

INTRODUZIONE AL MODELLO STANDARD ①
DELLA FISICA DELLE PARTICELLE

GIOVANNI MARCO PRUNA

PRUNAGIOVANNIMARCO@GMAIL.IT

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

LABORATORI NAZIONALI DI FRASCATI

UNIVERSITA' DI ROMA TRE

FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

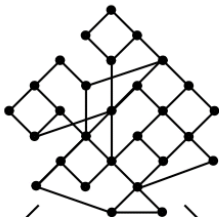
②

- DI COSA È FATTA LA MATERIA CHE COMPONE L'UNIVERSO?
 - ALCUNI FATTI STRABILIANTE: (QUASI) TUTTA LA MATERIA CONOSCIUTA È COSTITUITA DA POCHISSIMI "MATTONCINI" TREMENDAMENTE DISTANTI FRA LORO!
 - QUESTI MATTONCINI SONO REPLICATI IN QUANTITÀ ENORMI FINO A COSTITUIRE (QUASI) TUTTO CIÒ CHE OSSERVIAMO
 - TALI REPLICHE SONO COPIE PERFETTE E INDISTINGUIBILI CI SEMPLIFICA LA VITA: UN ELETTRONE VALE L'ALTRO!
-
- CAPITO UNO, CAPITI TUTTI: POTEVA ANDARCI PEGGIO...
DA TALI E POCHISSIMI INGREDIENTI CONSEGUO LA RICETTA COSMICA.
-
- FAREMO UN VIAGGIO NELLA STORIA DELLA SCOPERTA DI QUESTI INGREDIENTI, POI PARLEREMO DELLA CUCINA IN CUI VIVONO (TEORIA) E DEGLI STRUMENTI PER ATALGARLI (SIMMETRIA)...

World



Model



Theory

$(\exists x)(\exists y)R(x,y). \quad (\forall x)\neg R(x,x)$
 $(\forall x)(\forall y)(R(x,y) \supset \neg R(y,x))$
 $(\forall x)(\forall y)(R(x,y) \supset C(x,y))$
 $(\forall x)(\forall y)(C(x,y) \supset C(y,x))$
 $(\forall x)(\forall y)(\forall z)((R(x,y) \wedge R(y,z)) \supset R(x,z))$

Approximation

{Good, Fair, Poor}

Denotation

{True, False}

L'ERA CLASSICA (1897-1932)

③

LA FISICA DELLE PARTICELLE NASCENNEL 1897 CON LA SCOPERTA DELL' ELETTRONE DA PARTE DI THOMSON

UN RAGGIO CATHODICO ATTRAVERSA UN CAMPO ELETTROMAGNETICO

$$\begin{array}{l}
 \xrightarrow{v} \text{---} \times \times \times \times \\
 \quad \quad \times \times \times \times \\
 \quad \quad \times \times \times \times \\
 \quad \quad \times \times \times \times
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 |F_e| = e|E| \\
 |F_H| = +eM|H|
 \end{array} \right\} \begin{array}{l}
 \text{BILANCIANDO LE FORZE} \\
 \bar{F}_e + \bar{F}_H = \bar{0} \Rightarrow |F_e| + |F_H| = 0
 \end{array}$$

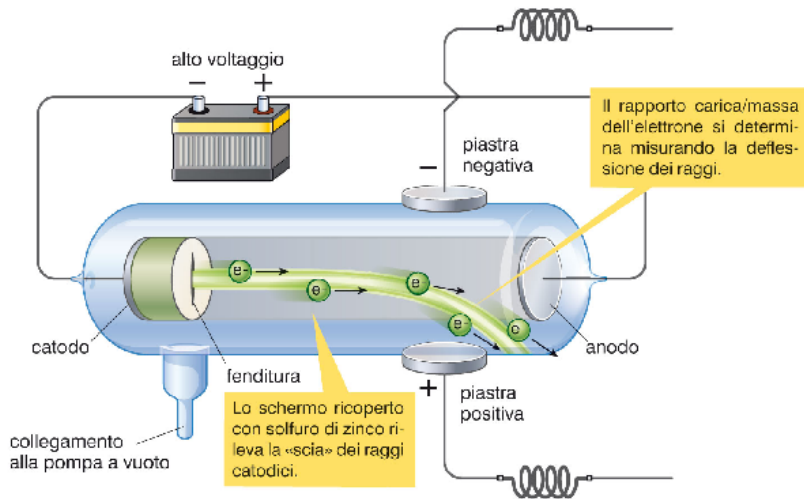
DA CIÒ THOMSON OTTENNE $M = \frac{|E|}{|H|} \sim 10^{-1} \cdot c$

IN ASSENZA DI H IL RAGGIO CATHODICO CURVA; FLUSSO DI e^- CURVA VERSO LA PLACCA POSITIVA; e^- UNA CARICA NEGATIVA SPEGNENDO IL CAMPO ELETTROICO TRACCIA UN ARCO $R = \frac{4\pi \cdot D}{\lambda}$

FORZA CENTRIFUGA; $|F_H| = m \frac{v^2}{D} = m \frac{v^2}{R} \pi = m \frac{E^2}{H^2} \frac{\pi}{R} = -e \frac{|E|}{|H|}$

DA QUI SI OTTIENE $\frac{e}{m} = \frac{E^2}{H^2} \frac{\pi}{R} \cdot \frac{1}{E} = \frac{|E|\pi}{H^2 R} \approx 1.7588196 \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$

O CARICA ENERGETICA O MASSA PICCOLA



ELETRONI COME COSTITUENTI ATOMICI

4

THOMSON (CORRETTAMENTE) IPOTIZZÒ CHE GLI ELETTRONI COSTITUSSERO L' ATOMO (ELETRICAMENTE NEUTRO), IMERSI IN UNA "PASTA POSITIVA".
MODELLO "PLUM PUDDING".

QUESTO MODELLO VENNE FALSIFICATO DA UN SUO STUDENTE: RUTHERFORD SPARANDO DELLE PARTICELLE- α SU UN FOGLIO D'ORO, ALCUNE SI DIFFONDEVANO RIMPALLANDO IN MODO IMPREVEDIBILE.

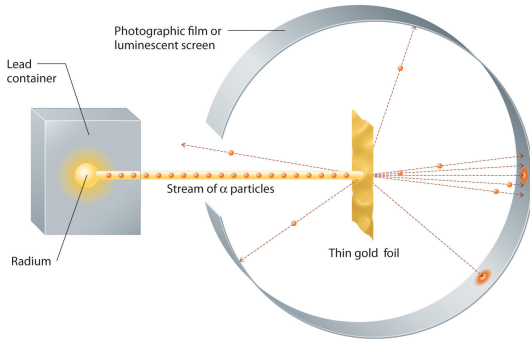
LE PARTICELLE SI SCONTRAVANO CONTRO QUALCOSA DI PICCOLO E PESANTE, OVVERO IL NUCLEO ATOMICO.

IL NUCLEO DELL' ATOMO PIÙ LEGGERO PRESE IL NOME "PROTONI".

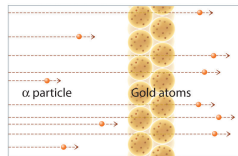
NEL 1914 BOHR PROPOSE IL MODELLO PLANETARIO, CALCOLÒ LO SPETTRO DELL' IDROGENO CON PRECISIONE SPETTACOLARE.

GLI ELEMENTI PIÙ PESANTI, PERÒ, PRESENTAVANO

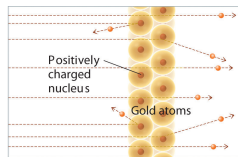
QUALCOSA DI VERAMENTE STRANO...



(a) Rutherford's experiment



(b) What Rutherford expected if Thomson's model were correct



(c) What Rutherford actually observed

ELETTRONI, PROTONI E...

5

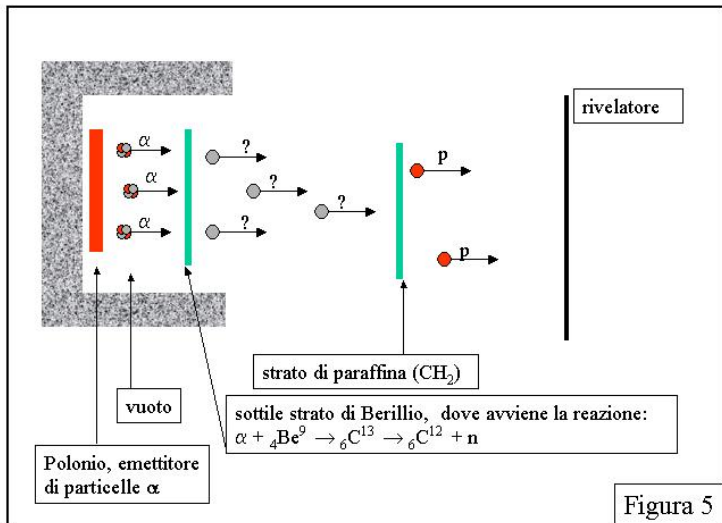
CON L'IDROGENO TUTTO PAREVA FUNZIONARE ALLA PERFEZIONE, MA GIÀ L'ELEMENTO IMMEDIATAMENTE SUCCESSIVO IN MASSA (He) PESAVA BEN QUATTRO VOLTE UN PROTONE (INVECE CHE DUE).

NEL 1932 CHADWICK SCOPRI' CHE LA DIFFERENZA ERA DOWTA ALLA PRESENZA DEI NEUTRONI!

NIENTE FU PIÙ CHIARO E SEMPLICE: TUTTO È COSTITUITO DA ELETTRONI, PROTONI E NEUTRONI... O NO??

LA "PAX SCIENTIFICA" DURÒ POCCHISSIMO, MA EFFETTIVAMENTE MANCAVANO I PRESUPPOSTI TEORICI AFFINCHÈ DURASSE A LUNGO E PRESTO ARRIVÒ L'"ERA DI MEZZO".

EFFETTIVAMENTE, IL MODELLO DI BOHR, ERA UNA FORMULAZIONE ~~SEMILCLASSICA~~ AD HOC RICCA DI POSTULATI ED AGGIUSTAMENTI E FALLIVA NEL RIPRODURRE ALCUNI RISULTATI SPERIMENTALI.



IL FOTONE (1900-1924)

(6)

IL FOTONE RAPPRESENTAVA ALL' EPOCA CIÒ CHE RAPPRESENTA PER NOI OGGI IL CONCETTO DI "MASSA": È OVUNQUE IN CIÒ CHE OSSERVAMO MA NON NE CAPIAMO NATURA E/O IMPLICAZIONI.

OSSERVATO DA "SEMPRE" (BASTANO I SENSI UMANI), È STATO "SCOPERTO" QUANDO È STATO CAPITO.

PROBLEMA DELLA RADIAZIONE DEL "CORPO NERO"



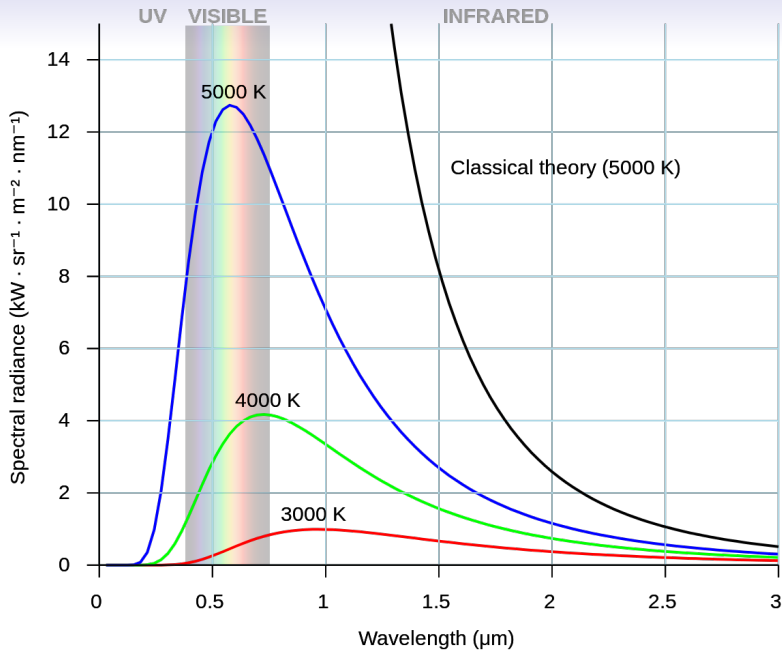
MODI RISONANTI
RADIAZIONE E.M.

PLANCK RIPRODUCES
I RISULTATI
SPERIMENTALI

SI TRATTA
DI UNA PROPRIETÀ
INTRINSECA?

	MODI PER UNITÀ DI FREQUENZA E DI VOLUME	PROBABILITÀ DI OCCUPARE TALI MODI	ENERGIA MEDIA PER MODO
MAXWELL			
MAXWELL	$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$	IDENTICA PER TUTTI I MODI	$\frac{\int_0^\infty E e^{-\frac{E}{kT}} dE}{\int_0^\infty e^{-\frac{E}{kT}} dE} = kT$
PLANCK	$\frac{8\pi\nu^2}{c^3}$	MODI QUANTIZZATI IL MODO "m" RICHIEDE ENERGIA ($E_m = m h \nu$)	$\frac{\sum_{m=0}^\infty E_m e^{-\frac{E_m}{kT}}}{\sum_{m=0}^\infty e^{-\frac{E_m}{kT}}} = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$

MAXWELL ERA INTUCCABILE, PLANCK OPTÒ PER CARATTERISTICA DELL' EMISSIONE.



EFFETTO FOTOELETTRICO

(7)

UN BRILLANTE INGEGNERO D'UFFICIO, NEL 1905, SI SPINSE OLTRE: LA NATURA QUANTISTICA È INTRINSECA DELLA RADIAZIONE, NON DEI MECCANISMI DI ASSORBIMENTO/EMISSIONE: È PER QUESTO CHE UN METALLO EMETTE ELETTRONI CON ~~UNA~~ ^{UNA} ~~FUNZIONE~~ DELLA FREQUENZA DELLA RADIAZIONE ~~ETI~~ CHE LO INVESTE, E NON DELL'INTENSITÀ.

$$E_c \leq h\nu - W$$

W: FUNZIONE DI LAVORO
DEL MATERIALE

h: COSTANTE DI PLANCK

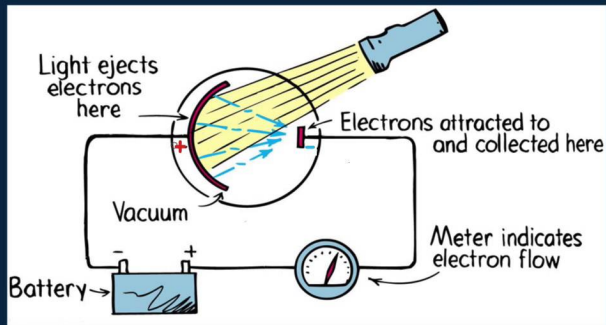
\nu: FREQUENZA DELLA
RADIAZIONE ETI.

L'ENERGIA DEGLI
ELETTRONI EMESSI DIPENDE
DAL COLORE DELLA
LUCE (:-)

LA REAZIONE FU... OSTILE! PER 20 ANNI IL POVERO INGEGNERO COMBATTÈ UNA BATTAGLIA SOLITARIA PER DIPENDERE IL "SUO" QUANTO DI LUCE.

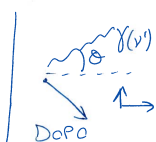
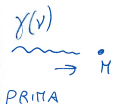
NEL 1916, MILLIKAN CONFERMÒ SPERIMENTALMENTE L'IPOTESI E LA SPIEGAZIONE, PUR CONTINUANDO AD ESPRIMERE STRENUA RESISTENZA VERSO LA TEORIA SEMICORPUSCOLARE

PHOTOELECTRIC EFFECT



EFFETTO COMPTON

⑧



$$\begin{aligned}
 p_i + p_e &= p_f + p_e' \\
 E_i + E_e &= E_f + E_e' \\
 0 &= p_f \cos \theta + M v_x \\
 0 &= p_f \sin \theta + M v_y
 \end{aligned}$$

DIATO RETTA ALL'IMPIEGATO

$$\begin{aligned}
 E_f &= \nu h & E_f' &= \nu' h \\
 E_e &= M c^2 & E_e' &= \frac{M' c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}
 \end{aligned}$$

MASSA/ENERGIA RELATIVISTICA

RISOLVENDO IL SISTEMA SI OTTIENE

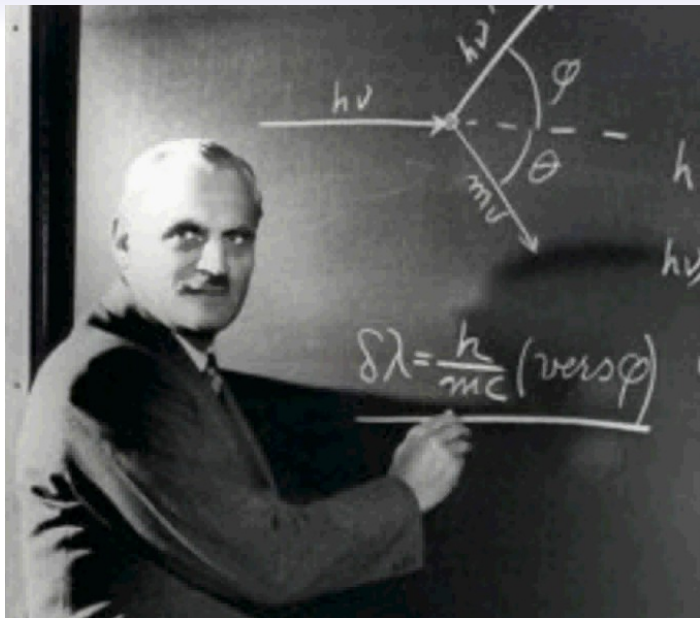
$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{M c} (1 - \cos \theta)$$

FORMULA DELLA LUNGHEZZA D'ONDA DI COMPTON

FUNZIONA BENE!

LA LUCE VIENE ASSORBITA ED EMESSA IN PACCHETTI MA NON SOLO: INTERAGISCE COME SE FOSSE UN PACCHETTO...

NEL 1921 L'IMPIEGATO VINCE IL PREMIO NOBEL
 NEL 1926 IL "QUANTO DI LUCE" PRENDE IL NOME DI **FOTONE**
 MA LA STORIA DEL FOTONE È ANCORA TUTTA DA RACCONTARE



FOTONE IN TEORIE QUANTISTICHE DI CAMPO

⑨

I FOTONI SONO "QUANTI" DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO



SONO CONTINUAMENTE EMESSI ED ASSORBITI DA UNA CARICA SITUATA IN UN PUNTO DELLO SPAZIO-TEMPO TRASFERISCONO LE INFORMAZIONI AD ALTRE CARICHE

INTERPRETIAMO L'AZIONE CHE ESERCITA UNA CARICA SULL' ALTRA COME SE FOSSE "MEDIATA" DAL FOTONE (DA UNO SCAMBIO DI FOTONI). QUESTO CONCETTO SI ESTENDE A TUTTE LE FORZE CONOSCIUTE IN NATURA (INCLUSA LA GRAVITA').

ATTENZIONE; NON SI STA PARLANDO SEMPLICEMENTE DI TRASFERIRE UN' INFORMAZIONE CINEMATICA, MA DI UNA COMPLETA INFORMAZIONE SULLO STATO QUANTISTICO DEL SISTEMA!

QUESTO TIPO DI INTERPRETAZIONE IMPONE CORREZIONI SUGLI SPETTRI ATOMICI, IN SEGUITO VERIFICATE SPERIMENTALMENTE

LAMB SHIFT: PREMIO NOBEL NEL 1955.

KLOCKWORKS

PRESENTS

BEN KLOCK

AMBIENT FLOOR: THE BLACK DOG

RØDHÅD

DVS1

PRURIENT

SURGEON LIVE

SIGHA

DJ NOBU

ALEKZANDRA

ETAPP KYLE

PHOTON

PRINTWORKS LONDON

01.04.18

MIDDAY UNTIL 11 PM

PRINTWORKS
LONDON

THE
HYDRA

CINEMATICA RELATIVISTICA

(10)

ALBERT EINSTEIN IMMAGINÒ CHE DUE SISTEMI INERZIALI S E S' , CON S' IN MOTO CON VELOCITÀ v RISPETTO AD S , PRESENTINO UNA SPECIFICA DESCRIZIONE RELATIVA DEGLI EVENTI. DICIAMO CHE $v = v_x \hat{x}$ E RESETTIAMO DEGLI OROLOGI ALL'ORIGINE DEI SISTEMI DI RIFERIMENTO ($t = t' = 0$ QUANDO $x = x' = 0$). SUPPONIAMO CHE AL TEMPO t ACCADA UN EVENTO IN (x, y, z) . COME È DESCRITTO L'EVENTO IN S' ?

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - vt); \\ t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right); \\ y' = y; z' = z; \end{cases}$$



TRASFORMAZIONI DI LORENTZ

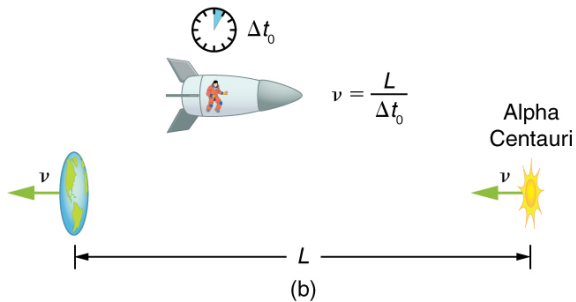
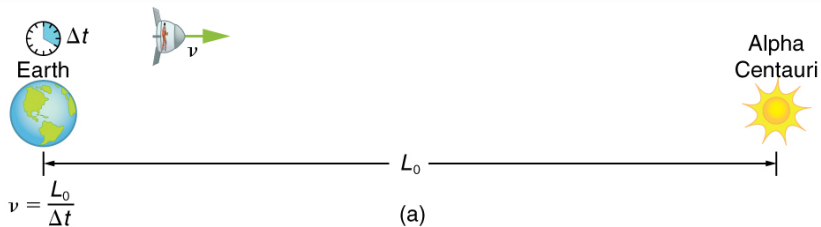
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$\xrightarrow{v \ll c} 1$ (GALILEO)
 $\xrightarrow{v \rightarrow c}$

LA VELOCITÀ RELATIVA DEI SISTEMI MESCOLO SPAZIO E TEMPO NELLE OPERAZIONI DI TRASFORMAZIONE

CONSEGUENZE ANTI-INTUITIVE:

- SIMULTANEITÀ NON UNIVERSALE: DUE EVENTI SIMULTANEI IN S NON LO SONO IN S' : $t'_A - t'_B = \frac{\gamma v}{c^2}(x_B - x_A)$
- CONTRAZIONE LUNGHEZZE } $x_B - x_A = (x'_B - x'_A) \gamma$
- DILATAZIONE TEMPI } $t_B - t_A = (t'_B - t'_A) \gamma$
- COMPOSIZIONE DELLE VELOCITÀ: $u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}} \rightarrow$ SE $u' = c$ ANCHE $u = c$



IL NUCLEO (1934-1947)

(11)

COSA TIENE INSIEME PROTONI E NEUTRONI NEL NUCLEO? UNA FORZA MOLTO PIU' INTENSA DI QUELLA EM.: LA FORZA NUCLEARE "FORTE"

CARATTERISTICA CHIARA: RAGGIO CORTISSIMO (NON NE ABBIAMO EVIDENZA NELLA VITA DI TUTTI I GIORNI)

YUKAWA 1934: PROTONI E NEUTRONI SONO ATTRATTI DA UN CAMPO CHE DEVE ESSERE QUANTIZZATO.

MA DEVE ESSERE A CORTO RAGGIO, QUINDI MASSICCIO.

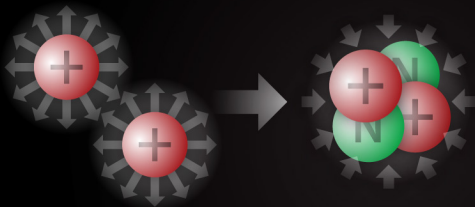
PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE ENERGIA-TEMPO: $\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \frac{h}{2\pi}$

MA I DUE NUCLEONI SCAMBIANO UN CAMPO π MASSIVO (MEDIATORE)

..... LADDOVE IL PRINCIPIO D'INDETERMINAZIONE "PERMETTE LA CREAZIONE" DI UNA MASSA m_π PERCHE' LA MEDIAZIONE AVVENGA IN UN TEMPO $\Delta t \leq \frac{h}{2\pi E}$. IL TEMPO DEVE GARANTIRE LA PROPAGAZIONE DENTRO UN TIPICO RAGGIO NUCLEARE.

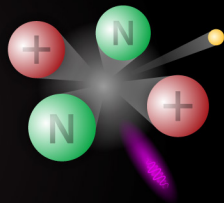
$$\Delta E \cdot \Delta t = \Delta(m_\pi c^2) \cdot \Delta\left(\frac{r_0}{c}\right) \sim \frac{h}{2\pi} \rightarrow m_\pi \sim \frac{h}{2\pi r_0 c} \left\{ \begin{array}{l} h = 6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \\ r_0 = 10^{-15} \text{ m} \\ c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} m_\pi = 300 m_e = \\ 3 \cdot 10^{-28} \text{ Kg} \end{array} \right.$$

Strong Nuclear Force



Binding protons in atomic nuclei

Positively charged particles naturally repel each other, it takes an extreme amount of force to hold protons together. The strong nuclear force overcomes the repulsion between protons to hold together atomic nuclei. Without the strong nuclear force, complex nuclei cannot form.



Breaking the bond

Enormous energy is released as gamma rays and neutrinos when the strong nuclear force is broken between protons and neutrons.

I MESONI E GLI INATTESI MUONI

(12)

LA MASSA DEL MESONE SI COLLOCA TRA ELETTRONE E PROTONE, DA CUI IL NOME. NEL 1937 FORONO SCOPERTI I MESONI π PROVENIENTI DAL COSMO. LE MISURE PRESENTAVANO ALCUNE DISCREPANZE. ~~ATOMICI~~ "MESONI" ERANO MOLTO PIU' LEGGERI E NON INTERAGIVANO CON I NUCLEI ATOMICI.

1947: I RAGGI COSMICI CONSISTEVANO DI DUE PARTICELLE:

- 1) I MESONI π \leftarrow VERI MESONI PREDETTI DA YUKAWA
- 2) I MUONI μ \leftarrow IMPOSTORE; CUGINO TAGLIA "LARGE" DI e^-

ESERCIZIO: UN PROTONE COLPISCE L'ATMOSFERA E PRODUCE π
QUESTO DECADA IN $\pi \rightarrow \mu + X$ E SAPPIAMO CHE

CINEMATICA CLASSICA:

$$L_{\mu} = \Gamma_{\pi} \cdot v_{\mu} = 600 \text{ m}$$

$$L_{\pi} = \Gamma_{\pi} \cdot v_{\pi} = 6 \text{ m}$$

CHIARAMENTE
FALLACE

CIN. REL. TERRA

$$L_{\mu} = v_{\mu} \cdot \Gamma_{\mu} \cdot \gamma \approx 9500 \text{ m}$$

$$L_{\pi} = v_{\pi} \cdot \Gamma_{\pi} \cdot \gamma \approx 95 \text{ m}$$

$$\gamma \approx 16$$

IL MUONE

ARRIVA A TERRA
VITA MEDIA LONGA

CIN. REL. μ/π

$$d' = d/\gamma \approx 500 \text{ m}$$

DAL "LORO" SISTEMA
LA TERRA DISTA

SOLO 500 m.

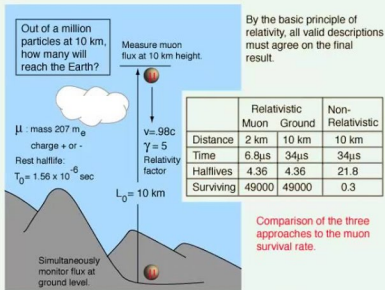
IL MUONE ARRIVA

A TERRA

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_{\mu} &= 2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \\ \Gamma_{\pi} &= 2 \cdot 10^{-8} \text{ s} \\ d &= 8000 \text{ m} \\ v_{\mu} - v_{\pi} &\approx 0.998 c \end{aligned} \right\}$$

CHI LO HA
ORDINATO?

Muon Experiment: Comparison of Reference Frames



ANTIPARTICELLE (1930-1936)

(13)

LA MECCANICA QUANTISTICA FU COMPLETATA TRA IL 1923 E IL 1926.

LA VERSIONE RELATIVISTICA RICHIEDETE PIÙ TEMPO (E UN NUOVO PARADIGMA)

I PRIMI TENTATIVI CONSEGUivano DALLA FORMULAZIONE DI SCHRÖDINGER

CLASSICAMENTE

$$\frac{p^2}{2m} + V = E$$

PRESCRIZIONE QUANTISTICA

$$| p \rightarrow \frac{\hbar}{i} \nabla |, | E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |$$

QUANTISTICAMENTE

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V\psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi$$

INFATTI LA FORMULAZIONE RELATIVISTICA CLASSICA IMPLICA $E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$
 DA CUI È IMMEDIATO OTTENERE PER $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + \nabla^2 \psi = \left(\frac{mc}{\hbar}\right)^2 \psi \quad \text{EQUAZIONE DI KLEIN-GORDON (VALIDA PER BOSONI MEDIANI)}$$

OTTENERE UNA FORMULAZIONE CHE "DISCENDA" DA $E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$

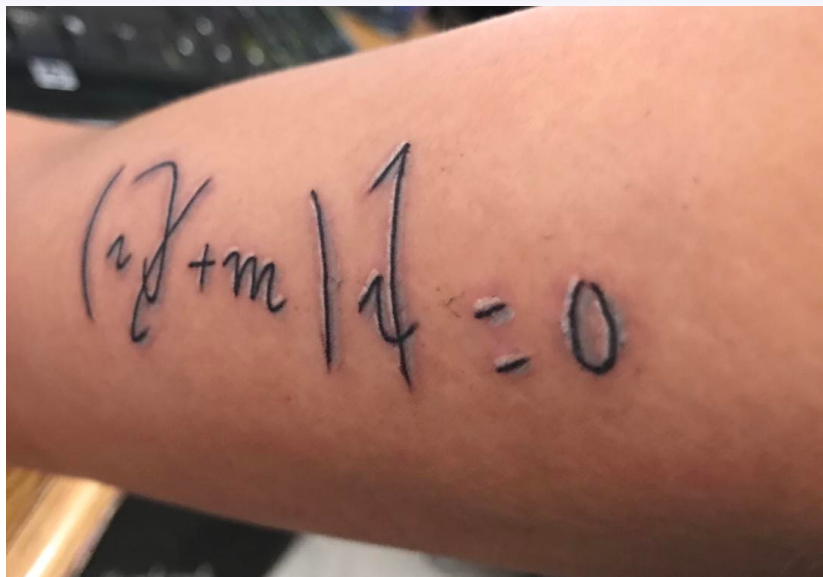
NON È FACILE; **PAUL DIRAC** NEL 1928 FORMULA L'EQUAZIONE:

$$i\hbar \not{\partial} \psi - mc\psi = 0$$

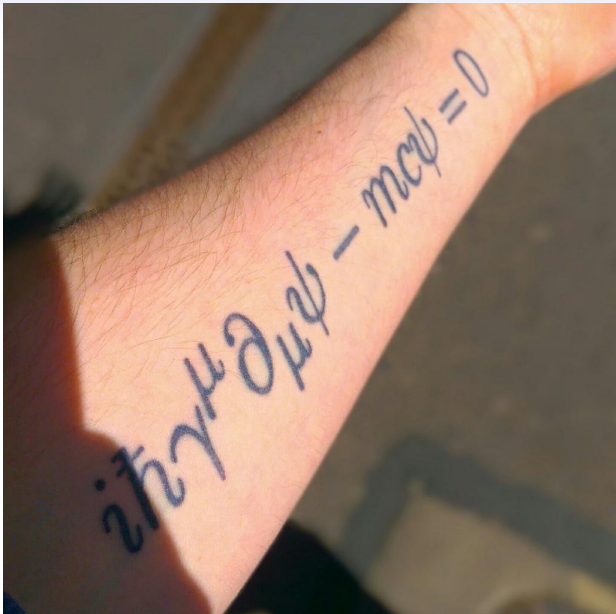
ψ È UN BI-SPINORE
 $\not{\partial} = \partial^\mu \gamma_\mu$ MATRICI

PROBLEMA: PER OGNI SOLUZIONE $E > 0$ AMMETTE UNA SOLUZIONE $E < 0$





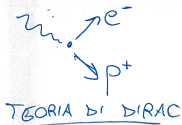




IL MARE DI DIRAC OVERO UNO SPLENDIDO FALLIMENTO (14)

DIRAC IPOTIZZÒ CHE TUTTI I LIVELLI DI ENERGIA NEGATIVI FOSSERO "STIPATI" DI ELETTRONI E CHE QUESTO FOSSE IL MOTIVO PER CUI NESSUN ELETTRONE "PRECIPITAVA" SUGLI STATI ENERGETICI INFERIORI (EMETTENDO ENERGIA INFINITA).

ANDO' OLTRE: IPOTIZZÒ CHE DARE ENERGIA A QUESTO "MARE" FACESSE EMERGERE UN ELETTRONE E LASCIASSE UN "BUCO" DI CARICA OPPOSTA NEGLI STRATI INFERIORI, E CERCO' DI IDENTIFICARLO COL



OVVIAMENTE LA TEORIA MOSTRAVA GROSSI DIFETTI: PREDICEVA L'EMERGERE DI UN "BUCO" DELLA STESSA MASSA DELL' ELETTRONE, E IL PROTONE HA $m_p \sim 2000 m_e$

PROTONE!
LA TEORIA MOSTRAVA CARENZE IRRISOLVIBILI

NEL 1930 SUCCEDÈ L' INCREDBILE: ANDERSON SCOPRE UNA PARTICELLA DEL TUTTO ~~ANALOGA~~ ANTECA ALL' ELETTRONE MA CON CARICA POSITIVA: IL POSITRONE

PRIMA EVIDENZA DI ANTIMATERIA

FEYNMAN E STUCKELBERG CAPISCONO CHE GLI STATI NEGATIVI D' ENERGIA NON SONO ALTRO CHE STATI POSITIVI DELLA RELATIVA ANTI PARTICELLA



DUALISMO PARTICELLA-ANTIPARTICELLA

(15)

IN UNA TEORIA QUANTISTICA DI CAMPO, PER OGNI TIPO DI PARTICELLA DEVE ESISTERE UNA CORRISPONDENTE ANTIPARTICELLA CON CARICHE OPPOSITE

1933: SCOPERTA DELL' **ANTIPROTONE**

1936: SCOPERTA DELL' **ANTINEUTRONE**.



LA CARICA ELETTRICA NON È L'UNICO NUMERO QUANTICO

ALCUNE PARTICELLE SONO "AUTOCONIUGATE" (CIÒ IDENTICHE ALLA LORO ANTIPARTICELLA), COME AD ESEMPIO IL FOTONE γ (E IL BOSONE DI HIGGS...)

UNA DELLE CONSEGUENZE DI CIÒ È LA "SIMMETRIA A INCROCIO" DEI PROCESSI:

DIFFUSIONE COMPTON

$$\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$$



ANNICHILAZIONE DI COPPIA

$$e^+ e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$

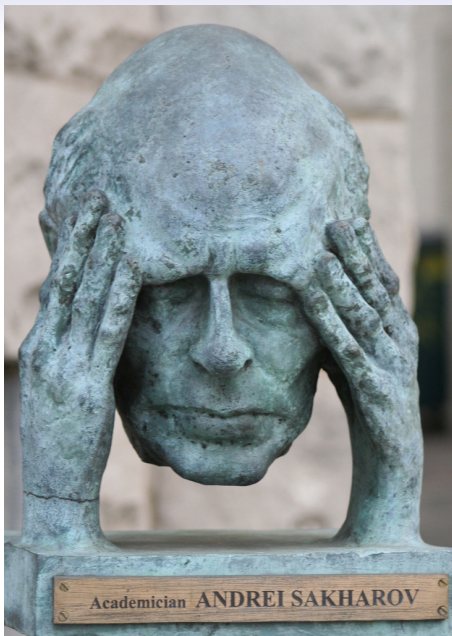


SONO LO STESSO PROCESSO DAL PUNTO DI VISTA DINAMICO

RELATIVITÀ SPECIALE + TEORIA QUANTISTICA DI CAMPO =

SIMMETRIA **MATERIA-ANTIMATERIA**.

COME MAI L'UNIVERSO SCELSE FATTO DI SOLA MATERIA?



NEUTRINI (1930-2000)

16

TORNIAMO NUOVAMENTE AL 1930 (ANCORA?!): C'È UN PROBLEMA COL "DECADIMENTO β " = $n \rightarrow p^+ + e^- + \dots$



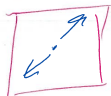
(IN UN ATOMO, ALL'EPOCA IL NEUTRONE NON ERA STATO ANCORA SCOPERTO...)

L'EMISSIONE DELL'ELETTRONE CONSERVA LA CARICA, BENISSIMO. PERÒ, SE FOSSE UN DECADIMENTO A DUE CORPI, LE ENERGIE DEGLI STATI FINALI SAREBBERO DETERMINATE:

$$E({}^3_1\text{H}) = E({}^3_2\text{He}) + E_e \quad \left| \quad \begin{array}{l} \text{ELETTRONE ED ELIO IN DIREZIONI OPPOSITE} \\ \text{ELETTRONE ED ELIO IN DIREZIONI OPPOSITE} \end{array} \right.$$

$$0 = p({}^3_2\text{He}) + p_e \quad \left| \quad |p({}^3_2\text{He})|^2 = |p_e|^2 = \frac{E_e^2 - m_e^2 c^2}{c^2}, \text{ DA CUI:} \right.$$

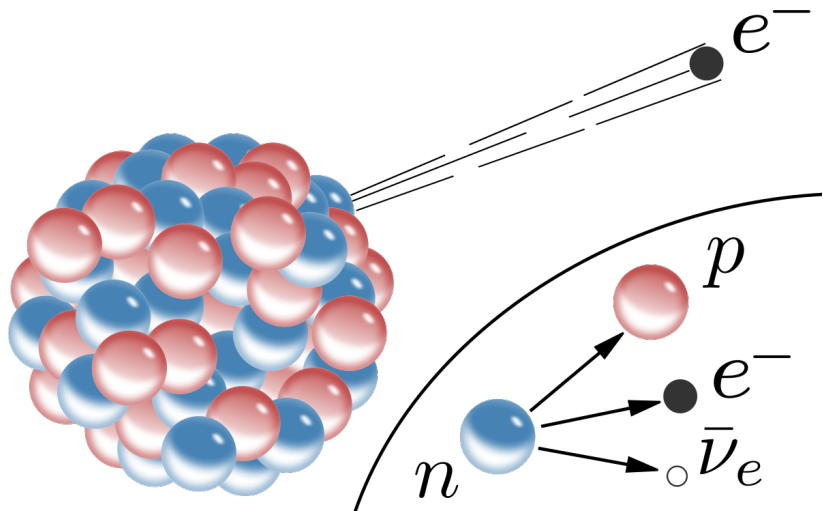
$$E_e = \left(\frac{m_H^2 - m_{\text{He}}^2 + m_e^2}{2m_H^2} \right) c^2 \quad \left| \quad \begin{array}{l} \text{INVECE L'ESPERIMENTO MOSTRAVA UNO} \\ \text{SPETTRO CON ENERGIA VARIABILE.} \end{array} \right.$$



IL RISULTATO RIUSCIVA A DETERMINARE SOLO L'ENERGIA MASSIMA

O SI BOTTA VIA LA CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA (BOMR)

O SI ASSUME CHE QUALCOS'ALTRO VENGA EMESSE NEL DECADIMENTO.
(PAULI)



LA TEORIA DI FERMI

(17)

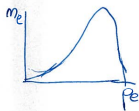
PRENDIAMO PER BUONA L'IPOTESI DI PAULI: C'È UNA QUARTA PARTICELLA IN GIOCO: $m \rightarrow p + e + \nu_e \Rightarrow$ QUESTO IMPLICA CHE

$$E_m = E_p + E_e + E_\nu \Rightarrow |p_p|^2 = |p_e|^2 + |p_\nu|^2 + 2|p_e||p_\nu|\cos\theta, \text{ PER } m_e \ll m_p, m_m$$

$$0 = p_p + p_e + p_\nu$$

$$E_e \approx \frac{c^2}{2} \left[\frac{c(m_m^2 - m_p^2) - 2m_m p_y}{c m_p - (1 - \cos\theta) p_y} \right] \text{ ADESSO L'ENERGIA NON È FISSATA: DIPENDE DA } p_y \text{ E } \cos\theta, \text{ È UNA FUNZIONE}$$

LA FUNZIONE È CALCOLATA DA FERMI E CORRISPONDE PERFETTAMENTE



m_e : NUMERO ELETTRONI

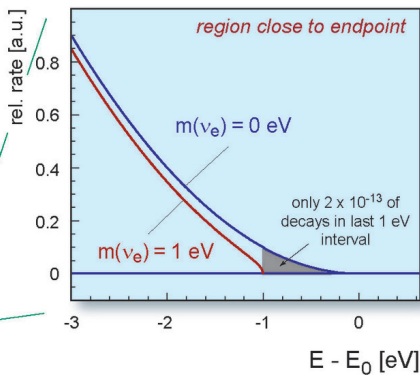
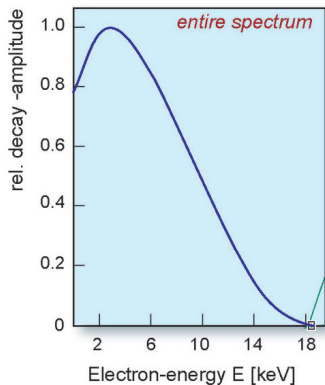
p_e : IMPULSO ELETTRONI

IL NUMERO TOTALE DI ELETTRONI CALCOLATO PRESENTA SOLO UN' INCOGNITA: LA COSTANTE DI QUESTA NUOVA FORZA IN GIOCO

SOSTITUENDO I VALORI SPERIMENTALI SI OTTIENE

$g_B \sim 10^{-7} \hbar c$, CHE È CINQUE ORDINI DI GRANDEZZA PIÙ DEBOLE

DELLA COSTANTE E.M.: $\frac{e^2}{\hbar c} \sim 10^{-2}$; LA CHIAMIAMO "FORZA NUCLEARE DEBOLE".



MESONI, MUONI & NEUTRINI

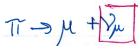
(18)

NEL 1949 POWELL, FOWLER & PERKINS PUBBLICANO UNA FOTO



È LA TRACCIA DI UN PIONE CHE DECADA IN UN MUONE CHE EMERGE A 90°, E CHE POI DECADA IN UN ELETTRONE, ANCORA EMERGENTE A 90°. L'ENERGIA DEL MUONE È SEMPRE LA STESSA:

QUESTO SUGGERISCE UN DECADIMENTO A 2 CORPI:



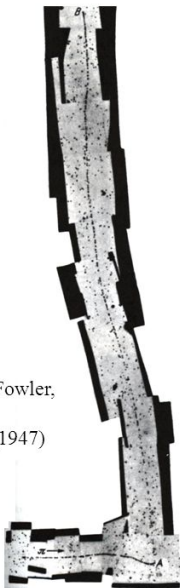
INVECE L'ENERGIA DELL'ELETTRONE VARIA DRAMMATICAMENTE:



L'ASSENZA DI TRACCE CI HA FORNITO EVIDENZA DELLA ESISTENZA DEI NEUTRINI.

TUTTAVIA, LA PRIMA EVIDENZA DIRETTA SI EBBE SOLO A META' DEGLI ANNI '50; OSSERVAZIONE DEL "β-INVERSO"

$$\bar{\nu} + p^+ \rightarrow n + e^+ \quad 5 \cdot 10^{13} \frac{\text{PARTICELLE}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \sim \boxed{2-3} \frac{\text{EVENTI}}{h} \quad \left| \begin{array}{l} \text{NON È} \\ \text{FINITA, ...} \end{array} \right.$$



C.F.Powell, P.H. Fowler,
D.H.Perkins
Nature **159**, 694 (1947)



Nature **163**, 82 (1949)

NEUTRINI E ANTINEUTRINI

ESSENDO ELETTRICAMENTE NEUTRI, CHE DISTINZIONE C'È? 19

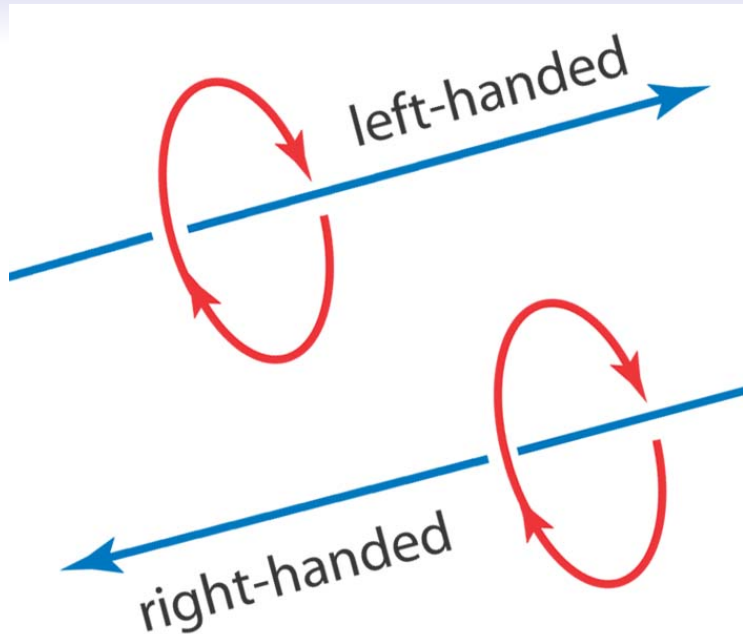
IL FOTONE È L'ANTIPARTICELLA DI SE STESSO COSÌ COME IL PIONE NEUTRO. L'ANTINEUTRONE NON È IDENTICO AL NEUTRONE UTILIZZANDO LA SIMMETRIA AD INCROCIO, NEL 1959 SI VERIFICÒ CHE $\nu_e + m \rightarrow p^+ + e^-$ ACCADE, MA $\bar{\nu} + m \rightarrow p^+ + e^-$ NON ACCADE. REGOLA EMPIRICA: CONSERVAZIONE DEL NUMERO LEPTONICO.

$$\left. \begin{array}{l} L = +1 \text{ PER } e^-, \mu^-, \nu_e, \nu_\mu \\ L = -1 \text{ PER } e^+, \mu^+, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu \end{array} \right\} \begin{array}{l} \bar{\nu}_e^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu^{(1)} \\ \mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu^{(1)} + \nu_e^{(1)} \end{array}$$

COSA DISTINGUE NEUTRINI E ANTINEUTRINI? IL NUMERO LEPTONICO!
QUESTA È UNA CLASSICA SIMMETRIA ACCIDENTALE DEL MODELLO.

IN REALTÀ LA DISTINZIONE È MOLTO PIÙ PROFONDA, E COINVOLGE LE SIMMETRIE CON CUI IL MODELLO STANDARD È COSTRUITO: LA SIMMETRIA $SU(2)_L$: ν È "SINISTRORSO" $\bar{\nu}$ È "DESTORSO".

HANNO SPIN (NUMERO QUANTICO) $\frac{1}{2}$ COME GLI ELETTRONI/MUONI.



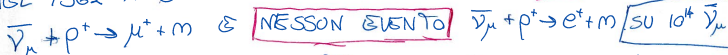
NUMERO E SAPORE LEPTONICI

TUTTO FAREBBE PENSARE CHE IL SEGUENTE PROCESSO POSSA (E DEBBA) ACCADERE: (20)



È INVECE NON VE. N'È TRACCIA $B_{\mu}(\mu \rightarrow e \gamma) \leq 4 \cdot 10^{-3}$
L'ASSENZA SUGGERIREBBE UNA LEGGE DI CONSERVAZIONE/SIMMETRIA
QUALCOSA CHE PRESERVI LA "MONICITÀ": UN NUMERO LEPTONICO
DEDICATO AD OGNI FAMIGLIA, E QUESTO CI FA DISTINGUERE FORTIAMENTE
I NEUTRINI DEL DECADIMENTO MUONICO $\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_{\mu}$.

IL PRIMA ESPERIMENTO DI OSSERVAZIONE DIRETTA FU CONDOTTO
NEL 1962 A BROOKHAVEN: VENNERO CONTATI 29 EVENTI



NEL 1962 QUINDI IL NUMERO DEI NEUTRINI SALÌ A 8.

PER I SUCCESSIVI 13 ANNI IL SETTORE DEI LEPTONI
NON OFFRÌ SURPRESE.

QUESTO È IL MOMENTO PER UNA PAUSA, DOMANDE?