

I NEUTRINI

Laboratori Nazionali di Frascati (INFN)
Incontri di Fisica 2013: 9 ottobre 2013

Paolo Lipari
INFN, Università Roma , La Sapienza

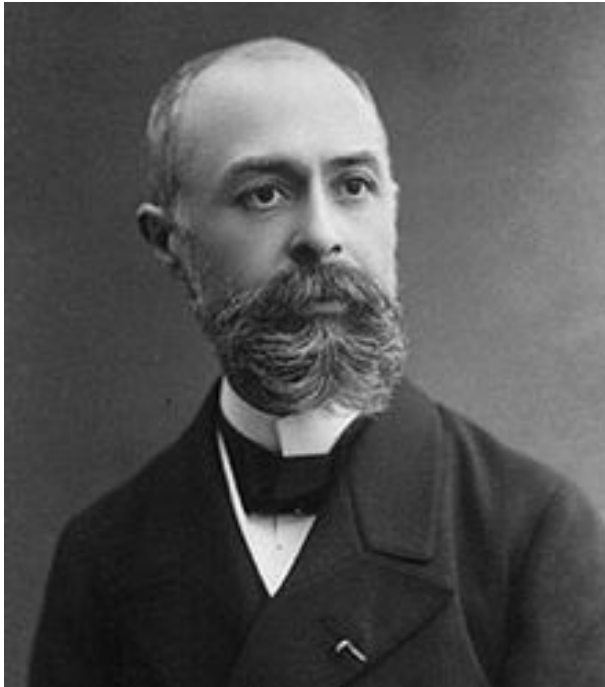
1. L'ipotesi del neutrino di Pauli
2. La Teoria di Fermi
3. Particelle “Attraverso lo Specchio”
4. Il Sole e i neutrini
5. Tre “sapori” di neutrini
6. Oscillazioni

1. L'ipotesi del neutrino di Pauli

1.1 La radioattività

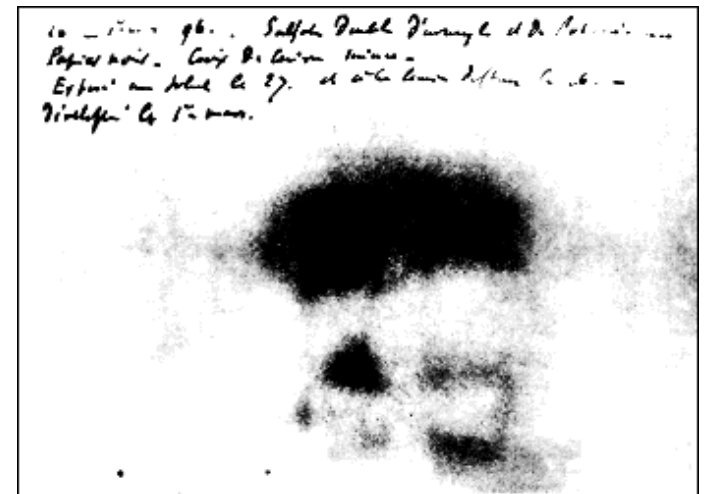
1.2 L'ipotesi di Pauli

La scoperta della RADIOATTIVITA'



Henry Bequerel

1 marzo 1896





Pierre e Marie Curie

Marie Curie (1911):

“Sembra che i fenomeni radioattivi abbiano origine in una regione piu' profonda degli atomi, una regione inaccessibile ai nostri mezzi di influenza e probabilmente ai nostri metodi di osservazione”





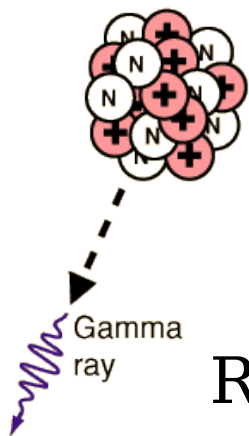
Ernest Rutherford

3 tipi di Decadimenti radioattivi:

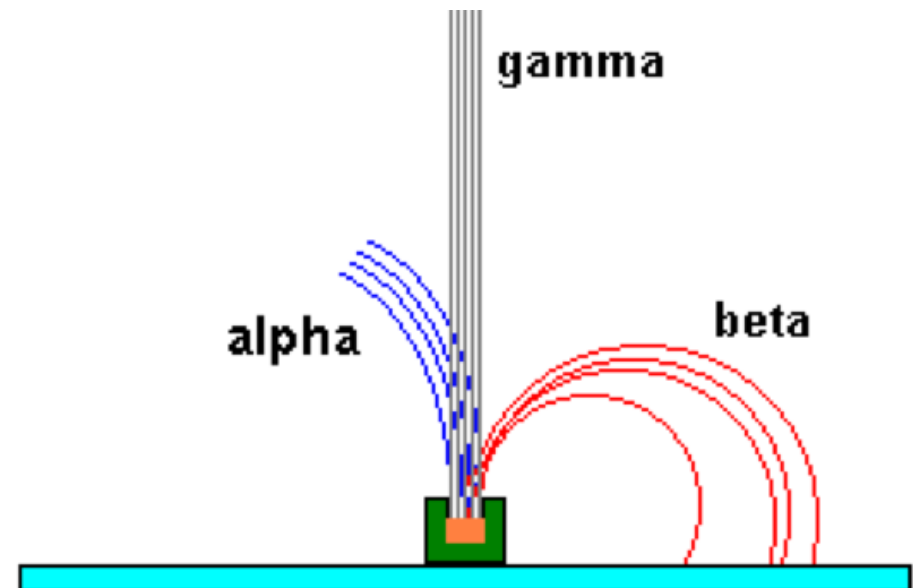
ALPHA

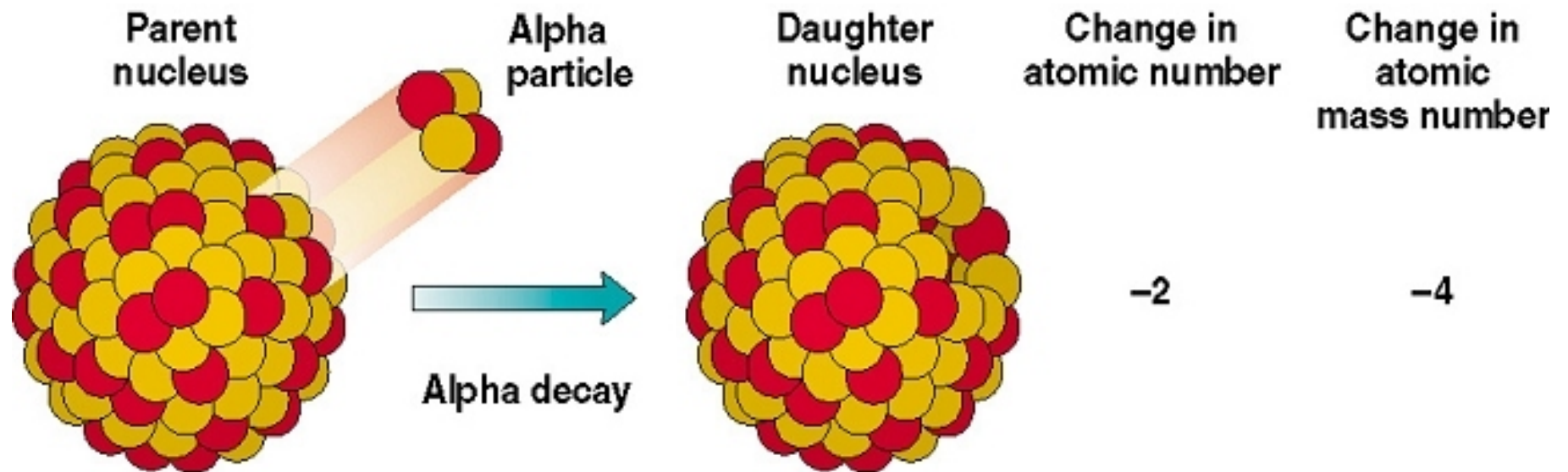
BETA

GAMMA

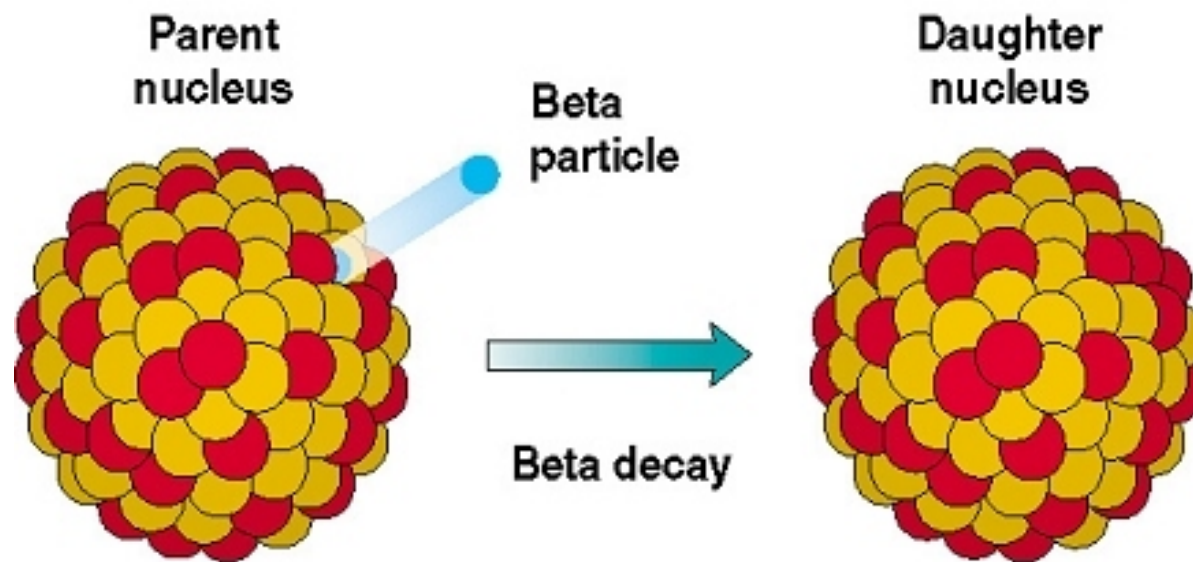


Radiazione gamma





(a)



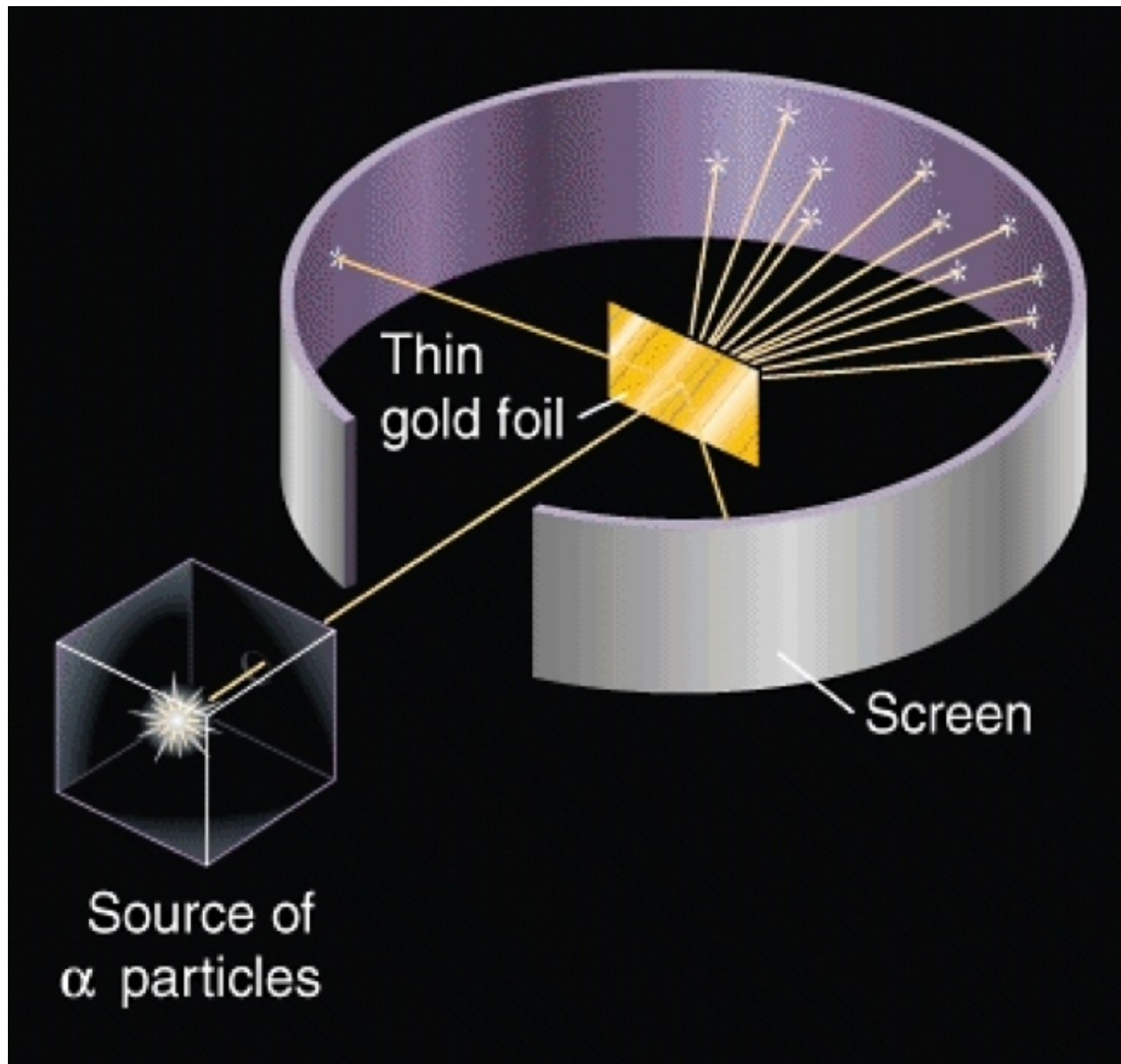
(b)

Proton Neutron Electron

“Trasmutazione”
degli elementi

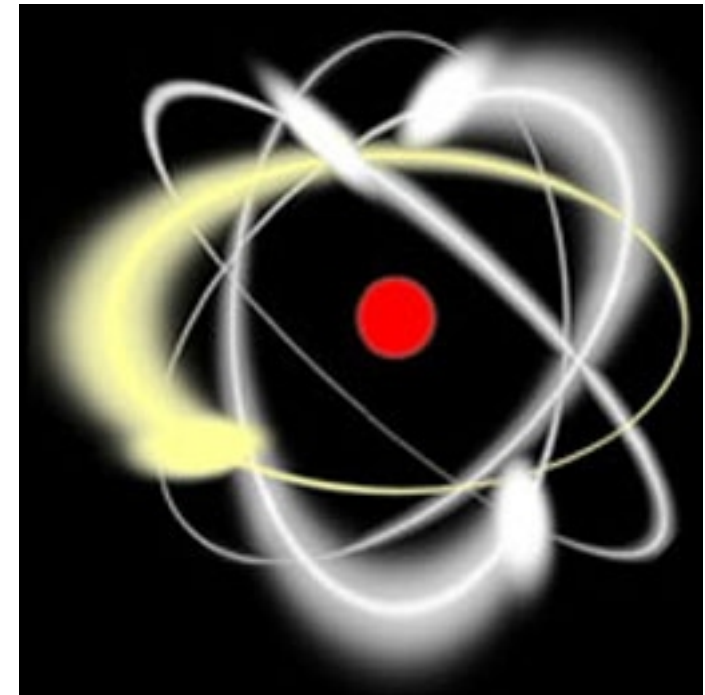
Rutherford e Geiger



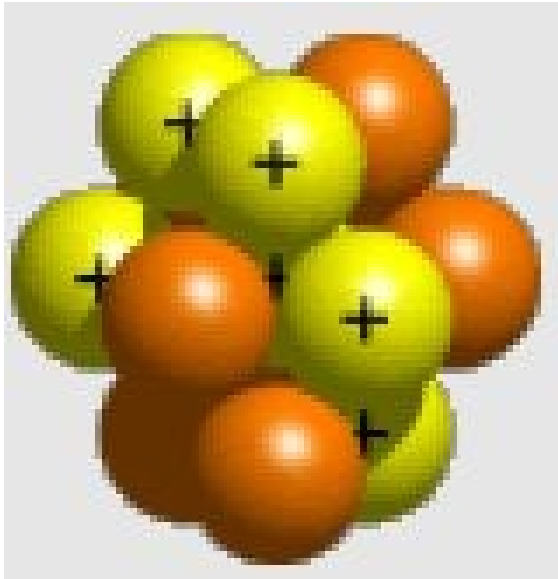


Atomo di
Rutherford

“microscopico
Sistema planetario”

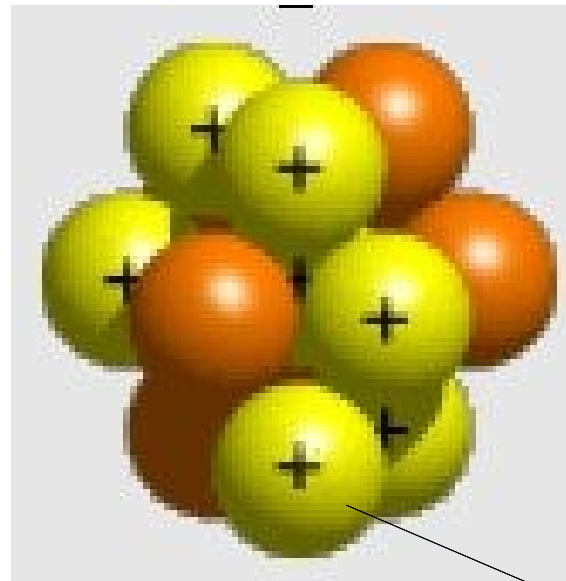


Decadimento "BETA"



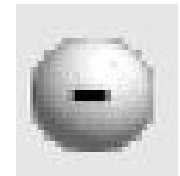
Carbonio-14

6 protoni,
8 neutroni



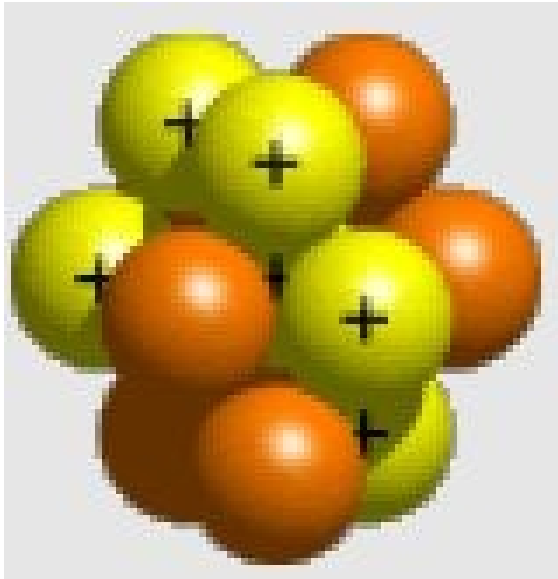
Azoto-14

7 protoni,
7 neutroni



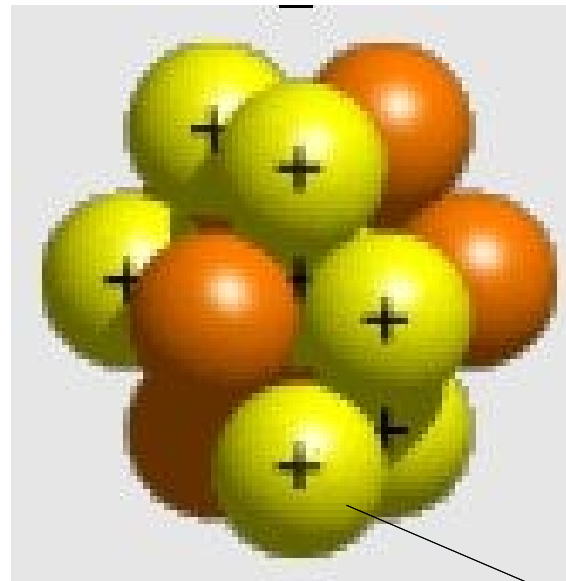
+ elettrone

Decadimento "BETA"



Carbonio-14

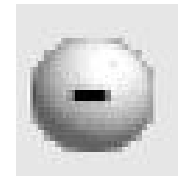
6 protoni,
8 neutroni



Azoto-14

7 protoni,
7 neutroni

Qualcosa
"Manca"
Conservazione
Energia
e impulso



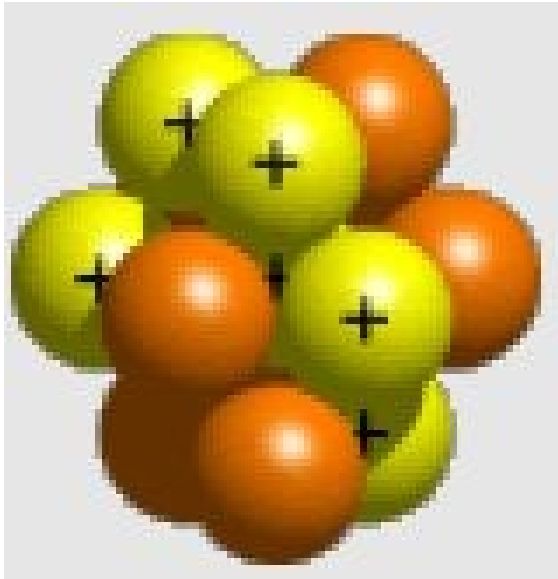
+ elettrone

Predizione della esistenza del Neutrino

Wolfgang Pauli (1930)

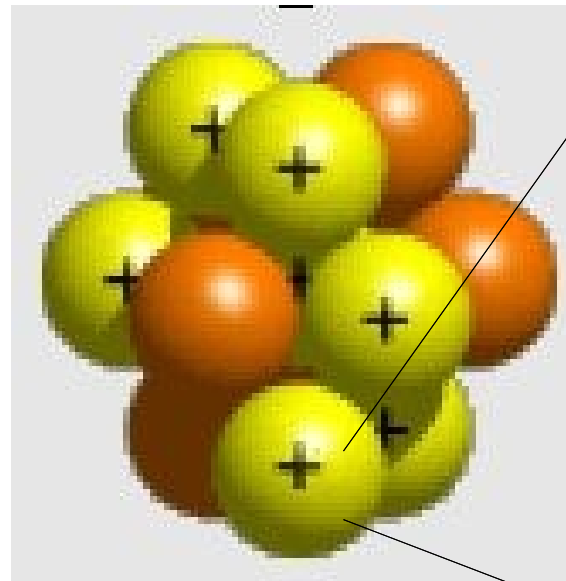


Decadimento "Beta"



Carbonio-14

6 protoni,
8 neutroni

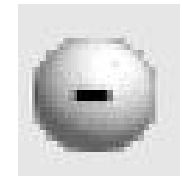


Azoto-14

7 protoni,
7 neutroni



neutrino



+ elettrone

Lettera di Wolfgang Pauli ai suoi colleghi. 4 dicembre 1930

Cari signore e signori radioattivi,

[...] sono arrivato a un rimedio disperato per salvare [...] la legge di conservazione dell'energia. Che esistano nei nuclei delle particelle elettricamente neutre, che io chiamerò neutroni. Lo spettro continuo della radiazione beta diventerebbe allora comprensibile se insieme all'elettrone venisse emesso anche un neutrone in modo che la somma delle energie di elettrone e neutrone rimanga costante. [...]

Fino ad ora non oso pubblicare nulla su questa idea, e mi rivolgo fiduciosamente a voi, cara gente radioattiva, con la domanda di quanto sia probabile trovare evidenza sperimentale per un tale neutrone [...]

Ammetto che il mio rimedio possa sembrare improbabile, perché, se esistessero, questi neutroni sarebbero stati visti già da molto tempo. Ma se non si specula, non si ottiene nulla. [...] Perciò, cara gente radioattiva, scrutinate e giudicate. [...]

Lettera di Wolfgang Pauli ai suoi colleghi. 4 dicembre 1930

Cari signore e signori radioattivi,

[...] sono arrivato a un rimedio disperato per salvare [...] la legge di conservazione dell'energia. Che esistano nei nuclei delle particelle elettricamente neutre, che io chiamerò neutroni. Lo spettro continuo della radiazione beta diventerebbe allora comprensibile se insieme all'elettrone venisse emesso anche un neutrone in modo che la somma delle energie di elettrone e neutrone rimanga costante. [...]

Fino ad ora non oso pubblicare nulla su questa idea, e mi rivolgo fiduciosamente a voi, cara gente radioattiva, con la domanda di quanto sia probabile trovare evidenza sperimentale per un tale neutrone [...]

Ammetto che il mio rimedio possa sembrare improbabile, perché, se esistessero, questi neutroni sarebbero stati visti già da molto tempo. Ma se non si specula, non si ottiene nulla. [...] Perciò, cara gente radioattiva, scrutinate e giudicate. [...]

Sfortunatamente non mi sarà possibile essere di persona a Tübingen, perché la mia presenza qui a Zurigo è indispensabile per via di un ballo che ci sarà la notte tra il 6 e il 7 dicembre. [...]

Il vostro umile servitore

Wolfgang Pauli

1. L'ipotesi del neutrino di Pauli

2. La Teoria di Fermi

- 2.1 Dirac e il positrone

- 2.2 Fermi e le interazioni del neutrino

Materia

Anti- Materia



Paul Dirac

Predizione dell'esistenza
dell' antimateria

Per ogni **particella**
esiste un'**anti-particella**
con la stessa massa
e tutte le “cariche”
di segno opposto.

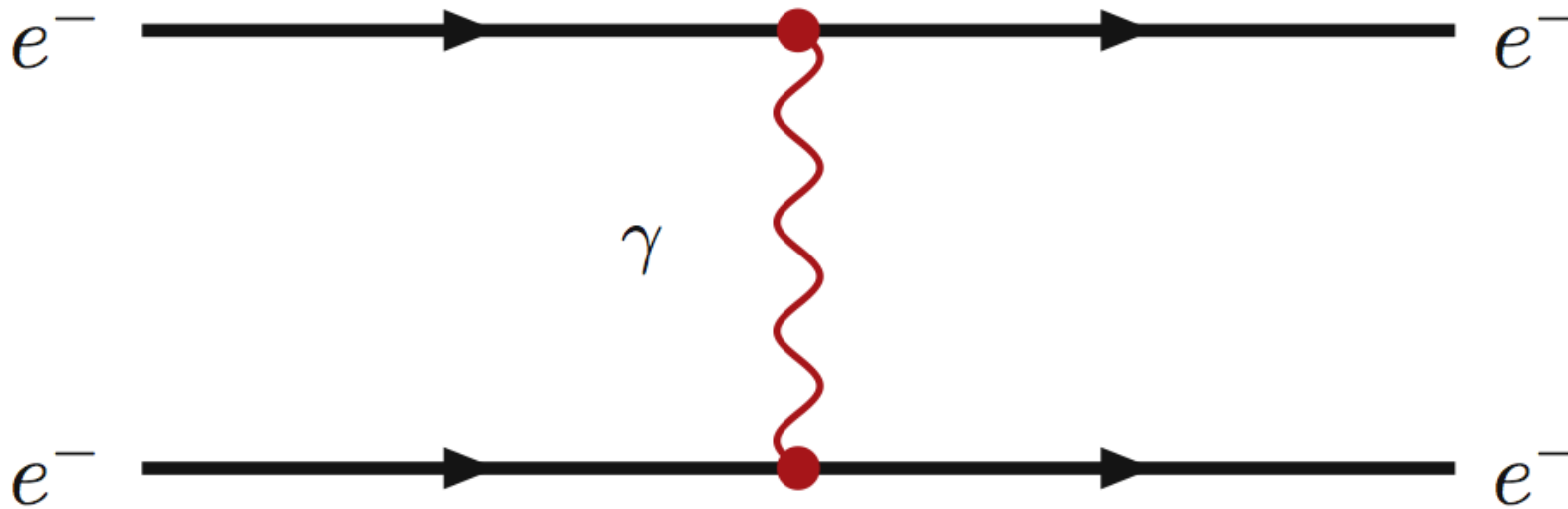
$$e^{-} \quad e^{+}$$

$$p \quad \bar{p}$$

$$n \quad \bar{n}$$

.....

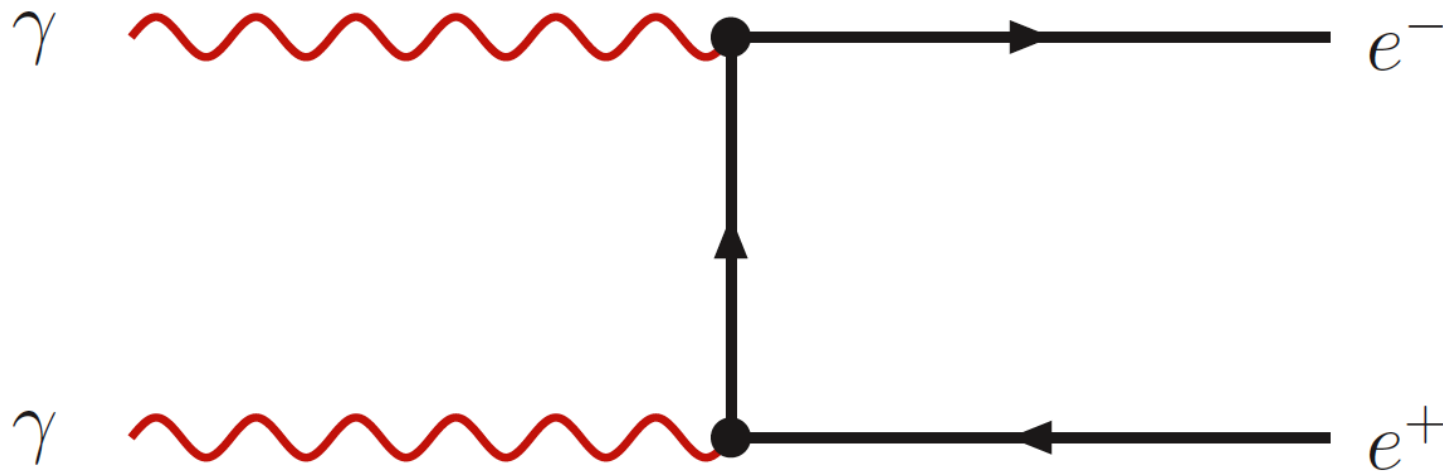
$$e^{-} + e^{-} \rightarrow e^{-} + e^{-}$$



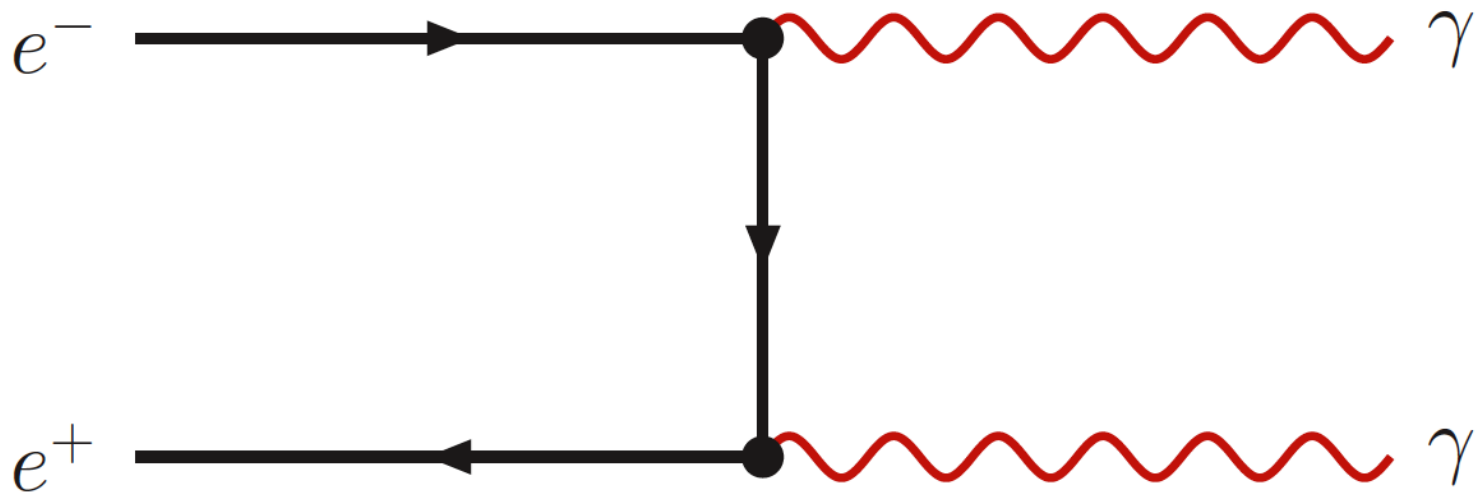
Sviluppo della “elettrodinamica quantistica”

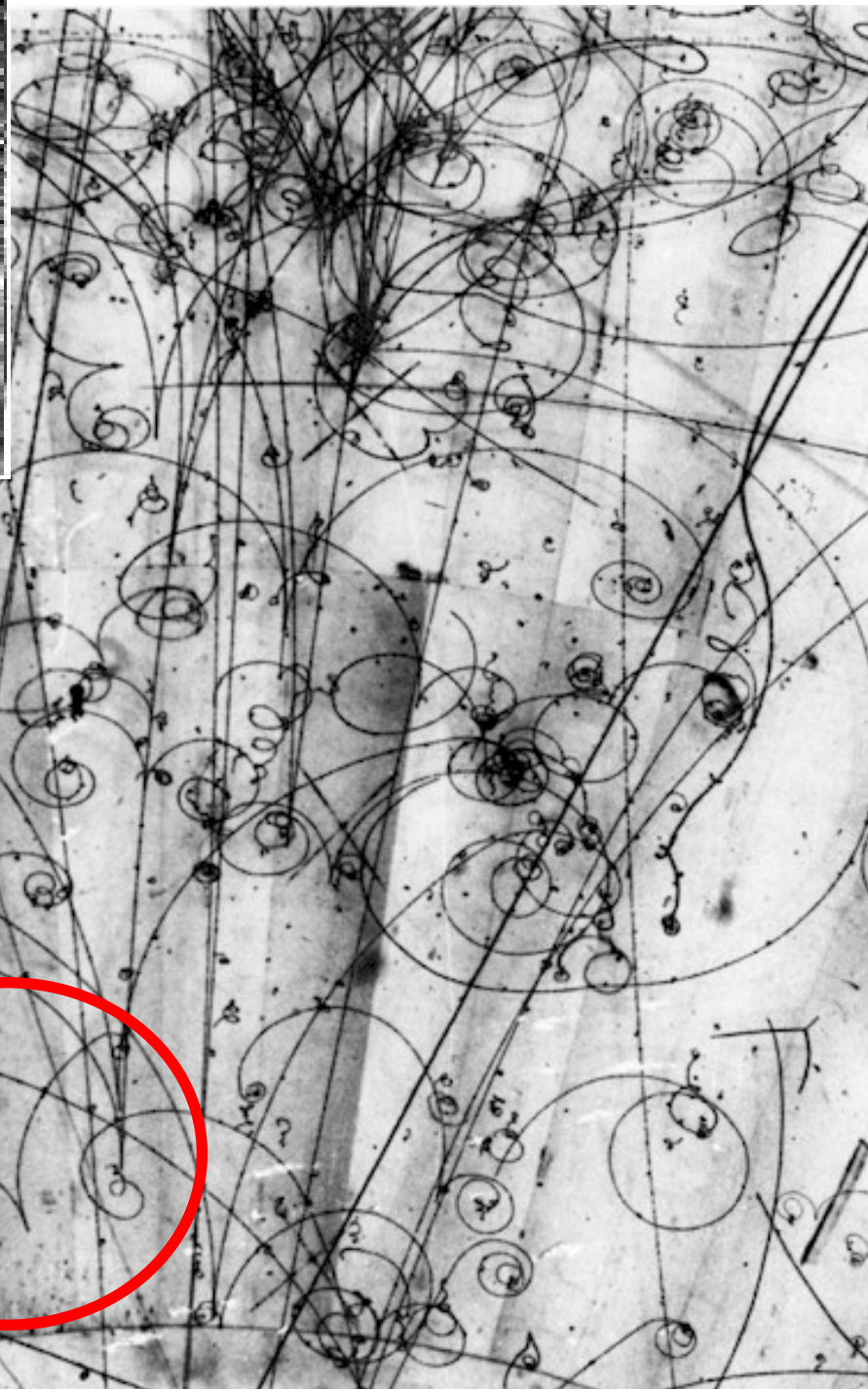
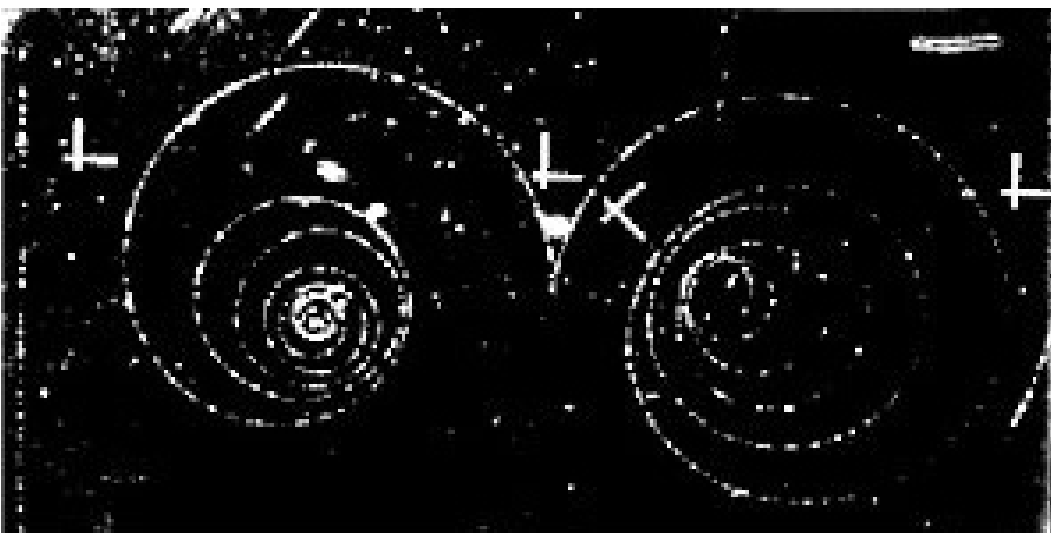
La forza elettrica è dovuta allo
“scambio” di fotoni (virtuali)

“Creazione” di una coppia elettrone-positrone



“Annichilazione” di una coppia elettrone-positrone





Creazione di una 'coppia'
elettrone - antielettrone



Enrico Fermi
Roma, 1933

ANNO IV · VOL. II · N. 12

QUINDICINALE

31 DICEMBRE 1933 · XII

LA RICERCA SCIENTIFICA

ED IL PROGRESSO TECNICO NELL'ECONOMIA NAZIONALE

Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi "beta"

Nota del prof. ENRICO FERMI

Riassunto: Teoria della emissione dei raggi β delle sostanze radioattive, fondata sull'ipotesi che gli elettroni emessi dai nuclei non esistano prima della disintegrazione ma vengano formati, insieme ad un neutrino, in modo analogo alla formazione di un quanto di luce che accompagna un salto quantico di un atomo. Confronto della teoria con l'esperienza.

Mi propongo di esporre qui i fondamenti di una teoria dell'emissione dei raggi β che, benchè basata sopra ipotesi delle quali manca al momento presente qualsiasi conferma sperimentale, sembra tuttavia capace di dare una rappresentazione abbastanza accurata dei fatti e permette una trattazione quantitativa del comportamento degli elettroni nucleari che, se pure

Articolo di Enrico Fermi sul quindicinale:
` `La Ricerca Scientifica" (31 dicembre 1933).

[Dopo il rifiuto di Nature perché il lavoro è troppo “speculativo”]

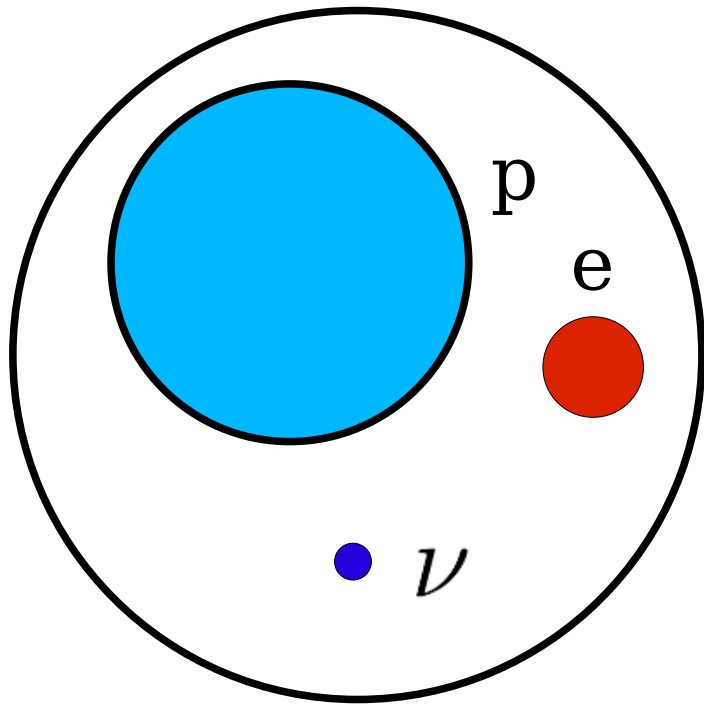
“Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi beta”

Riassunto: Teoria dell'emissione dei raggi beta delle sostanze radioattive fondata sull'**ipotesi che gli elettroni emessi dai nuclei non esistano prima della disintegrazione ma vengano formati insieme ad un neutrino**, in modo analogo alla formazione di un quanto di luce che accompagna un salto quantico di un atomo.

Confronto della teoria con l'esperienza.

Decadimento del neutrone:

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



Ipotesi ingenua (ed errata):

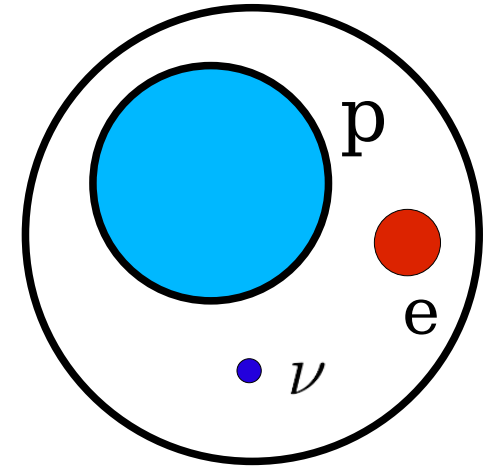
Il neutrone è una particella composta, formata da

[protone+ elettrone + neutrino]

Principio di indeterminazione
di Heisenberg:

$$R_{\text{neutron}} \simeq 10^{-13} \text{ cm} \simeq 1 \text{ fm}$$

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$



$$p_e \simeq \Delta p \geq \frac{\hbar}{2 \Delta x} \simeq \frac{\hbar}{4 R_{\text{neutron}}}$$

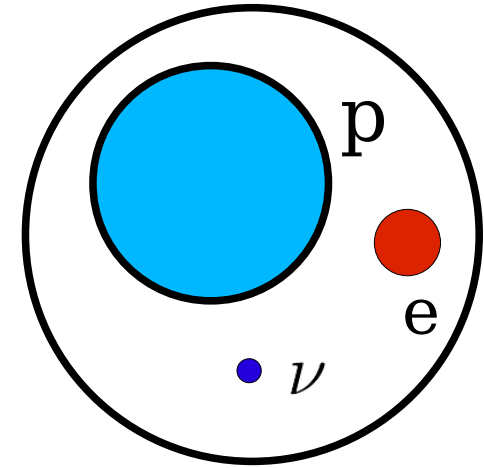
$$E_e = \sqrt{(p_e c)^2 + (m_e c^2)^2} \simeq p_e c \simeq 50 \text{ MeV}$$

$$E_\nu \simeq E_e$$

Principio di indeterminazione
di Heisenberg:

$$R_{\text{neutron}} \simeq 10^{-13} \text{ cm} \simeq 1 \text{ fm}$$

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$



$$p_e \simeq \Delta p \geq \frac{\hbar}{2 \Delta x} \simeq \frac{\hbar}{4 R_{\text{neutron}}}$$

$$E_e = \sqrt{(p_e c)^2 + (m_e c^2)^2} \simeq p_e c \simeq 50 \text{ MeV}$$

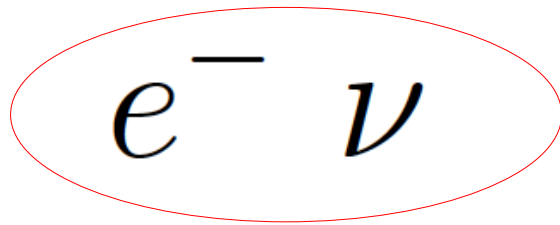
Elettrone e neutrino CREATI nella disintegrazione

Decadimento: $n \rightarrow p + e^{-} + \nu$

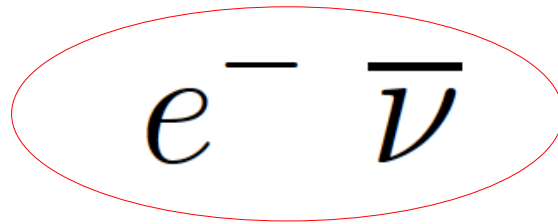
“Trasformazione” di un neutrone in un protone
e creazione di una “coppia” [elettrone-neutrino]

in analogia con la creazione di una coppia [elettrone-positrone]

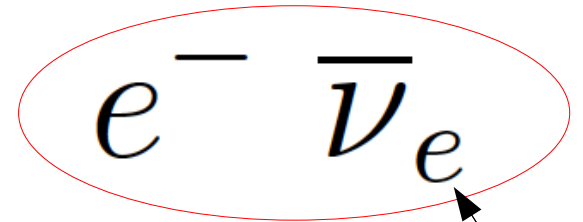
Questa idea suggerisce di cambiare la notazione
(e definire neutrino ed anti-neutrino)


$$e^{-} \nu$$

elettrone
neutrino


$$e^{-} \bar{\nu}$$

elettrone
anti-neutrino


$$e^{-} \bar{\nu}_e$$

“sapore”
del neutrino

Particelle conosciute sono riunite in due “doppietti”

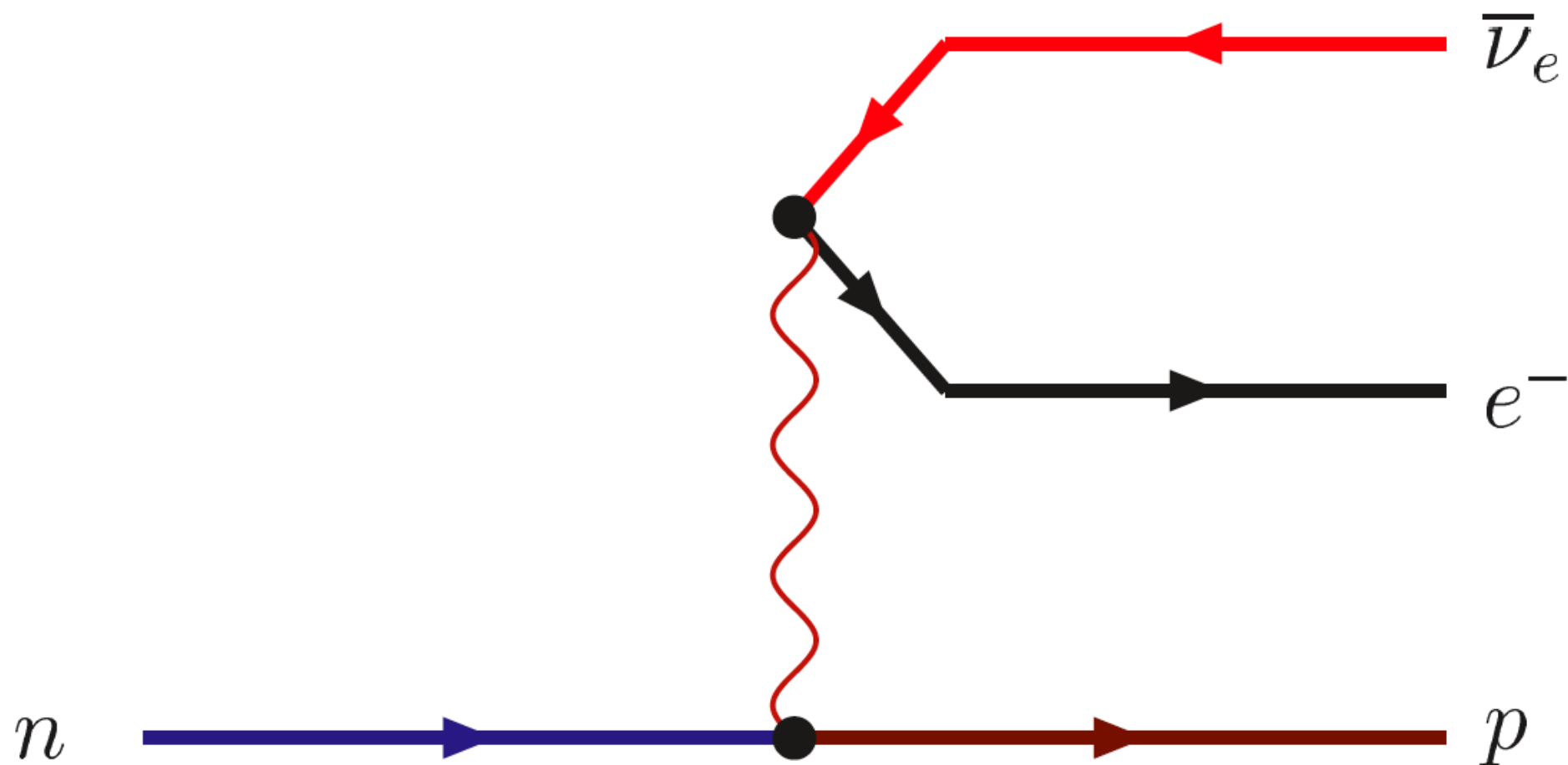
$$\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$$

Carica
elettrica:

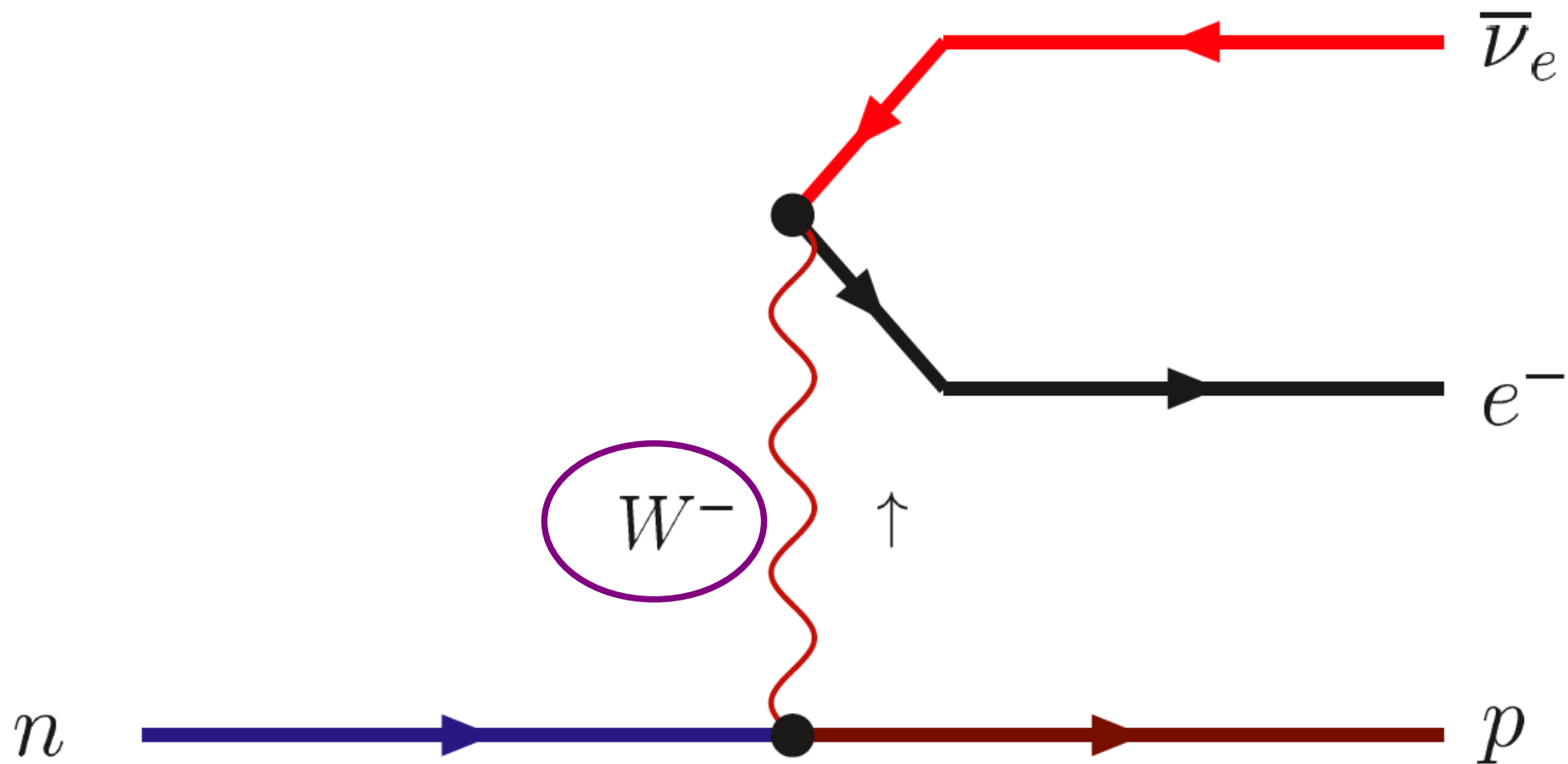
$$\begin{bmatrix} +1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

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



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



Particelle riunite in due “doppietti”

Quarks “up” e “down”

$$p = [u \ u \ d]$$

$$n = [u \ d \ d]$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$$

origine dei nomi
“up” e “down”

Carica elettrica:

$$\begin{bmatrix} +2/3 \\ -1/3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

Diversi processi:

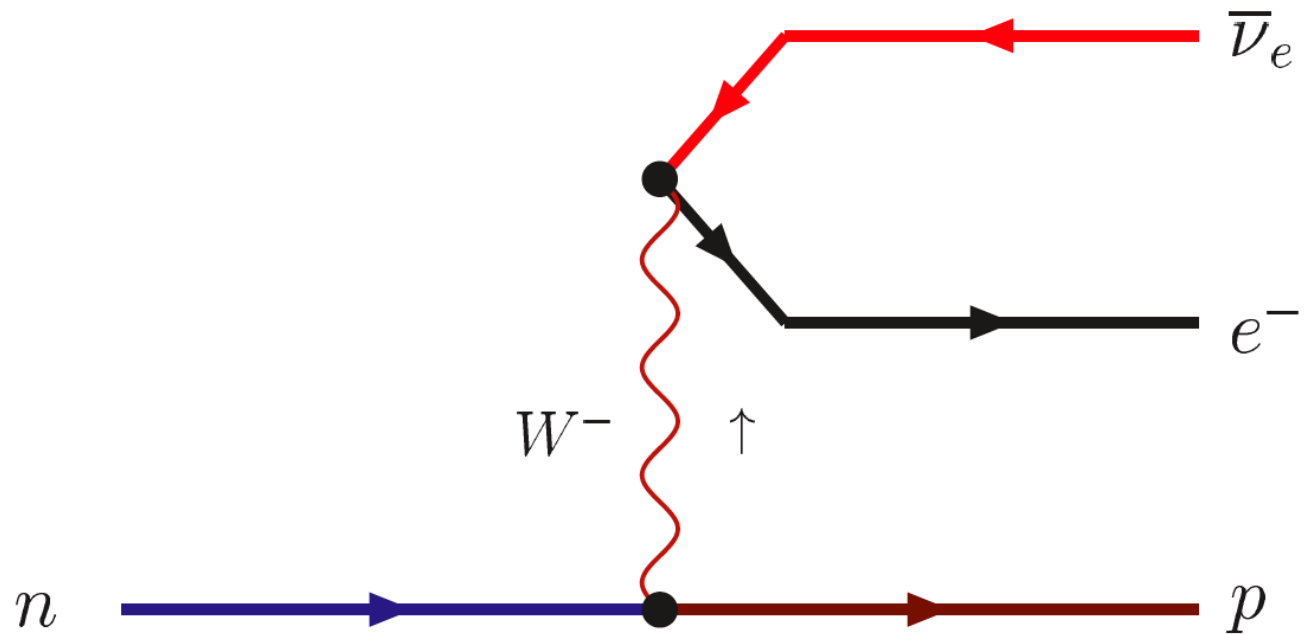
$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu_e$$

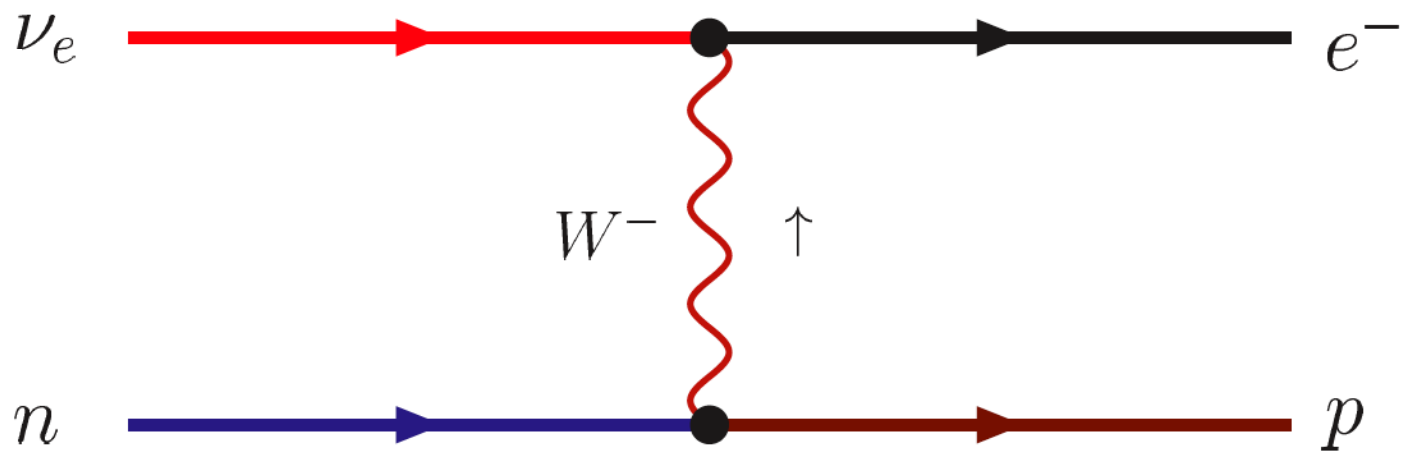
$$\nu_e + n \rightarrow p + e^{-}$$

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

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



$$\nu_e + n \rightarrow p + e^{-}$$



Nuova descrizione delle “Forze”:

Teoria quantistica dei campi

La “forza” è l'effetto di uno scambio di particelle (virtuali)

Nel caso della forza elettromagnetica

La particella scambiata è il fotone che ha massa zero

$$F_{\text{elettrica}} = \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F_{\text{elettrica}} = \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Limite classico per
“scambio” di una particella
con massa nulla (il fotone)

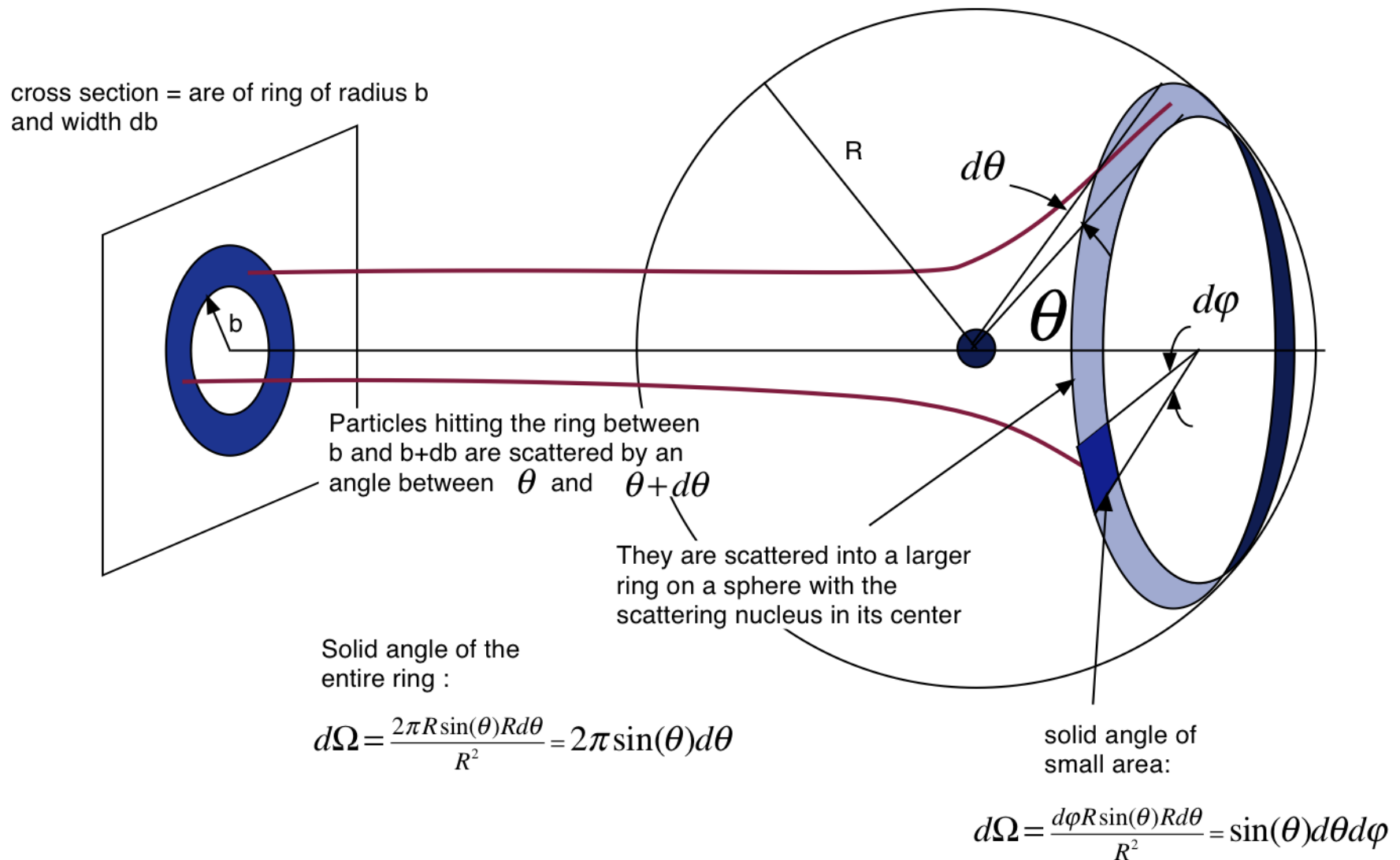
$$F_{\text{debole}} = \frac{\tilde{q}_1 \tilde{q}_2}{r^2} e^{-r/R}$$

“scambio” di una particella
con massa diversa da zero

$$R \simeq \frac{\hbar}{c} \frac{1}{M}$$

R inversamente proporzionale
alla massa della particella scambiata

Scattering tra particelle con carica elettrica



Sezione d'urto per la diffusione tra due particelle
Con carica elettrica

$$e^{-} p \rightarrow e^{-} p$$

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{ep \rightarrow ep}^{\text{Rutherford}} = \frac{(q_1 q_2)^2}{m_e^2 v^4 (1 - \cos \theta)^2}$$

$$e^- \ p \rightarrow e^- \ p$$

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{ep \rightarrow ep}^{\text{Rutherford}} = \frac{(q_1 \ q_2)^2}{m_e^2 \ v^4 \ (1 - \cos \theta)^2}$$

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{ep \rightarrow ep}^{\text{Rutherford}} = \left(\frac{q_1 \ q_2}{Q^2} \right)^2 4m_e^2$$

$$Q^2 = |\vec{p}_i - \vec{p}_f|^2 \qquad 0 \leq Q^2 \lesssim (2m \ v)^2$$

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{ep \rightarrow ep}^{\text{Rutherford}} = \left(\frac{q_1 q_2}{Q^2} \right)^2 4m_e^2$$

Calcolo della sezione d'urto assumendo che
Il fotone abbia una massa M:

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{ep \rightarrow ep}^{(\text{fotone pesante})} = \left(\frac{q_1 q_2}{M^2 c^2 + Q^2} \right)^2 4m_e^2$$

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{ep \rightarrow ep}^{(\text{fotone pesante})} = \left(\frac{q_1 q_2}{M^2 c^2 + Q^2} \right)^2 4m_e^2$$

$$\nu_e + n \rightarrow e^- + p$$

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

Sezione d'urto di interazione
del neutrino
(finita per tutti gli angoli)

$$\left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{\bar{\nu}p \rightarrow e^- n} \simeq \left(\frac{\tilde{q}_1 \tilde{q}_2}{M^2 c^2 + Q^2} \right)^2 \frac{4E_\nu^2}{c^2}$$

$$\alpha \simeq \frac{q^2}{\hbar c} \simeq \frac{1}{137}$$

$$g^2 \simeq \frac{(\tilde{q})^2}{\hbar c}$$

$$G_{\text{Fermi}} \simeq \frac{g^2}{M^2 c^4}$$

Costante che determina le proprietà dell'Interazione Debole

$$G_{\text{Fermi}} = \frac{g^2}{M_W^2 c^4} \frac{\sqrt{2}}{8}$$

$$g_\nu = -g_e = \frac{1}{2}$$

Legge del decadimento radioattivo:

$$n(t) = n_0 e^{-t/\tau}$$

$$\frac{dP_{\text{decadimento}}}{dt} = \frac{1}{\tau}$$

Probabilità di decadimento
per unità di tempo

$$\frac{1}{\tau} \simeq G_{\text{Fermi}}^2 (M_i - M_f)^5 \quad * \text{ fattore di correzione}$$

E' possibile stimare il valore di G_{Fermi} dalle misure
Del tempo di decadimento delle sostanze radioattive

$$\sigma_{\bar{\nu}p \rightarrow e^+n} \simeq \sigma_{\nu n \rightarrow e^-p} \simeq G_{\text{Fermi}}^2 (4 E_\nu^2) (\hbar c)^2$$

$$\simeq 9.3 \times 10^{-44} \left(\frac{E_\nu}{\text{MeV}} \right)^2$$

Sezione d'urto straordinariamente piccola

$$\sigma_{\bar{\nu}p \rightarrow e^+n} \simeq \sigma_{\nu n \rightarrow e^-p} \simeq G_{\text{Fermi}}^2 (4 E_\nu^2) (\hbar c)^2$$

$$\simeq 9.3 \times 10^{-44} \left(\frac{E_\nu}{\text{MeV}} \right)^2$$

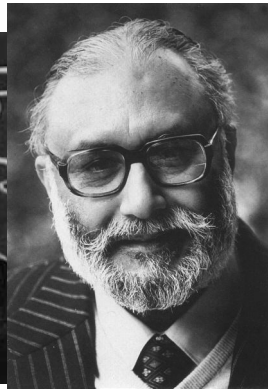
Sezione d'urto straordinariamente piccola

Espressione contemporanea della sezione d'urto:

$$\frac{G_F^2}{\pi} |V_{ud}|^2 (1 + 3 g_A^2) E_\nu^2$$

Passi principali nello sviluppo della Teoria della “Interazioni Debole”

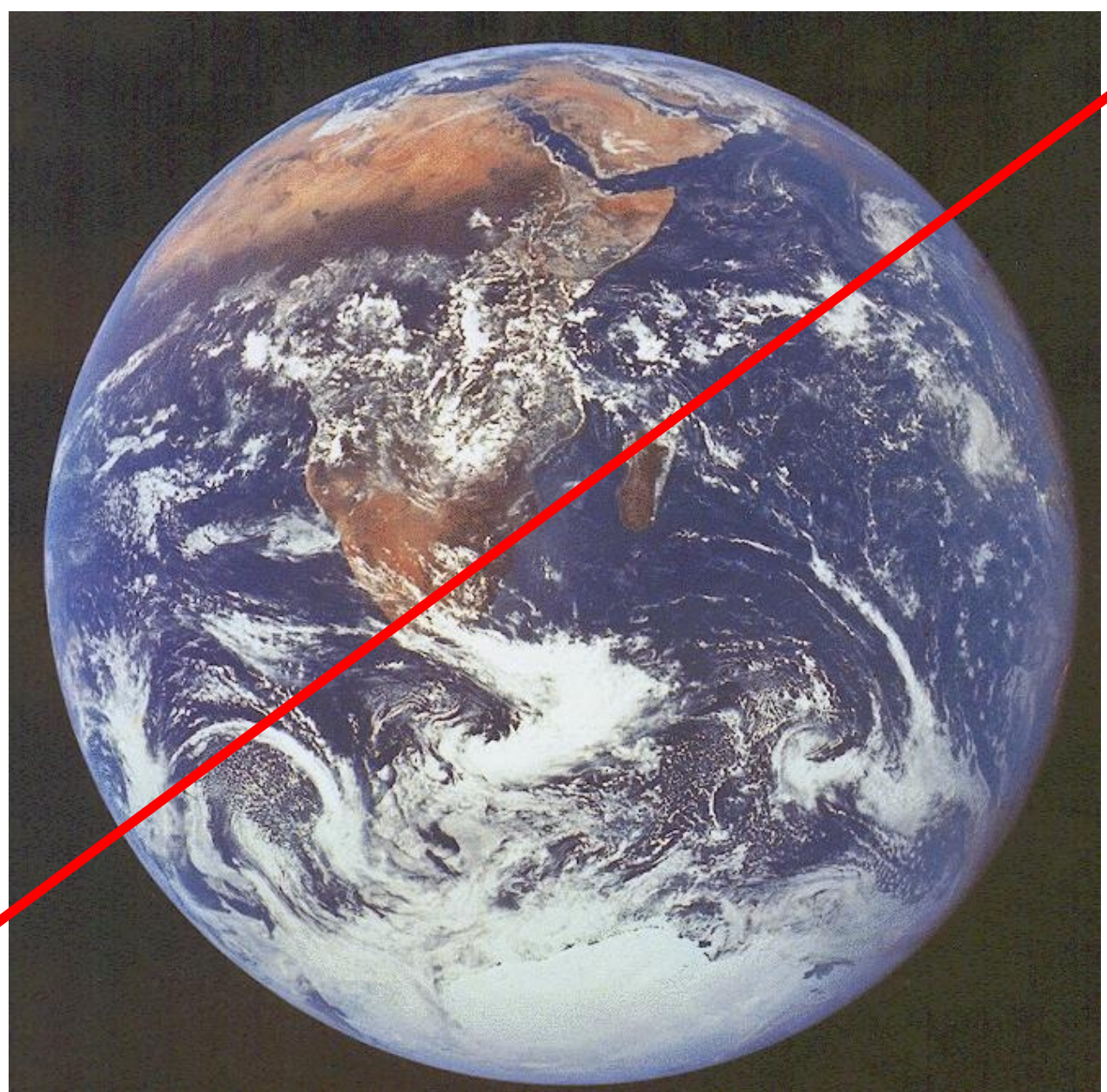
1. La Teoria di Fermi
2. Il “Meccanismo di Higgs”
(o di Englert, Brout e Higgs)
per dare massa alle particelle
che mediano una interazione
3. La teoria dettagliata della
Interazione Debole
3 particelle pesanti W^+ W^- Z
[Glashow, Weinberg, Salam]
4. La scoperta delle particelle W^+ W^- Z
Carlo Rubbia



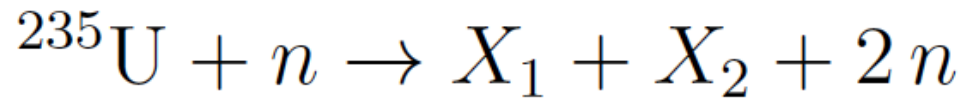
Neutrino
1 MeV

Σεζιονε διατο
 $= 10^{-43} \text{ cm}^2$

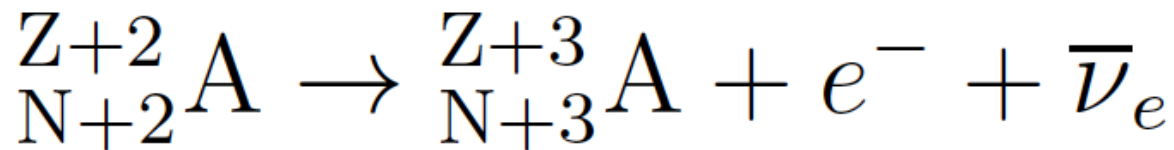
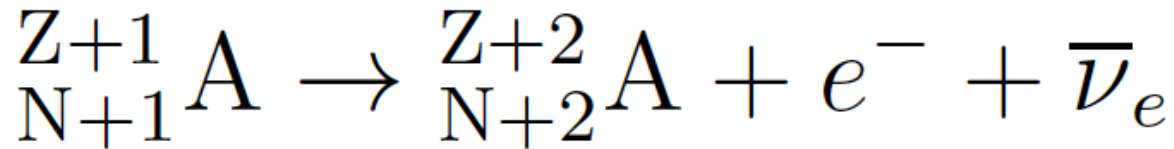
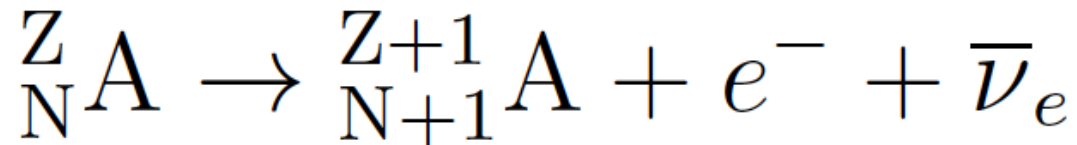
Probabilita' di
interazione
 $= 10^{-10}$



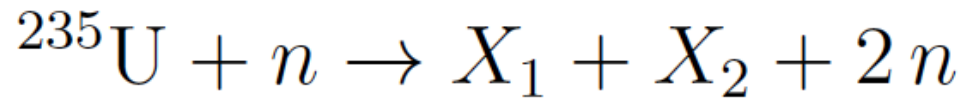
Uranio-235 (92 protoni e 143 neutroni)



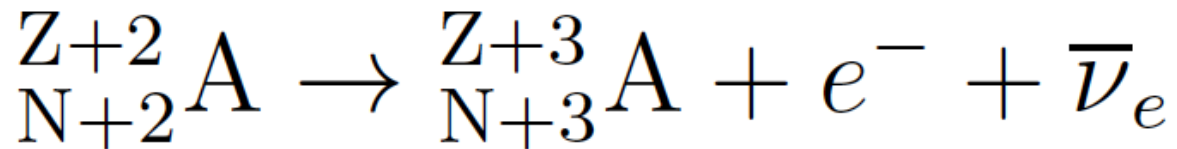
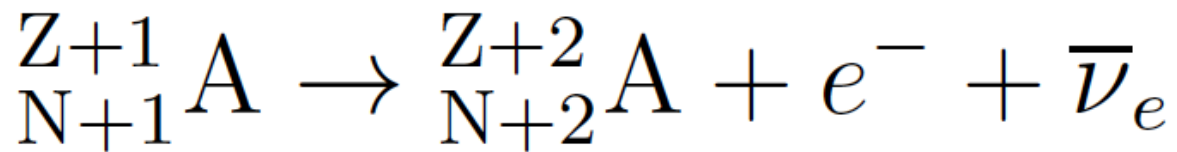
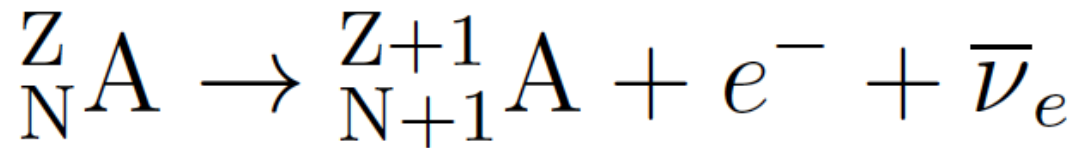
$$\frac{N}{Z} = \frac{\text{neutroni}}{\text{protoni}} \quad \text{cresce con } A = (Z + N)$$



Uranio-235 (92 protoni e 143 neutroni)



$$\frac{N}{Z} = \frac{\text{neutroni}}{\text{protoni}} \quad \text{cresce con } A = (Z + N)$$

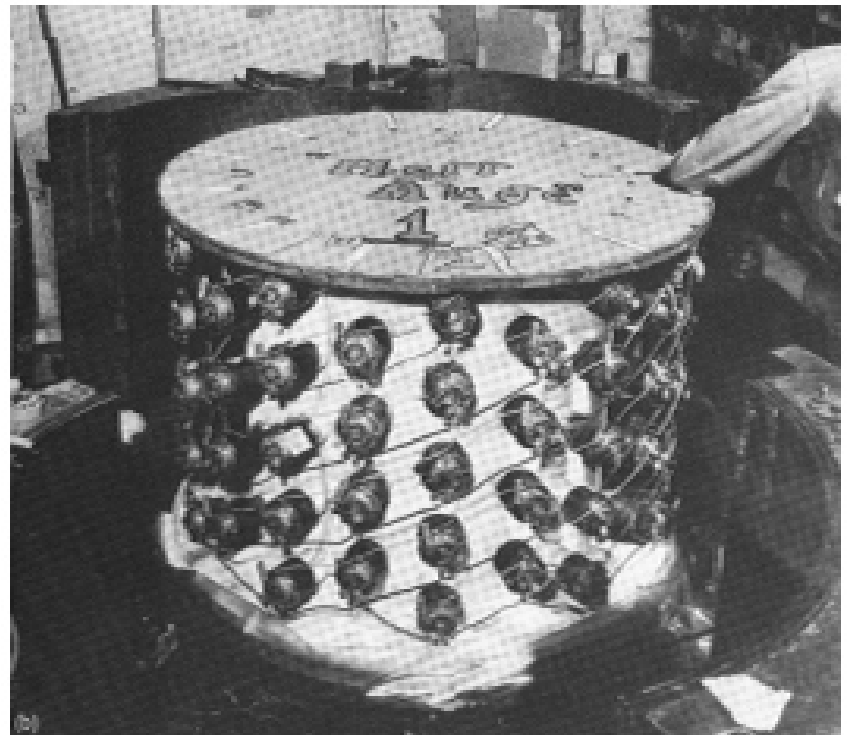


Ogni fissione di
Uranio, rilascia
200 MeV di energia
E (in media)
6 antineutrini

Reattore commerciale
 $6 * 10^{20}$ nu/sec

Scoperta del Neutrino (antineutrini da Reattore Nucleare)

Reines e Cowan
1956

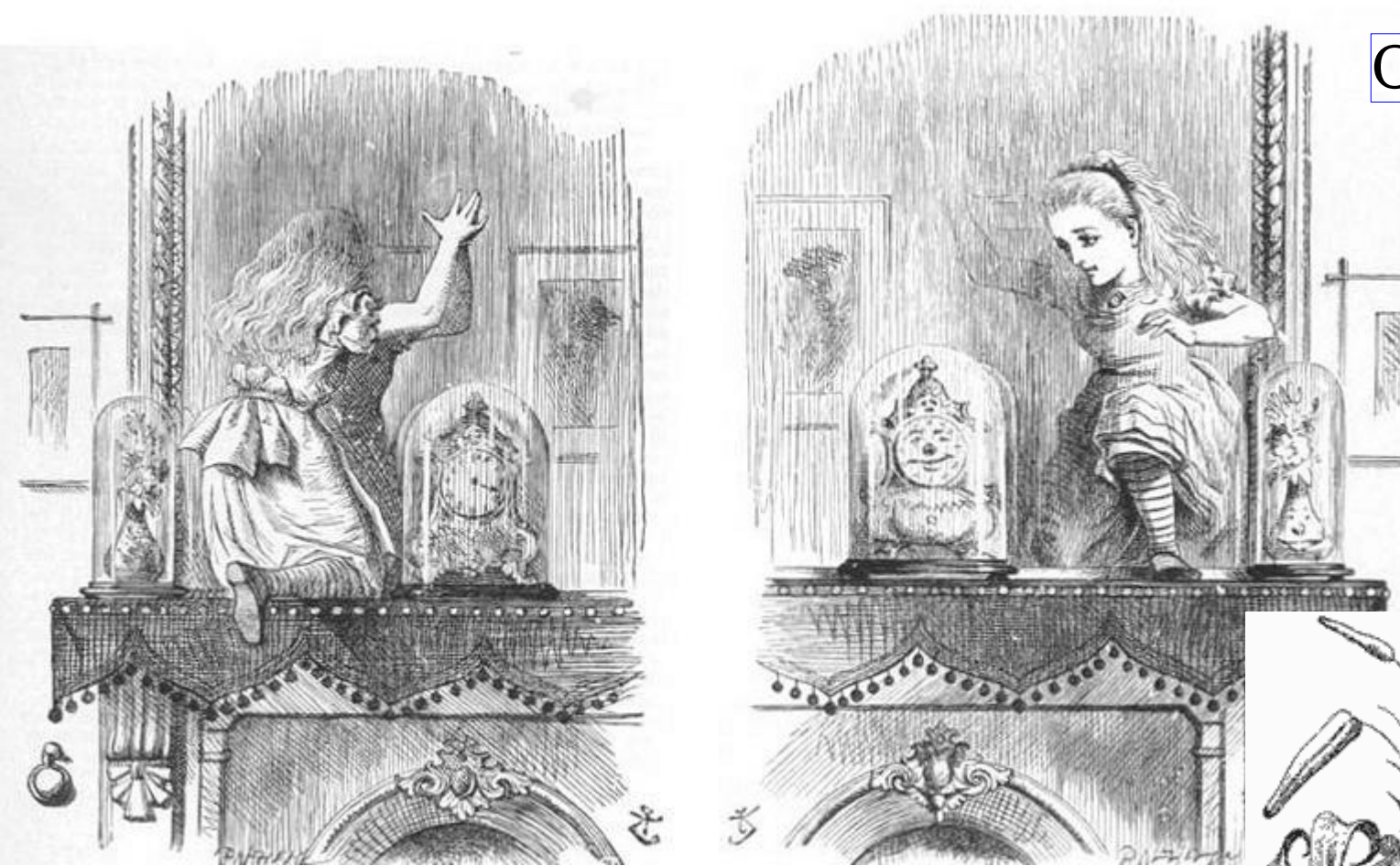


$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$

Rivelazione simultanea di un positrone
E il fotone di cattura del neutrone

$$n + p \rightarrow \text{deuterio} + \gamma$$

1. L'ipotesi del neutrino di Pauli
2. La Teoria di Fermi
3. Particelle
“Attraverso lo Specchio”



“Alice's adventures in Wonderland”
“Through the Looking Glass”

E' possibile distinguere il
mondo reale e la sua riflessione
in uno specchio ?

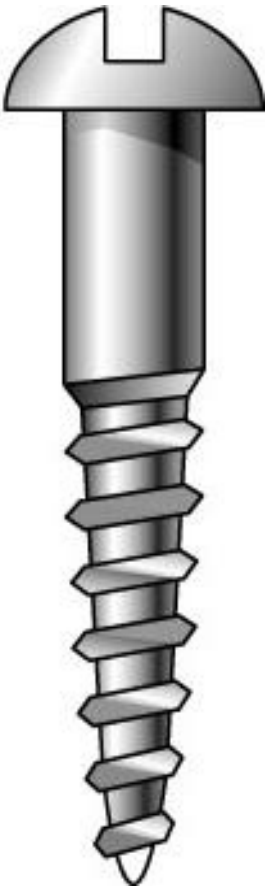


Alice (parlando al suo gattino):

Se stai zitto per un poco, micetto e smetti di parlare tanto ti racconterò delle mie idee sulla casa attraverso lo specchio. Innanzitutto la stanza che vedi attraverso lo specchio è proprio come la nostra, solo che le cose sono all'incontrario [...] i libri sono un poco come i nostri ma sono scritti con le parole rovesciate.

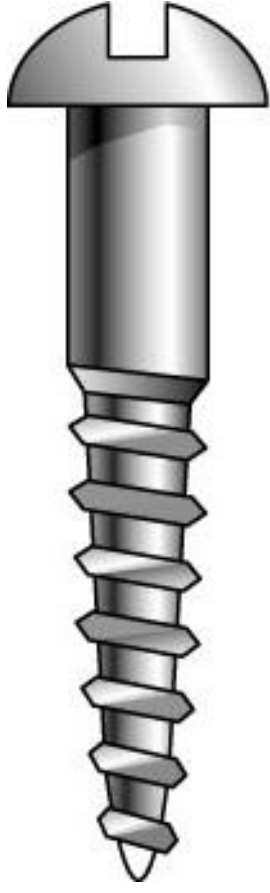
Lo so perché ho messo un libro di fronte allo specchio, e ne ho visto uno nell'altra stanza. Micino mio, ti piacerebbe vivere nella casa al di là dello specchio? Chissà se c'è del latte dall'altra parte? Forse il latte al di là dello specchio non è buono da bere. [...]

Oh, micino, come sarebbe bello potere entrare nella casa attraverso lo specchio. Sono certo che ci sarebbero, oh ! tante belle cose!

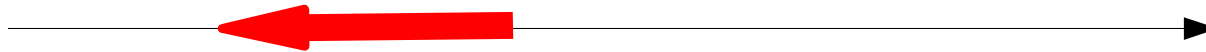


MIRROR

WIRBOR



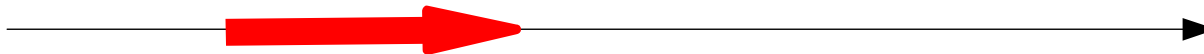
Neutrino spin 1/2



Spin
direction

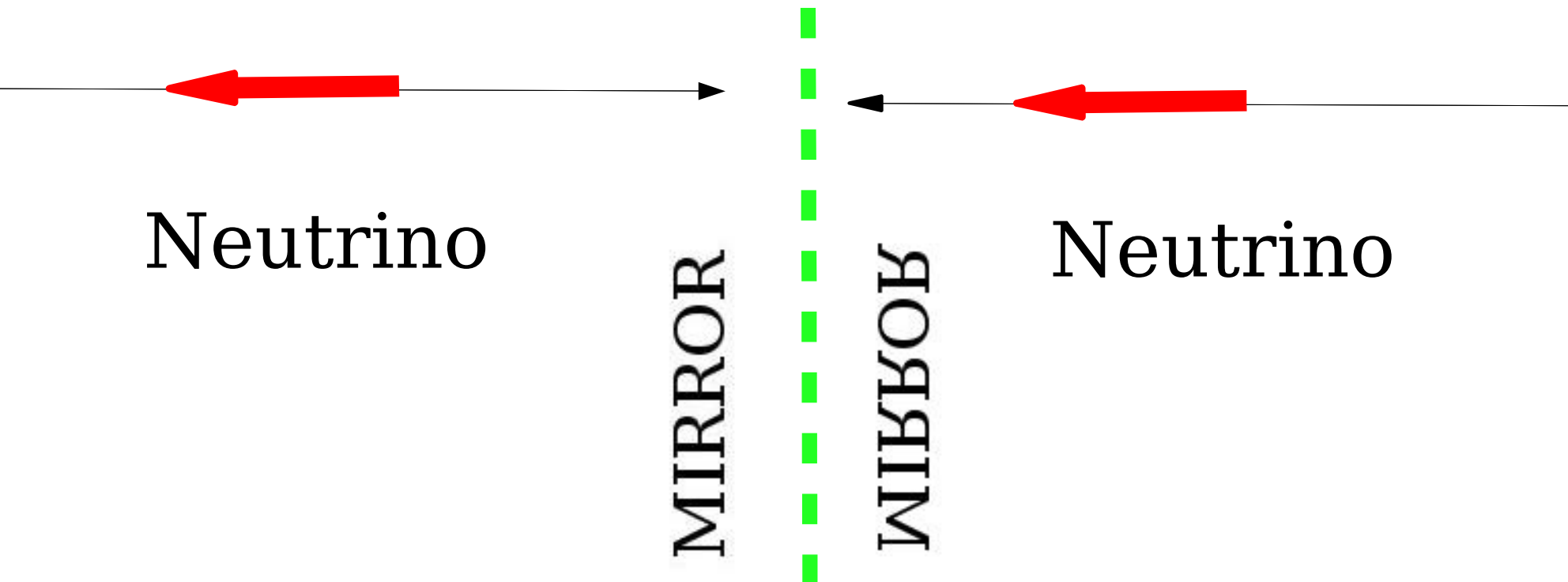
Momentum
direction

Anti-Neutrino



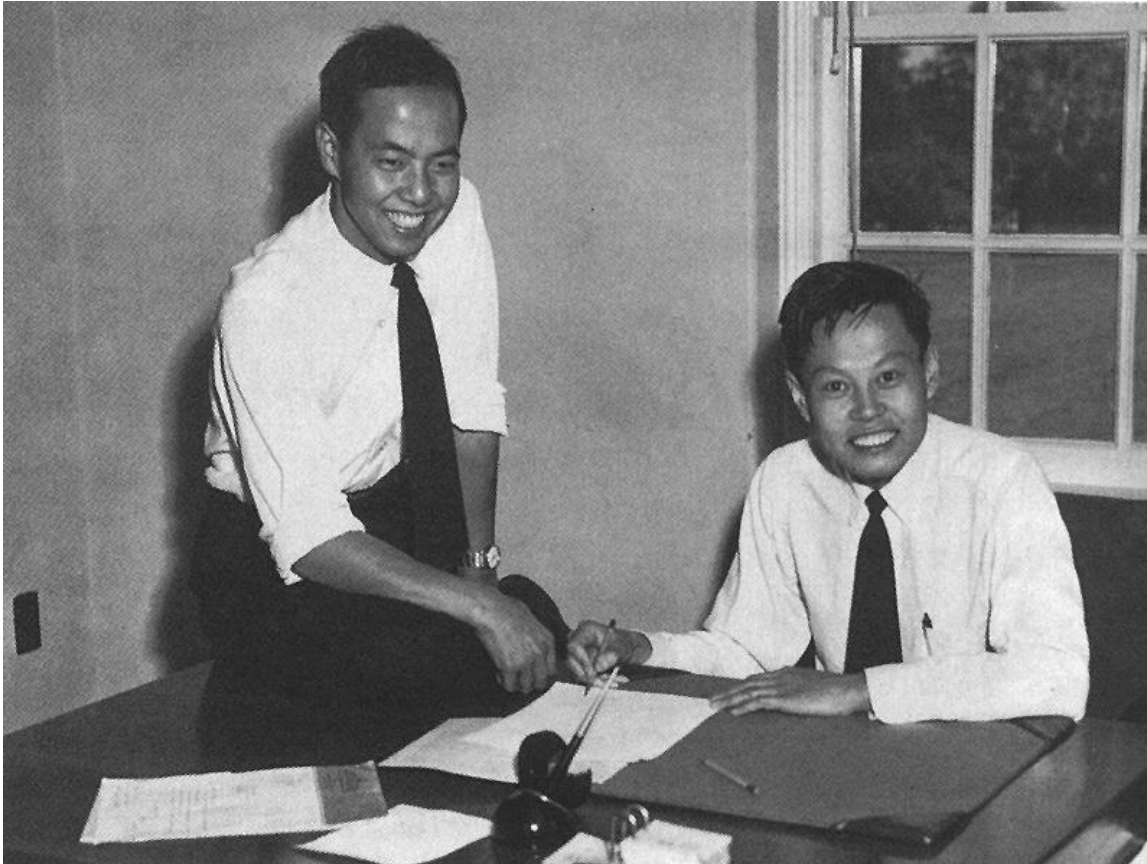
Spin
direction

Momentum
direction

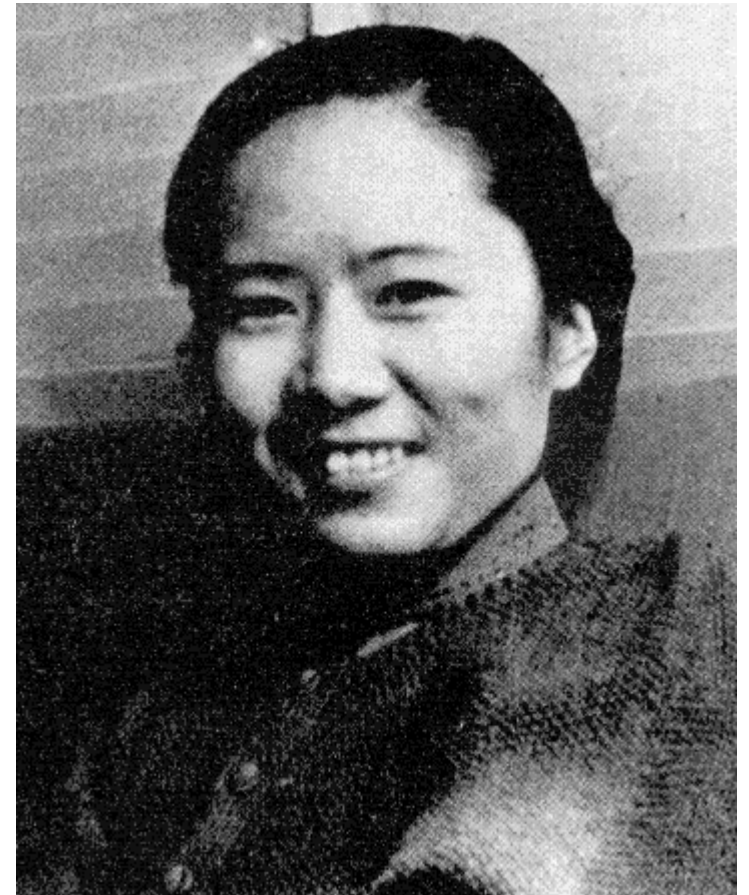


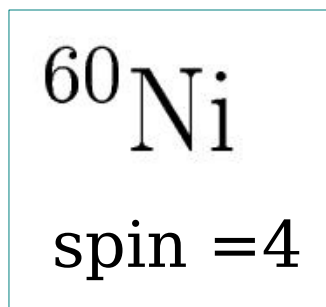
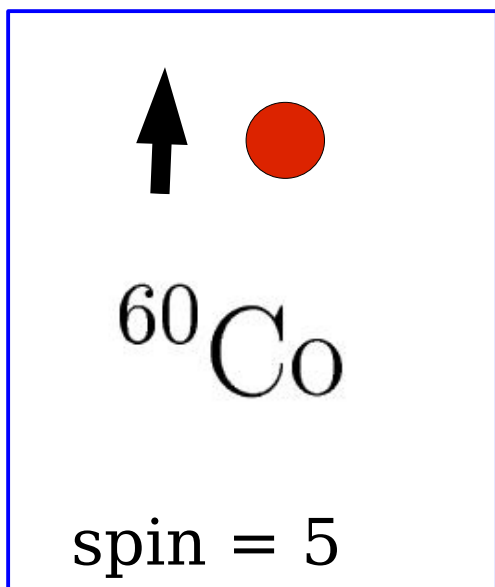
DISCOVERY of PARITY VIOLATION

Lee and Yang

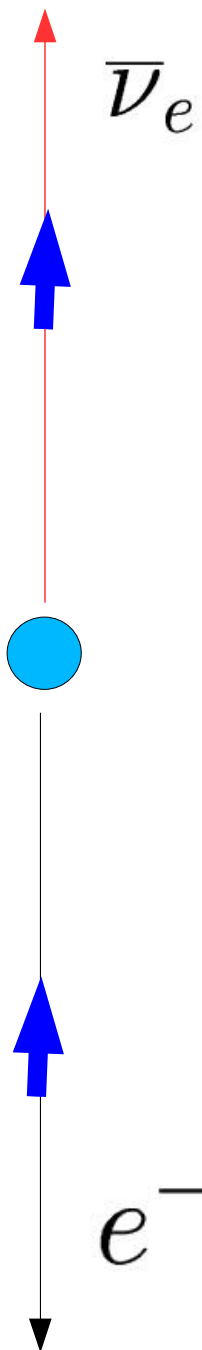


“Madame” Wu

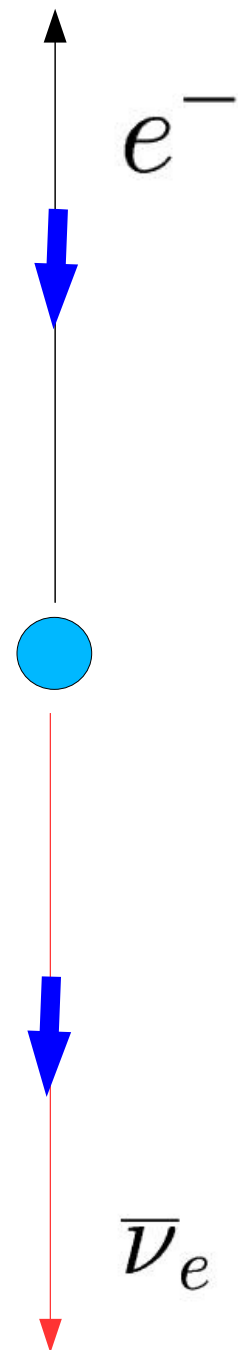


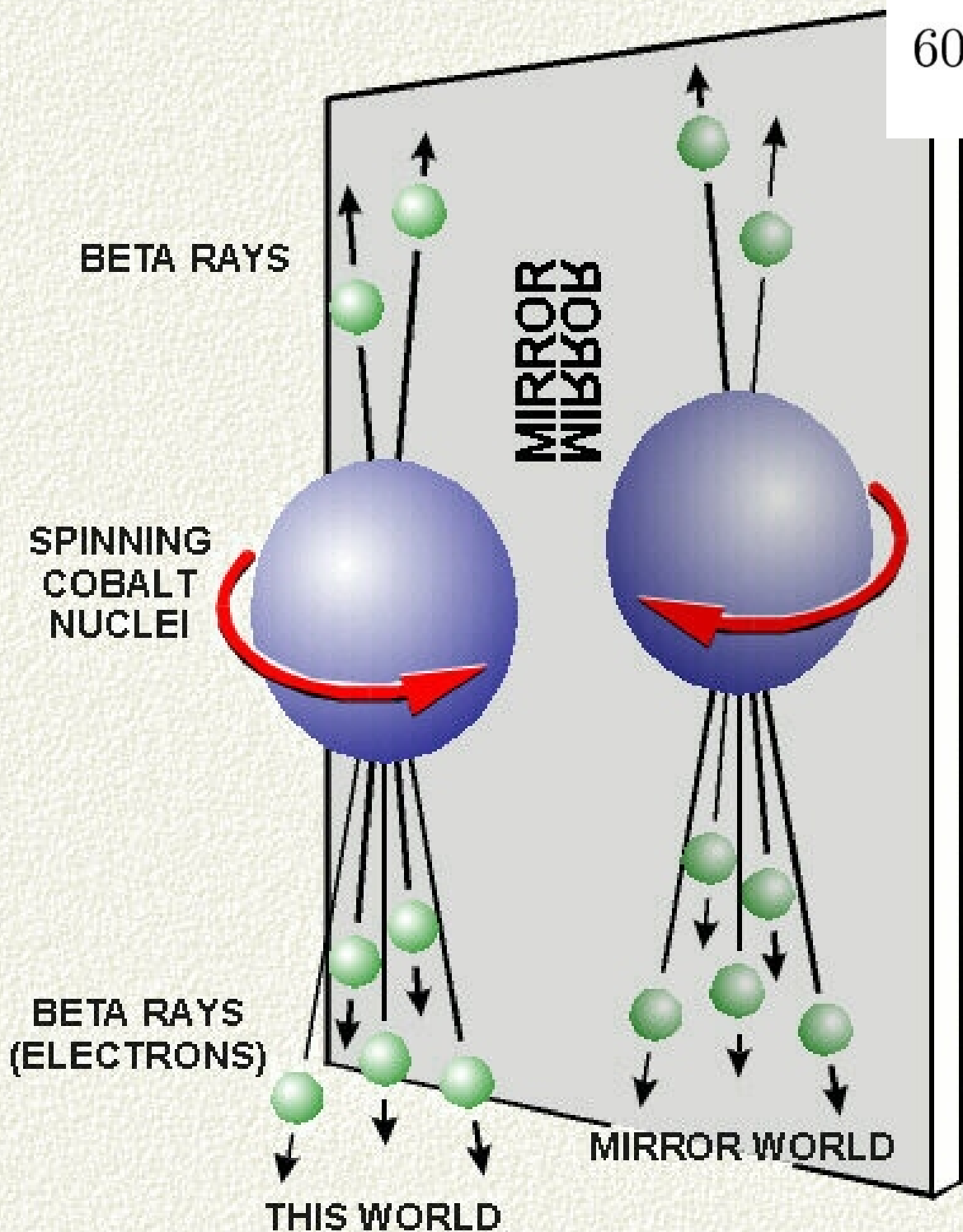


Allowed



Forbidden





The Experiment
(dec. 1956)
lead by:
“Madame”
Chien-Shiung WU

that determined
that
“PARITY”
is VIOLATED



5/10

Madame Wu and the Violation of Parity

Elle Willoughby
2011

Spin $\frac{1}{2}$ Particles are described by
4 components “Dirac Spinors”

Left and Right Chirality Projectors

$$\psi_L = \left(\frac{1 - \gamma_5}{2} \right) \psi$$
$$\psi_R = \left(\frac{1 + \gamma_5}{2} \right) \psi$$

Only the
Left-Chirality
component of a fermion
interacts with the W bosons.

For a massless particle
CHIRALITY = HELICITY

$$e^-, \quad \mu^-, \quad \tau^-$$

$$\nu_e, \quad \nu_\mu, \quad \nu_\tau$$

$$u, \quad d, \quad s, \quad c, \quad b, \quad t$$

Particles: Left-chirality

$$P_{\text{Left}} = 1 - \frac{m^2}{E^2}$$

$$P_{\text{Right}} = \frac{m^2}{E^2}$$

$$e^+, \quad \mu^+, \quad \tau^+$$

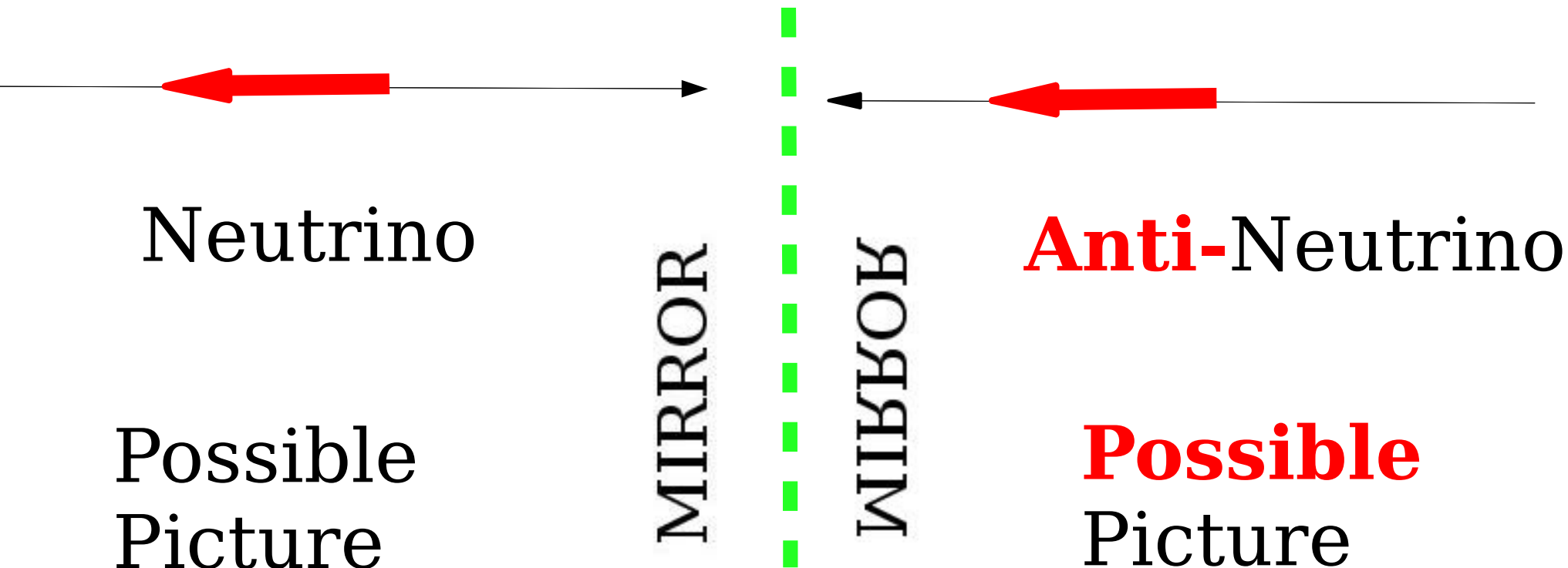
$$\bar{\nu}_e, \quad \bar{\nu}_\mu, \quad \bar{\nu}_\tau$$

$$\bar{u}, \quad \bar{d}, \quad \bar{s}, \quad \bar{c}, \quad \bar{b}, \quad \bar{t}$$

Anti-Particles: Right-chirality

$$P_{\text{Left}} = \frac{m^2}{E^2}$$

$$P_{\text{Right}} = 1 - \frac{m^2}{E^2}$$



Charge Conjugation Operation

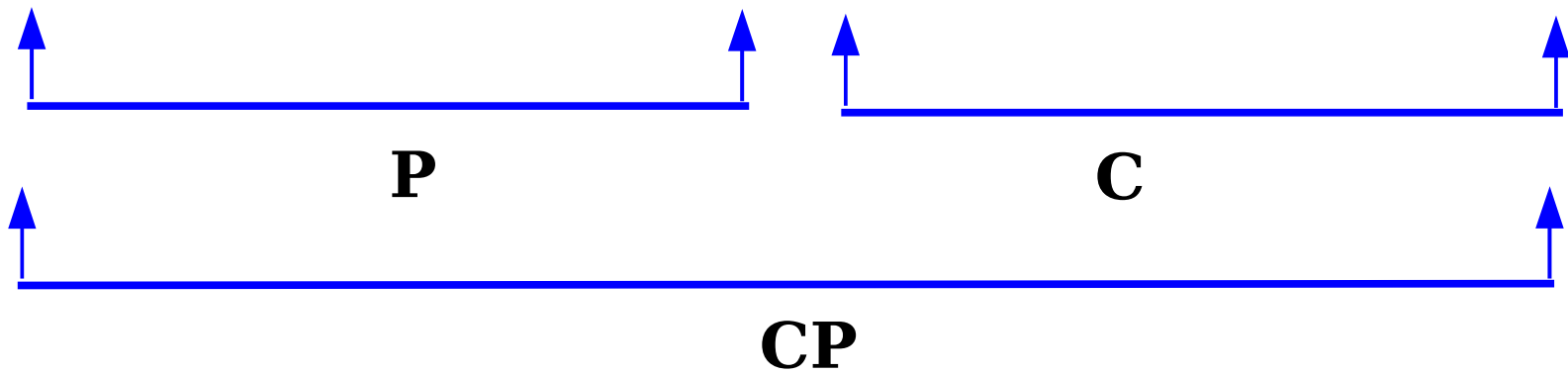
APPROXIMATE SYMMETRY of NATURE

CP Transformation

C = Coniugazione di carica
[Particella $\leftrightarrow$ Anti-Particella]

P = Parity
[Riflessione in uno specchio]

Paul M. Dirac



Particella di Dirac

$$\begin{array}{cc} e_{\text{L}}^- & e_{\text{R}}^- \\ e_{\text{L}}^+ & e_{\text{R}}^+ \end{array}$$

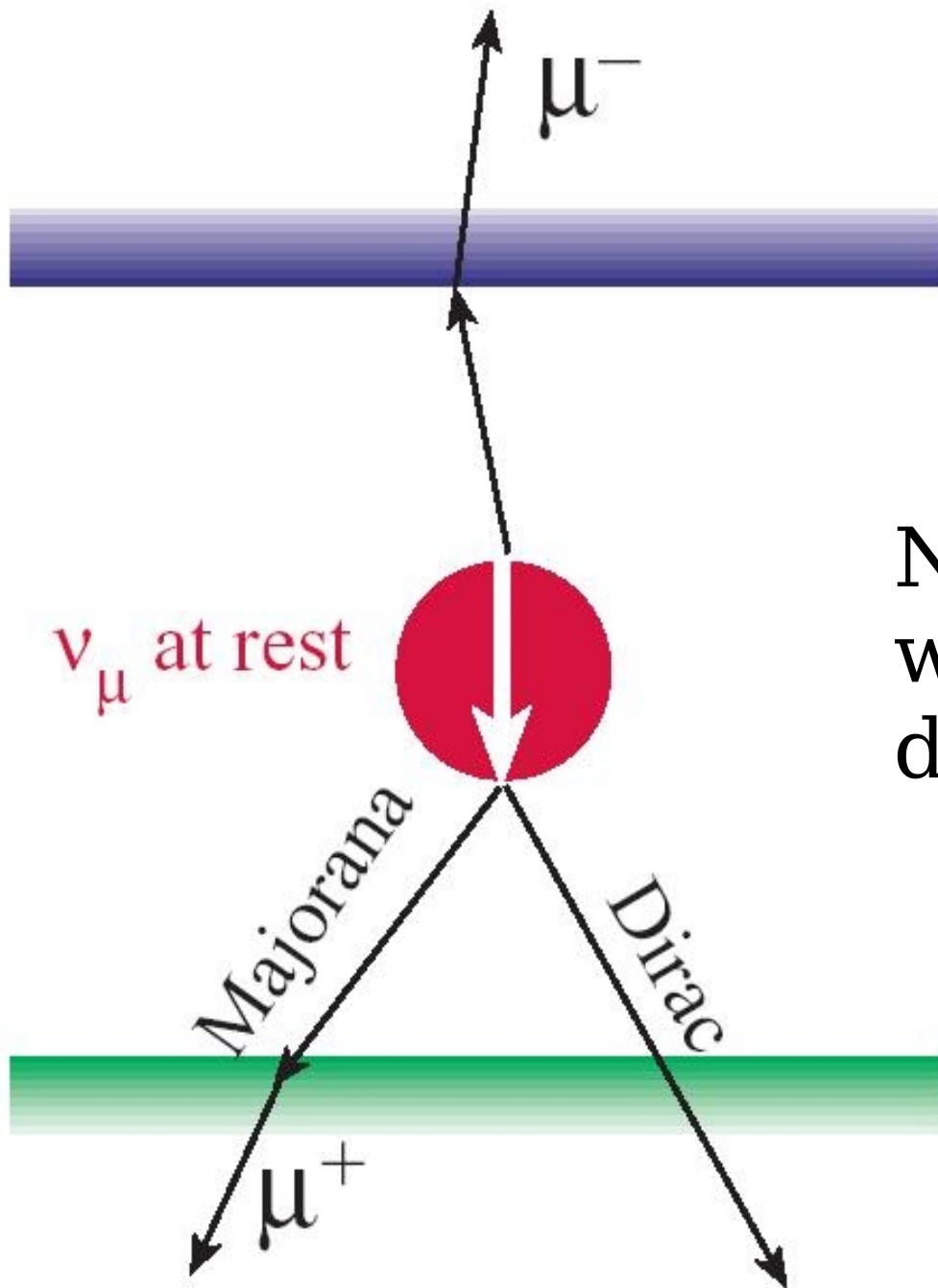
$$\begin{array}{cc} \nu_{\text{L}} & \nu_{\text{R}} \\ \bar{\nu}_{\text{L}} & \bar{\nu}_{\text{R}} \end{array}$$

Particella di Majorana

$$\begin{array}{cc} \nu_{\text{L}} & \\ & \bar{\nu}_{\text{R}} \end{array}$$

Gedanken Experiment

Neutrino at Rest
with spin pointing
downward.



1. L'ipotesi del neutrino di Pauli
2. La Teoria di Fermi
3. “Attraverso lo Specchio”
4. Il Sole e i neutrini

Quante sono le possibili forme degli atomi?
(per Democrito e altri antichi atomisti un numero grandissimo)

Lettera di Epicuro

*Gli atomi [...] variano indefinitamente nelle loro forme,
Perché la così grande
varietà delle cose che possiamo vedere non potrebbe
nascere dalla ricorrenza di un numero definito delle stesse
forme; ma la varietà delle forme sebbene indefinitamente
grande, non è assolutamente infinita.*

Idea che pochi “mattoni fondamentali”
Possono “formare tutte le cose”

Lucrezio nel “De Rerum Naturae”
utilizza più volte una analogia tra lettere e atomi:

*Le lettere sono comuni a molte parole,
che distano tra loro, e per significato e per modulazione di suono.
Tanto è il potere delle lettere, solo che se ne muti l'ordine.
I principi primi delle cose sono in grado di apportare
ancora più varietà perché possono creare tutte le cose.*

Tutta la Materia Ordinaria

e' composta dalla combinazione di tre particelle:

Elettrone $Q = -1$

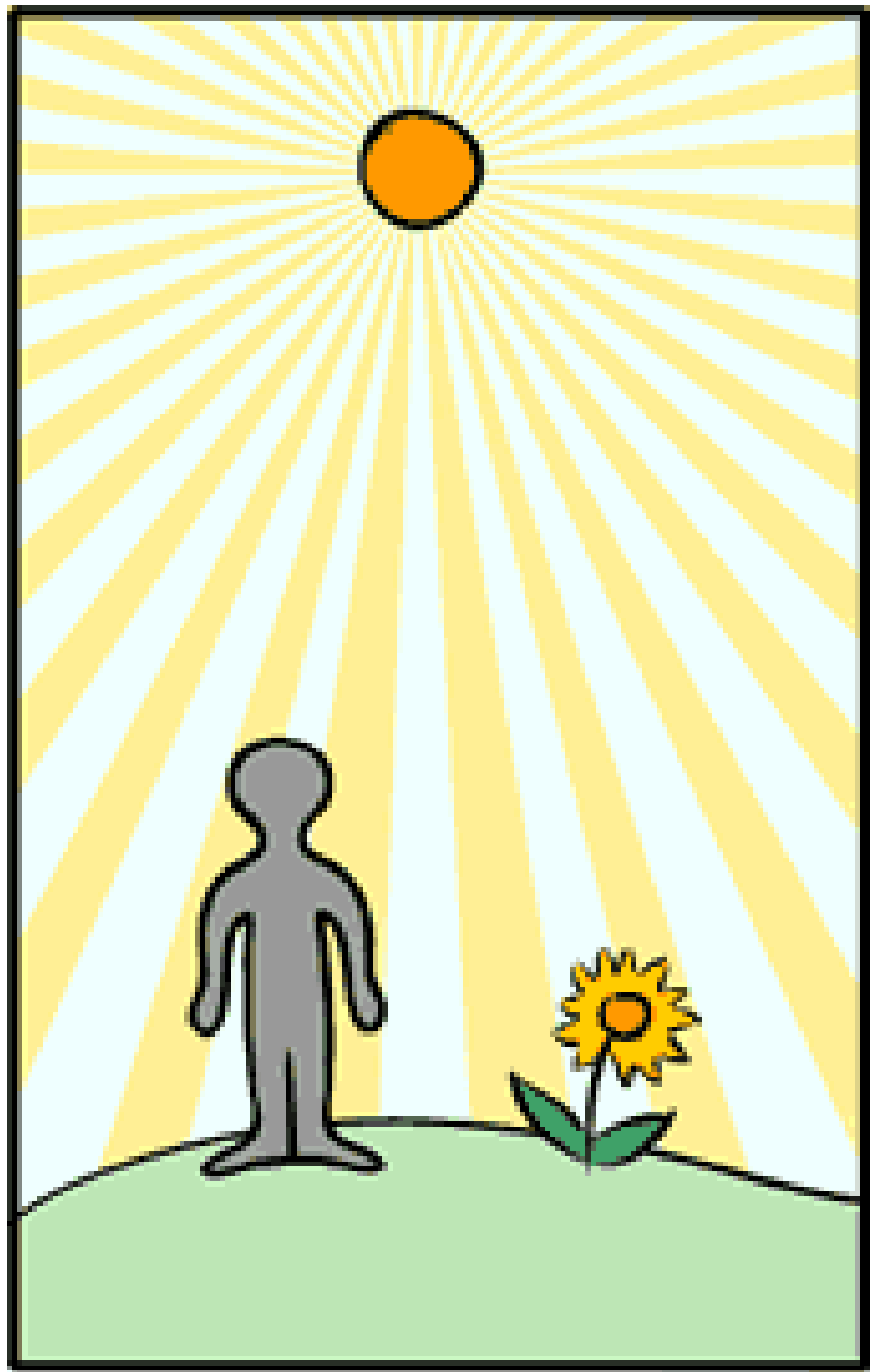
Up-Quark $Q = +2/3$

Down Quark $Q = -1/3$

La Quarta particella fondamentale, il Neutrino

Non “forma” stati stabilmente legati conosciuti

Quale è la
sorgente di
ENERGIA
del Sole
e delle stelle ?



La scoperta della:

“PROFONDITA' del TEMPO”

La nostra vita: 100 anni

La “Storia”: alcune migliaia di anni

[Le genealogie della Bibbia: 4400 anni ...]

La scienza contemporanea:

La Terra ha 4 MILIARDI di anni (!)

La scoperta della:

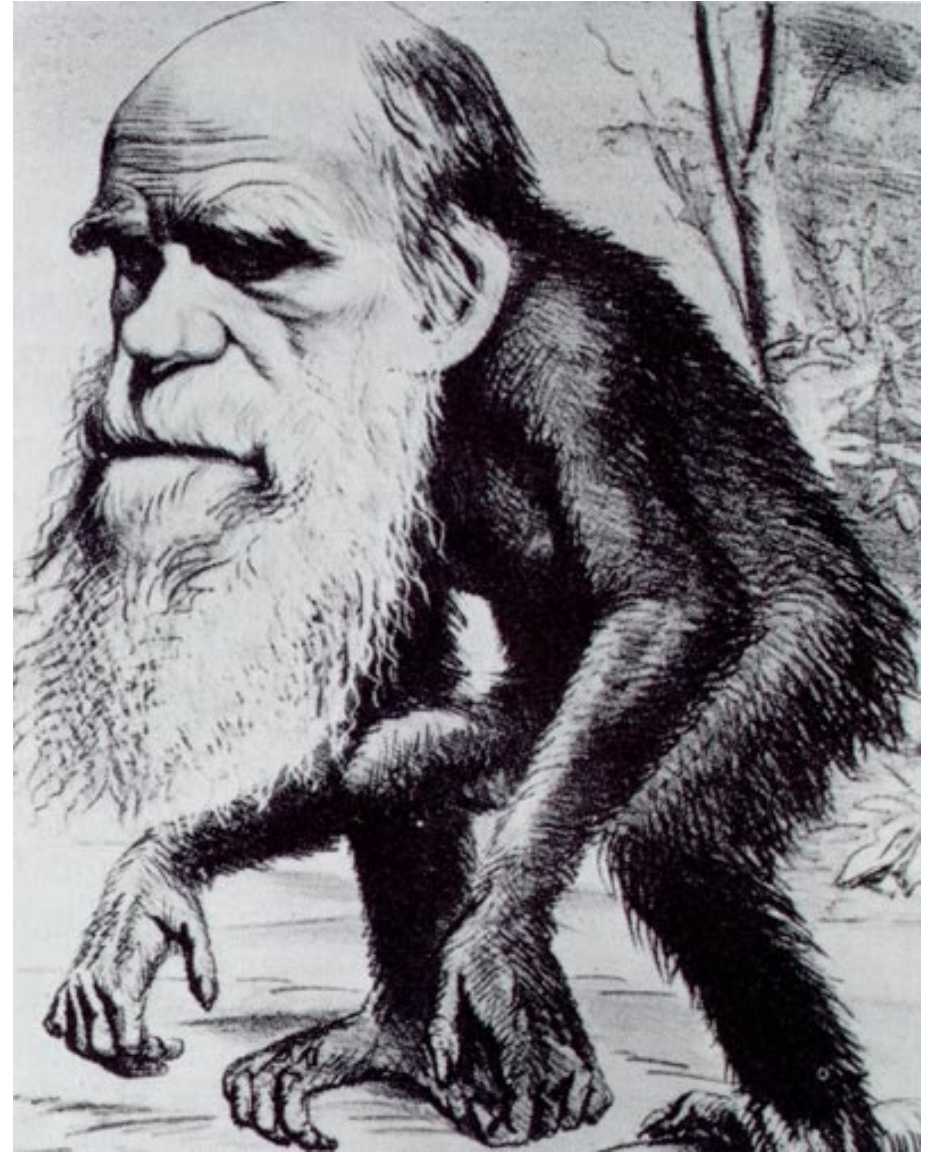
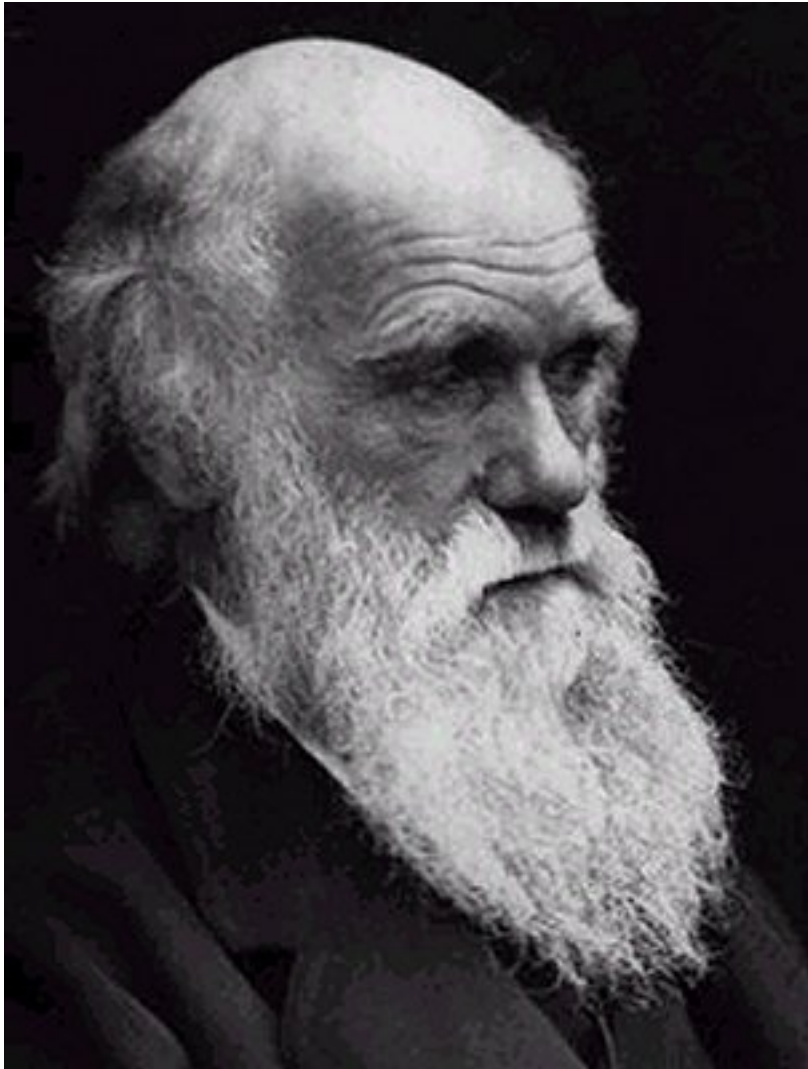
“PROFONDITA' del TEMPO”

Una scoperta fatta dai GEOLOGI

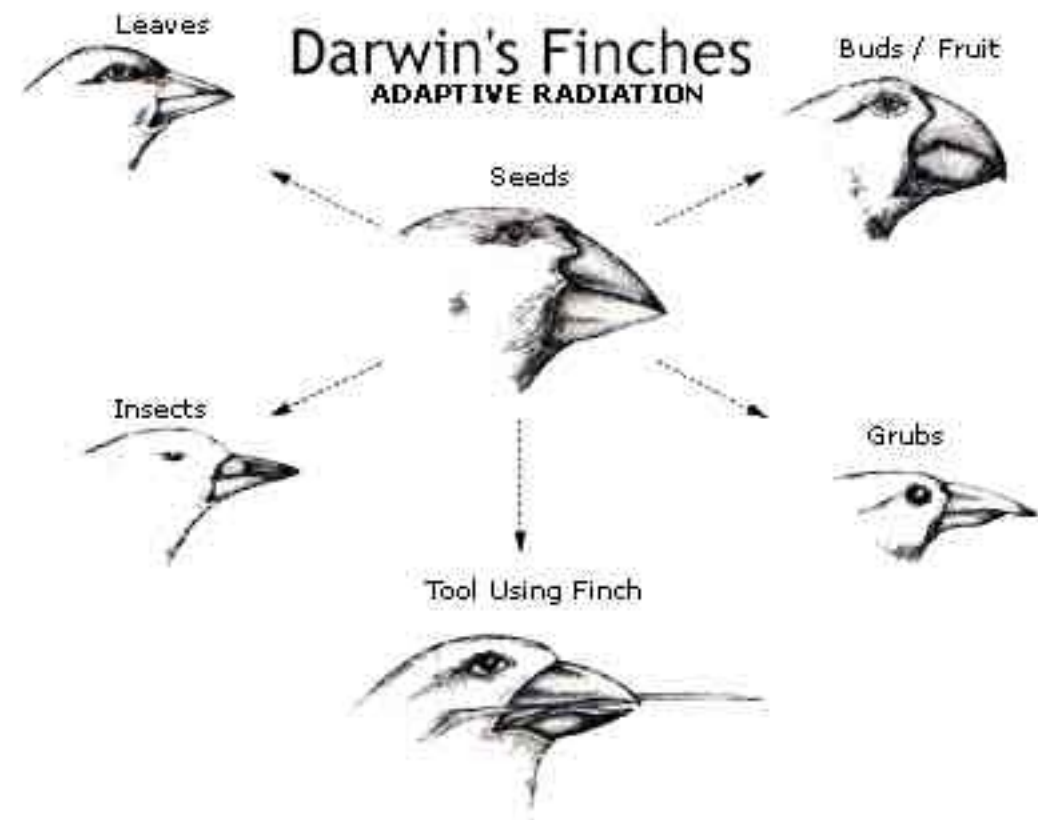
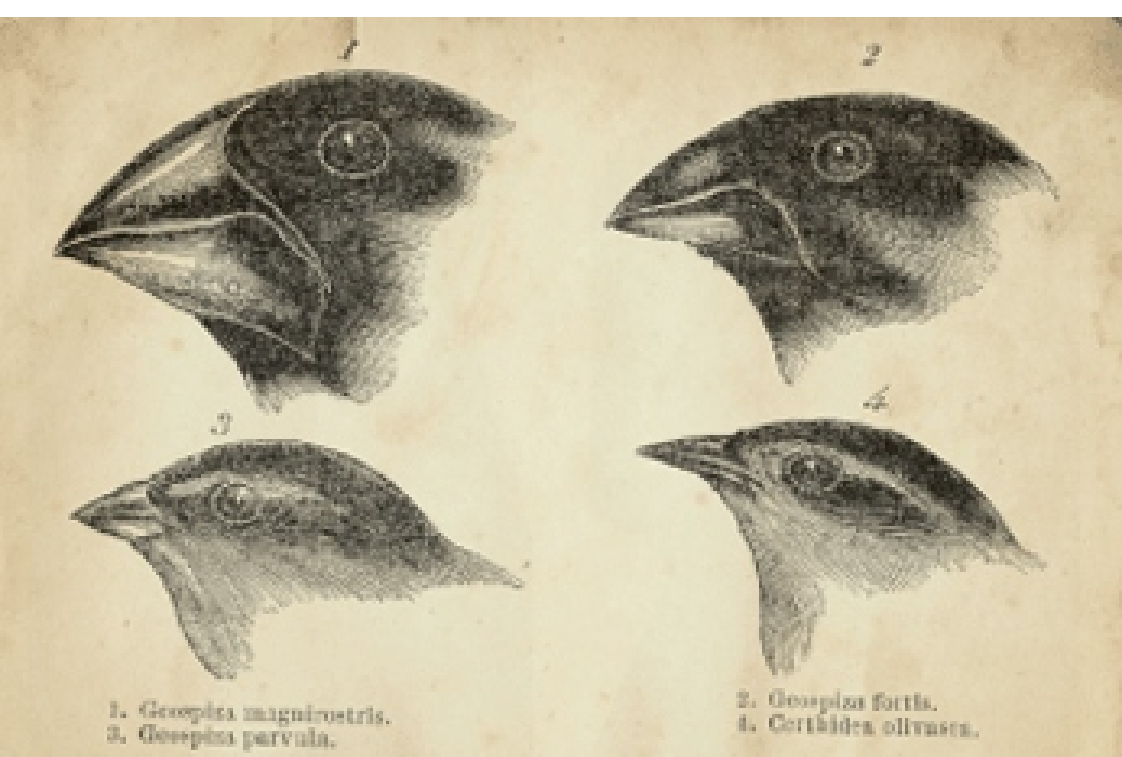
E da un grande biologo Charles DARWIN.



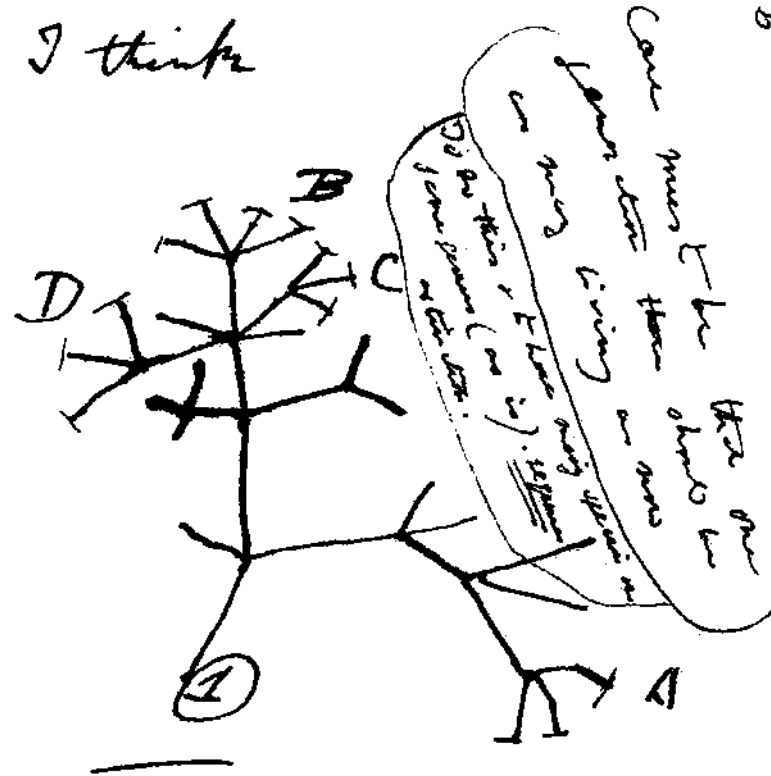
Charles Darwin



La teoria dell'evoluzione



I think



Then between A & B. various
 sort of relation. C & B. The
 first gradation, B & D
 rather greater distinction
 Then genus would be
 formed. - binary relation

La teoria dell'Evoluzione

Quanto tempo
e' necessario
per l'evoluzione
delle specie ?

.....

Centinaia di
Milioni di anni...



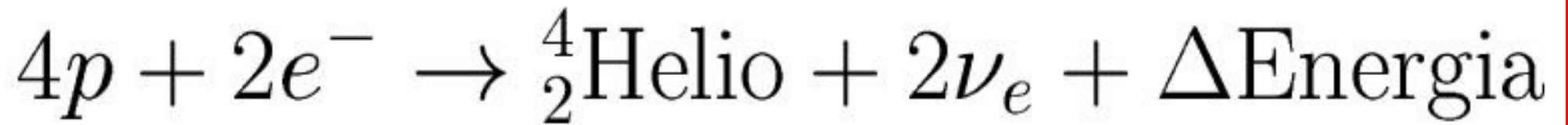
Da quanto tempo splende il SOLE ?

I Geologi, Darwin ed I biologi:
... da centinaia di milioni di anni

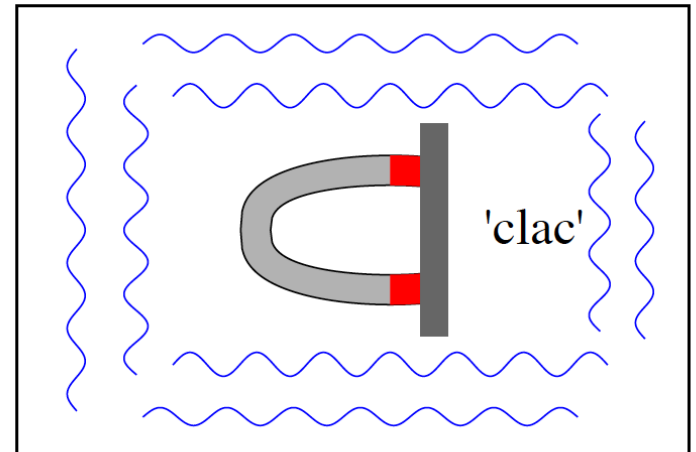
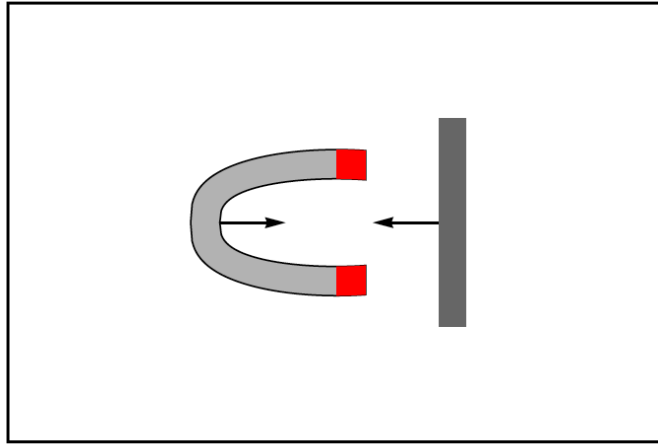
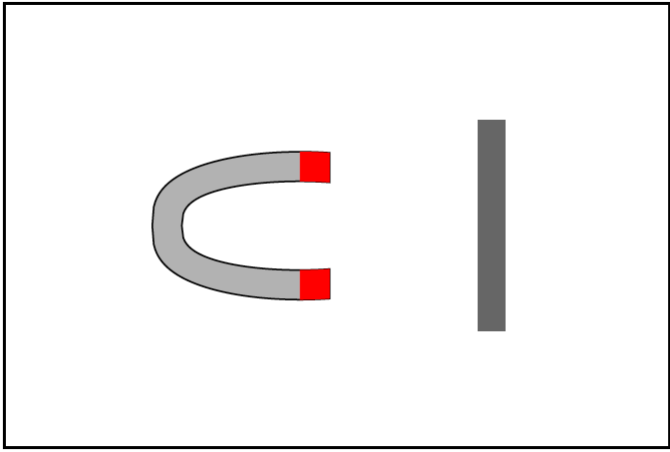
I Fisici (del 1800):
Impossibile !
Non esiste una sorgente di energia così grande

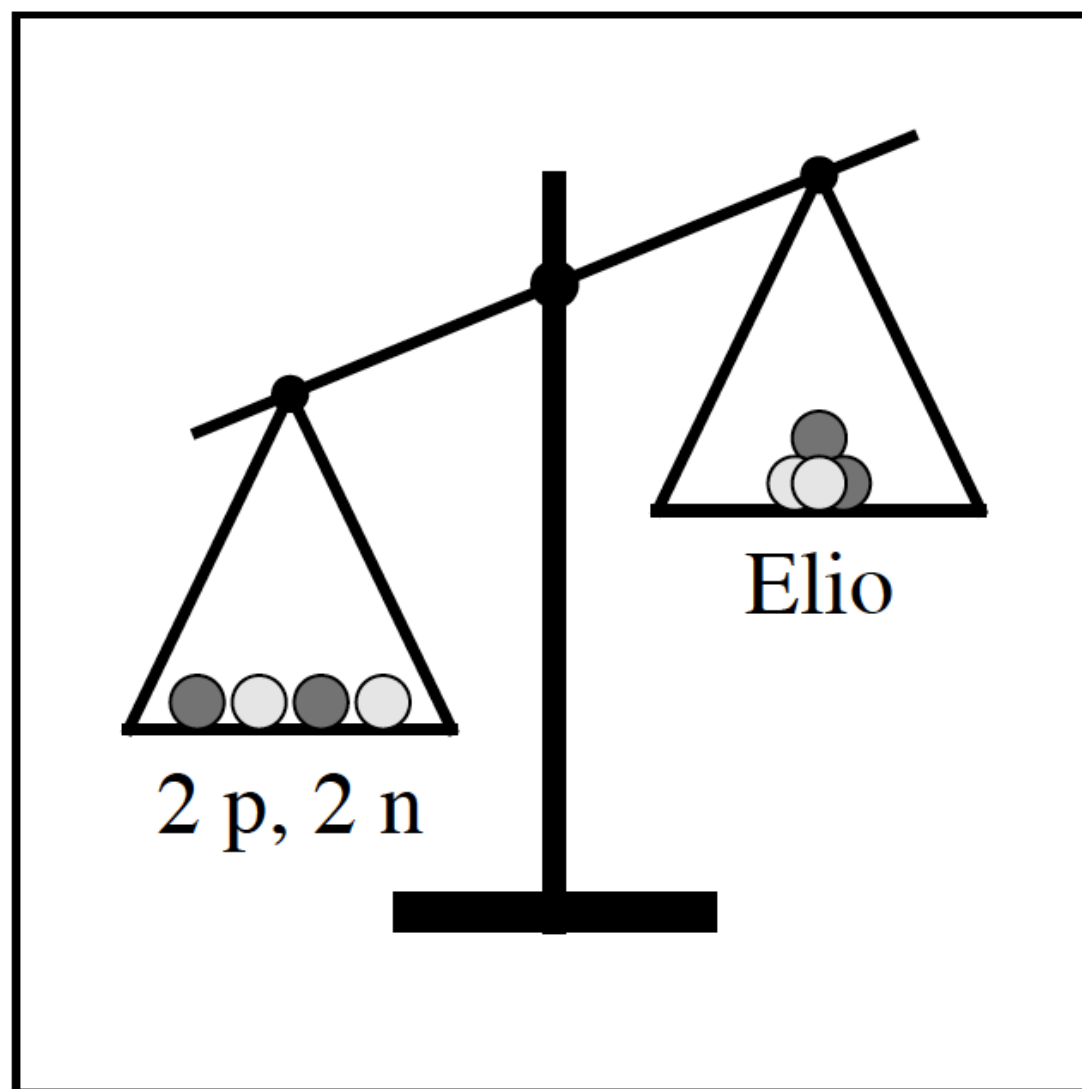
Qualche decina di migliaia di anni
Un milione di anni al massimo
(calore generato dalla formazione)

FUSIONE NUCLEARE

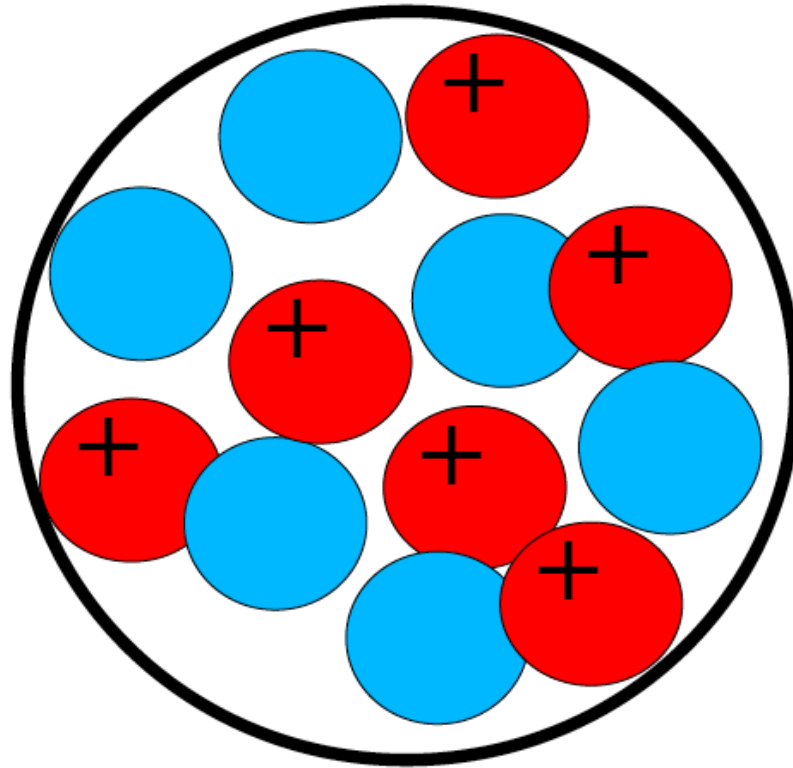


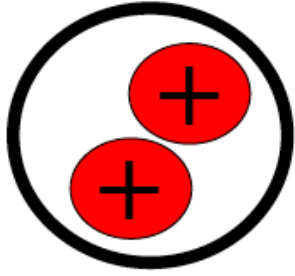
$$\Delta E = (4M_p + 2M_e - M_{\text{He}} - 2M_{\nu}) c^2 = 26.4 \text{ MeV}$$



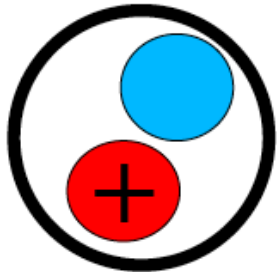
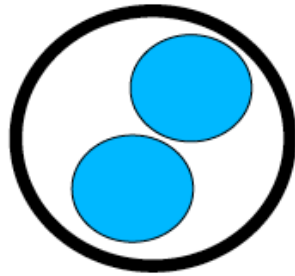


Nuclei: Numero di protoni e Neutroni
Piu' o meno uguale.



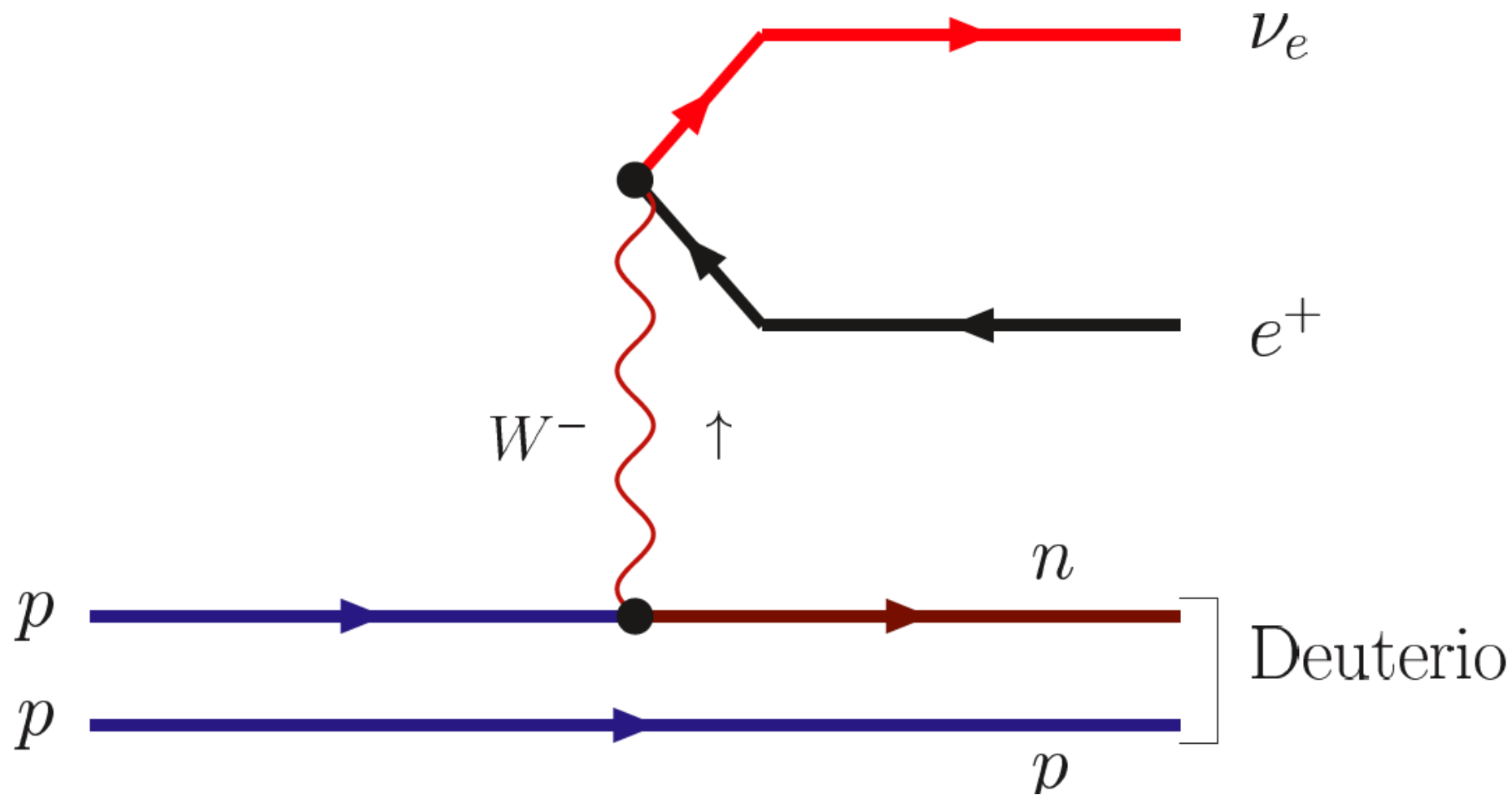


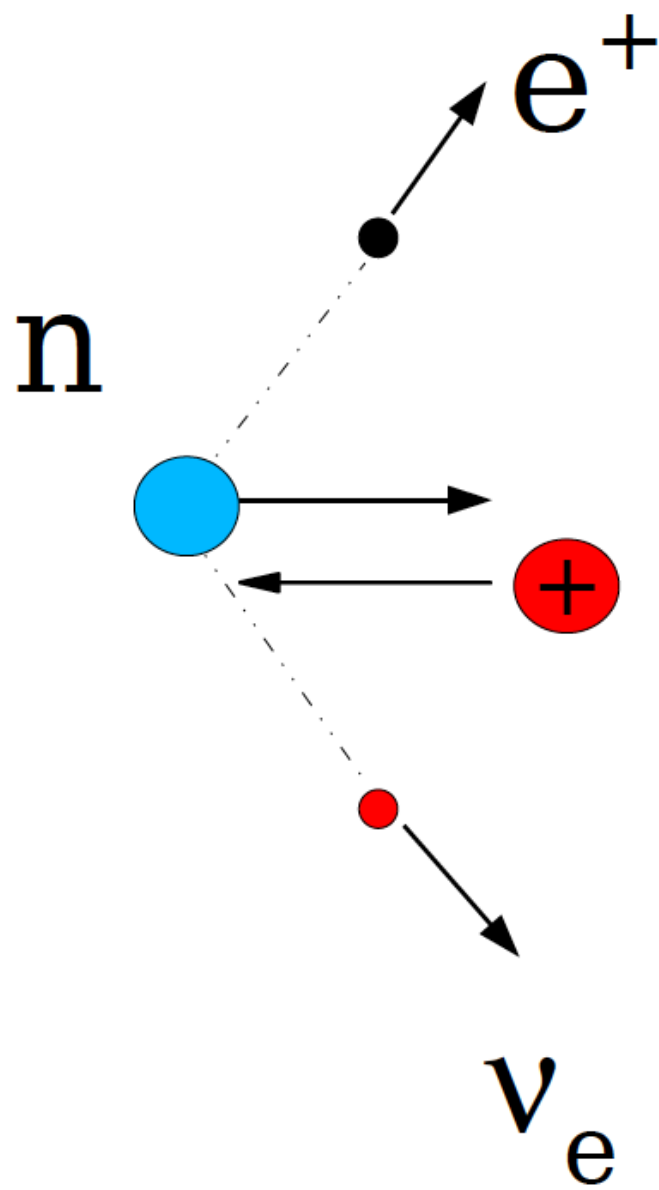
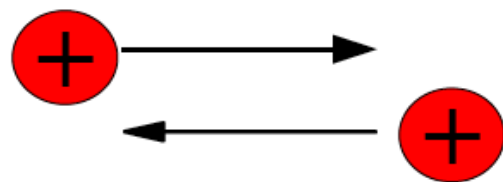
Questi nuclei
NON esistono



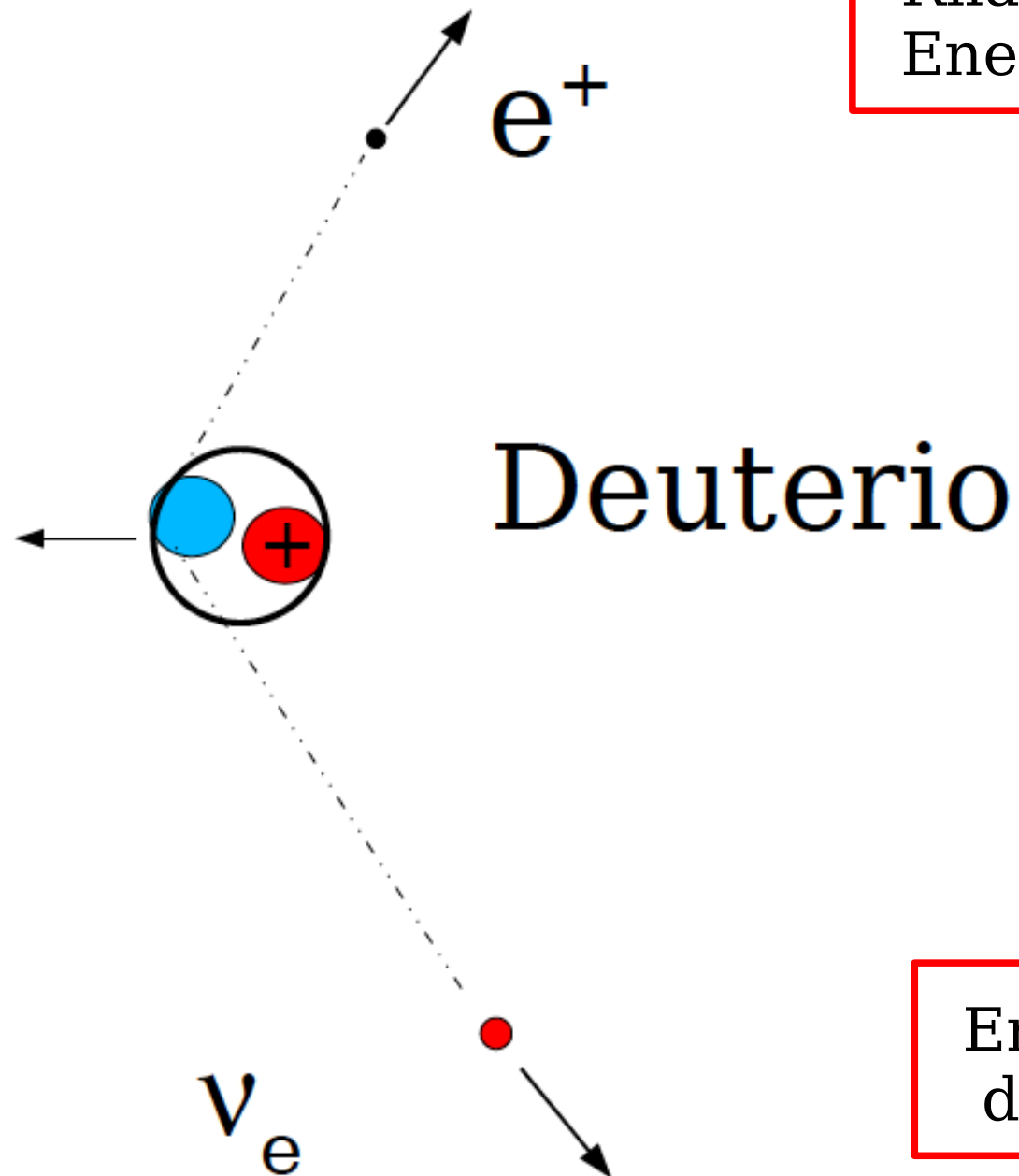
Deuterio

$$p + p \rightarrow \text{Deuterio} + e^+ + \nu_e$$

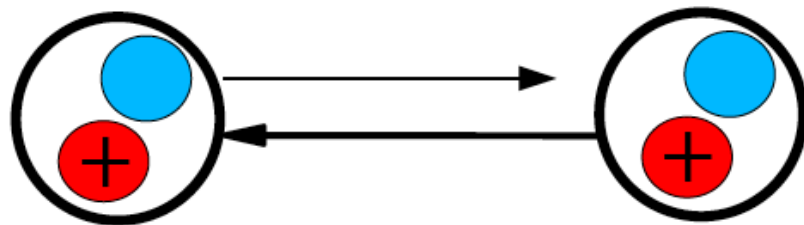
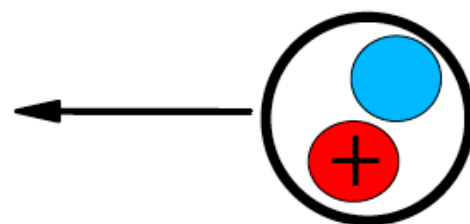
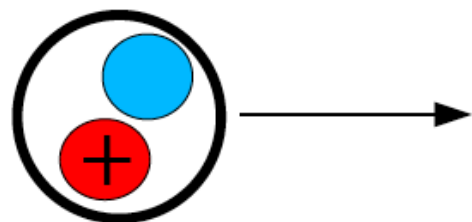
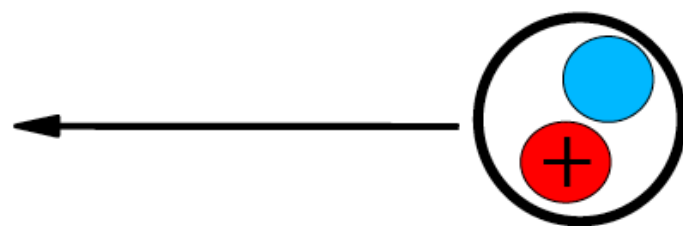
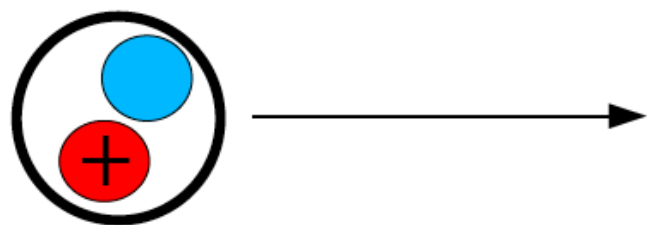


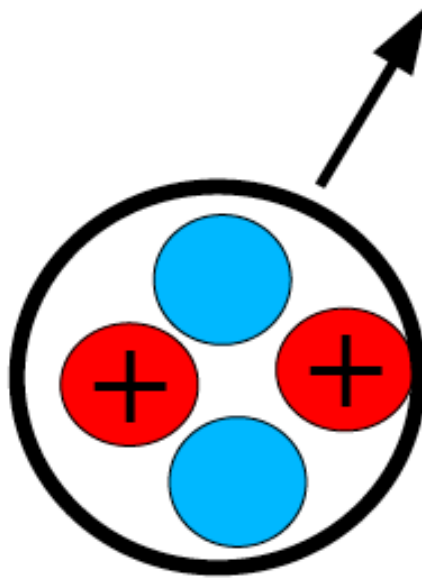


Rilascio di
Energia



Emissione
di un neutrino





Fotone (particella di luce).

Liberazione di energia

$$N_{\nu} = 2 \times \left[\frac{\text{Luminosita del sole}}{\Delta \text{Energia}} \right]$$

$$2 \times 10^{10} \frac{\text{Neutrini}}{\text{cm}^2 \text{ sec}}$$

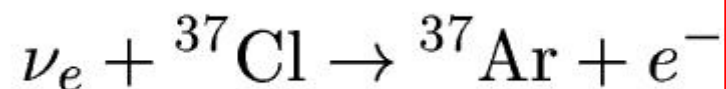
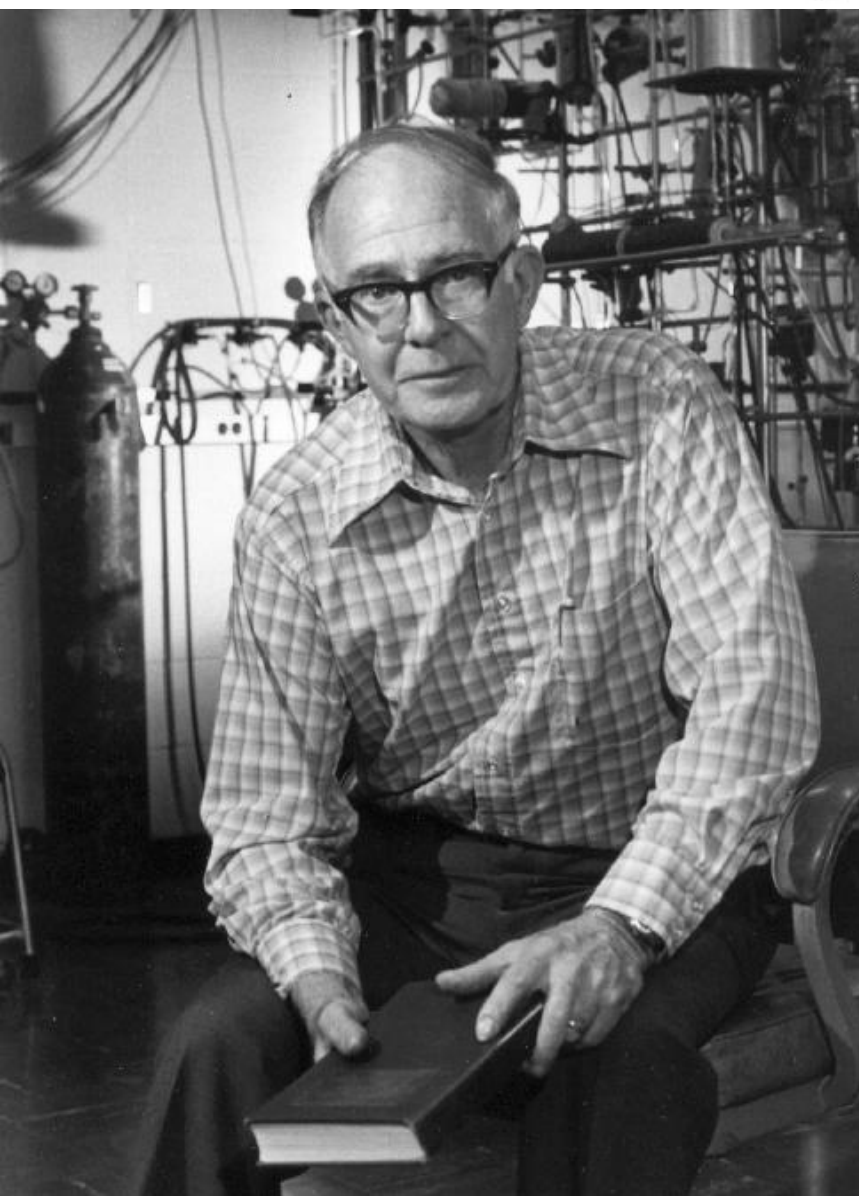
Relazione tra la luminosita' del Sole
E l'emissione di Neutrini !

SOLAR NEUTRINOS. II. EXPERIMENTAL*

Raymond Davis, Jr.

Chemistry Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York

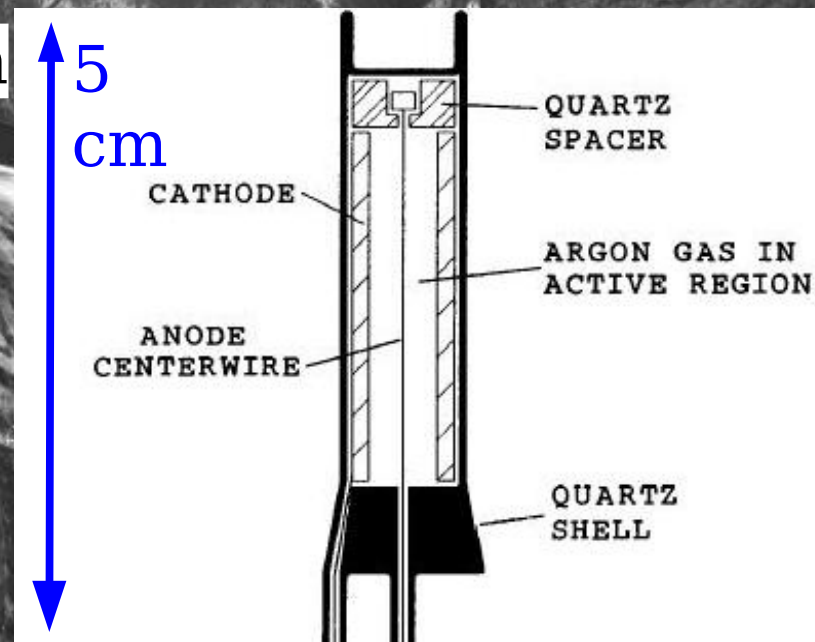
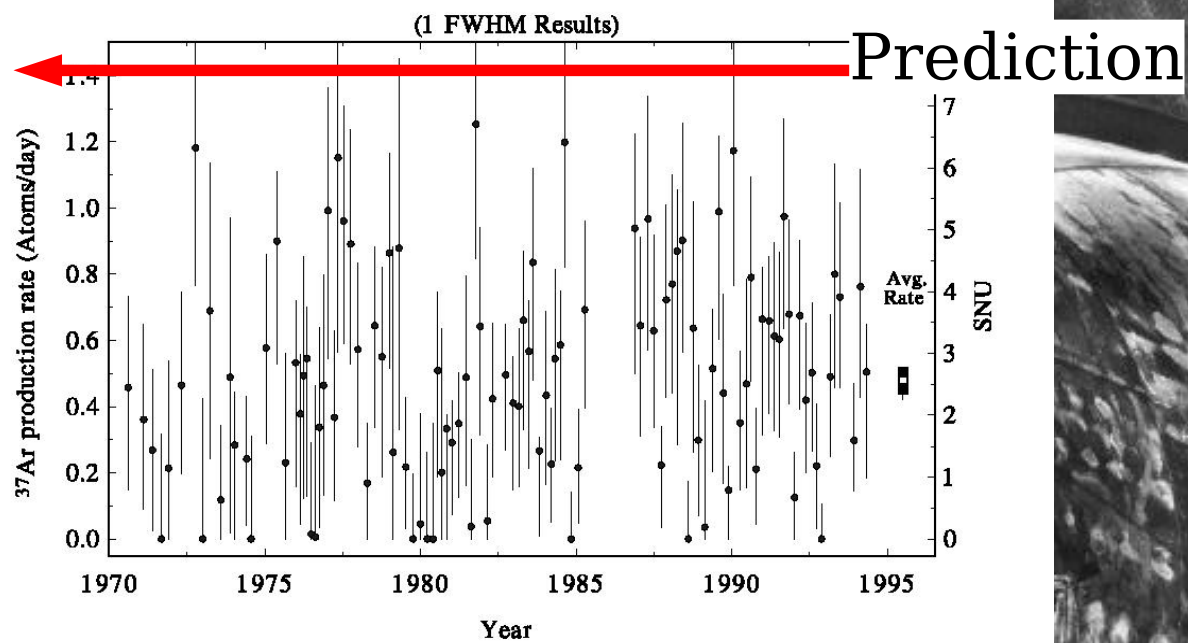
(Received 6 January 1964)



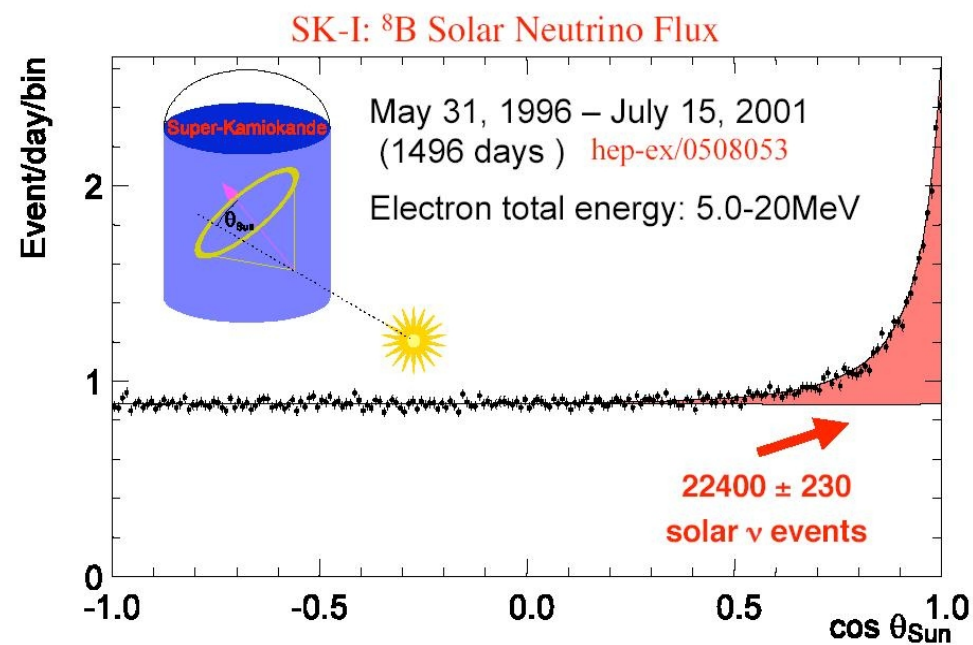
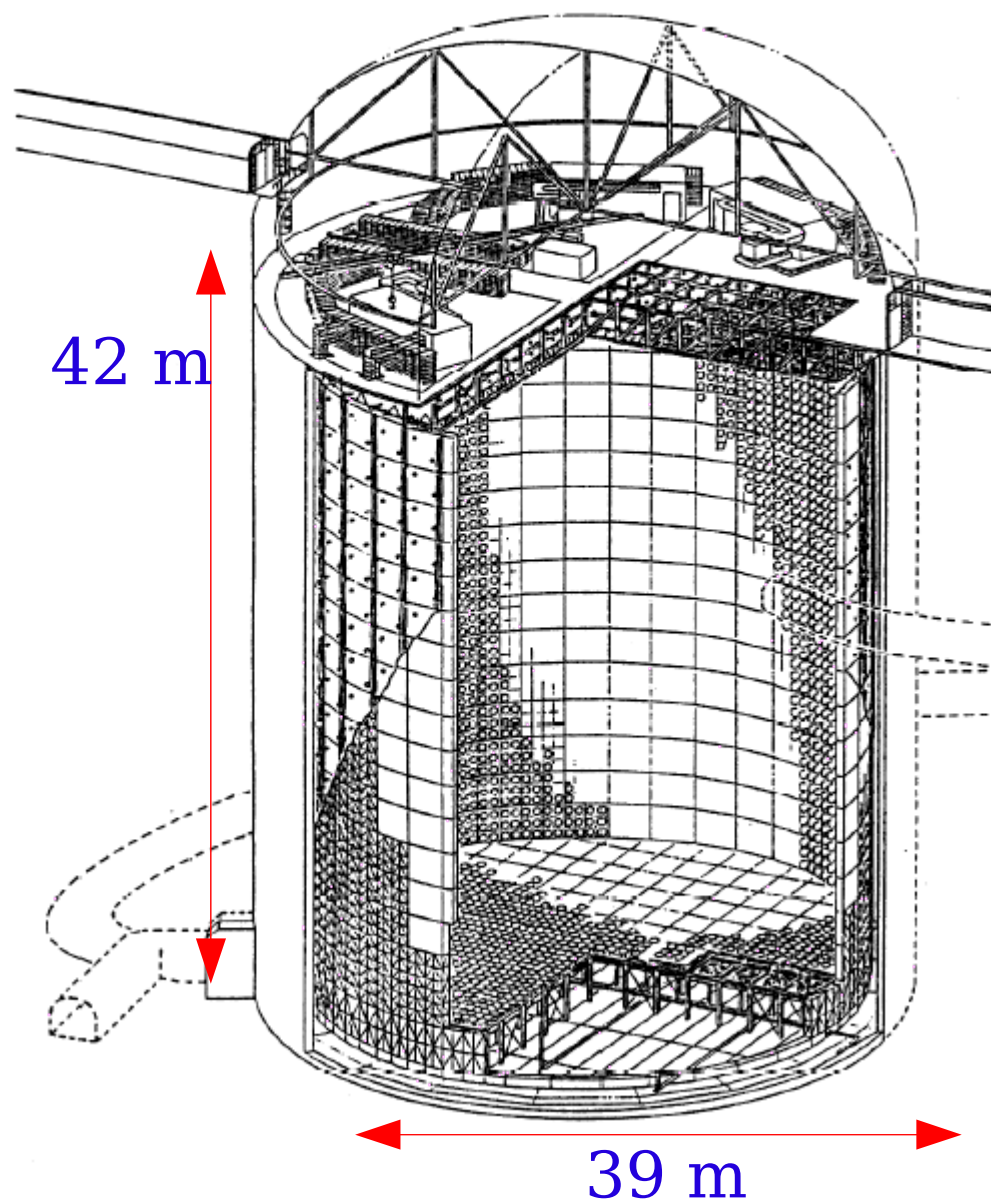
On the other hand, if one wants to measure the solar neutrino flux by this method one must use a much larger amount of C_2Cl_4 , so that the expected ${}^{37}\text{Ar}$ production rate is well above the background of the counter, 0.2 count per day. Using Bahcall's expression,

$$\begin{aligned} \sum \phi_\nu(\text{solar}) \sigma_{\text{abs}} \\ = (4 \pm 2) \times 10^{-35} \text{ sec}^{-1} ({}^{37}\text{Cl atom})^{-1}, \end{aligned}$$

then the expected solar neutrino captures in 100 000 gallons of C_2Cl_4 will be 4 to 11 per day, which is an order of magnitude larger than the counter background.

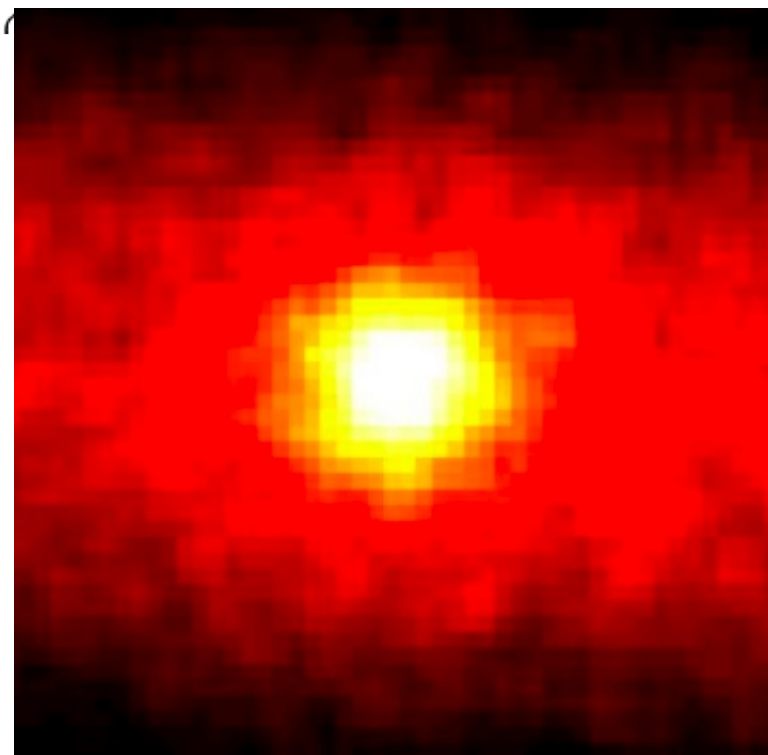


Super Kamiokande



$$\text{DATA/SM} = 0.465 \pm 0.015$$

90 degrees



1. L'ipotesi del neutrino di Pauli
2. La Teoria di Fermi
3. “Attraverso lo Specchio”
4. Il Sole e i neutrini
5. Tre “sapori” di neutrini

Tre “sapori” di Neutrino

ν_e ν_μ ν_τ

Tre “sapori” di Neutrino

$$\nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau$$

$$\bar{\nu}_e \quad \bar{\nu}_\mu \quad \bar{\nu}_\tau$$

Le tre “Generazioni” di Fermioni (particelle di spin=1/2)

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
	I	II	III
	The Generations of Matter		

3 GENERATIONS
of elementary
fermions

First Generation:
Ordinary Matter

Quarks

Leptons

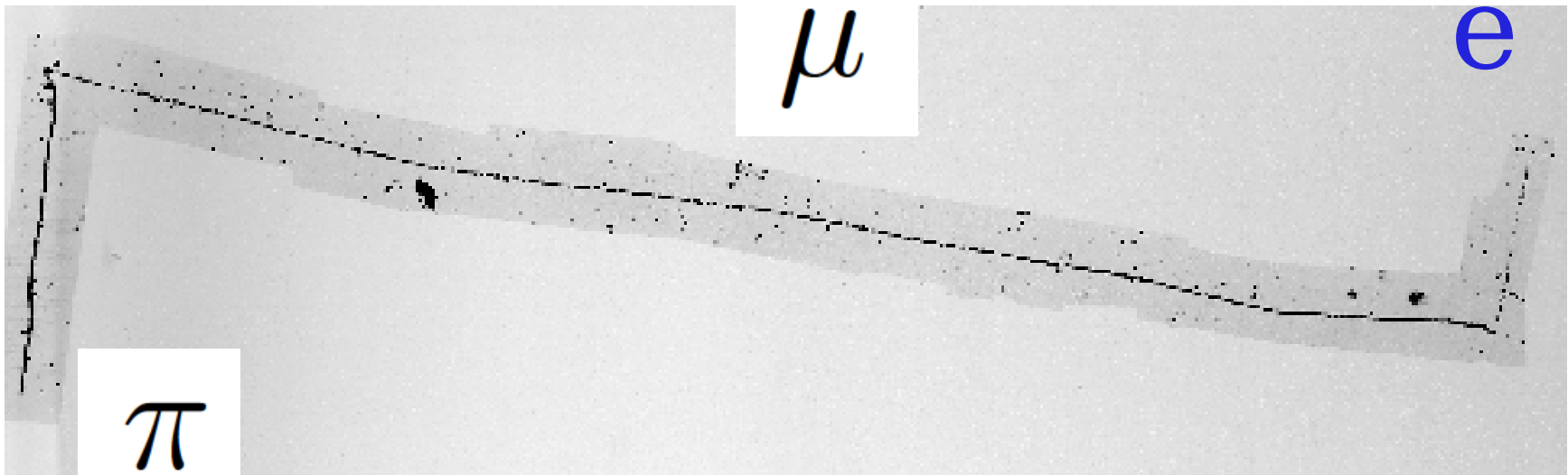
u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom
ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
e electron	μ muon	τ tau

I II III
The Generations of Matter

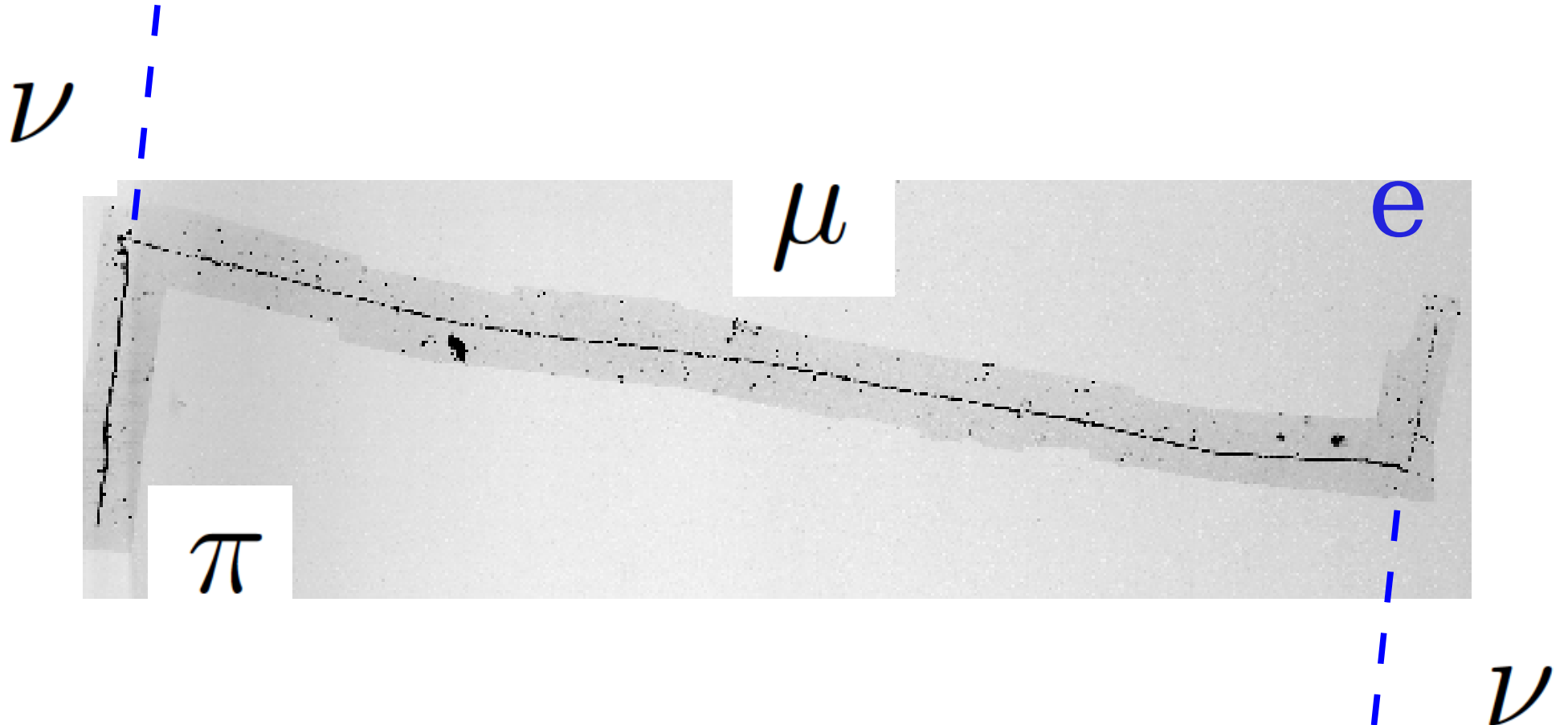
3 GENERATIONS
of elementary
fermions

Who ordered
these ?

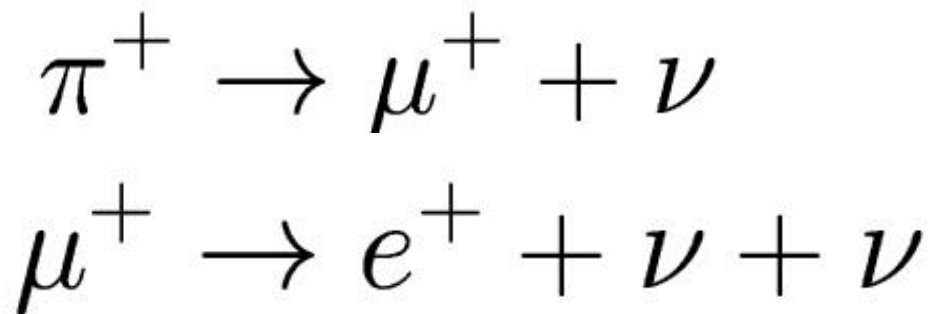
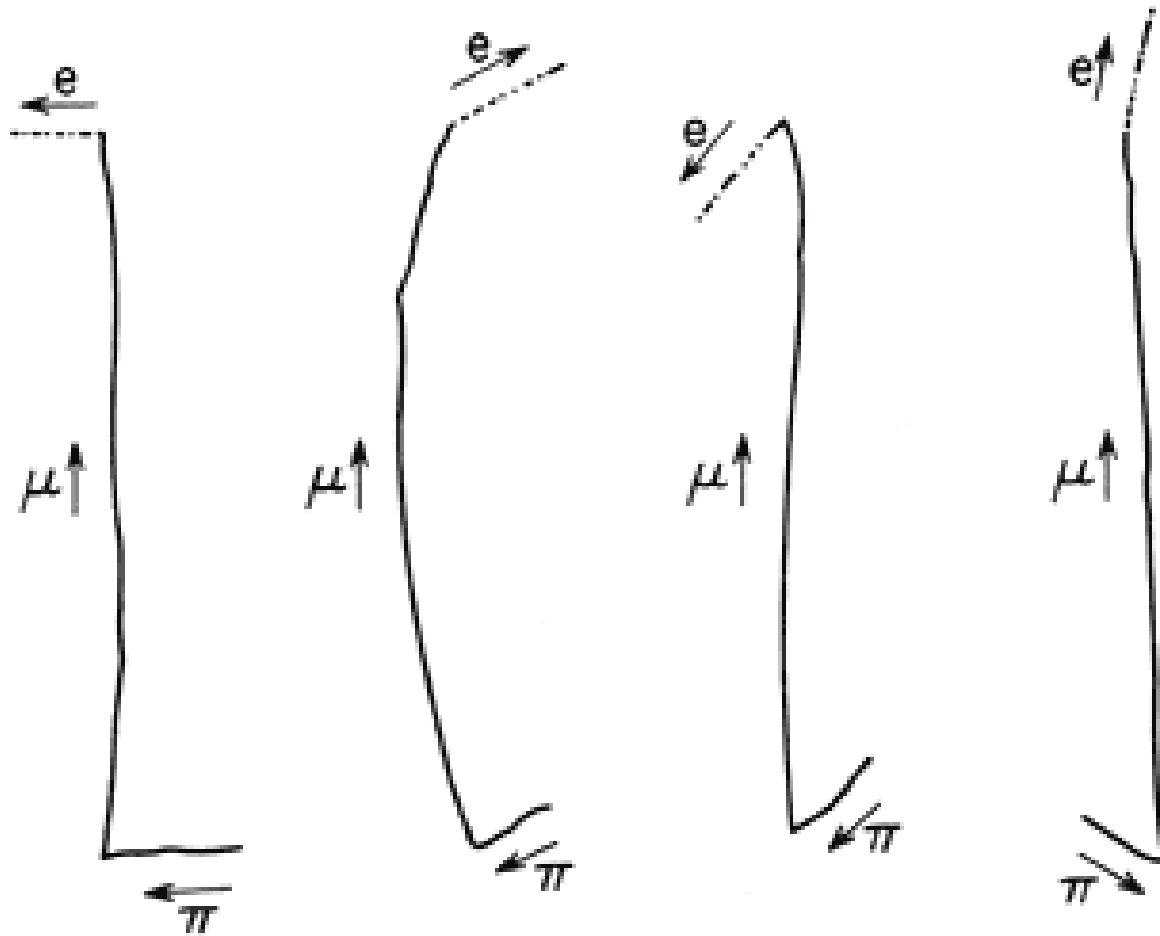
In 1947 Powell, Occhialini and Lattes discover the existence of the pion thanks to observation of Cosmic Rays with Emulsions in the Chacaltaya Laboratory.



In 1947 Powell, Occhialini and Lattes discover the existence of the pion thanks to observation of Cosmic Rays with Emulsions in the Chacaltaya Laboratory.



DISCOVERY of the PION



Pion:
Two body decay
with an invisible
Particle.

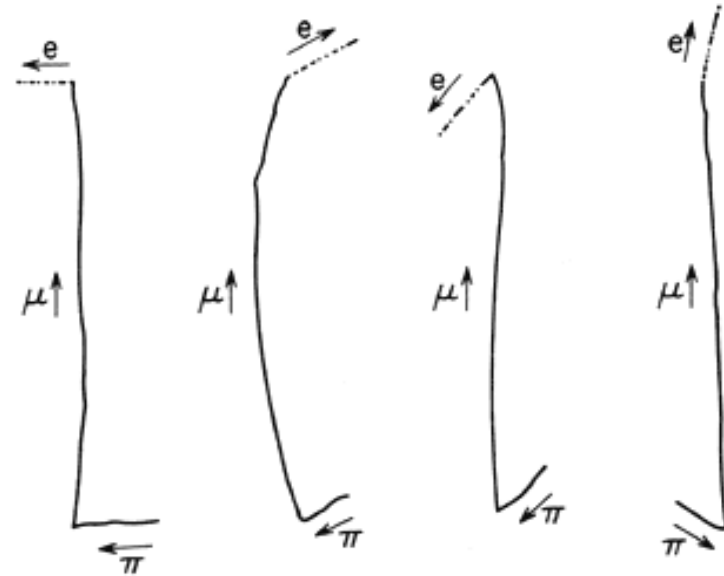
Is this particle
the same one emitted
in beta decays ?

PION DECAY

$$\pi^+ = [\bar{u}d]$$

$$\pi^- = [\bar{d}u]$$

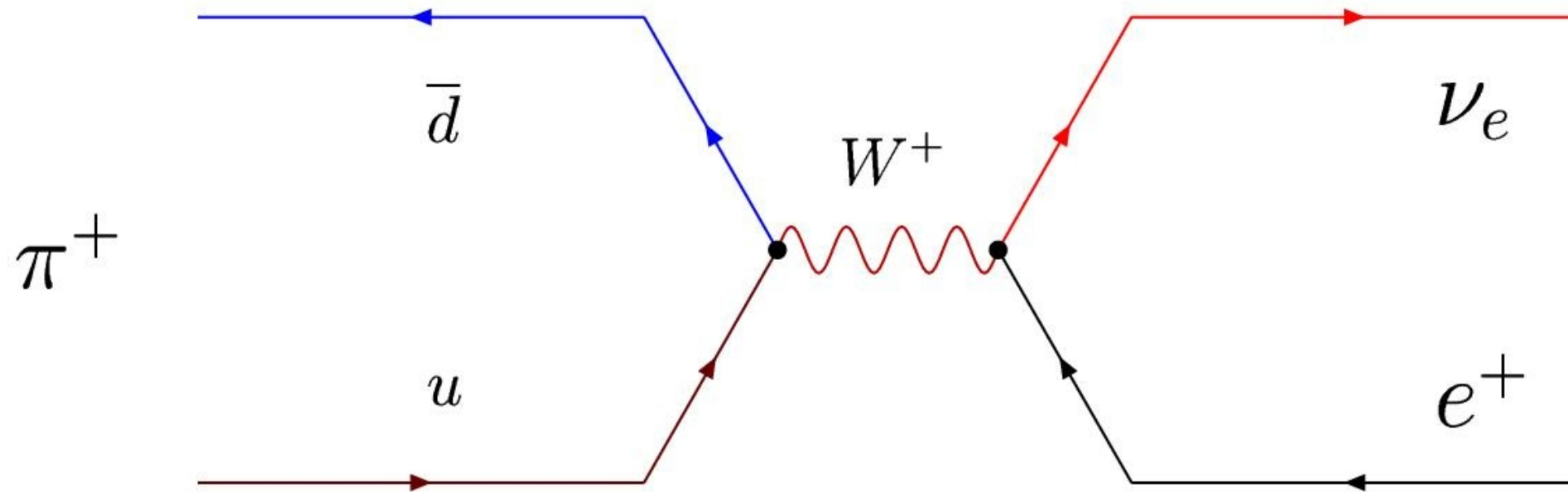
$$\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}[\bar{u}u + \bar{d}d]$$



$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\downarrow$$

$$e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$



$$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$

Dynamically suppressed

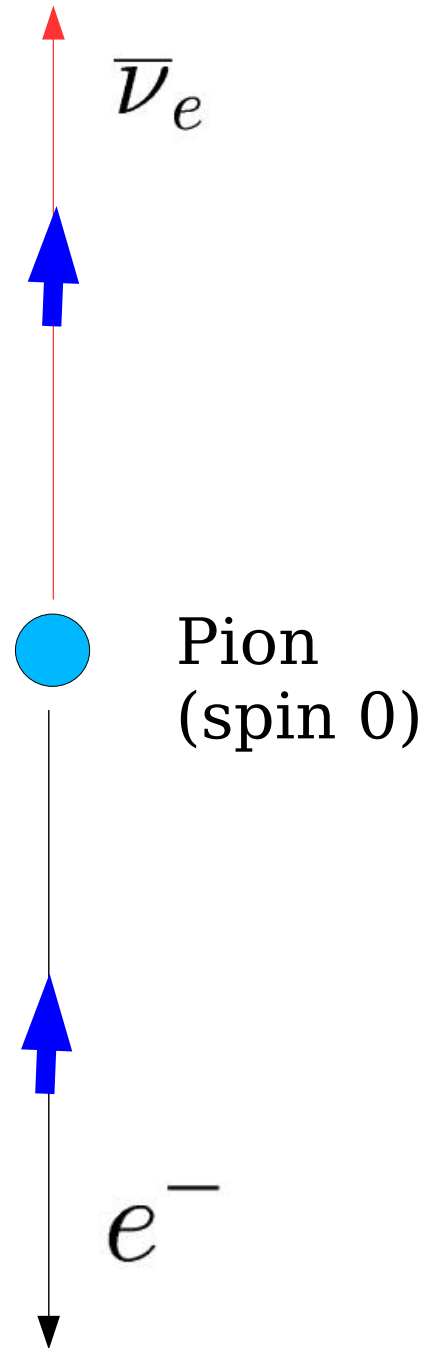
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

$$\pi^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$$

Kinematically Forbidden

Decay is nearly
forbidden by
Angular Momentum
Conservation

CHIRALITY
versus
HELICITY



$$e^-, \quad \mu^-, \quad \tau^-$$

$$\nu_e, \quad \nu_\mu, \quad \nu_\tau$$

$$u, \quad d, \quad s, \quad c, \quad b, \quad t$$

Particles: Left-chirality

$$P_{\text{Left}} = 1 - \frac{m^2}{E^2}$$

$$P_{\text{Right}} = \frac{m^2}{E^2}$$

$$e^+, \quad \mu^+, \quad \tau^+$$

$$\bar{\nu}_e, \quad \bar{\nu}_\mu, \quad \bar{\nu}_\tau$$

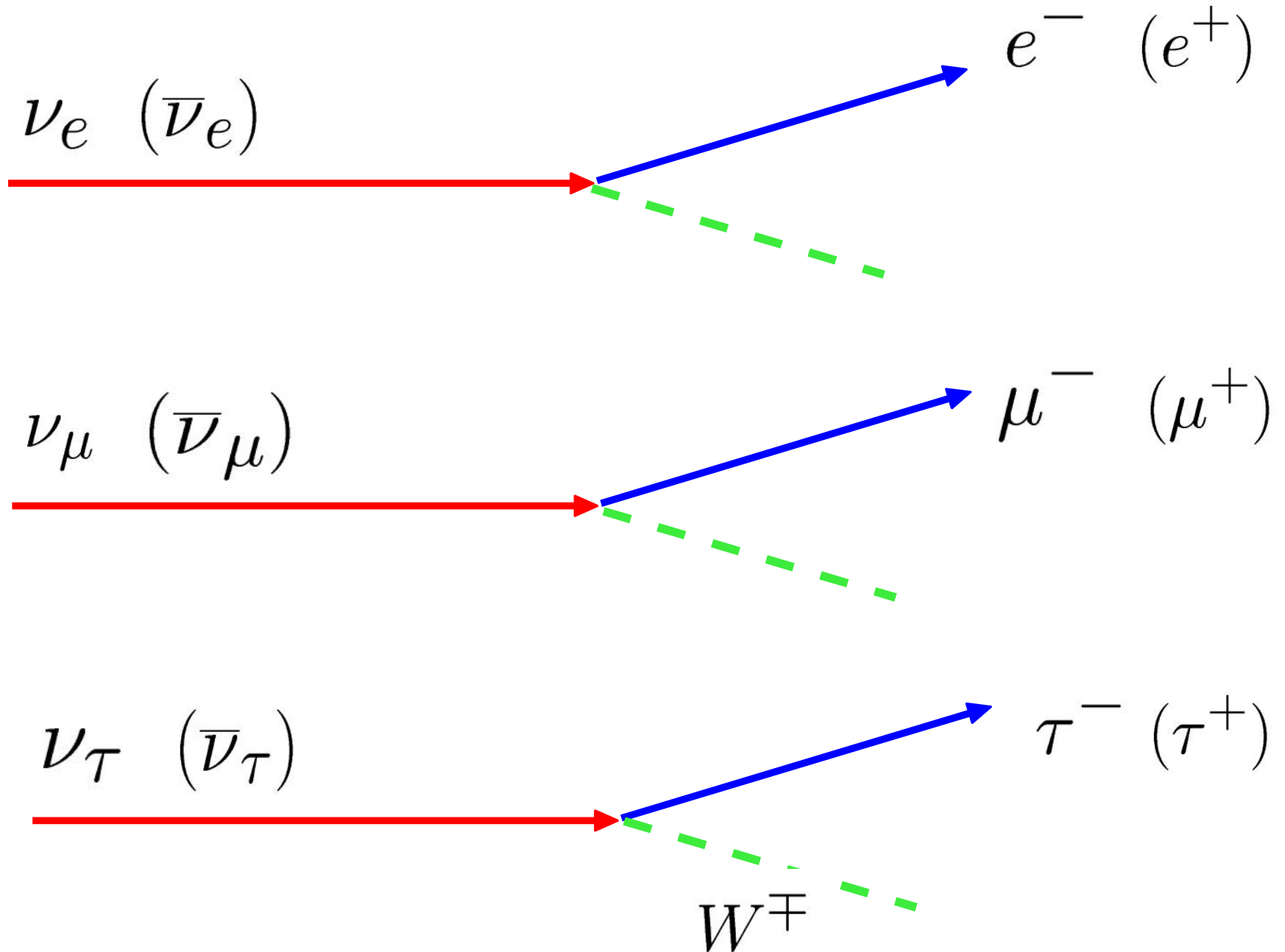
$$\bar{u}, \quad \bar{d}, \quad \bar{s}, \quad \bar{c}, \quad \bar{b}, \quad \bar{t}$$

Anti-Particles: Right-chirality

$$P_{\text{Left}} = \frac{m^2}{E^2}$$

$$P_{\text{Right}} = 1 - \frac{m^2}{E^2}$$

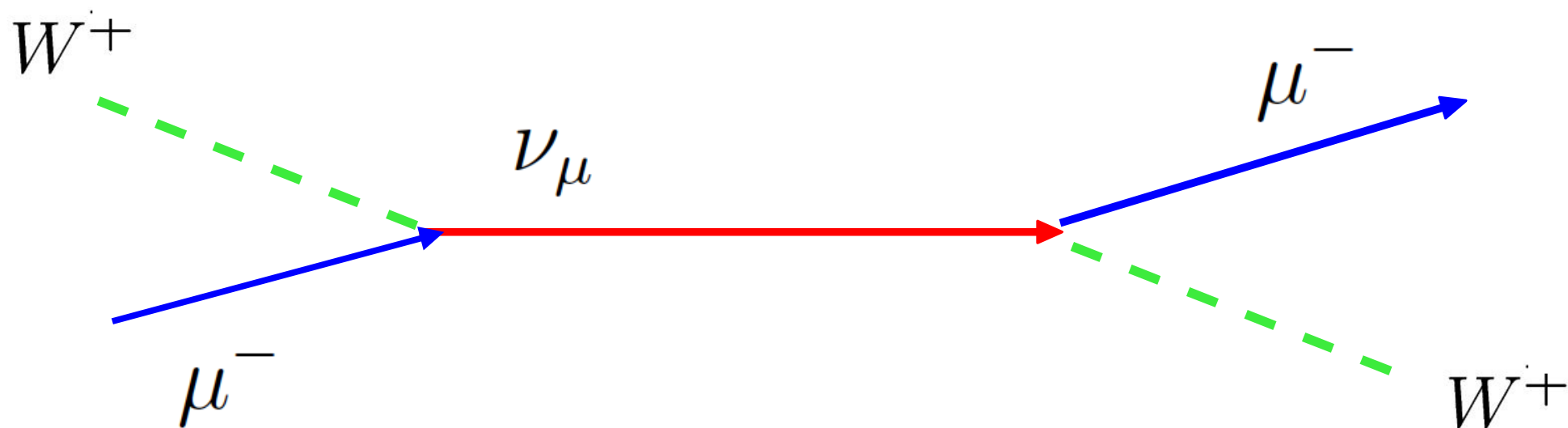
SAPORE (Flavor)



SAPORE (Flavor)

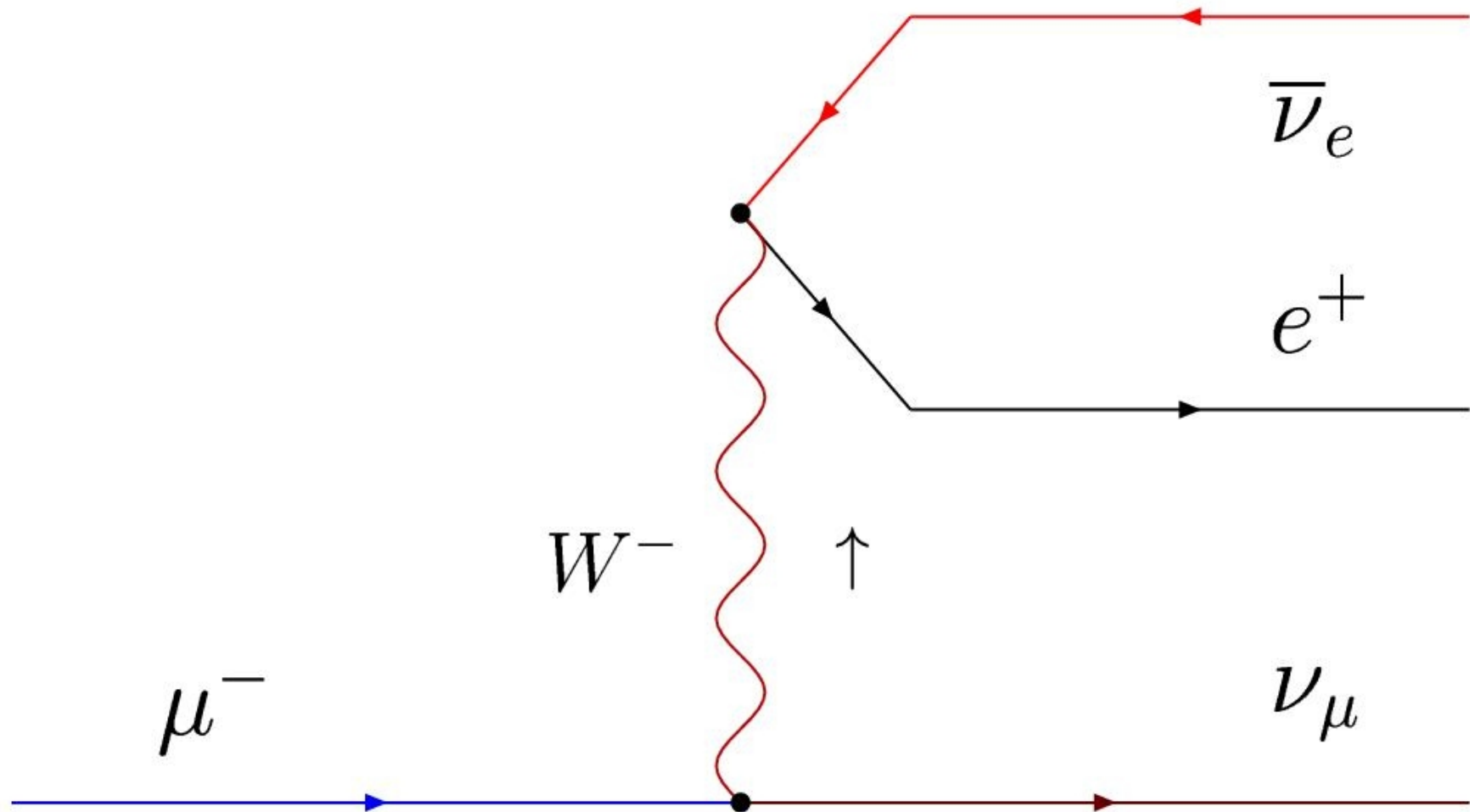


SAPORE (Flavor)



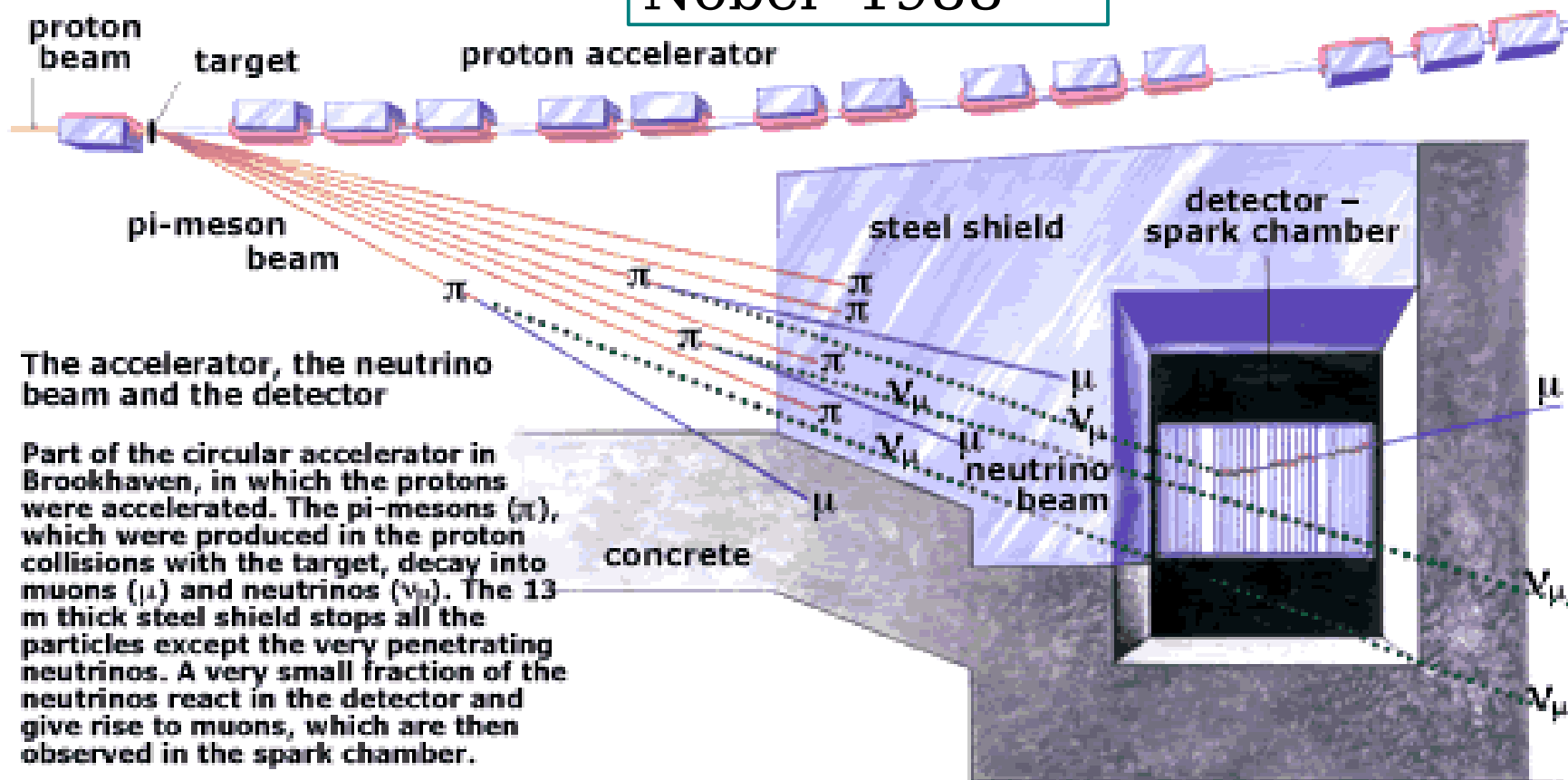
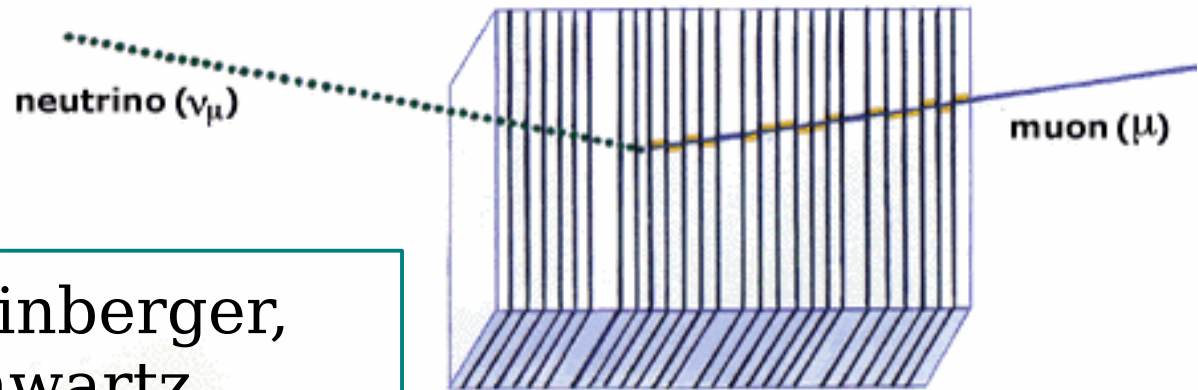
MUON DECAY:

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- \bar{\nu}_e$$





Steinberger,
Schwartz,
Lederman
Measure (1962)
Nobel -1988



The accelerator, the neutrino beam and the detector

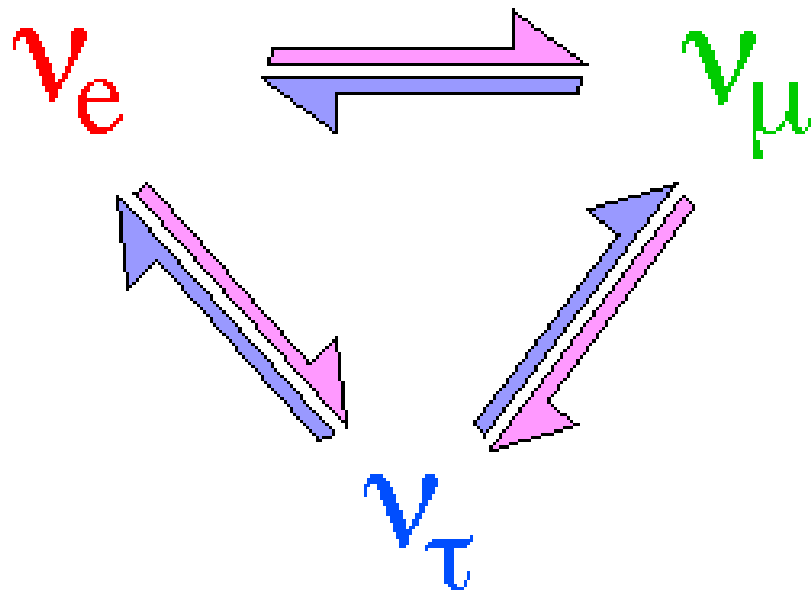
Part of the circular accelerator in Brookhaven, in which the protons were accelerated. The pi-mesons (π), which were produced in the proton collisions with the target, decay into muons (μ) and neutrinos (ν_μ). The 13 m thick steel shield stops all the particles except the very penetrating neutrinos. A very small fraction of the neutrinos react in the detector and give rise to muons, which are then observed in the spark chamber.

Based on a drawing in Scientific American, March 1963.

1. L'ipotesi del neutrino di Pauli
2. La Teoria di Fermi
3. “Attraverso lo Specchio”
4. Il Sole e i neutrini
5. Tre “sapori” di neutrini

6. Oscillazioni

Oscillazioni dei neutrini



Бруно Понтекорво

3 stati di neutrino. 3 masse

m_1, m_2, m_3

Gli stati con massa ben definita
in generale non coincidono con gli stati di “sapore”

$\{ |\nu_e\rangle, |\nu_\mu\rangle, |\nu_\tau\rangle \}$

Base di
“sapore”

$\{ |\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle, |\nu_3\rangle \}$

Base di
massa

$$W^- \rightarrow \bar{u} + d'$$

$$\rightarrow \bar{c} + s'$$

$$\rightarrow \bar{t} + b'$$

$$-(+2/3) + (-1/3) = -1$$

$$W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$

$$\rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

$$\rightarrow \tau^+ \nu_\tau$$

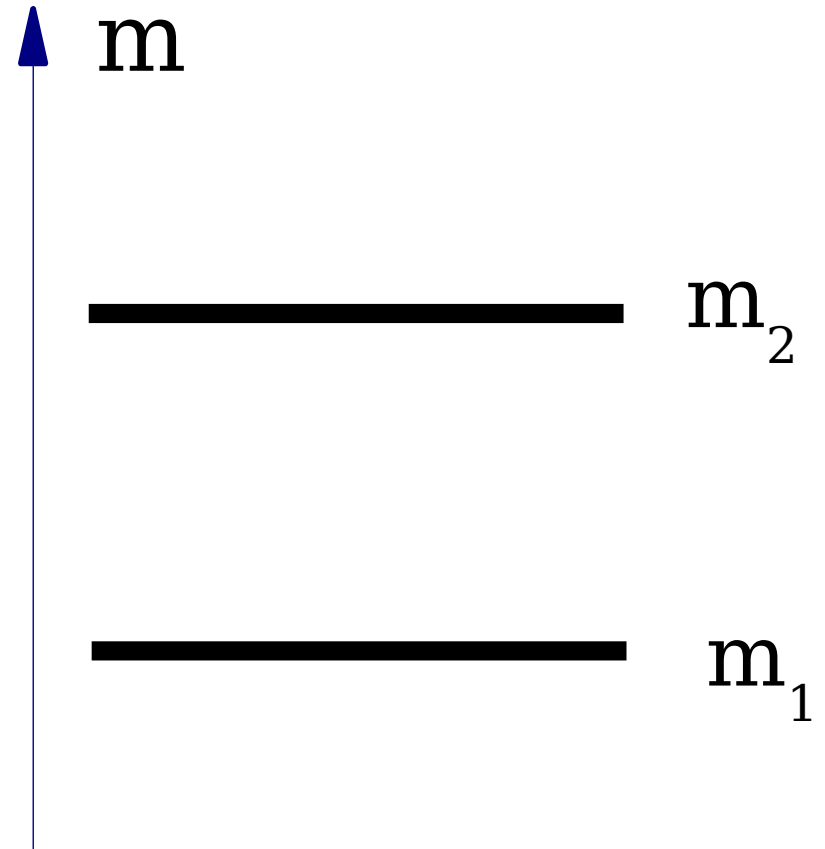
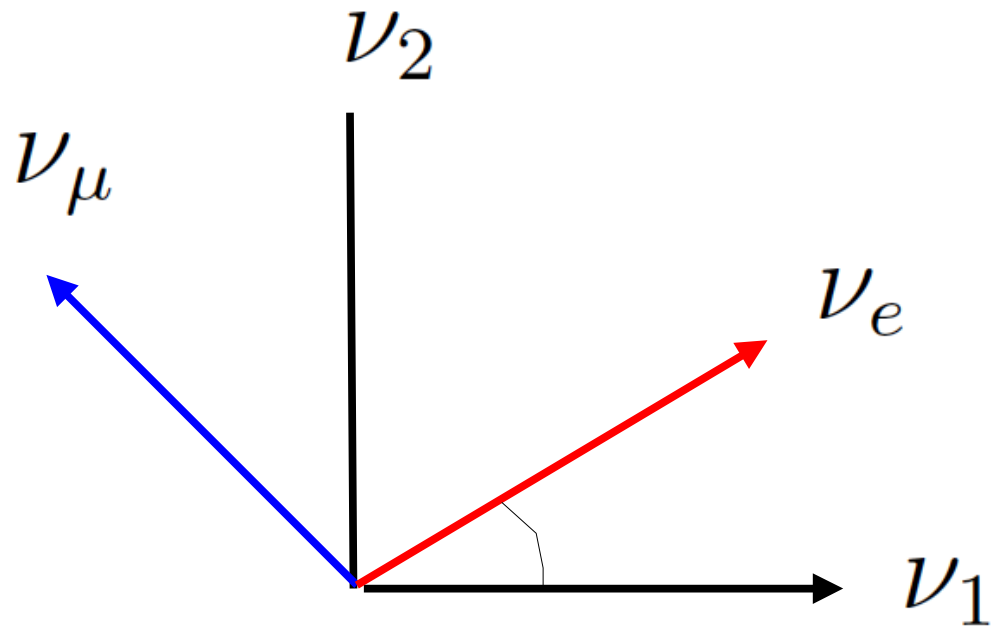
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = V^{\text{CKM}} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Cabibbo
Kobayashi
Maskawa

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U^{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Pontecorvo
Makato
Nakagawa
Sakato

2 Flavor case



$$|\nu_\mu\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle$$

$$|\nu_\tau\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle$$

$$\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$$

Neutrino Propagation

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

ν_μ created at $t=0$
with momentum $\mathbf{p}$

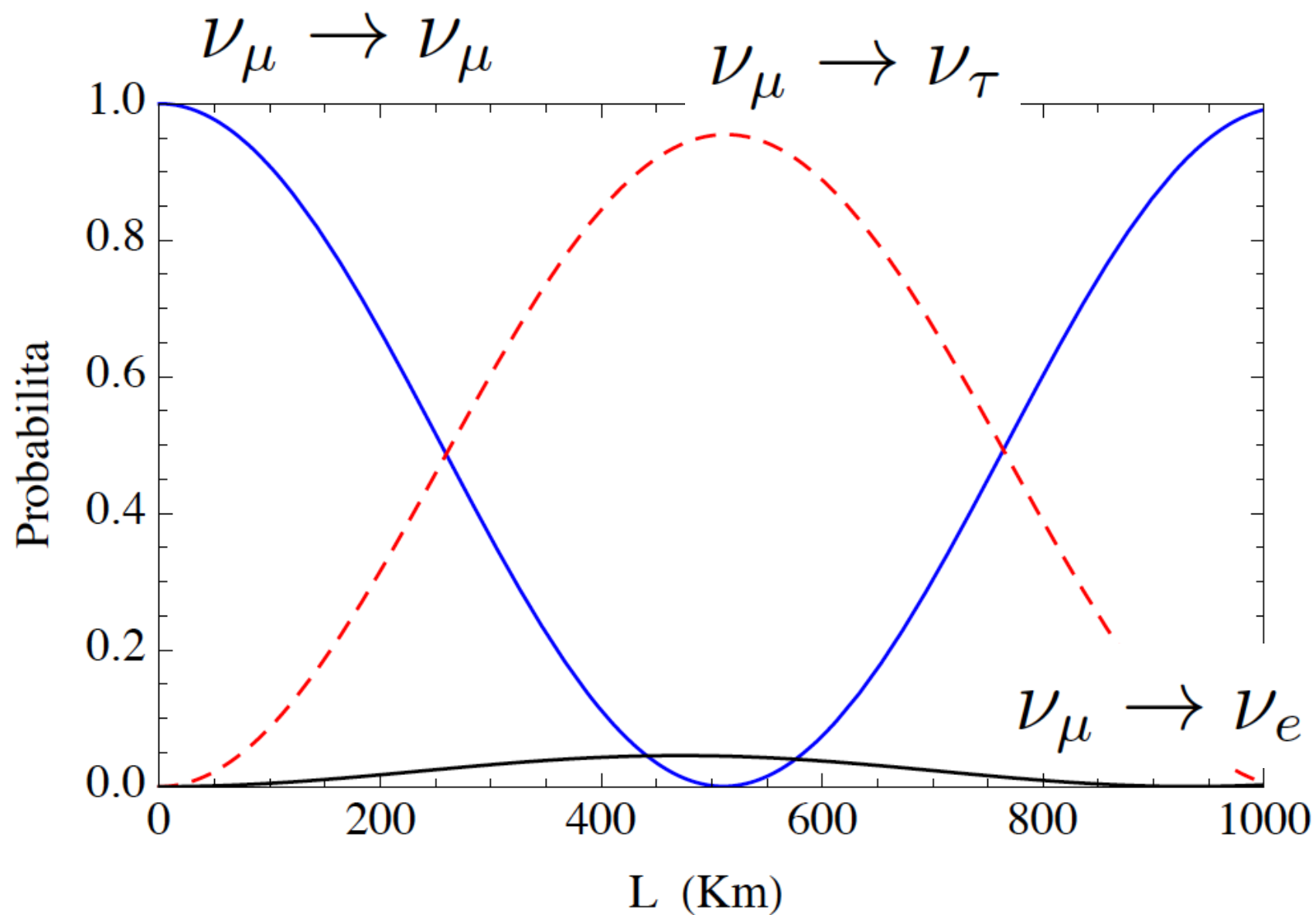
$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p + \frac{m_i^2}{2p} \simeq E + \frac{m_i^2}{2E}$$

Different mass
components
have different energy

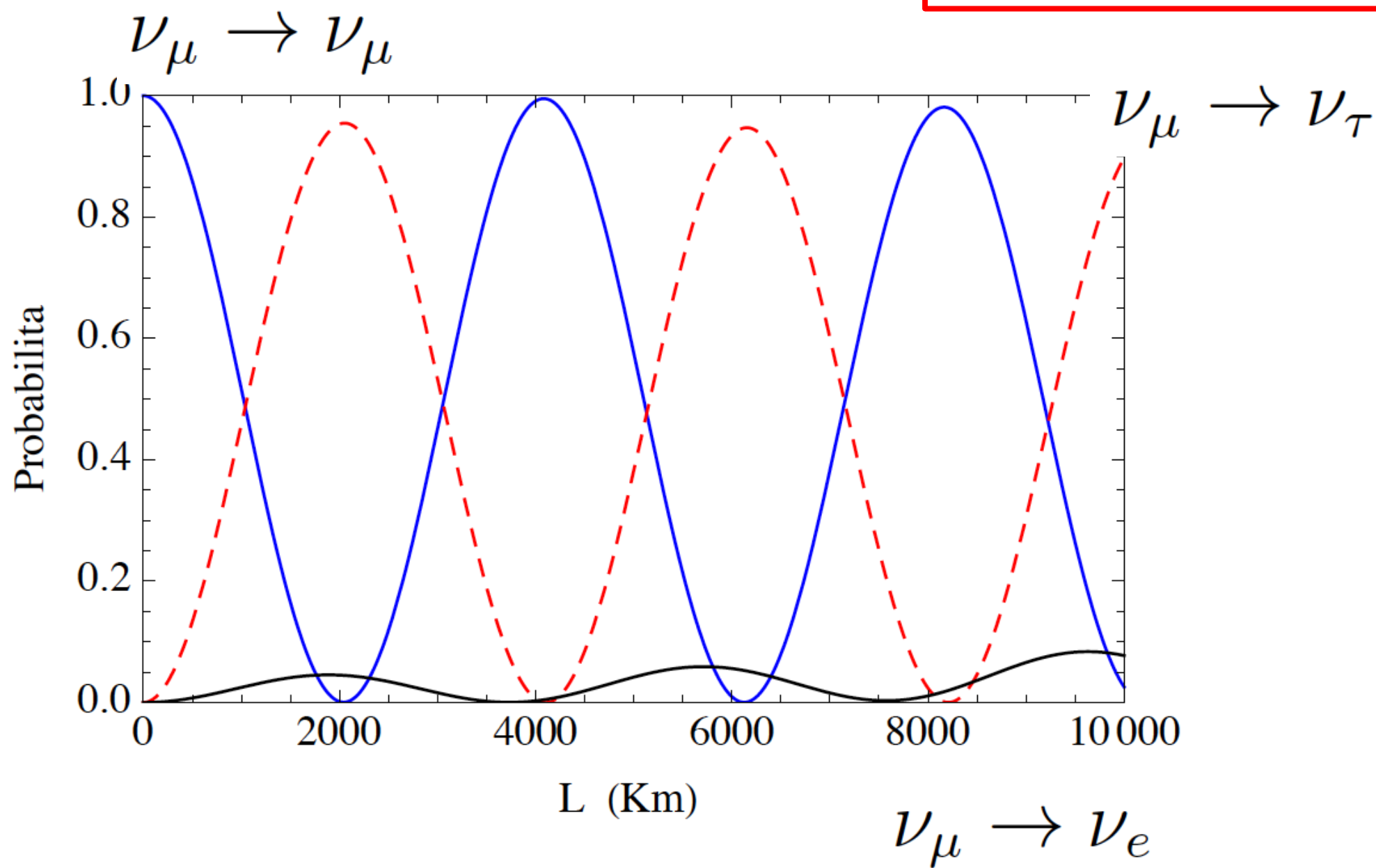
$$|\nu(t)\rangle = \cos\theta e^{-iE_1 t} |\nu_1\rangle + \sin\theta e^{-iE_2 t} |\nu_2\rangle$$

Stato al tempo t

$$E_\nu = 1 \text{ GeV}$$

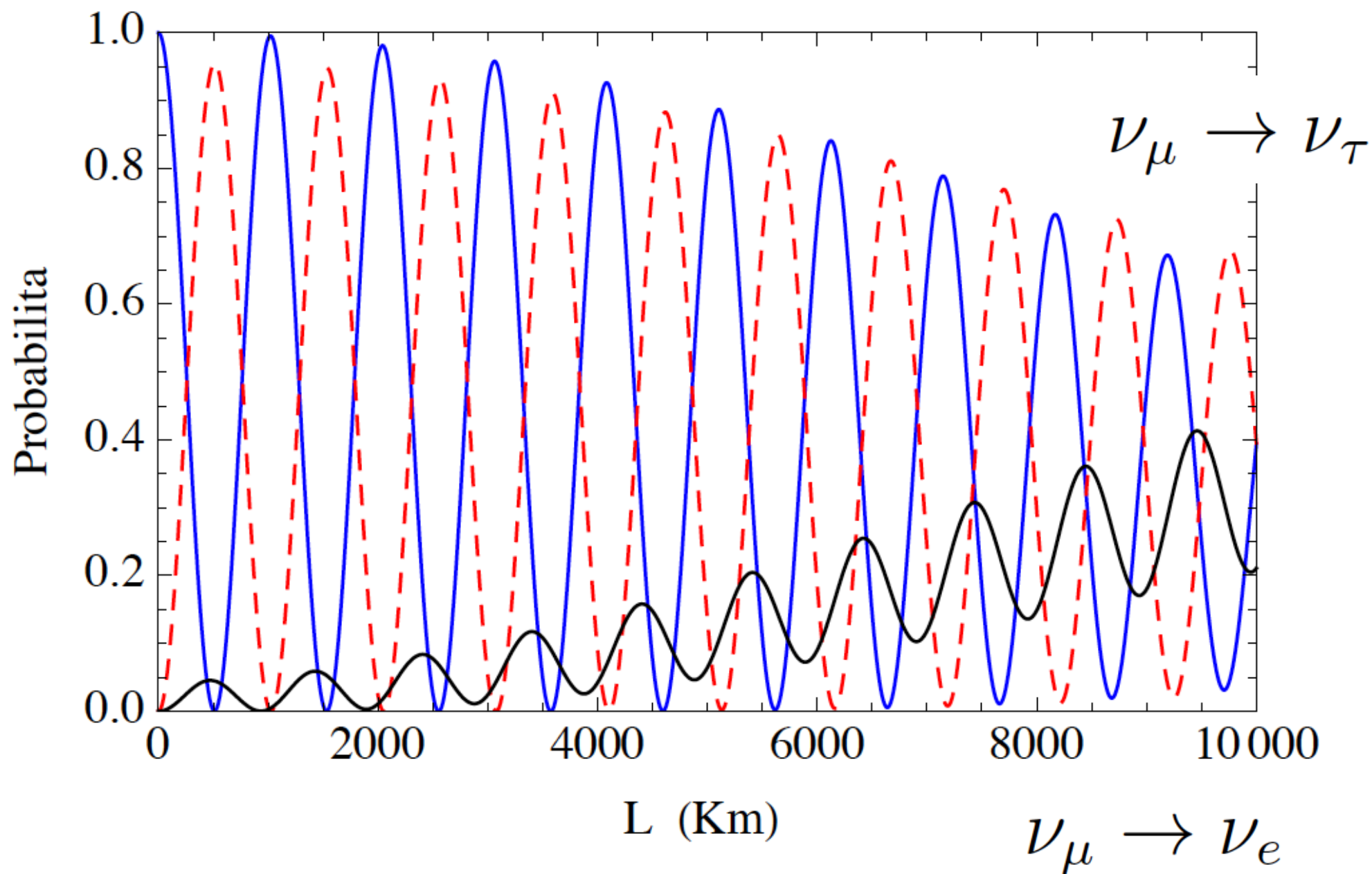


$$E_\nu = 5 \text{ GeV}$$

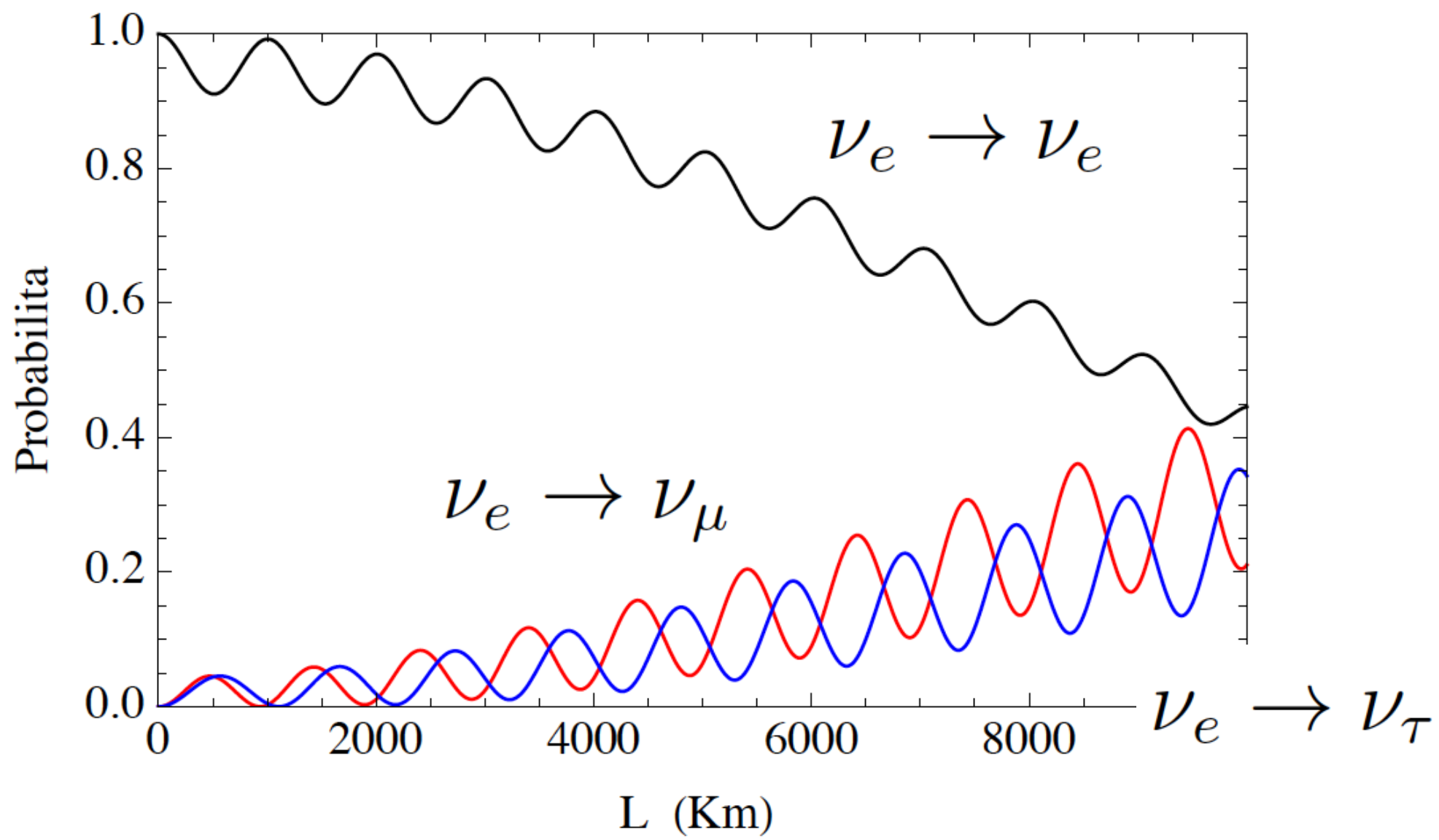


$$E_\nu = 1 \text{ GeV}$$

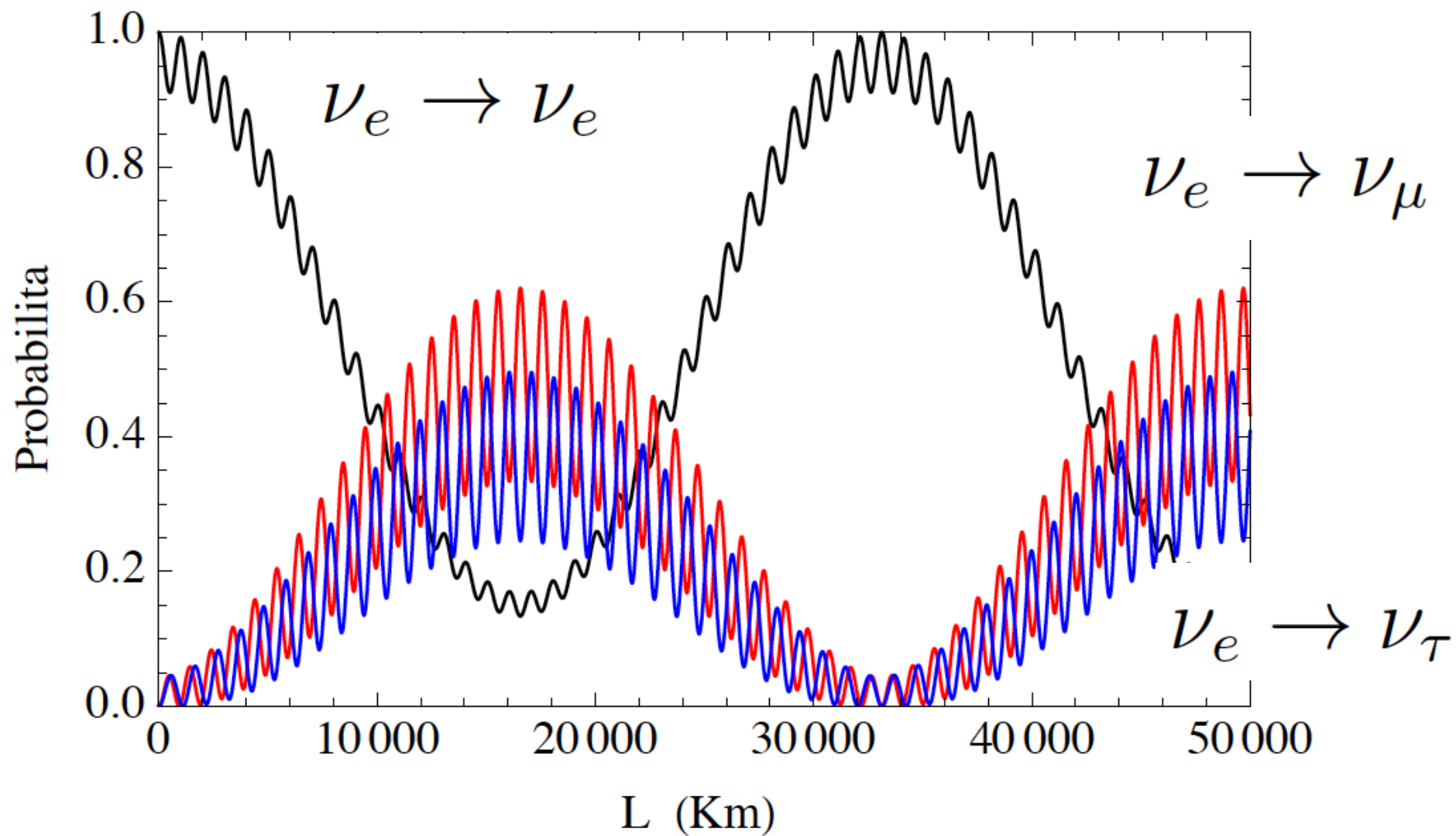
$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$$



$$E_\nu = 1 \text{ GeV}$$



$$E_\nu = 1 \text{ GeV}$$



Onde e Particelle

Il “cuore” della Meccanica Quantistica

$$E = h \nu$$

$$E = \hbar \frac{2\pi}{T} = \hbar \omega \quad \text{Equazione di Planck}$$

$$p = \hbar \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar k \quad \text{Equazione di De Broglie}$$

Neutrino di Energia E e sapore ben definito.

Questo neutrino NON ha una massa ben definita
(ha tre ampiezze di probabilità
di avere massa m_1 , m_2 , m_3).

Neutrino di Energia E e sapore ben definito.

Questo neutrino NON ha una massa ben definita (ha tre ampiezze di probabilità di avere massa m_1, m_2, m_3).

Il momento di una particella di energia E e massa m è:

$$p c = \sqrt{E^2 - m^2 c^4}$$

Neutrino di Energia E e sapore ben definito.

Questo neutrino NON ha una massa ben definita
(ha tre ampiezze di probabilità
di avere massa m_1 , m_2 , m_3).

Il momento di una particella di energia E e massa m è:

$$p c = \sqrt{E^2 - m^2 c^4}$$

Ma allora il neutrino non ha un unico momento
Ma ha ampiezze di probabilità di avere tre momenti....

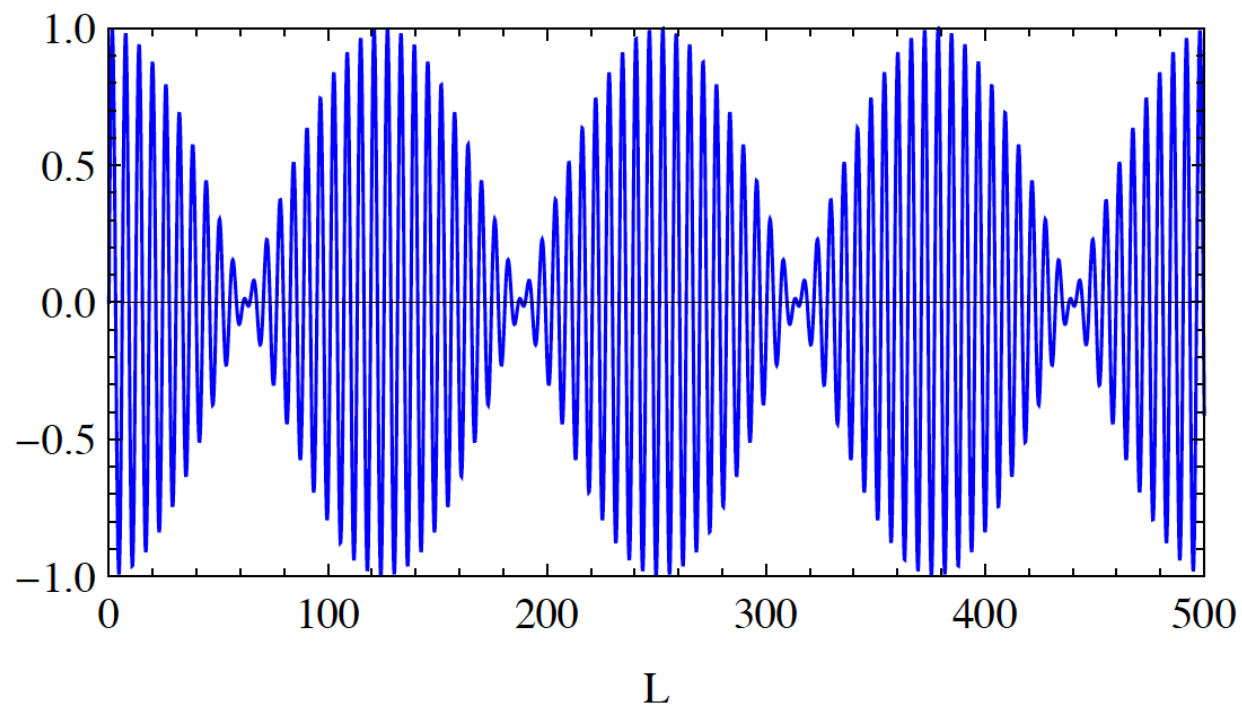
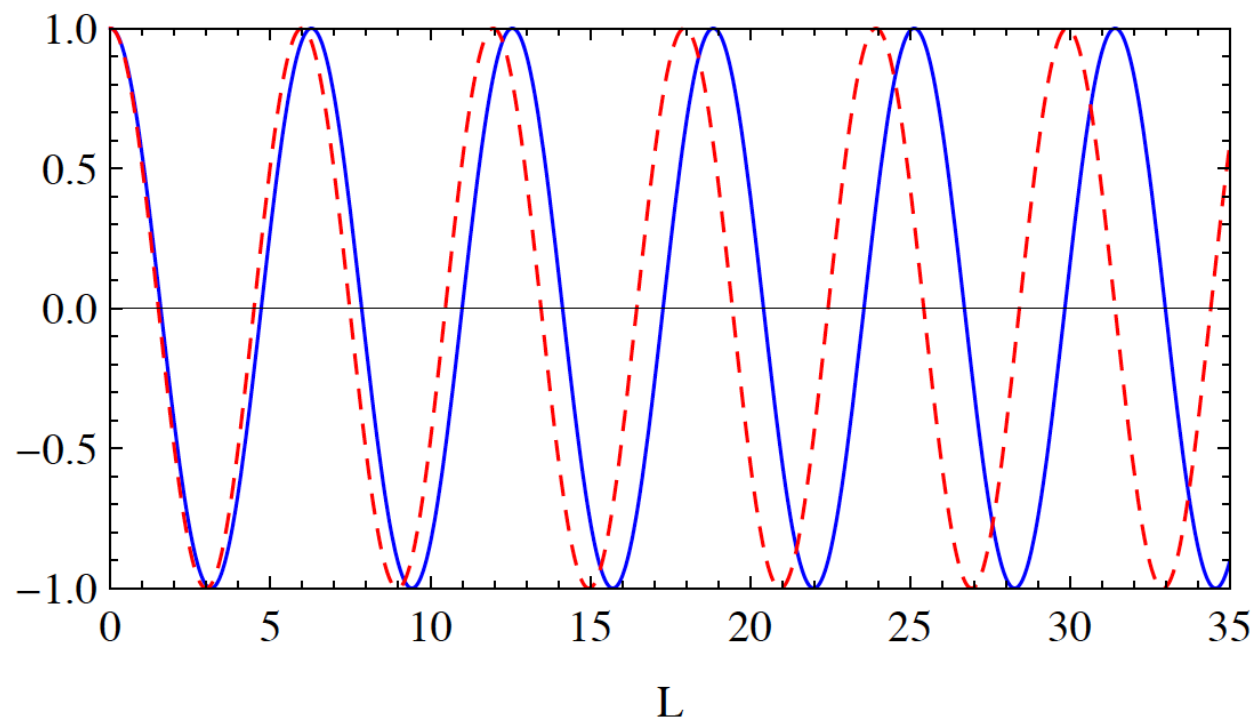
Dunque il neutrino NON ha un'unica lunghezza d'onda
ma ne ha TRE leggermente differenti l'una dall'altra.

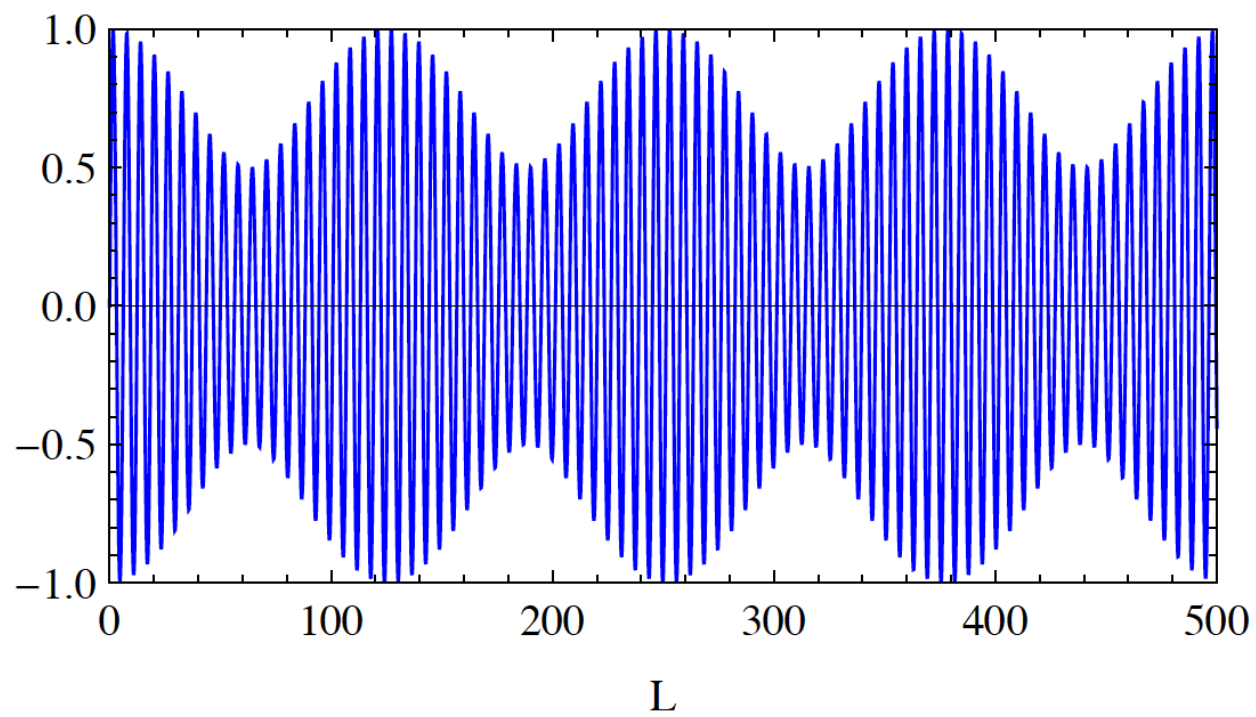
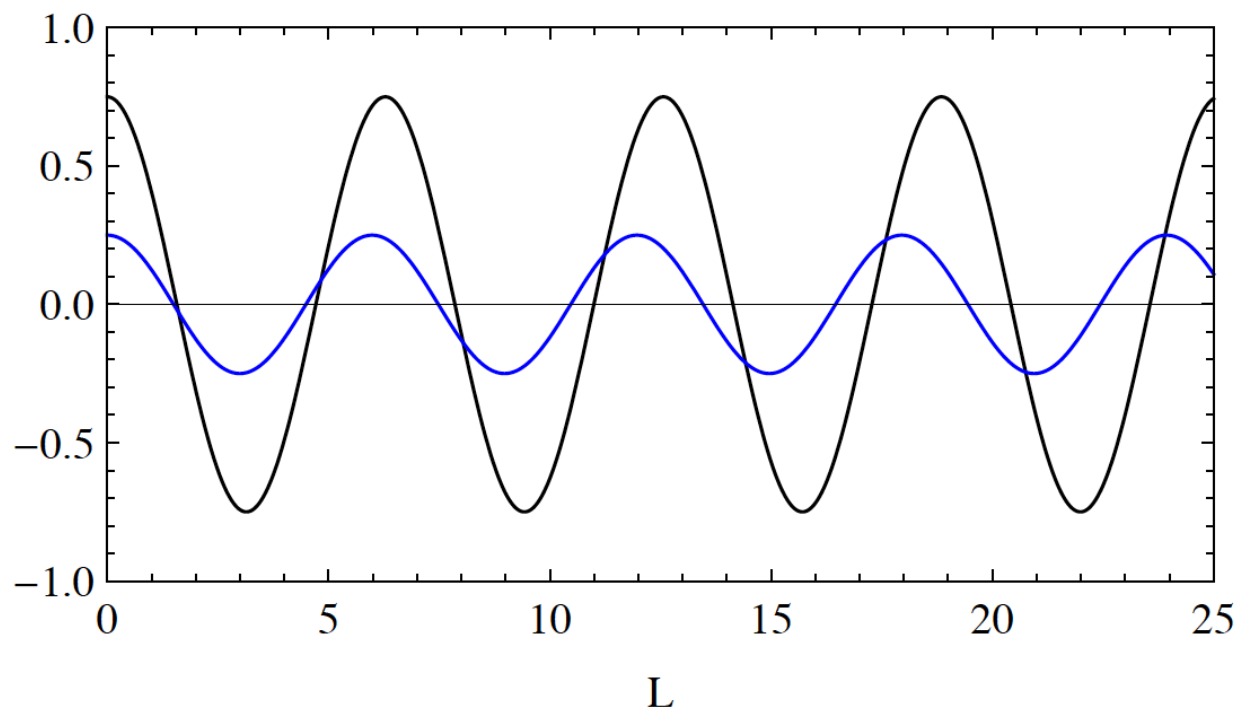
Relazione tra Energia e velocità (determinata dalla massa)

$$p c = \sqrt{E^2 - m^2 c^4}$$

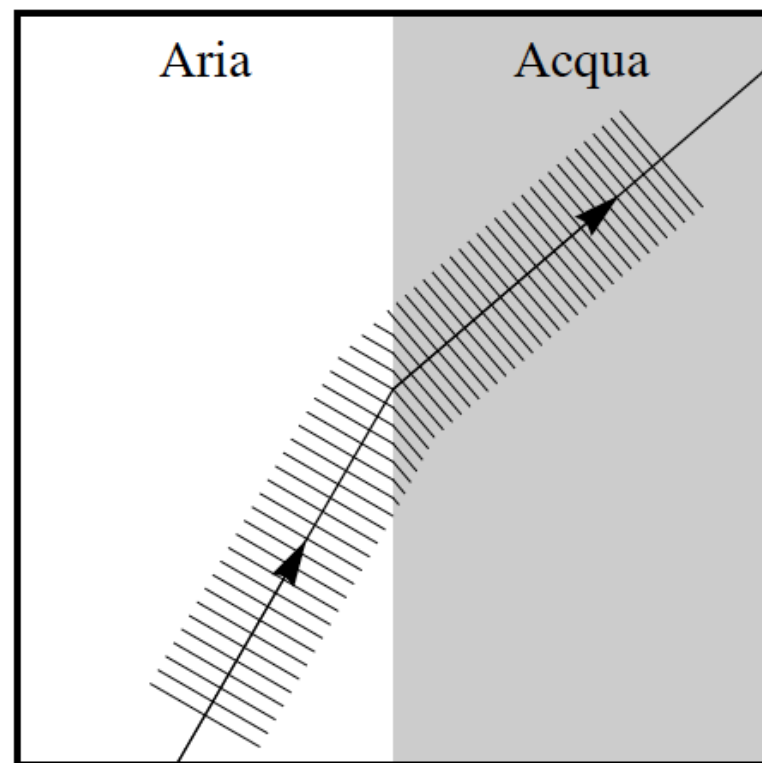
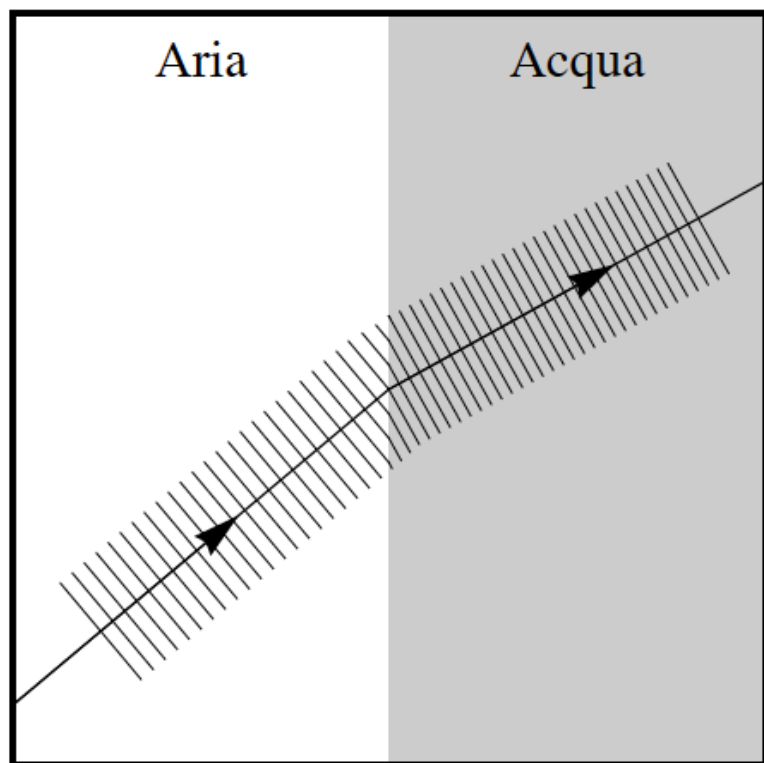
$$v = \frac{p}{E}$$

$$v = c \left(1 - \frac{m^2 c^4}{2 E^2} \right)$$





Rifrazione della luce in materiali trasparenti



From Feynman "lectures in Physics"

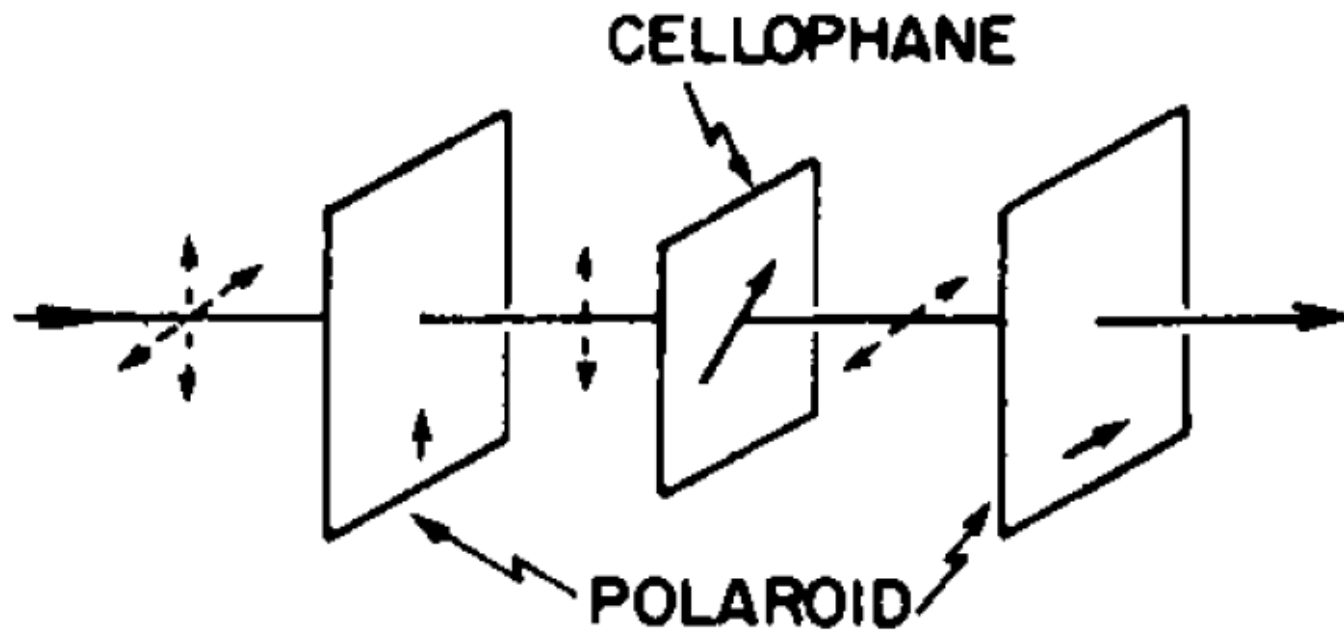
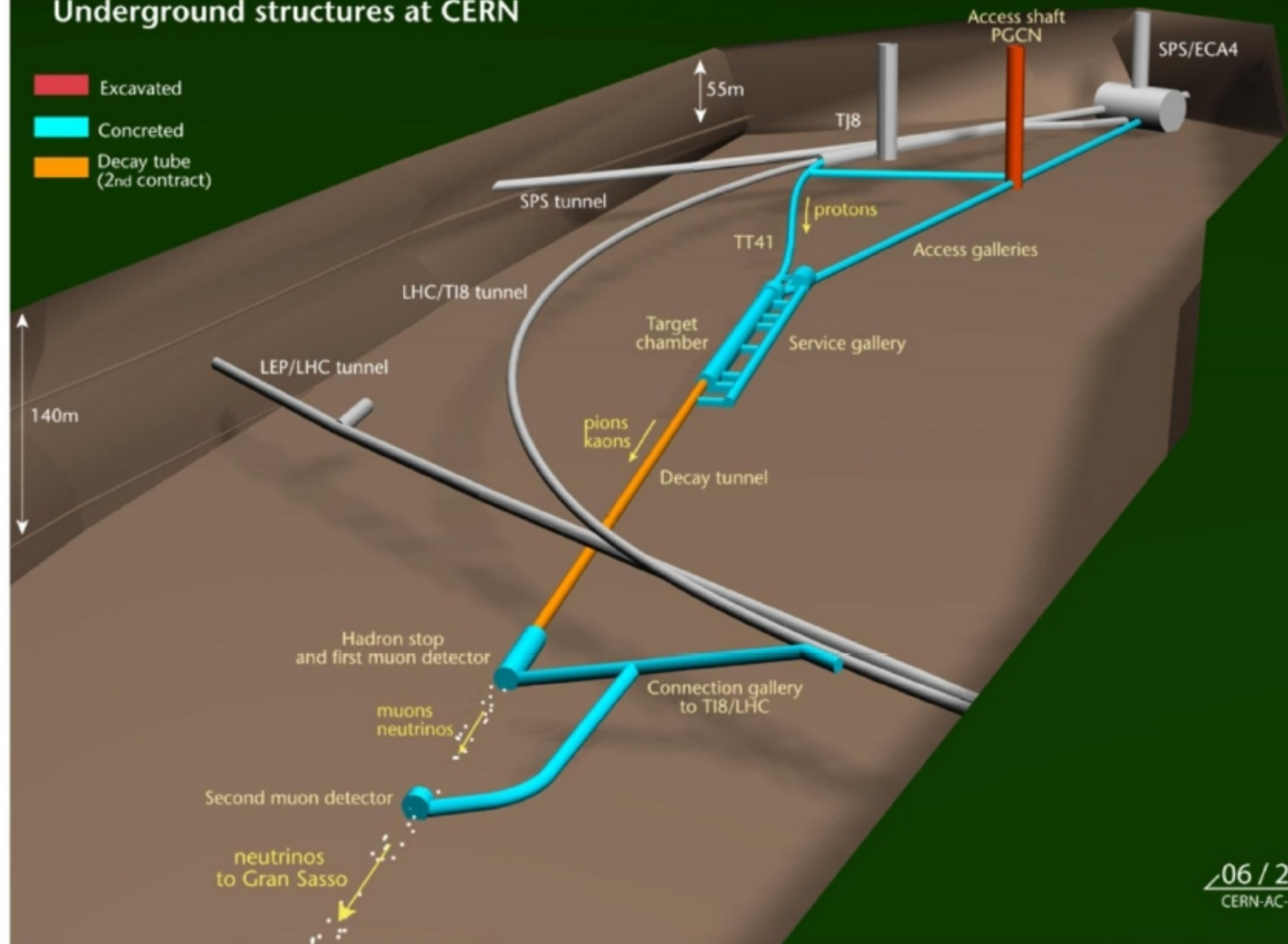


Fig. 33-3. An experimental demonstration of the birefringence of cellophane. The electric vectors in the light are indicated by the dotted lines. The pass axes of the polaroid sheets and optic axes of the cellophane are indicated by arrows. The incident beam is unpolarized.

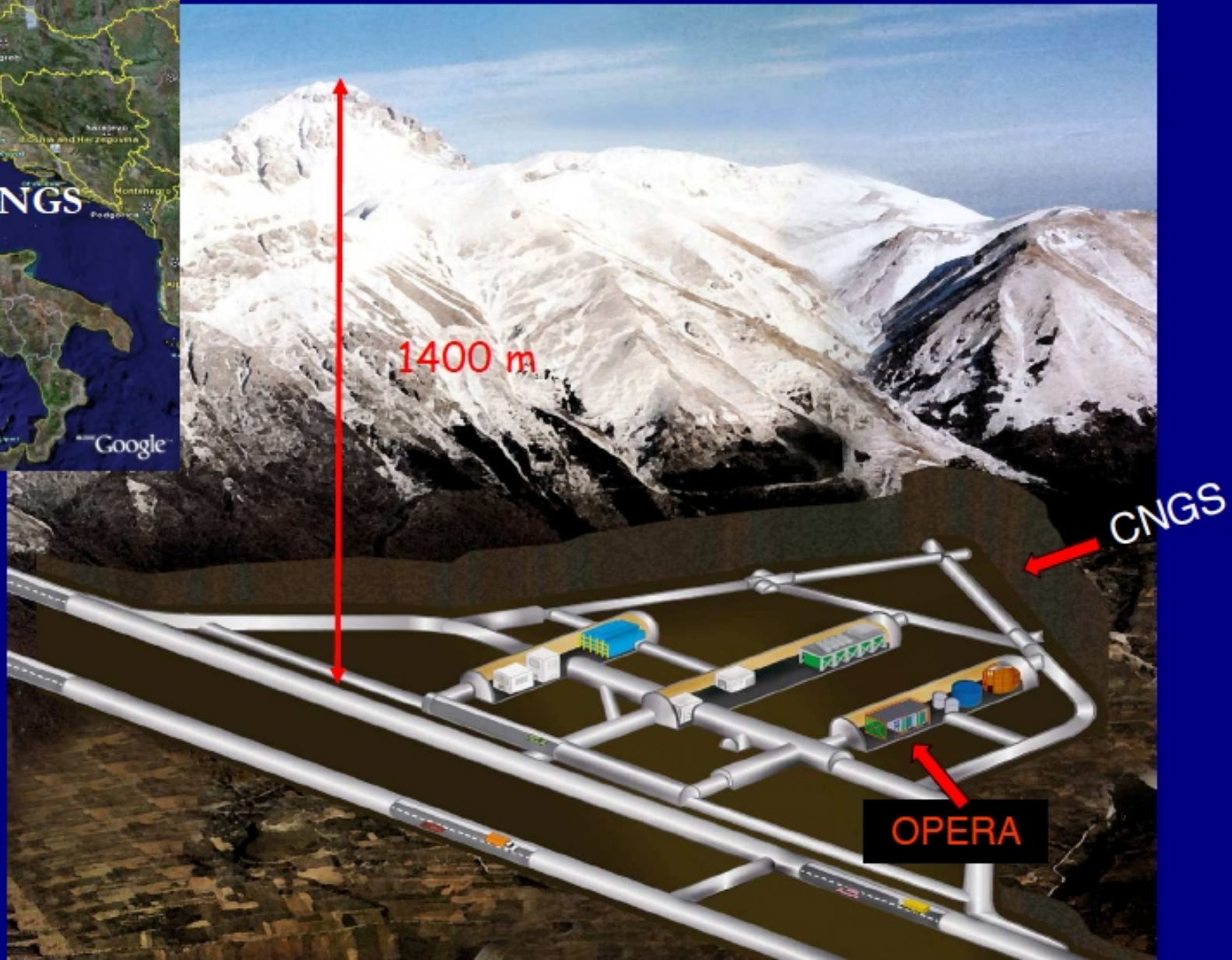
CERN NEUTRINOS TO GRAN SASSO

Underground structures at CERN

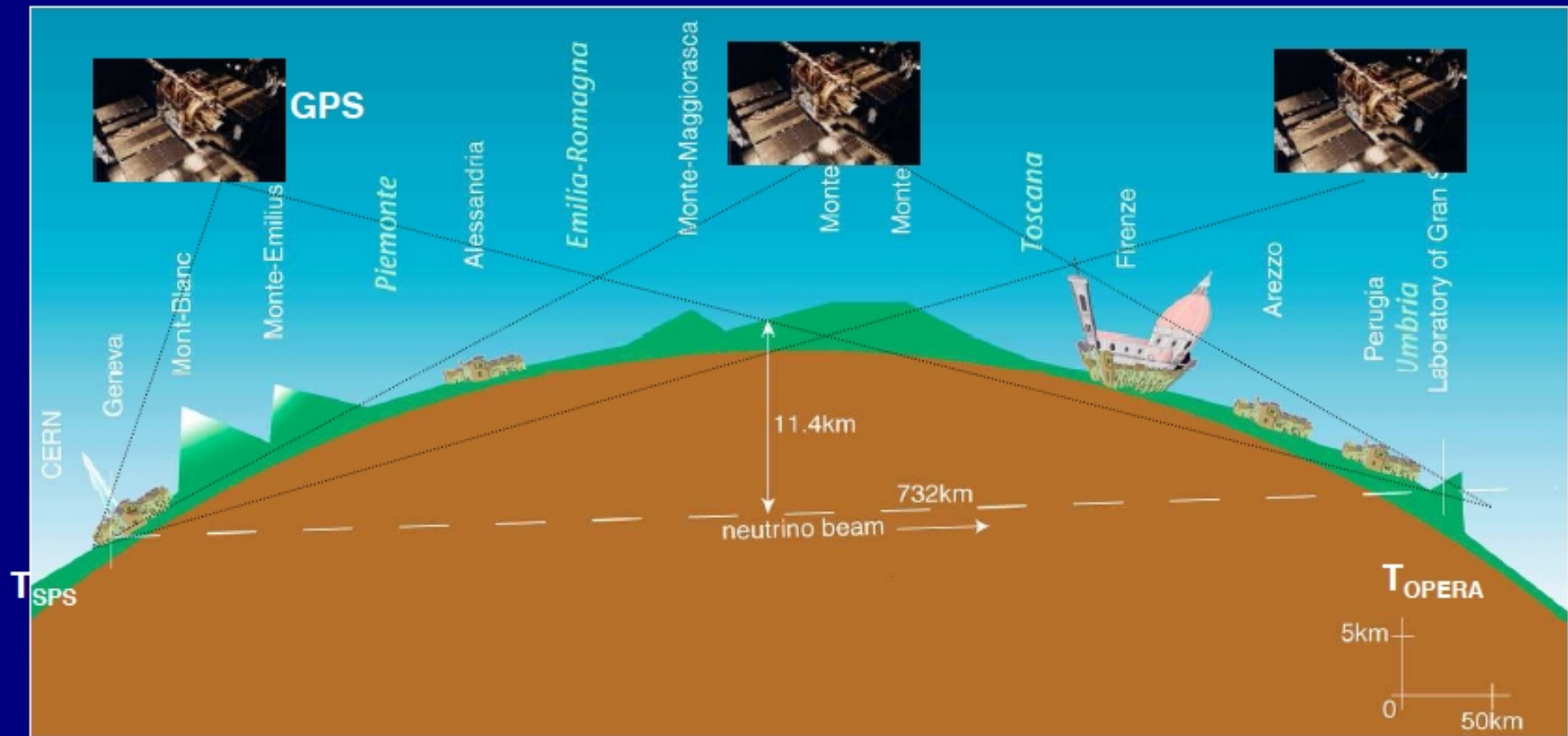
- Excavated
- Concreted
- Decay tube (2nd contract)

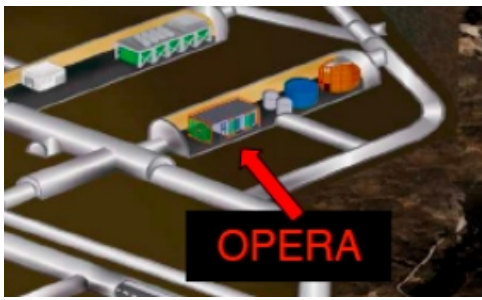


The LNGS underground physics laboratory

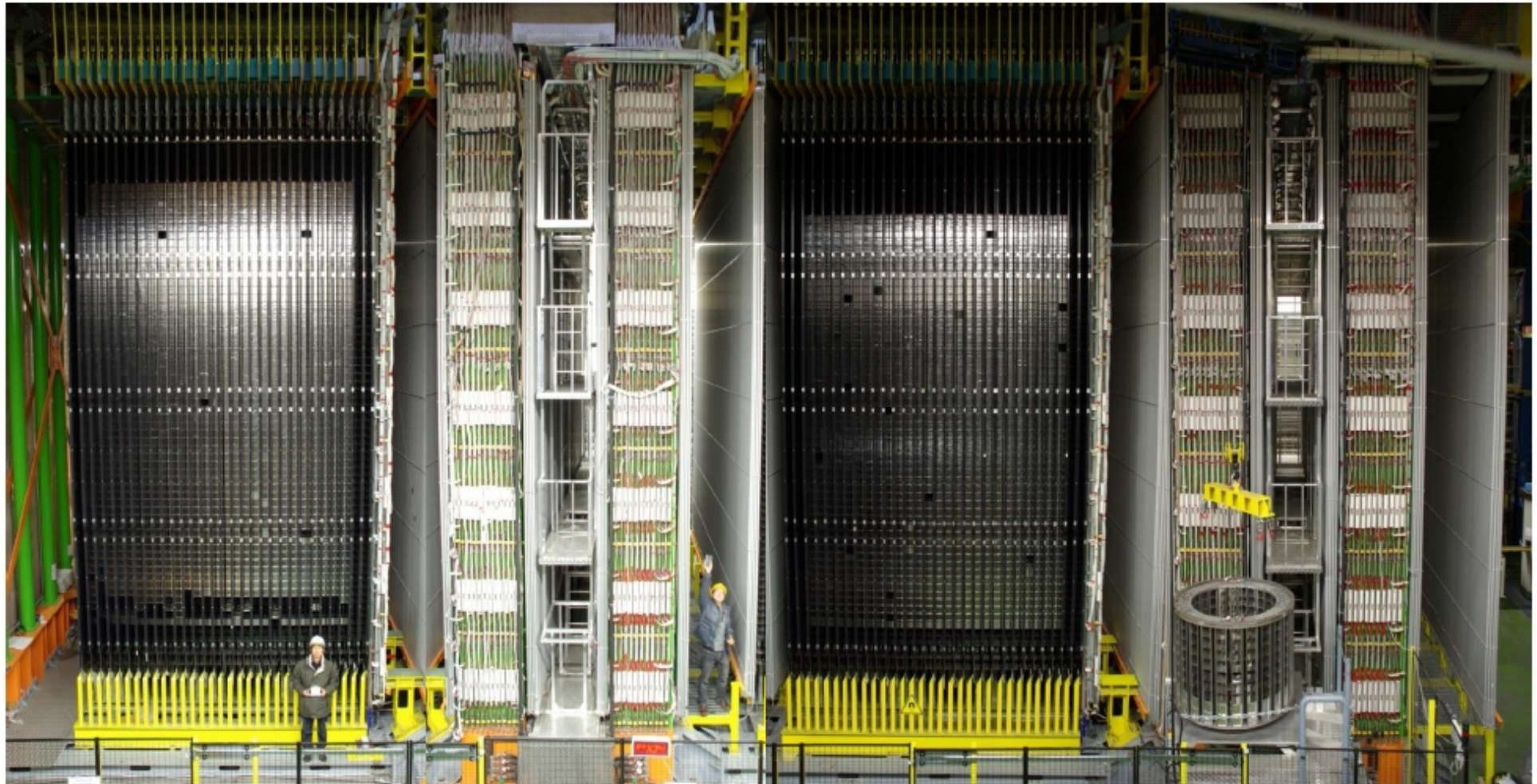


CNGS events selection





← SM1 → ← SM2 →



Target area

Muon spectrometer

Commenti finali

- La Fisica del Neutrino è un argomento molto ampio sia dal punto di vista sperimentale che teorico, e l'oggetto di studi intensi.
- Il neutrino sarà nel prossimo futuro usato come “messaggero” da sorgenti nell'Universo.
 - Neutrini dal Sole
 - Neutrini dal centro delle SuperNovae
 - Neutrini da sorgenti astrofisiche di alta energia.
- Comunicare gli sviluppi scientifici ai giovani (e più in generale alla società) è molto importante. Per questo la collaborazione e la continua Interazione tra ricercatori e insegnanti è di fondamentale importanza.