



1

LA “RIVOLUZIONE” DELLA FISICA “MODERNA”

Paola Gianotti



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

PERCHÈ SI PARLA DI RIVOLUZIONE?



Sì, è stata proprio una rivoluzione. Fino a quel momento si davano per scontati **due principi fondamentali**:

- **gli eventi accadono in uno spazio che li contiene ad un istante del tempo che fluisce indipendentemente;**
- **il nostro osservare non disturba lo svolgersi degli eventi.**

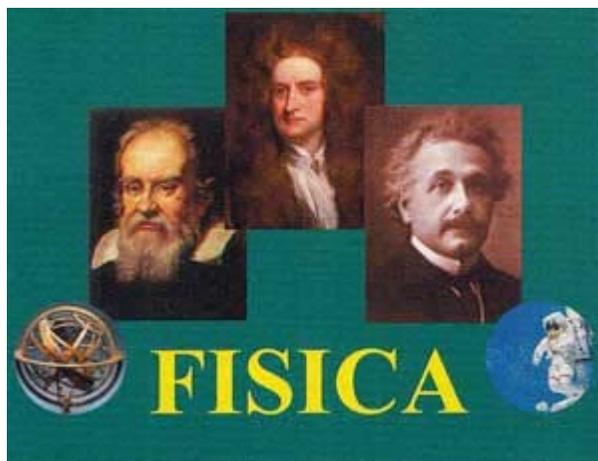


Ma alla fine dell '800 entrambe le **ipotesi** si sono rivelate **sbagliate**, imponendoci un drastico cambiamento di mentalità.



FISICA “CLASSICA”, FISICA “MODERNA”

La **fisica “classica”** è l’insieme delle teorie sviluppate nello scenario dell’universo newtoniano che prevede che tutti i **fenomeni** abbiano luogo **nello spazio tridimensionale descritto dalla geometria euclidea classica** (uno spazio sempre immobile e immutabile). Tutti i cambiamenti che si verificano nel mondo fisico sono descritti in funzione di una dimensione separata, chiamata **tempo, anch'essa assoluta**.



Chiamiamo **fisica “moderna”** l’insieme delle teorie che sono state sviluppate a partire dal ‘900 per spiegare fenomeni che non erano descrivibili con un approccio “classico”.

- **Meccanica quantistica**
- **Teoria della relatività**

L'ALBA DELLA FISICA MODERNA

Difficile dire quando è cominciata la fisica moderna. Di certo lo studio della termodinamica e dei gas, che utilizzava un approccio “statistico” ai fenomeni, insieme alla codifica dell'elettromagnetismo, hanno portato ad avere nuovi atteggiamenti verso i fenomeni osservati.

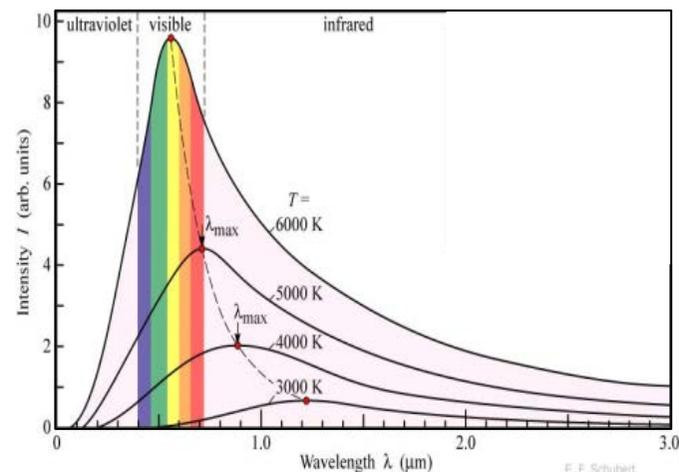


Max Karl Ernst Ludwig Planck
(1858-1947)

Per spiegare lo spettro di corpo nero, Planck ipotizzò che la radiazione elettromagnetica potesse essere scambiata solo in pacchetti discreti di energia: **quanti**

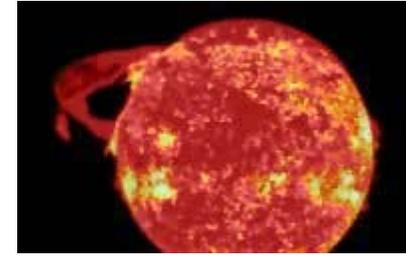
$$E = h \nu \cdot n$$

$$h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$



E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org

UN'UTILE CONSEGUENZA



La legge della “radiazione del corpo nero”, che segnò la nascita della meccanica quantistica, ha come conseguenza che ogni corpo riscaldato emette una radiazione elettromagnetica di colore (frequenza) caratteristico che dipende dalla temperatura.

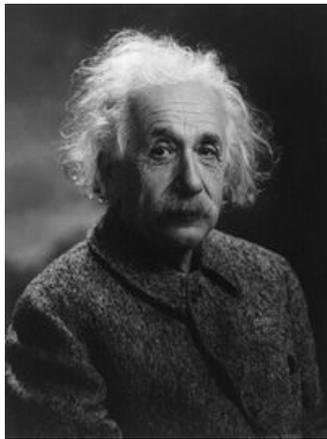
In astronomia questo è usato per calcolare la temperatura di una stella.

Classe Spettrale	Tipo di Stella	Temperatura in Gradi
0-B 	Bianco Azzurre	10000 - 60000
A 	Bianche	7500 - 10000
F 	Bianche	6000 - 7500
G 	Gialle	5000 - 6000
K 	Arancio	3500 - 5000
M 	Rosso	meno di 3000

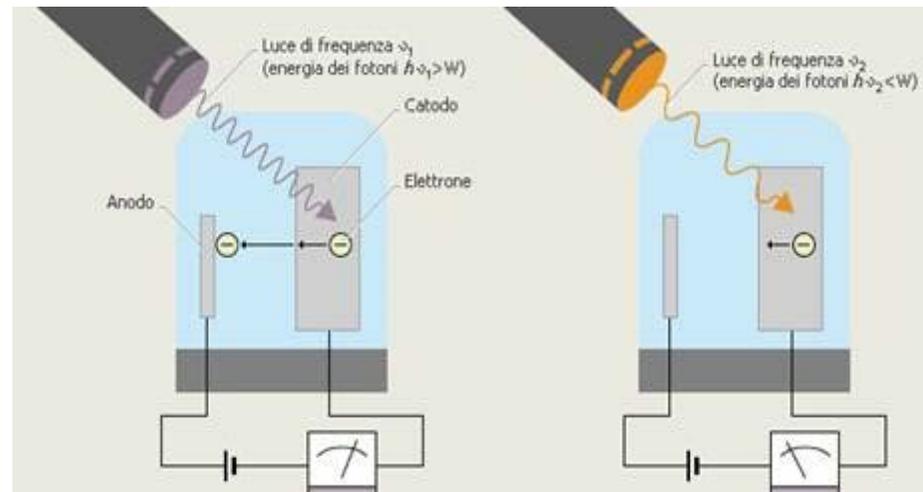
La catalogazione delle stelle si basa principalmente sull'energia da esse emessa. Infatti, l'energia prodotta dal nucleo stellare viene irraggiata sotto forma di luce e calore le cui lunghezze d'onda dipendono sostanzialmente dalla temperatura superficiale e dalla composizione chimica.

QUANTI DI LUCE

L'idea rivoluzionaria di Planck cominciò a circolare e si vide che accettandola si potevano spiegare alcuni fenomeni fino ad allora oscuri.



Albert Einstein
(1879 – 1955)



Nel 1905 Albert Einstein ammettendo i quanti di luce riuscì a spiegare **l'effetto fotoelettrico** il fenomeno di emissione di elettroni da parte di un metallo illuminato da “luce” di frequenza opportuna. I raggi luminosi, particelle chiamate fotoni, hanno energia direttamente proporzionale alla frequenza dell'onda corrispondente. I fotoni cedono la propria energia agli elettroni e se questa è sufficiente ne provocano la fuoriuscita.

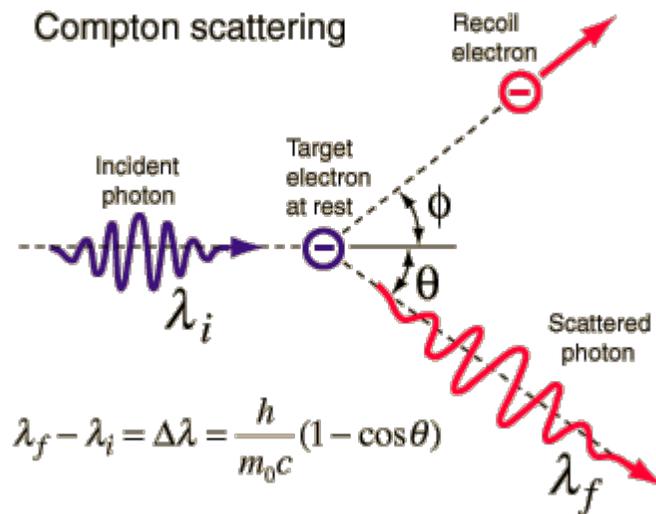
$$E_c = h (\nu - \nu_0)$$

L'EFFETTO COMPTON

Nel 1923 il fisico americano Arthur Compton sperimentò che l'interazione fra elettroni e quanti di luce avveniva come fra due particelle.

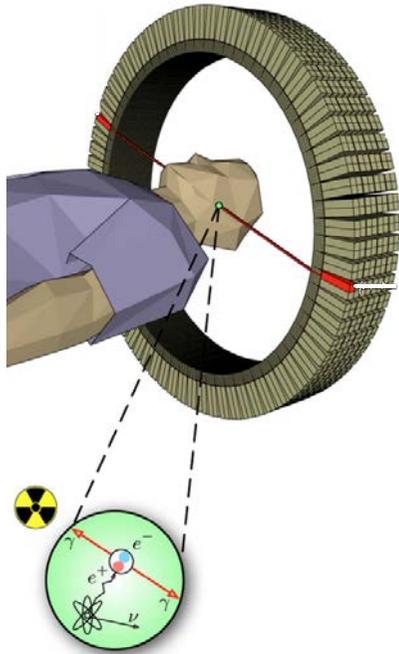


Arthur Holly Compton
(1892-1962)



La lunghezza d'onda della radiazione, quindi la sua energia, cambia a seconda dell'angolo di emissione analogamente a ciò che succede negli urti elastici fra due sfere!

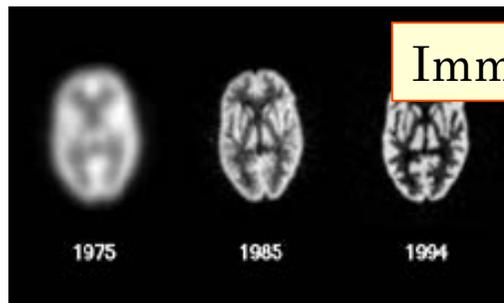
POSITRON EMISSION TOMOGRAPHY



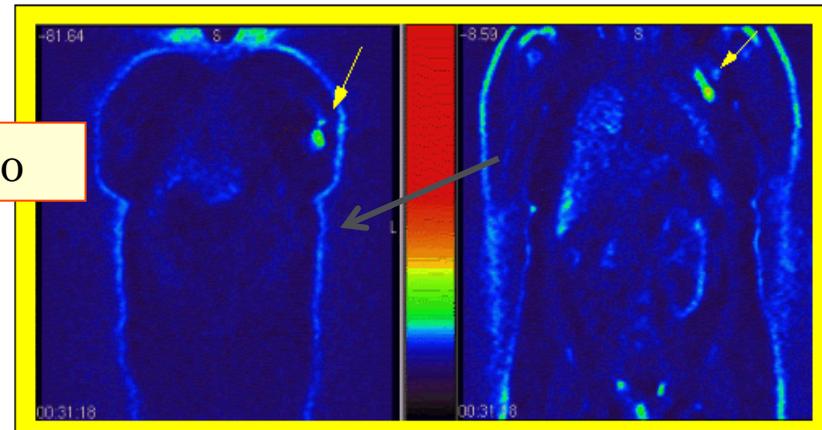
due fotoni emessi in direzione opposta
sono rivelati attraverso l'effetto Compton



Immagine di un tumore al seno ottenuta con la tecnica PET, la dimensione della massa tumorale è di qualche mm



Immagini del cervello

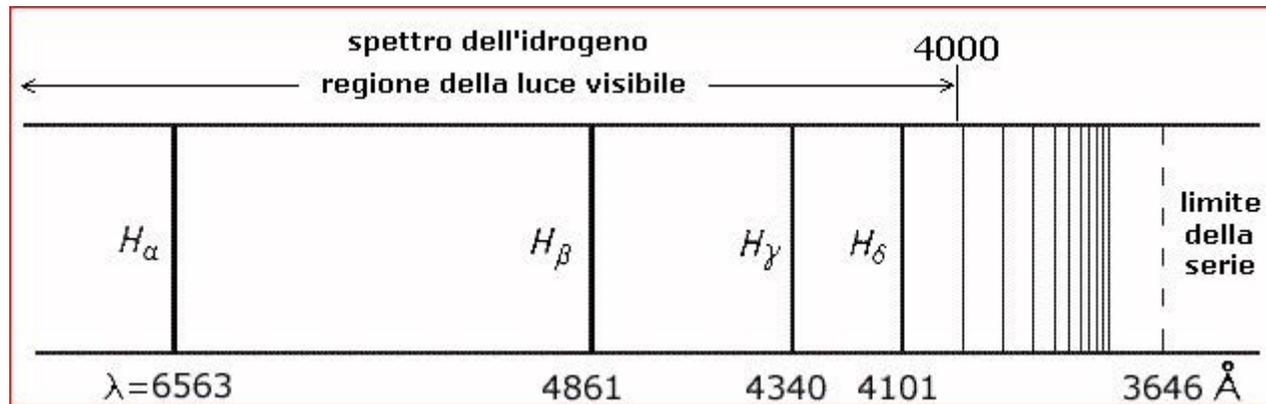


La PET oggi è molto diffusa e praticata grazie anche agli enormi progressi fatti nella produzione di cristalli BGO a basso costo da parte degli esperimenti di fisica delle particelle.

GLI SPETTRI ATOMICI

Il fisico svizzero Balmer aveva scoperto che le frequenze nel visibile emesse dall'atomo di idrogeno eccitato seguivano la relazione empirica

$$\nu_n = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{sec}^{-1} \quad R = 3,289 \cdot 10^{15}$$



Johann Jakob Balmer
(1825-1898)

Questa regolarità sembrava una stranezza della natura, ma celava motivazioni più profonde.

BOHR E LE ORBITE QUANTIZZATE

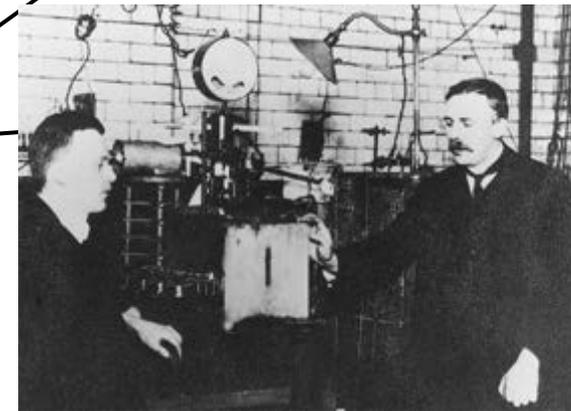
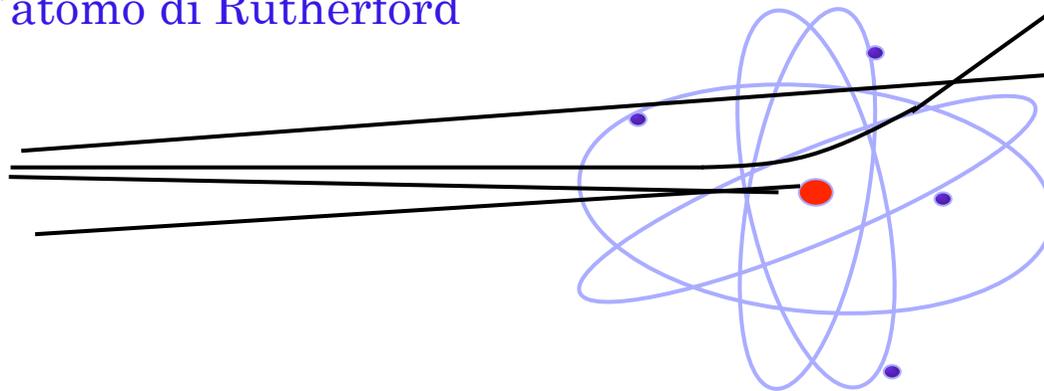
Al fisico danese Bohr va il merito di aver applicato la teoria quantistica alla materia.

Bohr aveva lavorato con Rutherford e sapeva pertanto che l'atomo era costituito da un "nociolo" carico positivamente e da particelle negative "orbitanti" intorno.



Niels Henrik David Bohr
(1885-1962)

L'atomo di Rutherford



Ernest Rutherford
1871 - 1937

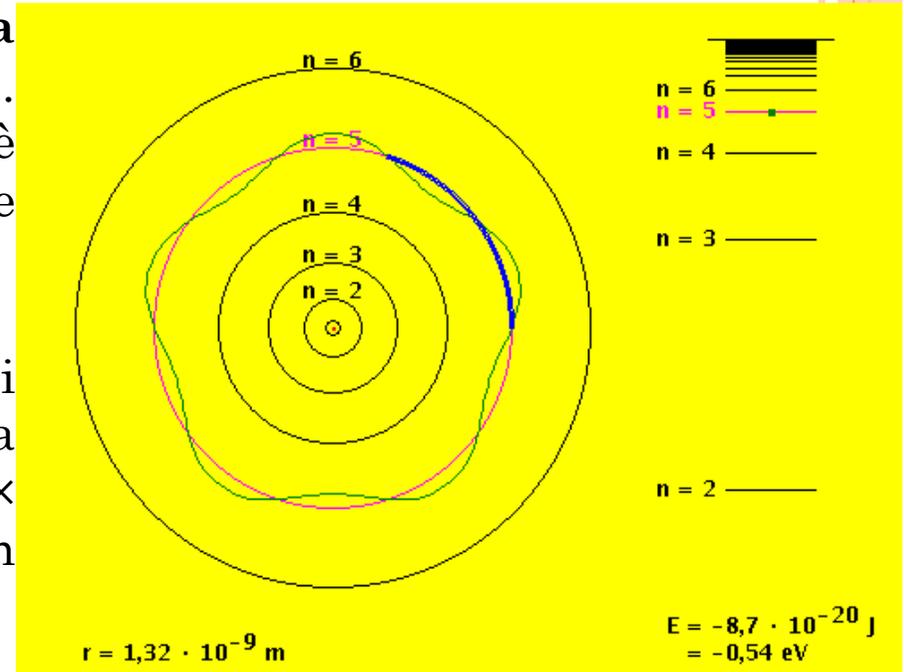
Tuttavia cariche elettriche in movimento emettono radiazione elettromagnetica pertanto non si riusciva a capire come gli atomi potessero essere stabili, infatti gli elettroni, una volta persa la loro energia, avrebbero dovuto cadere sul nucleo!

IL MODELLO ATOMICO DI BOHR

Bohr postulò che **non solo l'energia elettromagnetica, ma anche quella meccanica** potesse essere quantizzata. Questa ipotesi poteva spiegare anche perchè gli atomi emettessero solo alcune frequenze energetiche quando venivano eccitati.

Considerando orbite circolari la condizione di quantizzazione richiede che il prodotto della massa dell'elettrone \times per la sua velocità \times per la distanza percorsa [azione] sia un multiplo di h .

$$m_e \cdot v \cdot 2\pi r = nh$$



La condizione perchè possa realizzarsi un moto circolare è che la forza di attrazione elettrostatica eguagli la forza centrifuga da cui si ricava $v = \frac{e}{\sqrt{m_e r}}$

Sostituendo nella formula di sopra si ottiene il raggio delle orbite fondamentali per l'atomo di idrogeno

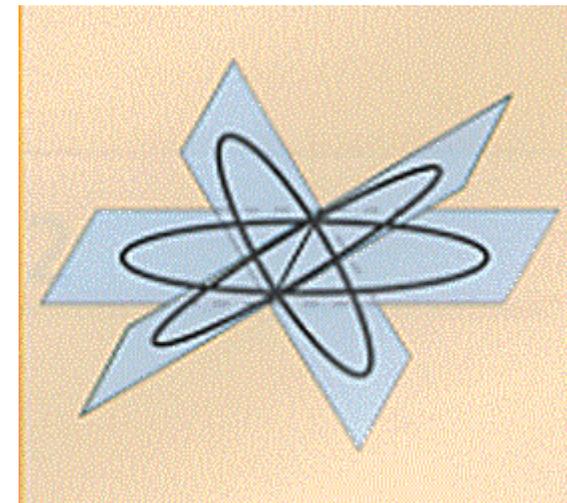
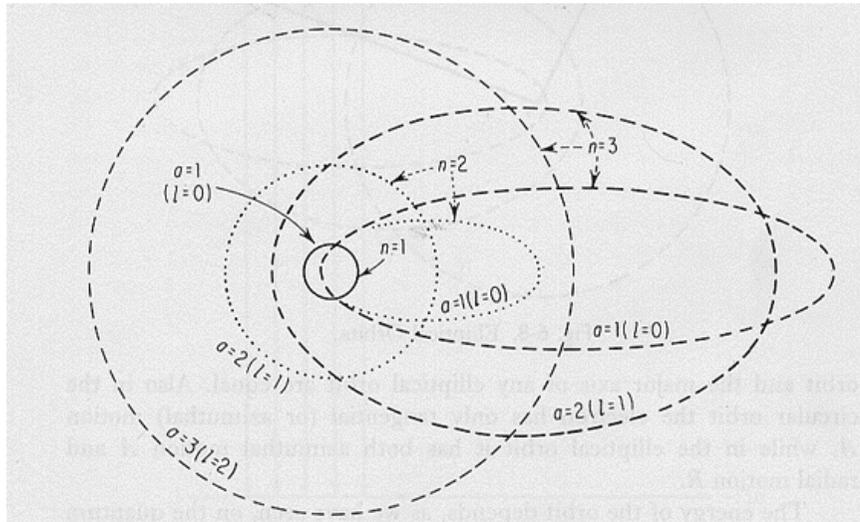
$$r_n = \frac{h^2}{4\pi^2 e^2 m} \cdot n^2$$

LA GENERALIZZAZIONE DI SOMMERFELD



Arnold Sommerfeld
(1868-1951)

I due postulati di Bohr (en. quantizzata e orbite circolari) forniscono un nuovo modello di atomo che è simile a quello di Rutherford con la fondamentale differenza che ora **non tutte le orbite sono permesse all'elettrone**



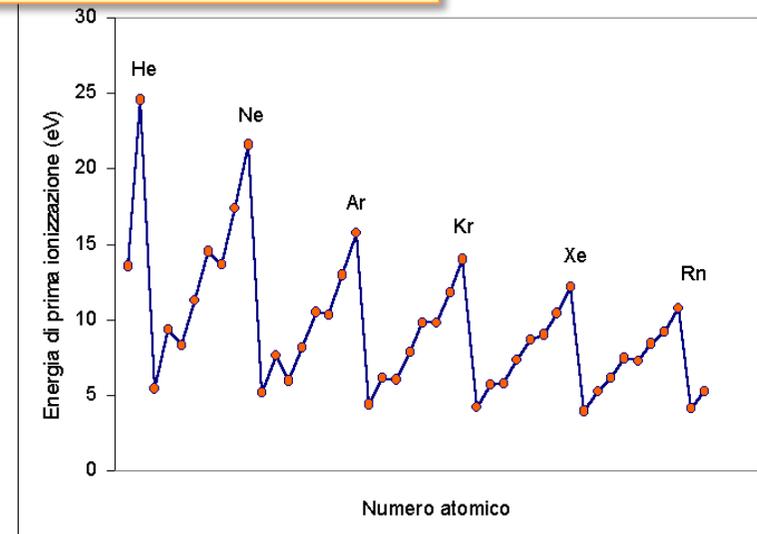
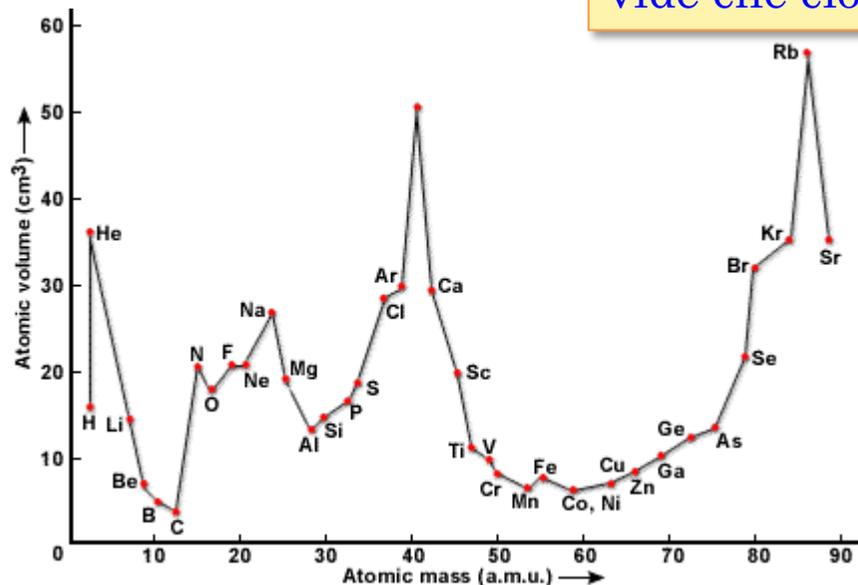
Sommerfeld introdusse orbite più generiche ellittiche definite da tre numeri quantici. Il primo, n , è come quello di Bohr, indica l'orbita su cui l'elettrone si muove (il suo livello energetico). Il secondo, l , ci dà lo schiacciamento delle orbite, Il terzo, m , rende conto del fatto che il piano dell'orbita può avere solo certe determinate inclinazioni rispetto ad un asse di riferimento. Con la generalizzazione di Sommerfeld fu possibile dare ragione alla struttura fine degli spettri atomici.

IL PASSAGGIO AD ATOMI PIÙ PESANTI

Se consideriamo un atomo generico che abbia Z protoni, e quindi anche Z elettroni, si deve sostituire nelle formule precedentemente scritte $e \rightarrow Ze$. Ne segue che i raggi delle orbite quantizzate andrebbero a ridursi andando dall'idrogeno all'Uranio.

Inoltre se gli Z elettroni fossero tutti accumulati sul livello fondamentale, negli atomi più pesanti, sarebbe più difficile estrarli.

Invece, sperimentalmente, si vede che ciò non avveniva!



Deve esistere un principio fondamentale che impedisce agli elettroni di affollarsi sullo stato fondamentale

L'EFFETTO ZEEMAN

Il fisico olandese Zeeman aveva osservato un fenomeno che consiste nello sdoppiamento delle linee spettrali a causa dell'effetto di un campo magnetico esterno.



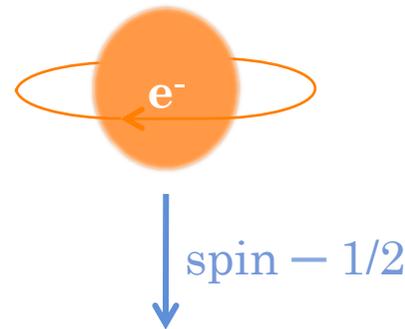
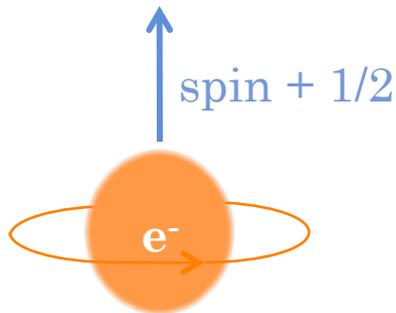
Pieter Zeeman
(1865 – 1943)

Alla luce della quantizzazione il fenomeno poteva essere spiegato introducendo un nuovo numero quantico.

Nel 1925 altri due fisici olandesi Goudsmit e Uhlenbeck proposero che lo sdoppiamento fosse dovuto non ad un nuovo numero quantico, ma all'elettrone stesso che poteva trovarsi ad avere un diverso stato di rotazione.

PAULI: IL PRINCIPIO DI ESCLUSIONE

L'idea che l'elettrone potesse ruotare su se stesso ed avere un momento angolare intrinseco, fu estesa e codificata da Pauli con l'enunciato del famoso "Principio di esclusione"



Wolfgang Ernst Pauli
(1900 – 1958)

Il principio di esclusione afferma che:

- 2 o più elettroni non possono stare nello stesso spazio allo stesso tempo;
- lo stato di un elettrone (inclusa la posizione) è descritto da 4 numeri quantici: n , l , m , s ;
- l'unico modo per due elettroni di condividere lo stesso orbitale è quello di avere lo spin (uno dei quattro numeri quantici) opposto.

LA RISONANZA MAGNETICA NUCLEARE

Non solo gli elettroni, ma tutte le particelle sono dotate di spin. Questo può essere semi-intero (fermioni) o intero (bosoni). Il protone è un fermione e come l'elettrone ha spin semi-intero. Questo fa sì che un atomo di idrogeno che ha un protone come nucleo abbia spin $\pm 1/2$.



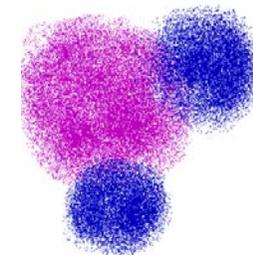
Magnete

Se quindi l'atomo di idrogeno si trova in presenza di un campo magnetico si orienterà // o anti // al campo esterno.

L'acqua, principale costituente del corpo umano, è ricca di idrogeno.

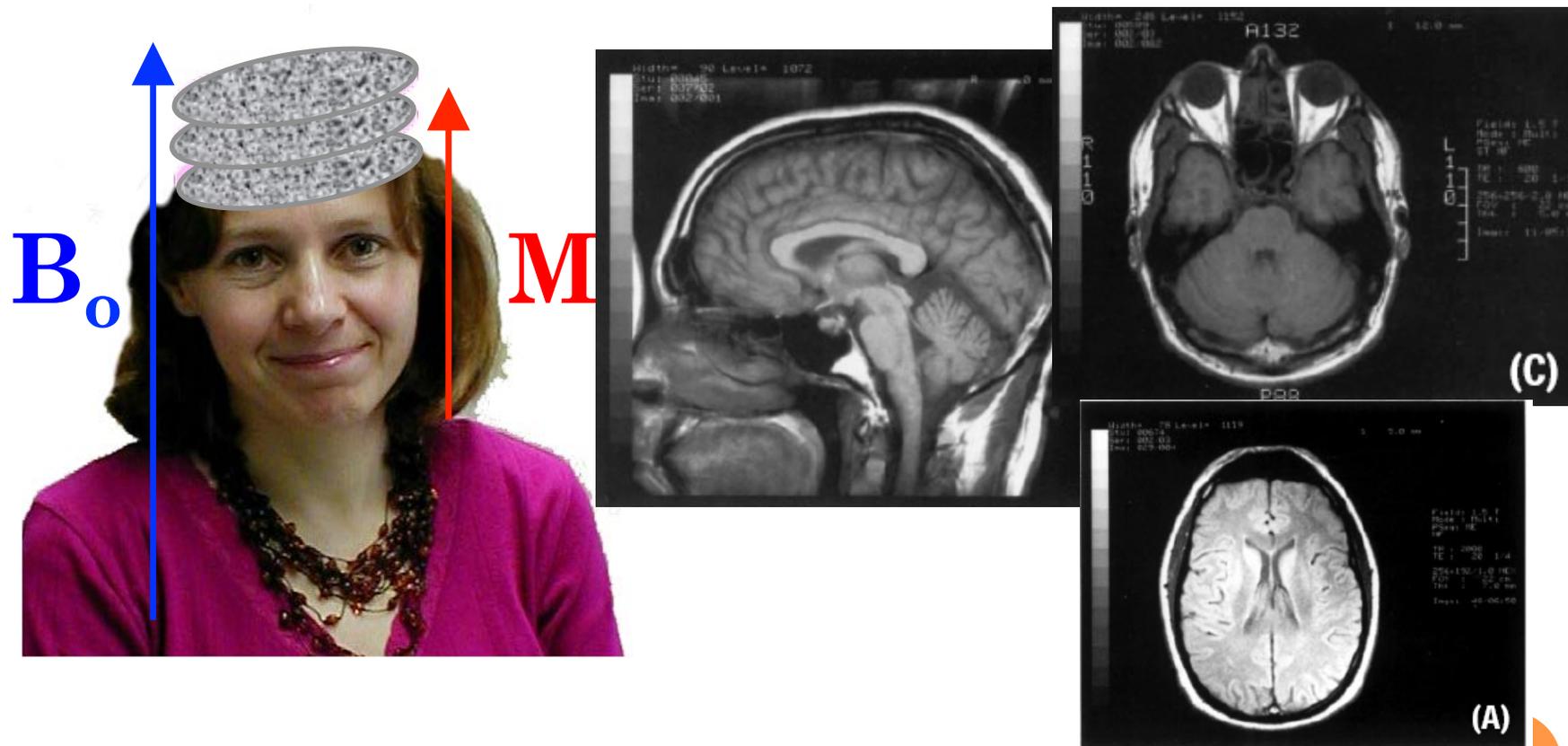
Il nucleo degli atomi di idrogeno è proprio quello che più facilmente si presta ad essere usato nelle analisi a risonanza magnetica nucleare (NMR).

Quando poniamo acqua dentro il magnete di un apparato NMR, i nuclei di idrogeno risentono del campo magnetico assumendo una configurazione "ordinata" e dando luogo ad una **magnetizzazione nucleare**



IMMAGINI NMR

I nuclei ^1H si orientano dando luogo ad una magnetizzazione netta nella direzione e verso di B_0



17

I nuclei sono in grado di assorbire energia se si inviano onde elm di frequenza
 $\nu = \nu_0 = \gamma B_0$

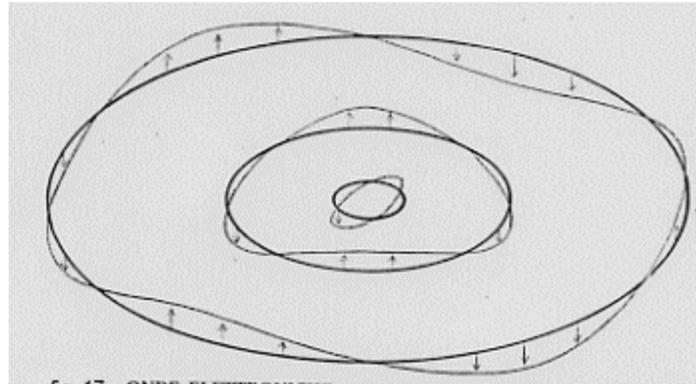
LA COMÉDIE FRANÇAISE

Nel 1925 la teoria delle orbite quantizzate si era ormai affermata. De Broglie nella sua tesi di dottorato postulò l'esistenza di onde aventi $\lambda = 2\pi r/n$, dove n è il numero quantico principale.

Se sostituiamo ad r il valore ottenuto nel modello di Bohr avremo che $\lambda = h / mv$.



**Louis Victor Pierre Raymond
Duc de Broglie**
(1892 – 1987)



Questo risultato aggiunge al modello di Bohr l'idea che ad una particella (elettrone) sia associata un'onda la cui lunghezza d'onda è legata alla sua massa e alla sua velocità.

Se questo è vero un fascio di elettroni in determinate condizioni mostrerà fenomeni diffrattivi tipici delle onde!!!

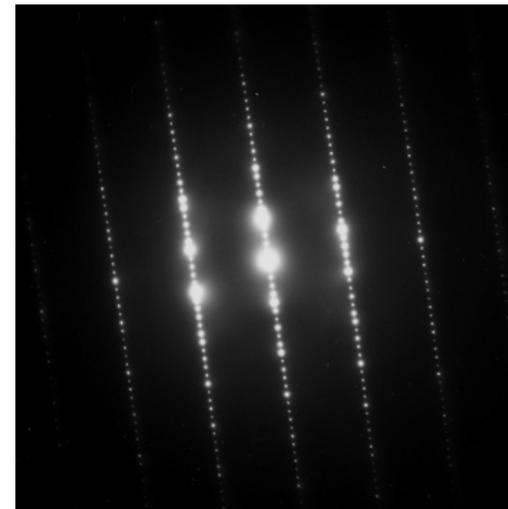
NON RIDE PIÙ NESSUNO...

Le onde di De Broglie hanno lunghezze estremamente piccole 10^{-8} cm. Pertanto per captarle ci serve qualcosa di dimensione paragonabile.

Sir George Thomson (figlio di Sir J.J.) in Inghilterra e Davisson e Germer negli USA spararono fasci di elettroni su cristalli di Bragg. Su uno schermo si ottennero figure di diffrazione simile a quelle dei raggi X.

Misurando, dalle figure di diffrazione, massimi e minimi si ottennero proprio le lunghezze d'onda predette da De Broglie

L'idea fu poi estesa a tutte le particelle conosciute, e le corrispondenti onde studiate e misurate.

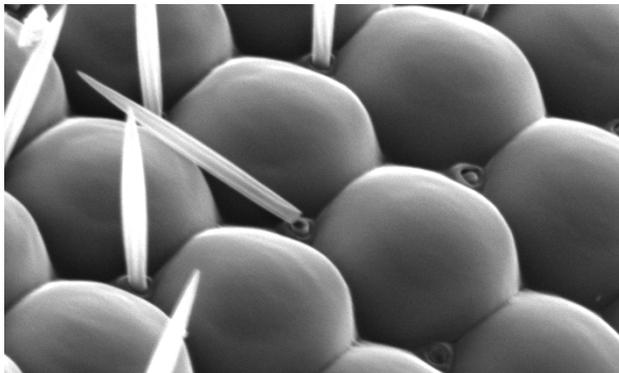


E ANCHE QUI CI SCAPPA UN'APPLICAZIONE

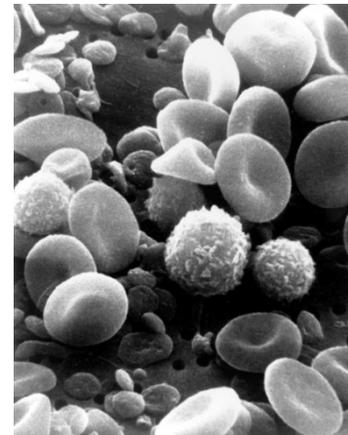
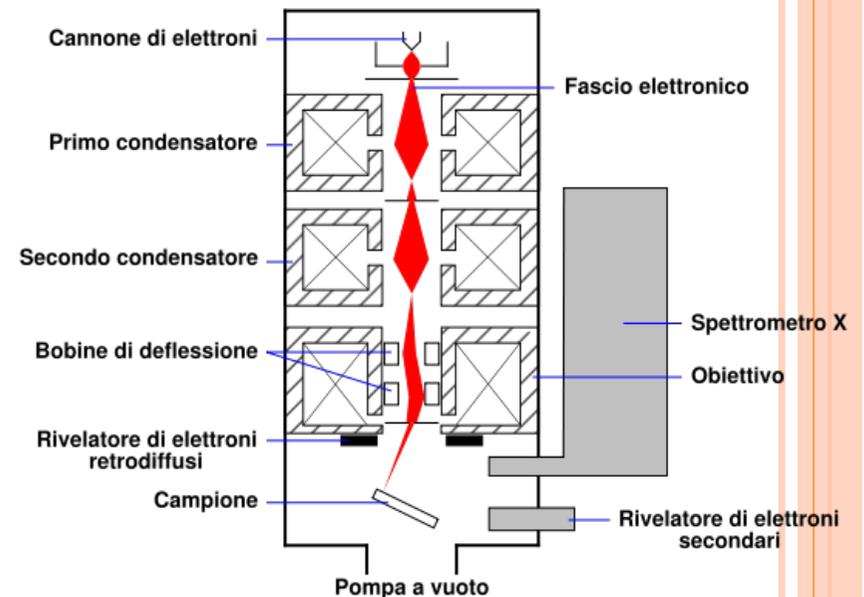
Il **microscopio elettronico** "illumina" i campioni in esame, invece che con un fascio di luce visibile, con un fascio di elettroni, di lunghezza d'onda quindi più breve. Questo permette di ottenere immagini con una risoluzione molto maggiore.

Il potere risolutivo di un microscopio è infatti definito da

$$d = \frac{\lambda}{2A_N}$$



Occhio di moscerino



Sangue umano

LA FORMULAZIONE DELLA TEORIA ONDULATORIA

Una volta associato il pacchetto d'onda alla particella era necessario scoprire quale equazione fosse in grado di descrivere l'evoluzione del pacchetto d'onda compatibilmente alla meccanica quantistica e interpretarne le soluzioni.



Erwin Rudolf
Josef Alexander
Schrödinger (1887 – 1961)

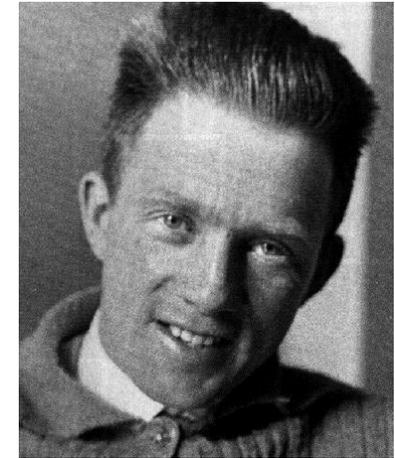
Questo fu fatto da Schrodinger. Invece delle nette orbite ellittiche su cui circolano gli elettroni abbiamo un atomo in cui gli elettroni rappresentano **onde stazionarie $\psi(r)$ di probabilità.**

Le particelle subatomiche sono **"delocalizzate"** nello spazio e nel moto, per cui si comportano come se stessero in più luoghi contemporaneamente. Ogni qualvolta una particella viene osservata con un esperimento che - per propria natura - modifica il livello energetico, la quantità di moto e pure la posizione della particella in esame, essa verrà certamente trovata nella posizione cercata e dotata di quel determinato livello energetico



HEISEMBERG E IL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE

In contemporanea al lavoro fatto da Schrodinger, un altro fisico tedesco, Heisenberg, stava lavorando allo stesso argomento, ma partendo da presupposti completamente diversi. Utilizzando le matrici e considerando l'atomo composto da infiniti oscillatori.



Werner Karl Heisenberg
(1901 – 1976)

Tuttavia Heisenberg è ricordato, ed ha preso il premio Nobel, per l'enunciato del principio di indeterminazione:

non è possibile conoscere simultaneamente posizione e quantità di moto di un dato oggetto con precisione arbitraria

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2 \quad \hbar = h/2\pi$$

Questo è vero anche per tutte le coppie coniugate di variabili fisiche: E, t

SCONVOLGENTI CONSEGUENZE

Il principio di indeterminazione pone fine al **determinismo Newtoniano** per cui era sufficiente conoscere posizione e velocità di un corpo per poter calcolare con le leggi della fisica tutti i suoi stati presenti e futuri.

Lo stato di un sistema non è determinato in modo univoco; la meccanica quantistica introduce una novità di fondo nel metodo sperimentale: la teoria non predice più un numero, ma un insieme di valori *associati a una probabilità*.

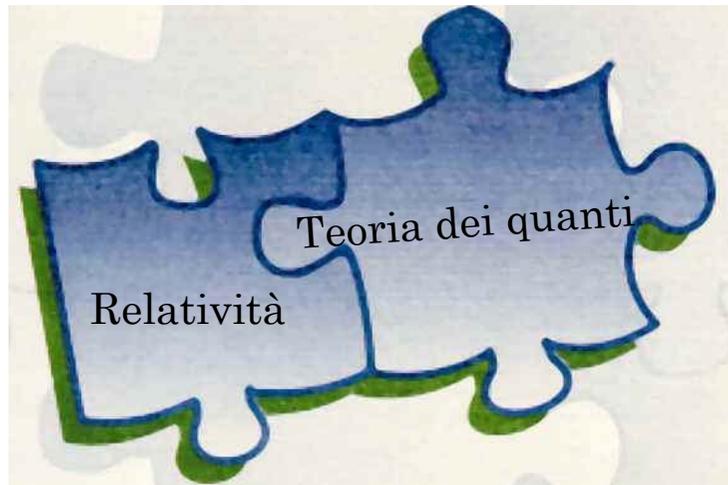
La teoria viene verificata su grandi numeri: l'esperimento è ripetuto molte volte, per accertare che le possibili soluzioni si manifestano con la frequenza predetta dalla teoria.

Einstein rifiutò questa interpretazione.



DIRAC E L'ANTIMATERIA

La meccanica quantistica e la teoria della relatività fino ad ora erano state entità separate.



Paul Adrien Maurice Dirac
(1902 – 1984)

Con un elegante formalismo matematico Dirac fu in grado di scrivere un'equazione relativistica che descrivesse le orbite quantizzate degli elettroni atomici.

Sulla lapide, a lui dedicata nel 1995 in occasione di una celebrazione, è scritto un epitaffio che gli si addice perfettamente. Essenziale, elegante e immortale:

la sua equazione quantistica



MA,....

Nello scrivere un'equazione per l'onda “di materia” che fosse Lorentz-invariante (relativistica), Dirac si trovò di fronte ad un nuovo problema...



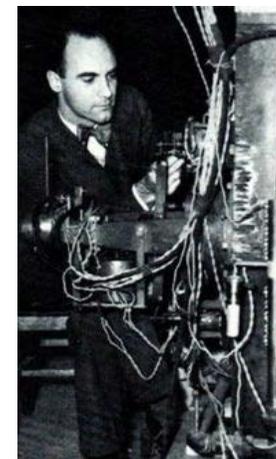
La sua equazione ammetteva, oltre alle soluzioni previste, anche **stati di energia negativa.**

Oltre ai normali livelli energetici per gli elettroni atomici, ce n'erano altri corrispondenti a particelle di energia $-E$ e carica elettrica $+e$!

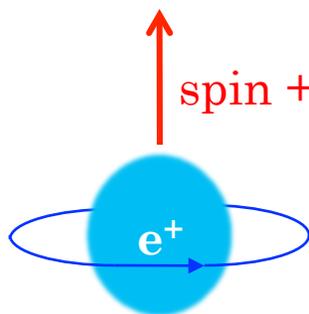
Lo stesso Dirac fu sconvolto dal suo risultato e cercò spiegazioni tanto ardite quanto inesatte delle nuove “particelle”. Una di queste ipotizzava che il protone fosse l'anti-elettrone.

ANCORA UNA VOLTA LA SPIEGAZIONE ERA SEMPLICE...

Nel 1932 il fisico americano Anderson, studiando i raggi cosmici, scoprì una particella che si comportava esattamente come un elettrone, ma con carica elettrica positiva.



Carl David Anderson
(1905 – 1991)

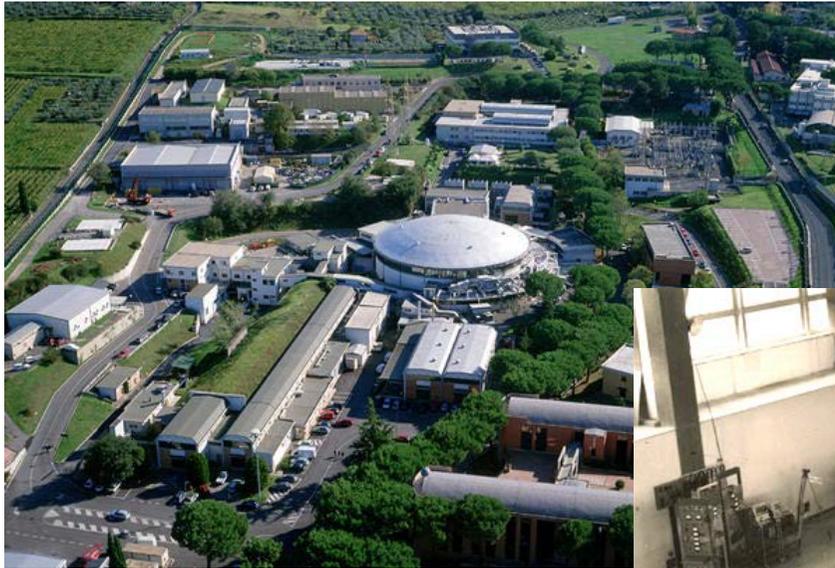


Dopo la scoperta si riuscì anche a produrli in laboratorio bombardando piastre metalliche con fotoni di energia $h\nu > 1 \text{ MeV}$.

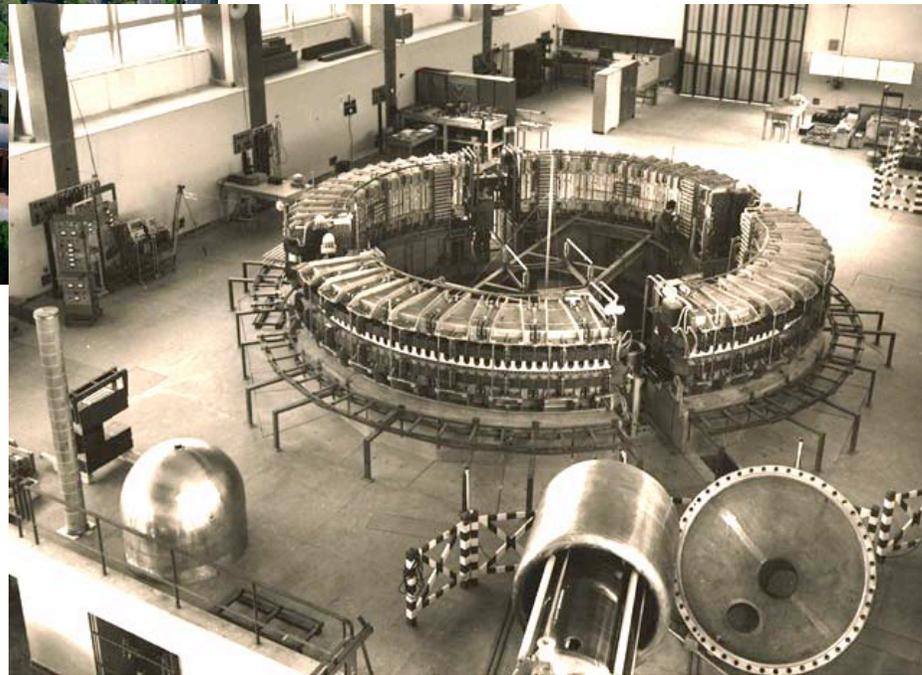
Questo perchè, entrando in collisione con i nuclei, i fotoni sparivano e davano vita a coppie $e^+ e^-$. Essendo la massa dell'elettrone $0,5 \text{ MeV}/c^2$ il fenomeno si verifica solo sopra la soglia.

Si cominciò quindi a pensare che anche il protone e il neutrone potessero avere un'antiparticella. **Grazie alla costruzione dei primi moderni acceleratori di particelle** nel 1955 fu scoperto l'antiprotone da Emilio Segrè e Owen Chamberlain, e nel 1956 l'antineutrone da Bruce Cork.

ANCHE A FRASCATI



Nel 1954 nascono i
laboratori INFN a Frascati



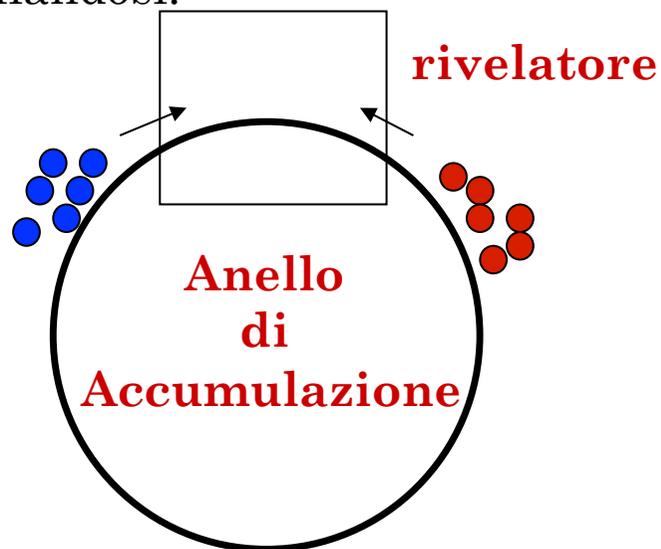
**1959 l'elettrosincrotrone di Frascati
primo acceleratore italiano**

BRUNO TOUSCHEK

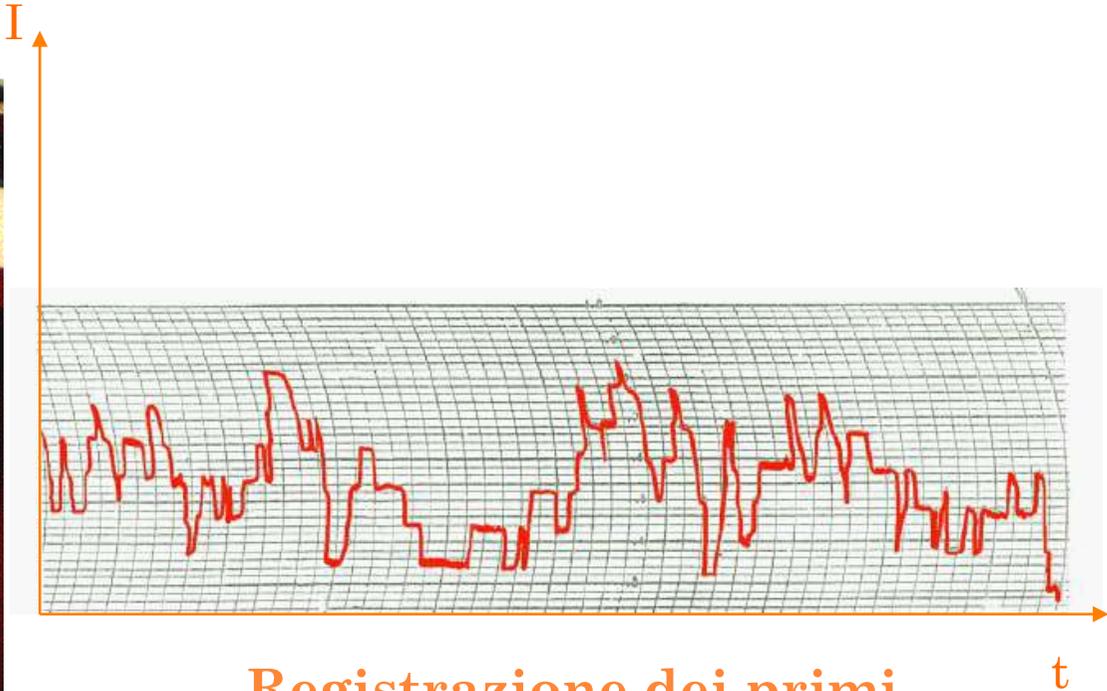
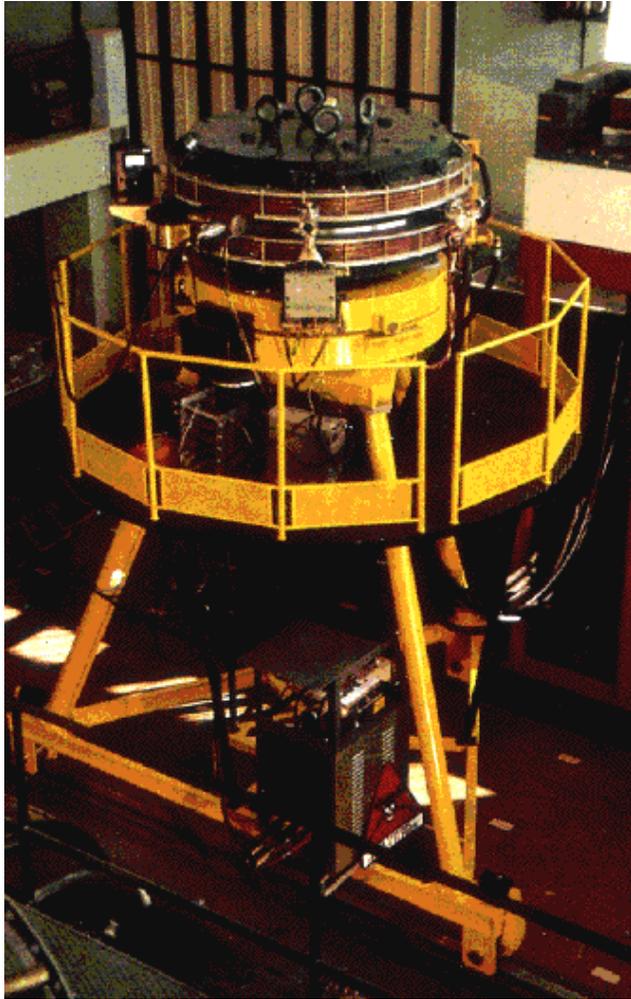
Il 7 marzo 1960 Touschek tenne un seminario presso i Laboratori Nazionali di Frascati, illustrando uno studio sistematico delle collisioni e^+e^- e come ottenerle con la **costruzione di un singolo anello magnetico**, nel quale due fasci di elettroni e positroni, circolando alla stessa energia, ma in opposte direzioni, si scontrassero annichilandosi.



Bruno Touschek
(1921 – 1978)



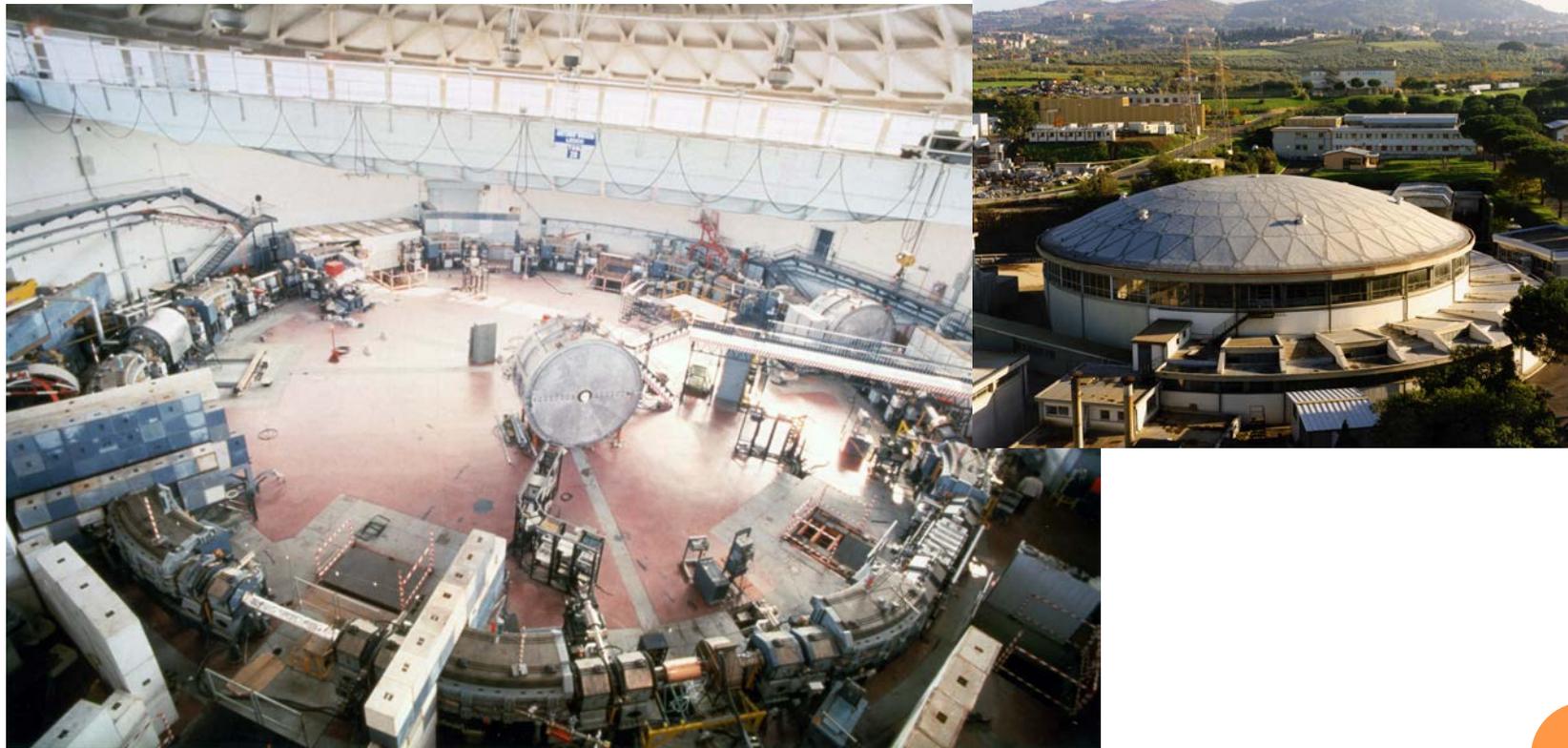
ADA (ANELLO DI ACCUMULAZIONE) 1961 - 1965



Registrazione dei primi
elettroni accumulati in AdA.
La vita media era 21 sec,
il numero medio 2.3

DA ADA AD ADONE E OLTRE

ADA non è mai stato un vero acceleratore per sperimentazione. Era di per se un esperimento che doveva testare la fattibilità dell'idea di Touschek.



Una volta verificato il principio si passo a costruire ADONE (1963 – 1993)

DA ADA AD ADONE E OLTRE

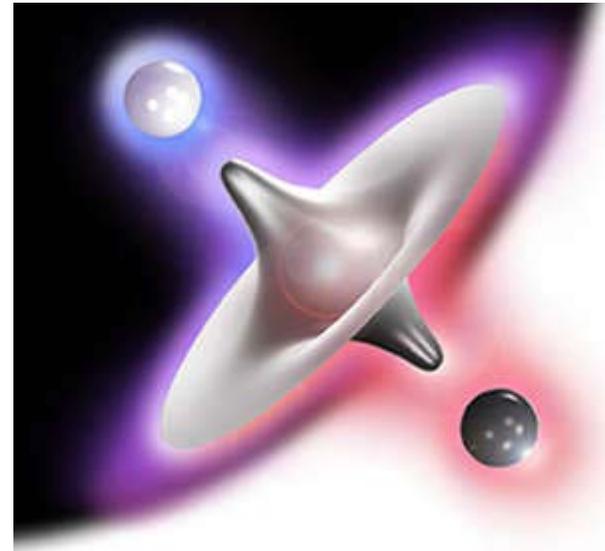
Nel 1993 è iniziata la costruzione dell'acceleratore che attualmente è in operazione a Frascati



DAΦNE è un collisore e^+e^- con caratteristiche di alta intensità ogni pacchetto di e è costituito da un miliardo di particelle

PROBLEMI ANCORA APERTI

La scoperta dell'antimateria, è stata senza dubbio sensazionale e di grande portata.



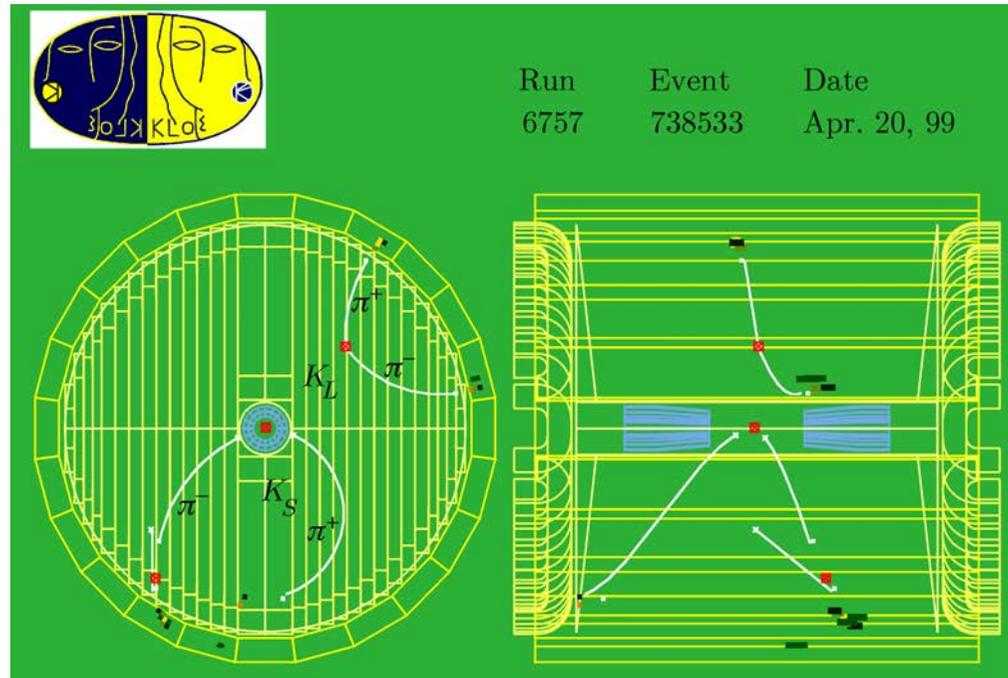
Ancor oggi ci sono almeno 3 problemi irrisolti legati all'antimateria:

- **L'universo conosciuto sembra essere fatto prevalentemente di materia. Dove è finita l'antimateria prodotta nel Big-Bang?**
- **L'antimateria è soggetta alla gravità nello stesso modo come lo è la materia?**
- **La materia così come la conosciamo costituisce solo il 5% dell'Universo**

L'ANTIMATERIA E LA VIOLAZIONE DI CP

Sul primo interrogativo ci sono indicazioni che la violazione della simmetria CP possa aver determinato la “scomparsa” della materia dall’universo.

Particelle ed antiparticelle normalmente si comportano allo stesso modo. Ma alcune, i mesoni K_0 e B_0 , sembrano avere rispetto alle corrispondenti antiparticelle un comportamento anomalo, (violazione di CP) che, su scala cosmica, potrebbe aver indotto l’universo verso la scomparsa dell’antimateria.

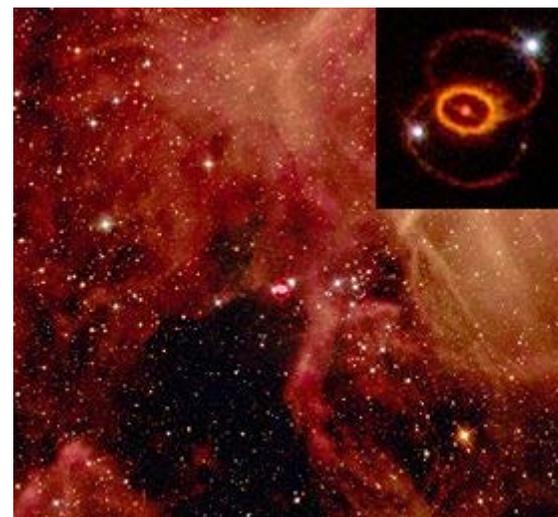


Questo interessantissimo aspetto è studiato anche a Frascati ai LNF, dall’esperimento KLOE

GRAVITÀ E ANTIMATERIA

I teorici dibattono sul fatto che l'antimateria senta la gravità come la materia.

L'unico risultato sperimentale, fin ora disponibile, ci viene dalla Supernova 1987A. Questa, che si trovava nelle nubi di Magellano, è esplosa emettendo, fra l'altro, neutrini e anti-neutrini. Queste particelle hanno impiegato 168.000 anni a raggiungere la terra e la loro traiettoria è stata curvata dalla materia che hanno incontrato nella nostra galassia.



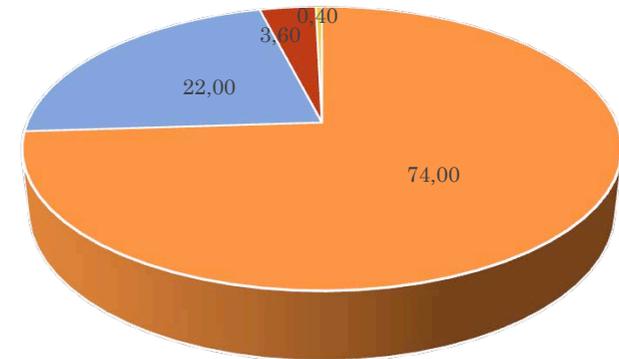
La curvatura ha cambiato il tempo che hanno impiegato ad arrivare sulla terra di circa 5 mesi. Tuttavia, con un'incertezza di soli 12", neutrini e anti-neutrini sono stati rivelati da due diversi apparati (Kamiokande in Giappone e IMB negli USA).

Questo ci mostra che neutrini e anti-neutrini “sentono” la gravità allo stesso modo, con un'incertezza di una parte su 1 milione.

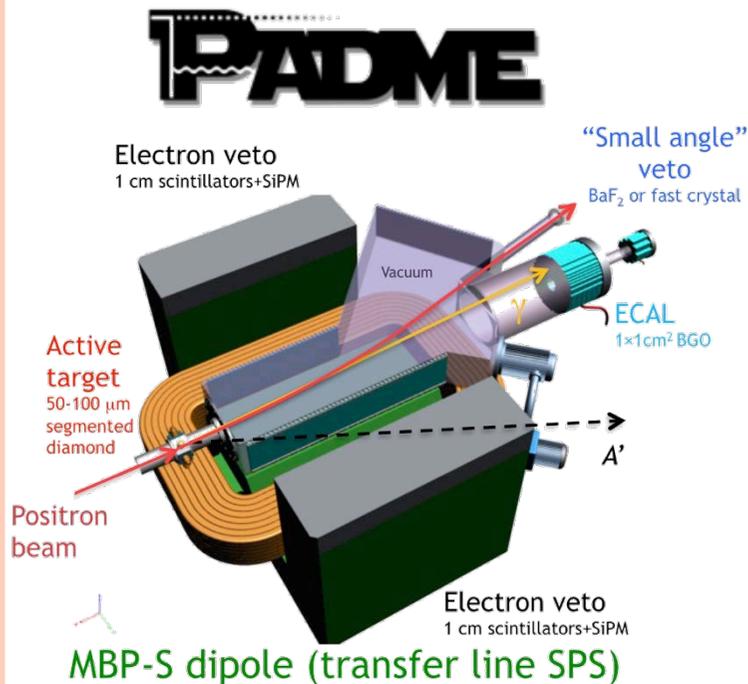
CACCIA ALLA MATERIA OSCURA

Cinque volte piú abbondante della materia ordinaria, sulla natura della **Materia Oscura** si sa davvero poco.

Un puzzle nato a livello cosmologico a cui si tenta di dare una spiegazione con idee e metodologie diverse e che coinvolge scienziati in tutto il mondo.



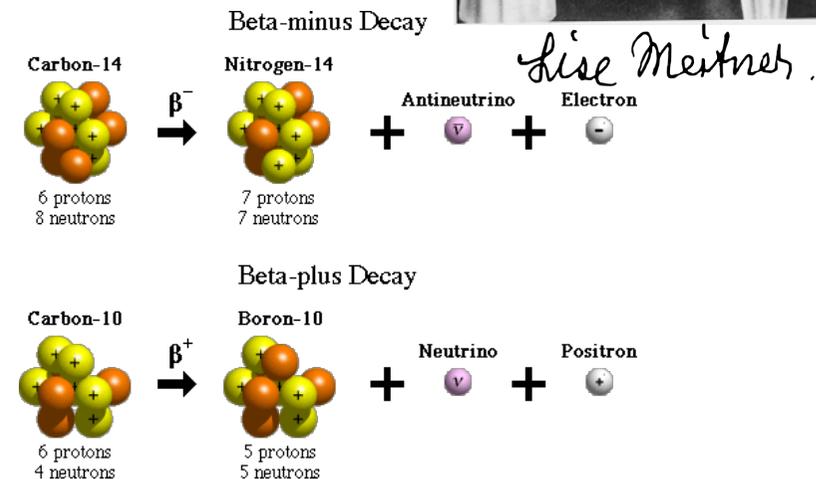
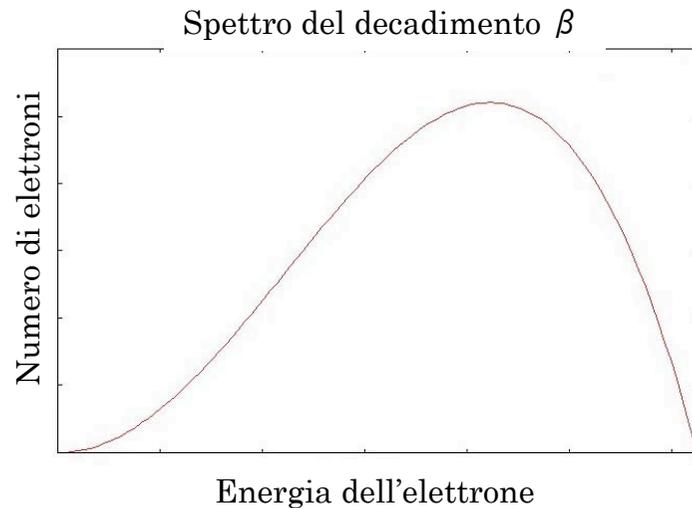
- Energia oscura
- Materia oscura
- Gas intergalattico
- Stelle, pianeti, etc...



L'ipotesi su cui si basa **PADME** (**P**ositron **A**nnihilation into **D**ark **M**atter **E**xperiment) è che la materia oscura sia sensibile a un nuovo tipo di forza, che non rientra tra le quattro che conosciamo e a cui sarebbe associato un mediatore chiamato **fotone oscuro**. Questa ipotesi postula che il fotone oscuro sia leggero e interagisca con le particelle del settore elettromagnetico.

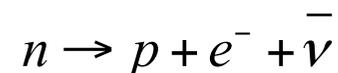
RADIOATTIVITÀ BETA

Nel 1911 Lise Meitner e Otto Hahn effettuarono un esperimento che mostrò che l'energia degli elettroni emessi nel decadimento beta aveva uno spettro continuo.



La radioattività β poneva un problema: gli elettroni emessi non erano **mono-energetici**. La situazione è ben diversa da quella che si riscontra nei decadimenti radioattivi di tipo α o γ , in cui l'energia della particella emessa è determinata dalla differenza di energia tra il nucleo iniziale e quello finale, ed è quindi sempre la stessa.

Bohr era giunto a proporre che in questo caso il principio di conservazione dell'energia non valesse.



I NEUTRINI

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

Il decadimento beta trasforma un atomo in un altro attraverso la trasformazione di un neutrone in un protone



C.Cowan F.Reines
(1919 – 1974) (1918-1998)



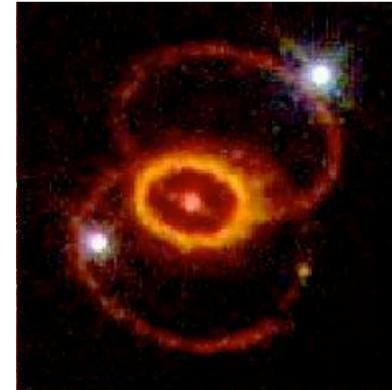
L'esistenza del neutrino venne postulata nel 1930 da Wolfgang Pauli per spiegare lo spettro continuo del decadimento beta, mentre il nome si deve a Fermi.

Venne osservato sperimentalmente 1956, dai fisici Cowan e Reines nel corso di un esperimento eseguito al reattore di Savannah River.

TRE LEPTONI TRE NEUTRINI

Esistono tre tipi differenti di neutrini:

- elettronico ν_e
- muonico ν_μ
- tauonico ν_τ



Il resto della supernova 1987a

in diretta relazione rispettivamente con i leptoni del modello standard: elettrone, muone e tauone.

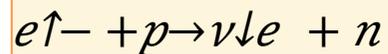
La gran parte dell'energia di una supernova che collassa viene irradiata in forma di neutrini, prodotti quando i protoni e gli elettroni del nucleo si combinano a formare neutroni. La prima prova sperimentale di questo fatto si ebbe nel 1987, quando vennero rilevati i neutrini provenienti dalla SN 1987a.

Tre ore prima che la luce visibile dalla SN 1987a raggiungesse la terra, un flusso di neutrini fu osservato simultaneamente in tre rivelatori, che erano stati costruiti per studiare i neutrini solari.

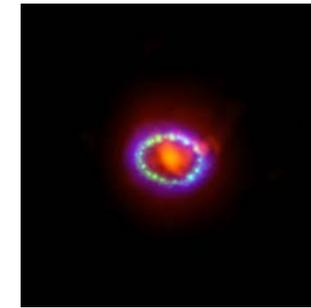
NEUTRINI DALLE SUPERNOVAE

Il ^{56}Fe è il nucleo con la massima energia di legame. Quando in una stella il materiale si è trasformato in Ferro, i processi di fusione si interrompono. Quando il core ha raggiunto una massa di 1,4 masse solari la forza di gravità prende il sopravvento e la stella collassa.

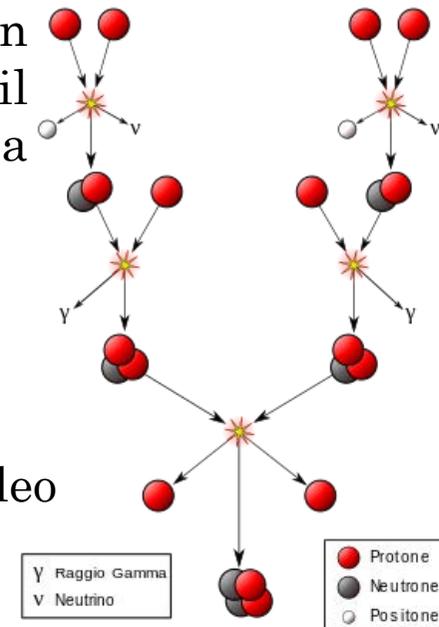
Gli elettroni del Ferro sono assorbiti dai protoni del nucleo che si trasformano in neutroni.



Questa non è altro che la reazione inversa a quella del decadimento beta.



SN 1987a

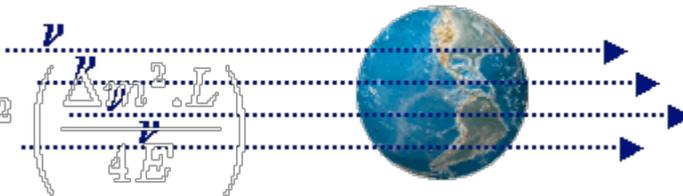


I NEUTRINI HANNO MASSA?

Il neutrino, non ha carica quindi non ha interazioni e.m., può interagire solo debolmente.

Quando si muove attraverso la materia le sue possibilità di interazione sono molto piccole.

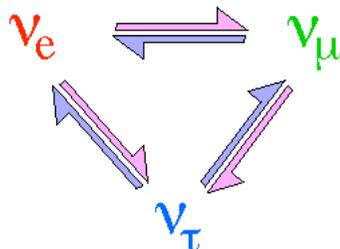
Per dimezzare l'intensità di un fascio di neutrini, servirebbe un muro di piombo spesso 1 anno luce !!!

$$P(\nu_1 \leftrightarrow \nu_2) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4E} \right)$$




Бруно Понтекорво

Nel 1962 Bruno Pontecorvo ipotizzò che i neutrini, se dotati di una pur piccola massa, potessero essere soggetti alle cosiddette oscillazioni. Cioè un neutrino di una specie potesse trasformarsi in un neutrino di altra



$$P(\nu_1 \rightarrow \nu_2) \propto \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)$$

MISURARE LA MASSA DEI NEUTRINI



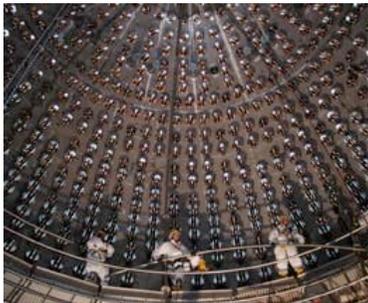
La moderna fisica studia i neutrini da diverse sorgenti sia naturali che artificiali. Essendo debolmente interagenti servono rivelatori di grandi dimensioni.



Grazie alle misure fatte, si è potuto verificare sperimentalmente che **i neutrini cambiano sapore** e che quindi hanno una massa.

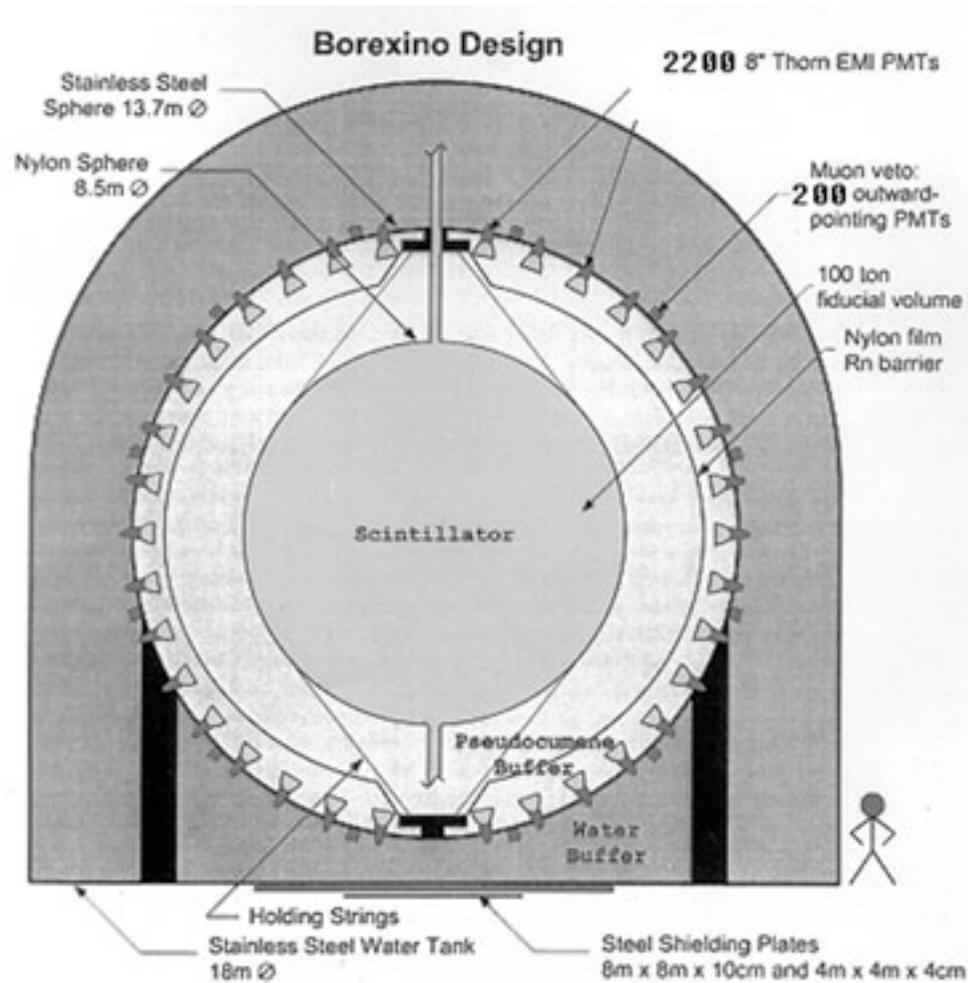
La prova sperimentale delle oscillazioni dei neutrini ha fruttato a Takaaki Kajita (Super-Kamiokande) e Arthur McDonald (Sudbury) il premio Nobel per la Fisica nel 2015.

UN LABORATORIO PER LO STUDIO DEI NEUTRINI



L'apparato Borexino per lo studio dei neutrini si

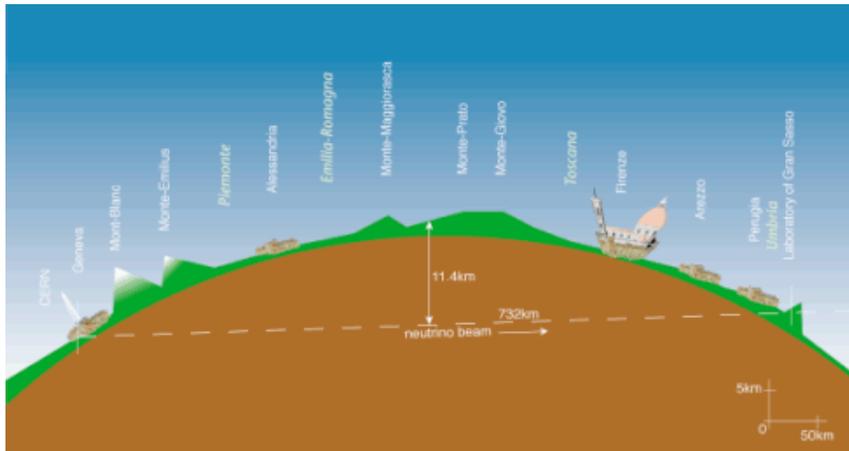
Il bassissimo "1" sovrastante, re



Esterno del LNGS

1
ersi
a.

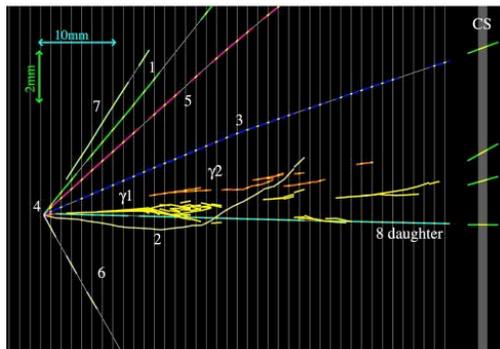
FASCI DI NEUTRINI DA GINEVRA AL GRAN SASSO IN 3 MILLISECONDI!



Per verificare la possibilità di oscillazioni tra ν_μ e ν_τ si è pensato di realizzare dei fasci artificiali di neutrini per effettuare esperimenti di laboratorio controllati.

Le oscillazioni sono funzione dalla distanza percorsa dal neutrino L e dalla sua energia E . Più precisamente, la probabilità di oscillazione dipende dal rapporto E/L .

L'esperimento OPERA è stato progettato per rivelare ν_τ nel fascio prodotto al CERN



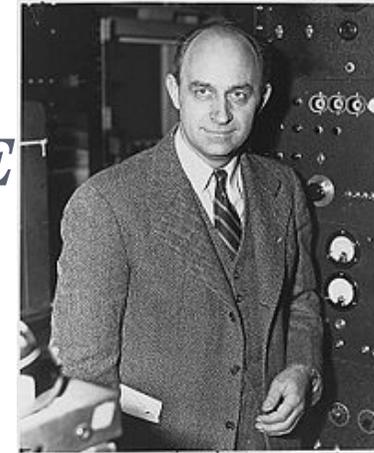
FERMI E LA FISICA DELLE PARTICELLE

Enrico Fermi e forse l'unico scienziato del '900, che è stato sia un grande teorico che un grande sperimentale.

A lui dobbiamo importanti contributi in diversi settori. Forse, i più significativi, sono quelli ottenuti nello studio delle disintegrazioni nucleari.

Fermi studiò il decadimento nucleare β ; meccanismo per cui un neutrone emette un elettrone e si trasforma in un protone.

Fermi calcolò teoricamente le probabilità di avere nello stato finale un elettrone di data energia.

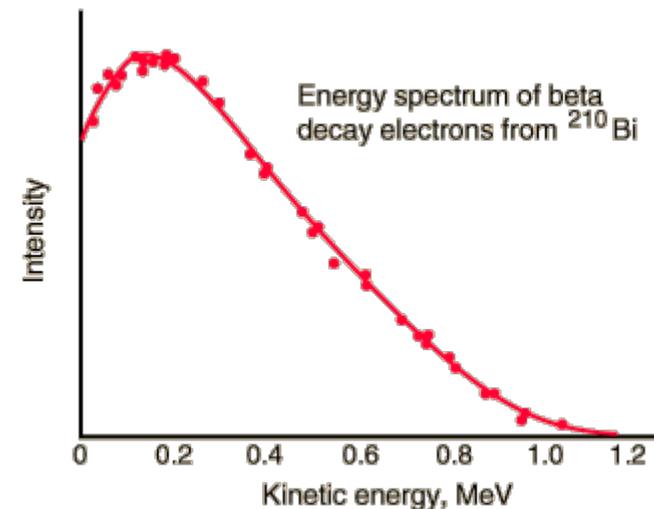


Enrico Fermi
(1901 –1954)

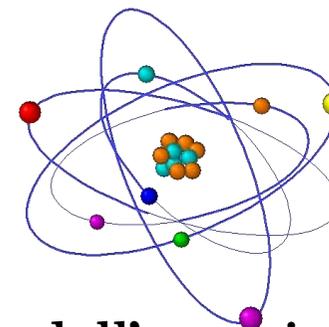
$$\lambda_{if} = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{if}|^2 \rho_f$$

Transition probability Matrix element for the interaction Density of final states

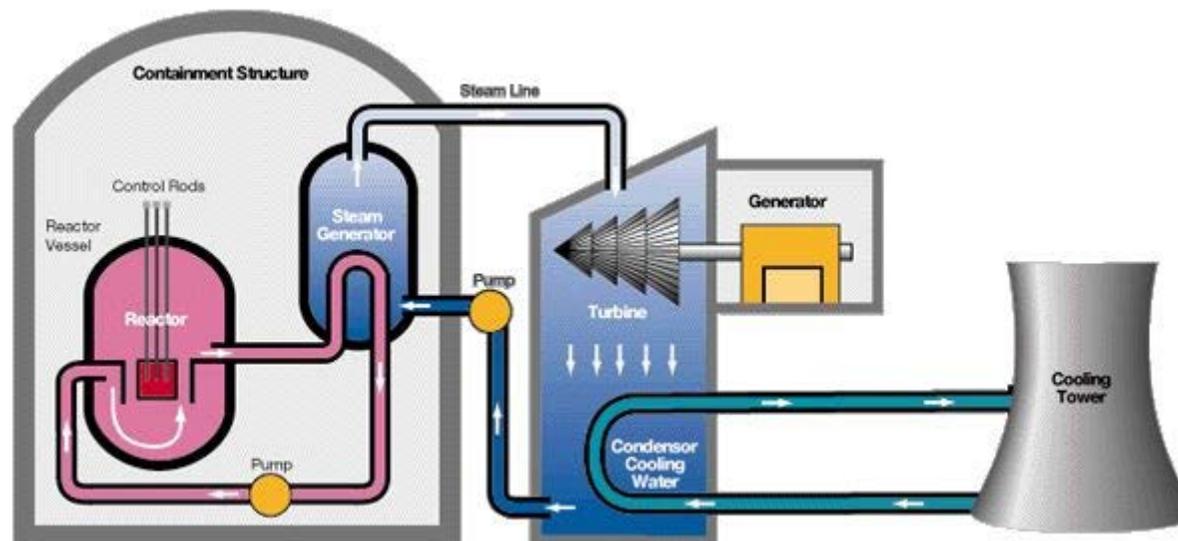
Fermi's Golden Rule



FERMI E L'ENERGIA NUCLEARE



Dal punto di vista sperimentale Fermi è sicuramente il padre **dell'energia nucleare**. A lui si devono i primi studi e le prime grosse scoperte sulla fissione dell'Uranio, progettò e guidò la costruzione del primo reattore nucleare a fissione, che produsse la prima reazione nucleare a catena controllata.



In suo onore venne dato il nome ad un elemento della tavola periodica, il Fermio (simbolo Fm), ed ad un'unità di misura, il Fermi (simbolo fm = 10^{-15} m).

YUKAWA E I MESONI

Il successo della teoria di Fermi fece sì che si cercasse di utilizzarla anche per spiegare le forze di attrazione che tengono insieme i nuclei.



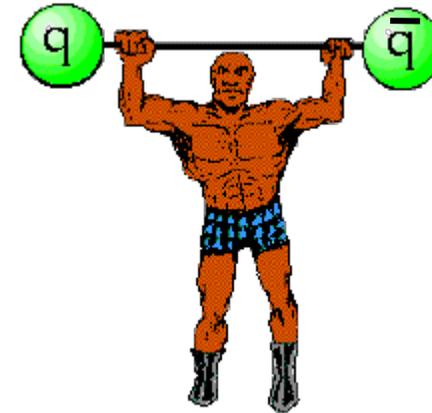
湯川 秀樹
(1907 – 1981)

Sfortunatamente la forza di Fermi era troppo “debole” per essere responsabile del forte legame tra protoni e neutroni all’interno del nucleo.

Nel 1935 il fisico Giapponese Hideki Yukawa postulò che **un nuovo quanto** fosse associato alle forze nucleari e concluse che dovesse avere una massa a riposo finita di circa $140 \text{ MeV}/c^2$ (270 volte la massa dell’elettrone). Inoltre stabilì che questo quanto potesse essere elettricamente neutro oppure con una carica pari a quella dell’elettrone o del positrone.

Nel 1937 Anderson e Neddermeyer, studiando i raggi cosmici, scoprirono una particella di massa $105 \text{ MeV}/c^2$.

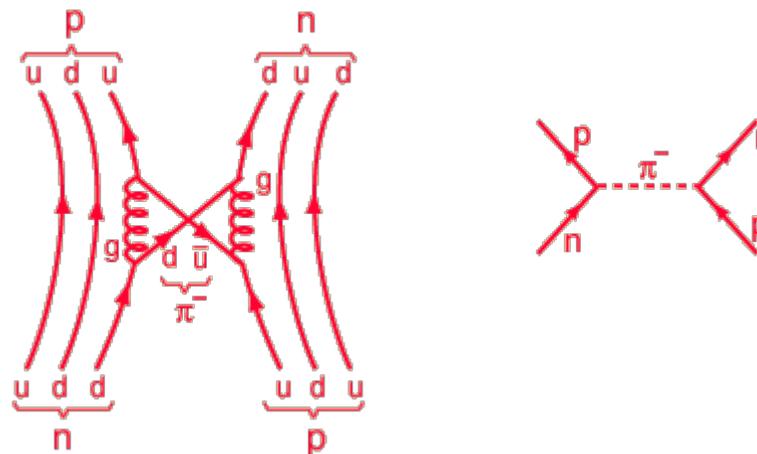
LA FORZA FORTE



Gli italiani Pancini, Piccioni e Conversi dimostrarono tuttavia che la nuova particella scoperta interagiva troppo debolmente con i nucleoni, si trattava in realtà di una sorte di elettrone pesante .

La particella di Yukawa doveva essere un'altra e fu trovata solo nel 1947 da Occhialini, Powell e Bristol, sempre nei raggi cosmici. Essa era il pione di massa $140 \text{ MeV}/c^2$.

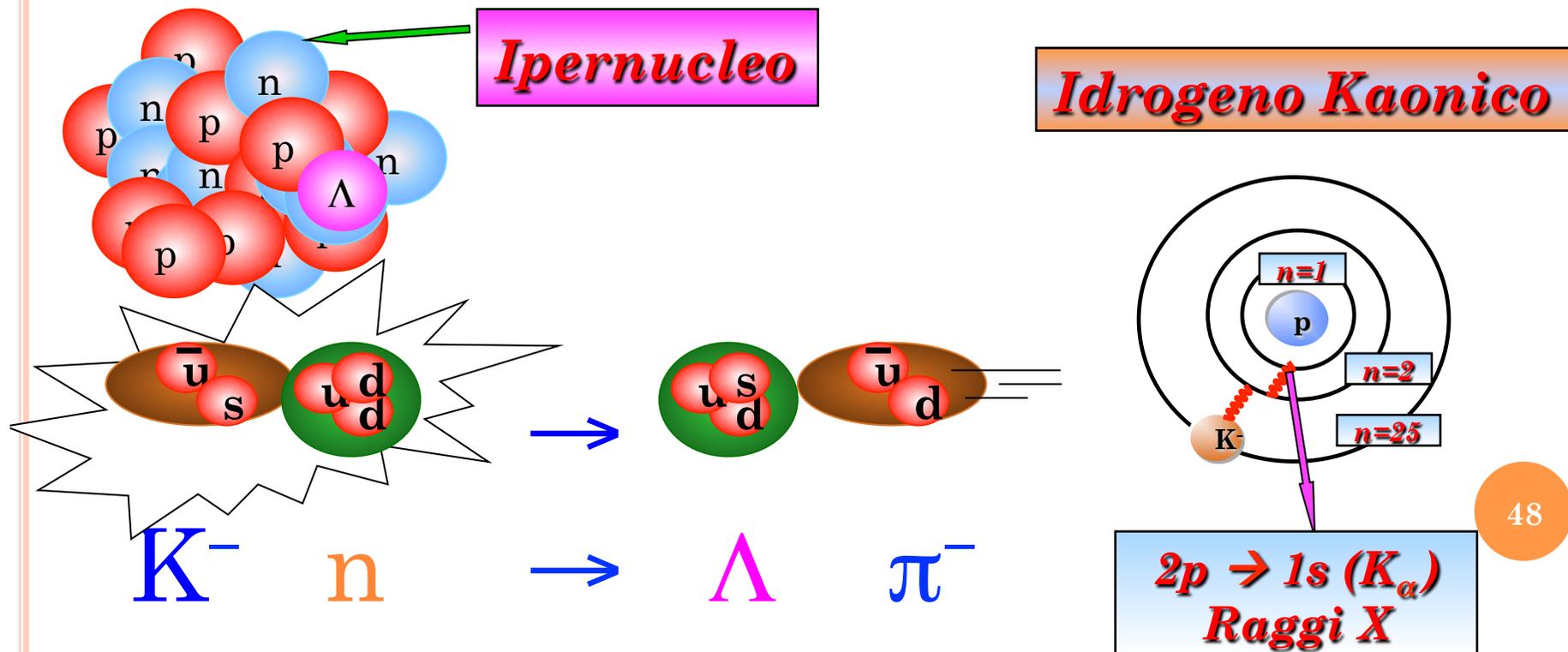
La teoria di Yukawa tuttavia non era completa e non riusciva a dare ragione di tutti i fenomeni nucleari.



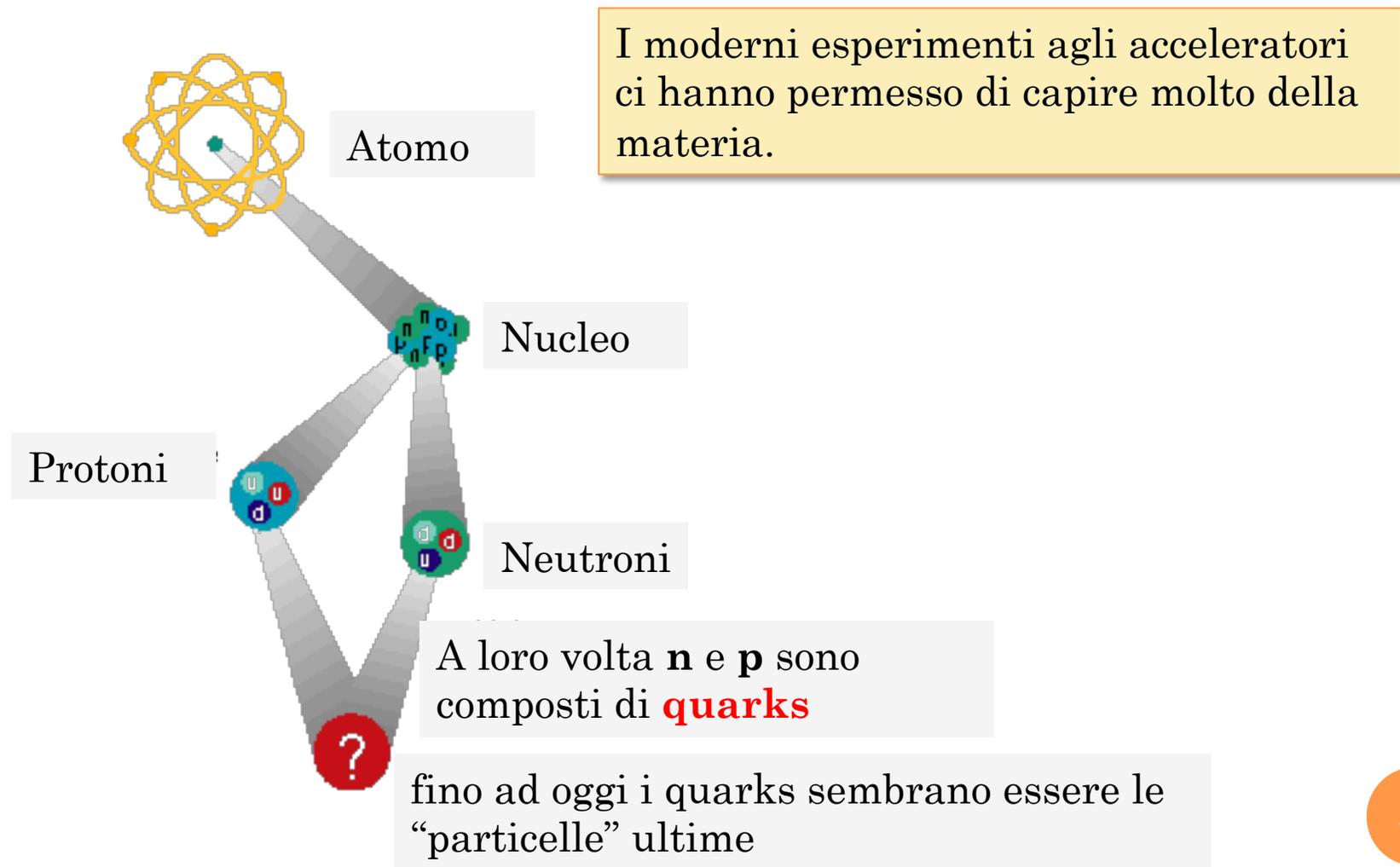
LA FISICA DI OGGI E DI DOMANI

Anche oggi a Frascati, come negli altri laboratori di Fisica fondamentale, si sta ancora studiando la forza forte, perchè non siamo ancora arrivati a comprenderla fino in fondo.

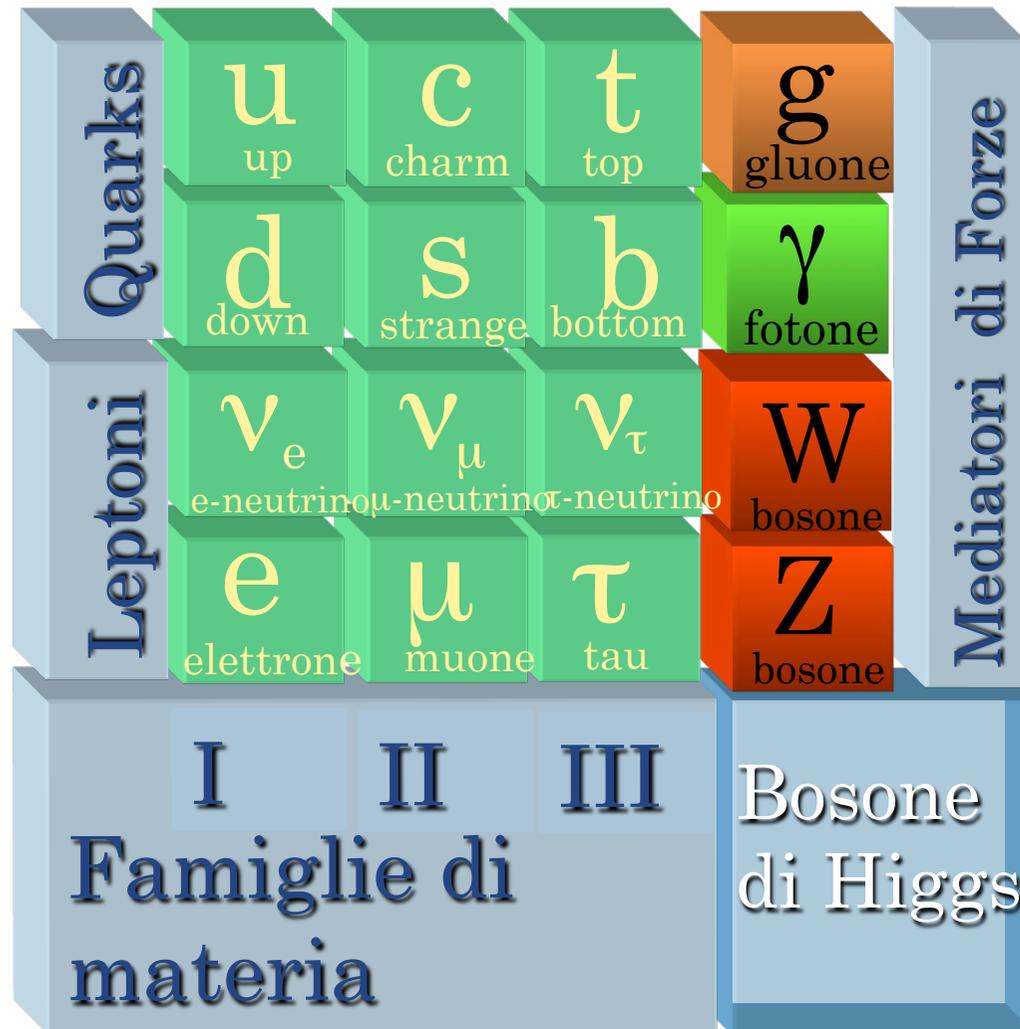
Ai LNF gli esperimenti FINUDA e SIDDHARTA, con metodi diversi, cercano di avere nuove informazioni sulla forza forte:



COSA SAPPIAMO OGGI DELLA “MATERIA”



IL MODELLO STANDARD



LE FORZE FONDAMENTALI



forza	intensità	effetto
Gravitazionale	1	Vi tiene seduti

Debole

10^{29}

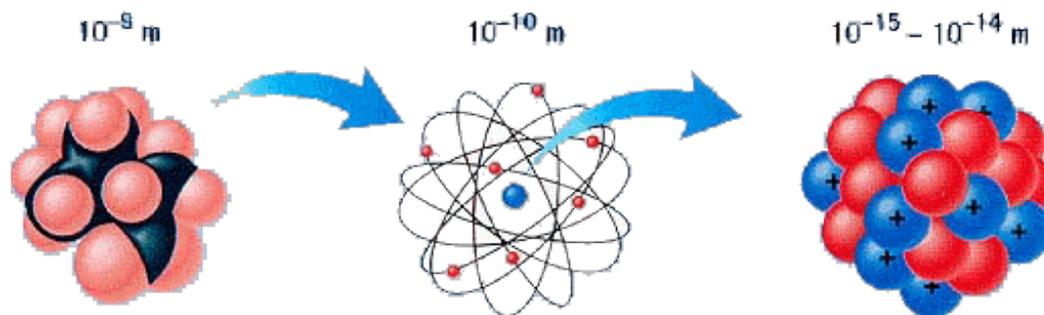
Decadimenti:
 $n \rightarrow p + e^- + \nu$



Elettromagnetica

10^{40}

Tiene insieme gli atomi



Forte

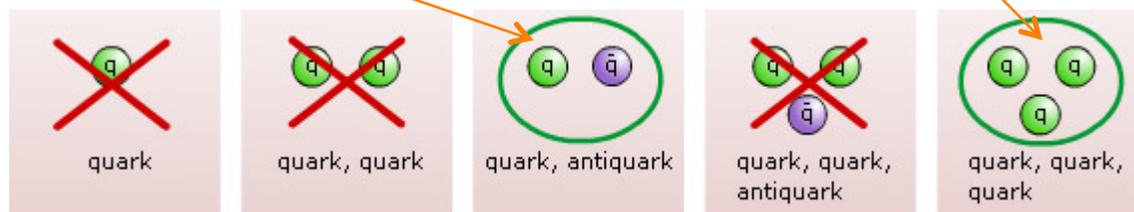
10^{43}

Tiene insieme i nuclei



QUARKS E OLTRE

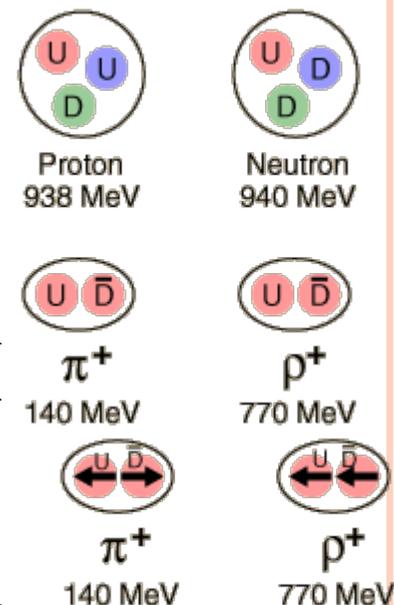
Quarks e Leptoni sono i costituenti fondamentali della materia. Nel modello standard sono stati previsti 6 diversi tipi di quarks, tutti trovati sperimentalmente. Dalla loro combinazione hanno origine tutte le particelle note **i mesoni** (stati quark-antiquark) e **i barioni**, (stati di 3 quarks).



La combinazione di quarks **up** e **down**, che da origine ai nucleoni, suggerisce che la loro massa sia simile e pari circa a **1/3 quella dei nucleoni $\sim 300 \text{ MeV}/c^2$** .

Tuttavia il pione, che è una combinazione di un quark up e di un antidown, ha una massa di soli $140 \text{ MeV}/c^2$!

In più il mesone rho, costituito dalla stessa combinazione di quarks, ha massa $770 \text{ MeV}/c^2$!



Su come si origina la massa c'è ancora molto da dire

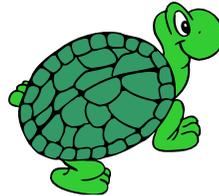
LHC E IL BIG BANG



... la ricerca del bosone di HIGGS per spiegare la massa

COSA ABBIAMO IMPARATO....

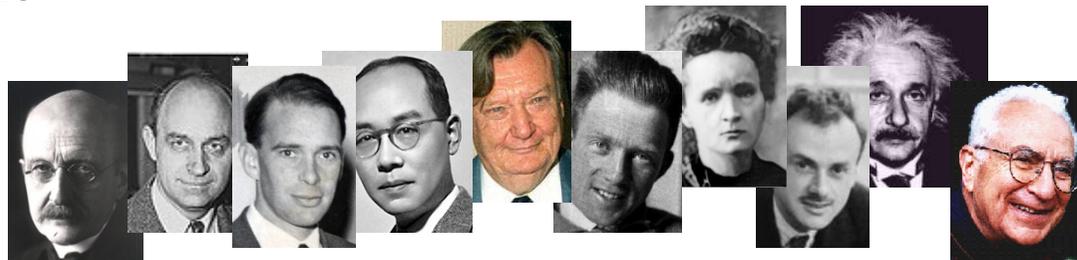
- La scienza procede lentamente



- Non sempre per percorsi lineari



- I grossi progressi degli ultimi 100 anni sono frutto del lavoro di tante persone



- Non sempre ciò che si studia ha un applicazione immediata, non per questo non è utile



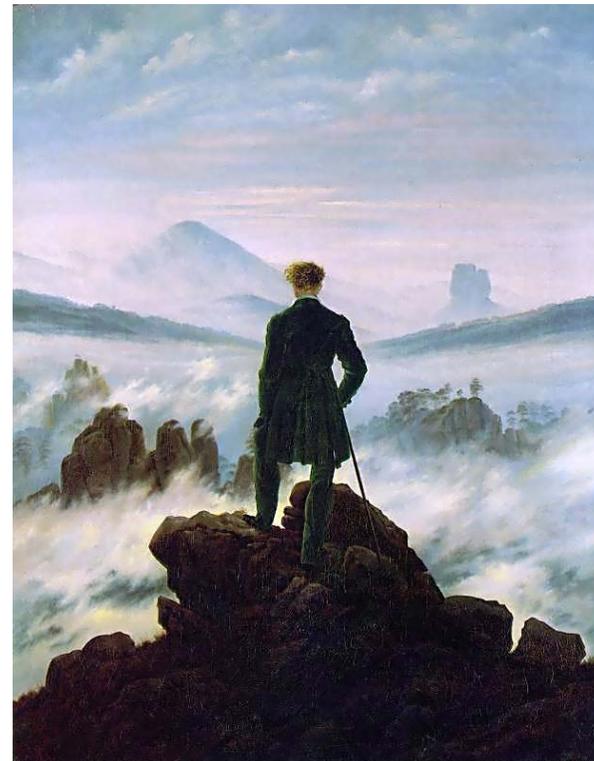
PER CHI VUOLE APPROFONDIRE

George Gamow “Trent'anni che sconvolsero la fisica. la storia della teoria dei quanti”, Zanichelli 1966.

Carlo Rovelli “La realtà non è come ci appare”, Raffaello Cortina Editore 2014.

www.lnf.infn.it/edu/navigando.html

paola.gianotti@lnf.infn.it



PER OGGI CI FERMIAMO QUI...

Consigli per gli
Internauti

Alcuni bei percorsi formativi sulla fisica moderna li trovate qui
<http://www.scienzapertutti.lnf.infn.it/>

Guardate questi video su youtube:

<http://www.youtube.com/watch?v=KT7xJ0tjB4A> Principio di ind. Heisenberg
<https://www.youtube.com/watch?v=LXf35olSYcw> Esperimento delle fenditure

paola.gianotti@lnf.infn.it

DEFINIZIONI E UNITÀ DI MISURA

$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

- Energia E misurata in eV
- impulso p misurato in eV/c
- massa m_0 misurata in eV/c²

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad E = m_0 \gamma c^2 \quad p = m_0 \gamma \beta c \quad \beta = \frac{p c}{E}$$

ma quanta energia è 1 eV? $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ $1 \text{ eV} / c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ Kg}$



$$m_{\text{ape}} = 1 \text{ g} = 5.8 \cdot 10^{32} \text{ eV}/c^2$$

$$v_{\text{ape}} = 1 \text{ m/s} \rightarrow E_{\text{ape}} = 10^{-3} \text{ J} = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

$$E_{\text{LHC}} = 14 \cdot 10^{12} \text{ eV}$$

tuttavia volendo riabilitare LHC...

L'energia totale di LHC:

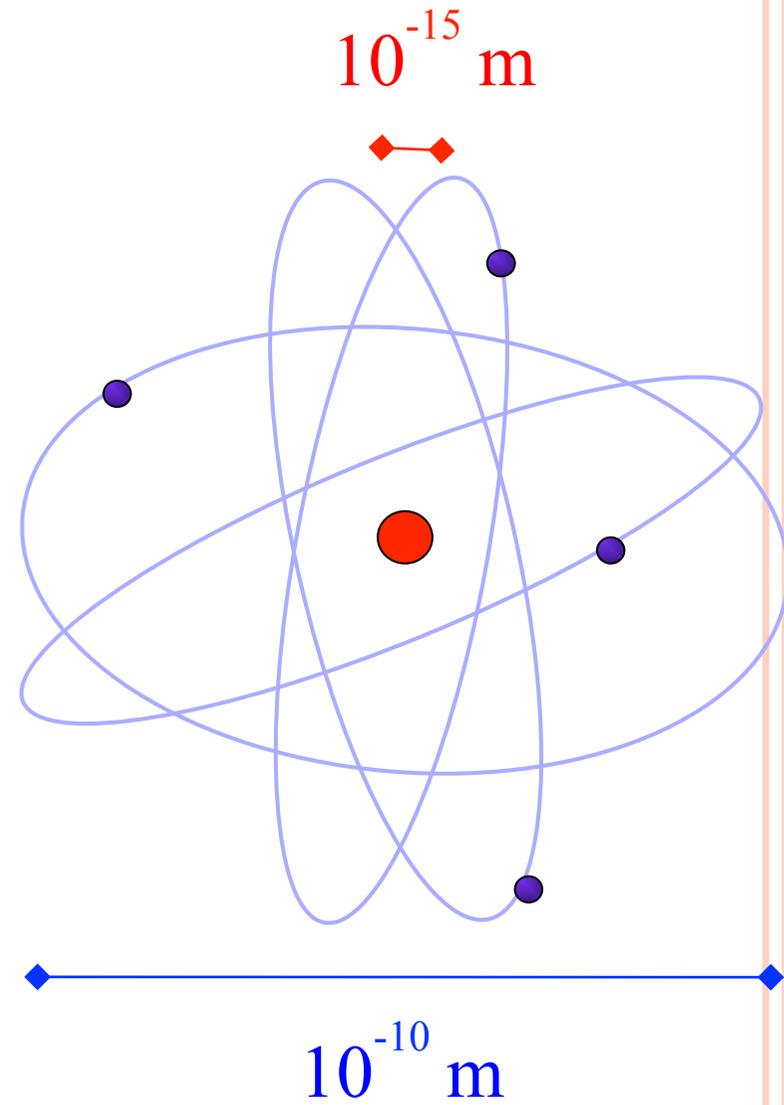
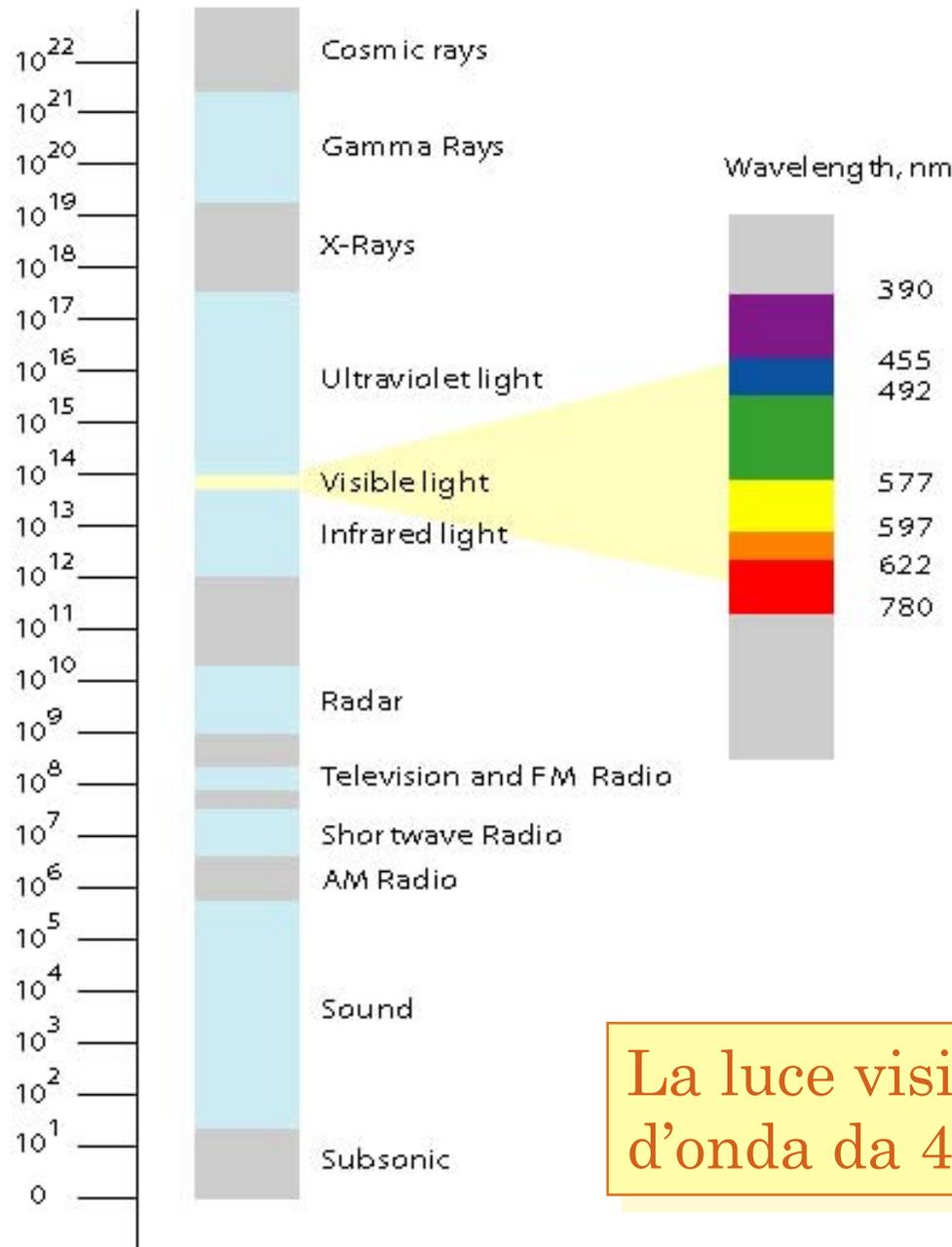
10^{14} protoni $\times 14 \cdot 10^{12} \text{ eV} \approx 10^8 \text{ J}$ questo corrisponde a



$$m_{\text{camion}} = 100 \text{ T}$$

$$v_{\text{camion}} = 120 \text{ Km/h}$$

Frequency, Hz



La luce visibile ha lunghezze d'onda da 400 a 800 nm (10^{-9} m)