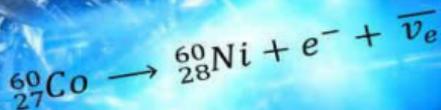


IL FAVOLOSO MONDO DELLA FISICA QUANTISTICA



*La fisica non è
una rappresentazione della realtà,
ma del nostro modo di pensare ad essa.
(Werner Heisenberg)*

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

$$|\psi|^2 = \psi \psi^*$$

$$|\psi\rangle = a|\psi_1\rangle + b|\psi_2\rangle$$

$$E\psi = \hat{H}\psi$$

$$E = h\nu$$

Umberto Piacquadio

1

IL FAVOLOSO MONDO

DELLA FISICA QUANTISTICA

Ing. Umberto Piacquadio
[\(umbpia@tiscali.it\)](mailto:umbpia@tiscali.it)

2

*copyright © 2019 by Umberto
Piacquadio – Edizione Marzo 2019*

*Nessuna parte di questa pubblicazione
può essere riprodotta, memorizzata in
un*

*sistema di recupero o trasmessa in
qualsiasi forma o con qualsiasi mezzo,*

*elettronico, meccanico, di
fotocopiatura, registrazione o altro
senza la previa*

autorizzazione dell'autore.

[info: umbpia@tiscali.it](mailto:umbpia@tiscali.it)

3

*La fisica non è una rappresentazione
della realtà, ma del*

nostro modo di pensare ad essa.

(Werner Heisenberg)

4

5

INDICE

Prefazione

7

1. STORIA ATOMICA

9

2. I MODELLI ATOMICI

15

2.1 THOMPSON E RUTHERFORD

15

2.2 CATASTROFE ULTRAVIOLETTA

25

2.4 QUANTIZZAZIONE

36

2.6 MODELLO ATOMICO QUANTISTICO

56

2.7 NUMERO QUANTICO DI SPIN

64

2.8 PRINCIPIO DI ESCLUSIONE DI PAULI

2.9 PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG 80

2.10 FUNZIONE D'ONDA- EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER 88

2.11 PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE

99

2.12 IL GATTO DI SCHRÖDINGER

110

2.13 DUALITA' ONDA -

PARTICELLA

114

2.14 ENTANGLEMENT
QUANTISTICO

122

2.15 ALTRE INTERPRETAZIONI E
TEORIE

131

3 L'ATOMO

137

3.1 LE DIMENSIONI DELL'ATOMO

137

3.2 IL NUCLEO E GLI ISOTOPI

139

4. RADIOATTIVITÀ

143

4.1 RADIOATTIVITÀ NATURALE ED ARTIFICIALE

143

4.2 IL DECADIMENTO α

150

4.3 IL DECADIMENTO b^-

151

4.4 DECADIMENTO b^+ o b inverso

154

4.5 DECADIMENTO g

158

5 FISSIONE NUCLEARE

160

5.1 LA REAZIONE DI FISSIONE A CATENA

160

5.2 REAZIONE DI FISSIONE INCONTROLLATA

164

5.3 FISSIONE NUCLEARE CONTROLLATA

168

6

6 FUSIONE NUCLEARE

171

6.1 REAZIONI DI FUSIONE

NUCLEARE

171

6.2 BOMBA AD IDROGENO (BOMBA H)

175

6.3 FUSIONE NUCLEARE NELLE STELLE

177

7 MATERIA E ANTI MATERIA

185

7.1 L'ANTIMATERIA

185

7.2 LE PARTICELLE ELEMENTARI

188

7.3 I FERMIONI DI I GENERAZIONE

190

7.4 LE GENERAZIONI SUCCESSIVE DEI FERMIONI

194

7.5 I BOSONI

196

7.6 IL BOSONE DI HIGGS

205

7.7 IL BOSONE GRAVITONE

208

8 ACCELERATORI DI PARTICELLE

210

ALTRE PUBBLICAZIONI AUTORE

216

APPUNTI AUTORE

218

BIBLIOGRAFIA

245

7

Prefazione

Dopo le formulazioni delle teorie di Newton e Maxwell sembrava che

null'altro potesse scalfire il percorso intrapreso nella descrizione Fisica

dei fenomeni naturali.

Il principio di causalità descriveva bene i fenomeni elettromagnetici ed

il moto dei corpi celesti, nel segno del determinismo.

Con la formulazione della Teoria della relatività Einstein prosegue un

percorso di descrizione dei fenomeni in movimento anche a velocità

paragonabili a quelle della luce.

Il cambiamento ha inizio con l'approfondimento e studi a livello atomico

dove, Planck, Bohr, Einstein, abbandonano il concetto di continuità a

favore dell'introduzione della quantizzazione della materia, continuando

però ad interpretare i fenomeni sempre con un fondamento di tipo

classico.

Sarà necessario l'apporto dei giovani Heisenberg e Schoidenger per

abbandonare definitivamente l'interpretazione classica a fronte della

stravolgente nuova interpretazione quantistica.

La successiva formalizzazione della meccanica quantistica basata

sull'algebra non commutativa, introdotta dal giovane Dirac prosegue il

*cammino verso il definitivo utilizzo
della teoria quantistica nel mondo
microscopico.*

*Con la fisica quantistica si scopre un
modo tutto nuovo di comportarsi
della materia e della luce, nel regno
del microcosmo.*

*Grammaticalmente basterebbe
invertire una consonante ed una
vocale:*

*passando dalla causalità alla
casualità.*

Un atomo non è più costituito da

elettroni orbitanti come pianeti, non possiede più una definita traiettoria con determinati valori di velocità e posizione.

La fisica quantistica descrive il microcosmo prediligendo un'evoluzione

della natura verso il disordine e l'incertezza, anziché il determinismo stabilito da causa-effetto, dominante nella fisica classica.

Le particelle possono trasmettersi informazioni istantanee, oltre il limite della velocità della luce, imposto da Einstein con la formulazione della Teoria sulla Relatività Ristretta.

La comprensione del comportamento della materia a livello atomico vi porterà a riflessioni importanti, ed a pensare che nulla di ciò che ci circonda può essere più interpretato con la sola deterministica razionalità.

Per comprendere il favoloso mondo della fisica quantistica possono

trovarsi centinaia di libri, che però il più delle volte o sono di carattere

troppo divulgativo o sono trattati a livello universitario.

Con la presente esposizione, invece, ho cercato di trattare i temi, in

modo da far comprendere principalmente i concetti, senza però

tralasciare le rigorose formule e dimostrazioni matematiche, con un

linguaggio sufficiente ad essere

interpretato con competenze

matematiche e fisiche che si apprendono in un liceo.

Il presente testo non si arroga la prerogativa di essere esaustivo

nell'interpretazione della teoria quantistica, ma è certamente utile per

acquisire nozioni al fine di poter comprendere in visione scientifica i testi

in commercio di carattere divulgativo sull'argomento e comunque creare

ottimi presupposti per futuri

*approfondimenti di carattere
universitario.*

*Ringrazio tutti coloro che mi sono stati
vicini durante la stesura della*

*presente trattazione e con la speranza
di aver impostato il lavoro in*

*modo che possa essere utile a tutti
quelli che si avvicinano allo studio*

*dell'affascinante mondo della Fisica
Quantistica, sono grato sin d'ora a*

*chi vorrà proporre migliorie o
eventuali suggerimenti.*



1. STORIA ATOMICA

La storia della costituzione della materia, da un punto di vista atomico, trova le sue origini già a partire dal 1500 – 500 a.c. in India, dove le scuole filosofiche, per motivare l'esistenza della materia, individuarono cinque essenze fondamentali di cui essa era composta: Fuoco – Terra –

Aria – Acqua – Cielo.

In aggiunta alle cinque sostanze
identificarono ulteriori quattro

sensi esterni: Spazio, Tempo, Mente ed
infine l'Io.

La materia così composta era sempre
divisibile in un numero

finito di particelle, secondo le essenze
fondamentali ed i sensi

esterni.

A seguire, nell'antica Grecia, Leucippo
di Mileto usò per la prima

volta il termine Atomo (ἄτομος), che significa indivisibile, ed il suo

allievo Democrito di Abdera, nel 460-360 a.c., ne

fece diventare il termine famoso.

In quest'ultima interpretazione, l'atomo era

considerato una particella indivisibile che formava tutta la

materia conosciuta.

Tutto il resto era riempito dal vuoto, come lo stesso luogo dove

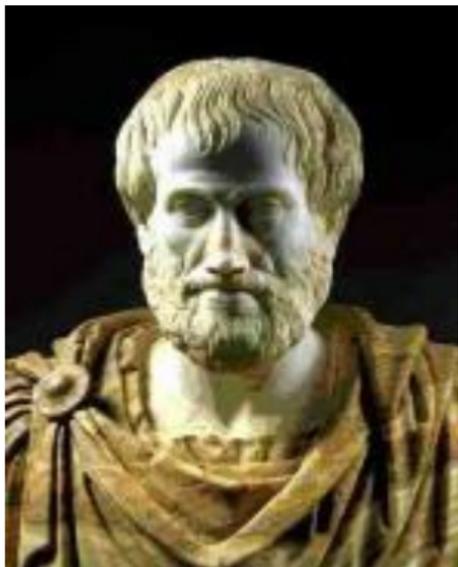
gli atomi si uniscono in un concetto di eternità, attraverso la loro nascita, morte e rinascita.

La divisibilità all'infinito, quindi, restava valida solo in campo

logico-matematico, ma non per la materia, che in un processo di

divisibilità infinita si sarebbe dissolta nel nulla, fino a giungere ad

un inattuabile concetto di non-materia.



10

Più tardi, nel 384-322 a.c. avanza la teoria di

Aristotele, dove la materia viene intesa come

divisibile all'infinito, abbandonando così il

concetto di esistenza dell'indivisibile
atomo.

Per Aristotele l'entità del movimento di
un corpo dipendeva

certamente dal suo peso, ma
principalmente dal mezzo

attraversato, la cui composizione ne
placava la velocità.

Non poteva esistere il vuoto, che
rappresentava il nulla, in

quanto esso avrebbe fatto raggiungere ad
un corpo velocità

infinità, contro il senso comune.

Contrariamente alla considerazione di Democrito, che tra gli

atomi indivisibili doveva trovarsi il vuoto, Aristotele sosteneva

che la materia doveva essere continua e divisibile all'infinito, in

tutta la sua formazione dell'esistenza terrena, sotto la regia ed il

controllo di un ente divino creatore.

Nel corso della sua continua divisione, la materia avrebbe

cambiato proprietà e le sostanze si sarebbero trasformate in

altre, al fine di comprendere ogni possibile entità del conosciuto.

Il Medioevo (400-1400 d.c.), invece, ha rappresentato il periodo

più buio della filosofia atomistica a causa del proliferare di

pratiche esoteriche, che più si avvicinano alla magia che alla

scienza. E' proprio in tale periodo che prende quota l'alchimia,

ricordata per la caratteristica del voler trasmutare metalli vili in

oro.

Tale concezione viene fortunatamente abbandonata con l'inizio

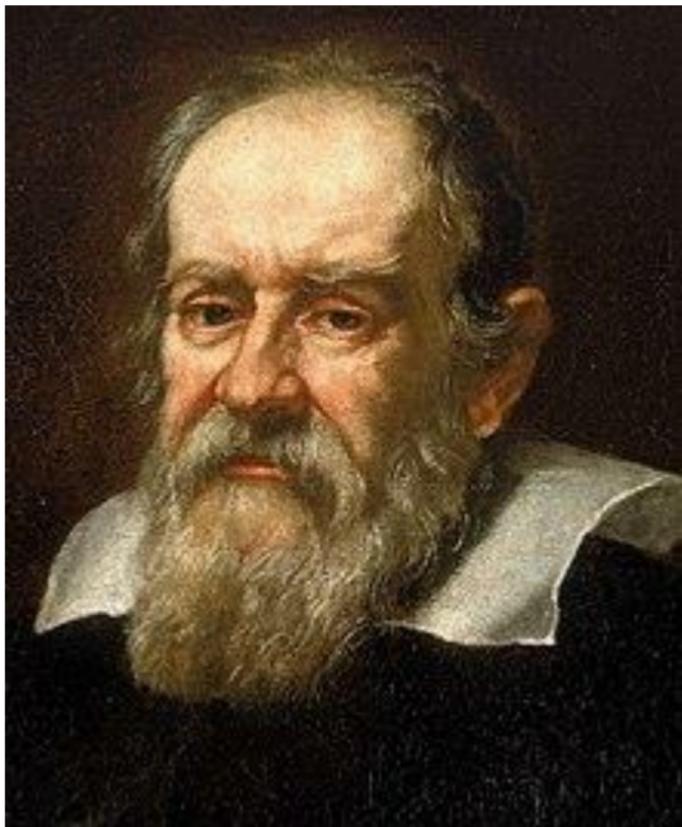
del "Rinascimento" e prosegue nell'epoca "Barocca", come

periodo di rivoluzione scientifica, dove si inizia a configurare una

netta separazione tra scienza e religione.







11

Quest'ultima epoca segna l'inizio del
metodo

sperimentale nelle scienze ad opera del

grande

padre della scienza moderna, italiano e fisico,

astronomo, filosofo, matematico e accademico,

Galileo Galilei.

Per il primo concetto scientifico di atomo,

bisognerà attendere nell'anno 1807 la formulazione delle teorie del chimico, fisico, meteorologo e insegnante inglese,

John Dalton, famoso anche per aver dato
luogo al famoso termine “daltonismo”,
da cui era affetto.

Dalton, attraverso la scomposizione
dell’acqua nei suoi

componenti

Ossigeno

ed

Idrogeno,

analizzandone

le

proporzioni, comprese che in una reazione chimica gli atomi

rimangono invariati in numero e in massa, nel rispetto del

principio di conservazione della massa e combinandosi in

proporzioni di numeri interi.

Nel caso dell'acqua, due atomi di idrogeno (H) si combinavano

con un atomo di ossigeno (O), che oggi scriviamo con la più

famosa formula chimica H_2O .

Nel 1823 circa, Lorenzo Romano
Amedeo

Carlo Avogadro, chimico e fisico
italiano,

introducendo il concetto di molecola
come

composta da atomi, ricavò
sperimentalmente

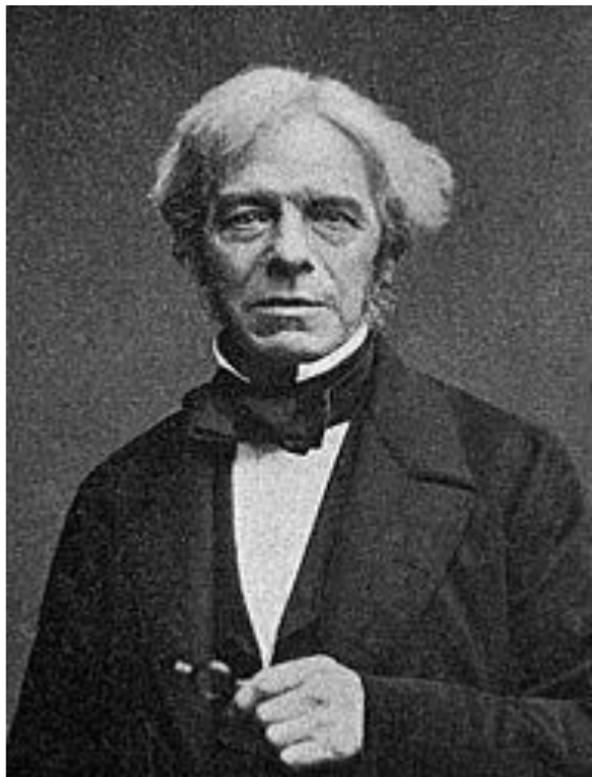
che uguali volumi di gas, anche diversi,
alla

stessa temperatura e pressione
contengono

lo stesso numero di molecole e quindi di

atomi.









12

In tale ipotesi, pesando volumi di gas diversi si potevano ricavare

le proporzioni tra le diverse masse atomiche.

Le ulteriori ricerche ad opera di Coulomb – Faraday- Maxwell tra

il 1780-1830, sulle teorie matematiche [dell'elettricità](#) e del [magnetismo](#) (Charles Augustin De Coulomb), sulla correlazione di massa e quantità di carica elettrica (Michael

Faraday) e sull'unificazione della teoria elettromagnetica (James

Clerk Maxwell) preparano il campo all'avvento della fisica

atomica.

Nel 1869 D.I. Mendeleev, chimico russo, ideò un ordine nella

chimica, disponendo gli elementi chimici in ordine di peso

atomico crescente ed in periodi, costituendo una tavola

periodica, precursore dell'attuale tavola periodica.

L'opera di Mendeleev riveste carattere di

eccezionalità in quanto ai quei tempi non era

ancora nota la composizione dell'atomo,

ne

tantomeno

l'esistenza

degli

elettroni,

riuscendo però comunque a raggruppare
gli

elementi per stesse proprietà chimiche.

Nella tavola periodica di Mendeleev gli
elementi erano ordinati in

righe e colonne, in ordine di massa

atomica, in una opportuna

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,1.
			Fe = 56	Rn = 104,4	Ir = 198.
			Ni = Co = 59	Pt = 106,8	O = 199.
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.
	Be = 9,1	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,1	? = 68	Ur = 116	Au = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,1	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204.
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.
		? = 45	Ce = 92		
		?Er = 56	La = 94		
		?Yt = 60	Di = 95		
		?In = 75,6	Th = 118?		

Д. Менделѣевъ

disposizione per righe e colonne quando le caratteristiche degli

elementi cominciavano a ripetersi.

A detta tavola effettuò alcune modifiche e senza saperlo eseguì

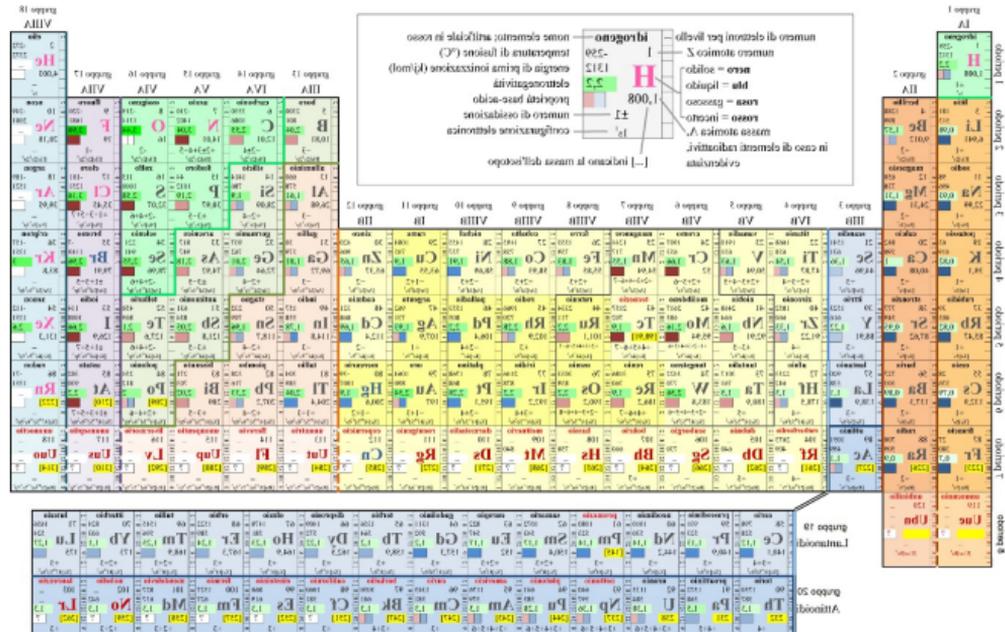
un ordine per numero atomico (numero di protoni).

Successivamente, con il progredire delle conoscenze sull'atomo

la tavola periodica è stata aggiornata, ottenendo la attuale

configurazione attraverso uno schema in cui gli elementi chimici

sono ordinati sulla base del loro numero atomico Z (numero di protoni = numero di elettroni), del numero di elettroni presenti nei diversi orbitali atomici s, p, d, f, ed opportunamente raggruppati per caratteristiche simili.





15

2. I MODELLI ATOMICI

2.1 THOMPSON E RUTHERFORD

Fin qui abbiamo raccontato dei risultati ottenuti da illustri

scienziati, nei secoli, attraverso teorie elaborate e formulate

senza la conoscenza dei meccanismi di nascita della carica

elettrica. In particolare non era ancora nota la corretta

composizione dell'atomo e l'esistenza dell'elettrone.

Nel 1897 il fisico britannico Joseph John Thompson studiò

approfonditamente i raggi catodici, così fino a giungere alla

scoperta dell'elettrone.

Thompson nasce a Cheetham Hill,

Manchester il 18 dicembre 1856 ed a soli

28 anni venne chiamato a dirigere uno dei

più famosi centri di ricerca presso

l'Università di Cambridge, il Cavendish

Laboratory, dove tra l'altro divenne docente

dotato di straordinarie capacità didattiche. Per diversi anni tenne

la presidenza della Royal Society, cioè della massima

accademia inglese. Morì a Cambridge il 30 agosto [1940](#).

I raggi catodici sono delle luminescenze che si sviluppano in un

tubo di vetro sotto vuoto o riempito adeguatamente, a seguito di

una sorgente elettrica che si collega a

due piastre: polo positivo

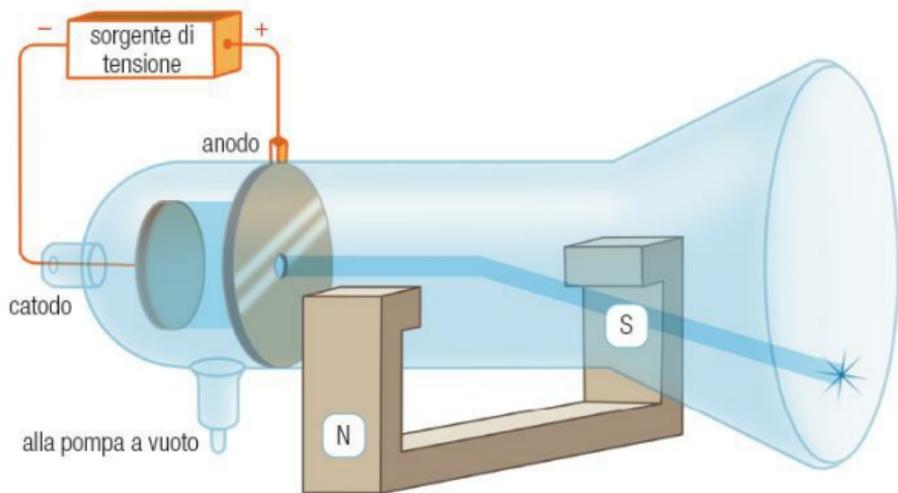
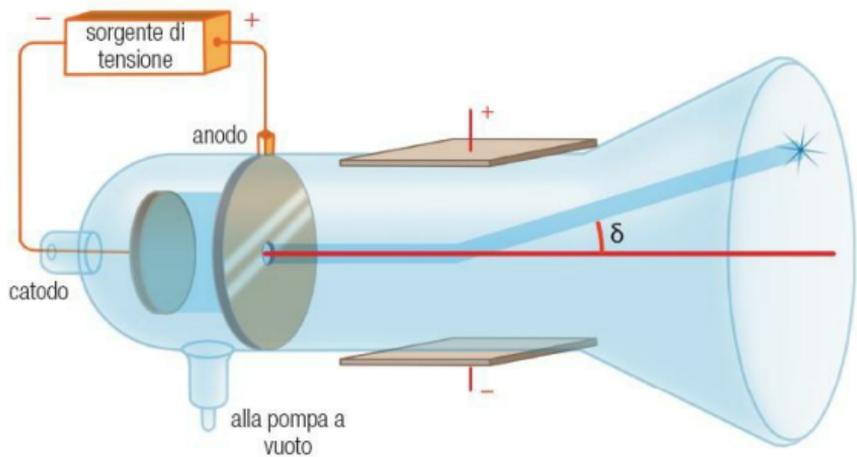
(anodo) e polo negativo (catodo).

Il primo tubo a raggi catodici della storia (tubo di Crookes) è stato

realizzato da William Crookes, nei primi anni '70 del XIX secolo.

Applicando un campo elettrico o magnetico, scoprì che questi

venivano deviati, deducendo che non potevano essere costituiti



16

da raggi (onde elettromagnetiche), bensì

da particelle cariche

negativamente.

Thompson, dopo aver scoperto la
consistenza dei raggi

osservati, attraverso la misura
dell'angolo di deviazione, riuscì

anche a ricavare il rapporto
carica/massa (q/m).

Queste

piccole

particelle,

così

individuate,

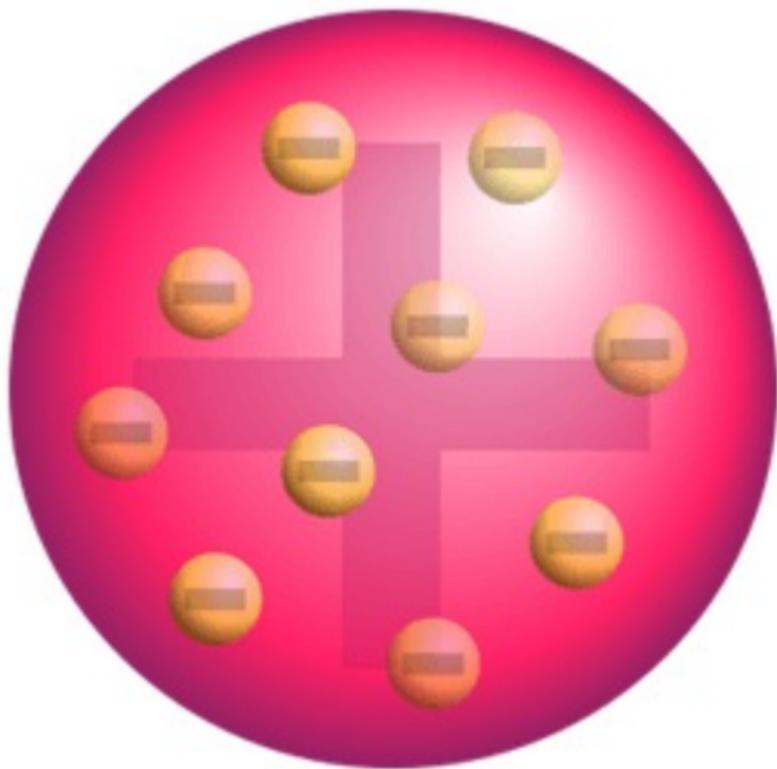
cariche

negativamente, vennero chiamate
“elettroni”.

La scoperta dell'elettrone costituisce la
prima vera opera di

discretizzazione della materia,
sperimentalmente supportata.





17

Infatti diversamente da quanto
precedentemente ipotizzato da

Maxwell, attraverso l'utilizzo della

densità di carica elettrica per

descrivere i fenomeni elettrici, in modo
che la carica elettrica

poteva assumere qualsiasi valore di tipo
continuo, ora la carica

elettrica poteva assumere solo valori
multipli della carica

elementare “ e ” .

Sulla base di quanto riscontrato
sperimentalmente, lo scienziato,

formula la prima modellazione
dell'atomo della storia.

Il modello atomico di Thomson viene scherzosamente chiamato

modello atomico a panettone, proprio perché prevedeva che

così come il panettone presenta all'interno una distribuzione di

uva passa, così l'atomo doveva avere una massa uniforme

positiva con gli elettroni distribuiti al suo interno, il tutto in modo

da avere comunque una carica totale neutra, perché tale doveva

essere sulla base dei valori

sperimentali.

Per tale scoperta nel 1906 riceve il premio Nobel.

Questo modello dell'atomo, non ha però vita lunga.

E' il chimico e fisico neozelandese Ernest Rutherford, che nel

1909,

contestualmente

alla

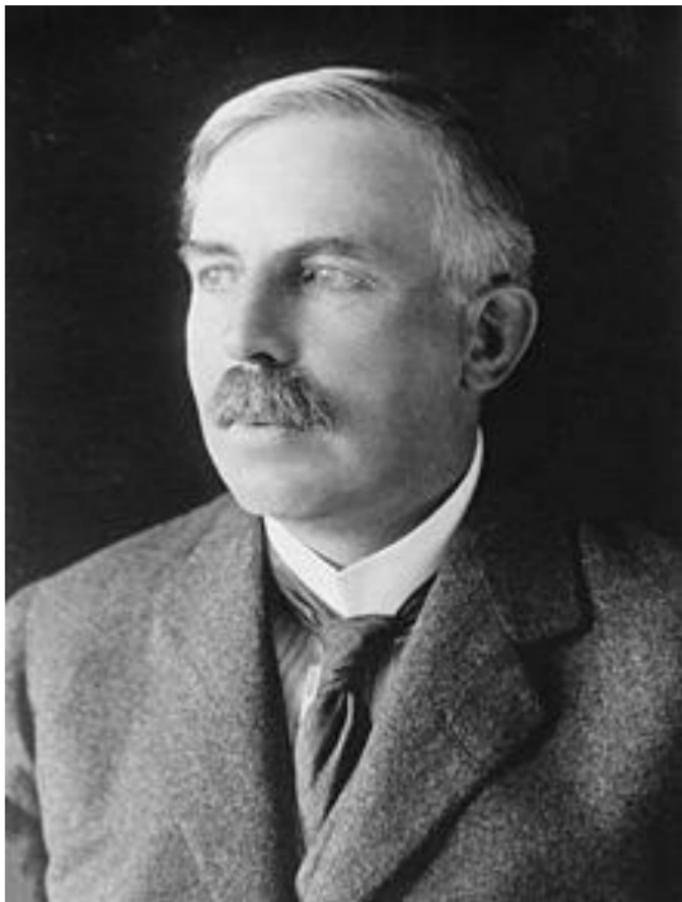
scoperta

dello

“scattering

coulombiano o di Rutherford”, sancisce
l’abbandono del modello

atomico a panettone per un nuovo
modello atomico.



18

Ernest Rutherford, I barone Rutherford
di

Nelson,

nasce

a

Spring

Grove

(ora

Brightwater) in Nuova Zelanda il 30
agosto

1871. Studiò al Nelson College e al
Canterbury

College, conseguendo tre diplomi e due

anni

di ricerche in prima linea nella tecnologia

elettrica. Nel 1895 si trasferì in Inghilterra per studi post-laurea

presso il Laboratorio Cavendish, dell'Università di Cambridge.

Durante la sua investigazione della radioattività coniò i termini

raggi alfa e raggi beta. Nel 1898 Rutherford fu nominato alla

cattedra di Fisica alla McGill University, in Canada, dove

sviluppiò il lavoro che gli fruttò nel 1908
il Premio Nobel per la

Chimica. Aveva dimostrato che la
radioattività era la spontanea

disintegrazione degli atomi. Dopo aver
notato che in un

campione di materiale radioattivo aveva
un ben determinato

tempo di dimezzamento, ideò una
applicazione pratica di questo

fenomeno, usando questo tasso costante
di decadimento come

un orologio, per ricavare la

determinazione dell'età effettiva della Terra, che si rivelò essere molto più vecchia di quanto la maggior parte degli scienziati dell'epoca credesse.

Nel 1907 assunse la cattedra di Fisica alla Victoria University of

Manchester. Qui scoprì l'esistenza del nucleo atomico negli

atomi. Più tardi, mentre lavorava con Niels Bohr, Rutherford

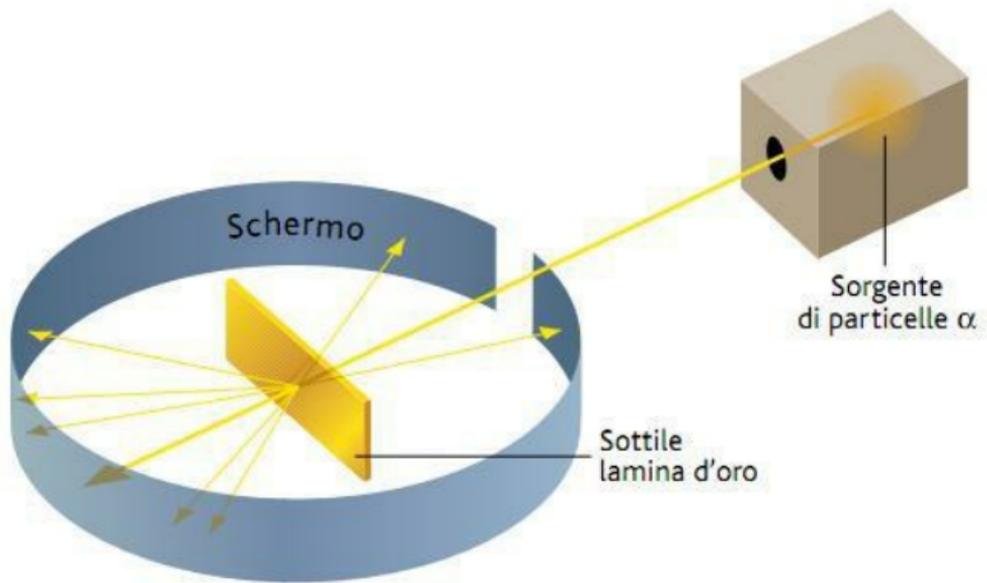
avanzò una proposta sull'esistenza di particelle neutre, i

neutroni. Nel 1917 ritornò al Cavendish come Direttore. Sotto la

sua direzione, furono assegnati premi Nobel a James Chadwick

per la scoperta del neutrone, John Cockcroft e Ernest Walton per

la scissione dell'atomo negli acceleratori di particelle e Edward



19

Victor Appleton per la dimostrazione dell'esistenza della

ionosfera. Si riporta una delle sue più famose affermazioni " *Nella*

scienza esiste solo la Fisica; tutto il

resto è collezione di

francobolli". Morì a Cambridge il 19 ottobre [1937](#).

Ritorniamo alla scoperta del nuovo modello atomico.

L'esperimento di Rutherford si svolgeva sparando particelle a

su lamelle in oro, dello spessore di alcuna decina di atomi.

Le particelle alfa (α), chiamate anche raggi α , altro non sono che

nuclei di Elio, costituiti da 2 protoni e 2 neutroni, quindi, particelle

a carica positiva.

Come risultato osservò un fenomeno di scattering coloumbiano,

ovvero una deviazione del percorso di queste particelle solo

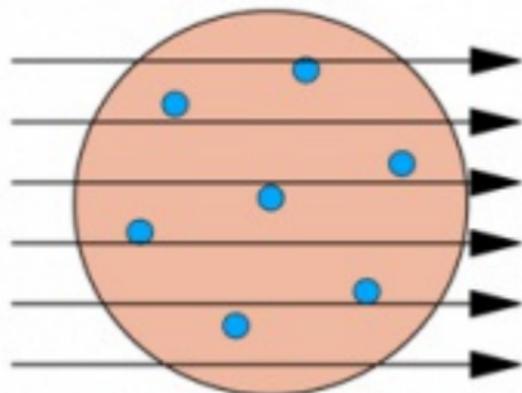
nell'1% dei casi, mentre per il 99% proseguivano indisturbate.

L'angolo di deviazione variava da 0° a 180° , nei rispettivi casi

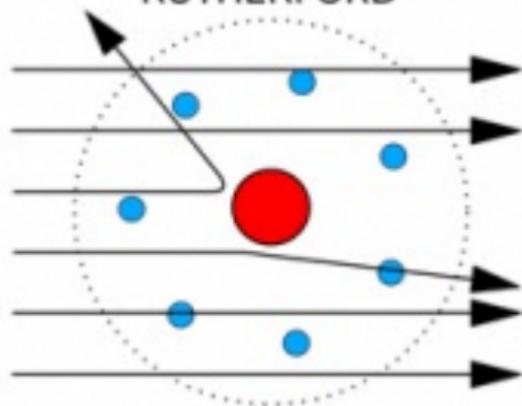
limite di passaggio indisturbato delle particelle e di ritorno nella

stessa direzione con verso opposto.

THOMSON



RUTHERFORD



20

Da ciò rilevò che, le particelle proiettile avendo una carica

positiva, l'atomo non poteva avere una configurazione "a

panettone", con una massa a carica positiva uniformemente

diffusa, come pensava Thompson, altrimenti le particelle a

sarebbero dovute passare sempre indisturbate per la prevalenza

della massa nucleonica sulla massa distribuita.

Il nuovo atomo, invece, doveva avere una concentrazione di

massa di carica positiva al centro

dell'atomo e la corrispondente

massa di carica negativa distribuita esternamente.

Quando le particelle proiettile colpivano il nucleo di carica

positiva, avrebbero ricevuto una opportuna deviazione maggiore

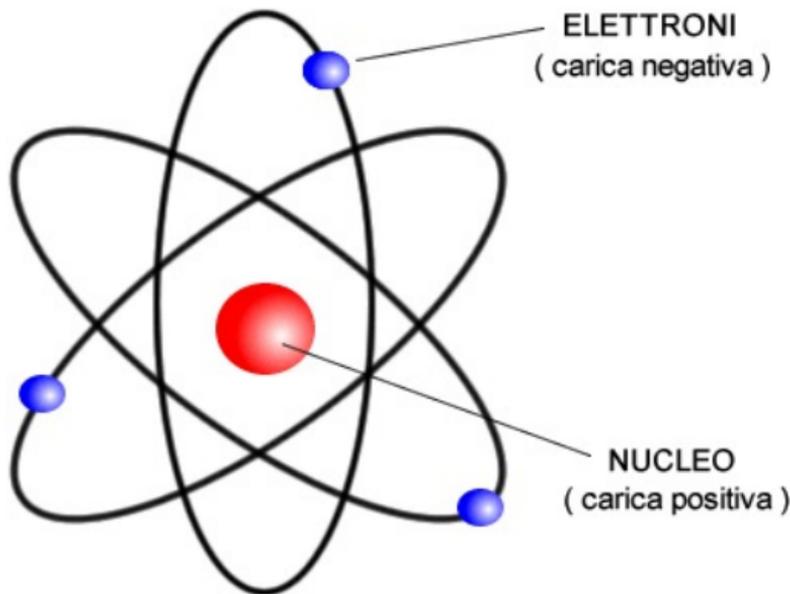
di 0° e fino a 180° , nel caso di ritorno nella stessa direzione con

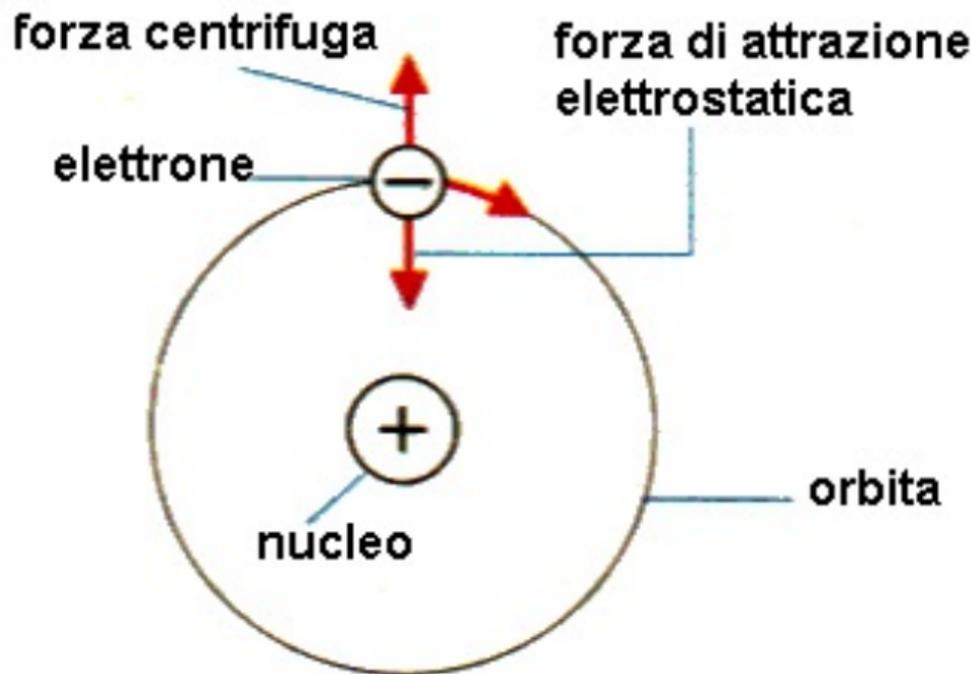
verso opposto.

Viceversa le particelle passanti nella parte atomica con le ben

meno massive cariche negative
distribuite, sarebbero passate

indisturbate.





21

Nasce così il modello atomico di Rutherford, che prevede un

nucleo centrale avente carica positiva ed elettroni che vi orbitano

intorno a carica negativa, denominato
per somiglianza al moto

dei pianeti intorno al sole, modello
atomico planetario.

Per tale modello atomico risulta
semplice calcolare l'energia

totale dell'elettrone orbitante in funzione
del raggio e della carica

elettrica.

L'elettrone è soggetto ad una forza
centripeta, materializzata con

la forza di attrazione elettrostatica.

Dalla relazione di Coulomb sappiamo che nucleo ed elettrone si

attraggono con una forza pari a:

1

$\frac{1}{4}$

(2.1.1) $F = -$

$\frac{1}{4} \frac{q_1 q_2}{r^2}$

con

22

$e =$ carica dell'elettrone

ϵ_0 = costante dielettrica nel vuoto

r = raggio dell'orbita

Essendo tale relazione simile alla legge gravitazionale di

Newton, le orbite degli elettroni dovevano essere, a rigor di

logica, in analogia al moto dei pianeti, di tipo ellittico.

In prima approssimazione, però, trascuriamo la forma ellittica ed

utilizziamo quella circolare.

In tali condizioni la forza centripeta

vale:

v^2

$$(2.1.2) \quad \square = -\square$$

\square

con

v = velocità tangenziale

m = massa dell'elettrone

Uguagliando la (2.1.1) con la (2.1.2) si ottiene:

1

$\square 2$ v^2 $(2.1.3)$ $= \square$ $4 \square \square 0 \square 2$ \square

Da cui dividendo per 2 e moltiplicando per r ambo i membri

 1 1

γ^2

$$(2.1.4) \quad \gamma^2 = \frac{1}{1 - \beta^2} =$$

2

$$8 \frac{1}{\gamma^2} = 0 \quad \gamma^2$$

Che equivale proprio all'energia cinetica, a velocità non

relativistiche. L'energia potenziale vale

1

γ^2

$\gamma^2 =$

$$4 \square \square 0 \square$$

Quindi l'energia totale dell'elettrone è pari a

$$1$$

$$1$$

$$\square^2$$

$$\square \square = \square v^2 -$$

$$2$$

$$4 \square \square 0 \square$$

$$23$$

Che sostituendo la (2.1.4) il valore dell'energia totale

dell'elettrone orbitante, diventa

1

$\frac{1}{2}$

(2.1.5) $E_n = -$

$\frac{13.6}{n^2} \text{ eV}$

Tale ultima relazione rappresenta l'Energia complessiva

dell'elettrone in orbita, intorno al nucleo.

Purtroppo anche questo modello continuava ad avere dei problemi di natura fisica.

Era già noto come una particella carica, accelerata, emettesse

energia sotto forma di radiazione elettromagnetica, perdendo energia.

Nel caso specifico essendo il moto di tipo circolare, generandosi

una accelerazione centripeta nel moto (centrifuga dal punto di

vista dell'elettrone), gli elettroni che ruotano attorno al nucleo

centrale avrebbero dovuto perdere energia fino a collassare sul

nucleo in pochissimo tempo.

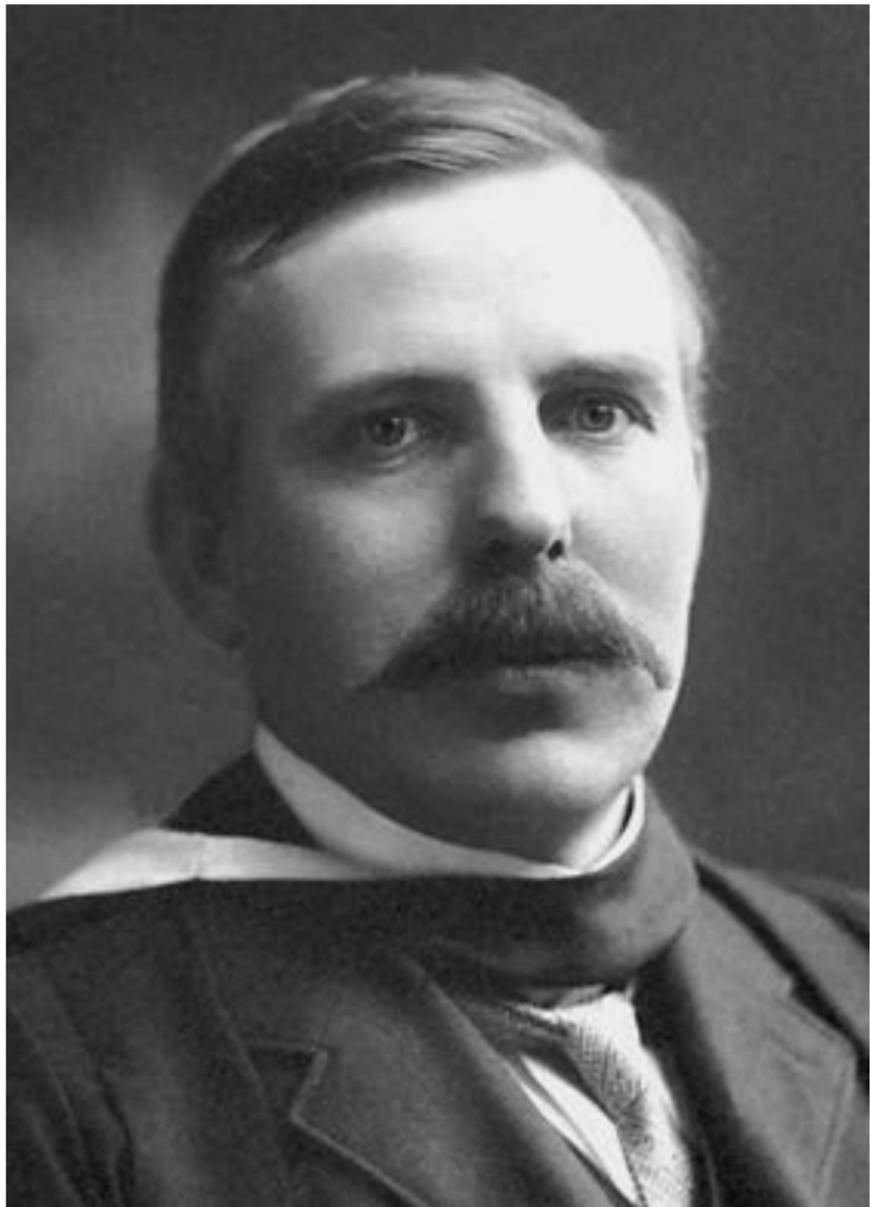
In definitiva, il modello di Rutherford oltre a restare un modello di

tipo classico, rispettoso delle leggi fisiche della meccanica

classica e legato ad un moto assimilato a quello dei pianeti,

risultava in gran parte non rispettoso dei risultati ottenuti

sperimentalmente.



COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

**“Nella scienza esiste solo la Fisica;
tutto il resto è**

collezione di francobolli.”

ERNEST RUTHERFORD

[https://www.frasicelebri.it/frasi-
di/ernest-rutherford/](https://www.frasicelebri.it/frasi-di/ernest-rutherford/)



25

2.2 CATASTROFE ULTRAVIOLETTA

Per una corretta individuazione di un modello atomico, che

avesse anche un riscontro sperimentale, era necessario

abbandonare alcuni pregiudizi fissati dalla meccanica classica,

specie per superare lo scoglio della prevista perdita di energia

dell'elettrone, fino al suo collasso sul nucleo atomico.

Un primo importante cambiamento venne ad opera dal fisico

tedesco, Max Planck, che formulò una legge di quantizzazione

dell'energia di un'onda elettromagnetica, nel corso della

risoluzione di una problematica in campo termodinamico,

denominata “catastrofe ultravioletta”, relativa allo studio dello

spettro del corpo nero.

Max Planck nasce a Kiel il 23 aprile 1858 e fu

sempre considerato fin dagli studi
liceali una

mente chiara, logica e polivalente.

Nominato

professore di fisica teorica
all'Università di

Berlino,

si

dedicò,

soprattutto

perché

interessato

dalle

prime

lampade

ad

incandescenza, allo studio dei problemi
termodinamici connessi

con l'irraggiamento. Il 14 dicembre del
1900, con la

pubblicazione del suo primo lavoro
sulla teoria quantistica,

rappresenta la data di nascita della fisica moderna.

Rivoluzionario suo malgrado, era quasi convinto che il concetto

di “quanto” fosse solo una “fortunata violenza puramente

matematica contro le leggi della fisica classica”. A proposito della

teoria sull’interpretazione dello spettro del corpo nero, scriveva:

” L’intera vicenda fu un atto di disperazione.... Sono uno studioso

tranquillo, per natura contrario alle

avventure piuttosto rischiose.

▪

26

*Però una spiegazione teorica
bisognava pur darla, qualsiasi*

*ne fosse il prezzo Nella teoria del
calore sembrò che le uniche*

*cose da salvare fossero i due principi
fondamentali*

*(conservazione dell'energia e principio
dell'entropia), per il resto*

*ero pronto a sacrificare ogni mia
precedente convinzione". Ed*

ancora in un passo della sua ultima conferenza, pochi mesi

prima della morte: ” *Chi è addetto alla costruzione delle scienze*

troverà la sua gioia e la sua felicità nell'aver indagato l'indagabile

e onorato l'inosservabile”. Dopo molte sofferenze spirituali e

materiali, Planck trascorse gli ultimi anni di vita a Gottingen, dove

morì quasi novantenne il 4 ottobre 1947.

Ritorniamo alla problematica dello spettro del corpo nero.

Dall'applicazione delle equazioni di Maxwell risultava che un

corpo nero in equilibrio termico con l'ambiente, quindi ad una

fissata temperatura, l'energia emessa per ciascuna radiazione

alle differenti frequenze/lunghezze d'onda (radianza), doveva

essere inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda.

In particolare la Legge di Rayleigh-Jeans poneva in correlazione

la densità di energia con la lunghezza

d'onda (λ)

corrispondente, attraverso la costante di Boltzmann (k_B) e la

temperatura (T)

$\frac{1}{\lambda^2}$

$\propto \frac{1}{\lambda^2}$

=

$\frac{1}{\lambda^2}$

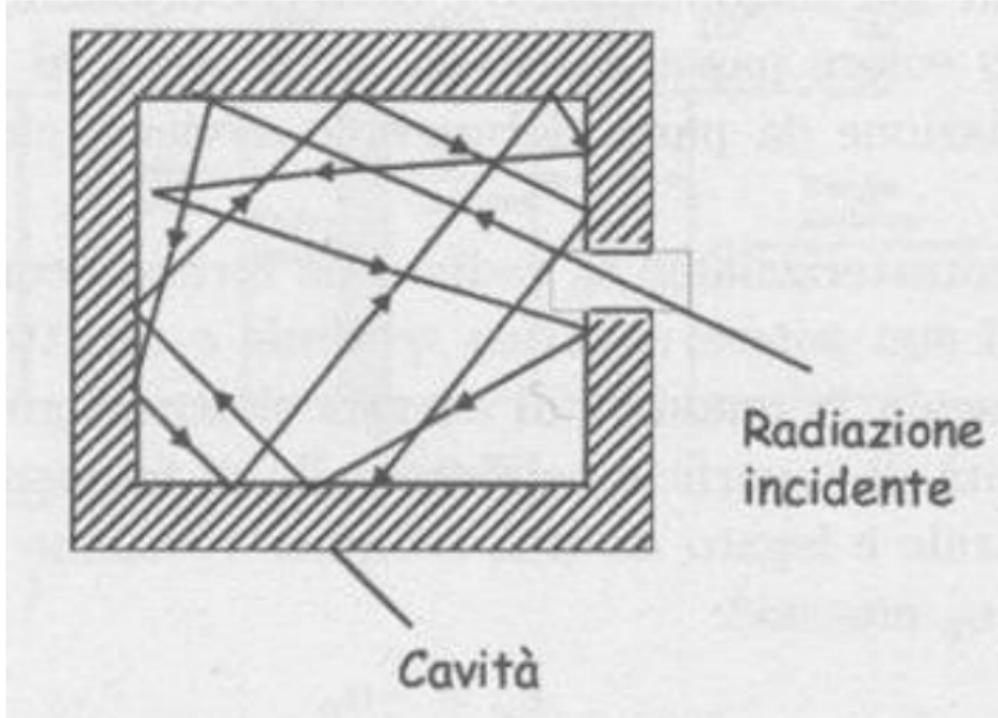
$\propto \frac{1}{\lambda^2}$

Questa relazione dava risultati confortanti per i corpi a

temperatura ambiente, ed operando con
radiazioni ad elevata

lunghezza d'onda, invece entrava in crisi
con i risultati

sperimentali ottenuti dall'analisi di un
corpo nero, dove le



27

temperature sono decisamente superiori
e lo spettro delle

radiazioni interessate è più ampio.

Un corpo nero ideale è un corpo che in natura non esiste, di certo

non è di colore nero, ed assorbe tutta la radiazione

elettromagnetica incidente senza rifletterla.

Assorbendo tutta la radiazione incidente, per la legge di

conservazione dell'energia, il corpo nero irradia la stessa

quantità di energia assorbita, sebbene trasformandola.

In laboratorio, un corpo nero, può essere

realizzato come un

oggetto cavo, isolato con l'esterno e mantenuto a temperatura

costante, come una sorta di forno.

L'oggetto così realizzato, al fine di poter procedere con le dovute

verifiche sperimentali, presenta un minuscolo foro per l'ingresso

della radiazione elettromagnetica, di dimensioni tali che la stessa

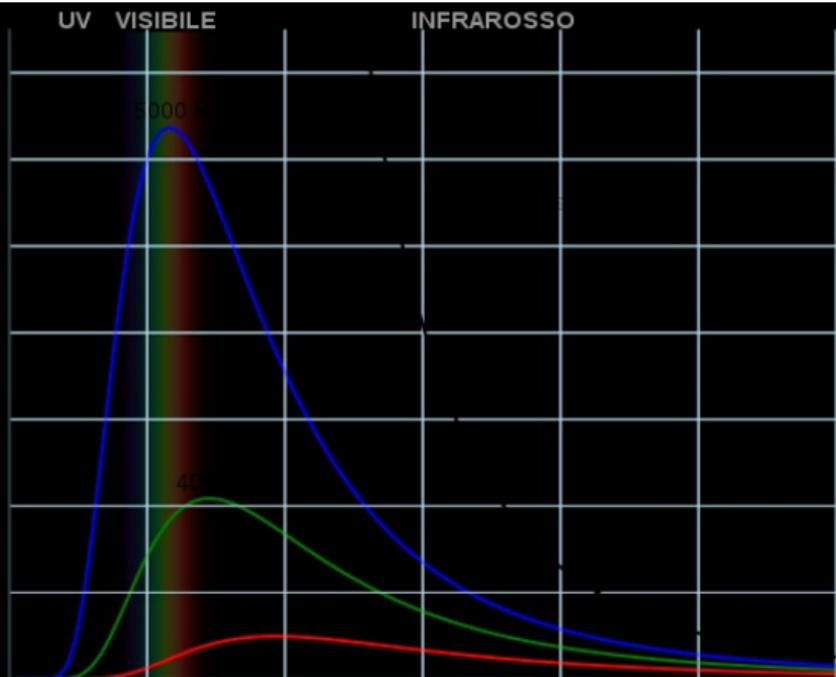
abbia minime probabilità di uscire.

Le pareti interne assorbono ed emettono

parte della radiazione,

in continuazione, nelle diverse lunghezze
d'onda e frequenza,

per ogni fissato valore di temperatura.



28

Il minuscolo foro viene così utilizzato anche come spioncino, per analizzare la distribuzione dello spettro

elettromagnetico delle

radiazioni presenti all'interno del corpo cavo.

Dalla suddetta osservazione è possibile costruire un grafico che

correla i possibili valori di energia emessa per ciascuna

radiazione alle differenti frequenze/lunghezze d'onda (radianza),

al variare della temperatura.

Il grafico evidenzia che al diminuire della lunghezza d'onda, e

quindi spostandoci verso le lunghezze dell'ultravioletto (UV),

poste a sinistra dello spettro del visibile, si ottengono valori

dell'intensità che tendono a zero, diversamente dal risultato

ottenuto dall'applicazione della vecchia teoria classica, dove i

valori di intensità tendono all'infinito a causa della relazione di

inversa proporzionalità tra lunghezza 'onda ed energia.

L'evidente discordanza dei dati sperimentali ottenuti con le teorie

classiche, in corrispondenza delle radiazioni di lunghezze d'onda

verso l'ultravioletto, ha portato a denominare tale problematica

con il nome di "catastrofe ultravioletta".

Per risolvere la questione, interviene così Max Planck, attraverso

la formulazione di una innovativa ipotesi di quantizzazione della

radiazione elettromagnetica, che porterà tra l'altro a formulare

una nuova legge come espressione dell'energia emessa per

radiazione alle differenti frequenze $\rho(\nu, T)$, in funzione della

temperatura e della frequenza, utilizzando la costante di

Boltzmann (k), la costante velocità della luce nel vuoto (c) ed una

nuova costante di Planck (h)

$$2 \quad \rho(\nu, T) =$$

1

$$(2.2.1) \quad \rho(\nu, T) =$$

□ 2

■ □

□ □ □ - 1

Ed è proprio in quest'ultima relazione che viene introdotta la

costante h , denominata costante di Planck, come elemento

cardine per la quantizzazione della radiazione elettromagnetica,

oggetto di approfondimento nel paragrafo successivo.

La costante di Planck h , rappresenta

l'azione minima possibile,

definita come “quanto d'azione”, che
calcolata sperimentalmente

assume un valore costante pari a
 $6,62606957 \times 10^{-34} \text{ J s}$, ed è la

costante più importante della meccanica
quantistica, così come

la costante c = velocità della luce nel
vuoto rappresenta la più

importante costante per lo studio della
Relatività di Einstein.

L'introduzione della costante di Planck
 h , sancisce l'effettiva

innovazione della meccanica quantistica
nei confronti della

meccanica classica, stabilendo che
l'energia e le grandezze

fisiche fondamentali ad essa legate, con
evidenza solo alla scala

30

microscopica,

non

evolvano

in

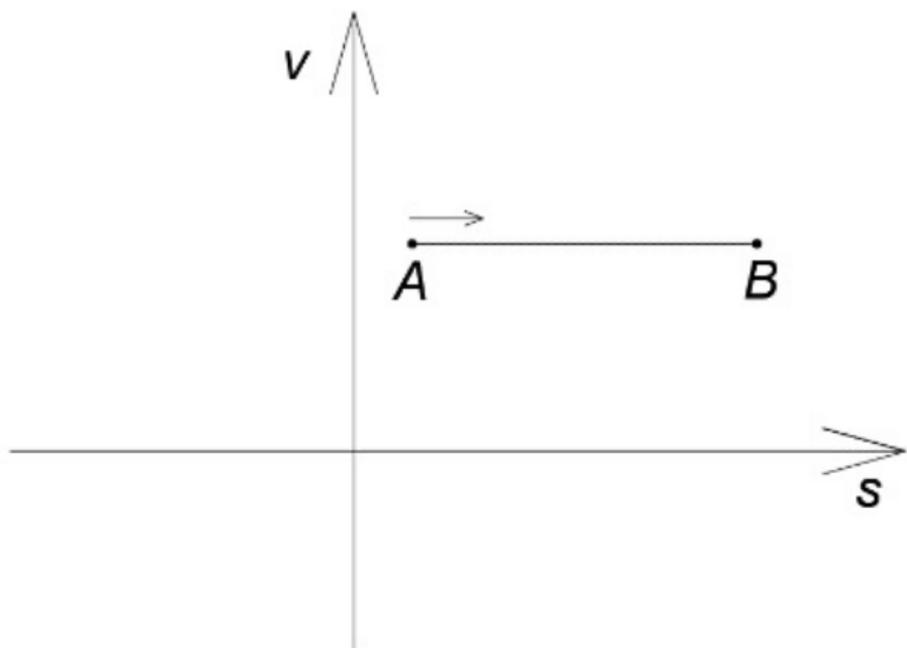
modo

continuo,

ma

risultano quantizzate, potendo assumere solo valori multipli di

tale costante.



2.3 LA COSTANTE DI PLANCK

Esaminiamo nel dettaglio ciò che effettivamente rappresenta, da

un punto di vista fisico, la costante di Planck.

Dalla fisica classica abbiamo imparato ad utilizzare i grafici

spazio-tempo per rappresentare i moti dei punti materiali.

Allo stesso modo, sempre da un punto di vista classico, è

possibile rappresentare un moto di una particella in un sistema

di assi cartesiani velocità-spazio.

Il grafico che segue rappresenta il moto unidimensionale di un

punto materiale in moto rettilineo uniforme, velocità costante,

che si muove da A verso B, in un sistema di riferimento velocità-

spazio.

A differenza di una rappresentazione velocità-tempo, dove il

tempo è sempre di tipo crescente, dal presente al futuro, nella

rappresentazione velocità-spazio, lo spazio può assumere valori

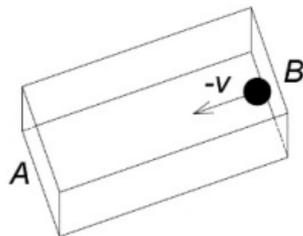
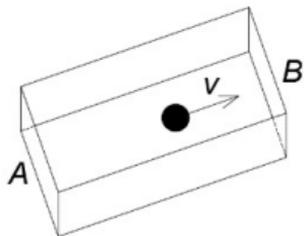
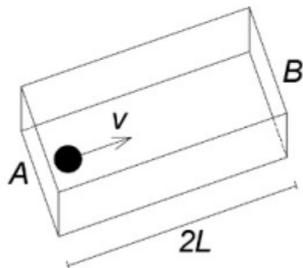
crescenti e decrescenti. Tale ultimo sistema, inoltre, fornisce

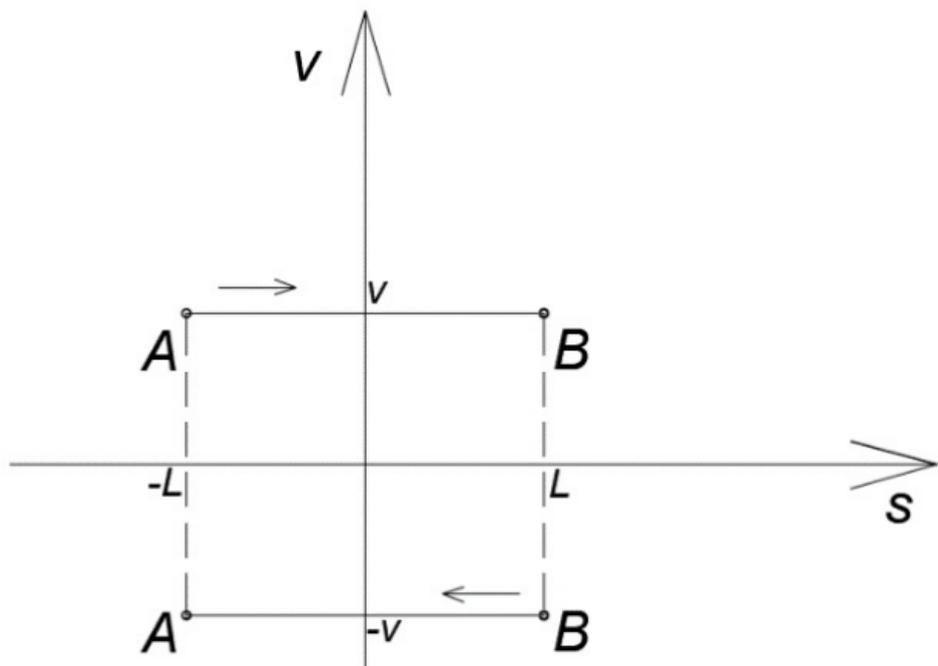
informazione sulla velocità della particella quando si trova in un

particolare punto dello spazio considerato, diversamente dalla

rappresentazione velocità-tempo dove è possibile correlare la

velocità solo in funzione del tempo.





32

Per semplicità continuiamo a considerare un moto di tipo

unidimensionale, di una particella che si sposta di moto uniforme

in una piccola scatola con urti elastici sulle pareti, tale che

quando la particella raggiunge la parete destra, per la legge sulla

conservazione della quantità di moto, inverte la sua velocità,

senza che la stessa varia, e così via quando raggiunge la parete

sinistra.

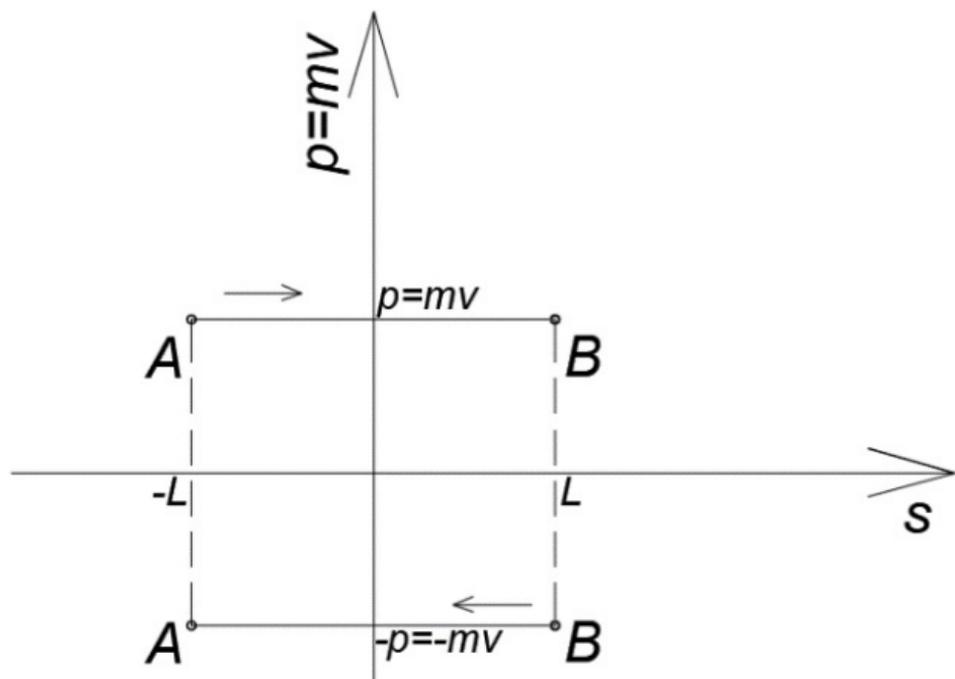
Se consideriamo come origine di riferimento il centro della

scatola, ipotizzando la scatola di lunghezza pari a $2L$, la

particella si muove nello spazio unidimensionale tra L e $-L$.

Tale moto è rappresentabile nel diagramma velocità-spazio nel

modo seguente.



33

Quando la particella raggiunge il lato destro B, la sua velocità di

inverte istantaneamente, da v a $-v$, e lo spazio viene percorso

nel verso opposto.

Per tener conto anche della massa della particella, possiamo

considerare sull'asse verticale la variabile quantità di moto o

impulso, pari alla velocità moltiplicata per la massa ($p = m \cdot v$), in

sostituzione della sola variabile velocità, senza che il grafico

subisca variazioni qualitative.

L'area del rettangolo così individuata, per il moto

unidimensionale considerato, viene denominata “azione ridotta

lungo una traiettoria chiusa nello spazio del e fasi” ed è pari a

$$(2.3.1) A = 2L \cdot 2 \cdot m \cdot v$$

Detta grandezza da un punto di vista dimensionale è esprimibile

come

$$[M] [L] [T]^{-1} [L] = [M] [L]^2 [T]^{-1}$$

e considerando le corrispondenti unità di misura nel Sistema

Internazionale è esprimibile in

$$Kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$$

34

in termini energetici, tenendo conto che per un Joule è valida la

seguente conversione

$$J = Kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$$

si ottiene

$$Kg \cdot m^2 \cdot s^{-1} = J \cdot s$$

Pertanto l'area individuata nel grafico “quantità di moto-spazio”

assume la stessa unità di misura del a

costante di Planck, che

abbiamo già definito minima azione
possibile e sappiamo essere

pari a circa $h = 6,62606957 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$.

La grandezza fisica “Azione” era già
nota ai tempi del a

meccanica classica, ma scarsamente
utilizzata in quanto nel o

studio delle leggi fisiche macroscopiche
questa grandezza

risulta avere poca utilità, considerato il
suo ridotto valore rispetto

alle grandezze macroscopiche.

Infatti se immaginiamo che la particella sia rappresentata da una

pallina da ping-pong e la scatola sia un tavolo da gioco,

ipotizzando il peso della pallina pari a 10 g , la sua velocità pari a

10 m/s e la lunghezza del tavolo pari a $2,5\text{ m}$, applicando la

(2.3.1) si ottiene un valore dell'azione pari a

$$A = 2L \cdot m \cdot v = 2,5\text{ m} \cdot 2 \cdot 0,01\text{ Kg} \cdot 10\text{ m/s} = 0,5\text{ Kg}\cdot\text{m}^2/\text{s} = 0,5\text{ Js}$$

Detto valore, se confrontato con la costante di Planck h è pari a

circa $a \approx 7,50 \cdot 10^{32} h$ volte più grande.

Dal valore dell'Azione così ottenuto, risulta evidente che nel

mondo macroscopico non ha senso parlare di costante di Planck

in quanto i fenomeni osservati presentano un valore dell'Azione,

abbondantemente multipla di detta costante.

E' come osservare una distesa di sabbia nel deserto e porsi il

problema di quanti granelli ne è composta.

35

Cosa ben diversa è afferrare un pugno di sabbia dove ci

rendiamo conto dell'effettiva costituzione in granelli.

Lo stesso succede, quindi, quando osserviamo il microcosmo,

allora ha senso parlare della costante h .

Se consideriamo un elettrone avente massa $m = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{Kg}$

che si muove nella nostra ipotetica scatola delle dimensioni

dell'ordine di grandezza pari a 10 volte il atomico dell'idrogeno

$2L = 53 \cdot 10^{-11} m$, con velocità v pari a circa l'1% della velocità del a

luce c , $v \approx 3.000.000 m/s$, otteniamo un valore del 'azione pari a

circa $A \approx 2,90 \cdot 10^{-33} J \cdot s$, evidentemente dell'ordine di grandezza

della minima azione h .

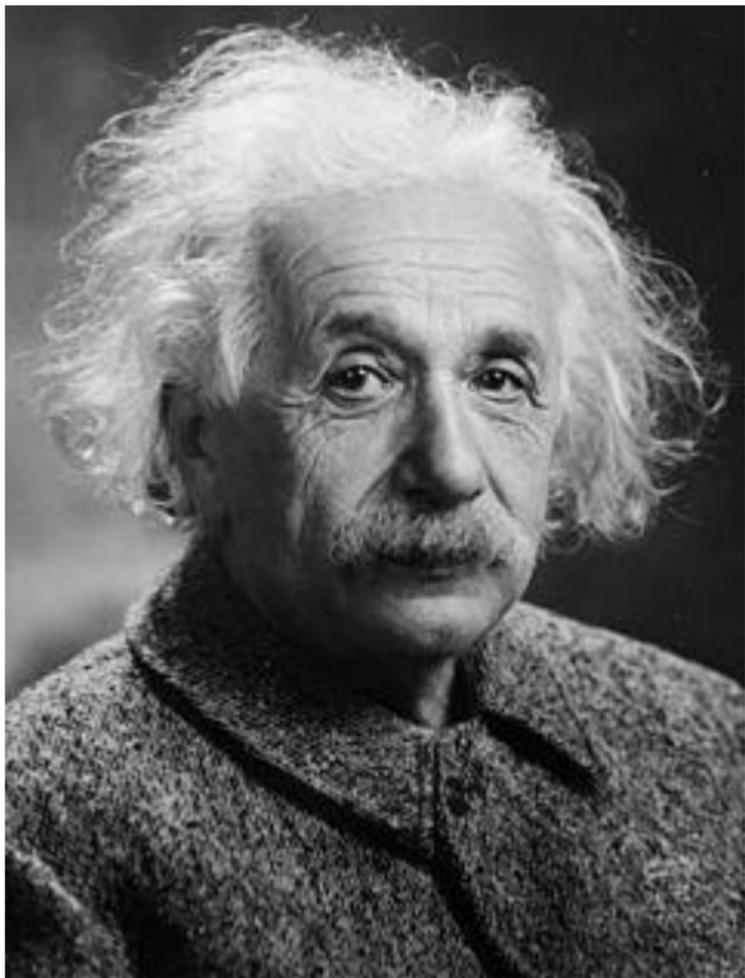
Nella trattazione precedente abbiamo per semplicità calcolato

l'azione in un moto unidimensionale, in realtà è possibile

effettuare anche il calcolo nello spazio tridimensionali con l'aiuto

di un po' di matematica, ma a parte le complicazioni di calcolo,

in sostanza il concetto espresso non varia.



36

2.4

QUANTIZZAZIONE

Tra il 1900 e il 1905, attraverso il contributo di Max Planck,

utilizzando i risultati ottenuti nel corso della risoluzione della

problematica della “catastrofe ultravioletta,

e successivamente con l’apporto del fisico

e filosofo tedesco Albert Einstein, al

seguito

dei

suoi

studi

sull'effetto

fotoelettrico,

viene

introdotto

come

costituente elementare della radiazione

elettromagnetica, il “quanto di luce”.

Questo

“pacchetto

minimo

o

quanto”

di

un’onda

elettromagnetica, dotato sia di energia
che di quantità di moto

(massa per velocità), solo successivamente, nel 1926 circa, verrà chiamato “Fotone”.

Il concetto di fotone fa diventare la radiazione elettromagnetica

una particella, assoggettandola così alla teoria corpuscolare

della luce; tale particella è fondamentalmente indivisibile, ha

massa e carica elettrica nulla e si propaga alla velocità della luce.

Planck attraverso una semplice relazione correlò l'energia alla

frequenza della radiazione
elettromagnetica per mezzo della
costante di proporzionalità h , per
l'appunto denominata costante
di Planck.

In tal modo l'energia di una radiazione
elettromagnetica risultava

quantizzata e non continua, con valori
possibili di energia

proporzionali ad una costante universale
 h ed alla sola

frequenza della stessa radiazione.

$$(2.4.1) \quad \square = \blacksquare \square$$

Con

37

$n =$

Frequenza radiazione elettromagnetica

$h =$

Costante di Planck

$E =$

Energia di un quanto di radiazione e.m. /
fotone

La costante di Planck h , rappresentando l'azione minima

possibile, viene definita come “quanto d'azione”, calcolata

sperimentalmente assume un valore costante pari a 6,62606957

$\times 10^{-34}$ J s, ed è la costante più importante della meccanica

quantistica in quanto la sua introduzione, come già detto,

sancisce l'effettiva innovazione nei confronti della meccanica

classica.

Tale costante assume le dimensioni di un'energia per un tempo.

Di frequente nelle trattazioni appare anche la costante ridotta \hbar ,

\hbar

che si legge h tagliato e vale $\hbar =$

2π

Per un numero n di fotoni la (2.4.1) si scrive:

$$E = n \hbar \omega$$

La frequenza ω , secondo le già note conoscenze della

meccanica ondulatoria, può essere
altresì espressa in funzione

della lunghezza d'onda e della velocità
della luce nel vuoto

□

$$(2.4.2) \quad \lambda =$$

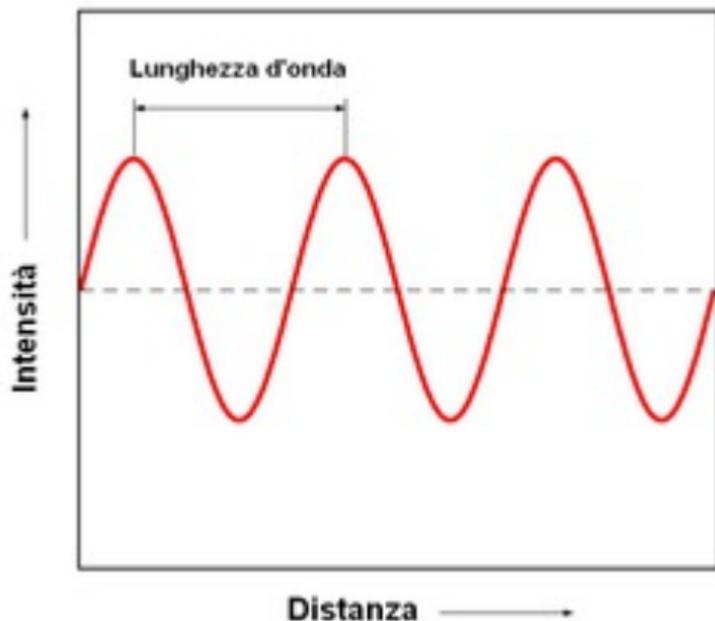
□

Dove la lunghezza d'onda rappresenta la
distanza tra i due

massimi o i due minimi di intensità della
funzione che descrive

l'onda elettromagnetica

Onda



38

La (2.4.1) descrive per un solo fotone, o meglio per un solo

quanto di radiazione, il valore dell'energia quantizzata

proporzionalmente ad una costante h ,
tanto maggiore quanto

maggiore è la frequenza dell'onda
elettromagnetica o quanto

minore è la lunghezza d'onda, senza
dipendere dall'intensità

della stessa radiazione.

L'indipendenza dall'intensità della
radiazione comporta che un

pacchetto o un quanto di luce
appartenente allo spettro del

visibile di forte intensità, possiede una
energia inferiore ad un

quanto di luce di più bassa frequenza, quale ad esempio il Laser.

Per avere una radiazione energetica bisogna utilizzare radiazioni

ad alte frequenze e non ad alte intensità.

Osservando lo spettro elettromagnetico, quale insieme di tutte le

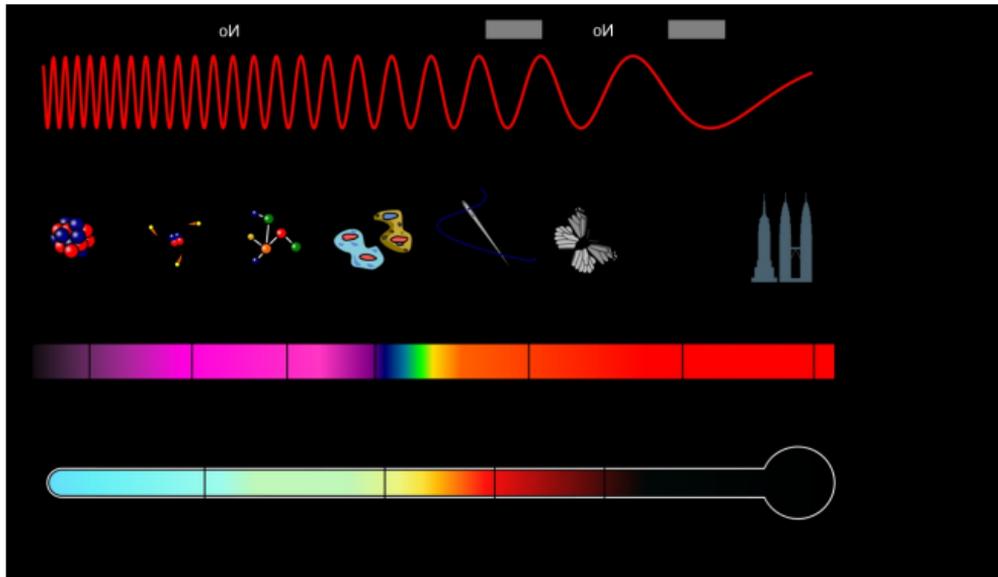
possibili frequenze delle radiazioni elettromagnetiche, di seguito

riportato, si ricava che la parte a destra (raggi X, raggi γ , etc.),

dove si trovano onde a più alta frequenza, individua radiazioni a

più elevate energie rispetto alla parte di sinistra (luce del visibile,

microonde, onde radio, etc.) aventi basse frequenze.



39

40

La (2.4.1) ci permette, altresì, con l'ausilio della famosa relazione

di Einstein sull'equivalenza massa-energia, di calcolare la

massa equivalente di un fotone, utile per un veloce confronto

dimensionale tra radiazione elettromagnetica e particelle

costituite da materia.

Partiamo dalla formulazione di Einstein dell'Energia totale

associata ad una massa in movimento

$$E = mc^2$$

Per la formula di Planck, scritta sostituendo la (2.4.2) nella

(2.4.1), l'energia di un singolo fotone

vale



$$\square = \blacksquare$$



Confrontando queste due ultime equazioni sulle energie si

ottiene



$$\square \square^2 = \blacksquare$$



E quindi un valore della massa
equivalente di un fotone, pari a

■

$$(2.4.3) \quad \square =$$

□ □

Moltiplicando la relazione così ottenuta
per la velocità della luce

c ad ambo i membri, considerando che
l'onda e.m. si propaga

alla velocità della luce, si ottiene
agevolmente anche la relazione

della quantità di moto

I

$$(2.4.4) \quad \square = \square \quad \square =$$

\square

La massa equivalente di un fotone, come si può facilmente

dedurre dalla (2.4.3), è inversamente proporzionale alla

lunghezza d'onda, ovvero direttamente proporzionale alla

frequenza.

Quanto maggiore è la massa equivalente di una radiazione tanto

maggiore sono gli effetti che essa produce.

Ecco perché affinché il fotone possa far sentire la sua presenza

ed i suoi effetti, è necessario che abbia una elevata frequenza o

una bassa lunghezza d'onda.

Le radiazioni elettromagnetiche a bassa frequenza sono dette

ionizzanti, perché riescono a strappare elettroni dall'atomo, per

il loro elevato potere energetico e per il valore della massa

equivalente confrontabile con la massa dell'elettrone, con cui

interagisce.

La luce visibile invece non riesce a far sentire i suoi effetti,

perché la sua massa equivalente è circa 200.000 volte più

piccola del già piccolo elettrone, come si può facilmente ricavare

dal calcolo che segue.

Per meglio comprendere la differenza in termini numerici

proviamo ad eseguire alcuni calcoli.

Ipotizziamo un fotone nel campo del visibile, avente lunghezza

d'onda $\lambda = 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

Sostituendo i valori di λ , h e c nella (2.4.3) si calcola la massa

equivalente di detto fotone

$6,62606957 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$

$J \cdot s$

$$\square \square \mathbf{v} =$$

\square

$$= 4,42 \cdot 10^{-36}$$

299.792.458

$$0,5 \cdot 10^{-6} \square$$

\square^2

\square

Kg \square^2

Essendo $1 \text{ J} = 1$

abbiamo

□2

$$\square = 4,42 \cdot 10^{-36} \square \square$$

Conoscendo la massa dell'elettrone pari a $9,11 \cdot 10^{-31}$ possiamo

calcolare il rapporto (massa elettrone)/(massa equivalente

Fotone visibile)

42

□

$$9,11 \cdot 10^{-31}$$

$$\square =$$

$$\square =$$

$$= 206.108,60$$

$$\square \square v$$

$$4,42 \cdot 10^{-36}$$

Tale risultato evidenzia una massa equivalente del fotone nel

campo del visibile di gran lunga inferiore alla massa

dell'elettrone, tale da scongiurarne una possibile interazione.

Invece, se consideriamo una radiazione elettromagnetica ad alta

frequenza, come ad esempio raggi gamma γ , abbiamo

$$\lambda = 10^{-12} \text{ m}$$

$$6,62606957 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

$$\square \square \square =$$

$$\square$$

$$= 2,21 \cdot 10^{-30} \square \square$$

$$299.792.458$$

$$10^{-12} \square$$

$$\square$$

E quindi il rapporto massa
elettrone/massa eq. Fotone g

\square

$9,11 \cdot 10^{-31}$

$\square =$

$\square =$

$= 0,41$

$\square \square \square$

$2,21 \cdot 10^{-30}$

Il risultato ottenuto evidenzia un valore
della massa

dell'elettrone inferiore alla massa
equivalente del fotone g , in

linea con le proprietà ionizzanti dei
raggi g .

La possibile interazione delle onde
elettromagnetiche con la

materia pone dei vincoli nei processi di
misura nel mondo

microscopico.

Infatti per effettuare misure di particelle,
quali ad esempio

elettroni, è necessario utilizzare onde
elettromagnetiche ad alta

frequenza e bassa lunghezza d'onda,
affinché si possa rilevarne,

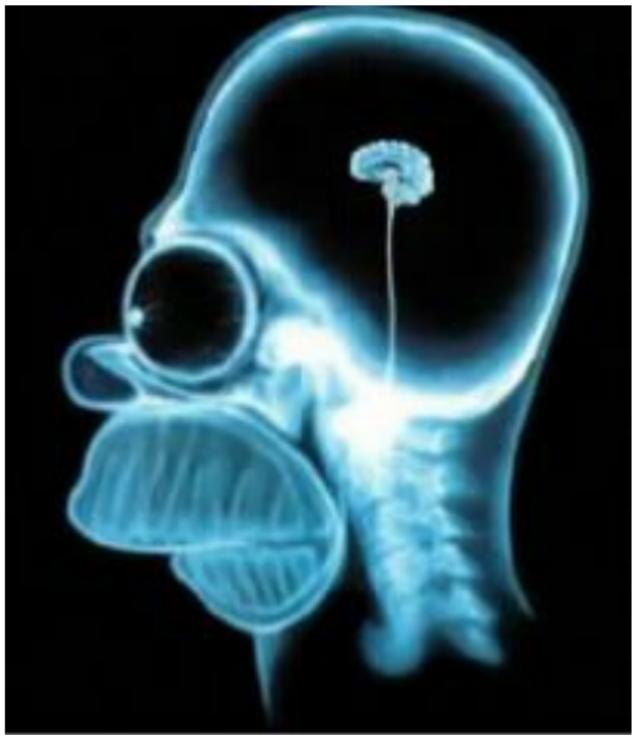
ad esempio la posizione.

Ma, di contro, l'utilizzo di tale tipo di
radiazione, ad elevato potere

di interferenza con il moto stesso della
particella, porta ad avere

risultati influenzati dal processo di
misura, diversamente da

quanto succede nella fisica classica
dove le radiazioni utilizzate



43

per i processi di misura sono ad elevata lunghezza d'onda (luce

visibile) senza nessun potere di interferenza nei confronti dello

stato fisico osservato.

Eseguendo il calcolo della massa equivalente per i raggi X , che

presentano un valore della lunghezza d'onda mediamente pari a

$\lambda = 10^{-10} \text{ m}$, si ottiene un rapporto massa elettrone e massa

equivalente fotone X pari a 41.

Detto valore manifesta un più basso valore di interazione dei

fotoni X con la materia, rispetto ai raggi γ , e quindi un più basso

potere ionizzante.

Questa particolarità dei raggi X viene sfruttata in campo medico

per l'esecuzione delle radiografie ai corpi biologici.

Il funzionamento è basato sull'interazione tra

un fascio di fotoni energetici, appunto raggi X,

diretti da una sorgente a un recettore, con la

materia interposta (corpo biologico).

Gli atomi di

tale

corpo

interferente,

esclusivamente nelle zone di elevate
densità atomica,

impediscono ai fotoni di raggiungere il
recettore, con la

conseguenza di ottenere un'immagine
fedele del corpo biologico

"in negativo", essendo impressi sulla
pellicola i soli fotoni che

invece non vengono assorbiti.

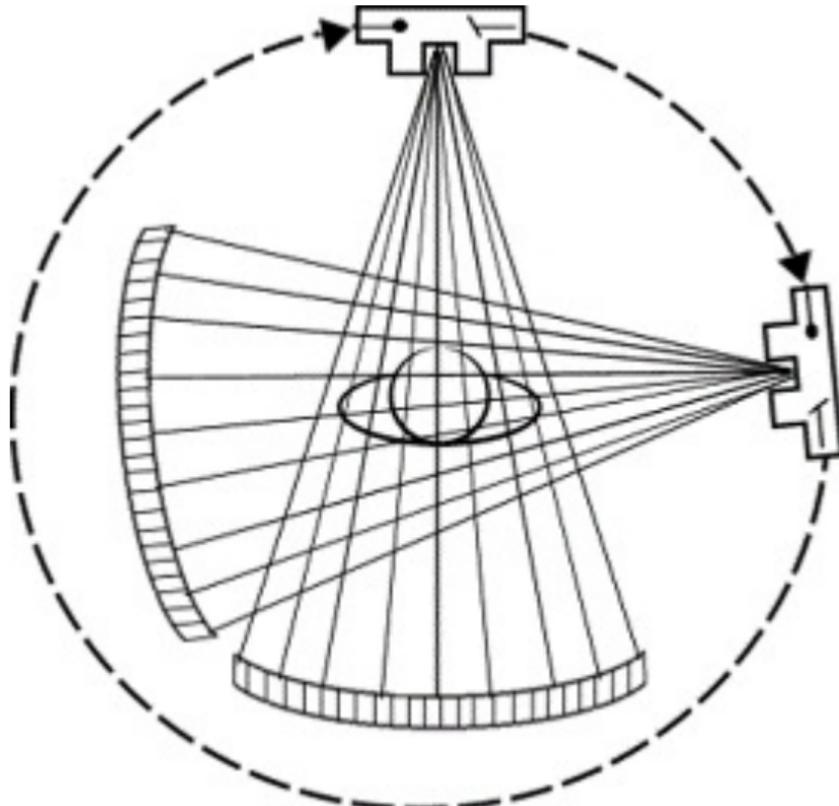
Tale pratica fornisce solo informazioni di tipo morfologico del

corpo biologico, quali ad esempio la presenza di fratture ossee

o masse addensate.

La quantità di radiazione è ben dosata ed in quantità limitate, tale

che in termini di paragone un volo aereo intercontinentale,





44

andata e ritorno, dall'Europa
all'America equivale ad eseguire 5
radiografie del torace.

Anche la TAC, acronimo di
TOMOGRAFIA ASSIALE

COMPUTERIZZATA, utilizza raggi X,
in maniera più evoluta.

Attraverso l'utilizzo di una sorgente
mobile, è possibile riprodurre

più sezioni o strati (tomografia)
corporei del paziente e di conseguenza
effettuare elaborazioni tridimensionali.

Sottoporsi ad una TAC merita un po' più
di attenzione

considerato che una TAC del torace
equivale ad effettuare circa

385 radiografie del torace.



Sulla porta d'ingresso della sua casetta di campagna a

Tisvilde aveva attaccato a un chiodo un ferro di cavallo, il

proverbiale portafortuna. Vedendolo un visitatore esclamò:

"Un grande scienziato come lei crede veramente che un

ferro di cavallo sull'uscio di casa porti fortuna?" "No"

rispose Bohr, "Certo che non credo in queste

**superstizioni. Ma sa com'è", aggiunse
con un sorriso,**

**"dicono che porti fortuna anche a chi
non ci crede!"**

NIELS BOHR

<https://dropseaofaula.blogspot.com/2011/01/niels-bohr-e-il-ferro-di-cavallo.html>



46

2.5 MODELLO ATOMICO DI BOHR

Il fisico danese, Niels Bohr, nel 1913 risolse il problema della

caduta dell'elettrone sul nucleo e di alcune discordanze

sperimentali sugli spettri di emissione, proponendo opportune

varianti rispetto al precedente modello atomico.

Bohr nasce a Copenaghen il 7 ottobre 1885.

Suo padre Christian Bohr era un fisiologo

danese, docente di fisiologia all'Università di

Copenaghen

e

scopritore

di

un

comportamento dell'emoglobina detto effetto

Bohr. Suo nonno paterno Henrik Bohr fu insegnante e successivamente preside del Westenske Institut di

Copenaghen. Sua madre, Ellen Adler Bohr, era una

ricca borghese danese di origine ebraica, la cui famiglia era

assai importante nell'ambiente bancario e parlamentare danese.

Suo fratello, Harald Bohr, era un matematico e calciatore della

nazionale danese, convocato alle Olimpiadi. Niels era un

calciatore come il fratello, ma dilettante,
di ruolo portiere, e giocò

nel 1905 insieme al fratello in una delle
squadre di Copenaghen.

Bohr si laureò all'Università di
Copenaghen nel 1911. Si

trasferisce prima a Cambridge grazie ad
una borsa di studio,

dove spera di collaborare con J. J.
Thomson per continuare le

indagini sulla teoria dei metalli. Non
riuscendo a lavorare con il

fisico britannico, si cimenta nello studio

dell'elettromagnetismo.

Grazie ad un'altra borsa di studio, si trasferì poi all'Università di

Manchester, in Inghilterra, dove studiò con Ernest Rutherford.

Durante il suo periodo di studi con Rutherford, si occupa della

riuscita di alcuni esperimenti sull'assorbimento da parte

47

dell'alluminio delle particelle alfa, programma suggerito proprio

da Rutherford. Questo progetto viene poi
sospeso dallo stesso

Bohr perché interessato al concetto
teorico del suo

nuovo modello atomico, originato dalla
teoria orbitale dell'atomo

scoperta da Rutherford. Dopo molti anni
dalla morte di

Rutherford,

Bohr

accetta

di

tenere

il suo

discorso

commemorativo, conosciuto come il
Rutherford Memorial

Lecture, il 28 novembre 1958,
all'Imperial College di Londra.

Anche Albert Einstein fu amico di Bohr,
ed è in una lettera a lui

indirizzata nel 1926, che Einstein fece la
sua famosa

osservazione sulla meccanica

quantistica, spesso parafrasata

come "Dio non gioca a dadi con l'universo", a cui lui rispose "Non

dire a Dio come deve giocare". Morì a Copenaghen il 18

novembre 1962.

Torniamo alla soluzione prospettata da Bohr per la descrizione

del nuovo modello atomico.

Questa, consiste nella proposta di un modello con energia ed

orbite quantizzate, seguendo la scia dei

risultati ottenuti, in tema

di quantizzazione da Max Planck da Albert Einstein.

In tale ipotesi, gli elettroni hanno possibilità di occupare solo

settori spaziali multipli di valori discreti, così da costringere

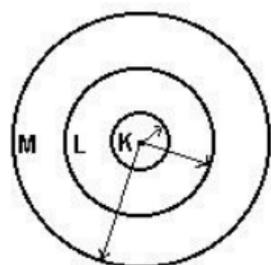
l'elettrone a non confluire nel nucleo centrale.

Prosegue così la sostituzione del concetto di continuità a favore

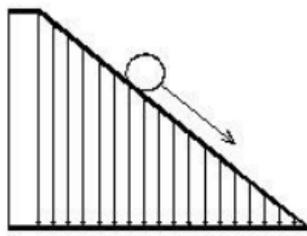
di un processo di discretizzazione dei fenomeni naturali.

L'elettrone, così, occupa un'orbita quantizzata con un ben

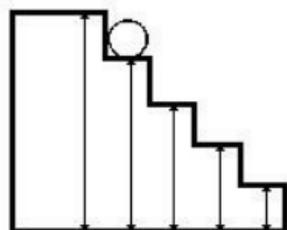
stabilito valore di energia, anch'essa quantizzata.



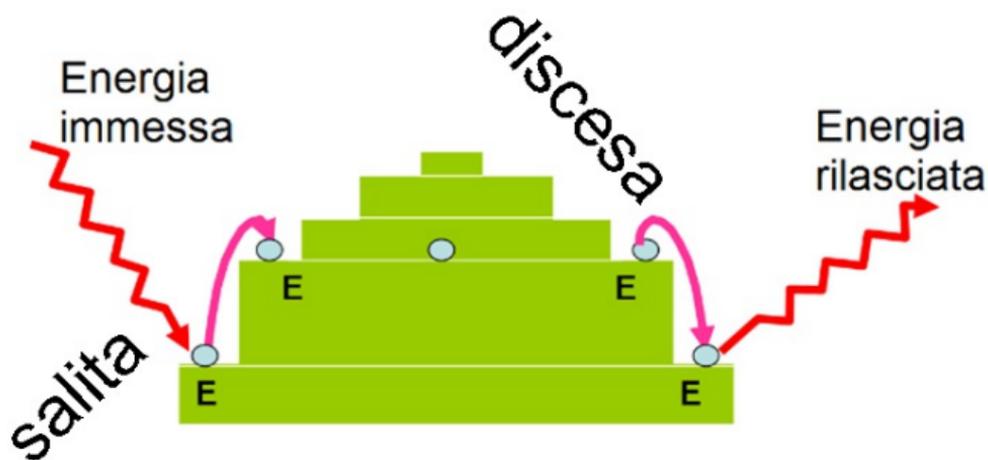
Orbite e raggi orbitali



Energia continua



Energia quantizzata



Lo stesso elettrone può cambiare orbita,
ma sarà necessario

fornire o sottrarre energia.

In una analogia nel mondo classico,
possiamo pensare a valori

discreti di energia in una forma a
gradini, diversamente dai valori

continui di energia raffigurabili con una
linea inclinata.

In tale similitudine, possiamo pensare ad
una pallina posta su

dei gradini, che nel corso della sua discesa acquista velocità,

guadagnando energia cinetica. Nel tentativo di far salire la

pallina, invece, sarà necessario somministrare energia cinetica.

Allo stessa maniera della pallina dell'esempio precedente,

l'elettrone può cambiare orbita, solo se avviene una cessione o

immissione di energia quantizzata con o verso l'esterno, di entità

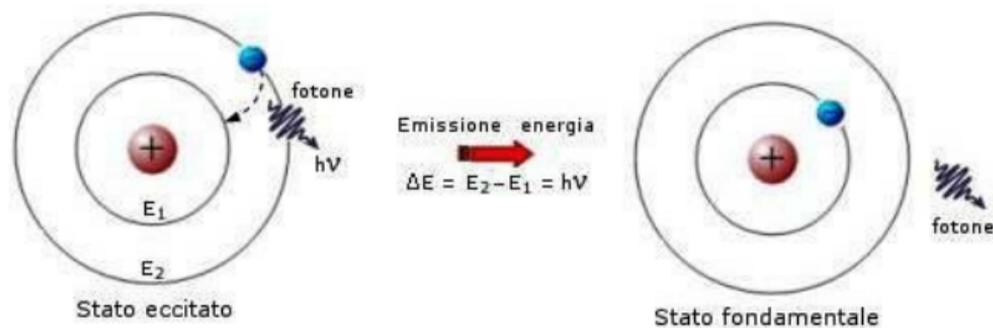
almeno pari all'altezza del

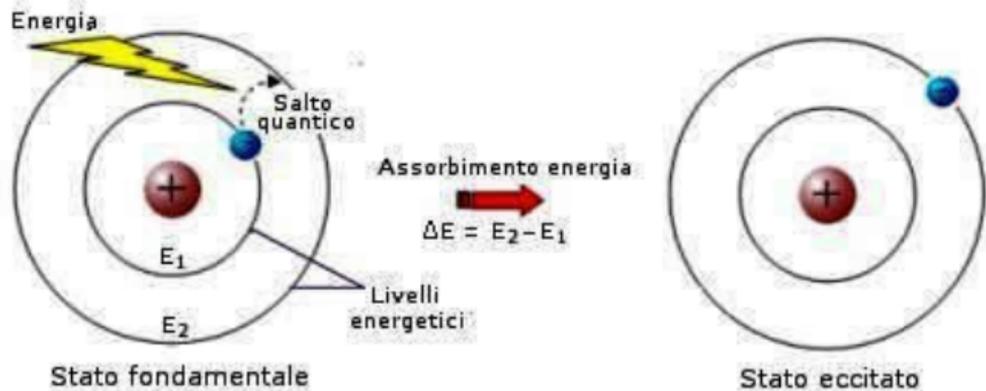
corrispondente gradino energetico.

Se l'elettrone passa da uno livello superiore in cui si trova, ad

uno inferiore, dovrà perdere energia, materializzata attraverso

l'emissione di un "lampo di luce" (fotone).





49

Diversamente, immettendo energia, attraverso l'ingresso di un

fotone o attraverso urti tra particelle, l'elettrone compie un salto

quantico da un livello energetico inferiore a quello superiore e

l'atomo si definisce "eccitato".

Tale stato eccitato è instabile, quindi l'elettrone tende a ritornare

nella posizione iniziale, restituendo l'energia acquisita,

attraverso l'emissione del fotone acquisito in precedenza.

Se l'energia immessa è eccessivamente alta è possibile che

l'elettrone venga strappato dall'orbitale e l'atomo resta carico

positivamente, avendo perso l'elettrone negativo. In questo

ultimo caso, si dice che l'atomo diventa

ionizzato.

Questo stato dell'atomo ionizzato, è molto importante nei legami

chimici, permettendo ad atomi normalmente neutri di combinarsi

attraverso legami elettromagnetici per la composizione di

molecole.

-
-
-
-

Altra variabile quantizzata introdotta da tale modello è il

momento angolare o momento della quantità di moto.

$$(2.5.1) \quad \mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = \mathbf{r} \times m \mathbf{v}$$

Tale variabile essendo un vettore, presenta le classiche tre

componenti lungo i tre assi cartesiani x, y e z .

Considerando il modulo del momento angolare, rispetto al centro

di rotazione, Bohr, formulò il suo valore

scalare quantizzato

$$(2.5.2) \quad m v r = n \hbar$$

Con $n = 1, 2, 3 \dots$ (numeri interi), \hbar è la costante ridotta di Planck,

ed sono rispettivamente massa, velocità tangenziale e

raggio dell'elettrone.

Stretta deduzione di tale assunzione è che anche il raggio

orbitale risulta quantizzato ed in funzione esclusivamente del

numero quantico principale .

Una conseguente implicazione della quantizzazione del

momento angolare è la quantizzazione dei raggi delle orbite, che

permette di risolvere la problematica dell'attesa caduta

dell'elettrone sul nucleo.

Da un punto di vista analitico, per il modello dell'atomo di

idrogeno, ponendo come posizione di equilibrio l'uguaglianza

della forza centripeta con la forza di attrazione delle cariche

elettriche, in analogia a quanto già
eseguito con il modello di

Rutherford con la (2.1.3), e
moltiplicando ad ambo i membri per

r^2 , si ottiene

1

(2.5.3)

$$\square^2 = \square v^2 \square$$

$$4 \square \square 0$$

Sostituendo la (2.5.2) nella precedente
(2.5.3)

.

51

$$1 - 2 = v - \mathbf{1}$$

$$4 - 0$$

Isolando la variabile velocità

1

$$v =$$

$$-2$$

$$4 - 0 - \mathbf{1}$$

sostituendo questa nella (2.5.3) si ottiene

1

1

$\square 2 = \square (\square$

$\square 2)2 \square$

$4 \square \square 0$

$4 \square \square 0 \square \blacksquare$

1

1

$\square 2 = \square$

$\square 4 \square$

$4 \square \square$

2

0

$$16 \square 2 \square 0 \square 2 \mathbf{12}$$

Semplificando

1

$$1 = \square$$

$$\square 2 \square$$

$$4 \square \square 0 \square 2 \mathbf{12}$$

|

Isolando la variabile raggio r e

sostituendo ad h il valore $h =$

2π

$\frac{h}{2\pi}$

$$(2.5.4) \quad \frac{h}{2\pi} = \frac{h}{2\pi} \frac{2\pi}{h} = \frac{h}{2\pi} \frac{2\pi}{h}$$

$\frac{h}{2\pi}$

Abbiamo così ottenuto, una relazione dove il raggio atomico

dipende esclusivamente dalla variabile quantizzata $n = 1, 2, 3,$

etc., mentre gli altri valori sono tutti delle costanti.

Sostituendo

si ottiene la misura della minima
distanza

dell'elettrone dal nucleo, nell'atomo di
idrogeno, che viene

denominato raggio di Bohr.

Tale valore calcolato risulta essere in
perfetto accordo con i dati

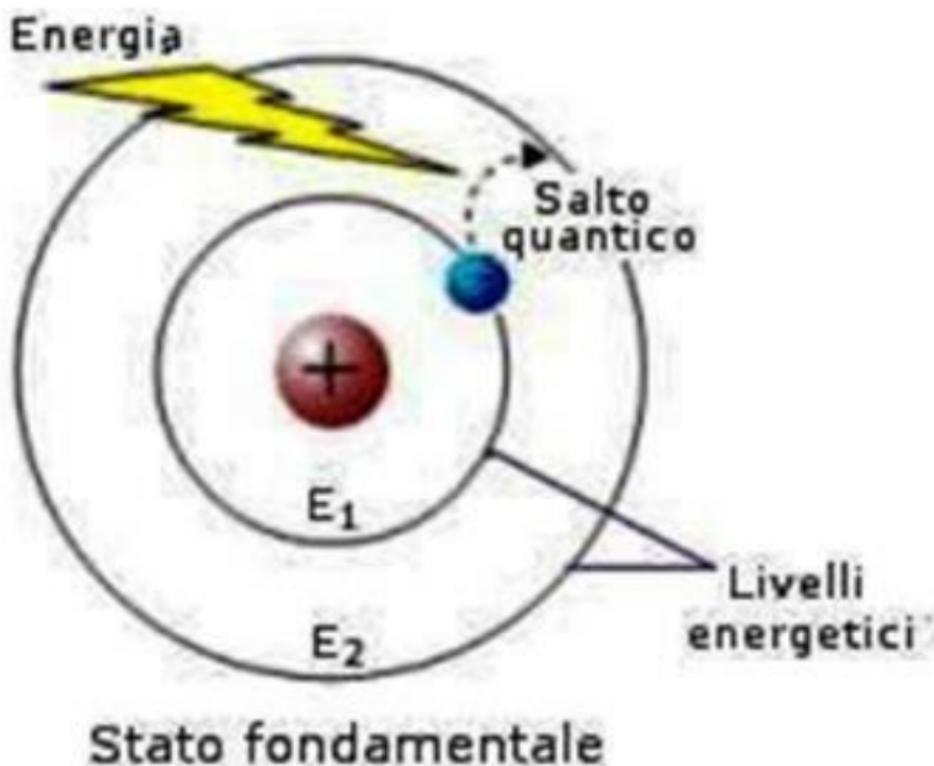
sperimentali.

In definitiva nel modello atomico di
Bohr, assegnato il numero

quantico principale n , risulta

univocamente determinato il raggio

dell'orbita ed il corrispondente livello energetico.



Utilizzando la relazione quantizzata del raggio orbitale di cui alla

(2.5.4) è possibile calcolare facilmente il valore della

corrispondente energia quantizzata.

Sostituendo la (2.5.4) nella relazione che individua l'energia

totale, nel caso dell'atomo di idrogeno, espressa dalla (2.1.5) si

ottiene:

1

□2

1

$$(2.5.5) \quad \square \square = -$$

$$= \square'$$

$$8 \square \square 0 \square \square 2$$

$$\square 2$$

Il valore dell'energia totale in un orbitale quantizzato è

esprimibile attraverso una relazione di proporzionalità inversa al

quadrato del suo numero quantico.

A partire da quest'ultima, è possibile

calcolare la necessaria

frequenza (ν) o la lunghezza d'onda (λ) della radiazione, di un

singolo fotone, da utilizzare per far eseguire un salto quantico ad

un elettrone, ovvero come si dice in gergo “eccitarlo”.

A tale scopo sarà prima di tutto necessario calcolare la

variazione di energia nel caso del salto quantistico a seguito

dell'eccitazione dell'elettrone, applicando allo stato finale ed

iniziale il risultato ottenuto dalle ipotesi di quantizzazione di Bohr,

di cui alla relazione (2.5.5),

1

1

1

1

$$(2.5.6) \quad \square \square \square = \square'$$

$$- \square'$$

$$= \square' ($$

—

)

2

2

2

2



53

Con n_f e n_i , rispettivamente i livelli energetici iniziale e finale.

Esprimendo il valore dell'energia, ceduta o assorbita, in funzione

della frequenza, attraverso la legge di Planck

$$\square \square = \blacksquare \square$$

ed esplicitando il tutto nella variabile
frequenza n

$\square \square$

$$(2.5.7) \square =$$

■

E quindi, sostituendo la (2.5.6) nella
(2.5.7) si ottiene

$\square' 1$

1

$$(2.5.8) \square =$$

(

—
)
 $\frac{1}{2}$

2

$\frac{1}{2}$

$\frac{1}{2}$

Accorpendo tutti i valori costanti in una nuova costante

denominata R , abbiamo così ottenuto la ricercata relazione che

esprime la frequenza del fotone

necessaria a causare un salto

quantistico dall'orbitale ni all'orbitale nf .

1

1

$\square = \square ($

—

)

$\square 2$

2

□

□ □

La stessa relazione è esprimibile in termini di lunghezza d'onda,

sostituendo il noto il rapporto frequenza/lunghezza d'onda di cui

alla (2.4.2) nella (2.5.8)

□

□ ' 1

1

=

(

-

)

1 2

2

accorpendo tutte le costanti in una nuova
costante denominata

\mathbb{R}' , abbiamo

1

1

1

(2.5.9) = \square' (

—

)

\square

$\square 2$

2



Quest'ultima

è

in

armonia

con

la

relazione

del

fisico e matematico svedese

Johannes

Robert

Rydberg,

conosciuto anche come Janne, che formulò la sua relazione per

54

la descrizione dello spettro dell'atomo di idrogeno ovvero di tutte

le possibili lunghezze d'onda della luce che l'atomo di idrogeno

è capace di emettere.

In definitiva il modello atomico di Bohr partendo da postulati di

quantizzazione dell'energia e del raggio orbitale, in funzione del

numero quantico principale n , riesce bene a descrivere bene il

comportamento dell'atomo di idrogeno, o comunque ogni altro

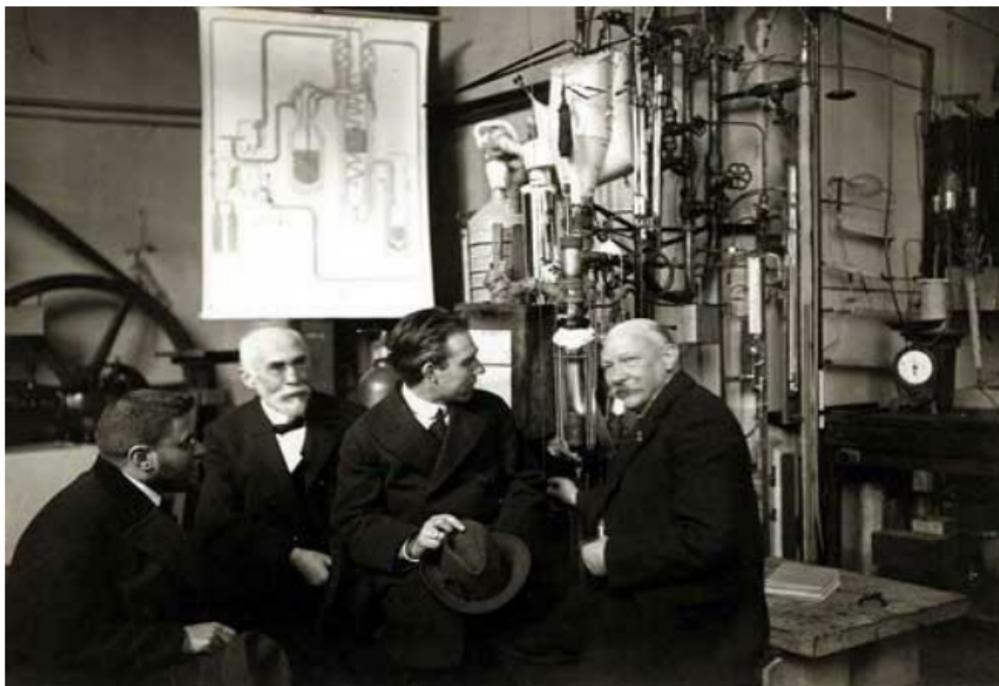
tipo di atomo avente un solo elettrone orbitante (atomi

idrogenoidi).

Per atomi pluri-elettronici, invece, tale modello non riusciva a

dare confortanti risultati rispetto a quelli sperimentali, quindi

necessitava di essere necessariamente perfezionato.



COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

“Un esperto è un uomo che ha fatto tutti gli errori che è

possibile compiere in un campo molto ristretto.”

NIELS BOHR

<https://www.frasicelebri.it/frasi-di/niels-bohr/>

2.6 MODELLO ATOMICO QUANTISTICO

Quest'ultimo modello atomico, di Bohr, se pur prevedeva

l'innovativa quantizzazione dell'energia e del momento angolare,

restava ancora ancorato alla classica idea dell'elettrone in orbita,

secondo una definita traiettoria classica.

Avendo però costituito un ottimo punto di partenza alla

definizione dell'odierno “modello
atomico quantistico secondo il

modello standard”, suo diretto
discendente ed oggi considerato

uno dei modelli più diffusi alla base
degli studi di fisica

quantistica, questa interpretazione della
meccanica quantistica

è anche identificata con il nome di
“interpretazione o scuola di

Copenaghen”, in onore della capitale del
danese Bohr.

Al modello atomico quantistico, come “modello standard (MS)”,

si è giunti con l’apporto di ulteriori teorie formulate da altri illustri

scienziati quali Pauli, Dirac, Sommerfeld, Heisenberg,

Schrödinger ed altri, ed è il modello preso in considerazione nella

presente trattazione.

Il nuovo modello atomico diventa più complesso ed idoneo a

descrivere il comportamento anche degli atomi pluri-elettronici,

con positivi riscontri sperimentali degli
spettri di emissione

atomici.

Nell'atomo quantistico, l'elettrone non
ha più una traiettoria

specificata, ma occupa determinate aree,
definite orbitali, nella

formazione dell'atomo.

La nuova formulazione quantistica
dell'atomo si basa sull'ipotesi

di quantizzazione di ulteriori elementi
descrittivi della struttura

atomica, identificativi dell'energia degli orbitali, della forma degli



orbitali, dell'orientamento degli orbitali ed infine del momento

angolare intrinseco denominato Spin.

Lo stato quantistico dell'atomo è la rappresentazione

matematica del suo stato fisico, ed è definito da opportuni valori

quantizzati, denominati numeri quantici, molto utilizzati

particolarmente in chimica ed indicati con le lettere: n , l , m , s .

Il numero quantico principale è indicato con la lettera n , e

rappresenta il livello di energia
quantizzato così come già

utilizzato nel modello atomico di Bohr,
di cui alla (2.5.5).

La quantizzazione degli orbitali in forma
e orientamento,

identifica un particolare spazio orbitale,
opportunamente

conformato ed orientato spazialmente,
occupato da elettroni per

ogni determinato livello energetico.

Alla forma è associato il numero
quantico

secondario indicato con la lettera

,

rappresentativo del momento angolare o

momento della quantità di moto, che

descrive una sorta di distorsione della
forma

dell'orbitale rispetto alla simmetria
sferica.

L'utilizzo del numero quantico deriva da
analoghe considerazioni

introdotte dal fisico tedesco Arnold
Johannes Wilhelm

Sommerfeld, che nel corso della sua
docenza di fisico teorico

presso l'Università Ludwig Maximilian
di Monaco ebbe fra i suoi

studenti Werner Heisenberg e Wolfgang
Pauli, ai quali

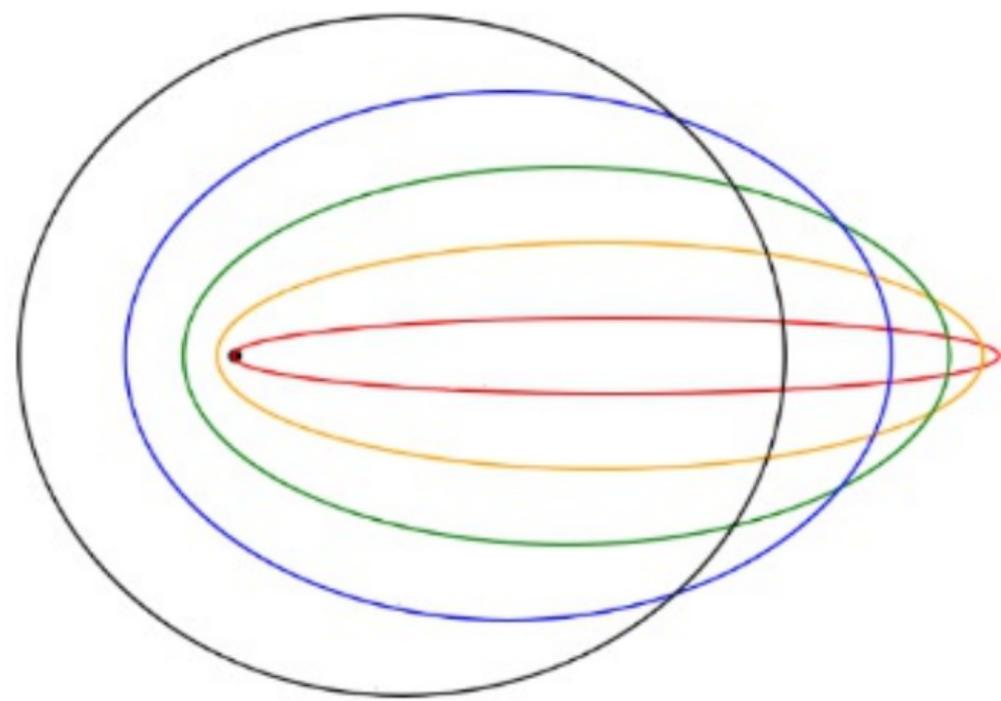
supervisionò le tesi di dottorato.

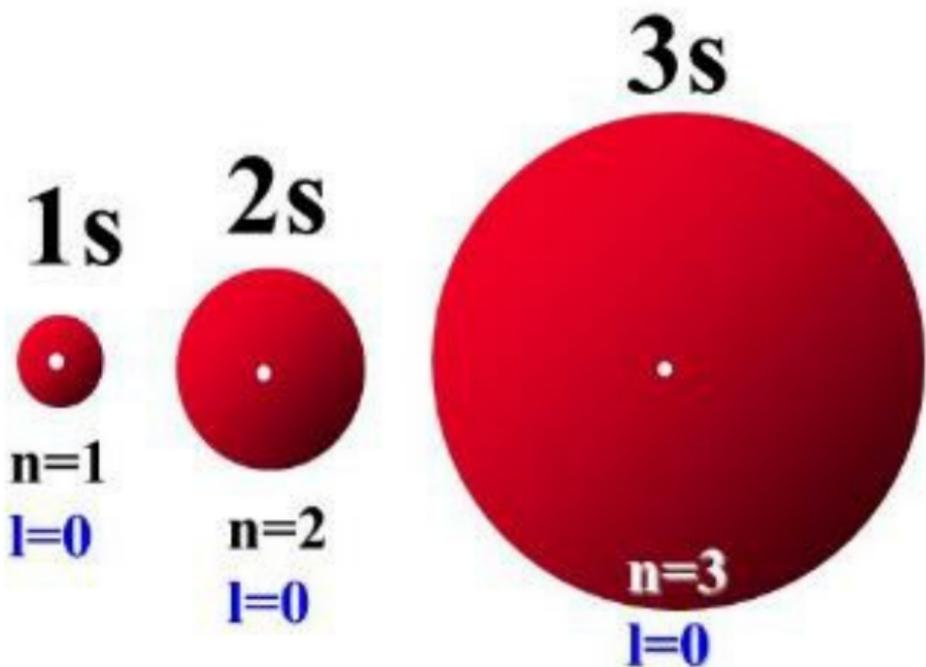
Sommerfeld ipotizzò che gli elettroni
viaggiassero intorno al

nucleo in orbite ellittiche, in analogia
alle orbite planetarie,

anziché con le orbite circolari di Bohr.

▪





58

Dette orbite ellittiche potevano avere diversi rapporti dei

semiassi, risultando quindi diversamente schiacciati.

In maniera analoga a quanto ipotizzato da Sommerfeld, per il

modello atomico quantistico viene introdotto il numero quantico

secondario indicato con la lettera

indicativo del momento

angolare o momento della quantità di moto, il cui valore può

variare come numero intero da 0 a $n-1$:

$(2.6.1) \ 0$

$< n-1$

Quindi per il primo livello energetico $n=1$, il numero quantico

secondario può assumere solo valore nullo $= n-l=1-1=0$, che

corrisponde appunto ad una assenza di distorsione spaziale

della simmetria sferica.

Di conseguenza entra in gioco dal secondo livello energetico in

poi, dove essendo il valore del numero quantico principale pari a

2, lo stato per la (2.6.1) può assumere valori pari a 0 o pari a 1.

Le configurazioni atomiche caratterizzate da un valore del

numero quantico secondario nullo, $=0$, a completa simmetria

sferica della forma orbitale, sono

indicati con la lettera s , anticipati dal

valore

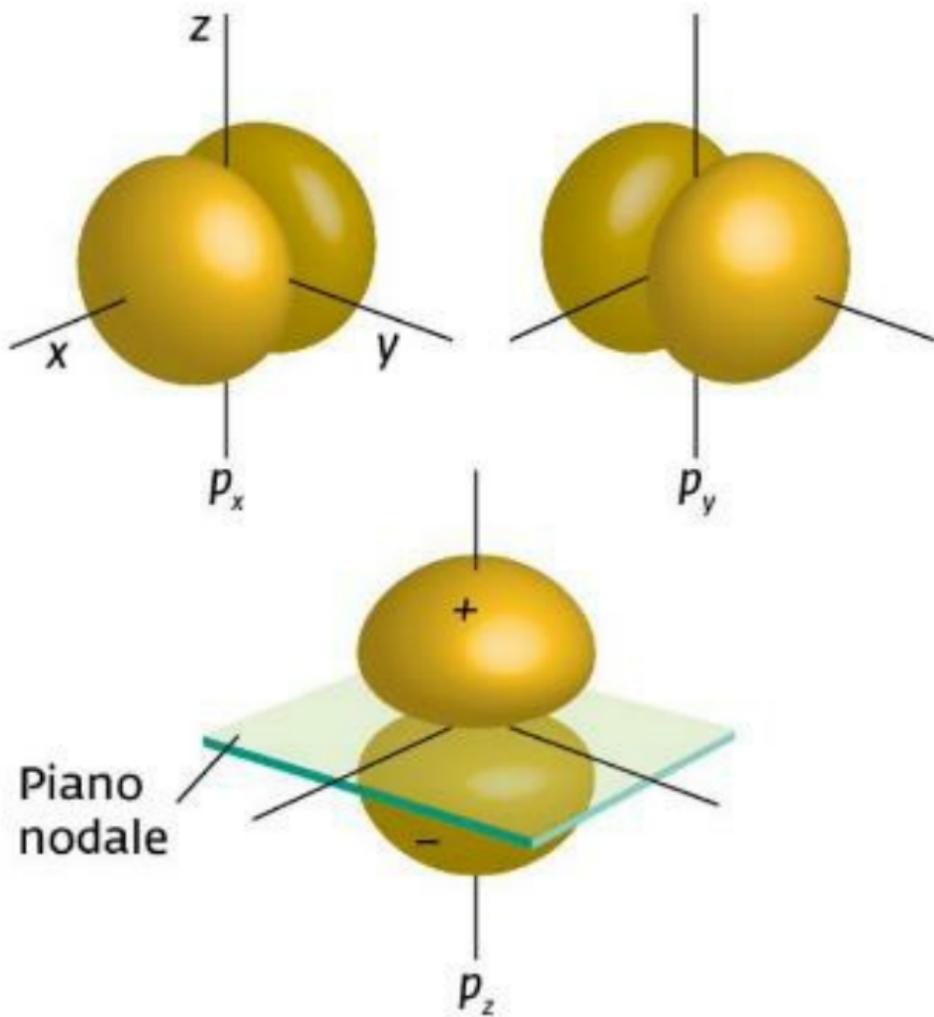
del

numero

quantico

principale n .

-
-
-
-
-
-
-



Gli orbitali aventi $l=0$ sono quindi indicati come $1s, 2s, 3s \dots$ etc,

al variare dei livelli energetici ovvero del numero quantico

principale.

Il valore $l=1$, indica orbitali a simmetria assiale, che vengono

rappresentati con la lettera p , anticipati dal numero quantico

principale e seguiti dall'asse di simmetria di riferimento, in modo

tale da venire denominati $2p_x 2p_y 2p_z, 3p_x 3p_y 3p_z, \dots$ etc.

Gli orbitali di tipo p sono suddivisi in tre sottolivelli ognuno

simmetrico rispetto ad un asse cartesiano.

Ognuno dei tre orbitali di tipo p

presenta un piano nodale: il piano

passante

per

il

nucleo

e

perpendicolare

all'asse

di

simmetria dell'orbitale, inteso come

luogo geometrico dove all'elettrone

non è possibile occupare il suo

spazio.

I tre orbitali p possiedono la stessa energia e, poiché gli orbitali

aventi la stessa energia vengono chiamati degeneri, diremo che

gli orbitali p sono tre volte degeneri.

I valori successivi di

$l = 2, 3, 4$, rappresentano forme più

complesse, tanto che per i valori pari a 3 e 4 gli orbitali non

possono essere rappresentati graficamente perché molto

complessi.

In particolare per $l=2$ ogni orbitale ha due piani nodali o una

superficie nodale, e vengono denominati con la lettera d

60

identificative degli assi di simmetria: $3d$
 2

$2 2$

$z 3dxz 3dyz 3dxy 3dx -y ,$

$4d 2$

$2 2$

$z 4dxz 4dyz 4dxy 4dx -y ..etc$

Gli orbitali di tipo d sono cinque volte degeneri.

Gli orbitali con numero quantico

secondario = 3, identificati con

la lettera f , in chimica teorica vengono presi in considerazione

abbastanza raramente, e quelli con = 4 denominati con la

lettera g , generalmente vengono ignorati del tutto anche se

teoricamente possibili.

L'orientamento dell'orbitale, che permette di distinguere i già visti

sottolivelli per ciascun tipo di orbitale, è rappresentato dal

numero quantico magnetico

.

Il numero quantico magnetico m può variare come numero intero

tra e :

(2.6.2)

$m <$

Il valore del numero quantico magnetico m identifica così

l'orientamento dell'orbitale, attraverso il valore identificativo

dell'asse di simmetria, posto come
pedice della lettera

corrispondente dell'orbitale: $2p$

2

2

x $2py$ $2pz$, $3dz$ $3dxz$ $3dyz$ $3dxy$ $3dx -$

2

y ...etc.

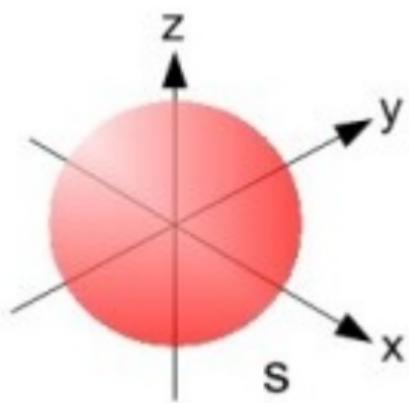
▪

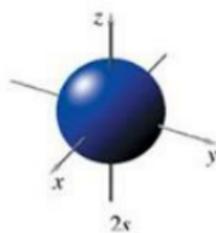
▪

▪

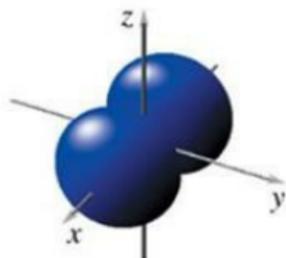
▪

▪



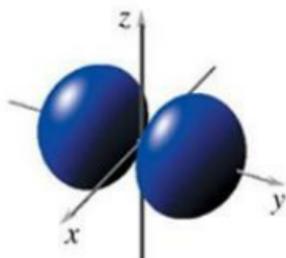


$$n=2 \quad l=0 \quad m=0$$



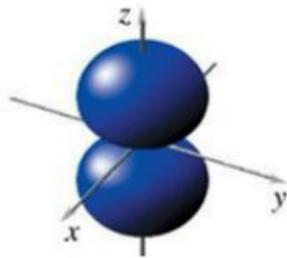
$$2p_x$$

$$n=2 \quad l=1 \quad m=0$$



$$2p_y$$

$$n=2 \quad l=1 \quad m=1$$



$$2p_z$$

$$n=2 \quad l=1 \quad m=-1$$

61

Riepilogando, a titolo di esempio esplicativo, in corrispondenza

di un numero quantico principale $n=1$,
per la (2.6.1) e la (2.6.2)

l'unico numero quantico secondario possibile è pari a $l=0$, come

per $l=0$, di conseguenza l'orbitale assume la forma con

simmetria sferica.

Per un numero quantico pari a $n=2$, possiamo avere che per la

(2.6.1) può assumere i valori $l=0$ e $l=1$, ed in corrispondenza del

solo valore $l=1$, per la (2.6.2) può assumere i rispettivi valori -1 ,

0 e $+1$.

In quest'ultimo caso l'orbitale per $m=0$, è di tipo sferico, mentre

per

di forma a simmetria assiale orientata rispetto ai tre assi

cartesiano al variare dei tre valori possibili del suo numero

quantico magnetico

ed

, indicati dalla lettera

dell'asse cartesiano posta al pedice della lettera rappresentativa

dello stato quantico secondario

-
-
-
-
-

	s	p_z	p_x	p_y	d_{z^2}	d_{xz}	d_{yz}	d_{xy}	$d_{x^2-y^2}$	f_z^2	f_{xz}^2	f_{yz}^2	f_{xy}^2	$f_{z(x^2-y^2)}$	$f_{x(x^2-3y^2)}$	$f_{y(3x^2-y^2)}$
$n=1$																
$n=2$																
$n=3$																
$n=4$																
$n=5$									
$n=6$				
$n=7$	

62

Per un numero quantico pari a $n=3$, possiamo avere che può

assumere i valori fino a $n-1$, quindi, per la (2.6.1), i valori $0, 1$ e

2.

In corrispondenza del solo valore $=1$, per la (2.6.2), m può

assumere i rispettivi tre valori -1 , 0 e $+1$, che corrispondono agli

orbitali di tipo p tre volte degeneri, mentre in corrispondenza del

valore $=2$, per la (2.6.2), m può assumere i cinque valori da $-$ a

ovvero $-2, -1, 0, 1, 2$, che corrispondono agli orbitali di tipo d

cinque volte degeneri.

La figura che segue riassume tutte le forme ed orientamento dei

possibili orbitali, in corrispondenza di ciascun stato energetico.



63

COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

**“Nel creare il mondo Dio ha usato
della bella matematica.”**

PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC

[https://www.frasicelebri.it/frasi-
di/paul-adrien-maurice-dirac/](https://www.frasicelebri.it/frasi-di/paul-adrien-maurice-dirac/)

2.7 NUMERO QUANTICO DI SPIN

Nel paragrafo precedente sono stati esposti le caratteristiche dei

primi tre numeri quantistici, tralasciando il numero quantico

denominato *spin*, che rappresenta un ulteriore grado di libertà

quantistico della particella.

Lo *spin* data la sua maggior complessità merita maggior

approfondimento per comprenderne la natura.

Il “*numero quantico di spin*”, viene indicato con la lettera s , ed è

un numero che quantizza una grandezza quantistica, di tipo

vettoriale particolare, denominata “*momento angolare intrinseco*

o di spin”, indicata come $\hbar s$, che concorre quindi a definire il più

complesso stato quantico.

Il numero quantico di spin s , associato al modulo del momento

angolare di spin, è uno scalare,
verificabile sperimentalmente,

che può assumere solo valori interi
(0,1,2,...) o seminteri ($1/2$,

$3/2$, $5/2$, etc..), tale da distinguere il tipo
di particella, in maniera

indipendente dalla massa, ma
semplicemente sulla base del suo

valore intero o frazionario.

Valori di spin intero identificano le
particelle di tipo bosone,

mentre valori di spin semintero
identificano le particelle di tipo

fermione.

La natura delle particelle tipo bosone e fermione sarà

opportunamente approfondita nei capitoli successivi.

Il momento angolare di spin è una grandezza fisica il cui modulo

è funzione del corrispondente numero quantico di spin e può

essere ricavato dalla relazione che segue

$$(2.7.1) \quad S = \sqrt{s(s + 1)} \quad \blacksquare$$

A differenza di altri numeri quantici, lo *spin* esiste anche per

particelle aventi massa nulla, come ad esempio per il fotone, il

quale numero quantico di Spin, può assumere solo valore intero

pari a $s=1$, con conseguente valore del modulo del momento

angolare di spin, applicando la relazione precedente, pari a $\hbar =$

$\sqrt{2} \hbar$.

Per l'elettrone, ad esempio, si trova sperimentalmente un valore

del numero quantico di spin pari a $\frac{1}{2}$, di conseguenza il modulo

del momento angolare di spin applicando la (2.7.1) vale

1 1

3

$$(2.7.2) \quad \square = \sqrt{(+1)} \quad \blacksquare = \sqrt{\blacksquare}$$

2 2

4

Il momento angolare di spin è una particolare forma del momento

angolare, denominato intrinseco, prestando attenzione a non

confonderlo con il momento angolare dell'elettrone in rotazione

intorno al nucleo.

La proprietà di Spin delle particelle è stata inizialmente dedotta

teoricamente

e

solo

successivamente

riscontrata

sperimentalmente, per necessità di compensare una carenza del

solo classico momento angolare o momento della quantità di

moto.

Relativamente al moto dell'elettrone nell'atomo di idrogeno,

venne notato che il solo momento angolare orbitale non

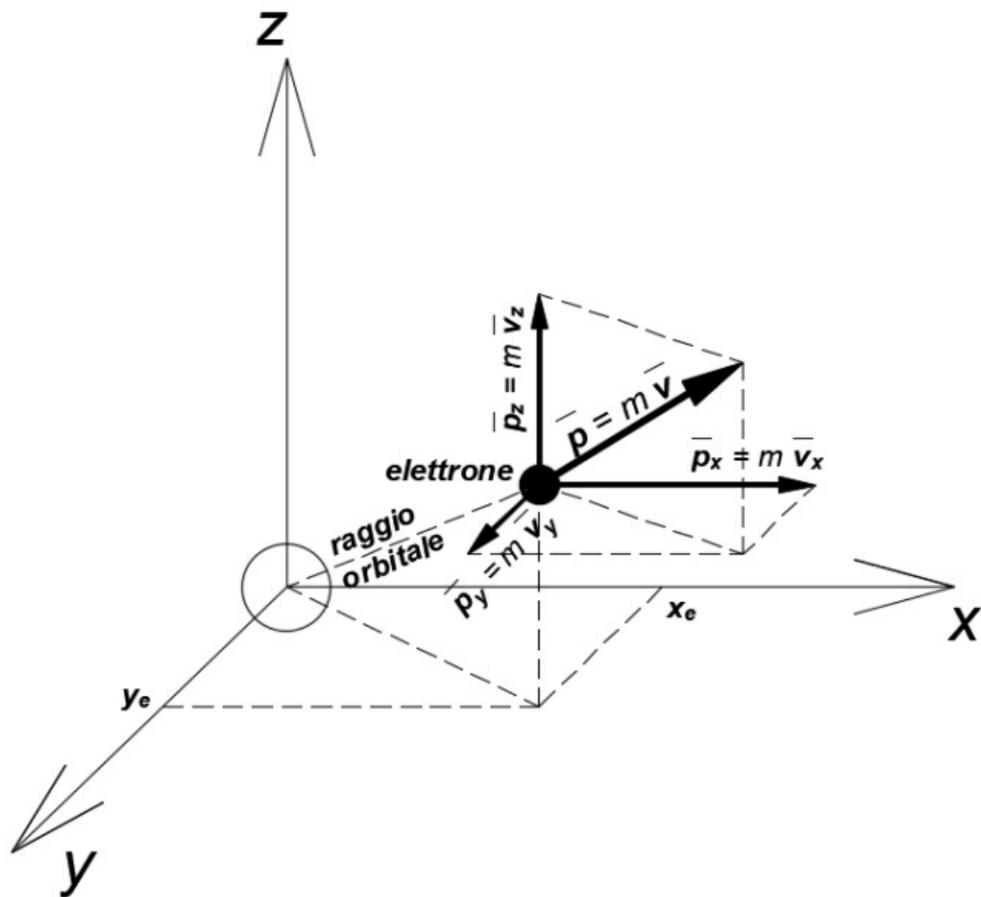
rappresentava una costante del moto,

come invece doveva

essere.

Infatti, il momento angolare orbitale, trovandosi l'elettrone in

movimento, in condizioni di un campo di forze centrali, quale è



66

la forza di attrazione elettrostatica
 protone-elettrone, deve

essere rispettoso del principio di conservazione.

Rappresentiamo su un sistema di assi cartesiani ortogonali, un

elettrone orbitante, nell'atomo di idrogeno, avente velocità v

comunque orientata, e massa m

Esaminiamo solo la componente lungo l'asse z del momento

angolare.

Dalla figura sopra riportata, nota la direzione del momento lungo

l'asse delle z, si può ricavare il suo valore scalare, tenendo conto

delle condizioni di perpendicolarità delle componenti

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = 0$$
$$(a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z = 0)$$

La sua derivata temporale risulta essere pari a

67

$$\frac{d}{dt} \vec{a} \cdot \vec{b}$$

$$\vec{a} \cdot \frac{d}{dt} \vec{b}$$

$$\frac{d}{dt} (\vec{a} \cdot \vec{b})$$

□ (□

□ (□

=

□ □ □ - □ □ □ □) = □

□ □ □ - □ □ □ □) = □ (

□ □ □) -

□ □ □)) =

□ □

□ □

□ □

= (

$+$ $-$ $-$ $) =$ (

- □

) =

□ □

□ □ □

□ □ □

□ □ □

□ □ □ + □ □ □ □

□ □ □ - □ □ □ □

□ □

□ □

2

2

= (

-

) = (

- □

)

□ □

□ □ □

□ □ □ 2

□ □ □ 2

E' evidente come tale ultimo valore è pari a zero solo in

determinate condizioni, ovvero quando è soddisfatta l'equazione

che segue

$$\square 2 \square$$

$$\square 2 \square$$

$$\square$$

$$\square$$

$$\square$$

$$\square$$

$$= \square$$

$$\square \square 2$$

$$\square \square \square 2$$

Mentre per tutti gli altri valori, la

derivata temporale di cui sopra,

resta diverso da zero, tale da poter affermare che

$$\square \square \square \neq 0$$

$$\square \square$$

Generalizzando, per tutte e tre le componenti, si può ammettere

che il solo momento angolare orbitale non si conserva.

Sulla base di tali osservazioni, risultò necessario introdurre un

nuovo termine affinché il momento

angolare complessivo

potesse essere una costante del moto.

E' così, che in aggiunta al momento
angolare venne introdotto

una nuova entità: il momento angolare
intrinseco o di spin.

A detto momento angolare intrinseco gli
venne assegnato

l'appellativo SPIN, dall'inglese "giro
vorticoso", proprio perché

alla particella si associò una sorta di
rotazione intorno al proprio

asse, in modo simile alla rotazione terrestre.

In definitiva il momento angolare totale, per l'elettrone orbitante,

è costituito da due valori, vettorialmente pari a

\square

$$\mathbf{L} = \square \mathbf{L} \pm \square$$

68

Avendo indicato con il vettore \square

\mathbf{L} l'aliquota relativa al momento

angolare orbitale pari a l

$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$ e con il vettore \mathbf{L}
il

momento angolare intrinseco o di spin.

Il vettore \mathbf{S} , diversamente dal vettore \mathbf{L}

\mathbf{S} , è un vettore particolare

a componenti complesse, rappresentato,
come meglio

approfondiremo in seguito, da un
operatore lineare di tipo

complesso, operante su un vettore di

stato del sistema.

Il solo modulo del momento angolare di spin, invece, per la

(2.7.1), risulta assumere un valore reale, noto il valore del

numero quantico di spin.

Tale vettore di spin è un'entità di tipo algebrico più che

geometrica, tant'è che può essere rappresentato con opportune

matrici-vettori a componenti immaginarie.

Mentre in fisica classica le variabili che descrivono uno stato di

un sistema sono sempre misurabili, in fisica quantistica bisogna

fare distinzione sul tipo di variabile considerata.

Una grandezza quantistica, che è in qualche modo

misurabile direttamente tramite opportuni strumenti di misura,

oppure indirettamente attraverso calcolo analitico è definita

“osservabile”.

Nel caso dello spin, il numero quantistico associato assume la

forma di una grandezza misurabile e quindi di una “osservabile”.

In particolare è possibile eseguire misure della componente

lungo un asse cartesiano, ad esempio z , del momento angolare

di spin.

A tale proposito introduciamo l'ulteriore grandezza denominata

m_s “numero quantico magnetico di spin o numero quantico

secondario di spin”, che, quale osservabile, è il valore che

69

quantizza la componente lungo l’asse considerato, del momento

angolare intrinseco attraverso la seguente relazione

$$\square \square = \square \square \blacksquare$$

Il numero quantico secondario di spin m_s può assumere solo

valori, interi o frazionari, in funzione del numero quantico di spin

e compresi tra $-s, (-s+1), \dots, (s-1), s$:

$$-s < m_s < +s$$

Ad esempio nel caso $s=1/2$ i corrispondenti valori possibili di m_s

sono $-1/2$ e $+1/2$, e di conseguenza i valori possibili delle due

componenti possibili del momento angolare intrinseco lungo tale

1

1

asse, sono pari a $\hbar/2 = +\hbar/2$ e $-\hbar/2$

1.

2

$$\square = -2$$

Nel caso $s=1$ abbiamo per m_s i valori possibili $-1, 0, +1$.

Il numero quantico di spin secondario m_s riveste grande

importanza, in quanto ci permette di distinguere stati quantistici

aventi stessi numeri quantici.

Quindi per riepilogare, abbiamo visto che lo stato di momento

angolare di spin è rappresentabile con un vettore particolare a

componenti complesse, per il quale è possibile conoscere solo il

suo modulo.

Invece il numero quantico di spin che quantizza il momento

angolare di spin è uno scalare e viene indicato con la lettera s .

Abbiamo anche introdotto un ulteriore numero quantico di spin

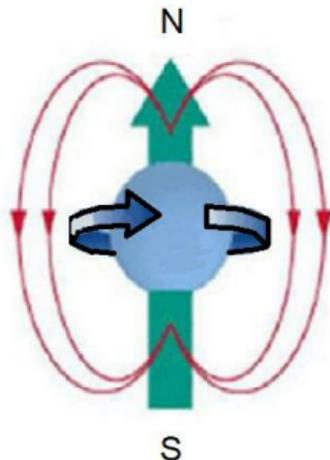
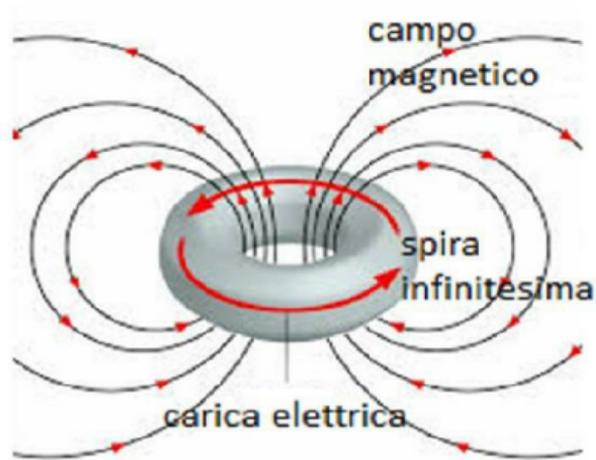
secondario indicato con la lettera m_s che quantizza la

componente del momento angolare di spin lungo un solo asse

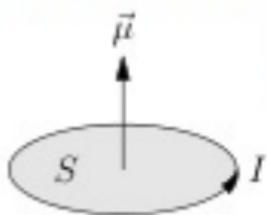
cartesiano.

La misura sperimentale del momento angolare intrinseco di una

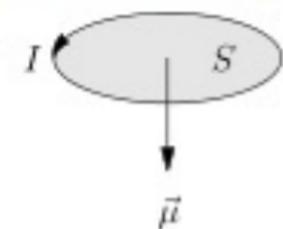
particella, come componente lungo una sola direzione, è



rotazione oraria



rotazione anti-oraria



70

possibile per la caratteristica che

quest'ultimo è funzione del

momento magnetico.

In analogia ad una spira microscopica percorsa da corrente,

l'elettrone, avente carica elettrica negativa, nel corso della

rotazione intorno al proprio asse, genera un dipolo magnetico,

ovvero un campo magnetico con i due poli Nord e Sud opposti.

Il corrispondente momento magnetico viene individuato con un

vettore orientato ortogonalmente al piano di rotazione della

carica elettrica

Il dipolo magnetico presenta la caratteristica di orientarsi in una

determinata direzione, se immerso in un campo magnetico, ed è

propria questa caratteristica che permette di effettuare misure di

Spin.



71

Il limite della conoscenza del momento magnetico di Spin è

rappresentato dalla possibilità di eseguire la sua misura lungo

una sola componente per volta.

Infatti, essendo il campo magnetico un campo vettoriale,

applicando al fine della misurazione due campi magnetici, questi

si sommerebbero vettorialmente tra loro, dando origine ad un

nuovo campo magnetico orientato lungo una nuova direzione

risultante.

In definitiva è possibile eseguire misure di spin lungo una sola

direzione.

La misura del stato di spin di un elettrone, come componente

lungo un'asse, può essere verificata attraverso l'esperimento di

Stern-Gerlach, già ideato nel 1922, dai fisici tedeschi Otto

Stern e Walther Gerlach.

L'apparato sperimentale è costituito da un generatore di campo

magnetico non uniforme, attraverso il quale vengono fatti

passare atomi di argento e rilevati su apposito schermo.

Il valore di spin misurato sarà relativo all'elettrone spaiato

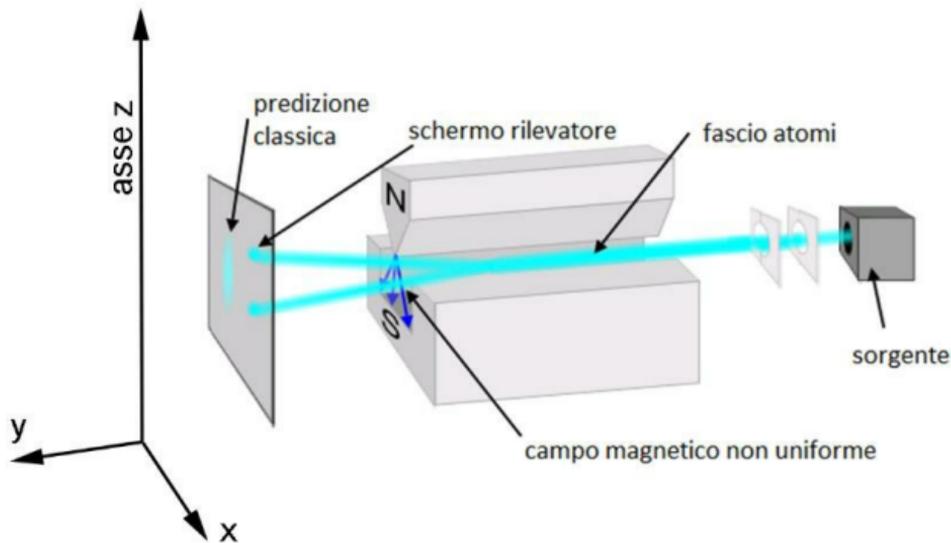
presente nell'ultimo orbitale dell'atomo di argento, l'orbitale $5s_1$,

dove è presente un solo elettrone, come si può rilevare dalla

lettura della tavola periodica.

Per una particella che si muove in un campo magnetico

omogeneo, le forze esercitate sulle estremità opposte del dipolo,



72

Nord e sud, si cancellano a vicenda e la traiettoria della particella

non viene modificata, per tale motivo per l'apparato sperimentale

viene utilizzato un campo magnetico non uniforme.

Una particella che attraversa un campo magnetico non

omogeneo, sarà soggetto ad una forza che ad una estremità del

dipolo sarà leggermente maggiore di quella all'estremità

opposta; questo causa la deflessione della particella.

Come risultato si ottiene che gli atomi, a causa dello spin

dell'elettrone spaiato, deviavano lungo solo due direzioni

opposte,

come

evidente

espressione

dello

stato

di

quantizzazione della grandezza misurata.

Diversamente, se il numero di Spin non avesse avuto valori

quantizzati ma continui, secondo la predizione classica, gli atomi

all'uscita dal campo magnetico
sarebbero dovuti deviare in tutte

le possibili posizioni, anche intermedie,
comprese tra i valori

massimi.

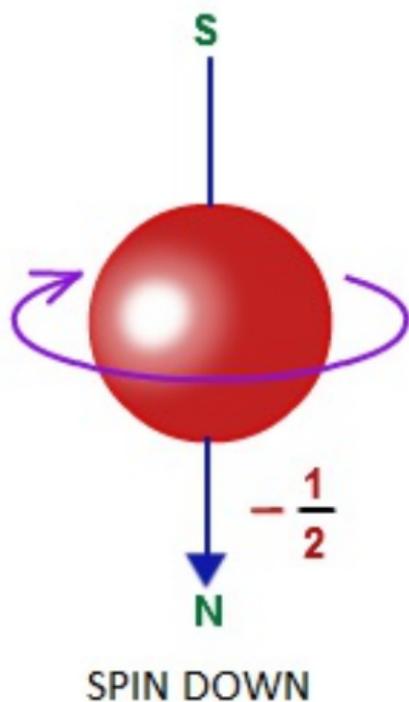
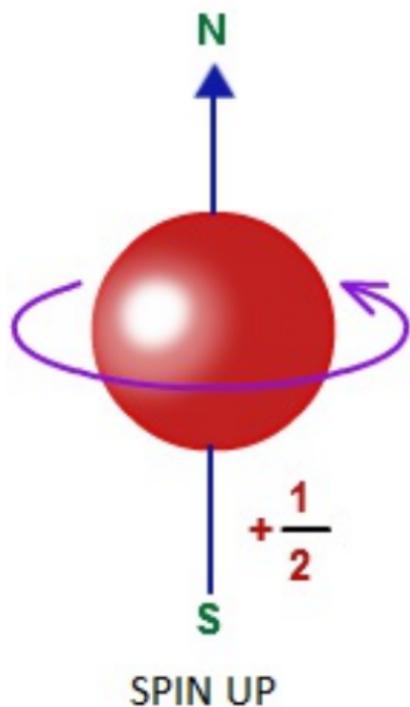
Questo

fenomeno

pone in evidenza

chiaramente la

quantizzazione dello stato quantistico di
Spin.



73

Quindi nella componente dell'asse z il vettore S di cui sopra, può

assumere solo valori verso l'alto e verso il basso, denominati

rispettivamente direzioni up e down, tale da avere valori delle

due componenti di momento di spin possibili pari a

1

1

$$\square \square = + \blacksquare, \square$$

\blacksquare

2

$$\square = - 2$$

Graficamente gli stati di spin vengono

così rappresentati:

Lo Spin in modo semplicistico, nel tentativo di assegnare una

interpretazione di tipo classico, richiama la rotazione della

particella carica intorno al proprio asse e può essere espresso

come quel valore che indica il numero di giri che dovrà eseguire

la particella affinché possa mostrare nuovamente la stessa

faccia.

Proseguendo per analogia, consideriamo un pianeta, che ruota

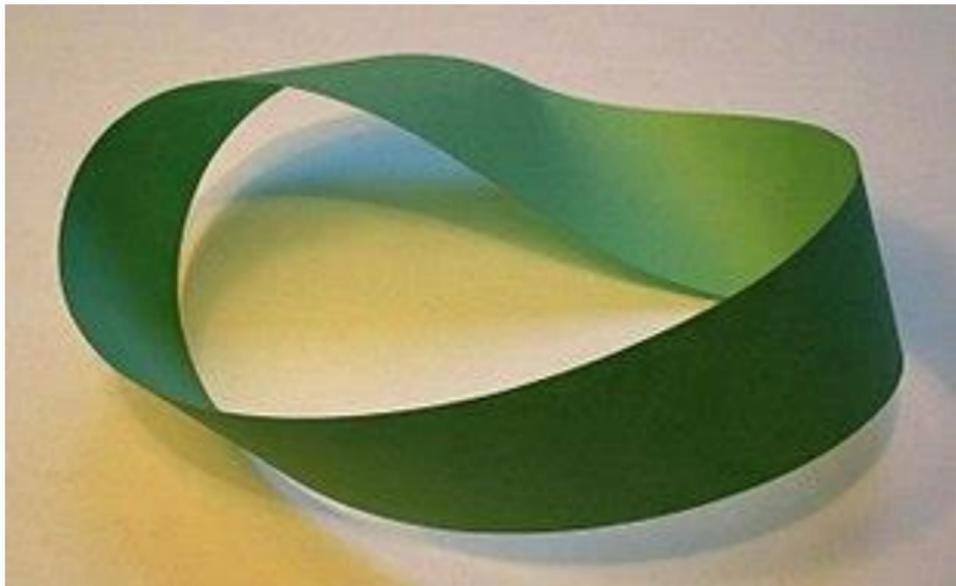
su se stesso, come la Terra ad esempio.

Dopo un giro completo compiuto dal pianeta quante volte sarà

mostrata la faccia d'origine?

La risposta è “uno”, una sola volta dopo una rotazione di 360° .

Prendiamo ora, una moneta con due facce uguali Testa-Testa.



74

La moneta mi mostrerà la faccia Testa dopo una rotazione di

180° , e nuovamente la faccia Testa dopo la rotazione di 360° , in

totale mi mostrerà la faccia richiesta per

due volte, nel corso di
una rotazione completa.

Questo valore, se il pianeta e la moneta
fossero delle particelle
quantistiche, rappresenterebbe lo spin
associato.

Sulla base degli esempi precedenti, il
pianeta ha Spin 1 e la
moneta T-T ha spin 2.

Per le particelle non si parla però di
facce da mostrare
nuovamente, ma di direzione della

rotazione.

Una particella con Spin $\frac{1}{2}$, vuol dire che dopo un giro di 360° non

riesce a mostrare nuovamente la stessa direzione iniziale, ma

avrà bisogno di ben 2 giri. Si può anche dire che tale particella

in un giro completo mostra solo per metà la direzione iniziale.

Una particella di spin 0 (zero) invece vuol dire che dopo un giro

completo mostra zero volte la propria direzione di rotazione, e

così sarà anche dopo infiniti giri, e
quindi la particella a spin 0,

non cambia direzione di rotazione.

Possiamo interpretare lo spin

frazionario

anche,

come

se

l'elettrone ruotando si muovesse

adagiato sopra un nastro di

Möbius., tale da mostrare la

stessa direzione di rotazione dopo 2 giri.

La misura del valore dello stato di spin
trova una importante

applicazione nel campo medico
attraverso la RMN (Risonanza

Magnetica Nucleare).







75

In particolare, il processo si svolge sottoponendo ad un apposito campo magnetico la materia.

In tali condizioni i protoni o in generale

i nuclei degli

atomi costituenti la materia,
acquisiscono una

precessione del proprio spin, come una
trottola in

rotazione.

Dalla misura del valore di precessione
di spin è

possibile ricostruire la morfologia del
corpo

biologico.

La RMN è definita nucleare, solo perché

interviene sulla misura

di proprietà dei nuclei, ed è
assolutamente innocua

diversamente da altre tecniche di tipo
radiologico, anche se

l'aggettivo nucleare potrebbe incutere
una certa paura.

L'unica accortezza da utilizzare durante
l'esecuzione della RMN

è di non introdurre oggetti metallici,
anche interni come pace-

maker, protesi metalliche (denti, occhi,
ossa ecc.) o comunque interagenti con i

campi magnetici.



76

COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

“L'uomo non unisca ciò che Dio ha separato.”

WOLFGANG ERNST PAULI

<https://www.frasicelebri.it/frasi-di/wolfgang-ernst-pauli/>



2.8 PRINCIPIO DI ESCLUSIONE DI PAULI

Lo Spin riveste un ruolo importantissimo in particolar perché il

suo stato è responsabile della stabilità della materia, attraverso

l'applicazione del principio di esclusione di Pauli, formulato dal

fisico austriaco Wolfgang Ernst Pauli, per il quale fra l'altro vinse

il premio Nobel nel 1945.

Pauli nasce a Vienna il 25 aprile del 1900.

Venne definito “uno spiritello che appare

dove si coltivano studi di fisica teorica”.

Giovanissimo pubblicò un articolo di rassegna sulla teoria della relatività e tale

lavoro è tuttora considerato un capolavoro di

didattica scientifica. Completò la sua

formazione scientifica dapprima nella
stimolante atmosfera di

Gottingen e poi nel famoso Istituto di
Copenaghen, dove trovò in

Bohr un maestro ed un amico. La sua
scoperta, il principio di

esclusione, formulata all'inizio del
1925, diventò la guida più

importante per interpretare la
spettroscopia atomica e nucleare,

connessa con la struttura della materia.
Chiamato all'Università

di Zurigo, vi rimase, tranne il periodo

della seconda guerra

mondiale che trascorse a Princeton
(USA) presso l'Institute for

Advanced Study, fino alla morte.

Durante la sua permanenza a

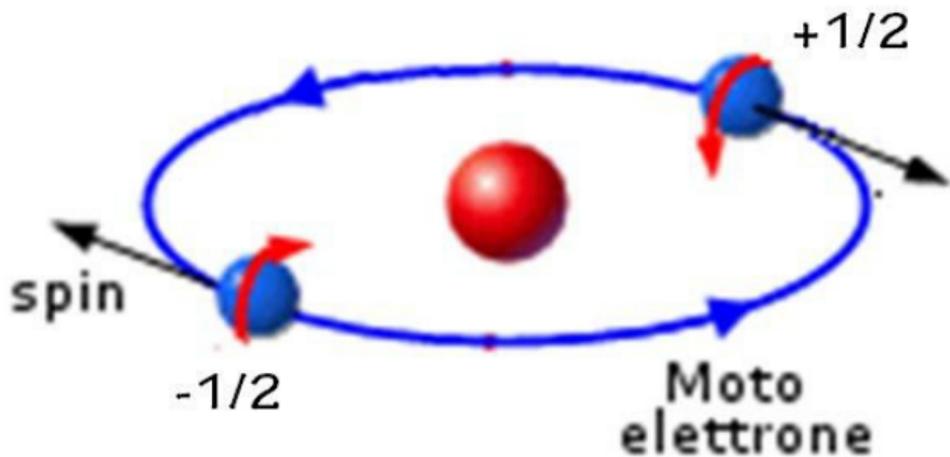
Zurigo, attraverso l'ipotesi
sull'esistenza di una particella neutra,

più tardi chiamata neutrino, fornì la
chiave per interpretare, nel

campo della radioattività, in modo
completo e coerente il

decadimento beta.

Elettroni antiparalleli



78

Il principio di esclusione di Pauli, è applicabile solo per le

particelle classificate come fermioni (elettrone, neutrini, quark,

protone, etc), che hanno spin semintero e rientrano tra le

particelle che compongono la materia ordinaria. Esso non è

valido per i bosoni (fotone, gluone, etc.), i quali hanno spin intero.

In particolare, secondo tale principio, gli elettroni, che come visto

in precedenza possono assumere solo spin secondario $+\frac{1}{2}$ o

$-\frac{1}{2}$, non possono coesistere all'interno

di un orbitale a stesso

livello energetico, con tutti i numeri quantici uguali (n, l, m, m_s),

quindi possono occupare lo stesso orbitale, stesso livello

energetico, stessa forma ed orientamento, solo se presentano

uno spin opposto.

Considerato che gli atomi sono composti in gran parte da vuoto,

il dubbio sulla compenetrazione degli orbitali della materia viene

risolto per mezzo di quest'ultimo principio.

Gli atomi e molecole componenti la materia, non si possono

intrecciare arbitrariamente uno con l'altro, perché se in un

orbitale sono già presenti due elettroni a spin opposto, non è

possibile l'inserimento di nessun altro elettrone, essendo

possibili solo valori di numero quantico di spin secondario m_s pari

a $+1/2$ e $-1/2$.



79

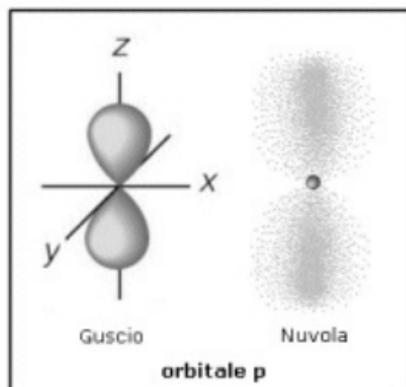
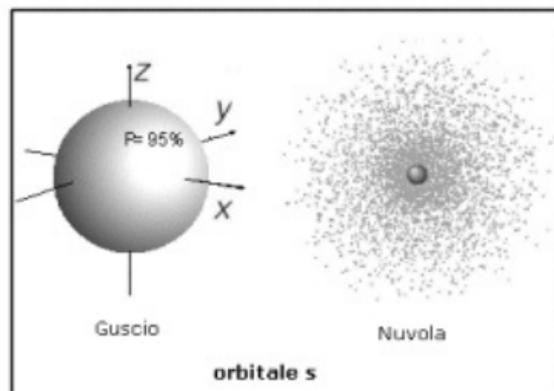
COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

“Ho fatto una cosa terribile, ho ipotizzato l'esistenza di una particella che non può essere rilevata.”

Riferendosi ai quanti.

WOLFGANG ERNST PAULI

<https://www.frasicelebri.it/frasidi/wolfgang-ernst-pauli/>



80

2.9 PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG

Con la formulazione dell'atomo quantistico, l'orbitale non è un

elemento solido ma è costituito e rappresentato da una nuvola

di probabilità di elettroni.

L'elettrone occupa lo spazio vuoto e vive attraverso una continua

danza elettronica negli orbitali quantistici.

Con riferimento all'elettrone, non è più possibile parlare di

traiettoria, come nella fisica classica, ma di probabilità che

occupi un determinato spazio.

Rappresentando la densità di probabilità di trovare un elettrone

di un determinato livello energetico in una determinata posizione

spaziale, si ottiene una nuvola che quanto più è fitta tanto più

indica un valore alto di probabilità che l'elettrone si trovi in tale

posizione spaziale, come meglio rappresentano le figure sopra

riportate.

Nella fisica classica la conoscenza della posizione e delle forze

applicate ad un corpo permette di descrivere il moto dello stesso

e quindi conoscere la successiva posizione e le modalità di

variazione delle grandezze caratterizzanti il moto.

Diversamente, con la fisica quantistica troviamo l'impossibilità di

poter conoscere di una particella, contemporaneamente il valore



di due variabili coniugate, quale ad esempio per l'elettrone,

posizione e velocità, se non nei limiti del principio di

indeterminazione, formulato dal fisico tedesco Werner Karl

Heisenberg.

Heisenberg nasce a Wurzburg, in Germania, il 5

dicembre 1901. Durante il corso dei suoi studi

presso l'Università di Monaco, del quale in

seguito divenne direttore, fu allievo di Arnold

Sommerfeld ed ebbe come compagno di banco Wolfgang Pauli. Dopo la laurea ebbe la

possibilità di perfezionare i suoi studi nei due centri di ricerca più

famosi, per la meccanica quantistica: Gottingen e Copenaghen.

A soli 25 anni pubblicò il suo famoso lavoro sul principio di

indeterminazione. Per i suoi studi sulla meccanica quantistica,

nel 1932 gli fu assegnato il premio Nobel. Durante l'ultimo

conflitto mondiale fu uno dei capi delle ricerche nucleari del III

Reich, per fortuna con mediocri risultati.

Il principio di indeterminazione di Heisenberg ammette che la

misura simultanea di due variabili coniugate, come posizione

e quantità di moto, non può essere compiuta senza una quota di

incertezza minima ineliminabile, diversamente dalla fisica

classica dove la conoscenza della
posizione (coordinate) e della

quantità di moto di un corpo definisce
l'evoluzione futura dello

stato fisico considerato.

La condizione di indeterminazione non è
però data dalla

mancata conoscenza di eventuali
variabili nascoste, ma è una

caratteristica propria della materia a
livello microscopico, come

se non volesse essere osservata.

A livello atomico, la conoscenza delle variabili posizione e

quantità di moto di un elettrone sono correlati da un valore di

indeterminazione legato alla costante di Planck.

Heisenberg formalizzò le proprie considerazioni, attraverso un

esperimento mentale inerente la problematica di individuare

l'esatta posizione e quantità di moto di un elettrone, utilizzando

un microscopio, che anziché utilizzare luce visibile, utilizza una

radiazione di lunghezza d'onda opportuna, compatibile con le

dimensioni dell'osservazione da compiere.

Infatti, per poter interagire e quindi misurare un elettrone è

necessario utilizzare radiazioni con valori piccoli di lunghezza

d'onda, avente massa equivalente paragonabili.

Ma un fotone avente un piccolo valore

della lunghezza d'onda e

quindi una elevata frequenza, per l'effetto Compton, interferisce

con la particella da osservare, modificandone la quantità di moto.

Di conseguenza, si riuscirà ad individuare l'esatta posizione

dell'elettrone, ma i valori di quantità di moto risulteranno

modificati nel processo di collisione.

In pratica secondo detto principio l'indeterminazione di due

variabili coniugate, quali ad esempio
posizione e quantità di

moto, non è dovuta alla mancanza di
informazioni o imprecisione

strumentale, ma è una caratteristica
propria del microcosmo che

cerca di opporsi in maniera congenita e
naturale alle

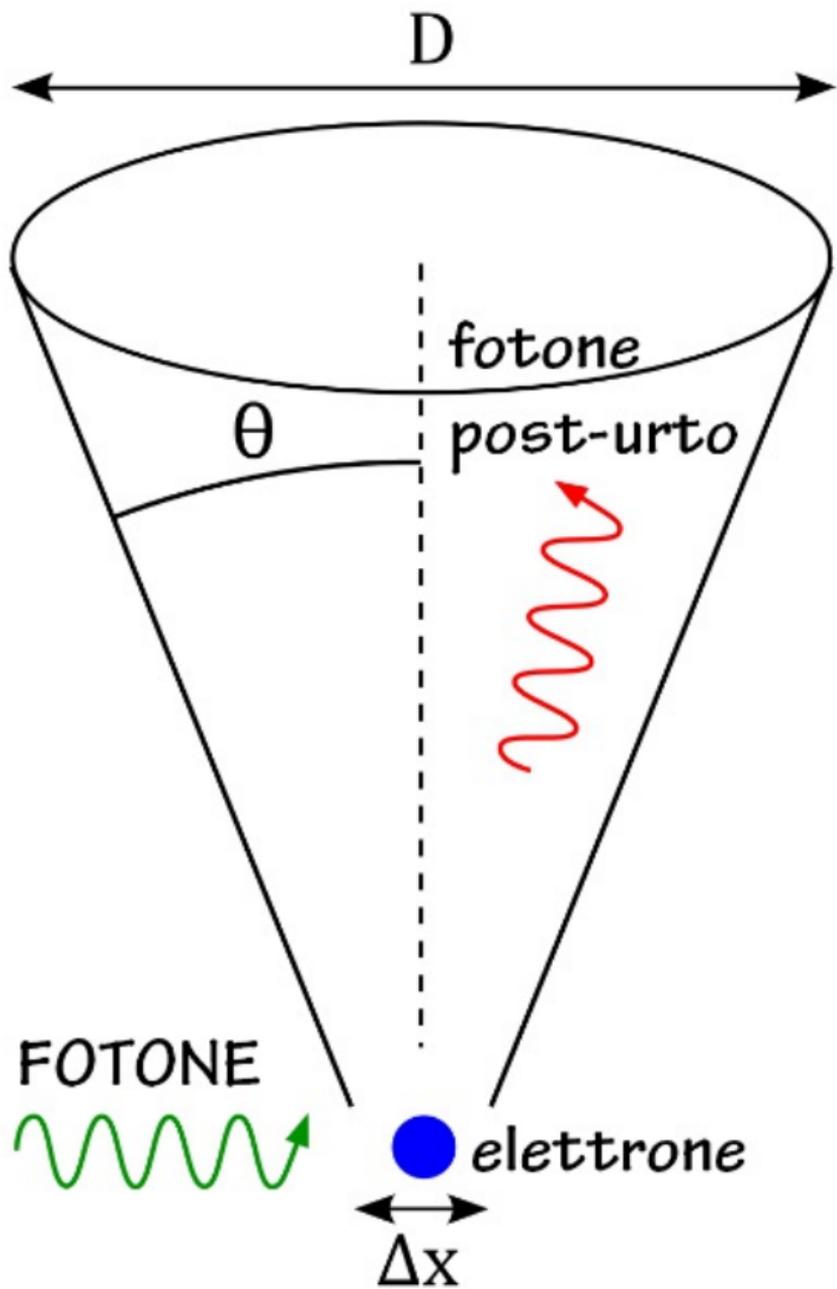
osservazioni del proprio
comportamento.

In termini analitici, Heisenberg ricavò
una disuguaglianza, che in

chiave moderna viene così riportata:

$$(2.9.1) \quad \Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Δx = incertezza statistica della
posizione dell'elettrone



Δp = incertezza statistica della misura della quantità di moto (p

= velocità x massa)

\hbar = costante di Dirac o costante di Planck ridotta = $h / 2\pi$

Questa relazione d'indeterminazione posizione e quantità di moto,

espressa in una prima formulazione differente, venne ricavata

mediante un esperimento mentale, eseguito dallo stesso

Heisenberg e riportato in una pubblicazione del 23 marzo 1927.

Riportiamo una spiegazione semplificata dell'esperimento.

Consideriamo un fotone proveniente lungo l'asse orizzontale

delle x, quando urta un elettrone fermo, per l'effetto Compton,

l'elettrone inizierà a muoversi ed il fotone cambiando direzione,

devierà verso un microscopio, variando la propria frequenza o

lunghezza d'onda iniziale λ , in modo che

la lunghezza d'onda

finale λ' sarà maggiore di quella iniziale.

84

Ipotizzando che il microscopio ottico ha un'accettanza angolare

pari a θ , possiamo ottenere il valore della risoluzione ottica Δx

con cui il microscopio osserva l'elettrone.

La quantità Δx rappresentando la risoluzione del microscopio

descrivere anche l'incertezza della posizione dell'elettrone lungo

l'asse delle x, che secondo il criterio di Abbe assume un valore

limite proporzionale alla seguente quantità

$\Delta x'$

$$(2.9.2) \Delta x \approx$$

$$2 \lambda \sin^2 \theta$$

Assumendo come riferimento l'asse dello strumento, la quantità

di moto del fotone deviato λ' è pari a p' ,

e la sua componente

lungo l'asse delle x varia tra $-px'$ e $+px'$ in funzione del grado di

allargamento del fascio ottico θ , tale da assumere un valore

massimo di indeterminazione pari a

$$\Delta x \Delta p_x \approx 2 \Delta x' \Delta p_x'$$

Ricordando che la quantità di moto di un fotone è esprimibile in

termini di lunghezza d'onda, sostituendo la (2.2.4) si ottiene

■

$$(2.9.3) \quad \square \square \square \approx$$

$$2 \square \square \square \square$$

$$\square'$$

Moltiplicando la (2.9.2) con la (2.9.3) si ottiene il valore

dell'indeterminazione della posizione e quantità di moto

■

$$\square'$$

$$\Delta \square \cdot \square \square \square \approx$$

$$2 \square \square \square \square \cdot$$

\approx **I**

\square'

2 $\square \square \square \square$

Il risultato ottenuto, ci fornisce una prima stima semi-quantitativa

circa l'indeterminazione di due variabili coniugate in maniera

proporzionale ad un valore discreto.

La relazione di indeterminazione, successivamente nel 1929,

sempre ad opera di Heisenberg, assume la seguente forma

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

85

Dove Δx Δp rappresentano
rispettivamente l'indeterminazione

media della posizione e della quantità di
moto.

In altre trattazioni, attraverso
l'applicazione del formalismo

matematico della meccanica quantistica
è possibile trovare

anche la seguente relazione

■

$$\square \square \square \square \geq$$

2

Dove con \square viene indicata
l'incertezza oppure in altri casi lo

scarto quadratico medio o in altri ancora
la deviazione standard,

relative alle misure delle variabili
coniugate.

La relazione di indeterminazione
generalizza il concetto che tutti

i fenomeni a livello atomico sono
ugualmente descrivibili

attraverso la teoria della meccanica classica, accompagnati però

da un'indeterminazione intrinseca, allorquando si indagano due

grandezze canonicamente coniugate.

Come diretta conseguenza del principio di indeterminazione, in

meccanica quantistica non è più quindi possibile parlare di

traiettoria di un elettrone, essendo la posizione di quest'ultimo

esprimibile solo in termini probabilistici.

La teoria di Heisenberg, sviluppata nell'anno 1925, costituisce la

prima formalizzazione della meccanica quantistica, attraverso

una teoria matematica basata sull'utilizzo della meccanica delle matrici.

Le matrici sono elementi dell'algebrici, che presentano la

particolarità di non rispettare la proprietà commutativa, in

particolare una matrice A moltiplicata per una matrice B è cosa

diversa dal risultato di una matrice B moltiplicata per la matrice

A.

86

Il calcolo matriciale risultava a quei tempi parecchio difficoltoso

e poco conosciuto, mentre risultava più semplice operare con il

calcolo differenziale, riferito ad elementi di tipo continuo.

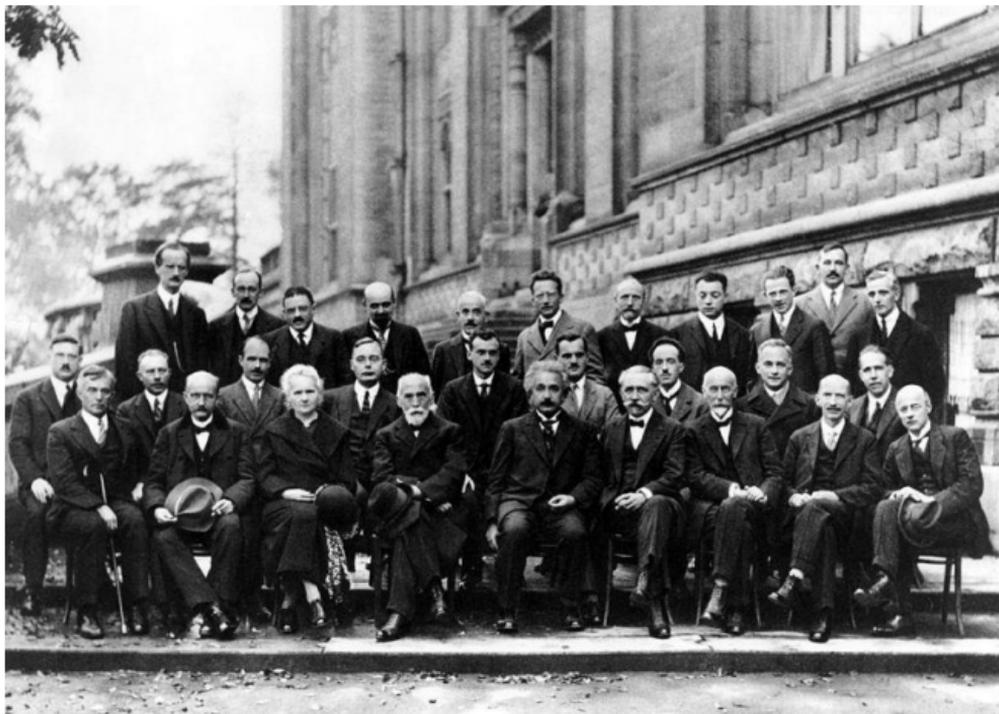
Tant'è che quasi contestualmente ed in maniera indipendente

veniva sviluppata la formulazione della
fisica quantistica

attraverso il calcolo differenziale dal
fisico e matematico

austriaco Erwin Schrödinger, che meglio
approfondiremo nel

paragrafo che segue.



87

COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

“Giace qui da qualche parte.”

Epitaffio sulla sua tomba. Un chiaro riferimento al suo famoso "Principio di

indeterminazione", secondo il quale non è possibile conoscere

simultaneamente ed esattamente due variabili coniugate, quali posizione e

quantità di moto

WERNER KARL HEISENBERG

<https://www.frasicelebri.it/frasi-di/werner-karl-heisenberg/>



88

2.10 FUNZIONE D'ONDA - EQUAZIONE DI SCHRÖDINGER

Il

fisico

e

matematico

austriaco

Erwin

Schrödinger,

contestualmente ad Heisenber ed in
maniera indipendente,

affronta il formalismo della fisica
quantistica da un punto di vista

ondulatorio, introducendo una funzione d'onda $Y(x_i, t)$ per

rappresentare l'evoluzione temporale dello stato quantistico di

un sistema (elettrone, atomo, etc.), nel limite non relativistico,

cioè senza tener conto delle deformazioni delle variabili in

funzione delle velocità delle particelle del sistema, come previsto

dalla teoria della relatività ristretta.

Se si considera la funzione d'onda nelle variabili posizione, il

modulo al quadrato della funzione d'onda è legato alla probabilità

di trovare una particella in una determinata regione spaziale,

basandosi sull'analogia con la teoria ondulatoria della luce,

per la quale il quadrato dell'ampiezza dell'onda luminosa in

una regione rappresenta la sua intensità.

Con riferimento alla composizione atomica, la funzione d'onda

diventa

rappresentativa

dell'indeterminata

posizione

dell'elettrone e delle ulteriori variabili di stato.

Schrödinger nasce a Vienna il 12 agosto 1887.

Favorito dalla sensibilità culturale paterna, si

dedicò fin dai primi anni della fanciullezza allo

studio delle discipline umanistiche e

scientifiche

e all'apprendimento delle principali lingue

straniere. Dopo essersi laureato all'Università di

Vienna, intraprese una brillante carriera accademica che da

Vienna lo portò a Stoccarda, a Zurigo e a Berlino. Dopo l'avvento

di Hitler, nonostante la sua estrazione cattolica, per l'avversione

al nazismo lasciò Berlino per continuare l'opera di docente a

Oxford e poi a Dublino. Nel 1956 ritornò nella sua città natale,

per insegnare fino agli ultimi giorni della sua vita. Bohr lo definì

un “uomo universale”, in quanto uno scienziato dai molteplici

interessi culturali: dalla filosofia alla fisica, dalla storia alla

politica, dalla biologia alla cultura greca. Un uomo caratterizzato

da un diffuso disprezzo per la moralità

convenzionale. Univa ad

un profondo pessimismo, una voluttuosa
indulgenza verso i

piaceri che la vita poteva offrire.
Einstein lo definì uno “scienziato

libertino troppo intelligente”,
sintetizzando le sue virtù e le sue

debolezze. Per la sua equazione,
condivise il premio Nobel nel

1933 con il Dirac, che generalizzò la
corrispondente equazione

tenendo conto delle previsioni
relativistiche. Schrödinger deve

essere infine ricordato per la soluzione di alcuni problemi di

carattere biologico. Le sue lezioni, oggi definibili di biologia

molecolare, furono raccolte in un volume dal titolo “What is life”,

pubblicato nel 1944 quando insegnava alla School for Advanced

Studies di Dublino. Morì a Vienna il 4 gennaio del 1961.

L'equazione di Schrödinger, formulata nel 1925 e pubblicata nel

1926, in maniera più generale, è

un'equazione differenziale,

dove la funzione d'onda $Y(x_i,t)$, che rappresenta lo stato del

sistema fisico considerato, ne è la soluzione.

Detta equazione, è stata formulata partendo dagli studi sul

dualismo onda-particella eseguiti dal fisico-matematico-storico

francese Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie.



90

De Broglie nasce a Dieppe il 15 agosto 1892.

Di nobile casato francese, si dedicò

dapprima

agli studi letterari, ottenendo una laurea
in

storia e diritto nel 1910 a soli 18 anni;

successivamente influenzato dal fratello

maggiore Maurice, valente fisico
sperimentale, fu attratto dalle

scienze fisiche. Si interessò soprattutto
delle teorie, connesse

con la fisica dei quanti, mediante le
quali Einstein era riuscito a

interpretare l'effetto fotoelettrico.

Sviluppò in forma organica

l'originale idea di estendere alle
particelle il dualismo onda-

corpuscolo nella tesi del dottorato nel
1924. Questo lavoro può

essere considerato il punto di partenza
della meccanica

ondulatoria. Nominato professore di
fisica teorica, insegnò dal

1928 al 1962 nell'Università di Parigi.
Nel 1929, a 37 anni, il

principe studente divenne il primo fisico
ad aver ricevuto il premio

Nobel per la sua tesi di dottorato, per la scoperta della natura

ondulatoria dell'elettrone. Lavoratore e studioso instancabile, nel

festeggiare il suo ottantesimo anno di età ebbe a dire: ” *di ritenere*

gli ultimi dieci anni trascorsi come i più validi scientificamente

della sua vita..... di aver capito, a cominciare dall'età di

settant'anni, molte più cose di prima, e la gioia che si prova è

superiore a quella della perdita

giovinetza”. De Broglie muore

in Francia a Louveciennes il 19 marzo
1987.

L’ipotesi di de Broglie, formulata nel
1926, afferma che ad ogni

particella sono associate proprietà
tipiche delle onde.

-
-

91

De Broglie, formula la sua ipotesi
partendo dall’analogia del

comportamento della materia con la

descrizione dei campi

elettromagnetici, come soluzione delle equazioni di Maxwell.

Per la luce monocromatica nel vuoto, che si propaga lungo una

direzione individuata dal vettore d'onda \mathbf{k} , i campi

elettromagnetici risultano descritti dalla seguente

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \cdot \exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))$$
$$-\exp(i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t))$$

dove $\omega = 2\pi \nu$ è la frequenza angolare esprimibile in funzione

della frequenza ν , A l'ampiezza del campo elettrico o magnetico,

il numero immaginario, il tempo, \mathbf{r} è il vettore distanza

dall'origine

Utilizzando la legge di quantizzazione dell'energia di Planck e la

dimostrazione di Einstein sull'effetto fotoelettrico, associò il

comportamento di una particella a quella di un'onda avente

lunghezza d'onda in funzione della massa, così come descritto

dalla (2.4.3).

La particella poteva quindi essere così descritta attraverso una

funzione d'onda

$$\psi(\mathbf{r}, t) = A \cdot e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$$

Sulla base di quanto ricavato da de Broglie, Schrödinger ricavò

la propria equazione, come nel seguito descritto.

Consideriamo una particella libera di muoversi e la sua Energia

cinetica nel campo non relativistico,
ovvero a velocità non

paragonabili a quelle della luce, che
vale

1

$$(2.10.1) \quad \square \square = \square v^2$$

2

Introducendo la quantità di moto

92

$$\square = \square v$$

Isolando il valore di v e sostituendolo

nella (2.10.1) in assenza di

campi esterni di forze, è possibile scrivere l'energia totale come

equivalente alla sola energia cinetica

$$1 \square 2$$

$$(2.10.2) \square \square =$$

$$2 \square$$

La quantità di moto di un oggetto quantistico può anche essere

espressa in funzione della lunghezza d'onda di de Broglie, come

ricavato nel paragrafo precedente con la
(2.4.4)

■

(2.10.3) $\square =$

\square

Introducendo il numero d'onda, definito
come

$2 \square$

$\square =$

\square

La (2.10.3) si può scrivere

$$(2.10.4) \quad \square = \square \quad \blacksquare$$

Sostituendo la (2.10.4) nella (2.10.2),
otteniamo l'espressione

dell'energia totale di una particella in
assenza di campo di forze

esterne

$$1 \quad \square \quad 2 \quad \blacksquare$$

$$\square \quad \square =$$

2

\square

Ponendo

$$1 \square 2 \blacksquare$$

$$(2.10.5) \square =$$

$$2 \square$$

Si ottiene

$$(2.10.6) \square \square = \blacksquare \square$$

Giunti a questo punto, introducendo la funzione d'onda $Y(x,t)$,

nella forma dell'onda di de Broglie, per semplicità nell'ipotesi

93

monodimensionale (solo asse x) e di

assenza di campo esterno

e quindi di potenziale esterno (cioè $V(x,t)=0$), si ottiene

$$(2.10.7) \quad \square(\square, \square) = \square \\ \square \square (\square \square - \square \square)$$

Con i pari all'unità immaginaria ($i^2 = -1$)

Derivando parzialmente rispetto al tempo la (2.10.7) e

considerando che la variabile ω di cui alla (2.10.5) è

indipendente dal tempo, si ha

$$\frac{\partial}{\partial x} f(x, y)$$

(2.10.8)

$$= -\frac{\partial}{\partial y} f(x, y)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}$$

Invece derivando sempre la (2.10.7) però rispetto a x , due volte,

si ottiene:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x, y)$$

(2.10.9)

$$= \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x, y)$$

$\square \square 2$

Isolando da questa solo la parte relativa alla funzione

esponenziale

1

$\square 2 \square (\square, \square)$

$\square \square (\square \square - \square \square) =$

$\square 2 \square 2$

$\square \square 2$

e sostituendo tale funzione ottenuta nella
(2.10.8)

$$\square \square (\square, \square)$$

1

$$\square 2 \square (\square, \square)$$

$$= -\square \square$$

$$\square \square$$

$$\square 2 \square 2$$

$$\square \square 2$$

Ed ancora, sostituendo per ω il valore di cui alla (2.10.5) e

ponendo a sinistra la derivata parziale dello spazio ed a destra

la derivata parziale del tempo, si ottiene l'equazione di

Schrödinger, non relativistica, alle derivate parziali, relativa al

moto di una particella quantistica, lungo il solo asse delle x , in

assenza di potenziale esterno, quindi relativa ad una particella

libera

$$\nabla^2 \psi(x, t) = 0$$

$$\psi(x, t)$$

= □ ■

2 □

□ □ 2

□ □

94

Nell'ipotesi in cui il moto della
particella può essere immersa in

ogni tipo di potenziale esterno, però
sempre considerando il solo

moto monodimensionale, Schrödinger
formulò la seguente

equazione

$$\mathbf{12} \square 2 \square (\square, \square)$$

$$\square \square (\square, \square)$$

—

$$+ \square (\square, \square) \square (\square, \square) = \square \mathbf{1}$$

$$2 \square$$

$$\square \square 2$$

$$\square \square$$

Dove $\square (\square, \square)$ rappresenta la
funzione d'onda generale e non più

la funzione d'onda di de Broglie.

Nel caso più generale di moto nelle tre dimensioni, introducendo

l'operatore di Laplace

$$\square^2$$

$$\square^2$$

$$\square^2$$

$$\square^2 =$$

+

+

$\square \square 2$

$\square \square 2$

$\square \square 2$

e posto

$$(\square, \square, \square, \square) = (\square, \square)$$

si ricava l'equazione nello spazio tridimensionale di Schrödinger

dipendente dal tempo, nel campo non relativistico

12

$$\square \square (\square, \square)$$

—

$$\square^2 \square(\square, \square) + \square(\square, \square) \square(\square, \square) = \square \blacksquare$$

2□

□ □

Generalizzando, se ipotizziamo che r rappresenta tutte le

possibili variabili di stato del sistema, $r = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \dots)$, la

funzione d'onda $\square(\square, \square)$, è soluzione dell'equazione alle derivate

parziali nello spazio astratto e descrive

tutti i possibili stati di un

oggetto quantistico.



La derivata parziale rispetto al tempo

, che rappresenta



l'evoluzione temporale della funzione
d'onda, in meccanica

quantistica, viene anche indicata con



, denominato operatore

di Hamilton.

95

Considerato che il membro a sinistra dell'equazione precedente

assume le sembianze di una Energia, utilizzando l'operatore di

Hamilton è possibile scrivere l'equazione di Schrödinger, nello

spazio ad n-dimensioni, dipendente dal tempo, nella più

semplice ed elegante forma seguente:

$$\square \square = \square$$

□
Da un punto di vista matematico la funzione d'onda $Y(r,t)$ è

una funzione complessa delle coordinate spaziali e del tempo

ed assume l'aspetto di una "ampiezza di probabilità", mentre il

quadrato del suo valore assoluto $|Y(r,t)|^2$, quello di una "densità

di probabilità", a condizione che la stessa sia normalizzata

all'unità.

La densità di probabilità rappresenta la probabilità di trovare una

particella in una determinata regione spaziale, in un determinato

stato quantico.

E' anche possibile scrivere il modulo della funzione d'onda in

altro modo

$$(2.10.10) \quad |\psi|^2 = \psi \psi^*$$

In questo caso la funzione ψ

ψ^* rappresenta il complesso coniugato

della funzione d'onda.

L'uguaglianza è possibile in quanto moltiplicando un numero

complesso per il suo complesso coniugato si ottiene sempre un

numero reale.

Si ricorda che, il complesso coniugato di un numero complesso

si ottiene sostituendo il valore i del numero complesso, con il

valore $-i$.

Considerando un numero complesso generico

$$z = a + bi$$

dato

$$z^2 = -1 \rightarrow z = \pm \sqrt{-1}$$

$$z^2 = -1 \rightarrow z = \pm \sqrt{-1}$$

Il suo modulo al quadrato è sempre un numero reale e vale

$$(2.10.11) |z|^2 = a^2 + b^2$$

Il complesso coniugato di z si indica con un asterisco posto in

apice e vale

$$z^* = \bar{z} - z$$

Moltiplicando un numero complesso per il suo complesso e

coniugato si ottiene

$$z z^* = (x + iy)(x - iy) = x^2 - i^2 y^2 = x^2 + y^2$$

Dato $i^2 = -1$, si ottiene

$$(2.10.12) \quad z z^* = x^2 + y^2$$

Dal confronto della (2.10.11) con la (2.10.12) si ottiene:

$$z z^* = |z|^2$$

Che dimostra l'uguaglianza 2.10.10.

L'implementazione della funzione d'onda nel modello atomico

quantistico, evidenzia il carattere di "casualità" (probabilità) della

fisica quantistica, esaltando la sostanziale differenza dalla fisica

classica basata sulla "causalità" (causa-effetto).

Risolvendo l'equazione di Schrödinger stazionaria, ovvero

supponendo che la stessa $Y(r,t)$ sia indipendente dal tempo,

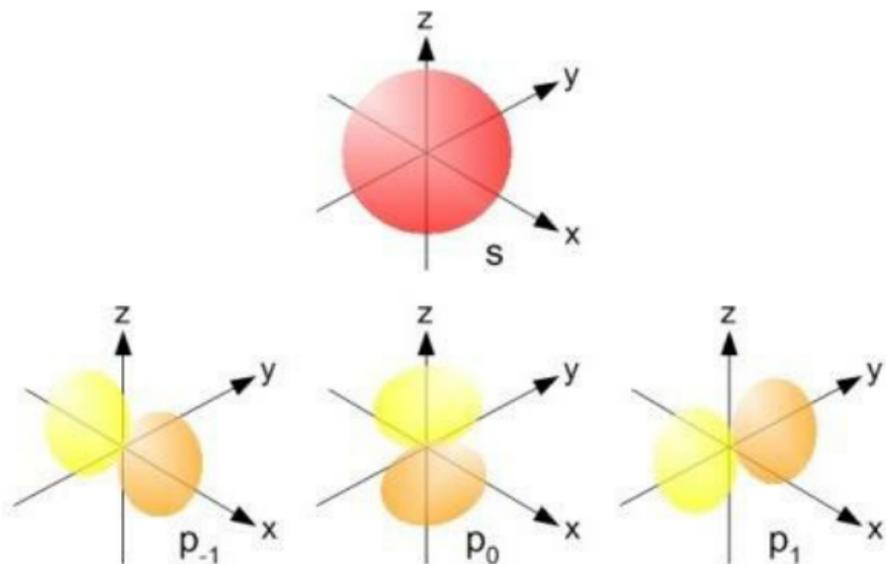
quest'ultima si riduce in $Y(r)$.

Rappresentando graficamente, nelle tre dimensioni, il modulo al

quadrato di tale equazione stazionaria $|\psi|^2$,
 $|\psi|^2$, avente come

condizioni note la posizione
dell'elettrone e la sua

corrispondente probabilità, ad esempio
del 95%, di trovarsi in



97

tale determinata posizione, al variare dei livelli energetici

($n=1,2,3, \dots$ etc.), si ottengono le figure tridimensionali

rappresentanti proprio gli orbitali

atomici, di cui al paragrafo 2.6.

E' evidente come risulta semplice risolvere l'equazione di

Schrödinger per atomi idrogenoidi, aventi un solo elettrone

orbitante, mentre per atomi poli-elettronici la questione si

complica, in quanto subentrano le forze di repulsione

elettromagnetiche tra elettroni.

In tale ultimo caso l'equazione si risolve per successive

approssimazioni,

permettendo

di

poter

rappresentare

graficamente anche gli orbitali atomici
degli atomi pluri-

elettronici.



ERWIN
SCHRODINGER
1887 1961

$$i\hbar\dot{\psi} = H\psi$$

COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

“La ricerca in fisica ha mostrato, al di là di ogni dubbio,

che l'elemento comune soggiacente alla coerenza che si

osserva nella stragrande maggioranza dei fenomeni, la cui

regolarità e invariabilità hanno consentito la formulazione

del postulato di causalità, è il caso.”

ERWIN SCHRODINGER

<https://www.frasicelebri.it/frasi-di/erwin-schrodinger/>

99

2.11 PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE

Una entità quantistica esiste in ogni luogo in sovrapposizione di

stati fino a che non si esegue l'osservazione e lo stato diventa

certo.

Da un punto di vista matematico la conoscenza dello stato fisico

di un sistema è diretta conseguenza del collasso della funzione

d'onda $Y(x,t)$, che provoca la riduzione degli stati sovrapposti in

un univoco stato osservabile.

Un elettrone può esistere sia qui che lì, in un qualunque stato

possibile, ed è solo quando effettuiamo l'osservazione che la sua

posizione diventa certa e lo stato determinato.

Consideriamo, ad esempio, un elettrone che, come visto in

precedenza, può avere valore di spin UP o DOWN ($+1/2$ e $-1/2$).

Tale stato di spin non è noto fintanto che effettuiamo una misura.

A seguito dell'azione di misura, si verifica il collasso della

funzione d'onda che rappresenta lo stato del sistema, quindi si

perdono le caratteristiche quantistiche di tipo casuale, per dar

luogo ad uno stato certo UP o DOWN.

In definitiva il principio di sovrapposizione ci dice che gli stati

quantistici non sono univoci, ma godono della condizione di

casualità che porta ad avere anche valori di stati sovrapposti,

oltre ai valori ordinari.

Il principio di sovrapposizione è una caratteristica propria del

mondo microscopico ed a tale proposito Erwin Schrödinger ideò

nel 1935 un esperimento mentale denominato paradosso del

gatto di Schrödinger, con lo scopo di illustrare come

l'interpretazione della meccanica quantistica ([interpretazione di](#)



100

[Copenaghen](#)) fornisca risultati

paradossali se applicata ad un
sistema fisico macroscopico.

A tale paradosso, considerata
l'importanza, dedichiamo

interamente il paragrafo successivo.

Il concetto di sovrapposizione
quantistica diventa più chiaro,

seguendo un formalismo di sorprendente
efficacia, introdotto dal

fisico, matematico e ingegnere
britannico Paul Dirac, che nel

1927 sviluppò una formalizzazione della

meccanica quantistica

basata sull'algebra non commutativa,
similmente all'utilizzo del

calcolo matriciale da parte di
Heisenberg, che ugualmente si

basa su proprietà di calcolo di tipo non
commutativo.

Dirac nasce a Bristol il 8 agosto 1902.
Coetaneo

di Heisenberg, Pauli e Fermi, è
considerato uno

dei più brillanti fisici teorici del secolo.
Dopo

essersi laureato a Bristol nel 1921, si trasferì a

Cambridge con una borsa di studio; qui, tranne

alcuni periodi trascorsi negli Stati Uniti, è sempre

rimasto ricoprendo, dal 1932 fino alla fine della carriera, la

cattedra già tenuta da Newton. Dotato di una forma mentis

altamente analitica e di carattere schivo, Dirac era noto per

l'estrema riluttanza a parlare, tanto che i

suoi colleghi a

Cambridge avevano istituito
ironicamente il "dirac", come unità

di misura della loquacità: "un dirac"
valeva l'emissione di una

parola all'ora. Nel 1933 condivise il
premio Nobel con il

Schrödinger, per la generalizzazione
della corrispondente

equazione, tenendo conto delle
previsioni relativistiche. Morì a

Tallahassee, in Florida, il 20 ottobre
1984.

La formalizzazione di Dirac, basata sull'algebra non

commutativa, prevede l'utilizzo di vettori ed operatori, quali

elementi di uno spazio di Hilbert, in grado di rappresentare uno

stato quantistico.

Detti vettori non sono i classici vettori definiti da verso, intensità

e direzione, ed indicati con una freccia in un sistema di assi

cartesiani, come siamo abituati a pensarli nella fisica classica.

Questi nuovi vettori, sono particolari, in quanto definiti in uno

spazio vettoriale astratto, e costituiti da successione di numeri

complessi o funzioni di numeri complessi, fino ad un numero

infinito di componenti.

Possiamo pensarli più come vettori algebrici e non geometrici,

tale da essere rappresentati attraverso opportuni matrici.

Dirac introduce due vettori fondamentali: il vettore *bra*- ed il

vettore – *ket*, che insieme formano la parola bracket dal

significato: *mettere tra parentesi, raggruppare*.

Il vettore *bra* viene indicato con la simbologia $\langle \square |$ mentre il vettore

ket con la simbologia speculare $|\square \rangle$.

Un *ket*, rappresenta un vettore complesso che descrive

completamente uno stato quantistico.

Il vettore *ket* è rappresentabile in uno spazio astratto di Hilbert,

avente particolari proprietà di calcolo algebrico ed in particolare

caratterizzato dall'essere uno spazio vettoriale complesso.

Un *ket* gode di diverse proprietà, tra le quali anche alcune

proprietà dei vettori ordinari: si possono sommare tra loro,

moltiplicare per un numero complesso (immaginario) e quindi

combinarsi tra loro.

In particolare la combinazione di due vettori *ket* può esprimersi

nel modo seguente:

$$(2.11.1) \quad a|\varphi\rangle + b|\chi\rangle = |\psi\rangle$$

Con a e b due numeri complessi arbitrari.

Il vettore ket $|\psi\rangle$ essendo espresso come combinazione lineare

di due vettori ket $|\varphi\rangle$ e $|\chi\rangle$ si definisce *dipendente*.

Viceversa se un vettore ket non è esprimibile come

combinazione lineare di altri ket, si definisce *indipendente*.

Quando un vettore ket è dipendente esso rappresenta un

ulteriore stato del sistema.

Quindi nel caso della (2.11.1) il vettore ket $|\square\square$ rappresenta un

ulteriore stato del sistema, in aggiunta agli stati rappresentati dai

vettori ket $|\square\square$ e $|\square\square$.

In definitiva un semplicissimo sistema fisico con soli due stati

possibili, può avere infiniti stati: i due stati possibili a seguito della

misura e tutte le combinazioni possibili tra i predetti stati.

Esaminiamo il famoso caso dello stato di *spin* dell'elettrone ed

appliciamo il formalismo e le considerazioni precedenti.

Prima di eseguire la misura l'elettrone si trova in uno stato

combinato di Spin UP = $\frac{1}{\sqrt{2}}$ e Spin

DOWN = $|2\rangle$.

Il suo stato è esprimibile, adottando il formalismo di Dirac, nel

modo seguente:

$$(2.11.2) \quad | \square \rangle = a | 1 \rangle + b | 2 \rangle$$

I coefficienti a e b , sono ampiezze di probabilità che

singolarmente solo se elevati al quadrato, rappresentano la

probabilità associata al verificarsi del rispettivo stato.

Nel caso analizzato, con due solo due valori possibili (Spin UP e

Spin DOWN) avremo

$$(2.11.3) \quad |\square|^2 + |\square|^2 = 1$$

Che esprime il fatto che la somma delle probabilità di ottenere il

valore effettivo di uno stato è sicuramente par al 100% =1.

Ed ancora considerando che l'elettrone ha uguale probabilità di

presentare uno dei suoi Spin possibili, si ottiene:

|

1

1

$$|\square|2 = ; |\square| =$$

$$= \sqrt{2} = 0,707$$

2

$$\sqrt{2}$$

2

|

1

1

$$\langle \sigma_x \rangle = \langle \sigma_y \rangle =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

2

$$\frac{1}{\sqrt{2}}$$

2

e la (2.11.2) diventa:

$$\langle \sigma_z \rangle = 0,707(\langle \sigma_1 \rangle + \langle \sigma_2 \rangle)$$

Questa relazione ci dice che i valori di spin possibili di un

elettrone fin tanto che non si effettua la misura sono tre:

SPIN up, SPIN down e $0.707(\text{SPIN up} + \text{SPIN down})$

La parte che segue presenta concetti matematici di un grado di

difficoltà più elevato, pertanto chi non volesse cimentarsi può

agevolmente passare alla lettura del paragrafo successivo.

Solo per completezza, ma senza entrare troppo nel merito, dopo

aver descritto il *ket*, vediamo di

descrivere il *bra*.

Assegnato un insieme di vettori è possibile costruire un secondo

insieme di vettori, chiamato dai matematici *insieme duale*.

Si definisce vettore *bra* un vettore coniugato al vettore *ket*,

avente gli elementi di uno spazio duale associato a quello dato

dal *ket*, con la particolare caratteristica che i prodotti scalari con

i corrispondenti *ket* di partenza assumono valori assegnati,

ovvero sono dei numeri espressi come
funzione lineare dei *ket*

di partenza.

Secondo il formalismo di Dirac nel
rappresentare il prodotto

scalare o interno si accostano le
simbologie del bra e del ket,

eliminando una delle barre verticali e
ponendo sempre a sinistra

il bra ed a destra il ket

$$(2.11.4) \quad \langle \square \square | \cdot | \square \square \rangle = \langle \square \square | \square \square \rangle =$$

$\square \square | \square \square$

Il prodotto scalare di un *bra* $\square \square |$ con il corrispondente *ket* $|\square \square$,

come prima evidenziato, è sempre uno scalare, tenendo

presente che però non gode della proprietà commutativa, tanto

che commutando la (2.11.4) in un nuovo prodotto scalare avente

il *ket* $\square \square |$ (a sinistra) ed il *bra* $|\square \square$ (a destra), anziché uno scalare

darà luogo ad un nuovo vettore (*ket* o *bra*), essendo

$$\square\square|\square\square \neq |\square\square\square\square|$$

In termini matriciali il *bra* viene indicato come vettore riga ed il

ket come vettore colonna, quindi attraverso il calcolo matriciale,

appare evidente come il prodotto tra un *bra* $\square\square|$ (1 riga x n

colonne) e un *ket* $|\square\square$ (n righe x 1 colonna), entrambi associati in

uno spazio duale, sia uno scalare (matrice 1×1 dimensioni), in

quanto per la (2.10.12) il prodotto di una componente

immaginaria per il suo complesso
coniugato è uno scalare.

Siano $(\psi^*$

*

*

$1, \psi_2, \psi_3, \dots$) le componenti del
bra $\langle \psi |$ e $(\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots)$ le

componenti del *ket* $|\psi\rangle$, abbiamo

ψ_1

$\langle \psi | \psi \rangle = (\psi^*$

*

*

□

*

*

*

1

$$\square^2 \square^3 \dots) (2) = \square^1 \square^1 + \square^2$$

$$\square^2 + \square^3 \square^3 + \dots = \square$$

□3

...

In tale rappresentazione matriciale, è possibile verificare anche

la mancata proprietà di commutazione.

105

Il prodotto commutato tra il *ket* $\begin{bmatrix} \square & \square \end{bmatrix}$ (1 riga x n colonne) e il *bra* $\begin{bmatrix} \square & \square \end{bmatrix}$

(n righe x 1 colonna), è una nuova matrice a $n \times n$ dimensioni,

ovvero una nuova entità vettoriale ad $n \times n$ dimensioni

\square

*

*

*

1

□ 1 □ 1 □ 1 □ 2 □ 1 □ 3

*

*

*

|□ □ □ □| = (□

...

2) (□ *

*

*



1

2 3) = (21 22 23)



*

*

*

...

3

...

$\square 3 \square 1 \square$

\square

...

$3 \square 2$

...

$3 \square 3$

...

...

In definitiva, lo stato di un sistema quantistico è esprimibile

attraverso degli opportuni vettori di stato soggetti ad una algebra

non commutativa nello spazio astratto di Hilbert.

Queste entità vettoriali se possono essere misurate o

direttamente attraverso opportuni strumento di misura o

indirettamente attraverso calcolo analitico, vengono definite

“osservabili”.

La possibilità di calcolare indirettamente le osservabili attraverso

il calcolo analitico è data da opportuni operatori lineari che

applicati al vettore rappresentante la grandezza fisica di stato,

dà luogo ad un valore reale, che corrisponde alla misura della

grandezza fisica.

Tali operatori lineari, definiti anch'essi nell'ambito dell'algebra

non commutativa in uno spazio di Hilbert, non sono altro che

delle particolari macchine matematiche che operando sui vettori

di stato producono dei valori reali delle grandezze ricercate.

Da un punto di vista matematico se O è un operatore lineare e

$|\psi\rangle$ è un vettore ket di stato si ha

$$\langle \phi | O | \psi \rangle = \langle \phi | O | \psi \rangle$$

Dove il valore λ è definito autovalore e rappresenta la misura

della grandezza osservata, mentre la grandezza $|\lambda\rangle$ prende il

nome di autovettore.

106

Esaminiamo il caso dell'operatore di spin.

Abbiamo visto che è possibile eseguire misure di spin

esclusivamente lungo una sola direzione.

Consideriamo l'asse delle z per

misurare uno stato di spin di un

elettrone che sappiamo poter assumere i due possibili valori up

e down.

Lo stato di spin generico, espresso come vettori ket può scriversi

come sovrapposizione di stati, nel modo seguente

$$|\psi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$$

Ricordando che i coefficienti a e b elevati al quadrato

rappresentano rispettivamente le

probabilità di ottenere il

corrispondente stato, condizionati da $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, allora

abbiamo che per avere lo stato $|\uparrow\rangle$ è necessario che $|\alpha|^2 = 1$

e $|\beta|^2 = 0$, invece per avere lo stato $|\downarrow\rangle$ è necessario che

$|\alpha|^2 = 0$ e $|\beta|^2 = 1$

Si trova che i vettori ket corrispondenti ai due stati possibili up e

down, rispettosi delle proprietà algebriche dello spazio di

appartenenza, possono costruirsi
ponendo i coefficienti della

relazione di sovrapposizione, su righe
diverse

1

0

$$\begin{bmatrix} \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \square & \square \\ \square & \square \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \square & \square & \square \\ \square & \square & \square \end{bmatrix}$$

)

0

$$\begin{bmatrix} \square & \square & \square & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & \square \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \square & \square & \square & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & \square \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \square & \square & \square & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & \square \end{bmatrix}$$

Applicando a questi due stati

l'operatore di spin definito come

■

□

$$\hat{\square} = \square$$

2 □

Dove □ □ è la matrice di Pauli, che per la componente z vale

1

0

$$\square \square = ($$

)

0 -1

Ed eseguendo i prodotti matriciali si
ottiene rispettivamente

107

■

■ 1

0

1

■ 1

□

$$\square \mid \square \square \square \square = \square$$

(

) () =

()

$$2 \square \mid \blacksquare \square \square \square = 2 \ 0 \ -1$$

0

2 0

■

■ 1

0

0

1 0

□

$$\hat{\square} | \square \square \square \square \square \square = \square$$

(

$$) () = - ()$$

$$2 \square | \blacksquare \square \square \square \square = 2 0 - 1$$

1

2 1

A questo punto il valore numerico presente davanti alla matrice

colonna risultante è definito autovalore e rappresenta la misura

dello stato di spin lungo l'asse considerato, ovvero in tale caso

corrisponde proprio al numero quantico di spin secondario.

Il vettore di stato, in tali relazioni, prende il nome di autovettore,

in quanto collegato al corrispondente autovalore.

In questo caso le misure dello stato di

spin lungo la componente

dell'asse z , risultano essere pari a $\pm \frac{\hbar}{2}$

$\pm \frac{\hbar}{2}$

e - rispettivamente nei casi

$\frac{1}{2}$

$\frac{1}{2}$

di spin up e down, così come atteso.

Analogamente per le componenti x e y , i relativi operatori sono

$\pm \frac{\hbar}{2}$

\square

$$\square = \square$$

$$2 \square$$

I

\square

$$\hat{\square} = \square$$

$$2 \square$$

considerando che le matrici di Pauli
valgono

0 1

$$\square \square = ($$

)

$$1 \ 0$$

$$0 \ -\square$$

$$\square \square = ($$

)

$$\square$$

$$0$$

È possibile ottenere i corrispondenti
stati di spin lungo gli assi

considerati, esprimendo però gli stati di spin lungo le componenti

come sovrapposizione di stati (combinazione lineare) degli stati

up e down.

Ora è anche possibile calcolare il modulo dello stato di spin

complessivo, ovvero del momento angolare di spin, di cui alla

108

(2.7.2), questa volta però come somma delle componenti

dell'operatore

$$\square = \sqrt{\square}$$



$$+ \square \square + \square \square =$$



0 1 □

■

0 - □ □

■

1

0 □

= $\sqrt{() |$

| + () |

| + () |

| =

2

1 0

2



0

2

0 -1



$$\sqrt{3}$$

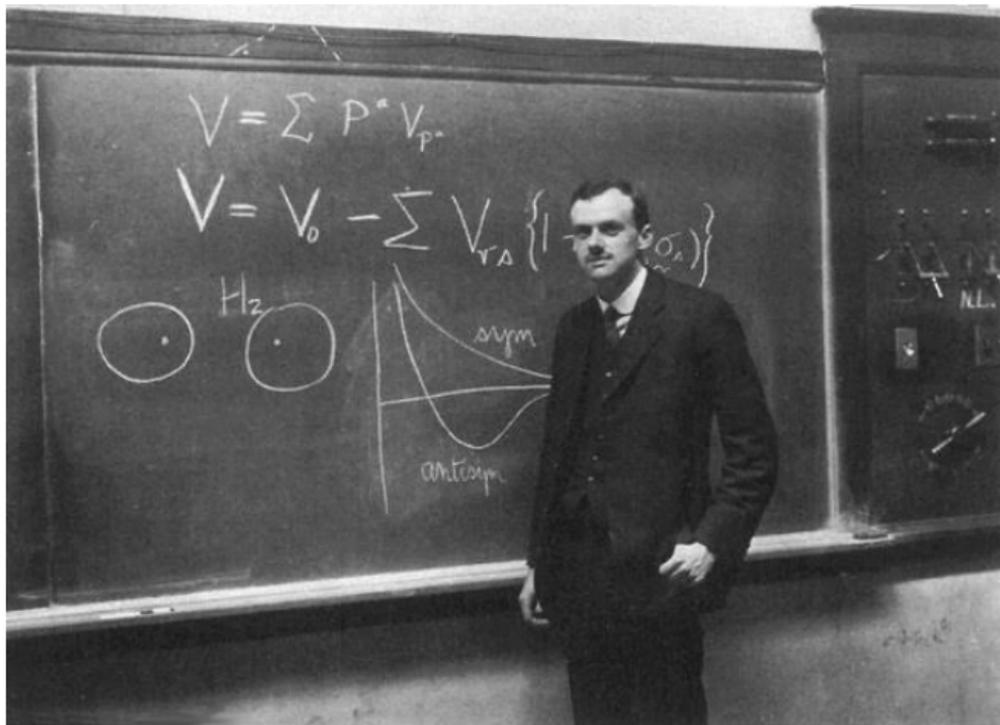
$$= \sqrt{(\quad) \cdot 1 + (\quad) \cdot 1 + (\quad) \cdot 1} =$$

2

2

2

2



109

COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

“Raccogli un fiore sulla Terra e
muoverai la stella più distante.”

PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC

<https://www.frasicelebri.it/frasi-di/paul-adrien-maurice-dirac/>



110

2.12 IL GATTO DI SCHRÖDINGER

Certo non era intenzione di Schrödinger
uccidere un povero

gatto, per un esperimento di fisica
quantistica, difatti

l'esperimento mentale viene ideato con
le aspettative di meglio

comprendere il concetto di
sovrapposizione di stati, che impone

una forte distinzione dell'interpretazione
dei fenomeni quantistici

rispetto ad una interpretazione dei
fenomeni secondo la fisica

classica.

Poniamo in una scatola chiusa un gatto, abbinato ad un diabolico

sistema che casualmente aziona un martelletto, che così può

rompere una fiala di cianuro.

Alla rottura della fiala, il gatto muore, in merito alla funesta fine e

su questo non vi sono dubbi.

La rottura della fiala viene affidata ad un evento di tipo casuale

quale è il decadimento di una sostanza radioattiva, per la quale

è possibile conoscere solo il tempo di decadimento medio.

Non possiamo sapere se il gatto è vivo o morto fintanto che non

apriamo la scatola e verifichiamo lo stato di salute del gatto.

Come rispondiamo alla domanda: Il gatto è vivo o morto?

Il gatto si trova nello stato sovrapposto di vivo, morto o vivo-

morto.

Il gatto può trovarsi oltre che agli stati ordinari di vivo e morto,

anche nello stato contestualmente vivo e morto, sempre fino a

che non si apre la scatola per eseguire l'osservazione.

A seguito dell'apertura della scatola, il processo di osservazione

comporta

la

rottura

della

“coerenza”

del

sistema

precedentemente isolato, a seguito del
contatto con gli oggetti

macroscopici posti all'esterno, con la
conseguenza del collasso

della funzione d'onda e della
trasformazione del sistema

quantistico in un sistema classico,
caratterizzato da misure di

tipo certo, o meglio: osservabile.

Per tali motivi nella vita quotidiana
anziché osservare

comportamenti di tipo quantistico, la
materia si pone nei nostri

confronti in maniera decisamente
deterministica, proprio per

effetto

della

così

detta

“decoerenza

quantistica”

o “desincronizzazione delle funzioni d'onda”.

Da un punto di vista probabilistico, il gatto ha il 50% di probabilità

di trovarsi nello stato Morto ed il 50% di trovarsi nello stato Vivo.

In termini quantistici, adottando la notazione di Dirac, indicando

lo stato del gatto con opportuni vettori ket, possiamo dire che lo

stato del gatto è il seguente:

$$\begin{aligned}
 &|\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square = \square|\square \\
 &\square\square\square\square\square\square + \square|\square\square\square\square\square\square\square\square
 \end{aligned}$$

Per le considerazioni di cui alla relazione (2.11.2) e successive,

avendo il gatto stessa probabilità di essere VIVO e MORTO

abbiamo

$$(2.12.1) \quad |\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square = \sqrt{2} (|\square\square\square\square\square\square + |\square\square\square\square\square\square\square\square)$$

2

Che rappresenta il terzo stato possibile, a seguito del principio di

sovrapposizione.

112

Volendo essere più precisi in realtà gli stati dovrebbero essere

combinati con la condizione del decadimento dell'atomo che

innesca il meccanismo di uccisione del gatto, cioè analizzando

lo stato dell'intero sistema ATOMO-GATTO.

L'atomo può trovarsi nello stato decaduto o non decaduto con

uguale probabilità, scriviamo quindi:

$$|\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square = \sqrt{2} (|\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square + |\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square)$$

2

Che combinata con la (2.4.1) e ponendo:

$$|\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square = |\square\square$$

$$|\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square = |\square\square$$

$$|\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square = |\square, \square\square$$

otteniamo

$\sqrt{2}$

$|\square, \square\square =$

$(|ADECADUTO, \square\square\square\square\square\square\square +$
 $|ANONDEC, \square\square\square\square\square\square)$

2

In definitiva gli stati possibili fino a che non si esegue la misura,

ovvero non si apre la scatola, il sistema gatto-atomo si trova in

tre sovrapposizione di stati:

ATOMO DECADUTO E GATTO
MORTO

ATOMO NON DECADUTO E GATTO
VIVO

ATOMO DECADUTO E GATTO
MORTO + ATOMO NON

DECADUTO E GATTO VIVO



“Il compito non è tanto di vedere ciò che nessun altro ha

ancora visto; ma pensare ciò che nessun altro ha ancora

pensato, riguardo a quello che chiunque vede.”

ERWIN SCHRODINGER

<https://www.frasicelebri.it/frasi-di/erwin-schrodinger/>



114

2.13 DUALITA' ONDA - PARTICELLA

La materia appare avere una duplice natura: a volte si comporta

come un'onda elettromagnetica ed altre come una particella

solida.

Questa caratteristica si esplica nel rispetto del principio di

complementarità, che così come sostenuto da Bohr, la duplice

natura del mondo subatomico non può essere osservata

contemporaneamente durante lo stesso esperimento.

Gli aspetti duali sono complementari, sia concettualmente che in

senso fisico, in quanto si escludono a vicenda: l'osservazione di

un comportamento ondulatorio in un singolo processo

sperimentale preclude un comportamento di tipo corpuscolare.

Per comprendere tale proprietà, interviene un esperimento,

definito l'esperimento più bello del mondo.

L'esperimento in questione è

denominato “della doppia

fenditura” ed è condotto in analogia a quanto eseguito dallo

scienziato britannico Thomas Young nel 1801, con la sostanziale

differenza

che

quest’ultimo

utilizzò

esclusivamente onde elettromagnetiche

(luce).

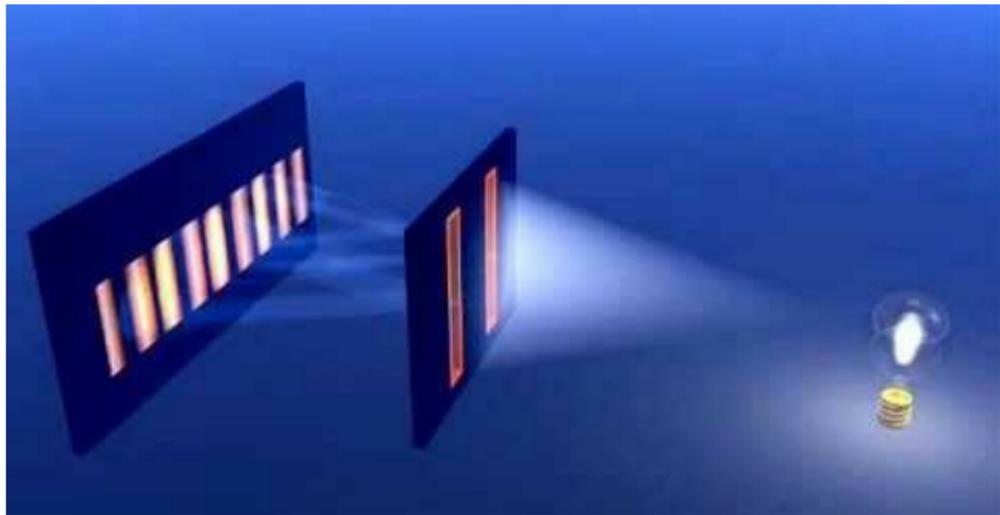
L'esperimento di Young si basa
sull'utilizzo

di una singola sorgente che illumina uno

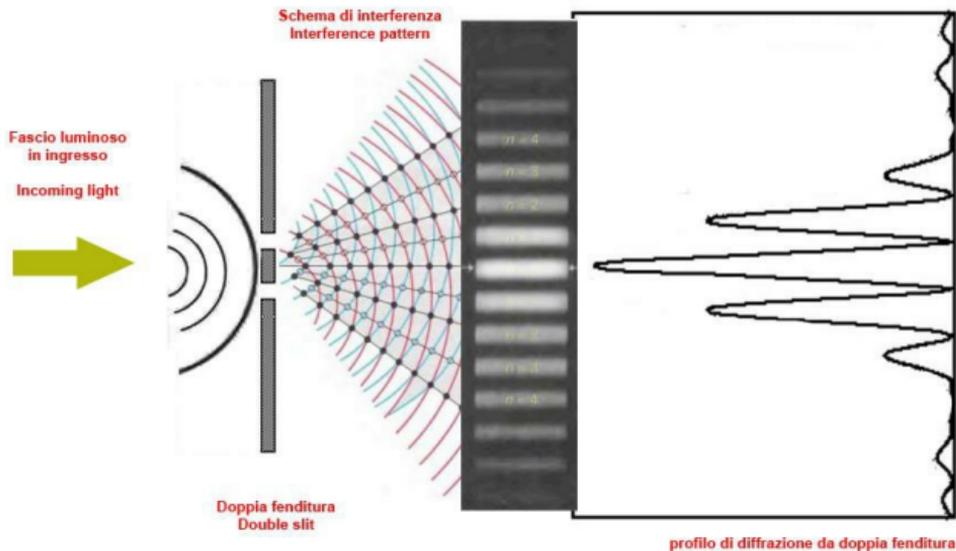
schermo opaco con due fenditure
parallele,

poste a piccola distanza e di larghezza
sufficientemente piccola

in confronto alla lunghezza d'onda della
luce incidente.



Diffrazione di Young da doppia fenditura



115

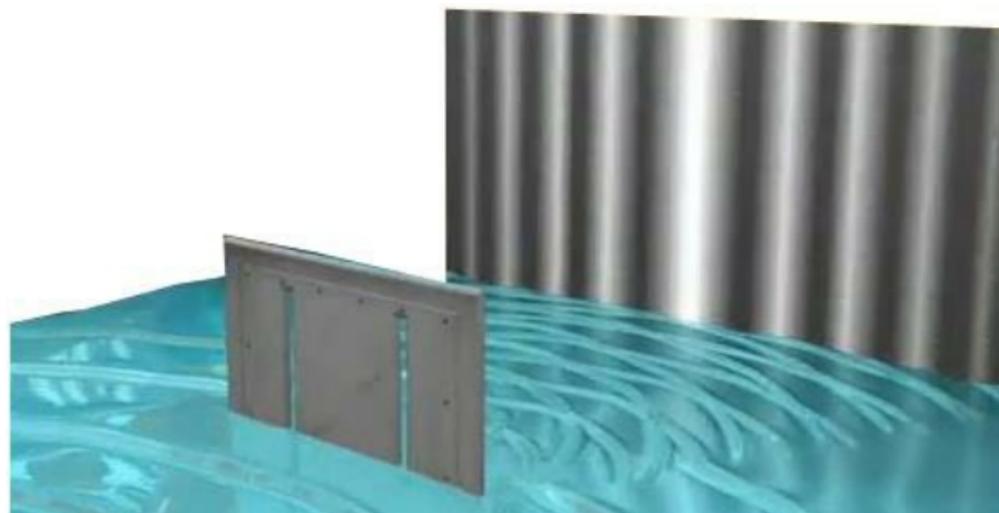
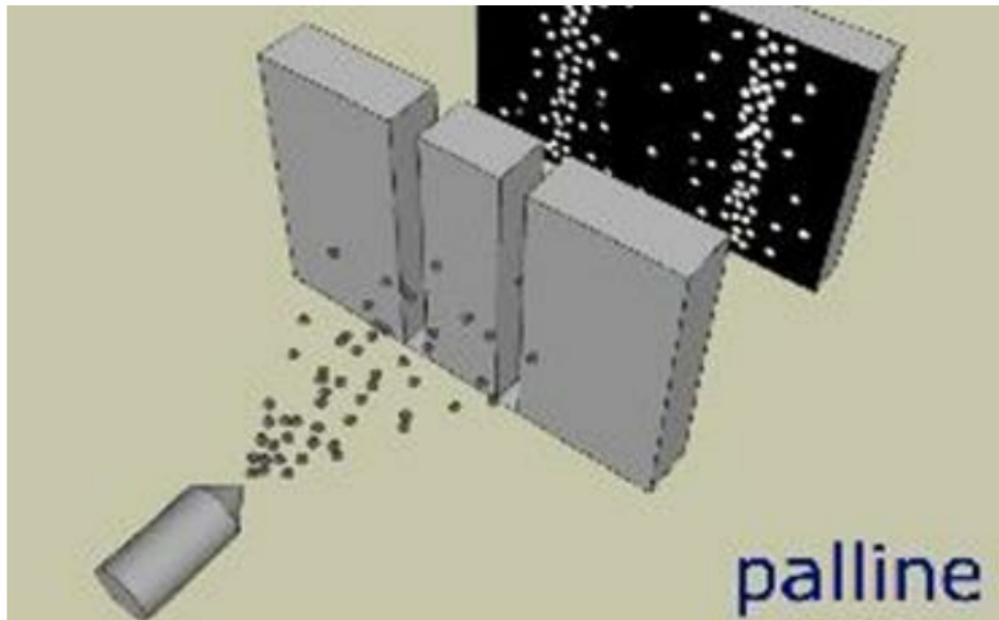
In tale situazione, per il principio di Huygens, le fenditure

diventano due sorgenti lineari di luce coerente che generano su

uno schermo posto a distanza una figura di interferenza formata

da bande alternatamente scure e luminose (punti di minimo e di massima esposizione).

Ora invece tralasciamo la luce ed effettuiamo lo stesso esperimento utilizzando materia.



Sparando palline da tennis su di uno schermo con due fenditure,

otteniamo che i punti di contatto sulla lastra di rilevazione posta

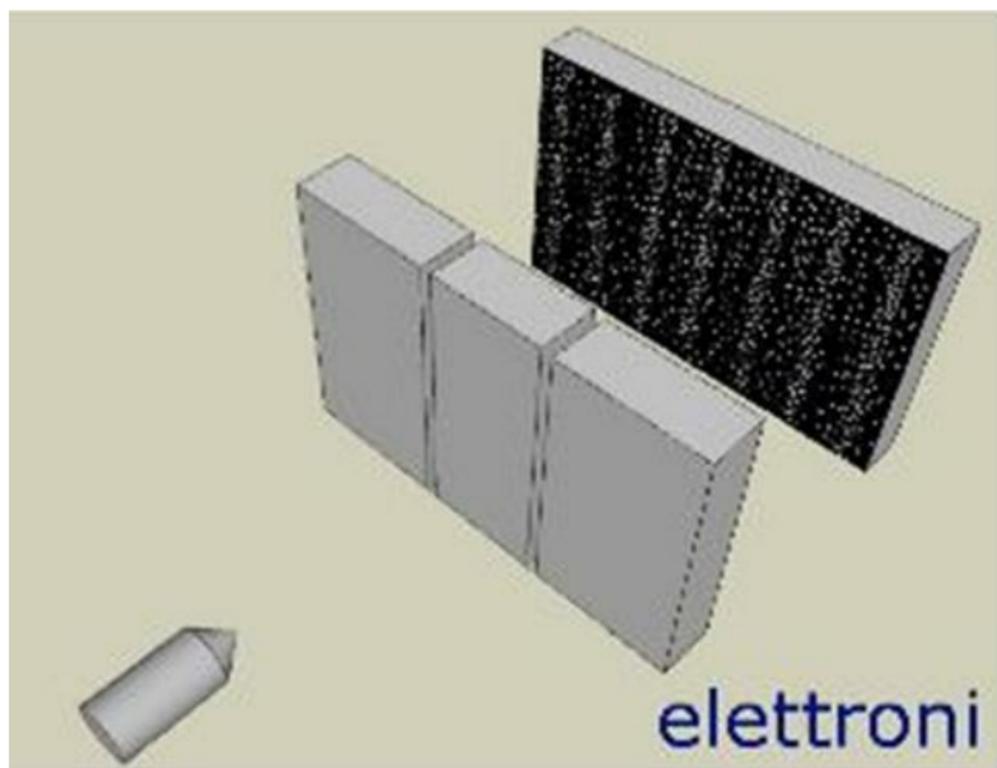
dopo lo schermo fessurato, sono maggiormente concentrati

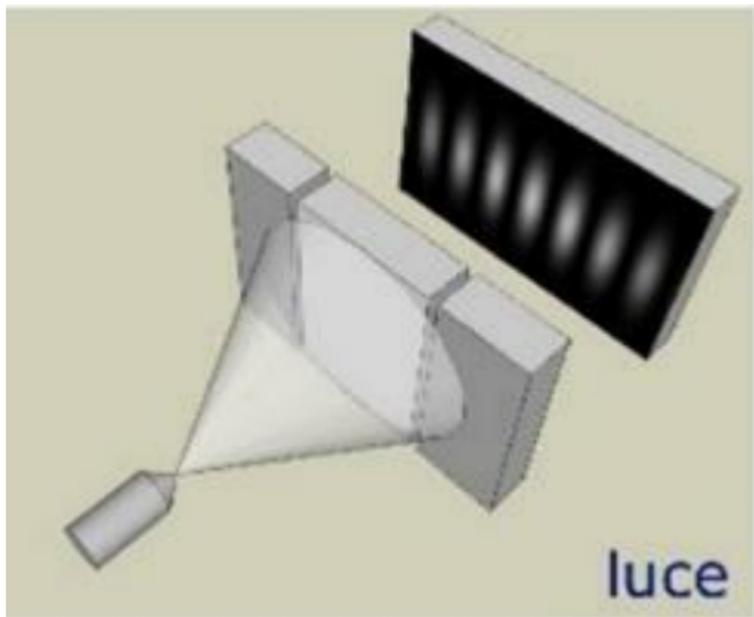
proprio in corrispondenza delle fessure.

Ripetiamo l'esperimento sostituendo la sorgente – cannone

(spara palline) con una perturbazione radiale sull'acqua, che

sappiamo produrre onde.





117

Succede che sulla lastra di rilevazione si

forma una figura di interferenza con dei

picchi e dei minimi di onda, in analogia del

comportamento della luce.

Da quanto sopra esaminato potremmo ammettere che se

l'esperimento è condotto con le onde (d'acqua o

elettromagnetiche) otteniamo delle figure di interferenza in

accordo a quanto pronosticato dalla teoria ondulatoria, se invece

l'analogo esperimento viene condotto utilizzando la materia

(palle da tennis) non si forma alcuna figura di interferenza e le

palline attraverseranno una delle due fessure con uguale

probabilità.

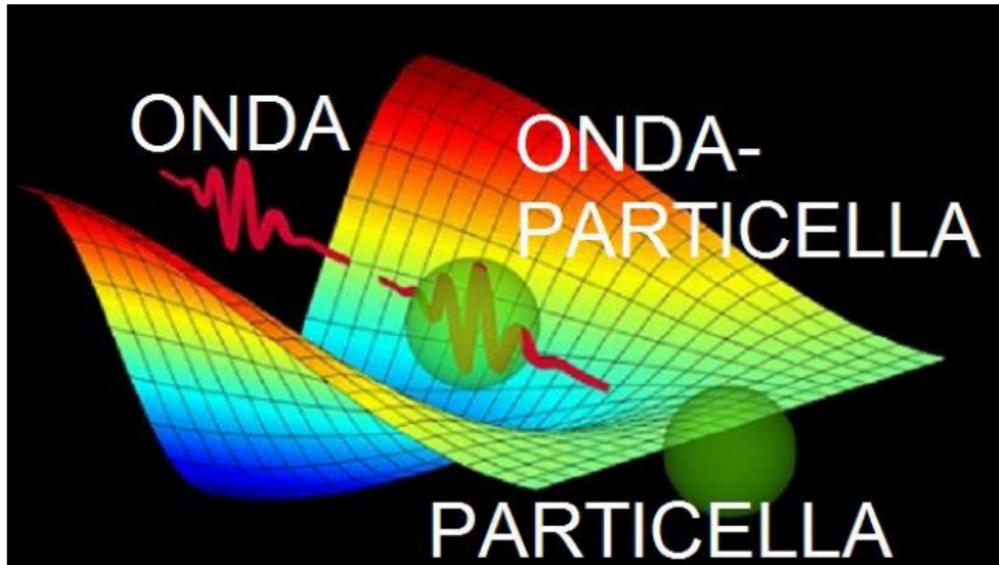
Se il comportamento della materia fosse stato così ovvia, certo

non avrei mai scritto questo libro.

Infatti, quando si passa a svolgere l'esperimento con particelle a

livello atomico, quali gli elettroni ad esempio, succede qualcosa

di diverso.



118

Come previsto teoricamente già da Einstein e De Broglie, e verificato sperimentalmente nel 1927 dai fisici Clinton Joseph Davisson e Lester Halbert Germer, quando trattiamo

l'esperimento con particelle di piccole dimensioni si ottiene una

figura di interferenza, facendo pensare ad un comportamento

ondulatorio della materia.

La particolarità del suddetto esperimento è data dal fatto che se

gli elettroni vengono "sparati" singolarmente, continua a formarsi

la figura di interferenza.

Quindi la motivazione dell'interferenza non risiede nella

interazione del fascio di elettroni tra di loro, ma diventa una

caratteristica propria della singola particella elettrone, in tali

condizioni al contorno.

Ed ancora, se si tenta di osservare il passaggio degli elettroni,

con dei rilevatori opportunamente collocati, l'effetto di

interferenza svanisce, in quanto il processo di misura provoca il

collasso della funzione d'onda che rappresenta la particella.

In definitiva la materia a volte si comporta come un'onda ed a

volte come materia, il tutto sintetizzato come PRINCIPIO DI

DUALITA' ONDA-PARTICELLA.

L'elettrone diventa quindi un'onda equivalente, rappresentato da

una propria funzione d'onda, che passa attraverso le fenditure,

nelle modalità proprie delle onde, per poi materializzarsi

nuovamente sullo schermo ricevitore a seguito del collasso della funzione d'onda.

L'esperimento, può essere interpretato quantisticamente anche

in termini di principio di sovrapposizione, come se l'elettrone

passa contemporaneamente sia dalla fessura di destra che di

sinistra, in sovrapposizione di stato.

Ecco che, se si chiude una delle due fessura, accade che l'effetto

di interferenza svanisce e gli elettroni si concentrano in

corrispondenza della fessura, proprio perché non sussiste più

una sovrapposizione di stati possibili.

Sempre in termini di sovrapposizione di stati, possiamo

descrivere il fenomeno con la nota notazione di Dirac.

Nel caso di due fessure, l'elettrone può passare in quella di

destra o di sinistra. Abbiamo quindi individuato due stati possibili

$$|\square\square\square\square\square \square\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square = \square$$

$$\square|\square\square\square + \square|\square\square\square$$

Per le considerazioni di cui alla
relazione (2.11.2) e successive,

avendo l'elettrone la stessa probabilità
di passare dalla fessura

di DESTRA (DX) che dalla fessura di
SINISTRA (SX) abbiamo

$$|\square\square\square\square\square \square\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square = \sqrt{2}$$

$$(|\square\square\square + |\square\square\square)$$

2

E quindi gli stati possibili degli elettroni
sono SINISTRA,

DESTRA E SINISTRA-DESTRA in sovrapposizione.

120

Nel caso di una sola fessura, lo stato possibile dell'elettrone si

riduce a SINISTRA e in termini di formalismo di Dirac

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|D\rangle + |S\rangle)$$

Con $|\langle\psi|\psi\rangle|^2 = 1$ che equivale ad una probabilità del 100% e quindi

alla certezza che la particella passerà dall'unica fenditura

presente.



121

COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

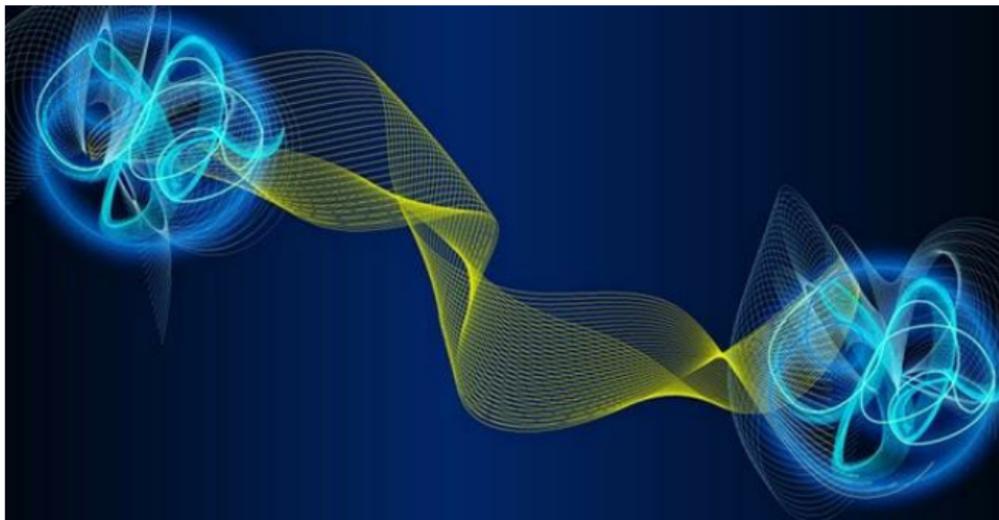
**“La matematica è lo strumento
particolarmente adatto per**

**trattare concetti astratti di ogni tipo e
non c'è limite al suo**

potere in questo campo.”

PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC

[https://www.frasicelebri.it/frasi-
di/paul-adrien-maurice-dirac/](https://www.frasicelebri.it/frasi-di/paul-adrien-maurice-dirac/)



2.14

ENTANGLEMENT QUANTISTICO

La parola Entanglement, letteralmente tradotta vuol dire

“intreccio, correlazione”.

E' un fenomeno quantistico per cui in determinate condizioni uno

stato quantistico di un sistema risulta correlato o intrecciato con

quello di un altro sistema, anche se posti a grande distanza tra

loro.

Una sorta correlazione a distanza, che però non viaggia alla

velocità della luce ma è istantanea.

Questo fenomeno della cosiddetta “azione fantasma a distanza

istantanea” è in completa contraddizione con la teoria della

relatività ristretta di Einstein che prevede come velocità massima

raggiungibile quella della luce.

Einstein sosteneva che se veramente la fisica quantistica fosse

stata corretta, allora il mondo dovrebbe essere stato pazzo.

Einstein perseguiva l'idea dell'esistenza di variabili nascoste,

non conosciute, attraverso le quali si sarebbe potuto spiegare in

123

maniera "causale" il comportamento dei fenomeni quantistici, e

trattare anche la fisica quantistica con un carattere

deterministico, in analogia alla fisica classica, in sostituzione di

quello probabilistico in uso dalla scuola di Copenaghen.

In particolare contro l'esistenza dell'azione a distanza

istantanea, Einstein insieme agli scienziati Boris Podolsky e

Nathan Rosen, formularono il famoso paradosso EPR.

Con tale esperimento mentale si voleva sostenere la validità del

principio di località, ovvero che oggetti

opportunamente distanti

non possono avere influenza istantanea l'uno sull'altro.

L'esperimento consiste nel considerare due particelle che dopo

aver interagito tra di loro si allontanano in senso opposto con una

elevata ma uguale ed opposta quantità di moto. Quando le due

particelle si trovano abbastanza lontane affinché non possano

più trasmettersi informazioni alla velocità della luce, considerata

l'elevata quantità di moto, due rispettivi osservatori effettuano

delle misure. Un osservatore misura la quantità di moto della

prima particella e l'altro misura la posizione della seconda

particella. Considerato che le particelle hanno stessa quantità di

moto in direzione opposta, scaturisce che la conoscenza della

variabile posizione o quantità di moto di una particella implica la

conoscenza della stessa variabile per

l'altra particella. Di

conseguenza, le variabili, posizione e quantità di moto, risultano

conosciute per entrambe le particelle, quindi per il sistema di

particelle, con estrema precisione, paradossalmente in completo

contrasto con quanto affermato dal principio di indeterminazione

di Heisenberg. La conseguenza è che i principi della meccanica

quantistica non possono essere validi.



124

Purtroppo, sebbene Einstein non ha mai accettato l'esistenza di

tale azione istantanea, ha avuto torto e quindi il mondo si è

dimostrato veramente essere pazzo.

Infatti il fenomeno dell'entanglement è stato ampiamente

verificato sperimentalmente.

La prima verifica sperimentale fu eseguita,

per esclusione probabilistica, nel 1982 dal

fisico francese Alain Aspect, poi ne seguirono

molte altre.

Aspect studiando le proprietà di due fotoni

posti in correlazione tra loro,
opportunamente

separati e lanciati in direzioni opposte,

dimostrò la violazione delle
disuguaglianze di Bell, così

verificando

con

altissima

probabilità

il

fenomeno

dell'entanglement quantistico.

Con lo stesso esperimento stabilì
l'esclusione dell'esistenza di

eventuali variabili nascoste di carattere
locale, che potessero

mettere in dubbio il comportamento
quantistico dei due fotoni.

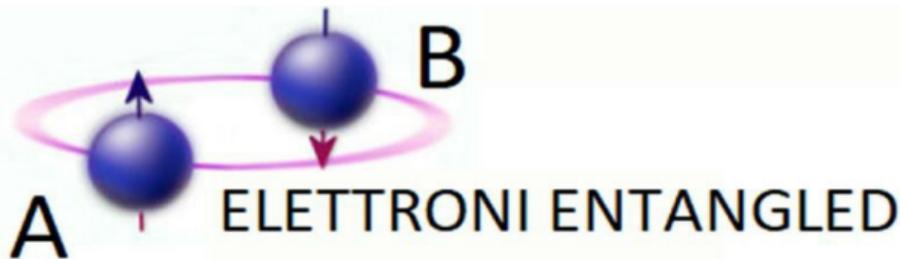
Si ricorda che il principio di località
afferma che oggetti distanti

non possono avere influenza istantanea
l'uno sull'altro.

Il teorema di Bell, nella sua forma più
semplice, afferma che

“Nessuna teoria fisica a variabili locali nascoste può riprodurre le predizioni della meccanica quantistica” .

Quando vengono violate le disuguaglianze di Bell, allora anche una eventuale teoria a variabili nascoste dovrà essere necessariamente non locale, tali da permettere lo scambio di informazioni istantanee.



125

In definitiva, resta confermato che il mondo dei quanti si

comporta al di sopra di ogni prospettiva convenzionale, che

principalmente

si

manifesta

attraverso

l'esistenza

dell'entanglement.

Nonostante sia stata dimostrata

l'esistenza di scambio di

informazioni istantanee per particelle
microscopiche dell'ordine

quantistico, la Relatività ristretta rimane
abbondantemente

valida per i corpi macroscopici.

Vediamo meglio di comprendere cosa è
l'Entanglement

quantistico, con degli esempi
esplicativi.

Supponiamo di avere due elettroni A e B
aventi gli stati

quantistici di SPIN inizialmente tra loro
correlati, intrecciati

(appunto "Entangled").

L'elettrone A avrà inizialmente spin UP
e l'elettrone B avrà spin

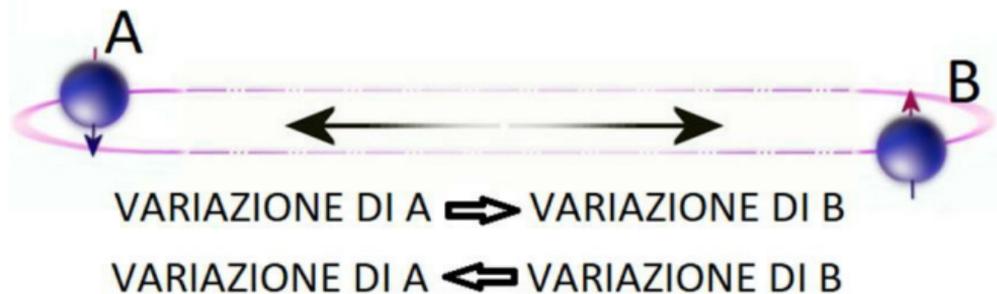
DOWN.

Se questi vengono allontanati e posti a grande distanza tra di

loro,

eseguendo una modifica dello stato quantistico di A (ad es.

variando lo spin da UP a DOWN) succede che istantaneamente





126

si ha un effetto sullo stato quantistico della particella B ed in

particolare l'elettrone B passa da uno stato di spin DOWN a spin

UP, nel rispetto del principio di esclusione del Pauli.

Tale caratteristica quantistica è
fondamentale negli studi dei

computer quantistici e del teletrasporto.

Il teletrasporto è sempre stato
ampiamente utilizzato nei svariati

film di fantascienza, in particolare
nell'universo fantascientifico di

Star Trek.

Ognuno di noi ha sempre immaginato di
essere teletrasportato

da un luogo ad un altro.

Nel 1993, un gruppo di fisici teorici

affrontando gli argomenti

dell'entanglement e non-località si
resero conto che una coppia

di particelle entangled poteva essere
usata per teletrasportare

uno stato quantistico da una posizione a
un'altra posizione

127

distante, in modo istantaneo ed anche se
il mittente non

conosceva lo stato quantistico o la
posizione del ricevente,

coniando il termine in "teletrasporto
quantistico"

Nell 1997, quattro anni appena dopo la
scoperta teorica, due

gruppi riuscirono nell'impresa del
teletrasporto quantistico. Il

primo fu quello di Danilo Boschi, allora
all'Università "La

Sapienza" di Roma, e colleghi, seguito
solo pochi mesi dopo dal

gruppo di Bouwmeester, in Austria,
anche se quest'ultimo

gruppo pubblicò la scoperta per primo.

Nel 2017 è stato dimostrato il teletrasporto quantistico tra un

satellite e una stazione terrestre in Cina, su distanze fino a 1200

chilometri.

Non bisogna confondere però il teletrasporto come trasporto di

materia, ma va inteso come trasporto di stati quantistici, per ora

con riferimento a particelle elementari ed al massimo atomi.

Considerato, però, che la materia è costituita da particelle

elementari non è precluso che in un futuro non molto lontano il

trasporto di materia potrebbe diventare realtà.

E' chiaro come l'entanglement sia utile per i computer quantistici,

principalmente per la caratteristica di avere eliminato il vincolo di

trasferimento delle informazioni all'interno dei circuiti alla velocità

della luce.

I computer quantistici, oltre che le proprietà di entanglement

sfruttano anche il principio di sovrapposizione, attraverso il quale

viene introdotto il concetto di QBIT (QUANTUM BIT) in

sostituzione dei BIT nei computer classici.

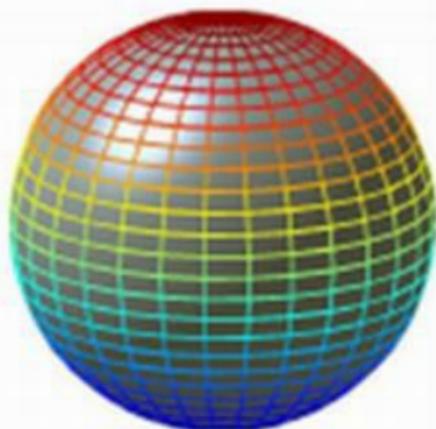
Bit
0



1

Stati: 0 o 1

Qubit
0



1

$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

128

In un circuito classico le informazioni vengono trasmesse

attraverso BIT che possono assumere solo valori pari a 0 oppure

1, equivalente a SPENTO e ACCESO.

In termini quantistici lo stato di una particella, può essere oltre

che ACCESO e SPENTO anche in sovrapposizione ACCESO-

SPENTO.

Con il formalismo di Dirac

$$|\square\square\square\square\square\square\square\square\square\square = \square|\square\square\square\square\square\square\square\square + \square|\square\square\square\square\square\square\square\square$$

$$|0 - 1\square = \square|0\square + \square|1\square$$

Quindi le combinazioni possibili diventano infinite.

E' a partire dagli anni '80 che gli scienziati si cimentano nello

sviluppo del computer quantistico (o computer quantico), un

super elaboratore che sfrutta le leggi della fisica e della

meccanica quantistica per superare le barriere dei super-

computer di oggi e aprire nuovi orizzonti per [l'Intelligenza](#)

[Artificiale.](#)

Attualmente sono già disponibili Computer Quantistici basati su

pochi QUBIT e si potrebbero comunque arrivare al massimo

entro un decennio alla commercializzazione di veri e propri CQ,

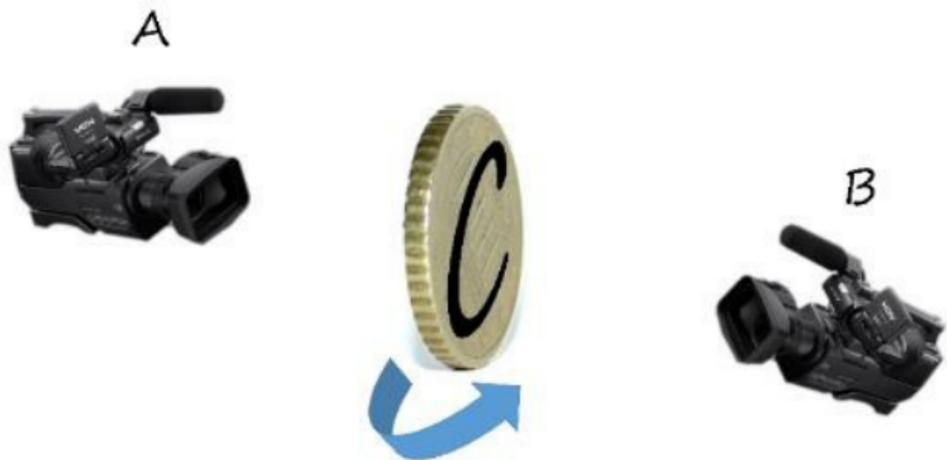
considerato che sono in corso sperimentazioni e ricerche da

A



B





129

parte di IBM, Google, Microsoft, Intel,
centri ricerche del MIT e

di Harvard.

L'analogia che segue potrebbe far
meglio comprendere il

fenomeno dell'entanglement da un punto di vista strettamente

qualitativo.

Immaginiamo di avere una moneta e due telecamere che

puntano rispettivamente le due facce.

La camera A osserverà la faccia denominata Croce, mentre la

camera B osserverà l'altra faccia denominata Testa.

Ora ruotiamo di 180° la moneta, in modo che la faccia Croce si

rivolta verso B e la faccia Testa verso A

Ogni volta che A cambia stato, da testa
passa a Croce, come

conseguenza anche B cambia
istantaneamente stato e passa da

Croce a Testa.

Abbiamo così ottenuto un trasferimento
istantaneo di

informazione intrecciata o meglio
Entangled.



130

COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

“Nella scienza uno prova a dire alla gente, in un modo che sia compreso da tutti, qualcosa che nessuno conosceva

**prima. Ma nella poesia, è l'esatto
opposto.”**

PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC

[https://www.frasicelebri.it/frasi-
di/paul-adrien-maurice-dirac/](https://www.frasicelebri.it/frasi-di/paul-adrien-maurice-dirac/)

131

2.15 ALTRE INTERPRETAZIONI E TEORIE

E' utile ricordare che vi sono altre numerose interpretazioni e

teorie della meccanica quantistica, delle
nel seguito si darà solo

breve cenno alle più note.

L'interpretazione a molti mondi, è stata
proposta da Hugh

Everett III nel 1957 ("Many Worlds
Interpretation") e considera la

funzione d'onda come ontologicamente reale, negandone il

collasso. Ogni possibilità descritta dall'equazione di Schrödinger

esiste in una sua specifica realtà.

Quando mettiamo il gatto nella

scatola l'universo si divide in due: un universo che contiene un

gatto morto ed uno che ne contiene uno vivo. Tutto questo

implica un numero pressoché infinito di mondi paralleli meglio

definiti come multiversi.

La Teorie delle stringhe e delle superstringhe, sono teorie

ancora in fase di sviluppo indirizzate all'unificazione della

meccanica quantistica con la relatività generale (gravità), al fine

della costituzione di una teoria del tutto. In tale teoria i costituenti

fondamentali sono delle stringhe (vibranti) ad una dimensione,

in sostituzione di particelle puntiformi della precedente teoria.

L'interpretazione

transazionale,

abbreviata

TIQM

dalla

definizione inglese transactional
interpretation of quantum

mechanics, è stata presentata nel 1986
dal fisico John

Cramer dell'Università di Washington.
Si basa su di

un'evoluzione dell'equazione d'onda di Schrödinger che prende

in considerazione i principi della teoria della relatività (equazione

132

di Klein-Gordon). Questa equazione contiene due soluzioni

descriventi due onde: una soluzione che descrive il flusso di

energia dal passato al futuro, onde ritardate, e una soluzione che

descrive il flusso di energia dal futuro al passato, onde

anticipate.

La transazione tra onde ritardate,
provenienti dal passato, e

onde anticipate, provenienti dal futuro,
dà luogo alla nota dualità

onda/particella. La proprietà delle onde
è conseguenza

dell'interferenza delle onde ritardate e
anticipate e la proprietà

della particella è dovuta alla
localizzazione della transazione.

L'interpretazione statistica è
un'estensione dell'interpretazione

probabilistica di Max Born della
funzione d'onda. La funzione

d'onda non viene considerata un'entità
reale e viene negata

l'applicazione ad un sistema singolo,
come un fotone o una

particella,

mentre

viene

imposto

che

essa

descrive

semplicemente il comportamento
statistico di un insieme di

sistemi, allo stesso modo in cui le leggi
probabilistiche

descrivono il comportamento delle
molecole di un gas nel suo

insieme. I misteri dei quanti vengono
equiparati ai "misteri"

relativi ai numeri che potrebbero uscire
da un lancio di dadi. Il

dualismo onda/particella non esiste
proprio in questa

interpretazione.

Teorie delle variabili nascoste, prevede
che la meccanica

quantistica sia una teoria incompleta,
mentre il comportamento

della materia resta di tipo deterministico
e la sua natura appare

indeterminata esclusivamente per la
mancata conoscenza di

variabili nascoste. Albert Einstein fu il
più grande sostenitore di

tale

teoria.

Ma

come

abbiamo

visto

la

teorie

a

variabili locali nascoste risulta
incompatibili con i risultati dei

numerosi esperimenti

sulle

disuguaglianze

di

Bell appositamente effettuati,
scaturendone che la meccanica

quantistica conserverebbe il proprio
carattere di non-località.

L'interpretazione di de Broglie-Bohm,
("Guide Wave

Interpretation") fu proposta
originariamente da Louis de

Broglie e poi migliorata e sostenuta da
David Bohm. Fa parte del

gruppo detto "a variabili nascoste".
Secondo questa teoria ad

ogni tipo di particella è associata
un'onda ("onda pilota") che

guida il moto della particella.

L'onda pilota è ben reale e permea tutto
l'universo,

costituendone l'ordine implicato (non manifesto), che Bohm

considera avere una struttura ologrammica, in quanto lo schema

globale è riprodotto in ogni sua singola parte. Quello che noi

possiamo osservare è solo l'ordine esplicito, che risulta

dall'elaborazione che il nostro cervello effettua delle onde di

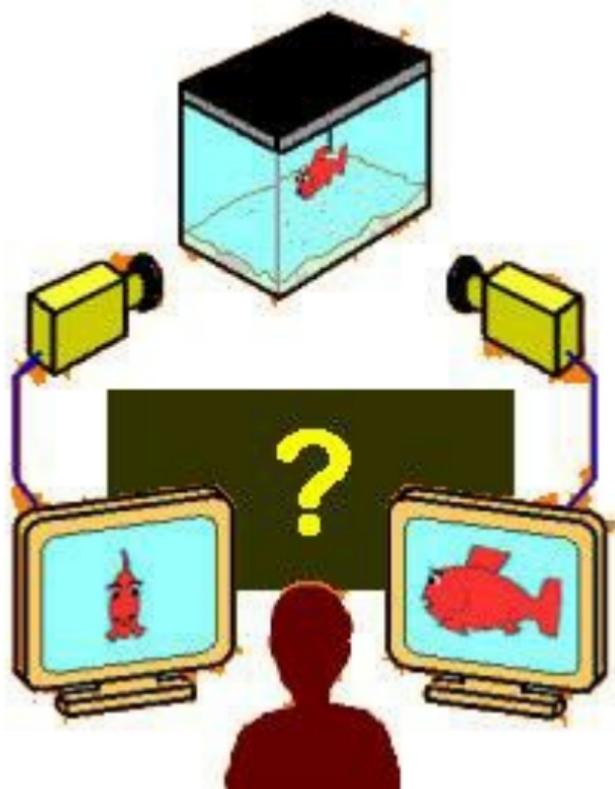
interferenza. Poiché Bohm riteneva che l'universo fosse un

sistema dinamico (mentre il termine

ologramma rimanda di solito

ad un'immagine statica), utilizzò il termine "Olomovimento" per

descrivere la natura del cosmo.



Nello spiegare il processo di entanglement, Bohm afferma che le

due particelle che noi vediamo come distinte ma interconnesse

sono una cosa sola ad un livello di realtà più profondo. Se due

telecamere differenti riprendessero lo

stesso pesce in un acquario, infatti, noi

potremmo avere la percezione di

vedere

due

pesci

stranamente

interconnessi

tra

loro.

Ogni

cambiamento nei movimenti dei due

pesci, infatti, sarebbe sincrono. Ciò

che nei due televisori (ordine esplicito)

sembra diviso, noi sappiamo trattarsi di un'unica entità

nell'acquario (ordine implicato). Allo stesso modo le due

particelle entangled costituirebbero un'unità su un piano di realtà

più fondamentale di quello che i nostri sensi percepiscono.

L'interpretazione a storie consistenti e teoria di Ghirardi-Rimini-

Weber,

E'

una

cosiddetta "teoria

oggettiva

del

collasso" e introduce l'idea che la
funzione d'onda collassi

spontaneamente, senza alcun intervento
di misura esterno. Il

gatto di Schrödinger è vivo e morto solo
per una brevissima

frazione di secondo e poi assume uno
dei due stati in modo

casuale.

L'interpretazione di Berkeley, si basa sul concetto che la causa

di tutte le nostre percezioni non è una realtà materiale esterna,

ma una volontà o spirito, che si identificava con il Dio cristiano;

come il sogno è generato dalla nostra mente, l'universo è una

135

sorta di sogno collettivo suscitato da Dio nelle nostre anime. La

realtà fisica non è considerata come qualcosa di esistente

oggettivamente in sé e per sé, ma solo come una teoria

matematica esistente come concetto nella mente di Dio e

proiettata da Dio nelle nostre menti attraverso le immagini

sensoriali che percepiamo; dunque tanto la funzione d'onda

quanto il suo collasso, sono reali solo in quanto rappresentano

le modalità con cui Dio concepisce

l'universo e suscita in noi le

nostre impressioni sensoriali. Questa interpretazione non ha

alcun supporto scientifico dunque è esclusivamente di

tipo metafisico.



136

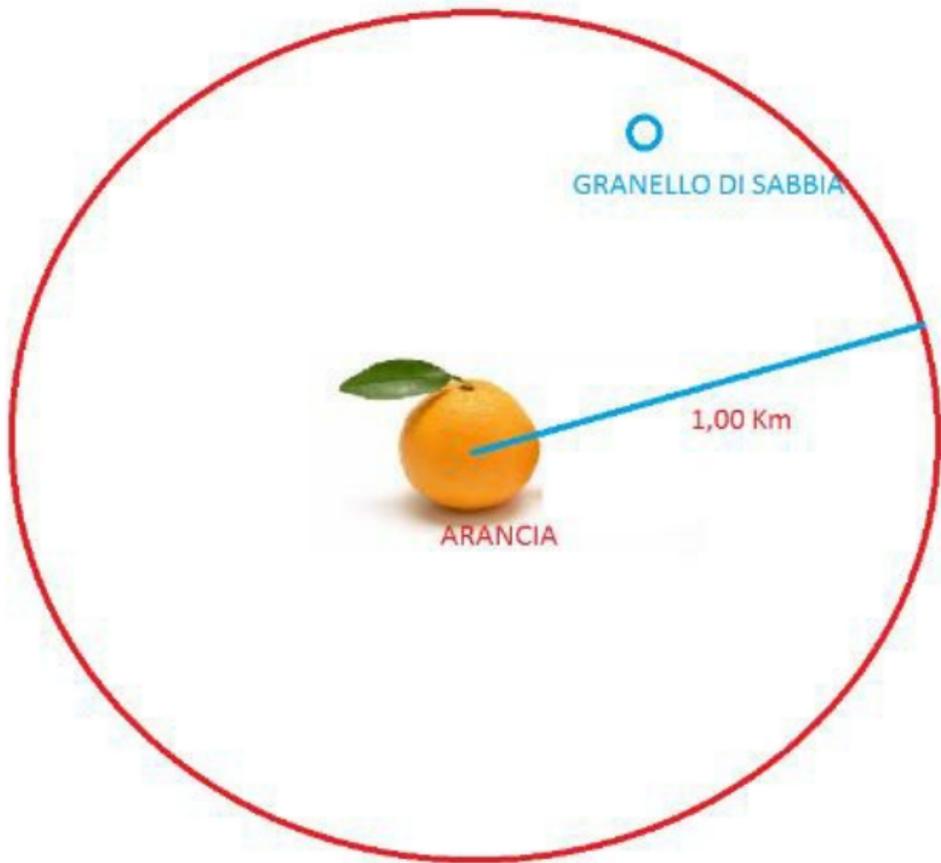
COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

“Questo non è giusto. Questo non è neppure sbagliato.”

Wolfgang Pauli, leggendo un documento di un giovane fisico

WOLFGANG ERNST PAULI

<https://www.frasicelebri.it/frasi-di/wolfgang-ernst-pauli/>



137

3 L'ATOMO

3.1 LE DIMENSIONI

DELL'ATOMO

Il modello atomico quantistico, secondo il modello standard,

prevede un nucleo centrale costituito da neutroni e protoni,

rispettivamente a carica elettrica neutra e positiva, circondato da

una nuvola di probabilità occupata da elettroni, a carica negativa,

confinati in apposite porzioni spaziali, definiti orbitali.

E' interessante notare che nelle proporzioni degli elementi

costituenti l'atomo, se il nucleo fosse grande come un'arancia

allora l'elettrone sarebbe grande come un granello di sabbia, ed

il raggio dell'atomo sarebbe pari a circa 1,00 km.

Questo porta alla considerazione che l'atomo è costituito

principalmente, per circa il 99%, dal "vuoto", poi da un piccolo

nucleo dove risulta concentrata quasi tutta la massa atomica, ed

infine troviamo dei minuscoli elettroni.

Di conseguenza risulta che noi siamo costituiti principalmente da

“vuoto” per circa il 99%.

138

Visto che il nostro corpo è costituito principalmente da vuoto,

come mai non riusciamo ad attraversare componenti opachi,

quali pareti murarie?

La motivazione risiede nel fatto che il vuoto, di cui è costituito

l'atomo, non è affatto sterile, ma è

animato dalla danza

quantistica degli elettroni negli spazi orbitali, dove grazie al

principio di esclusione del Pauli, due atomi non possono

arbitrariamente compenetrarsi.

Il principio di esclusione di Pauli afferma che due elettroni non

possono coesistere allo stesso livello energetico e nello stesso

orbitale, con lo stesso numero quantico secondario di spin;

considerato che i valori di spin
secondario possibili per l'elettrone

sono solo due: $+1/2$ e $-1/2$, uno stesso
orbitale energetico può al

massimo contenere due elettroni a spin
opposto e quindi gli

orbitali di atomi vicini non possono
compenetrarsi se non nel

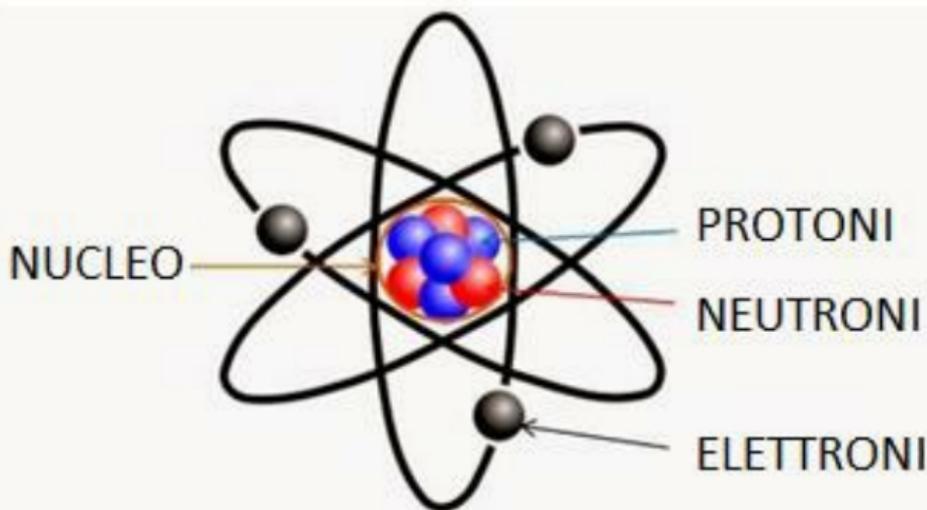
limite imposto.

Le particolari caratteristiche dell'atomo
quantistico, ampiamente

illustrate nei paragrafi precedenti,
evidenziano tutte le proprietà

che creano la distinzione dai ben lontani concetti della fisica

classica, ed esaltano la natura casuale e bizzarra dell'atomo.





139

3.2 IL NUCLEO E GLI ISOTOPI

Il nucleo costituisce la parte centrale

dell'atomo, dove è

concentrata la maggior parte della massa dello stesso atomo, in

considerazione dell'esiguo valore della massa dell'elettrone.

Inizialmente si pensava che il nucleo fosse costituito

esclusivamente da massa carica positivamente, che bilanciava

la carica degli elettroni orbitanti.

Ma in tale condizione i calcoli non tornavano, dato che il peso

atomico teorico risultava essere inferiore al peso atomico

effettivo.

Con la scoperta del Neutrone nel 1932, ad

opera del fisico inglese James Chadwick,

venne risolto il problema della differenza di

massa sopra evidenziata.

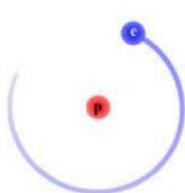
Veniva così definita la configurazione del

nucleo, costituito da Protoni, aventi carica

positiva, e Neutroni, aventi carica neutra.

Si precisa che la raffigurazione dell'atomo come nella figura

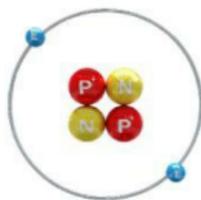
precedente è esclusivamente di carattere figurativo, ricordando



Idrogeno

H

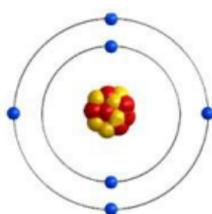
1 PROTONE (+)
0 NEUTRONI
1 ELETTRONE (-)



Elio

He

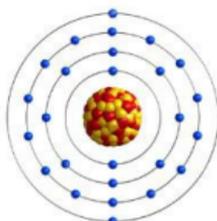
2 PROTONE (+)
2 NEUTRONI
2 ELETTRONE (-)



Carbonio

C

6 PROTONE (+)
6 NEUTRONI
6 ELETTRONE (-)



Ferro

Fe

26 PROTONE (+)
30 NEUTRONI
26 ELETTRONE (-)

che gli elettroni non orbitano intorno al nucleo, bensì danzano

negli orbitali quantistici.

In definitiva i neutroni sono particelle che intervengono nella

definizione della massa di un atomo, ma sono ininfluenti in

termini di carica e numero di elettroni.

Un elemento chimico è tanto più pesante quanti più protoni e

neutroni contiene il proprio nucleo

atomico.

Difatti, l'idrogeno avendo solo un elettrone ed un protone è un

elemento leggero. Lievemente più pesante, ma comunque

leggero risulta l'Elio costituito da due protoni, due neutroni e due

elettroni, diversamente dal Carbonio che risulta essere molto più

pesante e costituito da sei protoni, sei neutroni e sei elettroni. Ed

ancora il Ferro, evidentemente il più pesante degli elementi

precedenti costituito da ventisei protoni, trenta neutroni e

ventisei elettroni. E così via.

Un stesso elemento chimico può avere atomi costituiti da un

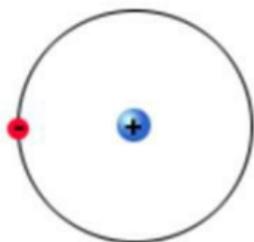
numero diverso di Neutroni, a parità del numero di elettroni e

protoni. In tali condizioni l'elemento così distinto viene chiamato

ISOTOPO.

Gli isotopi sono posti alla base degli studi sulla radioattività.

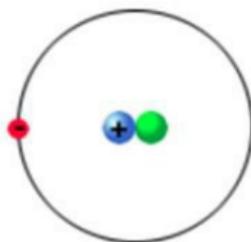
0 NEUTRONI



¹₁H

IDROGENO COMUNE

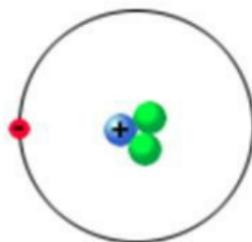
1 NEUTRONE



²₁H

DEUTERIO O
IDROGENO PESANTE

2 NEUTRONI



³₁H

TRIZIO

141

Esaminiamo il caso dell'idrogeno,
primo elemento della tabella

periodica.

L'idrogeno, ad esempio, può avere tre
tipi di Isotopi: Idrogeno

comune senza la presenza di neutroni,
Idrogeno pesante o

Deuterio con 1 neutrone ed infine Trizio
con 2 neutroni.

Si noti come il numero di protoni e di
elettroni restano gli stessi

e di conseguenza anche la carica totale
resta comunque e

sempre neutra.

Il numero neutroni sommato al numero di
protoni rappresenta il

“numero di massa atomica”.

$n_{\text{massa atomica}} = n_n + n_p$

Invece il numero di protoni, che per la neutralità dell'atomo,

saranno uguali al numero di elettroni, rappresentano il “numero

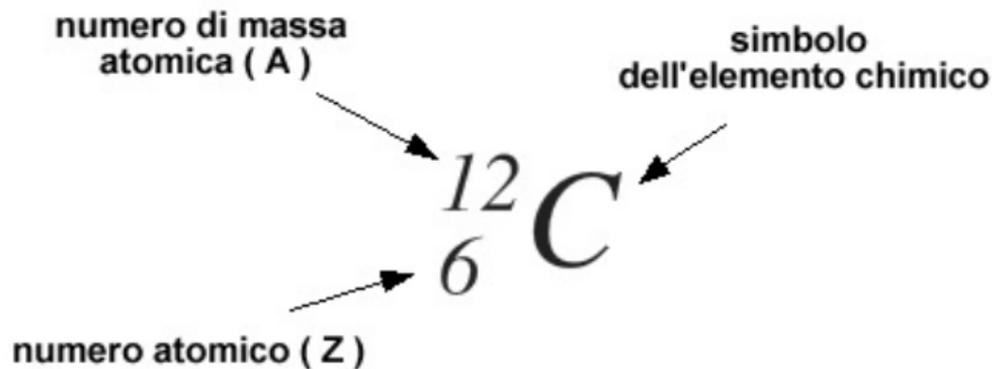
atomico”.

$n_{\text{atomico}} = n_p = n_e$

Gli isotopi di uno stesso elemento avranno, quindi, lo stesso

numero atomico ma differente numero di massa atomica, a

causa del numero differente di neutroni.



142

Gli isotopi dell'idrogeno possono essere riassunti dalla tabella

che segue:

ISOTOPO

n massa atomica = A

n atomico = Z

Idrogeno comune

1

1

Deuterio

2

1

Trizio

3

1

Un elemento chimico viene solitamente

identificato da due

numeri posti prima della lettera
identificativa in basso ed in alto.

Il numero in alto rappresenta in numero
di massa atomica che

contraddistingue l'isotopo, il numero in
basso rappresenta il

numero atomico che contraddistingue
l'elemento chimico.

143

4. RADIOATTIVITÀ

4.1 RADIOATTIVITÀ NATURALE

ED ARTIFICIALE

La radioattività è una caratteristica relativa ad atomi con elevato

numero atomico attraverso il decadimento di nuclei instabili.

Quando un nucleo presenta un numero elevato di protoni

succede che la forza di repulsione coulombiana di natura

elettromagnetica e di tipo debole, prevale sulle forze nucleari di

tipo forte, e nella ricerca di un equilibrio il nucleo emette delle

particelle che prendono il nome di “radiazione nucleare”.

Il nucleo quindi subisce un “decadimento” ovvero una

trasformazione del nucleo originario attraverso emissione di

radiazione.

E come se all'interno del nucleo la presenza di troppi protoni non

fosse gradita.

Il fenomeno della radioattività può essere di tipo naturale o

artificiale.

La radioattività naturale è una caratteristica propria di alcuni

elementi di essere instabili e decadere in un determinato tempo,

più o meno lungo.

La

radioattività

artificiale

avviene

attraverso

processi

appositamente indotti su alcuni elementi aventi già determinate

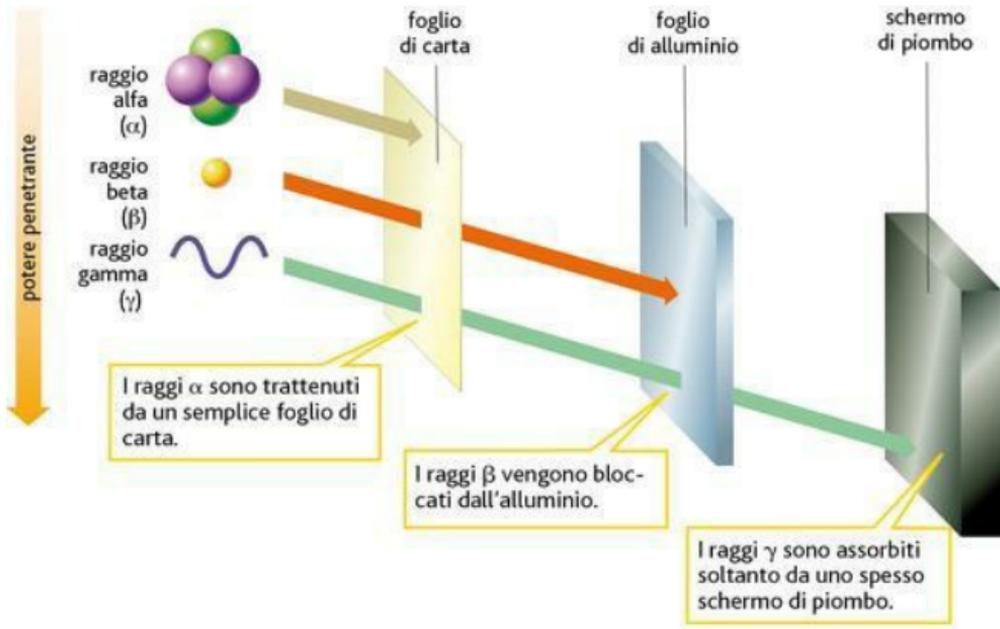
caratteristiche radioattive.

Le radiazioni scaturenti dal fenomeno della radioattività sono

denominate raggi alfa (a), raggi beta (b), raggi gamma (g).

Sebbene presentano la denominazione di raggi, in realtà sono

delle particelle.



144

I raggi α sono costituiti da nuclei di Elio (2 Protoni + 2 Neutroni),

quindi presentano una carica di tipo neutro e possono essere

ostacolati o trattenuti semplicemente da

un foglio di carta.

I raggi β sono costituiti esclusivamente da un elettrone ($1 e^-$),

quindi possiedono una carica negativa e possono essere

bloccati da un foglio di alluminio.

I raggi γ sono costituiti da radiazione elettromagnetica ovvero

Fotoni. Tali fotoni a causa delle elevate energie atomiche in

gioco, presentano un elevato valore di frequenza, in virtù della

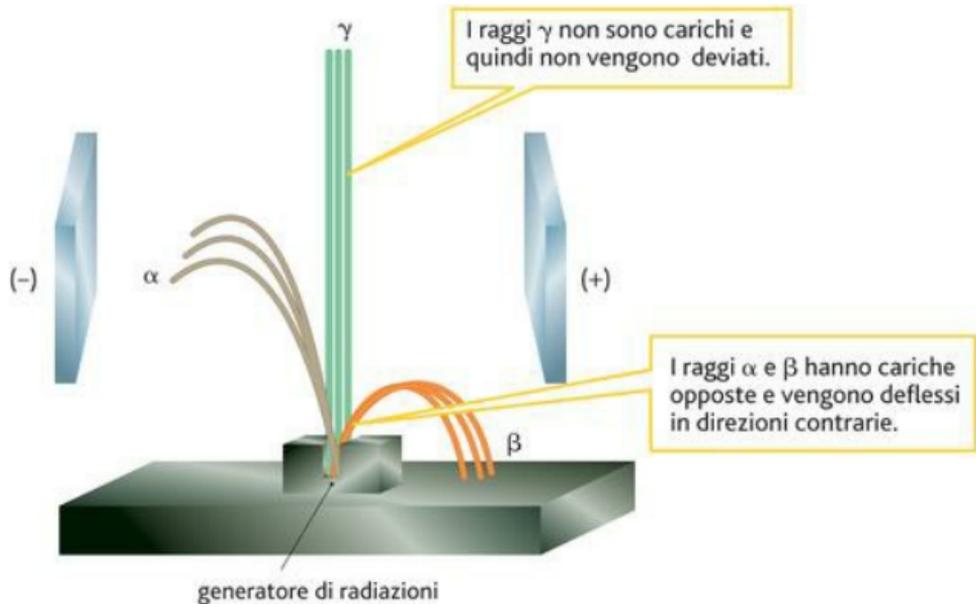
proporzionalità dell'energia con la
frequenza, data dalla nota

equivalenza di Planck $E = h \nu$.

Per tale motivo le radiazioni γ sono le
più penetranti e

pericolose, tanto che per trattenerle è
necessario interporre una

schermatura di piombo.



145

I tre tipi di radiazione sono facilmente separabili, se posti all'interno di un campo elettrico. In tale situazione i raggi γ , essendo privi di carica, in quanto

costituiti da Fotoni (radiazione

elettromagnetica), proseguono
indisturbati, i raggi a devieranno

verso il polo negativo ed infine i raggi b
devieranno verso il polo

positivo.

Una misura importante del decadimento
radioattivo è

rappresentata dal tempo di
dimezzamento o emivita, che è una

misura di tipo probabilistico indicante il
tempo necessario

affinché la metà dei nuclei atomici decadono in altri nuclei

atomici.

I tempi di decadimento e la tipologia di decadimento varia con il

tipo di elemento di partenza e di isotopo.

In natura la maggior parte degli elementi presentano nuclei

stabili o con tempi di decadimento abbastanza lunghi e questo è

il caso degli atomi leggeri (Elio, Idrogeno, Ossigeno, etc..), tant'è

che tali elementi in natura sono stabili.

URANIO 238 (U238) DECADIMENTO RADIOATTIVO

tipo di radiazione	nuclide	tempo di dimezzamento
α	 uranio-238	4.47 miliardi anni
	↓	
β	 torio-234	24.1 giorni
	↓	
β	 protattinio-234m	1.17 minuti
	↓	
α	 uranio-234	245000 anni
	↓	
α	 torio-230	75200 anni
	↓	
α	 radio-226	1600 anni
	↓	
α	 radon-222 (*)	3.823 giorni
	↓	
α	 polonio-218	3.05 minuti
	↓	
β	 piombo-214	26.8 minuti
	↓	
β	 bismuto-214	19.7 minuti
	↓	
α	 polonio-214	0.000164 secondi
	↓	
β	 piombo-210	22.3 anni
	↓	
β	 bismuto-210	5.01 giorni
	↓	
α	 polonio-210	138.4 giorni
	↓	
	 piombo-206	stabile

Invece, elementi aventi nuclei pesanti, quali Uranio, Radio,

Radon, etc, in natura sono instabili e decadono naturalmente in

elementi aventi nuclei più leggeri.

Consideriamo ad esempio il

decadimento

dell'isotopo

dell'Uranio tipo 238.

Inizialmente

l'Uranio-238

presenta un numero di massa
pari a 238, ovvero un numero
complessivo di neutroni e
protoni pari a 238.

A seguito del primo stadio di
decadimento si trasforma in

Torio-234

attraverso

emissione di particelle α , in

un tempo di dimezzamento

pari a 4.47 miliardi di anni.

Nel secondo stadio, il Torio-

²³⁴ attraverso emissione di particelle β ,
in un tempo di

dimezzamento abbastanza veloce di 24.1
giorni, decade in

Protattinio-^{234m}, che a sua volta in una
emivita di 1.17 minuti,

attraverso l'emissione di particelle β ,
decade in Uranio-²³⁴, e

così via si procede come meglio

illustrato in figura.

Nella radioattività artificiale, invece, il processo di decadimento

viene indotto artificialmente, come ad esempio bombardando i

nuclei atomici con neutroni o nucleoni (protoni e neutroni) in

modo da renderli instabili.

147

Rientrano in tale ultima tipologia tutti gli elementi che a seguito

del bombardamento diventano elementi

con numero atomico

maggiore di 92, e sono detti transuranici perché ottenuti

artificialmente. Elementi con numero atomico maggiore di 109,

invece, sono detti superpesanti.

Gli elementi transuranici e superpesanti non esistono in natura,

ad esclusione del Nettunio (^{93}Np) e Plutonio (^{94}Pu) che derivano

dal decadimento dell'Uranio-238.

Solitamente la radioattività viene

associata a eventi catastrofici

quali le esplosioni di bombe atomiche,
incidente del reattore di

Chernobyl e all'uso di strumenti
radiografici nel settore medico.

Chiaramente la pericolosità di una
radiazione è legata

esclusivamente alle quantità interagenti.

In realtà noi siamo “naturalmente” e
continuamente esposti a

radiazioni, anzi sorgenti radioattive sono
componenti naturali del

nostro organismo.

In una persona del peso di 70 Kg, sono presenti mediamente

elementi radioattivi nelle seguenti quantità:

Carbonio 14 (^{14}C) per 12.6 Kg

Potassio 40 (^{40}K) per 0.14 Kg

Torio 232 (^{232}Th) per 0.1 mg

Uranio 238 (^{238}U) per 0.1 mg

E' facile notare come Torio ed Uranio sono presenti in quantità

del tutto trascurabile, mentre Carbonio e Potassio a seguito di

processi di decadimento liberano energia che in parte viene

ceduta al corpo umano attraverso elettroni generati ed in parte

fuoriesce associata agli antineutrini, attraverso una reazione di

148

decadimento denominata beta meno (b-) meglio specificata nei

paragrafi successivi.

Ulteriori radiazioni a cui siamo esposti sono del tipo terrestri ed extraterrestri.

Le sorgenti extraterrestri sono le stelle dalle quali provengono i raggi cosmici.

Le sorgenti terrestri sono del tipo naturali e artificiali.

Le sorgenti naturali possono essere di due tipi: il primo tipo sono presenti sulla terra dal tempo della sua formazione, sempre

attraverso la provenienza dai processi di nucleosintesi stellare; i

secondi sono prodotti dai continui processi di interazione tra la

radiazione cosmica e gli atomi dell'atmosfera.

Le sorgenti terrestri artificiali provengono dai processi di fissione

nei reattori nucleari, dalle esplosioni nucleari, dalle collisioni

presso gli acceleratori nei laboratori di ricerca fisica e medica, e

dall'esposizione per diagnostica medica

(radiografie, TAC, etc.).

La loro radioattività media normalmente è inferiore delle sorgenti naturali.

Anche se è opinione consolidata che le radiazioni abbiano effetti

nocivi, numerosi studi hanno verificato che le radiazioni possono

avere effetti benefici nel caso di assorbimento, comunque, di

piccole dosi.

Da uno studio riferito all'incidenza del

cancro o malformazioni

congenite, in un campione di popolazione di 10.000 abitanti di

Taiwan, esposta accidentalmente per 20 anni (1983-2003) ad

una dose di radiazione da 8 a 20 volte superiore quella naturale,

per aver abitato o frequentato edifici costruiti utilizzando ferro

contaminato accidentalmente con l'elemento radioattivo Cobalto

60, è scaturito che i casi di morte per cancro e di malformazioni

congenite sono state sorprendentemente e notevolmente

inferiori a quelli della popolazione di Taiwan non esposta, per un

valore circa 35 volte inferiore.

Quindi

sembrerebbe

che

piccole

dosi

di

radiazione

aumenterebbero la capacità di difesa dell'organismo nei

confronti del cancro e malformazioni congenite.

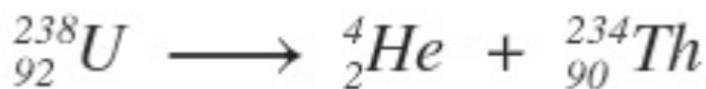
Questa ricerca, però, da sola non è esaustiva e richiede

conferme o smentite da ulteriori studi dedicati ai possibili effetti

benefici delle radiazioni.

NUCLEO
INIZIALE

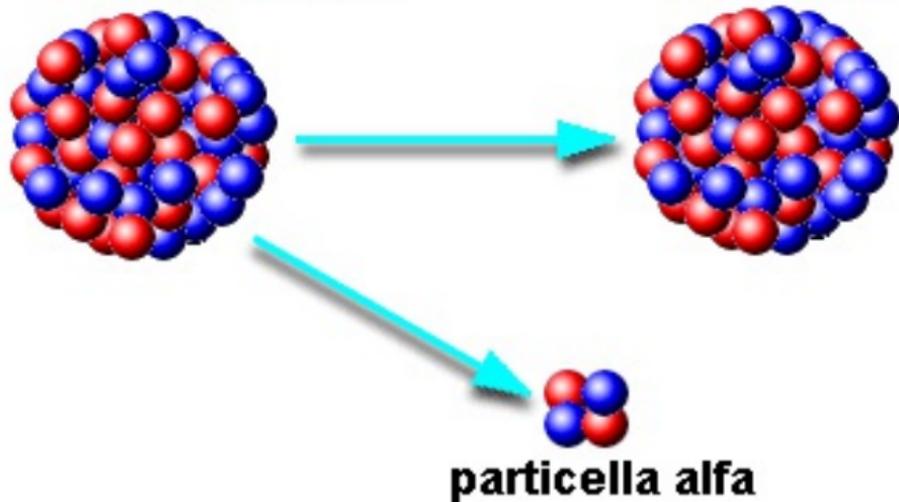
NUCLEO
FINALE



PARTICELLA
ALFA

URANIO 238

TORIO 234



4.2 IL DECADIMENTO α

Nel decadimento α , un elemento si trasforma (trasmuta) in un

altro piú stabile, attraverso l'emissione di particelle α , consistenti

in nuclei di Elio ($\text{He} = 2$ protoni e 2 neutroni).

Nel caso dell'Uranio-238 avente un numero di protoni e neutroni

pari a 238, attraverso l'emissione di un nucleo di Elio costituito

da 4 tra protoni e neutroni, abbiamo un residuo di 234 tra protoni

e neutroni, che costituiscono un nucleo di Torio-234.

Questo tipo di decadimento avviene nel rispetto del principio di

conservazione della massa/energia.

Si ricorda che il numero posto in alto indica la somma dei

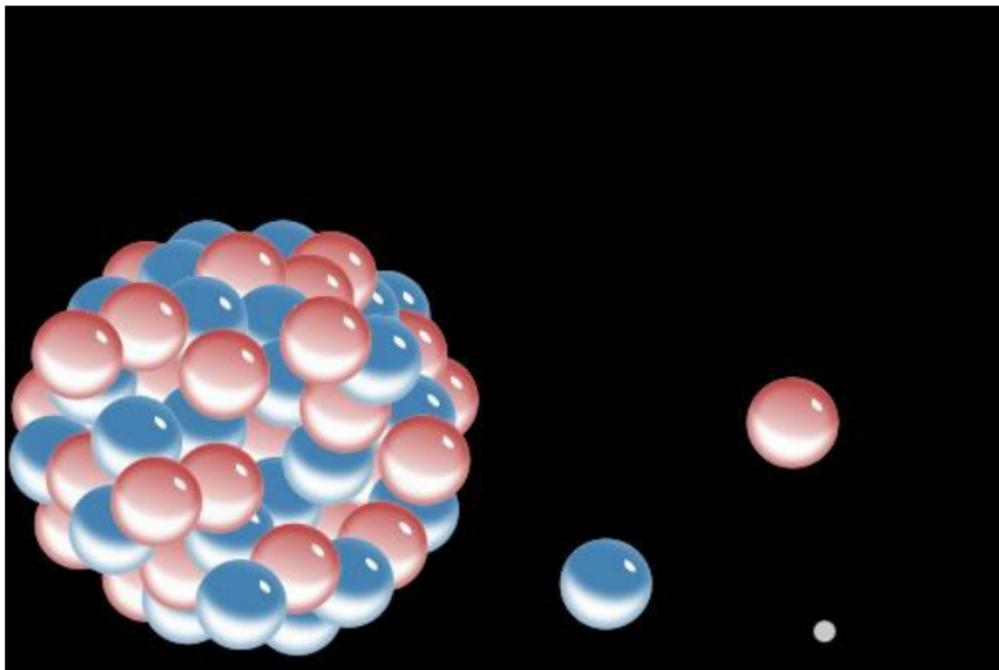
neutroni e dei protoni, mentre il numero in basso indica il numero

di protoni presenti nel nucleo.

Come detto in precedenza il nucleo di Torio ottenuto potrebbe

essere soggetto ad ulteriore decadimento
con emivita e modalità

differenti.



151

4.3 IL DECADIMENTO β^-

Il decadimento β^- (beta meno) è quel processo attraverso il

quale, in un nucleo instabile, il neutrone si trasforma in un

elettrone (e^-), un protone (p^+) e anti-neutrino $\bar{\nu}$.

In realtà, come meglio avremo modo di approfondire in seguito,

non è il neutrone a trasformarsi ma i suoi componenti elementari,

che solo come risultato finale si concretizza con la

trasformazione del neutrone in protone,

in aggiunta ad altre

particelle.

La legge di trasformazione del neutrone è la seguente:

\rightarrow + ⁻ +

Si può notare che dal neutrone viene generato un protone che,

restando nel nucleo, produce un aumento del numero atomico

(numero atomico = numero di protoni).
Invece l'elettrone e l'anti-

neutrino generati vengono emessi all'esterno.

Altro nuovo elemento che appare nel processo di trasmutazione

è l'anti-neutrino, che meglio approfondiremo nel seguito, quando

saranno trattate le particelle elementari. Per ora descriviamo tale

particella come costituita di antimateria, senza carica elettrica, di

152

massa piccolissima pari a circa 25.000 volte quella dell'elettrone,

con spin pari a $1/2$ e velocità prossime a quella della luce.

Un esempio di tale decadimento è dato dal nucleo Cobalto-60,

che a seguito del processo, trasmuta in Nichel-60 emettendo un

elettrone ed un anti-neutrino.

60

60

27

→ □ □

28

+ □ - + □ □

La reazione di decadimento b- diventa di fondamentale

importanza nel processo di datazione radiometrica con il metodo

denominato del Carbonio-14 (^{14}C) o radiocarbonio.

Tale metodologia fu ideata e messa a punto tra il 1945 e

il 1955 dal chimico statunitense Willard Frank Libby, che per

questa scoperta ottenne il Premio Nobel nel 1960.

In tale metodologia si sfrutta la caratteristica che ogni organismo

vivente presenta una componente radioattiva dell'isotopo del

carbonio 14 che decade in Azoto 14 (^{14}N), e due componenti di

carbonio stabile ^{12}C e ^{13}C .

Il Carbonio viene acquisito attraverso il continuo scambio con

l'atmosfera, anche per mezzo dell'anidride carbonica, tramite

processi di respirazione o la nutrizione di altri esseri viventi e

sostanze organiche per il mondo animale, o fotosintesi per il

mondo vegetale. Per tale motivo è possibile radiodattare

qualsiasi oggetto costituito da sostanze provenienti dal mondo

vegetale o animale (legno, tessuto, ossa, etc..)

Quando l'organismo è vivo il rapporto

di concentrazione tra

l'isotopo ^{14}C e quello degli altri due isotopi stabili ^{12}C e ^{13}C si mantiene costante e uguale al rapporto presente in atmosfera,

mentre dopo la morte, l'organismo non scambia più carbonio con

153

l'esterno e quindi la concentrazione dell'isotopo instabile ^{14}C , per

decadimento, diminuisce rispetto al quantitativo degli isotopi

stabili, in maniera regolare secondo una

determinata formula.

La reazione di decadimento dell'isotopo instabile è la seguente

14

14

6

→

7

+ □ - + □ □

con un tempo di dimezzamento o emivita di circa 5.730 anni e

secondo la seguente legge

Δ □

$$(4.3.1) \quad \square = \square_0 \square^{-\square}$$

Con

□ = concentrazione di ^{14}C nei resti organici

□₀ = concentrazione di ^{14}C in atmosfera

□ t = tempo trascorso dalla morte

dell'organismo

$$\square \square \square \square \square \square \square \square \quad 14 \square$$

5.730

$$\square = \text{vita media del } 14C =$$

=

$$= 8.267 \square \square \square \square$$

$\ln 2$

$\ln 2$

Attraverso la formula inversa della
(4.3.1), nota la

concentrazione di ^{14}C presente nei resti organici è possibile

determinare l'età del reperto

\square

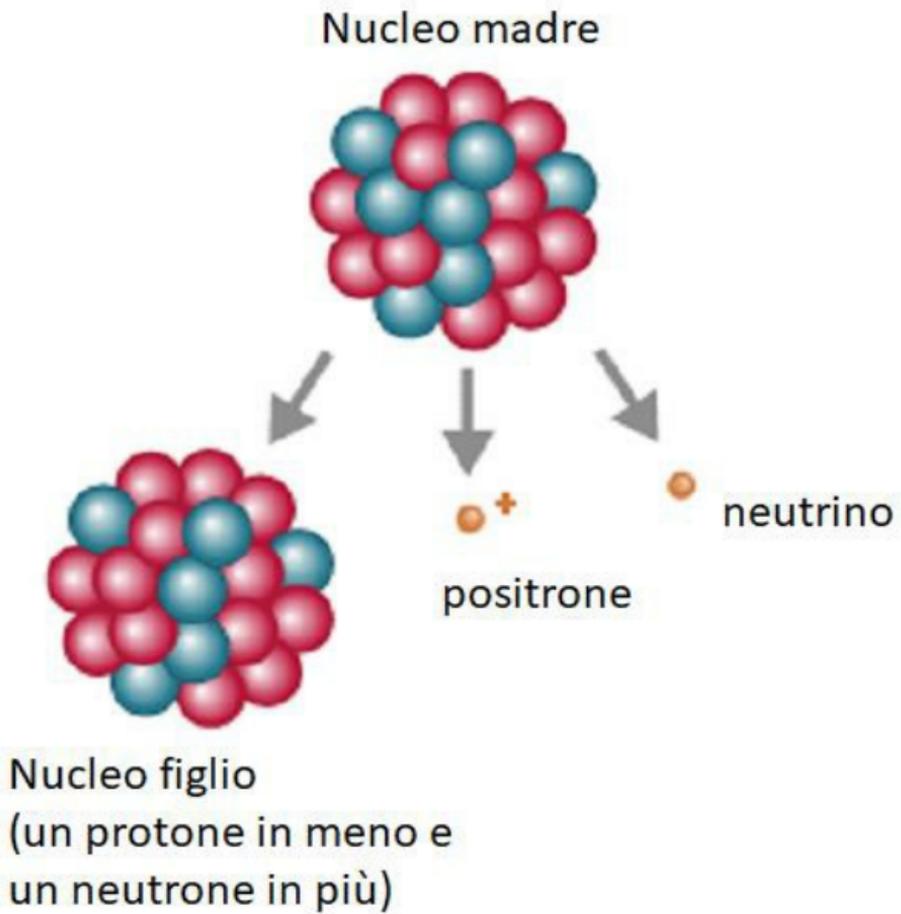
$$\Delta \square = - \square \log$$

$\square 0$

Non è però possibile radiodatare reperti fossili più vecchi di

50.000 anni, dove il Carbonio-14 si è totalmente trasformato in

Azoto-14.



154

4.4 DECADIMENTO b^+ o b^- inverso

Tale processo si manifesta attraverso la trasformazione

all'interno del nucleo di un protone in un neutrone (n), un

positrone (e⁺) e un neutrino (n).

Il neutrone generato resta nel nuovo nucleo mentre il positrone

ed il neutrino vengono emessi all'esterno.

→ + +

Affinché sia possibile ottenere questo

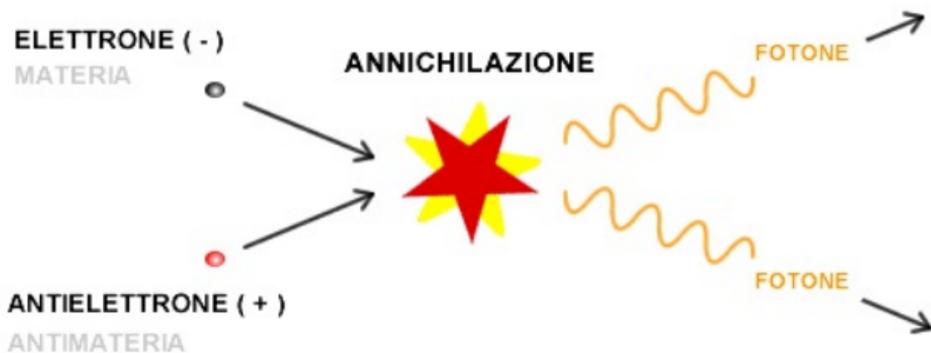
tipo di decadimento è

necessario fornire elevata energia,
infatti tale processo avviene

continuamente all'interno delle stelle.

Per tale motivo tale decadimento risulta
essere tipizzato come

non spontaneo.



Il positrone è l'anti-elettrone, ovvero il corrispondente

dell'elettrone come antimateria, ed ha la stessa massa

dell'elettrone ma carica opposta, positiva.

Il positrone ha la caratteristica che se viene a contatto con

l'elettrone, o meglio si incontra materia ed antimateria, entrambe

si annichiliscono in un tempo brevissimo, circa 10^{-9} sec, ciò si

annientano dando origine a due bagliori, costituiti da 2 fotoni.

Questa particolarità dell'anti-elettrone, viene utilizzata in campo

medico nel processo denominato PET (tomografia a emissione

di positroni), che permette, a differenza delle radiografie ai raggi

X, di avere informazioni di tipo fisiologico della materia.

Per ottenere i risultati desiderati è necessario seguire un

processo opportuno.

La procedura inizia con l'iniezione, al paziente, di un radiofarmaco,

costituito

da

un

radio-isotopo tracciante

156

con emivita breve, che si lega chimicamente ad una molecola attiva a livello metabolico (vettore).

La molecola vettore diffonde il radioisotopo nel corpo da

analizzare.

Per via del loro basso tempo di dimezzamento, i radioisotopi

devono essere prodotti da un ciclotrone posizionato in prossimità dello scansionatore PET.

L'isotopo, così diffuso, subisce un decadimento β inverso

emettendo un positrone.

Dopo un percorso che può raggiungere al massimo pochi

millimetri, il positrone si annichila con un elettrone, producendo una coppia di

fotoni gamma emessi in direzioni opposte, opportunamente rilevati da uno scanner, costituito da tubi

fotomoltiplicatori.

Dalla misurazione della posizione in cui i fotoni colpiscono il

rilevatore, si può ricostruire l'ipotetica posizione del corpo da cui

sono stati emessi.

Questa tecnica radiologica produce una dose di irradiazione

equivalente all'effettuazione di una TAC (tomografia assiale

computerizzata), che sfrutta raggi X, e quindi pari a circa 385

radiografie toraciche.

Ritorniamo al processo di decadimento ed esaminiamo le

ulteriori particelle prodotte nella reazione.

Il neutrino è una particella costituita da materia, che non ha

carica elettrica, ha una massa piccolissima pari a circa 25.000

volte quella dell'elettrone, con spin pari a $1/2$ e velocità prossime

a quella della luce.

157

Per tali sue caratteristiche ma in particolare a causa della sua

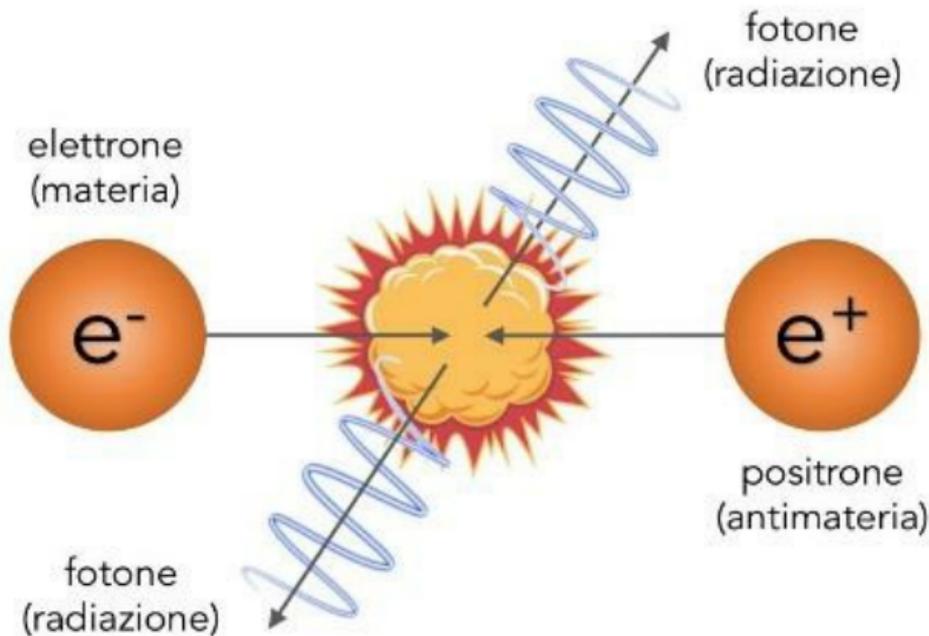
neutralità e piccola massa è di difficile individuazione.

Si riesce ad individuare per l'equivalenza massa-energia,

attraverso la misura della corrispondente energia cinetica,

rilevabile per via delle elevate velocità, prossime al valore della

velocità della luce.



158

4.5 DECADIMENTO g

Questo processo non è indipendente ma

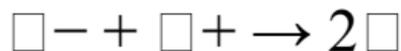
avviene nell'ambito di

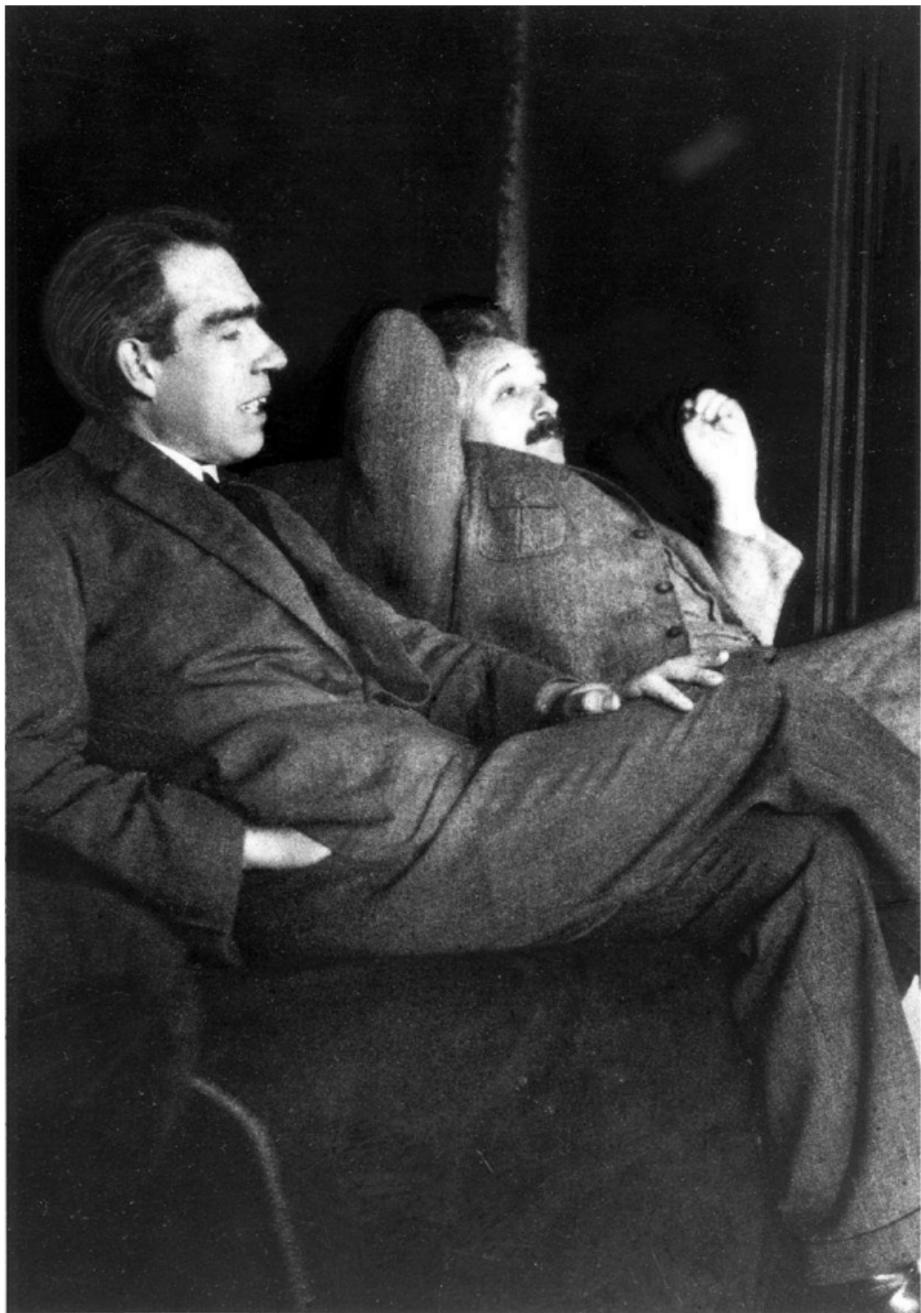
altri processi di decadimento, attraverso l'emissione di fotoni

(raggi g) a seguito dell'annichilazione di un elettrone (e-) con un

positrone (e+), come descritto nel paragrafo precedente.

In termini analitici





COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

“Piantala di dire a Dio che cosa fare con i suoi dadi.”

Risposta di Bohr all'affermazione di Albert Einstein: Dio non

gioca a dadi con l'universo

NIELS BOHR

<https://www.frasicelebri.it/frasi-di/niels-bohr/>

5 FISSIONE NUCLEARE

5.1 LA REAZIONE DI FISSIONE A CATENA

La fissione nucleare è un processo di decadimento radioattivo,

dove il nucleo di un elemento chimico pesante decade in frammenti di minori dimensioni, con emissione di una grande quantità di energia e radioattività.

Condizione necessaria affinché avvenga tale processo è la

presenza di un materiale o meglio un isotopo di tipo “fissile”, cioè

capace di una reazione a catena.

Se invece l’elemento non è capace di seguire una reazione a

catena ma è comunque divisibile, viene definito “fissionabile”.

A titolo di esempio, l’Urano 235 (U235) è un isotopo fissile, mentre

l’Urano 238 (U238), che è quello più abbondante in natura, è

fissionabile.

Si procede a bombardare l'isotopo
fissile con un neutrone lento,

in modo tale che detta particella resti
intrappolata nel nucleo

colpito, provocando un aumento del
numero atomico così da

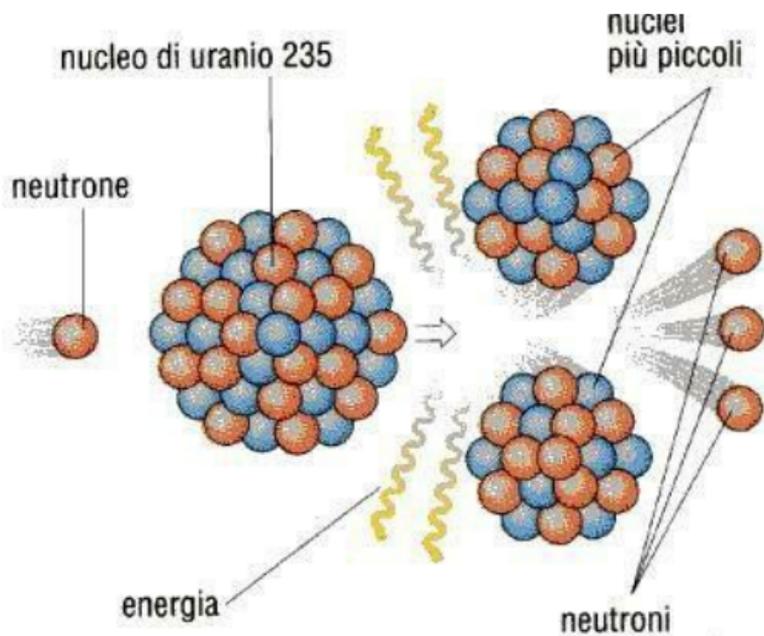
renderlo ancora più instabile, fino a
spezzarsi.

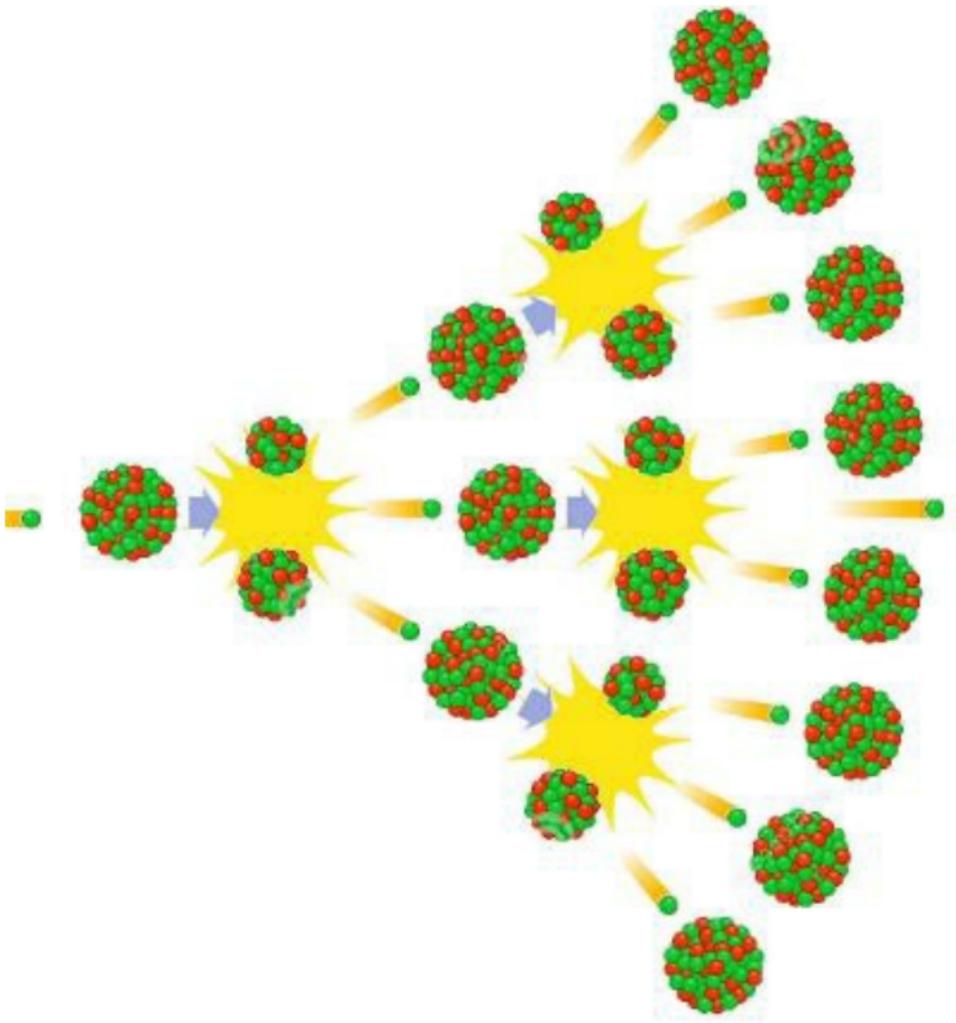
Il nucleo di partenza si divide in due
nuclei più piccoli.

Il neutrone, deve avere una adeguata
velocità in modo da restare

intrappolato nel nucleo colpito,

altrimenti potrebbe attraversarlo.





161

Nel corso del processo di fissione, per

ogni nucleo bersaglio di

partenza ed un neutrone si generano due nuclei più piccoli, tre

neutroni ed energia.

I tre neutroni così generati serviranno all'innesco di ulteriori

processi di fissione a catena.

Ulteriore condizione perché avvenga il processo di fissione è

data dalla presenza di una quantità di massa minima, definita

massa critica.

La massa critica di un materiale fissile
rappresenta la quantità

minima,

necessaria

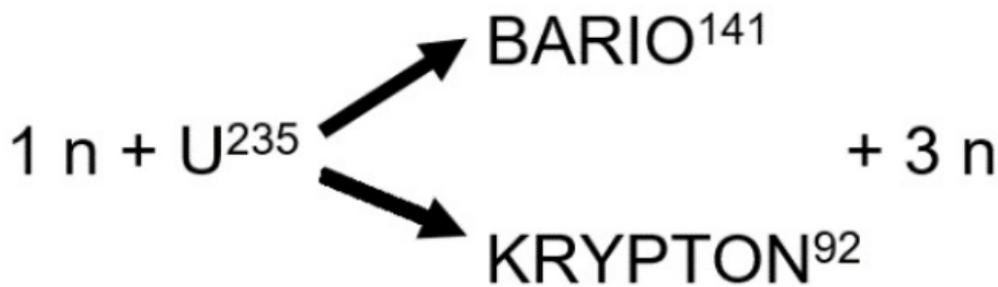
affinché

una reazione

nucleare

a

catena possa autosostenersi in maniera
autonoma.



162

Facciamo un esempio considerando l'Uranio235 che viene

bombardato con un neutrone lento; in totale abbiamo un numero

di neutroni e protoni, insieme definiti nucleoni, complessivi pari a

$235+1=236$, che potremmo chiamare Uranio236.

L'isotopo così ottenuto, si spezza in Bario141 e KRYPTON92, oltre

ad emettere tre neutroni;
complessivamente i due nuovi isotopi

presentano un numero di nucleoni pari a $141+92+3=236$.

La somma dei protoni e neutroni di partenza è equivalente al

numero degli stessi in uscita, mentre la massa in ingresso è

diversa dalla massa in uscita.

La differenza di massa del neutrone e del U235 iniziali, rispetto

alla somma delle masse dei prodotti finali dopo la reazione, è

conseguenza della trasformazione di parte della massa in

energia, per l'equivalenza dettata dalla famosa relazione di

Einstein $E=mc^2$.

Considerato l'elevato valore della costante c , velocità della luce

nel vuoto, è facile capire come piccole differenze di masse

possano generare elevate quantità di energia.

In termini quantitativi per un solo nucleo di U235 si ha:

$$E = [(m_{141} + m_{92} + 3m_{1}) - (m_{235})] c^2 = 211 \text{ MeV}$$

Questa energia, si manifesta con l'emissione di raggi gamma ed

in piccola parte (5% circa) viene convertita in energia cinetica e

quindi calore.

E' possibile calcolare che in una reazione di fissione con soli 16

g di Uranio235 si ha uno sviluppo

energetico pari a $1,2 \cdot 10^9$ KJ

163

equivalenti a $3,33 \cdot 10^5$ Kwh, ovvero
pari all'energia necessaria

ad accendere per un'ora circa 3.300.000
lampadine da 100 Watt.

Gli isotopi Bario141 e KRYPTON92
derivanti dalla reazione di

fissione, rappresentano i residui di
reazione, che a loro volta,

essendo

instabili,

decadono

ulteriormente

producendo

radioattività, con le modalità del decadimento beta.

Altro vantaggio della reazione di fissione, è che producendo

energia di processo, si autosostiene.

Una reazione di fissione in base alle modalità ed alla velocità di

sviluppo, può essere di tipo incontrollata o controllata.

5.2 REAZIONE DI FISSIONE INCONTROLLATA

La reazione di fissione abbiamo visto essere una reazione a catena autosostenuta.

Provocando una reazione senza controllo, dal processo si

ottiene una enorme quantità di energia in un tempo breve,

attraverso l'emissione di raggi gamma e calore, che è alla base

della realizzazione di una Bomba a fissione nucleare, detta

Bomba A (Atomica), che per intenderci è la "Little Boy" che fu

sganciata sul centro della città di Hiroshima il 6 agosto 1945.

Per la realizzazione della Bomba A, è necessario disporre di

U235, denominato Uranio arricchito, in quanto fissile, per una

quantità almeno pari all'85% degli isotopi totali.

L'Uranio in natura è presente come isotopo 238 per circa 99.2%,

chiamato Uranio impoverito, mentre come isotopo 235 si trova

solo per il 0.72%, altri isotopi in minima percentuale completano

la gamma.

Il processo di arricchimento presuppone la separazione dei due

isotopi, al fine di avere una maggiore concentrazione di U235.

Nella corsa agli armamenti atomici le nazioni arricchiscono

l'Uranio 238, diffuso in natura,
attraverso un processo lungo e

complesso, per via della poca differenza
di massa tra i due

isotopi, pari a circa 1,26%.

Per l'innesco della reazione a catena
abbiamo visto che è

necessario raggiungere una massa
superiore a quella critica,

denominata super-critica, senza però
rischiare l'esplosione

prima dell'innesco.

A tale proposito le masse sono tenute separate in blocchi di masse sub-critiche.



165

La bomba viene fatta detonare con

esplosivi convenzionali,

per portare istantaneamente a contatto le
varie masse sub-

critiche, attraverso il collasso dei
separatori, unendo così il

materiale nella formazione della massa
super-critica.

Al centro del sistema è presente anche
un dispositivo,

contenente una sostanza fortemente
emissiva di neutroni,

come il polonio, al fine di produrre i
neutroni necessari

all'avviamento della reazione di fissione a catena.

La testata è eventualmente rivestita esternamente con uno

schermo riflettente nei confronti dei neutroni che altrimenti

verrebbero persi all'esterno.

Il risultato devastante a seguito dell'innescò, potremmo solo

immaginarlo.



Nella reazione a catena si sviluppano elevati valori di energia

sotto forma di raggi gamma (energia elettromagnetica), calore

(energia termica) e alta velocità delle particelle (energia

cinetica).

Sono proprio i raggi gamma ad alta energia, e quindi bassa

frequenza, che in aggiunta alla particolarità di non avere massa,

permeano tutta la materia circostante, ionizzandola e creando

distruzione totale.

166

Nello stesso tempo le radiazioni neutroniche sviluppate nella

reazione a catena, penetrano la materia alterando la

composizione dei nuclei.

Inoltre come residui di reazione, vengono generati altri isotopi

instabili e quindi soggetti ad ulteriore decadimento, causa di

contaminazione dei luoghi anche dopo

secoli.

L'Uranio impoverito, invece, nel campo delle armi militari, non

essendo fissile, viene utilizzato per la realizzazione di munizioni

e nelle corazzature di alcuni sistemi d'arma.

Se adeguatamente trattato l'uranio impoverito diviene duro e

resistente come l'acciaio temperato ed unitamente alla

particolarità di avere una elevata densità, se usato come

componente di munizioni anticarro esso
risulta molto efficace,

decisamente in maniera superiore ad
altri materiali molto più

costosi.



167

COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

**“Non è possibile determinare
contemporaneamente**

**un'idea di una donna e la velocità a cui
tale idea cambierà.”**

WERNER KARL HEISENBERG

<https://www.frasicelebri.it/frasidi/werner-karl-heisenberg/>



5.3 FISSIONE NUCLEARE CONTROLLATA

Nel processo di fissione controllata, è necessario frenare la

velocità dei neutroni che si generano nel processo, al fine di

avere neutroni lenti per ottenere una corrispondente lenta

produzione di energia, tale da poter essere trasformata ed

utilizzata, diversamente dal caso della

Bomba A.

Tale processo avviene in opportuni reattori nucleari dove posto

il materiale fissile, la reazione a catena viene frenata, o meglio

moderata, con particelle a basso numero atomico.

Il primo reattore nucleare di cui si ha notizia è quello realizzato

dall'équipe di Enrico Fermi a Chicago, nel reattore CP-1

(Chicago Pile 1), che ottenne la prima reazione a catena

controllata ed autosostenuta il 2
Dicembre 1942.

Per moderare la reazione, solitamente
viene utilizzata acqua

pesante, che è costituita da acqua con
isotopi di idrogeno, come

ad esempio Deuterio ($2H$).

Al fine di poter rallentare i neutroni,
fino a fermare la reazione in

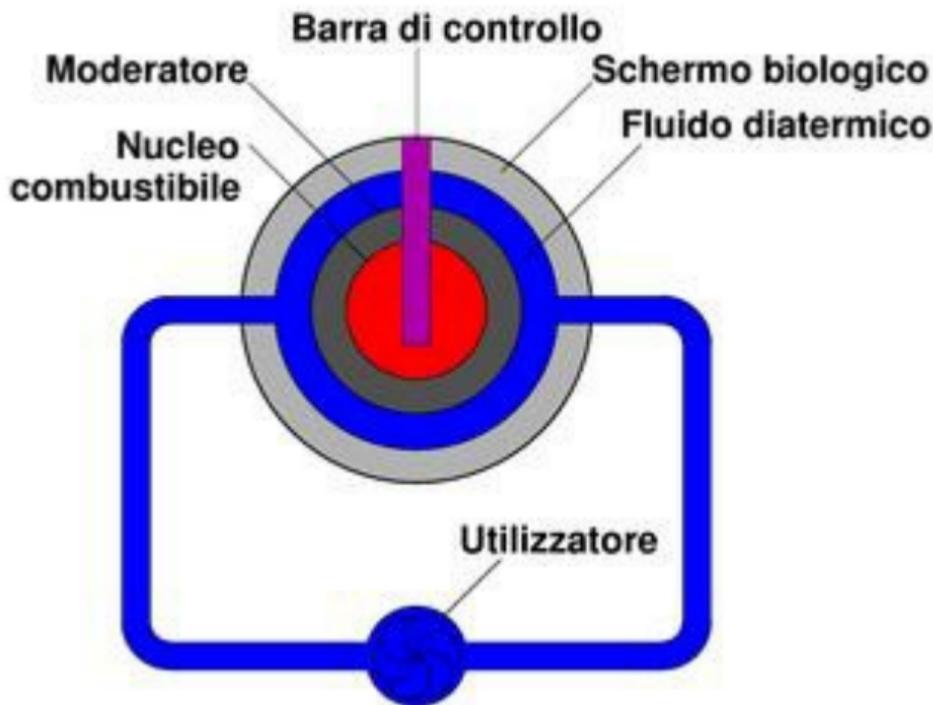
caso insorgenza di problematiche
preoccupanti, vengono

utilizzate apposite barre di controllo, in
materiale idoneo ad

assorbire i neutroni.

Le barre possono essere in argento, cadmio, grafite o materiali

con le stesse caratteristiche di neutralizzazione dei neutroni.



169

In definitiva una reattore nucleare, in
maniera schematica e

semplificata, può essere composto da un

nucleo centrale

contenente il combustibile (materiale fissile), una zona di

moderazione per il rallentamento della reazione, una barra di

controllo dei neutroni generati, una zona per il fluido diatermico

che a seguito del riscaldamento del fluido, aziona opportune

turbine per la produzione di energia elettrica.

I pericoli legati all'utilizzo di centrali a fissione sono ben noti e

dovuti al rischio nel controllo della reazione a catena, come già

accaduto, tra i più recenti e gravi, nel 1986 a Chernobyl

(Unione Sovietica), nel 2011 a Fukushima (Giappone).

Una ulteriore problematica, non di poco conto, nell'esercizio

delle centrali a fissione è dovuta allo smaltimento delle scorie,

composte da isotopi radioattivi derivanti dal processo di reazione

di fissione.



COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

“Dividendo la materia in unità sempre più piccole, non

giungiamo alle unità fondamentali e indivisibili; giungiamo

però a un punto in cui la divisione non ha più senso.”

RNER KARL HEISENBERG

<https://www.frasicelebri.it/frasi-di/werner-karl-heisenberg/>

DEUTERIO

1 protone
1 neutrone



ELIO

2 protoni
2 neutroni



+



neutrone
libero

+

energia



TRIZIO

1 protone
2 neutroni



171

6 FUSIONE NUCLEARE

6.1 REAZIONI DI FUSIONE NUCLEARE

La fusione nucleare è il processo di reazione tra due nuclei a

basso peso atomico, che si fondono tra loro per dar luogo ad un

nuovo nucleo a più elevato numero atomico.

Tale processo è molto dispendioso in termini energetici nella

fase di avviamento, dove è necessario

superare le forze di

repulsione elettrostatiche che si
ingenerano tra i protoni dei

corrispondenti nuclei, nel corso della
loro fusione.

Successivamente, nel caso di fusione
degli elementi con numero

atomico fino a 26 (Ferro) - 28 (Nichel),
essendo la reazione

avviata di tipo esotermica, si ha
emissione di energia tale da

rendere il processo di fusione
energeticamente autosostenibile.

Diverso è il caso di elementi con numero atomico superiore a 28,

dove il processo di fusione diventa endotermico, quindi si ha

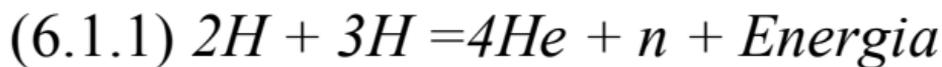
assorbimento di energia, e la reazione diventa non più

energeticamente autosostenibile.

Analizziamo il caso della reazione nucleare di fusione di soli due

elementi a basso numero atomico, quale è l'idrogeno negli

isotopi Deuterio e Trizio.



172

Dalla fusione di un nucleo di Deuterio ed uno di Trizio viene

generato un nucleo di Elio, in aggiunta ad un neutrone ed

emissione di Energia.

L'emissione del neutrone rappresenta un problema, che a causa

della sua elettroneutralità diventa difficile da controllare con i

campi magnetici.

L'Emissione di energia di manifesta per il così detto “difetto di massa”.

La massa dei nuclei di partenza risulta superiore alla massa dei

nuclei generati a seguito del processo di fusione.

Questa differenza di massa è una conseguenza della

trasformazione di parte della massa in energia, in accordo alla

equivalenza di Einstein $E=mc^2$.

Nel caso della reazione di fusione del Deuterio con il Trizio di cui

alla 6.1.1, noti i valori delle rispettive masse degli elementi di

reazione, possiamo calcolare l'energia sviluppata per difetto di

massa

$$\Delta m = [(m_{\text{D}} + m_{\text{T}}) - (m_{\text{He}} + m_{\text{n}})] \cdot c^2$$

$$\Delta m = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

Da questo risultato, tenendo conto del basso valore del peso

atomico degli elementi di reazione rispetto al peso atomico degli

elementi partecipanti al processo di reazione di fissione, si

evincesse chiaramente il vantaggio della reazione di fusione rispetto

alla precedente di fissione.

Una reazione di fusione, in realtà avviene in più stadi successivi

ed in più rami paralleli.

Partendo da due elementi si giunge a costituire un nuovo nucleo

per combinazione anche degli elementi intermedi.



Protone



Neutrone



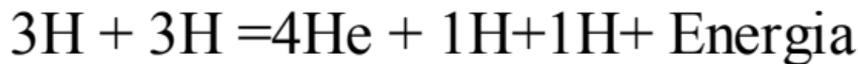
Positone

γ Raggio Gamma

ν Neutrino

Analizziamo uno solo dei rami possibili, di una reazione di

fusione di nuclei di idrogeno con sviluppo in più stadi:



Dalle reazioni precedenti emerge che nuclei di idrogeno,

costituiti da un protone, nel processo di fusione, attraverso

passaggi e combinazioni intermedie, si uniscono a formare

nucleo di Elio, costituito da due protoni e due neutroni, oltre alla

produzione di positroni, neutrini, raggi gamma ed Energia.

La fusione nucleare ha il grosso vantaggio di non produrre scorie

nucleari nel corso del suo processo e di produrre una energia

circa dieci volte superiore ad un processo di fissione, a parità di

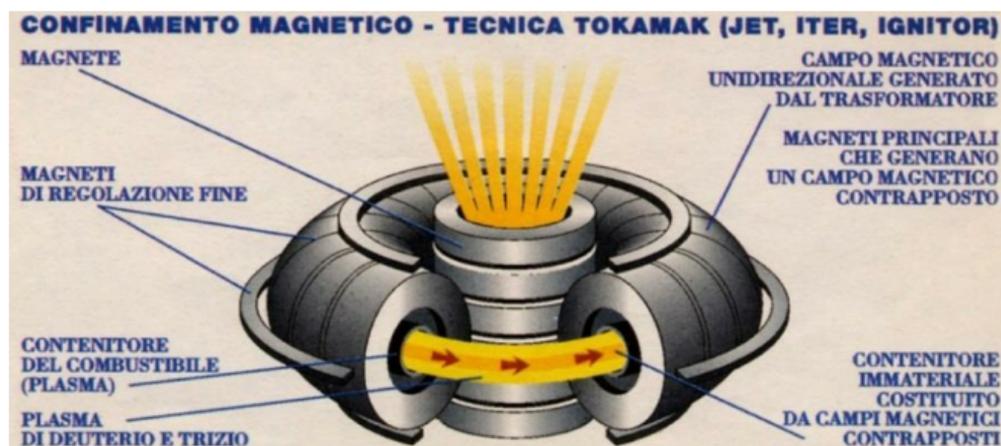
quantità di massa di partenza utilizzata.

Di contro, considerato che il processo, per la caratteristica di

generare reazioni esotermiche, porta a raggiungere temperature

altissime, diventa complicato contenere il materiale nel corso

della sua reazione di fusione per un tempo adeguato.



Alla luce della problematica di confinamento del plasma alle

elevate temperature del processo di fusione, diventa complicato

realizzare un Reattore nucleare di fusione, tanto che ad oggi non

esistono reattori di questo tipo operativi.

Gli unici impianti esistenti sono di tipo sperimentali in grado di

sostenere la reazione di fusione nucleare per un tempo molto

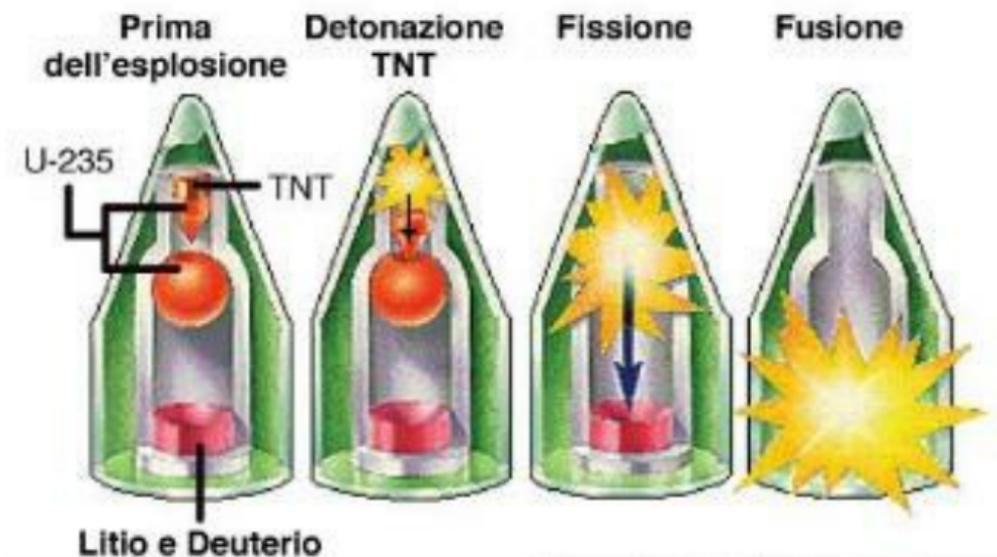
ridotto, attraverso il confinamento del plasma di fusione ad opera

di campi magnetici di intensità elevatissima

Si stima che i primi impianti potranno essere operativi solo

intorno al 2050.





175

6.2 BOMBA AD IDROGENO (BOMBA H)

Un ordigno esplosivo che sfrutta il processo di fusione anziché

quello di fissione, viene chiamato

Bomba ad Idrogeno, o meglio

Bomba H.

Il processo di fusione si lascia avvenire in maniera incontrollata

con produzione di elevati valori di energia, pari circa a 2.500

volte a quella derivante da un analogo processo di fissione.

Il combustibile di una bomba H è costituito da Litio e Deuterio ed

una piccola bomba a fissione viene usata per far avviare il

processo di fusione.

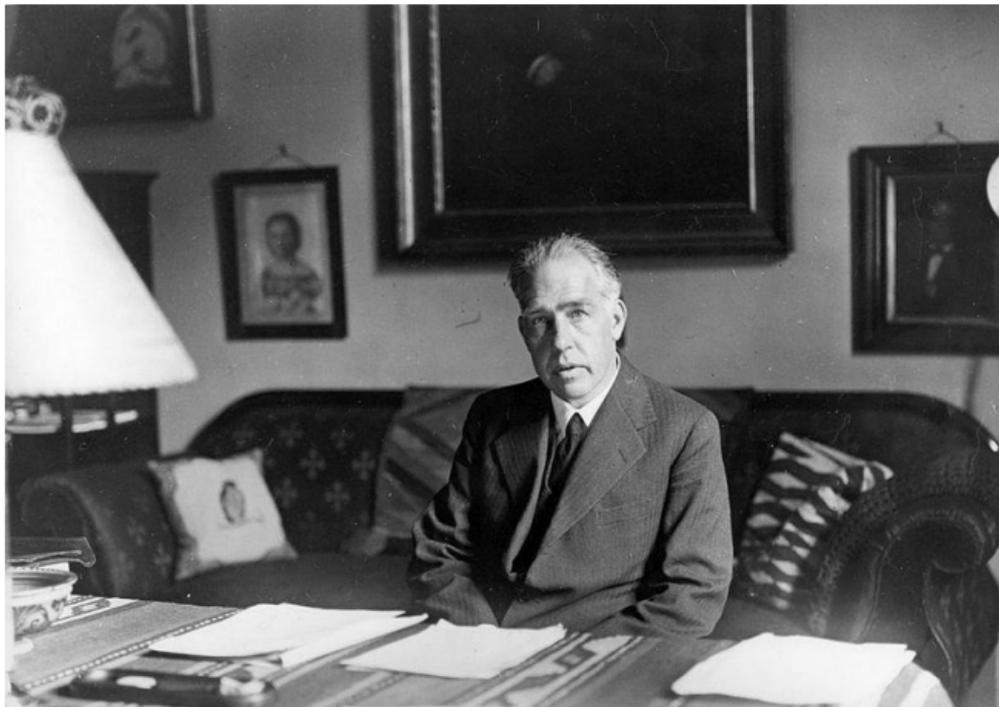
Abbiamo già visto che una bomba a fissione necessita di un

ordigno classico per la sua detonazione.

Quindi l'esplosione, attraverso il processo di fusione, avviene in

sequenza: detonazione Tritolo (TNT), reazione di fissione,

reazione di fusione.



176

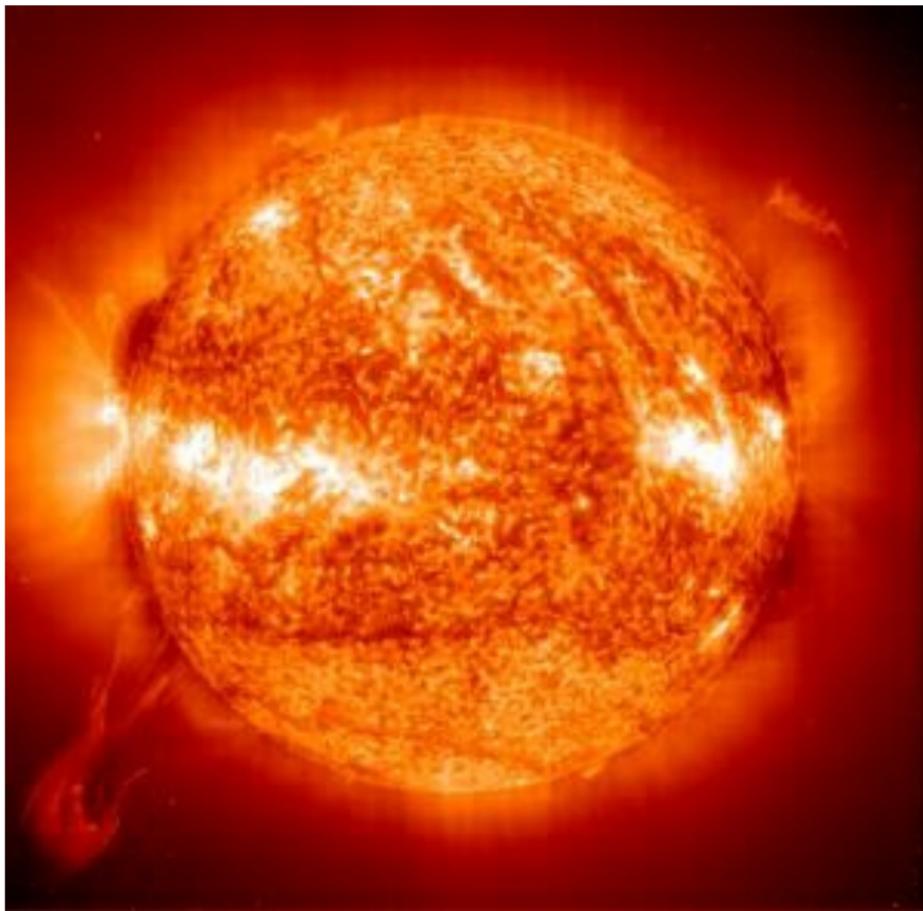
COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

“L'opposto di una dichiarazione corretta è una dichiarazione falsa. Ma l'opposto di una verità profonda

**può ben essere un'altra verità
profonda.”**

NIELS BOHR

[https://www.frasicelebri.it/frasi-
di/niels-bohr/](https://www.frasicelebri.it/frasi-di/niels-bohr/)



177

6.3 FUSIONE NUCLEARE NELLE STELLE

Abbiamo visto come la fusione nucleare sia difficile da

replicare nei reattori nucleari, per il problema di gestione

degli elevati valori di temperatura che si generano durante

il processo.

Nelle stelle, invece, come già avviene da millenni, i

processi di fusione, una volta avviati, proseguono in modo

spontaneo per la peculiare caratteristica esotermica delle

reazioni.

I nuclei degli elementi a basso peso atomico si fondono per

dare luogo a nuclei con peso atomico superiore, in un

processo energeticamente autosostenuto.

I nuclei di idrogeno si fondono in nuclei di Elio, tra le tante,

con le modalità viste nel paragrafo precedente.

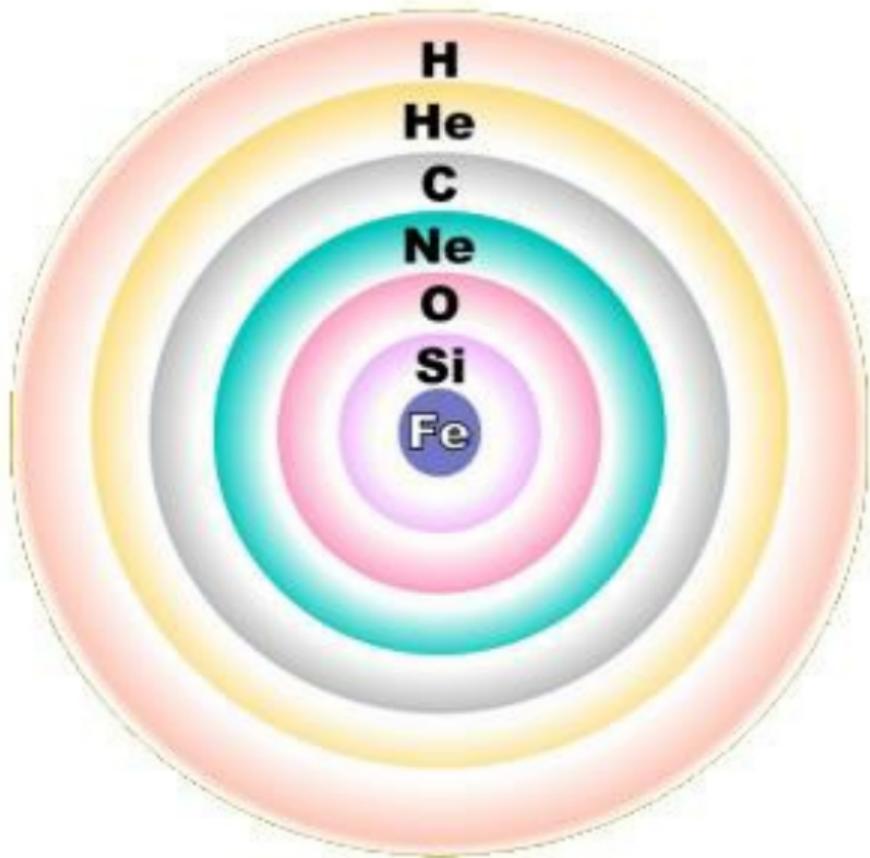
Nel sole la fusione interessa una quantità di Idrogeno pari

a circa 600 milioni di tonnellate al secondo.

La reazione continua attraverso la fusione dei nuclei di Elio

per dar luogo ad un nucleo a numero atomico più elevato

e quindi più pesante, e così via.



178

Nel corso del processo di fusione nucleare delle stelle, come si

può evincere dalle 6.1.2 e successive, vengono emessi oltre che

energia e radiazioni gamma anche neutrini e positroni.

Le radiazioni gamma conferiscono la luminosità alla stella, i

positroni si annichiliscono con gli elettroni dello spazio

circostante ed infine i neutrini proseguono il loro cammino

indisturbati, in quanto neutri e di piccolissima massa.

Si pensi che il Sole emette neutrini, che

raggiungono il pianeta

Terra in 8 minuti, con una entità tale che ogni persona risulta

investita di un numero pari a 10 miliardi di neutrini al secondo.

Il processo di fusione nelle stelle continua fino alla formazione di

nuclei di Ferro – Nichel, dove la reazione inizia a diventare

endotermica e non produce più energia di processo.

Se la stella non è abbastanza massiva, non riesce a generare

elevati valori di pressione, per incrementare i livelli di

temperatura necessari, e quindi si inizia a spegnere, non

potendo più sostenere energeticamente il processo di fusione.

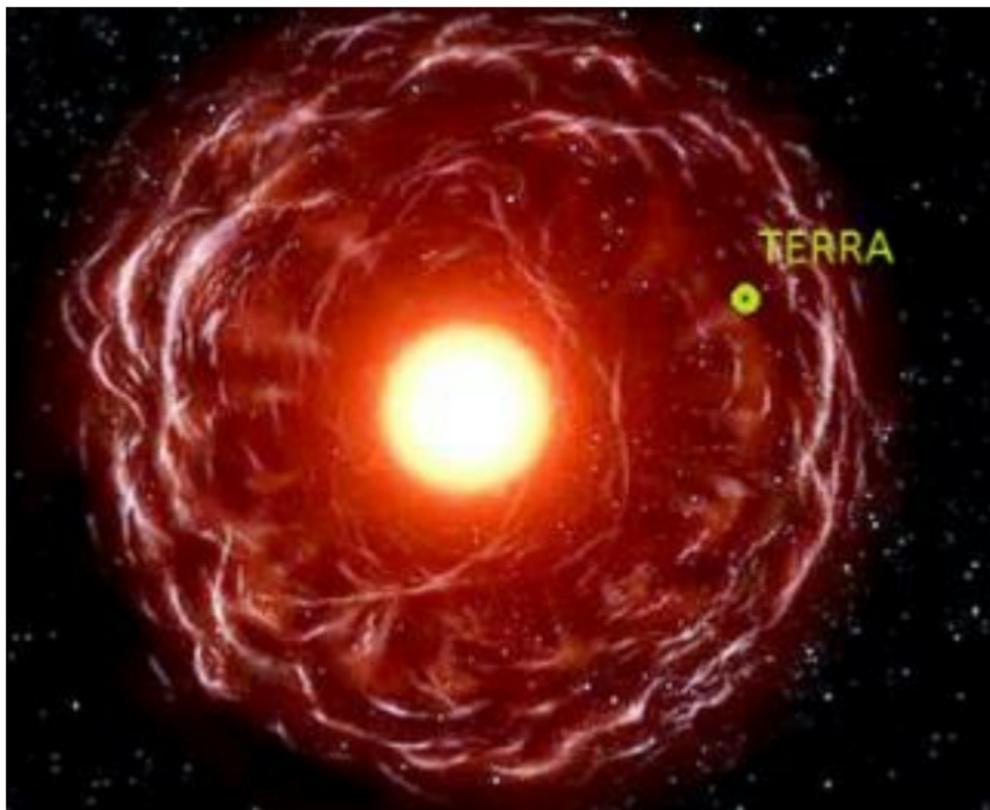
Nel caso di stelle poco massive, come il Sole, che ha un'età di

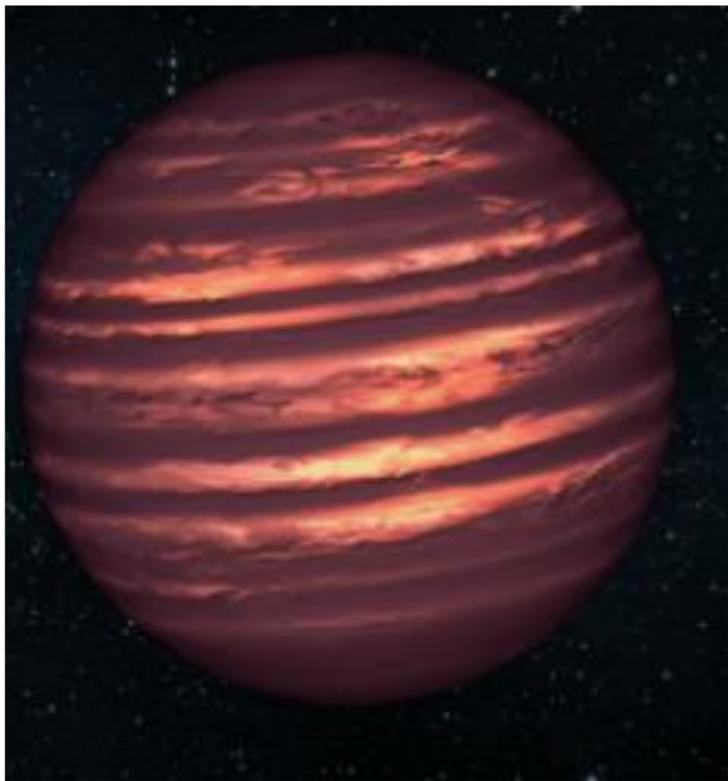
circa 4,6 miliardi di anni, il processo di fusione continua fino al

punto che il combustibile rappresentato dalle riserve atte a

“fondersi” di idrogeno e di elio, non si

esauriscono.





Il termine “poco massivo” è da confrontarsi sempre con le altre stelle dell’universo, ricordando che la massa del sole è enormemente superiore a quella dei singoli pianeti, anzi il sole costituisce il 99,8% circa di tutta la massa del nostro sistema solare.

La massa del sole è pari a circa $1,989 \times 10^{30}$ kg mentre la massa

della terra pari a circa $5,972 \times 10^{24}$ kg,
ed eseguendo il rapporto

si ottiene che la massa della terra è pari
allo 0,03% circa di quella

solare.

Il sole non ha massa sufficiente per
reggere la fusione di

elementi più pesanti dell'elio (He),
quindi nel momento che tale

ultimo “combustibile” starà per
esaurirsi, le forze di repulsione

nucleari/elettromagnetiche prevarranno
sulla gravità ed il sole

inizierà ad espandersi lentamente fino a 20-100 volte il suo

raggio attuale, così diventando una Gigante Rossa.

Nella fase di espansione la Gigante Rossa ingloberà tra l'altro

tutti i pianeti del sistema solare, Terra compresa.

Niente preoccupazioni però: il combustibile nel sole si esaurirà

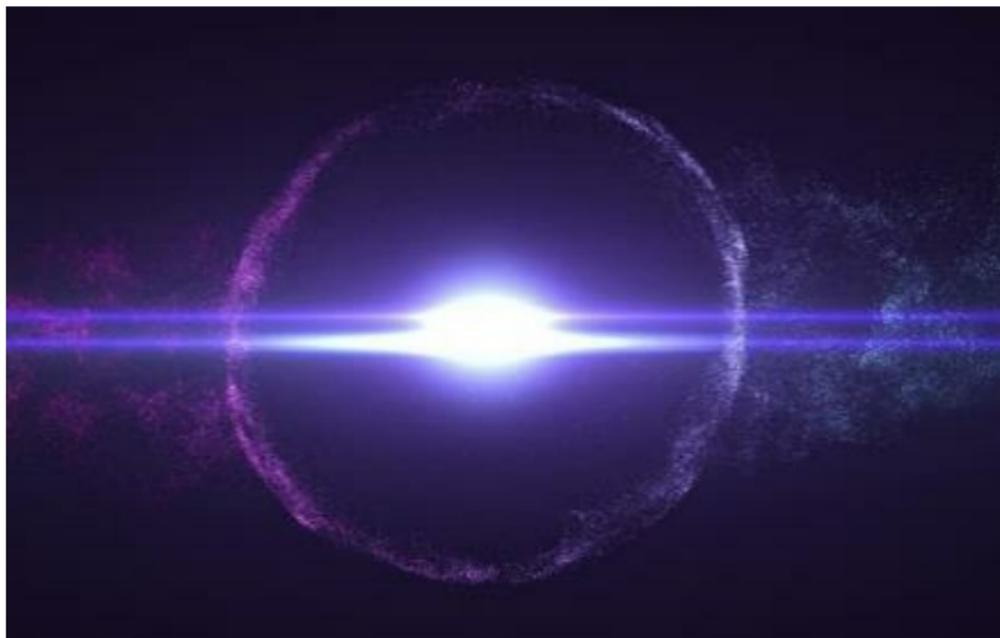
tra circa 5 miliardi di anni.

Dopo aver espulso la parte più esterna la Gigante Rossa subirà

il collasso del nucleo, fino a diventare una Nana Bianca, per poi

spegnersi e diventare una Nana Bruna.

Nel caso, invece, di stelle più massive, almeno di 9 masse solari,



la gravità prevale sulle forze repulsive e fa contrarre la stella, con

aumento di pressioni e temperatura, in modo da riuscire a

fondere gli strati più interni, almeno fino al ferro.

Al termine del combustibile disponibile, diversamente dal sole,

nella stella massiva, può succedere che la gravità tende a

concentrare la massa stellare, facendo diminuire il suo diametro,

fino ad implodere.

Il processo di implosione avviene in pochi secondi, producendo

il liberarsi di onde d'urto che viaggiano ad una velocità di 30.000

Km/s, ovvero pari al 10% della velocità della luce nel vuoto, e

provocano una esplosione degli strati superficiali della stella.

Tale processo di esplosione dura alcune settimane e genera

emissione di energia e radiazioni elevatissime, di entità tale che

per brevi periodi può superare la

luminosità di una
intera galassia.

L'esplosione comporta altresì la
diffusione nello spazio

circostante di tutto il materiale di cui la
stella ne era composta,

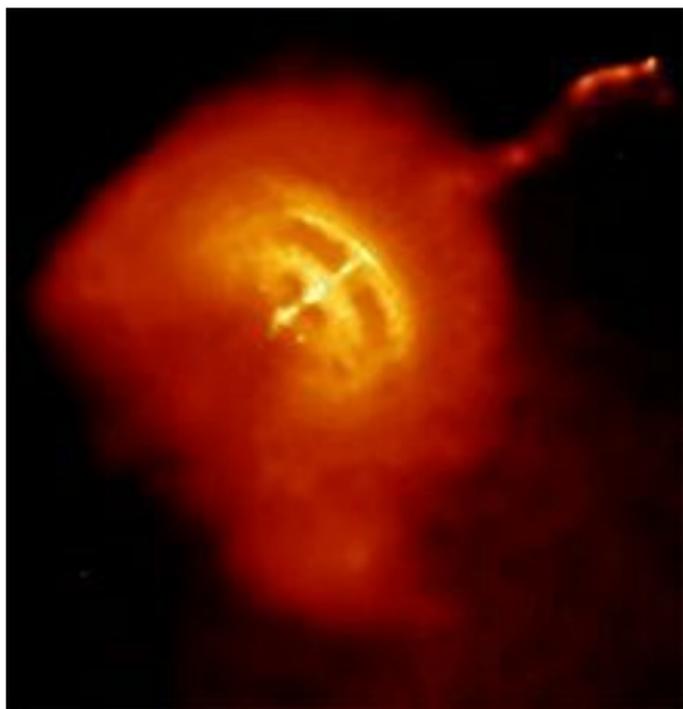
tanto da poter affermare di essere tutti
“figli delle stelle”, almeno

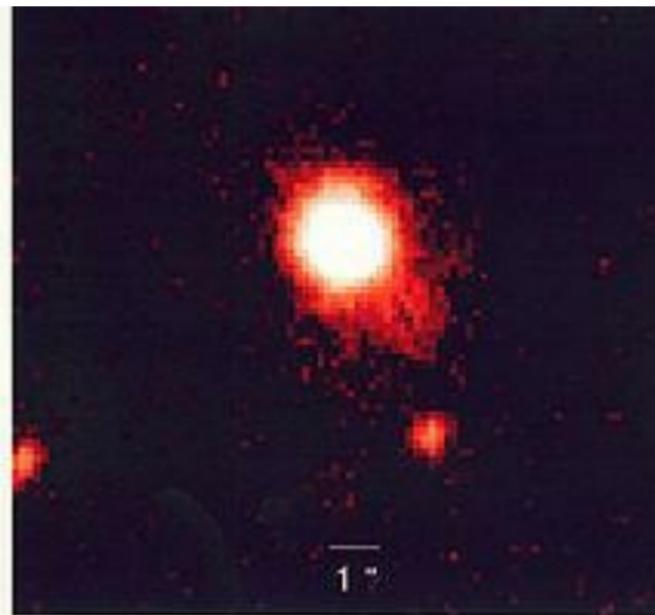
per composizione atomica.

E' bizzarro come proprio nell'ultimo
periodo di vita, prima di

spegnersi, questa stella diventa più

luminosa e raggiante che
mai.







181

In questa fase della sua esistenza, la stella, prende il nome di

“supernova”.

A seguito dell'esplosione resta un
nucleo stellare molto denso,

che in funzione della massa residua
diventa una stella Pulsar, se

costituita da soli neutroni, Quasar se
costituita da soli quark

(particelle elementari costituenti i
neutroni) o nel caso limite

diventa una singolarità denominata
Black Hole (Buco nero).

PULSAR

QUASAR

BUCO NERO

(RICOSTRUZIONE GRAFICA)

Queste particolari entità astronomiche, presentano una comune

caratteristica di avere una elevata densità di massa, ovvero una

enorme quantità di massa concentrata in un volume ridotto.

A differenza dei pianeti che risultano costituiti da atomi, costituiti

da un nucleo centrale ed elettroni orbitanti, e quindi più

voluminosi dei soli neutroni, le Pulsar, ad esempio, costituite da

soli neutroni sotto forma di plasma, presentano un volume

enormemente inferiore, a parità di massa.

Volendo provare a ricavare un dato numerico qualitativo,

ricordando le considerazioni sulle dimensioni dell'atomo

eseguite in precedenza, dove equiparando le dimensioni del

nucleo ad un'arancia, l'elettrone sarebbe

grande come un

granello di sabbia ed il raggio
dell'atomo pari ad 1,00 km,

possiamo ricavare un valore indicativo
del rapporto tra il raggio

atomico medio ed il raggio del neutrone:

182

10^{-10}

$\square =$

$= 10.000,00$

10^{-14}

Questo risultato indica che approssimativamente una stella di neutroni, a parità di massa, presenta un raggio 10.000 volte inferiore a quello di un equivalente pianeta.

In termini di massa considerando che il volume è funzione del raggio al cubo, possiamo ottenere che, a parità di dimensioni, una Pulsar, rispetto ad un pianeta “freddo”, presenta un rapporto di massa pari a

$$(10-10)^3$$

$$y =$$

$$= 10^{12}$$

$$(10-14)^3$$

In definitiva una Pulsar presenta una massa pari a circa Mille

miliardi di volte superiore e quella di un pianeta “freddo”, avente

stesso volume e quindi stesse dimensioni.

Questo enorme valore della massa, a volte, è tale da generare

una contrazione gravitazionale della stella, incrementandone

ulteriormente la densità di massa.

L'elevata massa concentrata in un piccolo volume può essere

talmente elevata da configurare una singolarità, meglio

conosciuta come Black Hole (Buco nero).

L'aggettivo "Nero" deriva dal fatto che nemmeno la luce riesce a

sfuggire all'attrazione gravitazionale, tale da non renderlo

visibile.

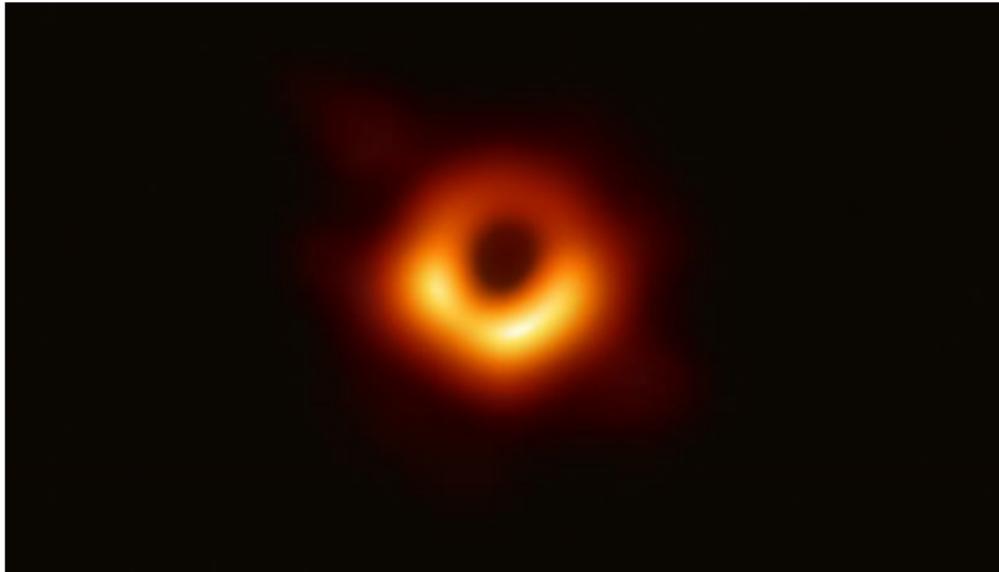
La presenza di buchi neri è stata accertata attraverso studi

gravitazionali dell'universo ed in Aprile 2019 gli scienziati

dell'EHT (Event Horizon Telescope) finanziato dalla

Commissione Europea, con la partecipazione dell'Italia con

l'Istituto Nazionale di Astrofisica (Inaf) e l'Istituto Nazionale di



183

Fisica Nucleare (Infn), hanno dato
annuncio della prima

immagine della fascia più interna che
avvolge un buco nero.

Il buco nero “fotografato” si trova al
centro della galassia M87,

nella costellazione della vergine, a 55 milioni di anni luce da noi,

ed ha una massa stimata in 6.5 miliardi di volte quella del sole.

Secondo la teoria sulla relatività generale (vedi libro stesso

autore “La meravigliosa teoria della Relatività Speciale e

Generale – anno 2018”) oggetti così massivi provocano altresì

una dilatazione dei tempi.

Se riuscissimo, quindi, ad avvicinarci ad un Buco Nero il tempo

scorrerebbe più lentamente ed al nostro
rientro sulla Terra ci

ritroveremmo catapultati nel futuro.

Purtroppo qualsiasi oggetto che si
dovesse avvicinare ad un

corpo

così

massimo

subirebbe

un

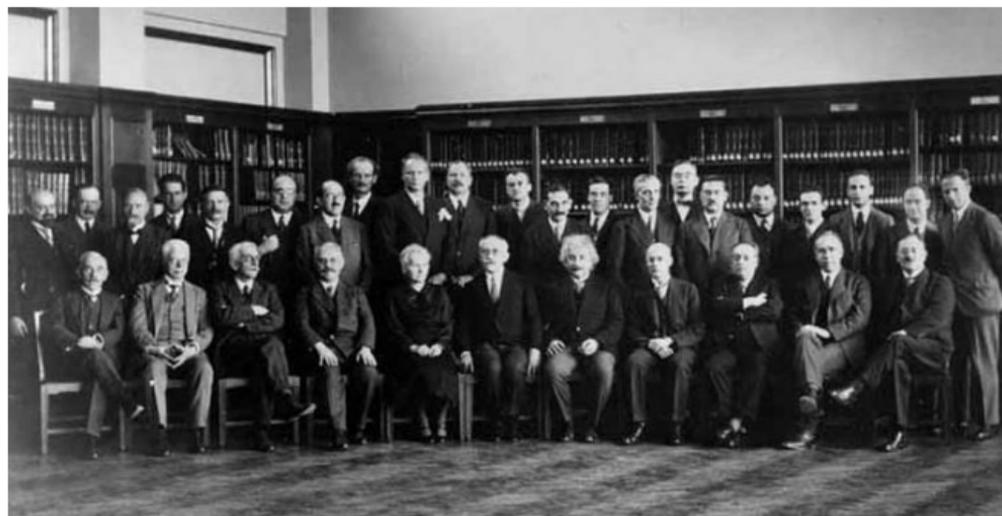
processo

di

spaghetizzazione, ovvero verrebbe
attratto radialmente in

maniera così forte da annullare la
propria struttura fino a renderlo

unidimensionale, proprio come uno
spaghetto.

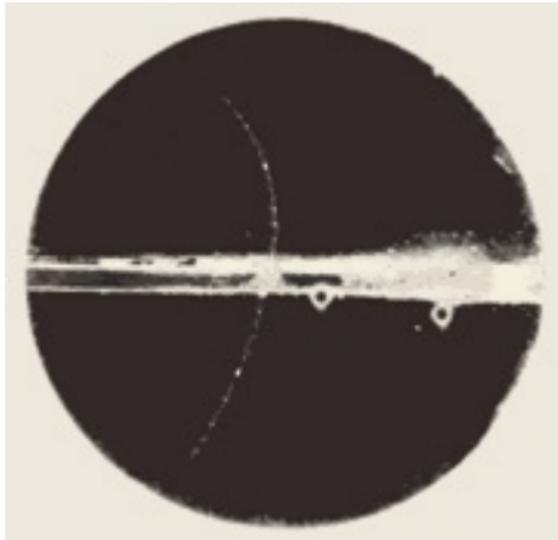


COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

**“La sua teoria, caro signore, è folle.
Ma non è abbastanza
folle da essere vera.”**

NIELS BOHR

[https://www.frasicelebri.it/frasi-
di/niels-bohr/](https://www.frasicelebri.it/frasi-di/niels-bohr/)



185

7 MATERIA E ANTI MATERIA

7.1 L'ANTIMATERIA

Alla fine degli anni '20, il non ancora trentenne Paul Dirac,

impegnato nello studio della teoria quantistica alle alte energie,

e quindi in regime relativistico, scoprì l'esistenza di una nuova

particolare particella di carica opposta a quella dell'elettrone, che

poi risulterà essere proprio una
particella dell'antimateria.

Inizialmente Dirac ipotizzò che tale
particella fosse un protone.

Solo più tardi, nel 1932 Carl Anderson,
un giovane fisico del

California Institute of Technology, riuscì
a fornire una evidenza

concreta dell'esistenza dell'antimateria,
e l'anno successivo

Patrick Blackett e Giuseppe Occhialini
completarono la scoperta,

confermando

la

previsione

teorica

dell'esistenza

di

un'antiparticella dell'elettrone.

La scoperta di Anderson avvenne nel corso di un esperimento

volto a studiare la natura dei Raggi Cosmici, ovvero del flusso di

particelle provenienti dallo spazio che

ad ogni istante colpisce il

nostro pianeta, attraverso lo studio delle
tracce lasciate dalle

stesse particelle nell'attraversamento di
una camera a nebbia.

La camera a nebbia, oggi sostituita da
sistemi tecnologicamente

più evoluti, era un apparato costituito

sostanzialmente da una camera

piena di vapore, in cui il passaggio di

una

particella

carica,

per

ionizzazione,

viene

visualizzato

dall'apparire di una scia di bollicine,

tipo la scia lasciata dagli aerei.

186

Fra tante tracce ordinarie, Andersen ne

identificò una

particolare, che corrispondeva al passaggio di una particella che

deviava in senso opposto all'elettrone, quindi di carica elettrica

opposta, che non poteva essere, per dimensioni, un protone.

Tale particella risultò proprio essere l'anti-elettrone, che lui

stesso denominò positrone, per la caratteristica di avere stessa

massa dell'elettrone ma carica opposta.

Tutto ciò che occupa l'universo è costituito da materia, anti-

materia e vuoto, senza dimenticare che vige l'uguaglianza

materia ed energia e perché no, anti-materia e anti-energia.

La materia è costituita da particelle elementari, non ulteriormente

divisibili, almeno rispetto alle conoscenze attuali.

L'anti-materia rispettivamente è costituita da anti-particelle.

L'esistenza dell'antimateria scaturisce

dalla fondamentale

proprietà di simmetria dell'esistente.

La presenza di materia nell'universo,
implica l'esistenza di altro

tipo di materia, speculare per alcune
proprietà, che ne completa

la simmetria.

Nei primi istanti di creazione
dell'universo, subito dopo in Big

Bang, venne creata in uguale
proporzione Materia ed

Antimateria, che coesistevano in un

mare di radiazione

elettromagnetica.

Negli istanti successivi, a seguito della rottura della simmetria

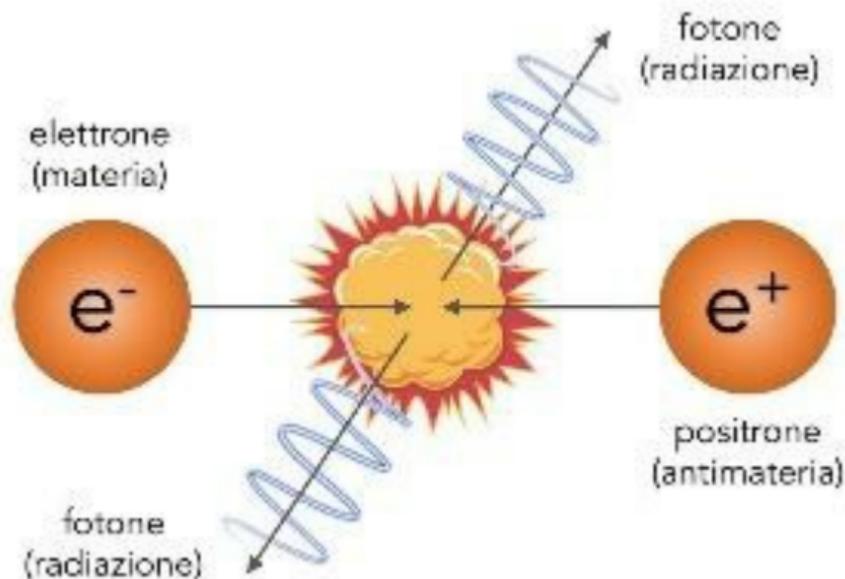
generata, la natura ha privilegiato la materia, nell'ordine di pochi

valori percentuali, tale da far pendere la bilancia verso la

predominanza della materia nell'universo.

Non è da escludere che, considerato le limitate dimensioni

dell'universo conosciuto, pari a circa il 4% dell'esistente, vi sia



187

abbondante antimateria che però non riusciamo a vedere e

quantificare.

Per tale motivo si cercano di studiare i raggi cosmici, per mezzo

di sonde spaziali atte ad eseguire rilevazioni che non possano

essere influenzate dalle azioni perturbatrici dell'atmosfera

terrestre, anche al fine di individuare nell'universo la naturale

presenza, oltre del già noto positrone, di altre particelle di

antimateria o meglio ancora, anti-atomi.

In definitiva, per ogni particella elementare esiste la

corrispondente antiparticella.

Per l'elettrone, ad esempio, esiste il suo antielettrone, chiamato

positrone e^+ , avente stessa massa e stessa carica, ma segno

opposto.

Materia ed antimateria, particelle ed antiparticelle, hanno una

particolarità unica: quando si incontrano svaniscono o meglio si

annichiliscono.

Il processo di annichilazione si manifesta con la formazione di

lampi di luce (fotoni), a seguito del contatto di una particella con

la sua antiparticella.

Un elettrone nell'incontrare un positrone, si annichiliscono con

l'emissione di due fotoni.

Pensate che noi stessi se incontrassimo il nostro anti-io, fatto di

antimateria, spariremmo in un lampo di

luce.

188

7.2 LE PARTICELLE ELEMENTARI

Una particella elementare è una
particella non ulteriormente

divisibile, almeno con riferimento alle
conoscenze odierne.

Le particelle elementari si distinguono
in due macro tipologie:

particelle costituenti la materia ed in
particelle portatrici delle

forze.

Le particelle elementari costituenti la materia, vengono

raggruppati nella famiglia dei FERMIONI, nome assegnato in

onore del fisico italiano Enrico Fermi.

I fermioni interagiscono tra loro, non attraverso fantomatiche

forze a distanza o campi di alcun genere, come previsto dalla

meccanica classica, bensì attraverso delle particolari particelle

portatrici di forze, prive di massa, raggruppate nella famiglia dei

BOSONI.

Fermioni e Bosoni sono i costituenti di tutto l'universo

conosciuto.

Una particella non elementare può avere un comportamento

fermionico se costituita da un numero dispari di fermioni

elementari (quark), in modo che lo spin complessivo risulti

comunque frazionario

$(1/2+1/2+1/2=3/2)$ indipendentemente dal

numero di bosoni.

Nel seguito esamineremo distintamente le due famiglie di

particelle elementari così individuate.

Relativamente alle particelle che presentano massa, si precisa

che tale grandezza, dimensionalmente può essere espressa sia

in Kg che per l'equivalenza massa-energia formulata da

Einstein, $E=mc^2$, in elettronvolt su velocità della luce nel vuoto al

quadrato (eV/c^2). L'elettronvolt (eV) è una unità di misura

alternativa per l'energia che vale $1,602176565 \cdot 10^{-19}$ Joule.

Considerando che $1J = 1 \text{ Kgm}^2/\text{s}^2$ si ottiene

$$\square \square \square^2$$

$$1 \square \square = 1,602176565 \cdot 10^{-19}$$

$$\square^2$$

Dividendo ambo i membri per la velocità della luce al quadrato

$c^2 = [m^2/s^2]$ si ottiene

$\square \square \square 2$

eV

$1,602176565 \cdot 10^{-19}$

1

=

$\square 2$

$= 1,78 \cdot 10^{-36} \square \square$

$\square 2$

$\square 2$

(299.792.458

)

□

e pertanto

eV

1 Kg = $5.61 \cdot 10^{35}$

□2

A titolo di esempio, se una particella presenta una massa pari a

$9,109 \times 10^{-31}$ kg, questa potrà essere espressa come 510.977,00 eV/c² o

meglio come $511 \text{ keV}/c^2$ o infine come $0,511 \text{ MV}/c^2$, avendo introdotto i prefissi kilo e mega.

Quindi nel seguito si indicherà la massa della particella in

maniera equivalente in Kg oppure in eV/c^2 .

190

7.3 I FERMIONI DI I GENERAZIONE

Le particelle elementari di tipo fermionico, relativamente alla sola

materia, che compongono l'universo sono: l'elettrone (e),

neutrino (n), Quark UP (u) e Quark DOWN (d).

Tutte le particelle fermioniche elementari e non, hanno la

comune particolarità di avere valore di spin semi-intero ($1/2$, $3/2$,

$5/2$...), di seguire la statistica di Fermi-Dirac e di obbedire al

principio di esclusione del Pauli.

Esaminiamo nel dettaglio ciascuna delle particelle elementari

costituenti la materia.

La prima particella fermionica che andremo ad esaminare è

proprio “**l’elettrone (e)**”, che se ricordate è la particella danzante nell’orbitale quantistico atomico.

L’elettrone ha carica negativa, pari a $-1.621 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, se misurata

in Colulomb, ed indicata con $Q = -1$ considerando la carica dello

stesso elettrone come carica di riferimento o meglio come carica

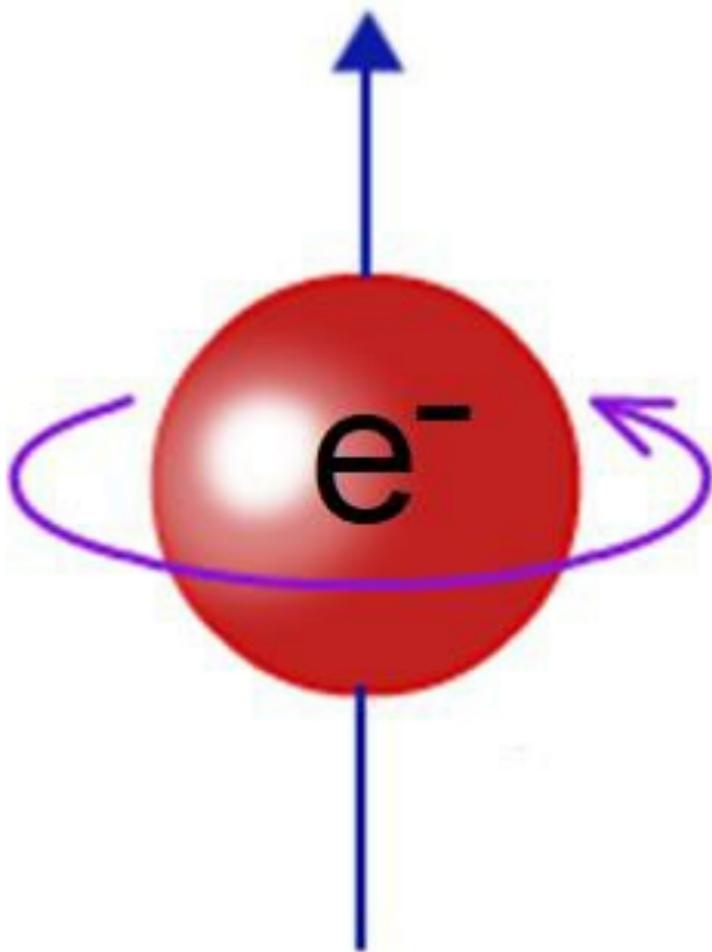
elementare.

La caratteristica propria di avere carica negativa, comporta che

un flusso di elettroni liberi, genera corrente elettrica.

L'elettrone ha numero quantico di spin pari a $s=1/2$, come tutte le

altre particelle elementari appartenenti alla famiglia dei fermioni.



191

L'elettrone presenta una massa molto

piccola, il suo peso risulta

essere $1/1836$ quello del più pesante protone, ed in media gli

elettroni costituiscono solo lo $0,06\%$ circa,

del peso di un atomo.

Considerando la teoria della relatività

ristretta, la massa a riposo di un elettrone

è pari a circa $9,109 \times 10^{-31}$ kg.

Il raggio dell'elettrone è pari a circa 10^{-22}

metri.

Proseguendo, in ordine così come riportate all'inizio del

paragrafo, troviamo il “**neutrino (n)**”, particella caratterizzata

dall'averne una massa piccolissima, tanto che inizialmente si

pensava non ne avesse.

Il nome “neutrino” nasce come diminutivo scherzoso del più

grande neutrone.

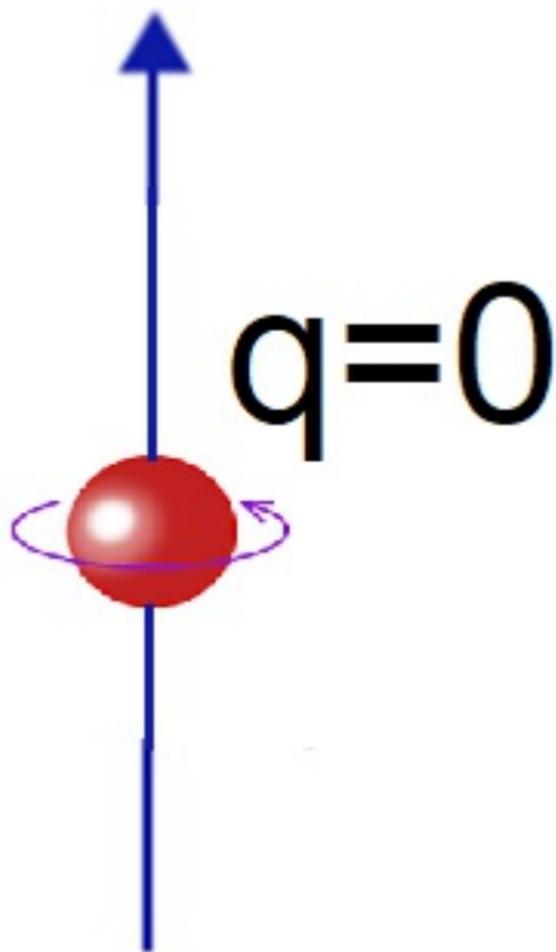
La sua massa è da centomila a un

milione di volte inferiore a
quella dell'elettrone.

Essendo un fermione elementare il suo
numero quantico di spin
è pari a $s=1/2$.

La carica è neutra, $Q = 0$, quindi
indifferente ai campi

elettromagnetici, ed è proprio per tale
motivo che è di difficile
individuazione.



192

Abbiamo visto nei capitoli precedenti

come esso viene generato

nei processi di decadimento, specie a seguito dei processi di

fusione nucleare nelle stelle, proseguendo

indisturbato, per assenza di carica, il suo

cammino alla velocità della luce.

In questo momento noi siamo investiti da un

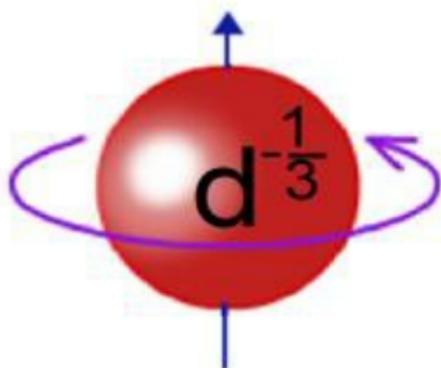
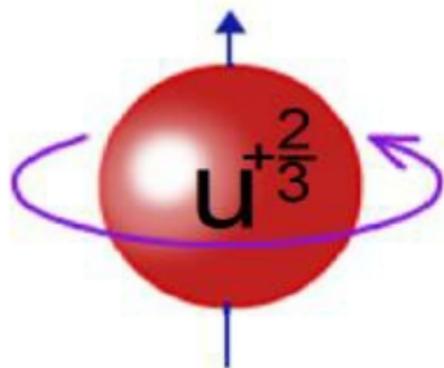
numero pari a 10 miliardi di neutrini al secondo, provenienti solo dal Sole in un

tempo pari a 8 minuti.

Elettroni e neutrini appartengono al gruppo dei **Leptoni**, termine

derivante dal greco Lepto (sottile) proprio per indicare la loro

leggerezza.



Proseguendo nella descrizione delle particelle elementari

troviamo i “**quark up (u)**” e “**quark down (d)**”.

I quark up e down, indicati con le lettere *u* e *d*, rappresentano i

componenti dei neutroni e dei protoni.

La massa del quark up è da circa 3 a 8 volte la massa

dell'elettrone, ed il quark down da circa 8 a 16 volte.

In rapporto al protone il quark up risulta avere una massa pari a

circa, da $1/200$ a $1/600$, ed il quark down da $1/100$ a $1/200$.

La carica elettrica del quark è di tipo frazionaria.

La carica del quark up è pari a $+2/3$, mentre la carica del quark

down è pari a $-1/3$.

Il numero quantico di spin è anche in questo caso pari a $1/2$.

Altra caratteristica dei quark è la carica di colore che meglio

analizzeremo nel seguito quanto tratteremo i gluoni.

In natura i quark u e d, in natura, non si trovano in maniera isolati,

ma come costituenti il neutrone ed il protone.

Un protone è costituito da due quark up ed un quark down, tale

che la carica elettrica del protone costituito è pari a uno.

2

1

$$2 \square\square + \square\square = \square\square\square\square\square\square\square\square \Rightarrow$$

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

3

3

Un neutrone, invece, è costituito da un quark up e due quark

down, tale che la carica elettrica del neutrone così costituito è

pari a zero.

2

1

$$\begin{aligned}
 & \square\square + 2 \square\square = \square\square\square\square\square\square\square\square \Rightarrow + \\
 & 2(-) = 0
 \end{aligned}$$

3

3

194

7.4 LE GENERAZIONI SUCCESSIVE DEI FERMIONI

Le particelle sin qui esaminate
appartengono alla prima

generazione di fermioni, che
costituiscono la parte di materia più

stabile e che quindi normalmente e
facilmente troviamo in

natura.

In realtà, le generazioni di fermioni conosciute in totale sono pari

a 3.

Le successive due generazioni hanno massa più elevata e

quindi anche energia, e per tale motivo risultano più instabili e

più soggette a veloce decadimento.

Infatti le particelle di II e III generazione vengono prodotte

artificialmente negli scontri negli acceleratori o prodotto nello

spazio e rilevate nei raggi cosmici, ed hanno vita breve,

decadendo in particelle della I generazione.

Con riferimento ai Leptoni (Elettrone e neutrino), di I

generazione, troviamo come II generazione: **neutrino muonico**

(ν_{μ}) e **muone** (μ), ed infine come III generazione: **neutrino**

tauonico (ν_{τ}) e **tauone** (τ).

Per quanto riguarda i Quark (quark up e quark down), di I

generazione, troviamo come II
generazione: **Quark charm (c)** e

Quark strange (s), ed infine come III
generazione: **Quark top**

(t) e **Quark bottom (b)**.

Le particelle elementari costituenti la
materia sono quindi pari a

12, raggruppare in 3 generazioni e
distinte in quark e leptoni, il

tutto meglio esplicitato dalla figura che
segue.

FERMIONI

	I	II	III
massa →	2,4 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	171,2 GeV/c ²
carica →	2/3	2/3	2/3
spin →	1/2	1/2	1/2
nome →	u up	c charm	t top
Quark	4,8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4,2 GeV/c ²
	-1/3	-1/3	-1/3
	1/2	1/2	1/2
	d down	s strange	b bottom
Leptoni	<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²
	0	0	0
	1/2	1/2	1/2
	ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico
0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²	
-1	-1	-1	
1/2	1/2	1/2	
	e elettrone	μ muone	τ tauone

Per ogni particella elementare
costituente la materia così

individuata, esiste una corrispondente
particella di antimateria,

avente stessa denominazione con il
prefisso anti, stessa massa

e carica opposta.

In definitiva le particelle elementari di
materia ed antimateria in

totale sono pari a 24.

7.5 I BOSONI

I Bosoni sono particelle mediatrici di forza, obbedenti alla

statistica di Bose-Einstein e sono caratterizzate dall'aver un

valore di spin di tipo intero (0, 1, 2 ...).

I bosoni, a differenza dei fermioni, che devono obbedire al

principio di esclusione del Pauli, sono liberi di occupare in gran

numero uno stesso stato quantico (livello energetico).

Come già detto in precedenza, particelle composte che

contengono un numero pari di fermioni, assumono un

comportamento di tipo bosonico, avendo come risultato valore di

spin complessivo intero.

Invece, particelle composte da bosoni, avendo sempre spin

complessivo intero, continuano ad essere sempre bosoni.

Le particelle elementari di tipo bosonico che compongono

l'universo, vengono distinte in due tipi.

Nel primo tipo rientrano i bosoni di gauge, che sono bosoni

vettoriali e come tali caratterizzati da verso, intensità e direzione.

Nel secondo tipo rientrano i bosoni di tipo scalare.

I bosoni di gauge o vettoriali sono distinti in tre tipi: **fotone (g)**,

gluone (g), e **bosoni** della forza debole (**Z⁰** e **W[±]**).

Il bosone scalare è invece rappresentato dal più famoso **bosone**

di Higgs.

Esaminiamo ciascuna delle particelle elementari portatrici di

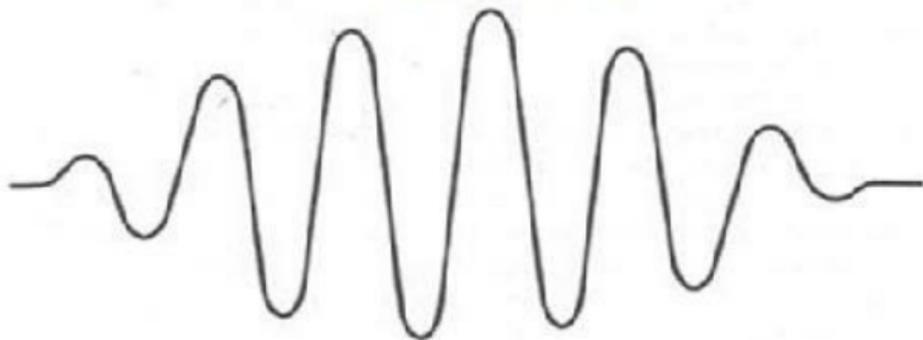
forza.

Il primo tra i bosoni di gauge, di tipo vettoriale, è il fotone, indicato

con la lettera greca g , che rappresenta un quanto di energia

elettromagnetica, ed è il mediatore della forza elettromagnetica.

FOTONE



197

La forza elettromagnetica costituisce una delle quattro

interazioni fondamentali ad oggi conosciute, così distinte:

interazione elettromagnetica, interazione nucleare forte,

interazione nucleare debole e
interazione gravitazionale.

L'interazione elettromagnetica si
manifesta per il tramite del

fotone, ed ha la caratteristica di avere un
raggio d'azione infinito.

Il fotone è privo di massa, ha carica
elettrica nulla, spin pari a 1,

ed è di tipo stabile ovvero non
decadendo spontaneamente

ha vita media infinita.

Avendo il fotone sia massa che carica
nulla, la sua antiparticella

è rappresentata proprio dallo stesso fotone.

A seguire nell'elenco dei bosoni di gauge, troviamo il gluone,

indicato con la lettera g , che è il portatore dell'interazione

nucleare forte che, analogamente al fotone, ha massa e carica

elettrica nulla ed in quanto bosone elementare, valore di spin pari

a 1.

L'interazione nucleare forte è caratterizzata dall'averne un raggio

di azione ridottissimo, dell'ordine di $1,4 \cdot 10^{-15}$ m, ma una elevata

intensità, da cui per l'appunto l'aggettivo forte.

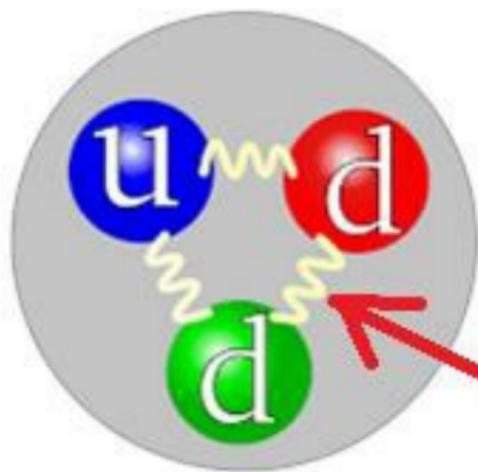
Il termine gluone deriva dall'inglese "glue" (colla) in quanto

responsabile di tenere incollati alcune particelle elementari al

fine di costituire particelle composte.

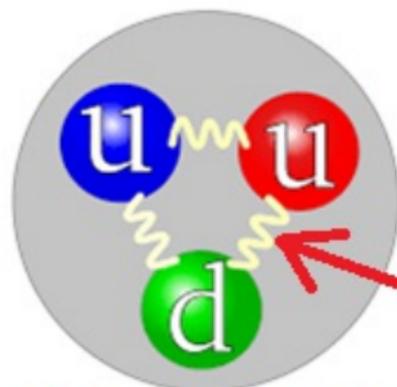
In particolare il gluone tiene incollati i quark, unendoli in triplette

per la costituzione di neutroni e protoni.



GLUONE

NEUTRONE



GLUONE

PROTONE

Il protone, come già in precedenza visto, è composto da due

quark up ed un quark down, tale da avere una carica totale pari

a $+1$, tenuti insieme appunto da tre gluoni.

Nel neutrone, invece, troviamo un quark up e due quark down,

tale da avere una carica totale pari a zero, tenuti insieme da tre

gluoni.

Nell'interazione dei gluoni, viene introdotta una ulteriore

proprietà, che è la carica di colore.

La carica di colore non ha nulla a che vedere con i colori percepiti

dall'occhio umano, ma è una caratteristica simile alla carica

elettrica, meglio descritta in cromodinamica quantistica (QCD).

La carica di colore, ad esempio, è usata per descrivere

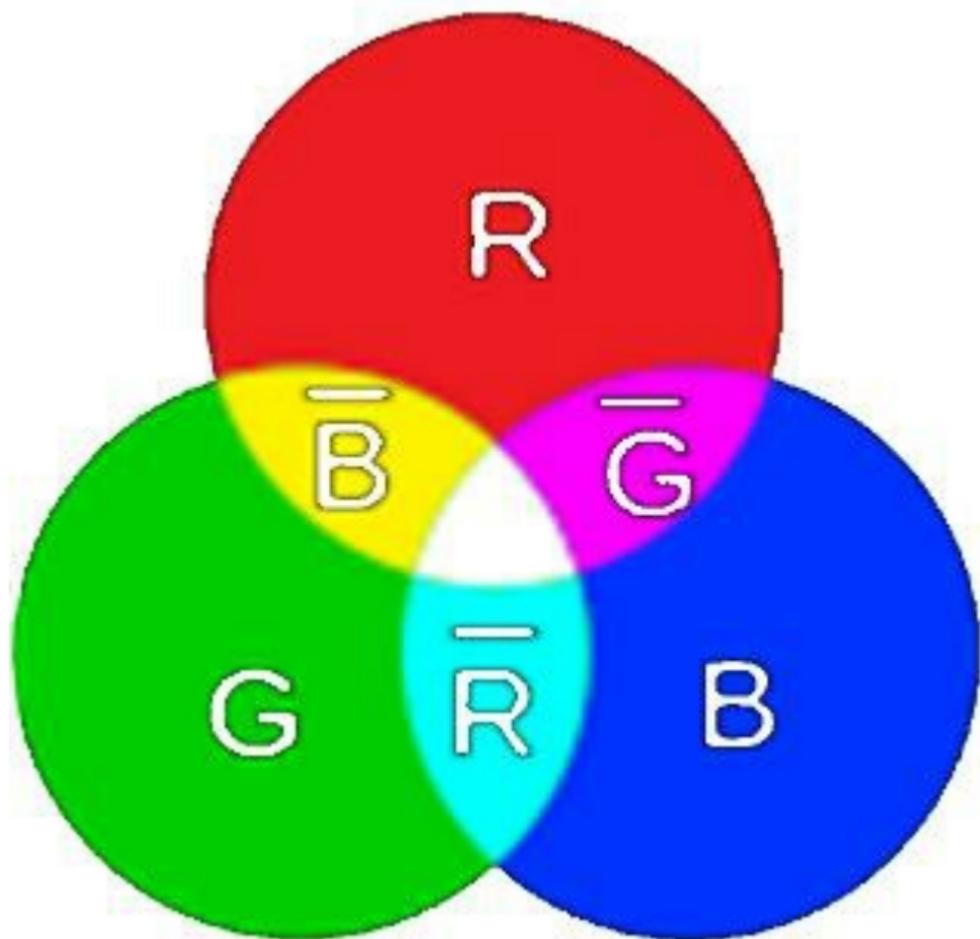
convenzionalmente gli scambi energetici, tra gluoni e quark, ed

è una caratteristica sia dei quark che dei gluoni.

I quark hanno solo una componente di colore, mentre

rispettivamente gli anti-quark, nel caso dell'antimateria, una solo

componente di anti-colore.



199

I gluoni, invece, hanno una mescolanza

di due componenti di

carica di colore: un colore ed un anti-colore.

Ciascuna componente di colore è chiamata R , G , B

rispettivamente come le iniziali del nome dei colori in lingua

inglese: Red (rosso), Green (verde) e Blue (blu).

Rispettivamente le componenti di anti-colore saranno indicati

con \bar{R} (anti-rosso), \bar{G} (anti-verde), \bar{B} (anti-blu) e rappresentati

con i colori ciano, magenta e giallo.

Nel corso dell'interazione con i quark, i gluoni, in considerazione

della carica di colore posseduta, oltre a tenerli legati, in quanto

portatori della forza nucleare forte, diventano anche portatori di

colore, scambiando così la carica di colore dei quark o anti-

quark.

Nel protone e nel neutrone si verifica un continuo scambio di

carica di colore, ad opera dei gluoni,
sempre nel principio di

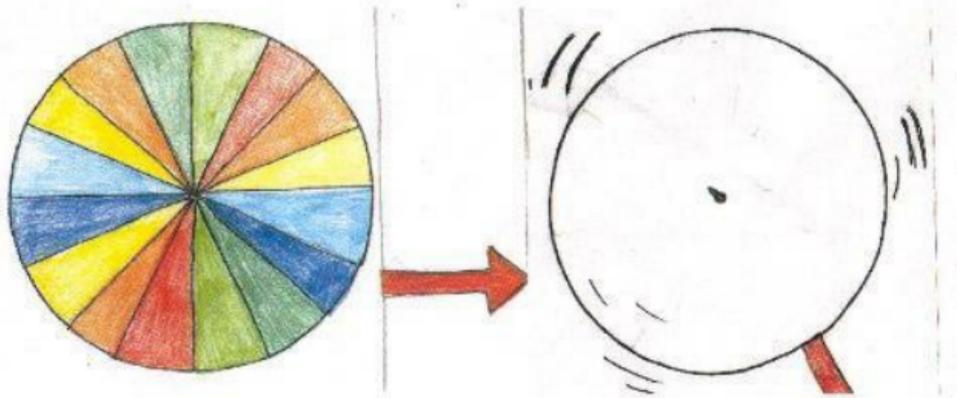
conservazione della carica di colore
totale, che resterà invariata.

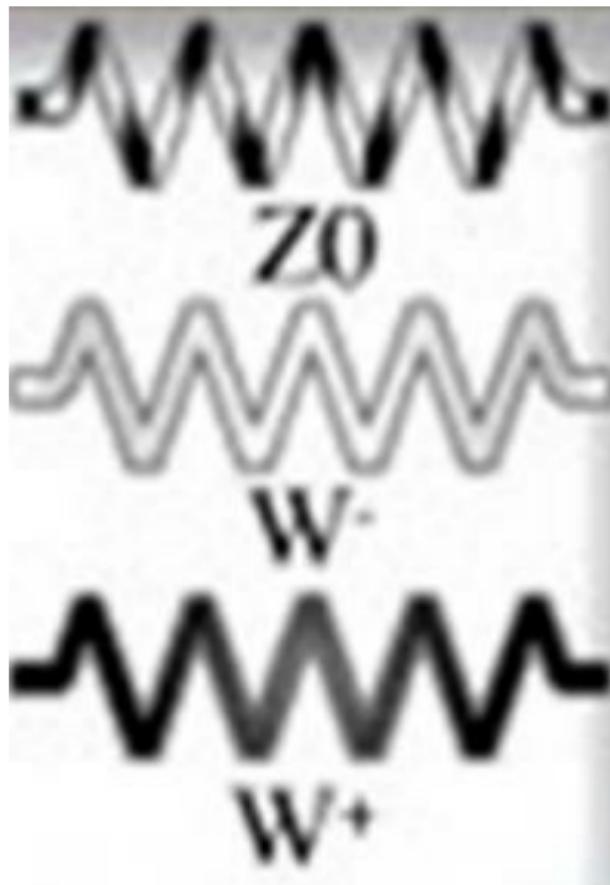
In analogia a quanto accade in
meccanica classica, facendo

ruotare il disco di Newton, succede che
la sovrapposizione dei

tre colori R, G, B darà luogo ad assenza
di colore, ovvero il

colore bianco.





200

In definitiva questo implica che sia il protone che il neutrone, pur

essendo costituiti da tre quark di colore R, G, B, globalmente

appaiono non avere una carica di colore, ovvero appaiono di

colore bianco, che in realtà è il risultato di una continua danza

d'arcobaleno tra quark ad opera dei gluoni.

Come ultima tipologia dei bosoni di gauge, troviamo i bosoni Z^0

e W^\pm , portatori della forza nucleare debole.

L'aggettivo

debole

è

conseguenza

dell'intensità di tale forza nucleare, pari a circa

100.000 volte inferiore all'interazione forte.

Il valore di spin per entrambi, essendo bosoni,

è pari ad un numero intero e nel caso specifico

pari a 1.

Detti bosoni Z^0 e W^\pm a differenza dei precedenti sono massivi,

con una massa rispettivamente pari a circa 80 e 90 GeV/c^2 .

A causa della loro elevata massa questi bosoni hanno una breve

vita media, pari a circa 3×10^{-24} secondi.

Mentre il bosone Z^0 ha carica nulla, il bosone W^\pm può avere

carica +1 o -1, per cui l'interazione mediata dal bosone Z^0 è detta

“a corrente neutra” e l’interazione mediata dal bosone W^{\pm} è detta

“a corrente carica”.

Nel corso dell’interazione a corrente carica, succede che una

particella si trasforma (decade) in altre particelle con carica

differente.

Ad esempio un elettrone, avente carica negativa, può emettere

un Bosone W^- e diventare un neutrino, oppure può assorbire un

bosone W^+ e trasformarsi comunque in un neutrino, come meglio

nel seguito schematizzato.

$$\square \Rightarrow \square - + \square$$

$$\square + \square + \Rightarrow \square$$

La forza debole per il tramite dei bosoni Z^0 e W^\pm , è responsabile

del

fenomeno

della

radioattività

ed

in

particolare

del decadimento beta dei nuclei atomici
ad esso associato.

Analizziamo, per meglio comprendere la
presenza di detti

bosoni, il processo di decadimento β^- di
un neutrone, già

precedentemente trattato con la
radioattività



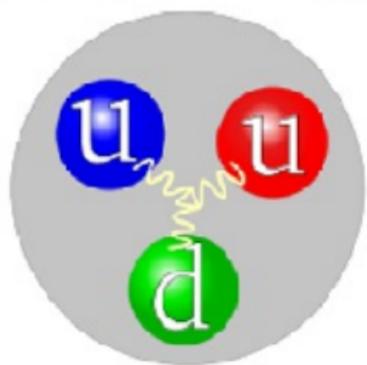
$\square \rightarrow \square + \square - + \square \square$

Esaminiamo nel dettaglio cosa succede a livello di particelle

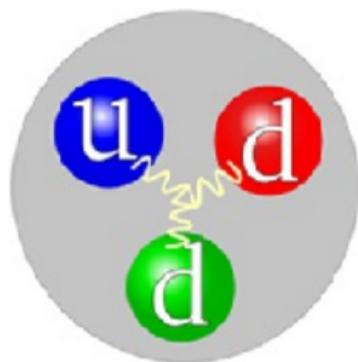
elementari, ovvero cosa accade all'interno del neutrone e del

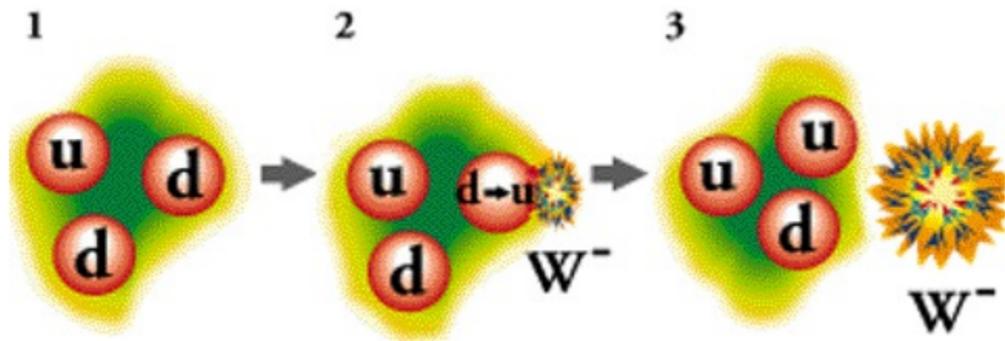
protone.

PROTONE



NEUTRONE





202

Il neutrone abbiamo visto essere costituito da due quark down

ed un quark up, tenuti insieme dai gluoni.

Affinché un neutrone possa decadere in un protone è necessario

che un quark down si trasformi in un quark up,

Considerato che il quark d ha carica ha carica $-1/3$ ed il quark u

ha carica $+2/3$, per bilanciare l'equazione sarà necessaria

l'emissione di un bosone W^- , avente carica negativa pari a -1 , in

modo tale che $-1/3 - (-1) = 2/3$.

In termini di particelle elementari

$\square \square \square \square \square \square \square \square$

$\square \rightarrow \square + \square^-$

Il processo di decadimento del neutrone viene meglio illustrato

graficamente come segue.

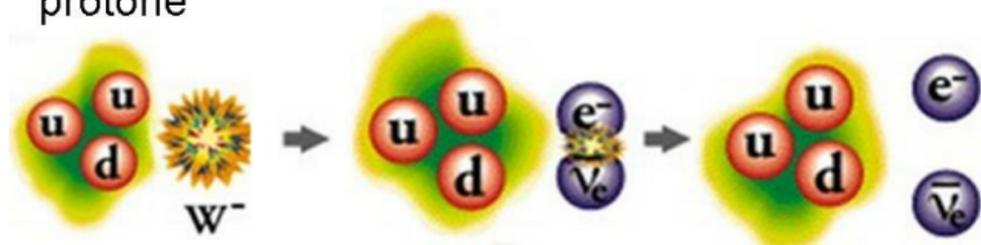
Il bosone W^- , come detto in precedenza ha però vita breve e

decade in un elettrone ed un anti-neutrino

□ □ □ □ □ □ □ □

□ - \rightarrow □ - + □ □

protone



0
0
1

Y

fotone

0
0
1

g

gluone

91,2 GeV/c²

0
1

Z⁰

forza
debole

80,4 GeV/c²

±1
1

W[±]

forza
debole

125.09 GeV/c²

0
0

H

higgs

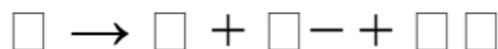
Bosoni di gauge

Bosone scalare

In definitiva la reazione di decadimento complessiva è sempre la

stessa, ricordando però che la stessa nasconde un decadimento

intermedio con la presenza del bosone W^- .



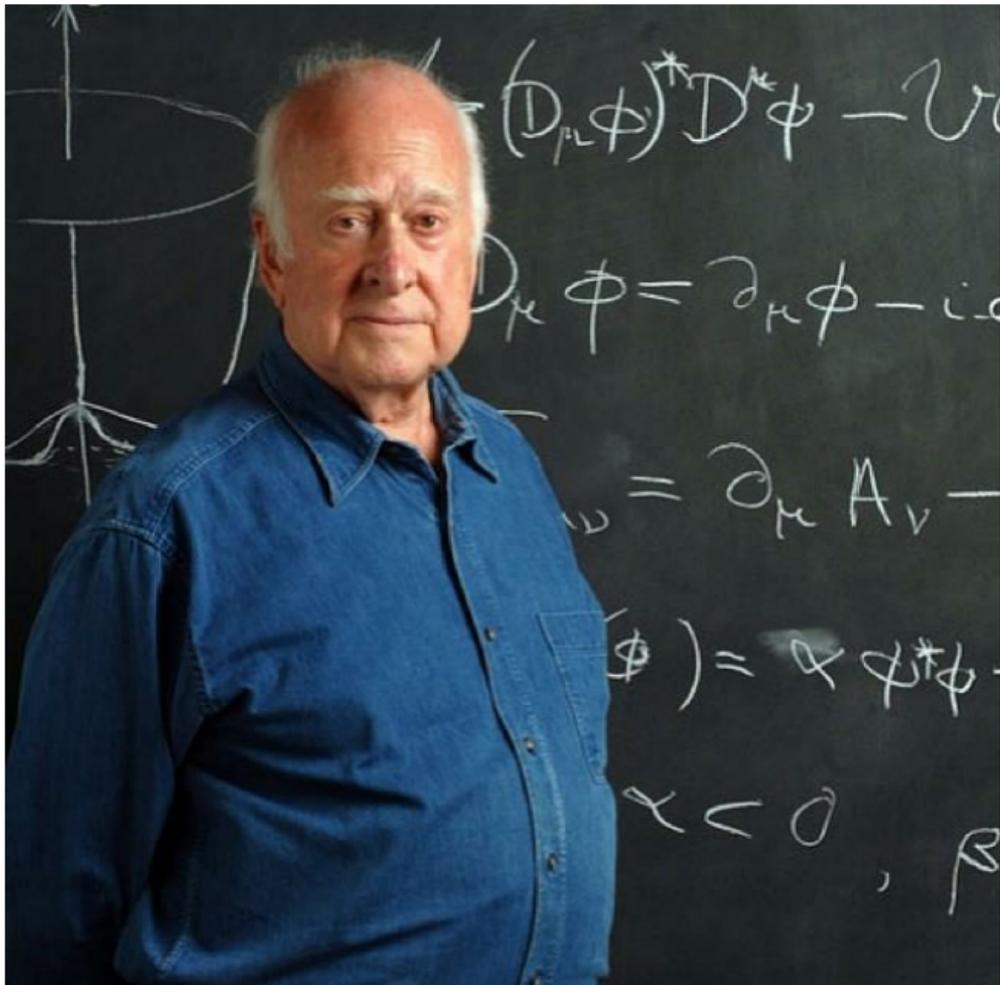
A titolo di riepilogo la tabella che segue sintetizza la tipologia dei

bosoni conosciuti, distinti in bosoni

vettoriali o di gauge e bosoni
scalari.

Il Bosone di Higgs sarà opportunamente
trattato nel paragrafo

che segue.



204

COMMONS.WIKIMEDIA.ORG

“Quando si lavora su una teoria già chiara ma di cui

bisogna definire i dettagli, conviene lavorare in gruppo. Ma

se si è in un momento di svolta, meglio lavorare da soli.”

PETER HIGGS

<https://www.frasicelebri.it/frasi-di/peter-higgs/>





205

7.6 IL BOSONE DI HIGGS

Il bosone di Higgs è un bosone di tipo scalare, molto massivo,

con carica nulla, spin intero pari a zero e la sua antiparticella è

uguale alla sua stessa particella.

Questo bosone essendo di tipo scalare, a differenza di altri

bosoni vettoriali, non è mediatore di forza bensì è mediatore di

massa.

Per tale motivo il bosone di Higgs è il responsabile della massa

di tutte le particelle elementari.

Il suo nome è in onore del fisico britannico

Peter

Ware

Higgs che

risolse

teoricamente nel 1964 la problematica

relativa

alla

provenienza

della

costituzione della massa nelle particelle

elementari, introducendo teoricamente,
un campo scalare complesso ed una
nuova particella: il campo
ed il bosone di Higgs.

Il campo di Higgs è un campo scalare
complesso che negli istanti
successivi al Big Bang, in
termini di milionesimo di
secondo,
ha
permeato

istantaneamente lo spazio.

In tali istanti, le particelle

esistenti,

originariamente

prive di massa, interagirono con questo campo di tipo scalare,

per mezzo della mediazione del quanto associato che è proprio

il bosone di Higgs, e da tale interazione però non nacquero forze

di alcun tipo, ma si verificò trasferimento di energia.

Per l'equivalenza massa-energia, il trasferimento di energia

conferì massa inizialmente ai bosoni di gauge di tipo W^\pm e Z^0 ,

mentre il fotone ed il gluone rimasero senza massa.

Successivamente la massa venne conferita anche ai fermioni

(quark e leptoni).

Il conferimento di massa a dette particelle elementari, ne

provocò il loro rallentamento, in quanto,
per la teoria della

relatività ristretta, gli venne inibita la
possibilità di poter

continuare a viaggiare alla velocità
della luce.

Il bosone così come previsto trova
conferma sperimentale

attraverso la sua osservazione attraverso
l'acceleratore di

particelle LHC del CERN dagli
Esperimenti ATLAS e CMS.

In un annuncio dato il 4 Luglio 2012, in

una conferenza tenuta

nell'auditorium del CERN, alla presenza di Peter Higgs, veniva

annunciata la scoperta di una particella compatibile con il

bosone di Higgs, la cui massa sperimentalmente risultava pari a

circa $126,5 \text{ GeV}$ - $125,3 \text{ GeV}$.

Tale scoperta ha portato la comunità scientifica internazionale a

conferire a Peter Higgs il premio Nobel per la Fisica nel 2013.

Il bosone di Higgs è noto anche come la "Particella di Dio", il

quale nome deriva dal cambiamento dell'originario soprannome

di "particella maledetta" (Goddamn particle), scelto dall'autore in

riferimento alla difficoltà della sua individuazione, da parte della

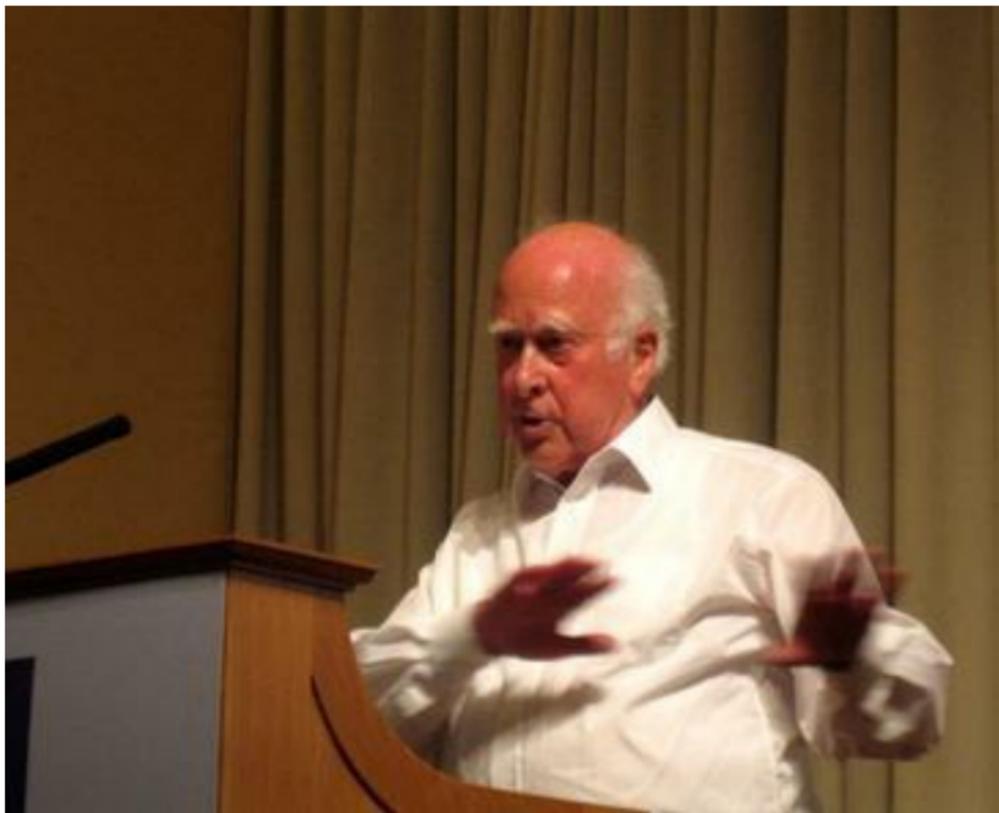
casa editrice del titolo di un libro di fisica divulgativa di Leon

Lederman. In merito a tale appellativo, Higgs ha dichiarato di non

condividere questa espressione,

trovandola potenzialmente

offensiva nei confronti delle persone di fede religiosa.



“Io sono ateo, ma ho la spiacevole sensazione che giocare

con nomi del genere potrebbe essere inutilmente offensivo

per coloro che sono religiosi.”

riferendosi a chi soprannominò
'Particella di Dio' la particella da

lui ipotizzata

PETER HIGGS

<https://www.frasicelebri.it/frasi-di/peter-higgs/>

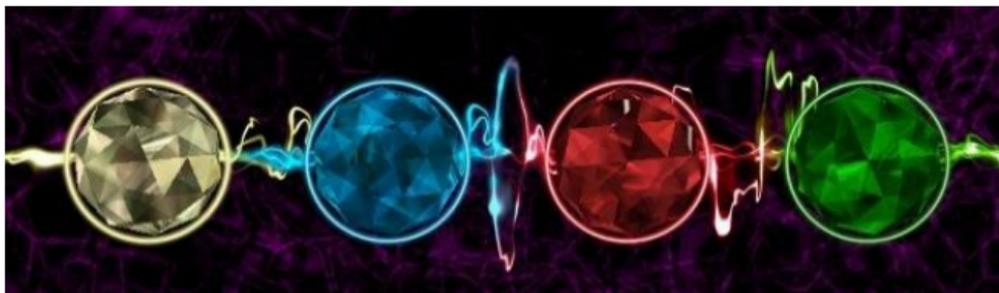
FERMIONI

BOSONI

	I	II	III		
massa →	2,4 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	171,2 GeV/c ²	0	125,09 GeV/c ²
carica →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
nome →	u up	c charm	t top	γ fotone	H higgs
	4,8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4,2 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
Quark	d down	s strange	b bottom	g gluone	
	<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²	91,2 GeV/c ²	
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico	Z⁰ forza debole	
	0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²	80,4 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
Leptoni	e elettrone	μ muone	τ tauone	W[±] forza debole	

Bosone scalare

Bosoni di gauge



7.7 IL BOSONE GRAVITONE

Le particelle elementari ad oggi note e secondo la classificazione

del modello standard sono riassunte nella tabella che segue:

Resta fuori dalla precedente classificazione un ulteriore bosone

denominato “gravitone”, avente massa nulla, carica nulla, spin

pari a 2 e raggio d'azione infinito.

In realtà detto gravitone ad oggi è solo un'ipotesi non avendo

ancora avuto alcun riscontro sperimentale.

209

La sua ricerca si fonda sul tentativo di unire la teoria

gravitazionale con la teoria della meccanica quantistica.

Infatti il gravitone dovrebbe essere responsabile della

trasmissione della forza di gravità.

Quindi il gravitone andrebbe a mediare la forza di gravità del tipo

attrattiva tra due corpi posti a qualsiasi distanza, attraverso

continui scambi nel limite della velocità della luce così come

richiesto dalla teoria della relatività ristretta, diversamente dalla

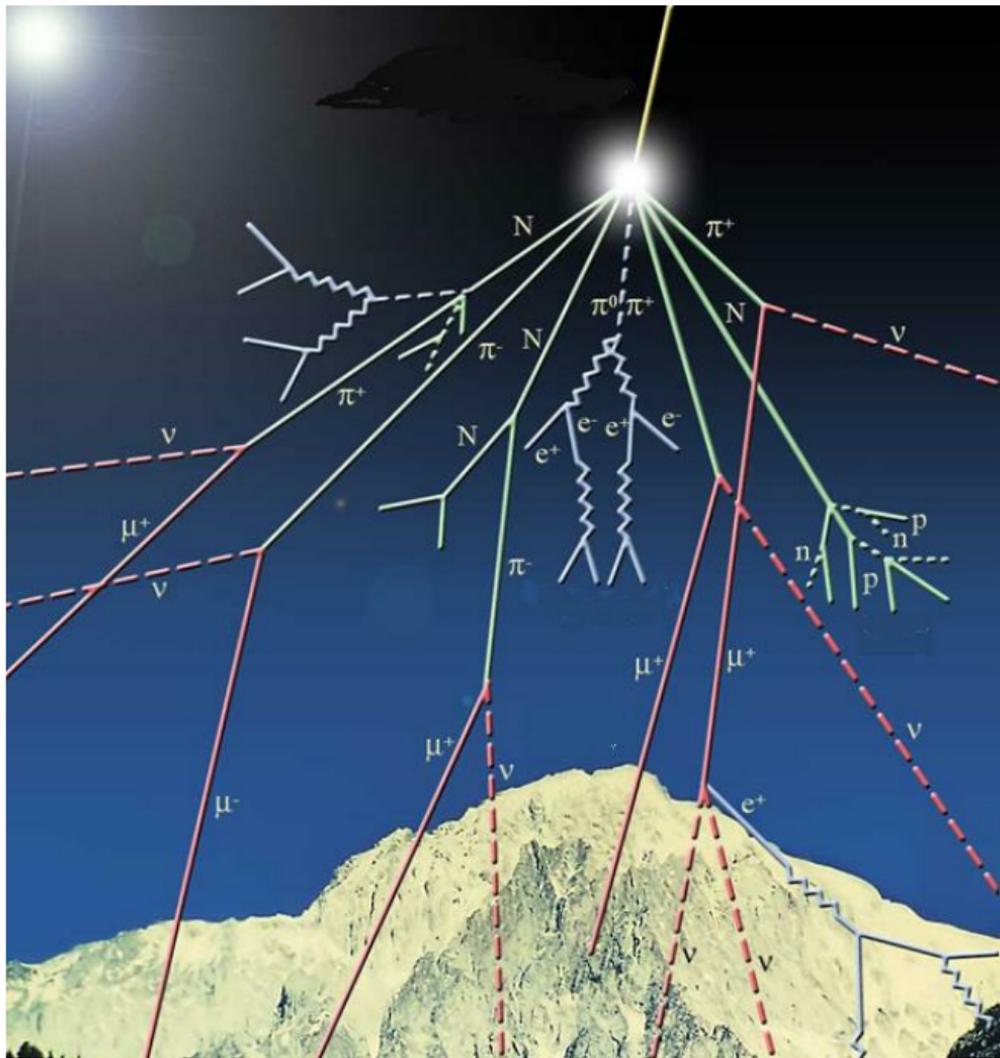
formazione del campo gravitazionale previsto dalla teoria

classica.

La problematica principale è insita nella rilevazione del

gravitone, in quanto tale particella,
qualora esistesse, avrebbe

un livello di interazione molto debole.



8 ACCELERATORI DI PARTICELLE

Le particelle elementari, e non solo, si possono osservare

attraverso i raggi cosmici
(impropriamente detti “raggi”),

provenienti dall’universo e diretti sulla
superficie terrestre.

L’universo in tal senso è una fucina di
particelle elementari.

Il limite di osservazione dei raggi
cosmici è dato dall’interazione

delle particelle costituenti con gli strati dell'atmosfera terrestre,

ecco perché si cerca di studiare detti raggi cosmici oltre

l'atmosfera terrestre con l'invio di opportune sonde spaziali.

Esiste un altro modo di ricercare artificialmente le particelle

elementari.

A tale scopo è necessario però creare valori di energia elevati,

al fine di simulare quanto avviene nell'universo e nei raggi

cosmici.



211

E' possibile creare elevati valori di energia cinetica, intervenendo

sulla velocità delle particelle, accelerandole in appositi

“acceleratori” sia di tipo circolare che lineari.

In un acceleratore lineare (LINAC) le particelle sono accelerate

lungo un percorso rettilineo contro un bersaglio fisso. Gli

acceleratori lineari sono molto comuni, per esempio un tubo a

raggi catodici è un acceleratore lineare di elettroni. Questi

acceleratori sono usati anche per fornire l'energia iniziale alle

particelle che saranno immesse in

acceleratori circolari più

potenti. L'acceleratore lineare più lungo al mondo è lo Stanford

Linear Accelerator, che è lungo 3 chilometri.

Gli acceleratori circolari hanno una forma toroidale.

In tali acceleratori, confinando opportunamente le particelle

originarie immerse con campi elettromagnetici, grazie alla

possibilità di un moto periodico, è possibile ottenere elevati

velocità procedendo ad una accelerazione continua.

Dopo che le particelle acquisiscono velocità e quindi energia

opportune si procede a provocare il loro scontro.

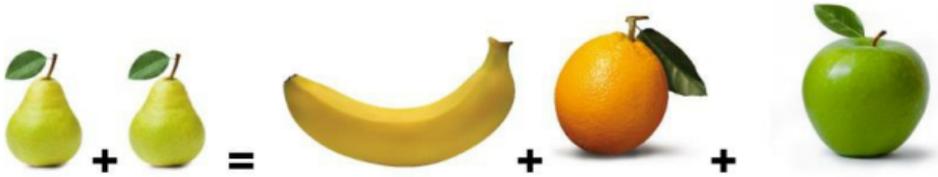
Da detto scontro di particelle altamente energetiche, succede

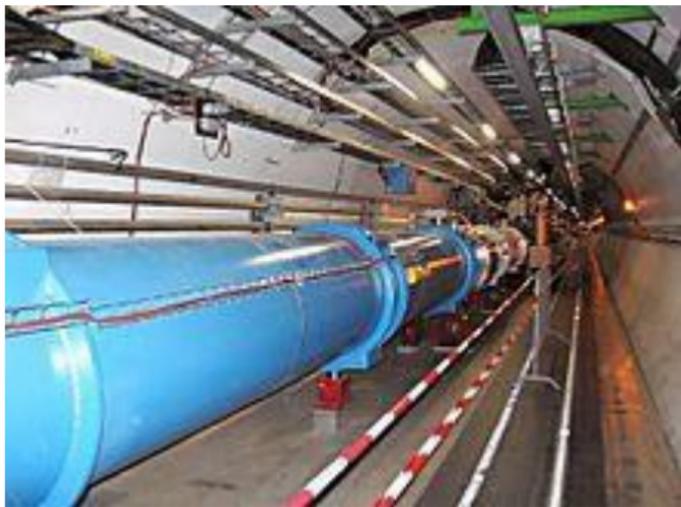
qualcosa di strano: per l'equivalenza massa-energia le particelle

si trasformano in altro tipo di particelle.

E' come se facendo scontrare 2 pere ad elevate velocità, queste

danno luogo ad una banana, una mela ed una arancia.





212

Solo che, non è così semplice leggere i risultati all'interno di un

acceleratore di particelle, infatti a seguito degli scontri tra

particelle così altamente energetiche, ricavare informazioni utili

dai risultati è come rimettere insieme i pezzi di un oggetto

lanciato da un grattacielo.

Il più grande acceleratore esistente al modo è il LHC (large

hadron collider) costruito all'interno di

un tunnel sotterraneo

di forma

circolare, lungo 27 km, posto a 100 m

di profondità in media, situato al

confine tra la Francia e la Svizzera,

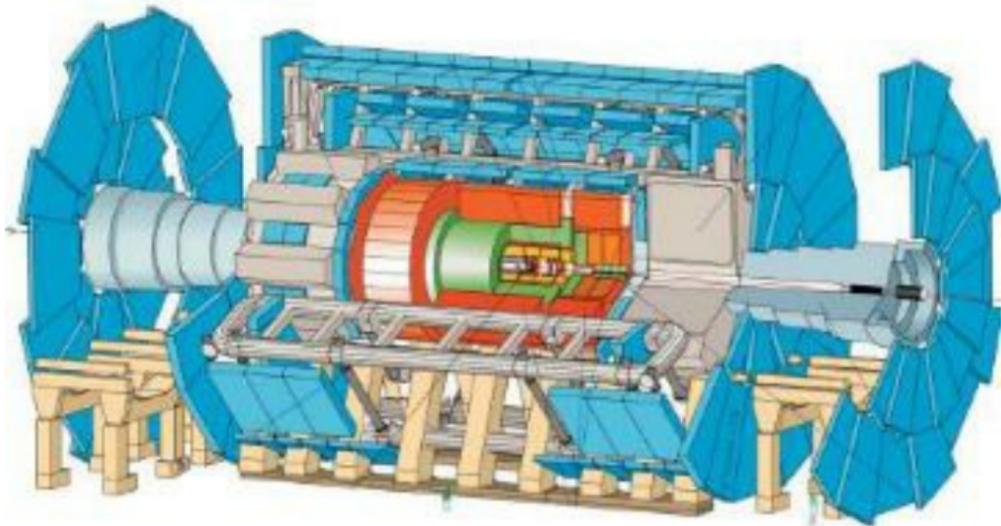
presso il CERN di Ginevra.

Questo acceleratore può accelerare e adroni, che sono particelle subatomiche non elementari costituiti da quark anche associati

ad antiquark, quali ad esempio protoni e ioni pesanti.

Riesce a far raggiungere a dette particelle una velocità pari a fino

al 99,9999991% della velocità della luce e farli successivamente scontrare, con un'energia che a maggio 2015, ha raggiunto i



213

13 teraelettronvolt (TeV), molto vicina al limite teorico della macchina di 14 TeV.

La macchina opera in condizioni di vuoto, accelerando,

attraverso oltre 1.600 magneti

superconduttori che realizzano un campo magnetico di circa 8 Tesla, necessario a mantenere in orbita all'energia prevista, due fasci di particelle che circolano in direzioni opposte.

La collisione si lascia avvenire in opportuni rilevatori, denominati detector, dove si procede

all'osservazione post scontro.

I detector sono composti da diversi strati cilindrici concentrici atti

ad osservare sia particelle cariche che neutre, e sia particelle

massive che senza massa, attraverso rilevatori di carica,

calorimetri per la misura dell'energia delle particelle, spettrometri

e sistemi di magneti.

Le uniche particelle che non possono essere rilevate sono i

neutrini, per la loro caratteristica di avere una massa di

ridottissime dimensioni associata all'assenza di carica elettrica.

Un tempo le tracce delle particelle generate a seguito della

collisione venivano osservate in apposite camere a bolle, ideata

e realizzata per la prima volta dal fisico e neurobiologo

statunitense Donald Arthur Glaser nel 1952, la quale scoperta gli

valse il premio Nobel per la fisica nel

1960.

La camera a bolle rappresentava un'evoluzione della più antica

camera a nebbia, quale strumento di rivelazione di particelle

elementari ideato dal fisico britannico Charles Thomson Rees

Wilson nel 1899 e successivamente perfezionata nel 1912.

214

La camera a nebbia consiste in una scatola a tenuta ermetica

che contiene aria soprassatura di vapore
acqueo, che al

passaggio di una qualsiasi particella
carica elettricamente

provoca la ionizzazione degli atomi con
i quali si scontra,

creando di conseguenza lungo il proprio
tragitto, una scia di

atomi ionizzati attorno ai quali il vapore
soprassaturo si raccoglie

a formare minuscole goccioline.

La traccia lasciata dalla traiettoria
percorsa della particella

può essere fotografata attraverso una parete trasparente

della scatola e da questa si può risalire, con particolari

accorgimenti, alla determinazione delle caratteristiche e della

natura della particella.

La camera a bolle, invece, è costituita da un recipiente metallico

cilindrico contenente un liquido surriscaldato e compresso,

quindi in condizione metastabile.

Quindi in tal caso, una particella veloce e carica che attraversa il

recipiente ionizza gli atomi del liquido e nello stesso tempo

rallenta la propria corsa, perdendo energia a seguito degli urti.

Lungo il percorso della particella si creano ioni positivi e negativi

attorno a cui il liquido inizia a bollire, lasciando quindi traccia del

passaggio.

Scattando diverse foto da angolazioni differenti, si ottiene una

ricostruzione stereoscopica spaziale delle tracce.

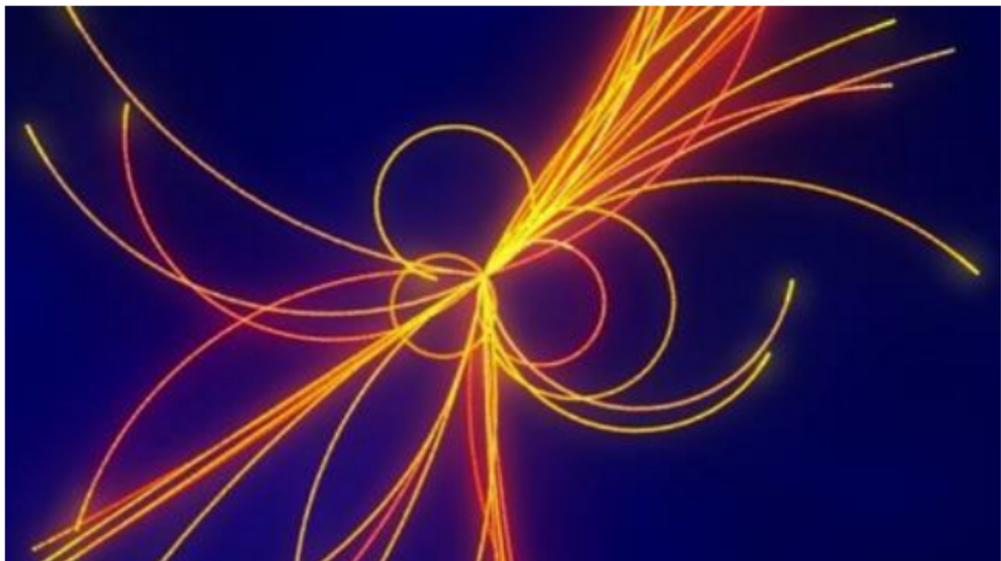
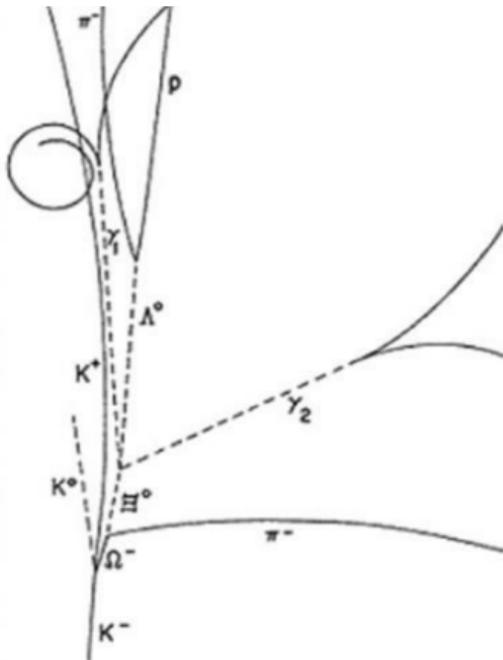
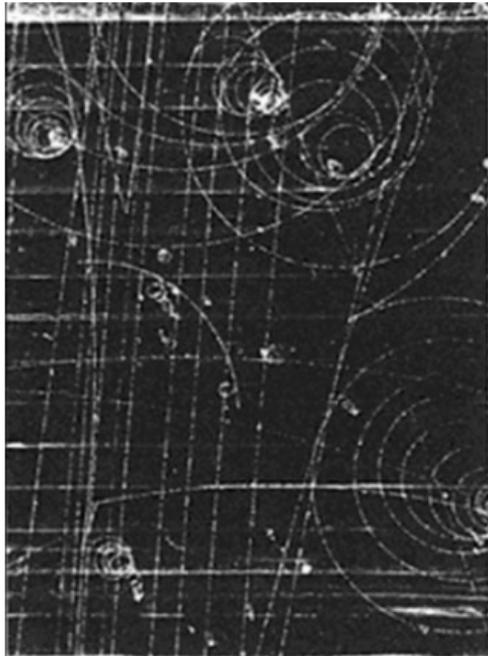
Essendo la camera a bolle costituita da liquido, quindi a densità

maggiore della camera a nebbia, si ottiene una maggiore

ionizzazione con conseguente migliore definizione delle tracce e

nello stesso tempo una migliore azione frenante utile per

l'osservazione di particelle leggere o a bassa energia.



Diversi tipi di camere a nebbia o a bolle vengono ad oggi

ancora realizzate per utilizzo didattico in considerazione delle

suggestive immagini che si possono ottenere.

Diversamente per scopi professionali oggi le particelle vengono

rilevate con appositi superconduttori e le tracce ricostruite in

maniera digitale.

*"Il tempo è il modo in cui la natura impedisce
che le cose accadano tutte insieme"*
(John A. Wheeler)

LA MERAVIGLIOSA TEORIA DELLA RELATIVITÀ RISTRETTA E GENERALE

Umberto Piarquadio

"Cos'è dunque il tempo?"

*"Quando nessuno me lo chiede io so,
ma se qualcuno me lo chiede e voglio spiegarcello,
non lo so".*
(San'Agostino)



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$



**ALTRE
PUBBLICAZIONI
AUTORE**

***LA MERAVIGLIOSA TEORIA
DELLA RELATIVITA'***

RISTRETTA E GENERALE

*Deve aver fatto un salto l'astronomo
inglese Sir Arthur*

*Eddington quando, il 29 maggio del
1919, intento ad*

*osservare un'eclissi totale di sole, ha
scoperto che*

*quell'uomo, che quattro anni prima
aveva pubblicato la*

*controversa teoria della Relatività
Generale, aveva*

ragione.

*Albert Einstein uno dei più celebri
fisici della storia, il cui*

*percorso di grande scienziato era
iniziato nel 1905 quando,*

*da semisconosciuto impiegato
dell'ufficio brevetti di Berna,*

*pubblicò i suoi due primi articoli sulla
Relatività Ristretta.*

*E' senza troppe pretese scientifiche che
mi accingo a*

*introdurre il lettore verso la Teoria
della Relatività Ristretta*

e Generale che è il tema del presente lavoro il quale

tuttavia non potrà essere colto pienamente senza almeno

le fondamentali competenze matematiche e fisiche che si

apprendono in un liceo.

Con un approccio innovativo rispetto a molti altri trattati

divulgativi sull'argomento, che spesso trascurano gli aspetti matematici indispensabili per

una corretta comprensione del

fenomeno, cercherò di trattare i temi, in modo da far comprendere principalmente i concetti, attraverso rigorose dimostrazioni matematiche o con

l'ausilio di grafici e diagrammi.

Dopo una brevissima ma indispensabile introduzione storica e biografica su Albert Einstein

ho dedicato particolare attenzione al pensiero di Relatività già presente nelle osservazioni

di Galileo e ho esposto i fondamentali lavori di James Clerk Maxwell, Albert Abraham Michelson, Edward Morley,

*ed Hendrik Antoon Lorentz per
giungere all'idea*

*assolutamente innovativa postulata
dalla Teoria della Relatività Ristretta.*

*Una volta immersi nella nuova Teoria,
nel secondo capitolo, ho approfondito
analiticamente*

*i concetti sulla dilatazione dei tempi e
la contrazione delle distanze fino alla
soluzione dei*

sempre affascinanti paradossi.

*Successivamente il presente lavoro si
sofferma sulle dualità massa-energia
($E=mc^2$) e*

massa gravitazionale-massa inerziale.

Non mancano gli “esperimenti mentali” e l’utilizzo del diagramma del Minkowsky allo scopo

di far meglio comprendere gli effetti della teoria.

Nella trattazione sulla Relatività Generale si affronteranno i temi della curvatura dello spazio-tempo a quattro dimensioni, la geometria di Riemann, l’utilizzo dei Tensori, l’esposizione

delle famose Equazioni di Campo di Einstein, il Redshift gravitazionale, la Deflessione della

Luce, la Precessione del Perielio di Mercurio e le Onde Gravitazionali.

Concludendo non si può dimenticare che Albert Einstein, oltre ad essere stato un celebre

fisico, fu molto attivo in diversi campi della cultura diventando uno dei più importanti pensatori del secolo scorso per cui i più citati e curiosi aforismi dell'illustre scienziato sono stati riportati come intermezzo tra i capitoli e paragrafi.

La presente stesura risulta rispetto alla precedente arricchita della trattazione quantitativa

*sulla geometria di Riemann, sulla
trattazione della geodetica nello
spazio-tempo deformato*

*dal campo gravitazionale e sulla
comprensione dei Tensori, a seguito
dei suggerimenti e degli scambi di
opinioni con il dott. Francis Ferrara
degli Stati Uniti, già correttore di
bozze di libri scientifici per la casa
editrice "The American Institute of
Physics"*

*Ringrazio tutti coloro che mi sono stati
vicini durante la stesura della presente
trattazione e con la speranza di aver
impostato il lavoro in modo che possa
essere utile a tutti quelli che*

*si avvicinano allo studio
dell'affascinante Teoria della
Relatività sono grato sin d'ora a chi
vorrà proporre migliorie o eventuali
suggerimenti.*

NEW
EDITION

THE MARVELOUS THEORY OF SPECIAL AND GENERAL RELATIVITY

Umberto Pignatario
translated by Giulia Carcaterra

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

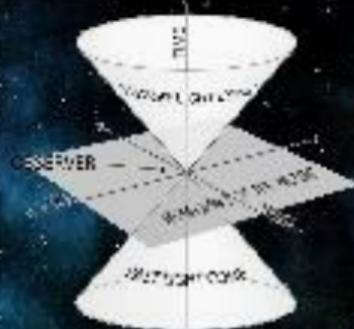
What then is time?

If no one asks me, I know what it is.

If I wish to explain it to him who asks, I do not know.

(Saint Augustine)

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Time is nature's way to keep
everything from happening all at once
(John A. Wheeler)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

***THE MARVELOUS THEORY OF
SPECIAL AND***

GENERAL RELATIVITY

On May 29, 1919, the English astronomer Sir Arthur

Eddington must have jumped when, while observing a total

eclipse of the sun, discovered that the man, who four years

earlier had published the controversial theory of General

Relativity, had been right.

We are talking about one of the most famous physicists of

history: Albert Einstein. His career as a great scientist had

begun in 1905 when, by a half-known employee of the

patent office in Bern as he was, he published his first two

articles regarding the Special Relativity.

I am going to introduce the reader to the restricted and

general Theory, which is the theme of

this work, without too

many scientific claims. However this topic can not be fully

grasped without the mathematical and physical bases

gained in high school.

I will try to explain the restricted and general Theory with

an innovative approach, different from many other educational treatises, which often neglect

the mathematical aspects necessary for a correct understanding of this subject.

On the contrary I am going to teach this topic through rigorous mathematical demonstrations, graphs and diagrams.

After a brief but indispensable historical and biographical introduction on Albert Einstein, I have paid particular attention to the idea of Relativity, already present in Galileo's observations. Furthermore I have exposed the main works of James Clerk Maxwell, Albert

Abraham Michelson, Edward Morley, and Hendrik Antoon Lorentz in order to reach the

*absolutely innovative idea postulated
by the Theory of Special Relativity.
Once immersed in*

*this new theory, in the second chapter I
analyzed the concepts about the times
dilation and*

*the distances contraction from an
analytical point of view concluding
with a solution to this*

*fascinating paradoxes. Subsequently,
the present work focuses on the duality
between*

*mass-energy ($E = mc^2$) and
gravitational mass-inertial mass. In
order to a better*

understanding of the theory effects there are references to "mental experiments" and Minkowsky's diagram.

The themes of the four-dimensional space-time curvature, the exposure of the famous

Einstein Field Equations, the Gravitational Redshift, the Deflection of Light, the Precession

of Mercury Perihelion and the Gravitational Waves will be addressed in the discussion of General Relativity.

In conclusion, we can't forget that Albert Einstein, besides being a famous

physicist, was

*very active in various cultural fields,
therefore becoming one of the most
important thinkers*

*of the last century. For this reason I
chose to quote his most and curious
aphorisms interluding them between
chapters and paragraphs.*

*I'm thankful to all the people who have
supported me while writing of this
book; as well as to*

*whoever should like to propose any
improvements or suggestions with the
hope that my work can be useful to all
those who are approaching the study of*

*the fascinating Theory of
Relativity.*

218

APPUNTI AUTORE

Vengono di seguito riportati alcuni appunti realizzati ed utilizzati

per un corso sulla Fisica quantistica, che ho tenuto nell'anno

2017 presso l'istituto di istruzione superiore Bonghi-Rosmini di

Lucera (Fg), presso il quale insegno matematica e fisica.

Nasce proprio da questi appunti, l'idea di trasformarli in un libro.

1) CAP

STORIA ATOMICA

N.B. LA FISICA DIVISA UNO E' VALIDA SOLO PER O 10²⁵ N. SIEU
PARA DIVISIBILI ALA $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J.S
(Azione quantizzata)

1500-500 a.e.

Indie

Fuoco
TERRA
ARIA
ACQUA
+ ETERE → NO materia
} Particelle di materia

400 A.E. GRECIA

→ ATOMO particelle indivisibile
VUOTO luogo dove rimangono gli atomi
ETERNITA'
↳ NASCITA
↳ MORTE
↳ RINASCITA

ARISTOTELE

→ NEGÒ ESISTENZA ATOMO + VUOTO

↓
MATERIA DIVISIBILE ALL' INFINITO
+
ENTE DIVINO CREATORE

MEDIOEVO → BUIO FILOSOFIA ATOMISTICA (ALCHIMIA !!)

1° CONCETTO SCIENTIFICO DI ATOMO "DALTON"
JOHN
~~CH~~ SCOPRIE L'ACQUA IN H e O E ANALIZZO
LE PROPORTIONI.

↓
BOGADRO

(PV = nRT) APPARSA DI VOLUME, PRESSIONE
E TEMPERATURA --- STESSO N. OLI ATOMI

↓
Quindi presenza di Volumi

↓
determinare le masse atomiche

Y
D

Mendeleev → Dispose elementi in ordine di
 massa crescente e in periodi.
 TAVOLA PERIODICA

MA ELETTRONI... - - NON ANCORA SCOPERTI!!

②
 CAP

FISICA ATOMICA

800

COULOMB

↓ CAMPI ELETTROSTATICI
 ATTRAZIONE CARICHE OPPOSTE
 REPULSIONE UGUALI

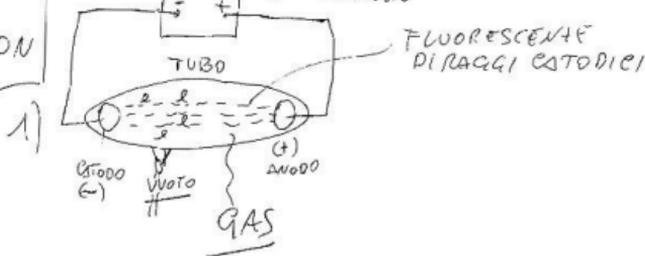
MAXWELL

↓
 CAMPI ELETTRODINAMICI
 PROPAG. ONDE RADIO } PROPAGAVANO COME
 LUCE } ONDE ELETTR.

MOVIMENTO
 DI CARICHE NEL
 VUOTO

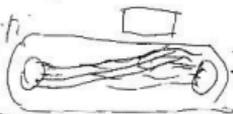
NON SI CONOSCEVANO I MECCANISMI DI
 USCITA DELLE CARICHE ELETTRICHE
 CORR. Elett. ALTO VOLTAGGIO

INGEGERE JOSEPH
 THOMPSON



2) Applicando un campo magnetico
 o elettrico
 i raggi venivano deviate:

Quindi i raggi
 atomici erano costituiti
 e particelle "m" piccole
 anche (-)



Dall'entità della
 deviazione si misurò
 il rapp. $\frac{q}{m}$

SFERA (+) ATOMO DI THOMSON



MODELLO PASTICCI
CON CARICA

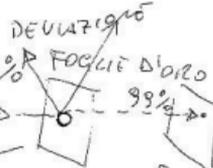
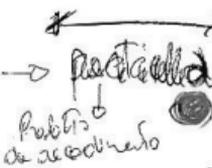
ELETT. SPANSI

NOBEL 1906

Perché ATOMO NEUTRO

NUMERO ATOMICO = NUMERO ELETTRONI
TAV. PERIODICA

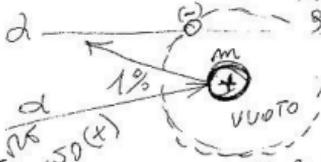
INGLESE
ERNEST
RUTHERFORD



Particella (Nucleo He)
Pubbli. da accelerato

DEVIAZIONE
1% FOGGIE D'ORO
99% SCURMO SOLFURO DI ZINCO

QUINDI LA MASSA E' CONCENTRATA AL CENTRO E DI
LA CSR. (+) NON E' DISTRIBUITA MA
PICCOLE DIVERTIONI

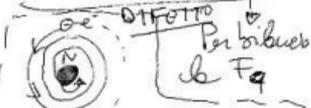


MODELLO PLANETARIO

2° ESPERIMENTO
UNA CARICA ELETTRICA IN MOVIMENTO
EMETTE ONDE ELETTRON. E QUINDI
PERDE ENERGIA
più leggera delle part. di m_{e^-}
1835 volte



2 forze =
Elettrostat + Centrifug



UNA CARICA ELETTRICA IN MOVIMENTO
EMETTE ONDE ELETTRON. E QUINDI
PERDE ENERGIA

più leggera delle part. di m_{e^-}
1835 volte

part. α bombard. AZOTO

STUDI ~~ANDREUCCI~~
PLANCK E EINSTEIN (1900-1905) TERORIA QUANTISTICA.

$E = h \cdot \nu$
 ↑ est freq.
 Energy radiazione elettromagnetica

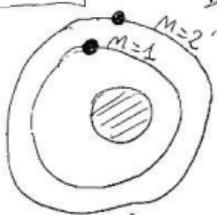
ENERGIA NON CONTINUA MA DISCRETA "QUANTIZZATA"

Radiaz. electron → particelle ^{energetiche} senza Massa
 ↓
FOTONI

$E = mc^2$ Massa ed Energia

DAMISE
NIELS BOHR 1913

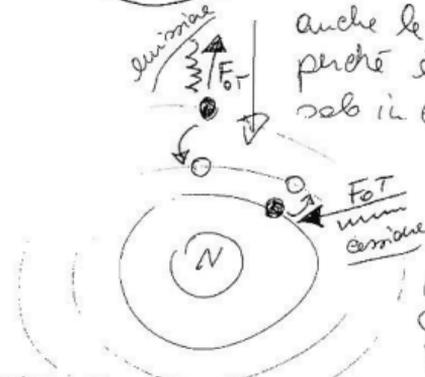
→ Risolve il problema esatute elettrone sul nucleo



↓
 QUANTIZZANDO L'ORBITA

$E = h \cdot \nu$

Essendo l'energia quantizzata anche le orbite lo sono, perché è permesso occupare degli e^- solo in certe orbite stabilite



L'ELETTRONE PUÒ CAMBIARE ORBITA MA È NECESSARIO CESSIONE O **EMISSIONE** DI ENERGIA

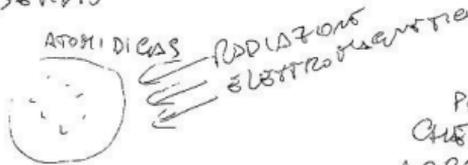
N.B.
 DOPO AVER CEDUTO ENERGIA ALL'ALTRA ORBITA L'ELETTRONE CAMBIA ORBITA E DOPO RITORNA ALL'ORBITA RIGIUNGA, EMETTENDO UN FOTONE

→ NEL PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE ENERGIA

RISPETTO AL D.C. DI CONSERVAZIONE

OSSENDO

5

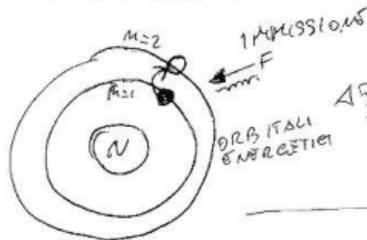


AFFINCHÉ LA RADIAZIONE POSSA INCIDERE È NECESSARIO CHE IL FOTONE ABBA ENERGIA ABBASTANZA E QUESTO DIPENDE

$$E = h \cdot \nu$$

DALLA SUA FREQUENZA, ALTRIMÉNTI LA RADIAZIONE PASSA INDISTURBATA

SE INVECE L'ENERGIA ^{DEL FOTONE} È SUFFICIENTE, ECCITA L'ATOMO (PORTA L'ELETTRONE IN UNO STATO ENERGETICO SUPERIORE - ORBITALE ?)



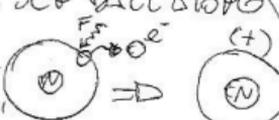
ATOMO ECCITATO

INSTABILE

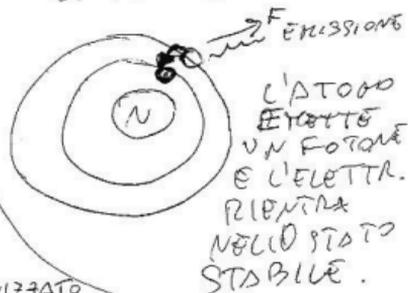
SE INVECE E_{fotone} È MOLTO MAGGIORE DELL'ENERGIA CHE LEGA L'ELETTRONE ALL'ATOMO

ELETTRONE ESCI DALL'ATOMO

PUÒ PERDERE UNO O PIÙ ELETTRONI



DOPO UN MILIARDESIMO DI SECONDO



MEL SOLE E

NELLE STELLE (ALTISSIME TEMPERATURE) ABBIAMO NUCLEI SENZA ELETTRONI ED ELETTRONI LIBERI... IL TUTTO FORMA IL "PLASMA"

ATOMO DI BOHR --- PERFETTIZIATO



IDEA DIMENSIONALE ATOMO: una goccia d'acqua CONTIENE TANTI ATOMI QUANTO SONO LE GOCCE D'ACQUA INTOTALE HA 10²³

ORBITALE → NUVOLE DI PROBABILITÀ

INVECE IN UN MECCANICA CLASSICA NEL MOTO DI UN SASSO NELLA RIA POSSO CONOSCERE SIA TRAIETTORIA CHE VELOCITÀ

Non conosciamo posizione e velocità contemporaneamente dell'elettrone

PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE HEISENBERG

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2}$$

Δx : posiz. (in tagliato) → est. Planck (h tagliato)
 Δp : mom. quant. moto
 $h = \frac{h}{2\pi}$
 COSTANTI DI DIRAC

DANZA ELETTRONICA DEGLI ORBITALI QUANTISTICI

QUANTIZZAZIONE

- FORMA ORBITALI
- ORIENTAZIONE
- MOMENTO ANGOLARE / SENSO DI ROTAZIONE } SPIN

$$+\frac{1}{2} \quad 0 \quad -\frac{1}{2}$$

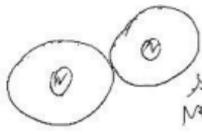
PRINCIPIO DI ESCLUSIONE PAULI

2 elettroni possono occupare lo stesso orbitale solo se hanno spin opposto



RESPONSABILE STABILITÀ DELLA MATERIA

Quindi quanto maggiore è il n. di elettroni tanto più complessa sarà la combinazione ottenibile.



ATOMI E MOLECOLE NON SI POSSONO INFIANTARE ARBITRARIAMENTE UNO NEGL'ALTRO.

Posizione elettronica $\Psi(x,t)$ Funzione d'onda

Ampiezza di probabilità

$|\Psi(x,t)|^2$ DENSITA' DI PROBABILITA'

PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE

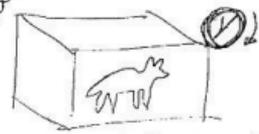
UN ELETTRONE ESISTE IN OGNI LUOGO (DIVERSI LUOGHI)

~~UN ELETTRONE ESISTE IN OGNI LUOGO (DIVERSI LUOGHI)~~

FINO A CHE SI OSSERVA E SINCA IL COLASSO DELLA Ψ E QUINDI LO STATO DIVENTA CERTO.

1) GATTO DI SCHRÖDINGER

Dopo aver aperto il cassetto (misura) si osserva il gatto per allora della Ψ



VIVO O MORTO?

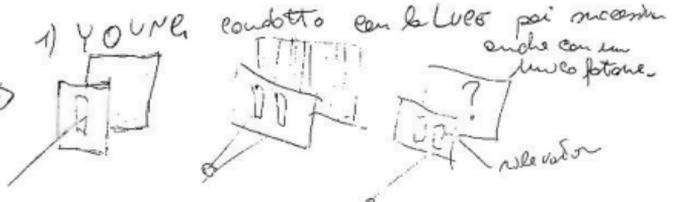
STATI SOVRAPPosti DI VIVO E MORTO.

2) ESPERIMENTO DOPPIA FENDITURA

DUALITA' ONDA-PARTICELLA MATERIA

SE MISURIAMO L'INTERFERENZA NON APPARE

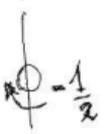
PRINCIPIO DI DUALITA' (ONDA-PARTICELLA)



2) Suce. Cambiato con fotone o elettrone in soluzione

ENTANGLEMENT QUANTISTICO (INTRODUZIONE)

1^a DUE PARTICELLE ACCOPPIATE



DE FINO A OGGI
DUNQUE NON
SARÀ PIÙ

Principio di NON LOCALITÀ

La velocità
EINSTEIN
LIMITE MAX
V.C. (LUMI)

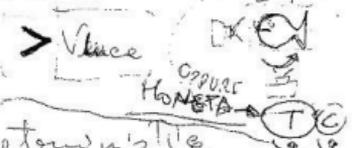
Trasmissione informazioni
istantanea a grandi distanze

BASE - computer quantistico
- Teletrasporto

Qbit
0-1-01

1000 parole
N. necessario

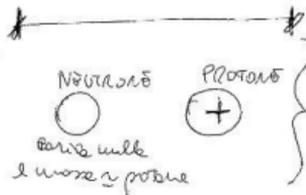
LA MISURA FA COLLAPSARE LA FUNZIONE D'ONDA
CON EFFETTO NON LOCALE



EINSTEIN → Teoria deterministica
(Dio non gioca a dadi)

HA AVUTO TORTO ... non vince mai
solam. in un'occhiata
effetti di tipo NON-LOCALE

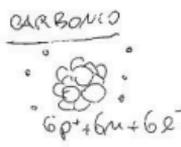
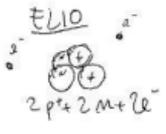
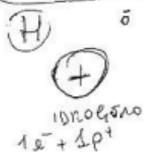
IL NUCLEO



carica nulla
e massa a protoni

La scoperta del neutrone
risolse il problema del
peso atomico < peso
effettivo.

ESempi



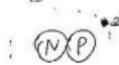
Peso nucleo
 $M_N + M_P = \text{Masse ATOMICHE}$
 $M_e = M_p = \text{Numero atomico}$

Uno stesso elemento chimico può avere stesso numero atomico $[M_p]$ ma di differenti masse atomiche (equiv. diff. $M_{nuclonari}$)

H

ISOTOPI

^2_1H
DEUTERIO



$1m+1p$

^3_1H
TRIZIO



$2m+1p$



ISOTOPI

BASE STUDIO
RADIOATTIVITA'

Legame chimico \rightarrow Per interazione degli elettroni periferici (elettroni di valenza)

Se un atomo perde o guadagna un elettrone = IONE

TAVOLA PERIODICA \rightarrow SCOPERTA MENDELIEV
PERFEZIONATA MOSELEY

STESSO NUM. ELETTR. VALENZA

Proprietà Periodiche elettr. I⁺
SX \leftarrow

RICHE ORIT \rightarrow PERIODI

STESSO NUMERO ~~di~~ ORBITALI ~~con~~ AUMENTO DA SX \rightarrow DX DI ELETTRONI \rightarrow acqu. stesso elettroni

STESSE COLONNE \rightarrow

IX

I⁻

SX \rightarrow

IX

NUM. ATOMI PRESENTI

LEGGI DEI TRE ATOMI



COPIA DI



COVALENTE \rightarrow CONDIVISIONE DI ELETTRONI (H_2O)

IONICO \rightarrow DONARE O ACQUISIRE ELETTRONI DA ALTRI ATOMI



X ALTA AFFINITA' ELETTRONICA



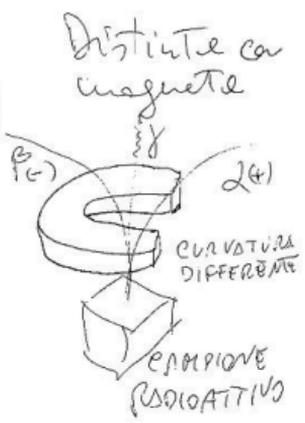
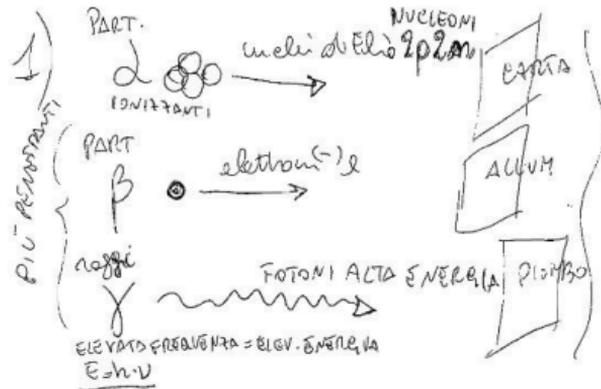
Per legge di Coulomb nettopeso

RADIOATTIVITÀ NATURALE E ARTIFICIALE
DECADIMENTI E FORZE NUCLEARI (10)

Lo Relativa ad ATOMI con elevato $M_{ATOMICO}$

DECADIMENTO NUCLEI INSTABILI (ES. URANIO)

3 TIPI DI RADIAZIONE



SCHERMATURA O FERMISTE

- α → foglio di carta
- β → foglio di alluminio
- Molto pesante → γ → blocchi di piombo

TRIFEMIVITA

tempo affinché la metà degli atomi si decadano in altro elemento = $T_{1/2}$ (DIMEZZAMENTO) di questo nucleo

Dipende dal materiale
 con $\Delta H \rightarrow$ Moltiplica ANNI

NUCLEONI = NEUTR + PROT.

Dec. α	^{230}U	15.8 ANNI (NAT.)
Dec. β	^{239}U	4.5 ANNI (NAT.)
Dec. α	^{234}U	24.5 ANNI (NAT.)
Dec. α	^{235}U	7.1 ANNI (NAT.)
Dec. α	^{238}U	4.5 $\cdot 10^9$ ANNI (NAT.)

IN NATURA LA MAGGIOR PARTE DI ELEMENTI È
STABILE INATTI QUANTO DI URANIO E
 POCHISSIMA IN NATURA.

QUINDI ATOMI LEGGERI SONO STABILI ES. Elio, H,
 etc..



P e N
 ○ ○ stanno insieme
 facilmente

Quando aumenta il peso ATOMICO e quindi il n. di prot.
 e neutroni, le forze repulsive dei protoni si innalzano
 e fa sentire ... le forze elettiche prevalgono sulle forze nucleari

ELEMENTI ~~STABILI~~ RADIOATTIVI (INSTABILI)

Sono spesso gli ISOTOPi

↑ eccesso di neutroni rispetto ai protoni

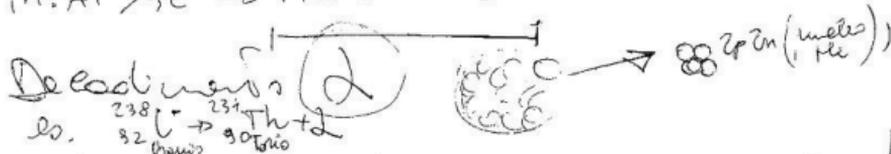


Chiuso RADIOATTIVITA' ARTIFICIALE ... BOMBARDAMENTO
 CON NEUTRONI I NUCLEI, TALI DA RENDERLI INSTABILI

POLOMIO -> NON HA ISOTOPi STABILI QUINDI RADIOATTIVO

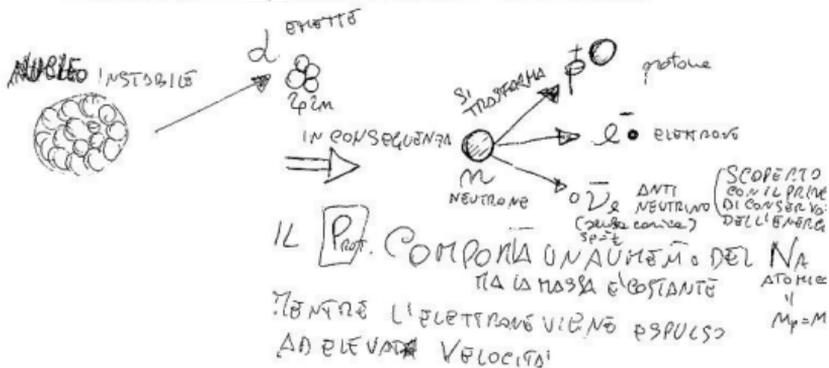
M. AT > 84 (numero di elettroni = numero di protoni)

M. AT > 82 -> "TRANSURANICI" SONO ARTIFICIALI



Decadimento β \rightarrow Avviene nell'ambito di altri
 processi nel nucleo come ad es. e^- oppure

DECADIMENTO BETA E NEUTRINO



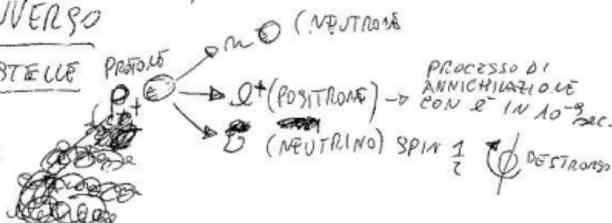
- $\bar{\nu}_e$ = NEUTRINO \neq SENZA CARICA
- PICCOLISSIMA MASSA (PRIMO SI CREDEVA NULLA)
 - Spin $\frac{1}{2}$ (ANTI-NEUTRINO SPIN $-\frac{1}{2}$)
 - Velocità: prossime alla luce

DIFFICILE DA INDIVIDUARE IN QUANTO NEUTRO (Oggi si individua negli acceleratori tramite la sua energia)

PROCESSO BETA INVERSO (Non è spontaneo)

ALL'INTERNO DELLE STELLE

Quindi in presenza di ENERGIA ESTERNA



A SEGUITO DEL DECADIMENTO L'ELEMENTO INIZIALE HA UNA MASSA INFERIORE... LA DIFFERENZA DI MASSA COMPORTA GENERAZIONE DI ENERGIA $[E = mc^2]$

Quindi il DECADIMENTO RADIOATTIVO GENERA ICTRI ELETTRICI ED ENERGIA

FISSIONE NUCLEARE

(DECADIMENTO RADIOATTIVO)¹³

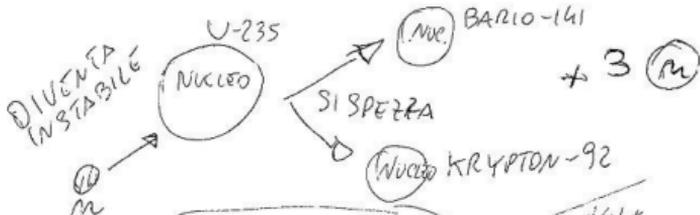
INTERIORE → URANIO 235 ($M_A = 92$)
FISSILE

URANIO ²³³ = NON FISSILE (non si fonde)

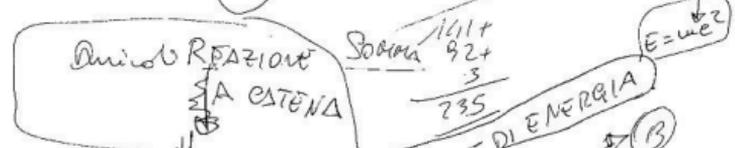
TALE DA PERDERE MA ANCORA PIÙ INSTABILE

LENTO $M_{proiettile}$ → verrebbe tale da assorbire troppo nel nucleo e non deve passare attraverso (LENTO)
BOMBA ARIA DA CON MORTARI

URANIO ~~235~~ ISOTOPO URANIO-235



MASSA ATOMI INTERESSATI



DIFETTO DI MASSA
MASSA TRASFORMATO IN ENERGIA $E = mc^2$

ELETTA ENERGIA E RAGGI

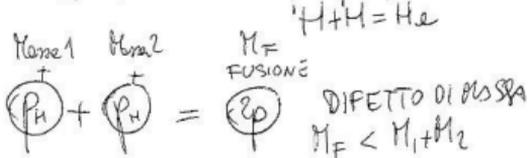
REAZIONE A CATENA
ESPLOSIONE ATOMICA A FISSIONE

ATTORI SE E' CONTROLLATA → CENTRALI
BOMBA ATOMICA → RAGGI γ , ENERGIA ELETTA (RAGGI) NUCLEARI
RADIAZIONI NEUTRONICHE (per alcuni usi in il campo...)

diventano nucleotidi, elettroni, muoni.

FUSIONE NUCLEARE → ^{IN MANIERA CONTROLLATA} STELLE O REATTORI SPERIMENTALI

UNIONE DI DUE NUCLEI A BASSO PESO ATOMICO



Energie →
 $E_{\text{fu}} \approx 10 \times E_{\text{fissione}}$

FORZE REPULSIVE LEGGE DI COULOMB

La massa mancante si è trasformata in Energia $E = mc^2$

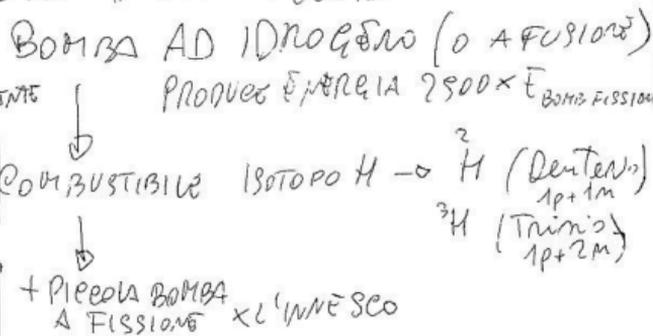
PER VINCERE È NECESSARIO AUMENTARE LA TEMPERATURA A LIVELLI ENORMI

10 MILIARDI K
 SOLE / STELLE



NON PRODUCE SCORIE
 → MOLTO EFFICIENTE

IN MANIERA INCONTROLLATA



NEL SOLE ~~OPPURE~~ AVVIENGONO REAZIONI NUCLEARI CHE DANNO LUOGO A NEUTRINI CHE RAGGIUNGOLO LA TERRA IN 8 MINUTI (V=C) E NOI SIAMO INVESTITI DA 10 MILIARDI DI NEUTRINI AL SECONDO!!!

SOLE



Processo Termoneucleare
 di fusione $H + H = He$
elios

Quando si esaurisce il
 combustibile

IL SOLE NON HA MASSA
 SUFFICIENTE PER PERSEVERARE
 LA FUSIONE DI ELEMENTI
 PIU' PESANTI

FRAGMENTI
 DI ESPLOSIONE
 NELLO SPAZIO PARALLELI
 INTER STELLE



NON FA ESPLODERE
 LA STELLA PERCHE' QUESTI
 FASE DI CONTRAZIONE AVVIENE IN POCCHI
 SECONDI. IL NOSTRO SOLE DI CUI LA STELLA
 SI COMPACTA SI ESPANDE NELLO SPAZIO
 CIRCOSTANTE LASCIANDO
 IL NUCLEO DI NEUTRONI
 CHE PUO' DIVENTARE
 A SECONDO DELLA MASSA
 UNA STELLA PULSAR (DI
 O BUCO NERO (SINGOLARITA'))



IL SOLE PER ESPANSIONE
 DIVENTA ROSSEA (ESPLOSIONE PACIFICA)
 INGLOBANDO ^{ANCHE} LA TERRA
 E ALTRI PIANETI

INVECE STELLE PIU'
 GRANDI DIVENTANO

POI IL NUCLEO STELLARE
 COLLOSSERA' FINO A
 DIVENTARE UNA "NAVABLANA"

SUPERNOVA

LA GRAVITA' FA CONTRARRE
 LA STELLA, FA AUMENTARE
 LA TEMPERATURA E IMMESCA
 LE PARTICELLE NUCLEARI NEGLI SPACI
 PIU' INTERNI FINO AL FERRO, NEL COMPLETO
 IL COMBUSTIBILE ETERNO SI ESAURISCE E IL DIAM. DIMINUISCE
 PRODUCENDO UNA DURA

NON BRUCIA
 MA SI SPENTA
 COME DOLCINI
 NANA BRUNA

LE QUATTRO INTERAZIONI FONDAMENTALI (FORTE)

IN FISICA QUANTISTICA NON ESISTONO I CAMPI DI FORZA E MISTERIOSI INTERAZIONI A DISTANZA COME NELLA TEORIA "CLASSICA" E "NEWTONIANA" ^{CAMPI ELETTRICI E CAMPI GRAVITAZIONALI}



LE INTERAZIONI AVVENGO NO TRAMITE "BOSONI"

PARTICELLE TRASPORTATRICI DI ENERGIA

Reggiparticelle
 $R = \lambda$
 carica
 $q = 0$
 massa
 $m = 0$

$I = 10^{-38}$ $\pi = \infty$

INTERAZIONE

GRAVITAZIONALE → SU TUTTE LE PARTICELLE

si spiega tramite

"GRAVITONE"

MA ANCORA SCOPERTO MA PREVISTO IN TEORIA

$I = 10^{-12}$

INTERAZIONE ELETTROMAGNETICA → SOLO SU PARTICELLE CARICHE ELETTRICHE E QUARK

si spiega tramite

"FOTONE" $q = 0$
 $m = 0$
 $\pi = \infty$

$R = \text{piccolo}$

INTERAZIONE NUCLEARE FORTE →

RESPONSABILE DELLA STRUTTURA DEL NUCLEO: AGISCE SU PARTICELLE COMPOSTE DA QUARK (NEUTR. E PROT.)

"GLUONE" $\pi = \text{piccolo}$

COME UN NASTRO ADESIVO (AGISCE SU PICCOLE DISTANZE)
 SOLO CHE I QUARK POSSONO MUOVERSI, MA NON I PROT. NEI NEUTR. O PROT.

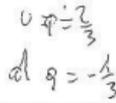
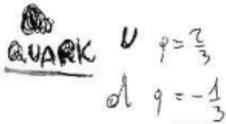
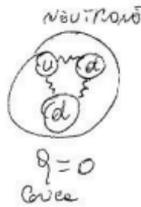
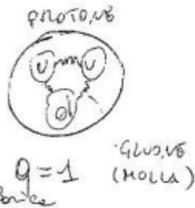
$I = 10^{-13}$

INTERAZIONE NUCLEARE DEBOLE →

RESPONSABILE DEL DECADIMENTO AGISCE SU QUARK, ELETTRONI, NEUTRINI

"BOSONI W^+ e W^- " $m = 81$
 $q = 81$
 $\pi = \text{piccolo}$
 "BOSONI Z^0 " $m = 81$
 $q = 0$
 $\pi = \text{piccolo}$

INTRODOTTO FORTE



TOT $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$

TOT $\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$ [RUB]

SAPORI = CARICA ELETTRICA

Rosso - Verde - Blu

Un QUARK ha un'altra caratteristica: **CARICA DI COLORE**
 Come anche i **GLUONI** $\left\{ \begin{array}{l} \text{colori} \\ \text{ANTI-colori} \end{array} \right\}$ SCAMBIANO I COLORI DEI QUARK
CON UN +1 O UN -1 PER DESCRIVERE SCAMBI DI CARICA

QUINDI INTERNO PROFONDI NEUTRO

GLUONI SCAMBIANO COLORI DEI QUARK \rightarrow DANZA D'ACROBAZIONE ALL'INTERNO

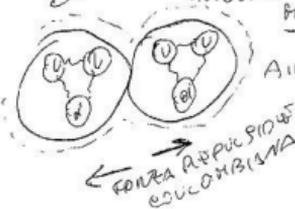
MENTRE DALL'ESTERNO $RGB = \text{BIANCO}$

Quindi III GENERAZIONI DI QUARK $(6 \times 3 \text{ colori})$ $\times 3 \text{ coppie}$ = 18 QUARK

DUE PROTONI \rightarrow INTERAZIONE FORTE RESIDUA

INFORMATI DA NUBI DI MESONI (COPPIE QUARK - ANTIQUARK)

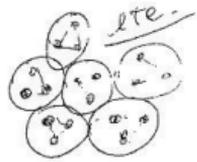
AUTONTE GLUONI



MESONI = PARTICELLE DI MASSA TRA ELETTRONI E PROTONI

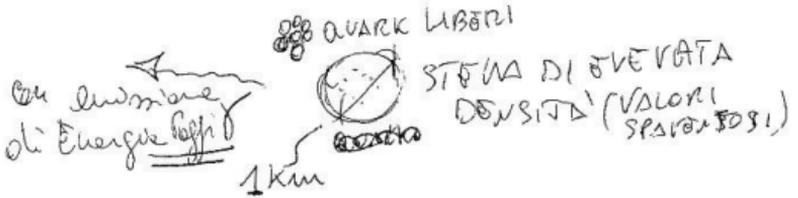
STRUTTURA DI QUARK

Una stella di neutroni (PULSAR)



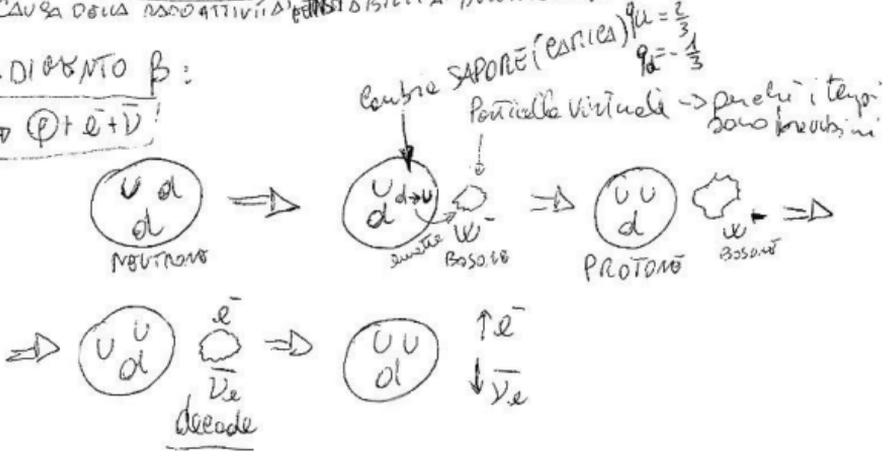
SI TRASFORMA

Può liberare i QUARK UP/DOWN



INTERAZIONI DEBOLI NUCLEARE
 NON CONTRIBUISCE ALLA COESIONE DELLA MATERIA MA ALLA DEFORMAZIONE
 CAUSA DELLA INSTABILITA' DELLA MATERIA 100000 volte più debole delle FORTE

DECADIMENTO β :
 $(n) \rightarrow (p) + e^- + \bar{\nu}$



INTEGRAZIONE CINETICA - Per la Teoria Relativista

$E = mc^2$
 COSTANTE SPAZIO-TEMPO
 GRAVITAZIONE \rightarrow NON MECCANICA CLASSICA

SI CERCA DI UNIFICARE TEORICAMENTE AL MODELLO QUANTISTICO STANDARD.

OPERATORI DI PARTICELLE

ABBIAMO BISOGNO DI ENERGIE ELEVATE

$$E = h \cdot \nu$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \nu = \frac{c}{\lambda}$$

E QUINDI PER VEDERE LE PARTICELLE ABBIAMO BISOGNO DI FREQUENZE ELEVATE E QUINDI λ BASSE.

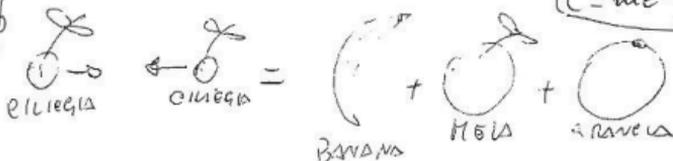
QUANDO 2 PARTICELLE SI SCOPPIANO IN

$$\overset{+E=mc^2}{\circ} \rightarrow \overset{-E=mc^2}{\circ} = \circ + \circ + \circ + \circ$$

ν minimo \rightarrow infinito alle particelle ob. nelle

UN ACCELERATORE DANNO LUOGO A PARTICELLE DI MASSA COMPLESSIVA SUPERIORE

$$E = mc^2$$

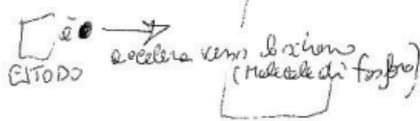


UN ACCELER. NATURALI

OSSERVAZIONE
RACCHI COSMICI
IMPROVVISAMENTE
OGGI RACCHI

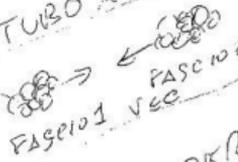
SI RILEVANO LE PARTICELLE PROVENIENTI DALL'UNIVERSO ALLA VELOCITA' IN MEDIA v

ESEMPIO CASALINGO DI ACCEL. = TV E TURO CATHODICO



CAMPI
MAGNETICI
PER RAFINARE LE PARTICELLE
TURBO A VUOTO (PACIFIC)

- PARTICELLE
ACCELERATE:
- ELETTRONI
 - PROTONI
 - POSITRONI
 - NUCLEI DI ATOMI PESANTI (ioni)
 - IONI CARICHI VARI



CAMPI ELETTRICI PER
ACCELERARE FINO A
CIKKA Vel. luce

SI USA UN PARTICELLA
ESISTENTE PER POTERLE
ACCELERARE

ENERGIE D'ORDINE DI

1 GeV
100 GeV
divinazione
1 eV = 1.6×10^{-19} J
elettrone

Quindi elevate velocità = elevate ENERGIA

anche elevate energie
produce materia
 $E = mc^2$

MATERIA \leftrightarrow ENERGIA

Quindi si creano nuove particelle
di elevate massa che non esistono nelle
nature, perché hanno bisogno di elevate
energie (Virus ad pochi secondi)

ACCELERATORI LINEARI
RETTLINCO

ACCELERATORI CIRCOLARI
ANELLO
PIÙ EFFICIENTI V. mag. di

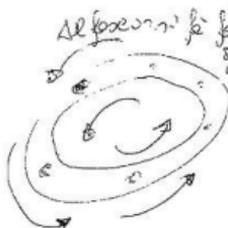
Pos To ai
Confusion
FRAMES &
SPRINGS

uovo LHC (Large Hadron Collider)
del CERN

Accelerazione fino a 99,999%

Si è inventato
Europe fino a 13000 GeV

(limite teorico delle macchine Teorico 14000 GeV)



Al momento le fibre più
lunghe per accelerare.

~~Acceleratore di particelle~~

CIRCONFERENZA DI 27 KM

A 100 m al
proprietà



RILEVATORI IN
GABBIA CILINDRICA

ATLAS DETECTOR (CERN) e LHC

- 1) Si riscaldano in fibre di metallo \rightarrow emettono elettroni $s = \frac{1}{2}$
- 2) Si fanno collidere parte degli elettroni con un bersaglio metallico, tale da creare POSITRONI $s = -\frac{1}{2}$
- 3) Ottenuta la materia prima, si accelera e si fa collidere
- 4) Si osserva il DETECTOR (rilevatore) con sub-rilevatore

Detection:

1- Rilevatore tracce particelle cariche elettriche.

↓
consorzio particelle e angoli di
diffusione

2- Calorimetri → Minimo energia ob tutte
le particelle ob collisione ne
cariche elettriche, che non.

3- Rilevatori ob MUONI (particelle più penetranti)
Il generatore dell'elettrone

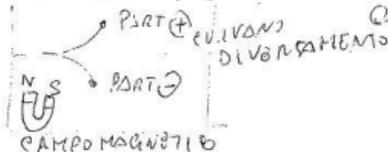
① Per registrare le tracce si usano SEMICONDUTTORI

↓
→ come si usavano le CAMERE A BOLLE
o NEBBIA

Le particelle ionizzano un liquido che viene
fotografato → come se serve ^{di condensatione} al d'acqua.

GRUPPI ABCD

Immagini suggestive

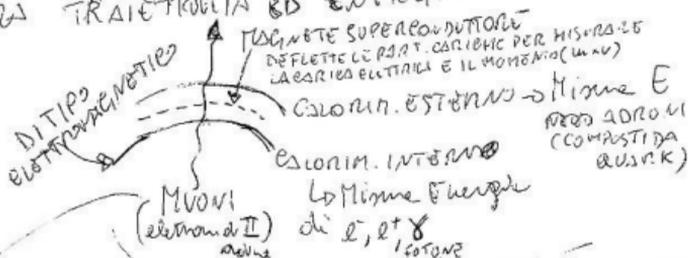


SEMICONDUTTORI

↓
immagini ricostruite
col COMPUTER

(2) CALORIMETRO → Perto in quello precedente al precedente

MISURA TRAIETTORIA ED ENERGIA



CONVULSIONE SIA DA UNA COLUSSIONE SI PRODUCONO PARTICELLE SECONDARIE

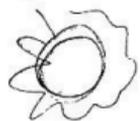
(3) Rivelatore di muoni (Metallic)



E' COME RIMETTERE INSIEME I PEZZI DI UN OGGETTO LANCiato DA UN GRANACCIUOLO.

PERCHÉ LE PARTICELLE HANNO MASSA?

Dopo
GLE BANG



NO MASSA

ROTTURA SIMMETRIA

TRA
L'ISTERNA E
L'ANTIISTERNA

CAMPO DI (Scalare)

HIGGS (tipo il campo elettrico)

BOSONE HIGGS

1 POT. FOSTA
ANNI 60

TROVATA
2012
4 luglio

$M_{Higgs} = 126 \times M_{proton}$

Bosone Higgs
DI MASSA

produce
una particella
quantistica bosone Higgs

senza carica
senza spin

Penetra
tutto lo spazio

Vuoto

Costante
Possibile
(Bosoni)
Vengono rallentati
dal campo e alcuni
diventano massa

Conferendo massa
alle parti delle elementari
(bosoni W e Z) (bosone Higgs)
ma non al Bosone fotone.

DISCOVERY
"PARTICELLE DI Dio"

BIBLIOGRAFIA

Fenomeni radioattivi, dai nuclei alle stelle - Giorgio Bendiscioli - Springer Vergal

Italia 2013

I quanti e la vita – Niels Bohr -
Universale scientifica Boringhieri –
Prima edizione

1965 – Ristampe 1969, 1974

Teoria dei quanti – John Polkinghorne –
Codice edizioni Torino - 2007

Meccanica quantistica, il minimo

indispensabile per fare della (buona)
fisica –

Leonard Susskind Art Friedman –
Raffaello Cortina editore - 2015

Dalla fisica classica alla fisica
quantistica – Carlo Tarsitani – Editori
riuniti

university press – 2009

L'esperienza più bello – Giorgio Lulli
– Apogeo – 2013

I principi della meccanica quantistica –
Paul Adrien M. Dirac – Bollati
Boringhieri

editore Torino – prima edizione 1959,
ristampa 2014

Il bizzarro mondo dei quanti – Silvia
Arrayo Camejo – Springer - 2012

L'atomo e le particelle elementari –
Massimo Teodorani – Macro Edizioni –
prima

edizione 2007, ristampa 2012

Il mondo secondo la fisica quantistica –
Fabio Fracas – Sperling & Kupfer -
2017

Bibliografia e immagini da Web:

Immagini

commons.wikimedia.org

Joseph John Thomson

https://it.wikipedia.org/wiki/Joseph_John_Thomson

https://it.wikipedia.org/wiki/Modello_atomico

Ernest Rutherford

https://it.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford

<https://it.wikipedia.org/wiki/Esperimento>

Max Planck

https://it.wikipedia.org/wiki/Max_Planck

https://it.wikipedia.org/wiki/Catastrofe_1914

https://it.wikipedia.org/wiki/Corpo_nero

https://it.wikipedia.org/wiki/Costante_di

https://it.wikipedia.org/wiki/Spettro_ele

Niels Bohr

https://it.wikipedia.org/wiki/Niels_Bohr

https://it.wikipedia.org/wiki/Modello_at

246

Arnold Sommerfeld

https://it.wikipedia.org/wiki/Arnold_Sor

https://it.wikipedia.org/wiki/Formula_di

Sommerfeld

Orbitale atomico

https://it.wikipedia.org/wiki/Orbitale_atomico

Stato quantistico di Spin

<https://it.wikipedia.org/wiki/Spin>

Esperimento di Stern-Gerlach

https://it.wikipedia.org/wiki/Esperimento_Stern-Gerlach

Wolfgang Pauli

https://it.wikipedia.org/wiki/Wolfgang_Pauli

https://it.wikipedia.org/wiki/Principio_d

Werner Karl Heisenberg

https://it.wikipedia.org/wiki/Werner_Ka

https://it.wikipedia.org/wiki/Principio_d

Erwin Schrödinger

https://it.wikipedia.org/wiki/Erwin_Schr

https://it.wikipedia.org/wiki/Equazione_

https://it.wikipedia.org/wiki/Funzione_d

https://it.wikipedia.org/wiki/Paradosso_

Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie

https://it.wikipedia.org/wiki/Louis-Victor_Pierre_Raymond_de_Broglie

https://it.wikipedia.org/wiki/Ipotesi_di_c

Paul Dirac

https://it.wikipedia.org/wiki/Paul_Dirac

https://it.wikipedia.org/wiki/Notazione_ket

Thomas Young

https://it.wikipedia.org/wiki/Thomas_Yc

<https://it.wikipedia.org/wiki/Esperimento>

Alain Aspect

https://it.wikipedia.org/wiki/Alain_Aspe

John Stewart Bell

https://it.wikipedia.org/wiki/Teorema_di

James Chadwick

https://it.wikipedia.org/wiki/James_Chadwick

<https://it.wikipedia.org/wiki/Neutrone>

Isotopi

https://it.wikipedia.org/wiki/Isotopi_dell

247

Radioattività

<https://it.wikipedia.org/wiki/Radioattivit>

<https://it.wikipedia.org/wiki/Decadiment>

<https://it.wikipedia.org/wiki/Decadiment>

https://it.wikipedia.org/wiki/Raggi_gamma

https://it.wikipedia.org/wiki/Radiazioni_

https://it.wikipedia.org/wiki/Metodo_del
14

Fissione e fusione nucleare

https://it.wikipedia.org/wiki/Fissione_nu

https://it.wikipedia.org/wiki/Fusione_nuc

https://it.wikipedia.org/wiki/Bomba_all%27idrogeno

https://it.wikipedia.org/wiki/Reattore_nucleare

https://it.wikipedia.org/wiki/Reattore_nucleare

https://it.wikipedia.org/wiki/Bomba_atomica

<https://it.wikipedia.org/wiki/Nucleosintesi>

<https://it.wikipedia.org/wiki/Pulsar>

<https://it.wikipedia.org/wiki/Quasar>

https://it.wikipedia.org/wiki/Buco_nero

Antimateria

<https://it.wikipedia.org/wiki/Antimateria>

Le particelle elementari

https://it.wikipedia.org/wiki/Particella_e

<https://it.wikipedia.org/wiki/Fermione>

[https://it.wikipedia.org/wiki/Bosone_\(fis](https://it.wikipedia.org/wiki/Bosone_(fis)

[https://it.wikipedia.org/wiki/Quark_\(part](https://it.wikipedia.org/wiki/Quark_(part)

Peter Higgs

https://it.wikipedia.org/wiki/Peter_Higgs

https://it.wikipedia.org/wiki/Bosone_di_

Gravitone

<https://it.wikipedia.org/wiki/Gravitone>

Raggi cosmici

https://it.wikipedia.org/wiki/Raggi_cosmici

Acceleratore di particelle

[https://it.wikipedia.org/wiki/Acceleratore](https://it.wikipedia.org/wiki/Acceleratore_di_particelle)

<https://it.wikipedia.org/wiki/CERN>

[https://it.wikipedia.org/wiki/Large_Hadr](https://it.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider)

[https://it.wikipedia.org/wiki/Camera_a_1](https://it.wikipedia.org/wiki/Camera_a_fotografia)

[https://it.wikipedia.org/wiki/Camera_a_1](https://it.wikipedia.org/wiki/Camera_a_fotografia)

248

Il teletrasporto quantistico compie

vent'anni

http://www.lescienze.it/news/2017/12/10/eletrasporto_quantistico-3793007/

Buco nero

http://www.ansa.it/canale_scienza_tecnica/10/ecco-la-foto-del-secolo-e-la-prima-di-un-buco-nero_3414097d-9364-492c-ad9a-18027bbd8495.html