

INTRODUZIONE ALLA FISICA NUCLEARE E SUBNUCLEARE PARTE III

Lezione 5

24/04/2024

Interazioni Deboli

VIERI CANDELISE



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE

La Stranetia (1947)

LEZIONE 5

(1)

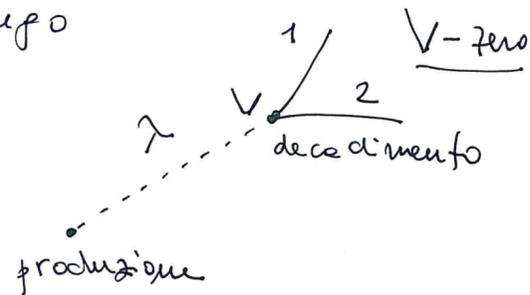
06/05/2022

17/05/2023

interazioni di cosmic in camera a nebbia in campo magnetico. Particelle mai viste che interagiscono con sezioni d'urto tipiche delle interazioni forti e che decadono con vite medie tipiche delle inter. deboli ($\tau \sim 10^{-10}$ s). Si osservano in produzione associata. Come si misura la vita media in un campo \vec{B} ?

Conoscendo $p = 0.3 BR$, ottengo

$$\lambda = (\beta\gamma) c\tau = \left(\frac{p}{mc}\right) c\tau$$



Per ottenere la massa:

$$m_{12}^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2 - 2|\vec{p}_1||\vec{p}_2|\cos\theta$$

Si trovano varie particelle di massa diverse

K^\pm (mesoni $S=0$) K^0 (mesoni $S=0$) Λ (iperoni $S=1/2$)

Σ^\pm (iperoni $S=1/2$) Ξ^0 (iperoni $S=1/2$) Ξ^- (iperoni $S=1/2$)

Per classificarle, tenuto conto del loro comportamento, viene introdotto un nuovo numero quantico

strangeness S conservato nelle interazioni forti:

$$\sum_i S_i = \sum_f S_f$$

violato nelle interazioni deboli:

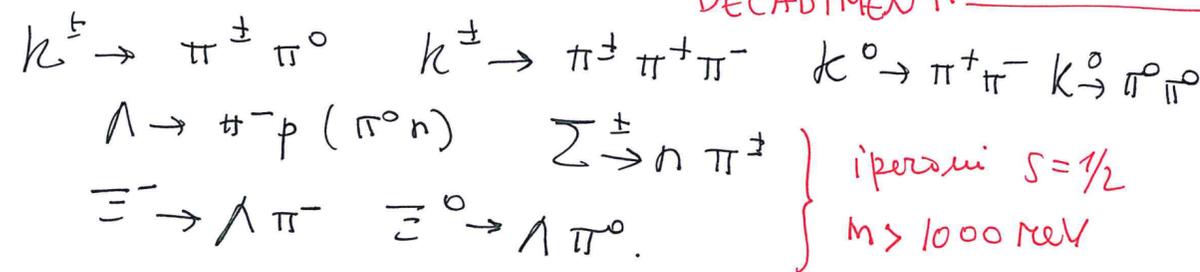
$$\sum_i S_i \neq \sum_f S_f$$

caratteristiche delle particelle strane ②

- prodotti copiosamente in interazioni forti: $pN, \pi N$
- $\sigma \sim 10^{-27} \text{ cm}^2$
- produzione associata (coppie)
- decadimento debole $\tau \sim 10^{-10} \text{ s}$. Esempi:

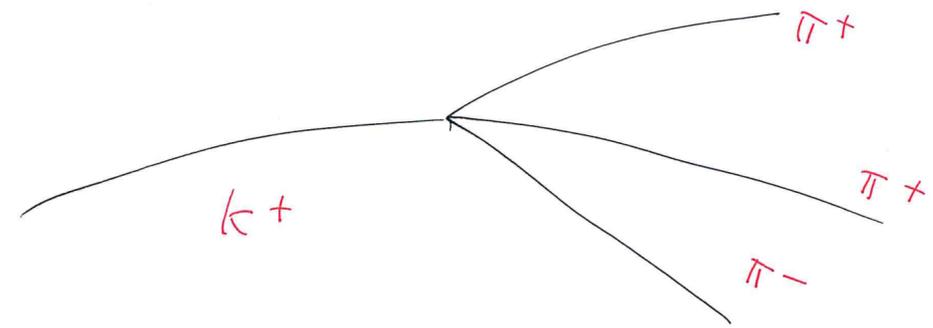
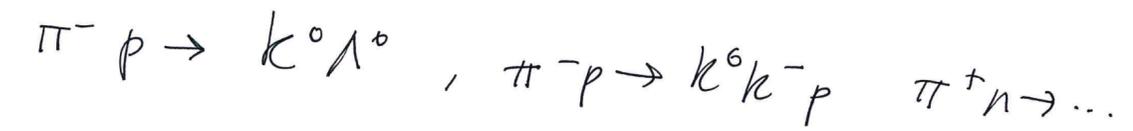
kaoni: $S=0$ $m \sim 497 \text{ MeV}$

DECADIMENTI



K^+, K^0	$S=1$	K^-, \bar{K}^0	$S=-1$
$\Lambda, \Sigma^{\pm}, \Sigma^0$	$S=-1$	$\bar{\Lambda}, \bar{\Sigma}^{\pm}, \bar{\Sigma}^0$	$S=1$
Ξ^0, Ξ^-	$S=-2$	$\bar{\Xi}^0, \bar{\Xi}^+$	$S=2$

PRODUZIONI



Il numero barionico

(3)

• perché non si osserva il decadimento del protone nel vuoto?

$$\begin{array}{l}
 p \rightarrow \pi^0 e^+ \\
 p \rightarrow \pi^0 \mu^+ \\
 p \rightarrow \pi^+ + \nu
 \end{array}
 \left|
 \begin{array}{l}
 \text{NB:} \\
 n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \quad \text{ok} \\
 p \rightarrow n e^+ \bar{\nu}_e \quad \text{NO} \\
 \quad \quad \quad M_p < M_n
 \end{array}
 \right.$$

• Il protone non decade: $\tau_p > 1.6 \cdot 10^{25}$ anni

È un'osservazione sperimentale ($\tau_{\text{universo}} \sim 13.7 \cdot 10^9$ anni) (che garantisce l'esistenza dell'universo).

Il protone è "protetto" da un numero quantico detto numero Barionico $B = 1$ (p, n) $B = -1$ (\bar{p} , \bar{n}).
 $B = 0$ (e, μ , mesoni, neutrini).

Qualunque processo in natura conserva B

$$\sum_i B_i = \sum_f B_f$$

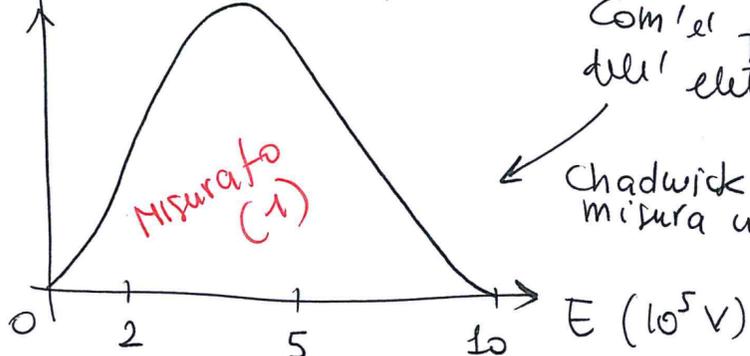
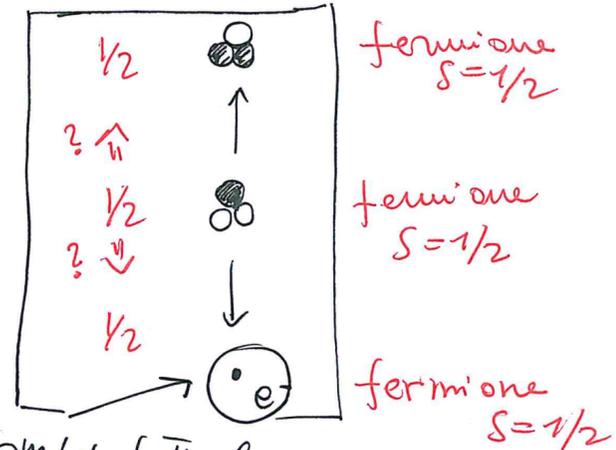
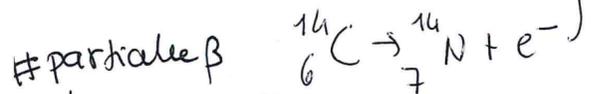
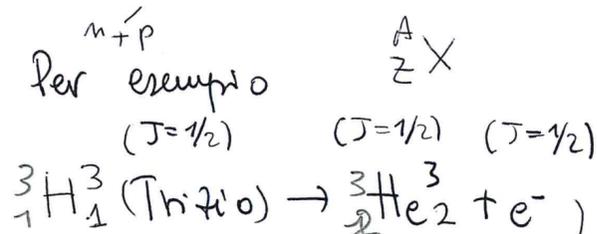
~~conservazione~~
~~conservazione~~
~~conservazione~~
conservazione!

Le particelle con B si chiamano **Barioni**

	B	S	Q	}	Barioni $S = 1/2$		B	S	Q	}	Mesoni $S = 0$
p	+1	0	1			K^\pm	0	± 1	± 1		
n	+1	0	0			K^0	0	+1	0		
Λ	+1	-1	0			π^\pm	0	0	± 1		
Σ	+1	-1	$\pm 1, 0$			π^0	0	0	0		
Ξ	+1	-2	$\pm 1, 0$			η^0	0	0	0		
				\bar{K}^0	0	-1	0				

- Teoria di Fermi del Decadimento β - $\text{\textcircled{2}}$

Prendiamo un decadimento β : INT. DEBOLE: decadimenti radiattivi

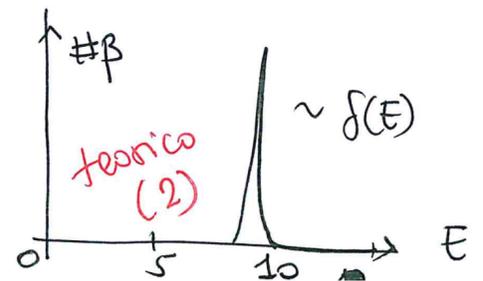


Com'è fatto lo spettro dell'elettrone emesso?
 Chadwick nel 1914 misura uno spettro continuo

Tuttavia questo presenta un problema: in un decadimento a due corpi l'elettrone emesso è MONOENERGETICO:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^-, \quad E_e = \frac{p_e^2}{2M_Y}$$

$$E_e = \sqrt{p_e^2 + m_e^2} \approx M_X - M_Y$$



Lo spettro misurato (1) assomiglia a quello di un decadimento a 3-corpi!
 \Downarrow
 Manca energia per conservare l'energia-impulso

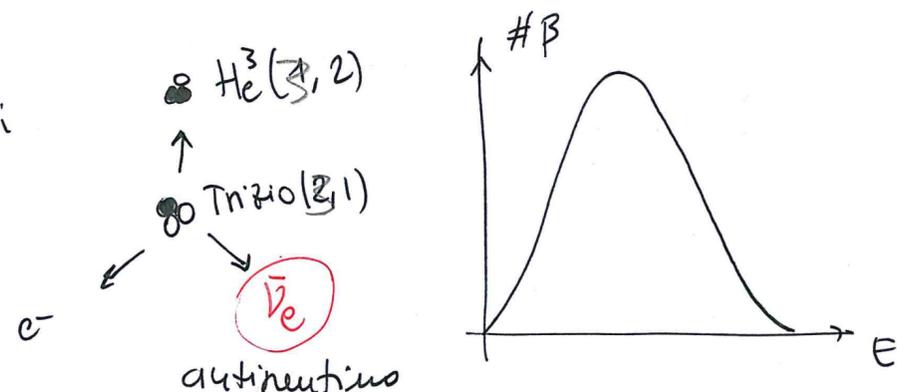
le particelle del decadimento β : lo spettro dell'elettrone misurato è continuo, come nel caso di un decadimento a 3-corpi. (Inoltre, non verrebbe rispettato il principio di esclusione di Pauli (perché?).

• A risolvere le faccende ci pensa Pauli nel 1930 che ipotizza l'esistenza di una energia extra neutra non rivelata) nel decadimento β : il **neutrino**.

* Pauli la chiamò neutrone, Fermi corresse il nome in neutrino

- particella neutra $Q=0$
- spin $1/2$ (ristora il principio di Pauli)
- non ha interazione EM né FORTE, solo DEBOLE
- massa \leq massa dell'elettrone

Decadimento β
e a 3-corpi



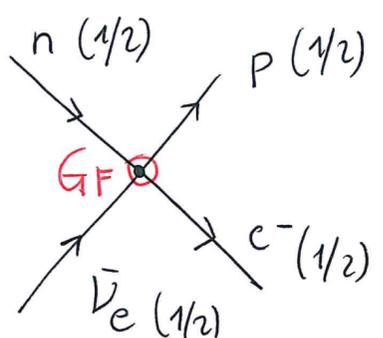
$$N, Z \rightarrow (N+1, Z+1) + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X \rightarrow \begin{matrix} A \\ Z+1 \end{matrix} Y + e^- + \bar{\nu}_e$$

Fermi scrive la teoria quantistica del decadimento β per la prima volta nel 1934, immaginando che le particelle prodotte non sono presenti "dentro" il nucleo ma vengono create nel momento del decadimento (a, a+)

Teoria di Fermi: Interazione a 4 Fermioni puntiforme

Neutron Decay
 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



"interazione di contatto" dei 4 fermioni coinvolti.

contatto = nessun propagatore nel vertice. \otimes

$$M_{fi} = \langle f | H_{int} | i \rangle = \int \psi_f^* H_{int} \psi_i d^3x = G_F \int \psi_p^* \psi_e^* \psi_\nu^* \psi$$

costante di interazione di Fermi

La probabilità di interazione vale $W \propto \text{const} \cdot |M_{fi}|^2$

$$W = \left(\frac{2\pi}{h} \frac{G_F^2}{\Omega^2} \right) |M_{fi}|^2 \cdot \rho$$

ρ = spazio delle fasi, e la statistica delle particelle dello stato finale all'energia del processo

Ω = volume nucleare. W predice rate di decadimento e spettri di energia misurati.

Decadimento β : decadimento DEBOLE regolato da G_F , un neutrone nel vuoto crea (α^+) tre particelle con una interazione di contatto.

$$M_V \approx 0$$

La teoria di Fermi ebbe un grande successo in termini di predittività dei risultati sperimentali, convincendo quindi dell'esistenza del neutrino. Ma come posso misurare l'interazione dei neutrini?

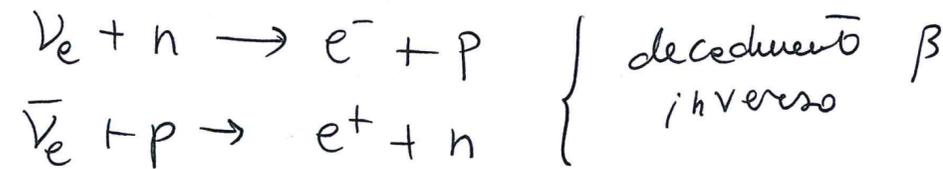
La W nelle teoria β di Fermi ci dice quanto vale la **sezione d'urto** (ovvero la probabilità di interazione per unità di superficie) dei neutrini:

se un flusso
sume di ν
"vederli"!

$$\sigma_{\nu p} \approx 10^{-43} \frac{\text{cm}^2}{\text{MeV}^2} \cdot E_{\nu}^2$$

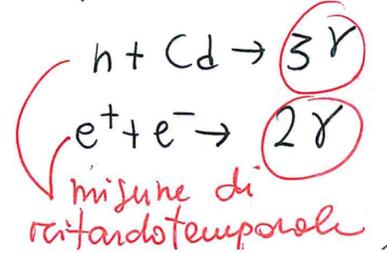
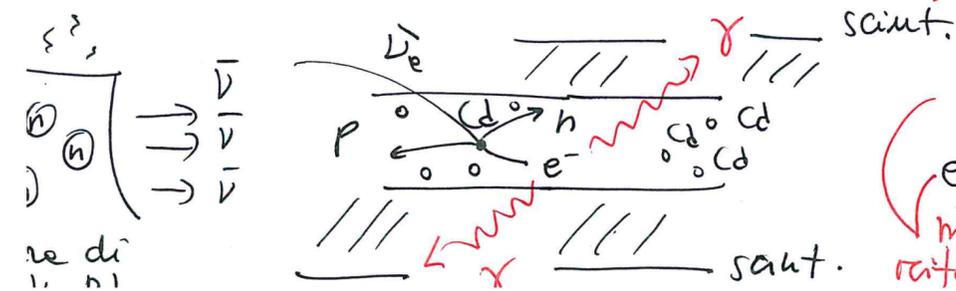
microscopicamente
piccole!

Le interazioni più semplici sono



Nel 1956 Cowan e Reines sfruttarono l'elevatissimo flusso di $\bar{\nu}_e$ nelle fissioni dell'Uranio in un reattore americano da 1GW (Savannah-River). I neutroni del reattore producono $\bar{\nu}_e$ che venivano fatti sbattere contro 1 tonnellata di acqua + cloruro di Cadmio (1 tonnellata di scintillatori).

SCOPERTA DEL NEUTRINO



Exp. di Cowan-Reines (Nobel 1995):

$$\sigma(\nu_e p) = (1,1 \pm 0,3) \times 10^{-43} \text{ cm}^2$$

neutrino scoperto
 Jernia di Fermi
 interazione debole

QUANTI NEUTRINI IN NATURA?

L'abbiamo chiamato sempre ν_e ... perché?

Bruno Pontecorvo fu uno dei massimi studiosi delle interazioni dei neutrini. Per primo dimostrò la necen di un anti-neutrino e poi scoprì l'esistenza di un neutrino per famiglie di leptoni diversi tra loro:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

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

Propose un esperimento per dimostrarlo

• $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

(LAPIDE di Pontecorvo a roma)

⊗ solo per approfondimento

Come decade il muone? • $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$

Si deve conservare il NUMERO LEPTONICO:

$$\rightarrow \underline{L=1} \quad \underbrace{L=1 \quad L=-1 \quad L=1}_{L=0} \quad (L_\mu)$$

$$L = L_e = L_\mu = \begin{cases} +1 & \text{particelle lept.} \\ -1 & \text{antiparticelle lept.} \end{cases}$$

$L=0$ bosoni

⇒ Se ν_e e ν_μ fossero ugali si osserverebbe un decadimento $\mu \rightarrow e \nu$ che invece ha un'unità 10^5 minore di $\mu \rightarrow e \nu \nu \dots$ $\mu \rightarrow e \nu$ violerebbe il numero $\nu_e \neq \nu_\mu$

«Care Signore e Signori radioattivi,
sono giunto a una disperata via di uscita [...] per salvare la legge della
statistica e la legge dell'energia. Vale a dire la possibilità che possano
esistere nel nucleo particelle elettricamente neutre, che chiamerò neutroni,
che hanno spin $1/2$ e soddisfano il principio di esclusione [...] La massa dei
neutroni dovrebbe essere dello stesso ordine di grandezza della massa degli
elettroni [...] Lo spettro continuo diventerebbe allora comprensibile
assumendo che nel decadimento un neutrone venga emesso insieme
all'elettrone, in modo che la somma delle energie del neutrone e
dell'elettrone rimanga costante. Non oso per ora pubblicare nulla su questa
idea e mi rivolgo a voi confidenzialmente, cari radioattivi, con la domanda di
come si possa fornire la prova sperimentale di questo neutrone, nel caso
dovesse avere un potere di penetrazione uguale o circa dieci volte maggiore
rispetto a quello di un raggio γ . [...] Ammetto che la mia via di uscita può
apparire piuttosto improbabile a priori poiché se questi neutroni esistono li
avremmo forse già visti da tempo. Ma solo chi osa riesce vincitore»
(Pauli ai fisici riuniti a Tübingen 4/12/30)

LA SCOPERTA DEL NEUTRINO

*Fermi first submitted his "tentative" theory of beta decay to the journal **Nature**, which rejected it "because it contained speculations too remote from reality to be of interest to the reader."*

Nel 1934, **Rudolf Peierls** e **Hans Bethe** calcolano che un neutrino può facilmente attraversare la Terra senza interagire con alcuna materia...

$$\sigma(\bar{\nu}p) = 10^{-44} \text{cm}^2$$

$$\lambda = \frac{1}{N_A \rho \sigma}$$

usando il piombo, per esempio, servirebbe un assorbitore largo 4 anni luce!

come fare per “vederlo” allora? Servirebbe produrre un flusso di neutrini enorme.

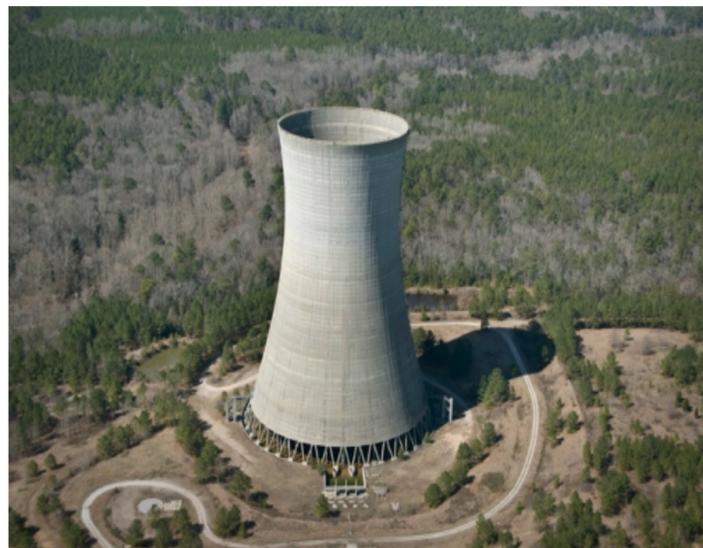
LA SCOPERTA DEL NEUTRINO

Cowan & Reines: Reattore nucleare dell'impianto Savannah River nella Carolina del Sud 1953

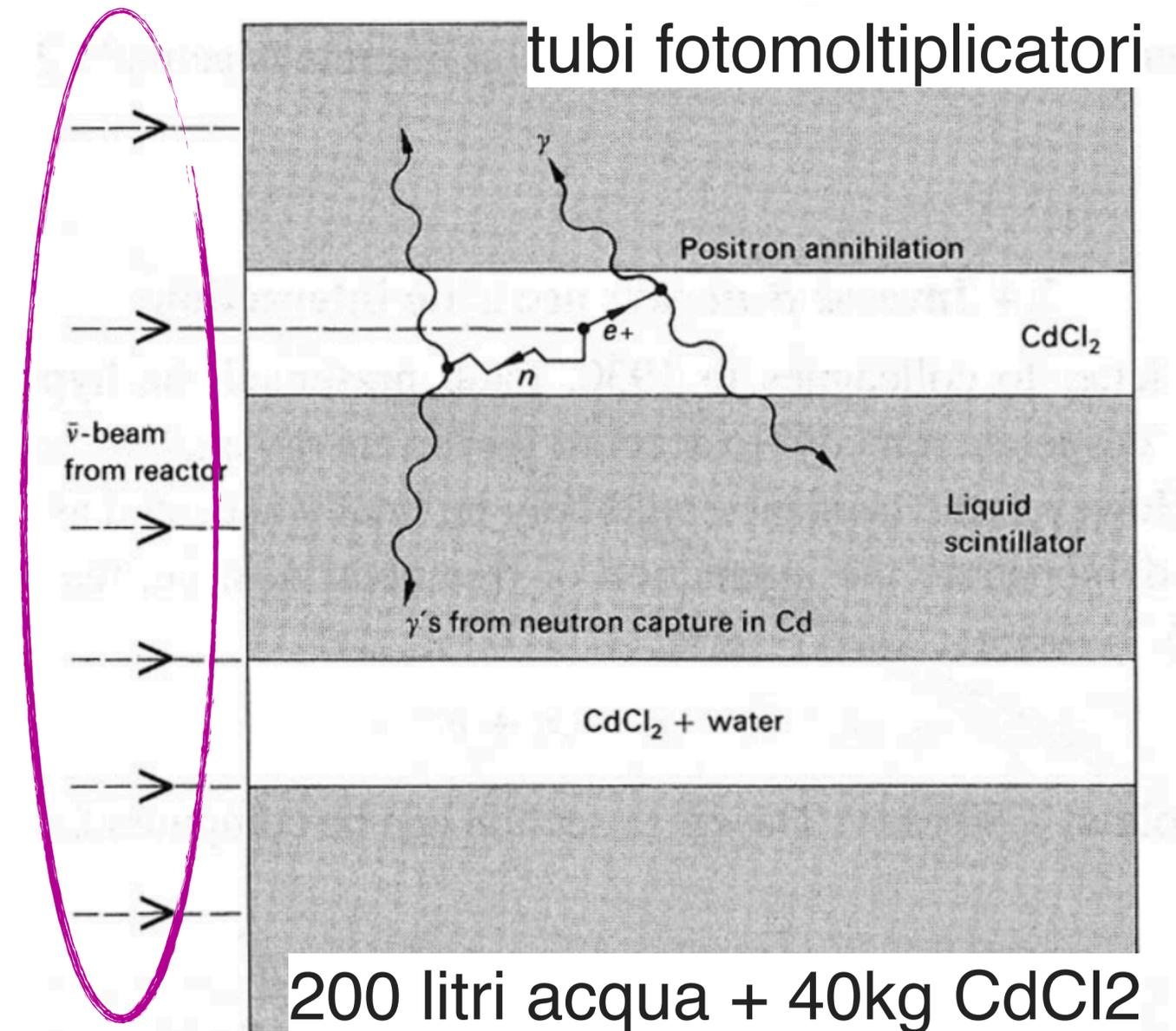


i reattori sono sorgenti intense di **antineutrini** provenienti dai neutroni prodotti dai frammenti della fissione dell'Uranio

un reattore di potenza $P=10^9$ W produce circa 10^{20} antineutrini al secondo per cm

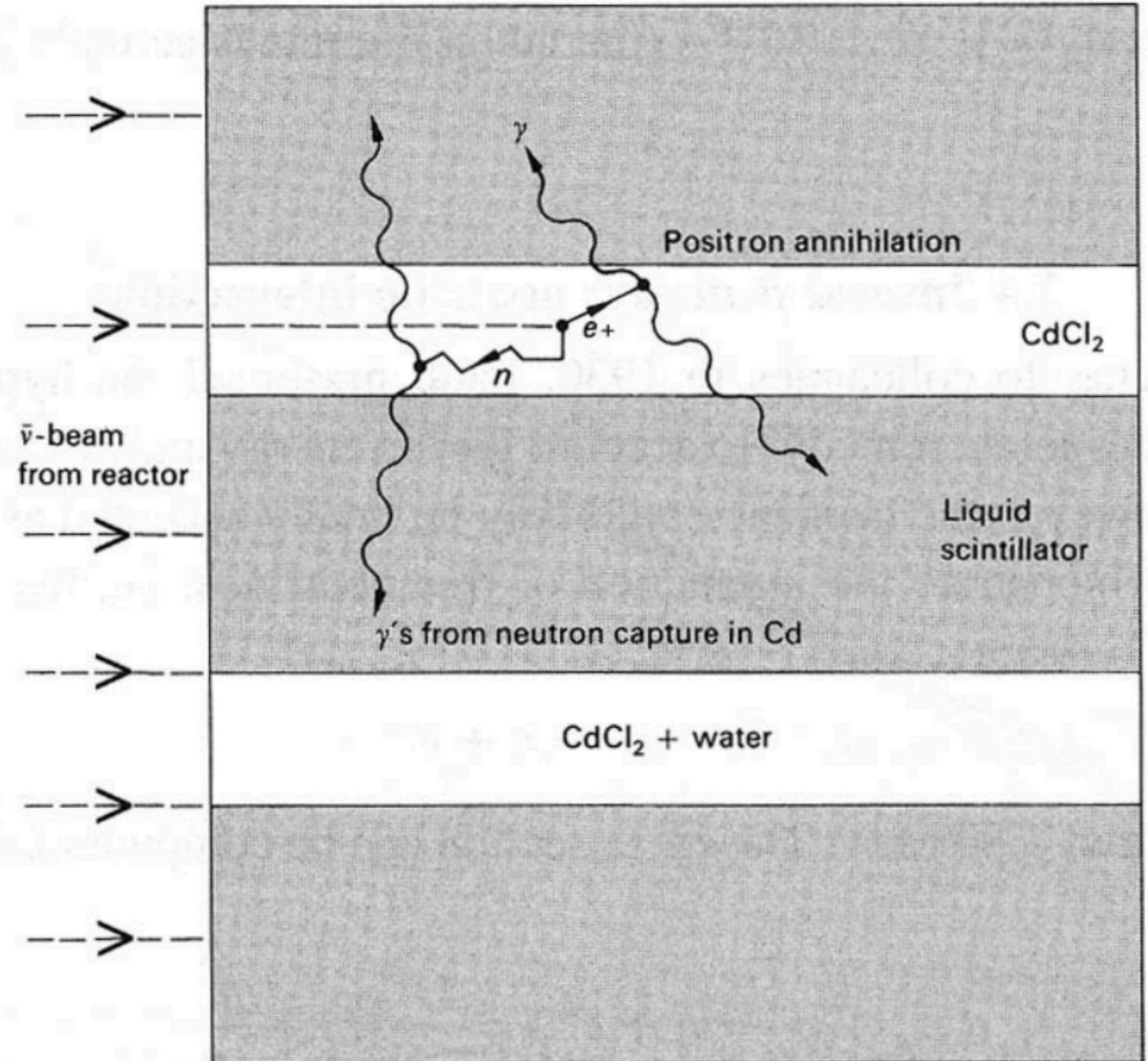
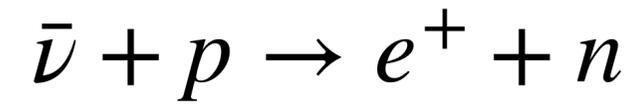


gli $\bar{\nu}$ prodotti poi interagiscono con un bersaglio ultra denso di **cloruro di cadmio (CdCl_2)** intervallato da scintillatori liquidi



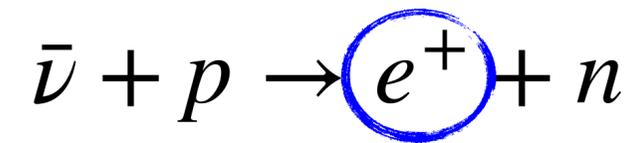
LA SCOPERTA DEL NEUTRINO

Cowan & Reines: Reattore nucleare dell'impianto Savannah River nella Carolina del Sud 1953

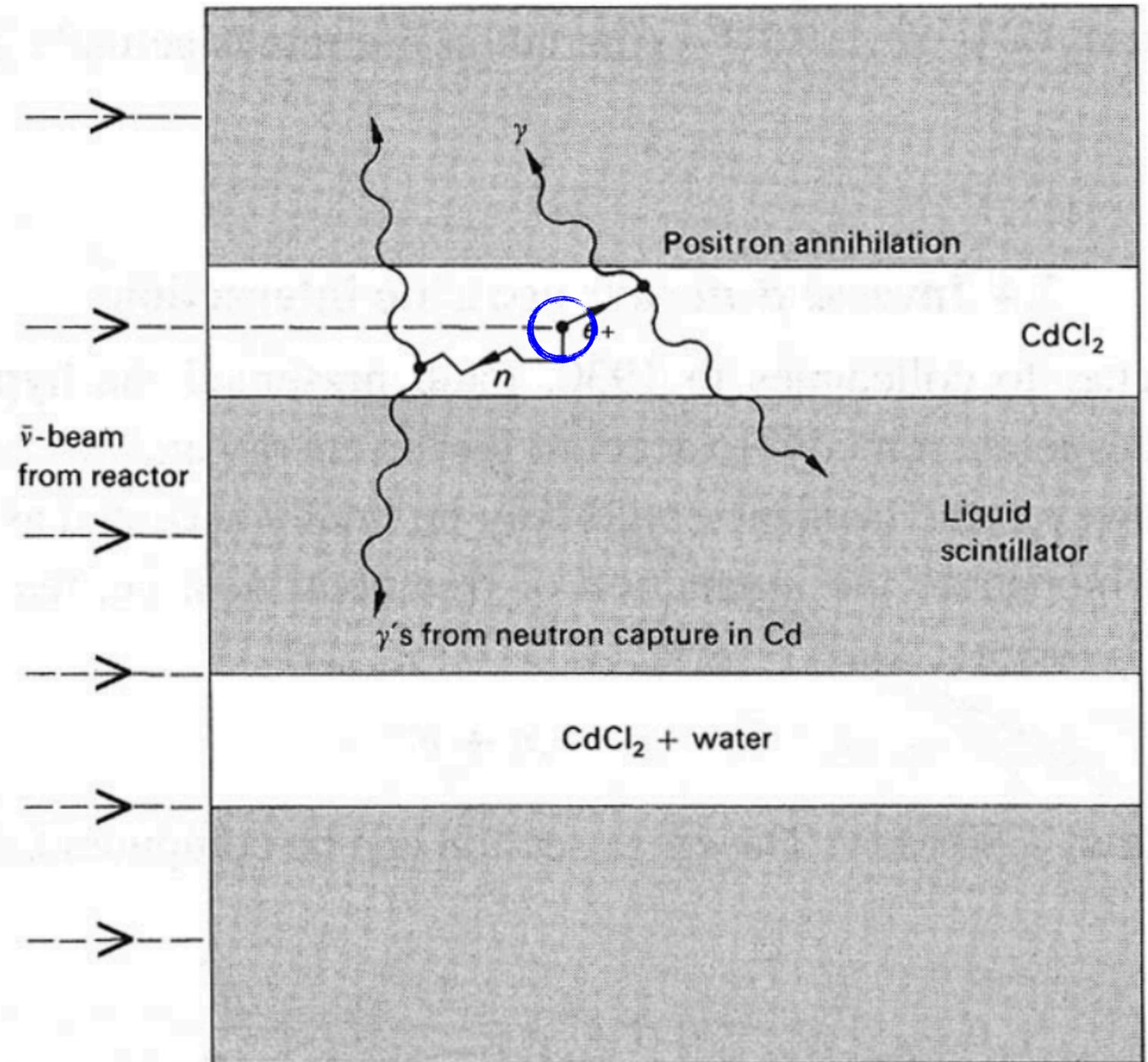


LA SCOPERTA DEL NEUTRINO

Cowan & Reines: Reattore nucleare dell'impianto Savannah River nella Carolina del Sud 1953

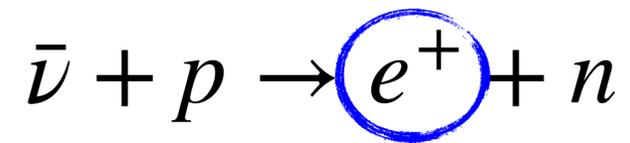


i positroni si annichilano subito con gli elettroni generando coppie di fotoni

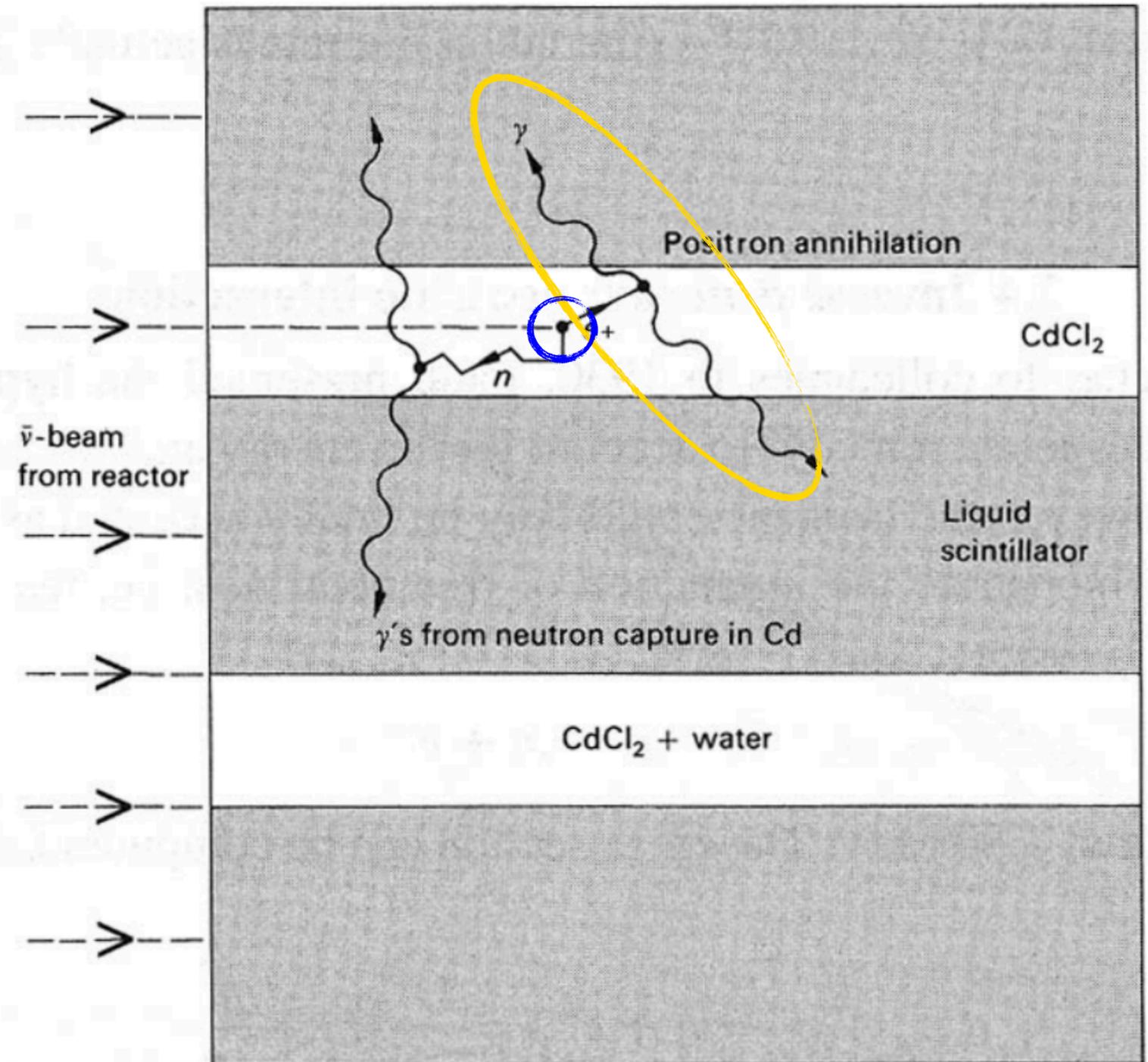
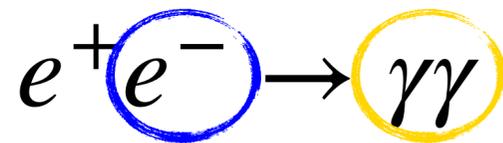


LA SCOPERTA DEL NEUTRINO

Cowan & Reines: Reattore nucleare dell'impianto Savannah River nella Carolina del Sud 1953

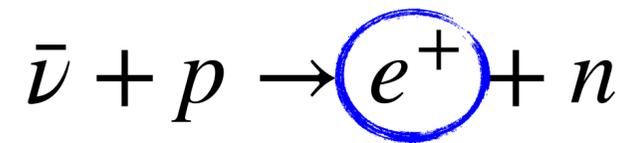


i positroni si annichilano subito con gli elettroni generando coppie di fotoni

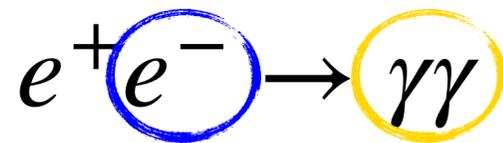


LA SCOPERTA DEL NEUTRINO

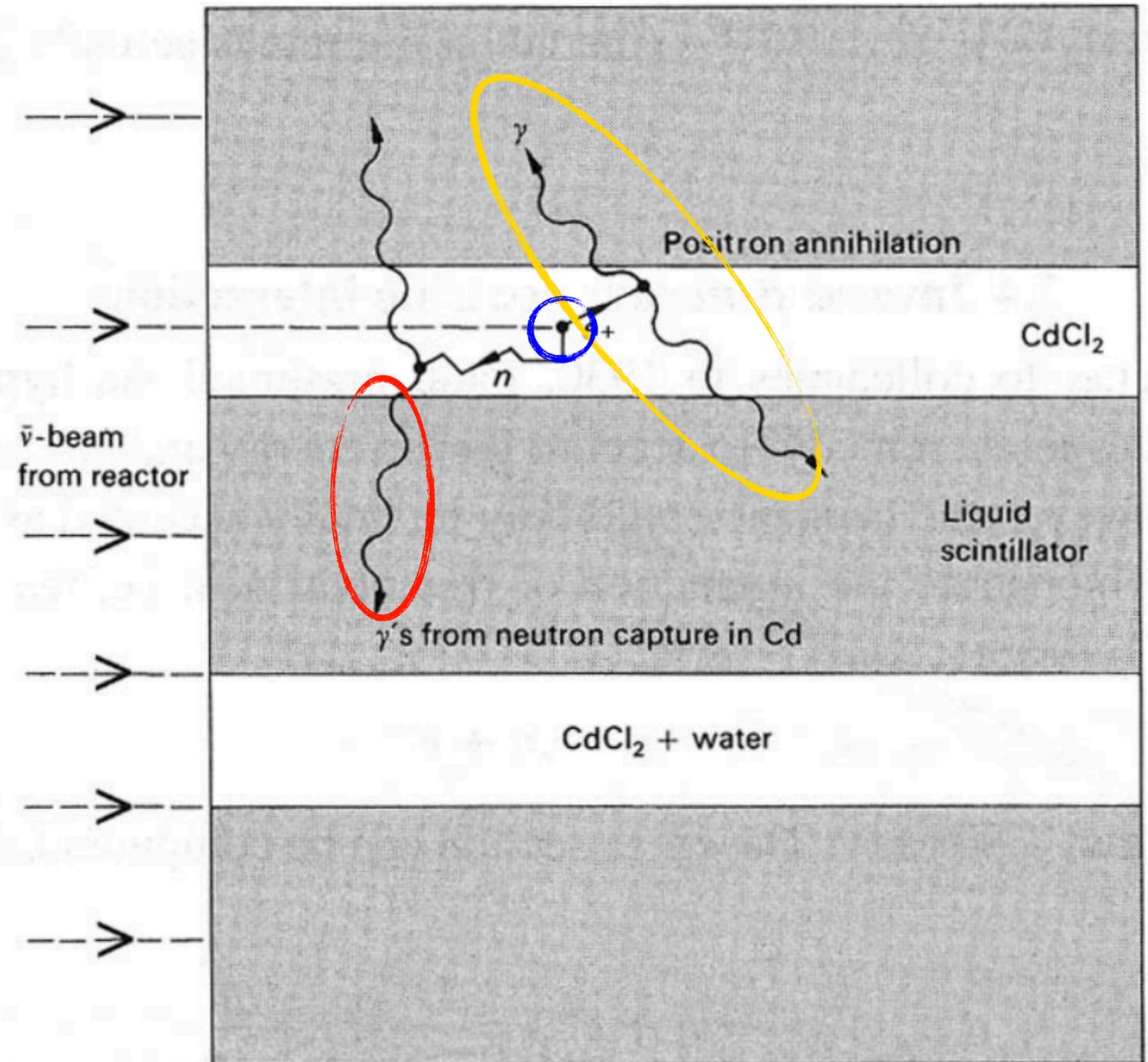
Cowan & Reines: Reattore nucleare dell'impianto Savannah River nella Carolina del Sud 1953



i positroni si annichilano subito con gli elettroni generando coppie di fotoni

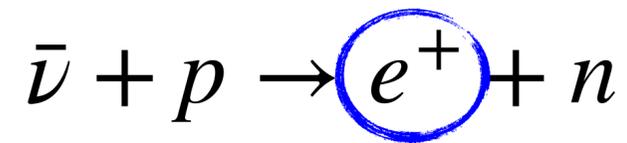


il **neutrone** viene dalla cattura del nucleo con l'emissione ritardata ($\sim\mu\text{s}$) di un terzo fotone

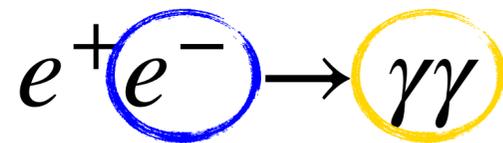


LA SCOPERTA DEL NEUTRINO

Cowan & Reines: Reattore nucleare dell'impianto Savannah River nella Carolina del Sud 1953

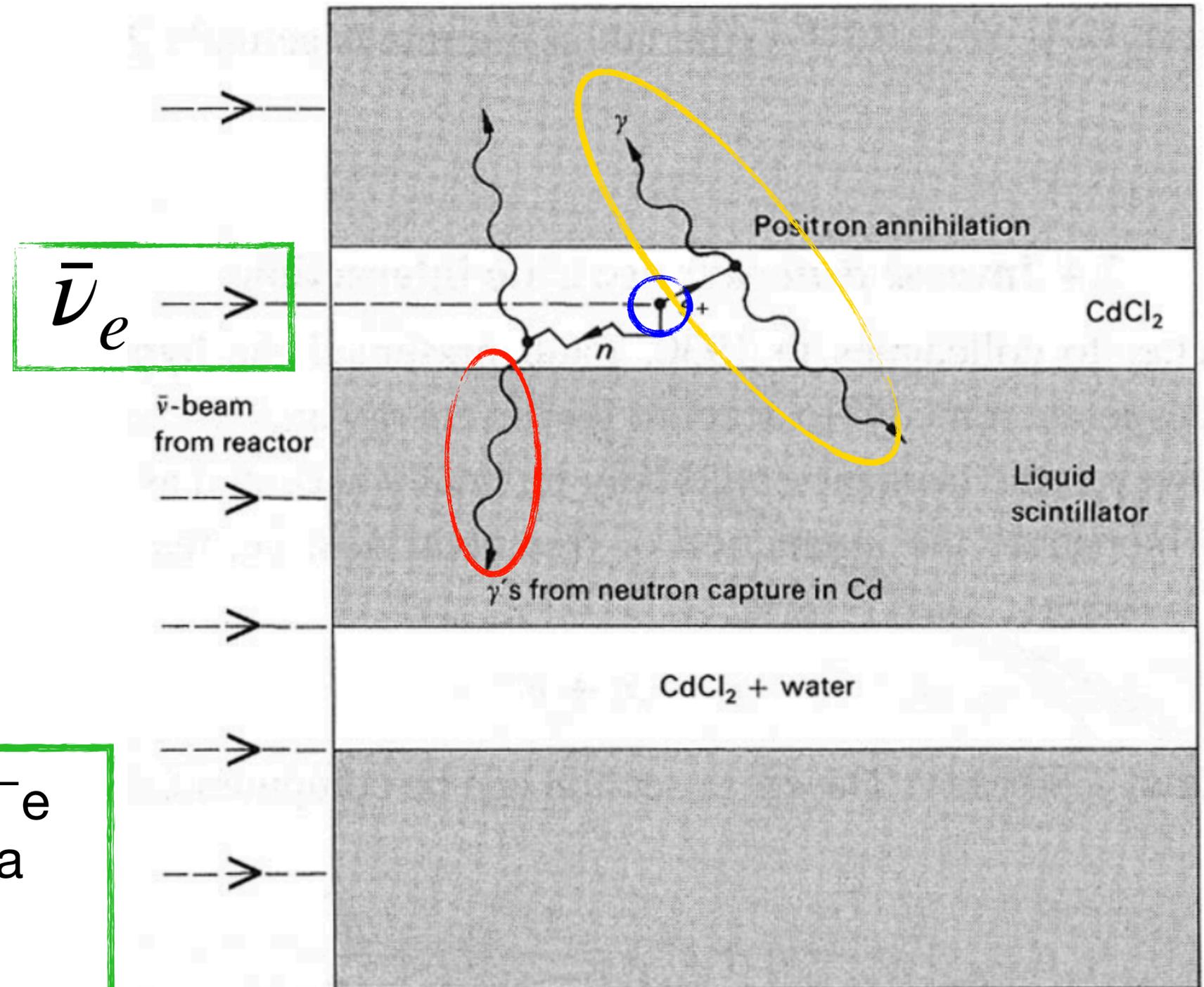


i positroni si annichilano subito con gli elettroni generando coppie di fotoni



il **neutrone** viene dalla cattura del nucleo con l'emissione ritardata ($\sim \mu\text{s}$) di un terzo fotone

la **coincidenza** dell'annichilazione $e^+ e^-$ e della cattura del neutrone forniscono la segnatura unica della presenza dell'interazione dell'antineutrino!



LA SCOPERTA DEL NEUTRINO

Cowan & Reines: Reattore nucleare dell'impianto Savannah River nella Carolina del Sud 1953

dopo un mese di presa dati, videro circa 3 interazioni di neutrino all'ora nel detector

il neutrino è una realtà fisica!

nel 1995 Reines prese il Nobel

la fisica dei neutrini è estremamente complessa e piena di misteri irrisolti, ancora oggi in tutto il mondo si cerca di capire la loro natura

20 July 1956, Volume 124, Number 3212

SCIENCE

Detection of the Free Neutrino: a Confirmation

C. L. Cowan, Jr., F. Reines, F. B. Harrison,
H. W. Kruse, A. D. McGuire

A tentative identification of the free neutrino was made in an experiment performed at Hanford (1) in 1953. In that work the reaction

$$\nu + p^+ \rightarrow \beta^+ + n^0 \quad (1)$$

was employed wherein the intense neutrino flux from fission-fragment decay in a large reactor was incident on a detector containing many target protons in a hydrogenous liquid scintillator. The reaction products were detected as a delayed pulse pair; the first pulse being due to the slowing down and annihilation of the positron and the second to capture of the moderated neutron in cadmium dissolved in the scintillator. To identify the observed signal as neutrino-induced, the energies of the two pulses, their time-

present work was done (3). This work confirms the results obtained at Hanford and so verifies the neutrino hypothesis suggested by Pauli (4) and incorporated in a quantitative theory of beta decay by Fermi (5).

In this experiment, a detailed check of each term of Eq. 1 was made using a detector consisting of a multiple-layer (club-sandwich) arrangement of scintillation counters and target tanks. This arrangement permits the observation of prompt spatial coincidences characteristic of positron annihilation radiation and of the multiple gamma ray burst due to neutron capture in cadmium as well as the delayed coincidences described in the first paragraph.

The three "bread" layers of the sand-

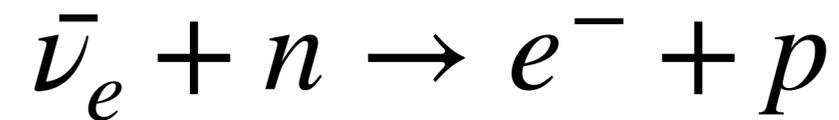
both triads. The detector was completely enclosed by a paraffin and lead shield and was located in an underground room of the reactor building which provides excellent shielding from both the reactor neutrons and gamma rays and from cosmic rays.

The signals from a bank of preamplifiers connected to the scintillation tanks were transmitted via coaxial lines to an electronic analyzing system in a trailer van parked outside the reactor building. Two independent sets of equipment were used to analyze and record the operation of the two triad detectors. Linear amplifiers fed the signals to pulse-height selection gates and coincidence circuits. When the required pulse amplitudes and coincidences (prompt and delayed) were satisfied, the sweeps of two triple-beam oscilloscopes were triggered, and the pulses from the complete event were recorded photographically. The three beams of both oscilloscopes recorded signals from their respective scintillation tanks independently. The oscilloscopes were thus operated in parallel but with different gains in order to cover the requisite pulse-amplitude range. All amplifier pulses were stored in long low-distortion delay lines awaiting electronic decision prior to this acceptance.

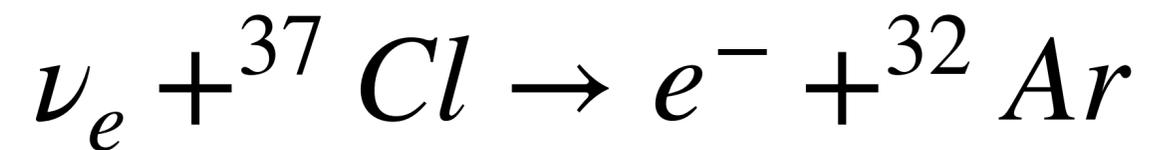
Manual analysis of the photographic record of an event then yielded the energy deposited in each tank of a triad by both the first and second pulses and

NEUTRINI E FAMIGLIE

Nel 1959, dopo l'esperimento di Cowan e Reines, il fatto di **NON** aver trovato eventi



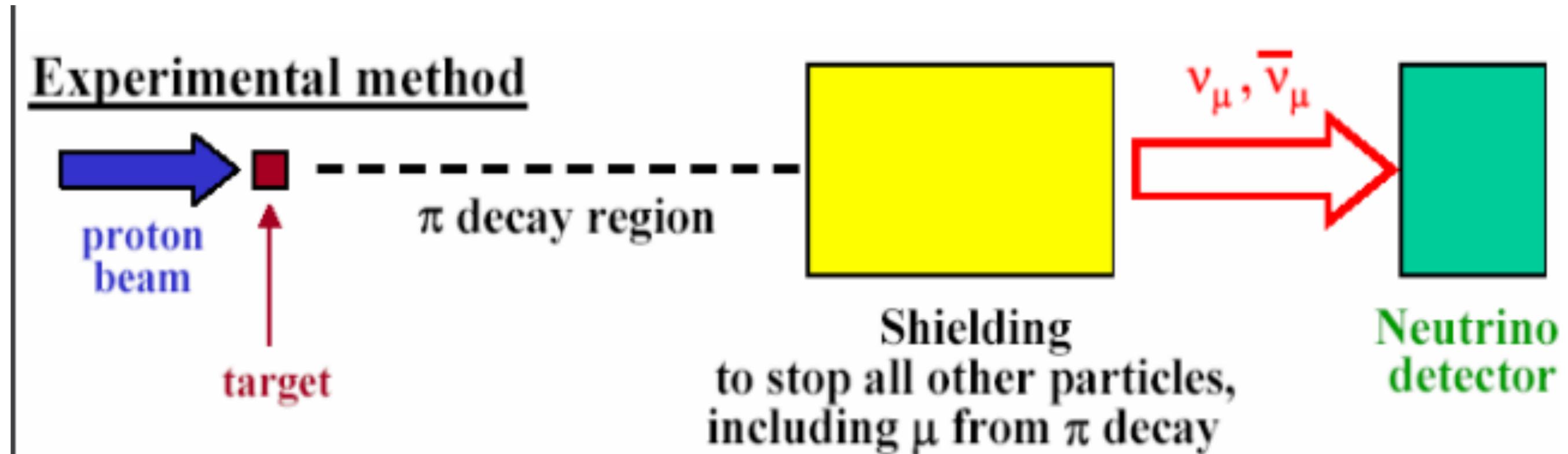
questo portò alla conclusione che, come ci aspettiamo, $\nu_e \neq \bar{\nu}_e$



questo fu il processo sperimentale predetto da Pontecorvo per misurare questa differenza

Nello stesso anno Pontecorvo realizza che il neutrino proveniente da processi elettronici era **diverso** da quello dal decadimento del mu (erano infatti chiamati con due nomi diversi: neutrino e neutretto) e propose un esperimento da fare presso un acceleratore per risolvere il problema, realizzato nel '62 a Brookhaven.

NEUTRINI E FAMIGLIE



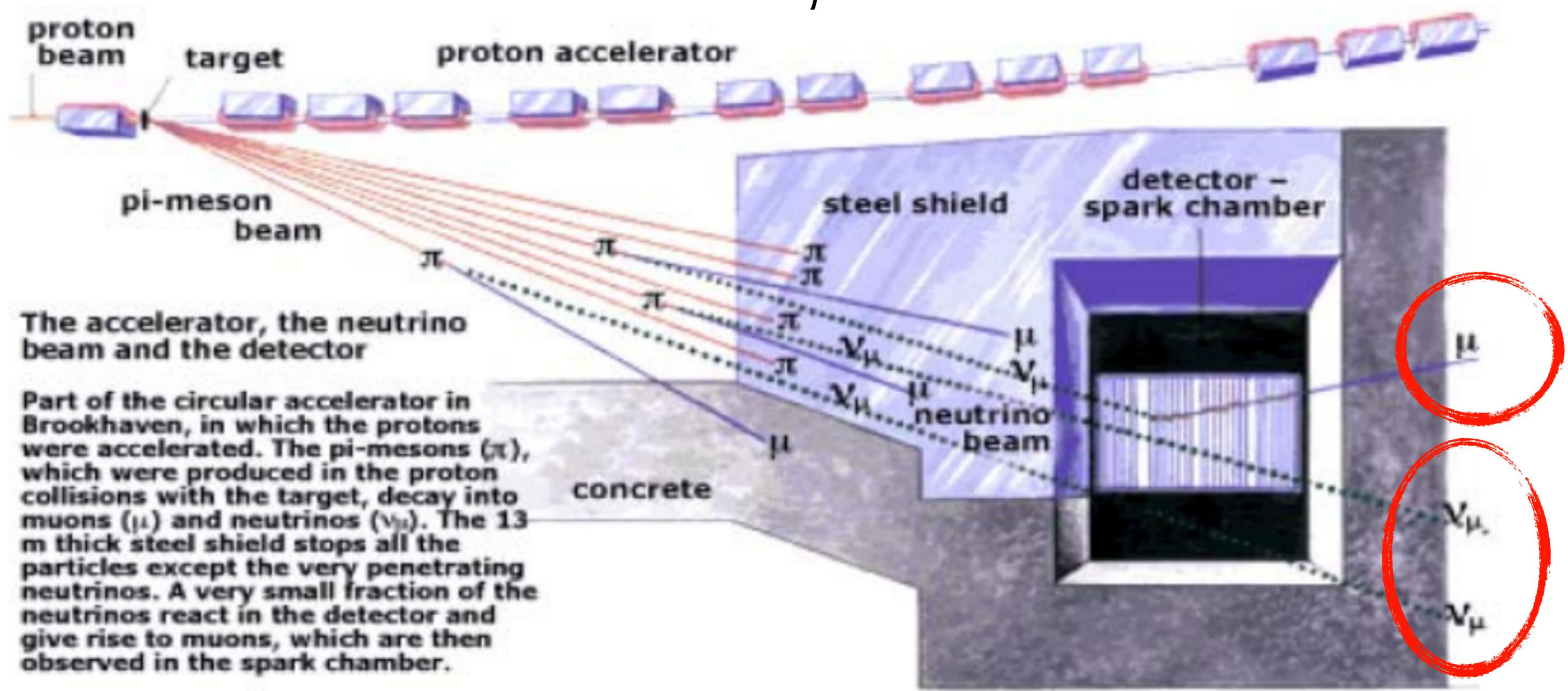
Se davvero $\nu_{\mu} \neq \nu_e$ allora le interazioni dei ν_{μ} possono produrre solo muoni e non elettroni tramite il processo $\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu + X$

Leederman, Steinberg e Schwartz trovano 68 eventi di questo tipo su oltre 300 ore di run:

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

NEUTRINI E FAMIGLIE

$$\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu + X$$



Based on a drawing in Scientific American, March 1963.

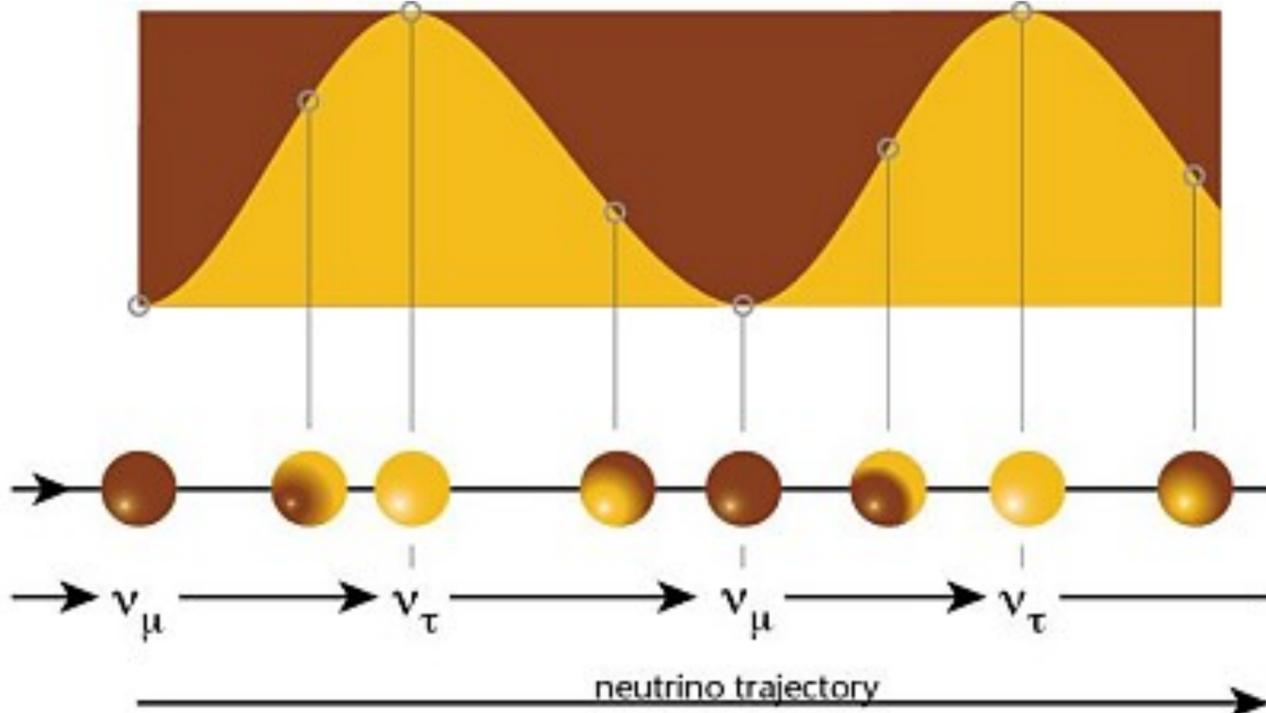
NB. i pioni non decadono in elettroni!

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

L'ULTIMA INTUIZIONE DI BRUNO PONTECORVO



Illustration: © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences



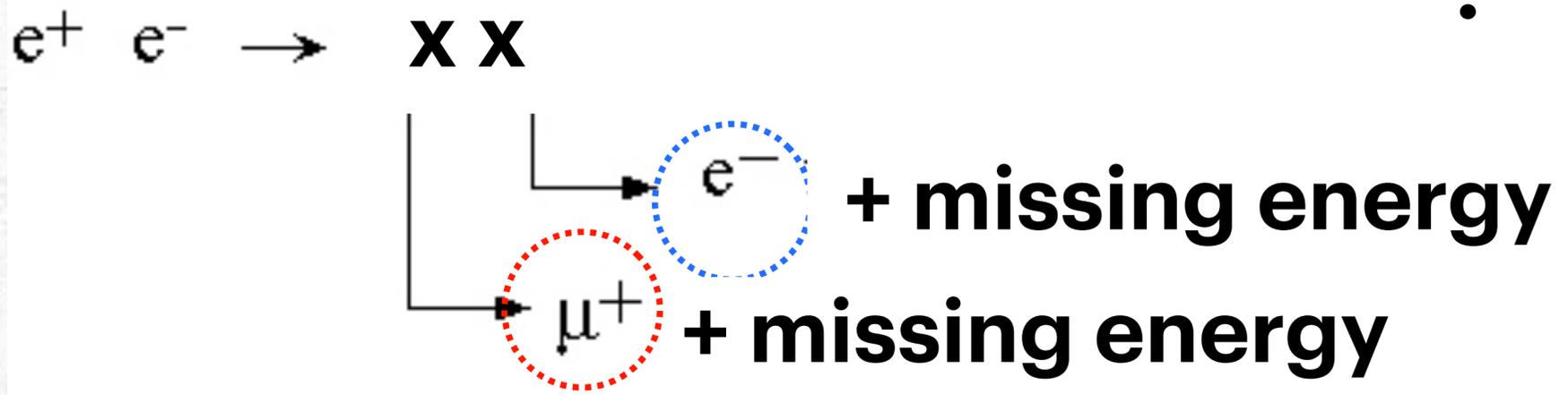
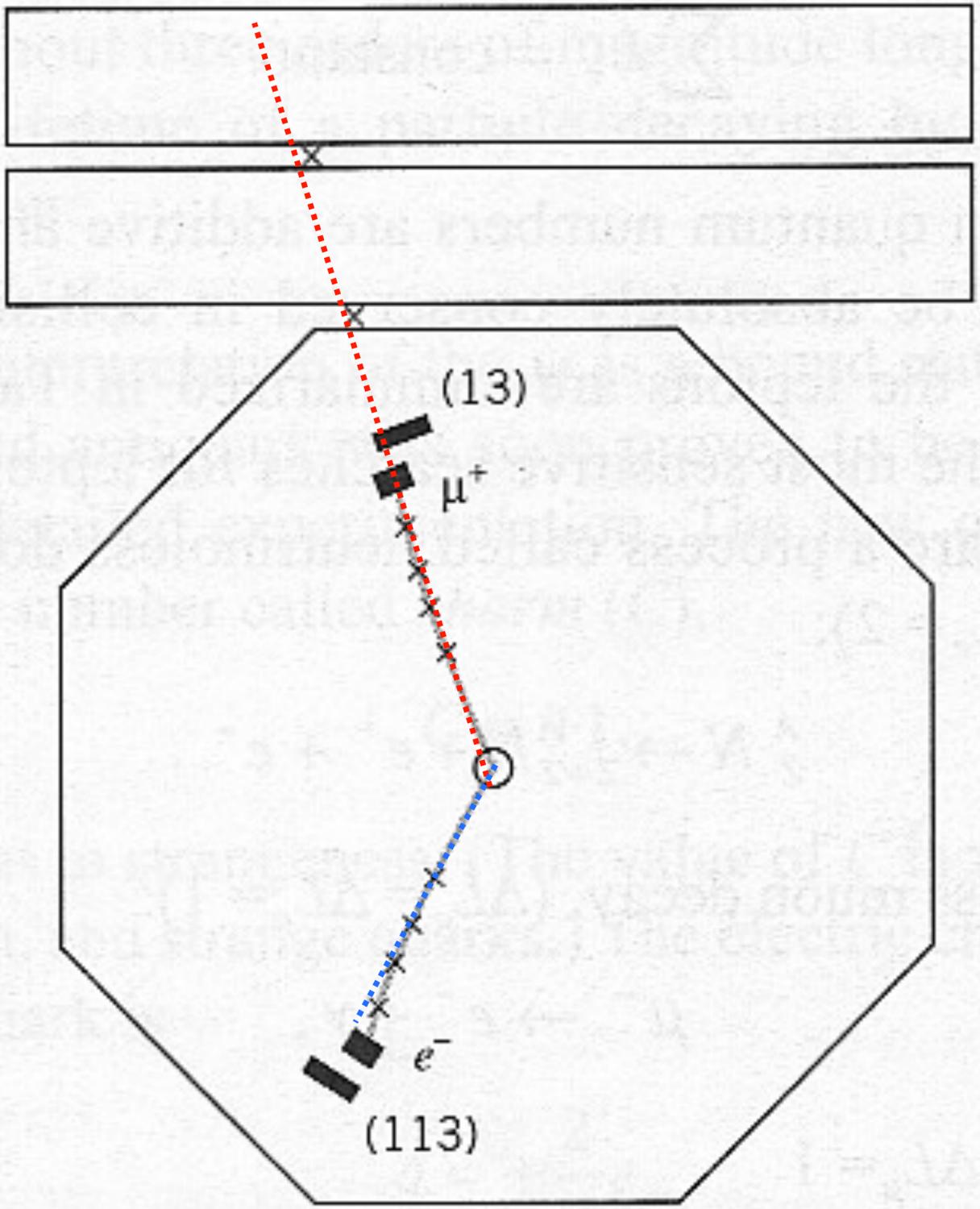
$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle + |2\rangle)$$

L'ULTIMA INTUIZIONE DI BRUNO PONTECORVO



IL TERZO LEPTONE ?

?



si misura la produzione associata di coppie di leptoni, e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $e^+\mu^-$, μ^+e^- in collisioni e^+e^- a $\sqrt{s} \sim 2.5-7.5$ GeV di SLAC con l'esperimento MARK I

vengono trovati 24 eventi con un μ ed un e di segno opposto, con energia mancante, e niente altro, impossibili da spiegare.

la conservazione dell'energia impone che l'energia mancante poteva essere associata a 2 particelle prodotte.

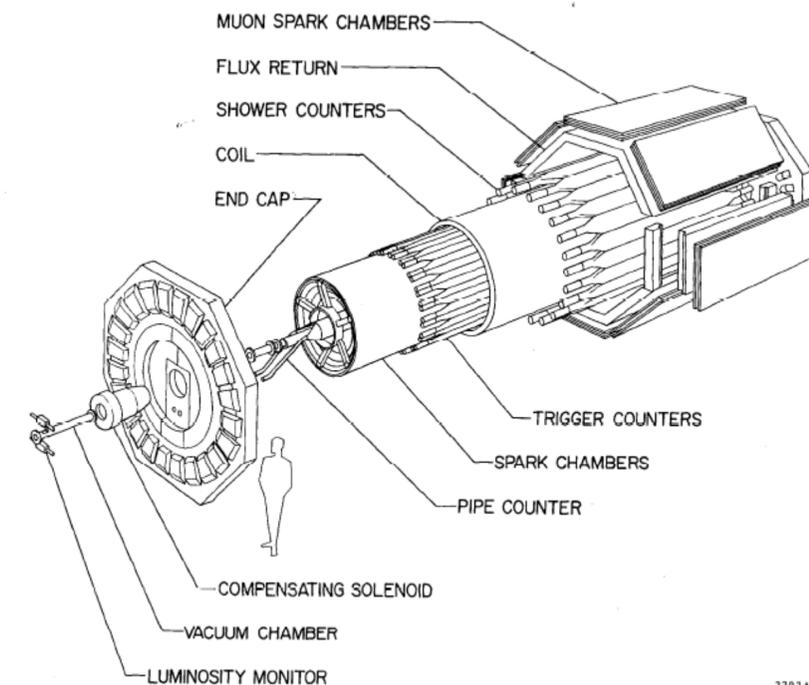
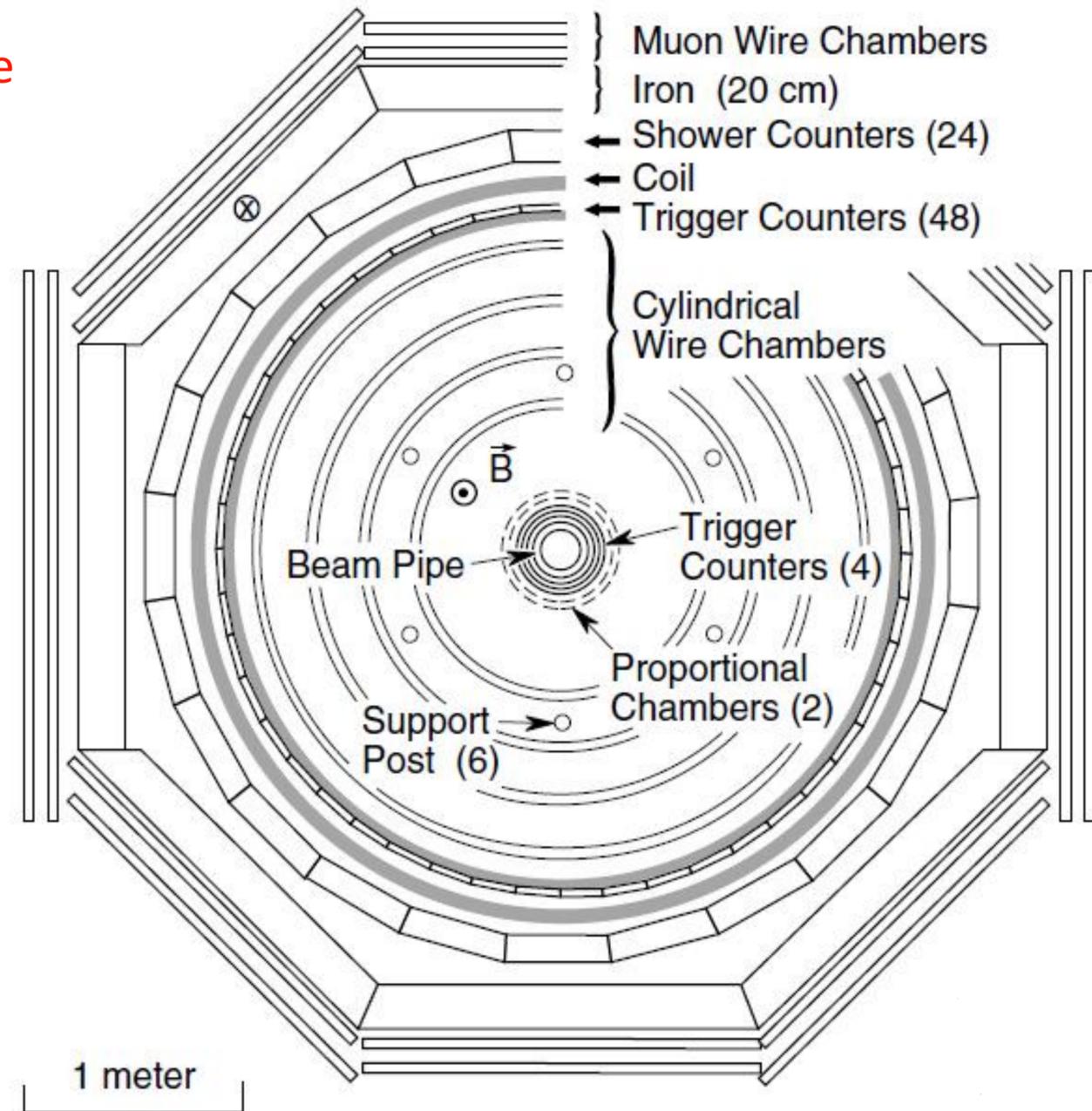
Martin Perl
1974

Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) and Lawrence Berkeley National Laboratory (LBL)

Il primo rivelatore (1973) con solenoide e grande angolo solido \rightarrow copertura totale 2.6π sr:
 da 50° a 130° per l'angolo polare θ ;
 2π per l'angolo azimutale ϕ .

Struttura del rivelatore:

- *Trigger counters* (scintillatori) per misurare i tempi di volo per separare π/K e per dare il *trigger* alle camere a scintillazione (riuscendo a ridurre di un fattore 1000 gli eventi dovuti a μ cosmici);
- *Proportional chambers*;
- *Spark chambers* cilindriche per il tracciamento;
- **Solenoide di raggio 1.65m e lungo 3.6m; campo magnetico: 0.4T;**
- Calorimetri elettromagnetici (piombo e scintillatore plastico) per identificare e^+ , e^- e γ .



- Condizioni per gli **elettroni**:

- impulso nel calorimetro maggiore di quello dovuto a un e di 0.5 GeV.

Imponendo solo questa condizione i segnali avevano anche queste caratteristiche:

- tipica distribuzione dell'impulso rilasciato nel calorimetro attesa per elettroni;
- segnale assente nelle *muon chambers*;
- compatibilità tra la posizione dell' e misurata dai fotomoltiplicatori connessi al calorimetro e la traccia stimata.

Evitavano di considerare e^\pm combinazioni di eventi $\mu+\gamma$ o $\pi+\gamma$ (a meno di eventi di fondo)

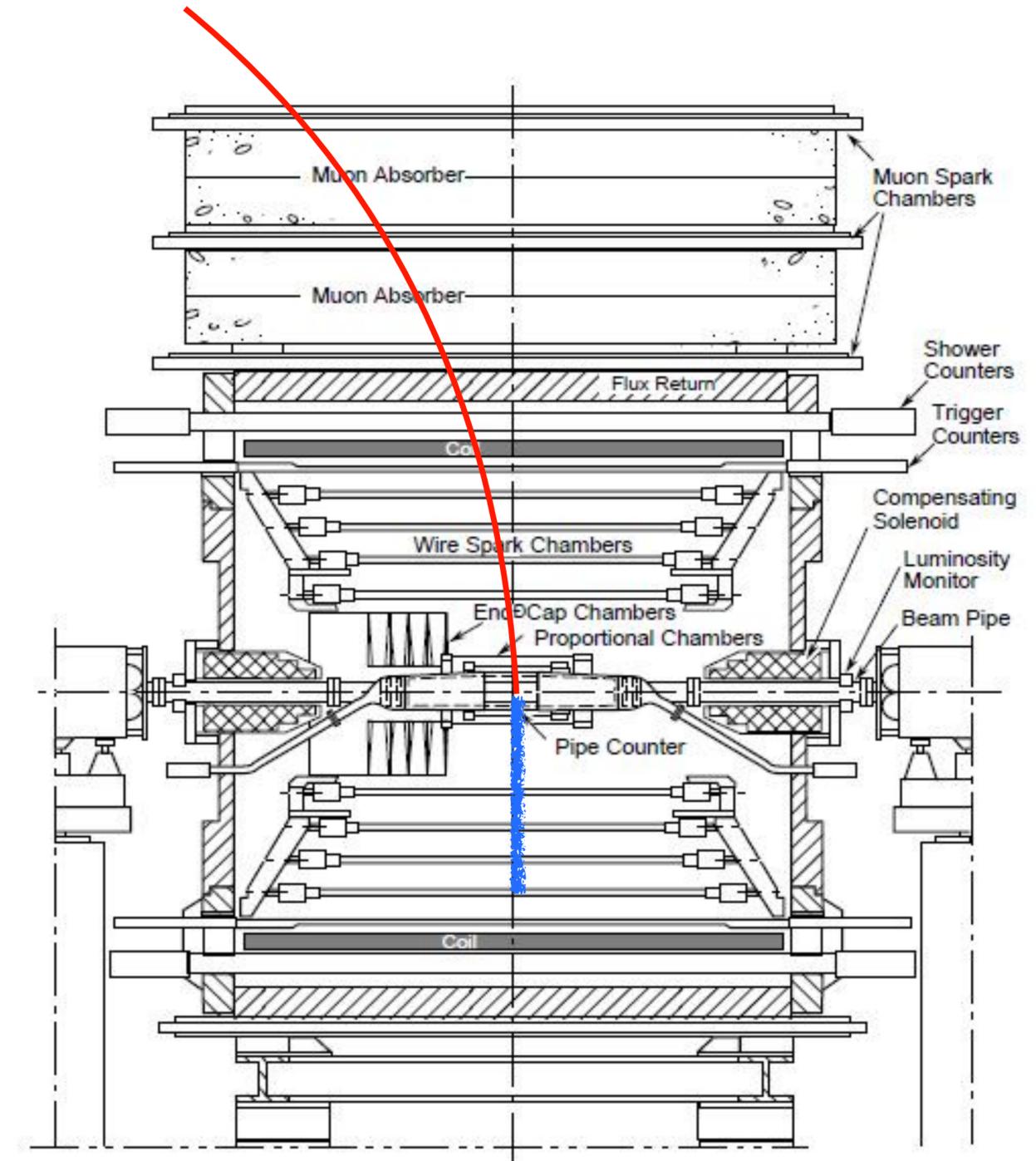
- Condizioni per i **muoni**:

- segnale nelle camere esterne per i muoni;
- poca energia rilasciata nei calorimetri.

- Tutte le altre particelle cariche rivelate erano classificate come adroni.

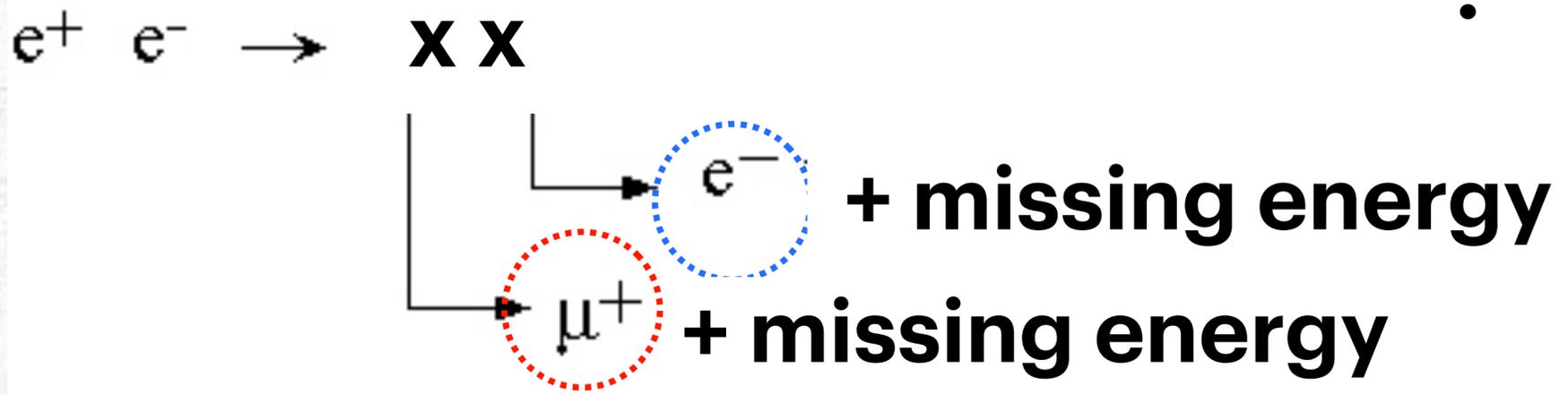
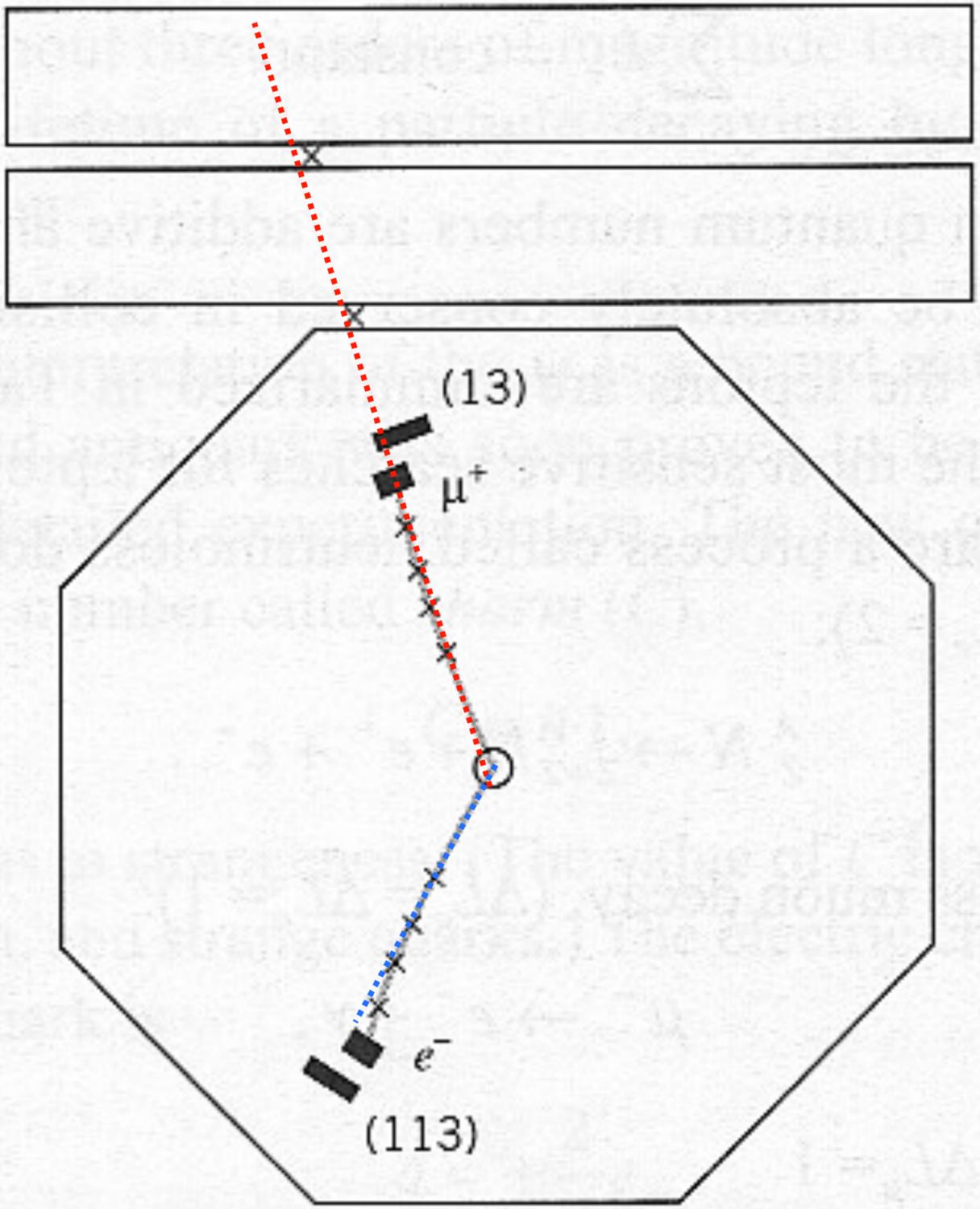
- I fotoni venivano rivelati dai calorimetri (con efficienza circa 95%).

- ha sezione d'urto troppo piccola $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^- + \mu^+ + \mu^-$



IL TERZO LEPTONE ?

?



si misura la produzione associata di coppie di leptoni, e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $e^+\mu^-$, μ^+e^- in collisioni e^+e^- a $\sqrt{s} \sim 2.5-7.5$ GeV di SLAC con l'esperimento MARK I

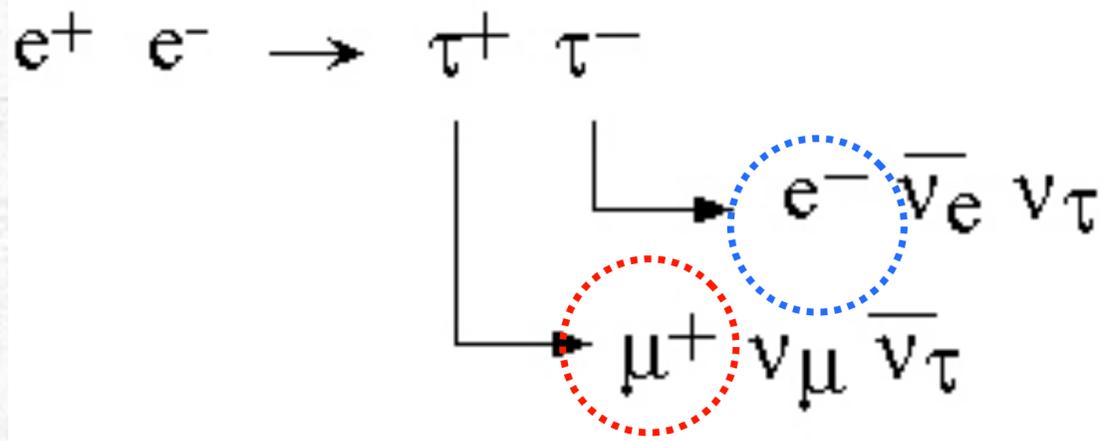
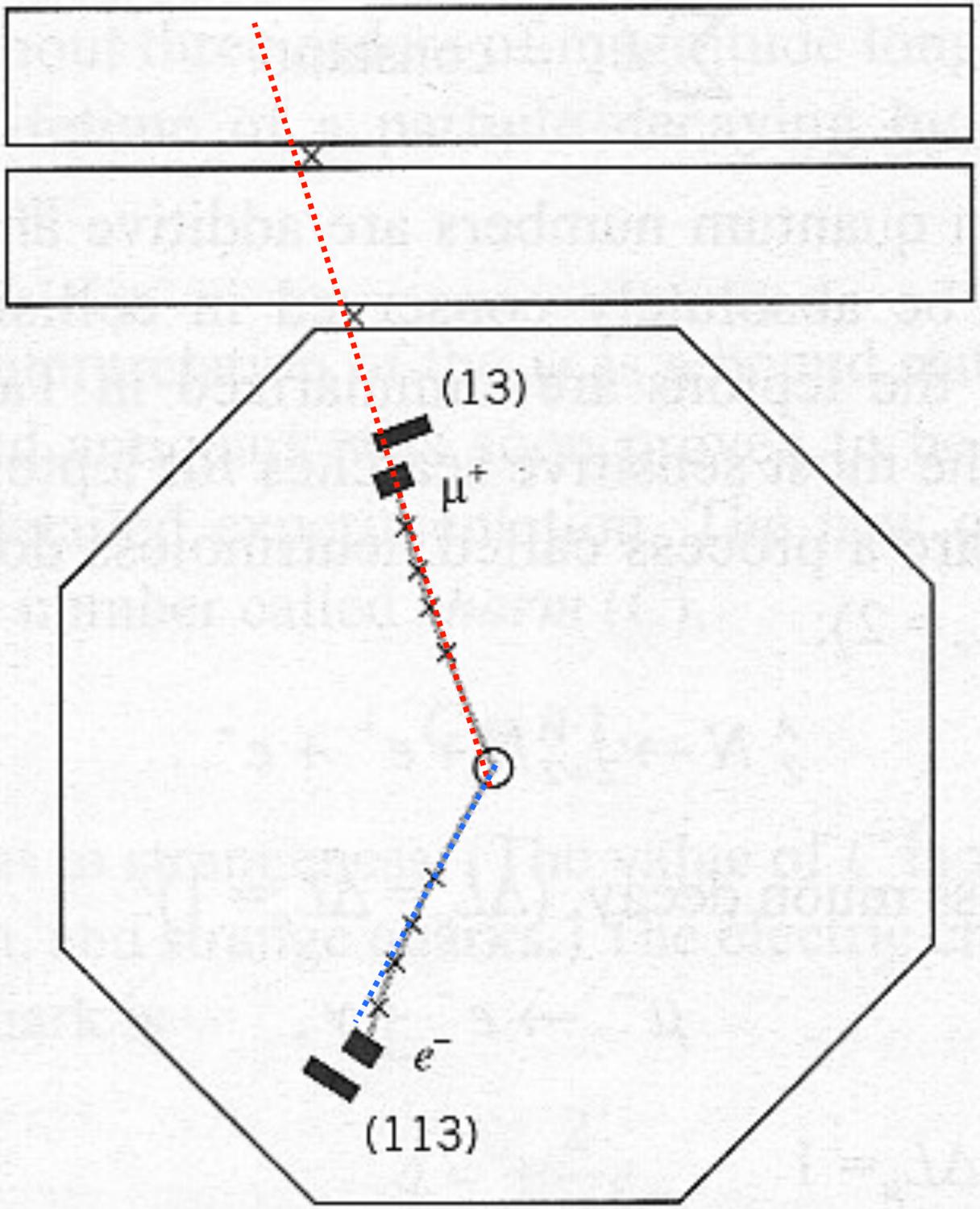
vengono trovati 24 eventi con un μ ed un e di segno opposto, con energia mancante, e niente altro, impossibili da spiegare.

la conservazione dell'energia impone che l'energia mancante poteva essere associata a 2 particelle prodotte.

Martin Perl
1974

Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) and Lawrence Berkeley National Laboratory (LBL)

IL TERZO LEPTONE



!

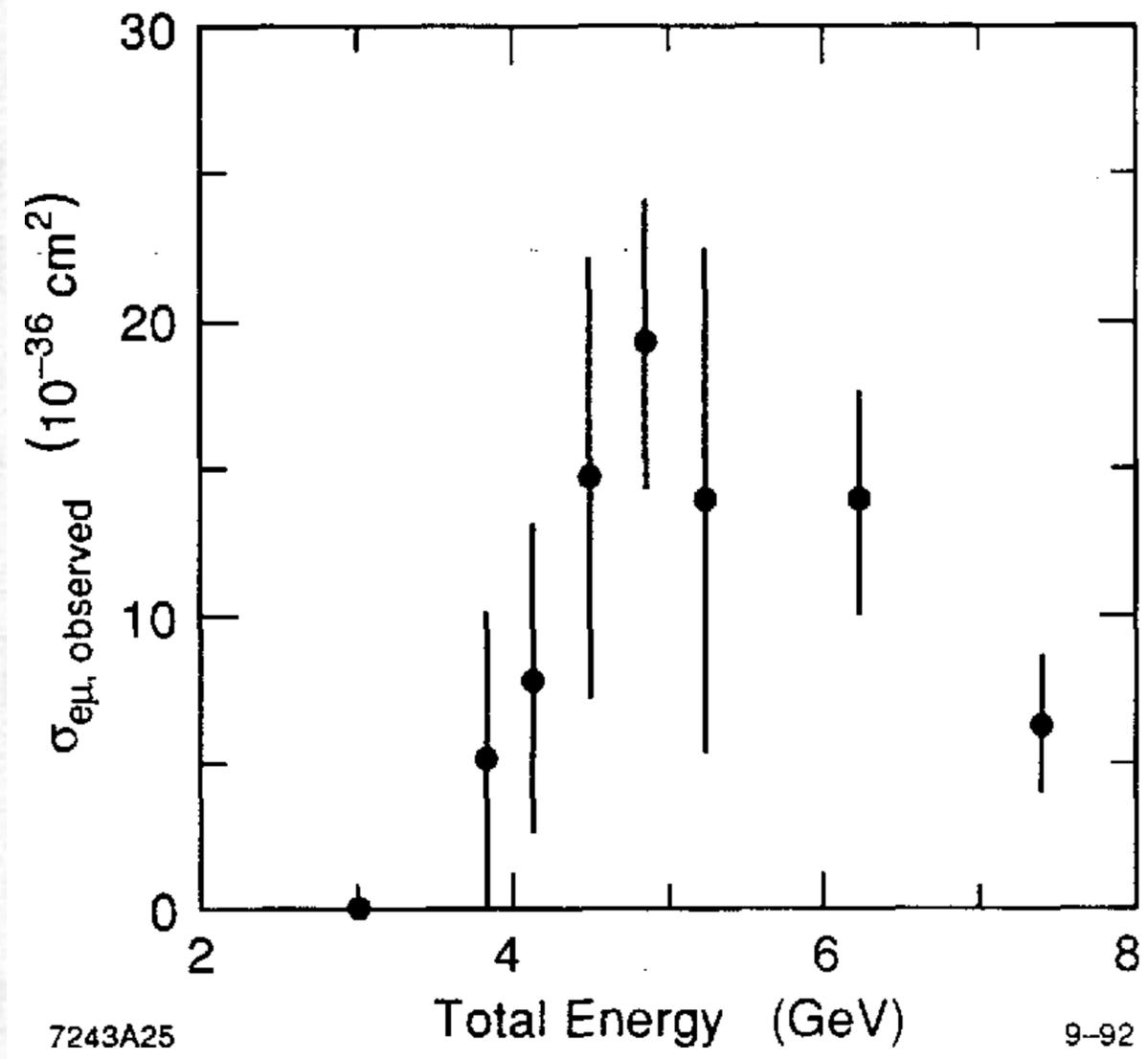
1.777 GeV/c²

-1

1/2

τ

tau



Martin Perl

1974

Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) and Lawrence Berkeley National Laboratory (LBL)

Nobel 1995

We conclude that the signature $e-\mu$ events cannot be explained either by the production and decay of any presently known particles or as coming from any of the well-understood interactions which can conventionally lead to an e and a μ in the final state. A possible explanation for these events is the production and decay of a pair of new particles, each having a mass in the range of 1.6 to 2.0 GeV/c^2 .

MESONI, BARIONI, LEPTONI

Cosa sappiamo fin ora

ADRONI

βαρύς (barys)

BARIONI: sono le particelle fermioniche ($s=1/3, 3/2\dots$) più pesanti del protone. Hanno un numero barionico, possono avere stranezza, hanno interazione forte, decadono debolmente.

μέσος (mesos)

MESONI: sono bosoni ($s=0, 1\dots$) di massa intermedia tra elettrone e protone. **NON** hanno un numero barionico, possono avere stranezza, hanno interazione forte, decadono debolmente.

λεπτός (leptós)

LEPTONI: sono fermioni ed esistono in 3 famiglie, repliche più pesanti dell'elettrone. Oltre ad elettrone/positrone abbiamo muone/antimuone e tau/antitau e loro neutrini (vedremo più avanti). **NON** hanno un numero barionico, **NON** hanno stranezza, **NON** hanno interazione forte ma solo debole ed elettromagnetica.

MESONI, BARIONI, LEPTONI

MESONI E BARIONI (fino al 1960)

<i>barioni</i> $\frac{1}{2}^+$	B	<i>S</i>	Mass (MeV)	<i>Q</i>	<i>mesoni</i> 0^-	B	<i>S</i>	Mass (MeV)	<i>Q</i>
p	+1	0	938	+1	K^+	0	+1	493	+1
n	+1	0	939	0	K^0	0	+1	497	0
Λ^0	+1	-1	1116	0	η^0	0	0	547	0
Σ^+	+1	-1	1189	+1	π^+	0	0	139	+1
Σ^0	+1	-1	1192	0	π^0	0	0	134	0
Σ^-	+1	-1	1197	-1	π^-	0	0	139	-1
Ξ^0	+1	-2	1314	0	\bar{K}^0	0	-1	497	0
Ξ^-	+1	-2	1321	-1	K^-	0	-1	493	-1

+ antibarioni

anti-mesoni già in tabella

ESERCIZIO ①

$$\pi^- p \rightarrow \Xi^0 \bar{K}^0 \quad \text{int. forte con } \Delta S \rightarrow \underline{\text{no}}$$

$$K^- p \rightarrow \Lambda \pi^- \quad \Phi \rightarrow \text{no}$$

$$\bar{\nu}_e e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu \mu^- \quad \underline{\text{debole}}$$

$$\mu^- n \rightarrow \bar{\nu}_\mu \pi^0 \quad \cancel{B} / L_\mu \quad \Phi \rightarrow \text{no}$$

$$\mu^- \rightarrow e^- \nu_e \bar{\nu}_\mu \quad \cancel{L}_e, \cancel{L}_\mu \rightarrow \text{no}$$

$$p \rightarrow n e^+ \bar{\nu}_e \quad \cancel{M}$$

$$\pi^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \quad \cancel{M}$$

$$n \bar{n} \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda} \quad \text{forte}$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma \quad \underline{\text{em.}}$$

$$K^- p \rightarrow \Xi^- K^+ \quad \underline{\text{forte}}$$