

Le simmetrie nelle Leggi della Fisica

Un pezzo "meno facile"

L'osservazione sperimentale delle interazioni fondamentali ha portato a concludere che le equazioni della Fisica alla scala subnucleare si possono semplificare notevolmente grazie al concetto di simmetria, un concetto che in natura ricorre molto spesso e che l'uomo ha emulato in una miriade di esempi, spaziando anche dall'arte all'architettura. Secondo Richard P. Feynman *"un oggetto è simmetrico se gli posso fare qualcosa senza cambiarlo"* e, con un approccio leggero e rigoroso al tempo stesso, proveremo a ripercorrere i punti salienti di una delle più famose lezioni che il grande fisico americano tenne al Caltech. I contenuti verranno contestualizzati nel particolare momento storico di quella lezione (risalente al 1962), allorché si stavano comprendendo sempre meglio le proprietà fondamentali di un crescente numero di particelle elementari, ancor prima che il Modello Standard venisse teorizzato, mentre una dopo l'altra stavano venendo meno alcune certezze sull'inviolabilità delle simmetrie discrete in natura, capisaldi fino a pochi anni prima ritenuti validi in ogni sistema fisico.



Andrea Ventura – Lecce, 5 settembre 2023

Le Simmetrie nelle Leggi della Fisica

DAI «SEI PEZZI MENO FACILI»
DI RICHARD P. FEYNMAN (1962)

Edito da ADELPHI – Febbraio 2005
Tradotto da G. Rigamonti

RICHARD P. FEYNMAN (1918-1988)

PREMIO NOBEL 1965

Quando un oggetto è **simmetrico**?

Per Feynman: «un oggetto è **simmetrico** se gli posso fare qualcosa senza cambiarlo».

Matematicamente: la figura resta invariata sotto isometria.

- traslazione
- rotazione
- simmetria assiale (riflessione)
- o una loro combinazione (e.g. glisoriflessione)



UN PEZZO «MENO FACILE»

Un approccio un po' insolito allo studio della Fisica:
Le *Lectures on Physics* tenute da Richard P. Feynman
al Caltech tra il 1961 e il 1963.

Una delle più celebri è la n. 52 del I anno:
«**Symmetry in Physical Laws**»

https://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_52.html

Dopo una selezione di «Sei pezzi facili», nel 2005
furono individuato e pubblicati in Italia da Adelphi i
«Sei pezzi meno facili».

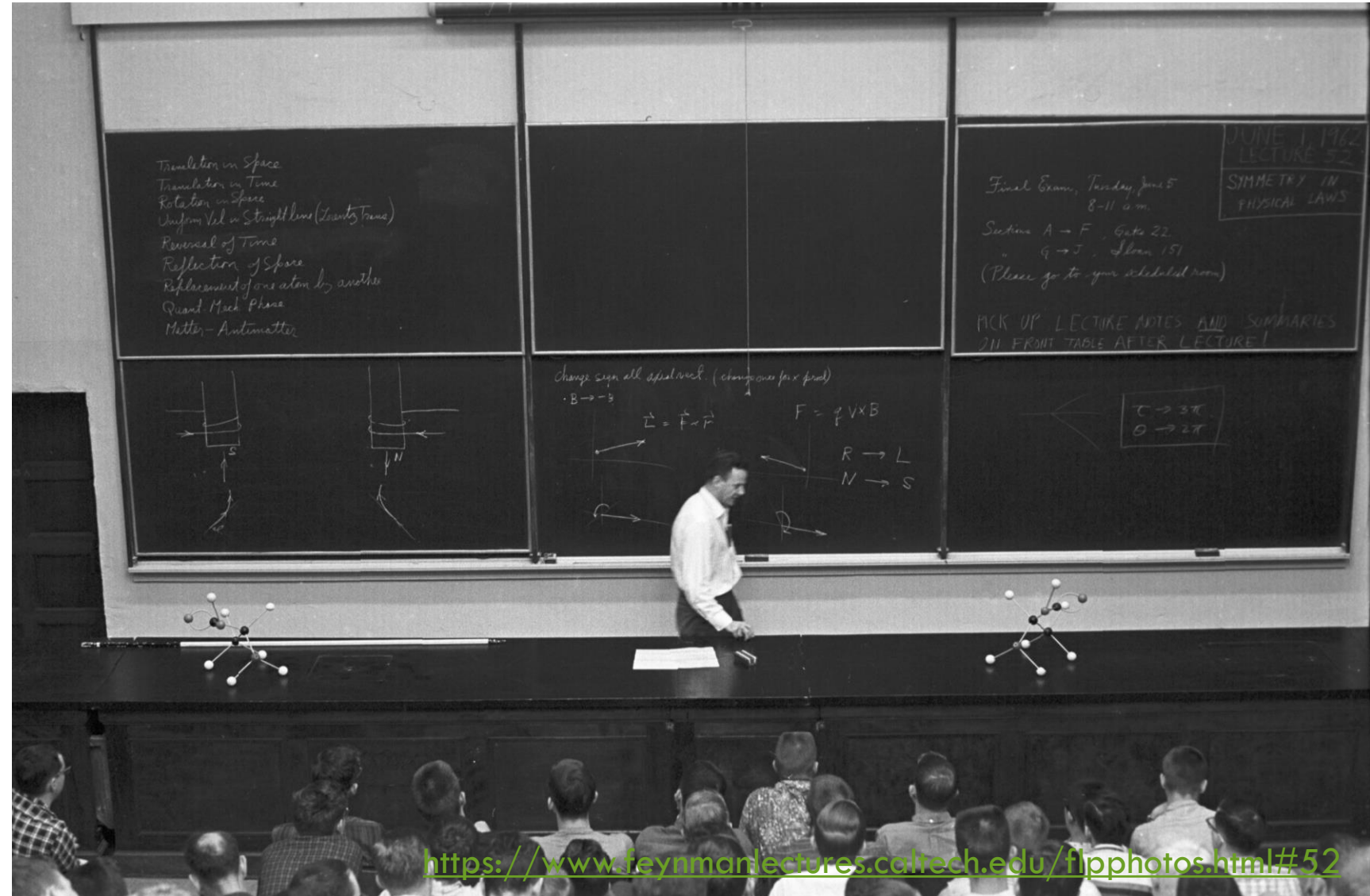


LE LEZIONI DI FISICA DI FEYNMAN AL CALTECH

June 1, 1962
Lecture 52

Symmetry in Physical Laws

- 1 Symmetry operations
- 2 Symmetry in space and time
- 3 Symmetry and conservation laws
- 4 Mirror reflections
- 5 Polar and axial vectors
- 6 Which hand is right?
- 7 Parity is not conserved!
- 8 Antimatter
- 9 Broken symmetries



OPERAZIONI DI SIMMETRIA

- Traslazione nello spazio
- Traslazione nel tempo
- Rotazione nello spazio
- Trasformazione di Lorentz
- Inversione temporale
(Time reversal **T**)
- Riflessione spaziale
(Parità **P**)
- Scambio di particelle
identiche
- Fase quantomeccanica
- Materia-antimateria
(Coniugazione di carica **C**)

Translation in Space

Translation in Time

Rotation in Space

Uniform Vel in Straight line (Lorentz Trans.)

Reversal of Time

Reflection of Space

Replacement of one atom by another

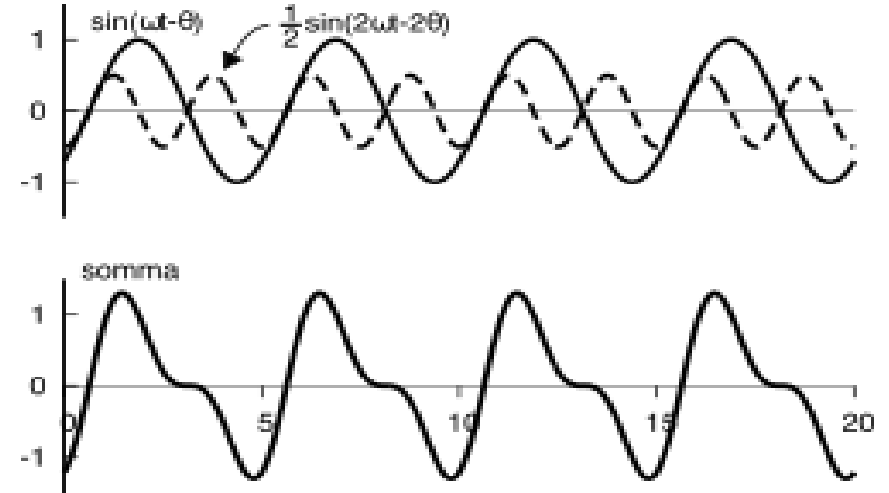
Quant. Mech. Phase

Matter - Antimatter

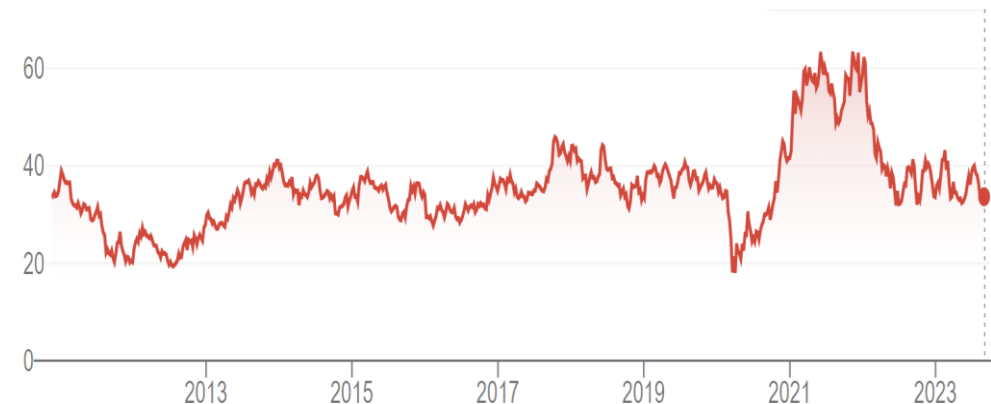
TRASLAZIONI SPAZIO-TEMPORALI

Se facciamo un esperimento in un certo luogo, e poi costruiamo una seconda apparecchiatura in un altro posto [...], qualunque cosa sia accaduta nella prima apparecchiatura si ripeterà identicamente, nel medesimo ordine temporale, nella seconda se avremo ricreato le stesse condizioni, con la dovuta attenzione [...] che vengano rimossi tutti quei fattori ambientali che impediscono un uguale funzionamento.

Oggi si pensa, analogamente, che neppure uno spostamento temporale influisca sulle leggi fisiche. [...] Questa simmetria significa, ovviamente, che l'aver acquistato azioni della General Motors tre mesi fa o acquistarle oggi non fa alcuna differenza!



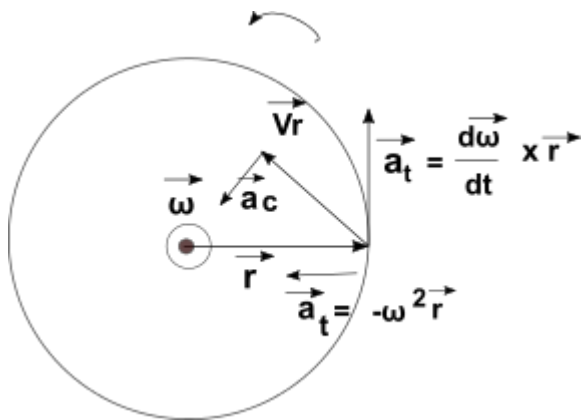
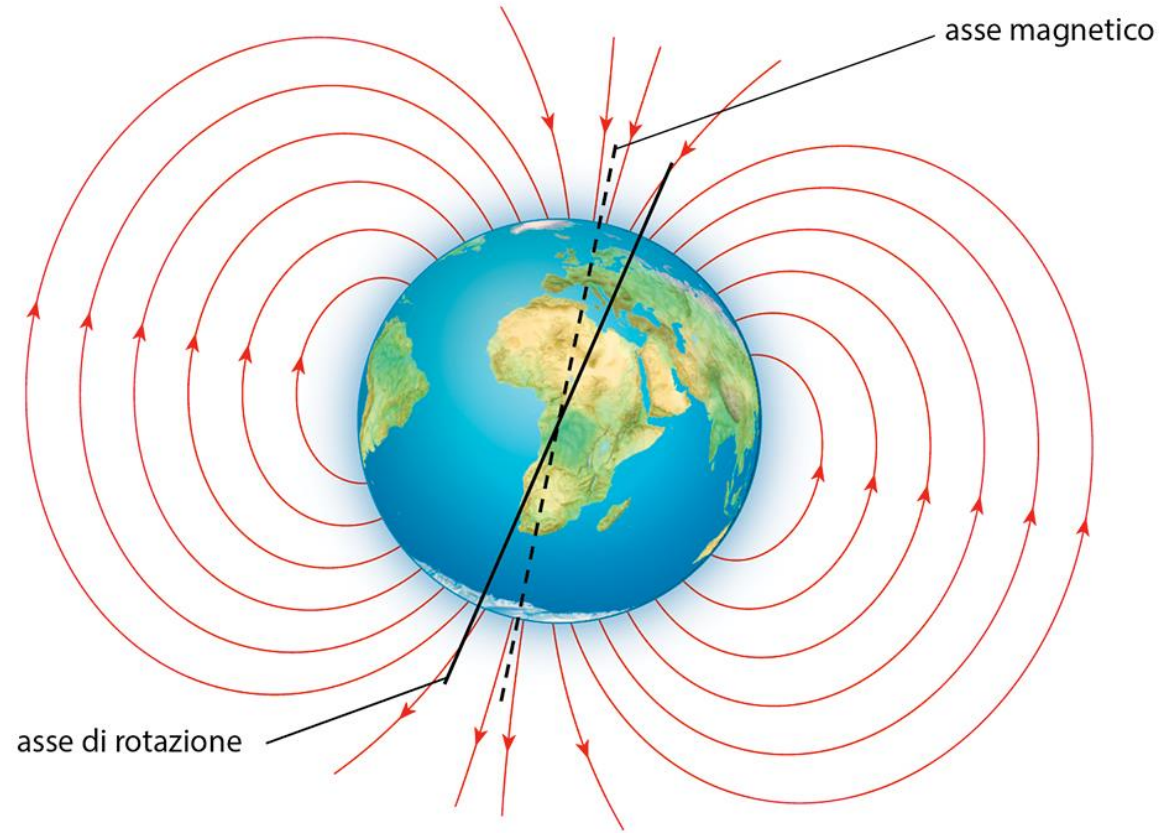
Dipendenza dal tempo di alcuni segnali



Andamento delle azioni General Motors dal 2011

ROTAZIONI NELLO SPAZIO

Dobbiamo fare attenzione anche alle differenze geografiche, perché le caratteristiche della superficie terrestre possono variare. Così, per esempio, se misuriamo il campo magnetico in una certa regione e poi spostiamo la nostra apparecchiatura in qualche altra regione, non è detto che dia lo stesso risultato, perché magari il campo è diverso [...], spostando **solidalmente** la Terra con l'apparecchiatura, il risultato resterebbe invariato.



$$\vec{a}_a = \vec{a}_r + \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{r} + 2\vec{\omega} \times \vec{v}_r - \omega^2 \vec{r}$$

UN VELOCE RICHIAMO: TEOREMA DI NOETHER

Teorema di Simmetria

Dato un sistema fisico con più gradi di libertà, se la sua Lagrangiana rimane invariata per determinate funzioni, allora la trasformazione continua operata è simmetrica e si conserveranno alcune quantità, costanti del moto.

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = 0 \quad \Rightarrow \quad p \equiv \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} = \text{const}$$

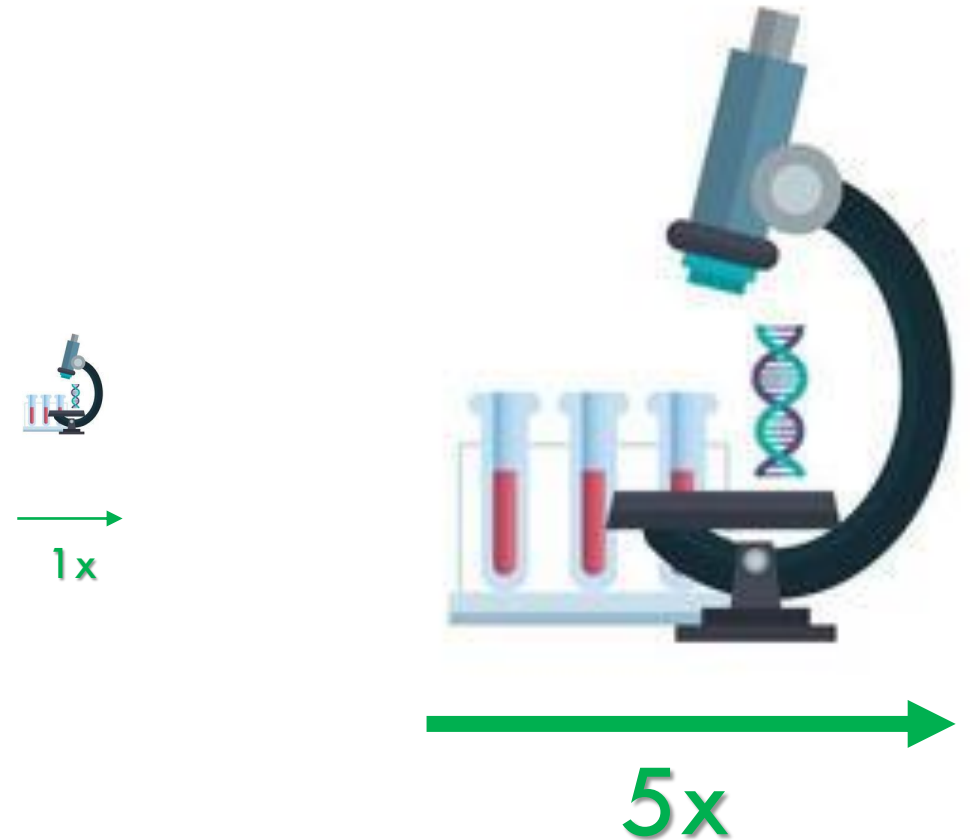


Emmy Noether (1882-1935)

Trasformazione	Traslazione nello spazio	Traslazione nel tempo	Rotazione nello spazio
Costante del moto	Quantità di moto	Energia	Momento angolare

CAMBIAMENTI DI SCALA

"Le leggi fisiche sono invarianti rispetto a un cambiamento di scala?" Supponiamo di costruire una certa apparecchiatura e poi di costruirne un'altra che sia, in ogni sua parte, cinque volte più grande: funzioneranno esattamente allo stesso modo? In questo caso la risposta è *no!* Per esempio la lunghezza d'onda della luce emessa da un gas di sodio chiuso in un certo contenitore non è cinque volte minore di quella della luce emessa da un volume di gas di sodio cinque volte maggiore: è esattamente uguale. Di conseguenza il rapporto fra la lunghezza d'onda e le dimensioni dell'emittente cambia.

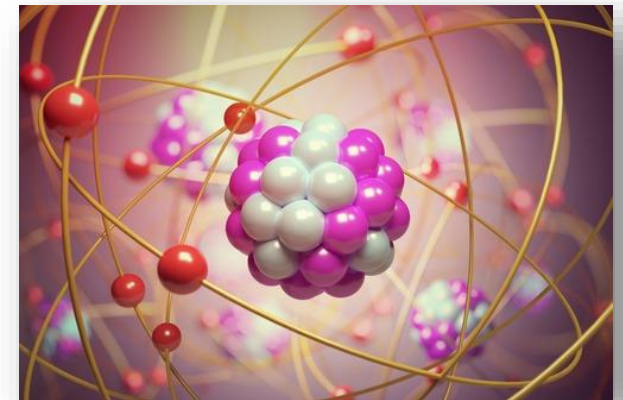


La natura, come sappiamo, si basa su una struttura (sub-)atomica, la cui scala non è arbitraria, ma assolutamente ben definita!

INVERSIONE TEMPORALE

"Apparentemente le leggi fisiche non possono essere reversibili nel tempo [...] Questa irreversibilità è dovuta al numero molto elevato di particelle coinvolte; se potessimo vedere le singole molecole non riusciremmo a capire in quale direzione si muove il meccanismo nel suo complesso. [...] Se giriamo un film sufficientemente dettagliato di tutti i meccanismi interni di un pezzo di materia e poi lo proiettiamo all'incontrario, nessun fisico sarà in grado di dire: "È contro le leggi della fisica, c'è qualcosa di sbagliato!" [...]

Vediamo l'uovo che casca sul marciapiede, il guscio che si spacca, e così via, e di sicuro diremo: "è un evento irreversibile, perché se proiettassimo il film all'indietro l'uovo si rimetterebbe insieme e il guscio tornerebbe intero – un'idea ridicola, ovviamente!". Ma se guardiamo ai singoli atomi, le leggi ci appaiono completamente reversibili.



RIFLESSIONI SPECULARI

Le leggi fisiche sono invarianti rispetto alla riflessione? Mettiamola così: immaginiamo di costruire un congegno – per esempio un orologio – con un sacco di ingranaggi, quadranti e lancette; fa tic-tac, funziona, e ha dentro delle molle. Ora guardiamolo allo specchio [...] Supponiamo di costruire un altro orologio, che riproduca esattamente l'immagine riflessa del primo [...] ogni molla si avvolgerà in un senso in un orologio e nel senso opposto nell'altro.

E adesso la domanda: se i due orologi vengono fatti partire nelle stesse condizioni, con identica tensione delle molle, da quell'istante in poi continueranno a compiere movimenti esattamente speculari? Questo è un problema di fisica, non di filosofia; e la nostra conoscenza intuitiva delle leggi della fisica ci suggerisce di sì.



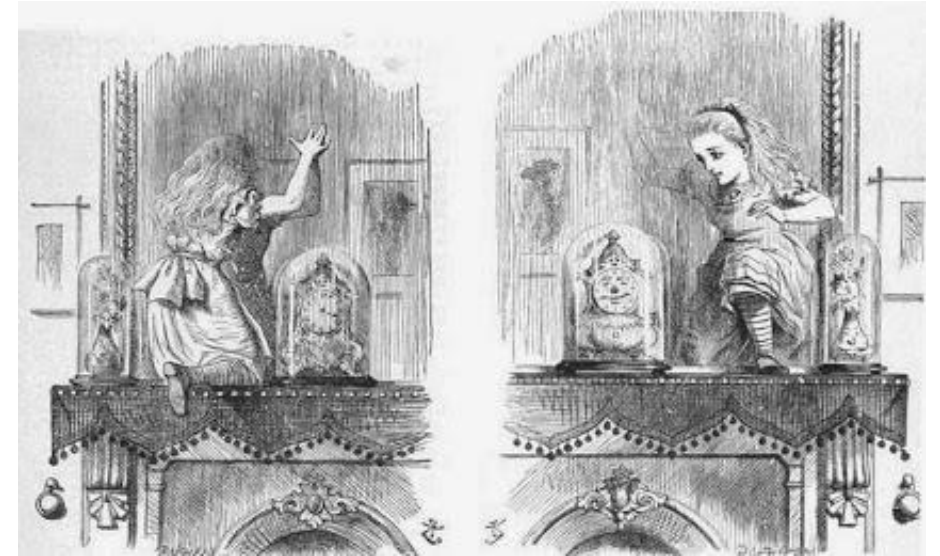
Doppio orologio con specchio
(Palazzo di Schonbrunn, Vienna)

DESTRA E SINISTRA...

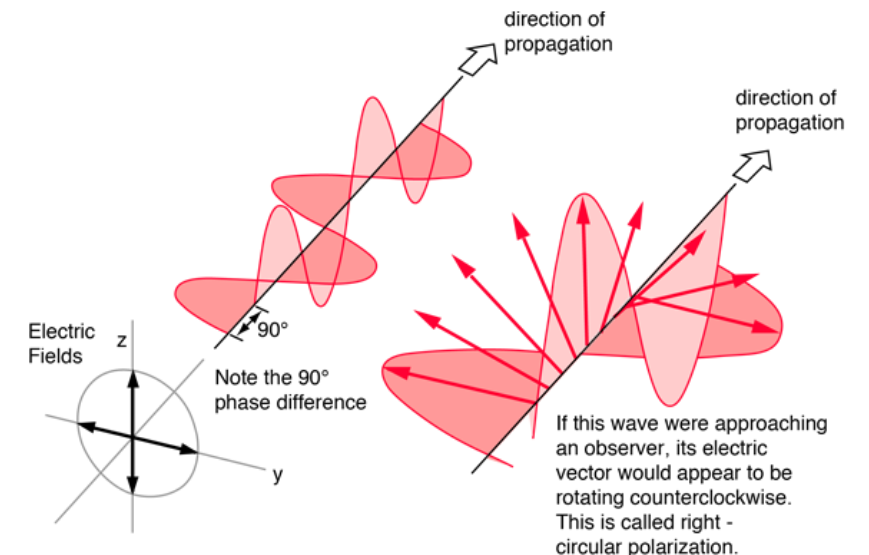
Chiaramente, l'idea di uno scambio destra-sinistra di tutte le cose non appare impossibile, non sembra essere contro le leggi fisiche.



C'è un modo molto semplice di distinguere la destra dalla sinistra: andare in un negozio di ferramenta e scegliere una vite a caso. È molto probabile che abbia una filettatura destra [...] Però dipende dalla storia, dalle convenzioni, o da come vanno le cose, e ancora una volta non sono in giuoco leggi fondamentali. [...] Così dobbiamo cercare di scoprire fenomeni in cui il carattere «destrorso» sia presente a livello fondamentale.

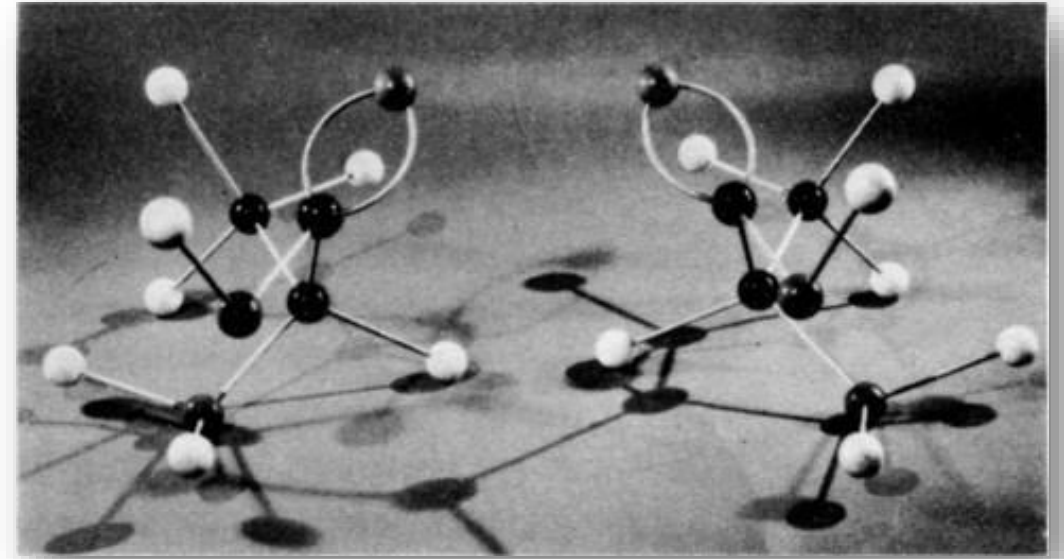


Alice attraversa lo specchio (J. Tenniel) ispirato al romanzo di L. Carroll (1871)



L-ALANINA E D-ALANINA

Le proteine sono costituite da catene di aminoacidi. L'aminoacido è l'alanina e la sua struttura molecolare, se la proteina è prodotta da un essere vivente, è come nella parte (a) della figura. Ma se cerchiamo di sintetizzare l'alanina a partire da anidride carbonica, etano e ammoniaca (e lo *sappiamo* fare, non è una cosa complicata), scopriamo che nel processo vengono prodotte uguali quantità di questa molecola e dell'altra che si vede nella parte (b). La prima molecola si chiama *L-alanina* ed è una molecola «sinistrorsa» (levogira); l'altra, chimicamente uguale [...], si chiama *D-alanina* ed è una molecola «destrorsa» (destrogira).



L-alanina (a)

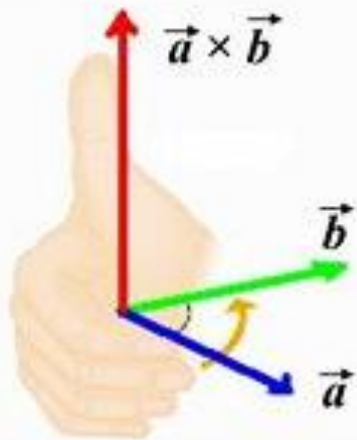
D-alanina (b)

Sembrerebbe dunque che i fenomeni della vita ci permettano di distinguere la «destra» dalla «sinistra» [...] nella vita tutto è a senso unico! [...] Nulla vieterebbe in linea di principio di creare, ad esempio, una rana nella quale ogni molecola sia ribaltata e tutto sia tale e quale l'immagine speculare, «sinistrorsa», di una rana reale – una rana sinistrorsa. Per un po' questo animale funzionerebbe benissimo, ma non troverebbe di che nutrirsi perché se pure inghiottisse una mosca, i suoi enzimi non sarebbero fatti per digerirla.

VETTORI POLARI E VETTORI ASSIALI

Esempio: la forza di Lorentz $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$

In realtà, se facciamo un passo indietro e ci interroghiamo sull'origine dei vettori, ci accorgiamo che la regola della mano destra non era niente più di una convenzione, un trucco.

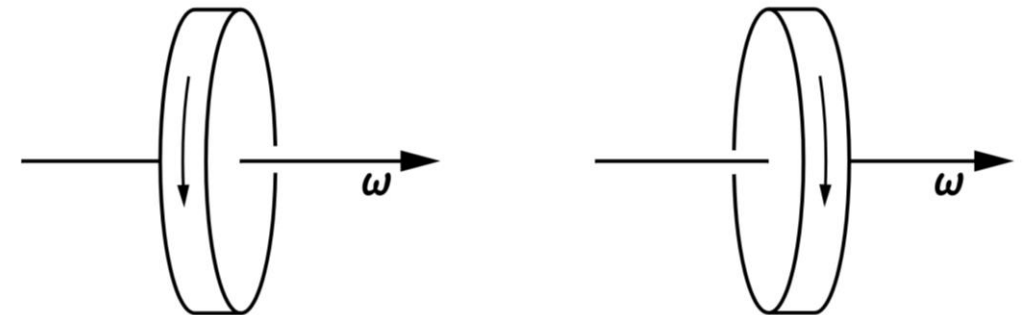


Così [...] se un diavoletto s'intrufolasse in tutti i laboratori di fisica e sostituisse ovunque «destra» con «sinistra» in tutti i libri che contengono regole «della mano destra», e noi di conseguenza usassimo solo le regole «della mano sinistra», nelle leggi fisiche non cambierebbe nulla.



Uno spostamento nello spazio e la sua immagine speculare

Vettori polari: quando lo spazio si rovescia, la freccia del vettore cambia direzione.

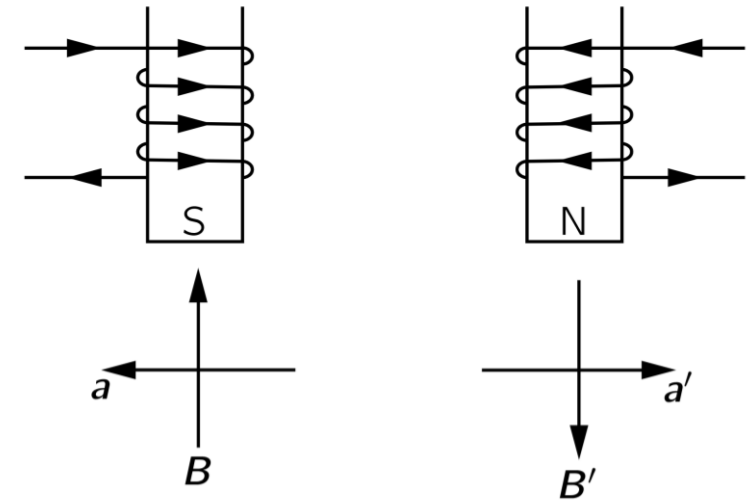


Un disco rotante e la sua immagine speculare

Vettori assiali: se viene vista «nello specchio», la freccia del vettore non si inverte.

VETTORI POLARI E VETTORI ASSIALI

Nel caso della forza di Lorentz, \vec{F} e \vec{v} sono **vettori polari**. Passando dalla regola della mano destra a quella della mano sinistra, il cambiamento di segno della forza deve essere compensato dal fatto che \vec{B} è un **vettore assiale**: passando da un sistema destrorso a uno sinistrorso, i poli magnetici nord e sud vanno invertiti tra loro.



Un magnete e la sua immagine speculare

In un caso abbiamo un polo magnetico sud, nell'altro la corrente va nel senso opposto e il campo magnetico è rovesciato, cioè abbiamo un polo magnetico nord. Come si vede, quando facciamo un'inversione da sinistra a destra dobbiamo cambiare il sud in nord!

Immaginiamo ora di aver un elettrone in un campo magnetico che si muova verso la pagina. Se usiamo la formula della forza (ricordiamo che la carica è negativa), troviamo che l'elettrone devierà nella direzione indicata [a], conformemente alla legge fisica. Il fenomeno reale, quindi, è che c'è una bobina con una corrente che va in un verso ben determinato e l'elettrone devia in un certo modo. [...] Ora rifacciamo l'esperimento allo specchio [...] la forza si rovescia. E va benissimo così, perché i *moti* corrispondenti sono immagini speculari di quelli iniziali!



$$q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$q < 0$$

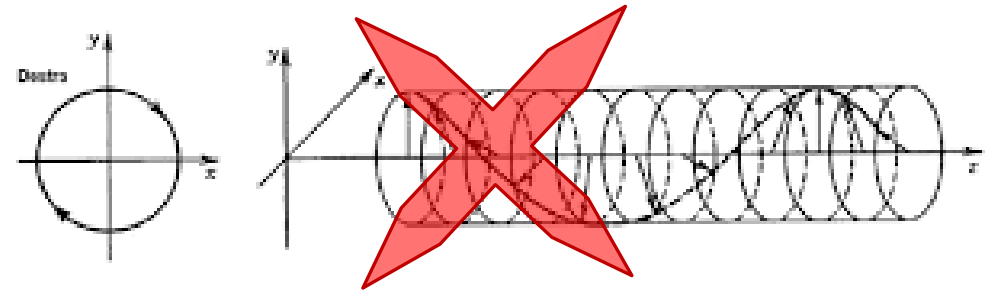
QUAL È LA MANO DESTRA?

Nello studio di un qualsiasi fenomeno vi sono sempre due regole della mano destra (o comunque un numero pari), per cui alla fine il fenomeno appare invariabilmente simmetrico.

Per illustrare il problema in modo ancora più chiaro, immaginerò di parlare per telefono con un marziano, o comunque con qualcuno che stia molto lontano. Non posso spedirgli, e quindi fargli esaminare, niente di fisicamente reale.

[...] se gli potessi inviare per esempio un fascio di luce gliela manderei polarizzata circolarmente a destra e gli direi: «Questa è la luce destrorsa, basta guardare da che parte gira». Ma non gli posso dare niente; posso solo parlargli.

[...], per esempio non posso dirgli: «Guarda l'Orsa Maggiore e osserva come sono disposte quelle stelle. Per “destra” intendo...». Gli posso solo parlare per telefono.



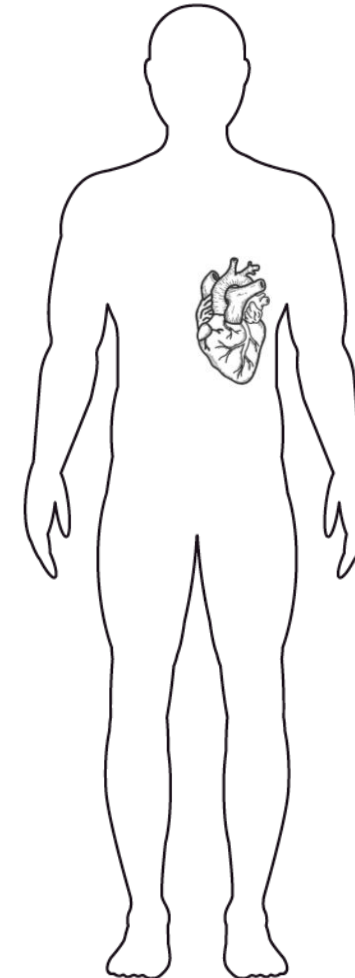
QUAL È LA MANO DESTRA?

E adesso provo a parlargli di noi.

Ovviamente per prima cosa definisco i numeri, «Tic tic, *due*; tic tic tic, *tre*», così a poco a poco arriverà a capire un po' di parole e poi andremo avanti. E dopo un po' magari diventeremo molto amici [...]

Così definisco le dimensioni del corpo, e gli spiego qual è la sua forma generale – che ha diramazioni con cinque sporgenze alle estremità, e così via – e lui mi segue, e alla fine descrivo il nostro aspetto esteriore, [...] lui si fa addirittura un modellino, mi dice: «Di sicuro siete bei tipi, ma dentro cosa c'è?».

E io comincio a descrivere gli organi interni finché arrivo al cuore, gli spiego bene che forma ha e gli dico: «Mettilo a sinistra». E lui fa: «Mmm... a sinistra?». Ora il problema è spiegargli da che parte sta il cuore senza che lui veda niente di quello che vedo io; e nessuno potrà mai spiegargli un campione di quello che noi intendiamo per «destra», un oggetto destro standard.

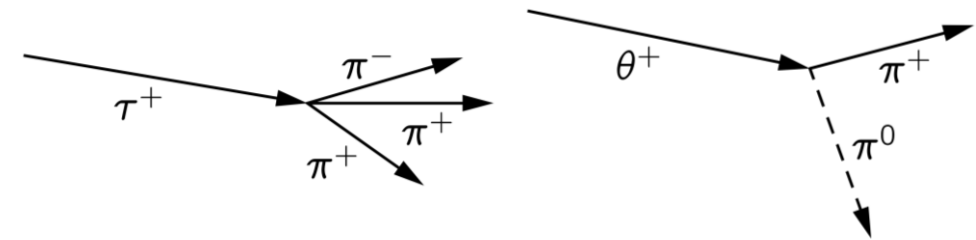
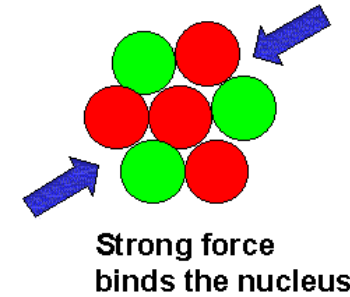
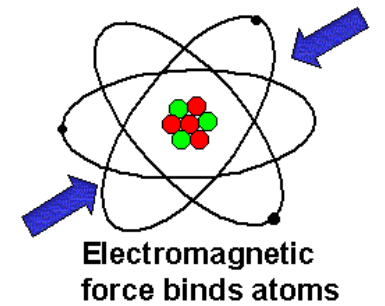
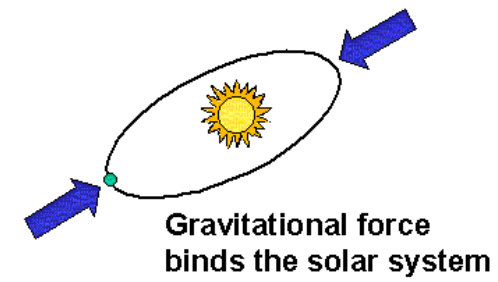


LA PARITÀ NON SI CONSERVA!

Si scopre che le leggi della gravitazione, dell'elettricità e del magnetismo, come pure le forze nucleari soddisfano tutte il principio di simmetria rispetto alla **riflessione**. [P]

[...] c'è un fenomeno chiamato *decadimento beta*, o *decadimento debole* [...] una particella scoperta nel 1954 o giù di lì [...] dotata di carica elettrica [τ^+] che decadeva in tre mesoni π , ma [...] anche un'altra particella [θ^+] che decade in *due* mesoni π uno dei quali, per la conservazione della carica, deve essere neutro.

[...] Si scoprì che la τ e la θ hanno massa quasi uguale [...] che impiegavano quasi esattamente lo stesso tempo per decadere [...] circa un 14% di particelle τ e un 86% di particelle θ . Basta un minimo di lucidità mentale per capire che si tratta della stessa particella.



La conservazione della simmetria rispetto alla riflessione (P) non permette che una stessa particella possa decadere in entrambi tali modi (con 2 e con 3 pioni) \Rightarrow P è violata nelle interazioni deboli.

LA VIOLAZIONE DELLA PARITÀ

La violazione di P fu ipotizzata da T. D. Lee e C. N. Yang, verificata sperimentale nel decadimento β ad opera di C.-S. Wu et al.

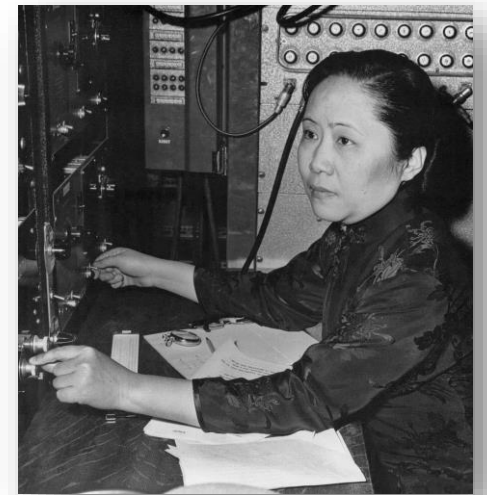
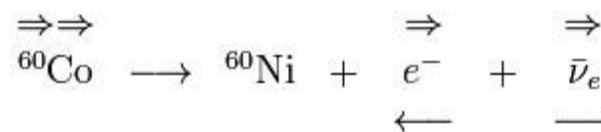
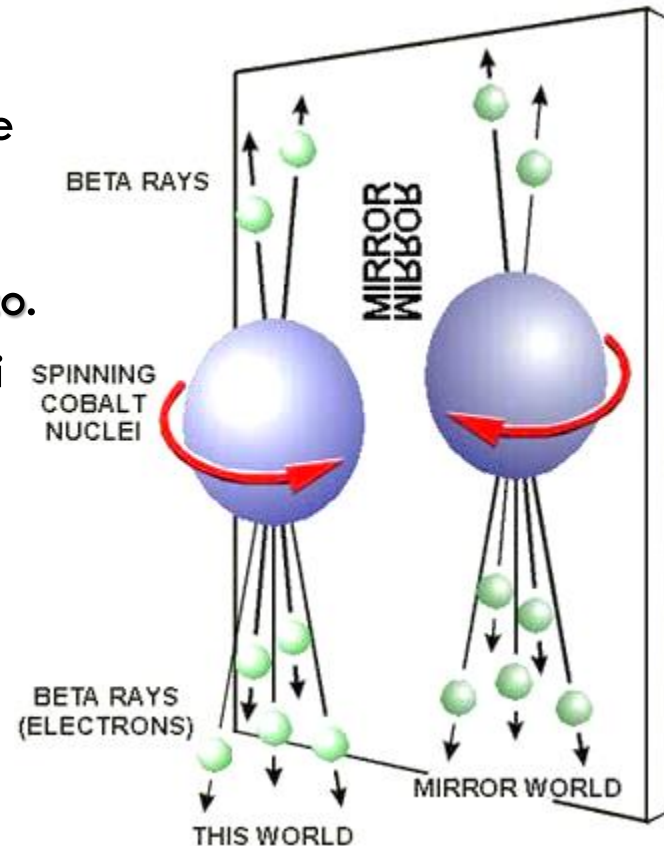
- Si allineano gli spin con un campo magnetico.
- Si scopre che il Cobalto-60 emette elettroni prevalentemente verso il basso, cioè in direzione opposta allo spin.

Nell'esperimento speculare ($x \rightarrow -x$)

- Il campo magnetico B_z cambia segno;
- La direzione del momento magnetico μ (allineato al campo B) cambia segno.

Se la parità fosse conservata, ci sarebbe da attendersi che gli elettroni vadano prevalentemente verso l'alto.

Al contrario, nell'esperimento riflesso nello specchio, vanno anch'essi verso il basso.



Chien-Shiung Wu

PHYSICAL REVIEW
VOL 105 PAG. 1413 (1957)

Experimental Test of Parity Conservation
in Beta Decay*

C. S. Wu, *Columbia University, New York, New York*

AND

E. AMBLER, R. W. HAYWARD, D. D. HOPPES, AND R. P. HUDSON,
National Bureau of Standards, Washington, D. C.

(Received January 15, 1957)

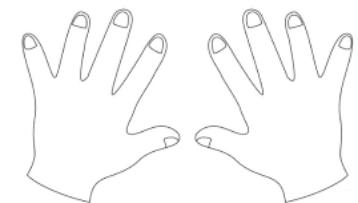
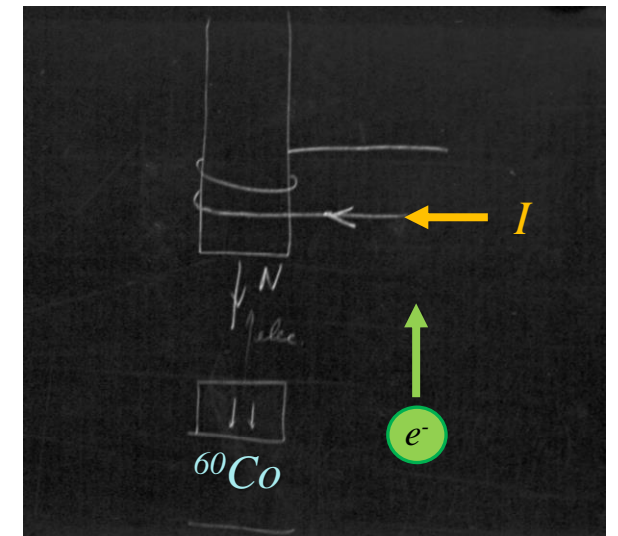
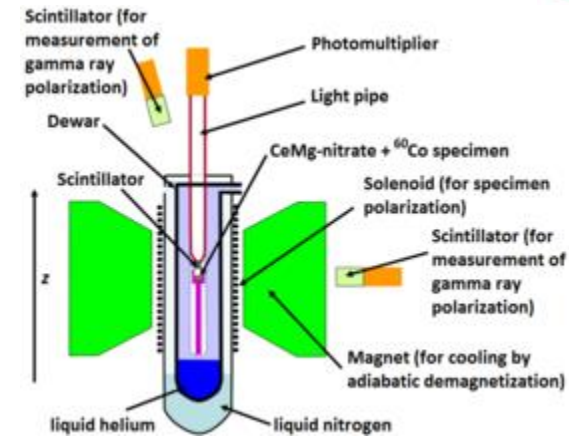
Chi sa valutare l'importanza dei problemi e le cose davvero interessanti del mondo, vede subito che questa è una scoperta sensazionale.

LA MANO DESTRA

In breve, possiamo spiegare a un marziano da che parte sta il cuore. Basta dirgli: «Senti, fa' un magnete, metti l'avvolgimento, attacca la corrente, poi prendi un po' di cobalto e abbassa la temperatura. Se prepari l'esperimento in modo che gli elettroni vadano dai piedi alla testa, allora la corrente entra nell'avvolgimento a destra ed esce a sinistra».

E così, ormai è possibile, con un esperimento di questo tipo, definire destra e sinistra.

[...] Qual è la regola che specifica quanto grave sarà questa violazione? È la seguente: la violazione ha luogo solo in reazioni molto lente, i cosiddetti decadimenti deboli; e quando si presenta, le particelle dotate di spin – elettrone, neutrino, e via dicendo – ruoteranno prevalentemente a sinistra. È una regola asimmetrica [...] il momento angolare ha più probabilità di essere opposto alla velocità che concorde.



Sinistra

Destra

L'ANTIMATERIA

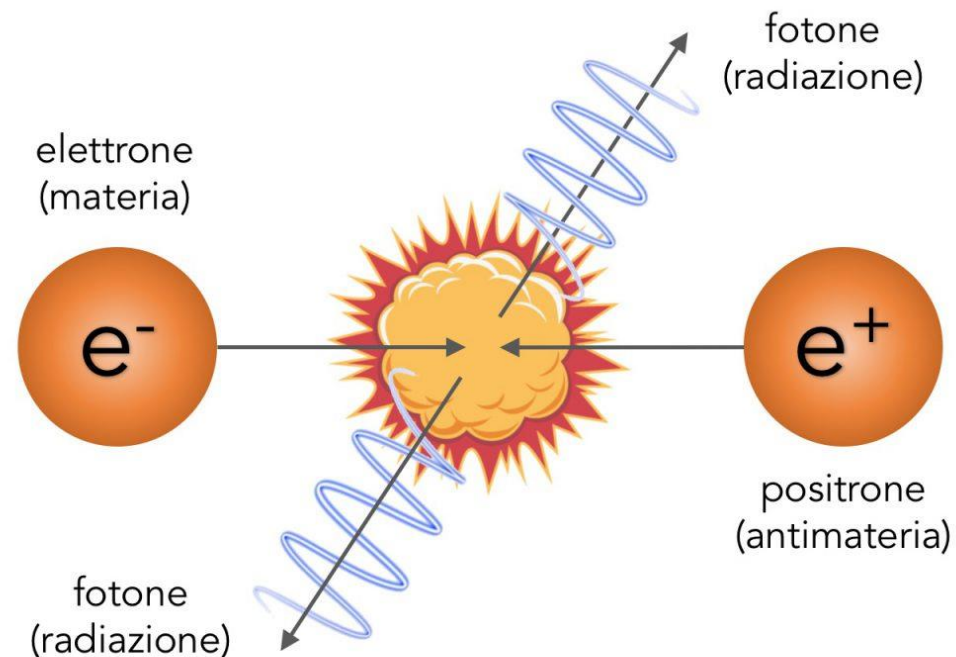
Ipotizzata da P.A.M. Dirac nel 1928 come soluzione dell'equazione di Schrödinger per particelle con energia negativa

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}(\mathbf{r}, t) = \hat{H} \Psi(\mathbf{r}, t)$$

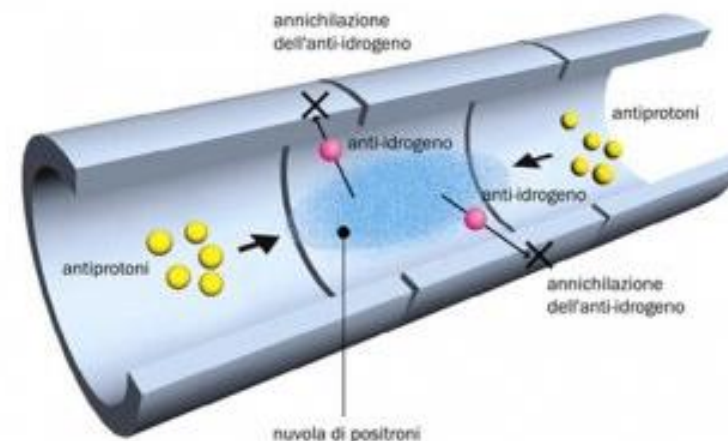
L'antimateria fu scoperta da C.D. Anderson nel 1932, utilizzando una camera a nebbia per rivelare un positrone (o «antielettrone»), dove *anti-* sta non solo per indicare carica opposta, ma anche altre proprietà tra loro opposte). Materia e antimateria si annichilano.

Un atomo di idrogeno, per esempio, ha al centro un protone e un elettrone che gira intorno all'esterno. Ma immaginiamo di essere riusciti a fabbricare, da qualche parte, un antiprotone e un positrone: questo gli gira intorno davvero? [...]

I primissimi atomi di anti-idrogeno furono creati al CERN e al Fermilab tra il 1995 e il 1996.



www.borborigmi.org



Trappola di ricombinazione per antiatomi

L'ANTIMATERIA

Le equazioni sembrano implicare un principio di simmetria in base al quale se, per esempio, un orologio fosse fatto di materia ordinaria e poi lo rifacessimo uguale, ma di antimateria, questo secondo orologio funzionerebbe come il primo. (Naturalmente, se li mettessimo a contatto si annichilerebbero a vicenda).

[...] Con la materia ordinaria posso costruire due orologi, uno «destrorso» e uno «sinistrorso» [...] potremmo farli con dei magneti, del cobalto, dei rivelatori che intercettano gli elettroni e li contano – e ogni volta che questo succede la lancetta dei secondi scatta in avanti. Ma uno dei due orologi speculari riceverà meno elettroni, quindi andrà più lento.

[...] Abbiamo appena scoperto che, in generale, *non* andranno con lo stesso ritmo.

[...] Se avessimo costruito un orologio identico destrorso, ma di antimateria, avrebbe funzionato come l'orologio destrorso di materia ordinaria [?]

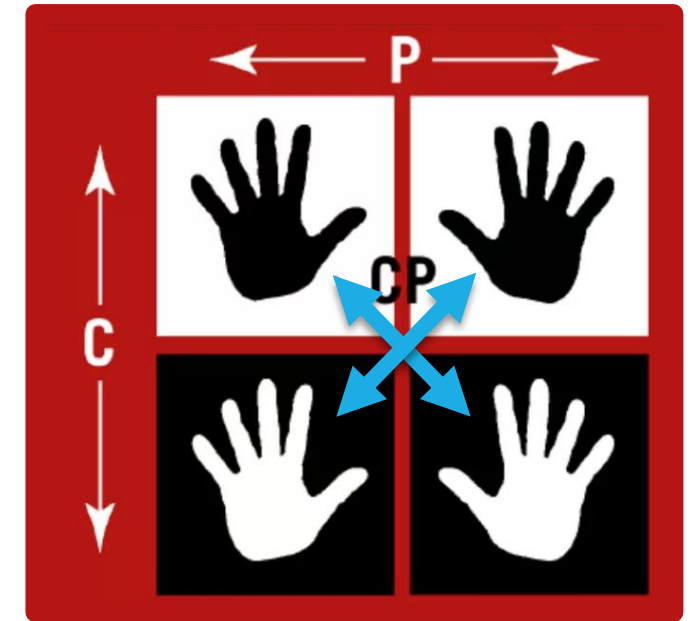


Inizialmente si credeva che *tutti e quattro* questi orologi fossero uguali; ora naturalmente sappiamo che la materia destrorsa e quella sinistrorsa non sono uguali – e dunque è presumibile che neppure l'antimateria destrorsa e sinistrorsa lo siano.

PARITÀ E CONIUGAZIONE DI CARICA

La domanda più ovvia, a questo punto, è: [...] la materia destrorsa si comporta come l'antimateria destrorsa, o come l'antimateria sinistrorsa?

Gli esperimenti sul decadimento β , in cui si usano i positroni invece degli elettroni, indicano che [...] la materia «destrorsa» funziona esattamente come l'antimateria «sinistrorsa».



« La simmetria CP è conservata »



Perciò se il nostro marziano è fatto di antimateria e gli spieghiamo che deve costruire un modello «destrorso» come il nostro, lo costruirà all'incontrario.

Ma che cosa accadrà quando, dopo interminabili dialoghi, ci saremo insegnati a vicenda come costruire astronavi e ci incontreremo a metà strada nello spazio? Di certo saremo informati sulle rispettive abitudini, e così via, e dunque ci affretteremo a stringerci la mano. Ma se lui porge la sinistra... **attenzione!**

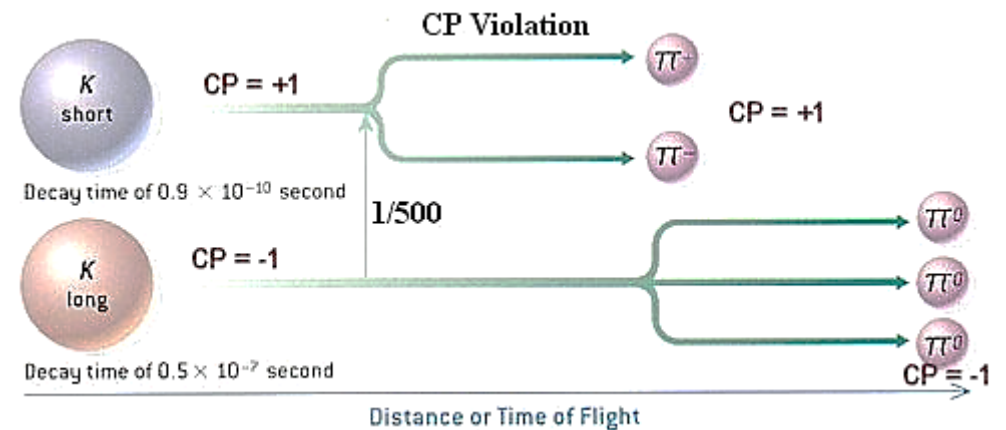
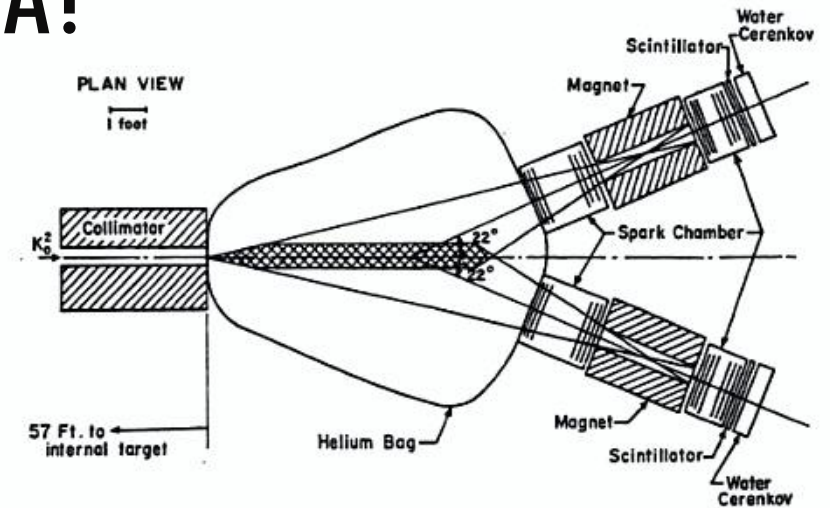
ANCHE LA SIMMETRIA CP È VIOLATA!

Nelle sue *Lectures on Physics*, Feynman ipotizzava che la **simmetria CP** fosse conservata, ma già nel 1964 J. Cronin, V. Fitch et al. provarono che, nel sistema dei mesoni K neutri, tale simmetria è **violata**, circa lo 0.2% delle volte.

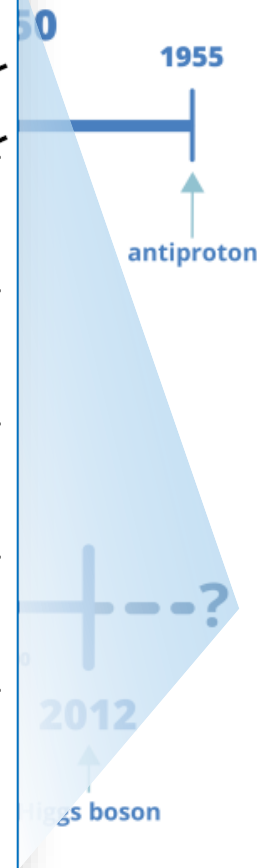
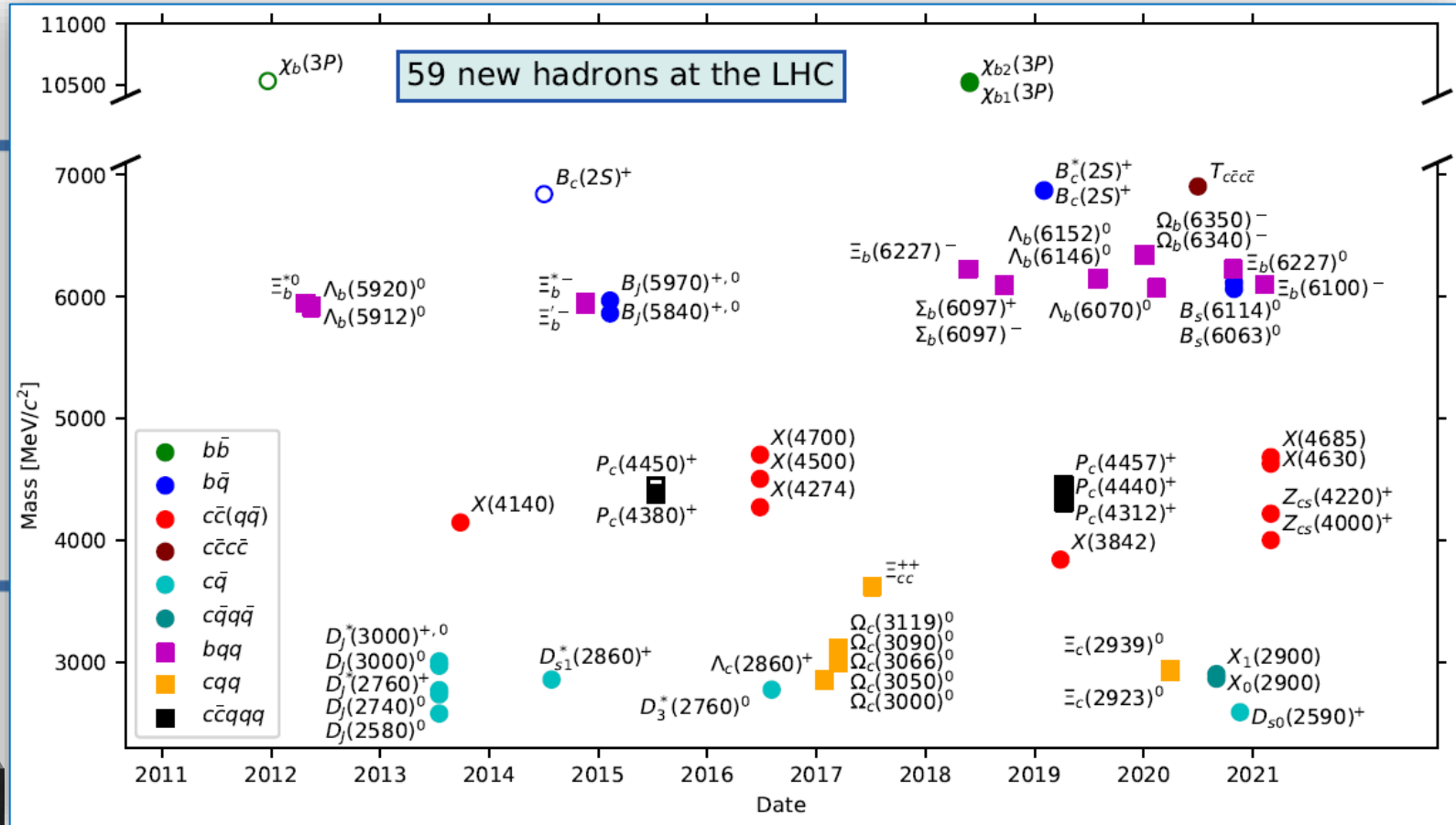
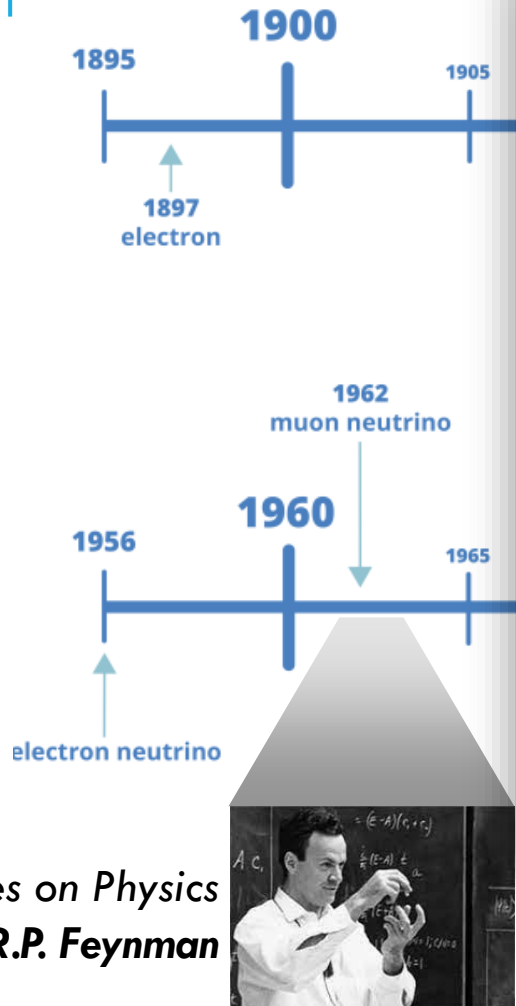
Trovarono decadimenti del mesone K_L (ritenuto avere $CP = -1$) con due pioni anziché tre, dunque non più identificabile con l'autostato K_2 .

Ulteriori prove sperimentali di violazione di CP (a partire dal sistema dei mesoni B) furono poi ottenute dagli esperimenti BaBar e Belle (2003).

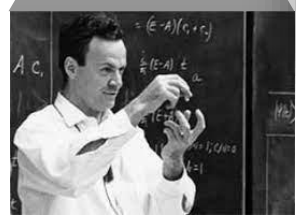
Si tratta comunque di effetti troppo piccoli per spiegare l'asimmetria tra materia e antimateria che esiste nell'universo.



CRONISTORIA DELLA SCOPERTA DELLE PARTICELLE



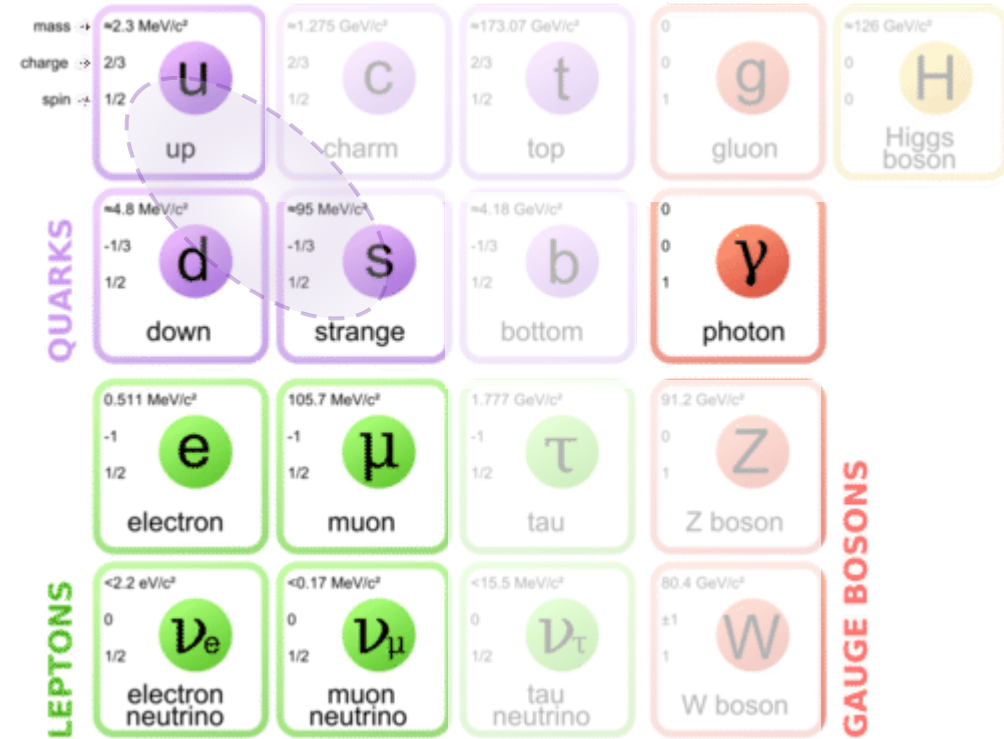
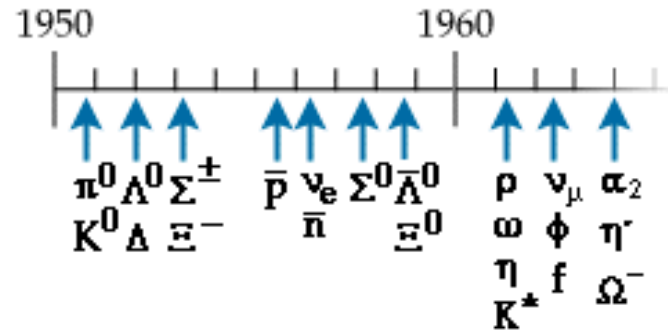
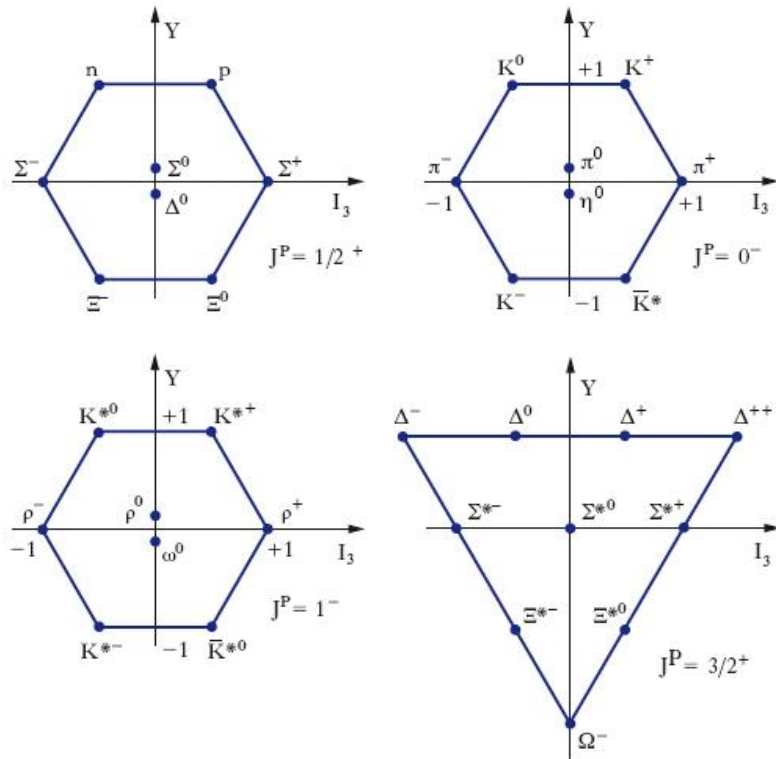
Lectures on Physics
by R.P. Feynman



Key Particle Discoveries Timeline - <https://cds.cern.ch/record/2665175>

AGLI ALBORI DEL MODELLO STANDARD

All'epoca delle *Lectures on Physics* al Caltech, ancora le particelle non erano state inserite nel Modello Standard.



Nel 1964 Gell-Mann e Zweig, cercando di classificare gli adroni, ipotizzarono per la prima volta il Modello a Quark, basato sulla simmetria del gruppo SU(3).

$$qqq = 3 \otimes 3 \otimes 3 = 1 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 10$$

$$q\bar{q} = 3 \otimes \bar{3} = 1 \oplus 8$$

SIMMETRIE NELL'ARTE

(SOLO QUALCHE ESEMPIO)



Interno del Duomo di Siena



Ultima cena (S. Dalí)



Alhambra - Granada



Tempietto di S. Pietro in Montorio - Roma

ROTTURE DI SIMMETRIE

Perché la natura è solo approssimativamente simmetrica? Nessuno lo sa.

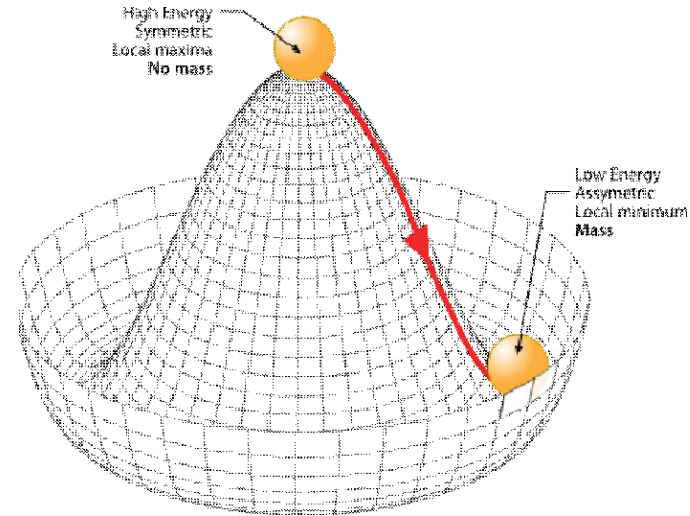
A Nikko, in Giappone, vi è una porta famosissima [...] una costruzione estremamente elaborata, con timpani e bellissime sculture e una profusione di colonne e teste di drago e figure di principi intagliate nei pilastri, e così via. Ma se si guarda più da vicino, si vede che nella decorazione di un pilastro c'è un piccolo elemento scolpito sottosopra. A parte questo particolare, il resto è completamente simmetrico. Ma se ne chiedete il motivo vi spiegano che fu fatto in quel modo affinché gli dèi non fossero gelosi della perfezione umana.



ROTTURE DI SIMMETRIE

↓ Cit: R. P. Feynman (1962)

Forse potremmo capovolgere il concetto e pensare che la vera spiegazione della imperfetta simmetria della natura sia un'altra: Dio fece le Sue leggi approssimativamente simmetriche affinché noi non fossimo gelosi della Sua perfezione!



$$\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$$

$$\phi^+ = \frac{\phi_1 + i\phi_2}{\sqrt{2}}$$

$$\phi^0 = \frac{\phi_3 + i\phi_4}{\sqrt{2}}$$

$$V(\phi) = \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2$$

↑ Meccanismo di rottura spontanea della simmetria (1964)



Physics Letters B
Volume 716, Issue 1, 17 September 2012, Pages 1-29



Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC ☆

This paper is dedicated to the memory of our ATLAS colleagues who did not live to see the full impact and significance of their contributions to the experiment.

ATLAS Collaboration *, G. Aad⁴⁸, T. Abajyan²¹, B. Abbott¹¹¹, J. Abdallah¹², S. Abdel Khalek¹¹⁵, A.A. Abdelalim⁴⁹, O. Abdinov¹¹, R. Aben¹⁰⁵, B. Abi¹¹², M. Abolins⁸⁸, O.S. AbouZeid¹⁵⁸, H. Abramowicz¹⁵³, H. Abreu¹³⁶, B.S. Acharya^{164a 164b}, L. Adamczyk³⁸, D.L. Adams²⁵, T.N. Addy⁵⁶, J. Adelman¹⁷⁶,

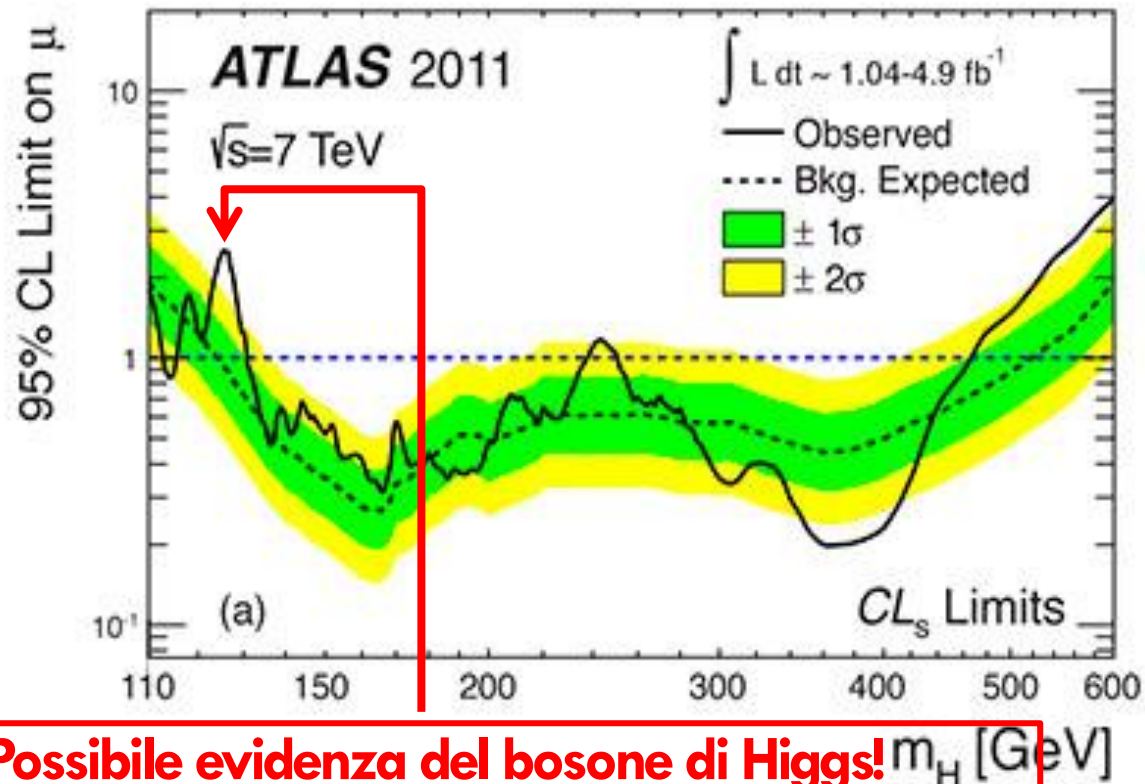
← Articolo ATLAS Collaboration sulla scoperta del bosone di Higgs (2012).

→ F. Englert e P.W. Higgs, Premi Nobel per la Fisica (2013).

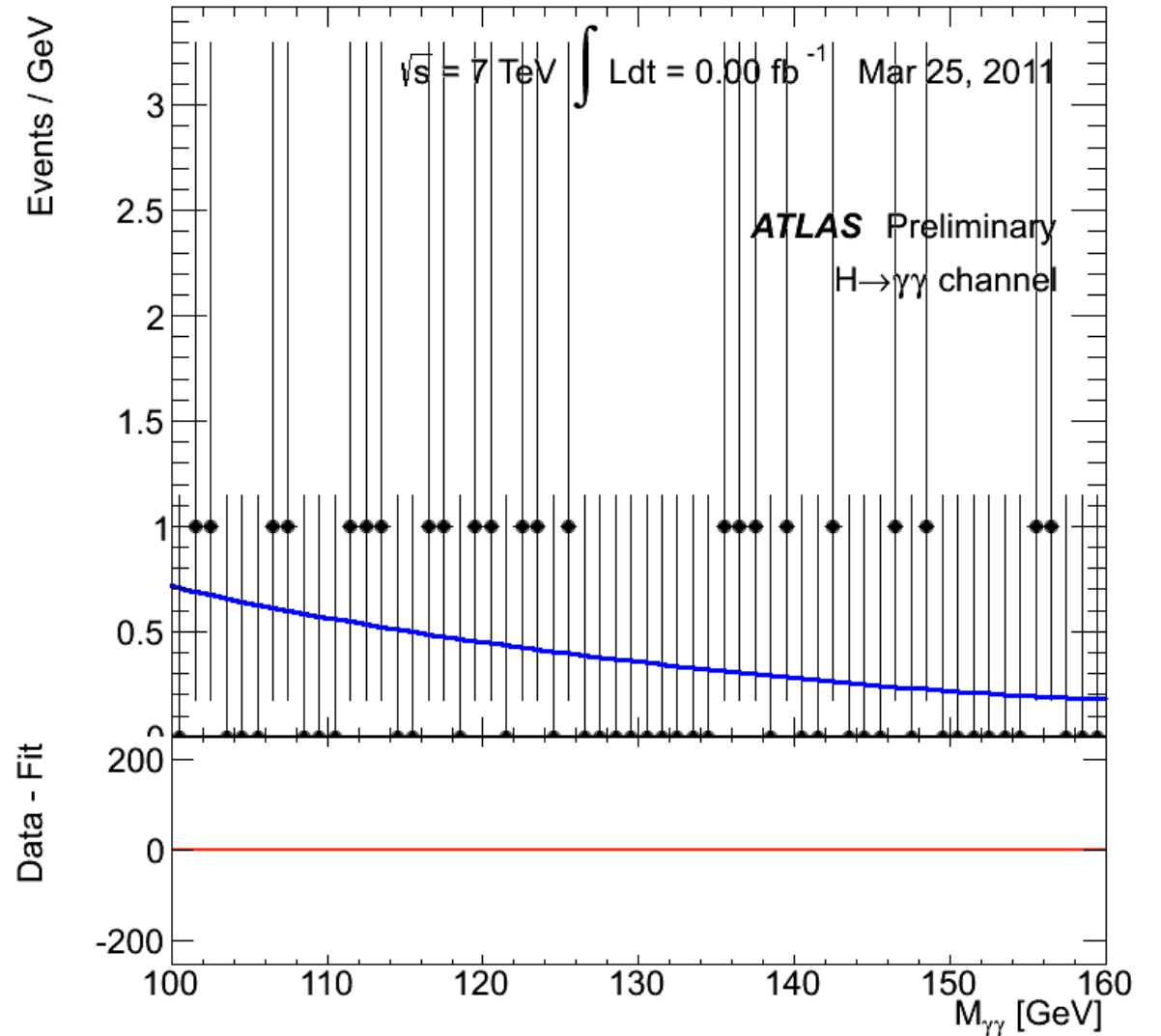


LA SCOPERTA DEL BOSONE DI HIGGS (2012)

Esperimenti ATLAS e CMS presso l'LHC
(Large Hadron Collider) del CERN

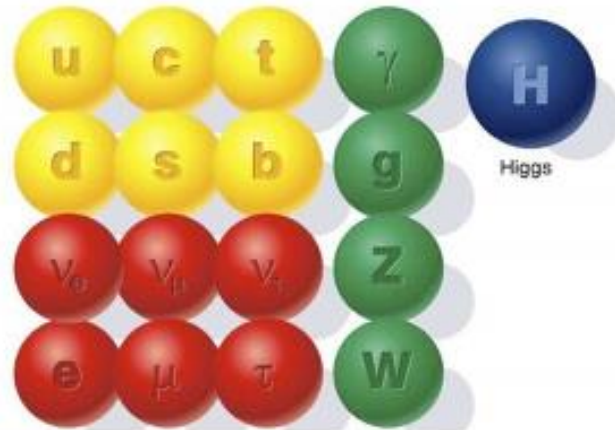


Possibile evidenza del bosone di Higgs!
Responsabile della rottura spontanea della simmetria



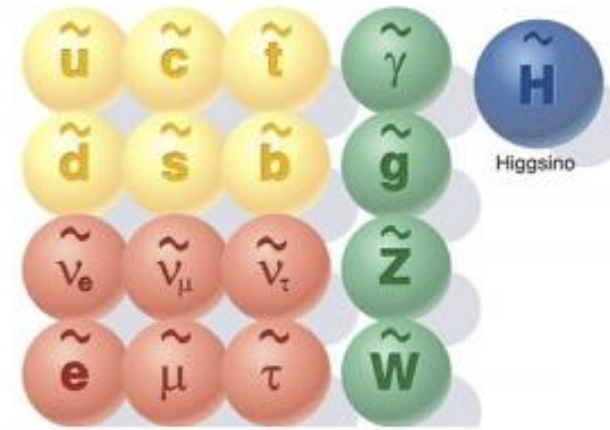
POSSIBILI FUTURI SCENARI: LA SUPERSIMMETRIA

Per ciascuna delle particelle note nell'ambito del Modello Standard...



- quarks
- leptons
- force carriers

... potrebbe esistere un partner *supersimmetrico* con masse a scale energetiche più elevate.



- squarks
- sleptons
- SUSY force carriers

La **Supersimmetria** (SUSY) è una teoria che potrebbe spiegare alcuni aspetti irrisolti del Modello Standard. Si tratta di una simmetria rotta, dal momento che non si osserva tra le particelle oggi note. Si spera che l'LHC possa riuscire a confermare o confutare la teoria.

THE FEYNMAN TECHNIQUE



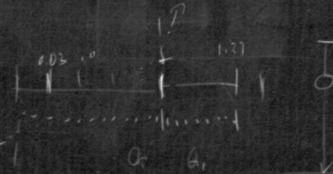
JUNE 1, 1962
LECTURE 52
SYMMETRY IN
PHYSICAL LAWS

Final Exam, Tuesday, June 5
8-11 a.m.

Sections A → F, Gates 22
" G → J, Sloan 151
(Please go to your scheduled room)

PICK UP LECTURE NOTES AND SUMMARIES
ON FRONT TABLE AFTER LECTURE!

$p \leftrightarrow p$
 $m \leftrightarrow m$
 $m \leftrightarrow p$



- STEP 1 - Pick and study a topic
- STEP 2 - Explain the topic to someone, like a child, who is unfamiliar with the topic... and at their level of understanding. Use simple language.
- STEP 3 - Identify any gaps in your understanding
- STEP 4 - Return to the literature to understand better