

Leggi di conservazione e simmetrie dell'Universo

© Mauro Fiorentini, 2019

Leggi di conservazione

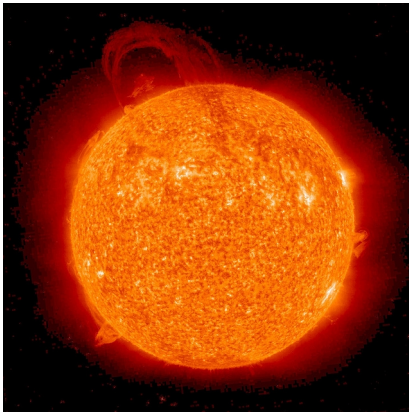
- Descrivono il fatto che in un **sistema isolato** certe grandezze fisiche si conservano.
- Sappiamo che ne esistono parecchie; per esempio, nel tempo si scoprì che si conservano:
 - la quantità di moto;
 - il momento angolare;
 - l'energia totale,
 - la carica elettrica;
 - il numero di quark (?);
 - il numero di leptoni (elettroni, mu, tau e neutrini associati) (?).

Leggi di conservazione: un po' di storia

- La prima legge di conservazione proposta fu la legge di conservazione della materia (Lavoisier, 1772).
- La seconda fu la legge di conservazione dell'energia in termodinamica, nella seconda metà del XIX secolo.
- Entrambe sono state dimostrate false, perché la materia può essere trasformata in energia e viceversa.
- Sono state sostituite da una legge più generale: si conserva l'energia totale di un sistema isolato, comprendendo anche la massa, convertita in energia tramite la formula $E = mc^2$.

Conservazione dell'energia

- Il Sole converte ogni secondo 4.260.000 tonnellate di massa in energia, circa $3,827 \times 10^{26}$ J.
 - Solo la Terra riceve 50.000.000 GW di potenza.



Grandezze non conservate

- Si scoprì però che alcune grandezze, che sembrava si dovessero conservare, in realtà non si conservano sempre:
 - la temperatura media, che reazioni chimiche o fenomeni fisici possono cambiare;
 - il numero di barioni (protoni, neutroni...), che in alcune reazioni nucleari, può cambiare.
 - Si rimediò con la legge di conservazione dei loro componenti, detti “quark” (siamo proprio sicuri?).

Si possono spiegare?

- All'inizio le leggi di conservazione furono viste come leggi della natura, **principi primi indimostrabili**.
- Oltre un secolo fa iniziò a farsi strada l'idea di **spiegare le leggi di conservazione**, mediante principi più profondi, ma in fondo molto più semplici.
- Si vide che alcune leggi di conservazione derivano dal fatto che certe leggi della fisica hanno particolari simmetrie.

Emmy Noether

- Amalie Emmy Noether (23/3/1882 – 14/4/1935) fu considerata come una delle più grandi matematiche di sempre dai maggiori scienziati del secolo scorso.
 - Hilbert si batté per farle avere una cattedra permanente a Gottinga, riscendo solo ad ottenere per lei una posizione di “ospite”.
 - Einstein l’aiutò a emigrare in USA nel 1933.



Il teorema di Noether

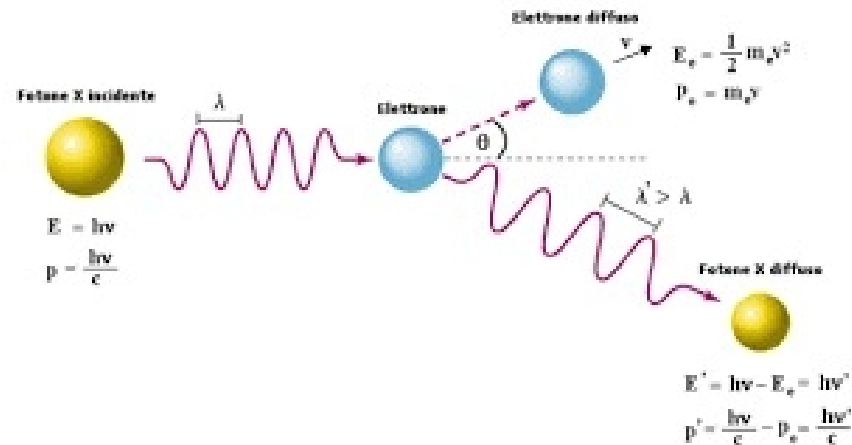
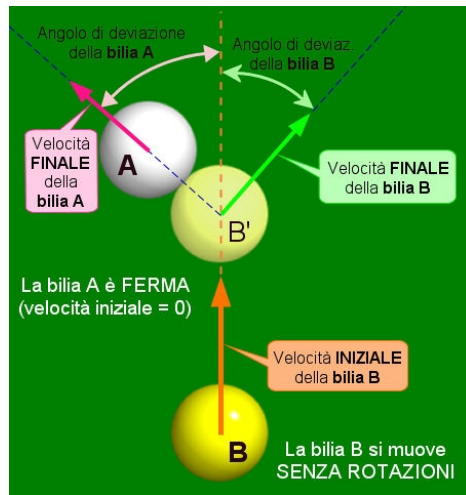
- Dimostrato nel 1915 da Emmy Noether.
- Ha una formulazione tecnicamente complessa, ma afferma **un concetto semplice**:
 - Quando una legge fisica è **invariante rispetto a una trasformazione**, esiste una grandezza, esprimibile mediante una “corrente”, che si **conserva**.
- In altri termini, **se una legge fisica non cambia** per una qualche trasformazione di coordinate, esiste una **legge di conservazione** per una quantità associata alla legge.

Un esempio

- Per esempio, la legge del moto rettilineo uniforme $s = s_0 + vt$ è invariante se si trasla il sistema di coordinate, spostando l'origine.
 - Cambia il valore di s_0 , ma **non la formula**.
- Quindi ci sarà una grandezza associata alla legge che si conserva, in questo caso la quantità di moto mv , ossia la velocità, se la massa non cambia e non ci sono forze esterne.
 - E' il principio di inerzia.

Conservazione della quantità di moto

- La quantità di moto di un sistema isolato si conserva.
- Per esempio, in un urto elastico la somma dei prodotti mv lungo ciascun asse spaziale resta uguale prima e dopo l'urto.
 - Sia che si tratti di palle da biliardo o fotoni ed elettroni.



Un secondo esempio

- La legge che esprime l'angolo di rotazione di un oggetto, che ruoti a velocità uniforme intorno a un asse fisso, è analoga alla legge del moto rettilineo uniforme.
- La legge è invariante se si ruota il sistema di coordinate di un angolo fisso.
- Se ne ricava una legge di conservazione analoga, in questo caso la legge di conservazione del momento angolare.

Conservazione del momento angolare (I)

- Il momento angolare di un sistema isolato si conserva.
- Per esempio, in un insieme di corpi isolato la somma dei prodotti mrv rispetto all'asse di rotazione non può variare.
 - Senza il rotore di coda, un elicottero girerebbe su se stesso in senso contrario alla rotazione delle pale.
 - Una pattinatrice aumenta la velocità di rotazione stringendo le braccia al corpo.
 - Un tuffatore o un trapezista aumentano la velocità di rotazione in un salto mortale avvicinando gambe e braccia al tronco.

Conservazione del momento angolare (II)

- L'attrito delle maree rallenta la rotazione terrestre (di circa 42 ns al giorno) e la Luna si allontana di circa 4.5 cm all'anno.



Conservazione del momento angolare (III)

- Piccolo esperimento per mostrare la conservazione del momento angolare.



Invarianza delle leggi fisiche

- Le leggi della fisica sono invarianti rispetto a certe trasformazioni di coordinate.
 - La legge del moto rettilineo uniforme è invariante rispetto alla traslazione.
 - La legge del moto circolare è invariante rispetto alle rotazioni.
- Vale a dire che cambiando il sistema di riferimento in alcuni modi, le formule restano inalterate.
 - Al massimo bisogna cambiare alcuni parametri, come la distanza dall'origine, se questa viene spostata.

Da dove nasce la conservazione?

- La conservazione di molte grandezze nasce quindi dall'invarianza delle leggi della fisica.
- L'invarianza delle leggi, però, **non è casuale**, ma riflette **simmetrie** più profonde dell'Universo.
 - La legge del moto rettilineo uniforme è invariante per traslazione delle coordinate perché **l'Universo lo è**.
 - La legge del moto circolare è invariante rispetto alle rotazioni perché **l'Universo lo è**.





Simmetria dell'Universo e fisica

- Quindi abbiamo una catena di conseguenze:
 - l'Universo ha certe simmetrie;
 - le leggi fisiche esprimono queste simmetrie tramite formule, a loro volta **invarianti** rispetto a qualche trasformazione di coordinate;
 - il teorema di Noether ci dice che ci dev'essere qualcosa che **si conserva**.
- **Ogni legge di conservazione non fa altro che esprimere una simmetria dell'Universo.**

Attenzione agli effetti “esterni”

- Naturalmente quando si parla di simmetrie, si intende che si **eliminano gli effetti esterni** o che si possono ridurre al punto da poterli trascurare.
 - La traiettoria di un proiettile di cannone non è esattamente la stessa all’Equatore o al Polo Nord: dipende dall’effetto della rotazione terrestre, non dall’asimmetria dell’Universo.
 - Un pendolo non oscilla allo stesso modo sulla Terra e sulla Luna: dipende dalla diversa gravità.

Simmetrie

- Simmetria per traslazione nello spazio.  Conservazione della quantità di moto.
- Simmetria per rotazione.  Conservazione del momento angolare.
- Simmetria per traslazione nel tempo.  Conservazione dell'energia.
- Simmetria nella meccanica quantistica, nella quale le “coordinate” esprimono altre grandezze, quali carica, spin ecc..  Conservazione della carica elettrica.

Quali simmetrie ha l'Universo?

- Riteniamo che l'intero Universo sia simmetrico per traslazione e rotazione.
- Riteniamo che l'Universo sia simmetrico nel tempo.
- Riteniamo che l'Universo abbia varie simmetrie a livello quantistico.
 - Complesse da esprimere, ma con effetti macroscopici semplici da enunciare: conservazione della carica elettrica, del numero di quark, del numero di leptoni, della “carica di colore”...

Simmetria dell'Universo (1)

- Dire che l'Universo è simmetrico per traslazione vuol dire che se riproduciamo lo stesso esperimento un centinaio di metri (o un milione di chilometri) più in là, ci attendiamo gli stessi risultati.
 - Sembra ovvio, quantomeno è intuitivo, ma i fisici non si accontentano: nei limiti del possibile, si sottopone anche questa invarianza a **verifica!**

Simmetria dell'Universo (2)

- Misure astronomiche indicano che, almeno per i fenomeni accessibili, in particolari le reazioni nucleari, le leggi e le costanti fondamentali sono rimaste **invariate per almeno 13.7 miliardi d'anni** e sono **invarianti su distanze di miliardi d'anni luce**.
 - A meno che varie costanti fisiche non cambino insieme nel tempo **in modo accuratamente sincronizzato**.
 - Non è completamente accertato che la legge di gravitazione sia rimasta invariata.

Quali simmetrie non ha l'Universo?

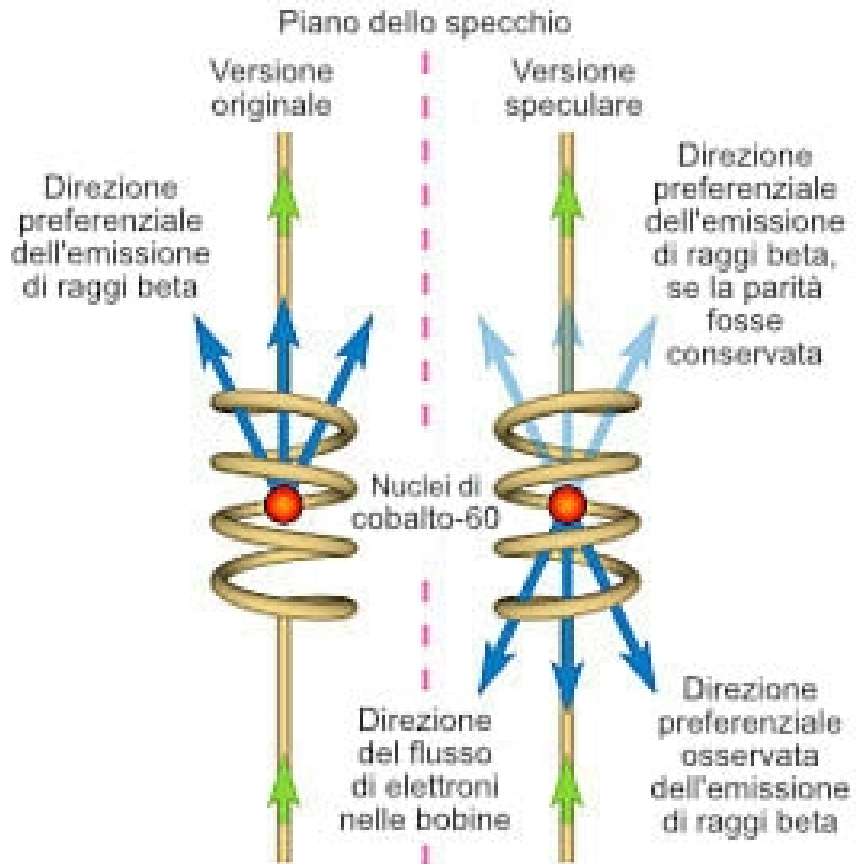
- Tendiamo a dare per scontato che l'Universo abbia anche altre “ovvie” simmetrie, ma ogni tanto restiamo sorpresi scoprendo che non è vero: l'Universo **non è così semplice** come vorremmo.
 - Sembra ovvio che l'Universo sia simmetrico per inversione speculare, tutte le leggi della meccanica classica lo sono ...
 - ... ma nel 1956 si scoprì un esperimento che dava risultati diversi dalla sua versione speculare.

La simmetria spezzata

- L'esperimento proposto da Tsung-Dao Lee e Chen-Ning Yang (premi Nobel per la Fisica 1957), e realizzato da Chieng-Shung Wu (premio Wolf per la Fisica 1978) mostrò nel 1956 il primo esempio di violazione di parità, ossia di **risultati differenti** tra un esperimento e la sua versione speculare.
 - Solo la forza nucleare debole è asimmetrica rispetto all'inversione speculare, quindi fenomeni del genere non si osservano nella vita quotidiana.

L'esperimento di Wu

- L'esperimento consiste nell'immergere un piccolo campione di cobalto-60, raffreddato a $0.003 \text{ } ^\circ\text{K}$, in un forte campo magnetico.
 - Il decadimento beta si rivela asimmetrico: vengono emessi più elettroni nella direzione del polo Sud del magnete che in quella opposta.



La verifica (1)

- Raggiunti dalla notizia dell'esperimento di Wu, alcuni fisici della Columbia University si precipitarono a modificare un ciclotrone per riprodurlo.
- Essendo sera tarda, utilizzarono materiali di fortuna per montare l'apparecchiatura, tra i quali: un'asse di legno sorretta da un barattolo di caffè, una lattina di Coca-cola, una bottiglia di aranciata, come sostegno intorno al quale avvolgere spire di un magnete ... e tanto nastro adesivo per tenere insieme il tutto.

La verifica (2)

- L'esperimento ebbe successo alle 2 del mattino, mostrando un'asimmetria nel decadimento beta del cobalto-60, ma fu interrotto ... dalla fusione della bottiglia di plastica.
- Solo 4 ore dopo fu possibile ripristinare l'apparecchiatura.
- Anche i fisici talvolta si lasciano prendere la mano per eccesso di entusiasmo.

Salviamo il salvabile

- Sconcertati dalla violazione della parità, i fisici tentarono di salvarla, inserendola in un quadro più generale: la simmetria CP.
 - Vale a dire che un esperimento dà lo stesso risultato se lo si esegue in versione speculare e si scambiano le particelle con le corrispondenti antiparticelle.
- Però la legge della forza nucleare debole non ha questa simmetria.

L'Universo non collabora

- Nel 1964 a Brookhaven fu annunciato il primo esperimento nel quale la simmetria CP non vale, in forma indiretta, e nel 2001 al CERN di Ginevra fu osservata la prima violazione della parità CP in forma diretta.
 - Ovvero, invertendo specularmente l'apparecchiatura e scambiando le particelle con le corrispondenti antiparticelle si ottengono risultati diversi.
- Decisamente la natura non ama gli specchi!

Aspettate a lamentarvi, però!

- La violazione della parità CP è fondamentale perché mostra che esiste un' **asimmetria** tra materia e antimateria.
- Questa asimmetria ha fatto sì che, tramite un meccanismo ancora ignoto, il Big Bang generasse **più materia che antimateria**.
 - Altrimenti le due forme avrebbero finito con l'annichilirsi, lasciando solo energia!

Asimmetrico? Meno male!

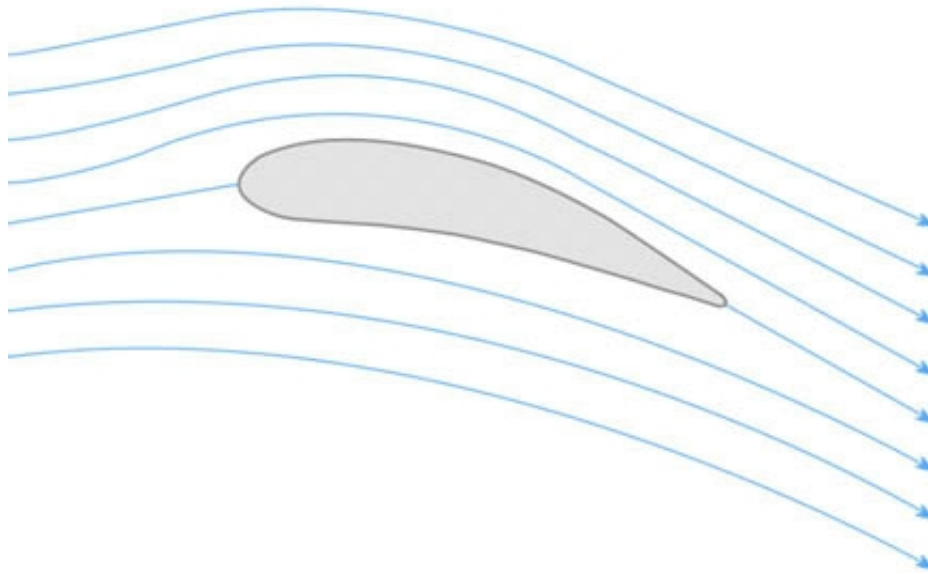
- Se non ci fosse questa **piccola asimmetria**, non esisterebbe abbastanza materia nell'Universo per formare stelle e pianeti.
- In definitiva **non esisteremmo noi!**

Conseguenze di una legge di conservazione

- Che conseguenze può avere una legge di conservazione?
- Per esempio, permettere agli aerei di volare!

Come vola un aereo (1)

- Quando l'aria incontra un'ala, il flusso viene diviso in due parti; la forma dell'ala fa sì che l'aria che passa al di sopra percorra una traiettoria più lunga dell'altra.

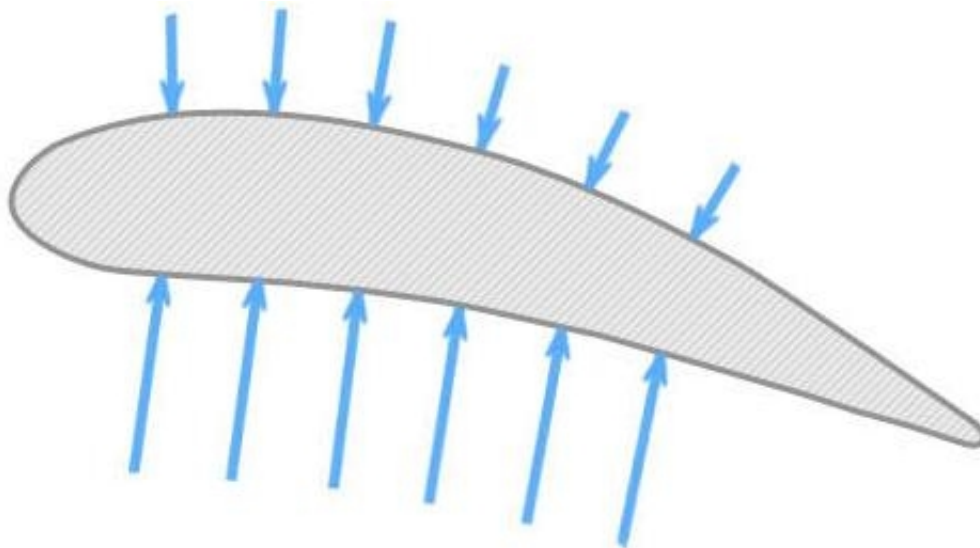


Come vola un aereo (2)

- Quindi l'aria che passa al di sopra si muove più velocemente di quella che passa al di sotto.
- Un gas in movimento ha un'energia che dipende dalla sua velocità (energia cinetica) e dalla pressione (energia di pressione).
- Aumentando la velocità aumenta la prima e, per la **legge di conservazione dell'energia** deve diminuire la seconda, quindi cala la pressione (legge di Bernoulli).

Come vola un aereo (3)

- Pertanto sulla parte superiore dell'ala agisce una pressione minore di quella sulla parte inferiore e l'aria esercita sull'ala una forza diretta verso l'alto.



Come vola un aereo (4)

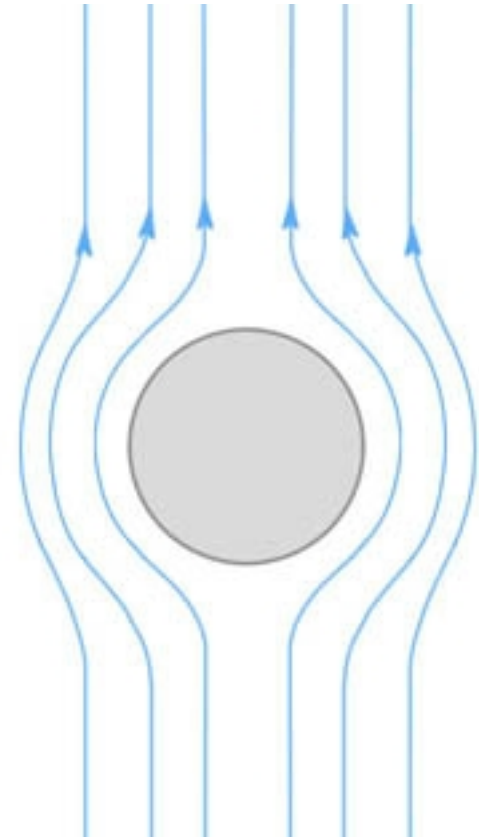
- Questa forza sorregge l'ala, l'aereo e i passeggeri.
- L'aereo vola perché l'Universo è simmetrico rispetto al tempo!

Un semplice esperimento (1)

- E' difficile tenere in equilibrio una pallina da ping-pong in un getto d'aria?
- No: è quasi più difficile farla cadere.

Un semplice esperimento (2)

- Quando la pallina, per effetto della turbolenza, inizia a uscire lateralmente dal getto, incontra aria ferma o quasi, che ha pressione **maggiore** di quella in movimento.
- Si genera quindi una forza verso l'interno del getto, che ributta la pallina verso il centro dello stesso.



Riassumendo

- L'Universo ha **alcune** simmetrie, ma non altre, che pure sembrano ovvie.
 - Dalle simmetrie derivano **leggi di conservazione**.
 - Dalle asimmetrie deriva la possibilità di **non conservare** alcune grandezze, come la somma tra materia e antimateria.

Ovvero

- Esistiamo perché l'Universo è (in parte) asimmetrico, possiamo godercelo perché è (in parte) simmetrico.

Un compromesso accettabile!