



FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI

# Simmetrie nella Fisica Fondamentale

Domenico Galli

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

Pesaro, Liceo Marconi, 2 maggio 2017



1. La Fisica
2. La Fisica Fondamentale
3. Le Simmetrie nella Fisica Fondamentale
4. L'Asimmetria Cosmica



# Fisica: Etimologia

- Deriva dal greco antico **φύσις, φύσεως** (traslitterato fisis, fiseos), che **letteralmente** significa **natura**.
  - La più antica ricorrenza del termine risale all'**Odissea** di Omero.
- È il titolo collettivo dei trattati di **filosofia naturale** di **Aristotele** (384-322 A.C.), in contrapposizione con la metafisica.
- L'applicazione del termine nel tempo si è **sempre più ristretta**:
  - Originariamente (Aristotele) includeva **tutta la natura** (**inorganica** e **organica**).
  - Il filosofo Locke (1632-1704) includeva nella fisica anche lo **spirito** (Dio, angeli, ecc.).
  - Nel corso del XVIII secolo si è limitata alla **natura inorganica** e da allora, **escludendo la chimica**, ha acquisito il presente significato.
- A partire dall'opera di **Galileo Galilei** (1564-1642), nel mondo occidentale, la Fisica diventa **scienza** (non più soltanto **filosofia**).



# Il Metodo Scientifico

- Nella storia del genere umano si è creduto a molte **idee assurde**.
- Poi si è trovato un **metodo efficace** per **selezionare le idee**:
  - **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).
- Il metodo si è raffinato ed è divenuto il **Metodo Scientifico**.

- **Circa 800** – **Geber** (*Abu Musa Jābir ibn Hayyān*, Persia) progetta Esperimenti Controllati.
- **1021** – **Alhacen** (*Abū ‘Alī al-Ḥasan ibn al-Ḥasan ibn al-Haytham*, Persia, Egitto): introduce il metodo sperimentale e combina osservazione, sperimentazione e argomentazione razionale nel suo *Libro di Ottica*.
- **1025** – **Alberonius** (*Abū al-Rayḥān Muḥammad ibn Aḥmad al-Bīrūnī*, Persia) sviluppa il metodo sperimentale per la mineralogia e la meccanica, e conduce elaborati esperimenti in relazione ai fenomeni astronomici.
- **1638** – **Galileo Galilei**, pubblica *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche*, intorno a due nuove scienze.



- Il metodo Scientifico **non è una semplice ricetta**:
  - Richiede **intelligenza** e **immaginazione, ragionamento** e **creatività**.
- Una **traccia pragmatica** del Metodo Scientifico è la seguente:
  1. **Caratterizzazione** del soggetto di indagine;
  2. Raccolta di informazioni (**osservazione**);
  3. Formulazione di una **ipotesi** esplicativa (**modello, teoria**); criterio del rasoio di Ockham (lex parsimoniae);
  4. **Deduzione di conseguenze** dell'ipotesi formulata **diverse dalle osservazioni iniziali** (la scienza deve **prevedere**, non soltanto spiegare a posteriori);
  5. **Progettazione di esperimenti** che possano verificare o smentire l'ipotesi formulata;
  6. **Esecuzione degli esperimenti** e raccolta di dati in maniera riproducibile;
  7. **Analisi** dei dati;
  8. **Interpretazione** dei dati ed elaborazione di una **conclusione** che serva come punto di partenza per nuove ipotesi;
  9. **Pubblicazione** dei risultati;
  10. **Ripetizione della verifica** (spesso eseguita da scienziati diversi).

- **Pseudo-scienza** è ogni teoria, metodologia, pratica che **afferma di essere scientifica** o **vuole apparire scientifica** e che tuttavia **non rispetta il metodo scientifico**.
- Il termine deriva dal greco antico  $\psiευδής, ψευδής$  (traslitterato pseudès, pseudés) che significa **falso** e dal latino **scientia, scientiae**, che significa **conoscenza**.
- Pseudo-scienza è qualsiasi disciplina che **in superficie appare essere scientifica** o che ha dei presupposti scientifici e che tuttavia **contravviene ai requisiti di verificabilità** richiesti dalla scienza o comunque devia sostanzialmente da altri fondamentali aspetti del metodo scientifico.
- Molte pseudo-scienze di **moda**:
  - Diffuse dal movimento **"new age"**;
  - **Divulgate in TV** in trasmissioni che vorrebbero essere scientifiche;
  - **Pervasive** sul **Web**.



# Esempi di Pseudo-Scienze

## Lista Non Esaustiva

- Ufologia,
- Astrologia,
- Percezioni extrasensoriali,
- Telepatia,
- Chiaroveggenza,
- Premonizione,
- Sedute spiritiche,
- Channeling,
- Parapsicologia,
- Agroglifi,
- Fenomeno delle voci elettroniche,
- Maledizione di Tutankhamon,
- Grafologia,
- Frenologia,
- Psicoanalisi,
- Levitazione,
- Chirurgia psichica,
- Psicocinesi,
- Il Triangolo delle Bermudas,
- Rabbdomanzia,
- Complotto sulle scie chimiche,
- Società della Terra Piatta,
- Millenarismo del 2012,
- Effetto della Luna Piena,
- Bioritmi,
- Chiropratica,
- Guarigione con i cristalli,
- Iridologia,
- Moto perpetuo,
- Automobili ad acqua,
- Nuova medicina germanica,
- Correlazione autismo-vaccini,
- Danni da onde e.m. di bassa frequenza,
- Previsioni dei terremoti, ecc.



- La scienza **non riconosce l'autorità**:
  - Un'affermazione **non** è ritenuta valida per il fatto di essere stata sostenuta da qualche autorità scientifica, intellettuale, politica, televisiva, ecc. (Argumentum ad Auctoritatem);
- La scienza **non è democratica**:
  - Un'affermazione **non** è ritenuta valida per il fatto di essere sostenuta dalla maggioranza delle persone (Argumentum ad Populum o Argumentum ad iudicium);
- Le **dispute scientifiche non si risolvono con il contraddittorio**:
  - Ma con la **sperimentazione**.
- **Non** si conoscono **applicazioni tecnologiche** delle **pseudo-scienze**:
  - Possiamo **apprezzare** o **non apprezzare** il **metodo scientifico**, come **principio**, ma **di fatto** è l'**unico metodo** che ha prodotto finora **sviluppo tecnologico**.

- Navigando sul **World Wide Web** mediante i **Motori di Ricerca**, si incorre **più** facilmente in informazioni **pseudo-scientifiche** che su informazioni **scientifiche**:
  - I **Motori di Ricerca** **non** distinguono la **qualità scientifica** del sito, **ma** soltanto la **popolarità**:
    - ▶ Esempio: vaccini;
    - ▶ I Motori di Ricerca sono ottimizzati per ricerche **commerciali**;
  - L'**informazione** che ne consegue è **viziata** dalla **fallacia** detta **Argumentum ad Populum** o **Argumentum ad iudicium**.
- Per cercare **informazioni scientifiche** sul Web, il docente consiglia di partire da **Wikipedia** in **inglese**:
  - Uno studio della prestigiosa rivista scientifica **Nature** mostra che la **frequenza di errori** è **molto bassa** e confrontabile con la prestigiosa **Encyclopædia Britannica**:
    - ▶ Si veda:
   
<http://www.nature.com/nature/journal/v438/n7070/full/438900a.html>



# Sistematica della Fisica

- La **fisica** studia il **mondo naturale inanimato** e tenta di **individuare le leggi matematiche** che lo governano.
- È consuetudine suddividere la fisica (intesa in senso lato) nelle seguenti discipline:
  - **Fisica sub-nucleare**;
  - Fisica nucleare;
  - Fisica atomica;
  - Chimica;
  - Fisica dei materiali / Fisica dello stato solido;
  - Fisica macroscopica;
  - Astronomia / Astrofisica / Cosmologia.





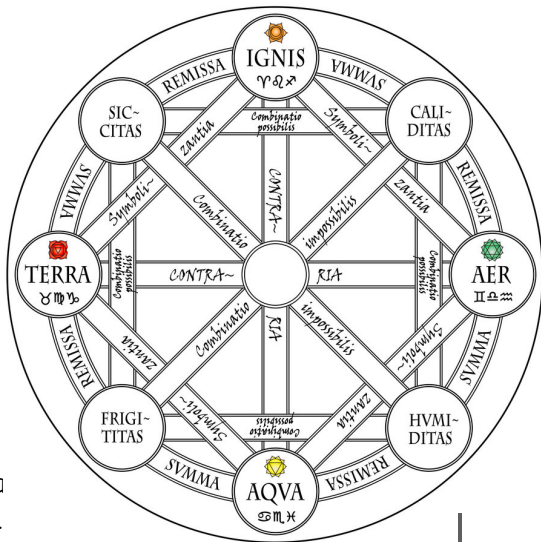
# La Fisica Fondamentale

- 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**, il loro moto nello spazio-tempo e le **forze fondamentali** della natura, che governano le interazioni tra di essi.

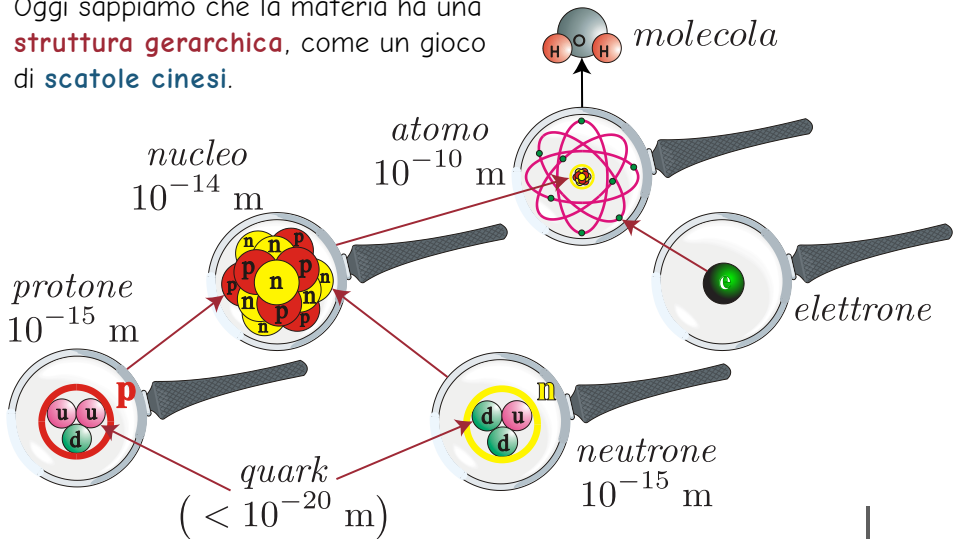
# I 4 Elementi nella Filosofia Greca

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

- 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 conferma scientifica.

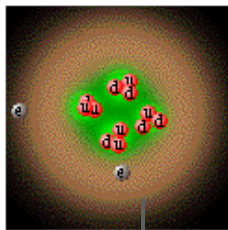


Oggi sappiamo che la materia ha una **struttura gerarchica**, come un gioco di scatole cinesi.



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**.





# Le Sostanze Chimiche (Molecole)

L'avanzamento nella conoscenza della fisica **atomica**, **nucleare** e **sub-nucleare** ha determinato una grande **semplificazione** del modello con cui interpretiamo il mondo fisico che ci circonda, animato e inanimato.

- La American Chemical Society ha classificato **71 milioni** di **sostanze (molecole)**:
  - Tale numero aumenta di **12000** nuove **sostanze/giorno**.





# Gli Elementi (Atomi)

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

Bosoni di Gauge (Forze)

1 e = 1.602 × 10<sup>-19</sup> C  
 1 MeV/c<sup>2</sup> = 1.783 × 10<sup>-30</sup> kg

# Le Antiparticelle

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

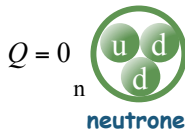
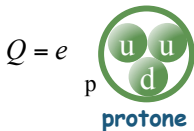
- Le antiparticelle sono **identiche** alle corrispondenti particelle in tutto **eccetto** che nella **carica elettrica** e nel **momento magnetico**, che sono **opposti**.
- Per esempio, la carica del protone è positiva e quella dell'antiprotone è negativa. Esse hanno la **stessa massa**.

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

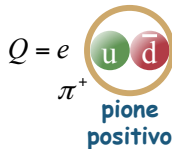
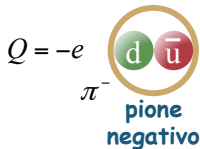
# Gli Adroni: Barioni e Mesoni

**Non si osservano mai i quark individualmente**, ma soltanto in combinazione di almeno due o tre.

- 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**.

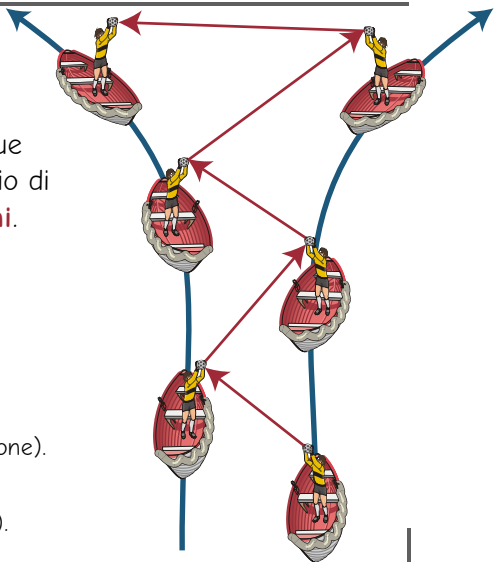
- Per esempio la **repulsione** tra due **elettroni** è attribuita allo scambio di particelle mediatrici, dette **fotoni**.



Particella interagente (p. es., elettrone).



Particella mediatrice (p. es., fotone).



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

	<p>Gravitazione</p>	<p>Debole</p>	<p>Elettromagnetismo</p>	<p>Forte</p>
Particella scambiata	Gravitone G	Bosoni vettoriali intermedi $W^+, W^-, Z^0$	Fotone $\gamma$	Gluoni g
Raggio d'azione	$\infty$	$10^{-16}$ cm	$\infty$	$10^{-13}$ cm
Intensità a piccola distanza ( $10^{-13}$ cm)	$10^{-38}$	$10^{-13}$	$10^{-2}$	1



# I Nomi delle Particelle

## Elettrone, Protone, Neutrone

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”.



# I Nomi delle Particelle (II)

## 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, moulty 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).**

# Simmetria (Regolarità) in Natura



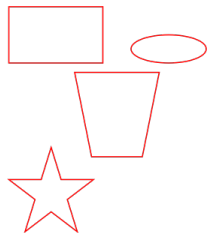
Monte Cervino o Matterhorn  
(Italia-Svizzera)



Monte Fuji  
(Giappone)



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



Regolarità nelle forme

Concetto



Realizzazione

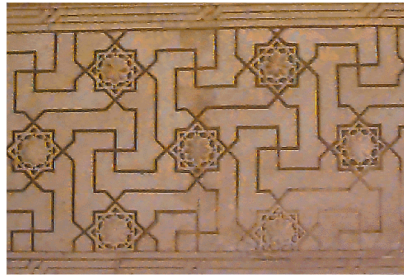


# Simmetria nell'Arte (II)

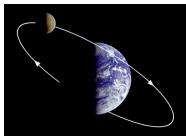




# Simmetria nell'Arte (III)



# Simmetria (Regolarità) nelle Leggi della Fisica

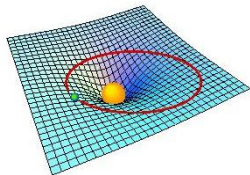
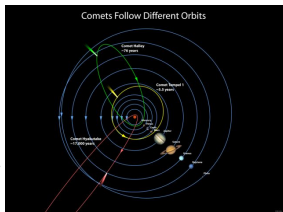


osservazione

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

generalizzazione  
e formulazione  
della legge fisica

predizione di  
fenomeni



estrazione di  
concetti più  
astratti





# Troppa Simmetria è Innaturale



Volto naturale



Volto "simmetrizzato"



# Una Certa Asimmetria Rende le Figure più Dinamiche



# Una Certa Asimmetria Rende le Figure più “Belle”



Simmetrie nella Fisica Fondamentale  
Fisica Fondamentale



Simmetrie

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
Asimmetria Cosmica

traslazione



trasformazione  
continua

rotazione



trasformazione  
continua

riflessione  
(parità)



trasformazione  
discreta



# Perché i Fisici si Interessano delle Simmetrie?

Esiste un legame tra **quantità non definibili, invarianza della fisica per trasformazioni di simmetria e principi di conservazione.**



Emmy Amalie  
Nöther,  
1882-1935

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 angolare



# Perché i Fisici si Interessano delle Simmetrie? (II)

Lo stesso vale 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  $\chiείρ$ ,  $\chiείρός$ , 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.



# Violazione della Simmetria $\mathcal{P}$ nel Mondo Macroscopico

Mondo reale



90%



10%

Mondo allo specchio



10%



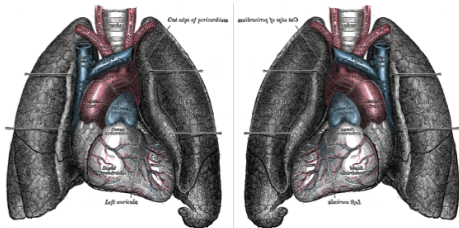
90%

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



# Violazione della Simmetria $\mathcal{P}$ nel Corpo Umano

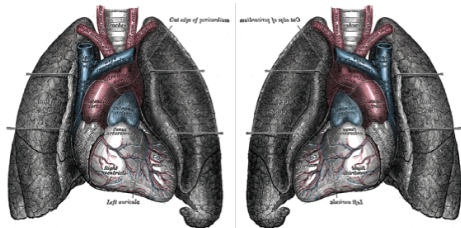
Mondo reale



99.999%  
cuore a sx

0.001%  
cuore a dx

Mondo allo specchio



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

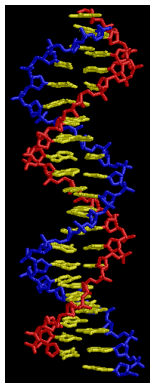


100%



0%

Mondo allo specchio



0%



100%

Mondo reale  $\neq$  Mondo allo specchio

**Parità totalmente violata**



# Violazione della Simmetria $\mathcal{P}$ e Chiralità Assoluta

- 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.

# Violazione della Simmetria $\mathcal{P}$ nella Fisica Microscopica

- 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  $\beta$  del  $^{60}\text{Co}$ .



Tsung-Dao Lee (1926-)



Chen Ning Yang (1922-)



Chien-Shiung Wu (1912-1997)

# Violazione della Simmetria $\mathcal{P}$ nella Fisica Microscopica (II)

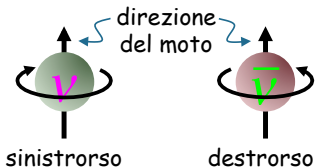
Nel **1958** fu determinata sperimentalmente (M. Goldhaber) l'elicità del **neutrino**:

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

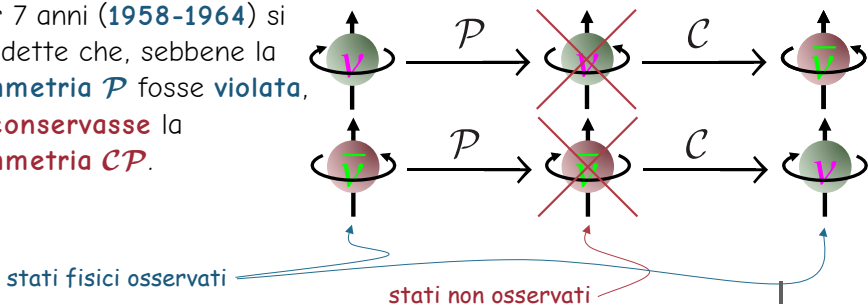


Maurice Goldhaber (1911-)

neutrino      anti-neutrino



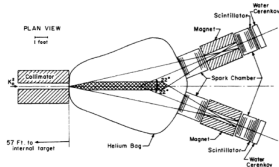
- In alcuni decadimenti di particelle (mediati dalle **interazioni nucleari deboli**) si osserva **violazione di  $\mathcal{P}$** .
- Tuttavia, se, **oltre** a guardare tali processi allo **specchio**, si **scambiano** anche le **cariche positive** con quelle **negative** (simmetria  $\mathcal{C}$ ,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



# Violazione della Simmetria $CP$ e Conservazione della Simmetria $CPT$

- 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)

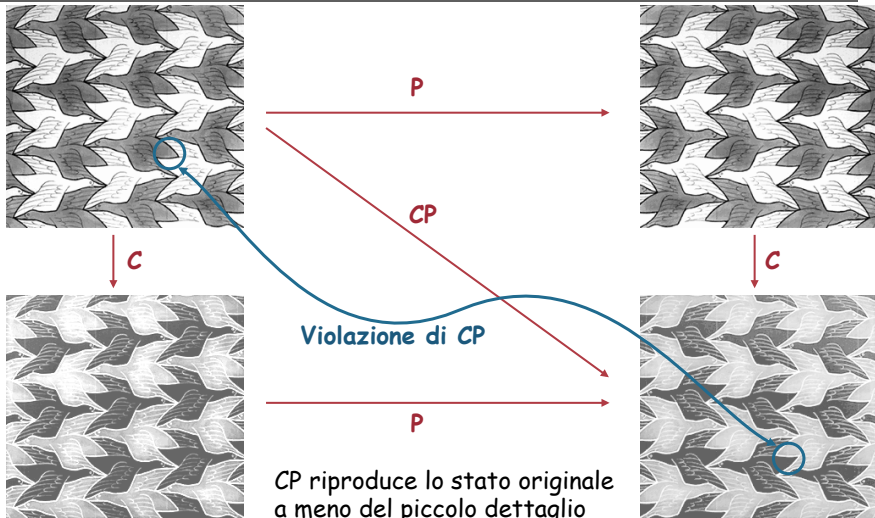
- **Oggi** si ritiene, su basi teoriche (teorema  $CPT$ ) e sperimentali, che sia **sempre conservata la simmetria  $CPT$** .
  - Un **film proiettato a rovescio**, visto attraverso uno **specchio** e con le **cariche scambiate**, rappresenta ancora una **realtà plausibile**.
  - Se  $CP$  è violata,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



Val Logsdon Fitch  
(1923–2015)



# Una Metafora



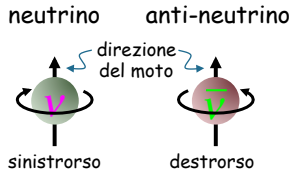
CP riproduce lo stato originale a meno del piccolo dettaglio della coda.

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

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

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  $\mathcal{CP}$ :

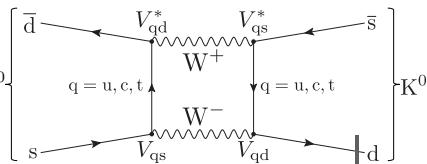
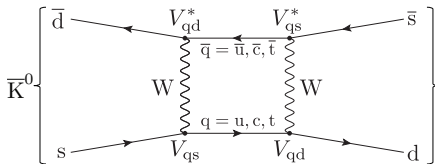
$$\frac{\text{rateo}(\text{K}_L \rightarrow e^+ \pi^- \nu_e)}{\text{rateo}(\text{K}_L \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu}_e)} = 1.00648 \pm 0.00035$$

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**”.

# La Freccia Assoluta del Tempo

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:

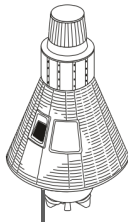
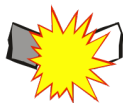
$$\frac{\text{rateo}(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) - \text{rateo}(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)}{\text{rateo}(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) + \text{rateo}(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)} = 6.6 \times 10^{-3}$$

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”.

# La Stretta di Mano a un “Extraterrestre”

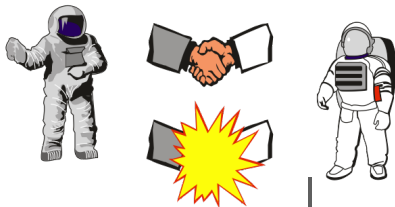
- Prima di **stringere la mano** a un “extraterrestre” occorre accertarsi che esso sia composto di materia:
  - Se malauguratamente egli fosse composto di **antimateria** la stretta di mano sarebbe mortale e porterebbe alla **mutua annichilazione**.
- Come ci si può accertare che egli sia composto di 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  $\mathcal{CP}$ , 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

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**.
- Recentemente è stata scoperta una "**fontana**" di **positroni** espulsi da qualche oggetto in prossimità del **centro della nostra galassia**, presumibilmente un buco nero.



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):

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

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

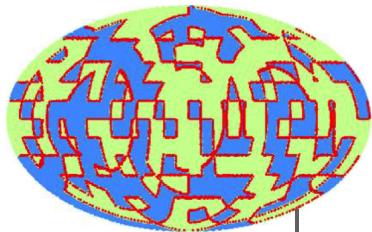
$$\frac{N_{\bar{N}}}{N_N} < 2.9 \times 10^{-5}, \quad 2 \leq Z \leq 6$$

Esperimento AMS (Alpha Magnetic Spectrometer), livello di confidenza: 95%. Osservati  $2.86 \times 10^6$  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**  $\approx 1 \text{ Gpc}$  ( $1 \text{ pc} = 3.08 \times 10^{16} \text{ m} = 3.26 \text{ a.l.}$ ).

# Ammassi Isolati di Antimateria?

- 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**.

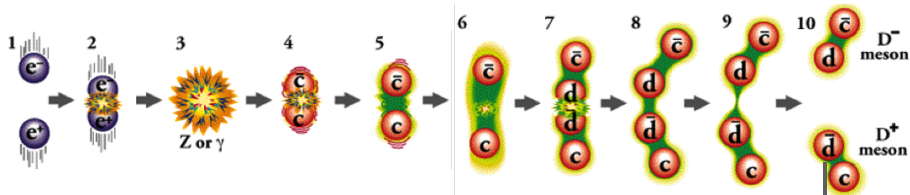


# Perché ci Stupiamo che NON ci Sia Antimateria nell'Universo?

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**.

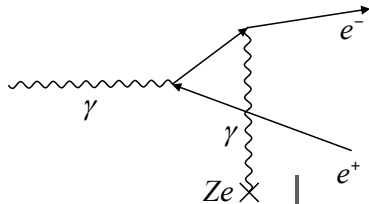
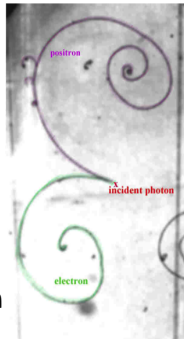
Dobbiamo perciò spiegare **come è scomparsa l'antimateria**.



# Come si Produce l'Antimateria in Laboratorio: Positroni

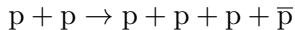
Fotografie di produzioni di coppie  $e^+e^-$  in camera a bolle.

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



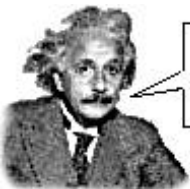
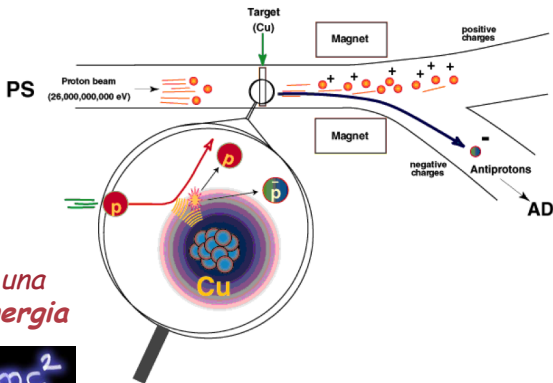
# Come si Produce l'Antimateria in Laboratorio: Antiprotoni

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*

$$E=mc^2$$

# Conservazione della Carica Elettrica e dell'Energia nella Creazione

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

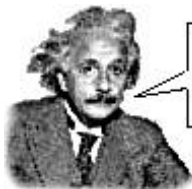
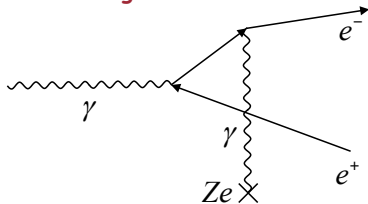
- Si possono creare **elettrone + positrone** (carica totale  $-e + e = 0$ ):
  - Ma **non** un elettrone da solo o un positrone da solo.

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*

$$E=mc^2$$

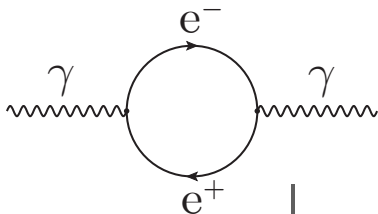
Una coppia elettrone-positrone può **crearsi** per un certo **intervallo di tempo  $\Delta t$**  e poi **annichilirsi**.

- 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**:

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

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

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

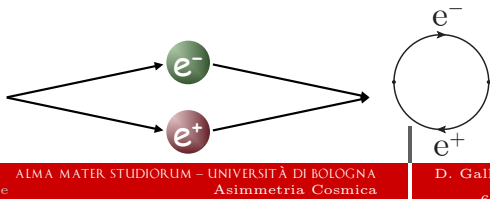


Coppie particella-antiparticella possono **spontaneamente apparire dal vuoto** e **svanire** (creandosi e annichilendosi) a **condizione** che esse **sopravvivano** per un **intervallo di tempo limitato**.

- 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**.







# Dalle Coppie Virtuali alle Coppie Reali

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:**

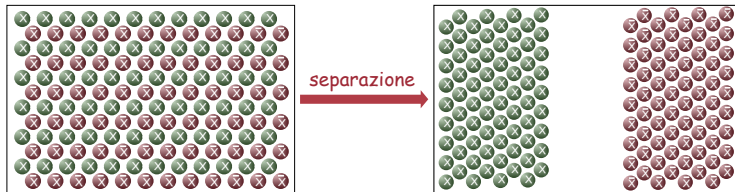
- Non è rimasto **nulla** perché materia e antimateria si sono **annichilate** a vicenda producendo energia.



- **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 certa 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**:

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

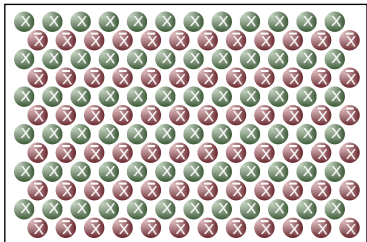
sia in **un anti-quark e un leptone**:

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

- 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 (V)

(percentuali di fantasia, per fissare le idee)



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

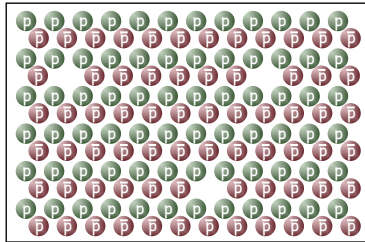
$$X \xrightarrow{45\%} q\bar{l}$$

asimmetria



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

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



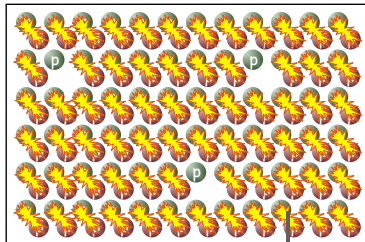
72 p, 69  $\bar{p}$



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.



Andrei Dmitrievich  
Sakharov  
(1921–1989)



La **violazione di  $\mathcal{CP}$**  impegna la **fisica fondamentale** da circa **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  $\mathcal{CP}$  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  $\mathcal{CP}$  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  $\mathcal{CP}$** .



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

# Domenico Galli

## Dipartimento di Fisica e Astronomia

`domenico.galli@unibo.it`

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

`https://wiki-lhcb.bo.infn.it/bin/view/GalliDidattica`

