio padre di fare la spia, Buffarini rispose con una sfida a duello (che poi non ebbe luogo), la quale generò in tutti noi una grande ilarità accompagnata da ammirazione per nostro padre".*  
[Bruno Pontecorvo, "Una nota autobiografica"]



Diploma di maturità



# La laurea a Roma



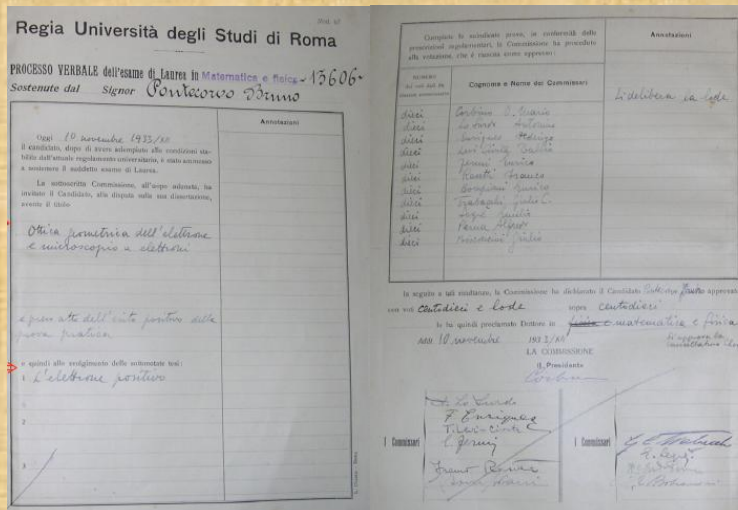
Istituto di Fisica dell'Università di Roma in via Panisperna

Pontecorvo arriva a Roma nell'autunno del 1931 e viene immatricolato al terzo anno del corso di "Matematica e Fisica" dopo aver superato brillantemente l'esame di ammissione con Fermi e Rasetti. Fermi dopo l'esame, come fa anche con gli studenti più bravi, asserisce perentoriamente: "*Se un teorico non possiede straordinarie capacità, il suo lavoro non ha senso...*" e Bruno decide che sarà uno sperimentale!

A soli 20 anni, il 10 novembre del 1933, si laurea con 110/110 e lode in Fisica e Matematica con una tesi dal titolo " *Ottica geometrica dell'elettrone e microscopio a elettroni*".



Esami universitari sostenuti



Verbale dell'esame di laurea (scritto da Fermi)



Laurea di Pontecorvo

# Il lavoro di ricerca in via Panisoperna

Dopo la laurea inizia il suo lavoro di ricerca di spettroscopia atomica sul fenomeno dello spostamento delle righe spettrali dei vapori alcalini immersi in un gas estraneo, estendendo lo studio anche al caso dei vapori di Mercurio. I risultati vengono pubblicati nei Rendiconti dell'Accademia dei Lincei. È questo il suo primo articolo pubblicato all'età di soli 21 anni.

Fermi nel marzo del 1934 scopre che i neutroni possono indurre la radioattività su alcuni elementi usando una strumentazione semplice costituita da una sorgente di Radio-Berillio e da un contatore Geiger. Inizialmente la scoperta riguarda solo due nuclei leggeri (alluminio e fluoro) ma ben presto, grazie al fatto che i neutroni possono facilmente penetrare anche nei nuclei pesanti, Fermi intraprende con Amaldi, Segrè, Rasetti e il chimico D'Agostino uno studio sistematico di tutta la tabella degli elementi. Entro l'estate 1934 vengono "creati" radioisotopi da oltre 40 dei 60 elementi chimici studiati.

Pontecorvo è coinvolto in queste ricerche solo a partire dal settembre 1934. Il suo primo compito consiste nel predisporre, insieme con Amaldi, una scala quantitativa di attivabilità della radioattività indotta (forte, media, bassa). I risultati che ottengono sembrano non essere riproducibili e sembrano dipendere miracolosamente dai materiali circostanti.

— 105 —

Fisica. — Effetto del vapore di mercurio sopra i termini alti degli alcalini<sup>(1)</sup>. Nota<sup>(2)</sup> di B. PONTECORVO, presentata dal Socio O. M. CORBINO.

L'effetto della pressione di gas estranei (H, N<sub>2</sub>, He, A) sopra i termini alti delle serie spettrali è stato studiato recentemente da E. Amaldi e E. Segrè<sup>(3)</sup>. E. Fermi<sup>(4)</sup> ha dato una teoria quantitativa dell'effetto, il quale consiste in uno spostamento del limite della serie, proporzionale alla concentrazione del gas estraneo; tale spostamento inoltre, almeno nei casi sin qui studiati, dipende soltanto dalla natura del gas perturbatore e non da quella del vapore assorbente. L'effetto può ascrivere a due azioni distinte degli atomi perturbatori: a) Poiché nei termini elevati delle serie entro il volume dell'atomo assorbente viene a trovarsi un gran numero di atomi perturbatori, si comprende come questi ultimi si polarizzano nel campo del resto atomico; quest'azione, dipendente dalla costante dielettrica del gas estraneo, genera un abbassamento dei termini elevati rispetto al termine fondamentale ossia uno spostamento delle righe verso il rosso. b) Gli atomi del gas perturbatore possono descriversi come buche di potenziale disseminate sul cammino dell'elettrone luminoso. Questa azione tende a spostare le righe elevate verso il rosso o verso il violetto, a seconda dei casi; dalla teoria di Fermi si ricava la grandezza dello spostamento del termine in funzione della concentrazione del gas perturbatore e della sezione d'urto limite per velocità nulla di elettroni contro gli atomi del gas estraneo. I gas fin qui studiati hanno sezioni d'urto relativamente piccole, per elettroni lenti; è quindi interessante studiare l'effetto sopra il limite delle serie di Na e K di un gas, come il mercurio, il quale abbia una sezione d'urto molto grande, per elettroni di 0,5 volti, e di cui nulla è noto per valori più bassi dell'energia. Nel § 2 si descrivono le esperienze; nel § 3 si discutono i risultati.

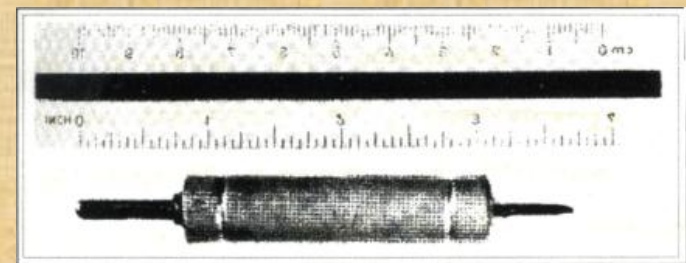
§ 2. Lo spettrografo usato è l'E<sub>1</sub> di Hilger, che dà all'incirca una dispersione di  $33 \frac{\text{cm}^{-1}}{\text{mm}}$  presso il limite della serie del K (8536 Å) e di  $40,5 \frac{\text{cm}^{-1}}{\text{mm}}$  presso il limite della serie di Na (2412 Å). La sorgente per lo spettro continuo è una lampada a idrogeno di pyrex alimentata con 5000 volt e 0,4 ampère in corrente alternata a 50 periodi. Le pose erano di 25 minuti; si sono usate lastre Cappelletti rosse.

(1) Lavoro eseguito nell'Istituto di Fisica della R. Università di Roma.

(2) Presentata all'Accademia il 18 luglio 1934.

(3) E. AMALDI ed E. SEGRÈ, «Nuovo Cimento», 11, 141, 1934.

(4) E. FERMI, «Nuovo Cimento», 11, 117, 1934.



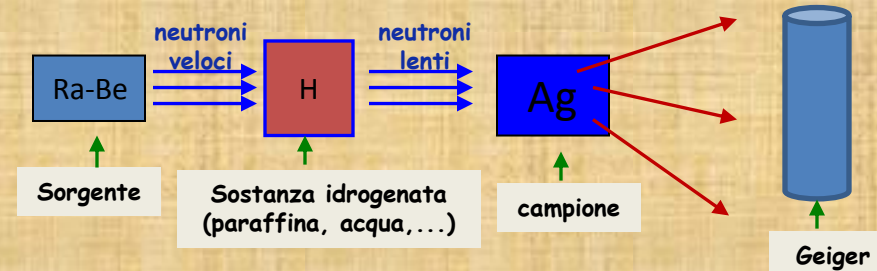
Contatore Geiger-Muller usato da Fermi



Sorgente Radio-Berillio

# I neutroni lenti

Fermi si convince che la stranezza dei risultati ottenuti da Amaldi e Pontecorvo potrebbe essere dovuta ad un effetto fisico reale e decide di studiare il problema. Fermi ha l'intuizione geniale di sistemare della paraffina tra la sorgente e il campione d'argento che voleva irradiare e osserva un grande aumento dell'attività. La paraffina, ricca di idrogeno, ha la proprietà di rallentare i neutroni che diventano più facilmente catturabili da parte dei nuclei atomici.



Poche ore dopo la scoperta Fermi aveva la spiegazione per questo inatteso fenomeno:

- passando attraverso un composto ricco di idrogeno, cioè sostanzialmente di protoni liberi, i neutroni collidono con bersagli con massa simile e quindi cedono in media metà della loro energia ad ogni collisione;
- nell'urto con nuclei pesanti invece i neutroni collidono elasticamente, cioè rimbalzano senza perdere energia cambiando solo direzione ma non velocità.

In un composto ricco di idrogeno (paraffina, acqua, etc.) un fascio di neutroni veloci viene quindi rapidamente rallentato, e l'energia dei singoli neutroni diviene quella propria dell'agitazione termica dell'idrogeno.

- La probabilità di assorbimento del neutrone nel nucleo dipende dal tempo che il neutrone passa entro il raggio di cattura del nucleo, quindi è inversamente proporzionale alla velocità del neutrone.

Poiché i neutroni termalizzati sono migliaia di volte più lenti di quelli emessi dalla sorgente, la loro efficacia nell'indurre reazioni nucleari è migliaia di volte maggiore.



# I ragazzi di via Panisperna

L'effetto della paraffina viene scoperto sabato 20 ottobre 1934 e il lunedì seguente la scoperta viene comunicata alla rivista "La Ricerca Scientifica" con una Lettera firmata da "E. Fermi, E. Amaldi, B. Pontecorvo, F. Rasetti, E. Segrè".



ANNO V - VOL. II - N. 7-8 QUINDICINALE 15-31 OTTOBRE 1934 - XIII

## LA RICERCA SCIENTIFICA

ED IL PROGRESSO TECNICO NELL'ECONOMIA NAZIONALE

### Azione di sostanze idrogenate sulla radioattività provocata da neutroni

Nel corso di esperienze sulla radioattività provocata nell'argento da bombardamento di neutroni si sono notate anomalie nella intensità della attivazione: uno spessore di alcuni centimetri di paraffina interposto fra la sorgente e l'argento invece di diminuire l'attivazione la aumenta. In seguito abbiamo potuto constatare che la presenza di grossi blocchi di paraffina circondanti la sorgente e l'oggetto irradiato esalta

l'intensità della attivazione per un fattore che, a seconda delle condizioni geometriche, varia da alcune decine ad alcune centinaia.

In seguito a questa constatazione abbiamo cercato di riconoscerne, in modo per ora sommario, le circostanze in cui si presenta questo fenomeno. I fatti che sono emersi fino ad ora sono i seguenti:

a) un preparato di radio senza berillio non produce effetto, ciò che induce ad attribuire i fenomeni ai neutroni e non ai raggi  $\gamma$ ;

b) un effetto approssimativamente della stessa intensità di quello ottenuto colla paraffina si ha coll'acqua. Ritenevamo molto probabile che esso dipenda dalla presenza dell'idrogeno perché sostanze costituite prive di idrogeno ( $N_2O_4$ ) non producono un aumento di attività, almeno nello stesso ordine di grandezza;

c) il fenomeno osservato nel caso dell'argento non si presenta in tutti gli elementi che si attivano con i neutroni. Abbiamo finora constatato che per il silicio, zinco e fosforo non si ha un aumento apprezzabile di intensità, mentre il rame, l'argento e lo sodio danno luogo ad effetti enormemente maggiori di quelli che si avrebbero senza la presenza dell'acqua.

Da questi pochi casi sembra valga la regola che siano sensibili solo quegli elementi che per bombardamento danno luogo a sostanze radioattive isotopiche con l'elemento di partenza.

Notevole è il caso dell'alluminio, il quale si attiva nell'acqua con un periodo di poco inferiore a tre minuti che corrisponde a quello del  $Al^{28}$  estratto dal silicio irradiato. Questa attività, prodotta in condizioni normali, è così debole che quasi sparisce di fronte alle altre dello stesso elemento.

Parimenti lo zinco ed il rame, che danno origine agli stessi prodotti attivi ( $Zn^{65}$  isotopi del rame, in condizioni normali hanno attività dello stesso ordine di grandezza, mentre nell'acqua il rame lascia a grande distanza lo zinco).

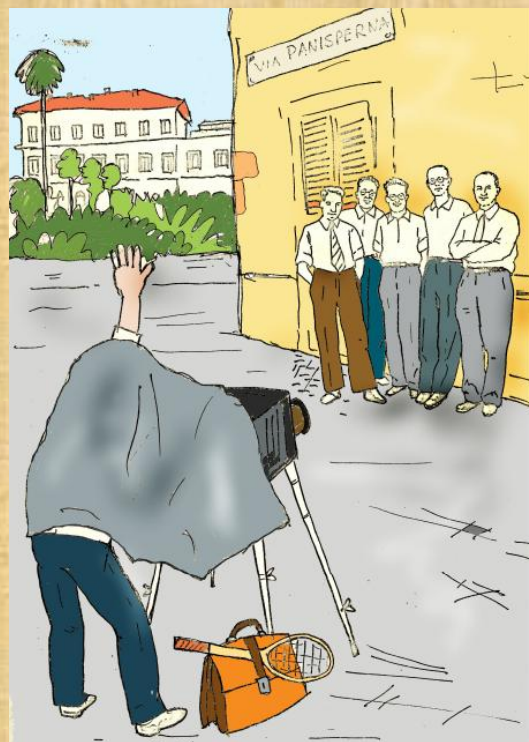
Una possibile spiegazione di questi fatti sembra essere la seguente: i neutroni per urti multipli contro nuclei di idrogeno perdono rapidamente la propria energia. È plausibile che la sezione di urto neutrone-protonone cresca al calore della energia e così quindi i pensarsi che dopo alcuni urti i neutroni vengano a muoversi in modo analogo alle molecole diffondendosi in un gas, eventualmente riducendosi fino ad avere solo l'energia cinetica competente alla agitazione termica. Si formerebbe così intorno alla sorgente qualcosa di simile ad una soluzione di neutroni nell'acqua o nella paraffina. La concentrazione di questa soluzione in ogni punto dipenderebbe dalla intensità della sorgente, dalle condizioni geometriche della diffusione e da eventuali processi di cattura del neutrone da parte dell'idrogeno o di altri nuclei presenti.

Non è escluso che un simile punto di vista possa avere importanza nella spiegazione degli effetti osservati da Lea (2).

Sono in corso indagini su tutto questo complesso di fenomeni.

Istituto Fisico della R. Università.  
Roma, 22 ottobre 1934-XIII.

E. FERMI  
E. AMALDI  
B. PONTECORVO  
F. RASETTI  
E. SEGRÈ




Perché Pontecorvo non è nella foto?  
Ecco la risposta di Misha Bilenky!

Questa lettera su "La Ricerca Scientifica" rappresenta l'ingresso ufficiale di Pontecorvo nel gruppo noto come "i ragazzi di via Panisperna", nel quale tutti hanno un soprannome: Fermi è il *Papa*, Rasetti è il *Cardinale vicario*, Segrè e Amaldi sono gli *Abati*, e Pontecorvo è il *Cucciolo*.

# I ragazzi di via Panisperna

Il direttore dell'Istituto di Fisica di Roma, Orso Mario Corbino, si rende conto dell'importanza strategica della scoperta e consiglia di brevettare "le parti del lavoro che erano brevettabili." A quattro giorni di distanza dalla pubblicazione della scoperta, il 26 ottobre 1934, viene depositata al Ministero delle Corporazioni la domanda per il brevetto N° 324458 riguardante il "Metodo per accrescere il rendimento dei procedimenti per la produzione di radioattività artificiali mediante il bombardamento con neutroni".

  
REGNO D'ITALIA  
MINISTERO DELLE CORPORAZIONI  
UFFICIO DELLA PROPRIETÀ INTELLETTUALE

**Attestato di Privativa Industriale**  
**N° 324458**

Nel Registro degli attestati di privativa industriale di questo Ufficio è stata regolarmente iscritta la domanda depositata, coi documenti voluti dalla legge, all'Ufficio stesso  
nel giorno ventisei del mese di ottobre 1934 alle ore 12,15  
da Fermi Enrico,  
Amaldi Edoardo,  
D'Agostino Oscar, ( a Roma  
Pontecorvo Bruno,  
Rasetti Franco,  
Segrè Emilio  
e Trabacchi Giulio Cesare  
per ottenere una privativa industriale per il trovato designato col titolo:

Metodo per accrescere il rendimento dei procedimenti per la produzione di radioattività artificiali mediante il bombardamento con neutroni.

Il presente attestato non garantisce che il trovato abbia i caratteri voluti dalla legge perché la privativa sia valida ed efficace, e viene rilasciato senza esame preliminare del merito e della novità di esso


Roma, li -2 FEB 1935 Anno XIII

Il Direttore  
*Orso Mario Corbino*

Nel riferimento al presente attestato richiamare soltanto il suindicato numero, adottando la dizione PRIVATIVA ITALIANA **324458**

La Tipografia - Roma XII - Ord. 1540 - 0.900

Il primo novembre 1934 Pontecorvo è nominato "assistente incaricato presso l'Istituto di Fisica" della regia Università degli Studi di Roma.

  
R. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA  
IL RETTORE

Voluti i regi decreti 30 settembre 1923, n. 2102; 6 aprile 1924, n. 674; 25 settembre 1924, n. 1585;  
Voluti il vigente regolamento interno per il personale assistente, tecnico e subalterno;  
Voluti il bilancio per l'esercizio finanziario 1934-35;  
Sulla proposta del Direttore dell'Istituto di Fisica

Vista la deliberazione del Consiglio di Amministrazione in data 17 gennaio 1935, XIII;

DECRETA

Il signor dott. Bruno Pontecorvo  
è nominato assistente incaricato presso l'Istituto di Fisica di questa R. Università dal 1 novembre 1934, XIII al 30 giugno 1935, XIII con lo stipendio annuo di lire 8.300 ridotte a L. 7.692,96 a norma di legge, serate e ferie, oltre indennità essendo posto non di ruolo, quale supplemento di servizio attivo, ed al caro-viveri nella misura e con le norme stabilite per gli impiegati civili dello Stato.

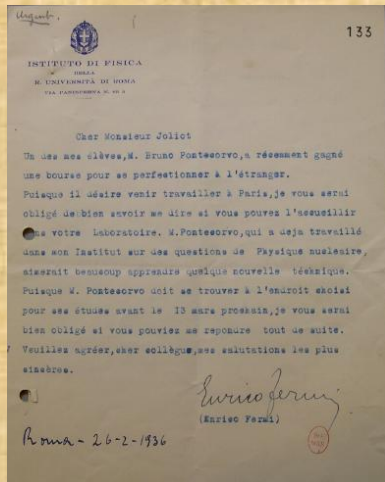
Roma, addì 19 gennaio 1935 - XIII

IL RETTORE  
*Orso Mario Corbino*

La tecnica del rallentamento dei neutroni avrà molte applicazioni, dalla produzione di radioisotopi ai reattori nucleari. Il riconoscimento del brevetto da parte degli Stati Uniti si concluderà solo nel 1953, con una sentenza favorevole al gruppo di Fermi e con un risarcimento a ciascuno di loro di 27.500 \$ di cui però Pontecorvo non riuscirà a beneficiare.



# Da Roma a Parigi



Lettera di presentazione di Fermi a Joliot

Nel 1936 Bruno vince una borsa di studio di 6 mesi da trascorrere all'estero e Fermi gli propone di andare a Parigi allo *Institut du Radium*, diretto da Frédéric Joliot, premio Nobel insieme alla moglie Irène figlia di Pierre e Marie Curie, per la scoperta della radioattività artificiale. Il 15 aprile 1936, Pontecorvo giunge a Parigi e vi resterà quattro anni fino a dopo lo scoppio della seconda guerra mondiale. Sono anni molto importanti per la sua formazione politica. Abita in una modesta stanza dell'*Hôtel des Grands Hommes* in Piazza del Pantheon, nel quartiere latino. Pontecorvo è affascinato dal nuovo ambiente decisamente più democratico e politicamente più impegnato rispetto a Roma e a Pisa:



Institut du Radium

*"Mi colpì molto la generale promiscuità, la presenza di tanta gente di colore, il gran numero di ragazze che frequentavano l'università, il loro atteggiamento così disinvolto. Ma soprattutto mi colpiscono gli operai. A Parigi c'erano gli operai, si riconoscevano fisicamente e frequentavano gli stessi locali dove andavamo noi studenti e intellettuali. Mangiavano al nostro fianco, tranquillamente. A Roma credo di non aver mai visto un operaio. Ma certo non avevo mai mangiato alla stessa tavola con loro."*  
[M. Mafai - *Il lungo freddo* - Rizzoli Editore]



A Parigi le elezioni sono vinte dal *Front Populaire*. I Joliot sono figure di spicco sulla scena politica parigina tanto che Irène viene scelta come sottosegretario per la ricerca Scientifica nel neonato governo di Léon Blum. Pochi mesi dopo, rientrati da una missione scientifica in Russia, i Joliot testimoniano il loro apprezzamento per il progresso economico sociale dell'URSS..

L'amicizia con Joliot e la frequentazione col cugino Sereni, esule antifascista, sono i momenti centrali per la formazione della coscienza politica di Pontecorvo. "Nel momento in cui i comunisti erano così isolati, calunniati, insultati, ebbene io scelsi proprio quel momento per aderire al partito." Verso la fine di Agosto del 1939 Pontecorvo prende la tessera del Partito Comunista d'Italia.

*"... Ho cominciato a vedere cose prima non vedevo, e soprattutto mi sono convinto che ognuno di noi doveva fare qualcosa per cambiare il mondo... Ho cominciato a guardare con interesse prima e con entusiasmo poi a quello che accadeva in URSS, dove il proletariato era al potere e dove si andava costruendo l'uomo nuovo."*  
[M. Mafai - *Il lungo freddo* - Rizzoli Editore]



# La ricerca a Parigi

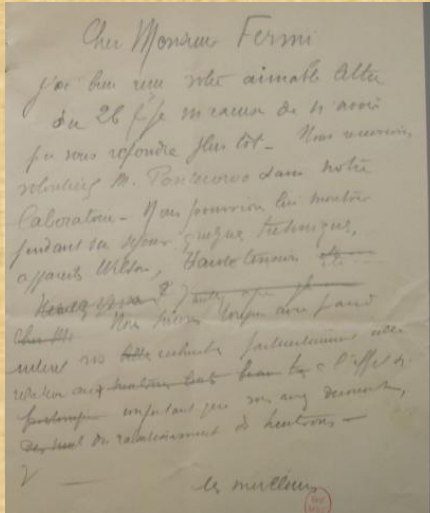
A Parigi, presso l' *Istitut du Radium*, Pontecorvo sotto la guida di Frédéric Joliot e Irène Curie-Joliot acquisisce nuove tecniche di indagine e in particolare impara ad usare nuovi rivelatori di particelle (camere di Wilson) con cui studiare la radiattività.

Nei primi mesi continua il lavoro di Roma sui neutroni lenti ma poi si dedica allo studio del fenomeno dell'isomeria nucleare, considerandola un modo interessante per capire la struttura del nucleo.

Gli isomeri sono stati eccitati di nuclei atomici con lo stesso numero atomico  $Z$  e lo stesso numero di massa  $A$  che presentano radiattività  $\gamma$ , ma con vita media lunga (metastabili).



Frédéric Joliot e Irène Curie-Joliot



Lettera di Joliot a Fermi: accetta volentieri Pontecorvo

Pontecorvo è convinto che debbano esistere isomeri nucleari stabili dal punto di vista della radioattività beta e li cerca con determinazione. Finalmente nel 1939 riesce a individuarne un primo esempio nel Cadmio eccitandolo con neutroni veloci.

Nello stesso anno, insieme con A. Lazard produce isomeri beta-stabili irraggiando nuclei stabili (per esempio l'Indio) con raggi X di alta energia. Joliot apprezza molto queste ricerche e battezza il fenomeno come "fosforescenza nucleare".

Pontecorvo informa di questi risultati Fermi "che (come dice Pontecorvo) pur non essendo assolutamente un tipo da sperticarsi in lodi, rispose congratulandosi con me "per l'ottimo risultato della ricerca". La cosa mi fece un piacere enorme e duraturo, in quanto ero convinto che Fermi (che a Roma soleva chiamarmi "il gran campione") avesse un certo rispetto per me, ma soltanto come esperto di tennis".

New York, 4 febbraio 1939

Caro Pontecorvo,

le ringrazio dell'invio del suo manoscritto, che del resto aveva già visto pubblicato; mi congratulo assai per l'ottimo successo della ricerca. Trovo strano che l'effetto sia stato osservato fino ad ora solo nell'Indio. E l'interpretazione più probabile mi sembra che sia nel fatto che l'Indio eccitato rappresenta una dei pochissimi casi di elementi che pure essendo stabili nello stato fondamentale, hanno la possibilità di emettere raggi  $\beta$  da uno stato metastabile anche di eccitazione molto bassa.

Qui stiamo tutti lavorando sull'Uranio. Avevamo trovato le distinzioni per spezzamento già prima che arrivasse la notizia che Frisch ha fatto lo stesso esperimento pochi giorni prima di noi. Ed ora stiamo cercando di chiarire ulteriormente i fenomeni. Ho visto l'altro ieri Firenze che mi ha portato la notizia di lei e di Fano.

Io cerco di occuparmi di trovare qualche sistemazione qui per i fisici italiani che hanno perso il posto. C'è però stata una tale invazione di rifugiati tedeschi che la cosa non si presenta molto facile, anzi le probabilità mi sembrano piuttosto scarse. Desidererei comunque sapere se anche lei desidera venire in America. E ciò perché il caso suo potrebbe forse essere meno difficile di altri.

Stia a Fano che lo ringrazio della sua lettera e che ha scritto ogni stesso a Joliot per raccomandarlo.

Molti auguri per il successo delle sue ricerche e affettuosi saluti

E. Fermi  
Enrico Fermi

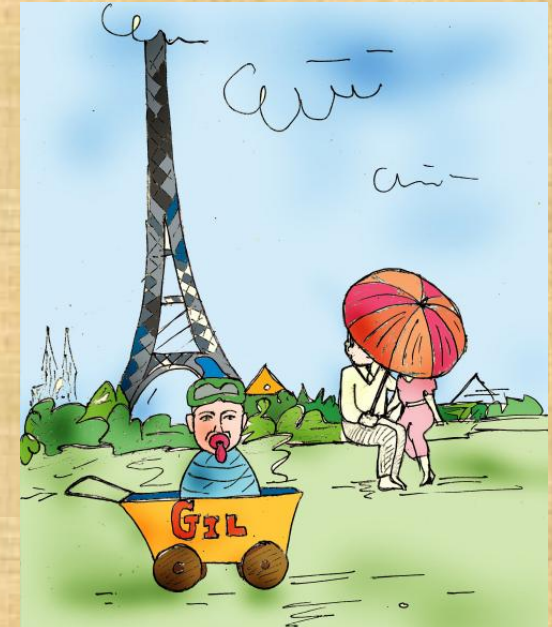
La risposta di congratulazioni di Fermi a Pontecorvo

# La vita privata a Parigi



Bruno e Marianne

Bruno pochi mesi dopo il suo arrivo a Parigi, conosce Marianne Nordblom, una studentessa svedese con cui stabilisce una stretta relazione che porterà alla nascita del loro primo figlio Gil.



I Pontecorvo immaginati da Misha Bilenky

HANS E GERDA NORDBLOM  
ANNUNZIANO IL MATRIMONIO  
DELLA LORO FIGLIA MARIANNE  
COL SIGNOR

BRUNO PONTECORVO

MASSIMO PONTECORVO E MARIA  
PONTECORVO MARONI ANNUNZIANO  
IL MATRIMONIO DEL LORO  
FIGLIO BRUNO CON LA SIGNORINA

MARIANNE NORDBLOM

10 GENNAIO 1940  
PARIS  
HOTEL DES GRANDS HOMMES  
(PLACE DU PANTHÉON)

Bruno e Marianne si sposano civilmente il 10 gennaio 1940 due anni dopo la nascita di Gil



I Pontecorvo nel 1940



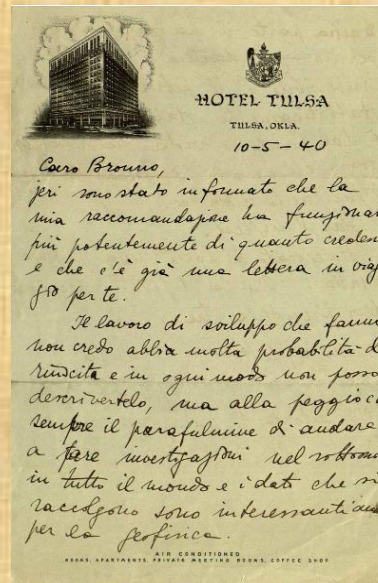
# La fuga da Parigi fino a New York

Il 3 settembre 1939 la Francia dichiara guerra alla Germania e la borsa di studio di Pontecorvo scaduta nel dicembre dello stesso anno non viene rinnovata. Con l'aiuto di Enrico Fermi e di Frédéric Joliot, Pontecorvo prepara il suo trasferimento in America.

Il 13 giugno 1940, con l'invasione nazista alle porte, Bruno insieme ad alcuni amici fugge da Parigi in bicicletta e raggiunge Tolosa dove vive la sorella Giuliana con in marito Duccio Tabet. Marianne e Gil sono già arrivati in treno. Da Tolosa raggiungono Lisbona e si imbarcano sulla motonave Quanza. Il 20 agosto sbarcano a New York.



motonave Quanza



Lettera di Segrè a Pontecorvo



Salvacondotti di Marianne e di Bruno

Fermi e l'amico Emilio Segrè, da tempo negli USA, lo aiutano a trovare un lavoro. Infine Pontecorvo ottiene una proposta dalla Well Surveys Inc. che fa ricerche di sviluppo di nuove tecnologie per individuare giacimenti di petrolio. La guerra è alle porte e la richiesta di petrolio sta già aumentando. Queste ricerche sono lontane dalla ricerca pura ma, come gli scrive Segrè, "i dati che si raccolgono sono interessanti anche per la geofisica".



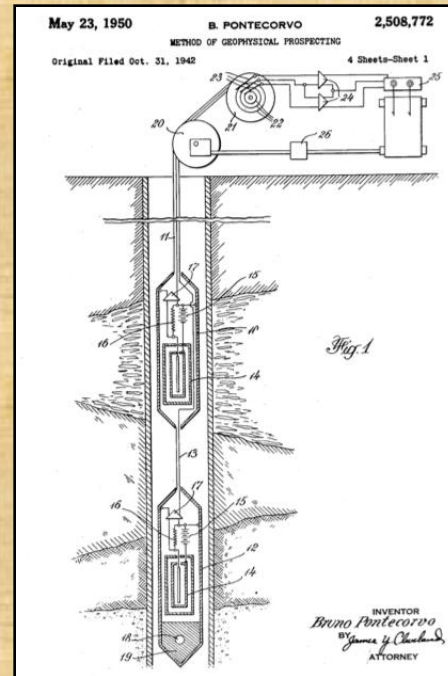
# Il carotaggio neutronico



Bruno che cerca il petrolio come visto da Misha Bileny



Pontecorvo rimane a Tulsa, Oklahoma, per quasi tre anni dove trascorre una vita tranquilla con la moglie e il figlioletto Gil. Anche il lavoro procede bene e gli procura grandi soddisfazioni. Sviluppa un sistema per identificare la presenza nel sottosuolo di giacimenti petroliferi sfruttando le a lui ben note proprietà dei neutroni lenti. Questa nuova tecnica, in uso ancor oggi, viene subito brevettata da Bruno, ma non a suo nome non essendone interessato, ma bensì a nome della ditta per cui lavora. È questa la prima applicazione industriale dei neutroni lenti, e presto ce ne saranno altre...



May 23, 1950 B. PONTECORVO 2,508,772  
 METHOD OF GEOPHYSICAL PROSPECTING  
 Original Filed Oct. 31, 1942 4 Sheets-Sheet 1

Patented May 23, 1950 2,508,772

UNITED STATES PATENT OFFICE

2,508,772  
 METHOD OF GEOPHYSICAL PROSPECTING

Bruno Pontecorvo, National Guards, Captain, assigned to Well Services, Incorporated, Tulsa, Okla., a corporation of Oklahoma.

Original application October 21, 1942, Serial No. 424,414. Divided and this application September 21, 1945, Serial No. 413,844

1 Claim. (Cl. 250-82A)

This invention relates to geophysical prospecting and more particularly to well logging by the use of radioactive radiation.

By radioactive radiation it is known that alpha and beta radiation and positrons, protons and other types of radiation which as a result of nuclear reactions, and similar to these are ionizing in nature, and some other types of radiation are not sufficiently penetrating for the present purpose and hence will not be suitable. Incidentally, the term radiations as here used is intended to cover both the radiation of particles such as neutrons and the radiation of quanta, as for example, gamma radiation.

It has already been suggested that production of secondary radiation in the natural process of emitting primary radiations, and that these radiations may be detected by appropriate means, as rapid measurements indicative of the nature of the formations. It has also been suggested that the discrimination of geological formations and the consequent production of radiations may be stimulated by irradiation of the formation with radiations, following procedure for that purpose.

It further has been suggested that the nature of geological formations may be determined by measurement of the ability of certain types of radiations to penetrate the formation, or by measurement of the ability of certain types of radiations to enter into a formation, whether as a result of neutron capture within the formation and return into the formation. Thus, several possibilities have been suggested whereby production of secondary radiations and measurements made of the radiations that come from the geological formation as a result of its being irradiated. Actual tests indicate that such methods are accurate and that information can be obtained in this manner as to the nature of geological formations.

The present invention is an improvement upon the above processes of determining the nature of geological formations by subjecting the formation to irradiation with radioactive radiations, and suitable to such processes regardless of whether the process desired for these operations is the penetration of the formations by the radiations, the scattering of the radiations by the formation, or the production of secondary radiations in the formation as the result of the primary radiations.

In an aspect, the amount of radiation that comes from the formation and can be detected and measured, and the distance between the primary source of radiation and point at which said radiation are detected is not exactly a function of the distance between the primary source of radiation and the point of detection. This is a function of the nature of the formation, but it is also a function of the nature of the formation, and the only controlling factor for the ability of radiations to penetrate a formation does not depend only upon density, and some types of radiations, particularly neutrons will penetrate in many cases denser formations more readily than other types.

For the purpose of stimulating the production of secondary radiation and of the means for providing suitable means for measuring the nature of geological strata and correlating the measurements with indications of the formations which they were taken, several arrangements of apparatus have been devised. Since it is particularly useful to make these measurements in all wells where the strata are not exposed for direct observation and hence can only be identified by some indirect means, the apparatus devised has all been adapted to such use. However, suitable apparatus can easily be used on the surface of the earth or in any other place where it is desired to investigate the nature of geological strata by such a method.

Probably the simplest apparatus that can be used for the purpose of the present invention, for making rapid and complete well surveys, consists of a lead of ionization chambers suspended on a cable and separated a sufficient distance and a source of radiation also suspended from said cable in certain spaced relation to the ionization chambers. Signals indicating the measurements made by the ionization chambers can then be carried to the surface through the cable and recorded in connection with indications of the depths of the apparatus in the hole.

Such an apparatus can be arranged to give two curves, one for each of the ionization chambers, and a visual comparison of these two curves can be made by such instrument as a spectrometer. The measurements can be obtained in this manner by dividing one measurement into the other, as the ratio of the radiations that will be directly sensitive of the nature of the strata.

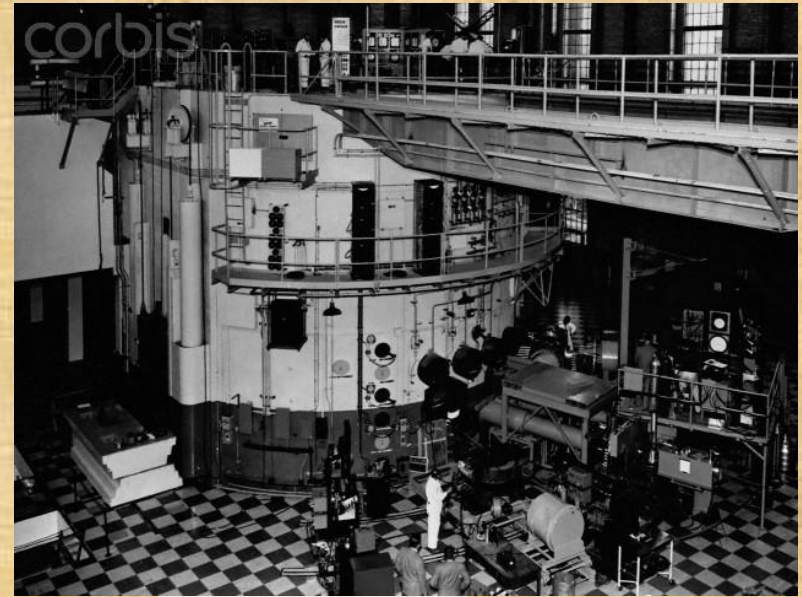
The main difficulty with such an arrangement

# In Canada: Montreal-Chalk River

Nel 1942 negli USA sta partendo la corsa per la costruzione della bomba atomica col Progetto Manhattan a Los Alamos, in New Mexico.

Anche l'Inghilterra vuole la sua bomba ma, vista la vicinanza con la Germania, le ricerche sul nucleare vengono organizzate in Canada, dove vanno a lavorare alcuni dei vecchi colleghi francesi di Pontecorvo. Così all'inizio del 1943 Pontecorvo viene invitato ad unirsi a loro presso il laboratorio di Montreal del National Research Council of Canada per progettare e costruire il primo reattore nucleare anglo-canadese.

*"Non ricordo chi mi ha contattato per primo, forse Auger, forse Placek... Il periodo canadese fu molto bello, molto utile, molto stimolante dal punto di vista scientifico."*  
dirà Pontecorvo a Miriam Mafai nella sua famosa intervista [M. Mafai, Il Lungo Freddo].



Il reattore NRX



I Laboratori di Chalk River

Per Bruno questa è un'ottima occasione per tornare in un ambiente di ricerca e si trasferisce a Montreal con la famiglia nella primavera del 1943. A metà del 1944 viene deciso di costruire a Chalk River il grande reattore nucleare ad acqua pesante *NRX* (*National Research eXperimental*). Così Bruno negli anni 1944-47 è impegnato a lavorare alle molteplici problematiche del reattore incluso un grande contatore di neutroni per rivelare eventuali perdite radiattive e altri monitors per controllarne il buon funzionamento.

In questi anni la famiglia cresce con l'arrivo dei figli Tito nel 1944 e Antonio un anno dopo. Il reattore NRX entra in funzione il 22 luglio 1947 e per molti anni sarà il principale fornitore di isotopi radiattivi per la medicina.



# Le prime intuizioni geniali

È nel periodo canadese che Pontecorvo matura alcune intuizioni geniali sulla fisica delle particelle elementari

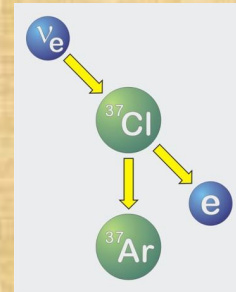
*"...Fu lì, in Canada, che intuì la simmetria elettrone-muone che ha avuto, penso, qualche importanza per la elaborazione successiva della universalità delle interazioni deboli." [M. Mafai, Il Lungo Freddo]*

## Nuclear Capture of Mesons and the Meson Decay

B. PONTECORVO  
National Research Council, Chalk River Laboratory, Chalk River,  
Ontario, Canada  
June 21, 1947

Phys. Rev. 72, 246–247 (1947)

È ancora in quegli anni che Bruno si pone il problema di rivelare l'ipotetica particella ipotizzata da Pauli nel 1930, il neutrino. Propone di rivelarli usando la reazione  $\nu + {}^{37}\text{Cl}_{17} \rightarrow {}^{37}\text{Ar}_{18} + e^-$  rivelando successivamente la radioattività dei nuclei di Argon-37. È un'idea geniale che solo dopo molti anni verrà ripresa e messa in pratica da altri a cui varrà il premio Nobel.



In collaborazione con G.C. Hanna e D.H.W. Kirkwood sviluppa dei rivelatori a gas in regime proporzionale necessario per rivelare la radioattività dei nuclei di argon prodotti dai neutrini.

## High Multiplication Proportional Counters for Energy Measurements

G. C. HANNA, D. H. W. KIRKWOOD, AND B. PONTECORVO  
Chalk River Laboratory, National Research Council of Canada,  
Chalk River, Ontario, Canada  
January 24, 1949

Esegue una serie di esperimenti insieme a E.P.Hincks con raggi cosmici per studiare le proprietà della particella "che noi oggi chiamiamo muone".

## Search for Gamma-Radiation in the 2.2-Microsecond Meson Decay Process

E. P. HINCKS AND B. PONTECORVO  
National Research Council, Chalk River Laboratory,  
Chalk River, Ontario, Canada  
December 9, 1947

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 77, NUMBER 1

JANUARY 1, 1950

## On the Disintegration Products of the 2.2- $\mu$ Sec. Meson

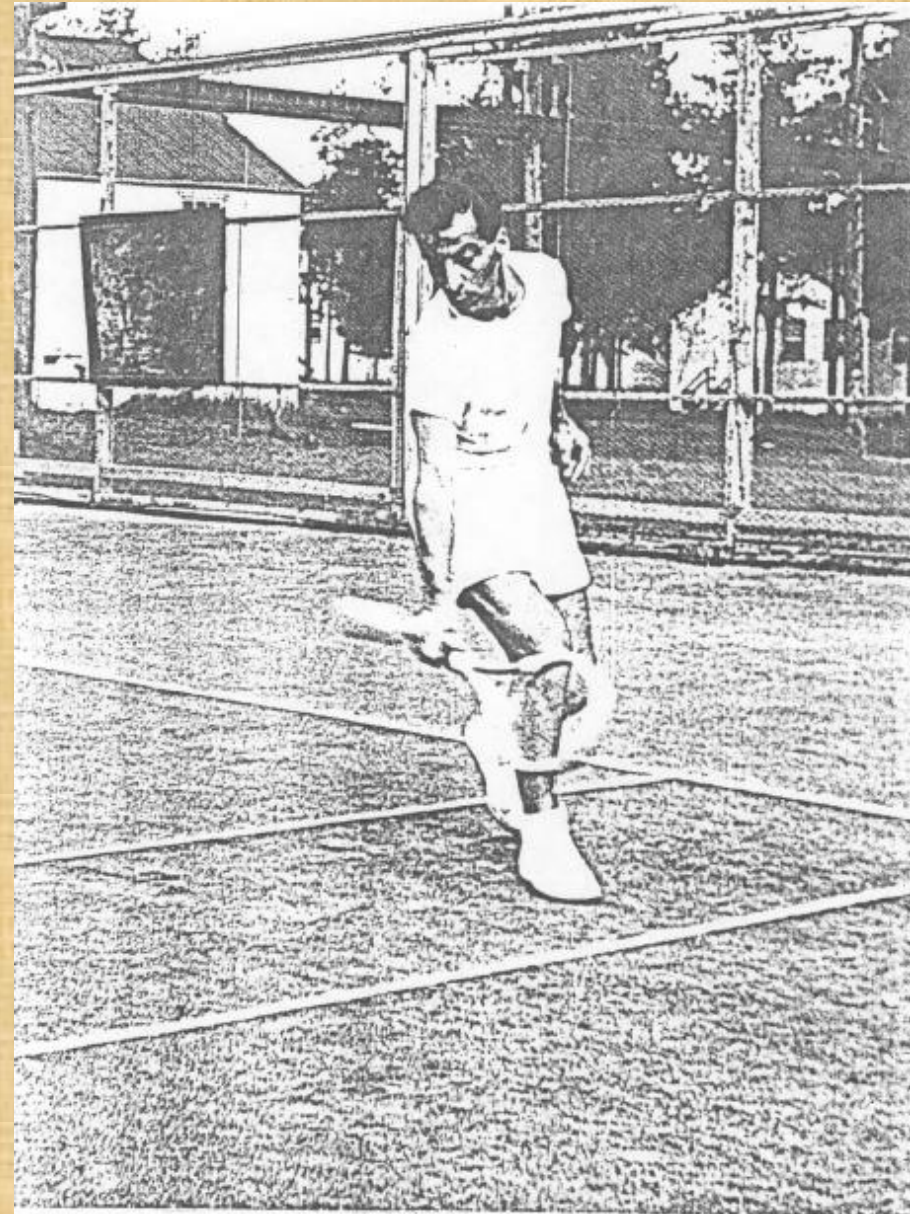
E. P. HINCKS AND B. PONTECORVO\*  
National Research Council of Canada, Chalk River Laboratory, Chalk River, Ontario, Canada  
(Received September 19, 1949)

## The Absorption of Charged Particles from the 2.2- $\mu$ sec. Meson Decay

E. P. HINCKS AND B. PONTECORVO  
National Research Council of Canada, Chalk River Laboratory,  
Chalk River, Ontario, Canada  
July 26, 1948



# Bruno vince il campionato di tennis di Chalk River nel 1948



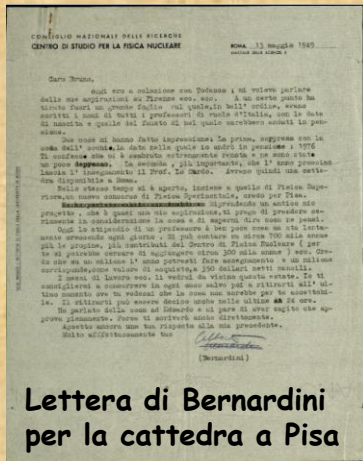
# Dal Canada in Inghilterra

Il periodo canadese si conclude nella primavera del 1948. Forse, Bruno vuole tornare in Europa per avvicinarsi ai vecchi amici e ai numerosi parenti. Rinuncia a numerose proposte di prestigiose Università e lascia cadere anche la proposta di Gilberto Bernardini per una cattedra a Pisa. Accetta invece di trasferirsi in Inghilterra, nel nuovo centro per ricerche atomiche costruito ad Harwell, vicino ad Oxford e prende casa nel villaggio di Abington, vicino ad Harwell.



Una via di Abington nel 1950

Pontecorvo è sempre più affascinato dalla fisica delle particelle e dallo sviluppo di nuovi rivelatori necessari per studiarle. Partecipa a numerosi Convegni di Fisica Nucleare: Edimburgo, Basilea, Como dove, nel settembre del 1949, incontra Fermi con cui discute il suo lavoro sui contatori proporzionali.



Lettera di Bernardini per la cattedra a Pisa

Siamo all'inizio della guerra fredda e la segretezza della tecnologia nucleare viene considerata come il problema centrale della sicurezza nazionale. Scoppiano vari casi di spionaggio nucleare, tra cui il caso "Fuchs", un fisico teorico tedesco che lavora al centro nucleare di Harwell e che ha partecipato al Progetto Manhattan. Anche il comunista Pontecorvo, che ben conosce Fuchs, viene indagato senza che tuttavia gli venga contestato alcunchè. In Francia, le pressioni americane sul governo portano alla rimozione di Joliot-Curie da direttore del CEA, Centre pour l'Energie Atomique, per motivi ideologici. Forse Bruno inizia a temere per la sua libertà personale e forse già comincia a pensare di trasferirsi a vivere in Unione Sovietica. Tuttavia all'inizio dell'anno 1950 accetta la cattedra all'Università di Liverpool anche se non vi prenderà mai servizio.

Accettazione della cattedra a Liverpool



# Vacanze in Italia

Nell'estate del 1950, Bruno decide di fare una bella vacanza in Italia con la famiglia. Il 25 luglio, dopo aver scritto all'Università di Liverpool che prenderà servizio con un pò di ritardo, parte con la famiglia in macchina per un lungo viaggio che lo porterà in Francia, in Svizzera, in Austria e finalmente arriverà in Italia.

Il 22 agosto Bruno festeggia il suo 37° compleanno al Circeo, ospite del fratello Gillo. Sono giorni felici con parenti e amici, ma lo spettro di una nuova guerra aleggia sul mondo. Lo scoppio della guerra in Corea fa crescere il rischio di ricorrere di nuovo all'uso della bomba atomica.

Il 25 agosto la famiglia Pontecorvo rientra a Roma. La macchina con la quale sono arrivati dall'Inghilterra viene consegnata ad un garage della capitale, con l'impegno di ritirarla dopo qualche tempo. Ma quella macchina nessuno la ritirerà mai.

Con tutta la famiglia Bruno si imbarca su un volo della Scandinavian Airlines per Stoccolma.



DC-6 della Scandinavian Airlines

# Il Viaggio

Alla fine di agosto 1950 la famiglia di Bruno Pontecorvo atterra a Stoccolma. Il figlio Gil, appena dodicenne, così ricorda quei giorni: *"Siamo stati lì una notte ma stranamente non siamo andati a trovare la nonna. Il giorno seguente abbiamo preso un piccolo aereo per Helsinki. La costa della Svezia dall'alto era bellissima. Due giorni dopo ci hanno accompagnato in auto fino al confine con l'URSS. Io ero con mia madre e i miei fratelli; mio padre viaggiava da solo in un'altra macchina."*

Bruno nella famosa intervista rilasciata a Miriam Mafai racconta:

*"Viaggiai da clandestino chiuso nel bagagliaio. Occupai il tempo del viaggio pensando a cosa avrei detto all'arrivo a Mosca. Mi ero preparato una specie di piccolo discorso col quale intendevo spiegare le ragioni della mia scelta. ...Non c'entrava niente l'atomica. L'URSS l'aveva già da oltre un anno. Io volevo lavorare per il progresso e la pace. Trovavo scandaloso l'atteggiamento antisovietico che andava prevalendo in Occidente. Era una cosa molto ingiusta se si pensa ai milioni di russi morti anche per noi nella seconda guerra mondiale."*  
[M. Mafai - *Il lungo freddo*]



Via Gorkij nel 1950. La freccia indica il balcone dove abitarono i Pontecorvo

Dal confine i Pontecorvo prendono un treno per Leningrado e dopo due settimane sono a Mosca.

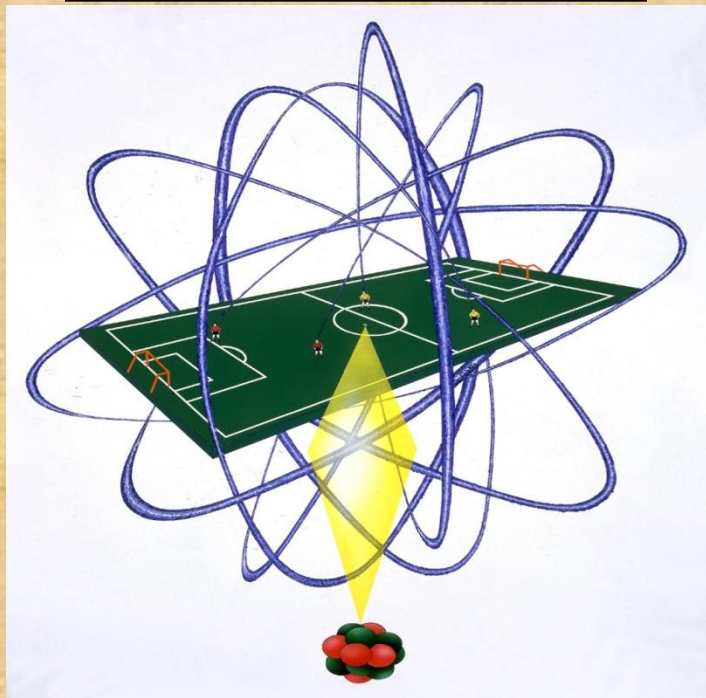




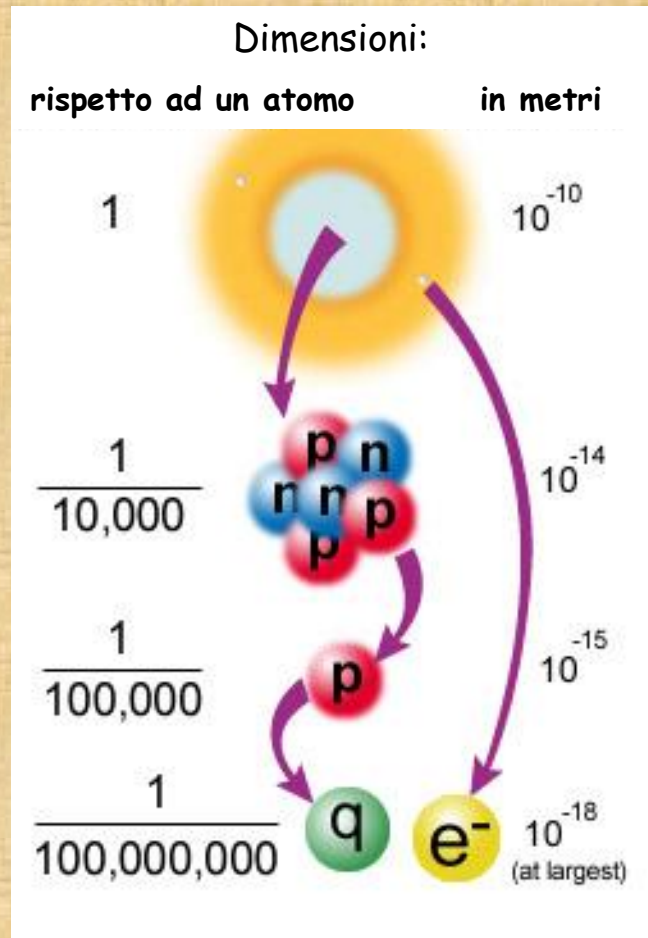
# La materia ordinaria



**Atomo**  
(ingrandito mille miliardi di volte)



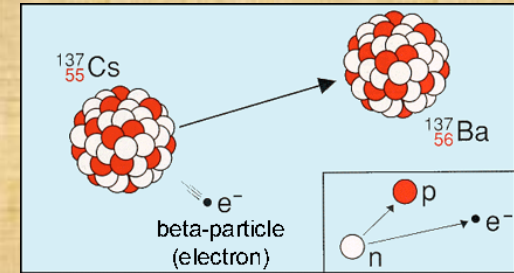
A questa scala, il Nucleo è ~ 1 cm



# .... poi ci sono i neutrini !

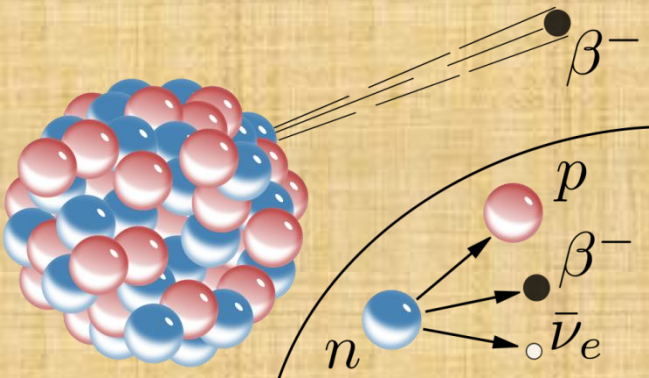
(il problema del decadimento  $\beta$ )

- ✓ 1911-1914: si studia la radioattività: un nucleo si trasforma in un altro emettendo un elettrone (radiazione  $\beta$ ):  ${}_Z^A N \rightarrow {}_{Z+1}^A N' + e^-$



ma c'è un problema: non si conserva l'energia, la quantità di moto e il momento angolare !! ??

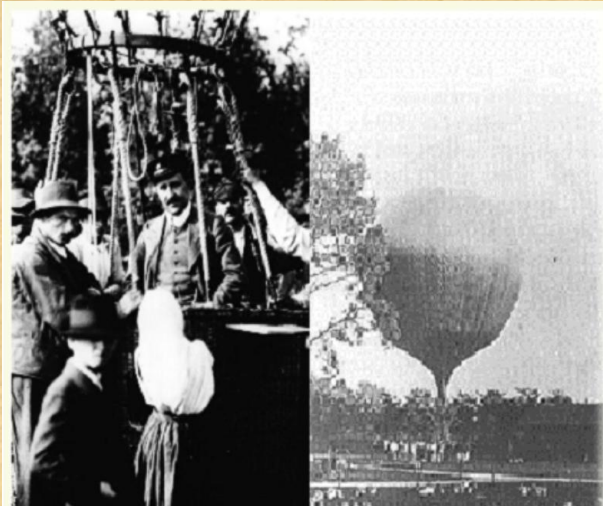
- ✓ 1930: W.Pauli ipotizza che un'altra particella neutra, senza massa e invisibile venga emessa insieme all'elettrone:  ${}_Z^A N \rightarrow {}_{Z+1}^A N' + e^- + X$
- ✓ 1933: E.Fermi formula teoria del decadimento  $\beta$  e chiama la nuova particella neutrino. Il fenomeno elementare è il decadimento del neutrone. La forza responsabile del decadimento è dovuta ad una nuova forma di interazione: **la forza debole.**



flusso di neutrini sulla terra dal sole:  
 $6.5 \times 10^{11} / (\text{cm}^2 \text{ s})$



# Oltre la materia ordinaria... scoperta con i Raggi Cosmici

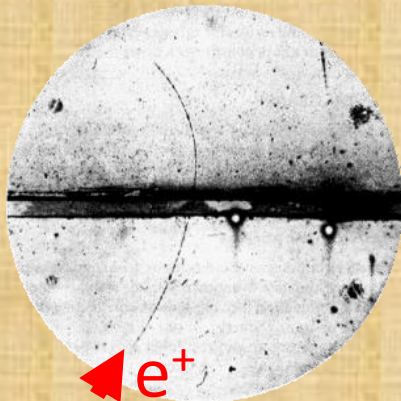


Victor Hess nel 1912 scopre con esperimenti ad alta quota i raggi cosmici

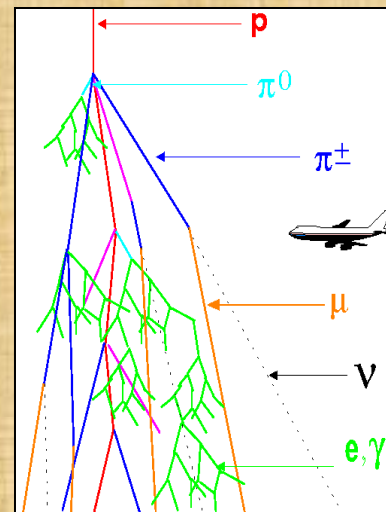
**I raggi cosmici primari producono  
sciame di particelle nell'atmosfera**



**Sulla superficie della Terra :~ 1/sec/dm<sup>2</sup>**



**1932- Anderson  
scopre il positrone**



**Raggi cosmici primari:  
p 80 %,  $\alpha$  9 %, n 8 %  
e 2 %, nuclei pesanti 1 %  
 $\gamma$  0.1 %,  $\nu$  0.1 %**

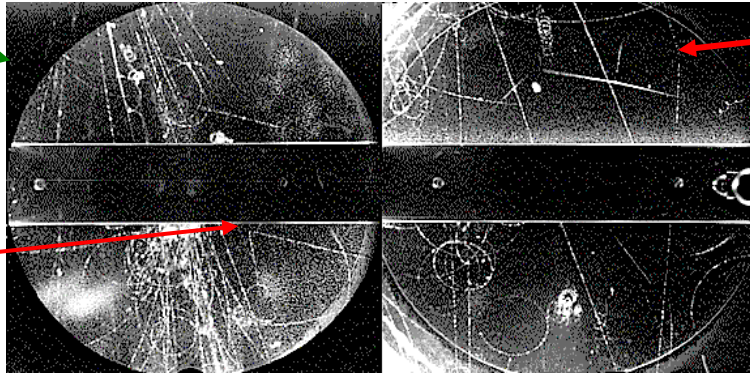
**Raggi cosmici secondari  
sulla superficie della Terra:  
 $\nu$  68% ;  $\mu$  30%; p, n,...2 %**

# Oltre la materia ordinaria ...

1937, scoperta del muone (C. Anderson & S. Neddermeyer)

1947, scoperta del pione (C. Powell)

1947, scoperta delle particelle K neutre e cariche (G. Rochester & C. Butler)



$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$

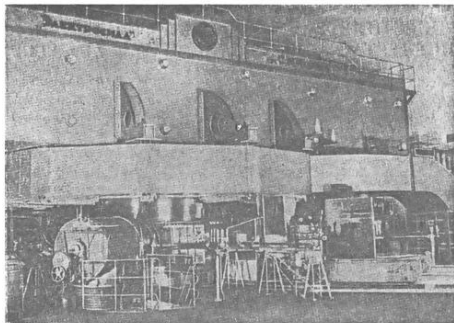
*Foto di camera a nebbia esposta a raggi cosmici*

$\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-$

Un grande balzo in avanti nella comprensione del mondo subatomico fu reso possibile con la costruzione di acceleratori di particelle.



E. Lawrence costruisce il primo ciclotrone nel 1929 (80 KeV diametro 13cm)



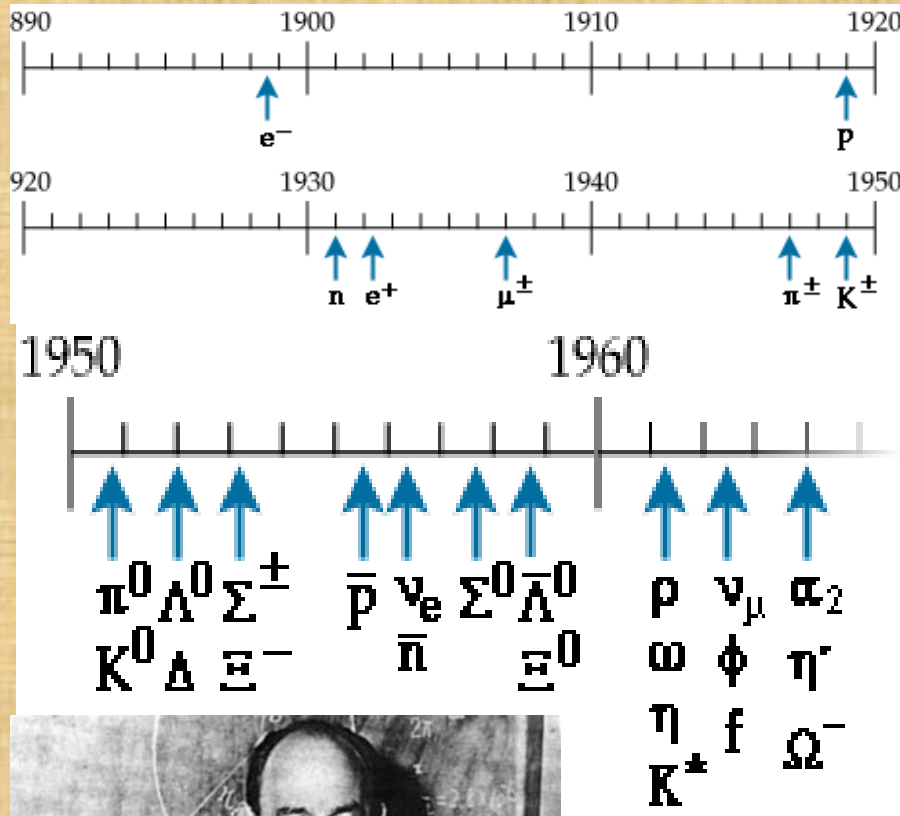
Il sincrociclotrone di Dubna entra in funzione nel 1949 (500 MeV diametro 5 m)



Il proto-sincrotrone del CERN entra in funzione nel 1959 (26 GeV diametro 200 m)



# Oltre la materia ordinaria ...



- 1952, scoperta della  $\Delta$  (Fermi et al.)
- 1955, scoperta dell'antiprotone (Segrè et al.) 1955,
- 1964, scoperta dello  $\Omega^-$
- .....

Tra gli anni '50 e gli anni '60 con l'avvento degli acceleratori e della camera a bolle (un nuovo rivelatore molto migliore della camera a nebbia) vengono scoperte moltissime nuove particelle, forse troppe.. c'è ora molto da fare per i teorici !



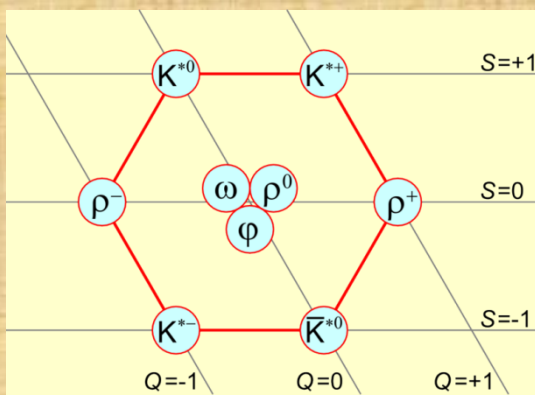
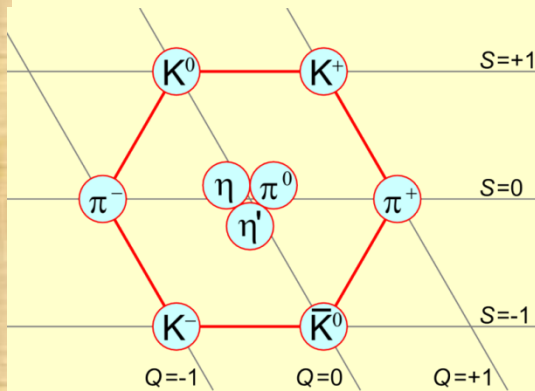
*"Young man, if I could remember the names of these particles, I would have been a botanist!" disse E.Fermi al suo studente L. Lederman (anch'egli premio Nobel)*

**Nel 1964 per mettere ordine nello zoo delle particelle fino ad allora scoperte, Gell-Mann intuisce l'esistenza di una struttura di simmetria ( $SU(3)$ ), ipotizzando l'esistenza di tre particelle che chiamò quark.**

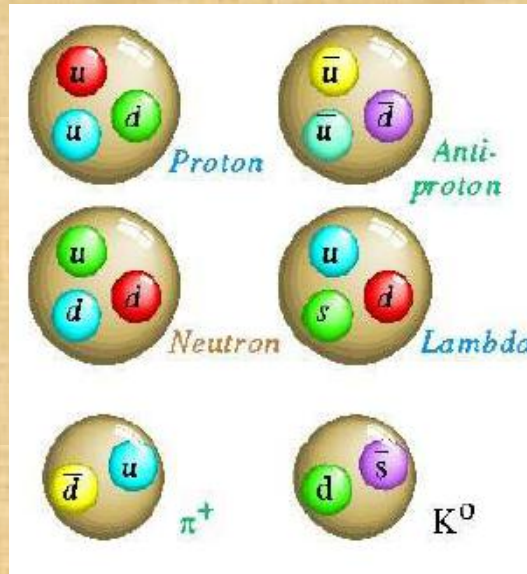
# L'ipotesi dei quark

("The 8-fold way")

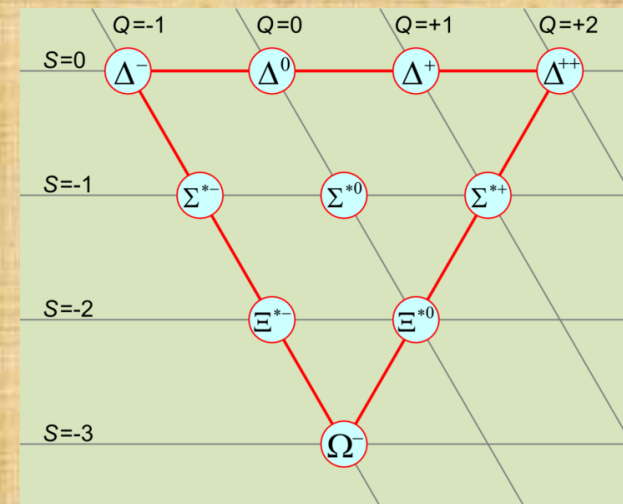
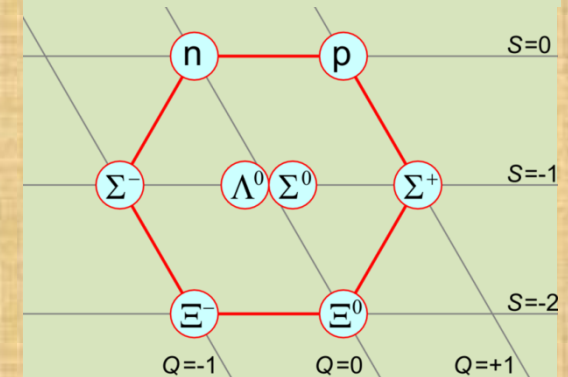
## Mesoni ( $q_1 q_2^{\text{bar}}$ )



quark	carica	stranezza
up	$+2/3 e$	0
down	$-1/3 e$	0
strange	$-1/3 e$	-1



## Barioni ( $q_1 q_2 q_3$ )

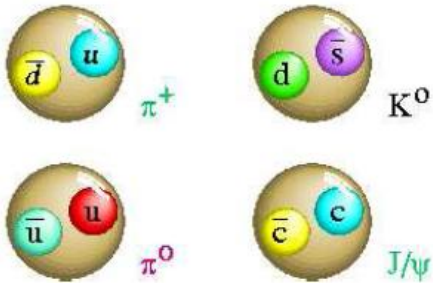


C'è molta riluttanza nell'accettare l'ipotesi dei quark con carica frazionaria e, nonostante che questa ipotesi permetta di organizzare tutte le particelle scoperte in semplici strutture di multipletti e abbia predetto nuovi stati poi realmente scoperti ( $\Omega^-$ ), rimane per molti un artificio matematico fino al 1974.



# Lo zoo delle particelle

## Mesoni ( $q_1 q_2^{\text{bar}}$ )



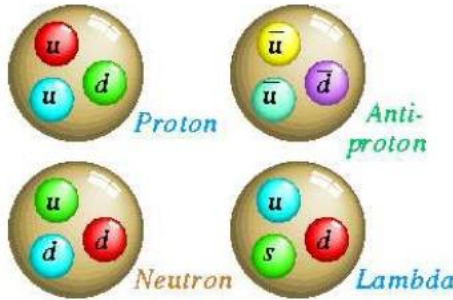
$SU(4): u, d, s, c$

$(L=0)$

$SU(4): u, d, s, c$

$(L=0)$

## Barioni ( $q_1 q_2 q_3$ )



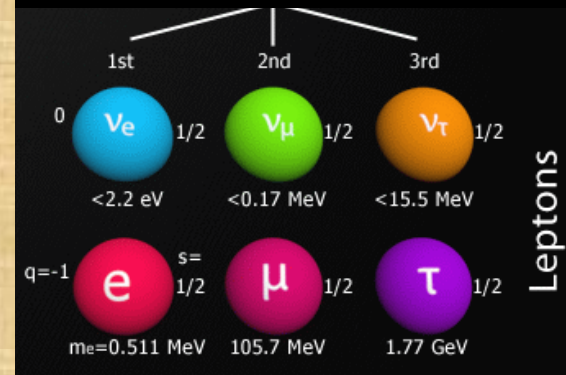
$SU(4): u, d, s, c$

$(L=0)$

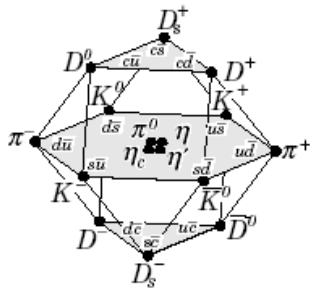
$SU(4): u, d, s, c$

$(L=0)$

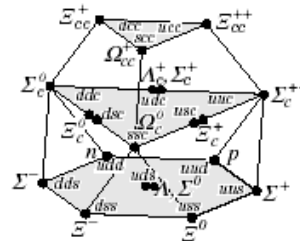
## Leptoni



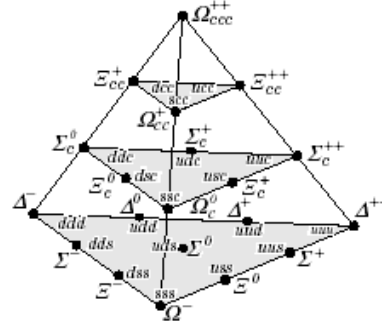
$J=0$



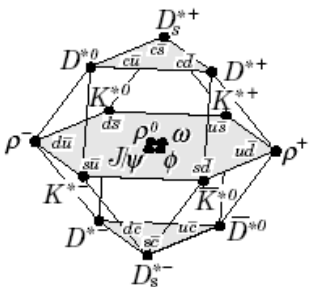
$J=1/2$



$J=3/2$



$J=1$



Si conoscono più di 200 particelle, la stragrande maggioranza sono instabili e decadono in tempi brevissimi, altre vivono abbastanza a lungo da poter essere rivelate direttamente.



## Riassumendo:

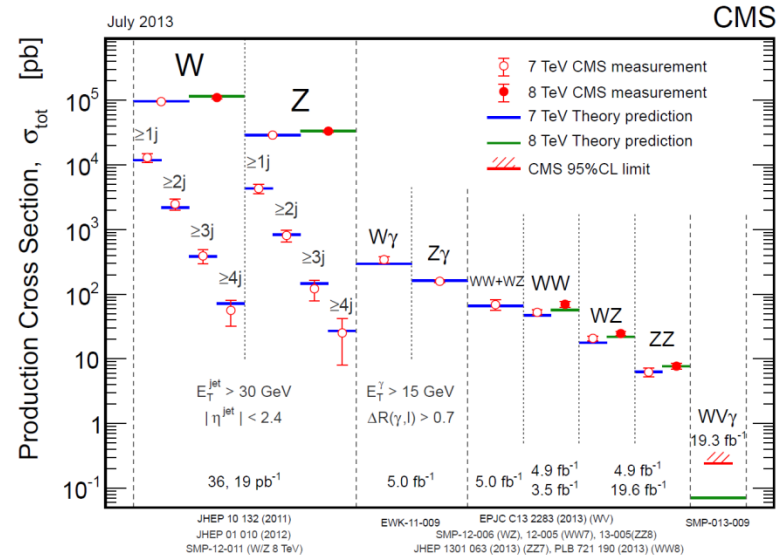
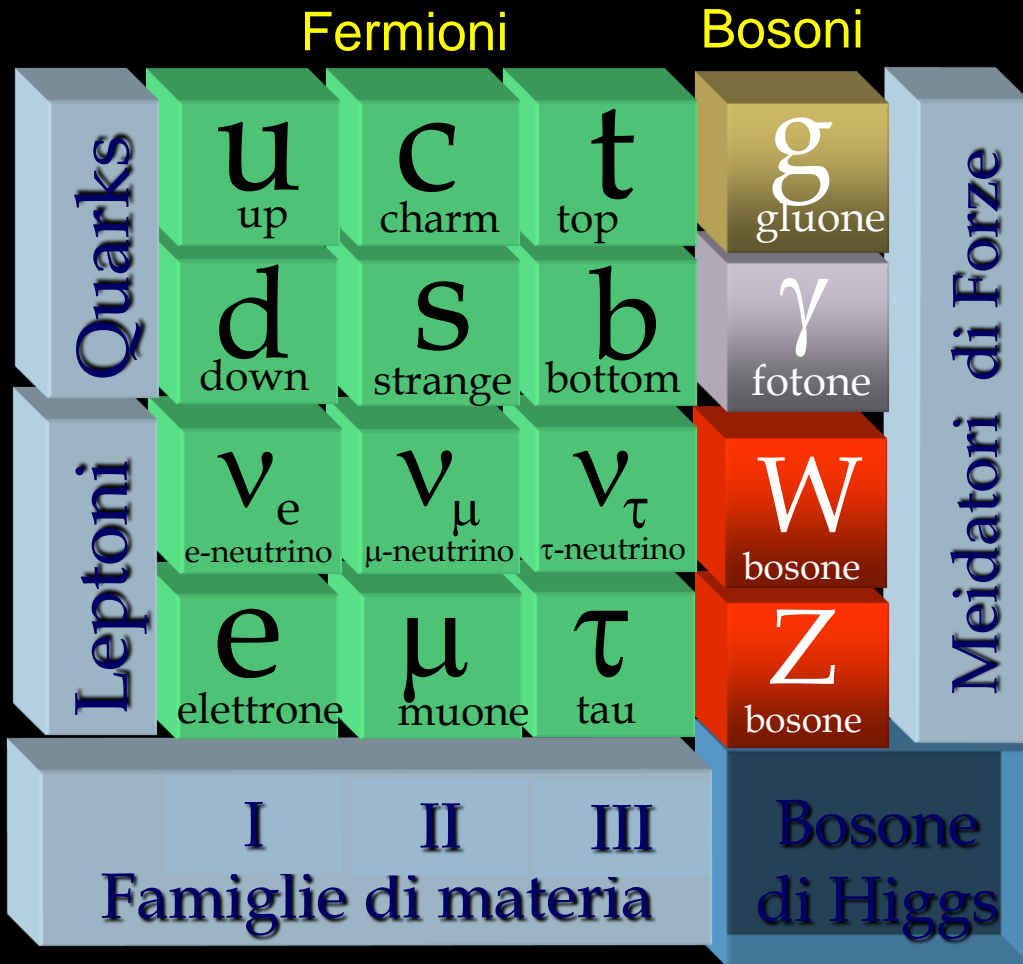
i costituenti fondamentali della materia sono i fermioni

Quarks				Leptoni					
Le generazioni di materia	I		up		down		e - neutrino		elettone
	II		charm		strange		$\mu$ - neutrino		muone
	III		top		bottom		$\tau$ - neutrino		tau

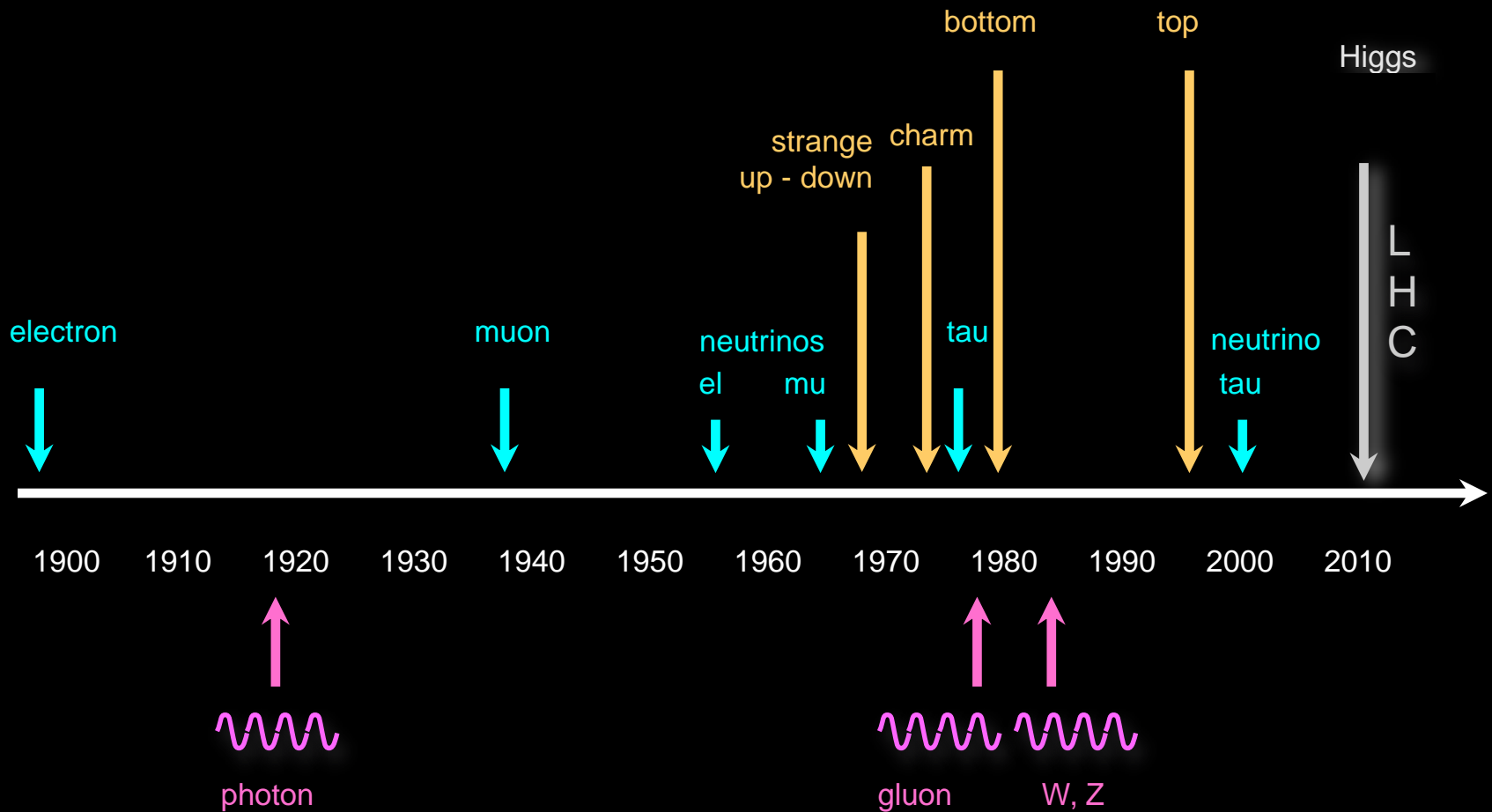
- Tutta la materia visibile è composta dalle particelle di prima generazione
- Tutte le particelle di seconda e terza generazione sono instabili e decadono rapidamente in particelle di prima generazione
- Inoltre si identificano tre classi di decadimenti corrispondenti a tempi diversi con cui essi avvengono e che dipendono dall'intensità dell'interazione responsabile del decadimento:
  - ✓ **Interazione forte:** le particelle decadono in tempi di circa  $10^{-20}$  secondi o inferiori
    - ✧ Esempio:  $\Delta^{++} \rightarrow p\pi^+$
  - ✓ **Interazione elettromagnetica:** le particelle decadono in tempi intorno ai  $10^{-15}$  secondi
    - ✧ Esempio: il pione neutro  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
  - ✓ **Interazione debole:** le particelle decadono in tempi di  $10^{-10}$  secondi e superiori
    - ✧ Esempio: i pioni carichi  $\pi \rightarrow \mu\nu$ , i kaoni  $K \rightarrow \pi e\nu$



# Il Modello Standard



# Scoperta dei costituenti fondamentali del Modello Standard





**Chi è Bruno Pontecorvo come uomo e come scienziato quando, nel settembre del 1950 all'età di 37 anni decide di abbandonare tutto per andare a vivere in Russia?**

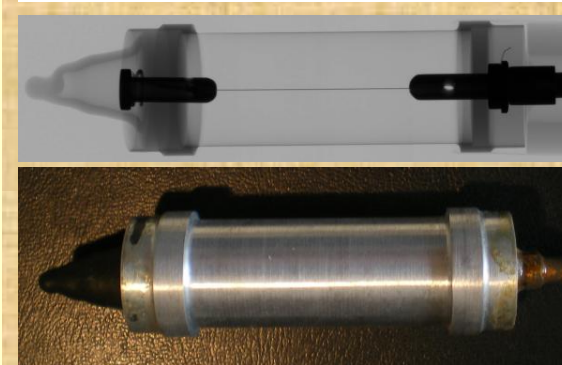
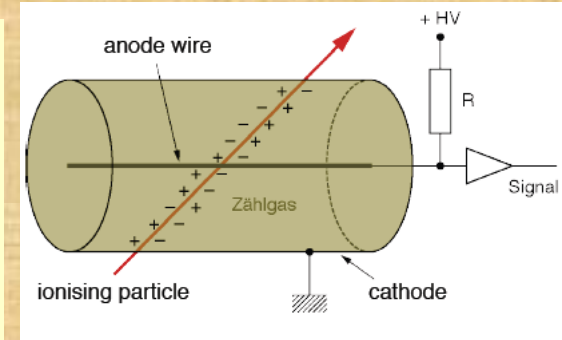
**Quali sono i motivi per cui prende questa drastica decisione? decisione che cambierà irrevocabilmente non solo tutta la sua vita ma anche quella della moglie e dei figli.**

# Fisico sperimentale esperto dei più avanzati rivelatori di particelle

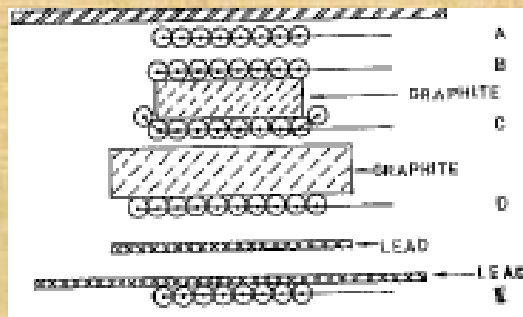
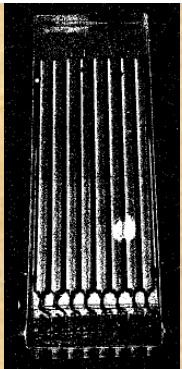
Ha appena pubblicato un articolo di rivista ("Recent development in proportional counter technique, *Helv.Phys.Acta*, 1950, vol 23, p.97) sui rivelatori a gas proporzionali con alta amplificazione che permettono di misurare al passaggio di una particella carica non solo la posizione ma anche l'energia depositata nel gas.

Il rivelatore a gas che descrive in questo articolo non è molto diverso dai moderni rivelatori a gas che si usano oggi.

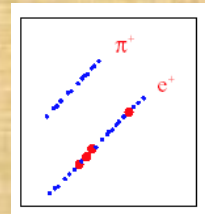
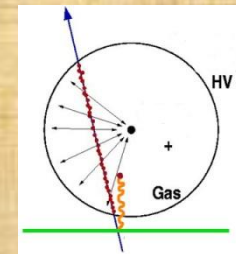
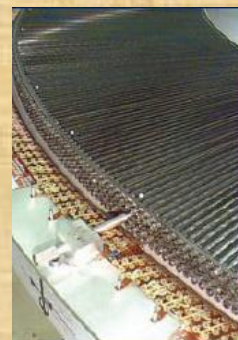
- fili di tungsteno di 50-100  $\mu\text{m}$  di diametro
- tubi catodici con diametri da 0.2 fino a 5 cm di diametro
- riempiti con Argon (o Xenon) + 20%  $\text{CH}_4$  per limitare la scarica
- alimentati con tensioni di 2-3 KV...



Insomma utilizza tubi a gas molto simili ai così detti "straw tubes" di 4 mm con i quali ATLAS ha costruito il grande rivelatore TRT a LHC !



Tubi proporzionali a gas usati da Pontecorvo



"Straw tubes" a gas proporzionali usati da ATLAS



# Fisico teorico con una visione profetica delle interazioni deboli

Dopo il famoso esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni e l'interpretazione datane da Fermi, Teller and Weisskopf che il mesotrone misurato nei raggi cosmici non era la particella che interagisce forte prevista dalla teoria di Yukawa, Pontecorvo immediatamente pubblica l'articolo *"Nuclear capture of mesons and the meson decay"* (*Phys. Rev.*, 1947, 72, p.246).

In questo articolo Pontecorvo osserva che le probabilità di cattura nucleare di un elettrone e di un muone sono praticamente identiche (se si tiene conto del pur grande fattore dovuto agli effetti cinematici che la diversità della massa delle due particelle comporta). Pontecorvo conclude poi l'articolo dicendo:

*"there exists fundamental analogy between  $\beta$ -processes and processes of emission and absorption of charged mesons"*

*("esiste una fondamentale analogia tra i processi del decadimento  $\beta$  ed i processi di emissione ed assorbimento dei mesoni carichi", cioè i muoni).*

**Pontecorvo per primo concepisce l'universalità muone-elettrone ( $\mu$ - $e$ ) nell'interazione debole !**

(idea che è la base fondante di tutta la teoria delle interazioni deboli)

"...I became fascinated by the particle which we call now the muon" scriverà poi ricordando quei giorni in un articolo di tipo storico *"The infancy and youth of neutrino physics"* (*Journal de Physique*, 1982, 12, vol. 43, p. C8-221) ...e subito vuol saperne di più:

- il muone decade in un elettrone ed un solo neutrino o due neutrini?
- decade anche in un elettrone ed un fotone?
- nel decadimento ci sono altre particelle oltre all'elettrone ed i neutrini ?



Un bravo tennista che gioca con l'universalità  $e$ - $\mu$  sotto la Torre di Pisa: lo vede così Misha Bilenky

# Un fisico brillante sia come teorico che come sperimentale

Pontecorvo, da buon fisico sperimentale, decide di rispondere alle domande che come teorico pone a se stesso.

Con una serie di esperimenti realizzati in collaborazione con E.P.Hincks ottiene le risposte alle sue domande:

- *Nel decadimento del muone la particella carica è un elettrone*
- *Il decadimento è cinematicamente consistente con un decadimento in un elettrone e due neutrini*
- *Non ci sono fotoni di alta energia nel decadimento del muone, cioè non si osserva nessun decadimento  $\mu \rightarrow e + \gamma$*

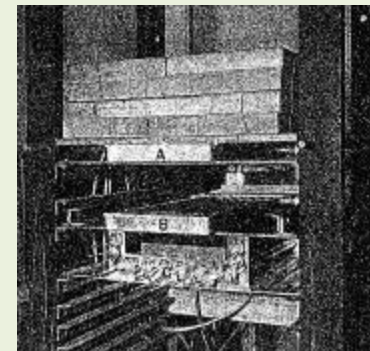
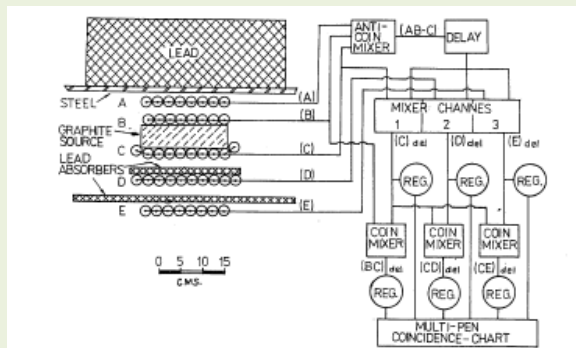
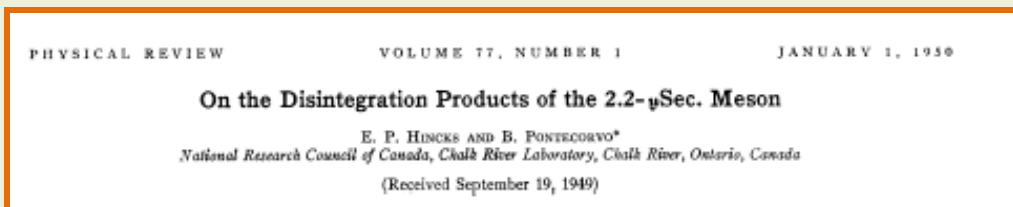
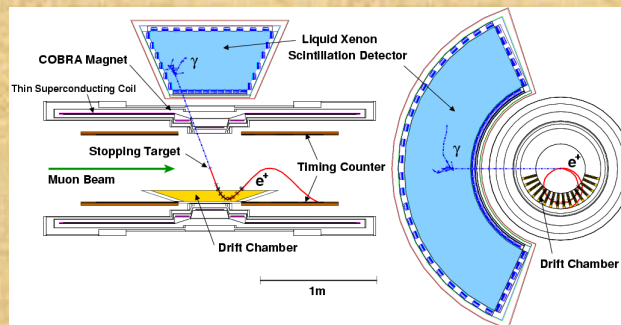


Fig.8. Experimental arrangement for the detection of bremsstrahlung, with simplified block diagram of the circuits. The lengths of the counters and source are ~40 cm

Ancor oggi, 65 anni più tardi, l'esperimento MEG sta cercando il decadimento  $\mu \rightarrow e + \gamma$

$$BR(\mu \rightarrow e + \gamma) < 5.7 \times 10^{-13} \quad (90\% \text{ C.L.})$$



Esperimento MEG



# Persona che crede fermamente nel Comunismo

Bruno Pontecorvo è un comunista convinto che crede in una vera società socialista ispirata ad un profondo senso di giustizia e di eguaglianza:

*"Le mie opinioni politiche sono di sinistra.*

*In origine esse erano dovute soprattutto al mio odio per il fascismo e, io penso ora, al senso di giustizia inculcatomi da mio padre....., opinioni dominate da una categoria non logica che io chiamo adesso "religione", una specie di "credo fanatico"....."*

Scrive queste frasi in una nota autobiografica del 1988 per la "Enciclopedia della Scienza e della Tecnica" (Arnoldo Mondadori Editore).

Quando scrive questa nota, nonostante tutto quello che era successo in Russia, è ancora convinto che con la "Perestroika" di Mikhail Gorbachev l'Unione Sovietica diventerà una vera democratica società socialista *"fondata su leggi avanzate e sui diritti dell'uomo"*.

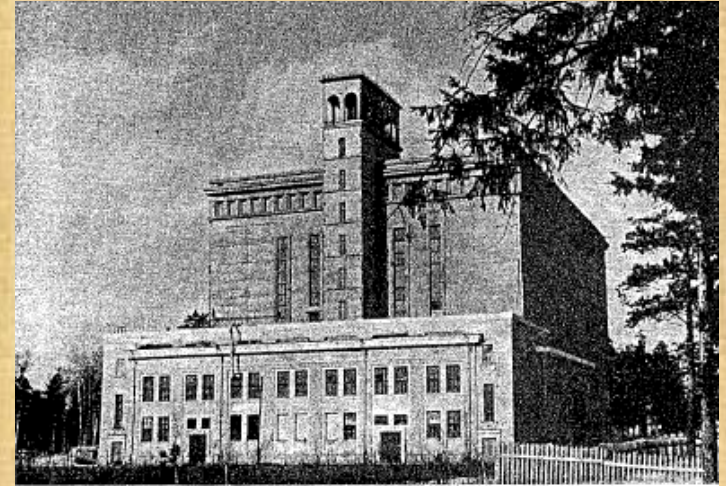
Indipendentemente dalle idee politiche di ciascuno, merita certamente molto rispetto questo uomo che ha fortemente creduto che una tale ipotetica società non è un'utopia ed ha dedicato tutta la sua vita cercando di realizzarla a discapito del proprio interesse personale.



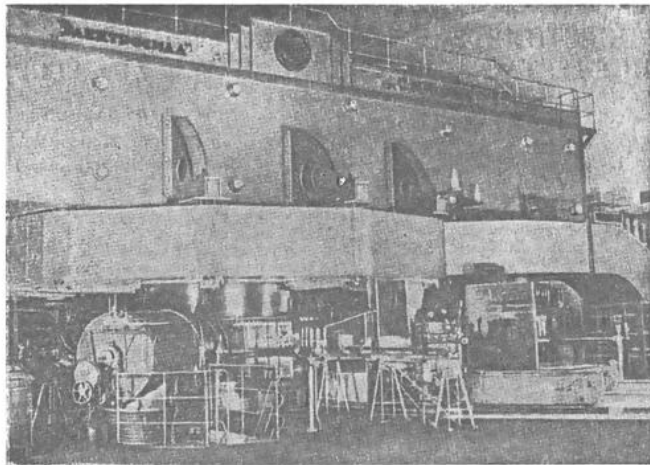
# Una nuova vita e nuovi esperimenti a Dubna

Sicuramente Bruno Pontecorvo deve essere stato entusiasta di arrivare allo "Institute of Nuclear Problems" di Dubna all'inizio di Novembre 1950, dove poteva lavorare al sincrociclotrone dell'istituto che all'epoca era il più potente del mondo e per di più vivere in una società che proclamava di voler realizzare il vero comunismo.

La sua fama di geniale discepolo di Fermi lo precede e suscita grande entusiasmo tra i fisici del Laboratorio. È abitudine anche tra colleghi del laboratorio chiamarsi col nome seguito dal patronimico e risulta quindi a tutti molto imbarazzante chiamarlo semplicemente Bruno, il suo solo nome di battesimo. Il padre di Bruno si chiamava Massimo per cui decisero di chiamarlo Bruno Maximovich, nome che gli rimase per sempre.



Edificio del sincrociclotrone

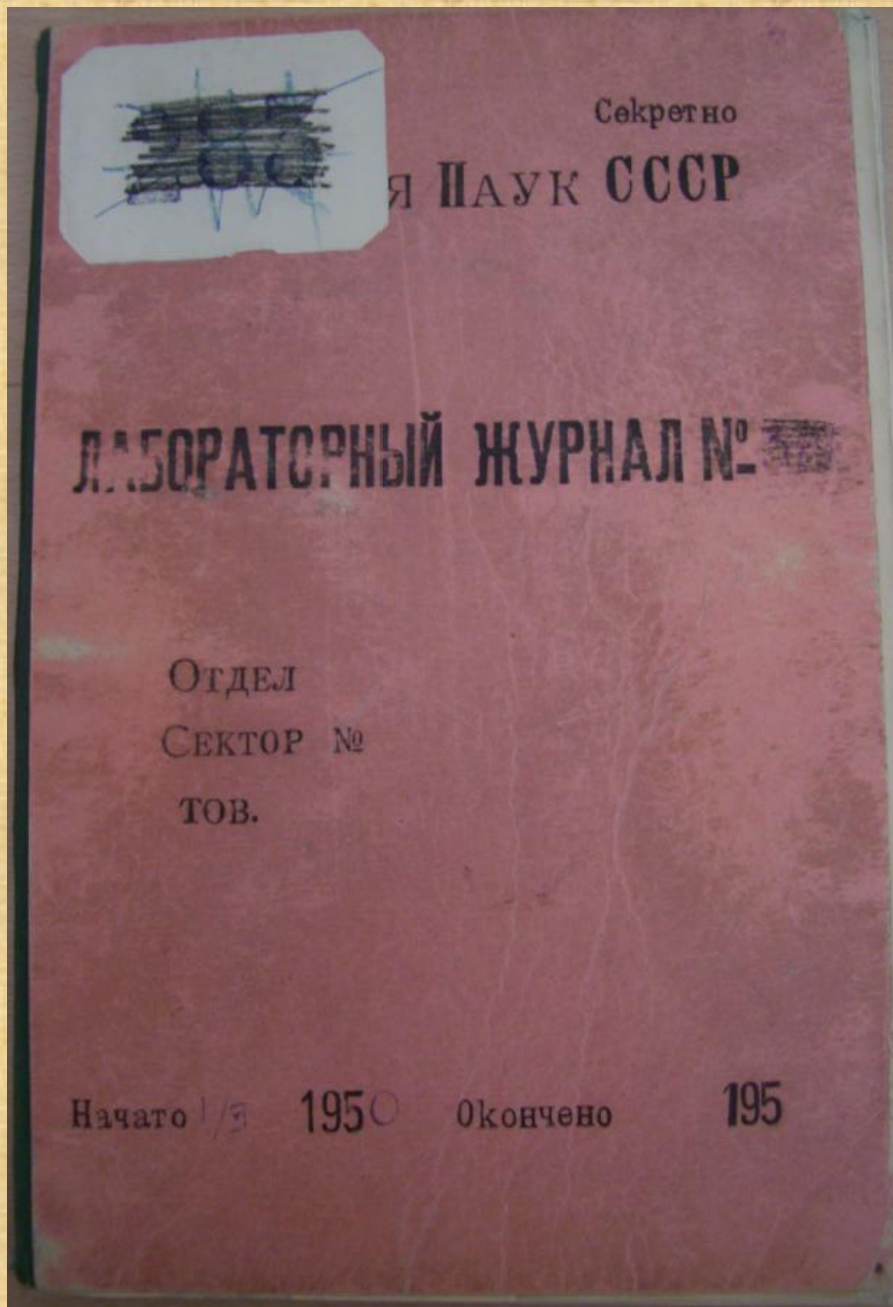


Il sincrociclotrone

	Kind of accelerated particles and their energy		
	280 MeV deuterons	560 MeV $\alpha$ 's	480 MeV protons
Internal target current ( $\mu A$ ) . . . . .	1	0,025	0,2-0,3
Extracted proton flux at a distance of 10 m from the magnetic channel ( $cm^{-2} sec^{-1}$ ) . . .	—	—	$1 \cdot 10^6$ ( $E_p = 460$ MeV)
Neutron flux at the maximum of the angular distribution 2 m from the internal target ( $cm^{-2} sec^{-1}$ ) . . . . .	$8 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^6$
Neutron energy at the maximum of the energy distribution (MeV) . . . . .	120	120	380
Halfwidth of the angular neutron distribution (radian) . . . . .	0,17	0,35	0,55
Process responsible for neutron production . .	Stripping	$\alpha$ -particle disintegration	charge exchange

Parametri dei fasci disponibili nel 1950





1<sup>st</sup> Novembre 1950

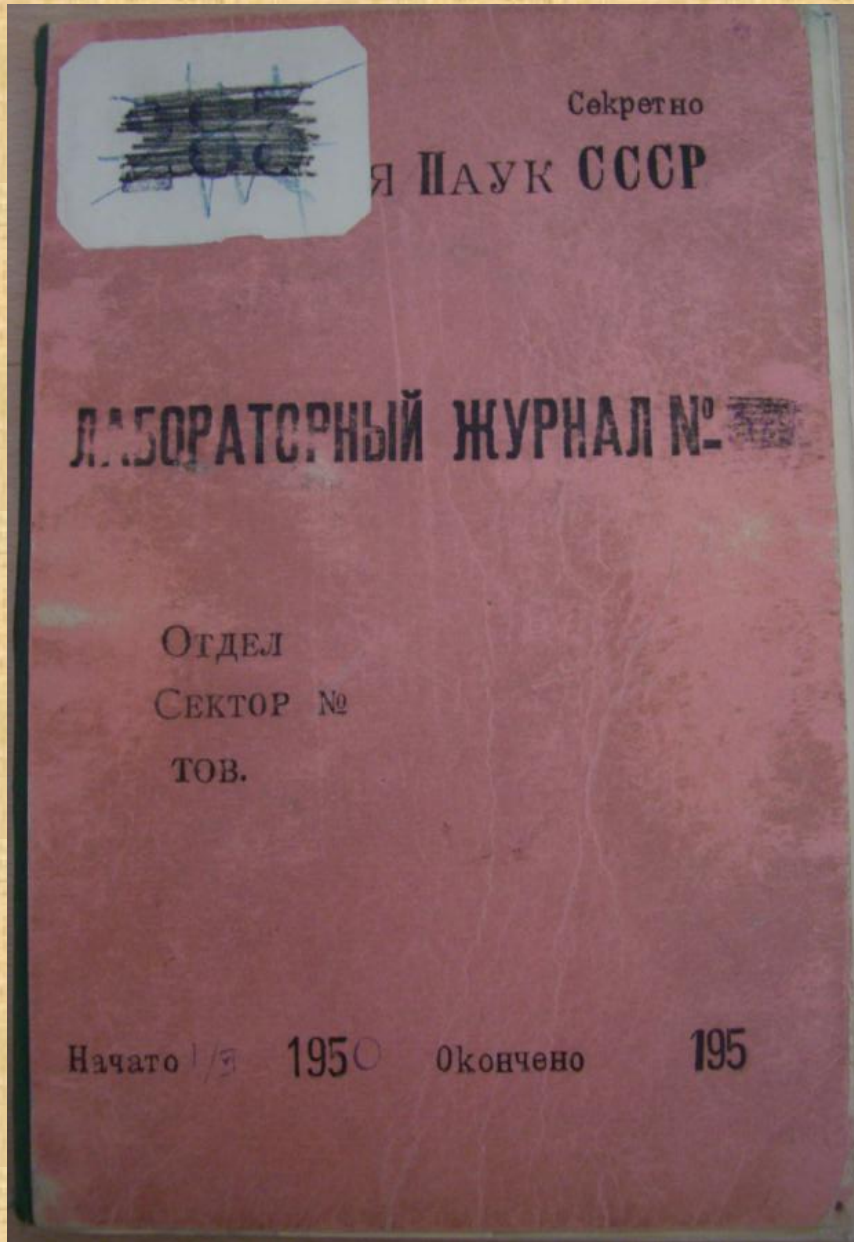
Pontecorvo inizia il suo lavoro di ricerca con il sincrociclotrone del "Institute of Nuclear Problems" di Dubna. La segretezza è rigorosa: non si può prendere appunti e scrivere formule se non su un quaderno ufficiale che viene riconsegnato a fine giornata e controllato periodicamente dalle autorità.

Questa è la foto del primo quaderno di appunti dove Pontecorvo riporta giornalmente la sua attività scientifica e quella del suo gruppo durante il suo primo periodo di lavoro col sincrociclotrone.

Ringrazio Gloria Spandre e Elena Volterrani che hanno avuto questo importante documento direttamente da Gil Pontecorvo, il figlio di Bruno.



# Quaderno di appunti di lavoro dal 01/11/1950 al 24/03/1952



Questo documento inedito è particolarmente interessante perché ci sono stati spesso dubbi su quale sia stata la vera attività scientifica di Bruno Pontecorvo nei primi cinque anni della sua permanenza in Russia.

Pontecorvo infatti ai primi di settembre del 1950 fa perdere le sue tracce dopo una breve vacanza con la famiglia in Italia. Di lui, della moglie e dei suoi tre figli non si sa più niente fino al 4 marzo del 1955 quando nella sede dell'Accademia Delle Scienze di Mosca tiene una conferenza stampa annunciando a giornalisti esteri i motivi che l'avevano portato a prendere la decisione di andare a vivere nell'Unione Sovietica.

Il giorno dopo la stampa internazionale da grande risalto alla notizia. Si parla con grande enfasi dello scienziato italiano che ha trafugato in Russia i segreti della bomba atomica americana e che sta collaborando alla realizzazione russa della bomba all'idrogeno.

Niente di più falso, come lui più volte ripeterà anche in molte altre successive occasioni.

**In questo documento credo ci sia la conferma più evidente che Bruno Maximovich Pontecorvo non ha mai lavorato né contribuito alla realizzazione della bomba atomica russa ma ha solo fatto ricerca di base in fisica delle particelle elementari.**

# Page 1 del quaderno

1 Novembre (1950)

- Neutron production by cyclotron particles -

1<sup>o</sup> Hoeloped

- Neutron production by cyclotron particles - 1

In the experiment with the water tank, one can get an idea of the neutron energy by measuring the space distribution of neutrons (for example measure  $r^2|_{Av}$ ). A comparison at different energies is interesting.  $r^2|_{Av}$  would be probably representative of the "evaporation" process, while the mean ~~mean~~ relaxation length would be probably characteristic of the "see knock on" process.

**"In the experiment with the water tank, one can get an idea of the neutron energy by measuring the space distribution of neutrons (for example measure  $r^2|_{Av}$ )."**

(I neutroni sono prodotti a partire da un fascio di particelle  $\alpha$  accelerate a 560 MeV e fatte collidere su una targhetta interna. Pertanto la loro distribuzione in energia non è conosciuta).

- Fission from highly excited states -  
 The normal fission happens usually from low excited states ( $\approx 10$  MeV), with high energy bombardment. Now, as the fission of medium A shows, there must be fissions ~~about~~ arising from very highly excited states, in very few cases. These fissions from highly excited states must release plenty of energy, ~~the~~ in U or Th. The difficulty in detecting them is "electrical" noise. This is stated to be  $\sim 1/\text{min}$ . It is possible to reduce it by gas amplification.

2

H<sup>4</sup> problem - Is it possible to detect the H<sup>4</sup> particles inside the chamber? One could use the magnetic field of the cyclotron to curve the electrons.

3 November

According to Anatoly Alexandrovich, the experiment with H<sup>4</sup> is possible "inside the tank", with an arrangement of 3 counters in coincidence.

- Fission from highly excited states -  
 .....The difficulty in detecting them is "electrical" noise. This is stated to be  $\sim 1/\text{min}$ . It is possible to reduce it by **gas amplification**

H<sup>4</sup> problem - Is it possible to detect the H<sup>4</sup> particles inside the chamber? One could **use the magnetic field of the cyclotron to curve the electrons.**  
 3<sup>th</sup> November

According to Anatoly Alexandrovich, the experiment with H<sup>4</sup> is possible "inside the tank", with an arrangement of 3 counters in coincidence.

Multiple meson production  
 The threshold for multiple <sup>(double)</sup> production, for example:  
 $n+p \rightarrow p+n + \pi^+ + \pi^-$  or  $n+p \rightarrow D + \pi^+ + \pi^-$   
 $p+p \rightarrow n+n + \pi^+ + \pi^+$   
 $p+p \rightarrow p+p + \pi^+ + \pi^-$  (1)  
 $p+p \rightarrow p+n + \pi^+ + \pi^0$   
 etc.

Incidentally, note that the detection of  $\pi^-$  in alpha count (energy of  $\sim 10^2$  eV) would be a proof of pure multiple, according to (1).

is  $\sim 600$  MeV in H. But in heavy materials the threshold is of the order of 300 MeV! An experiment can be done as follows: a)  $2 + p \rightarrow 2 + 3 + 2\pi^- + \dots$

I irradiate a target, and separate chemically the element 2+3 - Let us evaluate the  $\sigma$  for the emission of  $2\pi^-$ . It is:  
 $\sigma_{(2\pi^-)} \approx \sigma_{(500p)} \times \frac{\sigma_{(2\pi^-)}}{\pi R^2} = 10^{-26} \times \frac{10^{-28}}{10^{-24}} \approx 10^{-30} \text{ cm}^2$

In Pb, this gives a mean free path for double  $\pi^-$  equal to:  
 $l = \frac{200}{12 \times 0.6 \times 10^{24}} \text{ cm} = 3 \times 10^7 \text{ cm}$

Multiple meson production  
 The **threshold for multiple (double) production**, for example:  
 $n+p \rightarrow p+n + \pi^+ + \pi^-$  or  $n+p \rightarrow D + \pi^+ + \pi^-$   
 $p+p \rightarrow n+n + \pi^+ + \pi^+$   
 $p+p \rightarrow p+p + \pi^+ + \pi^-$   
 $p+p \rightarrow p+n + \pi^+ + \pi^0$   
 etc.

is  $\sim 600$  MeV in H. But in heavy material the threshold is of the order of 300 MeV. An experiment can be done as follows: .....



## Proton beam, internal scattering

It is easy to see that the nuclear scattering is very important. So the intensity in point 5 is mainly due to <sup>nuclear</sup> scattered protons, <sup>and not coulomb</sup> This effect is tremendous, and it is certain that Deuterons,  $H^3$  particles, etc, also come out of the cyclotron. One way of measuring this, of course, is measuring the ionization in a proportional counter

## Cerenkov detector

It may well be that the "water Cerenkov detector", about 30 cm long, is the "perfect" neutral meson detector. In fact  $\gamma$  ray of small energy are biased off, and recoil proton etc are not detected

## Organic solution -

A organic solution detects, for a given energy loss, more electrons than  $\alpha$ . For this may also be used

## Estimate of m.f.p of $\pi^0$ in nuclear matter.

The mean free path of charged mesons in nuclei can be investigated in photoplates. To investigate the mean free path of  $\pi^0$ , the only way is to use as a ~~nuclear matter~~ absorber the nuclear matter itself, as it is necessary to have a substance of such density that the m.f.p for interaction is  $\ll \lambda_{decay}$ . This means that one must use as an absorber the same nucleus which produces mesons. Using  $\gamma$ , study the ratio  $\frac{\sigma_{\pi^+ + \pi^-}}{\sigma_{\pi^0}}$  as a function of  $Z$ .

Pontecorvo continua a scrivere fino a pagina 9 del quaderno le sue idee su quali siano gli esperimenti interessanti da fare con questo acceleratore e quali siano le tecniche e i rivelatori più idonei per realizzarli.

## - Proton beam, internal scattering -

It is easy to see that the nuclear scattering is very important. So the intensity in point 5 is mainly due to nuclear scattered protons (and not coulomb). This effect is tremendous, and it is certain that Deuterons,  $H^3$  particles etc, also come out of the cyclotron. One way of measuring this, of course, is measuring the ionization in a proportional counter

## Cerenkov detector

It may well be that the "water Cerenkov detector", about 30 cm long, is the "perfect" neutral meson detector. In fact  $\gamma$  ray of small energy are biased off, and recoil proton etc are not detected

## Organic solution -

A organic solution detects, for a given energy loss, more electrons than for  $\alpha$ , so this may also be used

## A estimate of m.f.p of $\pi^0$ in nuclear matter

The mean free path of charged mesons in nuclei can be investigated in photoplates. To investigate the mean free path of  $\pi^0$ , the only way is to use as an absorber the nuclear matter itself, as it is necessary to have a substance of such density that the m.f.p for interaction is  $\ll \lambda_{decay}$ . This means that one must use as our absorber the same nucleus which produces mesons. Using  $\gamma$ , study the ratio  $\sigma_{\pi^+ + \pi^-} / \sigma_{\pi^0}$  as a function of  $Z$ .

A pagina 9 Pontecorvo scrive solo un breve commento "On the multiple production of mesons". Nella restante parte della pagina c'è scritto, in senso capovolto, il un draft di un articolo.

- On the multiple production of mesons -

In discussing the phenomenon of multiple production, from an experimental point of view, it is necessary to remember the possibility that an appearance of multiple production may be given by the production of heavy mesons (spin integer, strong interaction with matter), which of course, decay into  $\pi$  mesons immediately, giving the appearance of multiple production, while, in fact there maybe only one particle produced per hit.

- On the multiple production of mesons -

In discussing the phenomenon of multiple production, from an experimental point of view, it is necessary to remember the possibility that an appearance of multiple production may be given by the production of heavy mesons (spin integer, strong interaction with matter), which of course decay into  $\pi$  mesons immediately, giving the appearance of multiple production, while, in fact there maybe only one particle produced per hit.

... with a compensating filter of Al (2.5cm) in front of the collimator, equivalent (2.5cm) in... This method is preferable for small angle of detection to the ..... (?) method.

Apparentemente dopo le prime 9 pagine Pontecorvo smette di scrivere su questo quaderno e riprende a scriverci il 14 settembre del 1951 (si veda la prossima slide) girando il quaderno e iniziando dall'ultima pagina.

- On the multiple production of mesons -

In discussing the phenomenon of multiple production, from an experimental point of view, it is necessary to remember the possibility that an appearance of multiple production may be given by the production of heavy mesons (spin integer, strong interaction with matter), which of course, decay into  $\pi$  mesons immediately, giving the appearance of multiple production, while, in fact there maybe only one particle produced per hit.

... with a compensating filter of Al (2.5cm) in front of the collimator, equivalent (2.5cm) in... This method is preferable for small angle of detection to the ..... (?) method.

- On the multiple production of mesons -

In discussing the phenomenon of multiple production, from an experimental point of view, it is necessary to remember the possibility that an appearance of multiple production may be given by the production of heavy mesons (spin integer, strong interaction with matter), which of course decay into  $\pi$  mesons immediately, giving the appearance of multiple production, while, in fact there maybe only one particle produced per hit.



Pontecorvo riprende a scrivere sul quaderno il 14 settembre 1951 iniziando dall'ultima pagina (la numero **100**) dopo aver capovolto il quaderno. Ha ora finalmente deciso quale esperimento fare: "Experiment on production of mesons by neutrons":

$$\frac{A \times 1538 \times 10^4}{B \times 10^6} \times \frac{C \times 10^4}{D \times 10^2} \times E = \frac{F}{G} \times 10^6 \times 10^3 \times 10^3$$

Diagram showing particle tracks and detector components labeled A, B, C, and D. Includes handwritten notes like "Antineutrino" and "40/cm".

Chemical reactions:

- $\pi^+ + p \rightarrow n + \gamma$
- $\pi^+ + p \rightarrow n + \pi^0$
- $\pi^+ + n \rightarrow \pi^+ + p$
- $\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p$
- $\pi^+ + p \rightarrow \pi^0 + p$
- $\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + n$
- $T^+ + p \rightarrow \pi^+ + n$

Other notes: "ABC - 60", "10000/hour", "150/sec", "750 x 30", "2 Ni<sub>2</sub>N<sub>2</sub>Z = C", "061".

14 September

Experiment on production of mesons by neutrons:

- 1)  $\pi^0$   
It is necessary: 1) the "radiator" R  
2) the "converter" C  
3) the "absorber" A between the last counters  
4) the absorber of production T

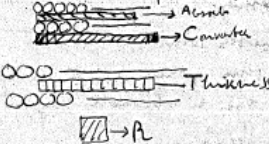
A → The radiator must be a "sphere" of diameter = m.f.p. for  $\gamma$ . *exp. Diameter 10 cm approx.*

C → The converter must be 1 cm Pb, area equal to the counter tray area.

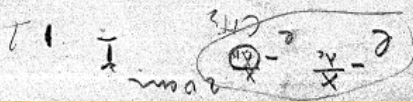
A → The absorber between counters must be 1 cm  $\text{Al}$ , area equal to the tray counter, small.

T → Must be about 1 cm thin of Pb and 1 cm thin of Cu (to see that the collision is really  $\gamma$ ), area equal to the tray counter.

The geometry as follows:



The detecting counters (five away) are the trouble tray to increase the coincidence efficiency.



14 September

Experiment on production of mesons by neutrons:

- 1)  $\pi^0$   
It is necessary:
  - 1) the "radiator" R
  - 2) the "converter" C
  - 3) the "absorber" A between the 2 last counters
  - 4) the absorber of  $\gamma$  radiation T

- R → The radiator must be a "sphere" ....
- C → The converter must be 1 cm Pb,....
- A → The absorber between counters ....
- T → Must be about 1 cm thin of Pb,....

The geometry as follows:

E continua a scrivere quello che oggi chiameremmo il "Technical Proposal" dell'esperimento...



A settembre 1951, meno di un anno dopo il suo arrivo a Dubna, Bruno Maximovich Pontecorvo è un rispettato **group leader di un gruppo di giovani fisici** (Vladimir, Anatol, Alex, Adolph and George Selivanov). In frequenti group meeting assegna ad ogni membro del gruppo il lavoro da fare, stabilisce il programma sperimentale da seguire, definisce come realizzare certe misure, etc.etc..:

- 1) Vladimir: Finish work on  $H^4$  in the present variant, + report. Help of Anatol, Alex. *Kirpa.*
- 2) Adolph: Finish work on mesons with radioactive indicators + report. Have  $\beta$  counters ready. Have  $\alpha$  counter ready.

- 3) George
  - 1) Finish work on duty factor + report.
  - 2) Conclude on the work of production of  $\pi^0$  in C by neutrons.
  - 3) Initiate electronic detection of mesons in forest.
  - 4) Finish ~~one~~ <sup>one</sup> channel coincidence ~~counter~~ <sup>unit</sup> consisting of 3 circuits + scintillator ( $10^{-8}$  sec), on the principle:
 

double coincidence  $10^{-8}$ , triple  $10^{-6}$   
+ 1 channel coincidence anti, external.  
external, coinc, or anticoinc.

Remember delay of  $5 \times 10^{-8}$  to measure accidental.

- 4) Anatol: finish work + write <sup>2</sup> reports
  - a) angular
  - b) total work on secondary neutrons

Program

- 1) Measure the effective duty factor of the cyclotron as follows - From this:
  - a) Measure the resolving time of the system (using continuous sources).
  - b) Measure the accidental rates when the cyclotron works.

Experiment a: In the cyclotron building with a distance of two traps of about 10m, and with 2 sources, measure:

  - 1) Single rates, and coincidences:  $C-D-A-B$  invol. coinc.
  - 2) Same with no source for collecting values in subsequent experiment.

Experiment b:

  - 1) When cyclotron works, single rates and coincidences rates.

Measurement of  $\alpha$ , duty factor.

- I) Take 2 single counters. +
- II) Put them on the beam, far away with from each other, and measure A B (AB)
- III) ~~Verify that~~ Verify that the cyclotron is constant.
- IV) ~~In various conditions of~~ Measure also after shutdown, A, B (AB).
- V) Write all data relative to the cyclotron
- VI) If <sup>the</sup> experiments <sup>are</sup> reasonably reproducible, try various conditions of cyclotron.

# L'attività di tutto il gruppo è molto ben documentata giornalmente

Workshop time - 180 Telescope  
 \*480 Protot.  
660

It was decided to cancel \* 660 for that the time for us will be:

180	} Telescope G.I
180	
100	} Other telescope.
100	
100	} small work
100	
<u>660</u>	small chassi
	Prot + Verschluss
	probieren.


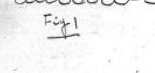
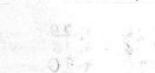
Of these:  $\approx$  February 16  $\approx$  24<sup>h</sup> television cylinders

- 1) ~~3) 2 cmolobn~~
- 2) reports
- 3) 2 cmolobn = }
- 4) ~~Tomman~~

27 February - Workshop time: 630.

2 telescope : 400 hrs  
 Fe shield : 25 hrs  
 chassi : 30 hrs

15. Consider  
 To test the various coincidence and anticoincidence efficiency, make the following experiments. Pro memoria:  
 Big pink box: A 997  
 Big black box: C' 1263  
 Very wide tube box: A 885  
 Other tube box: B. 885

- I<sup>st</sup> experiment, testing an actual parameter  
 A =   
 C =   
 C' =   
 Fig 1

Measure  $(ACBC')$  same but one channel


$$(ACBC') = 57x4+0 \quad 56x4+1$$

$$(ABC'-C) = 15x4+0 \quad 2x4+3$$

$$(ABC'-C) = 41x4+2 \quad 35x4+2$$

with no voltage on C.

### II experiment

  
 Fig 2

$$(AC'BC) = 113 / 2m$$

$$(ABC-C') = 53 / 2m$$

$$(ABC-C') = 140$$

with no voltage on C.

This is no good.

- Fig 2 - Report experiment after change of electronic.  
 $(AC'BC) = 54x4+1 \quad 51x4+3$   
 $(ABC-C') = 15x4+0 \quad 15x4+3$   
 $(ABC-C') = 42x4+3 \quad 43x4+2$   
with no voltage on C.

Dez. updaten.  
 A 124  
 B 46 } x64  
 C 94  
 D 115  
 BCD-A 20

Note: In this case the system was completed, but not the monitor! Take the time.

updaten.  
 A 1400  
 B 514 } x64  
 C 669  
 D 656  
 BCD-A 10x64+60

977 / 3<sup>mm</sup>

Dez. updaten.  
 A 1436  
 B 605 } x64  
 C 693  
 D 700  
 BCD-A 5x64+26

1000 / 3<sup>mm</sup>

Feb. updaten.  
 A 883  
 B 421 } x64  
 C 643  
 D 651  
 BCD-A 2x64+27

993 / 3<sup>mm</sup>

Feb. updaten.  
 A 847  
 B 571 } x64  
 C 612  
 D 615  
 BCD-A 4x64+17

1007 / 3<sup>mm</sup>

Mar. updaten.  
 A 1806  
 B 534 } x64  
 C 694  
 D 677  
 BCD-A 6x64+33

982 / 3<sup>mm</sup>

Tempo richiesto in officina meccanica per costruire il supporto dei rivelatori

Misure di efficienza di varie coincidenze e anticoincidenze dei rivelatori

La presa dati



# L'attività di tutto il gruppo è molto ben documentata giornalmente

Final results of all measurements

	When	Observed	Corrected
C		1	1
Al	27 febr.	0.70 ± 0.10	0.85 ± 0.12
Fe	26, 25 febr.	0.93 ± 0.08	0.46 ± 0.11
Cu	26, 25 febr.	0.82 ± 0.09	0.45 ± 0.13
Sn	26, 22 febr.	0.27 ± 0.05	0.35 ± 0.07
Pb	27 febr. 26 febr.	0.10 ± 0.04	0.14 ± 0.06

$$\frac{\sigma_{\text{el}}}{\sigma_C} = \frac{\text{Eff}_{\text{el}}}{\text{Eff}_C} \times \frac{56.3}{\left(\frac{\text{Weight}}{A}\right)_{\text{el}}} \cdot \text{elem.}$$
  

$$\frac{\sigma_{\text{Al}}}{\sigma_C} = 0.85 \times \frac{56.3}{\frac{813}{27}} = 1.6 \pm 0.2$$
  

$$\frac{\sigma_{\text{Fe}}}{\sigma_C} = 0.46 \times \frac{56.3}{\frac{660}{55.8}} = 2.2 \pm 0.5$$
  

$$\frac{\sigma_{\text{Cu}}}{\sigma_C} = 0.45 \times \frac{56.3}{\frac{668}{63.6}} = 2.4 \pm 0.5$$
  

$$\sigma_{\text{Sn}} = 0.35 \times \frac{56.3}{\frac{550}{118.7}} = 4.3 \pm 0.8$$
  

$$\sigma_{\text{Pb}} = 0.14 \times \frac{56.3}{\frac{328}{207}} = 5 \pm 2$$
  

Be	$\frac{\sigma_{\text{el}}}{\sigma_C} (n, \pi^0)$	Cells (n)	$\frac{\sigma_{\text{el}}}{\sigma_C} (n, \pi^+)$
C	1	0.24	1
Al	1.6 ± 0.2	0.58	2.1
Fe	2.2 ± 0.5		2.8 ± 1.3
Cu	2.4 ± 0.5	1.03	2.9 ±
Sn	4.3 ± 0.8	1.64	7.0 ± 3.6 ± 2
Pb	5 ± 2	2.58	11
U		2.92	3 ± 1.6

Summary result Be-C (29 febr. 52)

C c krombin:	565 569 542 520 517 511 592 <u>3826</u>	C: Fey kromb.	231 287 248 278 276 277 306 <u>1962</u>
Be c kromb:	571 501 571 523 508 547 560 <u>3781</u>	Be: Fey kromb:	258 251 251 246 263 238 295 <u>1802</u>
Torino c kromb:	239 258 301 267 278 264 275 <u>1882</u>	Torino Fey kromb:	155 143 188 149 166 165 159 <u>1120</u>

C effect: (3826 - 1882) - (1962 - 1120) = 1944 - 842 = 1102 ± 92

Be effect: (3781 - 1882) - (1802 - 1120) = 1899 - 682 = 1217 ± 91

$$\frac{\sigma_{\text{Be}}}{\sigma_C}, \text{ observed} = 1.1 \pm 0.16$$

Weight C = 329.18  
Weight Be = 332.26

$$\frac{\sigma_{\text{Be}}}{\sigma_C} = \frac{\text{Eff}_{\text{Be}}}{\text{Eff}_C} \times \frac{\left(\frac{\text{Weight}}{A}\right)_C}{\left(\frac{\text{Weight}}{A}\right)_{\text{Be}}} = 1.1 \times \frac{329.2}{\frac{12.01}{332.26}} = 1.1 \times \frac{329.2}{9.02} = 1.1 \times 36.5 = 40.15$$
  

$$= 0.81 \pm 0.12 \quad \text{Corrected}$$
  

0.79 ± 0.12



# Il discorso al group meeting del 6 marzo 1952

"A mio avviso le relazioni personali nel nostro gruppo non sono state soddisfacenti", scrive Pontecorvo in modo gentile ma perentorio redarguendo severamente i suoi bravi ma ambiziosi collaboratori che non collaborano in modo corretto tra loro. È capitato molte volte che alcuni membri del gruppo abbiano chiesto aiuto su problemi di elettronica a persone di altri gruppi mentre c'è all'interno del gruppo G.I., una persona molto competente in elettronica. Pontecorvo conclude pertanto in modo deciso che questo stato di cose non è accettabile e deve cambiare radicalmente per l'interesse di tutto il gruppo.

March 6, 1952

We have this meeting in relation to some reorganization of our group. The first thing is that there is a new addition. The second is that we must have internal discussions more frequently. For this we will make a seminar every week, of 1<sup>st</sup> or 2<sup>nd</sup> on Thursday at 6<sup>th</sup>. This seminar will be an informal argument and will have 2 parts: a) Briefly, ~~very~~ mostly of group will describe the progress of the week.

b) There will be a brief mention of what has been the progress in the week of interesting in the week's new one or two foreign journals to be given.

The third is the most important thing that we have to discuss. In my opinion personal solutions inside our group were ~~not~~ not satisfactory. There were many examples where members of our group, for example, went for advice to other groups, while there exist in our group a very well qualified man. I am afraid speaking our group, because of these solutions, could not make use of the full capabilities of our group. I think that we have not discussed now whose is fault. And also we must not discuss, in general, the past. The only frame in which we must agree, is to forget the to admit that the situation was not satisfactory and we must forget change it radically. How can we change it radically, for the good of the total scientific production of the group? For this is the necessary that it is established since collaboration in our group. What does this

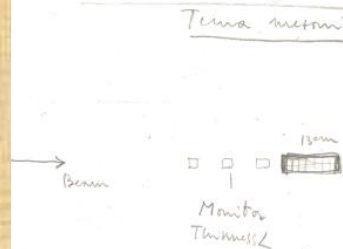
mean? This means that G.I. will help, with his experience of electronic design and construction, other members of group. This collaboration must be friendly. This collaboration must also be 2 ways, i.e. in the interest of all. Specifically, what does this mean reorganization mean:

- I) G.I. will help in general with advice about work of the group and technical problems.
- II) In addition to advice, there will be a more concrete form. Give someone apparatus, and even ~~take~~ the help of construction and testing, in other words full collaboration on a scientific team. This means, that on a given team, G.I. will look make in this role of the work that on the work in the group itself.
- III) The decision that applies to the laws.
- IV) It is essential that, generally speaking, every team has more or less his own apparatus. This means, generally, not platform of apparatus from a few to other. (The whole collaboration), generally speaking, each on own continue to work only with group I've on his own team. This is necessary

68 character,

because of IV want to see in machine ~~type~~ and not to be in construction. The interest of other people in the group will be of course that will have advice and be trained, but the ~~idea~~ of I must be will participate in experiments not any.

~~The main aim is to have a good scientific group~~



# Il discorso al group meeting del 6 marzo 1952

March 6, 1952

*We have this meeting in relation to some reorganization of our group.*

*The first thing is that there is a new addition.*

*The second is that we must have internal discussion more frequently. For this we will make a seminar every week, of  $\approx 1^h$ , on Thursday at 6<sup>h</sup> ...omissis...*

*The third is the most important thing that we have to discuss. In my opinion personal relations inside our group were ~~very bad~~ not satisfactory. There were many examples where members of our group, for example, went for advice in electronics to other group, while there exists in our group a very well qualified man in electronics G.I.*

*...omissis.... the situation was not satisfactory and we must change it radically, for the interest of the total scientific production of the group. For this is necessary that it is established more collaboration in our group.*

*What does this mean? This means that G Iv. will help, with his experience of electronic design and construction, other members of the group. This collaboration must also be 2 ways, i.e. in the interest of all. Specifically, what this reorganization means:*

*I) G.I. will help in general with advice other member of the group on electronic problems*

*II) In addition to advice, there will be more concrete form. Give scheme apparatus, and even of constructing and testing, in other words full collaboration on a scientific thema.*

*III) It is essential that, generally speaking, every thema has more or less his own apparatus. IV)....omissis, ....Cast (?) and Gean (?) continue to work only with George Ivan.. on his own theme. This is necessary because G Iv wants to work(?) in nuclear physics and not to be working on constructing apparatus.*

*V) The interest of other people in the group will be of course that will have advice and be trained, of G. I. that he will participate in experiments ....*

*~~VI) Remember .....is good what is for everybody~~*





Questo problema di avere collaborazione tra i membri del gruppo ed in particolare tra l'esperto in elettronica e gli altri fisici del gruppo è considerato da Pontecorvo un problema molto importante e pertanto scrive un documento su come pensa sia possibile risolvere il problema. Sostiene che è ormai necessario, data la complessità degli esperimenti, che uno scienziato si specializzi su particolari aspetti tecnici per quanto spiacevole questo possa essere.

- Electronics and Nuclear Physics -

Recent days research in nuclear physics requires a great deal of modern electronic apparatus. Until a few years ago, ~~there~~ <sup>it was the practice</sup> natural that <sup>for</sup> the experimental physicists produced himself all the electronic equipment necessary for his experiments. However, <sup>knowledge of</sup> <sup>the</sup> <sup>availability</sup> <sup>of</sup> <sup>electronic</sup> <sup>equipment</sup> <sup>is</sup> <sup>not</sup> <sup>efficient</sup>, as it must be close to everybody, <sup>and</sup> <sup>in</sup> <sup>electronic</sup> <sup>groups</sup>, possessing "standard equipment" and developing new advanced techniques is very desirable. Without an electronic group, the production of scientific results will suffer from <sup>effects</sup> the contradiction between the <sup>laboratory</sup> <sup>and</sup> <sup>the</sup> <sup>individual</sup> <sup>researcher</sup>. <sup>of</sup> <sup>the</sup> <sup>laboratory</sup> <sup>and</sup> <sup>the</sup> <sup>individual</sup> <sup>researcher</sup>.

The <sup>presence</sup> of an electronic group requires a good collaboration. The presence of an electronic group not only is necessary to produce the large quantity of equipment necessary for physics research. It is necessary also because it is not possible to expect that every physicist in the laboratory can produce first class equipment as a "professional" electronic man. There are of course men which manage to be very competent in the science of electronics and in the science of nuclear physics, but there are exceptions. If ~~we~~ <sup>we</sup> <sup>think</sup> <sup>these</sup> <sup>will</sup> <sup>be</sup> <sup>the</sup> <sup>men</sup> <sup>which</sup> <sup>can</sup> <sup>advance</sup> <sup>our</sup> <sup>knowledge</sup> <sup>in</sup> <sup>the</sup> <sup>field</sup> <sup>of</sup> <sup>nuclear</sup> <sup>physics</sup> <sup>out</sup> <sup>of</sup> <sup>electronics</sup>. <sup>If</sup> <sup>we</sup> <sup>expect</sup> <sup>that</sup> <sup>every</sup> <sup>man</sup> <sup>in</sup> <sup>the</sup> <sup>laboratory</sup> <sup>must</sup> <sup>be</sup> <sup>able</sup> <sup>to</sup> <sup>produce</sup> <sup>first</sup> <sup>class</sup> <sup>equipment</sup> <sup>as</sup> <sup>a</sup> <sup>"professional"</sup> <sup>electronic</sup> <sup>man</sup>, <sup>we</sup> <sup>are</sup> <sup>removing</sup> <sup>one</sup> <sup>of</sup> <sup>the</sup> <sup>most</sup> <sup>important</sup> <sup>factors</sup> <sup>of</sup> <sup>the</sup> <sup>present</sup> <sup>day</sup> <sup>high</sup> <sup>productivity</sup>, i.e. the specialization. The specialization, in science and techniques is <sup>a</sup> <sup>necessity</sup>, however unpleasant it may be.

The presence of an electronic group requires not only <sup>formal</sup> <sup>continuous</sup> <sup>control</sup> <sup>between</sup> <sup>the</sup> <sup>physicist</sup> <sup>and</sup> <sup>the</sup> <sup>electronic</sup> <sup>man</sup> but also <sup>an</sup> <sup>absolute</sup> <sup>equality</sup> <sup>of</sup> <sup>"status"</sup> <sup>between</sup> <sup>the</sup> <sup>man</sup> <sup>involved</sup> <sup>in</sup> <sup>electronics</sup> <sup>and</sup> <sup>the</sup> <sup>man</sup> <sup>involved</sup> <sup>in</sup> <sup>nuclear</sup> <sup>physics</sup>. This <sup>condition</sup> is often absent - point is very

The ~~electronics~~ <sup>electronics</sup> is important, because in some physics laboratories there is the tendency to put nuclear physics on a higher plane than electronics. This "tendency" is without foundation, and is <sup>usually</sup> <sup>to</sup> <sup>effect</sup> <sup>the</sup> <sup>best</sup> <sup>of</sup> <sup>the</sup> <sup>physicists</sup>. It is true that the discovery of a new particle is more important than the construction of a microscope, but it is equally true that the introduction of negative feedback, and the development of the travelling wave amplifier is much more important than <sup>the</sup> <sup>observation</sup> <sup>of</sup> <sup>a</sup> <sup>new</sup> <sup>particle</sup>. <sup>Electronics</sup> <sup>and</sup> <sup>physics</sup> <sup>are</sup> <sup>2</sup> <sup>parts</sup> <sup>of</sup> <sup>physics</sup>. <sup>If</sup> <sup>the</sup> <sup>status</sup> <sup>of</sup> <sup>electronics</sup> <sup>is</sup> <sup>kept</sup> <sup>low</sup>, <sup>it</sup> <sup>is</sup> <sup>impossible</sup> <sup>to</sup> <sup>have</sup> <sup>a</sup> <sup>collaboration</sup> <sup>between</sup> <sup>electronics</sup> <sup>and</sup> <sup>nuclear</sup> <sup>physicists</sup>. <sup>Because</sup> <sup>the</sup> <sup>former</sup> <sup>will</sup> <sup>not</sup> <sup>want</sup> <sup>to</sup> <sup>"change</sup> <sup>profession"</sup> <sup>and</sup> <sup>do</sup> <sup>nuclear</sup> <sup>physics</sup>. <sup>This</sup> <sup>is</sup> <sup>impossible</sup>. <sup>In</sup> <sup>this</sup> <sup>case</sup> <sup>there</sup> <sup>will</sup> <sup>be</sup> <sup>no</sup> <sup>collaboration</sup>. <sup>The</sup> <sup>professional</sup> <sup>electronic</sup> <sup>man</sup> <sup>will</sup> <sup>want</sup> <sup>to</sup> <sup>do</sup> <sup>more</sup> <sup>experiments</sup> <sup>and</sup> <sup>the</sup> <sup>physicist</sup> <sup>will</sup> <sup>not</sup> <sup>work</sup> <sup>in</sup> <sup>a</sup> <sup>field</sup>. <sup>The</sup> <sup>possibility</sup> <sup>of</sup> <sup>existence</sup> <sup>of</sup> <sup>an</sup> <sup>electronic</sup> <sup>group</sup> <sup>is</sup> <sup>of</sup> <sup>the</sup> <sup>greatest</sup> <sup>importance</sup>. <sup>If</sup> <sup>it</sup> <sup>is</sup> <sup>not</sup> <sup>possible</sup> <sup>to</sup> <sup>have</sup> <sup>a</sup> <sup>collaboration</sup> <sup>between</sup> <sup>electronics</sup> <sup>and</sup> <sup>nuclear</sup> <sup>physicists</sup>, <sup>then</sup> <sup>the</sup> <sup>development</sup> <sup>of</sup> <sup>new</sup> <sup>apparatus</sup> <sup>will</sup> <sup>be</sup> <sup>impossible</sup>.



Propone la creazione di un gruppo di elettronici che sviluppino l'elettronica per tutti i gruppi del laboratorio, ma, perché questa soluzione funzioni, è necessario che sia garantito lo stesso stato sociale e lo stesso sviluppo di carriera tra le due diverse figure di ricercatori: "...absolute equality of "status" between the profession in "electronics" and the profession on "nuclear physics".

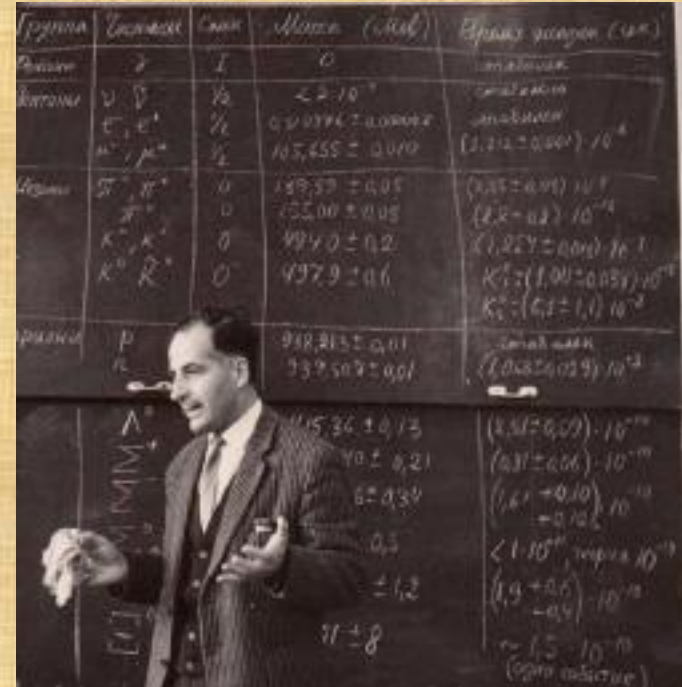
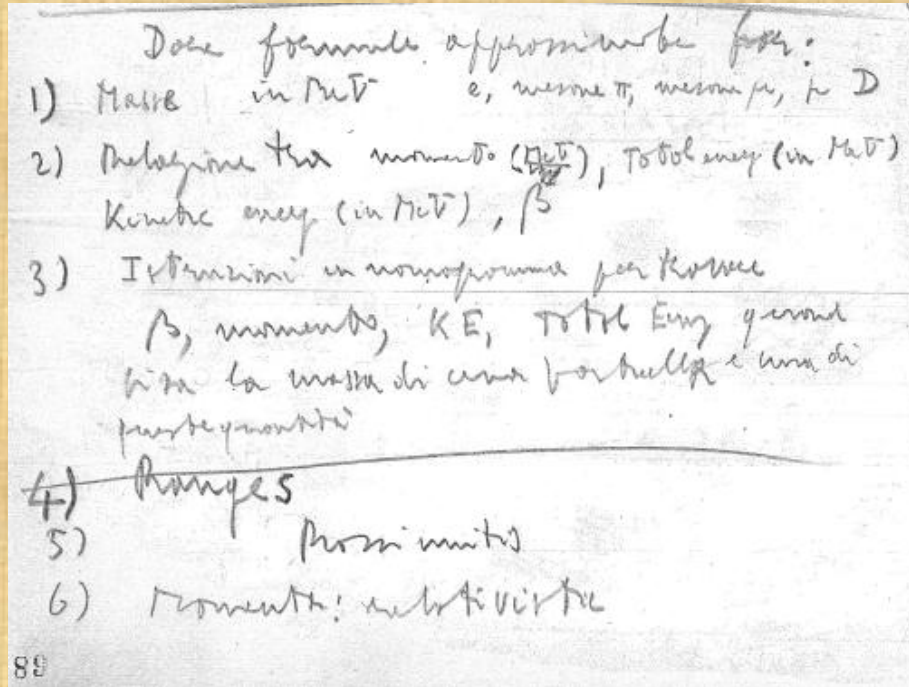
### - Electronics and Nuclear Physics -

Until a few years ago, it was natural for the experimental physicist to produce himself all the electronics equipment necessary for his experiments. However nowadays the quantity of electronic equipment necessary for research is so great that **an electronic group, providing "standard equipment" and developing new advanced techniques is very desirable** .....omissis ...The presence of an electronic group not only is necessary to produce the large quantity of equipment necessary for physics research. It is necessary also because it is not possible to expect that every physicist in the laboratory can design and produce first class equipment as a "professional" man....omissis..**The specialization in science and techniques today is a necessity, however unpleasant it may be.** The presence of an electronic group requires not only continuous control and discussions between the nuclear physicists and the electronic group but also an **absolute equality of "status" between the profession in "electronics" and the profession on "nuclear physics"**. This point is very important,

because in some physics laboratories there is the tendency to put nuclear physics on higher plane than electronics.....omissis.....It is true that the discovery of a new particle is more important than, for example, the realization of a stabilovolt (?), but it is equally true that the introduction of negative feed-back, or the development of the travelling (?) wave amplifier is much more important than for example, the study of a certain  $p, 3n$  reaction. Electronics and nuclear physics are 2 parts of physics of equal importance (?). If this artificial behaviour (?) is kept, clearly it is impossible a collaboration between professional electronic men and professional nuclear physicists: the professional electronic man will want to move (?) nuclear experiments, and consequently disappears the possibility of existence of an electronic group. If, on the contrary, the electronic man will feel that his work in electronics is appreciated, that he can gain prestige by the development of new apparatus, then he will generally prefer to work in such field.

# Il Professore

Una pagina interessante, scritta addirittura in italiano, è quella in cui Pontecorvo si appunta la lista delle formule e dei calcoli che vuol discutere probabilmente in una lezione di fisica da fare ai suoi giovani collaboratori. Fin da subito si manifesta la vocazione didattica di Pontecorvo che lo porterà ad essere titolare della cattedra di fisica delle particelle elementari all'Università di Mosca e ad essere un professore tra i più amati e rispettati dai suoi studenti.

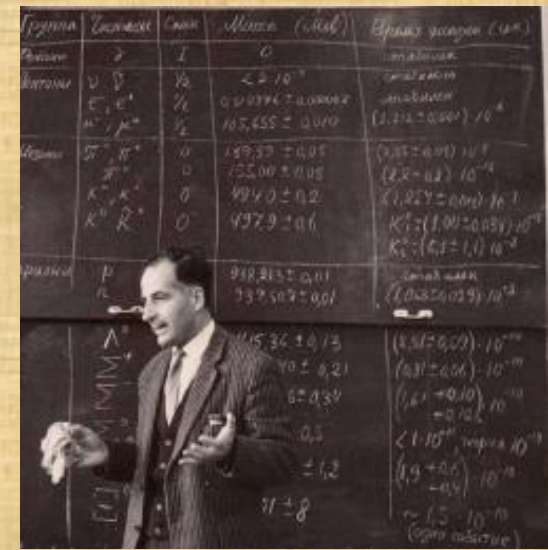


Dare formule approssimate per:

- 1) Masse in MeV e, mesone  $\pi$ , mesone  $\mu$ , p, D
- 2) Relazione tra momento (MeV/c), Total energy (in MeV), Kinetic energy (in MeV),  $\beta$
- 3) Istruzioni in monogramma(?) per trovare  $\beta$ , momento, KE, Total energy quando si sa la massa di una particella e una di queste quantità
- 4) Ranges
- 5) Rossi units
- 6) Momenta: relativistic

# Il Professore

In queste tre pagine, probabilmente per una lezione di fisica da fare ai suoi giovani collaboratori, Pontecorvo scrive alcune formule di cinematica relativistica e riporta i risultati del calcolo del cammino libero medio per protoni e deutoni in rame ed alluminio per diversi valori dell'energia di queste particelle.



- Useful relativistic formulae in C.G.S. -  
 $E_{tot}$ ;  $E_{kin}$ ;  $m_0$ ;  $v$  = velocity;  $p$  = momentum.  
 $E_{kin} = mc^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$ ;  $E_{tot} = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}}$ ;  $\frac{mc^2}{E_{tot}} = \sqrt{1-\beta^2}$   
 $p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1-\beta^2}}$ ;  $\frac{pc}{E_{tot}} = \beta$ ;  $\frac{pc}{mc^2} = \frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}$   
 $E_{tot} = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2} = mc^2$   $p = \frac{\sqrt{E_{tot}^2 - m_0^2 c^4}}{c}$

---

If we express energy, momenta, and mass in MeV,  $MeV/c$ ,  $MeV/c^2$ , or, briefly, in MeV, then, and denote in those units:  
 $m =$  mass in MeV  
 $T =$  Kin. E. in MeV  
 $K =$  Total energy  $m + T = E_{tot}$   
 $K =$  Momentum in MeV  
 $Hg =$  viscosity in poise.  
 $T = m \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$   $K = \frac{m\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}$   $\left\{ \begin{array}{l} T \leq K \leq T + m \\ \text{will be for ultrarelativistic particles.} \end{array} \right.$   
 $E_{tot} = \sqrt{m^2 + K^2} = m$   $Hg = \frac{K \times 10^6}{300}$  (charge 1)  
 $K = \sqrt{T^2 + 2m} \sqrt{T}$   $K = 300 Hg \times 10^6$   
 $\beta = \frac{K}{T+m}$   $\frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{K}{m}$   $\frac{T+m}{m} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$   
 $\beta = \frac{\sqrt{K^2 - m^2}}{T+m}$

Masses (MeV):

	electron	$\mu$	$\pi$	$p$	D
$m$	0,5108		140	931	

$\frac{c'}{mc}$   $\frac{p}{mc}$   $\frac{v}{c}$

- Units - - Electron relativistic -

Quantity	Symbol	Definition
Charge	$e$	charge of electron
Potential	$v$	volt
Velocity	$c$	velocity of light
Length	$cm$	centimeter
Time	$\frac{cm}{c}$	time necessary for light to travel 1 cm
Energy	$eV$	energy of an electron accelerated by 1 volt.
Mass	$\frac{eV}{c^2}$	mass of a particle whose rest energy is 1 eV
Momentum	$\frac{eV}{c}$	momentum of a particle for which total energy <sup>2</sup> - rest energy <sup>2</sup> = 1 (or momentum of a particle whose energy is 1 eV and velocity $c$ )
Electric field	$\frac{v}{cm}$	
Force	$\frac{eV}{cm}$	force acting on an electron in a field of 1 Volt.
Magnetic induction (B)	$\frac{v}{c} cm$	Magnetic induction of a field in which a particle with unit momentum and unit charge has a radius of curvature of 1 cm when travelling perpendicular to the field (1 $\frac{v}{c} cm = \frac{1}{300}$ gauss)

$m \frac{d^2x}{dt^2} = e v \times B = m R \frac{dv}{dt}$

Range of protons and range of Deuterons -

Energy (MeV) →	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Proton Range (g/cm <sup>2</sup> )	in Cu	0,25	0,75	1,4	2,4	3,5	5,0	6,5	7,7	10,0
	in Al	0,15	0,55	1,2	1,9	2,9	4,0	5,3	6,5	8,0

Energy (MeV) →	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600
Proton Range (g/cm <sup>2</sup> )	Cu	5,3	6,8	8,6	10,4	12,2	14,2	16,2	18,3	20,4
	Al	4,3	5,6	7,2	8,6	10,4	12,0	13,7	15,6	17,3

Range of

Energy (MeV) →	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Deuteron Range in (g/cm <sup>2</sup> )	Cu	0,5	1,5	2,8	4,8	7	10	13	15,4	20,0
	Al	0,3	1,1	2,4	3,8	5,8	8	10,6	13	16,0

Particle in energy (MeV/g/cm<sup>2</sup>)

$E_{tot}$ (MeV)	Cu	Al
200	3,03	3,58
250	2,85	3,12
300	2,40	2,81
350	2,21	2,59
400	2,08	2,43
500	1,88	2,20
600	1,76	2,05



In questo quaderno di appunti c'è la storia di alcuni esperimenti sulla produzione di mesoni pi-greco con fasci di neutroni e di protoni su bersagli di protoni e di nuclei complessi che Bruno Maximovich Pontecorvo e il suo piccolo gruppo hanno fatto al ciclotrone di Dubna. Bruno usa questo quaderno per riportarci giornalmente l'attività scientifica sua e del suo gruppo ma anche per annotarci idee, calcoli e disegni in modo assolutamente informale. Vi scrive anche alcune prime stesure degli articoli degli esperimenti fatti in quel periodo. Questo è il draft dell'articolo "Production of neutral mesons by neutrons", del primo esperimento che aveva proposto il 14 settembre e che verrà poi pubblicato come report interno scritto in russo (B.M. Pontecorvo, G.I. Selivanov, RINP, 1951).

- Production of neutral mesons by neutrons -

Schema:

A) Introduction B) Apparatus C) Absolute experiment in Carb D) Relative measurements Discussion in relation to production of mesons E) Relative measurements F) Discussion a) production b)  $\lambda$  c) Conclusions - Spectrum

Introduction.

Considerable amount of data have been published in the last years on the production of mesons by protons. The ~~subject~~ production of ~~charged~~ mesons by neutrons has been so far only the object of a short communication and the production of neutral mesons by neutrons so far had not been observed. The following table summarizing the present day information on this subject.

Table I

It is clear from this table that production of charged and neutral mesons in ~~n-p~~ collisions has not yet been observed, and ~~not~~ even in complex nuclei. The ~~same~~ production of neutral mesons by neutrons has not yet been observed. For this reason, because of the absence of data on this subject, it was natural presents some ~~interests~~ <sup>a considerable</sup> interests. In the present work we report experiments we have made utilizing the neutrons from the ~~synrocyclotron~~ of our laboratory, we have investigated (and observed, for the first time), the production of neutral mesons in Hydrogen and complex nuclei of neutrons. The ~~research on~~ <sup>The investigation of</sup> production of neutral

- Production of neutral mesons by neutrons -

Schema:

A) Introduction B) Apparatus C) Absolute experiment in Carb D) Relative measurements Discussion in relation to production of mesons E) Relative measurements F) Discussion a) production b)  $\lambda$  c) Conclusions - Spectrum

Introduction -

While a considerable amount of data have been published <sup>(1)</sup> in the last years on the production of mesons by protons from accelerators, **the production of charged mesons by neutrons has been so far only the object of a short communication <sup>(2)</sup> and the production of neutral mesons by neutrons so far had not been observed.** The following table summarize the present day information on this subject.

Table I

It is clear may be seen from this table that production of charged and neutral mesons in elementary n-p collisions has not yet been observed, and ~~not~~ even in complex nuclei. The production of neutral mesons by neutrons has not yet been observed. For this reason, ~~Because of the absence of data in this subject, it was natural presents some a considerable interests~~ In the present work we report experiments we have made utilizing the neutrons from the syncrocyclotron of our laboratory, we have investigated (and observed for the first time), the production of neutral mesons in Hydrogen and complex nuclei by neutrons.

# Primi report interni sulla produzione di mesoni $\pi$

I risultati di tutti gli esperimenti fatti da Pontecorvo ed il suo gruppo nel periodo 1951-1954 al ciclotrone di Dubna furono pubblicati in russo come Report Interni del Laboratorio.

In questi primi esperimenti venne studiata la produzione di mesoni  $\pi$ , carichi e neutri, con protoni e neutroni su bersaglio di protoni e nuclei complessi.

La produzione del  $\pi^0$  con fascio di neutroni su protoni e nuclei complessi fu studiata per la prima volta nel mondo. (B.M.Pontecorvo, G.I.Selivanov, RINP, 1951) and (B.M.Pontecorvo, G.I.Selivanov, RINP, 1952; Dokl. Acad. Nauk SSSR, 102, 253 (1955)).

Production of neutral mesons in  $n-p$  collisions.

A) Introduction B) Apparatus C) Absolute experiment in Carb D) Production measurements Discussion in relation to production of mesons E) Polarization measurements F) Discussion G) Conclusions - summary

Introduction.

A considerable amount of data have been published in the last years on the production of ~~charged~~ mesons by ~~protons~~ <sup>neutrons</sup>. The ~~highest~~ production of ~~charged~~ mesons by neutrons has been so far only the object of a short communication and the production of neutral mesons by neutrons to ~~fast lead and~~ has been observed. The following table summarizing the present-day information on this subject.

Table I

It is clear from this table that production of charged and neutral mesons in  $n-p$  collisions has not yet been observed and ~~only~~ in complex nuclei. The ~~same~~ production of neutral mesons by neutrons has not yet been observed. For this reason, because of the absence of data on this subject, it was ~~not possible~~ <sup>a considerable</sup> ~~to present some~~ <sup>interests</sup>. In the present work we report experiments we have made utilizing the neutrons from the ~~synchrocyclotron~~ of our laboratory, we have investigated (and observed, for the first time), the production of neutral mesons in Hydrogen and complex nuclei by neutrons. The ~~results~~ <sup>conclusions</sup> on production of neutral

**УТВЕРЖДАЮ\***

ДОКТОР ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК  
*И.А.Александров* (И.А.АЛЕКСАНДРОВ)  
25.09.1952г.

НАУЧНЫЙ ОТДЕЛ  
ЦЕНТР Ф 62

**О Т Ч Е Т**  
ОБРАЗОВАНИЕ  $\pi^0$ -МЕЗОНОВ В (n-p) И (n-d)  
СТОУКОВОБРАЗЕНИИ.

Начальник сектора Ф 62  
профессор (Б.М.Понтекорво)

Исполнители:  
профессор (Б.М.Понтекорво)  
Ст. инженер (Селиванов Г.И.)

1952 г.

25 September 1952

**REPORT**  
Production of  $\pi^0$  mesons in (n-p) and (n-d)  
collisions

Section leader  
Professor (B.M.Pontecorvo)

Executors:  
Professor (B.M.Pontecorvo)  
Engineer (Selivanov G.I.)



# Primi report interni sulla produzione di mesoni $\pi$

АКАДЕМИЯ НАУК СОВЕТА СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

661. 6/7. 162  
Пираева

"УТВЕРЖДАЮ"

Начальник Гидротехнической  
лаборатории АН СССР  
доктор физико-матем. наук

/М.Г.Щедряков/

" марта 1952 года.

ОТЧЕТ

ПОПЫТКА ДЕТЕКТИРОВАТЬ ЯДЕРНОЕ РАССЫЯНИЕ  $\pi$ -МЕЗОНОВ  
С ОБЫЧНОЙ ЗАРЯДА ПРИ ПОМОЩИ РАДИОАКТИВНЫХ ИНДИКАТОРОВ.

Руководитель: проф. Понтекорво В.  
Исполнители: проф. Понтекорво В.  
инж. Мухин А.И.

March 1952

## REPORT

Detection of charge exchange scattering  
of  $\pi$  mesons on nuclei by the method of  
radioactive indicators

Leader: Prof. Pontecorvo B.  
Executors: Prof. Pontecorvo B.  
Eng. Mukhin A.I.

Report Interno datato marzo 1952 gentilmente  
procuratoci da Gil Pontecorvo

Attempt to detect the <sup>charge exchange</sup> scattering of  $\pi$  mesons by  
the method of radioactive indicators.

## Introduction

The interaction of  $\pi$  mesons with nuclei was first investigated in the cosmic ray region, with conflicting results. Brown (1) found on interaction mean free path <sup>in photographic plates</sup> for the  $\pi$  mesons produced in showers of relativistic particles of the order of the "geometrical" mean free path, while Piccioni, with counter techniques, obtained a mean free path  $> 10$  times the geometrical mean free path. This discrepancy was removed when work with artificial  $\pi$  mesons from accelerator was initiated. In fact the results of <sup>obtained with photographic</sup> Brown

showed definitely that  $\pi$  mesons interact with nuclei with a cross section of the order of femtobarns.

It occurred to us that <sup>under conditions with</sup> such cross sections of this order could be detected with the method of radioactive indicators. In fact the intensities (2) of the order of  $10^4$  <sup>ions/cm<sup>2</sup>/sec</sup>  $\pi$  mesons, which are available from the cyclotron of our laboratory it can be estimated that in <sup>favorable</sup> circumstances it is possible to detect <sup>in certain</sup> the production of <sup>radioactive</sup>  $\pi$  mesons.

- The first report will be mainly concerned with the reaction  $\pi^+ + B^{11} \rightarrow \pi^0 + C^{11}$  and the following processes which can be considered:
- 1) Production of  $\pi^+$  mesons (hydrogen or nuclei)
  - 2) Inelastic collision of the meson with nuclei <sup>with energy loss</sup> to produce a  $\pi^+$  meson.
  - 3) Inelastic collision with nuclei <sup>with energy loss</sup> to produce a  $\pi^0$  meson.

Attempt to detect the charge exchange scattering of  $\pi$  mesons by the method of radioactive indicators

## Introduction

The interaction of  $\pi$  mesons with nuclei was first investigated in the cosmic ray region, with conflicting results. Brown(1) found an interaction mean free path in photographic plates for the  $\pi$  mesons produced in showers of relativistic particles of the order of the "geometrical" mean free path, while Piccioni, with counter techniques, obtained a mean free path  $> 10$  times the geometrical mean free path. This discrepancy was removed when work with artificial  $\pi$  mesons from accelerator was initiated....omissis... It occurred(?) to us that nuclear interaction with cross section of this order could be detected with the method of radioactive indicators. In fact with the meson intensities of the order of  $10^4$ - $10^5$ /cm<sup>2</sup>/sec, which are available in a beam from the cyclotron of our laboratory it can be estimated that in favorable circumstances it is possible to detect in light elements the production of radioelement with cross section only  $10^{-27}$  cm<sup>2</sup>. This report will be mainly concerned with an attempt to detect the reaction  $\pi^+ + B^{11} \rightarrow \pi^0 + C^{11}$  from the radioactive indicators.

Draft in Inglese scritto tra il  
5 ottobre e il 25 dicembre 1951

( $^{11}C \rightarrow ^{11}B + e^+ + \nu + 0.96 \text{ MeV}$  with 20.3 min. half-life)



# Fisico sperimentale ma anche fisico teorico

Dalle pagine di questo quaderno emerge la figura di bravo fisico sperimentale che coordina le attività del suo gruppo con competenza e grande rigore scientifico.

Gli esperimenti sull'interazione  $\pi$ -nucleone che in questi anni Pontecorvo realizza col suo gruppo al ciclotrone di Dubna sono certamente molto importanti per capire, almeno da un punto di vista fenomenologico, le interazioni forti.

Con questi esperimenti si conferma che il protone e il neutrone per quanto riguarda le interazioni forti non sono due particelle diverse ma sono la stessa particella in due stati diversi di un nuovo numero quantico chiamato spin isotopico.

Tuttavia l'interesse scientifico di Pontecorvo va ben oltre questi esperimenti, e molte delle sue riflessioni di questi anni riguardano ancora le interazioni deboli.

L'interazione debole aveva da sempre affascinato Pontecorvo, alla cui comprensione aveva già dato contributi fondamentali.

# Interessantissimo è ciò che scrive a pagina 8! !

( primi di Novembre del 1950)

## On the transformations of mesons

8

The  $\Sigma$  meson has a long life  $\approx 10^{-9}$  sec, and is supposed to decay into  $\pi^+ + \pi^+ + \pi^+$ . If this is so, it must be concluded that  $\Sigma$  does not interact with nuclei, because, if the  $\Sigma$  interacts with nuclei, then the rate of the ~~disintegration~~ <sup>disintegration</sup> would be very fast. (through the interaction with nucleons of the vacuum). Let us suppose that it does not interact strongly. Since it is strongly produced, it must be produced as a decay product of a strongly interacting meson  $M$ . But this  $M$  then would decay into  $\pi$  quicker than in  $\Sigma$ . So there is a contradiction between the evidence of a strong interacting particle and its long lifetime. This contradiction, of course, is resolved if the strongly <sup>strongly</sup> particle is produced in pairs. So from the very fact that a)  $\Sigma$  mesons have a long life, b) that they are present in abundance, we can conclude that there are mesons (not necessarily  $\Sigma$  mesons) which are strongly produced in pairs. <sup>Incidentally this consideration explains the fact that until present day cyclotron no other mesons than  $\pi$  mesons have been produced.</sup> A consistent picture until now would be:

$\mu \rightarrow e + 2\nu$   
 $\pi \rightarrow \mu + \nu$   
 $\Sigma^+ = K = V^+ \rightarrow \begin{cases} \mu^+ + 2\nu \\ \mu^+ + \pi^+ + \pi^+ \\ \mu^+ + \pi^0 \end{cases}$

~~.....~~  
 $V_{\text{light}} \rightarrow \pi^+ + \pi^+ \text{ or } \pi^+ + \mu^- ?$   
 $V_{\text{heavy}} \rightarrow \rho + \pi$

$\mu \rightarrow e + \nu + \mu$

## On the transformations of mesons -

The  $\tau$  meson has a long life  $\approx 10^{-9}$  sec, and is supposed to decay into  $\pi^+ + \pi^+ + \pi^+$ . If this is so, it must be concluded that  $\tau$  does not interact with nuclei, because, if the  $\tau$  interacts with nucleons then the rate of the disintegration would be very fast.

(through the interaction with nucleons of the vacuum)  
 Let us suppose that it does not interact strongly. Since is strongly produced, it must produced as a decay product of a strongly interacting meson  $M$ . But this  $M$  then would decay into  $\pi$  quicker than in  $\tau$ . So there is a contradiction between the existence of a strong interacting particle and his long lifetime. This contradiction, of course, is resolved if the strongly interacting particle is produced in pairs. (\*) So from the very fact that a)  $\tau$  mesons have a long life, b) that they are present in abundance, - we can conclude that there are mesons (not necessarily the  $\tau$  mesons) which are strongly produced in pairs.

(incidentally these considerations explain the fact that until present day cyclotron no other mesons than  $\pi$  mesons have been produced.)

A consistent picture until now would be:

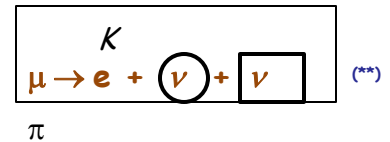
$\mu \rightarrow e + 2\nu$

$\pi \rightarrow \mu + \nu$

$\tau^+ = K = V^+ \rightarrow \begin{cases} \mu^+ + 2\nu \\ \mu^+ + \pi^+ + \pi^+ \\ \mu^+ + \pi^0 \end{cases}$

$V_{\text{light}} \rightarrow \pi^+ + \mu^+ \text{ or } \pi^+ + \mu^- ?$

$V_{\text{heavy}} \rightarrow \rho + \pi$



(\*) a fine 1950 senza la nozione della stranezza, è necessaria una profonda intuizione per proporre che una produzione in coppia risolve la contraddizione.

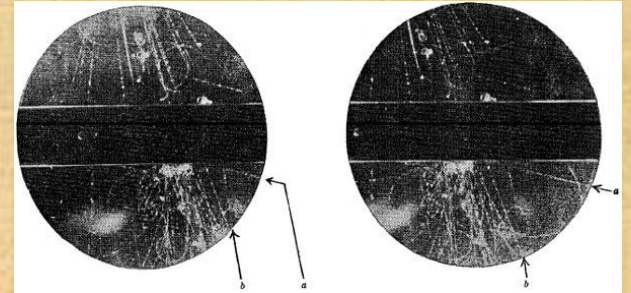
(\*\*) forse solo una coincidenza! Due righe prima scrive  $\mu \rightarrow e + 2\nu$  mentre qui scrive  $\mu \rightarrow e + \nu + \nu$  indicando i due neutrini con due diversi segni.

Due profonde intuizioni in una singola pagina ?!

# Particelle Strane

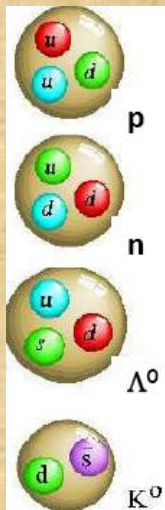
In questa pagina 8 Pontecorvo riflette sul comportamento contraddittorio di certe strane particelle da poco scoperte in esperimenti con i raggi cosmici. Queste particelle vengono prodotte con probabilità elevata tipica delle interazioni forti e decadono invece con vite medie relativamente lunghe ( $10^{-8}$ - $10^{-10}$  sec) il che induce a pensare che le interazioni deboli siano le forze responsabili del loro decadimento. Ma perché, si domanda Pontecorvo, se queste particelle vengono prodotte nell'interazione forte dei raggi cosmici con i nuclei dell'atmosfera e quindi sono soggette all'interazione forte, non decadono con vite medie tipiche dei decadimenti forti? Come si risolve questa contraddizione? In questa pagina c'è la sua risposta:

So there is a contradiction between the existence of a strong interacting particle, and its long lifetime. This contradiction, of course, is resolved if the strong <sup>particle</sup> is produced in pairs.



Cloud-chamber photograph of a  $V^0$  particle decaying into two charged particles (G. D. Rochester, C. C. Butler, Nature 160, 855 (1947))

Due anni dopo, nel 1952, per risolvere questo problema anche A. Pais (Pais A., Phys. Rev., 1952, vol 86, p. 655) ipotizza che queste particelle strane debbano essere prodotte in coppia; ciò verrebbe spiegato dall'esistenza di un nuovo numero quantico, successivamente chiamato stranezza, che viene conservato nelle interazioni forti ma non nelle interazioni deboli. In "Recollections on the establishment of the weak interaction notion" (B. Pontecorvo, JINR Preprint E1-85-583, Dubna, 1985) Pontecorvo scrive: "On the basis of simple arguments I introduced (B. Pontecorvo, JETP, 1955, vol. 29, p. 140, with quotations on previous papers.), independently of Pais the idea of pair production of the new particles, more exactly the pair production of hyperons and kaons." A fine 1950, senza la nozione della stranezza, è necessaria una profonda intuizione per proporre che una produzione in coppia risolve questa contraddizione!





# Particelle strane

In un report interno del 1953 scritto in russo<sup>(\*)</sup>, Pontecorvo discute come e perché deve essere studiata la produzione delle particelle  $\tau$  ( $K^0$ ) and  $V$  ( $\Lambda^0$ ):

Тема 48. Методы регистрации частиц класса " $\tau$ " и " $V$ " с помощью электронных устройств и камеры Вильсона.

Руководитель: Понтекорво Б.М.

Theme 48. Detection method of the class of particles " $\tau$ " and " $V$ " with electronic detectors and Wilson chamber.

Group leader: Pontecorvo B.M.

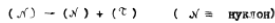
## 2. О процессах образования тяжелых мезонов и $V$ -частиц.

Исполнитель: Понтекорво Б.М.

Написан отчет<sup>1)</sup>, в котором излагаются некоторые замечания феноменологического характера о процессах образования тяжелых мезонов и  $V$ -частиц. Основные идеи этой работы обсуждались на семинаре в нашей лаборатории в 1951г. Хотя представленные рассуждения имеют характер поисков, они могут помочь сформулировать рабочие гипотезы при интерпретации экспериментальных данных и при обсуждении возможности постановки экспериментов по образованию новых частиц.

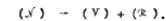
Выводы работы следующие:

1) Тот факт, что в соударениях при высокой энергии с большой вероятностью образуются мезоны (мезоны класса  $\tau$ ), распадающиеся с продолжительным временем жизни на  $\pi$ -мезоны, указывает на то, что рождение этих мезонов не может происходить по схеме:

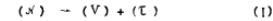


2) Аналогично, тот факт, что в соударениях при высокой энергии с большой вероятностью образуются частицы (тяжелые нуклоны класса  $V$ ), распадающиеся с продолжительным временем

жизни на нуклоны и  $\pi$ -мезоны, указывает на то, что рождение этих частиц не может происходить по схеме:



3) Предполагается, что мезоны класса  $\tau$  и частицы класса  $V$  появляются вместе согласно схеме:



Таким образом одновременно решаются трудности, связанные с продолжительным временем жизни частиц класса  $V$  и мезонов класса  $\tau$ . Кроме того, эта схема подразумевает сильное взаимодействие между нуклонами и  $V$ -частицами.

4) Если схема (1) верна, то следует ожидать, что в благоприятных условиях должны осуществляться квази-стабильные системы из нуклонов и  $V$ -частиц.

Некоторые экспериментальные указания о справедливости этих выводов появились в литературе<sup>2)</sup>.

Ниже мы обсудим вопросы, связанные с порогами образования  $V^+$ -частиц при предположении, что в схеме (1) под  $V$  подразумевается известная  $V^+$ -частица.

Очевидно, что сечение реакции



должно быть крайне малым при справедливости схемы (1). Сле-

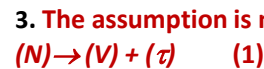
## 2. On the production of heavy mesons and $V$ -particles.

Executer: Pontecorvo B.M.

A report has been written [B. Pontecorvo, Report numb. 850, 1953], in which certain comments of phenomenological character concerning the production of heavy mesons and  $V$ -particles are presented. **The main ideas of this work have been discussed at the seminar of our laboratory in 1951.** Although the issues presented are of a search nature, they may help in formulating operative hypotheses for interpretation of experimental data and the discussion of future experiments relevant to the production of new particles.

The conclusions are the following:

1. The fact that high energy collisions with a **high probability result in the production of mesons** (mesons of the  $\tau$  class), **decaying with a long lifetime** into  $\pi$ -mesons indicates that **the production of such mesons cannot proceed** according to the following scheme:  $(N) \rightarrow (N) + (\tau)$  ( $N \equiv \text{nucleon}$ ).
2. Similarly, the fact that high energy collisions with a **high probability result in the production of particles** (heavy nucleons of the  $V$  class), **decaying with a long lifetime** into nucleons and  $\pi$ -mesons indicates that the **production of these particles cannot proceed** according to the following scheme:  $(N) \rightarrow (V) + (\pi)$ .
3. **The assumption is made that mesons of the  $\tau$  class and particles of the  $V$  class appear together according to the scheme:**



Thus, **difficulties related to the long lifetime of particles of the  $V$  class and of mesons of the  $\tau$  class are resolved simultaneously.**

Moreover, this scheme implies strong interaction between nucleons and  $V$ -particles.

4. If the scheme (1) holds true, then quasi-stable systems of nucleons and  $V$ -particles can be expected to be realized in favorable conditions.

Certain experimental indications of the validity of the above conclusions have appeared in the literature [W.B.Fowler et al., Phys.Rev 91 (1953) 1062].

Below we shall discuss issues relating to the production thresholds of  $V^0$ -particles under the assumption that  $V$  in the scheme (1) is considered to be a known  $V^0$ -particle.

Evidently, the **cross section of reaction**



**should be extremely small, if the scheme (1) is valid.**

<sup>(\*)</sup>gentilmente fornitoci e tradotto dal russo da Gil Pontecorvo

# Particelle Strane

Nel 1953 non era chiaro sperimentalmente se queste particelle, che sono prodotte in interazioni forti ma che decadono con una lunga vita media, non possono essere prodotte singolarmente.

Allora il fisico teorico Pontecorvo, quale anche ottimo fisico sperimentale, decide, come spesso ha fatto, di chiarirsi questo punto da solo:

Propone e realizza un esperimento per verificare se fosse possibile produrre singole particelle in collisioni di protoni da 670 MeV su bersaglio di carbonio (*Baladin M.P., Balashov B.D., Zhukov V.A., Pontecorvo B.M., Selivanov G.I. Report of the Inst. for Nuclear Problem, Acad. Sci. USSR, 1954*). Il risultato dell'esperimento fu che:

*"The small value of the cross section for the formation of  $\Lambda^0$  particles in the interaction of protons with an energy of 670 MeV with complex nuclei agrees with the hypothesis of the fundamental transformation of a nucleon according to the scheme  $(N) \leftrightarrow (\Lambda^0) + (\text{heavy meson})$ ."* ,

e cioè che i dati dell'esperimento erano in accordo col fatto che queste due particelle debbano essere prodotte insieme.

La produzione in coppia delle "V-particles" e gli "heavy mesons" fu successivamente osservata nelle collisioni  $\pi^- p$  con  $\pi^-$  di 1.5 BeV al Cosmotrone di BNL da W.B.Fowler et al. (*Phys. Rev. 93, 861 (1954)*)

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 93, NUMBER 4

FEBRUARY 15, 1954

## Production of Heavy Unstable Particles by Negative Pions\*

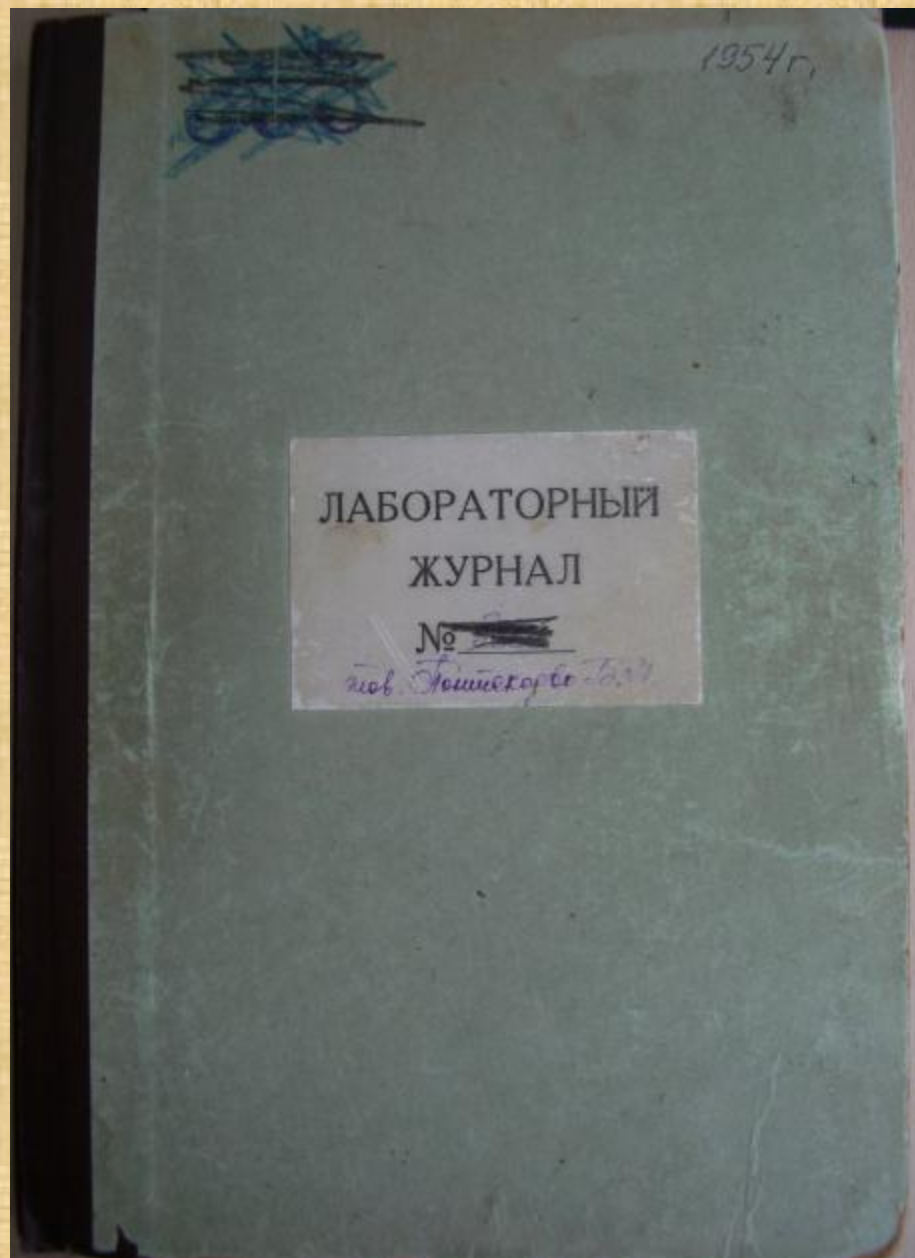
W. B. FOWLER, R. P. SHUTT, A. M. THORNDIKE, AND W. L. WHITTEMORE  
Brookhaven National Laboratory, Upton, New York  
(Received November 10, 1953)

Questi importanti contributi che hanno portato alla comprensione della natura delle "particelle strane" quasi mai sono stati riconosciuti a Bruno Pontecorvo dalla comunità scientifica.

Da quanto si legge in questo quaderno, sembrerebbe che Bruno sia stato il primo ad intuire che il comportamento contraddittorio di queste strane particelle può essere compreso se si assume che esse vengano prodotte in coppia.

Sfortunatamente questa idea rimase nascosta in questo quaderno ed in successivi report interni scritti in russo, non accessibili per lungo tempo alla comunità dei fisici al di fuori dell'Unione Sovietica.

Ancora grazie a Gil Pontecorvo abbiamo un altro quaderno di appunti di Bruno che copre il periodo da febbraio a novembre 1954. Questo quaderno è scritto in russo (difficilmente leggibile).



4-II-54

Решение задачи о фазовом  
напряжении:

A) I) Диск - Радарица; (по шкале 285 отбалансирован 277,5,  
не А  
по фазе  
Р  
285  
276  
277  
278  
279  
281.

Схема и формулы -  

$$N(E, \vartheta) dE d\Omega$$
 универсальной  
 и формулы с энергией E и углом рассеяния  $\vartheta$   
 в направлении энергии dE и в объеме  $d\Omega$ , где dE  
 $N(\vartheta, E) =$  значение  $N$  в направлении  $\vartheta$  и при  
 $E$  лаборатория, см. табл. =

II)  $\Pi$   
 $R_0$   
 $A:$

$$= \frac{1}{\sqrt{2} (1 - \beta \cos \vartheta)} \left\{ A + \frac{\beta \sin^2 \vartheta}{2 \sqrt{2} (1 - \beta \cos \vartheta)^2} + \frac{\beta^2 \Gamma^2 \mu^2}{\Gamma^2 \mu^2 2 \sqrt{2} (1 - \beta \cos \vartheta)^2} \right\}^2$$

Б) Б  
 где  $\vartheta$  угол  $\vartheta$  и  $\mu$  по  $\Pi$  см. табл.  
 $R_0$  - скорость  $\Pi$  по отношению к с.л.т.  
 $\mu$  = масса  $\Pi$  по отношению к с.л.т.  
 $g$  = скорость  $\Pi$  по отношению к с.л.т.  
 $\chi = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$   
 $\beta$  = скорость, вычислена по табл.  
 Предположим, что  $\mu$  и  $g$  являются функциями  
 энергии  $E$  и угла  $\vartheta$  по формулам  
 $\frac{dE}{dL} = A + B \cos^2 \chi$ , где  $\chi$  угол к  
 направлению  $\vartheta$ .  
 Максимум  $E$  и минимум  $E$  достигаются  
 при  $\chi = 0$  и  $\chi = \pi$  соответственно.  
 $E_{\max} = \frac{(1 + \beta \mu)}{2 \sqrt{2} (1 - \beta \cos \vartheta)^2} \times \frac{g}{\mu}$   
 $E_{\min} = \frac{(1 - \beta \mu)}{2 \sqrt{2} (1 - \beta \cos \vartheta)^2} \times \frac{g}{\mu}$



Nemmeno per il figlio Gil (anche lui fisico) è facile leggere questi appunti! tuttavia verso la fine del quaderno è riconoscibile il draft dell'articolo dell'esperimento sulla produzione delle  $\Lambda^0$ : "**The possibility of the formation of  $\Lambda^0$ -particles by protons with energies up to 670 MeV**" (Baladin M.P., Balashov B.D., Zhukov V.A., Pontecorvo B.M., Selivanov G.I., Report of the Inst. for Nuclear Problem, Acad.Sci. USSR, 1954.)

~~Доклад~~ - Понтекорво наблюдение образования  $\Lambda^0$   
 в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с  
 энергией 670 МэВ

- Балашов, Мухомов, Тонич, Селиванов -

Вкратце описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ. В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ. В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ.

В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ. В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ. В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ.

В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ. В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ. В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ.

\* Понич Клавдия

~~Максимум  $\Lambda^0$  в реакции  $\pi^+ + N \rightarrow \Lambda^0 + N$   
 (3)  $\pi^+ + N \rightarrow \Lambda^0 + N$   
 $\pi^+ + N \rightarrow \Lambda^0 + N$~~

Понич Клавдия  
 В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ. В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ. В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ.

В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ. В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ. В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ.

В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ. В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ. В работе описаны результаты экспериментов по образованию  $\Lambda^0$  в реакциях при бомбардировке протонов нейтронами с энергией 670 МэВ.

Понич Клавдия

# Forse c'è una seconda intuizione geniale a pagina 8 !!

( primi di Novembre del 1950 )

## On the transformations of mesons

8

The  $\Sigma$  meson has a long life  $\approx 10^{-9}$  sec, and is supposed to decay into  $\pi^+ + \pi^+ + \pi^+$ . If this is so, it must be concluded that  $\Sigma$  does not interact with nuclei, because, if the  $\Sigma$  interacts with nuclei, then the rate of the ~~disintegration~~ <sup>disintegration</sup> would be very fast. (through the interaction with nucleons of the vacuum). Let us suppose that it does not interact strongly. Since it is strongly produced, it must be produced as a decay product of a strongly interacting meson  $M$ . But this  $M$  then would decay into  $\pi$  quicker than in  $\Sigma$ . So there is a contradiction between the evidence of a strong interacting particle and its long lifetime. This contradiction, of course, is resolved if the strongly <sup>strongly</sup> particle is produced in pairs. So from the very fact that a)  $\Sigma$  mesons have a long life, b) that they are present in abundance, we can conclude that there are mesons (not necessarily  $\Sigma$  mesons) which are strongly produced in pairs. <sup>Incidentally these considerations explain the fact that until present day cyclotron no other mesons than  $\pi$  mesons have been produced.</sup>

A consistent picture until now would be:

$\mu \rightarrow e + 2\nu$   
 $\pi \rightarrow \mu + \nu$   
 $\Sigma^+ = K = V^+ \rightarrow \begin{cases} \mu^+ + 2\nu \\ \mu^+ + \pi^+ + \pi^+ \\ \mu^+ + \pi^0 \end{cases}$

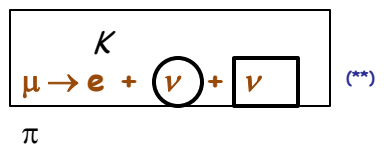
~~.....~~  
 $V_{\text{light}} \rightarrow \pi^+ + \pi^+ \text{ or } \pi^+ + \mu^- ?$   
 $V_{\text{heavy}} \rightarrow \rho + \pi$

$\mu \rightarrow e + \nu + \nu$

## On the transformations of mesons -

The  $\tau$  meson has a long life  $\approx 10^{-9}$  sec, and is supposed to decay into  $\pi^+ + \pi^+ + \pi^+$ . If this is so, it must be concluded that  $\tau$  does not interact with nuclei, because, if the  $\tau$  interacts with nucleons then the rate of the disintegration would be very fast. (through the interaction with nucleons of the vacuum). Let us suppose that it does not interact strongly. Since it is strongly produced, it must be produced as a decay product of a strongly interacting meson  $M$ . But this  $M$  then would decay into  $\pi$  quicker than in  $\tau$ . So there is a contradiction between the existence of a strong interacting particle and his long lifetime. This contradiction, of course, is resolved if the strongly interacting particle is produced in pairs. (\*) So from the very fact that a)  $\tau$  mesons have a long life, b) that they are present in abundance, - we can conclude that there are mesons (not necessarily the  $\tau$  mesons) which are strongly produced in pairs. (incidentally these considerations explain the fact that until present day cyclotron no other mesons than  $\pi$  mesons have been produced.) A consistent picture until now would be:

- $\mu \rightarrow e + 2\nu$
- $\pi \rightarrow \mu + \nu$
- $\tau^+ = K = V^+ \rightarrow \begin{cases} \mu^+ + 2\nu \\ \mu^+ + \pi^+ + \pi^+ \\ \mu^+ + \pi^0 \end{cases}$
- $V_{\text{light}} \rightarrow \pi^+ + \mu^+ \text{ or } \pi^+ + \mu^- ?$
- $V_{\text{heavy}} \rightarrow \rho + \pi$



(\*) a fine 1950 senza la nozione della stranezza, è necessaria una profonda intuizione per proporre che una produzione in coppia risolve la contraddizione.  
 (\*\*) forse solo una coincidenza! Due righe prima scrive  $\mu \rightarrow e + 2\nu$  mentre qui scrive  $\mu \rightarrow e + \nu + \nu$  indicando i due neutrini con due diversi segni.  
 Due profonde intuizioni in una singola pagina ?!



$$\nu_{\mu} \neq \nu_e$$

Come abbiamo visto, c'è un'altro elemento estremamente interessante in questa pagina 8 del quaderno che fa supporre che già nel 1950 Pontecorvo sospettasse che i due neutrini del decadimento del muone in elettrone e due neutrini ( $\mu \rightarrow e + 2\nu$ ) fossero due particelle di natura diversa, ben dodici anni prima che questo fatto fosse provato sperimentalmente. Infatti dopo aver scritto che "a consistent picture until now would be":  
(*"un quadro consistente fino ad oggi sarebbe"*):

$$\mu \rightarrow e + 2\nu$$

poche righe più in basso, verso la fine della pagina, riscrive il decadimento come

$$\mu \rightarrow e + \nu_e + \nu_{\mu}$$

indicando i due distinti neutrini con due segni diversi.

Otto anni più tardi, nel 1958, a Dubna prende forma il progetto di costruire un ciclotrone di alta intensità capace di accelerare protoni fino a 800 MeV. È questa una buona occasione per Pontecorvo di dimostrare, come da molto tempo sospettava, che i due neutrini presenti nel decadimento del  $\mu$  non sono lo stesso tipo di particella. Nell'articolo "Electron and Muon Neutrino" (*J. Exptl.*

*Theoret. Phys.* 37 (1959) p. 1751) scrive molte possibili reazioni indotte da neutrini o anti-neutrini che non possono avvenire se  $\nu_e \neq \nu_{\mu}$ .

"There are no reasons for asserting that  $\nu_e$  and  $\nu_{\mu}$  are identical particles" scrive Pontecorvo prima di elencare una lunga lista di reazioni da investigare e poi continua: "the existence of two different types of neutrinos, which are not able to annihilate, is attractive from the point of view of the symmetry and the classification of particles and might help to understand the difference in nature of muons and electrons."

Infine nell'articolo Pontecorvo propone di utilizzare un fascio di anti- $\nu_{\mu}$  per verificare che la reazione  $\text{anti-}\nu_{\mu} + p \rightarrow e^+ + n$  è proibita.



L'iscrizione  $\nu_{\mu} \neq \nu_e$  sulla lapide testimonia l'intuizione di Bruno

**Sfortunatamente il ciclotrone di alta intensità da 800 MeV a Dubna non fu mai costruito!**

Un simile esperimento fu invece fatto tre anni più tardi al Brookhaven AGS da G. Danby et al. (*Phys. Rev. Lett.* 9 (1962) 36).

**Per aver dimostrato sperimentalmente che  $\nu_e \neq \nu_{\mu}$**

**L.M.Lederman, M.Schwartz and J.Steinberger furono insigniti del Premio Nobel nel 1988.**



# Sul quaderno si trova un'altra pagina (la 76) interessantissima !!

Questa pagina è stata scritta tra il 25 dicembre 1951 e il 30 gennaio 1952.

## Appendix

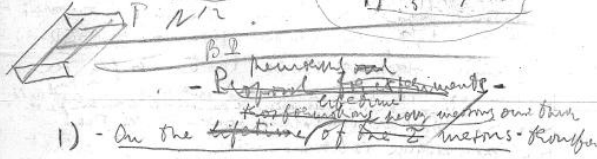
Appendix for the determination of a search for a stable state of  $H^+$  (Hecht & Vay).

### Appendix The Experiment

The concept for the experiment is to produce a beam of  $H^+$  stable ions in the emission of  $\beta$  particles. The experiment planned is to use a cyclotron to accelerate a beam of deuterons  $D^+$  on the millimeter region. The ion with emission of  $\beta$  particles of a 20 MeV. The apparatus consist of a  $\beta$  particles consist of 3-counter coincidence.

### Problems - Future work -

- 1) - Production of mesons in nuclear
- 2) - Interaction of mesons with nuclei
- 3) - Production of  $N^{12}$  in stars and in  $H^+$



- 1) - On the lifetime of the  $\tau$  mesons - Kowalew
- 2)  $\tau \rightarrow$  experiment

### Remarks and

#### Proposal for experiments -

- 1) - On the lifetime transformations lifetime of the  $\tau$  mesons heavy mesons and their transformation -
- 2)  $\tau \rightarrow$  experiment

$\beta$  On the charge symmetry - On the charge symmetry -

### A. Alex. - Observations

In the course of this year several remarks on proposed experiments were made in the 62 group, of which it is possible to mention some.

- 1) At the seminaire ~~a method~~ was discussed ~~to solve~~ the problem of the detection of free neutrinos, i.e. of the detection of neutrinos which is not connected with the act of a  $\beta$  disintegration (like in the classical experiment of Leipunski). The conclusion is that such possibility is not too far from present day facilities. A short report on this subject was written.
- 2) ~~Lifetime of  $\tau$  mesons~~ - ~~Proposed experiment on  $\tau$  mesons~~. In photographic plates it was observed  $\tau$

(3) Lifetime etc

(4) ~~On the charge symmetry hypothesis - A discussion~~

$c$   $10^{16} \text{ Km}$  (\*)  $Cl^{37} + \nu \rightarrow Ar^{37} + e$

3) On the charge symmetry - On the charge symmetry

### A. Alex. -

#### Observations

In the course of this year several remarks or proposed experiments were made in the 62 group, of which it is possible to mention some.

#### Neutrino -

1) At the seminaire ~~a method~~ was discussed ~~in-rele~~ the problem of the detection of free neutrinos, i.e. of a ..... detection of neutrino, a method which is not connected with the act of a  $\beta$  disintegration (like in the classical experiment of Leipunski). The conclusion is that such possibility is not too far from present day facilities. A short report on this subject was written.

(2) Lifetime of  $\tau$  mes Heavy mesons - Possible experiment on  $\tau$  meson.

In photographic plates it was observed  $\tau$

(3) Lifetime etc.

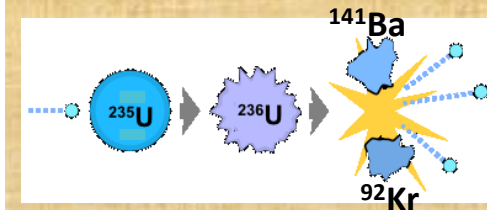
(4) ~~On the charge symmetry hypothesis - A discussion~~

(\*) H. Bethe and R. Peierls in Nature 133, 532 (07 April 1934) avevano valutato un limite superiore per la probabilità per il neutrino di interagire con la materia solida e scrivevano: "For an (neutrino) energy of  $2 \cdot 3 \times 10^6$  volts...  $\sigma < 10^{-44} \text{ cm}^2$  (corresponding to a penetrating power of  $10^{16} \text{ Km}$  in solid matter) It is therefore absolutely impossible to observe process of this kind with neutrinos created in nuclear transformation."

# Uno fisico sperimentale con idee e intuizioni geniali

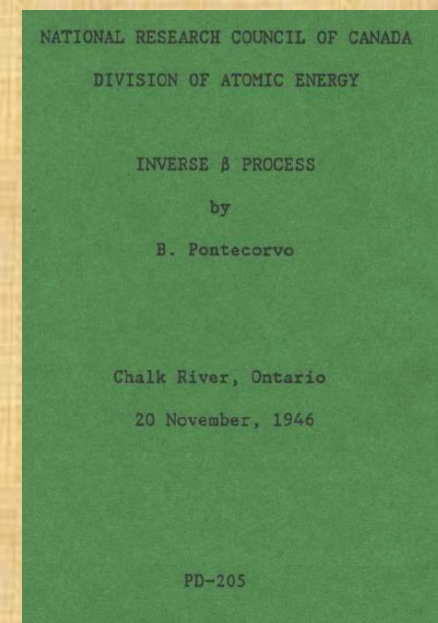
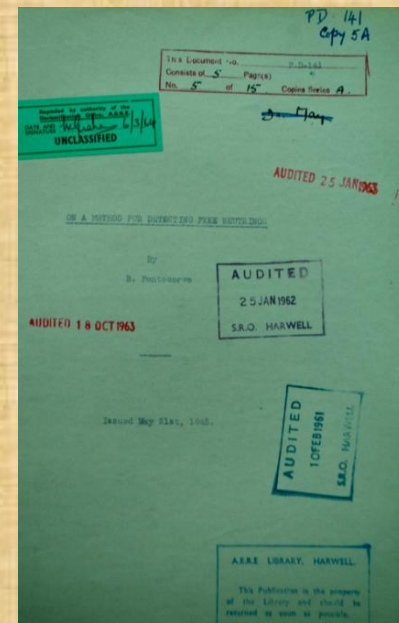
Nel 1934 Bethe e Peierls (Nature 133,532,1934) avevano valutato che i neutrini, a causa della loro bassissima probabilità di interagire con la materia, potevano penetrare ben  $10^{+16}$  Km (corrispondenti a  $\sim 1000$  anni luce) di materia solida prima di interagire o, equivalentemente, che solo un neutrino su  $10^{+11}$  neutrini avrebbe interagito nell'attraversare la terra da una parte all'altra. Concludevano poi il loro articolo affermando *"it is therefore absolutely impossible to observe processes of this kind with neutrinos created in nuclear transformations"*.  
**"È assolutamente impossibile osservare processi di questo tipo con neutrini prodotti in reazioni nucleari"**

Nel 1945, in Canada, Bruno si era posto il problema di rivelare questa elusiva particella ipotizzata da Pauli nel 1930, il neutrino, che, come ben sapeva, nei reattori nucleari viene prodotta copiosamente dai decadimenti  $\beta$  ( $n \rightarrow p + e^- + \text{anti-}\nu$ ) dei frammenti di fissione (più ricchi in neutroni degli elementi stabili (in media 6 neutrini emessi/fissione)



Pontecorvo nel PD-205 propone di rivelare i neutrini rivelando la reazione  $\nu + ^{37}\text{Cl}_{17} \rightarrow ^{37}\text{Ar}_{18} + e^-$ .  
Propone pertanto di irradiare quindi una grossa quantità di  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  (liquido molto comune) su una intensa sorgente di neutrini, di separare successivamente l'Argon-37 radiattivo prodotto e rivelare poi la cattura dell'elettrone da parte del nucleo di Argon-37 che ritorna Cloro-37 (il nucleo da  $Z+1$  ritorna a  $Z$ ) misurando l'elettrone (o il raggio X) emesso dall'atomo Cloro-37 eccitato che torna allo stato fondamentale.

**È un'idea geniale che solo dopo molti anni verrà ripresa e messa in pratica da altri che per questo otterranno il premio Nobel.**



Rapporti interni PD-141 e PD-205. Vengono dichiarati "documenti segreti" perché si teme che possano servire per misurare la potenza dei reattori nucleari.

# Come rivelare il neutrino

Immagino che Pontecorvo quando scrive, alla fine del 1951, nell'angolo in alto a destra della pagina 76 del quaderno



stia valutando il flusso di neutrini e la quantità di Cloro necessaria a rivelare questa particella così elusiva da poter attraversare  $10^{16}$  Km di materia solida senza interagire !

Già alla fine del 1951 Pontecorvo pensa di essere in grado di fare l'esperimento Cloro/Argon per rivelare finalmente il neutrino.

A handwritten note in blue ink on a piece of paper. The text reads: "like the classical experiment of Leipun... The conclusion is that such possibility is not too far from present day facilities, a report on this subject was written".

Sarebbe veramente interessante trovare questo **"short report"** per sapere come e dove Pontecorvo pensava che fosse possibile per lui fare l'esperimento in Russia. Sfortunatamente questa possibilità non si concretizzò mai; forse perché non aveva a disposizione una miniera o una caverna sufficientemente grande e profonda da provare a rivelare il flusso di neutrini solari o forse semplicemente perché, come testimonia il fisico russo S.S.Gershtein, gli era negato l'accesso ai reattori nucleari che, come aveva scritto nei suoi articoli, sembravano essere una sorgente di neutrini più promettente di quella del sole per fare l'esperimento.



Sognando di rivelare i neutrini solari !  
di Misha Bilenky



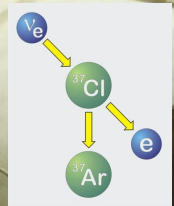
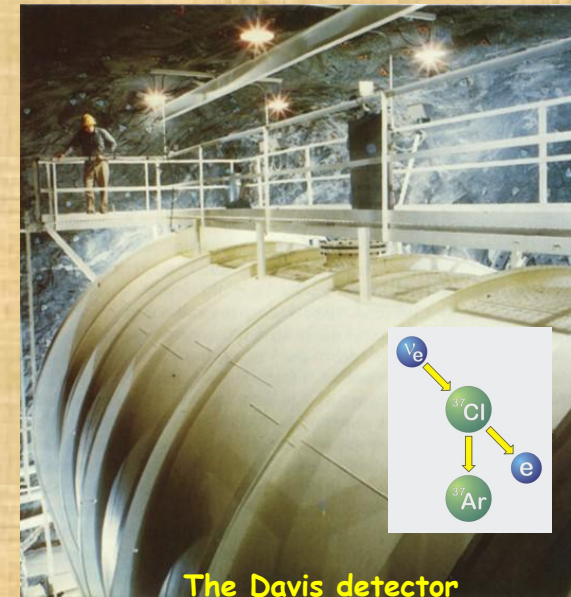
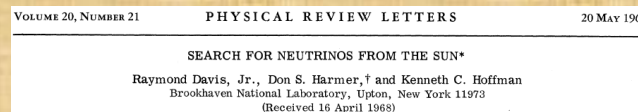
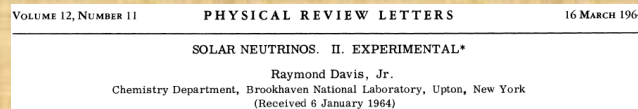
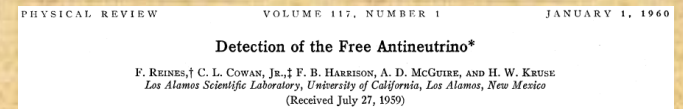
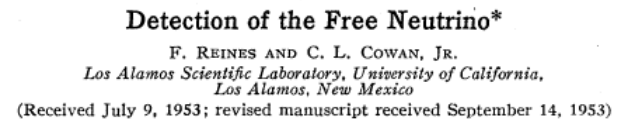
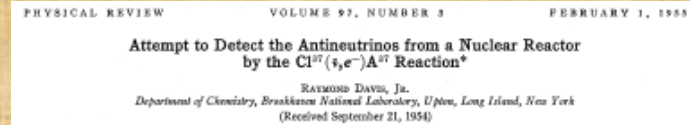
# Altri due Premi Nobel mancati !

Nel 1954, tre anni più tardi di quando Pontecorvo scriveva il quaderno, R. Davis provò ad usare il metodo  $\text{Cl}^{37}\text{-Ar}^{37}$  nel tentativo di rivelare i neutrini prima esponendo 3900 litri di  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  al reattore nucleare di Brookhaven e poi esponendone ben 11.400 litri al più potente reattore nucleare di Savannah River senza riuscire tuttavia a rivelare la reazione Cloro-Argon (Davis R. Jr., "An attempt to observe the capture of reactor neutrinos in Chlorine-37". UNESCO Conf., Paris, Vol.1, 728, 1958). Fu questa la prima indicazione sperimentale che i reattori nucleari sono sorgente di antineutrini e non di neutrini.

L'anno prima, nel 1953, F. Reines and C.L. Cowan Jr. avevano già iniziato ad utilizzare, come aveva proposto Pontecorvo nel suo articolo del '46, i reattori nucleari come intensa sorgente neutrinica. Finalmente, solo nel 1960, riuscirono a rivelare direttamente in maniera inequivocabile gli antineutrini che venivano emessi dal reattore di Savannah River anche se con una tecnica di rivelazione diversa da quella proposta da Pontecorvo. Per questa scoperta, purtroppo dopo la morte di C.L. Cowan Jr., nel 1995 F. Reines fu insignito del Premio Nobel

L'altra possibile sorgente di neutrini che Pontecorvo aveva proposto nel suo articolo del 1946 era il sole. Solo 21 anni dopo, nel 1967 R. Davis utilizzò il metodo  $\text{Cl}^{37}\text{-Ar}^{37}$  per rivelare i neutrini emessi dal sole con un rivelatore di 378.000 litri di  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  installato nella miniera di Homestake nel South Dakota e scoprendo così un vistoso deficit nel flusso previsto di neutrini solari.

Nel 2002 R. Davis fu insignito del Premio Nobel



# Premio Lenin nel 1963

Penso che molti concordino nel ritenere che Bruno Pontecorvo avrebbe meritato di ricevere svariati Premi Nobel. Purtroppo l'esser vissuto in Unione Sovietica e quindi non aver avuto a disposizione acceleratori di particelle sufficientemente potenti, né aver avuto accesso ai reattori nucleari russi, né aver avuto le risorse necessarie per costruire i necessari apparati sperimentali gli hanno impedito di concretizzare le sue profetiche idee teoriche in altrettanti esperimenti di successo, esperimenti che hanno invece permesso a molti altri fisici di essere insigniti successivamente del Premio Nobel. D'altra parte collaborazioni con le comunità internazionali (CERN, USA, etc.) erano all'epoca impensabili, dato che non gli era permesso nemmeno di uscire dall'Unione Sovietica con la scusa della sua sicurezza personale !

Bruno Maximovich Pontecorvo fu insignito dei più prestigiosi riconoscimenti russi. Nel 1953 gli fu assegnato il Premio Stalin e nel 1963, per i suoi lavori sulle interazioni deboli e sulla fisica del neutrino, il Premio Lenin. Fu insignito anche di due ordini della Bandiera Rossa del Lavoro. Nel 1964 divenne membro dell'Accademia delle Scienze dell'Unione Sovietica.



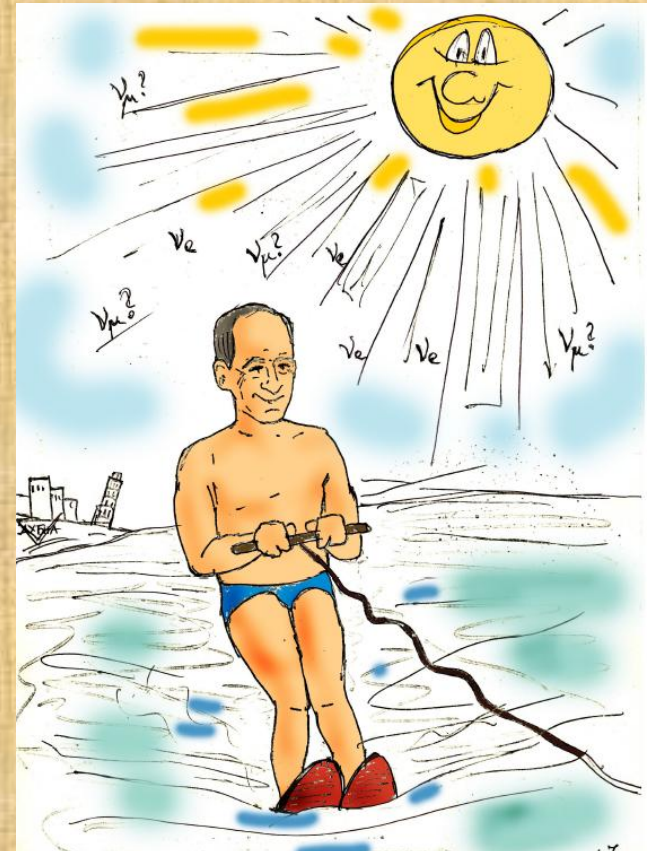


# Le oscillazioni dei neutrini

L'idea più rivoluzionaria di Bruno Pontecorvo è certamente stata quella di avere proposto che i neutrini potessero oscillare, cioè che fossero possibili transizioni da un certo tipo di neutrino ad un altro; per esempio la transizione in cui un  $\nu_e$  emesso dal sole in una tipica reazione di fusione nucleare ( $p+p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$ ) nel suo viaggio verso la terra si trasforma in un  $\nu_\mu$  e come tale viene rivelato sulla terra. La prima intuizione di Bruno che processi di questo tipo siano possibili riguarda una transizione (che in realtà non può avvenire) tra il neutrino e il suo antineutrino in analogia con quanto avviene nel caso di  $K^0 - K^{0\text{bar}}$ . In un articolo del 1957 "*Mesonium and antimesonium*" (*J. Exptl. Theoret. Phys.*, 33, 549 (1957)) Pontecorvo scrive: "*..if the conservation law for neutrino charge took no place, neutrino-antineutrino transitions in vacuum would be in principle possible*". "...transizioni neutrino-antineutrino nel vuoto sono in linea di principio possibili"

Nel 1967 quando ormai è stato dimostrato sperimentalmente che esistono due tipi diversi di neutrini, è naturale per lui considerare la possibilità di oscillazione tra  $\nu_e$  e  $\nu_\mu$ . Nel suo articolo del 1967 "*Neutrino experiments and the question of leptonic-charge conservation*" (*J. Exptl. Theoret. Phys.* 53, 1717 (1967)) Pontecorvo discute in dettaglio la possibilità di oscillazione tra  $\nu_e$  e  $\nu_\mu$ : "*If the lepton charge is not an exactly conserved quantum number, and the neutrino mass is different from zero, oscillation similar to those in  $K^0$  beams become possible in neutrino beams.*" "...oscillazioni simili a quelle che avvengono in fasci di  $K^0$  diventano possibili in fasci di neutrini

Riprende poi l'osservazione che aveva già anticipato nell'articolo del '57 asserendo che il miglior modo per rivelare l'oscillazione dei neutrini sia la misura del flusso sulla terra dei neutrini solari: "*From an observational point of view the ideal object is the sun.*" e la quantifica: "*The only effect on the earth's surface would be that the flux of observable sun neutrinos must be two times smaller than the total (active and sterile) neutrino flux.*" Si noti che al momento in cui Pontecorvo scrive queste osservazioni l'esperimento di Davis non aveva ancora prodotto nessun risultato e solo molto più tardi i risultati di questo esperimento evidenziarono l'effettivo deficit nel flusso dei neutrini solari.



Bruno si gode i neutrini del sole di Misha Bilenky



# Le oscillazioni dei neutrini

**Nel 1969**, Pontecorvo e V. Gribov nell'articolo *"Neutrino astronomy and lepton charge"* (Phys. Lett 1969, 28B,7,493-496) scrivono le equazioni formali delle oscillazioni  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ . In questo articolo si assume che i neutrini hanno massa diversa da zero ma sono particelle di natura diversa dagli altri fermioni fondamentali. Mentre i quark e i leptoni carichi sono particelle di Dirac, i neutrini sono particelle di Majorana. La questione se i neutrini siano o no particelle di Majorana è tutt'oggi irrisolta e solo la scoperta del decadimento doppio beta senza neutrini può risolvere.

**Nel 1975** Pontecorvo scrive con S.M. Bilenky l'articolo *"Quark-lepton analogy and neutrino oscillations"* (JINR Preprint E2-9383, Dubna, 1975; Phys. Lett 1976, 61B, 248.), dove si ipotizza che i neutrini siano normali particelle di Dirac che acquistano massa attraverso il meccanismo standard di Higgs della rottura spontanea della simmetria.



$\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$  as seen by Misha Bilenky

**Nel 1976**, Pontecorvo e Bilenky pubblicano l'articolo *"Again on neutrino oscillations"* (Lett. Nuovo Cimento, 1976, 17, 569) dove generalizzano ulteriormente la teoria delle oscillazioni dei neutrini introducendo nella Lagrangiana termini di massa sia di Dirac che di Majorana. La teoria delle oscillazioni dei neutrini acquistano la sua forma più generale introducendo possibile nuova fisica oltre il Modello Standard.

Concludono l'articolo dicendo che solo gli esperimenti sulle oscillazioni dei neutrini potranno dare risposta a quale sia la vera natura del neutrino: *"Thus the questions which might be answered in experiments based on neutrino oscillation ideology directly concern the very nature of neutrinos."*

# Oscillazioni dei neutrini

Ma come si spiega che una particella si trasformi in un'altra di natura diversa?

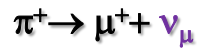
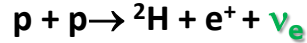
forse così ? (come suggerisce Mysha Bilenky)



ШАРНИ  
МИХАИЛА  
БИЛЕНЬНОГО  
1988 г.

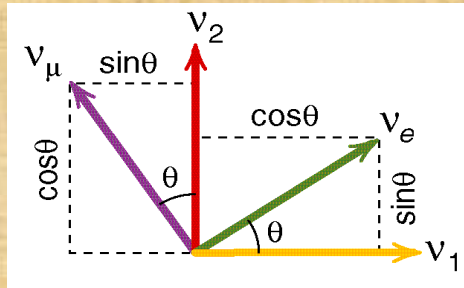
o forse, meglio, come un fenomeno tipico della meccanica quantistica ?

# Oscillazioni dei neutrini



Quando un neutrino viene prodotto in una interazione debole (in una reazione o in un decadimento) viene prodotto con una carica di sapore ben definita corrispondente al leptone coinvolto nella reazione in modo da conservare la carica di sapore totale.

Se i neutrini hanno massa, e questa è l'ipotesi fondamentale (e controcorrente per l'epoca) di Pontecorvo, può avvenire il fenomeno dell'oscillazione tra  $\nu_e$  e  $\nu_\mu$ .



$$|\nu_e(t=0)\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle$$

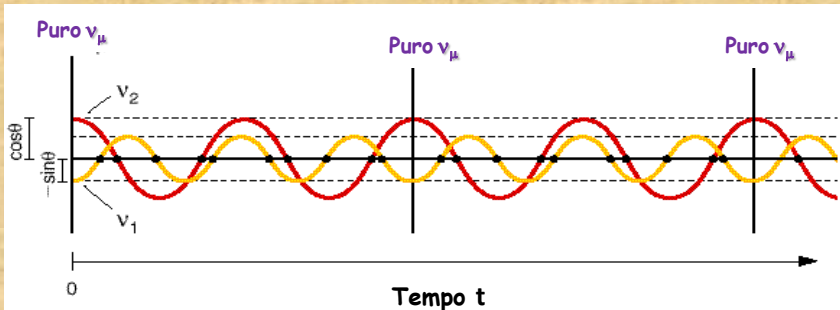
$$|\nu_\mu(t=0)\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle$$

È questo un fenomeno tipico della meccanica quantistica in cui lo stato fisico  $\nu_e$  ( $\nu_\mu$ ) di una definita carica di sapore ( $e$  o  $\mu$ ) viene descritto come una sovrapposizione di due stati fisici  $\nu_1$   $\nu_2$  corrispondenti a due valori di massa ben definiti. L'oscillazione avviene se le masse di  $\nu_1$  e  $\nu_2$  sono differenti (come è ragionevole che siano data la diversità di massa tra  $e$  e  $\mu$ ) e può succedere che avendo prodotto diciamo un  $\nu_e$ , sul sole nel rivelatore posto sulla terra rivelò un  $\nu_\mu$  perché il  $\nu_e$  di partenza si è trasformato in un  $\nu_\mu$  durante il percorso tra il sole e la terra.

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta \exp[-i(\mathbf{E}_1/\hbar)t] |\nu_1\rangle + \cos\theta \exp[-i(\mathbf{E}_2/\hbar)t] |\nu_2\rangle$$

$$\mathbf{E}_{1(2)}^2 = p^2 c^2 + m_{1(2)}^2 c^4; \quad \mathbf{E}_{1(2)} \text{ diverse se le masse sono diverse}$$

Questo fenomeno può essere capito considerando che in meccanica quantistica ad ogni particella con una data energia viene associata un'onda la cui frequenza cresce con la sua energia. Prendiamo per esempio il caso di un neutrino  $\mu$  che viene prodotto con un certo impulso (quantità di moto) in un decadimento del  $\pi$ . Se questo neutrino è una sovrapposizione delle due particelle con massa definita e diversa  $\nu_1$  e  $\nu_2$  ma con ovviamente lo stesso impulso, secondo la meccanica quantistica questo stesso neutrino potrà essere visto come la sovrapposizione di due onde con energia e quindi frequenza diversa.



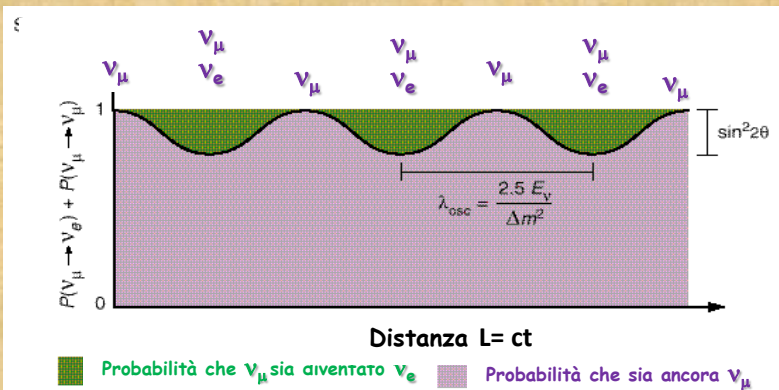
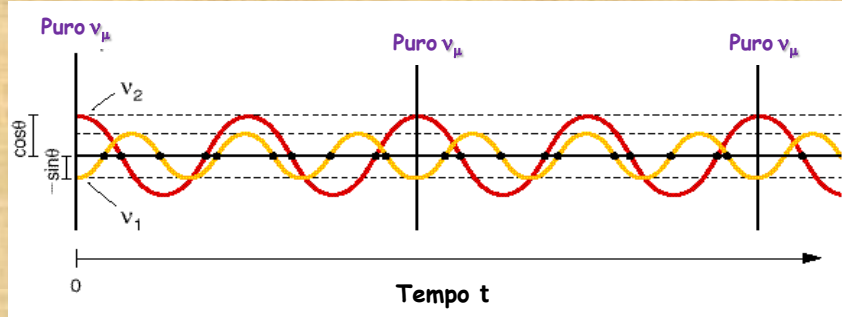


# Oscillazioni dei neutrini

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta \exp[-i(E_1/h)t] |\nu_1\rangle + \cos\theta \exp[-i(E_2/h)t] |\nu_2\rangle$$

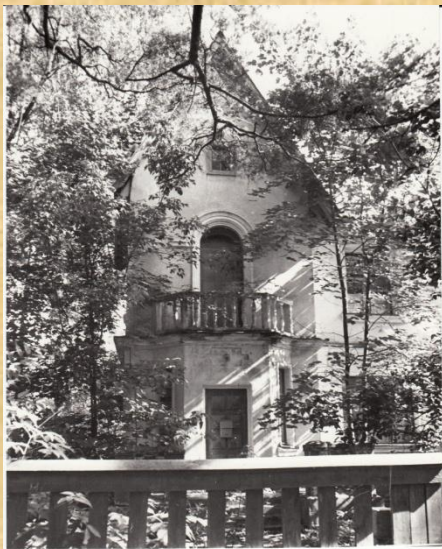
$$E_{1(2)}^2 = p^2 c^2 + m_{1(2)}^2 c^4; \quad E_{1(2)} \text{ diverse se le masse sono diverse}$$

Possiamo quindi visualizzare il percorso di un neutrino  $\mu$  (per esempio prodotto al CERN dal decadimento di un fascio di mesoni  $\pi$  nella direzione del laboratorio del Gran Sasso) come quello di due onde corrispondenti alle due particelle  $\nu_1$  e  $\nu_2$  che si propagano con frequenze diverse a seconda delle loro diverse masse. Se  $\nu_1$  e  $\nu_2$  avessero la stessa massa le due onde avrebbero la stessa frequenza e arriverebbero al Gran Sasso con la stessa fase; si ricombinerebbero quindi esattamente come erano alla partenza e quindi riveleremmo sempre (per esempio coll'esperimento OPERA) un neutrino  $\mu$  con la carica di sapore identica a quella che aveva nel momento in cui era stato prodotto al CERN. Se le due masse sono diverse, le relative onde propagandosi con frequenza diversa, arrivano sfasate e quindi nel momento in cui vengono rivelate si ricombinano in maniera diversa e corrispondono quindi ad uno stato di particella che non ha piú la stessa carica di sapore  $\mu$  ma risulterà essere un mescolamento delle due cariche di sapore  $\mu$  ed  $e$ . Quindi OPERA non rivela sempre il neutrino  $\mu$  ma talvolta rivela un neutrino  $e$  con probabilità definita dalla fase con cui si mescolano le due onde nel momento in cui vengono rivelate. Si potrà quindi vedere in OPERA dei neutrini  $e$  provenienti dal CERN anche se al CERN sono stati prodotti soltanto neutrini  $\mu$ .



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_\mu(t) | \nu_e(t=0) \rangle|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2(1.267(m_2^2 - m_1^2)L/E_\nu \text{ [GeV/eV}^2\text{km]})$$

# La vita in Russia



Casa Pontecorvo a Dubna

La posizione di accademico riserva a Pontecorvo privilegi che pochi anno in Russia. Ma Bruno seguirà a trascorrere sempre una vita normale, tra ricerca, insegnamento e famiglia. I figli crescono ma purtroppo la moglie Marianne continua ad avere problemi di salute che la portano a passare lunghi periodi in ospedale. Bruno, come sempre, pratica con ottimo successo le sue passioni che riguardano lo sport: tennis, innanzitutto, ma anche sci d'acqua, escursioni in montagna, e dopo essersi fatto mandare l'attrezzatura necessaria dall'Italia, anche la pesca subacquea. Anche la classica dacia farà parte della sua nuova vita. Alla fine del '59 incontra Radam, una donna bellissima, di nobili origini georgiane, che sarà al suo fianco per quasi tren'anni.



La dacia



La sua passione: il tennis



In montagna sul Caucaso



A pesca sul Mar Nero



Bruno con il figlio Gil nel 1964



# La fede politica

Nel 1952 Bruno diventa cittadino sovietico. Due anni dopo si iscrive al PCUS. È un comunista convinto, un idealista che crede che in Unione Sovietica stia nascendo una vera società socialista.

Il 4 marzo 1955 tiene una conferenza stampa nella sede dell'Accademia delle Scienze, alla presenza di giornalisti provenienti da tutto il mondo. Le sue prime parole ai giornalisti, dopo anni di silenzio, sono:

*Le potenze atlantiche hanno deciso di preparare la guerra atomica. Per costoro le armi nucleari sarebbero armi legittime. Durante i quattro anni vissuti in URSS ho potuto convincermi che il popolo sovietico, tutto il popolo sovietico, vuole la pace e che il governo dell'URSS prende tutte le misure possibili per impedire una guerra.*

Un anno dopo, all'indomani dell'invasione dell'Ungheria avvenuta nel novembre del 1956, è tra i milioni di sovietici che condividono la decisione presa dal segretario del PCUS Nikita Krusciov su un intervento armato. In Italia, Giolitti, Nenni ed altri funzionari lasciano il PCI. Anche il fratello Gillo restituisce la tessera del partito. Ma la fede di Bruno nel comunismo non vacilla! Bisogna arrivare all'agosto del 1968 e all'invasione della Cecoslovacchia da parte delle truppe sovietiche perché inizi a dubitare.

Anni dopo confesserà a Miriam Mafai: *Forse è lì, a Praga, che è morta la mia idea del socialismo.* [M. Mafai - Il lungo freddo]

Tuttavia pur condannando l'invasione Pontecorvo non si unisce alle voci di protesta capeggiate dal fisico Andrej Sacharov, padre della bomba atomica sovietica. *In quel tempo pensavo che Sacharov avesse qualche ragione ma lo giudicavo un terribile ingenuo dal punto di vista politico. Ci ho messo molto tempo a capire che era lui ad avere ragione. L'ingenuo ero io.* [M. Mafai - Il lungo freddo]



L'Unità, 22 agosto 1968

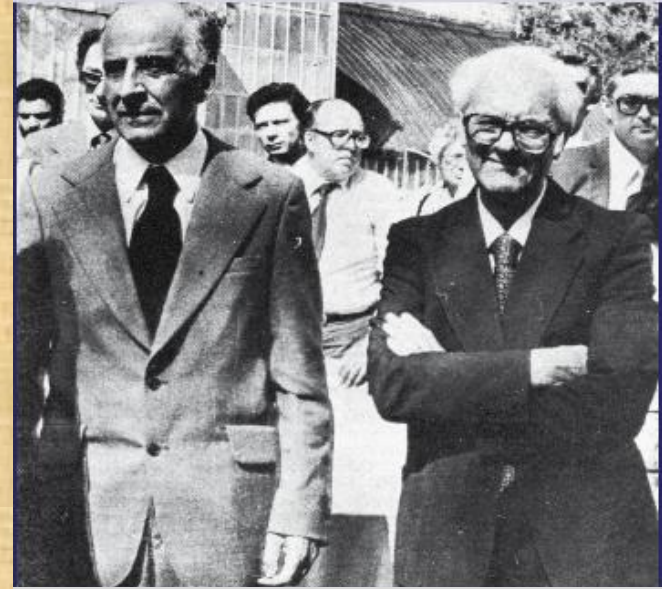


# Il ritorno in Italia

Il 6 settembre 1978, dopo 28 anni di lontananza, Pontecorvo, ritorna in Italia anche se per pochi giorni.

Torna per festeggiare i 70 anni del vecchio amico Edoardo Amaldi, al quale lo legano tanti ricordi ed esperienze fatte insieme in via Panisperna.

Appena sceso dall'aereo che lo ha portato a Roma c'è un'orda di giornalisti e cineoperatori ad aspettarlo. Pontecorvo dichiara: *"Io subito vi voglio svelare un gran segreto. Io non ho mai, dico mai, lavorato alla bomba atomica, alla bomba all'idrogeno o ad altre bombe, né in Occidente né in Russia né in Cina né altrove"*.



Pontecorvo con Edoardo Amaldi

**L'Unità**



Pontecorvo arriva a Fiumicino

Dopo di allora Pontecorvo ritorna molte altre volte in Italia, anche per partecipare a convegni e incontri scientifici. Viene nominato membro dell'Accademia dei Lincei, l'Accademia che fu anche di Galileo. Nel 1991 gli viene conferita dall'Università di Ferrara la laurea in fisica *honoris causa*. Anche Pisa vuole onorare il suo antico concittadino e la Pubblica Assistenza di Cascina gli conferisce il *Premio Delfini d'Argento* "Una vita per la scienza".



Pontecorvo col sindaco di Pisa L. Bulleri

# Una persona per bene

Durante uno dei suoi ultimi soggiorni a Roma, a Miriam Mafai che gli chiede:  
*"Sei pentito di aver fatto quella scelta, quarant'anni fa?"*

Bruno Pontecorvo risponde: *"Ci ho pensato molto, a questa domanda. Puoi immaginare quanto ci ho pensato. Ma non riesco a dare una risposta. Io credo di essere sempre stato una persona per bene, anche se alle volte forse ho fatto delle scelte sbagliate; ma cosa è più importante, fare le scelte giuste o essere una persona per bene?"*



Cimitero Degli Inglesi a Roma

Affetto dal morbo di Parkinson, Pontecorvo muore a Dubna il 24 settembre 1993. Le sue ceneri, per sua espressa volontà, sono deposte metà a Roma nel cimitero acattolico Degli Inglesi e metà nel piccolo cimitero di Dubna.



Cimitero di Dubna

# L'eredità scientifica di Bruno Pontecorvo

Voglio riprendere la frase con cui conclude l'articolo del 1976, quello in cui la teoria delle oscillazioni dei neutrini prende la sua forma più generale con termini di massa sia di Dirac che di Majorana:

*"Thus the questions which might be answered in experiments based on neutrino oscillations ideology directly concern the very nature of neutrinos."*

"Così le domande a cui può essere data risposta con esperimenti sulle oscillazioni dei neutrini riguardano direttamente la stessa natura del neutrino"

Ancora una volta Pontecorvo, il teorico, chiama in causa Pontecorvo lo sperimentale e afferma che solo gli esperimenti potranno dare la risposta a quale sia la vera natura del neutrino. Penso che questa sia l' **Eredità** scientifica che ci ha lasciato

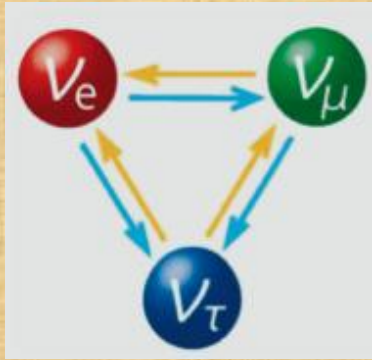
## lo Scienziato Bruno Pontecorvo

Con le sue idee rivoluzionarie ha aperto un programma di ricerca sperimentale impressionante che ancora oggi continua con esperimenti sempre più impressionanti e che verosimilmente ci condurranno a scoprire la fisica Oltre il Modello Standard.

A Pisa lo scorso 18-20 settembre si è tenuto il convegno scientifico "Symposium in honor of Bruno Pontecorvo for the centennial of the birth", durante il quale è stato illustrato questo vasto programma di ricerca attualmente in corso in tutto il mondo (<http://www.pi.infn.it/pontecorvo100> ).



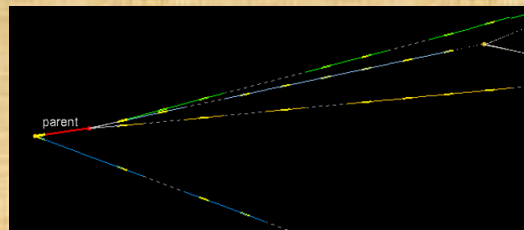
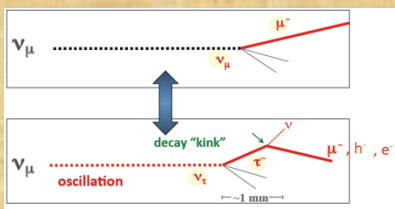
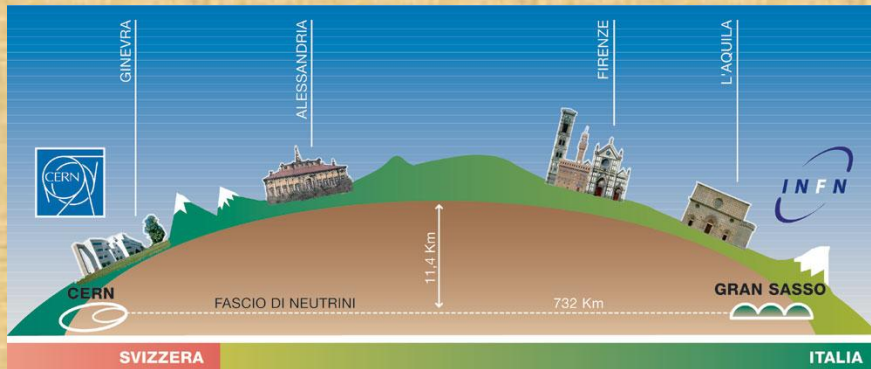
# L'eredità scientifica di Bruno Pontecorvo



Sappiamo oggi che esistono tre tipi di neutrini  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ , corrispondenti ai tre leptoni  $e, \mu, \tau$ , identificati da un attributo detto carica di sapore. Abbiamo quindi tre tipi di cariche di sapore ciascuna corrispondente ad ognuno dei tre leptoni e del neutrino a lui associato. Con tre neutrini la matematica che descrive le loro oscillazioni è un po' più complicata ma il concetto è esattamente lo stesso.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \bar{\nu}_e \\ e^+ \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \bar{\nu}_\mu \\ \mu^+ \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \bar{\nu}_\tau \\ \tau^+ \end{pmatrix}$$

Molti esperimenti sono stati effettuati per studiare le oscillazioni dei neutrini e molti sono ancora in corso con vari tipi di neutrini: solari, da reattori nucleari, prodotti nell'atmosfera, da acceleratori di particelle; e sarebbe troppo lungo elencarli tutti. Uno di questi esperimenti ancora in corso è OPERA, sotto il Gran Sasso



# L'eredità di Bruno Pontecorvo

Ma oltre alla grande eredità scientifica che lo scienziato Bruno Pontecorvo ci ha lasciato, io credo ci sia un'altra grande **Eredità** che

## **I' Uomo Bruno Pontecorvo**

ha lasciato alle future generazioni: ed è il suo desiderio di giustizia sociale.

Si legge nella autobiografia scritta nel 1988 per l' "*Enciclopedia della Scienza e della Tecnica*":

*"Le mie opinioni politiche sono di sinistra. In origine esse erano dovute soprattutto al mio odio per il fascismo e, io penso ora, al senso di giustizia inculcatomi da mio padre".*

Alla Mafai che lo intervista ammette di essersi sbagliato e di essere stato per molti anni un grande ingenuo nel credere che nell'Unione Sovietica

*"si andasse costruendo l'uomo nuovo"*

Tuttavia, nonostante tutto quello che era successo nell'Unione Sovietica, ancora nel 1988, quando scrive la sua biografia, continua a credere che sia possibile costruire una società giusta e democratica

*"fondata su leggi avanzate e sui diritti dell'uomo".*

# Grazie dell'attenzione

È possibile scaricare questa presentazione dalla pagina:

[http://www.pi.infn.it/~castaldi/Pontecorvo/Lectio\\_Potecorvo.pdf](http://www.pi.infn.it/~castaldi/Pontecorvo/Lectio_Potecorvo.pdf)



# Nel centenario della nascita di Bruno Pontecorvo

*The Legacy of Bruno Pontecorvo: the Scientist and the Man*  
 Roma, September 11 - 12, 2013, "Sapienza" University

The year 2013 is the centenary of the birth of Bruno Pontecorvo, one of the great physicists of the 20<sup>th</sup> century and a pioneer of high-energy physics. To honour his memory as a person and a scientist, INFN and the Physics Department of University of Rome "La Sapienza", are organising an International Meeting on 11 and 12 September 2013. Bruno Pontecorvo's life was characterised by his important, ground-breaking scientific ideas as well as by his ideological choices, occasionally dramatic, which marked his destiny as man and scientist. The meeting will be fitting tribute to the memory of the greatest "ragazzo di Via Panisperna": an opportunity for scientists and students to celebrate his scientific vision and his civil contributions.

**Organizing Committees**

**Scientific Committee**

**11 September**

**12 September**

**Tribute to the Bruno Pontecorvo's family**

**The Legacy of Bruno Pontecorvo:  
 the Scientist and the Man.  
 Roma 11-12 Sept. 2013**

<http://www.roma1.infn.it/pontecorvo/>

**1913-2013**



**PONTECORVO100**

Symposium in honour of  
**Bruno Pontecorvo**  
 for the centennial of the birth

**Pisa / 18-20 September 2013**

**Local Organizing Committee**

Alessandro Massimo Bellini  
 Roberto Bernabini  
 Giovanni Battagari  
 Vittorio Corradi  
 Fabrizio Del  
 Francesco Falciano  
 Luca Lili  
 Mauro Morganti  
 Daniela Nobile  
 Claudia Totani

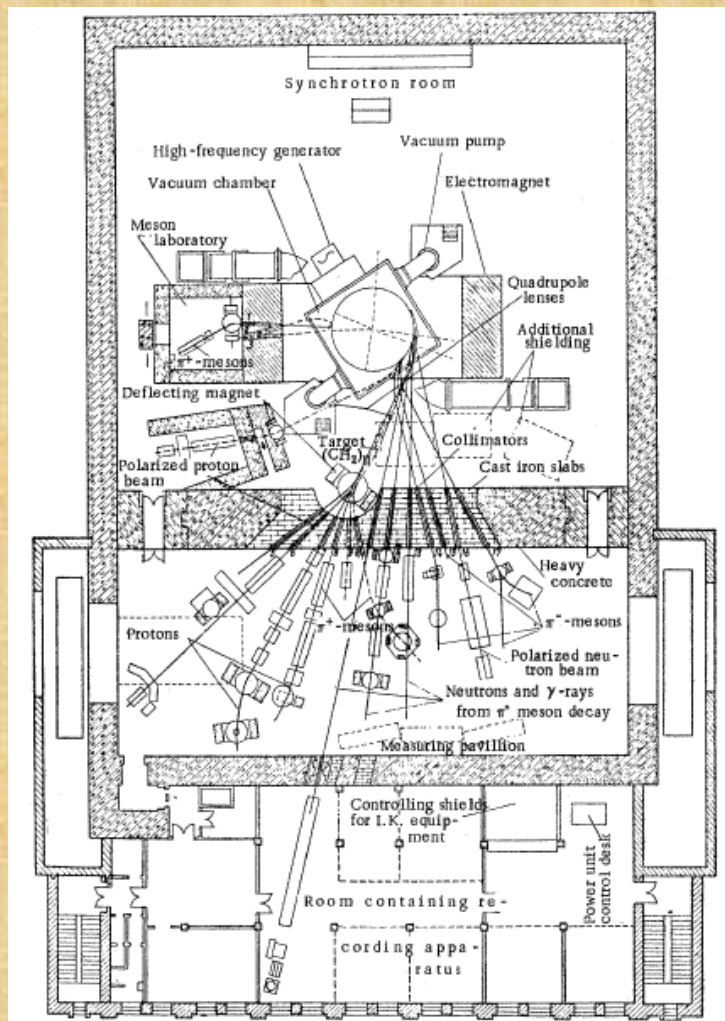
INFN - Sezione di Pisa  
 e Dipartimento di Fisica "Enrico Fermi"  
 Polo Fibonaccini - Edificio C  
 Largo Bruno Pontecorvo, 3  
 I-50127 Pisa (Italy)

[www.pi.infn.it/pontecorvo100/](http://www.pi.infn.it/pontecorvo100/)

**PONTECORVO100**  
 Symposium in honour of  
 Bruno Pontecorvo  
 Pisa 18-20 September 2013

<http://www.pi.infn.it/pontecorvo100/>

In the 1953 the accelerator was upgraded to a six-meter synchrocyclotron, the protons were accelerated up to 680 MeV and the proton current almost doubled. 14 beams of various kind become available (protons, neutrons,  $\pi^\pm$ ,  $\mu^\pm$ ,  $\gamma$  from  $\pi^0$  )



Kind of particle	Energy (MeV)	Collimator number	Beam flux $\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$
Protons . . . . .	$675 \pm 6$	7 as well as 6 or 8	$1,5 \cdot 10^9$
Polarized protons . . . . .	$640 \pm 10$	4	$4 \cdot 10^5$
Neutrons . . . . .	610	6	$6 \cdot 10^5$
Polarized neutrons . . . . .	for the spectrum interval $500 \leq E_n \leq 650$	11, 12, 13	$(3 \div 4) \cdot 10^4$
$\pi^+$ -mesons . . . . .	for the spectrum interval $450 \leq E_\pi \leq 600$	10	$10^4$
$\pi^-$ -mesons . . . . .	150	8	450
	300	8	1000
	310	9	1600
	360	8	150
$\pi^0$ -mesons . . . . .	300	1	500
	330	1	200
	370	3	70
$\mu^+$ -mesons . . . . .	90	8	$20 \div 30$
$\mu^-$ -mesons . . . . .	25	17	60
$\gamma$ -quanta from $\pi^0$ -meson decay	$10 \leq E_\gamma \leq 600$	12	$3 \cdot 10^3$

Intensities of particle beams after 1953

Synchrocyclotron beams



# Internal reports on $\pi$ -mesons production

The results of all **experiments** carried on by Bruno Maximovich Pontecorvo with his group of young researchers in the **period 1951-1954** at the five-meter cyclotron were published as internal reports in Russian, some of those were also published later in 1955. In these early experiments **the production of single charged and neutral  $\pi$  mesons with proton and neutron beams** on proton and complex nuclei were performed. Here there is a couple of examples:

The  $\pi$  meson production was extensively studied in p-p and p-d interactions (*B.M.Pontecorvo, G.I.Selivanov, V.A.Zhukov, RINP, 1953*) and the results reported in this internal report in Russian.

Тема 36. Исследование процессов образования  $\pi$ -мезонов при взаимодействии нуклонов с нуклонами и легкими элементами.

Руководитель: Понтекорво Б.М.  
Исполнители: Селиванов Г.И.  
Жуков В.А.

В предстоящих опытах предполагается исследовать процесс рождения  $\pi$ -мезонов в (p-p) и (p-d)-столкновениях. Для изучения рождения нейтральных  $\pi$ -мезонов при взаимодействии протон-протон экспериментально будет найдено:

1. Угловое распределение  $\gamma$ -лучей от распада  $\pi$ -мезонов.
2. Полное сечение образования  $\pi$ -мезонов.
3. Зависимость полного сечения образования  $\pi$ -мезонов от энергии сталкивающихся нуклонов.

Theme 36. Study of the  $\pi$  meson production in nucleon-nucleon and nucleon-light nuclei collisions

Leader: Pontecorvo B.M.  
Executors: Selivanov G.I.  
Zhukov V.A.

The  $\pi^0$  production in nuclei of different atomic weight allowed the measurement of the  $\pi^0$  mean free path in nuclear matter (*B.M.Pontecorvo, G.I. Selivanov, RINP, 1952; Dokl.Acad.Nauk SSSR, 102, 495 (1955)*) following the idea that Pontecorvo wrote in the first pages of his Notebook as soon as he arrived in Dubna in November 1950.

Asymptote of m.f.p of  $\pi^0$  in nuclear matter.

The mean free path of charged mesons in nuclei can be investigated in photoforbes. To investigate the mean free path of  $\pi^0$ , the only way is to use as a ~~nucleon-nucleon~~ nuclear matter itself, as the it is necessary to have a substance of such density that the m.f.p for interaction is  $\ll$  decay. This means that one must use as an absorber the same nucleus which produces mesons. Using  $\gamma$ , study the ratio  $\frac{dN}{dZ}$  as a function of Z.

In 1953 the accelerator was upgraded to a six-meter cyclotron, the protons were accelerated up to 680 MeV and the proton current almost doubled. Some of the previous experiments were done once again at this higher energies by the Pontecorvo's group (*Yu.D.Balashov, V.A.Zhukov, B.M.Pontecorvo, G.I.Selivanov, RINP, 1955*). In 1954 As soon as well-collimated  $\pi$ -meson beams became available at the cyclotron, several measurements were performed by the Pontecorvo's group on the energy dependence of the **total cross sections for  $\pi$  mesons** on hydrogen, deuterium and on complex nuclei. See "*The Soviet Journal of Atomic Energy 1957, vol. 3, 5, 1273-1314*" for a review.



# Scattering of $\pi$ -mesons on hydrogen, deuteron and complex nuclei

As soon as well-collimated  $\pi$ -meson beams became available at the cyclotron in 1954, Pontecorvo became very interested in doing experiments of  $\pi$ -meson scattering on protons and complex nuclei. In a review paper with V.P.Dzhelepov on the experiments performed with the cyclotron in "The Soviet Journal of Atomic Energy 1957, vol.3, 5, 1273-1314", he writes: "the interaction between charged particles takes place through photons, which are the quanta of the electromagnetic field. Therefore, the properties of photons are strongly related to the characteristics of the electromagnetic forces between charged particles. Similarly, the properties of  $\pi$ -mesons are intimately related to the forces between nuclei, which means that they are related to nuclear forces. Meson theory is based on the hypothesis, first formulated by Yukawa, that nuclear forces are caused by mesons. Although this concept is correct, meson theory is still, unfortunately, in the early stages of its development."

Several measurements were performed by the Pontecorvo's group on the energy dependence of the total cross sections for  $\pi$  mesons on hydrogen and deuterium. (A.E.Ignatenko, A.I.Mukhin, E.B. Ozerov, B.M.Pontecorvo; Dokl. Acad. Nauk SSSR, 103, 45(1955); Dokl. Acad. Nauk SSSR, 103, 209(1955); J. Exptl. Theoret. Phys (USSR) 30, 7 (1956). A.I. Mukhin, E.B. Ozerov, B.M. Pontecorvo; J. Exptl. Theoret. Phys (USSR) 31, 371 (1956)). See for instance the up-right figure. From its caption one reads:

*"The "resonance" behaviour of the cross sections is in the vicinity of 190 MeV characterizes the meson-nucleon interaction in state with isotopic spin and total angular momenta 3/2".*

Measurements of total cross section of  $\pi$  mesons on complex nuclei were also performed by the Pontecorvo's group. (A.E.Ignatenko, A.I. Mukhin, E.B. Ozerov, B.M. Pontecorvo; Dokl. Acad. Nauk SSSR, 103, 395(1955); J. Exptl. Theoret. Phys (USSR) 31, 545 (1956)). See for instance the down-right figure. From its caption one reads:

*"The curves are reminiscent of the energy dependence of the cross section for the total interaction of  $\pi^+$  and  $\pi^-$  mesons with nucleons. Analysis shows that the interaction of  $\pi$ -mesons with nuclei takes place primarily by means of interactions with individual nucleons of the nucleus.*

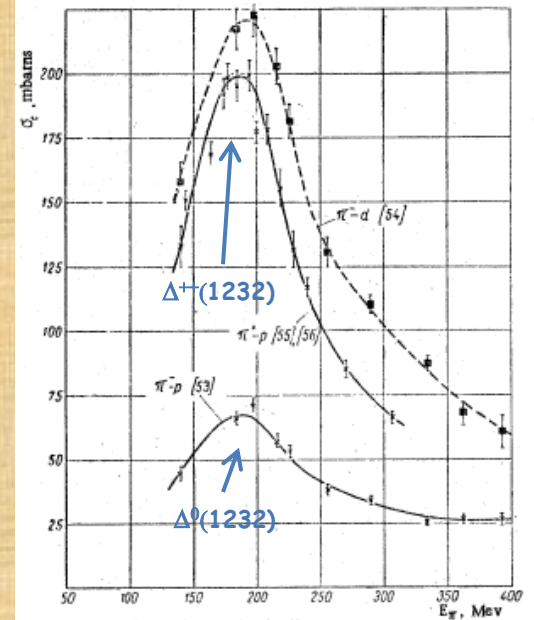


Fig. 12. Total cross section for the interaction of  $\pi^+$  and  $\pi^-$  mesons with hydrogen and deuterium. The "resonance" behavior of the cross sections in the vicinity of 190 MeV characterizes the meson-nucleon interaction in the state with isotopic spin and total angular momenta 3/2. At an energy of  $E_{lab} \approx 300$  MeV the contribution to scattering from the state with isotopic spin 1/2 becomes significant.

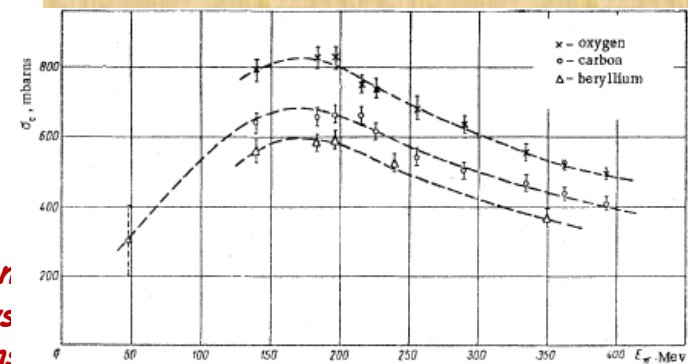


Fig. 15. The energy dependence of the total cross section for the interaction of  $\pi$ -mesons with light nuclei [65]. The curves are reminiscent of the energy dependence of the cross section for the total interaction of  $\pi^+$  and  $\pi^-$  mesons with nucleons. Analysis shows [66] that the interaction of  $\pi$ -mesons with nuclei takes place primarily by means of interactions with individual nucleons of the nucleus.

# Scattering of $\pi$ mesons on hydrogen

On the review paper written together with V.P.Dzhelepov in "The Soviet Journal of Atomic Energy 1957, vol. 3, 5, 1273" one can read: "Several experiments (see for instance A.I.Mukhin, E.B.Ozerov, B.M.Pontecorvo; J.Exptl.Theoret.Phys (USSR) 31, 371 (1956). A.I.Mukhin, B.M.Pontecorvo; J.Exptl.Theoret.Phys (USSR) 31, 550 (1956)) were devoted..omissis..to investigations of angular distributions of  $\pi$ -mesons scattered by hydrogen in the  $\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p$ ,  $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + p$ ,  $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$  reactions for the following meson energies: 176, 200, 240, 270 MeV. Some of the data obtained is shown in Figs. 13 and 14. All data obtained, in particular the equality of the cross section for the interaction of both  $\pi^+$  and  $\pi^-$  mesons with deuterium, verifies the principle of charge symmetry for a set of mesons and nucleons, as well as the more rigorous principle of charge independence..omissis..Experiments verified the fact that in the energy range up to 300 MeV the meson-nucleon interaction

is extremely strong for the state whose isotopic spin and total angular momentum are 3/2. The scattering cross section in this state attains its maximum possible value at a  $\pi$  meson energy of about 190 MeV. It is therefore often said that the meson-nucleon interaction has a "resonant" character<sup>(\*)</sup>. It is possible that this resonance is related to the nucleon structure, although one may not assert this at present..omissis.. The high accuracy with which the angular distribution of the  $\pi^+$ -meson scattering

by hydrogen have been measured for energies higher than 200 MeV allowed the first phase analysis accounting not only for the s- and p-states, but also for the d-state. It follows from this analysis that the meson-nucleon interaction radius is about  $7 \times 10^{-14}$  cm.

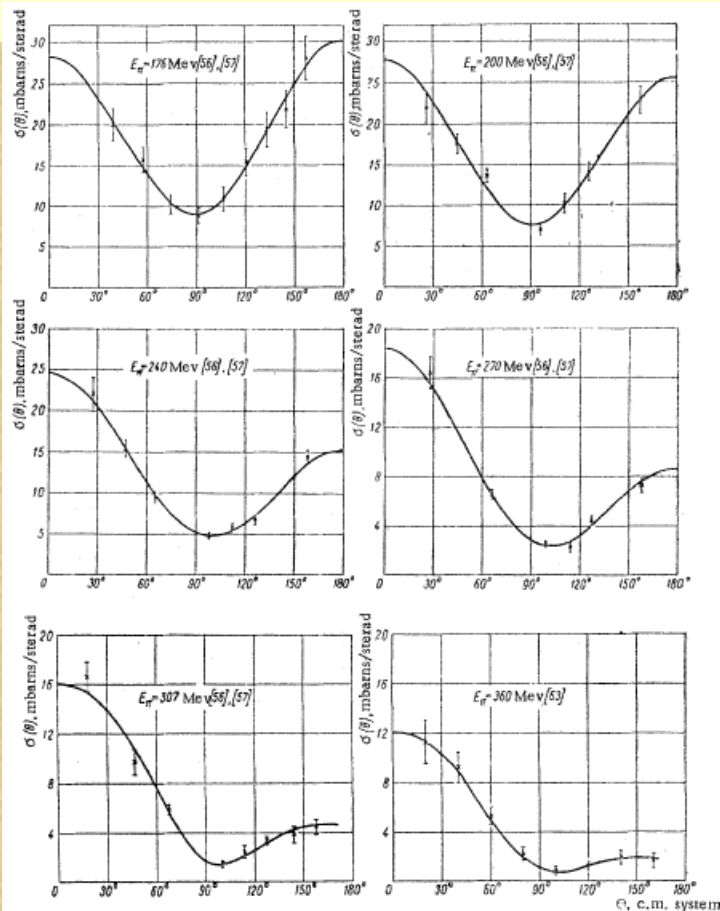


Fig. 13. The angular distribution of  $\pi^+$ -mesons elastically scattered by hydrogen for various energies. It is seen from the figure that close to the "resonance" energy (190 Mev) the angular distribution is symmetric about  $90^\circ$ . At energies greater than the "resonance" energy, forward scattering predominates.

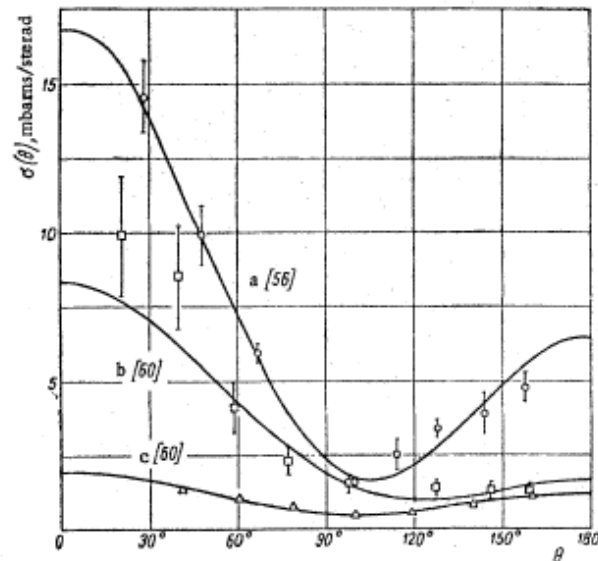


Fig. 14. Scattering of  $\pi$ -mesons by hydrogen at 307 Mev in the following processes: a)  $\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p$ ; b)  $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n \rightarrow \gamma + \gamma + n$ ; c)  $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + p$ . From the data given in this figure and in Fig. 13, one can obtain the coupling constant  $f^2$  of the meson-nucleon interaction, which is found to be about 0.1.

(\*) the  $\Delta(1232)$

# Strange Particles

Since the end of 1950 Pontecorvo (as we saw from his notebook and from the previous internal report) was deeply convinced that the only way to solve the contradiction posed by particles which are strongly produced but are decaying weakly is to assume that they must be produced in pair. **In 1953, from an experimental point of view, this fact was not completely clear**; on the contrary this hypothesis was in contradiction with the results of the experiment of Schein et al. (*Schein M., Haskin D., Glasse R., Fainberg F., Brown K.; Congress International sur le rayonnement cosmique, Bagnere de Bigorre, 1953*). This experiment was claiming that five events with  $\Lambda^0$ -particles from  $\pi^-$  mesons on carbon were observed on photographic plates and that was in contradiction with the experiment of Garwin (*Garwin R.L.; Phys.Rev., 1953, vol.90, p.274*) who was finding an upper-limit of  $\sigma \leq 7 \cdot 10^{-32} \text{ cm}^2$  to the cross section per nucleon for the production of  $\Lambda^0$  by 450-MeV protons on carbon.

**As usual, the theoretical physicist Pontecorvo, as brilliant experimenter, decides to clarify this point by himself** with an experiment trying to observe the formation of  $\Lambda^0$ -particles in collisions of 670 MeV protons with carbon nuclei. (*Baladin M.P., Balashov B.D., Zhukov V.A., Pontecorvo B.M., Selivanov G.I. Report of the Inst. for Nuclear Problem, Acad. Sci. USSR, 1954.*) The experiment was looking, as done by Garwin, for  $\Lambda^0$ -particles in the decay channel  $\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^0$ . Gamma rays from the decay of  $\pi^0$  mesons were detected by means of a telescope of scintillation and Cherenkov counters. It was found an upper limit for the **cross section for production of  $\Lambda^0$ -particles in the reaction Nucleon+Nucleon  $\rightarrow \Lambda^0 + \text{Nucleon}$  of  $\sigma \leq 10^{-31} \text{ cm}^2/\text{nucleon}$** . Therefore conclusion was reached that:

**"The small value of the cross section for the formation of  $\Lambda^0$  particles in the interaction of protons with an energy of 670 MeV with complex nuclei agrees with the hypothesis of the fundamental transformation of a nucleon according to the scheme  $(N) \leftrightarrow (\Lambda^0) + (\text{heavy meson})$ ."**

The production in pair of V-particles and heavy mesons according to the previous scheme, hypothesized by Pontecorvo already in the 1951, was then observed in  $\pi^- p$  collision with  $\pi^-$  of 1.5 BeV from the BNL Cosmotron by W.B.Fowler et al. (*Phys. Rev. 93, 861 (1954)*)

These important contributions given by Pontecorvo to the problem of understanding the properties of the "strange particles" are not often acknowledged to him by the scientific community.

**He was probably the first to have the intuition that the contradictory behavior of these strange particles can be explained if are produced in pair. Unfortunately this idea remained hidden in internal reports written in Russian, not accessible for long time to the vast community of physicists outside the Soviet Union.**

PHYSICAL REVIEW VOLUME 93, NUMBER 4 FEBRUARY 15, 1954

## Production of Heavy Unstable Particles by Negative Pions\*

W. B. FOWLER, R. P. SHUTT, A. M. THORNDIKE, AND W. L. WHITTEMORE  
Brookhaven National Laboratory, Upton, New York

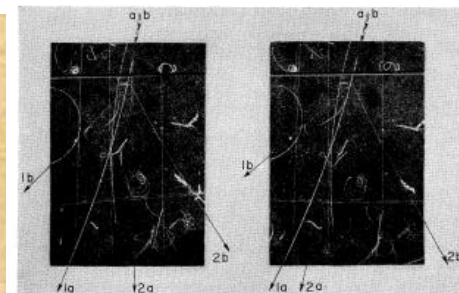
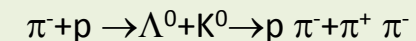


FIG. 1. C. C. Diffusion cloud-chamber photograph of two neutral  $V^0$  particles (a) and (b), whose lines of flight are almost collinear. (a) is believed to be a  $\Lambda^0$  decaying into a proton (1a) and a negative  $\pi$  meson (2a). Tracks 1a and 2a practically coincide in the right view. (b) is probably a  $\Sigma^0$  decaying into  $e^-$  (1b) and  $\pi^-$  (2b).



first event observed in a cloud chamber by Fowler et al.



# Free neutrino detection

At the end of 1951, when Pontecorvo writes this page in his Notebook, he is evidently thinking to the brilliant method that he proposed in its famous publication "Inverse beta process" (Chalk River Report, PD-205, 1946) to detect "free neutrinos".

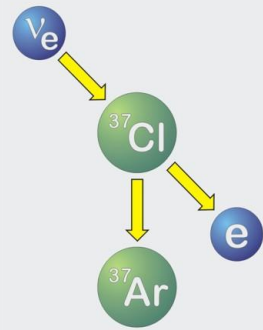
At that time it was believed that the direct detection of neutrinos, because of his negligible cross section with matter as evaluated by Bethe and Peierls ( $\sigma < 10^{-44} \text{ cm}^2$ , corresponding to a penetrating power of more than  $10^{16}$  Km in solid matter), was "absolutely impossible".

In the paper of '46, proposing his method to directly detect "free neutrinos", Pontecorvo asserts:

*"it is true that the actual  $\beta$  transition involved, i.e., the actual emission of a  $\beta$  particle in process  $\nu + Z \rightarrow \beta^- (\beta^+) + Z \pm 1$  ..omissis..is certainly not detectable in practice."*

but immediately adds:

*"However, the nucleus of charge  $Z \pm 1$ , which is produced in the reaction may be (and generally will be) radioactive with a decay period well know..omissis.. The essential point, in this method, is that radioactive atoms produced by an inverse  $\beta$ -ray process have different chemical properties from the irradiated atoms. Consequently, it may be possible to concentrate the radioactive atoms from a very large irradiated volume."*



Then Pontecorvo proposes, as the best candidate, the use of the reaction  $\nu + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow \beta^- + {}^{37}\text{Ar}$

*"irradiating with neutrinos a large volume of Chlorine or Carbon Tetra-chloride, for a time of the order of one month, and extracting the radioactive  ${}^{37}\text{Ar}$  from such volume by boiling. The radioactive argon would be introduced inside a small counter; the counting efficiency is close to 100%, because of the high Auger electron yield."*

The choice of this elements was done "according to a compromise between their desirable properties...", namely 1) The material irradiated must not be too much expensive, since large volume is needed. 2) The nucleus radioactive produced should have a rather long decay period because of the long time needed for the separation. 3) The separation of the radioactive atoms must be relatively simple. 4) The difference in mass of the elements  $Z$  and  $Z+1$  must be small because the inverse  $\beta$  process cross section increases with the energy. 5) The background of  $Z+1$  element produced by other causes must be as small as possible.

The sources proposed by Pontecorvo for an "inverse beta process" experiment is the neutrino flux from the sun ("the neutrino emitted by the sun, however, are not very energetic") or the high intensity neutrino source from a pile of a nuclear reactor ("the neutrino source is the pile itself, during operation. In this case, neutrinos must be utilized beyond the usual pile shield. The advantage of such an arrangement (with respect to use as source of hot uranium metal extracted from a pile) is the possibility of using high energy neutrinos emitted by all the very short period fission fragments. Probably this is the most convenient neutrino source").

# Free neutrino detection

The first idea of Pontecorvo to detect "free neutrinos" was to use the "inverse beta process" in the reaction:



(Chalk River Report, PD-141, 25 May, 1945):

*"The  ${}^{35}_{16}\text{S}$  is a  $\beta$ -active radioelement, decaying to  ${}^{35}_{17}\text{Cl}$  with a period of 87.1 days the energy of the  $\beta$ -ray radiation being only 120 KeV.  ${}^{35}_{16}\text{S}$  would be produced by absorption of a neutrino and emission of a positive electron from the original  ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ ".*

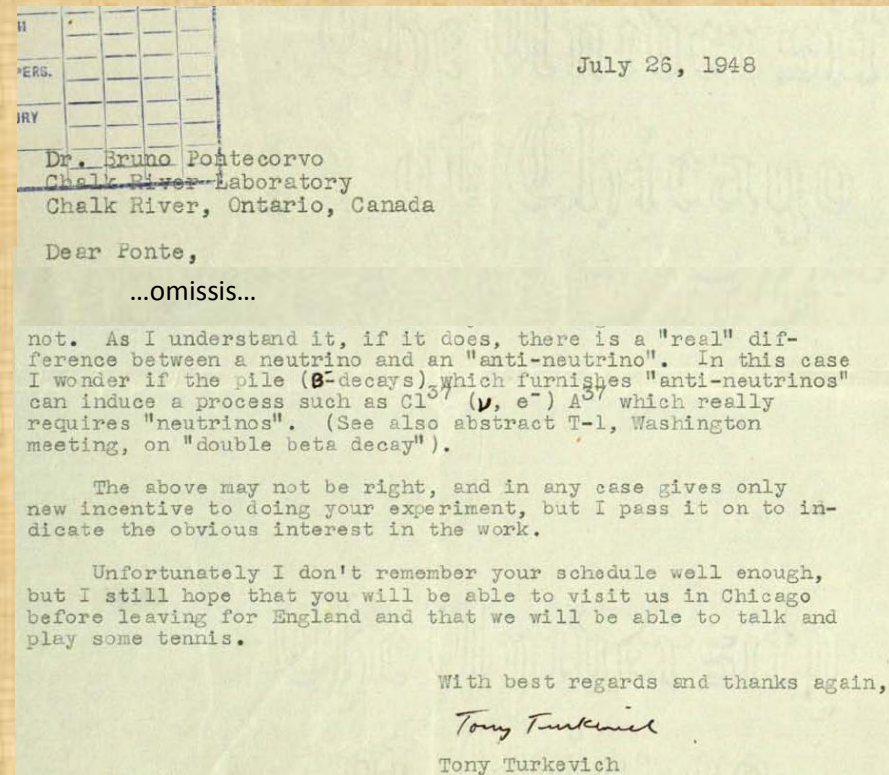
In the years '45-46 the difference between neutrino and antineutrino was not very clear and the Chlorine-35/Sulphur-35 reaction could only be used to detect reactor neutrinos (i.e. antineutrinos), while the Chlorine-37/Argon-37 reaction could be used to look for solar neutrinos.

However in 1948, as can be seen from this letter of T. Turkevich to Pontecorvo, there was already the suspicion that reactor (anti) neutrinos could not induce the Chlorine/ Argon process and in the letter we read: *"The above may not be right, and in any case gives only new incentive to doing your experiment"*.

The idea of a Chlorine/Argon experiment was not pursued when Pontecorvo moved from Chalk River to England, although some tests were already done to detect the 2.8 KeV Auger electrons in Argon-37 using proportional counters with high amplification (D.H.W. Kirkwood, B.Pontecorvo, G.C.Hanna, Phys.Rev.74(1948)497

## An Example.

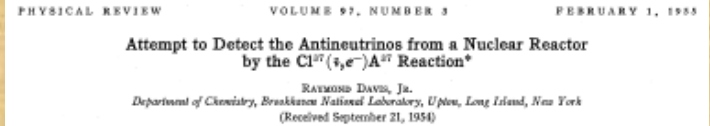
There are several elements which could be used for neutrino irradiation in the suggested investigation. Chlorine, for example, fulfils reasonably well the desired conditions indicated in the preceding paragraph. According to Seaborg's Table of Isotopes<sup>(4)</sup>,  ${}^{35}_{16}\text{S}$  is a  $\beta$ -active radioelement, decaying to  ${}^{35}_{17}\text{Cl}$  with a period of 87.1 days, the energy of the  $\beta$ -ray radiation being only 120 kv.  ${}^{35}_{16}\text{S}$  would be produced by absorption of a neutrino and emission of a positive electron from the original  ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ . According to





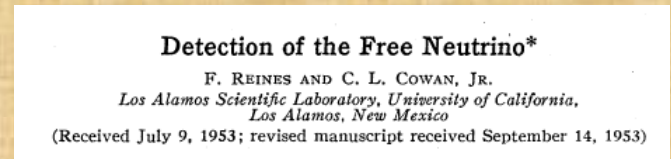
# Free neutrino detection

In 1954, R. Davis tried to use the  $\text{Cl}^{37}\text{-Ar}^{37}$  method in an attempt to detect reactor neutrinos exposing a 3900-liter tank of carbon tetrachloride ( $\text{CCl}_4$ ) at the Brookhaven Research Reactor.

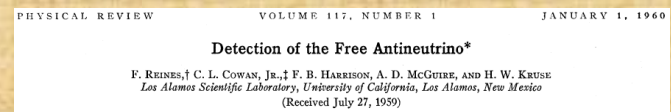


The antineutrino source of the Brookhaven reactor was not powerful enough to detect any possible signal with the target volume of  $\text{CCl}_4$  exposed and so no signal was observed. Therefore Davis moved the experiment to the Savannah River reactor, which was the most intense antineutrino sources in the world at that time. Similarly no reactor neutrinos was found even when the experiment was upgraded to a 11.400-liter  $\text{CCl}_4$  target (Davis R. Jr., "An attempt to observe the capture of reactor neutrinos in Chlorine-37". UNESCO Conf., Paris, Vol.1, 728, 1958). This was the first evidence that antineutrinos (reactor neutrinos) are different particles from neutrinos.

Meanwhile, in 1953, F. Reines and C.L. Cowan Jr. tried a first attempt to detect free reactor neutrinos at the Hanford nuclear reactor in the reaction antineutrino + proton  $\rightarrow$  neutron + positron by using liquid scintillators. The background from cosmic rays prevents to draw a definitive conclusion on this experiment. Only several years later, in 1960, after having repeated the experiment at the Savannah River reactor they could reach a definitive conclusion on the observation of free antineutrinos. This discovery was recognized with the Nobel Prize to F. Reines in 1995.



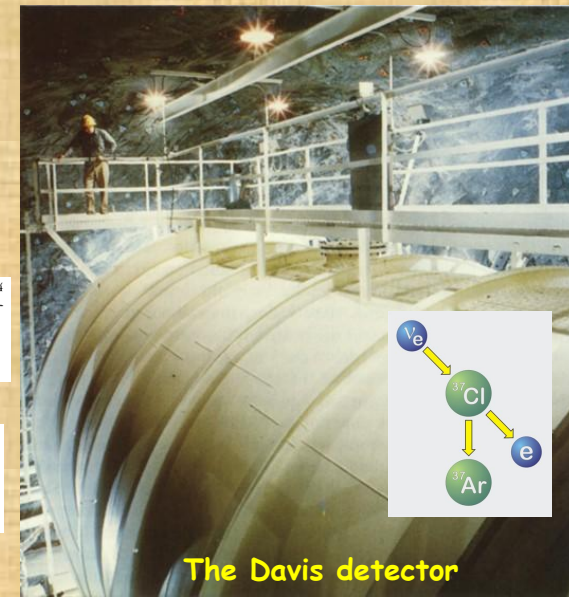
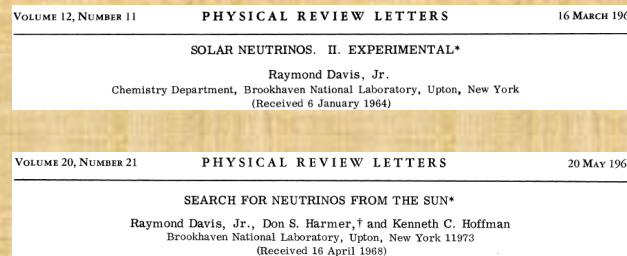
The other possible source of neutrinos suggested by Pontecorvo in 1946 was "the neutrino emitted by the sun, however, are not very energetic." In the 1964 R. Davis, ten years after he tried to detect reactor neutrinos, in the paper Phys. Rev. Lett. 12, 303-305 (1964) proposes an experiment to detect solar neutrinos arguing that the neutrino flux from Boron-8 decay, according to J. N. Bahcall (Phys. Rev. Lett. 12, 300-302 (1964)) could be detectable.



The detector, a 378.000-liter tank of  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  located in the Homestake mine in South Dakota, in 1967 was operational and already from the beginning the data, published in 1968, showed a deficit in the predicted solar neutrino flux:

the solar neutrino problem was born.

R. Davis was awarded with the Nobel Prize in 2002



The Davis detector



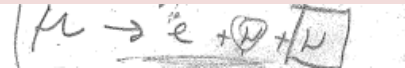
$$\nu_{\mu} \neq \nu_e$$

"At the Laboratory of Nuclear Problems of JINR in 1958 a proton relativistic cyclotron was being designed with a beam energy 800 MeV and a beam current 500 A. By the way, this accelerator eventually was not built. Anyway at the beginning of 1959 I started to think about the experimental research program for such an accelerator. First, it occurred to me that neutrino investigations at accelerator facilities are perfectly feasible and that an healthy and relatively cheap neutrino program could be accomplished by dumping the proton beam in a large Fe block. ...omissis... (one experiment) was intended to clear up the question as to whether  $\nu_e \neq \nu_{\mu}$ ." Pontecorvo writes that in "The infancy and youth of neutrino physics: some recollections" Journal de Physique, 1982, n.12, vol 43, C8-221. And then he continues: "I have to come back a long way (1947-1950). Several groups, among which J. Steinberger, E. Hincks and I, and others were investigating the (cosmic) muon decay. ...omissis... the decaying muon emits 3 particles: one electron and two neutral particles, which were called by various people in different way: two neutrinos, neutrino and neutretto,  $\nu$  and  $\nu'$ , etc. I am saying this to make clear that for people working on muons in the old times, the question about different types of neutrinos has always been present.

It seems to me that what he writes at page 8 of his Notebook at the beginning of November 1950



and few lines later



reinforces the fact that Pontecorvo had always the suspicion that the two neutrinos in the muon decay were two different type of particles.

The new powerful cyclotron foreseen at Dubna could be for Pontecorvo the good occasion to answer that question. In the paper "Electron and Muon Neutrino" (J. Exptl. Theoret. Phys. 37 (1959) p.1751) he writes many possible reactions induced by neutrino (or antineutrino) beams that could be forbidden if  $\nu_e \neq \nu_{\mu}$ . "There are no reasons for asserting that  $\nu_e$  and  $\nu_{\mu}$  are identical particles" he writes just before to itemize the long list of possible interesting reactions, and continues giving some reasons (like the absence of the  $\mu \rightarrow e + \gamma$  decay) for which the hypothesis of  $\nu_e \neq \nu_{\mu}$  is attractive and concludes "the existence of two different types of neutrinos, which are not able to annihilate, is attractive from the point of view of the symmetry and the classification of particles and might help to understand the difference in nature of muons and electrons."

Finally, in the paper Pontecorvo proposes to use an anti- $\nu_{\mu}$  beam to look for the reaction anti- $\nu_{\mu} + p \rightarrow \mu^{+} + n$  and to check if the anti- $\nu_{\mu} + p \rightarrow e^{+} + n$  is forbidden.

Unfortunately the foreseen 800 MeV cyclotron was never built at Dubna !



$\nu_{\mu} \neq \nu_e$  acknowledges the Bruno's intuition

The experiment was done three years later at the Brookhaven AGS by G. Danby et al. (Phys. Rev. Lett. 9 (1962) 36). For the experimental proof that  $\nu_e \neq \nu_{\mu}$ , L.M.Lederman, M.Schwartz and J.Steinberger were awarded with the Nobel Prize in 1988.

# neutrino oscillations - 1

The more revolutionary idea of Bruno Pontecorvo is certainly the "*neutrino oscillations*". The first Bruno's intuition of this process can be found in a paper of 1957 "*Mesonium and antimesonium*" (*J.Exptl.Theoret.Phys, 33, 549 (1957)*). He writes: "*We discuss here the problem as to whether there exist other mixed neutral particles (not necessarily elementary ones) (besides the  $K^0$ -mesons) which are not identical to the corresponding antiparticles and for which the **particle-antiparticle transitions are not strictly forbidden.***" and concludes "*...if the conservation law for neutrino charge took no place, **neutrino-antineutrino transitions in vacuum would be in principle possible*** .

The following year, in 1958, when Bruno hears a false rumor that Davis has observed some events of antineutrinos produced by the Savannah River reactor, he publishes the article "*Inverse beta processes and non-conservation of lepton charge*" (*J.Exptl.Theoret.Phys, 34, 247(1958)*) in which he discusses in detail whether it is possible the transition neutrino-antineutrino as he had suggested in his previous article. In the paper Pontecorvo makes the hypothesis that "*a) the neutrino and antineutrino are not identical particles; b) the neutrino charge is not strictly conserved.*" from which he concludes that: "*neutrinos in vacuum can transform themselves into antineutrinos and vice versa. This means that neutrino and antineutrino are particle mixtures, i.e. symmetrical and antisymmetrical combination of two truly neutral Majorana particles  $\nu_1$  and  $\nu_2$* ".

Immediately after he adds that these assumptions may not be true, but the discussion is still interesting because they have consequences (as possible neutrino oscillations) that can be tested experimentally by the two experiments of Reines and of Cowan and Davis:

*"So, for example, a beam of neutral leptons from a reactor which at first consists mainly of antineutrinos will change its composition and at a certain distance  $R$  from the reactor will be composed of neutrino and antineutrino in equal quantities."*

However, he warns that such an effect could be unobservable in these experiments because the distance between the detector and the source of antineutrinos is too small compared to the large values of  $R$ ,...but: "*...it will certainly occur, at least, on an astronomic scale*", anticipating of more than ten years, the phenomenon of the deficit of solar neutrinos.

# neutrino oscillations - 2

In his famous paper of 1967 "*Neutrino experiments and the question of leptonic-charge conservation*" (*J. Exptl. Theoret. Phys.* 53, 1717 (1967)) Bruno Pontecorvo discusses in detail the possibility of oscillations both for neutrinos ( $\nu_e$  and  $\nu_\mu$ ) in their respective antineutrinos ( $\nu_{e(\mu)} \leftrightarrow \text{anti-}\nu_{e(\mu)}$ ) and for neutrinos  $e$  in neutrinos  $\mu$  ( $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ ):  
*"If the lepton charge is not an exactly conserved quantum number, and the neutrino mass is different from zero, oscillation similar to those in  $K^0$  beams become possible in neutrino beams."*

At first he considers the neutrino oscillation with the respective antineutrinos, as he had suggested in its first article of 1957, now introducing the concept of neutrino "sterile": *"If there are two different additive lepton charges, the transitions  $\nu_e \leftrightarrow \text{anti-}\nu_e$  and  $\nu_\mu \leftrightarrow \text{anti-}\nu_\mu$  transform potentially "active" particles into particles, which, from the point of view of ordinary weak processes, are **sterile**, i.e. practically undetectable, inasmuch as they have "wrong" spirality. In such a case the only way of observing the effects in question consists in measuring the intensity and the time variation of the intensity of **original active particles**, but not in detecting the appearance of the corresponding (sterile) antiparticles.*



In the 1967, when the existence of two kind of neutrinos had been experimentally well proved, it is natural for him to consider also the possibility of oscillation of  $\nu_e$  in  $\nu_\mu$ :  
*"Returning to the usual notations, there will take place oscillations  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ , which, in principle are detectable not only by measuring the intensity and the time variation of the intensity of original particles, but also by observing the "appearance" of new particles."*

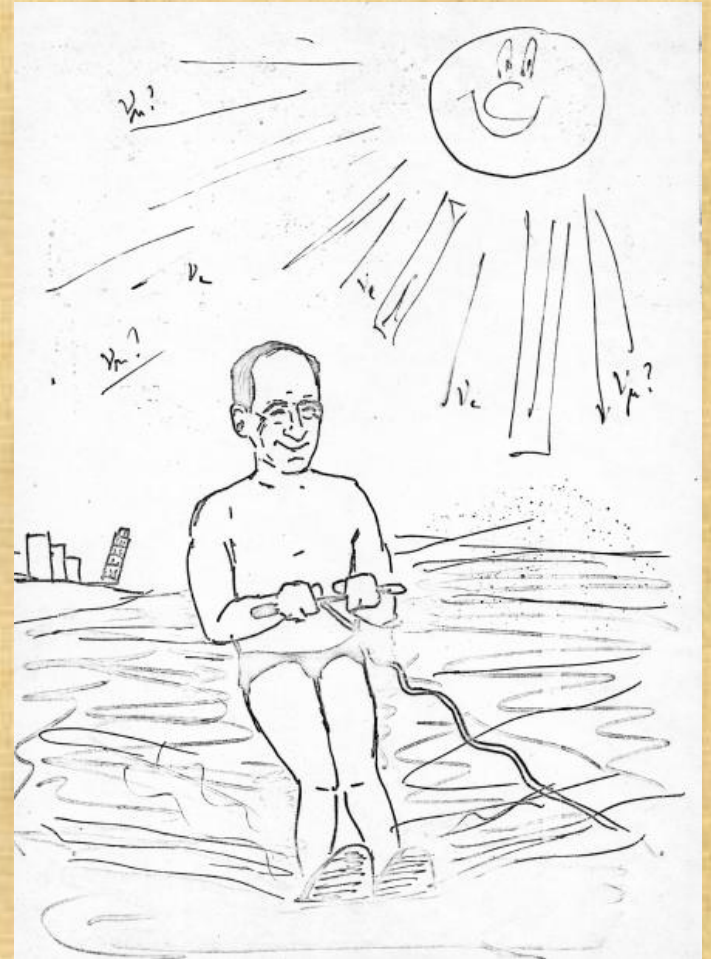


# neutrino oscillations - 3

The deep conviction of Pontecorvo that neutrinos have non-zero mass, although small, and are therefore susceptible to oscillations as in the system as  $K^0$ -anti $K^0$ , derived from the intuition of a profound symmetry between leptons and hadrons at least with respect to the weak interaction, as well as for the same argument of symmetry he was convinced that the neutrino in the decay of the pion into muon + neutrino was of a different nature from the neutrino of the  $\beta$  decay.

Furthermore, in the paper of 1967 "*Neutrino experiments and the question of leptonic-charge conservation*" (*J.Exptl. Theoret. Phys.* 53, 1717 (1967) Bruno Pontecorvo observes, as already anticipated in the 1957 paper, that the best way to detect the neutrino oscillation is the measurement of the solar neutrino flux on the earth: *"From an observational point of view the ideal object is the sun."* and he quantifies it: *"The only effect on the earth's surface would be that the flux of observable sun neutrinos must be two times smaller than the total (active and sterile) neutrino flux."*

It must be noticed that at the time when Pontecorvo is writing these observations the Davis' experiment had not yet produced any result and only later this experiment really showed the existence of a deficit in the solar neutrino flux.



by Misha Bilenky

# neutrino oscillations - 4

Two years later, in 1969, Pontecorvo writes a paper together with V. Gribov *"Neutrino astronomy and lepton charge"* (Phys. Lett 1969, 28B,7,493-496) where they write the equations of the oscillations  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$  in the case of non-conservation of the lepton charge (lepton number) and the existence of only two Majorana neutrinos with mass different from zero:

*"It is shown that lepton nonconservation might lead to a decrease in the number of detectable solar neutrinos at the earth surface, because  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$  oscillations, similar to the  $K^0 \leftrightarrow \text{anti-}K^0$  oscillations. Equations are presented describing such oscillations for the case when there exist only four neutrino states".*

In this paper Gribov and Pontecorvo assume that neutrinos are particles with non-zero mass different from the other fundamental fermions. While the charged leptons and quarks are Dirac particles, the neutrinos hypothesized here are Majorana particles. The question of whether neutrinos are actually Majorana particles or not is a fundamental question which remains open and which only the detection of a neutrino-less double beta decay could solve.

In 1975 Pontecorvo writes with S.M. Bilenky the paper "Quark-lepton analogy and neutrino oscillations" (JINR Preprint E2-9383, Dubna, 1975; Phys. Lett 1976, 61B, 248.), where in analogy with the mechanism of the quark mixing model (Cabibbo-GIM), neutrinos are Dirac particles to which a mass is given as to all other fundamental fermions (quarks and leptons) with the standard Higgs mechanism of spontaneous symmetry breaking: *"In this note we consider neutrino mixing starting from a different point of view suggested by an analogy between leptons and quarks. We assume that each neutrino is described by a four-component spinor."*

The following year, in 1976, Pontecorvo and Bilenky publish the paper "Again on neutrino oscillations" (Lett. Nuovo Cimento, 1976, 17, 569) where they further generalize the theory of neutrino oscillations by introducing in the Lagrangian both Dirac and Majorana mass terms. The theory of neutrino oscillations thus assumed its most general form by introducing elements of possible new physics beyond the Standard Model.

Now only the experiments can give the answer to what is the real nature of neutrinos. They conclude the paper saying: *"In conclusion let us stress that the main points related to oscillation phenomena are: finite neutrino masses, neutrino mixing, lepton charge violation, number of neutrino types. Thus the questions which might be answered in experiments based on neutrino oscillation ideology directly concern the very nature of neutrinos."*

# Radioattività

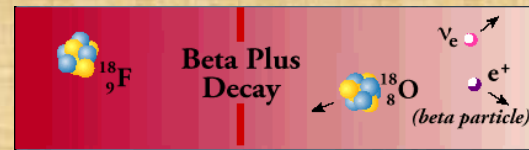
Sono soprattutto i nuclei pesanti ( $A > 200$ ) e deficienti in neutroni ad essere interessati da decadimento Alpha



decadimento  $\beta^-$ : avviene per quei nuclei in cui vi è un eccesso di neutroni



decadimento  $\beta^+$ : avviene per quei nuclei in cui vi è un eccesso di protoni



Per l'emissione gamma, la massa atomica  $A$  e il numero atomico  $Z$  rimangono invariati; si parla in questo caso di **isomeria nucleare**.



Dy=Disprosium

anche l'emissione dei fotoni  $\gamma$  obbedisce alla legge del decadimento esponenziale, ma a differenza dei decadimenti  $\alpha$  e  $\beta$ , i tempi in gioco sono dell'ordine di  **$10^{-15}$  secondi**.

Esistono però casi in cui il tempo di dimezzamento risulta essere superiore al **millesimo di secondo**, in questo caso si parla di **stato metastabile** (lo stato metastabile è detto anche stato isomerico)

Esempio di stato metastabile:

**protoattinio metastabile**  $^{234m}\text{Pa}$  ( $T = 1.17$  minuti)



Possiamo classificare i diversi modi di emissione radioattiva di un nucleo instabile nel seguente modo:

- Interazione nucleare forte
  - Radioattività  $\alpha$
  - Radioattività da protoni o neutroni differenziati
  - Fissione spontanea
- Interazione nucleare debole
  - Radioattività  $\beta$
  - Cattura elettronica (EC)
- Interazione elettromagnetica
  - Isomeria nucleare

**Curie (Ci):** attività di 1 g di  $^{226}\text{Ra}$

**Becquerels (Bq):** una disintegrazione al secondo

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

ESEMPIO: Un grammo di  $^{60}\text{Co}$  ( $\tau = 5.27$  anni) avrà un'attività di  $4.185 \cdot 10^{13}$  Bq  
Un grammo di  $^{238}\text{U}$  ( $\tau = 4.47 \cdot 10^9$  anni) avrà un'attività di 12500 Bq