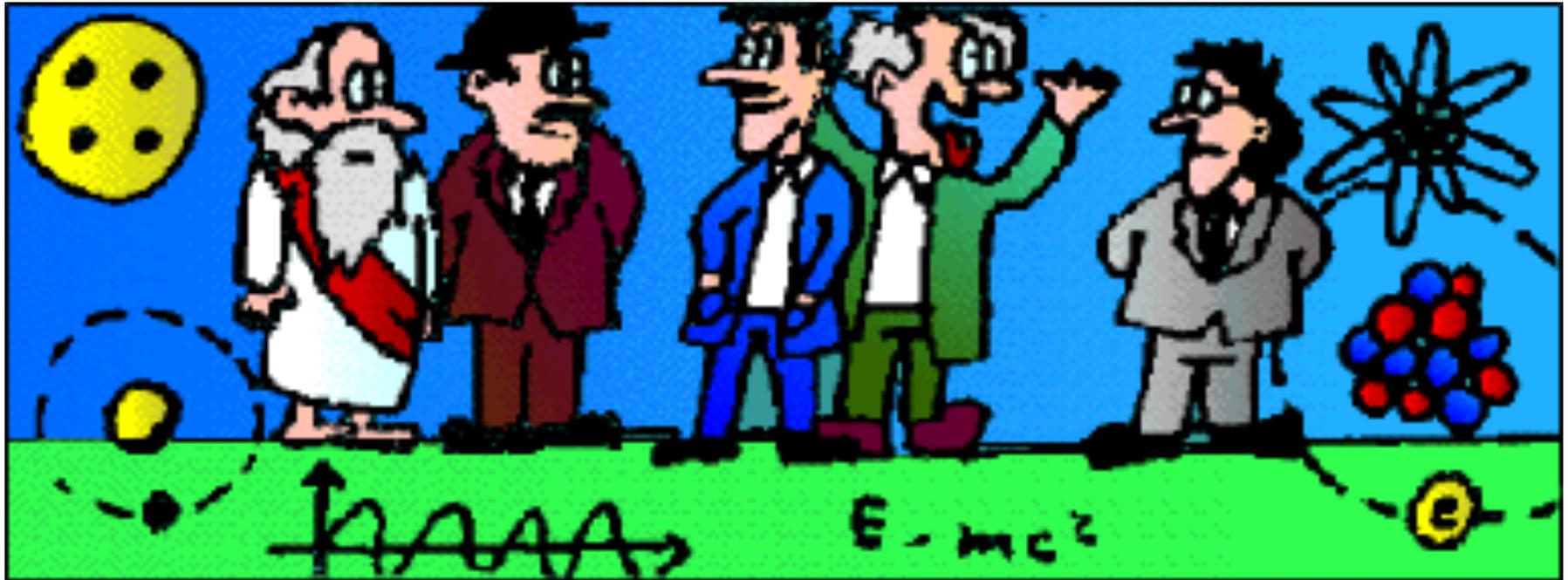
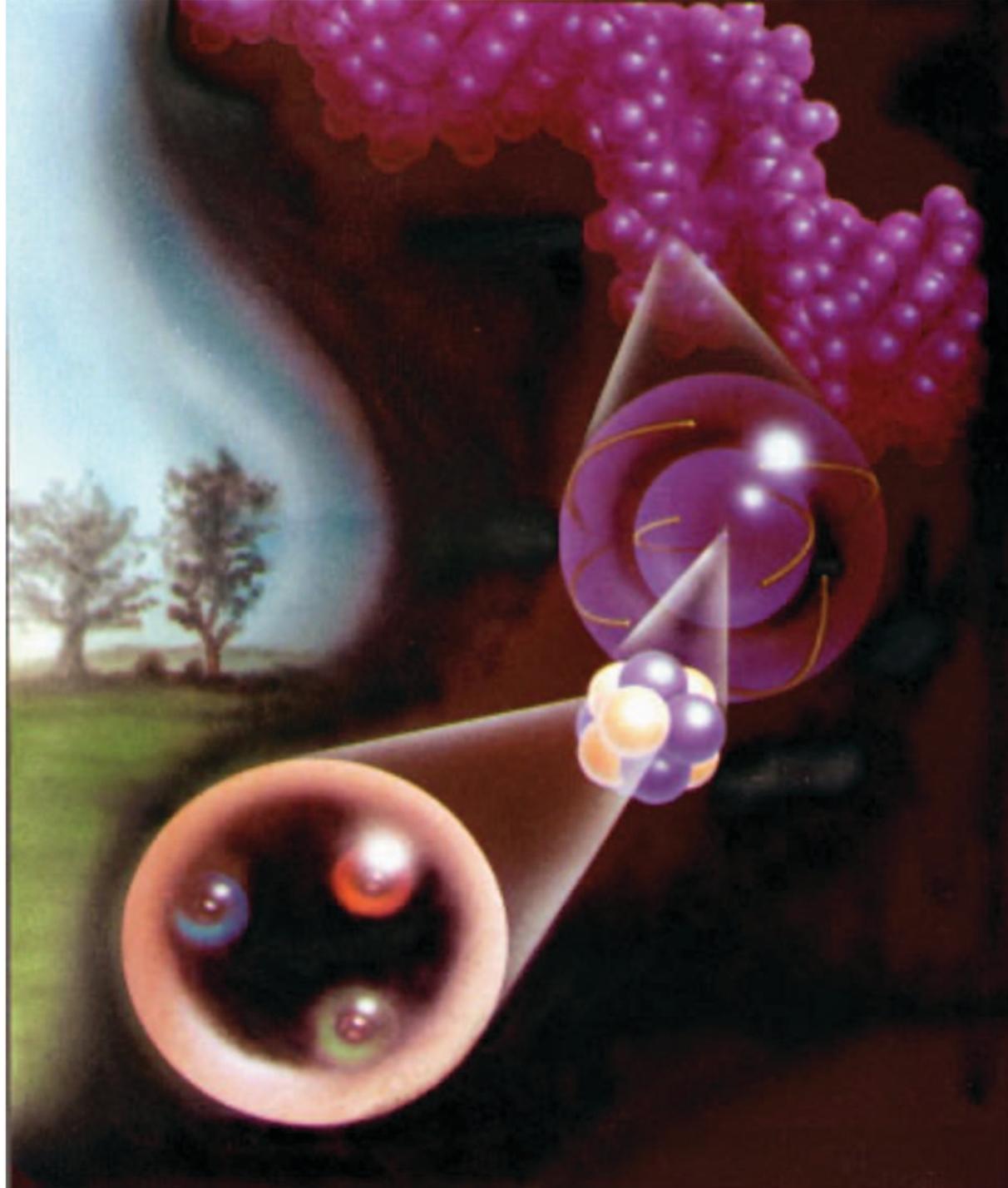


Le superleggi del microcosmo: le teorie quantistiche



Alessandro Pascolini 2025

q a L n m
2- n t t 5 t t e
m 2- o t i
t i n k - d P L O t i
5 è m i L q
a m o t i t i 5 a t i t i
q a t i q t i q
i q è t i a n
m - d m è t i a n
m - d t i n
m 2- o t L d P è t i n
?
?
?



un mondo lontano ed effimero

dimensioni:

atomo 10^{-10} m

nucleo 10^{-15} m

quark 10^{-18} m

vite medie:

muone $2,2 \mu\text{s}$

tau $2,9 \times 10^{-13}$ s

Z_0 3×10^{-25} s

numero molecole in 18 g d'acqua
(un cucchiaino) 6×10^{23}

stelle nella galassia 4×10^{11}

galassie nell'universo 10^{11}

stelle nell'universo 4×10^{22}

il mondo atomico **non** può essere simile al nostro



**quanto: la minima quantità di una data
grandezza fisica**

**una grandezza fisica non può assumere valori
arbitrari, in modo continuo, ma solo valori
discreti, multipli interi di quanti fondamentali**

**lo sviluppo del concetto quantistico è legato
alla concezione atomistica della materia e
storicamente nasce nell'ambito del dibattito
sulla realtà fisica degli atomi alla fine del 1800**

principi dell'atomismo "canonico"

- la realtà è costituita dal vuoto e da enti materiali indivisibili di dimensioni finite, gli **atomi**
- ogni cambiamento in natura è effetto del riarrangiamento degli atomi

Epicuro vede gli atomi nel pulviscolo



la concezione atomistica diviene operativa nella chimica dell'800

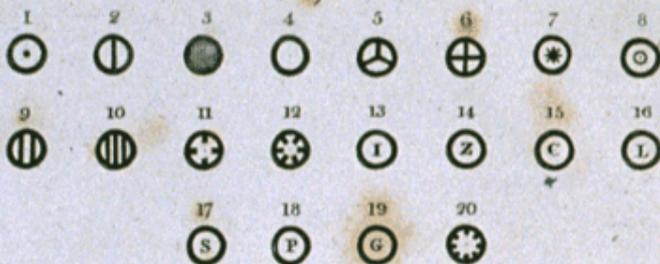
Gli atomi degli elementi chimici

- ▷ si combinano in molecole secondo numeri interi
- ▷ hanno massa circa multiplo intero di quella dell'idrogeno H

⇒ “peso atomico” dell'elemento Y =
massa di una mole di Y/massa di una mole di H

La concezione atomistica fornisce un sistema coerente di formule per tutti i composti chimici

Simple



Binary



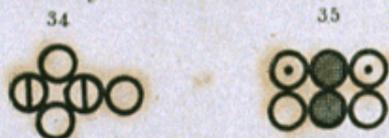
Ternary



Quaternary



Quinquenary & Sextenary



Septenary

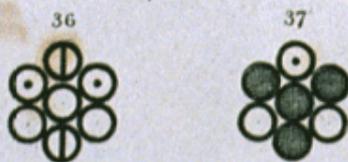


PLATE IV. This plate contains the arbitrary marks or signs chosen to represent the several chemical elements or ultimate particles.

Fig.		Fig.	
1	Hydrog. its rel. weight 1	11	Strontites - - - - 46
2	Azote, - - - - 5	12	Barytes - - - - 68
3	Carbone or charcoal, - 5	13	Iron - - - - 38
4	Oxygen, - - - - 7	14	Zinc - - - - 56
5	Phosphorus, - - - - 9	15	Copper - - - - 56
6	Sulphur, - - - - 13	16	Lead - - - - 95
7	Magnesia, - - - - 20	17	Silver - - - - 100
8	Lime, - - - - 23	18	Platina - - - - 100
9	Soda, - - - - 28	19	Gold - - - - 140
10	Potash, - - - - 42	20	Mercury - - - - 167
21.	An atom of water or steam, composed of 1 of oxygen and 1 of hydrogen, retained in physical contact by a strong affinity, and supposed to be surrounded by a common atmosphere of heat; its relative weight = - - - - 8		
22.	An atom of ammonia, composed of 1 of azote and 1 of hydrogen - - - - 6		
23.	An atom of nitrous gas, composed of 1 of azote and 1 of oxygen - - - - 12		
24.	An atom of olefiant gas, composed of 1 of carbone and 1 of hydrogen - - - - 6		
25.	An atom of carbonic oxide composed of 1 of carbone and 1 of oxygen - - - - 12		
26.	An atom of nitrous oxide, 2 azote + 1 oxygen - 17		
27.	An atom of nitric acid, 1 azote + 2 oxygen - 19		
28.	An atom of carbonic acid, 1 carbone + 2 oxygen 19		
29.	An atom of carburetted hydrogen, 1 carbone + 2 hydrogen - - - - 7		
30.	An atom of oxynitric acid, 1 azote + 3 oxygen 26		
31.	An atom of sulphuric acid, 1 sulphur + 3 oxygen 34		
32.	An atom of sulphuretted hydrogen, 1 sulphur + 3 hydrogen - - - - 16		
33.	An atom of alcohol, 3 carbone + 1 hydrogen - 16		
34.	An atom of nitrous acid, 1 nitric acid + 1 nitrous gas - - - - 31		
35.	An atom of acetous acid, 2 carbone + 2 water - 26		
36.	An atom of nitrate of ammonia, 1 nitric acid + 1 ammonia + 1 water - - - - 33		
37.	An atom of sugar, 1 alcohol + 1 carbonic acid - 35		

la concezione atomica fonte di acceso dibattito fra i fisici all'inizio del '900

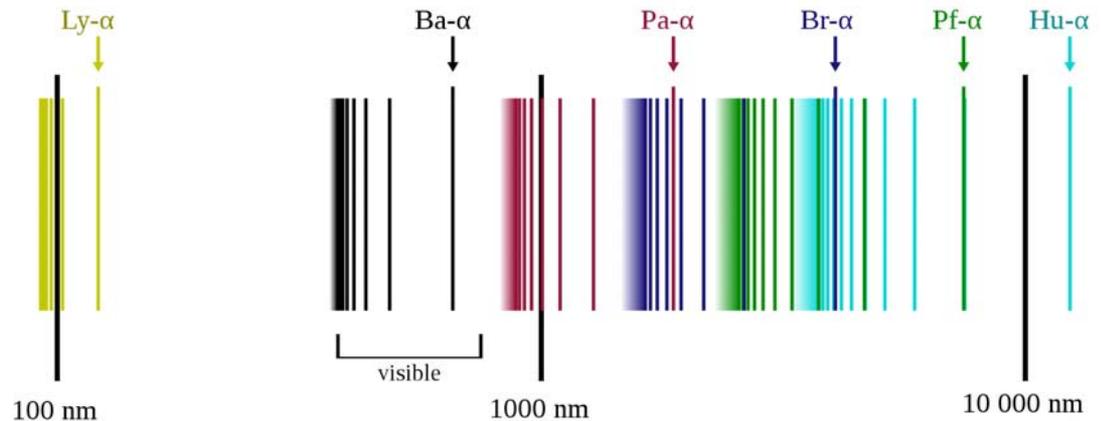
- **critica positivista: per il ricorso a ipotesi astratte contro l'empirismo e la fenomenologia sperimentale (Ernst Mach, Wilhelm Ostwald, Joseph Petzold)**
- **critica formalista: per il ricorso a modelli, rappresentazioni, invece che procedere in modo deduttivo da assiomi formali (Pierre Duhem)**
- **critica meccanicistica: per l'incompatibilità con la termodinamica classica (Max Planck)**

segnali “atomistici” sperimentali

- “granulosità” della carica elettrica
 - ▷ “corpuscolo elettrico” senza struttura interna
- radioattività
 - ▷ eventi isolati casuali
- spettroscopia atomica

gas eccitati emettono radiazioni elettromagnetiche di precisa frequenza, caratteristiche di ciascun elemento

spettro dell'idrogeno



atomismo elettromagnetico

esiste una carica elettrica elementare (quanto)

$$e = 1,602176565(435) \times 10^{-19} \text{ C}$$

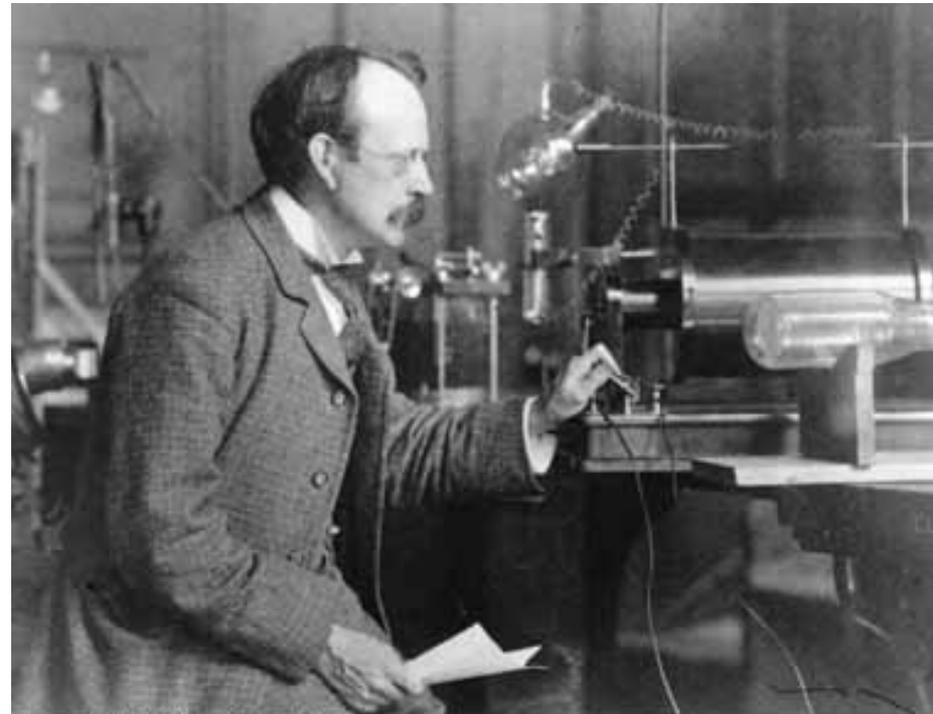
e attuale unità di misura della carica elettrica

$$e = 1,60217634 \times 10^{-19} \text{ A s esatto}$$

esiste un “corpuscolo” con
carica $Q_e = -e$

l'**elettrone** (simbolo *e*)

$$m_e = 9,10938291(40) \times 10^{-31} \text{ kg}$$
$$= 0,510998928(11) \text{ MeV}/c^2$$



l'unità di misura dell'energia nel microcosmo è
l'**elettronvolt** eV: energia di una carica e che
attraversa una differenza di potenziale di 1 V
1 eV equivale a $1,60217634 \times 10^{-19}$ joule
o a circa $3,822 \times 10^{-20}$ calorie
è estremamente piccolo per il mondo ordinario

Un battito d'ala di una
farfalla richiede 1 GeV di
energia (un miliardo di eV)

conviene misurare la
massa in multipli di eV/c^2 ,
tipicamente MeV/c^2



tre fasi della teoria quantistica

- **quantizzazione dell'energia**
teoria dei quanti (1900 – 1925)
- **quantizzazione della materia**
meccanica quantistica (1927 \Rightarrow)
- **quantizzazione dei campi**
teoria quantistica di campo (1947 \Rightarrow)

due programmi di ricerca teorici contrapposti



Planck: dimostrare che la teoria atomica non è valida

- ▷ **radiazione termica**

Einstein: confermare l'esistenza di atomi di determinate dimensioni finite

- ▷ **colore del cielo**
- ▷ **moto browniani**
- ▷ **radiazione termica**

“atomi” (quanti) di azione

La radiazione del corpo nero può venir pensata come generata da un “gas” di risonatori elementari.

L’azione [energia per tempo] di ciascun risonatore può assumere soltanto valori multipli interi di una costante universale, che chiamai “h”

Max Planck, 1900

***h* è piccolissima: conta solo nel microcosmo**

$$h = 6,62606957(29) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

$$= 4,13566751(15) \times 10^{-21} \text{ MeV s}$$

attuale unità di misura della massa

$$h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ esatto}$$

“atomi” (quanti) di energia

L'energia di un risonatore elementare può assumere soltanto valori multipli interi di $(R/N) \beta \nu$. Durante l'assorbimento e l'emissione, l'energia di un risonatore varia in modo discontinuo per un multiplo intero di

$$\Delta E = (R/N) \beta \nu$$

Albert Einstein 1905

$$(R/N) \beta = h$$



“atomi” di luce

la luce in questi processi si comporta non come un'onda ma come un gas di corpuscoli, i quanti di luce (γ – **fotoni**) di massa nulla, energia

$$E_{\gamma} = h\nu$$

e quantità di moto

$$p_{\gamma} = E/c = h\nu/c = h/\lambda$$

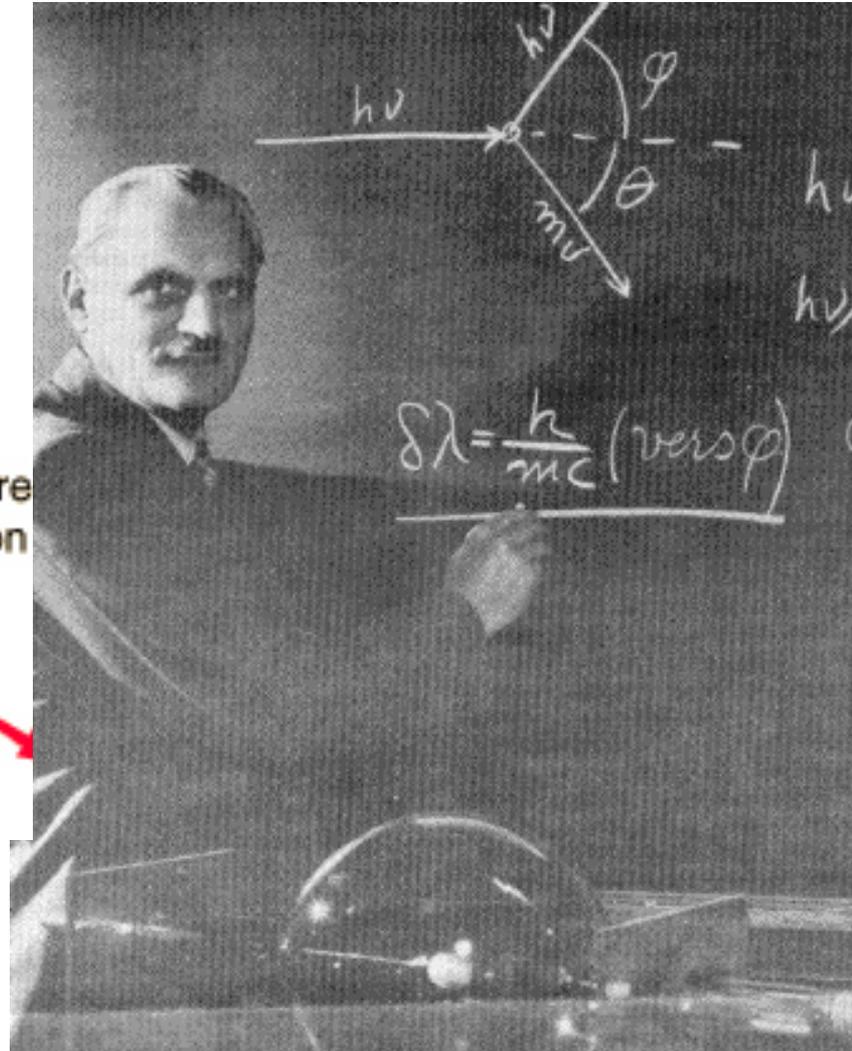
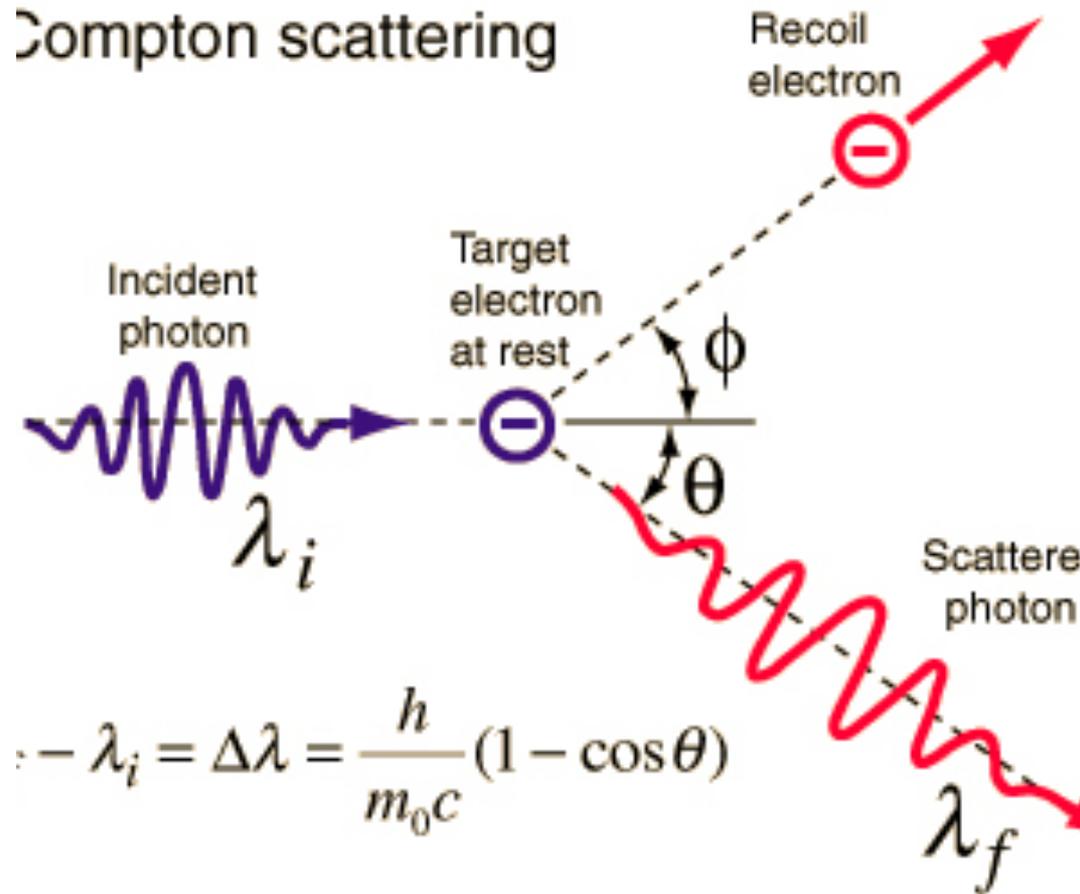
L'ipotesi del fotone era così rivoluzionaria da suscitare incertezze sulla stessa idea dei quanti anche da parte dei teorici che l'avevano presa sul serio.

l'ipotesi dei quanti di luce permette a Einstein di spiegare un fenomeno noto e di prevederne un altro:

- **effetto fotoelettrico (noto)**
inspiegabile con la teoria ondulatoria
- **comportamento dei calori specifici a bassa temperatura (ancora non studiato)**
 - ▷ **favorisce il terzo principio della termodinamica**
 - ▷ **metterà in moto un fondamentale processo di politica scientifica: le conferenze Solvay**

diffusione fotone-elettrone: i fotoni si comportano come particelle

Compton scattering



Arthur Holly Compton, 1924

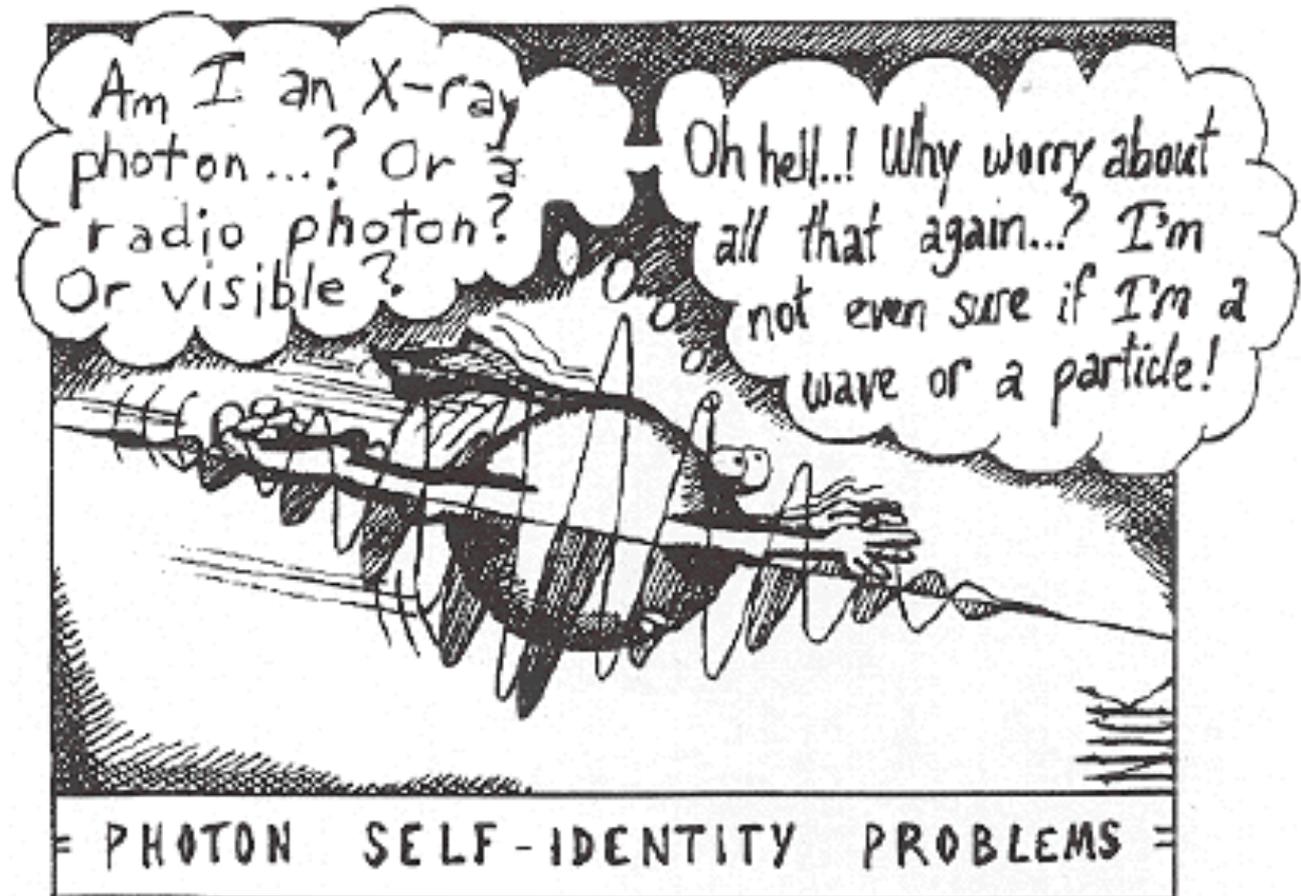
aspetto inquietante

status ontologico della radiazione luminosa:

doppia natura contraddittoria

▷ **onde elettromagnetiche**

▷ **quanti di luce come particelle**



modelli atomici

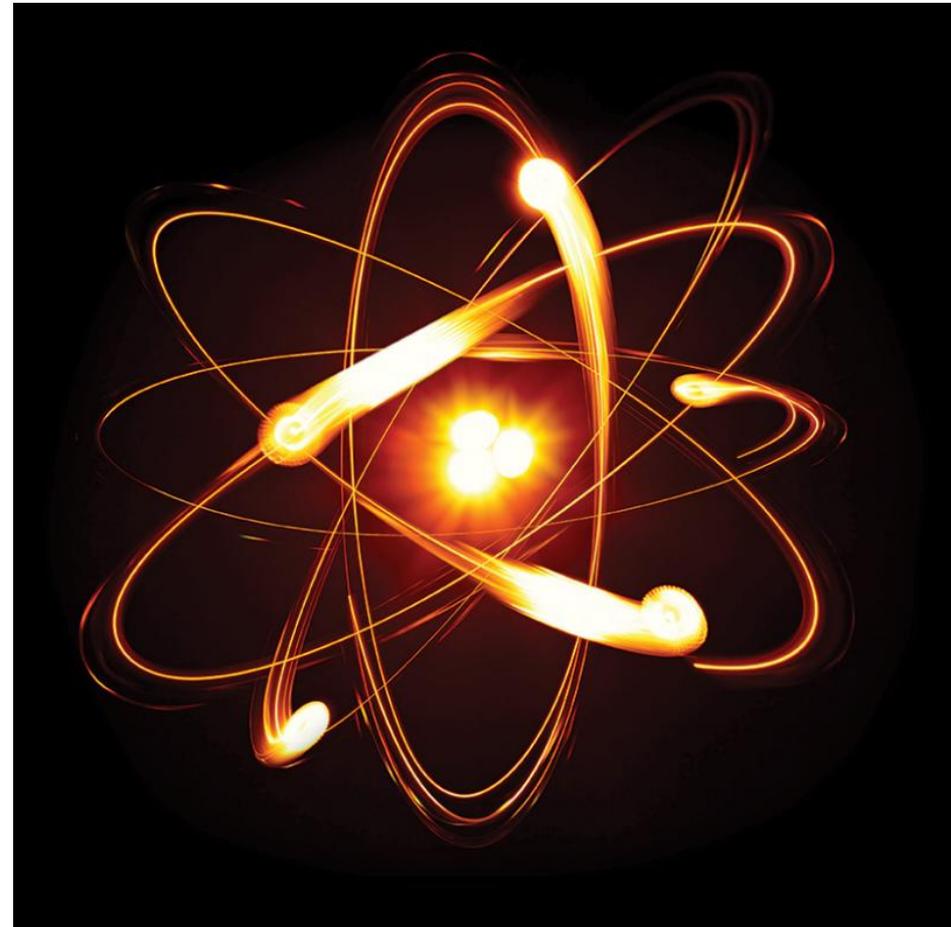
- **modello nucleo-planetario (Jean Baptiste Perrin 1901)**
- **modello a “dinamidi” (Philipp Lenard 1903)**
- **modello saturniano (Hantaro Nagaoka 1903)**
- **modello a carica distribuita (Joseph John Thomson 1904)**
- **modello elettronico fluido**
(John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh 1906)
- **modello a elettroni vibranti (James Hopwood Jeans 1906)**
- **modello a elettroni che si espandono**
(George Adolphus Schott 1906)
- **modello ad “archioni” (Johannes Stark 1910)**
- **modello nucleare**
(Ernest Rutherford, 1st Baron Rutherford 1911)

il nucleo atomico (Rutherford 1911)

esiste nel centro dell'atomo una carica elettrica positiva concentrata in un volume molto piccolo in grado di generare un campo elettrico molto intenso

la carica elettrica negativa compensativa dell'atomo (neutro) è dovuta a elettroni distribuiti nel volume atomico

il modello è instabile sia dal punto di vista dinamico che elettromagnetico



l'atomo nucleare

i vari elementi chimici si distinguono per il numero di elettroni presenti nell'atomo, il *numero atomico*.

L'atomo dell'idrogeno ha un solo elettrone, l'elio ha numero atomico 2, il carbonio 6, l'ossigeno 8 e l'uranio, il più "pesante" degli elementi naturali, 92. Sono stati creati artificialmente elementi con numero atomico fino a 118.

Group

	I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

* Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

il nucleo dell'idrogeno ha carica elettrica opposta a quella dell'elettrone e quindi è un "corpuscolo" con carica positiva elementare.

I nuclei degli altri elementi hanno carica elettrica multipla di quella dell'idrogeno

⇒ nuova particella elementare:
il **protone** (p)

$$m_p = 938,272621777(74) \text{ MeV}/c^2$$

$$Q_p = +e$$



teoria atomica, 1913

Niels Henrik David Bohr parte dal modello di Rutherford per costruire una teoria coerente.

- 1. gli atomi sono stabili**
- 2. il modello nucleare è ragionevole**
- 3. la teoria classica prevede che il modello sia instabile**

⇒

- 4. meccanica ed elettromagnetismo classici non valgono a livello atomico**
- 5. si deve ricorrere alla teoria dei quanti di Planck ed Einstein**



Bohr propone per la descrizione quantistica degli atomi due postulati:

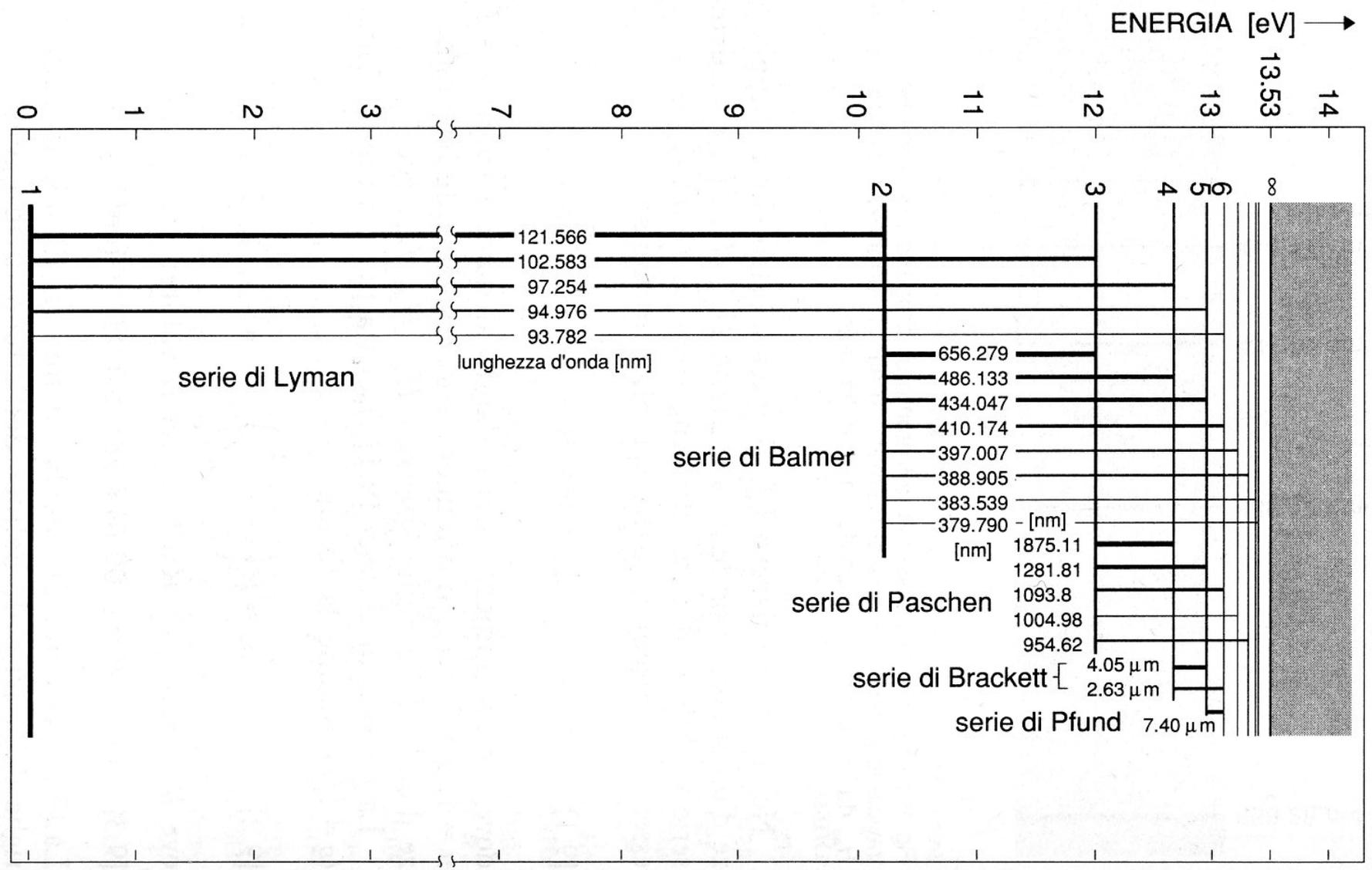
- 1. in un sistema atomico esiste un certo numero di stati stazionari che possiedono una stabilità incompatibile con la meccanica classica; l'unico possibile cambiamento del sistema consiste in una transizione completa da uno stato in un altro;*
- 2. non vi è radiazione negli stati stazionari; nella transizione fra stati viene emessa radiazione monocromatica [fotoni!] di frequenza data da*

$$h \nu = E' - E''$$

Niels Bohr 1913

stati stazionari e spettro dell'idrogeno

Fig. 9.3 - Diagramma dei livelli energetici dell'atomo di idrogeno.



la teoria dei quanti

- le grandezze fisiche dei sistemi coincidono con quelle classiche: carica elettrica, massa, energia, momento, momento angolare, componente del momento angolare rispetto a un'asse, momento magnetico, posizione ...
- i corpuscoli si trattano come punti materiali e il loro moto avviene lungo traiettorie o orbite ben definite
- la forza elettromagnetica (unica rilevante a livello atomico) è descritta dalle formule classiche
- valgono i principi di conservazione galileani

lo **stato** di un sistema microscopico è definito da un insieme di **numeri quantici** che indicano per ogni grandezza fisica rilevante quante unità possiede del valore quantico fondamentale

nel caso degli atomi:

$n_E (n)$ numero quanti di energia

$n_L (l)$ numero quanti di momento angolare

$n_z (m)$ numero di quanti della componente del momento angolare rispetto all'asse z

n_μ numero di magnetoni di Bohr

principio di esclusione di Pauli (1925)

in un atomo due elettroni non possono avere lo stesso insieme di numeri quantici

- **se un elettrone atomico si trova in uno stato atomico con un insieme di numeri quantici (n, l, m, \dots) gli altri elettroni sono esclusi da tale stato**
- **in questo modo si riempiono via via stati con numeri quantici crescenti**

configurazioni degli stati fondamentali dei vari elementi chimici

TAB. 30.1 - CONFIGURAZIONE ELETTRONICA DEGLI ATOMI E CORRISPONDENZA CON GLI ELEMENTI CHIMICI NATURALI (Z ≤ 92) E TRANSURANICI (Z > 92)

Z	Guscio Livello	K			L			M			N				O		Z	N				O				P			Q					
		1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	4s	4p	4d		4f	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d	7s								
1	H	1															55	Cs	2	6	10		2	6					1					
2	He	2															56	Ba	2	6	10		2	6					2					
3	Li	2	1														57	La	2	6	10		2	6	1				2					
4	Be	2	2														58	Ce	2	6	10	2	2	6				2						
5	B	2	2	1													59	Pr	2	6	10	3	2	6				2						
6	C	2	2	2													60	Nd	2	6	10	4	2	6				2						
7	N	2	2	3													61	Pm	2	6	10	5	2	6				2						
8	O	2	2	4													62	Sm	2	6	10	6	2	6				2						
9	F	2	2	5													63	Eu	2	6	10	7	2	6				2						
10	Ne	2	2	6													64	Gd	2	6	10	7	2	6	1			2						
11	Na	2	2	6	1												65	Tb	2	6	10	9	2	6				2						
12	Mg	2	2	6	2												66	Dy	2	6	10	10	2	6				2						
13	Al	2	2	6	2	1											67	Ho	2	6	10	11	2	6				2						
14	Si	2	2	6	2	2											68	Er	2	6	10	12	2	6				2						
15	P	2	2	6	2	3											69	Tm	2	6	10	13	2	6				2						
16	S	2	2	6	2	4											70	Yb	2	6	10	14	2	6				2						
17	Cl	2	2	6	2	5											71	Lu	2	6	10	14	2	6	1			2						
18	Ar	2	2	6	2	6											72	Ho	2	6	10	14	2	6	2			2						
19	K	2	2	6	2	6	1										73	Ta	2	6	10	14	2	6	3			2						
20	Ca	2	2	6	2	6	2										74	W	2	6	10	14	2	6	4			2						
21	Sc	2	2	6	2	6	1	2									75	Re	2	6	10	14	2	6	5			2						
22	Ti	2	2	6	2	6	2	2									76	Os	2	6	10	14	2	6	6			2						
23	V	2	2	6	2	6	3	2									77	Ir	2	6	10	14	2	6	7			2						
24	Cr	2	2	6	2	6	4	2									78	Pt	2	6	10	14	2	6	9			1						
25	Mn	2	2	6	2	6	5	2									79	Au	2	6	10	14	2	6	10			1						
26	Fe	2	2	6	2	6	6	2									80	Hg	2	6	10	14	2	6	10			2						
27	Co	2	2	6	2	6	7	2									81	Tl	2	6	10	14	2	6	10			2		1				
28	Ni	2	2	6	2	6	8	2									82	Pb	2	6	10	14	2	6	10			2		2				
29	Cu	2	2	6	2	6	10	1									83	Bi	2	6	10	14	2	6	10			2		3				
30	Zn	2	2	6	2	6	10	2									84	Po	2	6	10	14	2	6	10			2		4				
31	Ga	2	2	6	2	6	10	2	1								85	At	2	6	10	14	2	6	10			2		5				
32	Ge	2	2	6	2	6	10	2	2								86	Rn	2	6	10	14	2	6	10			2		6				
33	As	2	2	6	2	6	10	2	3								87	Fr	2	6	10	14	2	6	10			2		6				
34	Se	2	2	6	2	6	10	2	4								88	Ra	2	6	10	14	2	6	10			2		6				
35	Br	2	2	6	2	6	10	2	5								89	Ac	2	6	10	14	2	6	10			2		6	1			
36	Kr	2	2	6	2	6	10	2	6								90	Th	2	6	10	14	2	6	10			2		6	2			
37	Rb	2	2	6	2	6	10	2	6								91	Pa	2	6	10	14	2	6	10	2		2		6	1			
38	Sr	2	2	6	2	6	10	2	6								92	U	2	6	10	14	2	6	10	3		2		6	1			
39	Y	2	2	6	2	6	10	2	6	1							93	Np	2	6	10	14	2	6	10	4		2		6	1			
40	Zr	2	2	6	2	6	10	2	6	2							94	Pu	2	6	10	14	2	6	10	6		2		6				
41	Nb	2	2	6	2	6	10	2	6	3							95	Am	2	6	10	14	2	6	10	7		2		6				
42	Mo	2	2	6	2	6	10	2	6	4							96	Cm	2	6	10	14	2	6	10	7		2		6	1			
43	Tc	2	2	6	2	6	10	2	6	5							97	Bk	2	6	10	14	2	6	10	9		2		6				
44	Rv	2	2	6	2	6	10	2	6	7							98	Cf	2	6	10	14	2	6	10	10		2		6				
45	Rh	2	2	6	2	6	10	2	6	8							99	Es	2	6	10	14	2	6	10	11		2		6				
46	Pd	2	2	6	2	6	10	2	6	10							100	Fm	2	6	10	14	2	6	10	12		2		6				
47	Ag	2	2	6	2	6	10	2	6	10							101	Md	2	6	10	14	2	6	10	13		2		6				
48	Cd	2	2	6	2	6	10	2	6	10							102	No	2	6	10	14	2	6	10	14		2		6				
49	In	2	2	6	2	6	10	2	6	10							103	Lr	2	6	10	14	2	6	10	14		2		6	1			
50	Sn	2	2	6	2	6	10	2	6	10																								
51	Sb	2	2	6	2	6	10	2	6	10																								
52	Te	2	2	6	2	6	10	2	6	10																								
53	I	2	2	6	2	6	10	2	6	10																								
54	Xe	2	2	6	2	6	10	2	6	10																								

完全の周期表 (長周期型)

遷移元素と典型元素

この周期表は、長周期型を示しています。遷移元素は、d-軌道に電子が入る元素であり、典型的な金属性を示します。典型元素は、s-軌道に電子が入る元素であり、非金属性を示します。

teoria dei quanti: successi

- struttura atomica
- tavola periodica degli elementi
- legami chimici
- molecole
- spettroscopia
- raggi X
- assorbimento ed emissione della radiazione
- termodinamica quantica
- separazione delle proprietà atomiche e nucleari
- legge dello spostamento radioattivo



teoria dei quanti: limiti

- manca una legge dinamica dei sistemi
- non esiste una formulazione relativistica
- si tratta in modo diverso la radiazione e la materia
- è una descrizione della realtà non l'individuazione dei rapporti causali
- restano “effetti” atomici non spiegabili
- eccessiva molteplicità di linee spettrali
- proprietà della radioattività
- struttura e proprietà dei nuclei
- momento magnetico “sbagliato” dell'elettrone
- esistono grandezze fisiche non classiche
- doppia natura dei fotoni: ondulatoria e particellare

ipotesi di Uelenbeck e Goudsmit, 1925

- l'elettrone ha un ulteriore attributo:
un “momento angolare intrinseco” (**spin**)
che vale $s^2 = \frac{1}{2} (\frac{1}{2} + 1) \hbar^2$ con terza componente $\pm \frac{1}{2} \hbar$
- il momento magnetico intrinseco è generato dal
“momento angolare intrinseco”
- il momento angolare totale è la somma del
momento orbitale e di quello intrinseco
- spiega la molteplicità di linee spettrali e il momento
magnetico dell'elettrone

lo spin non ha equivalente classico

si estende ai nuclei atomici e a tutte le particelle
microscopiche

lo spin caratterizza le proprietà statistiche dei sistemi microscopici

- se lo spin ha valori seminteri ($1/2, 3/2, \dots$) vale il principio di Pauli e non vi possono essere due “corpuscoli” nello stesso stato
 - ▷ statistica di Fermi-Dirac per **fermioni**
- se lo spin ha valori interi ($0, 1, 2, \dots$) non vale il principio di Pauli e vi può essere un numero arbitrario di “corpuscoli” nello stesso stato
 - ▷ statistica di Bose-Einstein per **bosoni**



fermione



bosoni

Statistiche classica e quantistiche:

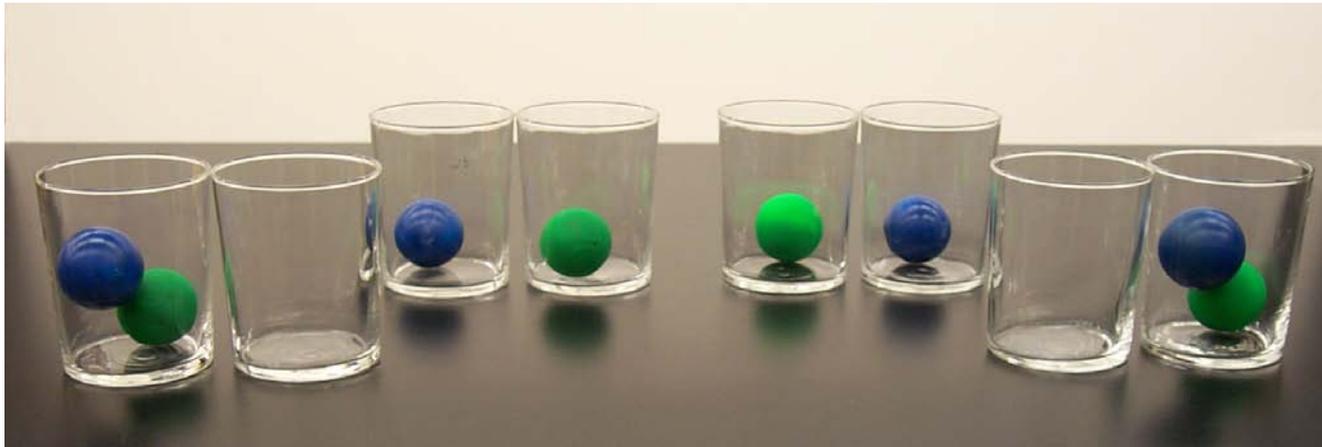
la meccanica statistica deriva il comportamento di un gran numero di particelle identiche (come le variabili termodinamiche) dalle caratteristiche individuali e dalle leggi probabilistiche generali.

Nel caso classico ogni particella è distinguibile dalle altre, mentre a livello quantistico particelle identiche sono assolutamente indistinguibili. I fermioni e i bosoni hanno proprietà statistiche diverse

Statistica di Boltzmann (particelle distinguibili):
due stati (bicchieri) e due particelle (palline)
ci sono quattro possibilità:

- due palline nel bicchiere 1 e nessuna nel bicchiere 2
 - due palline nel bicchiere 2 e nessuna nel bicchiere 1
 - la pallina A nel bicchiere 1 e la pallina B nel bicchiere 2
 - la pallina A nel bicchiere 2 e la pallina B nel bicchiere 1
- per cui, detta $P(k_1, k_2)$ la probabilità che ci siano k_1 palline nel bicchiere 1 e k_2 nel bicchiere 2, si ha

$$P(2,0)=1/4; \quad P(0,2)=1/4; \quad P(1,1)=1/2.$$



Statistica di Bose-Einstein (bosoni):

abbiamo tre sole possibilità:

- due palline nel bicchiere 1 e 0 nel bicchiere 2
- due palline nel bicchiere 2 e 0 nel bicchiere 1
- una pallina nel bicchiere 1 e 1 nel bicchiere 2

con probabilità

$$P(2,0) = 1/3: \quad P(0,2) = 1/3: \quad P(1,1) = 1/3.$$



Statistica di Fermi-Dirac (fermioni):

una sola possibilità

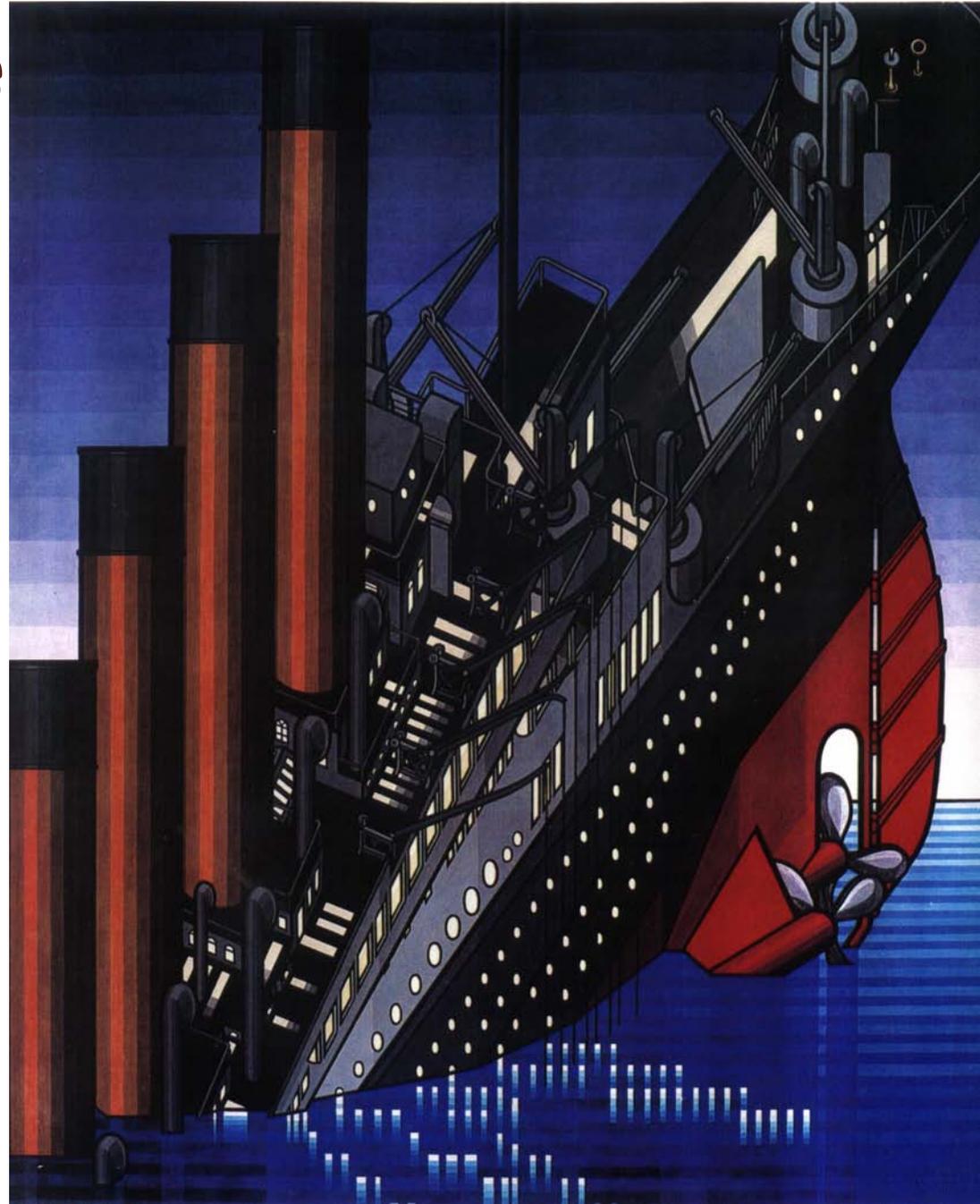
una pallina nel bicchiere 1 e 1 nel bicchiere 2

con probabilità:

$$P(2,0)=0; \quad P(0,2)=0; \quad P(1,1)=1.$$



**1924, la navigazione
della teoria dei
quanti trova
crescenti ostacoli ...**



MARVEL COMICS PRESENTS
**FANTASTIC
FIRSTS**



i giovani leoni

**Werner Heisenberg, Louis-Victor-
Pierre-Raymond de Broglie,
George Uelenbeck,
Samuel Goudsmit, Pasqual
Jordan, George Gamow,
Enrico Fermi, Frédéric Joliot,
Vladimir Aleksandrovich Fock,
Hans Albrecht Bethe,
Paul Adrien Maurice Dirac,
Johann von Neumann,
Eugene Paul Wigner, Oskar Klein**

e il più cattivo di tutti:

Wolfgang Ernst Pauli

la Knabenphysik (1925–28)

ripartire dalle contraddizioni di fondo del mondo microscopico

due strade contrapposte:

- superare il dualismo onda/particella in una teoria unificata della radiazione e della materia, “alla Einstein”**
- individuare le grandezze fisiche effettivamente osservabili e stabilire relazioni quantistiche fra di loro, nello “spirito di Bohr”**

Sia per la materia che per la radiazione è necessario introdurre contemporaneamente sia il concetto di corpuscolo sia quello di onda. Poiché i corpuscoli e le onde non possono essere indipendenti, costituendo due aspetti complementari della realtà, deve essere possibile stabilire un certo parallelismo fra il moto di un corpuscolo e la propagazione dell'onda associata

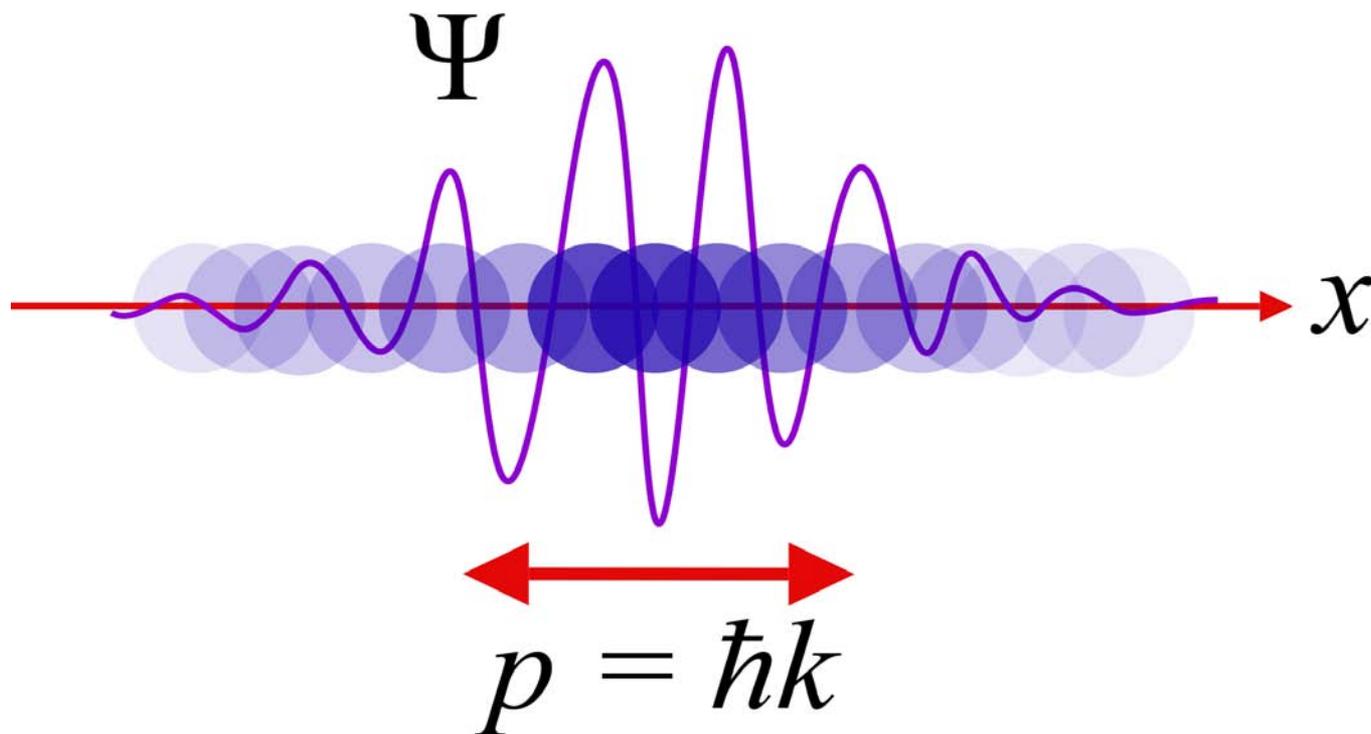
**Louis-Victor-Pierre-Raymond
principe de Broglie (1924)**



la lunghezza d'onda e la frequenza della
vibrazione sono legate al momento e
all'energia del corpuscolo secondo la costante
di Planck

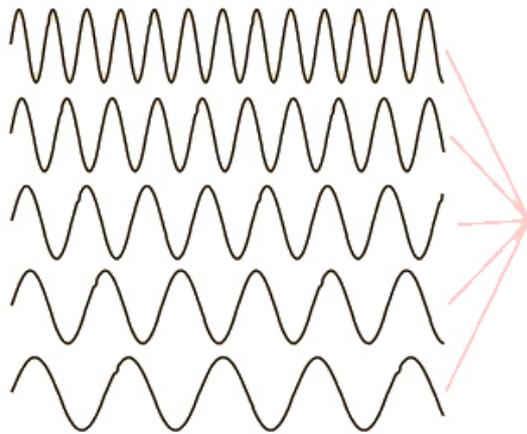
$$\nu = E/h$$

$$\lambda = h/p$$

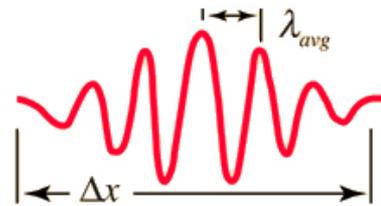


onde e particelle

- onde di frequenza precisa sono diffuse ovunque
- l'“onda” di una particella deve essere localizzata in prossimità della particella e muoversi assieme
- si costruiscono “pacchetti d’oda” fondendo più onde di frequenza differente

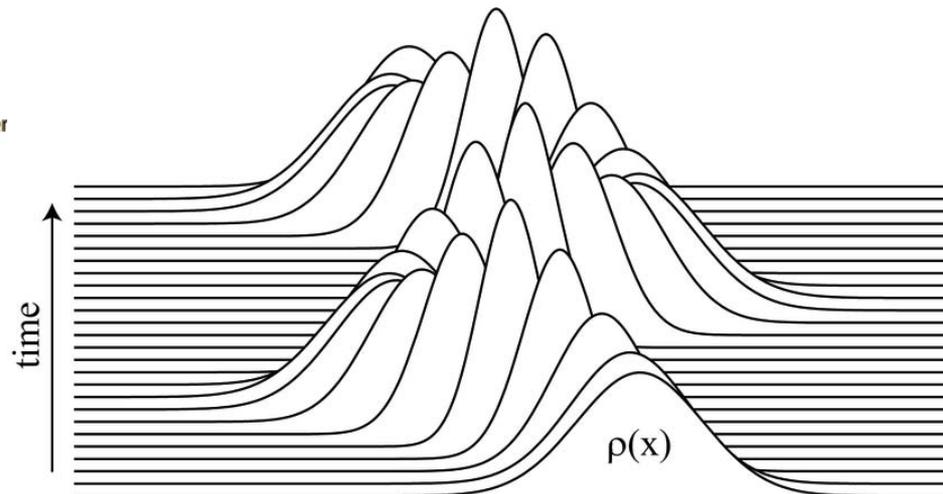


Adding several waves of different wavelength together will produce an interference pattern which begins to localize the wave.



But that process spreads the wave number values and makes it more uncertain. This is an inherent and inescapable increase in the uncertainty Δk when Δx is decreased.

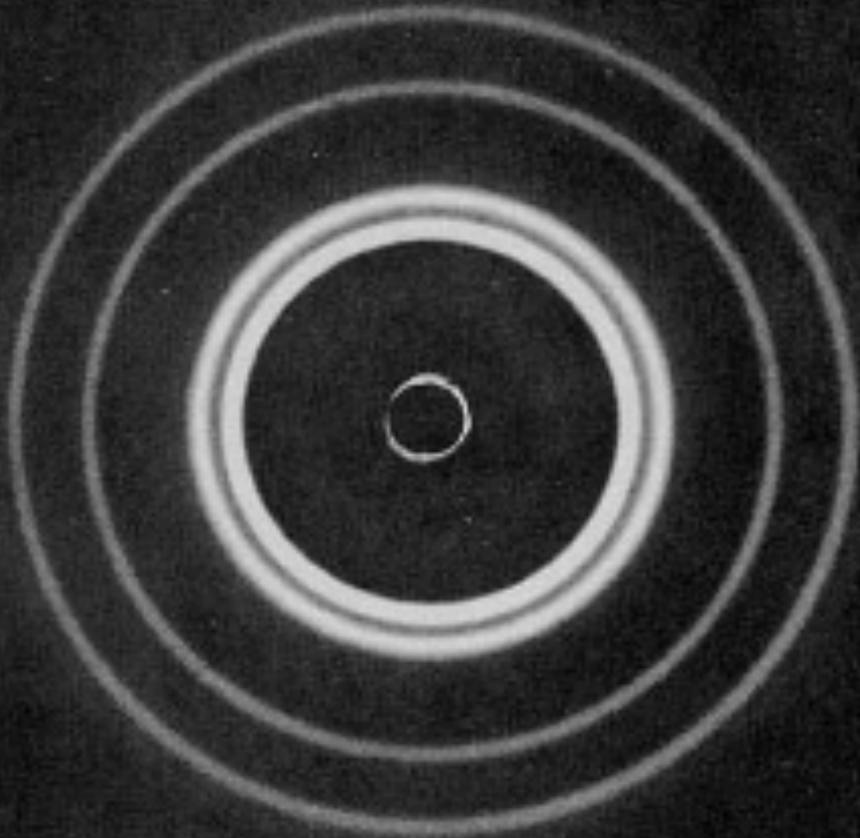
$$\Delta k \Delta x \approx 1$$



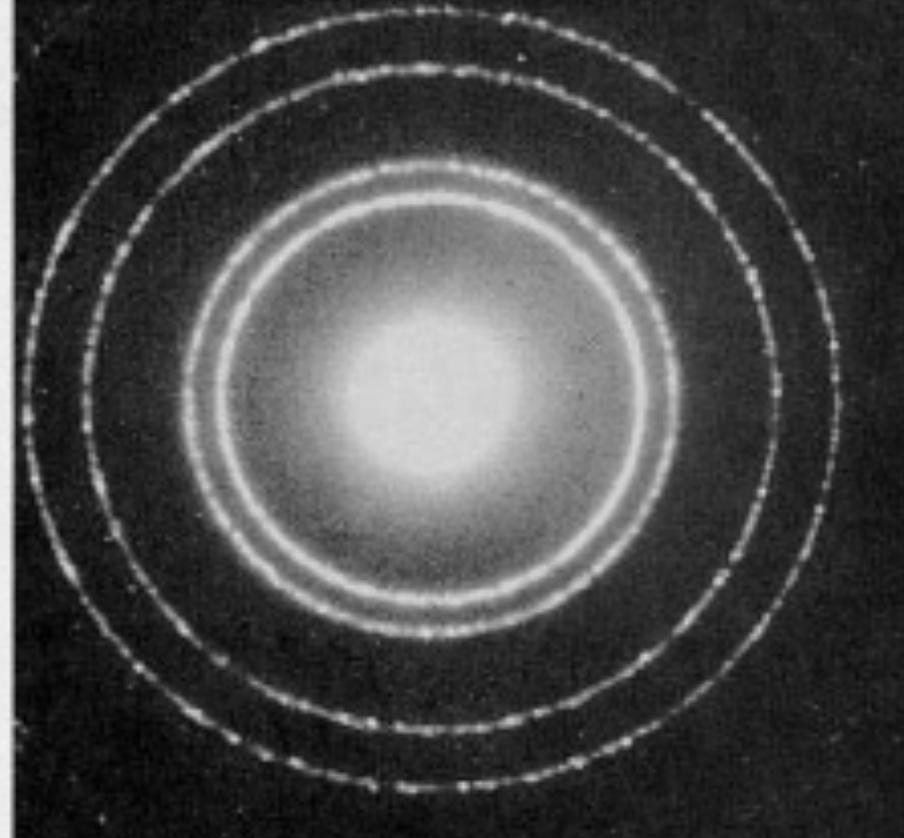
le onde materiali esistono e provocano fenomeni di diffrazione!

Clinton Davisson e Lester Germer (1927)

Diffraction pattern of X-ray beam passing through Al foil



Diffraction pattern of electron beam passing through Al foil



Erwin Schrödinger e la meccanica ondulatoria

- ogni sistema microscopico è descrivibile con un'onda di un "campo" di materia
- l'onda obbedisce a un'equazione di evoluzione data dalla rappresentazione del principio di conservazione dell'energia in termini quantici:

$$d\psi(x,t)/dt = [T + U] \psi(x,t)$$

con la condizione iniziale
nota $\psi(x,t_0)$





SCIENCEPHOTOLIBRARY

la funzione d'onda $\psi(x, t)$

- dipende dalle coordinate spaziali (x) della particella (particelle) e dal tempo (t)
- è una funzione complessa
- contiene tutte le informazioni sullo stato dinamico del sistema
- fornisce l'ampiezza e la fase dell'onda materiale del sistema nel punto x all'istante t
- vale il principio di sovrapposizione:
se $\psi(x, t)$ e $\varphi(x, t)$ sono funzioni d'onda,
anche $a \psi(x, t) + b \varphi(x, t)$ è una funzione d'onda
[le funzioni d'onda sono grandezze vettoriali]

la funzione d'onda oltre alla parte spazio-temporale $\psi(x,t)$ può comprendere una componente relativa a gradi di libertà non classici (spin, isospin, stranezza...) $\chi(\sigma,\tau)$ per descrivere completamente lo stato di un sistema

$$\Psi(x,t,\sigma,\tau) = \psi(x,t) \chi(\sigma,\tau)$$

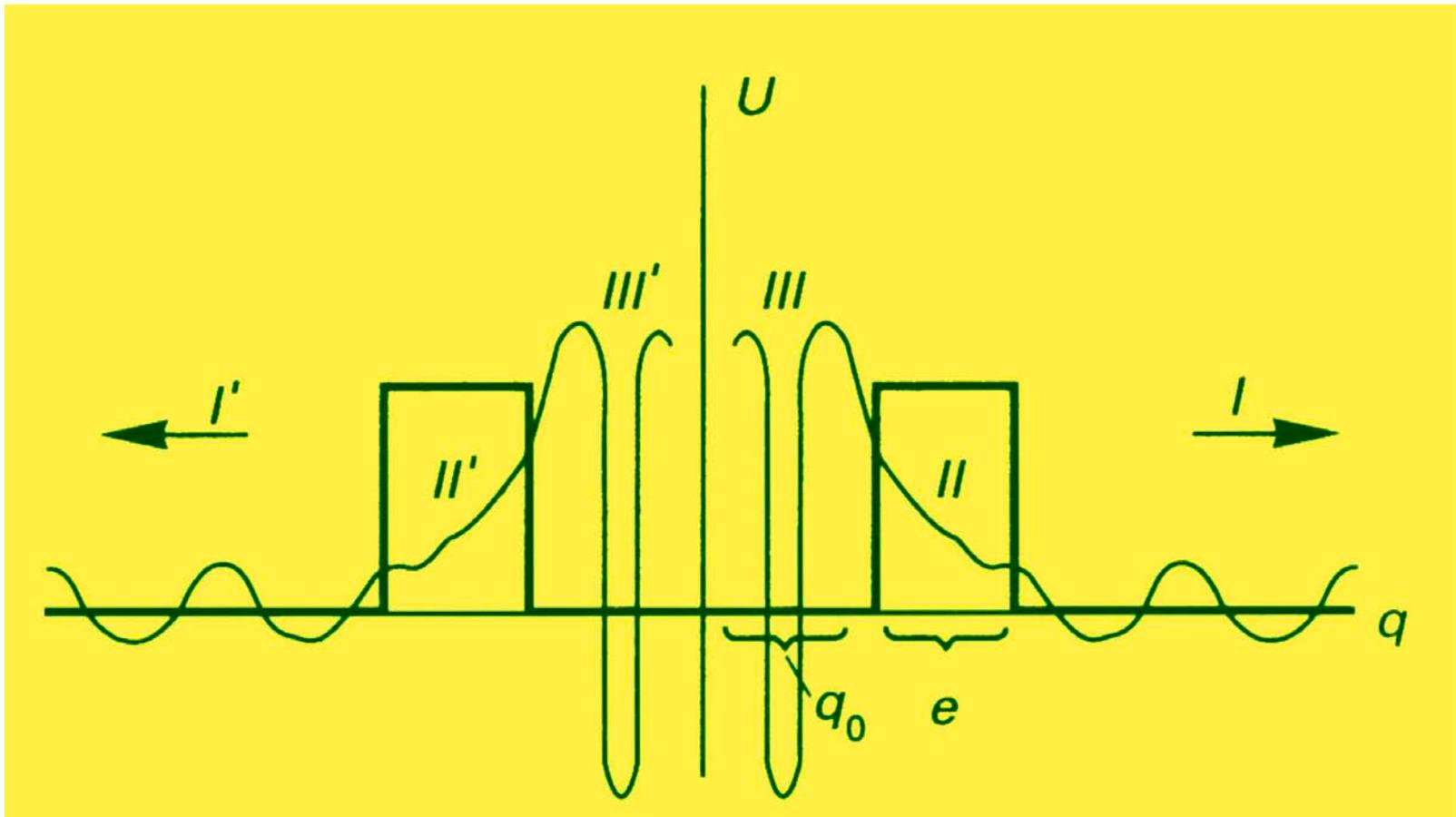
i valori delle varie grandezze fisiche in quello stato si trovano come i valori di aspettazione delle variabili aleatorie

$$\langle \Psi, A \Psi \rangle = \sum_{\sigma,\tau} \int \psi(x) A \psi(x) dx$$

effetto tunnel

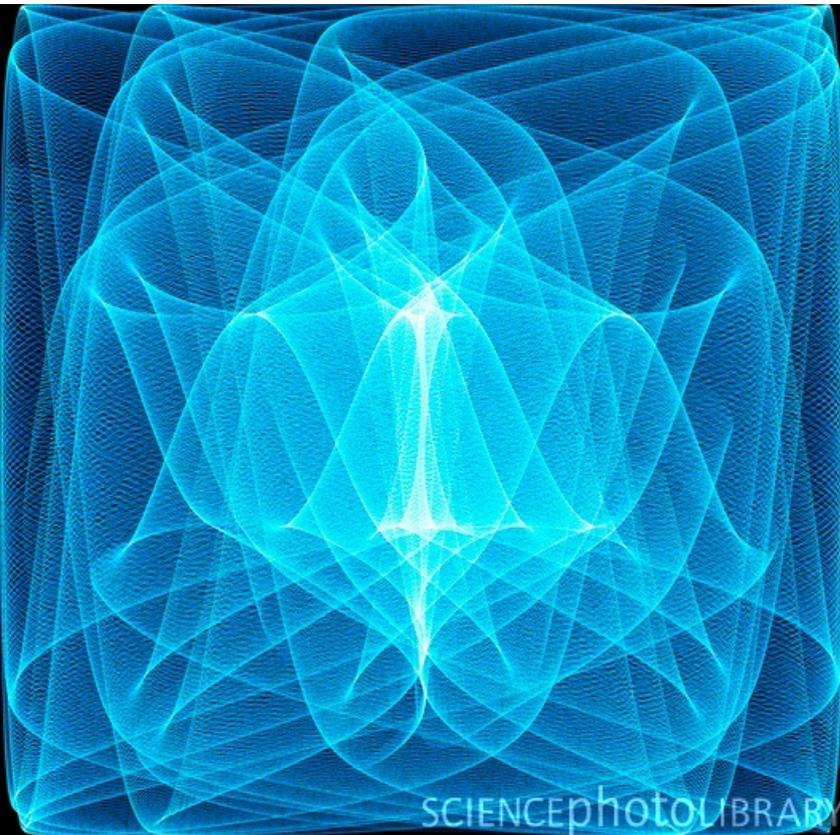
la funzione d'onda di un sistema limitato da barriere di potenziale si estende anche nello spazio esterno alla barriera anche per energie inferiori alla barriera.

Il processo spiega l'emissione di particelle alfa dai nuclei



ma cosa sono veramente le funzioni d'onda di Schrödinger?

non sono vere onde nello spazio-tempo:



- contengono tutte le informazioni sullo stato dinamico del sistema
- esprimono la *densità di probabilità* che il sistema si trovi in un dato punto nello spazio a un certo tempo con derminate proprietà

Max Born, 1927

probabilità classica e quantistica

predizioni probabilistiche

- in meccanica classica

- ▷ per una conoscenza incompleta delle condizioni iniziali
- ▷ per una conoscenza incompleta dei parametri. delle equazioni di evoluzione
- ▷ nel caso di un grande numero di enti

- in meccanica quantistica

- ▷ di ogni possibile evento si può conoscere solo la probabilità
- ▷ vale anche per eventi individuali

alternativa dei “leoncini” di Bohr

- individuare le grandezze fisiche effettivamente **osservabili** (massa invariante, carica elettrica, posizione, quantità di moto, momento angolare, energia, spin, ...)
- stabilire le relazioni quantistiche fra di loro, nello spirito di Bohr
- non considerare la struttura spazio-temporale
- fissare la legge di evoluzione temporale delle grandezze osservabili

principio di indeterminazione

Werner Heisenberg, 1926

grandezze coniugate
(il cui prodotto è un'azione)
si possono determinare
simultaneamente solo con
un'**indeterminazione**
intrinseca e ineliminabile

$$\Delta p \Delta q > h/2\pi$$

per esempio

$$\Delta p_x \Delta x > h/2\pi$$

$$\Delta L \Delta \phi > h/2\pi$$

$$\Delta E \Delta t > h/2\pi$$



principio di indeterminazione

esempio: masse e vite medie

mesone K

$$\Delta E = 1,6 \times 10^{-2} \text{ MeV} \quad \Delta t = 2,1 \times 10^{-11} \text{ s}$$

$$\Delta E \Delta t = 3,36 \times 10^{-13} \text{ MeV s}$$

leptone μ

$$\Delta E = 3,5 \times 10^{-6} \text{ MeV} \quad \Delta t = 2,2 \times 10^{-12} \text{ s}$$

$$\Delta E \Delta t = 7,7 \times 10^{-18} \text{ MeV s}$$

mesone π^0

$$\Delta E = 6 \times 10^{-4} \text{ MeV} \quad \Delta t = 1,8 \times 10^{-18} \text{ s}$$

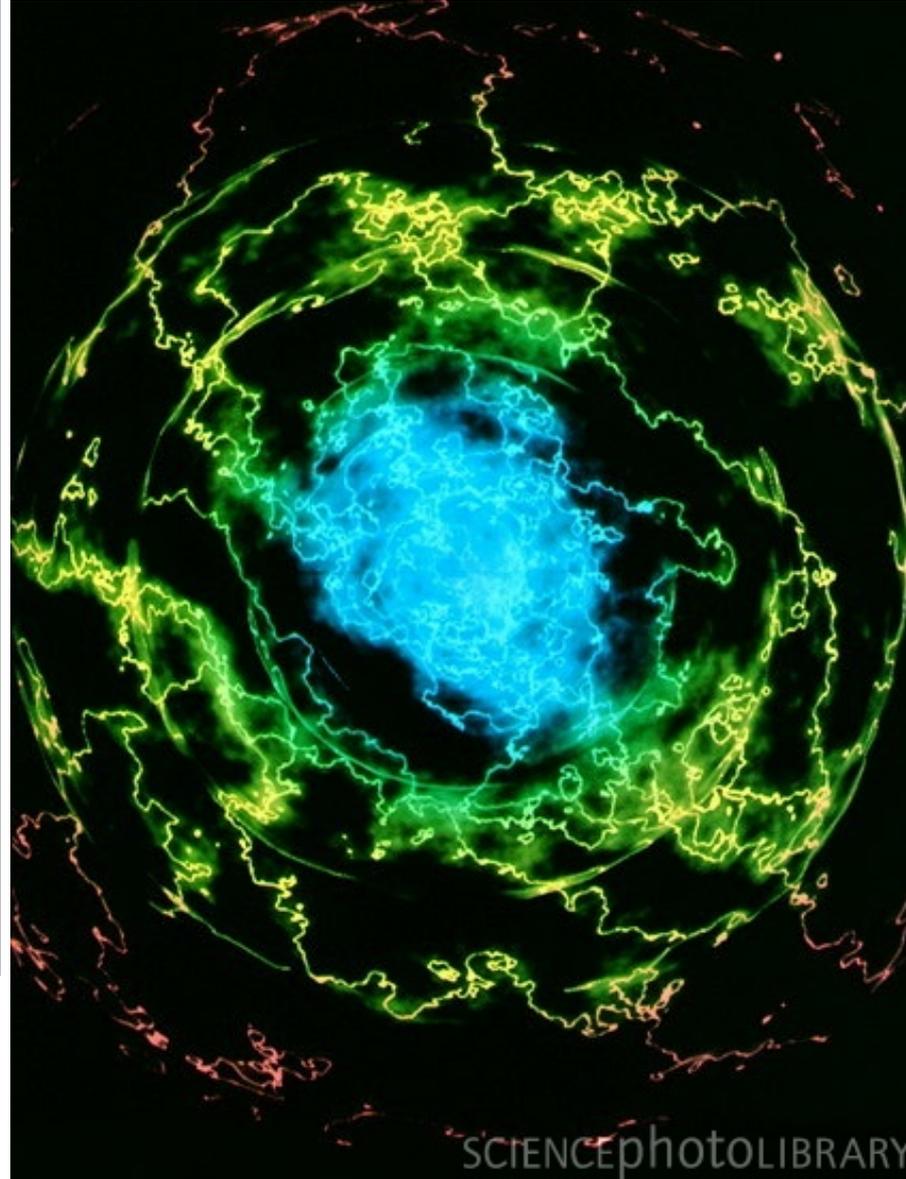
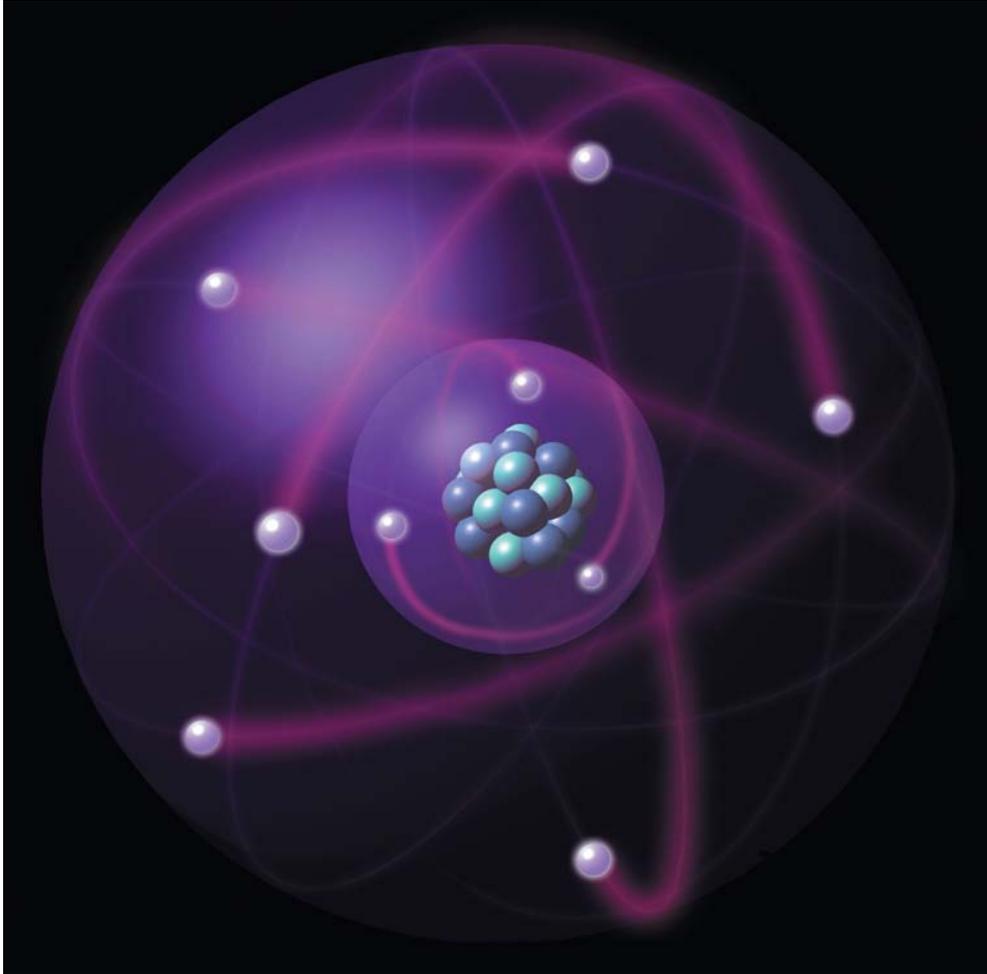
$$\Delta E \Delta t = 1,08 \times 10^{-21} \text{ MeV s}$$

$$h/2\pi = 6,58211928 \times 10^{-22} \text{ MeV s}$$

conseguenze del principio di indeterminazione

- poiché una traiettoria e un'orbita sono definite dalla posizione e velocità in ogni istante, **non** esistono né orbite né traiettorie quantiche ben definite
- in spazi ristretti **non** si conserva il momento
- l'energia di uno stato stazionario si può conoscere esattamente e si conserva;
per un tempo brevissimo Δt si può disporre dell'energia "virtuale" $\Delta E < 2\pi \Delta t/h$

si dissolvono le orbite e anche le rappresentazioni analogiche dei microsistemi



meccanica corpuscolare

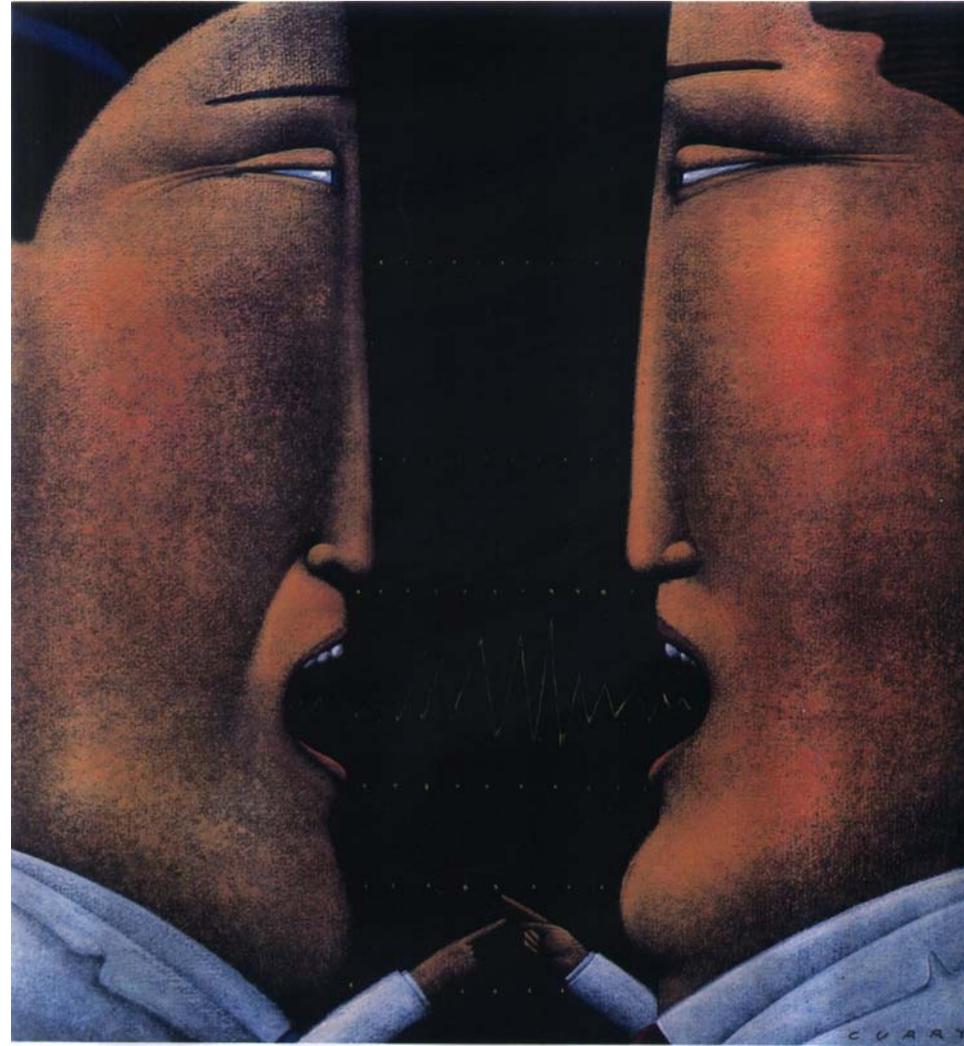
(Heisenberg, Born, Jordan, Dirac, 1926)

- gli stati di un sistema microscopico sono individuati dai valori delle grandezze fisiche osservabili e sono esprimibili mediante *vettori* di uno spazio *hilbertiano*
- le grandezze osservabili del sistema sono espresse da *operatori* con speciali proprietà algebriche vincolate dalle relazioni di indeterminazione
- l'evoluzione temporale della grandezza G è determinata dall'operatore H associato all'energia totale del sistema mediante una relazione algebrica

$$dG(t)/dt = [H(t), G(t)]$$

meccanica ondulatoria/*meccanica corpuscolare*

- **onde/*corpuscoli***
- **funzione d'onda/*vettori***
- **equazione differenziale/*relazione algebrica***
- **descrizione spazio-temporale/*valori delle osservabili***
- **amici di Einstein/*amici di Bohr***

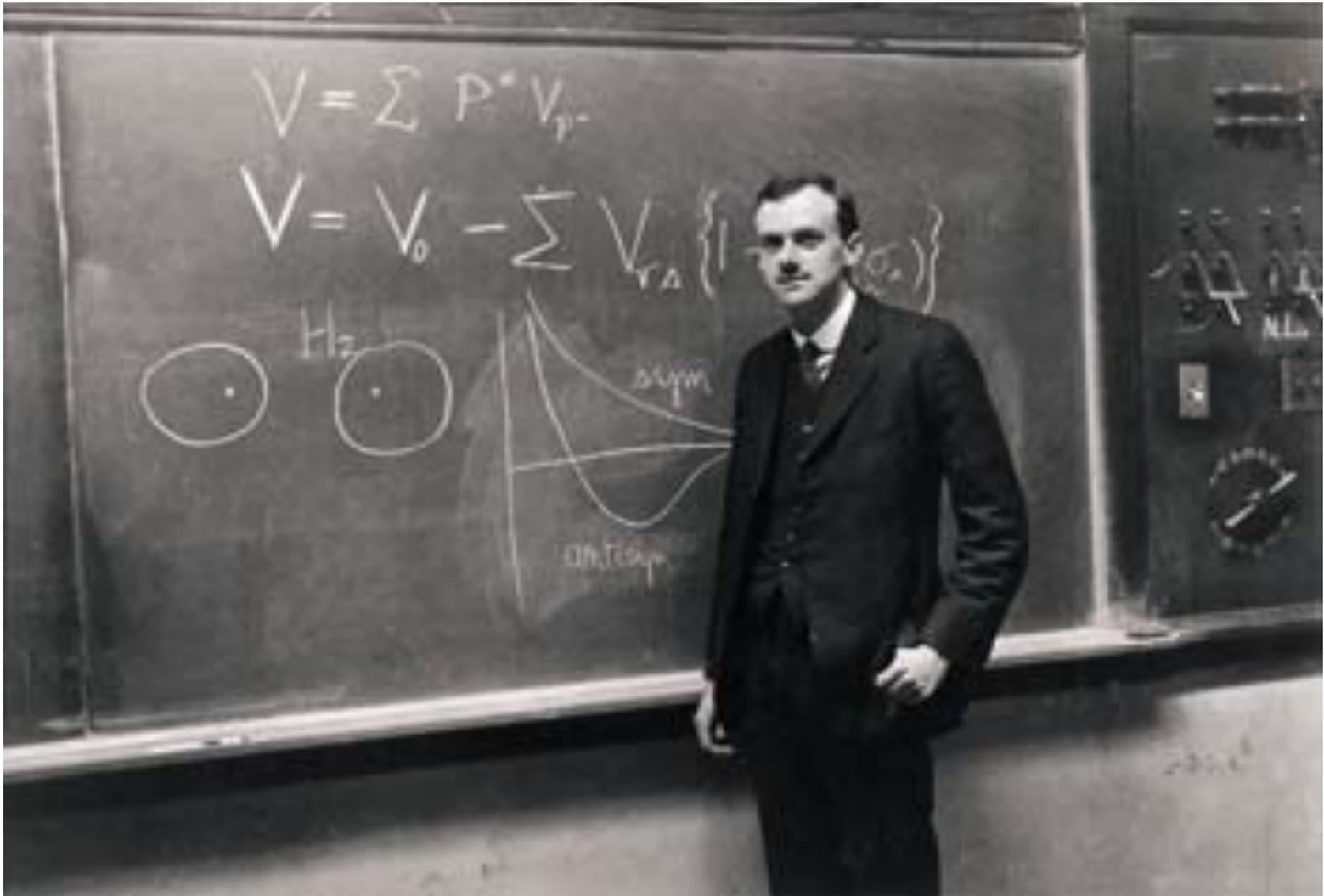


teorema di Schröndinger (1927)

la formulazione
ondulatoria e quella
corpuscolare sono
assolutamente
equivalenti e si può
passare da una all'altra
mediante una
trasformazione
matematica



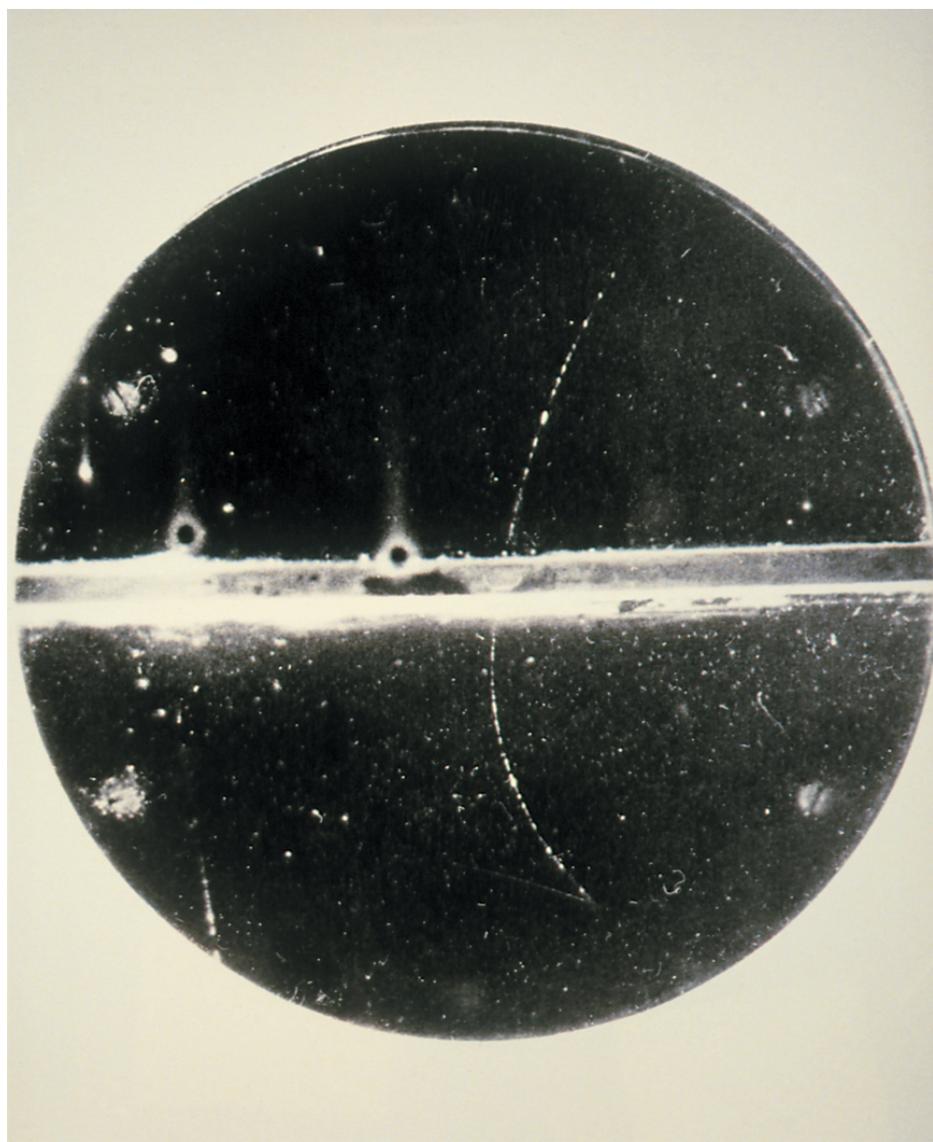
ma la mia è molto più meglissima ...



Paul Adrienne Maurice Dirac

Paul Dirac (1928) individua una formulazione relativisticamente invariante della meccanica quantistica

- l'equazione di Dirac vale per ogni fermione
- motiva l'esistenza dello spin
(le soluzioni dell'equazione sono "spinori")
- suggerisce l'esistenza di un nuovo corpuscolo, con le caratteristiche dell'elettrone, ma con carica elettrica positiva, il **positrone** (e^+), primo esempio di "antimateria"
 - ▷ osservato sperimentalmente nel 1932
- l'equazione di Dirac vale per ogni fermione

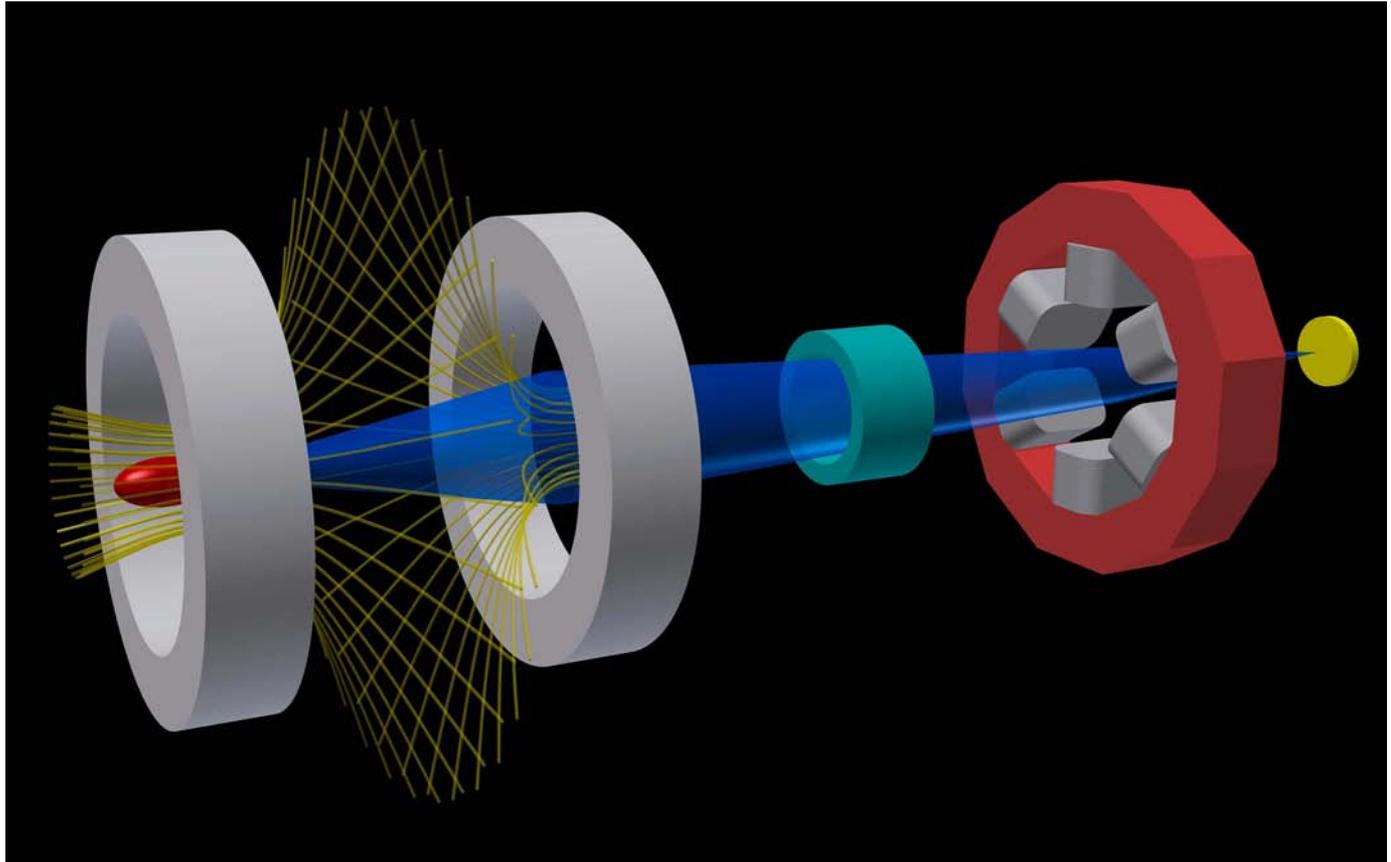


$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$
 $e^+ + e^- \rightarrow \gamma$



ogni particella possiede un'antiparticella

**l'universo è composto di sole particelle
(non sappiamo perché ...), le antiparticelle
vengono prodotte in condizioni particolari**



notazione di Dirac

lo stato quantico contiene tutta l'informazione disponibile su un dato sistema; si può rappresentare come funzione d'onda o usare la notazione di Dirac mediante il simbolo $| \rangle$ (ket)

per esempio la descrizione quantistica del decadimento alfa



coinvolge gli stati

$$| U_{238} \rangle \rightarrow | Th_{234} \rangle | He_4 \rangle$$

principio di sovrapposizione per ket

se per un sistema sono possibili due stati differenti $|\alpha\rangle$ e $|\beta\rangle$ allora ogni combinazione lineare dei due stati (con coefficienti complessi) è ancora uno stato del sistema

$$|\gamma\rangle = c_\alpha |\alpha\rangle + c_\beta |\beta\rangle$$

per esempio, se abbiamo un atomo di U_{238} che può decadere alfa, lo stato del nostro sistema è

$$|S\rangle = c_U |U_{238}\rangle + c_{Th} [|Th_{234}\rangle |He_4\rangle]$$

coefficienti legati alla probabilità del decadimento

**URANIUM 238 (U238)
RADIOACTIVE DECAY**

type of radiation	nuclide	half-life
	uranium-238	4.47 billion years
α	↓	
	thorium-234	24.1 days
β	↓	
	protactinium-234m	1.17 minutes
β	↓	
	uranium-234	245000 years
α	↓	
	thorium-230	8000 years
α	↓	
	radium-226	1600 years
α	↓	
	radon-222	3.823 days
α	↓	
	polonium-218	3.05 minutes
α	↓	
	lead-214	26.8 minutes
β	↓	
	bismuth-214	19.7 minutes
β	↓	
	polonium-214	0.000164 seconds
α	↓	
	lead-210	22.3 years
β	↓	
	bismuth-210	5.01 days
β	↓	
	polonium-210	138.4 days
α	↓	
	lead-206	stable

anche il torio “figlio” è a sua volta radioattivo e si genera una “famiglia” radioattiva, fino al “pronipote” stabile; lo stato completo è

$$| S \rangle = c_U | U_{238} \rangle + c_{Th} [| Th_{234} \rangle | He_4 \rangle] + \sum c_k [| X_k \rangle | \rho_k \rangle]$$

coefficienti legati alla probabilità dei decadimenti

$$\sum_k |c_k|^2 = 1$$

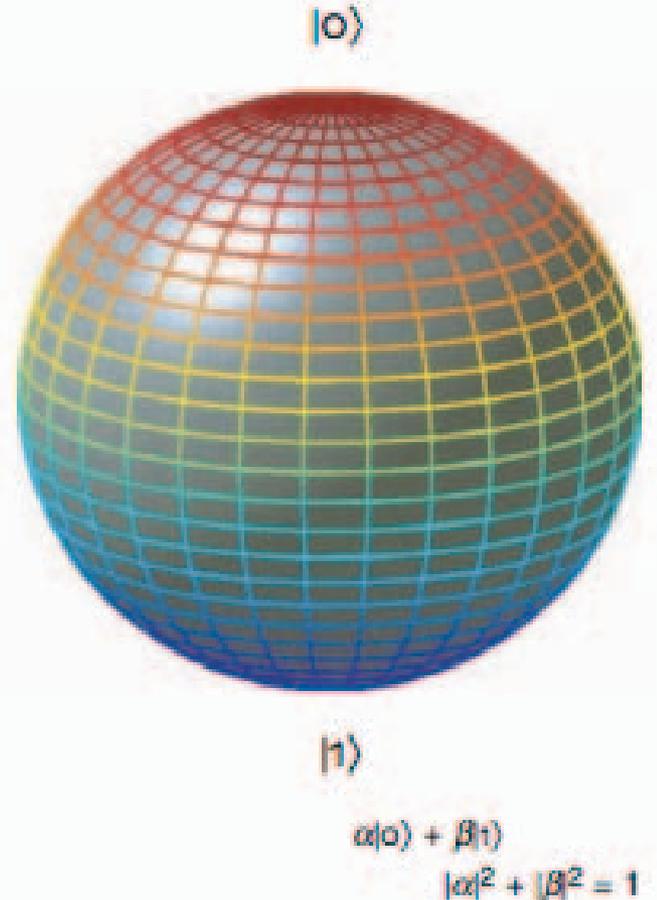
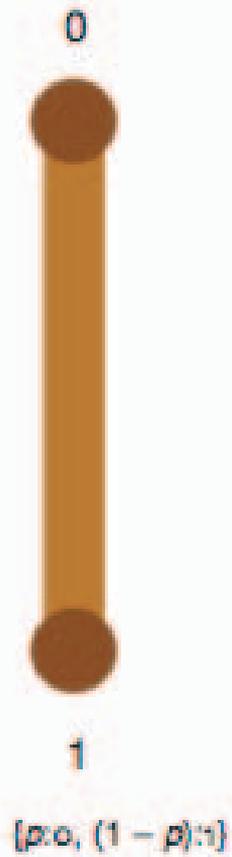
5è?tt?P- On?L ?Stiv0?P Pti5n?rtin n?

??q 55n?a LnèL ? q?5è?tt?j ?L ?U?Stinti??cèL On?ttvr?

5n?Pti55tinti?EPL 5?0L G??tin?c?c?ti0ti?P0ti???r?è??P?j ?U=P N?V?

3p?Stiv0?P Pti5n?rtinL?- ?ntt5tt????timvtiq L? ??tiLI ?rbntt?

0L? q?nti0a ?q?3?tt?m?m?n?- ?nti? n?3- PL0p?rb?5sL On????



Stiv0? P Pti5n?rtin L ?? n?è?tt?

??

i q?è?tt?Y?P>L?Y?é>ntin?Stinti?Estin??a Lnè?q?G?i 5n?è?nti?5- q?P?

E5- PL Op?rbG?mpn?rèL??tiPPrb??n?è?tt?L??- n?tia ?m?3rtinn?mL?0?

OrA0ti?- ?tinti?P?5èL 55?E5- PL Op?rbG?

?

??tt?

$|\psi\rangle + |\phi\rangle$! $|\psi\rangle$?

$|\psi\rangle + |\phi\rangle$! $|\psi\rangle$?

?

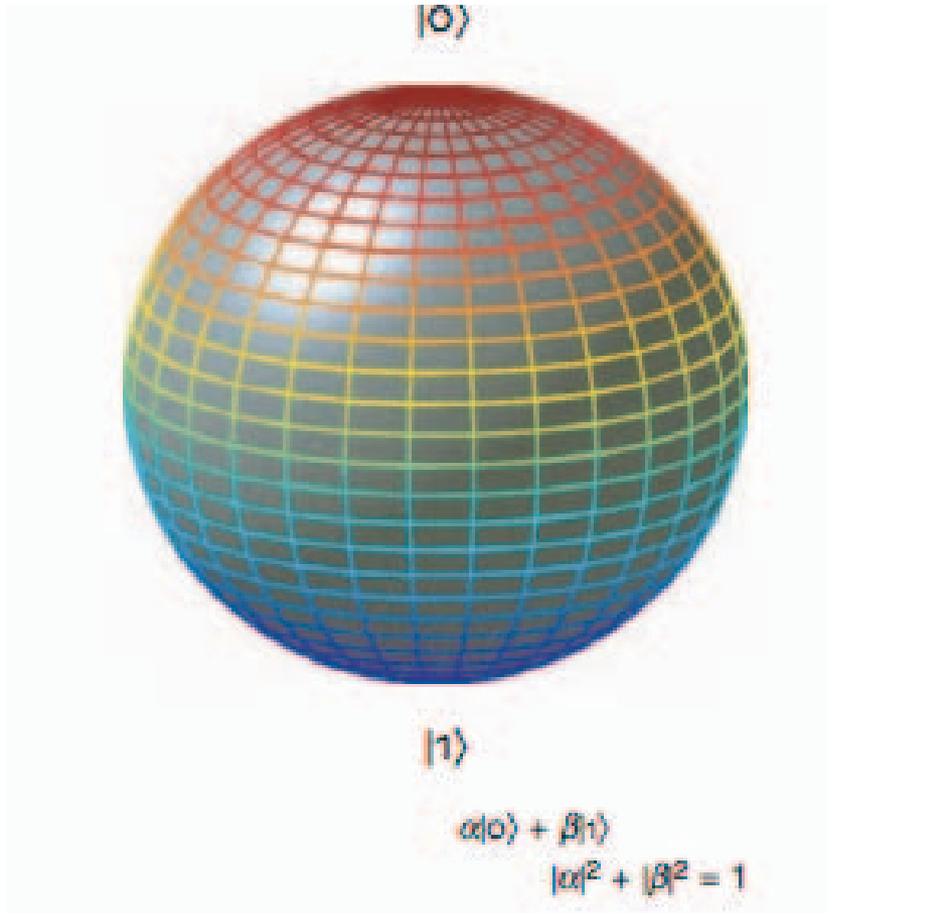
5nd???

$|\psi\rangle + |\phi\rangle$! $|\psi\rangle$?

$|\psi\rangle + |\phi\rangle$! $|\psi\rangle$?

?

?



rigenerazione dei K

I mesoni K vengono creati dalla forza nucleare, ma decadono per effetto di interazioni deboli; le particelle “reali”, quelle che si osservano in laboratorio e di cui si misurano le varie forme di decadimento, non possono essere gli “stati di produzione” K_0 e anti- K_0 caratterizzati da precisi valori della stranezza ($S = \pm 1$), ma due altre particelle neutre K_1 e K_2 , che non hanno stranezza ben definita, ma $CP = \pm 1$

K_0 e anti- K_0 sono “sovrapposizione” delle particelle K_1 e K_2 , le quali, a loro volta possono essere espresse come differenti combinazioni di K_0 e anti- K_0 . Avendo K_1 e K_2 opposti valori di CP , hanno differenti proprietà di decadimento: K_1 decade in una coppia di pioni, mentre l'altro K_2 decade in tre particelle e la vita media di K_2 risulta oltre 500 volte maggiore di quella di K_1 .

osservazione di un sistema quantistico

possiamo creare e osservare solo stati puri; questi evolvono quantisticamente in sovrapposizione degli stati possibili

per esempio

$$|U_{238}\rangle \rightarrow c_U |U_{238}\rangle + c_{Th} [|Th_{234}\rangle |He_4\rangle]$$

il processo di osservazione/misura del sistema fa trovare solo uno degli stati puri possibili

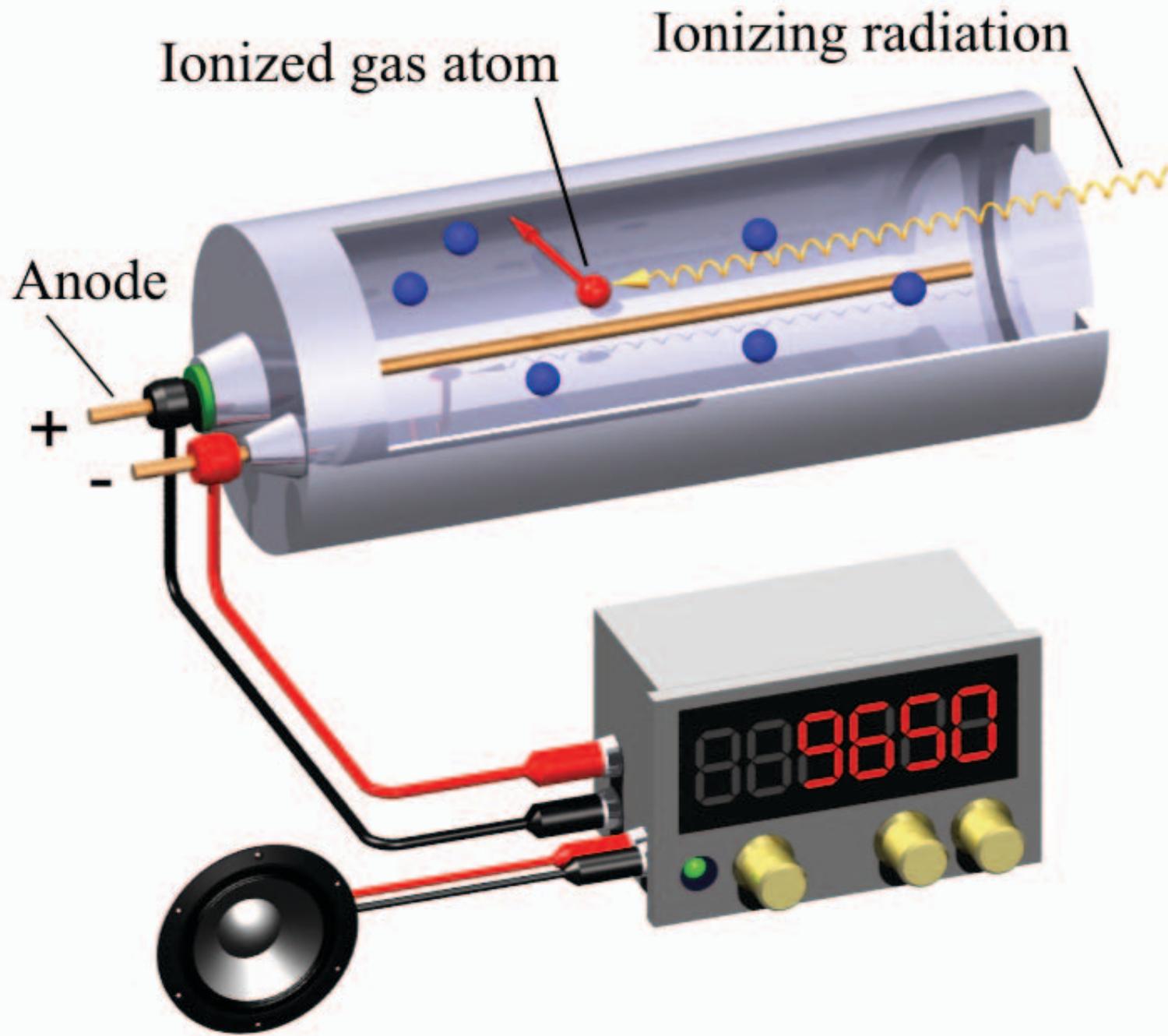
$$c_U |U_{238}\rangle + c_{Th} [|Th_{234}\rangle |He_4\rangle] \rightarrow$$

o $|U_{238}\rangle$

oppure $|Th_{234}\rangle |He_4\rangle$

problema dello strumento di misura

- **crea un ponte fra il micro-mondo e il macro-mondo**
- **usa processi quantici a contatto con i microsistemi**
 - e poi converte gli effetti in processi ordinari**
- **è soggetto sia alla meccanica quantistica che a quella classica**
- **modifica il fenomeno quantico**
 - ▷ **fa “colassare” la funzione d’onda in uno stato puro con un preciso valore dell’osservabile**
- **la misura è un processo quantistico**



?

?

?

principio di complementarità (Bohr, 1927)

a livello microscopico non si può separare il fenomeno naturale dallo strumento con cui lo si osserva

informazioni ottenute in condizioni sperimentali differenti non possono venir comprese in una singola descrizione:

per esempio, se si misura la posizione, non si può conoscere il momento coniugato, consistentemente con principio di indeterminazione

Il principio di complementarità comporta la dualità delle descrizioni degli oggetti quantici in termini di onde o di particelle, alternative fra di loro

in realtà viene meno la possibilità di “visualizzare” gli stati dei sistemi con immagini:

i microsistemi sono caratterizzati solo da proprietà espresse in forma matematica

- insieme di numeri quantici**
- funzione d'onda**

non esiste una metafora soddisfacente per i sistemi quantici

la meccanica quantistica permette lo studio del nucleo atomico

- è piccolissimo ≈ 100.000 più piccolo dell'atomo
- possiede una massa migliaia di volte quella dell'elettrone (praticamente tutta quella dell'atomo)
- ha una carica elettrica positiva a bilanciare quella di tutti gli elettroni atomici
- è sorgente dei processi radioattivi
- lo stesso elemento chimico può possedere nuclei di massa differente, ma di stessa carica elettrica (*isotopi*)

problemi del nucleo atomico

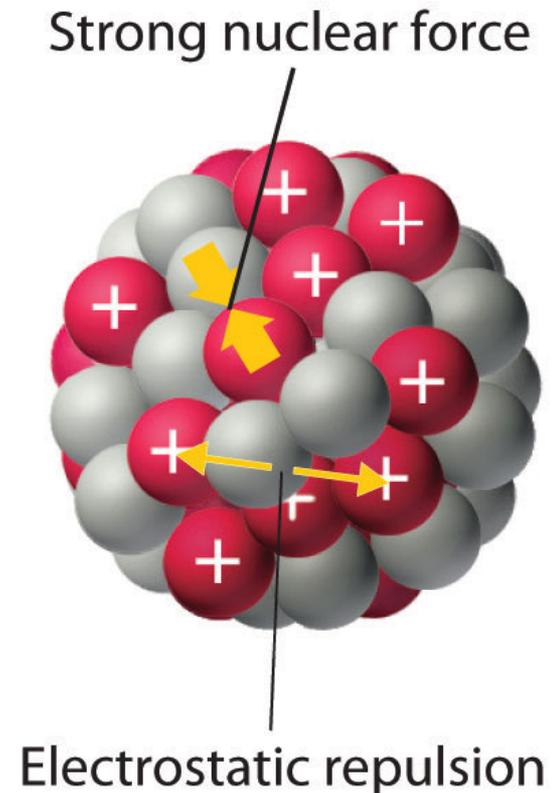
- **è composito:**
 - ▷ **emette elettroni, fotoni e alfa (nuclei di elio) [radioattività] e protoni [reazioni nucleari]**
 - ▷ **la carica elettrica positiva è distribuita su unità indipendenti (protoni)**
 - ▷ **la somma delle masse dei protoni è solo una parte della massa totale**
 - ➔ **deve possedere componenti neutri**
- **nonostante l'enorme repulsione elettrostatica rimane di dimensioni estremamente piccole**
 - ➔ **deve esistere una grande forza attrattiva**

occorre una “nuova” forza

- attrattiva e molto intense
 - a raggio d'azione limitato all'interno del nucleo
- ⇒ forza nucleare o **forte**

occorre una nuova particella
a spiegare la massa dei nuclei

- neutra
 - di massa analoga al protone
- ⇒ il **neutrone**



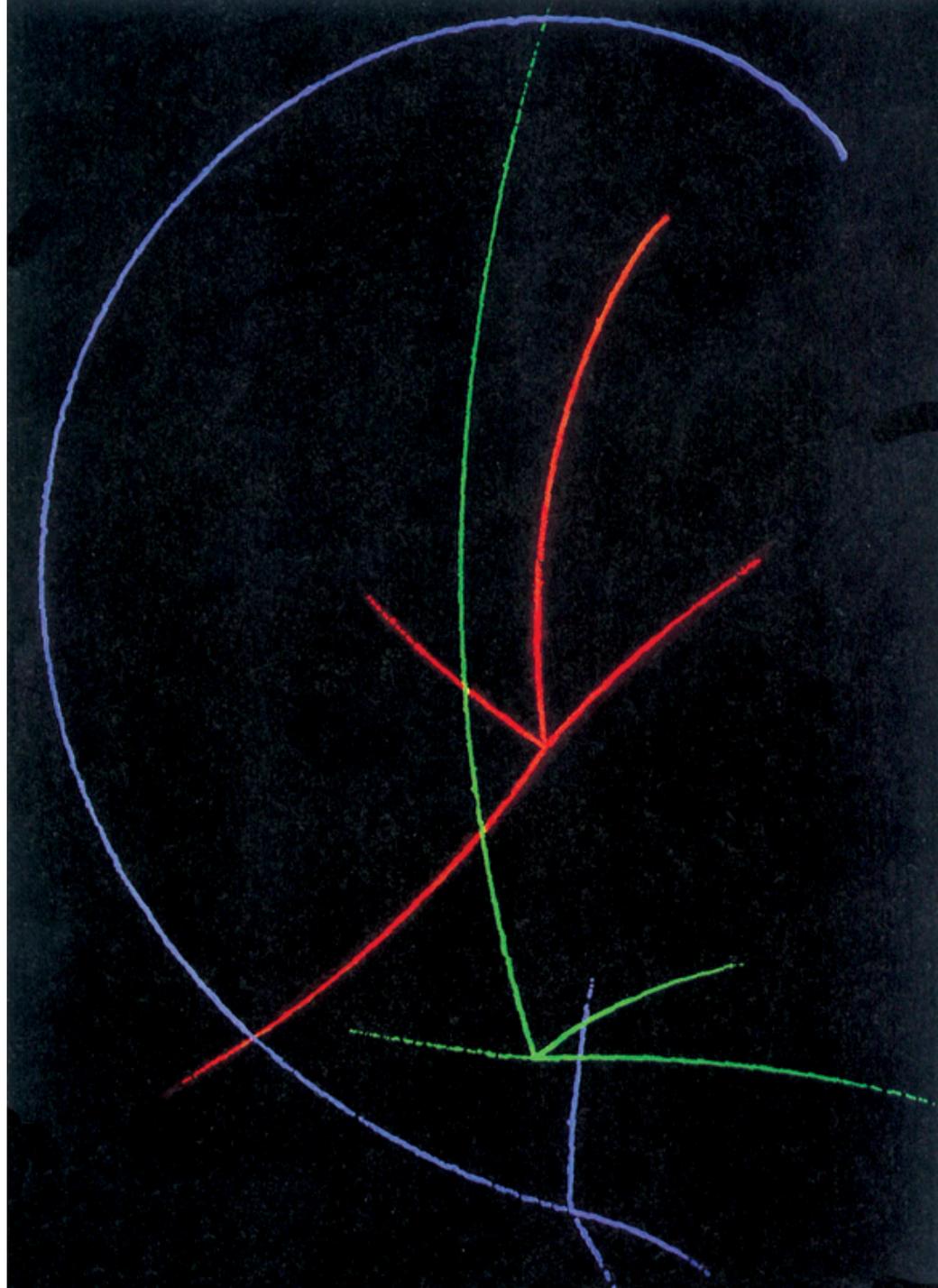
il neutrone (1932)

partner neutro del protone:
ha massa leggermente
superiore, spin $\frac{1}{2}$; sente la
forza forte; anche se ha
carica elettrica nulla
possiede proprietà
magnetiche
è instabile!

- neutroni liberi hanno una
vita media di

881,5(1,5) s

- legati nel nucleo possono
rimanere stabili o subire
decadimento beta



i problemi del decadimento beta

- si spiega ammettendo che un neutrone si trasformi in un protone e in un elettrone



- ⊙ ma non ci possono essere elettroni nei nuclei

- occorre una nuova forza, molto meno forte di quelle nucleare ed elettromagnetica

- ⊙ gli elettroni emessi non hanno uno spettro energetico discreto ma una distribuzione continua di valori, fino ad un valore massimo caratteristico

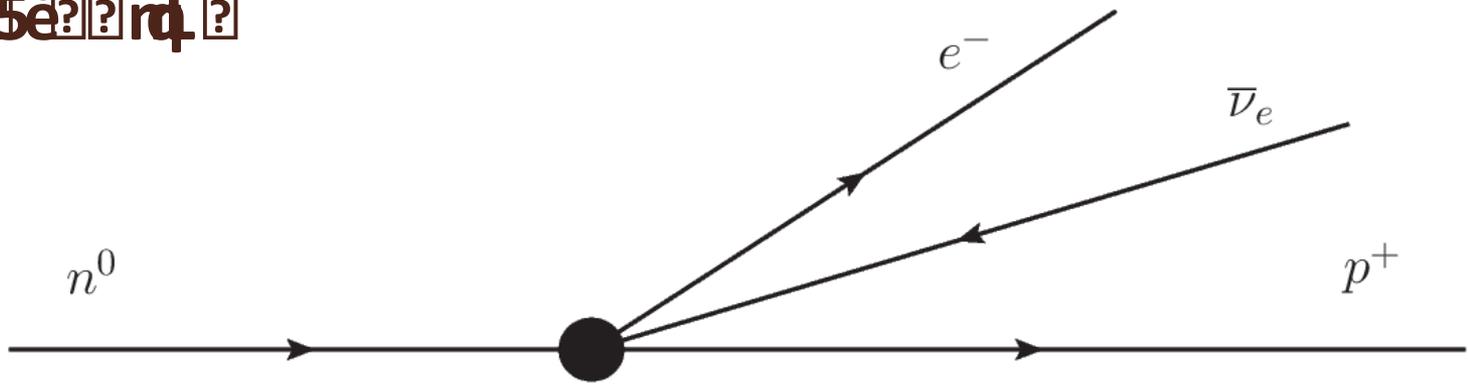
la teoria di Fermi del decadimento beta

- il processo è dovuto a una nuova forza detta **interazione debole** a raggio d'azione ancora inferiore di quella forte
- l'energia mancante all'elettrone emesso è "presa" da una nuova particella, neutra e di massa nulla (o piccolissima) il **neutrino** ν
- l'elettrone non preesiste nel nucleo ma viene creato, insieme al neutrino, nella trasformazione del neutrone nel protone



- n⁰ → p⁺ + e⁻ + ν_e

d⁺ → p⁺ + e⁻ + ν_e



D⁺ → p⁺ + e⁻ + ν_e

D⁺ → p⁺ + e⁻ + ν_e

D⁺ → p⁺ + e⁻ + ν_e

?

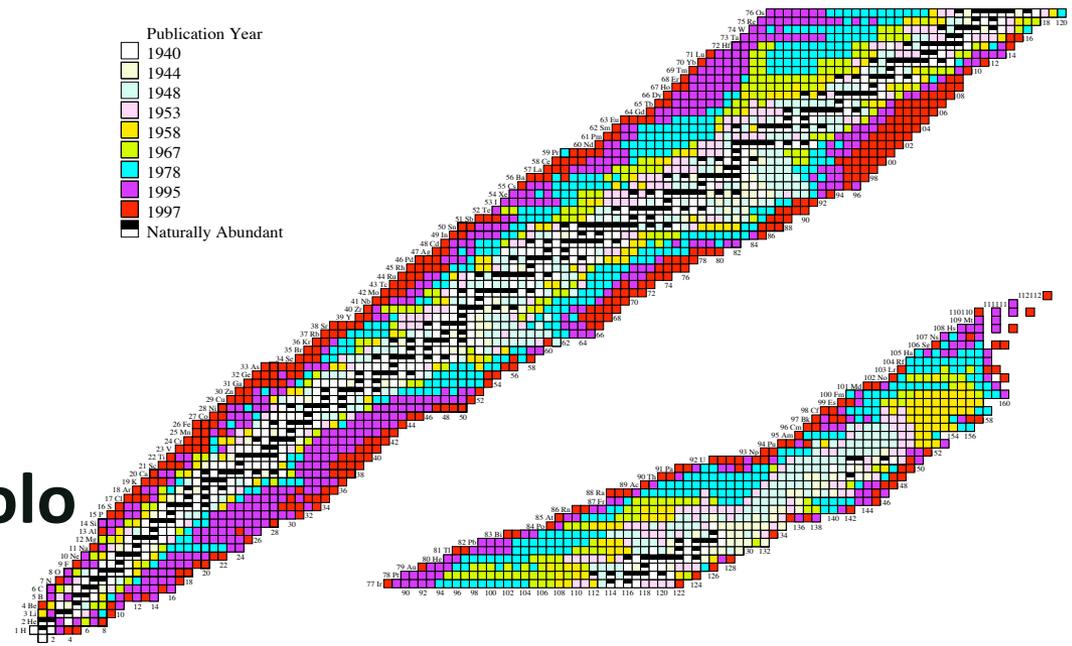
D⁺ → p⁺ + e⁻ + ν_e

D⁺ → p⁺ + e⁻ + ν_e

l'universo nucleare

- cinque elementi fondamentali:
 protone, neutrone, elettrone, neutrino, fotone
- tre forze: forte, elettromagnetica, debole
- la radioattività produce nuclei di elio, elettroni, neutrini e fotoni e trasforma nuclidi in altri nuclidi
- reazioni fra nuclei producono nuovi nuclei

Evolution of the *Table of Isotopes*



le specie nucleari note
sono circa 1700, di cui solo
300 stabili

gli elementi instabili non invecchiano:

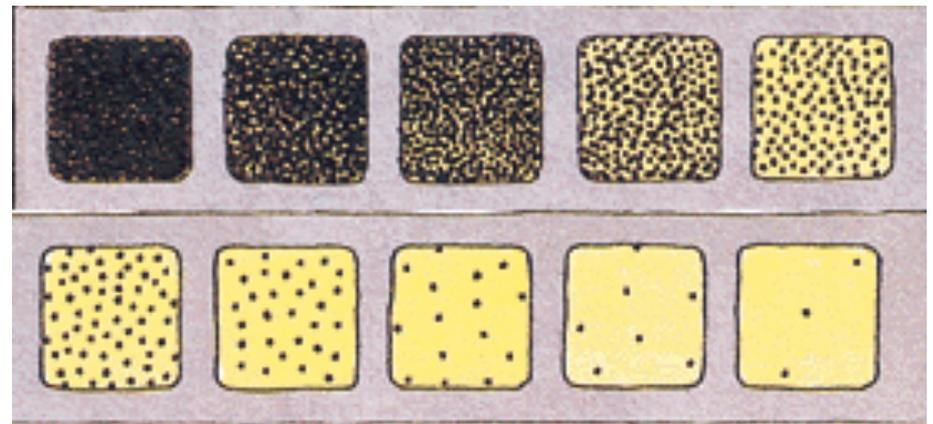
la probabilità di decadere rimane costante nel tempo ed è espressa dalla costante di decadimento λ

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

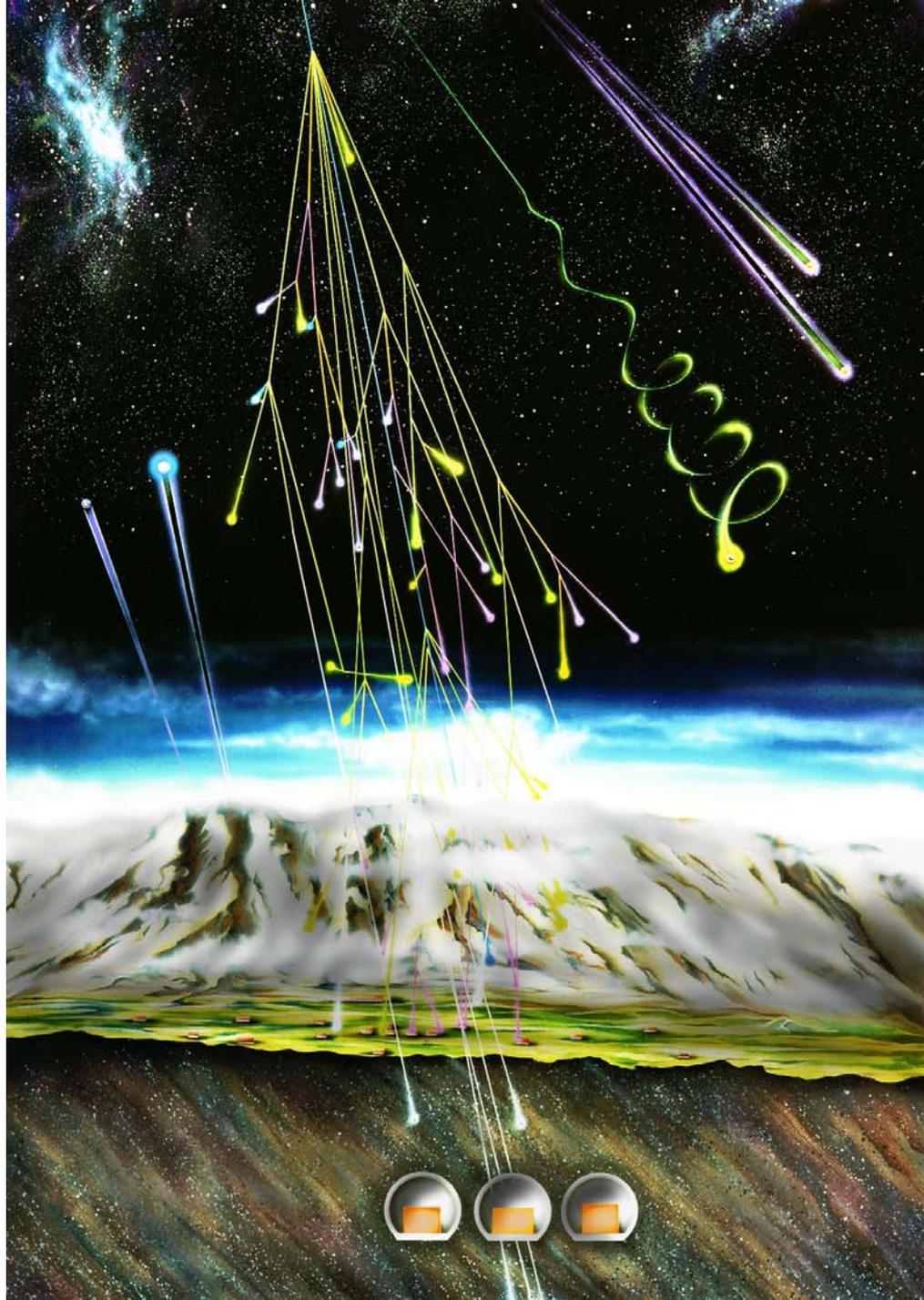
La vita media è data dall'inverso della costante di decadimento $T_m = 1/\lambda$

il tempo di dimezzamento è quando metà degli elementi iniziali sono decaduti

$$N(T_{1/2}) = \frac{1}{2} N_0 \quad T_{1/2} = 0,693/\lambda$$



particelle che nessuno
ha ordinato
nel 1937 si scoprono nei
raggi cosmici nuove
particelle “inutili”
per la struttura di nuclei
e atomi: i **muoni** μ^\pm
veri elettroni “pesanti”
(leptoni)
 $M_\mu \sim 106 \text{ MeV}/c^2$
spin = 1/2
carica = $\pm e$
vita media $\sim 2,2 \mu\text{s}$
non “sentono” la forza forte



i pioni π (mesoni) scoperti nel 1947

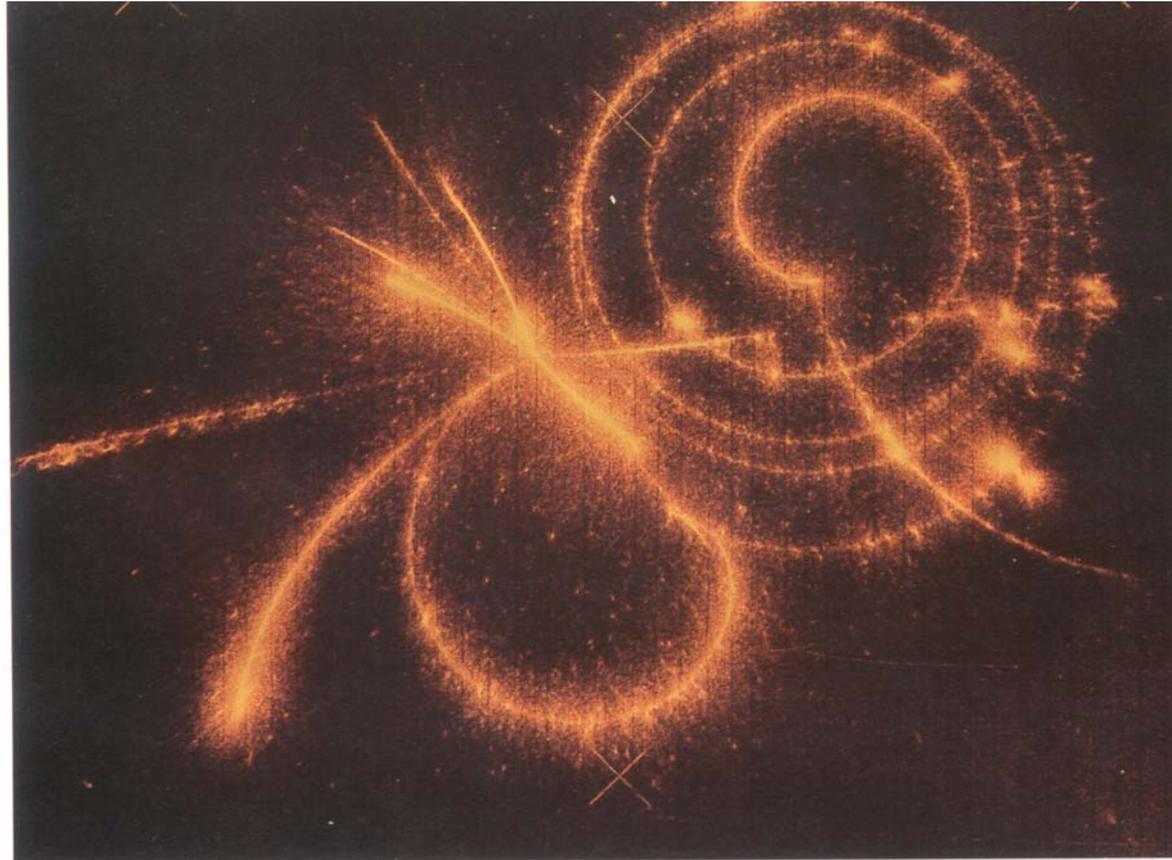
hanno spin 0; sono di tre tipi: con carica elettrica rispettivamente 0 (π^0), +e (π^+), -e (π^-); subiscono tutte le interazioni; la massa di circa $140 \text{ MeV}/c^2$ comporta che l'interazione forte abbia corto raggio d'azione; vita media dei pioni carichi 26 ns

$$\pi^0 \rightarrow 2 \gamma$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \text{anti-}\nu$$

generazione di pioni e loro decadimento



particelle inquietanti

nel 1947 i raggi cosmici forniscono nuove particelle che non decadono sempre nello stesso modo e vengono dette “strane”: i **kaoni** K^\pm e K^0 veri pioni “pesanti”

$$M_K \sim 495 \text{ MeV}/c^2$$

$$\text{spin} = 0$$

$$\text{carica} = \pm e \text{ o } 0$$

$$\text{vita media} \sim 1 \times 10^{-8} \text{ s}$$

sentono tutte le forze

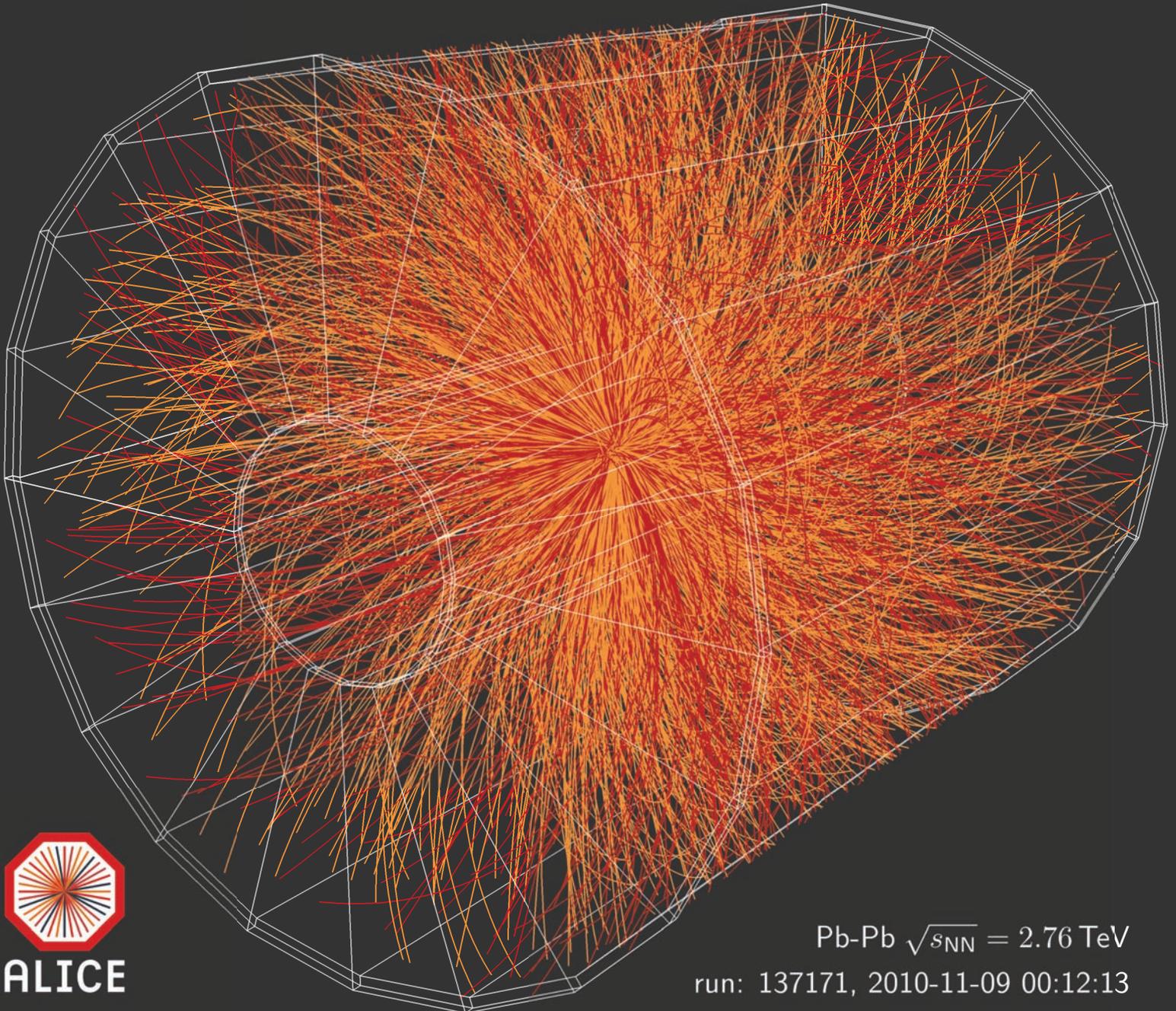


fisici padovani a caccia di kaoni

dagli anni '50: acceleratori e moltiplicazione delle particelle

**la disponibilità di ciclotroni e sincrotroni permette di
creare alte concentrazioni di energia che si
materializzano in famiglie:**

- ◆ **stati eccitati dei nucleoni (barioni o adroni):**
 - **famiglie N e Δ con stranezza $S = 0$**
 - **famiglia Λ con stranezza $S = 1$**
 - **famiglia Σ con stranezza $S = -1$**
 - **famiglia Ξ con stranezza $S = -2$**
 - **famiglia Ω con stranezza $S = -3$**
- ◆ **mesoni**
 - **famiglie $\pi, \eta, \rho, \varphi, a, b, f, X$ con stranezza $S = 0$**
 - **famiglia K con stranezza $S = \pm 1$**



ALICE

Pb-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV
run: 137171, 2010-11-09 00:12:13

un po' d'ordine: leptoni e barioni e nuovi numeri quantici

- **adroni (barioni)**: particelle che subiscono (anche) l'interazione forte
 - ▷ protoni, neutroni (numero barionico $B = +1$)
 - ▷ antiprotoni, antineutroni ($B = -1$)
- **leptoni**: particelle non soggette alle interazioni forti
 - ▷ elettroni, neutrini (numero leptonico $L = +1$),
 - ▷ positroni, antineutrini ($L = -1$)

i numeri barionico e leptonico assieme alla carica elettrica si conservano nelle interazioni forti, elettromagnetiche e deboli

decadimento beta



**$B=1, L=0, Q=0 \rightarrow B=1, L=2, Q=0$ conservati B e Q ,
violato L**



$B=1, L=0, Q=0 \rightarrow B=1, L=0, Q=0$ conservati B, Q e L

simmetrie delle leggi fondamentali

parità P invarianza per inversione delle coordinate spaziali;
violata dalle interazioni deboli

coniugazione di carica C invarianza per trasformazione di
particelle in antiparticelle

tempo T invarianza per inversione del tempo

CP invarianza inversione simultanea di parità e carica;
violata dall'interazione elettrodebole

CPT invarianza per inversioni simultanee di carica, parità e
tempo. A oggi è considerata l'unica simmetria discreta
esatta della natura

le proprietà di simmetria fra le particelle suggeriscono a Murray Gell-mann l'ipotesi che i barioni siano composti di unità più semplici, i **quark**

postula due tipi di quark:

u e *d*, con carica elettrica

frazione di *e* e spin $\frac{1}{2}$

$$Q_u = +\frac{2}{3} e \quad Q_d = -\frac{1}{3} e$$

ogni quark ha il suo antiquark

il protone diventa $p = uud$

il neutrone $n = udd$

i pioni $\pi^+ = u \text{ anti-}d$

$$\pi^- = d \text{ anti-}u$$

$$\pi^0 = u \text{ anti-}u / d \text{ anti-}d$$



rappresentazione dell'atomo di elio con i quark componenti dei protoni e neutroni



è k ? ? a ? è L O m ? i o ? m ? O m ? e ?

? t i a ? m ? 3 r t i n L ? ? L n ? - ? O t ? ? L ? ? ? P r a ?

L q k O t i n r o n L - è O m r o L ? O ? i i n ? a a ? ?

L ? ? ? ? i O t i ? ? n t t P ? O t t ? L q ?

◆ ? ? ? ? O t i n r ? S t i n t i ? S t i O a ? t t ? ? ? ? O L ?

2 - ? O t ? t i ? ? O L ? ? n t t 2 - ? O t N ?

◆ ? ? a L 5 t i n r ? S t i n t i ? S t i O a ? t t ? ? ? ? n ?

2 - ? O t ? L ? n ? n t t 2 - ? O t ?

mass	→	2.4 MeV/c ²
charge	→	2/3
spin	→	1/2
name	→	u
		up

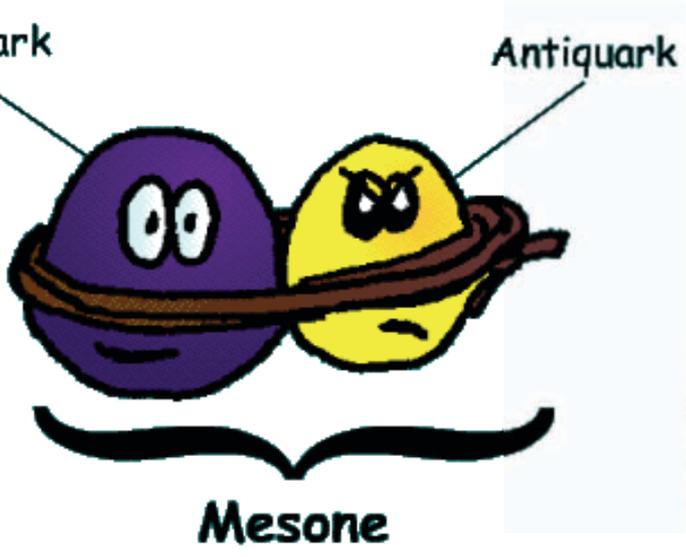
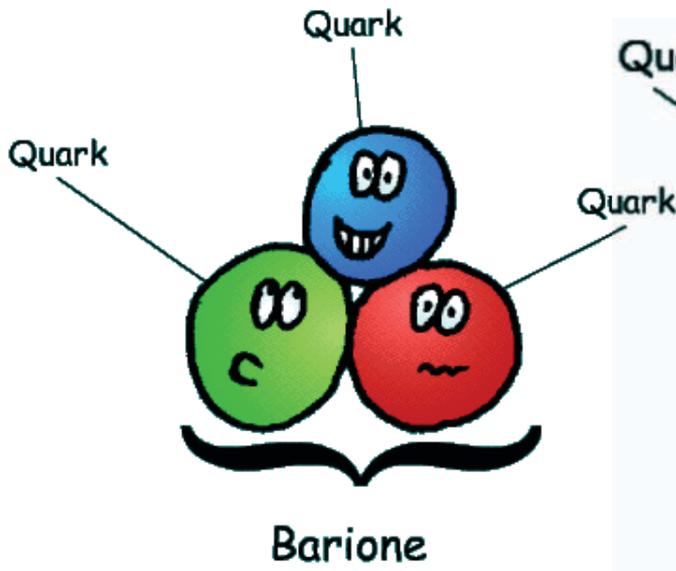
Quarks

mass	→	4.8 MeV/c ²
charge	→	-1/3
spin	→	1/2
name	→	d
		down

mass	→	<2.2 eV/c ²
charge	→	0
spin	→	1/2
name	→	ν_e
		electron neutrino

Leptons

mass	→	0.511 MeV/c ²
charge	→	-1
spin	→	1/2
name	→	e
		electron



Three generations of matter (fermions)

	I	II	III
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name →	u up	c charm	t top
Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom
Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	e electron	μ muon	τ tau

a tiqtPq[?]3rtinL [??]Ln[?]2- [?]Ot
 PL O[?]L 5P O[?]ra L O L [?]h- tivL [??]
 P[?]Ott[?]L q[?] [?]5[?]tiPL O[?]èL [?]ti[?]POL v[?]r[?]
 [??]q[?] [?]èL ti[?]m [?]5[?]Stinti[??]
 mèti[?]tik L [??]c[?]OL [??]- L [??]
 Ei LnL O[?]3rtinr[?]G[?]n[?]L q[?]a L ntt[??]
 stin[?] [?]a Ln[?]è[?]q[?] [?]2- [?]Ot [?]b[?]5[?]è[?]
 L [?] [?]P[?]ètin[?]ra - [?]L [?]è[?]- [?]tin[?] [??]
 qi[?]0ti[?]hL - è[?]0m[?]
 [?]
 è ffi[?]2- L 5tt[?]L q[?]a L ntt[?]Stinti[??]
 5è[?]tt[?]ti55L Ov[?]tt[?]L [?]a r[?]5- O[?]tt[?]



SCIENCEPHOTOLIBRARY

la teoria quantistica dei campi

descrive globalmente la materia e le sue interazioni, fondendo la meccanica quantistica e la relatività speciale.

Le particelle materiali sono considerate come quanti di campi di materia, come il fotone è un quanto del campo elettromagnetico:

- ▷ elettrone quanto del campo elettronico
- ▷ protone quanto del campo protonico
- ▷ neutrino quanto del campo neutrinico

...

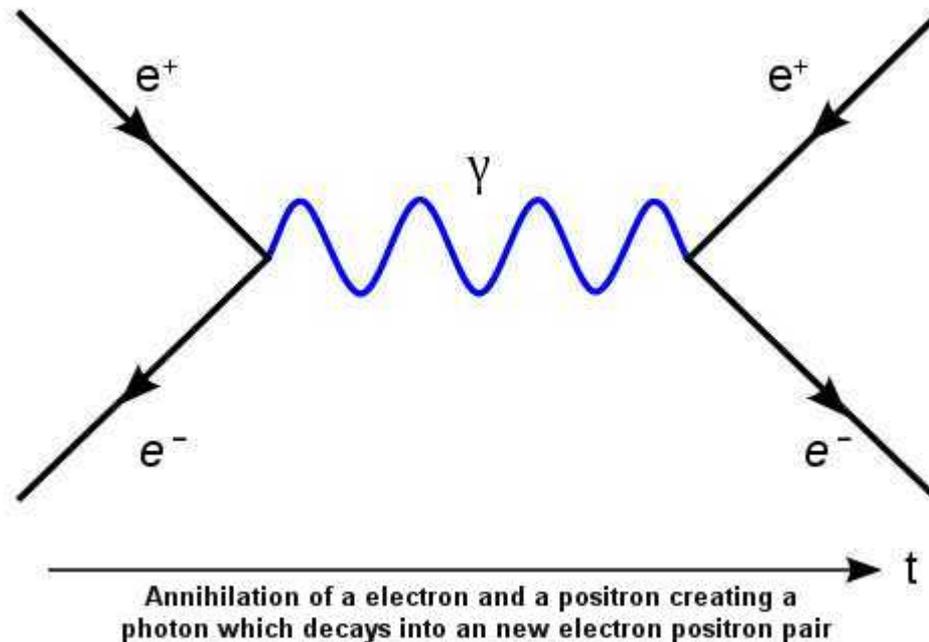
la teoria quantistica dei campi

il campo di radiazione e quelli materiali con cui interagisce sono trattati come un sistema unico la cui energia è la somma di tre termini:

- ▷ uno esprime l'energia del campo materiale
- ▷ il secondo esprime l'energia del campo di radiazione
- ▷ il terzo esprime l'energia di accoppiamento fra i due campi

la teoria quantistica dei campi

descrive l'interazione fra i campi materiali mediante lo scambio di particelle (campi) virtuali:
nel caso del campo elettromagnetico il mediatore della forza è il fotone

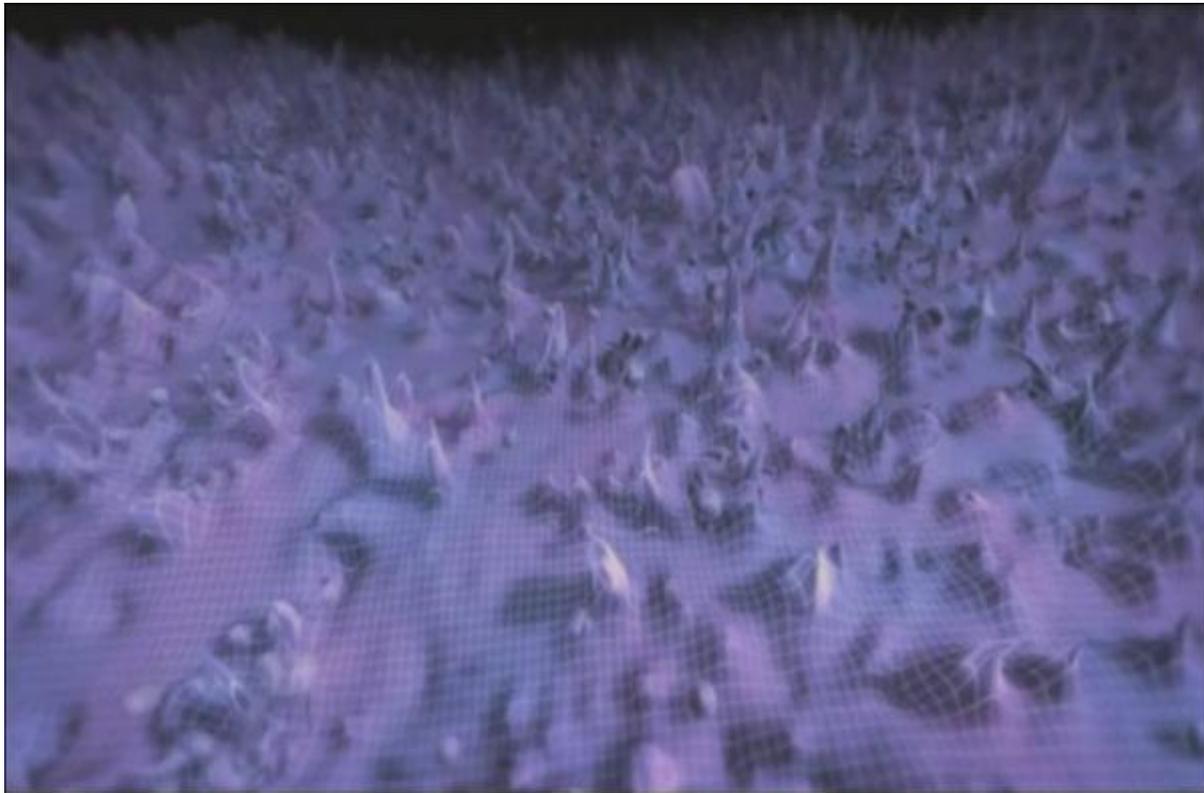


la teoria quantistica dei campi

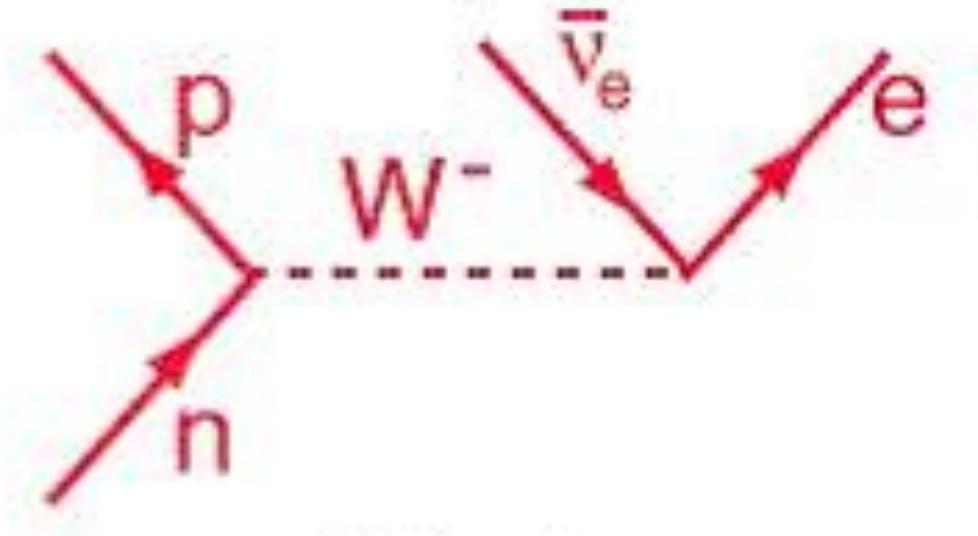
le particelle mediatrici vengono create dal “vuoto”
(lo stato di minima energia)

il principio di indeterminazione permette la creazione di
un quanto di energia ΔE che viva per un tempo

$$\Delta t = h/(2\pi \Delta E)$$



anche le interazioni deboli vanno espresse mediante lo scambio di mediatori della forza (W^\pm); poiché l'interazione è a cortissimo raggio d'azione la loro massa è enorme e la loro vita media brevissima



$$M_W = 80,4 \text{ GeV}/c^2$$

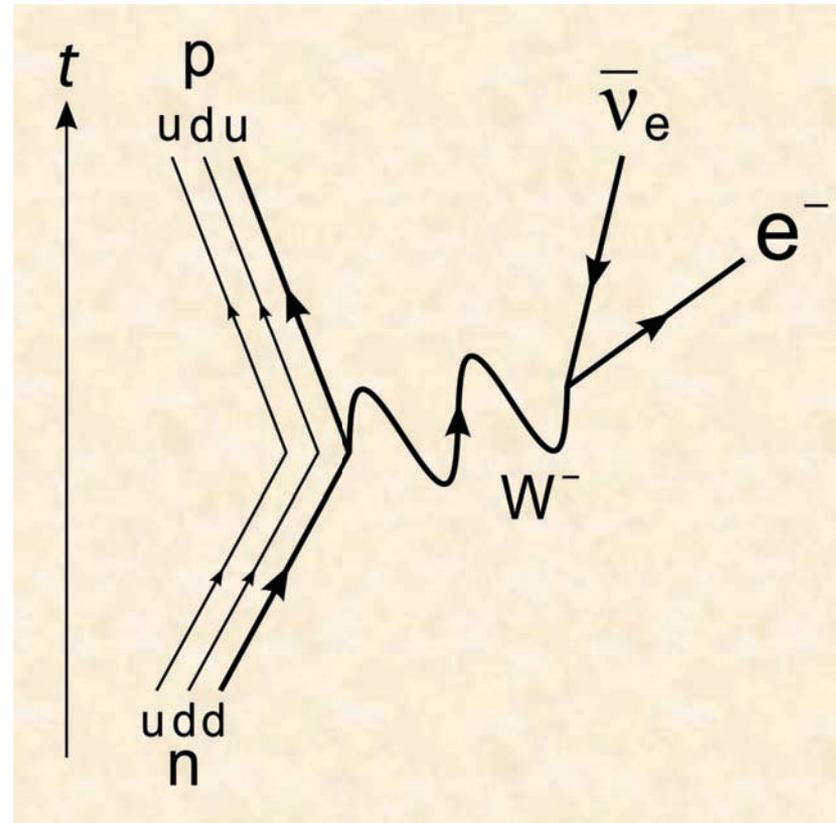
$$Q_W = \pm 1$$

$$spin_W = 1$$

$$\text{vita media } 3 \times 10^{-25} \text{ s}$$

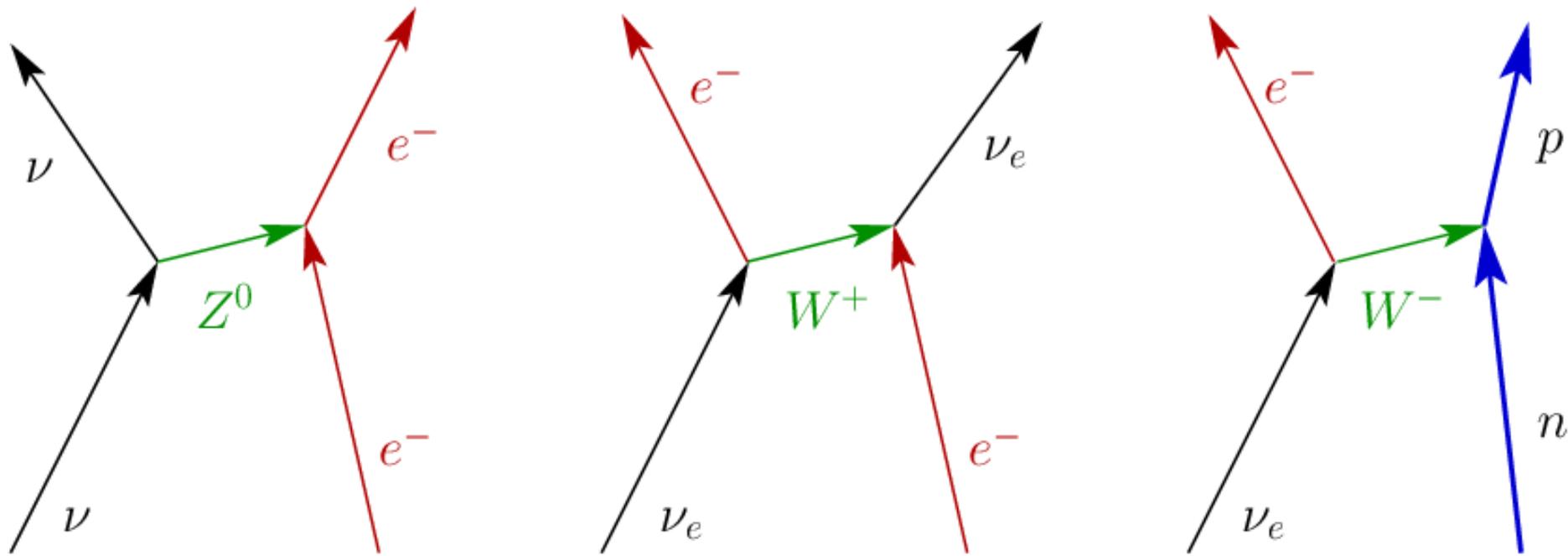
scoperti 1983

è f... Poti... L 55ms... Ott... L... VLn... tinti... tin... tiffi...
... mè... 3rtin... da Lnè... 0ms... 2- ... Ot... L... Pètin...
... L... ra Lnèti... Lè... 05- ... tiv- èti...
è... 5sti0a ... 3rtinL... n... 2- ... Ot... m... nti...



esistono interazioni deboli con un mediatore della forza neutro anziché carico, lo Z_0 .

$M_Z \sim 91 \text{ GeV}/c^2$, $Q_Z = 0$, $spin_Z = 1$ scoperto 1983
vita media $3 \times 10^{-25} \text{ s}$



Neutral current

Charged current

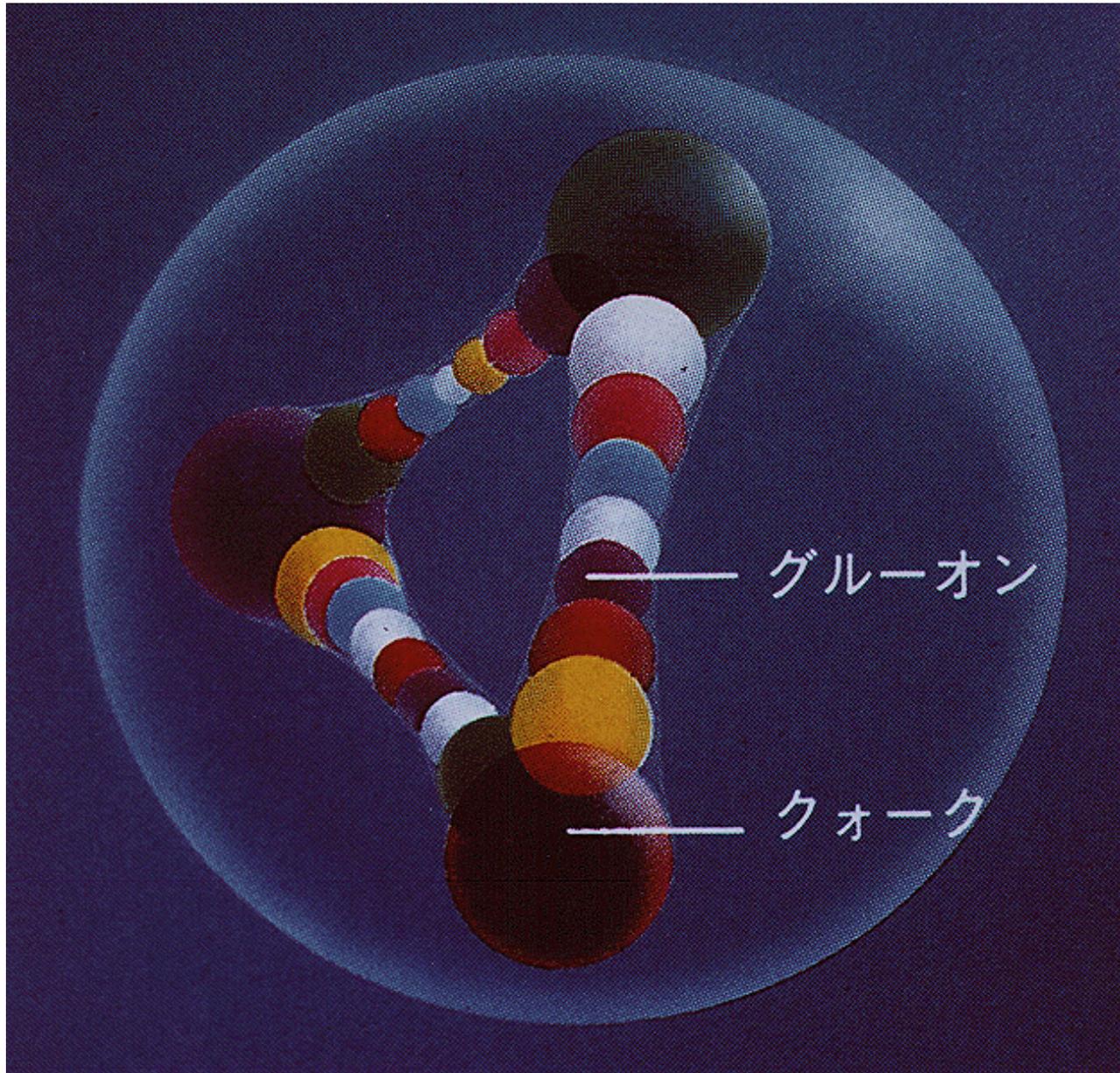
i quark: *atomos* o *elachiston*?

esperimenti di vario tipo confermano la natura composita del protone ma non si riesce in nessun modo a liberare i quark componenti

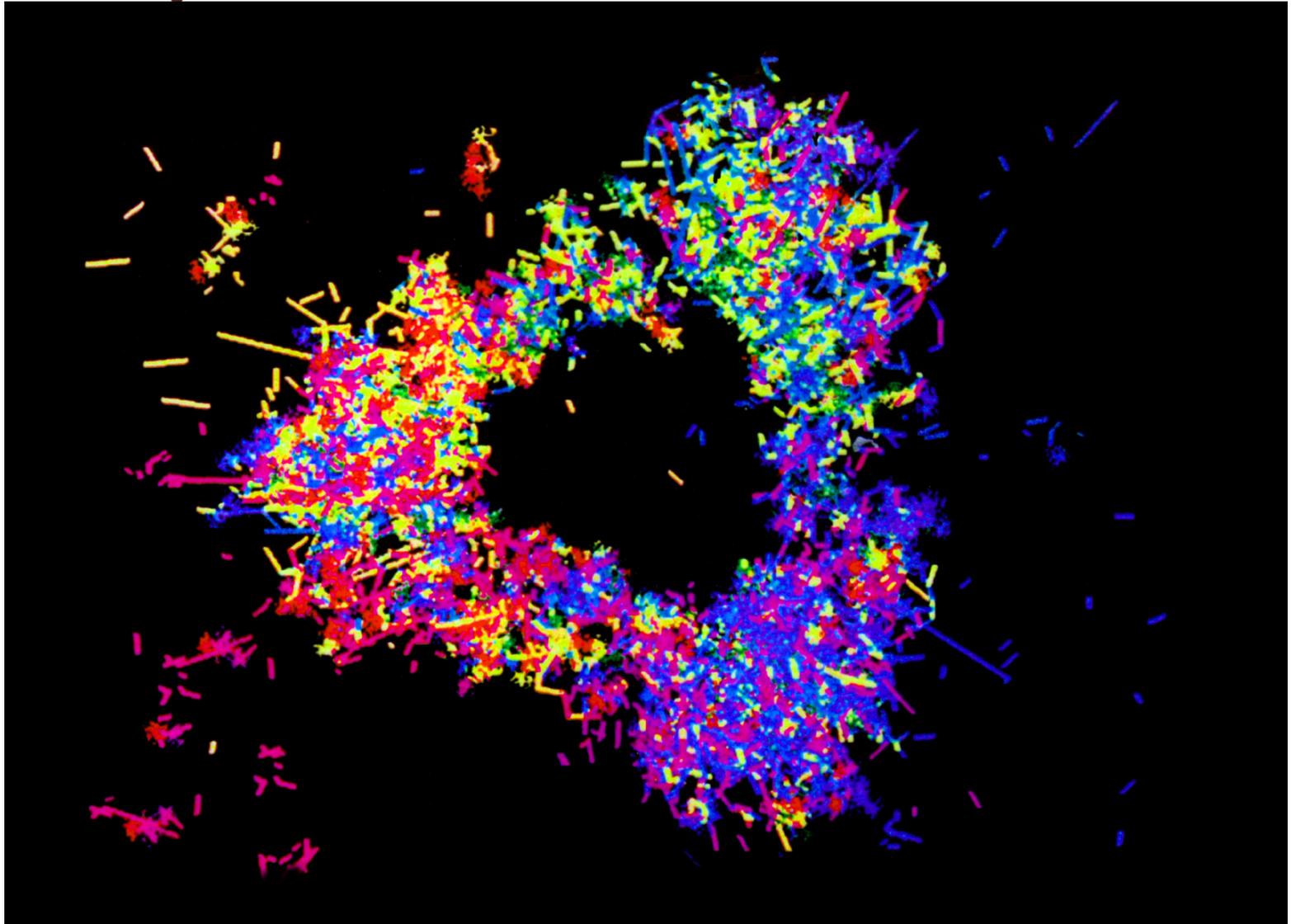
⇒ esiste una forza potentissima che li lega in modo indissolubile

- ◆ la forza presenta una carica “ternaria” detta “colore”**
- ◆ i mediatori della forza sono di 8 tipi chiamati **gluoni** (*g*)**
- ◆ i gluoni hanno carica di colore**

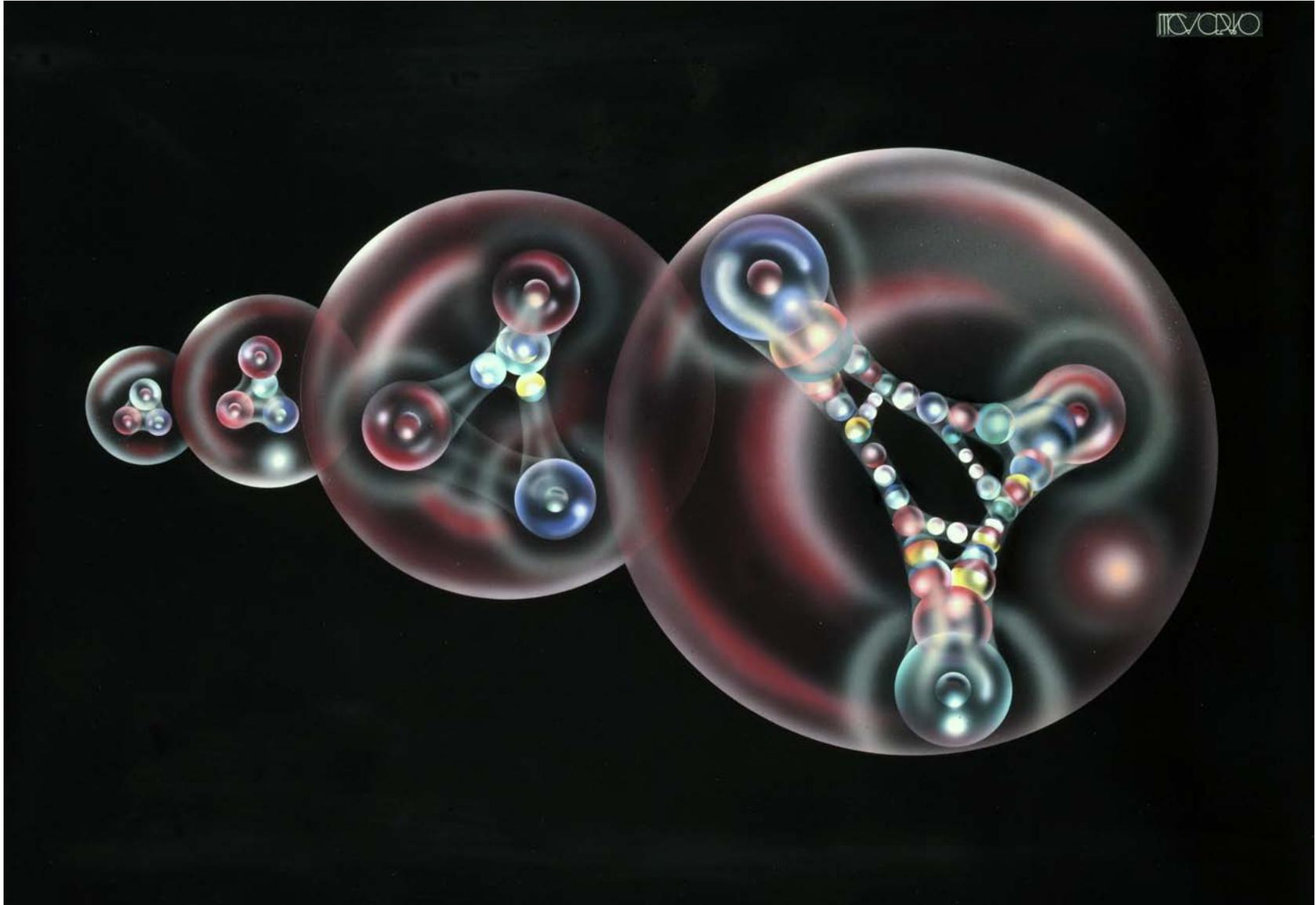
protone composto da quark e gluoni



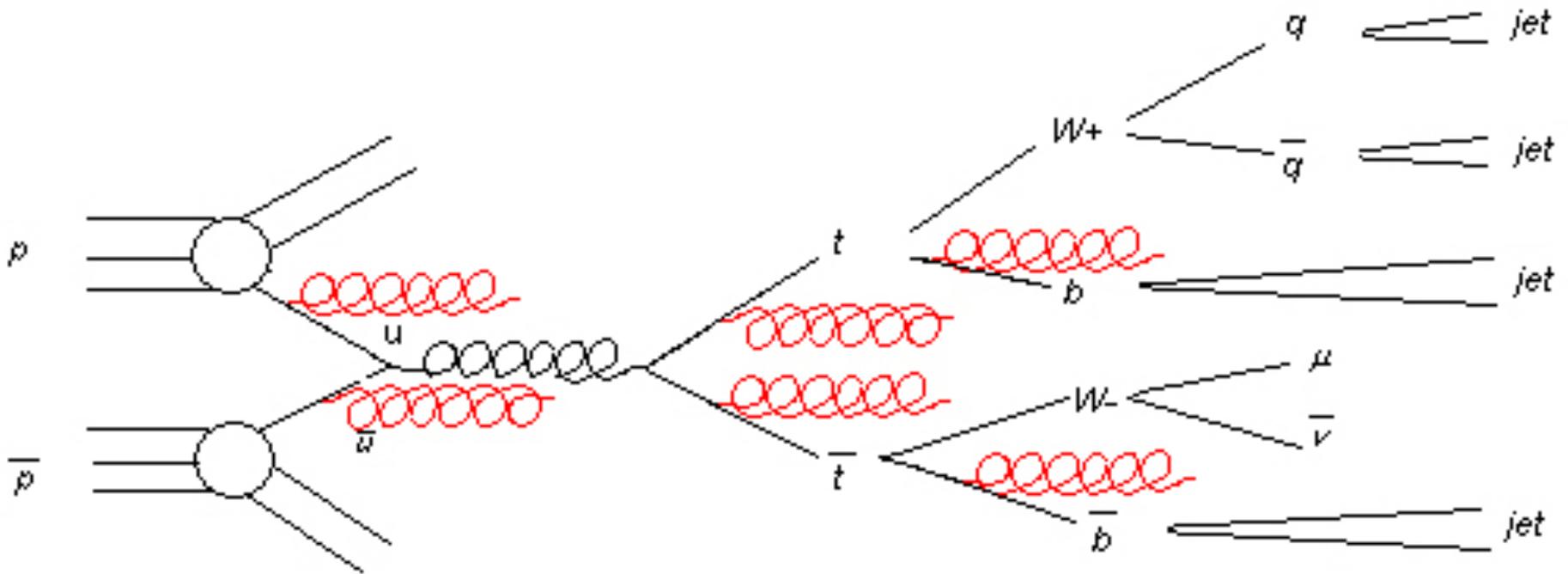
**il “gas” di gluoni che mantiene i quark
entro il protone**



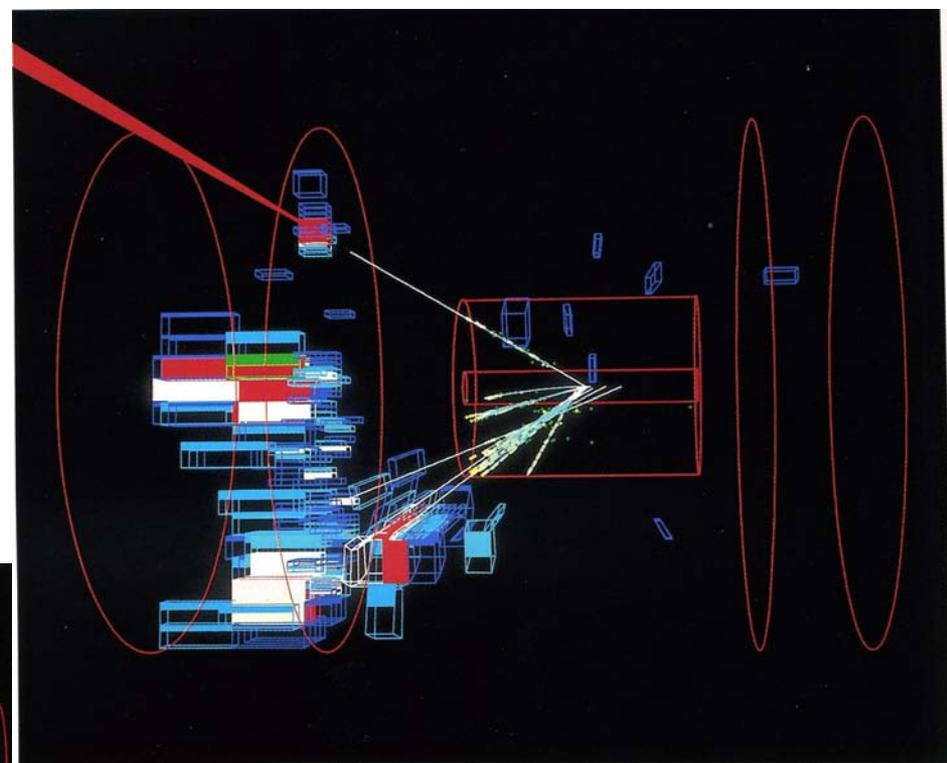
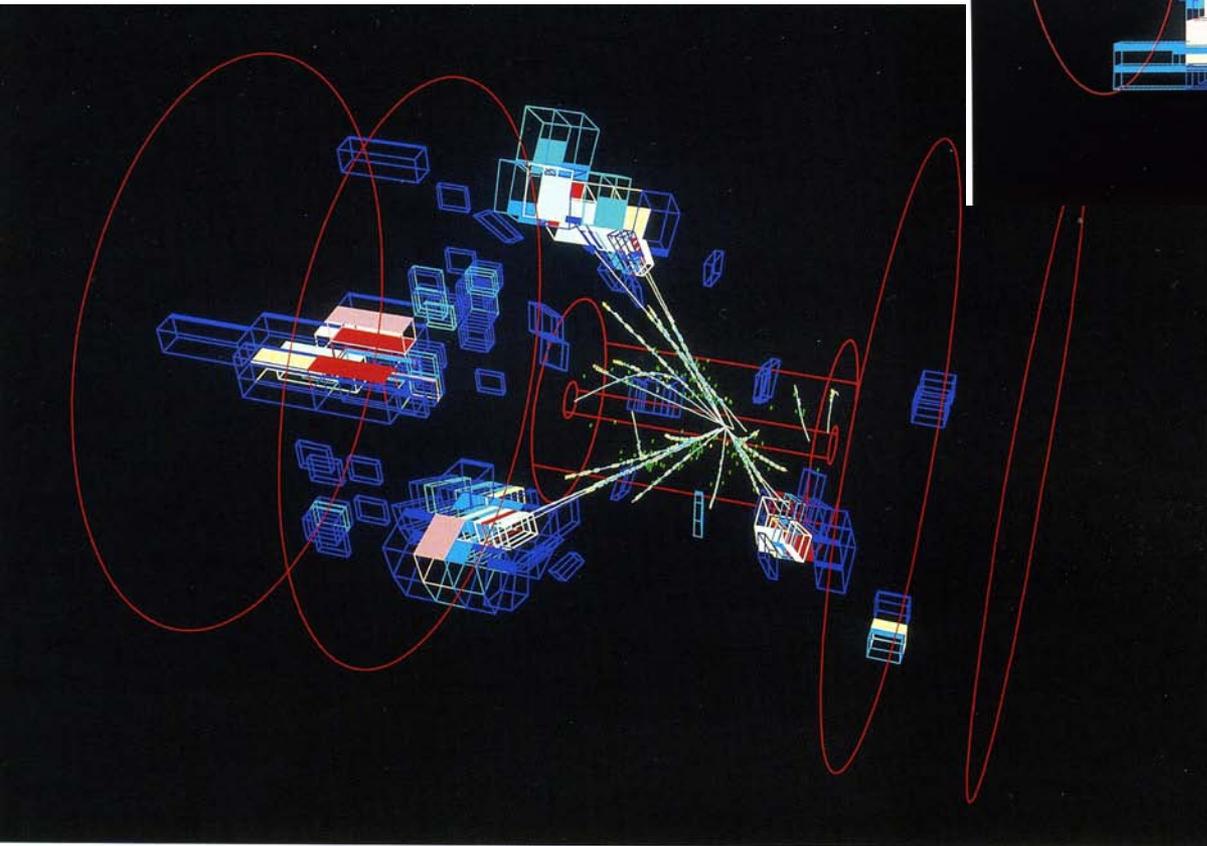
se si cerca di separare due quark all'interno di un protone, si moltiplicano i gluoni attrattivi



quark e gluoni non possono esistere liberi; una volta creati generano immediatamente una cascata di nuove particelle adroniche: i *jet*

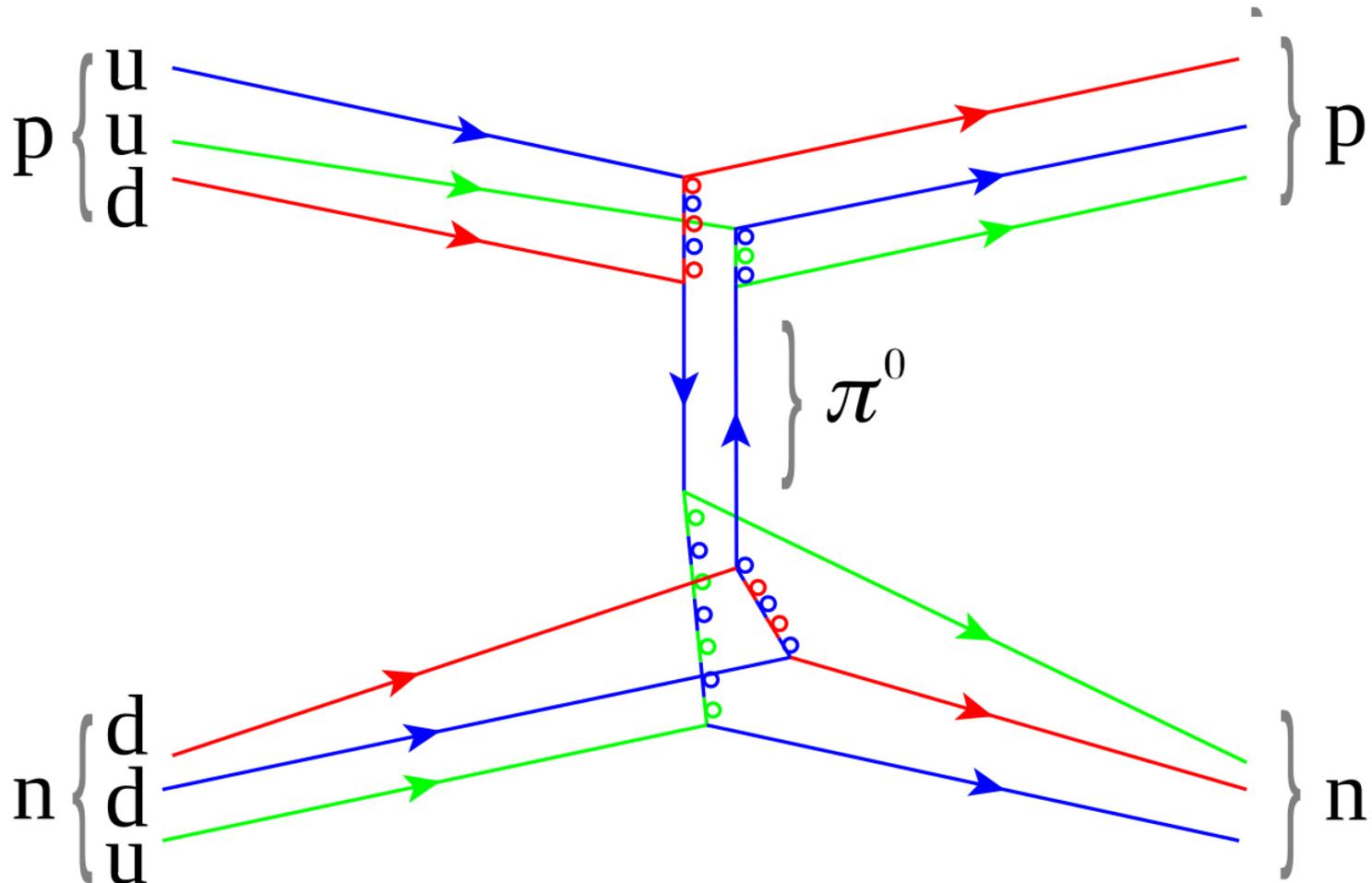


jet da un quark

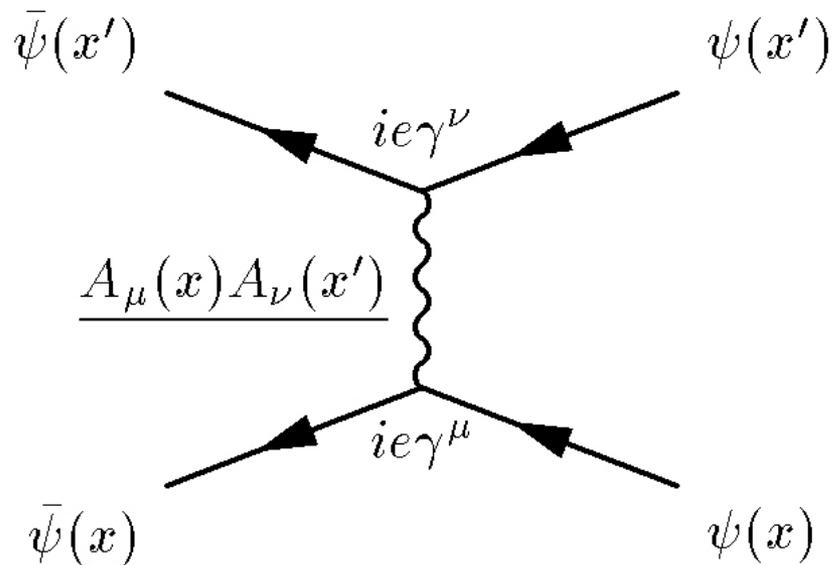


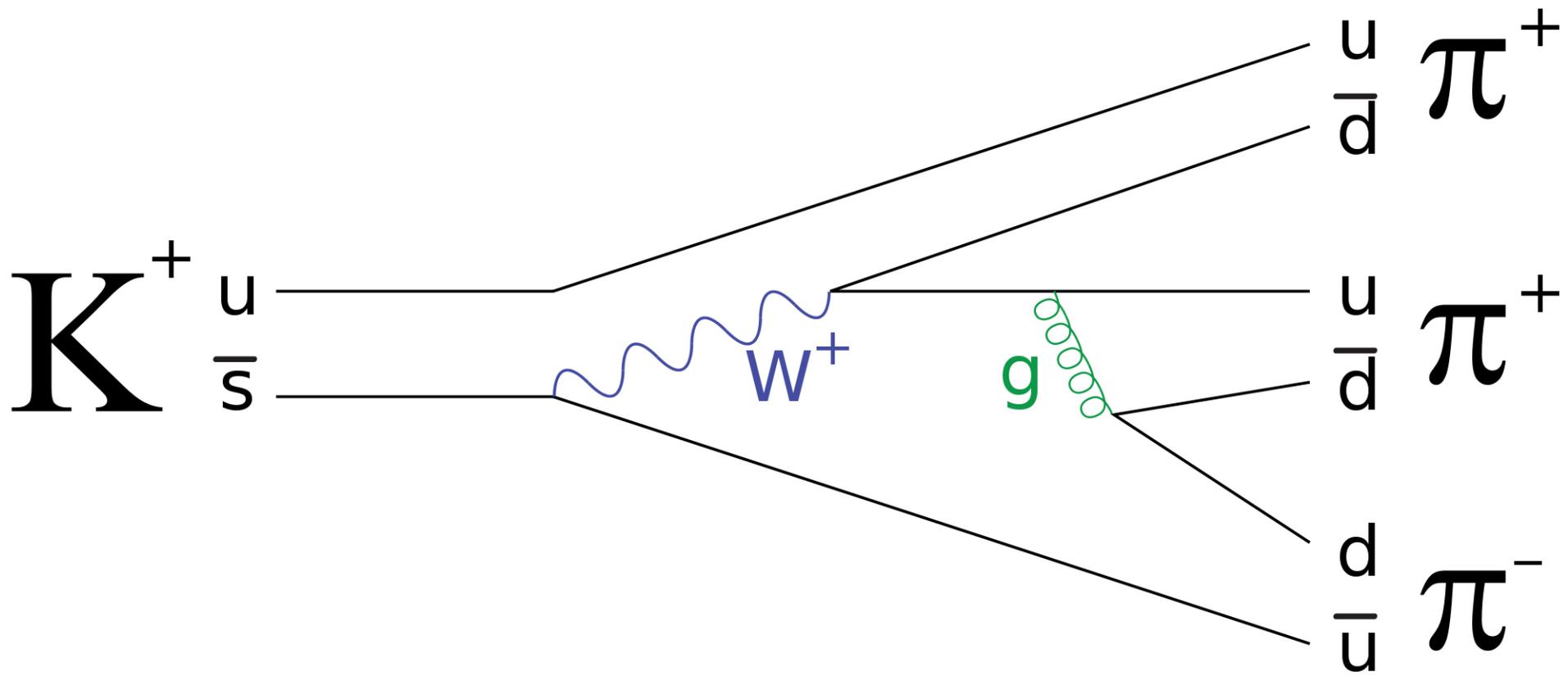
jet da un gluone

la forza nucleare fra neutrone e protone,
espressa dallo scambio di un pione neutro
viene riformulata in termini di quark e gluoni



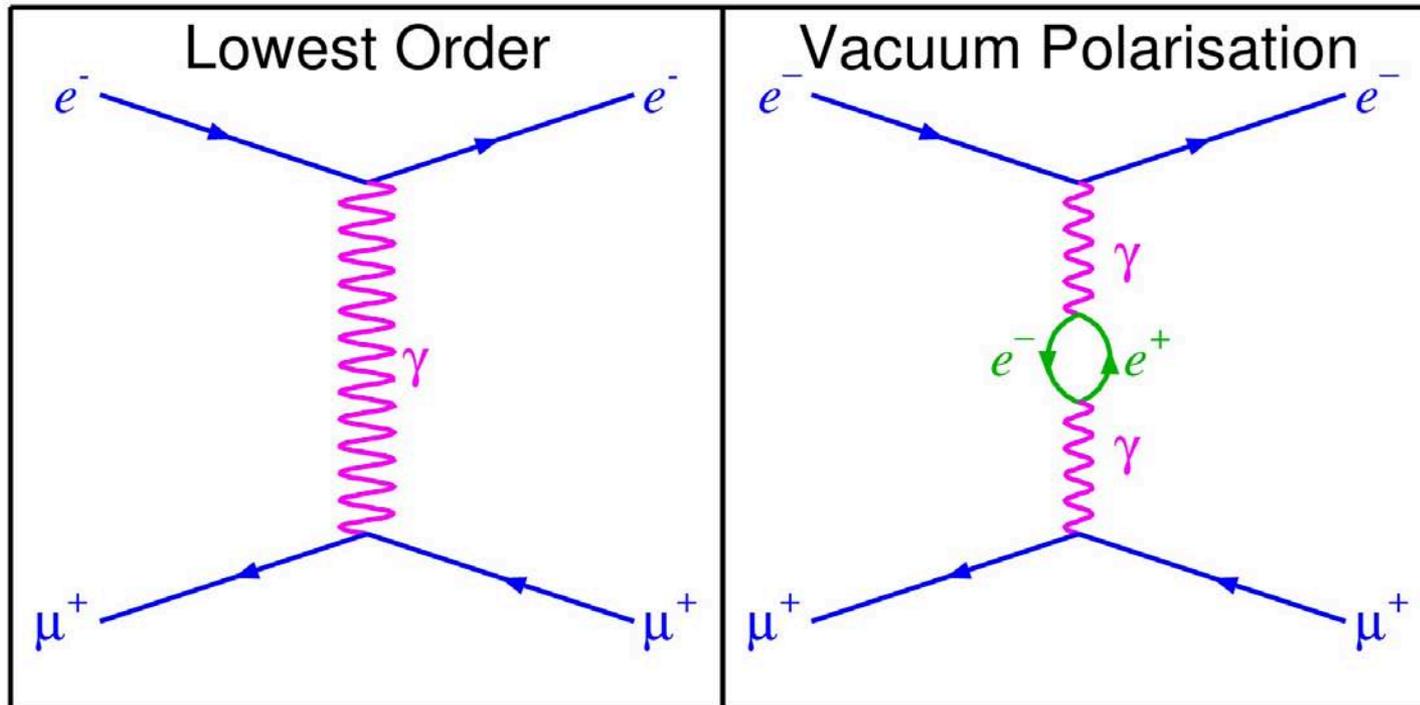
**i diagrammi delle
interazioni introdotti da
Richard Feynman
sono in realtà precisi
oggetti matematici, che
permettono il calcolo del
processo**





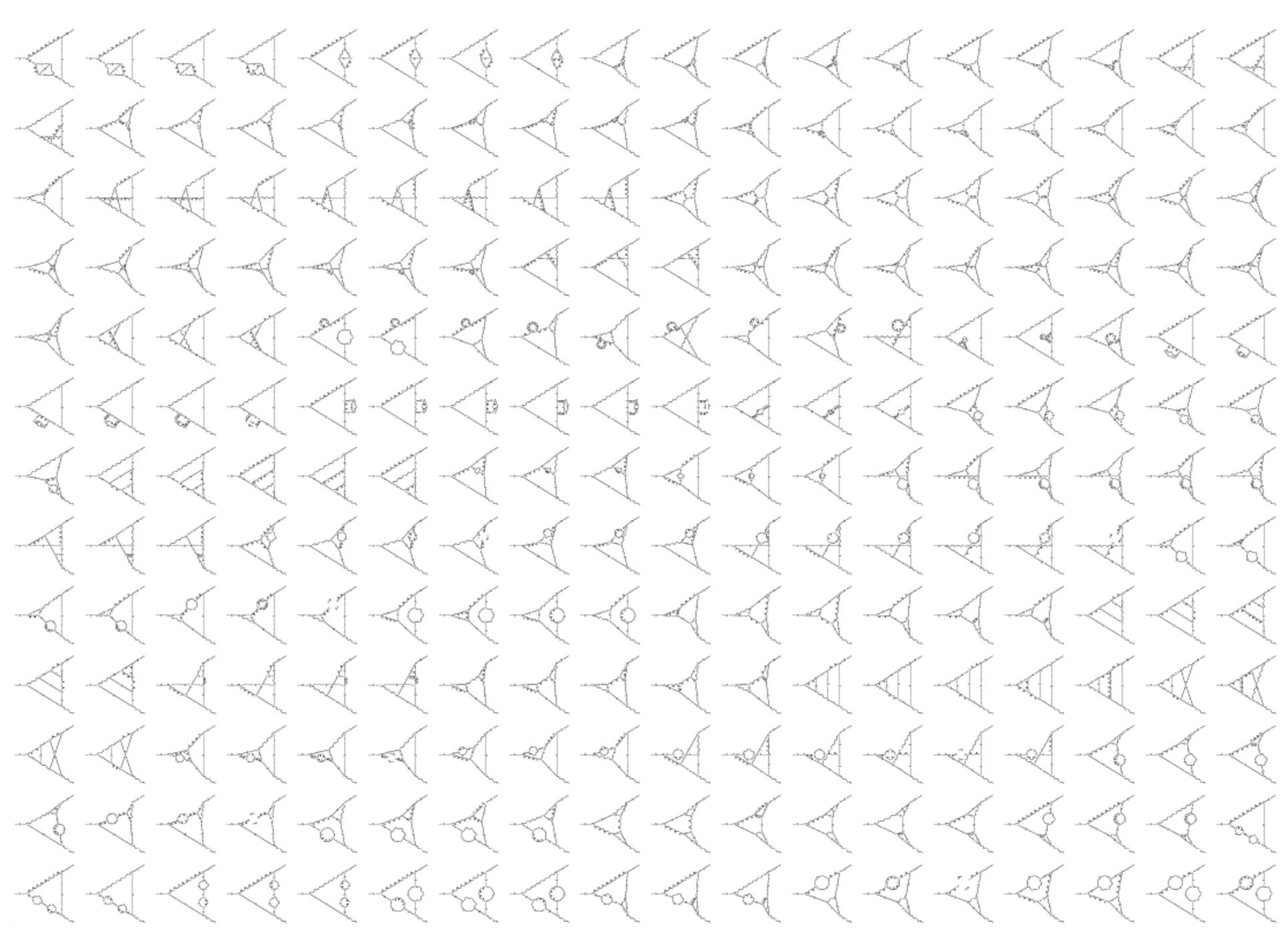
un problema della teoria quantistica dei campi

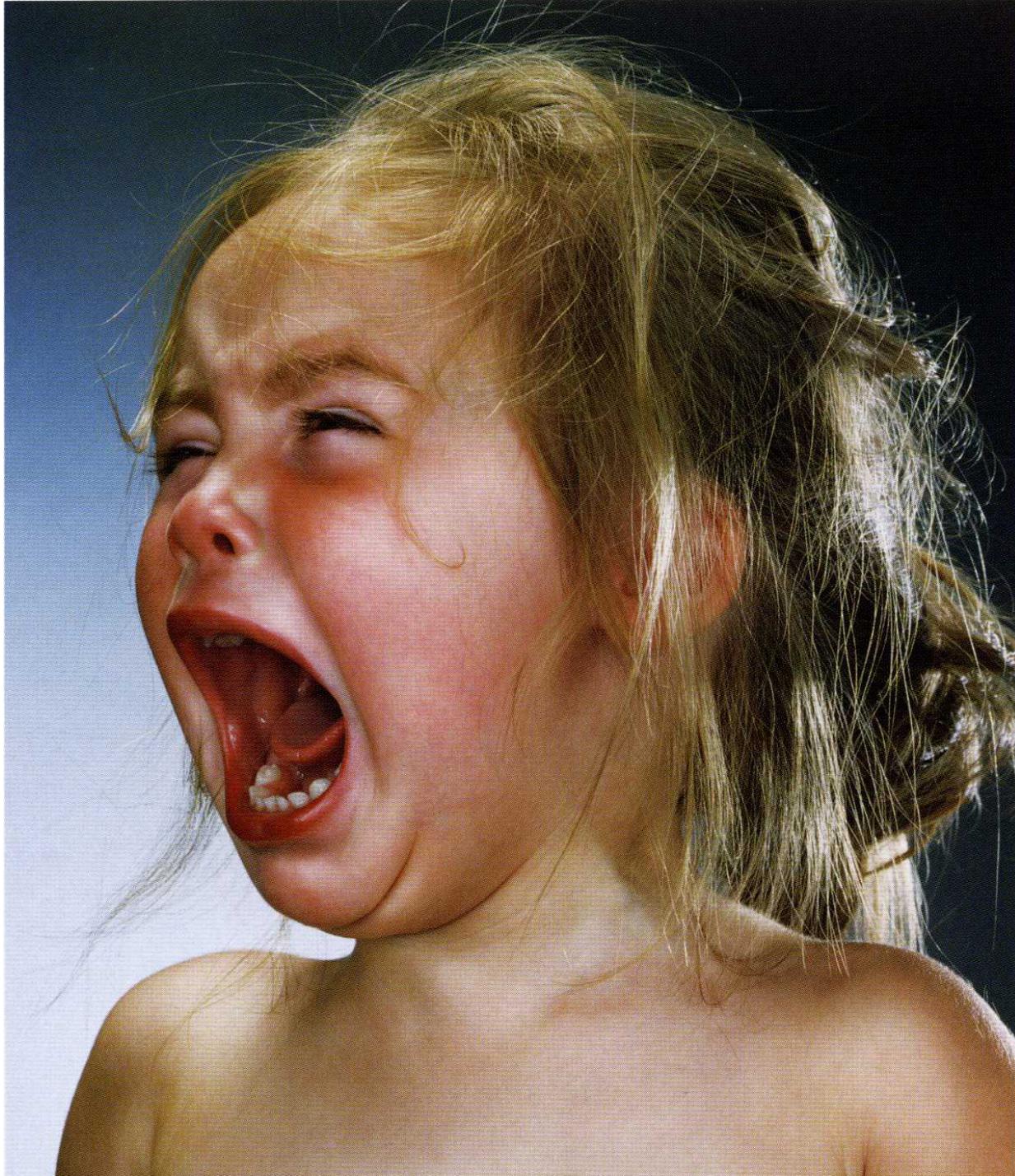
i mediatori delle forze possono a loro volta trasformarsi in particelle o altri mediatori per tempi ancora più brevi e i diagrammi di Feynman si complicano descrivendo processi di ordine superiore



“rinormalizzazione” dei campi

- *polarizzazione del vuoto*: l'elettrone, essendo carico, produce un campo elettromagnetico attorno a sé. A sua volta questo campo (*campo proprio dell'elettrone*) interagisce con l'elettrone, creando una massa che diventa sempre più grande
- volendo raggiungere alte precisioni occorre considerare termini aggiuntivi, inserendo diagrammi nei vertici: le approssimazioni aggiunte tendono a diventare infinite, facendo sballare tutti i calcoli
- nel 1946-47 viene trovato il modo di “rinormalizzare” i campi eliminando gli infiniti, ma solo per alcuni campi





il modello standard della materia e delle forze

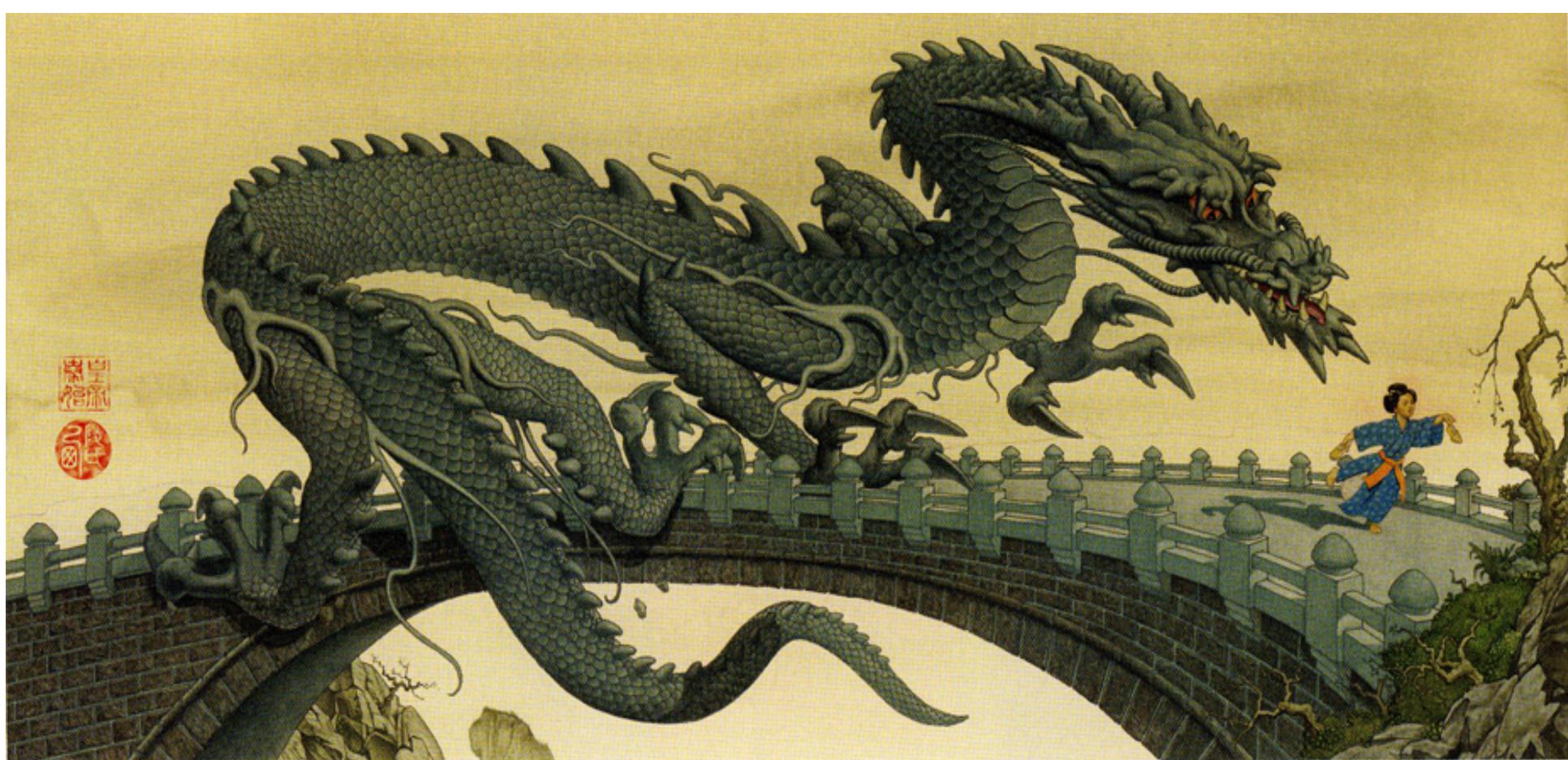
descrizione atomistica della natura con la materia costituita da 6 quark dotati di carica elettrica e colore e 6 leptoni, organizzati in tre generazioni di massa crescente

interagenti fra di loro sotto l'azione di 3 forze fondamentali mediate da bosoni



Three generations of matter (fermions)

	I	II	III		
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0	? GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
name →	u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs boson
Quarks	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	
	d down	s strange	b bottom	g gluon	
Leptons	<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 electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson	
Gauge bosons	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	
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson	



non esiste alcuna branca delle scienze naturali che sia così astratta, così lontana dalle nozioni quotidiane di come si comporti la natura, quanto la teoria quantistica dei campi
Steven Weinberg

problemi aperti

- manca un trattamento quantistico della gravità
- manca una spiegazione del numero delle “generazioni”
- esistano altre “generazioni”
- non si spiegano le enormi differenze di massa dei quark
- esistono “supersimmetrie” fra fermioni e bosoni?
- la materia oscura è composta da particelle sconosciute?
- perchè la simmetria C non ha generato antiparticelle stabili e diffuse nell’universo?
- origine della simmetria PCT
-



[www.pd.infn.it/
~pascolin/metodi](http://www.pd.infn.it/~pascolin/metodi)

pascolini@pd.infn.it
<http://perlascienza.eu>

 @apascolini

- nella fisica classica due modelli per i sistemi materiali:
- sistemi discreti: corpuscoli con traiettorie e urti
 - sistemi continui: fluidi, solidi, campi di forza con onde

alla fine dell'800 la meccanica statistica riconduce i fluidi a un gran numero di corpuscoli e la termodinamica alle proprietà cinetiche dei corpuscoli, aprendo la via alla concezione atomistica



Planck cerca in un processo elettromagnetico di carattere assoluto un metodo diretto per rendere compatibili il primo e il secondo principio della termodinamica: il problema della radiazione termica del corpo nero

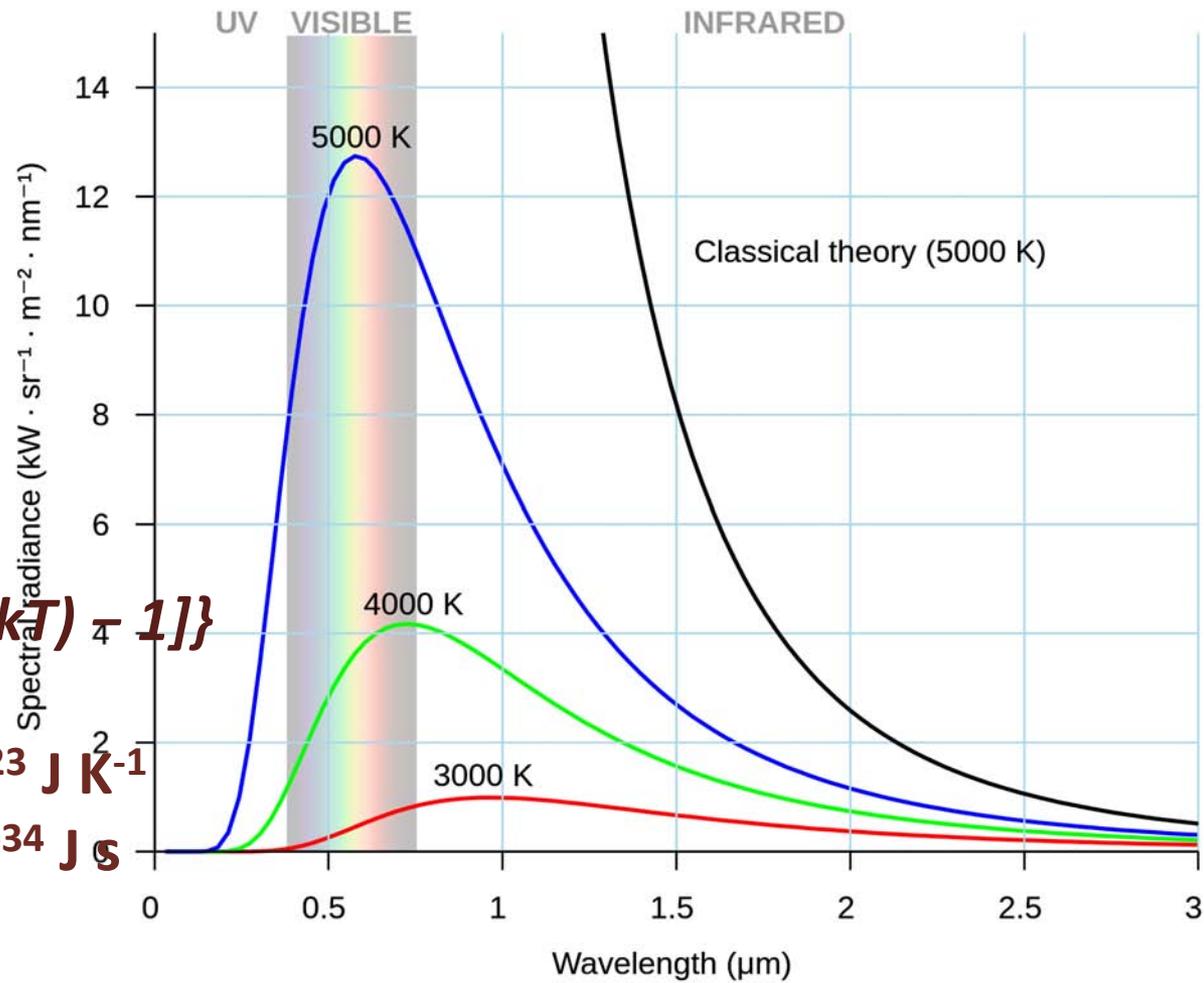
non spiegabile con la teoria classica

la legge di Planck

$$I(\nu) = \frac{2 h \nu^3}{c^2} \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1}$$

$$k = 1,3806504 (24) \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

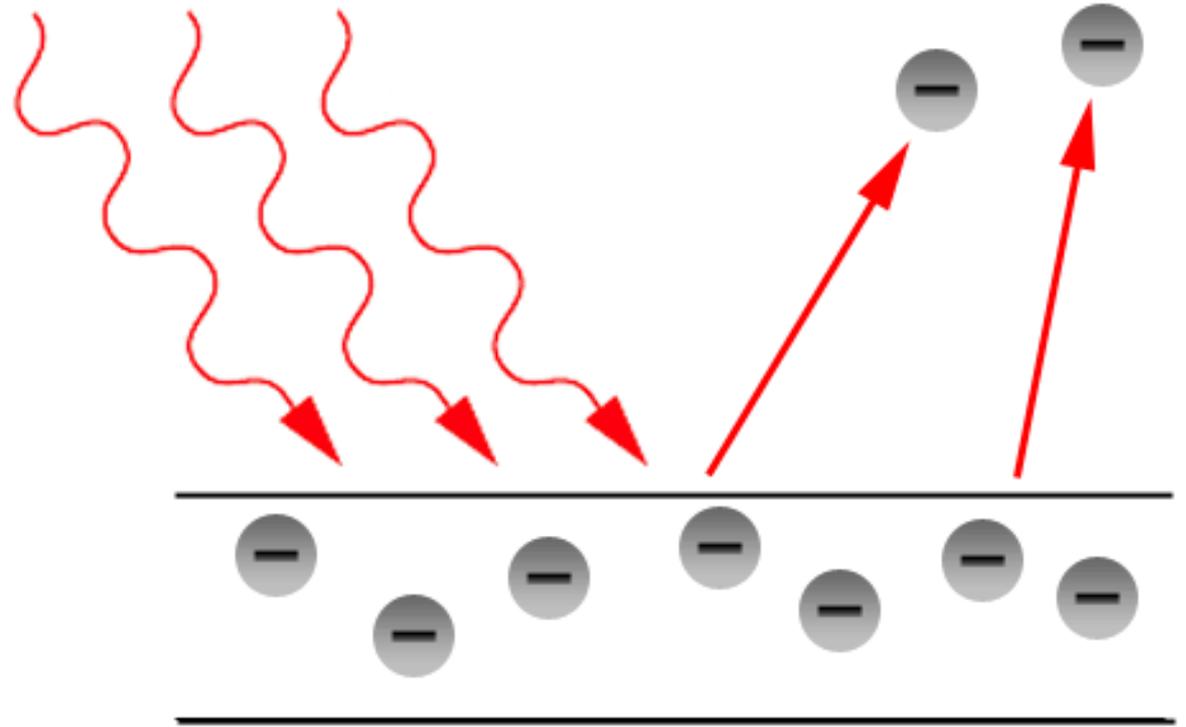
$$h = 6,626 0693 (11) \times 10^{-34} \text{ J s}$$



l'ipotesi dei quanti di luce permette a Einstein di spiegare un fenomeno noto e di prevederne un altro:

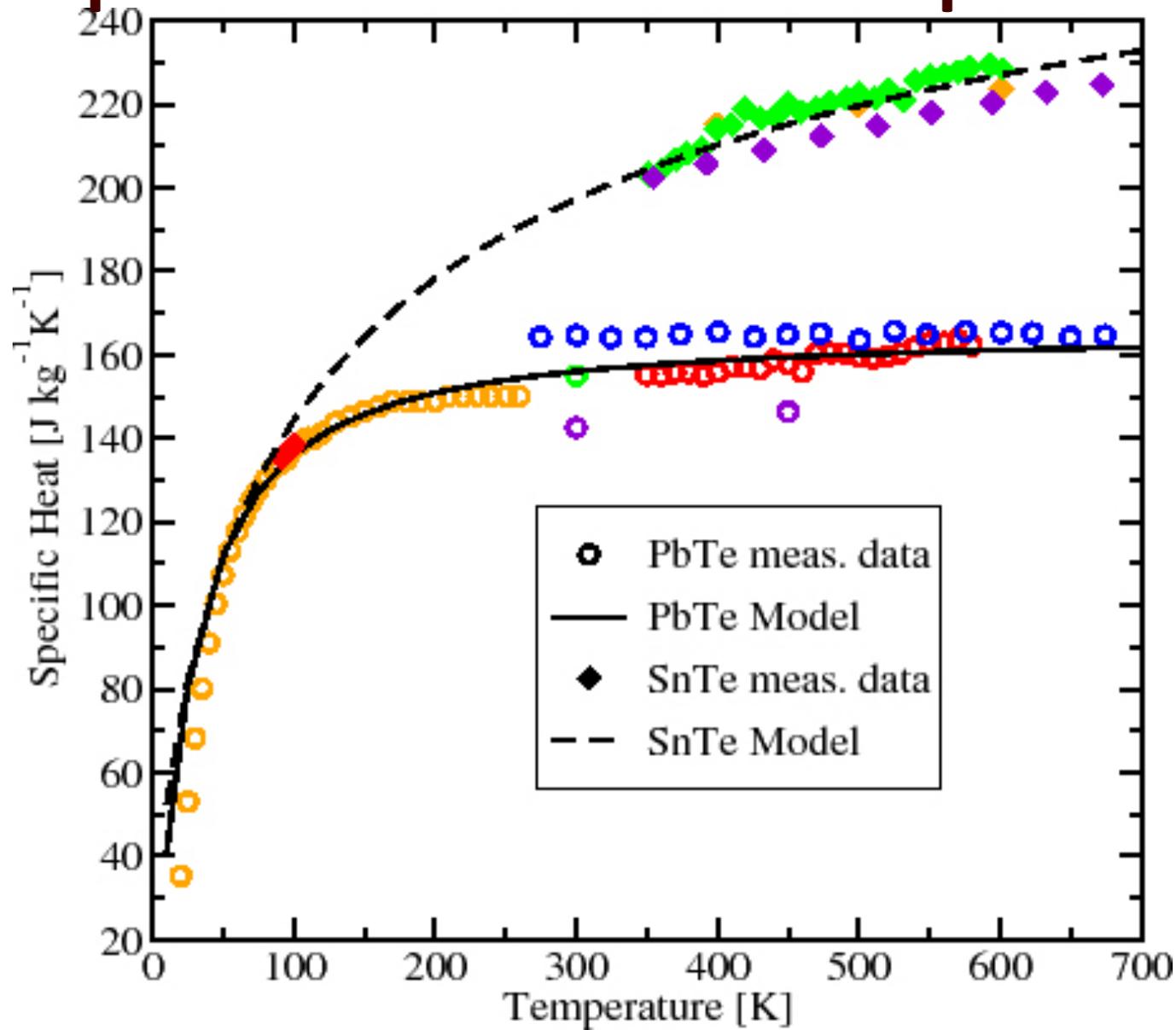
- **effetto fotoelettrico (noto, ma inspiegabile con la teoria ondulatoria)**
- **comportamento dei calori specifici a bassa temperatura (ancora non studiato)**
 - ▷ **favorisce il terzo principio della termodinamica**
 - ▷ **metterà in moto un fondamentale processo di politica scientifica: le conferenze Solvay**

effetto fotoelettrico



La radiazione luminosa di certe frequenze colpendo dei cristalli induce l'emissione di singoli elettroni
Processo alla base delle attuali fotocamere e della fotografia digitale

calori specifici in funzione della temperatura: Einstein prevede che si annullino per $T \rightarrow 0$



modelli atomici

- **modello nucleo-planetario (Jean Baptiste Perrin 1901)**
- **modello a “dinamidi” (Philipp Lenard 1903)**
- **modello saturniano (Hantaro Nagaoka 1903)**
- **modello a carica distribuita (Joseph John Thomson 1904)**
- **modello elettronico fluido**
(John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh 1906)
- **modello a elettroni vibranti (James Hopwood Jeans 1906)**
- **modello a elettroni che si espandono**
(George Adolphus Schott 1906)
- **modello ad “archioni” (Johannes Stark 1910)**
- **modello nucleare**
(Ernest Rutherford, 1st Baron Rutherford 1911)

l'equazione di Schrödinger

noto lo stato di un sistema all'istante t_0 fornisce il suo stato all'istante t $\psi(x, t_0) \Rightarrow \psi(x, t)$

- comporta la conservazione dell'energia e degli invarianti galileiani
- solo in casi semplici le soluzioni sono analitiche
- in generale si cercano soluzioni approssimate ricorrendo al calcolo numerico con computer

