



Simmetrie e Asimmetrie nella Fisica Fondamentale

Seminario divulgativo INFN Bologna

<https://agenda.infn.it/category/555/>

Domenico Galli

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna
e INFN, Sezione di Bologna

Bologna, via Zoom, 10 giugno 2020



1. Gli Elementi nella Fisica Fondamentale
2. Le Simmetrie nella Fisica Fondamentale
3. L'Asimmetria Cosmica

- La **fisica** è una **scienza fondamentale**:
 - Cioè una scienza di base, fondamento di altre scienze;
 - Altre scienze naturali (come biologia, fisiologia, patologia, geologia, mineralogia, ecc.) studiano sistemi che **obbediscono anche alle leggi della fisica**.
- La **fisica fondamentale** è la parte **più fondamentale** della fisica:
 - Studia i **componenti intimi della materia (particelle elementari)**, il loro moto nello spazio-tempo e le **forze fondamentali** della natura, che governano le interazioni tra di essi.

Fino dai tempi antichi si è pensato che l'**enorme variabilità** della materia conosciuta fosse **riconducibile** a **pochi elementi fondamentali**:

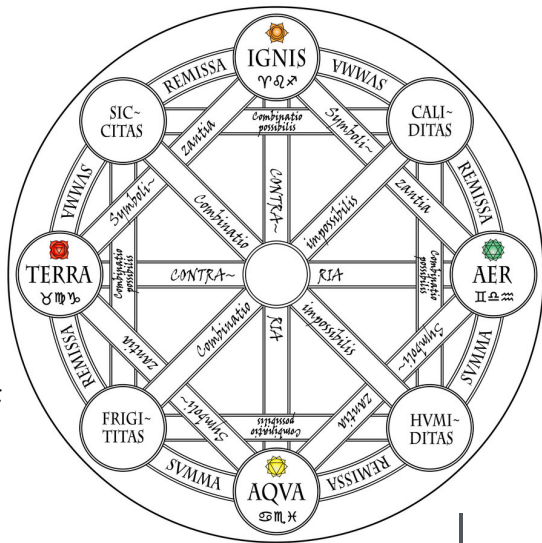
- Il termine **elemento** nasce quindi per designare uno dei **principi costituenti** di tutte le sostanze:
 - Una sostanza semplice di cui sono costituiti i corpi.

Il filosofo **Empedocle** (V secolo a.C.) ipotizzò che gli elementi fondamentali fossero 4:

- **Terra**,
- **Aria**,
- **Acqua**,
- **Fuoco**.

Si trattava tuttavia di un'idea priva di fondamento scientifico:

- **Non** sottoposta alla **prova dei fatti**.

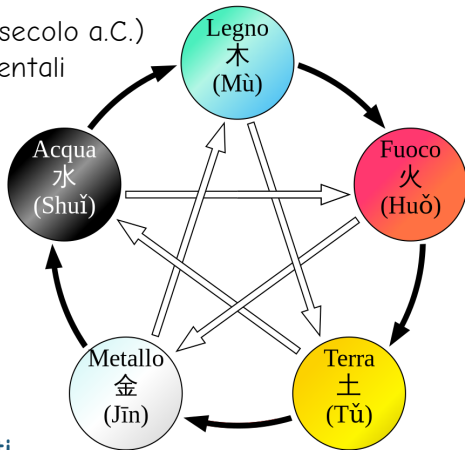


Nella filosofia cinese **wuxing** (VII-IV secolo a.C.) si ipotizzava che gli elementi fondamentali fossero 5:

- Terra,
- Acqua,
- Fuoco.
- Legno,
- Metallo,

Ma anche questa era un'idea priva di fondamento scientifico:

- **Non** sottoposta alla **prova dei fatti**.



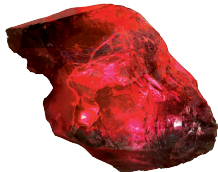
Interazioni di generazione
 Interazioni di distruzione

L'alchimista **Paracelso** (1493–1541), formulò la teoria dei **tria prima**, secondo la quale i costituenti della materia sarebbero stati 3:

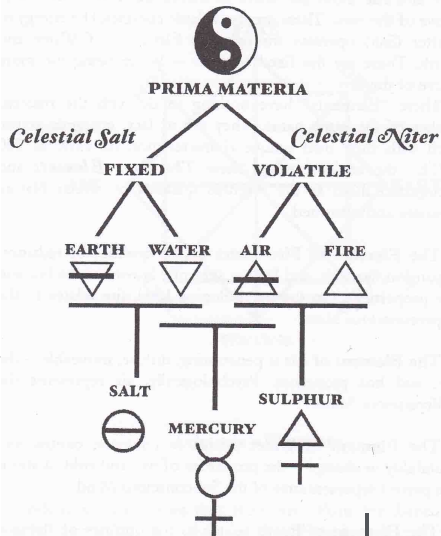
- **Zolfo**,
- **Mercurio**,
- **Sale**.

Ma, ancora una volta, si trattava di un'idea priva di fondamento scientifico

- **Non** sottoposta alla **prova dei fatti**.



Pietra filosofale
(dal film Harry Potter)

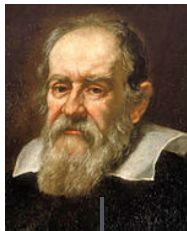


Con Galileo (1564–1642) si afferma nel mondo occidentale il **Metodo Scientifico**, che costituisce un **metodo efficace** per **selezionare le idee** e che consiste, sostanzialmente, nel:

- **Sottoporre** le **idee** alla **prova dei fatti**;
- **Eliminare** le **idee** che **non funzionano**.

Quello che l'esperienza e il senso ci dimostra si deve anteporre ad ogni discorso, ancorché ne paresse assai ben fondato (Galileo Galilei)

- A.-L. Lavoisier (1743–1794) pose al centro delle sue ricerche l'analisi chimica, **rifiutando** programmaticamente qualunque **sistema di elementi** che **non** risultasse **compatibile con l'esperienza**.
- Per Lavoisier un **elemento** era una sostanza che **non** è possibile **decomporre** mediante l'analisi chimica.



La **variabilità** della materia oggi conosciuta è **sterminata**:

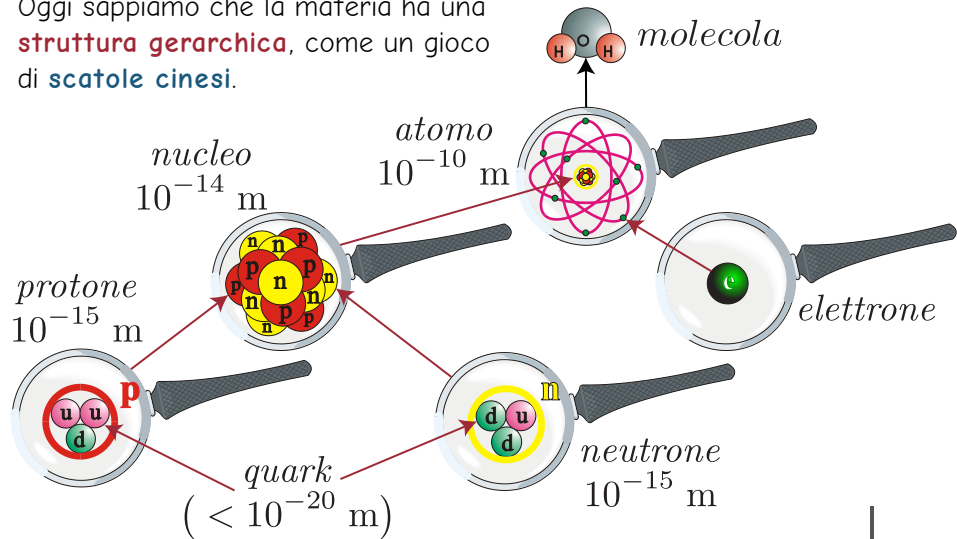
- La American Chemical Society ha classificato sinora **160 milioni** di **sostanze** (**molecole** inorganiche e organiche) uniche (al netto dei sinonimi):
 - Si veda CAS registry, <https://www.cas.org/>.

- Tale numero aumenta attualmente di **15 000** nuove **sostanze/giorno**.

Tuttavia l'avanzamento nella conoscenza della **chimica** e della **fisica atomica, nucleare e sub-nucleare** ha consentito una nuova ricerca degli **elementi** primi costituenti della materia:

- Questa volta su **base scientifica**.

Oggi sappiamo che la materia ha una **struttura gerarchica**, come un gioco di **scatole cinesi**.



Se si potesse osservare al microscopio, la struttura atomica della materia apparirebbe come nella figura, che rappresenta un **atomo di elio**.

- Le **proporzioni** però non sono rispettate:
 - Se i **protoni** e i **neutroni** avessero **1 cm** di diametro;
 - ▶ **Elettroni** e **quark** avrebbero diametro inferiore a quello di un **capello**;
 - ▶ L'**atomo** avrebbe un diametro pari a **30 volte** la lunghezza di un **campo da calcio**.

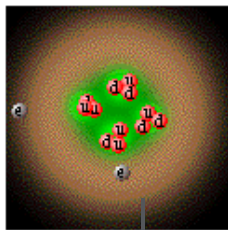


Tavola Periodica degli Elementi (Dimitri Mendeleev, 1869)

Group→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓Period																		
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	57 La	* 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	89 Ac	** 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
				* 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	
				** 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	

Particelle del

Modello Standard (1970):

- 12 Fermioni:

- 6 Quark;
- 6 Leptoni;

- 4 Bosoni di Gauge (forze);

- Bosone di Higgs.

Materia (Fermioni)

	I	II	III		
<i>massa</i> →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
<i>carica</i> →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
<i>spin</i> →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u <i>up</i>	c <i>charm</i>	t <i>top</i>	g <i>gluone</i>	H <i>bosone di Higgs</i>
Quark	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d <i>down</i>	s <i>strange</i>	b <i>bottom</i>	γ <i> fotone</i>	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e <i>elettrone</i>	μ <i>muone</i>	τ <i>tauone</i>	Z <i>bosone W</i>	
Leptoni	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e <i>neutrino elettronico</i>	ν_μ <i>neutrino muonico</i>	ν_τ <i>neutrino tauonico</i>	W <i>bosone Z</i>	











Bosoni di Gauge (Forze)

$$1 \text{ e} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$1 \text{ MeV}/c^2 = 1.783 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

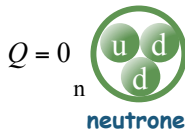
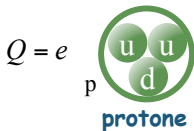
Per ogni **particella** costituente della materia esiste un'**antiparticella** costituente dell'antimateria.

- Le antiparticelle sono **identiche** alle corrispettive particelle in tutto **eccetto** che nella **carica elettrica** e nel **momento magnetico**, che sono **opposti**.
- Per esempio, la carica del protone è positiva e quella dell'antiprotone è negativa. Esse hanno la **stessa massa**.

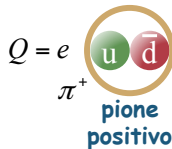
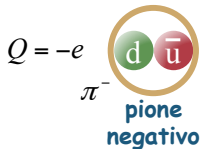
materia	anti-materia
$Q = -e$  elettrone	$Q = e$  positrone
$Q = \frac{2}{3}e$  up	$Q = -\frac{2}{3}e$  anti-up
$Q = -\frac{1}{3}e$  down	$Q = \frac{1}{3}e$  anti-down
$Q = e$  protone	$Q = -e$  anti-protone
$Q = 0$  neutrone	$Q = 0$  anti-neutrone

Non si osservano mai i quark individualmente, ma soltanto in combinazione di almeno due o tre (raramente anche 4 o 5).

- Gli **adroni** sono particelle **composite** formate da quark. Si suddividono in:
 - **Barioni** formati da **3 quark**.
 - **Mesoni**, formati da una **coppia quark-antiquark**.



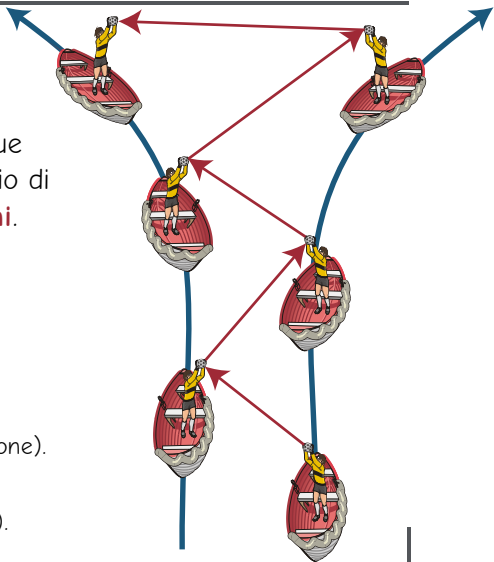
barioni



mesoni

Le **forze fondamentali** sono attribuite allo **scambio** di particelle mediatrici, dette **bosoni**.

- Per esempio la **repulsione** tra due **elettroni** è attribuita allo scambio di particelle mediatrici, dette **fotoni**.



Particella interagente (p. es., elettrone).



Particella mediatrice (p. es., fotone).

In natura esistono **soltanto 4 forze fondamentali**:

	Gravità	Debole	Elettromagnetismo	Forte
Particella scambiata	Gravitone G	Bosoni vettori intermedi W^+, W^-, Z^0	Fotone γ	Gluoni g
Raggio d'azione	∞	10^{-16} cm	∞	10^{-13} cm
Intensità a piccola distanza (10^{-13} cm)	10^{-38}	10^{-13}	10^{-2}	1

L'etimologia dei **nomi delle particelle**, di solito, risale — o si ispira — al **greco antico**:

- **Elettrone**: da ἤλεκτρον, traslitterato **elektron**, che significa **ambra**:
 - Materiale che si elettrizza se strofinato;
- **Protone**: da πρῶτον, traslitterato **proton**, (neutro singolare di πρῶτος, protos), che significa **primo**, nel senso di primitivo, al primo stadio di sviluppo, all'origine delle altre particelle;
- **Neutrone**: dalla radice latina **neuter** (neutro) e dal suffisso greco “-on”, in assonanza con elettrone o protone.

Una evidente eccezione è il nome “**quark**”.

- Qual è l'**etimologia** del termine “quark”?

Three **quarks** for Muster Mark!
 Sure has not got much of a bark
 And sure any he has it's all beside the mark
 But O, Wrengle Almighty, wouldn't un be a sky of a lark
 To see that old buzzard whooping about for uns shirt in the dark
 And he hunting round for uns speckled trousers around by Palmerstown
 Park?
 Hohohoho, moultly Mark!
 You're the rummest old rooster ever flopped out of a Noah's ark
 And you think you're cock of the wark.
 Fowls, up! Tristy's the spry young spark
 That'll tread her and wed her and bed her and red her
 Without ever winking the tail of a feather
 And that's how that chap's going to make his money and mark!

James Augustine Aloysius **Joyce** (1882–1941),
Finnegans wake, 2, 4, 383.



Finnegans wake:

- Romanzo scritto in un linguaggio molto particolare, consistente in una **miscela** di:
 - Parole **inglesi**;
 - Parole di **lingue diverse** (compresi ideogrammi);
 - **Parole composte** di parole o morfemi provenienti da **lingue diverse**;
 - **Neologismi** creati mediante **giochi di parole**;
- Con l'idea di ricreare l'esperienza del **sonno** e del **sogno**.
- Si dice sia **in grado di leggere il romanzo soltanto chi l'ha già letto...**

"Three quarks for Muster Mark...":

- **Filastrocca** irriverente di 13 versi:
 - Letta, nel romanzo, dal protagonista Humphrey Chimpden Earwicker;
 - Irride Re Marco di Cornovaglia, tradito dalla moglie **Isotta** di Irlanda nella leggenda di **Tristano**.

Che cosa significa **Quark**?

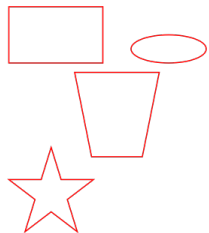
- La filastrocca si apre (“Three quarks...”) con una **formula** simile a quella del brindisi (“Three toasts...”) o per un applauso (“Three cheers...”).
- Nella circostanza del brindisi quark evoca **quarts** (**3/4 di birra o di vino**: Humphrey Chimpden Earwicker è un oste);
- Quark è anche una parola **tedesca** che significa “**giuncata**” (formaggio fresco fatto con latte cagliato);
- In senso **figurato** in **tedesco** quark significa “**sciocchezza**”;
- In **inglese arcaico** “to quark” equivale a “to croak”, cioè “**gracchiare**” (onomatopeico):
 - Joyce forse si riferisce ai **3 garriti** dei 4 gabbiani che seguono la nave sulla quale stanno viaggiando Tristano e Isotta e **si prendono gioco** di Re Marco per la relazione di Isotta con Tristano.

Tuttavia il **significato** di “quark” nel romanzo di Joyce **non è ben definito**:

- Trattandosi di particelle fino ad allora sconosciute fu scelto il termine “quark” dal premio Nobel **Murray Gell-Mann**, lettore di Joyce.

Dal dizionario Merriam-Webster (tradotto in italiano):

1. Bilanciamento delle proporzioni. Anche: bellezza che nasce dal bilanciamento delle proporzioni.
2. La proprietà di essere simmetrico; specialmente: corrispondenza in dimensione, forma e posizione relativa delle parti sui lati opposti di una linea o di un piano oppure rispetto a un centro o a un asse.
3. Un moto rigido di una figura geometrica che determina una corrispondenza 1-1 su se stessa.
4. **La proprietà dei fenomeni fisici e delle equazioni che li descrivono di rimanere invariati in seguito a certe trasformazioni (l'orientazione nello spazio, il segno della carica elettrica, la riflessione spaziale, la direzione del tempo).**



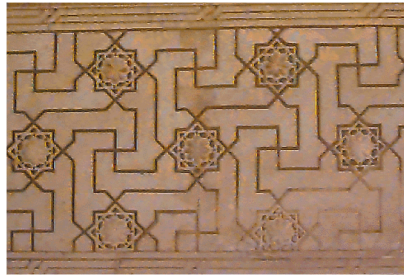
Regolarità nelle forme



Concetto

Realizzazione







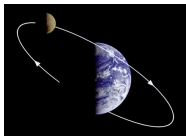
Monte Cervino o Matterhorn
(Italia-Svizzera)



Monte Fuji
(Giappone)



Stessa struttura dei cristalli di neve nelle montagne geograficamente molto lontane.

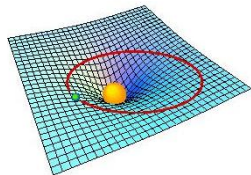
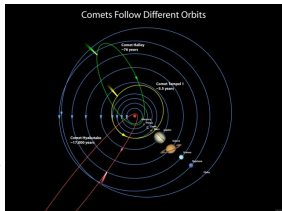


osservazione

$$F = \gamma \frac{mM}{r^2}$$

generalizzazione
e formulazione
della legge fisica

predizione di
fenomeni



estrazione di
concetti più
astratti



Volto naturale



Volto "simmetrizzato"

Una Certa Asimmetria Rende le Figure più Dinamiche



Una Certa Asimmetria Rende le Figure più “Belle”



traslazione

R

rotazione

R

riflessione
(parità)

R

R

trasformazione
continua

trasformazione
continua

trasformazione
discreta

trasformazione di scala



trasformazione continua

Le **leggi** fisiche e i **risultati** degli esperimenti fisici **non cambiano**:

- Per **traslazioni**;
- Per **rotazioni**;
- Per **traslazioni lineari nel tempo** (p. es.: su un treno in moto a velocità costante lungo un binario rettilineo);
- Quasi sempre per **riflessione**.

Le **leggi** fisiche e i **risultati** degli esperimenti fisici **cambiano**:

- Per **trasformazioni di scala**;
- Per **rotazioni lineari nel tempo** (p. es.: sulla piattaforma di una giostra rotante con velocità angolare costante);
- Molto raramente per **riflessione**.

L'interesse della fisica per le trasformazioni di simmetria nasce dall'esistenza di una **relazione** tra:

- L'**invarianza delle leggi della fisica** per una particolare **trasformazione di simmetria**;
- Un **principio di conservazione** della fisica.

La relazione è stata scoperta dalla fisica matematica tedesca Emmy Amalie Nöther (1882-1935), ed è oggi nota come **Teorema di Nöther**.

- La dimostrazione è basata sul **principio di minima azione**;
- I principi di minimo trovano una giustificazione nel quadro della meccanica ondulatoria.

Emmy Amalie Nöther, 1882-1935



- Lo studio sperimentale e teorico della fisica ha condotto all'individuazione di un **grande numero** di **leggi fisiche**, espresse in forma matematica e spesso non semplice.
- Tutte queste leggi sembrano tuttavia seguire dei **principi universali**.
- Esempi di tali principi universali sono proprio i **Principi di Conservazione**.
- Esistono **alcune grandezze fisiche** che **non cambiano nel tempo** (in gergo si dice che "si conservano"):
 - Anche se nel tempo lo **stato di moto** del sistema fisico considerato subisce **cambiamenti**.
- Esempi di **grandezze conservate**:
 - Energia;
 - Quantità di moto;
 - Momento della quantità di moto.

- Energia:

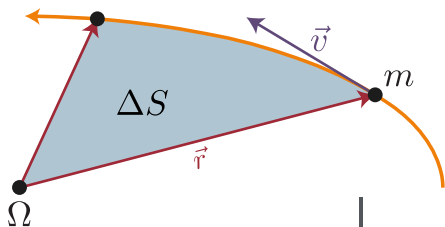
$$E = \underbrace{\frac{1}{2} m v^2}_{\text{cinetica}} - \underbrace{\gamma \frac{M m}{r}}_{\text{potenziale}} + \underbrace{CT}_{\text{termica}} + \underbrace{m c^2}_{\text{massa}} + \dots$$

- Quantità di moto:

$$Q = m v$$

- Momento della quantità di moto:

$$K^{(\Omega)} = 2m \frac{\Delta S}{\Delta t}$$



- Energia:

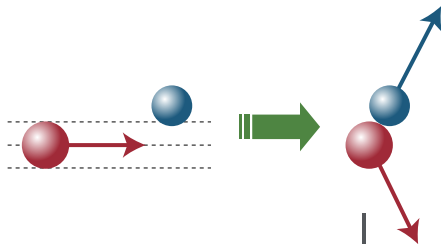
$$E_{1i} + E_{2i} = E_{1f} + E_{2f}$$

- Quantità di moto:

$$\vec{Q}_{1i} + \vec{Q}_{2i} = \vec{Q}_{1f} + \vec{Q}_{2f}$$

- Momento della quantità di moto:

$$K_{1i}^{(\Omega)} + K_{2i}^{(\Omega)} = K_{1f}^{(\Omega)} + K_{2f}^{(\Omega)}$$



L'invarianza delle leggi della fisica per una trasformazione indica inoltre l'**indefinibilità** di una **quantità fisica assoluta**.

- P. es.: l'invarianza delle leggi della fisica per una **traslazione** indica l'indefinibilità della **posizione assoluta**:
 - Con un esperimento fisico è possibile determinare la posizione relativa tra due corpi nello spazio, ma non la posizione assoluta di un corpo nell'universo:
 - ▶ Perché l'esperimento produce **il medesimo** risultato in tutti i punti e non consente di distinguere punti diversi;
 - ▶ Un punto dello spazio non può essere **riconosciuto** da un altro sulla base del risultato di un esperimento;
 - ▶ Tutti i punti dello spazio sono equivalenti per l'esperimento (in gergo si dice che lo spazio è **omogeneo**).

Relazione tra:

- Invarianza della fisica per trasformazioni di simmetria;
- Quantità non definibili;
- Principi di conservazione.

Quantità non definibili	Trasformazione di simmetria	Grandezza conservata
Posizione assoluta (omogeneità dello spazio)	Traslazioni nello spazio	Quantità di moto
Tempo assoluto (omogeneità del tempo)	Traslazioni nel tempo	Energia
Direzione spaziale assoluta (isotropia dello spazio)	Rotazioni nello spazio	Momento della quantità di moto

Relazioni analoghe valgono per alcune simmetrie discrete (per le quali la fisica non sempre è invariante):

Quantità non definibili	Trasformazione di simmetria	Grandezza conservata
Chiralità assoluta	Inversione spaziale	Parità spaziale P
Segno assoluto della carica elettrica	Coniugazione di carica	Parità per coniugazione di carica C
Verso della freccia del tempo	Inversione temporale	Parità per inversione temporale T

Il termine "chiralità" deriva dal greco antico $\chi\epsilon\acute{\iota}\rho$, $\chi\epsilon\iota\rho\acute{o}\varsigma$, traslitterato *kheír*, *kheirós*, che letteralmente significa **mano**.

- **Simmetria:**

- Il mondo visto allo specchio è **uguale** al mondo reale.

- **Violazione della simmetria** (asimmetria):

- Il mondo visto allo specchio è **diverso** dal mondo reale.



Mondo reale



90%



10%

Mondo allo specchio



10%

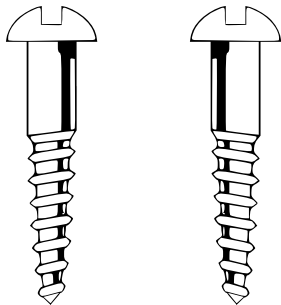


90%

Mondo reale \neq Mondo allo specchio
(violazione della parità)

Violazione della Simmetria \mathcal{P} nel Mondo Macroscopico (II)

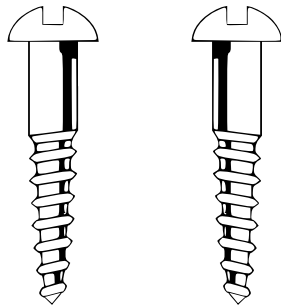
Mondo reale



99.9 ... 99%
destrorsa

0.0 ... 0.01%
sinistrorsa [1][2]

Mondo allo specchio



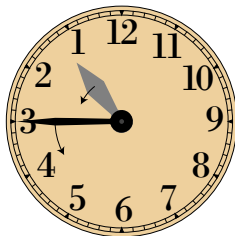
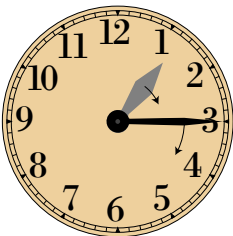
0.0 ... 0.01%
destrorsa

99.9 ... 99%
sinistrorsa

Mondo reale \neq Mondo allo specchio
(violazione della parità)

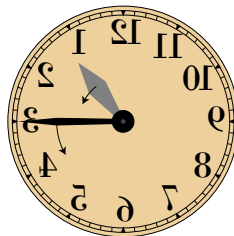
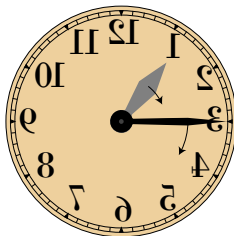
Mondo reale

Mondo allo specchio



99.9 ... 99%
orario

0.0 ... 01%
anti-orario



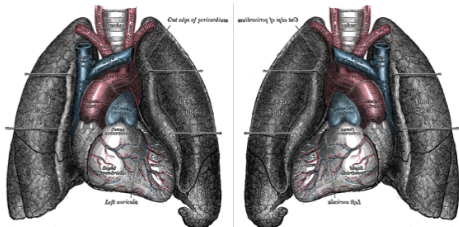
0.0 ... 01%
orario

99.9 ... 99%
anti-orario

Mondo reale \neq Mondo allo specchio
(**violazione della parità**)

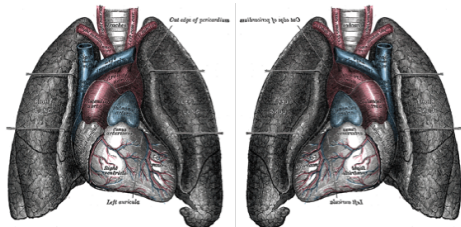
Mondo reale

Mondo allo specchio



99.999%
cuore a sx

0.001%
cuore a dx



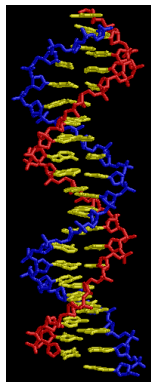
0.001%
cuore a sx

99.999%
cuore a dx

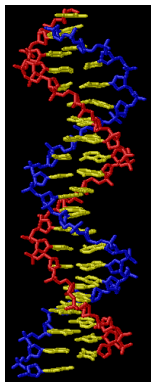
Mondo reale \neq Mondo allo specchio
(**violazione della parità**)

Violazione della Simmetria \mathcal{P} in Biologia (DNA)

Mondo reale



100%



0%

Mondo allo specchio



0%



100%

Mondo reale \neq Mondo allo specchio
Parità totalmente violata

- La **violazione** della **parità** consente di dare una **definizione assoluta della sinistra** (come si legge sui **vocabolari**):
 - p. es.: la parte verso cui è spostato il cuore;
 - Altrimenti si potrebbe soltanto dire che la sinistra è opposta alla destra e che la destra è opposta alla sinistra.
- Se tuttavia ci si volesse intendere con un ipotetico **extraterrestre** sul significato di destra e sinistra:
 - Bisognerebbe ricorrere a una violazione della parità nella **fisica**:
 - ▶ La fisica è la stessa in tutto l'Universo,
 - ▶ La **biologia potrebbe essere diversa**: cuore a destra, elica del DNA avvolta in senso opposto, ecc.

- Interazioni **elettromagnetiche**, e interazioni **nucleari forti** sono **invarianti** per inversione spaziale:
 - La parità P si conserva.
 - Le interazioni elettromagnetiche e le interazioni nucleari forti **viste allo specchio** sono assolutamente **verosimili**.
 - **Non è possibile** distinguere **la destra dalla sinistra** sulla base delle interazioni elettromagnetiche o delle interazioni nucleari forti.
- Le interazioni **nucleari deboli** invece **non** sono **invarianti** per inversione spaziale:
 - La parità P a volte non si conserva.
 - Le interazioni nucleari deboli **viste allo specchio** possono essere **inverosimili**.
 - **Si può** distinguere **la destra dalla sinistra** sulla base delle interazioni nucleari deboli.

- Fino al 1956 si credeva che la fisica microscopica fosse **invariante** per C , \mathcal{P} e \mathcal{T} .
 - Impossibilità di definire la sinistra assoluta, la carica positiva assoluta e la freccia del tempo assoluta.
- Nel 1956 (T.D. Lee e C.N. Yang) si scoprì **violazione** di \mathcal{P} nel decadimento della particella K^+ :

$$K^+ \rightarrow \begin{cases} 2\pi & (P = +1) \\ 3\pi & (P = -1) \end{cases}$$

- Nel 1957 (C. S. Wu) si scoprì la **violazione** di \mathcal{P} nel decadimento β del ^{60}Co .



Tsung-Dao Lee (1926–)



Chen Ning Yang (1922–)



Chien-Shiung Wu (1912–1997)

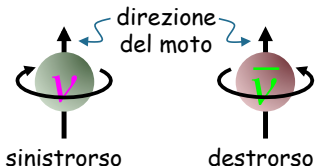
Nel **1958** fu determinata sperimentalmente (M. Goldhaber) l'elicità del **neutrino**:

- Che risulta sempre **sinistrorsa**.
 - L'elicità dell'**anti-neutrino** risulta invece sempre **destrorsa**.

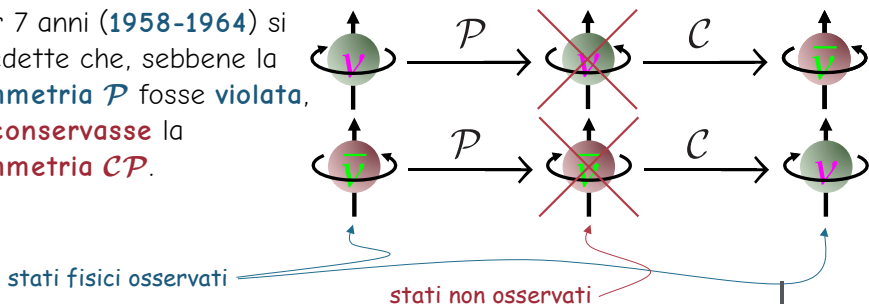


Maurice Goldhaber (1911-)

neutrino anti-neutrino

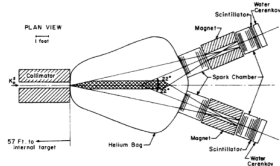


- In alcuni decadimenti di particelle (mediati dalle **interazioni nucleari deboli**) si osserva **violazione di P** .
- Tuttavia, se, **oltre** a guardare tali processi allo **specchio**, si **scambiano** anche le **cariche positive** con quelle **negative** (simmetria C , o **coniugazione di carica**), tali processi appaiono di nuovo **verosimili**. O **quasi**.
- Per 7 anni (**1958-1964**) si credette che, sebbene la **simmetria P** fosse **violata**, si **conservasse** la **simmetria CP** .



- La **violazione** di CP è stata osservata per la prima volta nel **1964** (J. Cronin, V. Fitch) nel decadimento della particella strana neutra K_L :

$$K_L \rightarrow \begin{cases} 3\pi & (CP = -1) & 99.8\% \\ 2\pi & (CP = +1) & 0.2\% \end{cases}$$

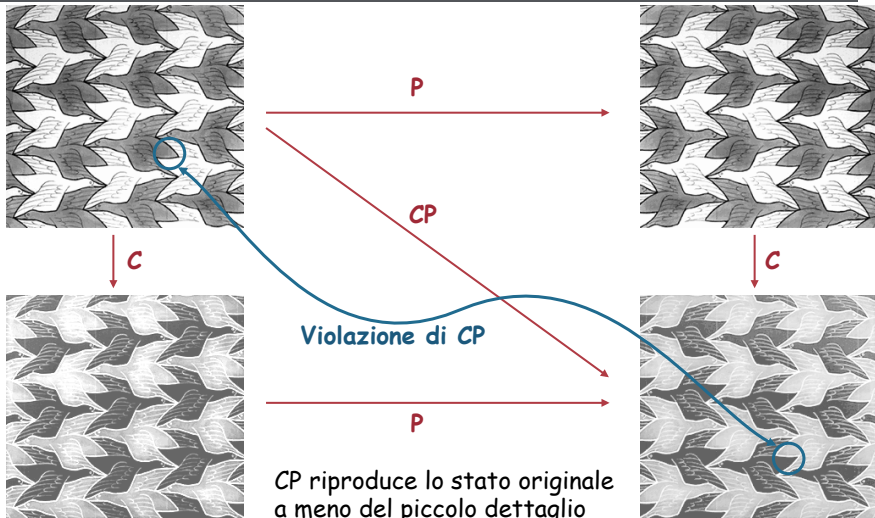


James Watson Cronin
(1931–2016)

- **Oggi** si ritiene, su basi teoriche (teorema CPT) e sperimentali, che sia **sempre conservata la simmetria CPT** .
 - Un **film proiettato a rovescio**, visto attraverso uno **specchio** e con le **cariche scambiate**, rappresenta ancora una **realtà plausibile**.
 - Se CP è violata, mentre CPT è conservata, significa che è **violata** anche T (irreversibilità meccanica microscopica).



Val Logsdon Fitch
(1923–2015)

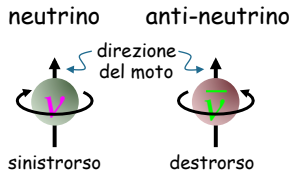


- Una misura della violazione di CP è data dal risultato sperimentale:

$$\frac{\text{rateo}(K_L \rightarrow e^+ \pi^- \nu_e)}{\text{rateo}(K_L \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu}_e)} = 1.00648 \pm 0.00035$$

Tale risultato può essere utilizzato per definire la **chiralità assoluta**:

- “Si definisce **sinistra** la **chiralità dei neutrini prodotti in maggior numero nel decadimento semileptonico dei kaoni neutri a vita lunga**”.



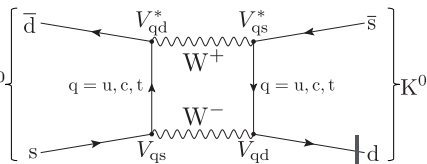
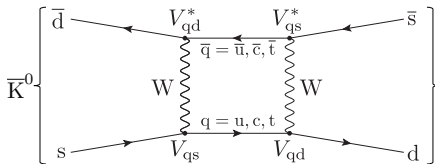
- Analogamente, utilizzando lo stesso risultato sperimentale sulla violazione di \mathcal{CP} :

$$\frac{\text{rateo}(K_L \rightarrow e^+ \pi^- \nu_e)}{\text{rateo}(K_L \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu}_e)} = 1.00648 \pm 0.00035$$

si può definire il **segno assoluto della carica elettrica**:

- “Si definisce **positiva** la **carica elettrica** degli ‘elettroni’ prodotti in **maggior numero** nel **decadimento semileptonico** dei kaoni neutri a vita **lunga**”.

Alcune particelle, chiamate K^0 (kaoni neutri), si trasformano spontaneamente nelle loro anti-particelle (**oscillazione del K^0**) mediante lo scambio di 2 bosoni W (interazione debole):



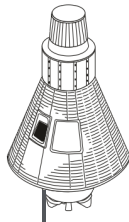
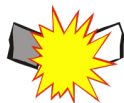
- Tuttavia l'oscillazione è **asimmetrica**. Una misura sperimentale ha ottenuto il risultato:

$$\frac{\text{rateo}(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) - \text{rateo}(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)}{\text{rateo}(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) + \text{rateo}(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)} = 6.6 \times 10^{-3}$$

Questa **asimmetria** consente di definire la **freccia assoluta del tempo**:

- “Si dice **positivo** il **verso del tempo** in cui gli anti-kaoni neutri tendono a trasformarsi in kaoni neutri più di quanto i kaoni neutri tendano a trasformarsi in anti-kaoni neutri”.

- Prima di **stringere la mano** a un “extraterrestre” occorre accertarsi che esso sia composto di materia:
 - Se malauguratamente egli fosse composto di **antimateria** la stretta di mano sarebbe mortale e porterebbe alla **mutua annichilazione**.
- Come ci si può accertare che egli sia composto di materia prima di toccarlo?
- Per fortuna **materia e antimateria non sono esattamente l'una l'opposto dell'altra** a causa della **violazione di CP**.



- Infatti alcune particelle, i **kaoni neutri a vita lunga K_L** possono avere, tra gli altri, 2 tipi di decadimento semileptonico, tra loro coniugati di CP , ma tali due canali di decadimento non hanno esattamente la stessa frequenza:

$$\frac{\text{rateo}(K_L \rightarrow e^+ \pi^- \nu_e)}{\text{rateo}(K_L \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu}_e)} = 1.00648 \pm 0.00035$$

- **Regola:** mai stringere la mano a “extraterrestri” i cui **nuclei** atomici hanno carica elettrica dello **stesso segno** della carica degli ‘**elettroni**’ emessi con **minore frequenza** nel decadimento semileptonico dei kaoni neutri a vita lunga.



L'antimateria **in natura** si osserva soltanto:

- Sotto forma di **antiprotoni** e **positroni** presenti in numero esiguo nei **raggi cosmici**:
 - Prodotti secondari della collisione di elettroni, protoni o fotoni con la materia ordinaria.
- Sotto forma di **positroni** prodotti in alcuni **decadimenti radioattivi**.

Nell'Universo **non** c'è evidenza di **antimateria primaria**.

- Si trovano **pochi antiprotoni** (fondo di radiazione cosmica) e **nessun** nucleo di **anti-elio**: (i limiti sono dovuti alla sensibilità degli apparati di misura):

$$\frac{N_{\bar{p}}}{N_p} < 10^{-4}$$

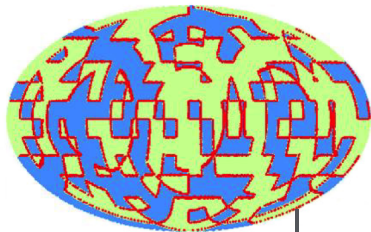
$$\frac{N_{\overline{\text{He}}}}{N_{\text{He}}} < 1.1 \times 10^{-6}$$

$$\frac{N_{\bar{N}}}{N_N} < 2.9 \times 10^{-5}, \quad 2 \leq Z \leq 6$$

Esperimento AMS (Alpha Magnetic Spectrometer), livello di confidenza: 95%. Osservati 2.86×10^6 nuclei di elio, **nessun** nucleo di anti-elio.

- La **distanza minima** dalla Terra di un **eventuale** dominio di antimateria è comparabile con la **scala dell'orizzonte visibile** $\approx 1 \text{ Gpc}$ ($1 \text{ pc} = 3.08 \times 10^{16} \text{ m} = 3.26 \text{ a.l.}$).

- Si potrebbe pensare che l'universo sia formato da un **mosaico** di zone isolate, dominate dalla materia e dall'antimateria.
- Tuttavia si ritiene comunemente che sia piuttosto **improbabile**:
 - Principalmente perché non è stato trovato un meccanismo mediante il quale un universo simmetrico nel bilancio materia-antimateria possa sviluppare, **evolvendo**, **regioni sufficientemente ampie** con **prevalenza netta di materia o antimateria**.
 - Sebbene possano essere presenti **fluttuazioni statistiche**, esse non sono **in nessun luogo sufficientemente ampie**.

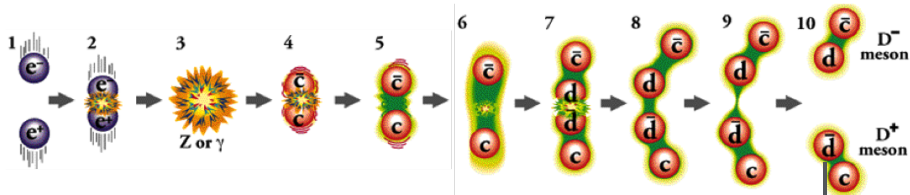


Perché ci Stupiamo che non ci Sia Antimateria nell'Universo?

Poiché l'Universo si è creato dal vuoto, ci aspettiamo che nei **primi istanti** di vita la **quantità di materia** fosse **esattamente uguale** alla **quantità di antimateria** (conservazione della carica elettrica):

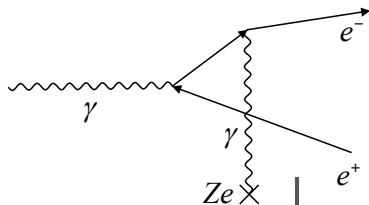
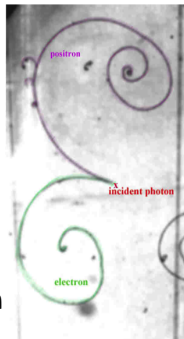
- Si è trattato del processo inverso dell'annichilazione;
- Nell'annichilazione una certa quantità di materia interagisce con la **stessa** quantità di antimateria annichilendosi e producendo energia;
- Nella creazione una certa quantità di energia si materializza in materia e antimateria nella **stessa quantità**.

Dobbiamo perciò spiegare **come è scomparsa l'antimateria**.

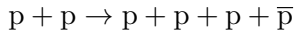


Fotografie di **produzioni di coppie e^+e^-** in camera a bolle.

- Il **fotone** non lascia tracce.
- L'**elettrone** spiraleggia in senso anti-orario.
- Il **positrone** spiraleggia in senso orario.

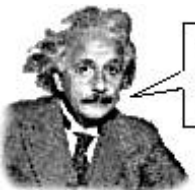
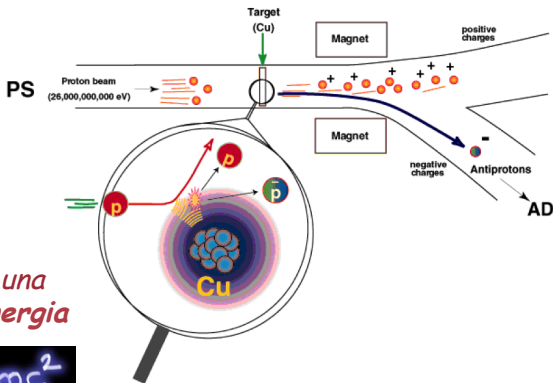


La reazione più utilizzata per produrre antiprotoni è:



dove l'energia cinetica nello stato iniziale deve essere superiore a due masse protoniche.

Principle of Antiproton Production



La massa è una forma di energia

$$E=mc^2$$

Nei processi di creazione di coppie si **conserva la carica elettrica**:

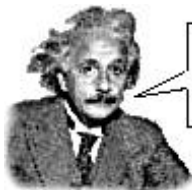
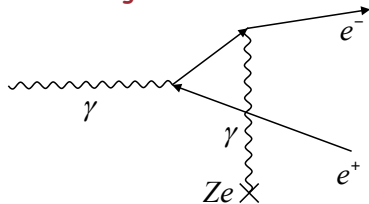
- Si possono creare **elettrone + positrone** (carica totale $-e + e = 0$):
 - Ma **non** un elettrone da solo o un positrone da solo.

Nei processi di creazione di coppie si **conserva l'energia**:

- Il fotone deve avere energia sufficiente per **creare la massa** dei due elettroni:

$$E_{\gamma} > 2 m_e c^2$$

- L'energia in **eccesso** si trasforma in energia cinetica degli elettroni.



La massa è una forma di energia

$$E=mc^2$$

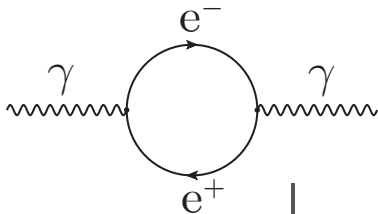
Una coppia elettrone-positrone può **crearsi** per un certo **intervallo di tempo Δt** e poi **annichilirsi**.

- Se l'intervallo di tempo è **molto piccolo**, il **principio di indeterminazione** di Heisemberg consente una **temporanea violazione della conservazione dell'energia**:
 - Tanto più **breve** è l'intervallo di tempo tanto **meno** l'energia è **definita**:

$$\Delta \mathcal{E} \Delta t \geq \hbar$$

$$\Delta m c^2 \Delta t \geq \hbar$$

$$\Delta m \Delta t \geq \frac{\hbar}{c^2}$$

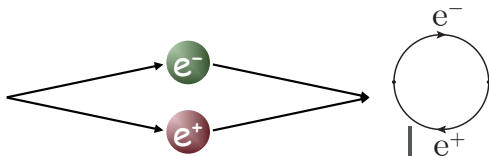


Coppie particella-antiparticella possono **spontaneamente apparire dal vuoto** e **svanire** (creandosi e annichilendosi) a **condizione** che esse **sopravvivano** per un **intervallo di tempo limitato**.

- Per le coppie elettrone-positrone ($\Delta m = 2 m_e$):

$$\Delta t = \frac{\hbar}{2 m_e c^2} \approx 6 \times 10^{-21} \text{ s}$$

- L'universo è pieno di un **mare di particelle virtuali** che attendono di diventare reali.
- **Il vuoto si polarizza**.



Se l'**energia disponibile** è **maggiore della massa delle due particelle**, le particelle possono diventare **reali**.

- Nel **Big Bang** la gravità o qualche altra sorgente ha potuto procurare energia e lo spazio si è espanso abbastanza velocemente da prevenire l'annichilazione della coppia.
- L'effetto netto è la **trasformazione di energia in massa**.



In **assenza di asimmetrie** nelle **leggi della fisica**, se nella **creazione** dell'Universo materia e antimateria si sono create nella **stessa quantità**, ci aspettiamo due possibili alternative:

● **I alternativa:**

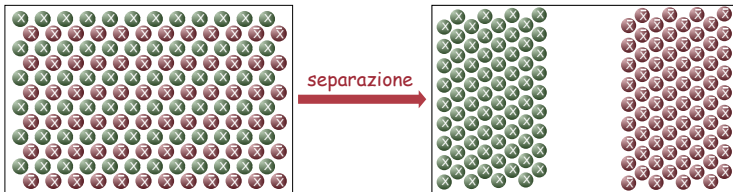
- Non è rimasto **nulla** perché materia e antimateria si sono **annichilate** a vicenda producendo energia.



- **II alternativa:**

- È rimasta la **stessa quantità** di materia e di antimateria e le due sono **molto lontane e separate** tra loro.

Com'è invece **possibile** che l'**antimateria sia scomparsa** mentre la **materia sia rimasta**?



Deve avere agito un **meccanismo asimmetrico** che “preferisce” la **materia** all'antimateria.

- Quanto deve essere stata **intensa** inizialmente questa asimmetria? **Quale eccesso di materia** rispetto all'antimateria deve esserci stato **inizialmente**?
 - In realtà **meno di quanto si possa pensare**.
 - È sufficiente **una parte su 10 miliardi**:

$$\frac{N_X}{N_{\bar{X}}} = 1 + 10^{-10} = 1.0000000001$$

- **Come si è prodotta** questa, pur piccola, asimmetria?
 - Quando l'**Universo** si **espande** e si **raffredda**, i processi di creazione e **annichilazione** si **rallentano** e sia la materia sia l'anti-materia hanno tempo per subire altri processi sub-nucleari, come il **decadimento**.

- Supponiamo che in una ceta fase molto iniziale dello sviluppo dell'Universo, fosse presente una certa quantità di ipotetiche **particelle primordiali X** e una quantità **esattamente uguale** delle corrispondenti **antiparticelle \bar{X}** .
- Supponiamo che le particelle X possano **decadere** sia in **2 quark**:

$$X \rightarrow qq$$

sia in **un quark e un anti-leptone**:

$$X \rightarrow q\bar{l}$$

- Supponiamo che, le corrispondenti antiparticelle \bar{X} possano **decadere** sia in **2 anti-quark**:

$$\bar{X} \rightarrow \bar{q}\bar{q}$$

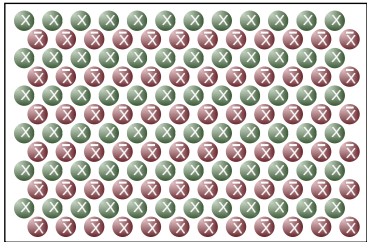
sia in **un anti-quark e un leptone**:

$$\bar{X} \rightarrow \bar{q}l$$

- Supponiamo infine che il decadimento $X \rightarrow qq$ sia **un po' più frequente** del decadimento coniugato $\bar{X} \rightarrow \bar{q}\bar{q}$ (**violazione di CP**).

La Scomparsa dell'Antimateria (VI)

(percentuali di fantasia, per fissare le idee)



$$X \xrightarrow{55\%} qq$$

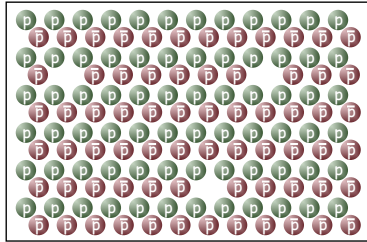
$$X \xrightarrow{45\%} q\bar{l}$$

asimmetria



$$\bar{X} \xrightarrow{54\%} \bar{q}\bar{q}$$

$$\bar{X} \xrightarrow{46\%} \bar{q}l$$



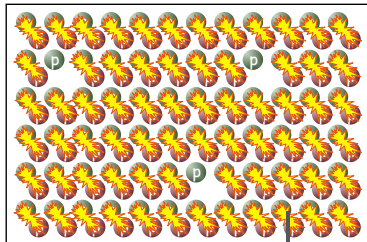
72 p, 69 \bar{p}



L'annichilazione estremizza l'asimmetria.

Soppresse parti uguali di materia e di antimateria.

annichilazione



La possibile **storia dei primi istanti dell'Universo**:

- Dopo 10^{-35} s dal **big bang** particelle e antiparticelle erano presenti nella stessa quantità.
- Tra 10^{-34} s e 10^{-4} s avvengono decadimenti che **violano** il **numero barionico**, **C** e **CP**, creando una leggera prevalenza della materia sull'antimateria:

$$\frac{N_X}{N_{\bar{X}}} = 1 + 10^{-10} = 1.0000000001$$

- Dopo 10^{-3} s protoni e antiprotoni si **annichilano** tra loro e **sopravvivono** soltanto i **protoni in eccesso**.

Le prime fasi dell'Universo, quelle **più simmetriche**, sono anche **più instabili**. **Perché esiste qualcosa invece del nulla?**

- Perché **il nulla è instabile**.

Requisiti per la bariogenesi (Sakharov, 1967):

1. Non conservazione del **numero barionico**.
2. **Asimmetria** nell'interazione particella-antiparticella (**violazione** di C e di CP).
 - Devono essere possibili reazioni in cui il numero barionico aumenta, ma devono anche essere **sfavorite** le reazioni, a esse CP -coniugate, in cui il numero barionico diminuisce.
3. Deviazione dall'equilibrio termico.
 - Non devono essere presenti, con uguale probabilità, i processi inversi.



Andrei Dmitrievich
Sakharov
(1921–1989)

Con le **conoscenze attuali** sappiamo giustificare questa piccola asimmetria tra materia e antimateria?

● **Qualitativamente sì:**

- Il Modello Standard include un meccanismo che descrive l'asimmetria materia-antimateria e che è in ottimo accordo con i risultati degli esperimenti agli acceleratori.

● **Quantitativamente no:**

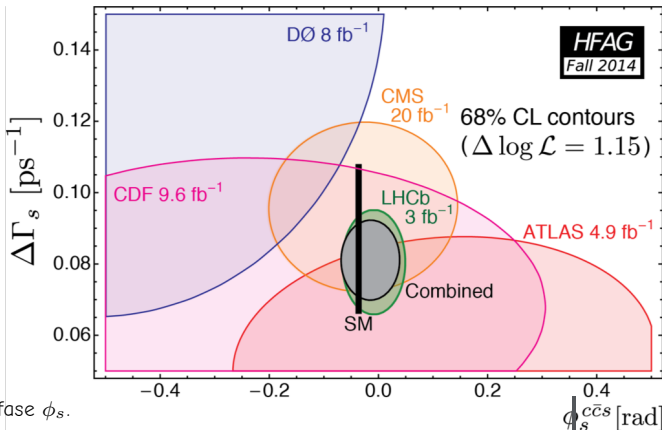
- Le previsioni del Modello Standard sul rapporto barioni/fotoni sono inferiori alla realtà di **10 ordini di grandezza**.

La **violazione di CP** impegna la **fisica fondamentale** da più di **50 anni**.

- La scoperta è stata **precoc**e, favorita dalla piccola massa del kaone neutro K^0 (circa metà della massa di un protone).
- Tuttavia la comprensione più profonda ha richiesto lo studio della violazione di CP nei decadimenti di altri **mesoni neutri di massa più grande** (D^0 , B^0 , B_s^0), per i quali sono minori le correzioni della QCD.
- La produzione di queste particelle (il B^0 ha massa pari a circa 5 volte la massa del protone) ha richiesto un notevole **avanzamento nella tecnologia degli acceleratori**.
- Infine il meccanismo di violazione di CP oggi conosciuto, basato sul **Modello Standard** prevede una violazione di entità **troppo piccola per spiegare l'asimmetria cosmica**:
 - La **cosmologia** suggerisce che, oltre al Modello Standard, esista un'**altra sorgente di violazione di CP** .

Molti esperimenti di Fisica delle Alte Energie contribuiscono attualmente alla ricerca sulla **violazione** della simmetria **CP**:

- Gli esperimenti indirizzati a questo tipo di ricerca — come l'esperimento **LHCb** — com'è ovvio, contribuiscono maggiormente.





ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Domenico Galli

DIFA – Dipartimento di Fisica e Astronomia

`domenico.galli@unibo.it`

`https://www.unibo.it/sitoweb/domenico.galli`

