

**Dispense del corso di**  
**FISICA**



**Wir Müssen Wissen, Wir Werden Wissen  
NOI DOBBIAMO SAPERE, NOI SAPREMO  
(D. Hilbert, 1930)**

# APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

## CONTENUTO

### 0. PREMESSA

#### 1. COSA È LA FISICA

#### 2. CENNI DI MATEMATICA

Relazioni di proporzionalità - Principali fattori di moltiplicazione - Principali funzioni trigonometriche e loro rappresentazione - Calcolo vettoriale

#### 3. UNITÀ DI MISURA

Metro – Kilogrammo - Secondo

#### 4. MECCANICA

**Cinematica** - Moto rettilineo uniforme - Moto rettilineo uniformemente accelerato - Moto circolare uniforme - Moto armonico - Il pendolo - La forza di Coriolis – **Statica** - Le forze - Coppia e momento – Equilibrio - Il baricentro - Il lavoro - La potenza - Macchine semplici – Attrito - Le leggi della fisica al volante – **Dinamica** - Il primo principio della dinamica - Il secondo principio della dinamica - La gravitazione universale - Il terzo principio della dinamica - Energia cinetica ed energia potenziale - Momento di inerzia - Momento angolare - Leggi di Keplero ed altri cenni di astronomia - Velocità di fuga - Struttura, formazione ed evoluzione del Sistema Solare – Esopianeti  
Le distanze in astronomia

#### 5. MECCANICA DEI FLUIDI E MECCANICA ONDULATORIA

**Pressione** - Principio di Archimede - Portanza di un'ala di aereo - Capillarità ed osmosi - **Le Onde** Riflessione – Rifrazione - Lo spettro della luce - La velocità della luce – Interferenza – Diffrazione Effetto Doppler – Risonanza - Velocità del suono - Ultrasuoni - Onde Anomale

#### 6. TERMOLOGIA E TERMODINAMICA

**Temperatura** – Il Föhn – Il Frigorifero - Conduzione termica - **Termodinamica** - I principi della termodinamica - Moto browniano

#### 7. ELETTRICITÀ

La legge di Coulomb e il “Coulomb” - Elettroscopio a foglie d'oro - La Pila di Volta - La Gabbia di Faraday – Il Generatore di Van Der Graaf - Resistenza - L'induzione elettromagnetica e la dinamo Elettromagneti - Trasformatori – Piezoelettricità - Forno a microonde - Correnti parassite – Elettrolisi - Aurora polare

#### 8. STRUTTURA DELLA MATERIA

Struttura dell'atomo - Caratteristiche degli elementi chimici - Tavola periodica degli elementi Interazioni fondamentali – Antimateria - La carica dell'elettrone: l'esperimento di Millikan Rivelatori di particelle

#### 9. LA RELATIVITÀ

Esperimento di Michelson-Morley - L'Annus Mirabilis - I capisaldi della relatività - L'esperimento di Sir Eddington - Le lenti gravitazionali - Il GPS e la Relatività – Elettronvolt - Materia oscura Reazioni nucleari – Collasso gravitazionale, supernovae e buchi neri

#### 10. CENNI DI MECCANICA QUANTISTICA

Effetto Fotoelettrico - Diffrazione degli Elettroni - Principio di indeterminazione di Heisenberg

E PER FINIRE .....

### 0. PREMESSA

Questi appunti sono la raccolta delle dispense utilizzate nel corso dei passati anni accademici per il corso di Fisica, integrate con nuovi contributi e sezioni.

Non costituiscono un “corpus” organico, né tantomeno una alternativa alle lezioni in aula, ma solo una utile integrazione alle stesse, soprattutto tenuto conto che non tutto quanto trattato in aula è stato messo in forma scritta.

Ai fini della comprensione della materia le lezioni in aula sono a mio avviso irrinunciabili, e la successiva lettura degli appunti può servire a consolidare e confermare quanto appreso durante gli incontri.

Alcuni temi trattati sono di interesse pratico, e riguardano le esperienze quotidiane di ciascuno di noi; cito, per fare qualche esempio, le macchine semplici, il frigorifero, il forno a microonde, l'arcobaleno, i miraggi, ecc.

Altri temi, pur essendo di impronta apparentemente più specialistica, sono oramai di dominio pubblico, essendo trattati da qualsiasi mezzo divulgativo, non ultimi alcuni canali televisivi del digitale terrestre: la struttura dell'atomo, richiami di astronomia, la relatività, ecc.

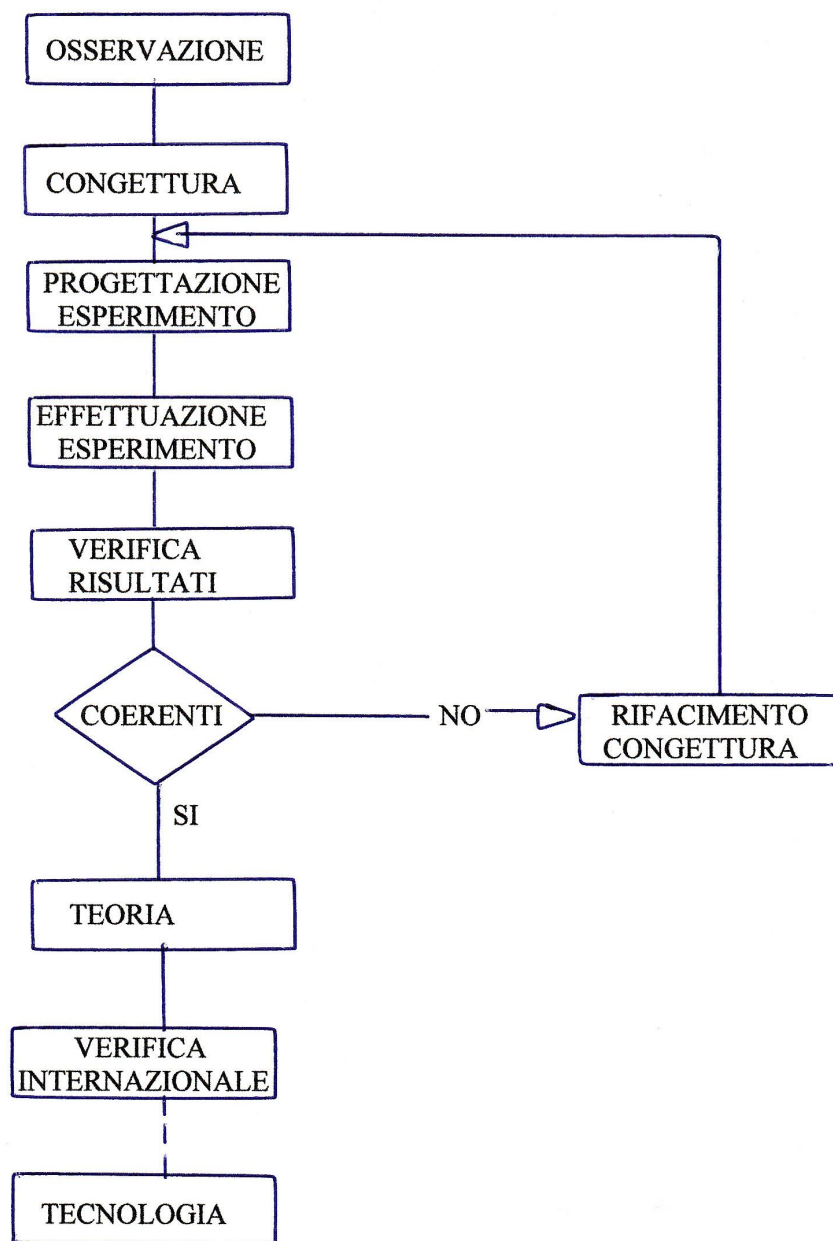
Per un proficuo uso di questi appunti (e delle lezioni cui fanno riferimento) non è richiesta una specifica preparazione matematica, ma solo la curiosità e la voglia di conoscere qualcosa di nuovo.

Le fonti di queste pagine sono i libri di testo delle superiori e reminiscenze scolastiche ed universitarie, senza dimenticare una sistematica consultazione di Internet, in particolare (ma non solo) Wikipedia. Ho infine attinto agli appunti scaricati da Internet, con una lodevole iniziativa, da una persona che ha frequentato il corso in un recente passato, e che ringrazio, seppure in forma anonima.

## 1. COSA È LA FISICA

« La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto (sic). »

(G. Galilei, *Il Saggiatore*)



## 2. CENNI DI MATEMATICA

### 2.1. Relazioni di proporzionalità

#### Proporzionalità diretta

Se una quantità raddoppia, l'altra raddoppia;  
se una quantità triplica, l'altra triplica;  
se una quantità dimezza, l'altra dimezza, ecc.

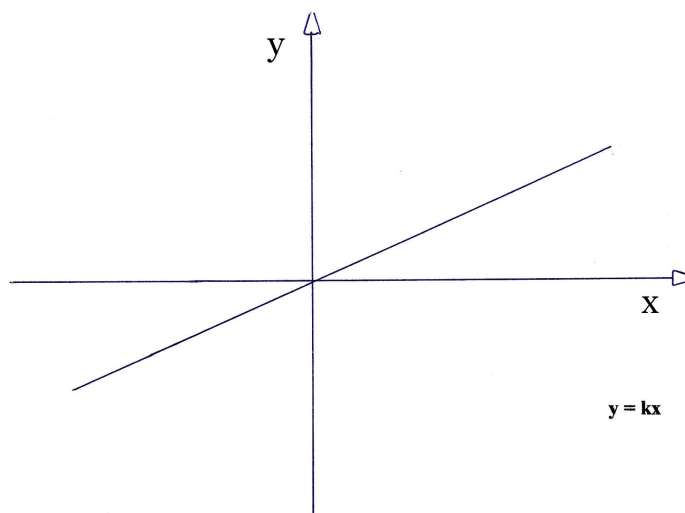
Si esprime con la relazione  $y = kx$ , dove:

- $x$  è la variabile indipendente
- $y$  è la variabile dipendente
- $k$  è la costante di proporzionalità

esempio:  $€ = pl$  dove:

- $p$  è il prezzo della benzina al litro, che in questo esempio si suppone costante (anche se non è sempre così), ed è la nostra costante di proporzionalità;
- $l$  sono i litri che facciamo al distributore, ed è la nostra variabile indipendente;
- $€$  è la cifra che paghiamo, ed è la nostra variabile dipendente (dipende da quanti litri facciamo), ed aumenta quanti più litri facciamo.

In un diagramma cartesiano la relazione di proporzionalità diretta si rappresenta con una retta passante per l'origine.



### Proporzionalità inversa

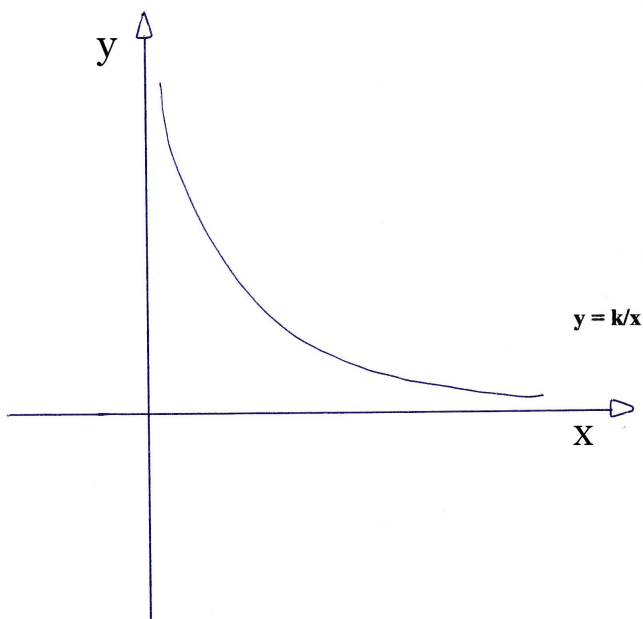
Se una quantità raddoppia, l'altra dimezza;  
se una quantità triplica, l'altra si riduce a un terzo;  
se una quantità dimezza, l'altra raddoppia, ecc.

Si esprime con la relazione  $y = k/x$ , dove:  $x$  è la variabile indipendente  
 $y$  è la variabile dipendente  
 $k$  è la costante di proporzionalità

esempio:  $l = \text{€}/p$  dove:

- p** è il prezzo della benzina al litro, che in questo esempio (e anche in realtà) si suppone variabile, ed è la nostra variabile indipendente;
- €** è la cifra che vogliamo spendere per la benzina; supponendo che impegniamo sempre la stessa cifra, € è la nostra costante di proporzionalità;
- l** sono i litri che facciamo al distributore, ed è la nostra variabile dipendente (dipende dal prezzo al litro); diminuisce quando il prezzo aumenta e viceversa.

In un diagramma cartesiano la relazione di proporzionalità inversa si rappresenta con una iperbole.



## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

### Proporzionalità quadratica

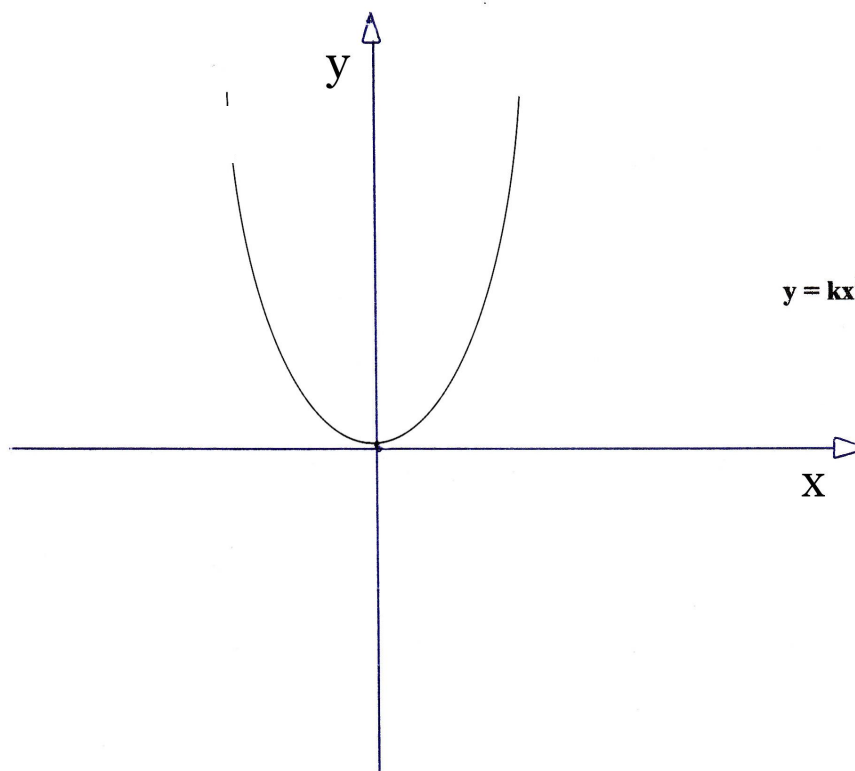
Se una quantità raddoppia, l'altra quadruplica;  
se una quantità triplica, l'altra aumenta di 9 volte;  
se una quantità dimezza, l'altra si riduce a un quarto, ecc.

Si esprime con la relazione  $y = kx^2$ , dove:  $x$  è la variabile indipendente  
 $y$  è la variabile dipendente  
 $k$  è la costante di proporzionalità

esempio:  $A=l^2$ , dove:

$l$  è il lato di un quadrato (p. es. 2 metri), e nel nostro caso è la variabile indipendente;  
 $A$  è l'area del quadrato (nel nostro caso  $2^2 = 4$  metri quadrati) ed è la variabile dipendente (in questo esempio la costante di proporzionalità è  $= 1$ ).

In un diagramma cartesiano la relazione di proporzionalità quadratica si rappresenta con una parabola passante per l'origine.



## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

### Proporzionalità quadratica inversa

Se una quantità raddoppia, l'altra si riduce a un quarto;  
se una quantità triplica, l'altra si riduce di 9 volte;  
se una quantità dimezza, l'altra quadruplica, ecc.

Si esprime con la relazione  $y = k/x^2$ , dove: **x** è la variabile indipendente  
**y** è la variabile dipendente  
**k** è la costante di proporzionalità

Anticipiamo che in Fisica la proporzionalità quadratica inversa assume un ruolo cruciale per descrivere alcuni tra i fenomeni più importanti, quali la gravità, il campo elettrico, ecc.

### 2.2. Principali fattori di moltiplicazione

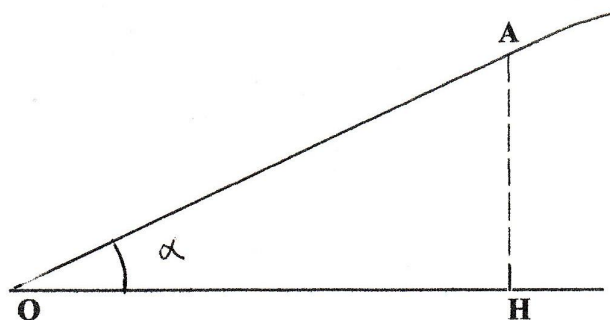
Abbrev.	Simbolo	Fattore di moltiplicazione	Per esteso	Notaz. Espon.
Kilo	<b>K</b>	1.000	Mille	$10^3$
Mega	<b>M</b>	1.000.000	Un milione	$10^6$
Giga	<b>G</b>	1.000.000.000	Un miliardo	$10^9$
Tera	<b>T</b>	1.000.000.000.000	Mille miliardi	$10^{12}$
Milli	<b>m</b>	0,001	Un millesimo	$10^{-3}$
Micro	<b>μ</b>	0,000001	Un milionesimo	$10^{-6}$
Nano	<b>n</b>	0,000000001	Un miliardesimo	$10^{-9}$
Pico	<b>p</b>	0,000000000001	Un millesimo di miliardesimo	$10^{-12}$

### 2.3. Principali funzioni trigonometriche e loro rappresentazione

Angolo retto =  $90^\circ = \pi/2$  rad.

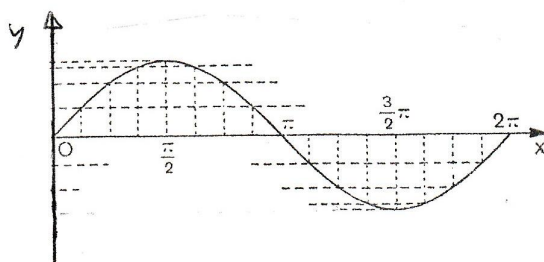
Angolo piatto =  $180^\circ = \pi$  rad.

Angolo giro =  $360^\circ = 2\pi$  rad.



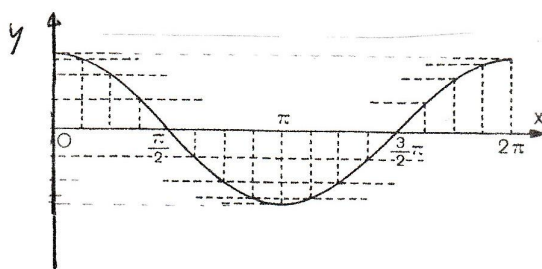
$$\sin \alpha = AH/OA$$

$$y = \sin x$$



$$\cos \alpha = OH/OA$$

$$y = \cos x$$



$$\operatorname{tg} \alpha = AH/OH$$

$\alpha$ (in gradi)	$\alpha$ (in radianti)	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$\operatorname{tg} \alpha$
0	0	0	1	0
$90^\circ$	$\pi/2$	1	0	$\infty$
$180^\circ$	$\pi$	0	-1	0
$270^\circ$	$3\pi/2$	-1	0	$\infty$
$360^\circ$	$2\pi$	0	1	0

## 2.4. Calcolo vettoriale

Il vettore è un **ente fisico** caratterizzato dai seguenti parametri:

**“Valore assoluto”** o **“modulo”** o **“valore scalare”**: indica la “grandezza” del vettore, p. es. “**25** kg”, opp. “**50** km/h”, ecc.; come vedremo, le diciture “kg” e “km/h” rappresentano rispettivamente le unità di misura della forza e della velocità, che sono entrambe vettori, e “**25**” e “**50**” ne rappresentano il rispettivo valore assoluto.

**Direzione**: indica la retta su cui si svolge l’azione rappresentata dal vettore

**Verso**: indica il verso di percorrenza lungo la retta indicante la direzione.

In simboli un vettore si rappresenta con una lettera sopralineata, p. es.  $\vec{v}$ , il suo valore assoluto si rappresenta con  $|\vec{v}|$  o più brevemente  $v$ , e lo si disegna come una “freccia” (o per meglio dire, un **segmento orientato**), dove:

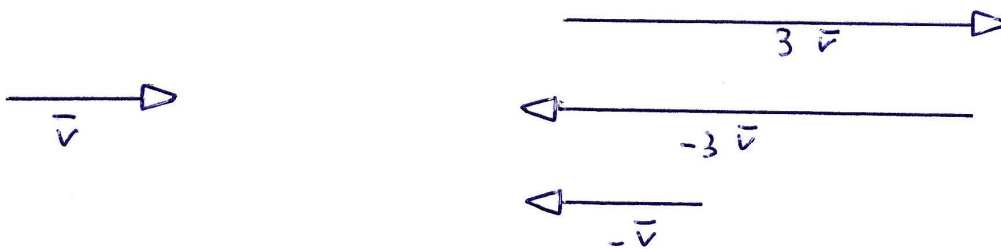
la **lunghezza** della freccia è proporzionale al modulo del vettore, in una opportuna unità di misura;  
l’**orientamento** della freccia rappresenta la direzione del vettore;  
la “**punta**” della freccia ne indica il verso.



### Moltiplicazione di un vettore per un numero

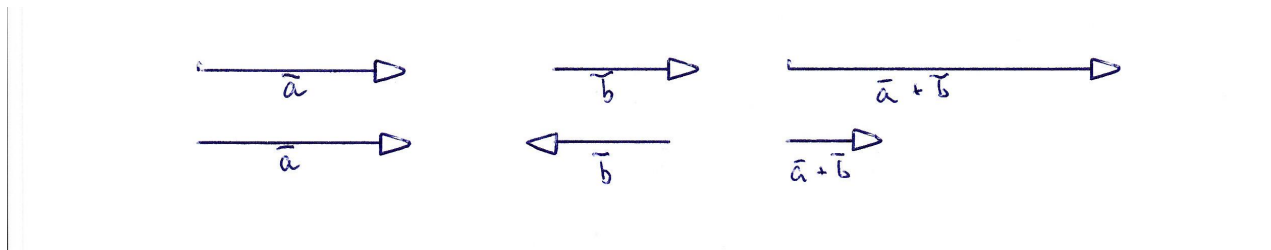
Se  $a$  è un numero qualsiasi, e  $\vec{v}$  è un vettore, il vettore  $a\vec{v}$  è un vettore che ha la stessa direzione del vettore  $\vec{v}$ , valore assoluto “ $a$ ” volte il valore assoluto del vettore  $\vec{v}$ , e verso concorde oppure opposto a quello del vettore  $\vec{v}$ , a seconda che il numero  $a$  sia rispettivamente positivo o negativo.

Ne consegue, come caso particolare, che l’opposto di un vettore  $\vec{v}$  (che si ottiene moltiplicando il vettore  $\vec{v}$  per il numero  $-1$ ) è un vettore che ha stesso modulo, stessa direzione e verso opposto del vettore  $\vec{v}$ .



## Somma di due vettori

Se i due vettori hanno la stessa direzione, il vettore somma è un vettore che ha la stessa direzione comune ai due vettori addendi e come modulo la somma o la differenza dei moduli a seconda che i vettori abbiano verso concorde od opposto rispettivamente.

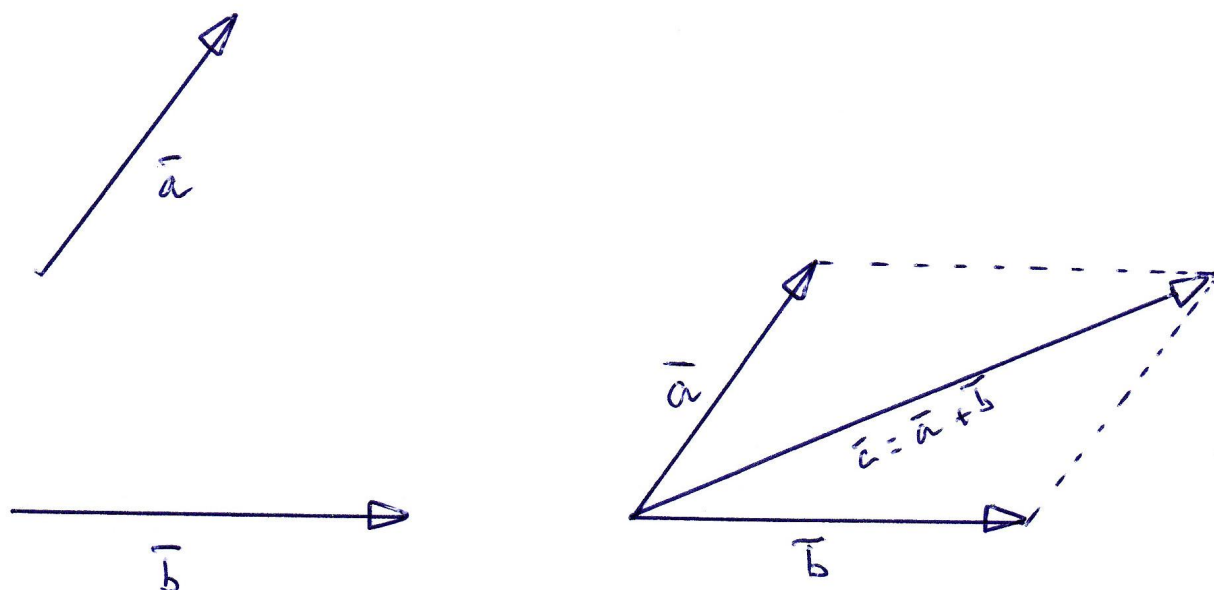


Se invece i due vettori  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$  hanno direzioni diverse occorre effettuare le seguenti operazioni:

Spostare un vettore qualsiasi dei due parallelamente a se stesso fino a farne coincidere il punto di applicazione con quello dell'altro vettore

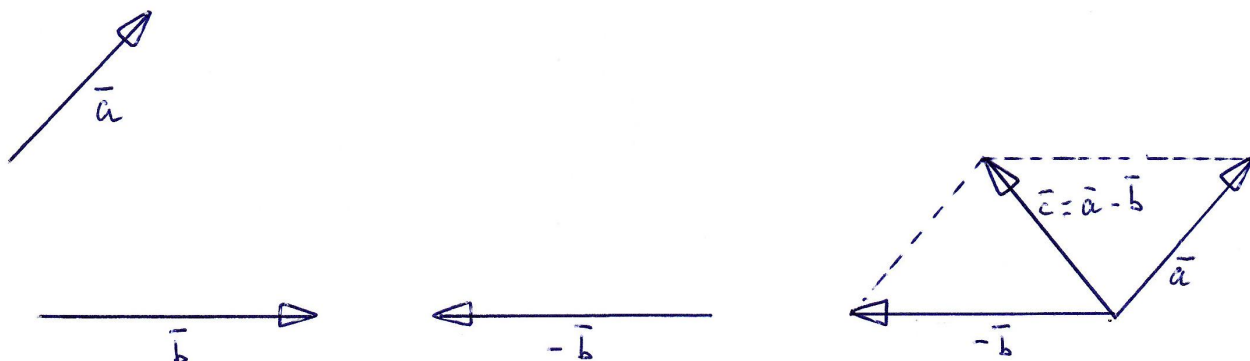
Costruire il parallelogramma avente due lati coincidenti con i due vettori

La diagonale del parallelogramma con inizio nel punto di applicazione comune dei due vettori è il vettore somma  $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$



### Differenza di due vettori

La differenza di due vettori  $\vec{a} - \vec{b}$  si ottiene sommando il vettore  $\vec{a}$  con il vettore  $-\vec{b}$ , secondo la regola detta sopra.

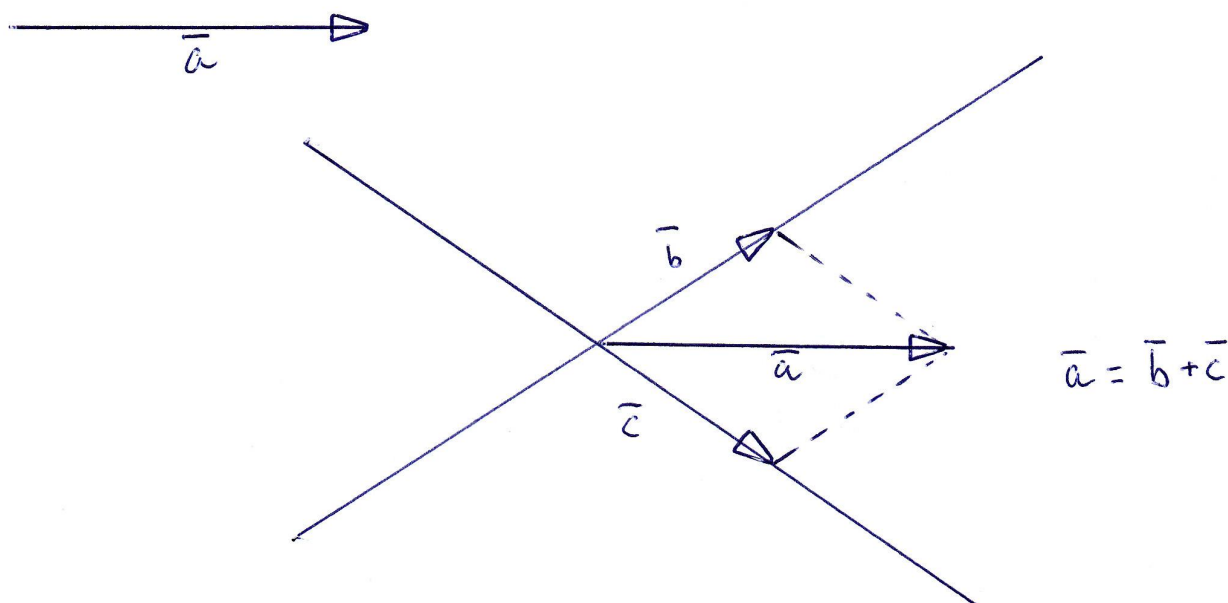


### Scomposizione di un vettore

Può capitare di dover scomporre un vettore secondo due direzioni assegnate, e cioè di dover trovare due vettori aventi le direzioni dette che sommati diano il vettore di partenza; si procede così:

Si fanno passare le due rette che rappresentano le direzioni assegnate per il punto di applicazione del vettore.

Dalla “punta” della freccia rappresentante il vettore si mandano le parallele alle rette date; i punti di intersezione con le rette (nel disegno A e B) individuano le “punte” delle frecce dei due vettori componenti che abbiamo così trovato.



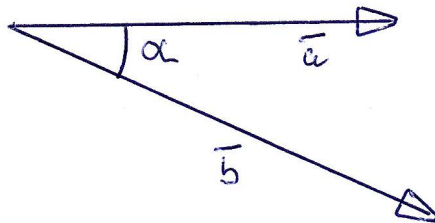
### Prodotto scalare di due vettori

Il prodotto scalare di due vettori  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$ , che si rappresenta con  $\vec{a} \cdot \vec{b}$ , oppure con  $\vec{a} \times \vec{b}$  è un **numero** dato da:

valore assoluto del vettore  $\vec{a}$  moltiplicato per il valore assoluto del vettore  $\vec{b}$ , moltiplicato per il coseno dell'angolo compreso fra le direzioni dei due vettori

si scrive:  $\vec{a} \cdot \vec{b} = a b \cos \alpha$ , dove  $\alpha$  è l'angolo detto.

Ne consegue che se due vettori sono perpendicolari fra loro, il loro prodotto scalare è nullo (ricordiamo che  $\cos(\pi/2) = 0$ ), mentre se sono paralleli il loro prodotto scalare è il prodotto dei moduli (infatti  $\cos 0 = 1$ ).



### Prodotto vettoriale di due vettori

Il prodotto vettoriale di due vettori  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$ , che si rappresenta con  $\vec{a} \wedge \vec{b}$ , è un **vettore** avente:

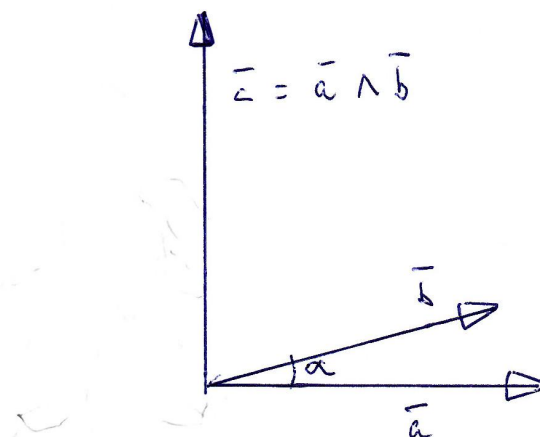
**modulo** pari al prodotto dei moduli dei due vettori moltiplicato il seno dell'angolo compreso

**direzione** la retta perpendicolare al piano individuato dalle direzioni dei vettori  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$

**verso** tale per cui un ipotetico osservatore posto coi piedi sul punto di applicazione comune e la testa sulla "punta" del vettore ottenuto veda il primo vettore ( $\vec{a}$ ) ruotare verso il secondo ( $\vec{b}$ ) in senso antiorario.

Dalla definizione consegue che:

- se due vettori sono paralleli il loro prodotto vettoriale è nullo (infatti  $\sin 0 = 0$ )
- $\vec{a} \wedge \vec{b} = - \vec{b} \wedge \vec{a}$ , cioè l'operazione di prodotto vettoriale **non è commutativa**.



### 3. UNITÀ DI MISURA

#### 3.1. Metro

Il **metro** (simbolo: **m** talvolta erroneamente indicato con **mt**) è l'unità base SI (Sistema internazionale di unità di misura) della lunghezza.

NB: Il sistema SI si indica indifferentemente anche come MKS, che sta per Metro-Kilogrammo-Secondo, e cioè le tre unità base.

In origine venne definito come 1/10 000 000 del meridiano terrestre fra il Polo Nord e l'equatore, finché, nel 1983, a Parigi, durante la 17ª Conférence générale des poids et mesures (Conferenza Generale di Pesi e Misure), venne ridefinito così:

**Un metro è definito come la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un intervallo di tempo pari a 1/299 792 458 di secondo.**

La definizione originale del metro basata sulle dimensioni della Terra viene fatta risalire al 1791, stabilita dall'Accademia francese delle scienze come 1/10 000 000 della distanza tra Polo Nord ed equatore, lungo la superficie terrestre, calcolata sul meridiano di Parigi.

Il 7 aprile 1795 la Francia adottò il metro come unità di misura ufficiale. L'incertezza nella misurazione della distanza portò l'Ufficio internazionale dei pesi e delle misure (BIPM) a ridefinire nel 1889 il metro come la distanza tra due linee incise su una barra campione di platino-iridio conservata a Sèvres presso Parigi. In Italia il metro è attuato mediante il campione dell'Istituto nazionale di ricerca metrologica di Torino, nato dall'unione dell'ex Istituto metrologico Gustavo Colonnetti (IMGC-CNR) e dell'ex Istituto elettrotecnico nazionale Galileo Ferraris (IEN).

Nel 1983, come detto, la XVII Conferenza generale di pesi e misure definì il metro come la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in 1/299 792 458 di secondo (ovvero, la velocità della luce nel vuoto venne definita essere 299 792 458 metri al secondo). Poiché si ritiene che la velocità della luce nel vuoto sia la stessa ovunque, questa definizione è più universale della definizione basata sulla misurazione della circonferenza della Terra o della lunghezza di una specifica barra di metallo e il metro campione può essere riprodotto fedelmente in ogni laboratorio appositamente attrezzato. L'altro vantaggio è che può (in teoria) essere misurato con precisione superiore rispetto alla circonferenza terrestre o alla distanza tra due punti.

Sempre grazie agli esperimenti in laboratorio, dalla fine del 1997 è stato possibile raggiungere un ordine di accuratezza dell'ordine di  $10^{-10}$  m.

#### Alcune lunghezze

Lunghezza	Equivalente in metri
Distanza media della Terra dalla più vicina delle grandi galassie (Andromeda M31)	$2 \cdot 10^{22}$
Diametro della nostra galassia	$8 \cdot 10^{20}$
Distanza media tra la Terra e la stella più vicina (Proxima Centauri, escluso il Sole)	$4 \cdot 10^{16}$
Distanza media tra la Terra e il Sole	$1,5 \cdot 10^{11}$
Raggio medio della Terra	$6,37 \cdot 10^6$
Diametro di un globulo rosso	$8 \cdot 10^{-6}$
Diametro di un atomo di ossigeno	$1 \cdot 10^{-10}$
Diametro di un protone	$2 \cdot 10^{-15}$
Diametro di un elettrone	$1 \cdot 10^{-22}$

### 3.2. Kilogrammo

Il **kilogrammo** (simbolo: **kg**) è l'unità di misura di base della massa nel Sistema internazionale di unità di misura (SI). Esso è definito come la massa del prototipo internazionale del kilogrammo.

**Il kilogrammo è la massa di un particolare cilindro di altezza e diametro pari a 0,039 m di una lega di platino-iridio depositato presso l'Ufficio internazionale dei pesi e delle misure a Sèvres, in Francia.**

Storicamente, è nato tuttavia come la massa di un litro (decimetro cubo) di acqua distillata alla temperatura di 4 °C. Il kilogrammo è pari a mille grammi (simbolo: **g**).

La conservazione del prototipo internazionale è realizzata con i più rigorosi criteri: viene utilizzato un sotterraneo blindato, per la cui apertura occorre l'uso contemporaneo di tre diverse chiavi, custodite da tre personalità del Bureau international des poids et mesures. L'apertura avviene previa autorizzazione del Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure. Le condizioni di temperatura, pressione e umidità sono costanti e si evita il contatto con la polvere tenendo il prototipo sotto tre campane di vetro. Tale prototipo viene usato per le comparazioni (circa tre volte al secolo). Altri campioni dell'unità di massa, realizzati per gli stati aderenti alla Convenzione del Metro differiscono dal capostipite per  $\pm 0,3$  mg. Sei di tali campioni servono a ricostruire il prototipo internazionale nel malaugurato caso questo dovesse divenire inservibile.

#### Definizione

Il grammo entrò a far parte del Sistema Metrico Francese il 1° agosto 1793, definito come la massa di un centimetro cubo ( $10^{-6}$  m<sup>3</sup>) di acqua alla temperatura di 3,98 °C a pressione atmosferica standard. Questa particolare temperatura venne scelta poiché per questa, l'acqua possiede la sua massima densità. Il 7 aprile 1795 fece la sua comparsa il kilogrammo, come suo multiplo (1 kg = 1000 g).

Tale definizione era difficile da realizzare accuratamente, anche perché la densità dell'acqua è legata in parte alla pressione, e l'unità di pressione include la massa tra i fattori, introducendo una dipendenza circolare nella definizione del kilogrammo.

Per evitare questo problema, il kilogrammo venne ridefinito come la massa precisa di una particolare massa standard, creata per approssimare la definizione originale e realizzata nel 1875, il prototipo internazionale del kilogrammo (Le Grand Kilo) descritto sopra. Dal 1889, il SI definisce l'unità di misura come pari alla massa di questo prototipo. Copie ufficiali del prototipo sono rese disponibili come prototipi nazionali, che vengono confrontati con il prototipo di Parigi all'incirca ogni 10 anni.

Quando, nel 1889, si confrontò il campione del kilogrammo costruito nel 1875 con il precedente campione definito tramite la massa d'acqua, ci si accorse che essi non concordavano, essendo il manufatto equivalente a 1,000 027 dm<sup>3</sup> di acqua. Alla scelta di mutare il campione del kilogrammo con un manufatto più preciso, i tecnici preferirono mantenere il campione già in uso da quattordici anni, abbandonando la definizione legata alla massa d'acqua. Inoltre, ritenuto importante il volume legato alla definizione mantenuta, si introdusse il litro come volume di acqua alla temperatura di 3,98 °C a pressione atmosferica standard di massa uguale ad un kilogrammo (una definizione soppiantata nel 1964 quando si decise di rendere il litro esattamente pari ad un decimetro cubo).

Per definizione, l'errore nella replicabilità del prototipo è pari a zero; in realtà, è valutato nell'ordine dei 2 microgrammi.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Questo risulta dalla comparazione del prototipo con le sue copie ufficiali, che sono, per quanto possibile, composte dallo stesso materiale e conservate nelle stesse condizioni. Non ci sono motivi per ritenere che il prototipo sia più o meno stabile delle copie ufficiali, la procedura di comparazione viene eseguita ogni 40 anni circa. Sembra che il kilogrammo originale abbia perso circa 50 microgrammi negli ultimi 100 anni per ragioni ancora sconosciute, per questo motivo si sta cercando di definire il kilogrammo attraverso delle leggi fisiche, e non più attraverso un campione di riferimento.

La scomodità legata all'accessibilità dei campioni unita alla loro dubbia accuratezza hanno convinto i tecnici e gli scienziati a cercare una definizione di kilogrammo maggiormente soddisfacente.

In Italia il campione del kilogrammo è conservato a Roma presso il ministero dell'industria, del commercio e dell'artigianato (Servizio Metrico).

### Proposte per la definizione futura

Il kilogrammo è l'unica tra le unità di misura SI che è definita in relazione ad un manufatto e non a una proprietà fisica. È in corso pertanto uno sforzo per introdurre una nuova definizione di kilogrammo, per mezzo di costanti fondamentali o atomiche. Ciò allo scopo di renderla maggiormente precisa e realizzabile in ogni laboratorio specializzato.

Le proposte su cui si sta lavorando sono:



Sfera campione del progetto Avogadro

- Legare la definizione di kilogrammo al numero di Avogadro. Il valore di questa costante universale è pari al numero di particelle contenute in una mole di una qualunque sostanza. La difficoltà tecnica di questo approccio è legata alla necessità di contare con precisione il numero di atomi della sostanza prescelta e quindi rendere l'incertezza con cui si conosce il numero di Avogadro minore di quella legata al kilogrammo campione attuale.
- L'utilizzo della bilancia di Watt (un apparato elettromeccanico usato per la definizione dell'ampere) per correlare il kilogrammo alla costante di Planck, ed utilizzando le definizioni di volt e di ohm.

- L'utilizzo della levitazione di un superconduttore, che mette in relazione il kilogrammo alle quantità elettriche tramite la levitazione di un corpo superconduttore in un campo magnetico generato da una spira superconduttrice, e misurando la corrente elettrica circolante nella spira.
- Da quando il valore della costante di Josephson e della costante di Von Klitzing si conoscono con sufficiente precisione, è stato proposto di ridefinire il kilogrammo come:

«Il kilogrammo è quella massa che subisce una accelerazione di  $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  se soggetta alla forza che si sviluppa tra due conduttori retti, paralleli, di lunghezza infinita e sezione circolare trascurabile, posti nel vuoto alla distanza di un metro, attraverso cui scorre una corrente elettrica costante di  $6,241\,509\,629\,152\,65 \times 10^{18}$  cariche elementari (nota: ovvero 1 Coulomb) al secondo.»

### 3.3. Secondo

Il minuto secondo (ellissi comunemente utilizzata: "secondo") è un'unità di misura del tempo ed una delle unità base del Sistema Internazionale. Il simbolo esatto è s. Talvolta viene erroneamente indicato con sec o con il simbolo ".

Il secondo è definito come la durata di 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra due livelli iperfini, da ( $F=4$ ,  $M_F=0$ ) a ( $F=3$ ,  $M_F=0$ ), dello stato fondamentale dell'atomo di cesio-133.

#### Storia

Storicamente il secondo venne definito in termini di rotazione terrestre, come 1/86400 del giorno solare medio. Nel 1956 il Comitato internazionale dei pesi e delle misure, con l'autorità datagli dalla decima Conferenza generale sui pesi e sulle misure del 1954, definì il secondo in termini di rivoluzione terrestre attorno al Sole in una particolare epoca, poiché si riconobbe che la rotazione terrestre non era sufficientemente uniforme da essere uno standard per il tempo. Il movimento della Terra venne descritto nelle Tabelle del sole di Newcomb, che fornivano una formula per il movimento del sole all'epoca 1900, basata sulle osservazioni astronomiche fatte durante il XVIII e XIX secolo. Il secondo effemeride così definito era:

**«la frazione di 1/31 556 925,9747 dell'anno tropico per lo 01 gennaio 1900 alle ore 12 tempo effemeride».**

Questa definizione venne ratificata dall'undicesima Conferenza generale sui pesi e sulle misure del 1960. Il riferimento all'anno 1900 non significa che questa sia l'epoca del giorno solare medio di 86 400 secondi. Piuttosto, è l'epoca dell'anno tropico di 31 556 925,9747 secondi in tempo effemeride. Il tempo effemeride (ET) venne definito come la misura del tempo che porta la posizione osservata dei corpi celesti, in accordo con la teoria dinamica del movimento newtoniano.

A seguito di numerosi anni di lavoro, due astronomi dello United States Naval Observatory (USNO) e due del National Physical Laboratory di Teddington (Inghilterra) determinarono la relazione tra la frequenza dell'atomo di cesio (lo standard del tempo) e il secondo effemeride. Essi determinarono il movimento orbitale della Luna rispetto alla Terra, dal quale il movimento apparente del Sole può essere riferito, in termini di tempo misurato da un orologio atomico. Come risultato, nel 1967 la tredicesima conferenza generale sui pesi e sulle misure adottò il secondo del Tempo atomico internazionale nel Sistema Internazionale come detto sopra.

Il secondo è l'unità di misura definita con maggiore accuratezza, che è attualmente nell'ordine di  $10^{-14} - 10^{-15}$

In Italia il secondo è misurato in base al campione dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, a Torino.

### 4. MECCANICA

La meccanica è la branca della fisica che studia i movimenti e le loro cause; si divide in tre grandi settori

- Cinematica
- Statica
- Dinamica

#### 4.1. Cinematica

La cinematica studia i movimenti, a prescindere dalle cause che li hanno generati.

##### Leggi del moto

Occorre premettere alcune definizioni

**Punto materiale:** corpo che si considera puntiforme in rapporto al sistema di riferimento adottato, ed i cui eventuali movimenti interni siano considerati trascurabili.

Esempi:

- Un'automobile sull'autostrada può essere considerata come punto materiale, ma non lo è se dentro il garage (è piccola rispetto all'autostrada, ma di dimensioni non trascurabili rispetto al garage); inoltre, ai fini dello studio del movimento dell'automobile, non consideriamo il movimento interno dei pistoni, ecc.
- Il pianeta Terra, certamente non piccolo, può essere considerato puntiforme se ne studiamo l'orbita intorno al Sole, ed in questo caso (ma solo in questo caso!) siamo autorizzati ad ignorarne la rotazione sul proprio asse.

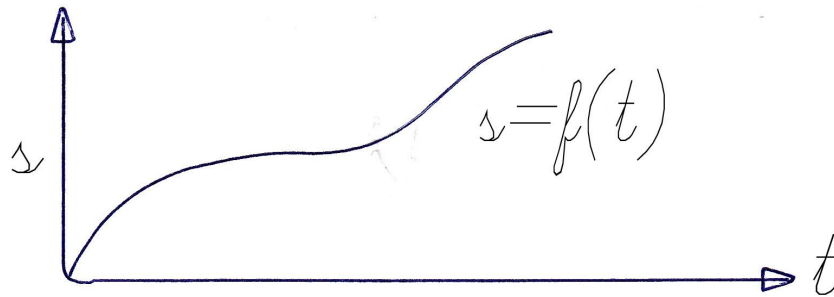
**Traiettoria:** l'insieme dei punti dello spazio progressivamente occupati dal punto materiale nel corso del suo movimento.

Esempi:

- La scia di fumo lasciata da un aereo delle "Frecce Tricolori" (a patto di considerare l'aria perfettamente immobile) rappresenta la traiettoria dell'aereo.
- La scrittura ordinaria lasciata dalla punta di una penna (purché avvenga in modo continuo e senza spazi) ne rappresenta la traiettoria.

**Legge oraria:** Quando un punto materiale si muove lungo la sua traiettoria, ne occuperà progressivamente tutti i punti, in funzione del tempo trascorso dall'inizio del movimento; si dice che lo spazio percorso è funzione del tempo impiegato a percorrerlo, e si scrive  $s = f(t)$ .

La legge oraria si rappresenta su un diagramma cartesiano, avente in ascissa il tempo ("variabile indipendente") e in ordinata lo spazio ("variabile dipendente"); l'unità di misura del tempo è il **secondo** (o suoi multipli/sottomultipli) e quella dello spazio è il **metro** (o suoi multipli/sottomultipli). La rappresentazione grafica della legge oraria prende il nome di "**diagramma orario**".



**Attenzione!:** Il diagramma orario **NON** è la traiettoria del punto materiale, ma è solo la rappresentazione grafica della legge oraria.

### Moto rettilineo

**Dicesi moto rettilineo il moto di un punto materiale che ha come traiettoria una retta.**

**Si definisce velocità media del punto materiale il rapporto fra lo spazio percorso ed il tempo impiegato a percorrerlo:  $v_{\text{media}} = s/t$ .**

Si suole anche scrivere  $v_{\text{media}} = (s_1 - s_0)/(t_1 - t_0)$ , dove:

$s_1$  e  $s_0$  sono rispettivamente il punto finale e il punto iniziale del nostro studio, e  $t_1$  e  $t_0$  il tempo finale ed il tempo iniziale.

**Per avere maggiori informazioni sul movimento è utile introdurre il concetto di velocità istantanea, che è la velocità media del punto materiale quando il tempo iniziale e il tempo finale sono molto (“infinitamente”) vicini.**

Si scrive:  $v_{\text{ist}} = \lim_{t_1 \rightarrow t_0} v_{\text{media}}$

E si legge: “La velocità istantanea è il limite della velocità media quando il tempo finale tende al tempo iniziale”.

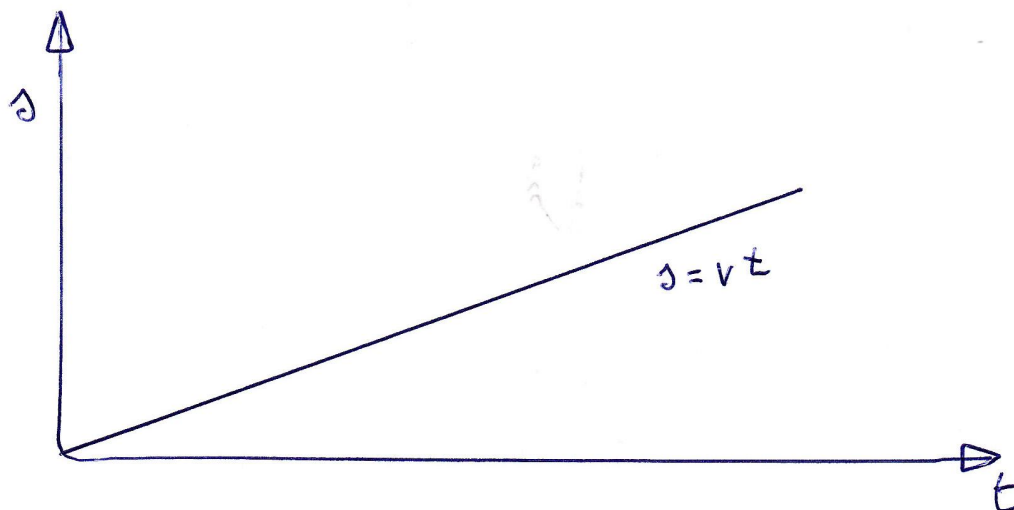
### Moto rettilineo uniforme

**Il moto rettilineo uniforme è il moto di un punto materiale che ha come traiettoria una retta e che percorre spazi uguali in tempi uguali.**

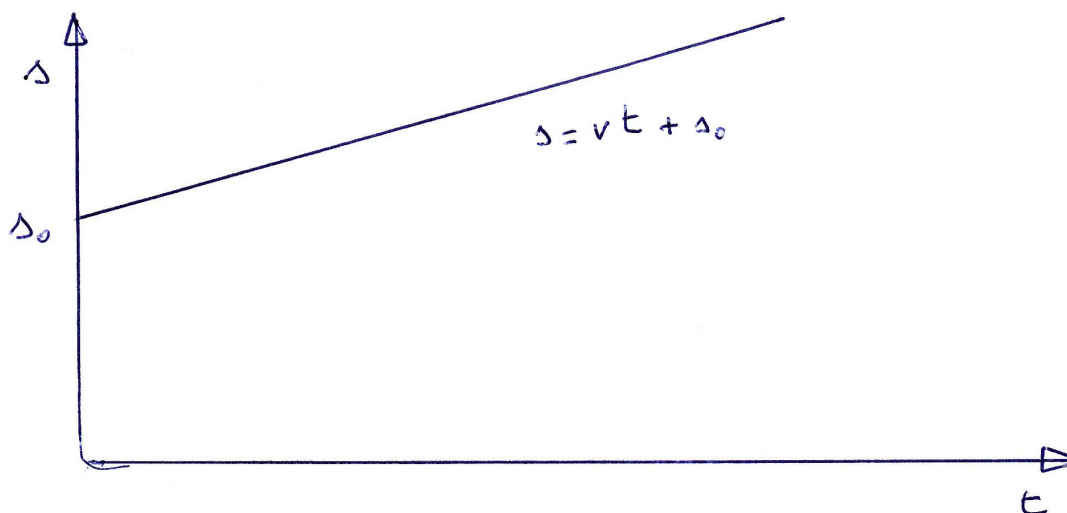
In altre parole: lo spazio percorso è direttamente proporzionale al tempo impiegato a percorrerlo (relazione di proporzionalità diretta) e la costante di proporzionalità prende il nome di **velocità**, indicata con  $v$ :  $v = \text{costante}$

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

La legge oraria è  $s = vt$ , ed il corrispondente diagramma orario sarà:



Se, al momento di iniziare lo studio del moto, il punto materiale occupava una posizione particolare (diversa da zero), indicata con  $s_0$ , la relativa legge oraria sarà  $s = vt + s_0$ , con il seguente diagramma orario:



L'unità di misura della velocità è il metro al secondo, che si scrive: **m/s**, opp. **m.s<sup>-1</sup>**

Per trasformare la velocità espressa in km/h (come siamo abituati) in m/s, e viceversa, usare la seguente tabella:

$$v \text{ (in km/h)} = v \text{ (in m/s)} \times 3,6$$

$$v \text{ (in m/s)} = v \text{ (in km/h)} / 3,6$$

es: la velocità di 30 m/s corrisponde a  $30 \times 3,6 = 108$  km/h

la velocità di 70 km/h corrisponde a  $70/3,6 = 19,5$  m/s circa

**Moto rettilineo uniformemente accelerato**

**Il moto rettilineo uniformemente accelerato è il moto di un punto materiale che ha come traiettoria una retta e la cui velocità varia (in modulo) di valori uguali in tempi uguali.**

In altre parole: la velocità è direttamente proporzionale al tempo (relazione di proporzionalità diretta) e la costante di proporzionalità prende il nome di **accelerazione**, indicata con **a**.

L'unità di misura dell'accelerazione è il metro al secondo per ogni secondo, cioè

$$[a] = \text{m/s}^2, \text{ che si può anche scrivere } [a] = \text{ms}^{-2}$$

Le leggi orarie sono:

$$a = \text{costante}$$

$$v = at + v_0$$

$$s = \frac{1}{2} at^2 + v_0 t + s_0$$

dove  $v_0$  e  $s_0$  sono rispettivamente la velocità iniziale e lo spazio iniziale.

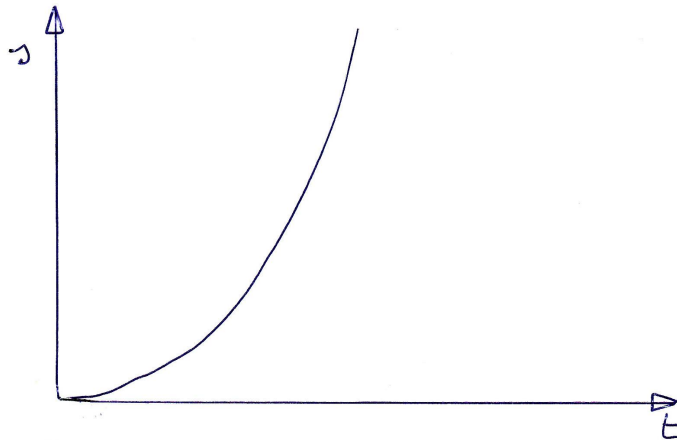
Nel caso particolare di velocità e spazio iniziali nulli la legge oraria diventa

$$s = \frac{1}{2} at^2, \text{ che è una relazione di proporzionalità quadratica.}$$

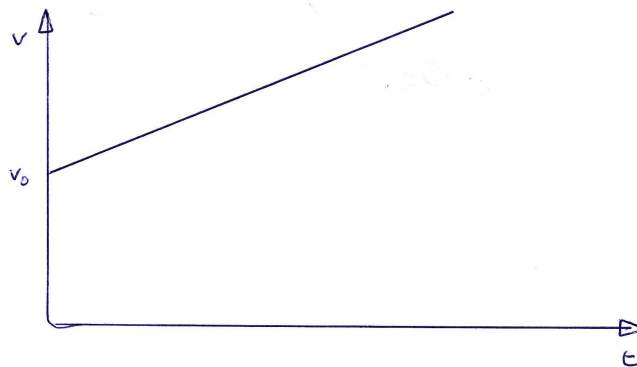
## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Vediamo alcuni diagrammi orari

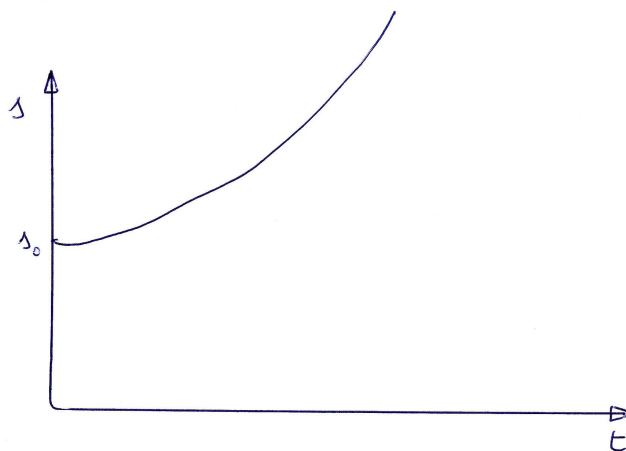
$$s = \frac{1}{2} at^2$$



$$v = at + v_0$$



$$s = \frac{1}{2} at^2 + v_0 t + s_0$$



## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Ha interesse risolvere i seguenti particolari problemi:

**Dato un corpo con velocità iniziale non nulla ( $v_0 \neq 0$ ) che subisce una accelerazione negativa (cioè una “frenata”), quanto spazio percorre prima di fermarsi.**

NB: In certi testi questo moto viene chiamato “moto uniformemente ritardato”

La legge oraria sarà:  $s = -\frac{1}{2}at^2 + v_0t$

Si può dimostrare che lo spazio percorso sarà  $s = v_0^2/2a$ , cioè esiste una relazione di **proporzionalità quadratica** fra la velocità iniziale e lo spazio occorrente per fermarsi, e la costante di proporzionalità è  $1/(2a)$ .

Da questa formula deriva la regola empirica per calcolare a mente la distanza di sicurezza dal veicolo che ci precede:

1. Osservare la propria velocità sul tachimetro, e arrotondare alla decina più vicina; p.es. 72 km/h si arrotondano in 70 km/h, 117 km/h si arrotondano a 120 km/h, ecc.
2. Togliere uno zero (70 diventa 7, 120 diventa 12, ecc.)
3. **Elevare al quadrato** (7 diventa 49, 12 diventa 144, ecc.)

Il numero così trovato rappresenta la distanza di sicurezza in metri, da calcolarsi (ovviamente) a occhio.

Qualche avvertenza: la formula è valida solo in prima approssimazione, perché non tiene conto dei seguenti fattori: stato di efficienza dei freni, stato delle gomme, stato del fondo stradale, stato e riflessi del conducente, capacità di calcolare “a occhio” le varie distanze, ecc. ecc. È importante sottolineare comunque la **proporzionalità quadratica** che c'è fra la velocità del veicolo e la distanza di sicurezza da gestire.

Un secondo problema è:

**Dato un corpo con velocità e spazio iniziali nulli, con accelerazione “a”, che velocità assume dopo aver percorso “s” metri.**

La legge del moto sarà  $s = \frac{1}{2}at^2$

Si può dimostrare che la velocità finale che assumerà il corpo dopo percorsi “s” metri sarà

$$v = \sqrt{2as}$$

Per esempio: che velocità assume al suolo un corpo che cade da **30 metri di altezza** (se consideriamo trascurabile l'attrito dell'aria)?

Vedremo più avanti che un corpo che cade sulla Terra si muove con moto uniformemente accelerato con **a = accelerazione di gravità**, che si indica con “g”, ed ha il valore approssimativo

$$g = 9,8 \text{ ms}^{-2}$$

Sostituendo nella formula  $v = \sqrt{2 \times 9,8 \times 30} \approx 24,2 \text{ ms}^{-1} \approx 87,3 \text{ km/h}$

Ultimo problema:

**Sul depliant di un'automobile dal concessionario leggiamo: "Da 0 a 100 km/h in 7 secondi". Calcoliamone l'accelerazione.**

$$100 \text{ km/h} = 100/3,6 \approx 27,8 \text{ ms}^{-1}$$

$$a = v/t = 27,8/7 \approx 4 \text{ ms}^{-2}$$

Naturalmente abbiamo supposto che in tutto il processo l'accelerazione si mantenga costante, ma questa è solo un'approssimazione.

Sta di fatto che un'accelerazione di  $4 \text{ ms}^{-2}$  corrisponde a poco meno della metà dell'accelerazione di gravità che abbiamo visto sopra, e questo significa che accelerando da 0 a 100 km/h in 7 secondi il nostro peso aumenta di poco meno del 40%.

### Moto circolare uniforme

**Dicesi moto circolare uniforme il moto di un punto che si muove su di una traiettoria circolare di raggio  $r$  con velocità che si mantiene costante in valore scalare.**

La velocità del punto prende anche il nome di **velocità periferica**.

Il tempo impiegato dal punto a percorrere una circonferenza è chiamato **periodo** e si indica con **T**. Ricordando che la legge oraria del moto rettilineo uniforme  $v = s/t$ , e tenendo presente che nel caso del moto circolare uniforme è  $s = 2\pi r$  e  $t = T$ , la legge oraria di tale moto è

$$v = 2\pi r/T \quad (1)$$

È utile introdurre il concetto di **velocità angolare**, definita come il rapporto fra l'angolo descritto dal punto ed il tempo impiegato a descriverlo:

$$\omega = 2\pi/T \quad (2)$$

( $2\pi$  è l'angolo giro espresso in radianti).

Dalle relazioni (1) e (2) si ricava l'espressione della velocità periferica in funzione della velocità angolare e del raggio:

$$v = \omega r \quad (3)$$

Si definisce la **frequenza** come il numero di giri nell'unità di tempo e si indica con la lettera **f**.

$$f = 1/T \quad (4)$$

Dalle relazioni (2) e (4) si ricava  $\omega = 2\pi f$

L'unità di misura della frequenza è il numero di giri in un secondo e prende il nome di **Hertz**, abbreviato con **Hz**

Ricordiamo infine che la velocità è un vettore, e che nel moto circolare uniforme la velocità, pur mantenendosi costante in modulo, cambia continuamente direzione, e pertanto è presente in ogni momento una accelerazione, che prende il nome di **accelerazione centripeta**, indicata con **a<sub>c</sub>**.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Si può dimostrare che:

- la direzione dell'accelerazione centripeta è la retta che congiunge il punto materiale con il centro della circonferenza;
- il suo verso è dal punto verso il centro;
- il suo modulo è dato da:  $\mathbf{a_c} = \omega^2 \mathbf{r}$ , o anche, ricordando la (3):

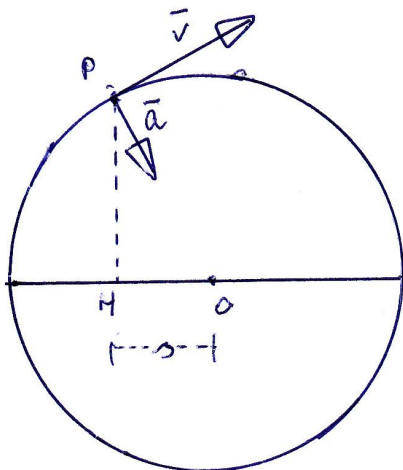
$$\mathbf{a_c} = \mathbf{v^2/r}$$

Si osserva una relazione di **proporzionalità quadratica** fra l'accelerazione centripeta e la velocità periferica.

### Moto armonico

Sia dato un moto circolare uniforme, e sia AB un diametro qualsiasi della circonferenza, di centro O, che costituisce la traiettoria del moto.

**Si dice moto armonico il movimento della proiezione H su AB del punto materiale P che percorre il moto circolare.**

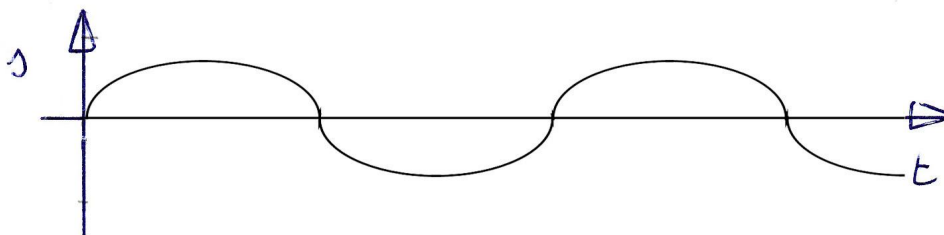


Si dimostra che l'accelerazione è  $\mathbf{a} = -\omega^2 \mathbf{s}$  dove s è la distanza HO.

Dal grafico si può vedere che:

- la velocità è massima nel centro O e nulla negli estremi A e B
- viceversa, l'accelerazione è massima negli estremi A e B, e nulla nel centro O

Il diagramma orario è il seguente:



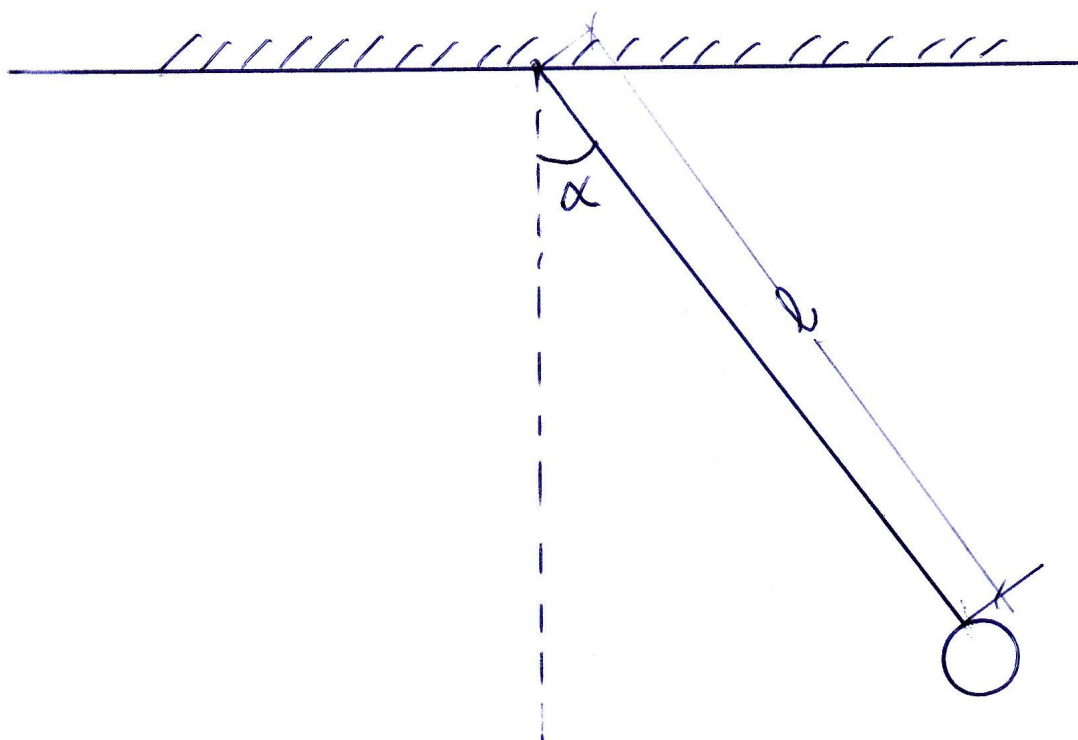
### Il pendolo

Il pendolo è un punto materiale costretto a muoversi lungo una traiettoria circolare in presenza di gravità. Di solito si realizza il semplice dispositivo di connettere il punto materiale a un filo di massa trascurabile vincolato superiormente (p. es. al soffitto).

Per il pendolo si stabiliscono (si possono dimostrare) le seguenti due caratteristiche fondamentali:

- Il piano di oscillazione del pendolo rimane costante; questa caratteristica è la base del famoso esperimento di Foucault volto a dimostrare la rotazione della Terra (v. più avanti);
- le piccole oscillazioni sono isocrone, cioè avvengono nella stessa durata di tempo, a prescindere dalla loro ampiezza, purché piccola ( $\alpha \leq 10^\circ$ ); più precisamente, se  $l$  è la lunghezza del pendolo, e  $g$  è l'accelerazione di gravità, il periodo  $T$  di una oscillazione è dato dalla formula:

$$T = 2\pi \sqrt{l/g}$$



### Il pendolo di Foucault



Da oltre 200 anni Copernico e Galileo avevano dimostrato che era la Terra a ruotare attorno al Sole, e non viceversa; ma fino alla metà dell'Ottocento (mentre si stava “facendo” l'Italia) c'era ancora chi non riusciva a credere che la stessa Terra ruotasse anche su se stessa. Ci volle lo storico esperimento di un fisico francese, **Leon Foucault**, per darne la prova tangibile, esattamente **l'8 Gennaio 1851**, utilizzando un grande pendolo, dotato di massa elevata. Foucault lo mise in moto e constatò che il piano di oscillazione del pendolo variava progressivamente rispetto alla Terra. Poiché il piano di oscillazione del pendolo è fisso, il fisico francese ne dedusse che in realtà è la Terra a ruotare rispetto ad esso. Semplice ed ingegnoso. Eppure un altro scienziato fiorentino, il matematico **Vincenzo Viviani**, compiendo lo stesso esperimento nel 1661, non aveva voluto arrendersi all'evidenza, ed aveva preferito postulare “ignote cagioni” capaci di far ruotare l'asse del pendolo rispetto alla Terra.



Leon Foucault

Lo stesso Foucault ripeté l'esperimento in pubblico, il Marzo successivo, facendo oscillare all'interno del **Pantheon di Parigi** un pendolo di 67 metri, con una massa di 28 chili, ed un'ampiezza di oscillazione di 6 metri. Il “**Pendolo di Foucault**” (l'esperimento prese immediatamente il suo nome) ebbe una vasta eco in tutto il mondo, ed in diverse località della Terra (anche a Bologna) vennero organizzate dimostrazioni simili, che ovviamente confermarono la tesi del fisico francese: la Terra ruota su se stessa! (almeno questa volta non furono necessari roghi ed abiure per affermarlo, come era accaduto per l'eliocentrismo avversato per secoli dalla Santa Inquisizione).

Foucault lavorò ancora sulle proprietà del pendolo, giungendo anche a gettare le basi per la realizzazione del “giroscopio” (poi sviluppato concretamente da **Sperry**), uno strumento in grado di mantenere fisso il suo piano di rotazione, destinato a diventare di grande utilità nella navigazione aerea e marittima. Su principio del giroscopio si basa anche la navigazione automatica delle sonde spaziali.

### Isocronismo del pendolo semplice

L'isocronismo (dal greco **isos** uguale e **kronos** tempo) del pendolo è quel fenomeno per cui le sue oscillazioni si svolgono tutte nello stesso tempo, a prescindere dalla loro ampiezza.

La legge dell'isocronismo del pendolo fu formulata da Galileo Galilei prima del 1592, in seguito ad una serie di osservazioni, condotte nella Cattedrale di Pisa, sull'oscillazione di una lampada votiva. Nella Cappella Aulla (vedi figura) del Camposanto Monumentale di Pisa, si può oggi osservare questa lampada che costituì in seguito il modello per i suoi studi sul pendolo.



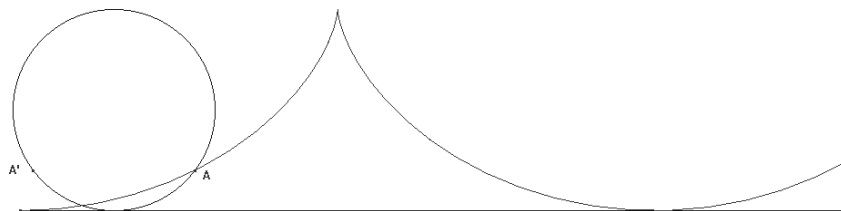
Il tutto, secondo la leggenda, avvenne causalmente: vedendo la lampada che, mossa dall'intervento di accensione, continuava ad oscillare lentamente, Galileo misurò il tempo di oscillazione utilizzando il battito del polso.

Galileo in questo modo constatò che le oscillazioni della lampada avvenivano nello stesso tempo e indipendentemente dall'ampiezza delle stesse, quindi erano isocrone.

In realtà le oscillazioni del pendolo non sono esattamente isocrone; se si superano i  $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$ , il tempo che occorre per compiere un'oscillazione completa dipende dall'ampiezza della stessa, ed è tanto maggiore quanto più essa è ampia. Solo per oscillazioni piccole ( $< 10^{\circ}$ - $15^{\circ}$ ) il tempo si può considerare quasi costante, e sono queste che si sfruttano negli orologi a pendolo, dove il peso che oscilla descrive un arco di circonferenza.

In questo contesto i fisici successivi a Galileo si posero la seguente domanda: lungo che tipo di curva, che non sia una circonferenza, bisogna fare oscillare un pendolo in modo che le oscillazioni siano perfettamente isocrone per qualsiasi angolo di oscillazione?

La risposta è lungo la cicloide, che è la curva descritta da un punto (A in figura) di una circonferenza che rotola (verso destra in figura) lungo un piano orizzontale.



Per spiegare perché la cicloide sia la curva cercata eseguiamo il seguente esperimento.

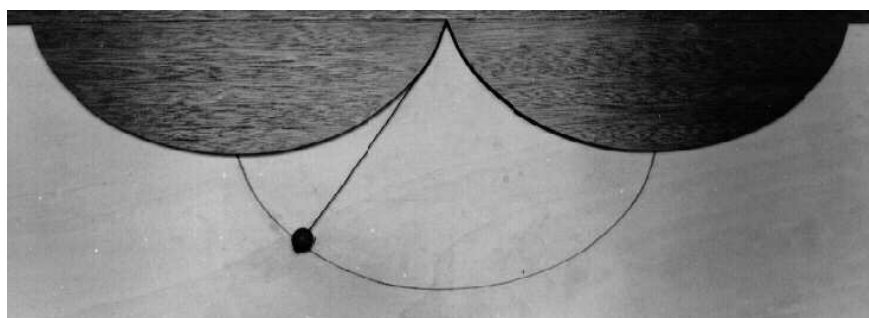
Mettiamo due palline su di un profilo sagomato a forma di cicloide, in modo che abbiamo due altezze diverse rispetto ad un piano orizzontale e lasciamole cadere contemporaneamente. Osserveremo che esse si urteranno esattamente nel punto più basso, anche se sono partite da altezze diverse.

L'analisi di questi risultati ci porta a concludere che la pallina impiega lo stesso tempo a percorrere l'arco grande e quello piccolo, segno che le oscillazioni (in realtà le semioscillazioni) delle due palline sono isocrone. Questo non accade se il profilo ha la forma di una circonferenza, infatti, in tal caso, la pallina che cade da un'altezza più bassa arriva prima dell'altra sul fondo.

Questa caratteristica della cicloide ci porta a definirla come la curva brachistocrona, cioè la curva del tempo più corto (dal greco **brachistos** il più corto e **kronos** tempo).

Si dimostra che, se vogliamo costruire un orologio a pendolo esattamente isocrono per qualsiasi angolo di oscillazione, occorre che il peso oscilli lungo una cicloide. Ma come è possibile obbligare il peso a muoversi lungo questa curva senza farlo strisciare su una guida a forma di cicloide, dove l'attrito condizionerebbe eccessivamente il moto?

Per fare ciò ci serviremo di un "trucco": invece di lasciare il peso libero di oscillare ne condizioneremo la traiettoria, facendo in modo che il filo, durante l'oscillazione del pendolo, si adagi sui due profili di legno (vedi figura alla pag. seguente).

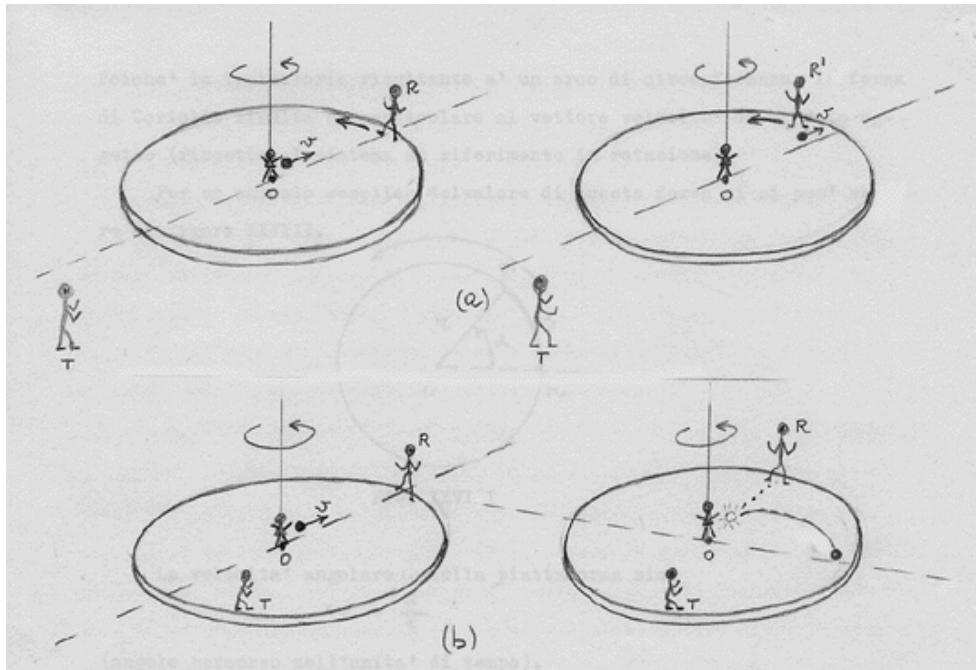


Occorrerà, però, sagomare questi profili in modo che formino una cicloide, solo in questo caso l'oscillazione sarà isocrona per qualsiasi angolo.

Il pendolo cicloidale è un tipo di pendolo ideato da Huygens intorno al 1659 con una peculiare proprietà: le sue oscillazioni sono isocrone indipendentemente dalla loro ampiezza. Huygens, infatti, dimostrò che un punto materiale che oscilla seguendo una traiettoria cicloidale sotto l'azione della gravità ha un periodo costante che dipende unicamente dalle dimensioni della cicloide.

## La forza di Coriolis

Mettiamoci su di un sistema ruotante. Già sappiamo che su di un tale sistema dobbiamo tener conto di una forza che non compare nei sistemi inerziali, quella centrifuga. Oltre alla forza centrifuga ve ne è ancora un'altra da dover considerare, quella, appunto, di Coriolis o forza centrifuga composta (lo scienziato francese G.G. Coriolis - 1792/1843 - sviluppò le sue ricerche tra il 1832 ed il 1835 e le pubblicò sul *Journal de l'École polytechnique*). Per capire di cosa si tratta riferiamoci alla figura.



In (a) l'osservatore T si trova fuori della piattaforma. Ad un dato istante il signor O, che si trova sulla piattaforma, lancia una palla ad R, anch'esso sulla piattaforma. T vede che, quando la palla è arrivata nel punto che all'istante del lancio occupava R, quest'ultimo occupa una posizione più avanzata, di modo che la palla non raggiunge R. In (b) l'osservatore T si trova sulla piattaforma. La piattaforma in rotazione non modifica le posizioni relative di T, O ed R. Quando O lancia la palla verso R, allo stesso modo di prima, la palla non raggiungerà R; solo che ora R è fermo rispetto a T e T non potrà far altro che concludere che la palla lanciata da O ha seguito la traiettoria indicata in figura.

La forza di Coriolis, che compare solo su oggetti in moto su sistemi in rotazione, è la forza responsabile della deviazione della traiettoria di un oggetto dalla sua traiettoria inerziale (occorre notare che su oggetti immobili in sistemi in rotazione, per un osservatore su uno di questi sistemi, agisce solo la forza centrifuga). Poiché la traiettoria risultante è un arco di circonferenza, la forza di Coriolis risulta perpendicolare al vettore velocità di un dato oggetto (rispetto al sistema di riferimento in rotazione).

Fu F. Reich (1799 - 1882) che nel 1833 verificò per primo quanto trovato da Coriolis. Facendo cadere grosse masse in un pozzo verticale, profondo 158 m, trovò delle deviazioni dalla verticale di 28 mm verso est. Questo fatto basta per riconoscere la non inerzialità del sistema Terra (si tenga conto che, poiché la Terra è una sfera in rotazione, e non una piattaforma, il fenomeno di deviazione avviene sia per moti che si svolgono sulla superficie della Terra, sia per moti di caduta dei corpi).

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Con la forza di Coriolis si possono spiegare altri svariati fenomeni tra cui:

- i cicloni osservati dai satelliti hanno verso antiorario nel nostro emisfero ed orario in quello australe, cosa che vale anche per le correnti marine (e cosa che accade anche per il vortice che l'acqua fa uscendo dallo scarico di un lavandino);
- i venti alisei vengono deviati verso occidente;
- nel nostro emisfero le rive destre dei fiumi e le rotaie destre (rispetto al verso del moto) sono le più consumate;
- se si spara a grande distanza su un bersaglio, senza tener conto della deviazione di Coriolis, non lo si colpisce;
- la famosa esperienza (1851) del pendolo di Foucault.

Dell'effetto di Coriolis, infine, occorre tenere conto negli spostamenti in aeroplano; per es., nel caso di un velivolo che dal Polo Nord diriga verso l'Equatore volendo mantenere fissa la propria direzione lungo un meridiano: mentre l'aereo è in volo, la Terra ruota di un certo angolo verso est, il che lo porterebbe ad atterrare in un punto a ovest del luogo previsto, se il pilota non modificasse la traiettoria.

### VERO O FALSO

*(In questa e nelle prossime sezioni di “Vero o falso” dire se le affermazioni che seguono sono vere oppure false, provvedendo nel secondo caso a rettificarle).*

1. Nel moto uniformemente accelerato la velocità è proporzionale allo spazio percorso.
2. L'accelerazione in un moto circolare uniforme è nulla.
3. Nel moto rettilineo uniforme la distanza percorsa da un punto materiale dopo un intervallo di tempo  $t$  da che è partito è data da  $vt$ , essendo  $v$  la velocità.
4. Tutti i punti di un disco animato da moto circolare uniforme hanno la stessa velocità.
5. La distinzione tra stato di moto e stato di quiete di un corpo dipende dal sistema di riferimento
6. L'accelerazione in un moto circolare uniforme è diretta tangenzialmente alla circonferenza
7. Non esiste alcun moto di un punto materiale in cui l'accelerazione è sempre perpendicolare alla velocità.
8. Velocità e accelerazione sono entrambe grandezze vettoriali
9. Per spostamento di un punto materiale da  $P_0$  a  $P_1$  si intende il vettore  $P_0-P_1$  qualunque sia il cammino seguito dal punto per andare da  $P_0$  a  $P_1$ .
10. Il pendolo di Foucault serve a dimostrare che per un corpo in rotazione diminuisce l'attrazione esercitata su di esso dalla Terra.

## 4.2. Statica

La Statica è il ramo della Meccanica che studia le forze e i loro equilibri. A differenza della Cinematica, dove i corpi sono considerati “punti materiali” (v.), nella Statica si considerano i corpi così come sono fatti nella realtà, cioè dotati di estensione spaziale, forma, ecc.

### Le forze

Fatti salvi gli approfondimenti che saranno illustrati in Dinamica, introduciamo il concetto di forza nel modo seguente:

**La Forza è quell'ente fisico che imprime ad un corpo di massa  $m$  un'accelerazione  $a$ , secondo la regola (2° principio della Dinamica):**

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

La forza è un **vettore**, caratterizzato da modulo, direzione, verso.

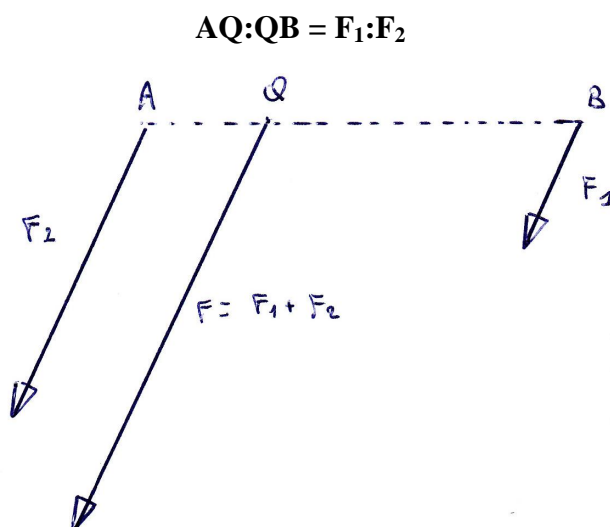
L'unità di misura delle forze nel sistema MKS è il **Newton**, che si indica con **N**, e si definisce come quella forza che imprime ad un corpo di massa **1 Kg<sub>m</sub>** l'accelerazione di **1 ms<sup>-2</sup>**

L'unità di misura delle forze più comunemente usata è il **Kg<sub>p</sub>**, definita come quella forza che imprime ad un corpo di massa **1 Kg<sub>m</sub>** l'accelerazione  **$g \approx 9,8 \text{ ms}^{-2}$**

$$1 \text{ Kg}_p \approx 9,8 \text{ N}$$

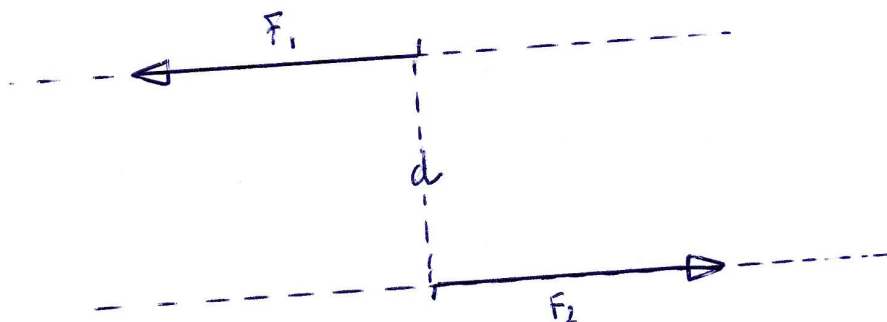
### Composizione di due forze parallele

Siano date due forze  **$\mathbf{F}_1$**  e  **$\mathbf{F}_2$** , aventi direzioni parallele, verso concorde e punti di applicazione rispettivamente **A** e **B**; si può dimostrare che la forza risultante ha modulo  **$\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$** , direzione parallela alle due forze componenti, verso concorde, e punto di applicazione **Q** tale per cui (v. disegno)



## Coppia e momento

Siano date due forze  $\mathbf{F}_1$  e  $\mathbf{F}_2$ , aventi moduli uguali ( $F$ ), direzioni parallele e versi opposti, e sia  $d$  la distanza fra le rette d'azione delle forze stesse (v. disegno). Il sistema delle due forze così definite prende il nome di **coppia**.



Si definisce momento scalare  $M$  della coppia il prodotto  $M = Fd$

L'unità di misura del momento è il **Newton per metro (Nm)**.

L'unità di misura più comunemente usata è il **Kilogrammetro (Kgm)**

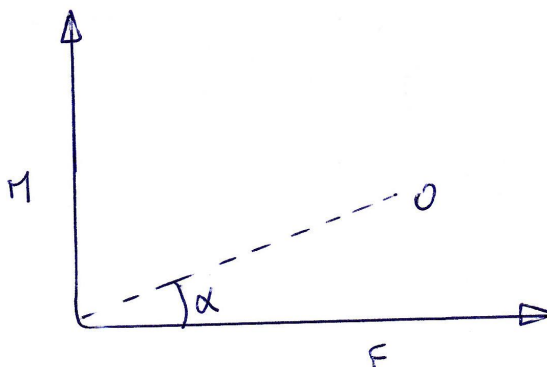
$$1 \text{ Kgm} \approx 9,8 \text{ Nm}$$

L'**asse momento** è un **vettore** di modulo uguale al momento scalare della coppia, direzione perpendicolare al piano individuato dalla coppia, e verso tale per cui un osservatore posto in coincidenza con l'asse momento vede la rotazione determinata dalla coppia avvenire in senso **antiorario**.

## Momento di una forza

Sia data una forza  $\mathbf{F}$  avente punto di applicazione  $\mathbf{P}$ , e sia  $\mathbf{O}$  un punto qualsiasi. Si definisce momento  $\mathbf{M}$  della forza  $\mathbf{F}$  rispetto al punto  $\mathbf{O}$  il prodotto vettoriale  $\mathbf{M} = \mathbf{F} \wedge \mathbf{PO}$ .

Il vettore momento  $\mathbf{M}$  ha il modulo  $|\mathbf{M}| = |\mathbf{F}| \cdot \mathbf{PO} \cdot \sin\alpha$



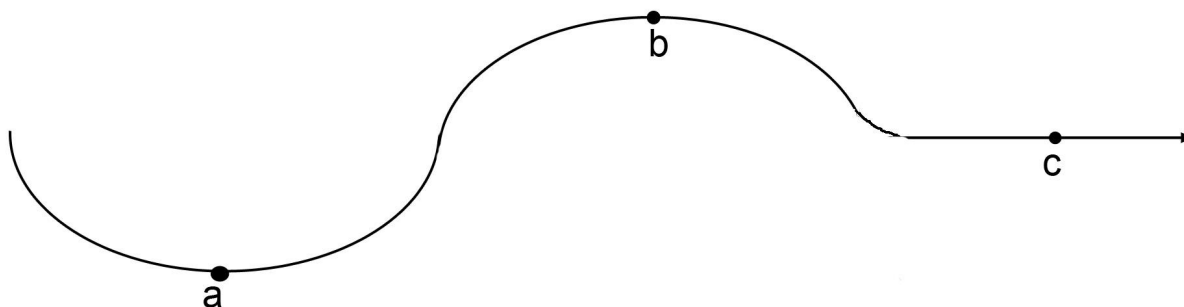
### Equilibrio

Un corpo si dice in equilibrio quando:

- la risultante di tutte le forze applicate al corpo è nulla
- il momento risultante di tutte le forze, rispetto ad un punto qualsiasi, è nullo

Tradizionalmente si individuano tre tipologie di equilibrio:

- Equilibrio **stabile**: quando il corpo, spostato di poco rispetto alla posizione di equilibrio, tende a ritornarvi (pos. A nel disegno)
- Equilibrio **instabile**: quando il corpo, spostato di poco rispetto alla posizione di equilibrio, tende ad allontanarsene (pos. B nel disegno)
- Equilibrio **indifferente**: quando il corpo, spostato di poco rispetto alla posizione di equilibrio, tende a restare nella nuova posizione (pos. C nel disegno)



### Il baricentro

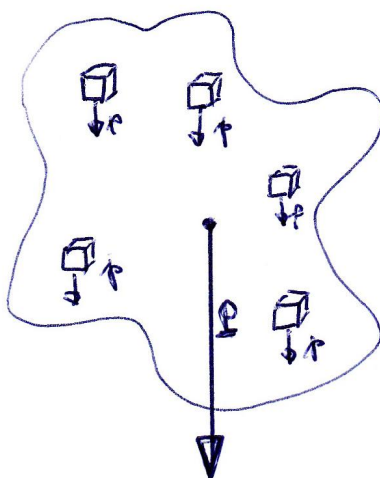
Sia dato un corpo esteso (= non puntiforme), dotato di massa  $M$ , posto in un campo gravitazionale, e quindi di peso  $P$ .

Scomponiamo (idealmente) il corpo in tanti corpuscoli puntiformi; su ciascuno di essi agirà una forza peso  $p$ .

Sommiamo tutte le forze peso, ed otteniamo che:

- la somma di tutte le forze peso  $p$  sarà, ovviamente, il peso del corpo  $P$
- il punto di applicazione si trova applicando ripetutamente le legge di composizione delle forze parallele

Il punto di applicazione della risultante si definisce **baricentro**.

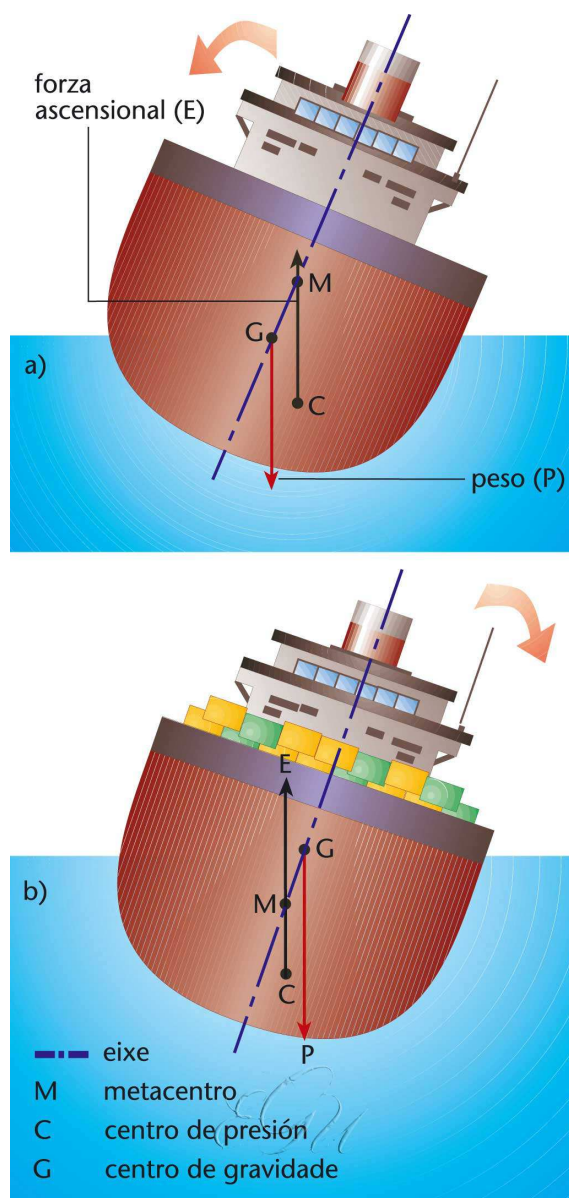


Trovare in pratica il baricentro di un corpo non è facile, e richiede di norma calcoli sofisticati; è abbastanza agevole trovare il baricentro di un corpo omogeneo e simmetrico, perché coincide con il centro di simmetria.

P. es.

- Il baricentro di una sfera (p. es. una biglia) è il centro della sfera
- Il baricentro di una lamina quadrata è il punto di incontro delle diagonali
- Il baricentro di un cilindro (p. es. una lattina di bibita) è il punto di mezzo dell'asse del cilindro
- Ecc.

## Il metacentro

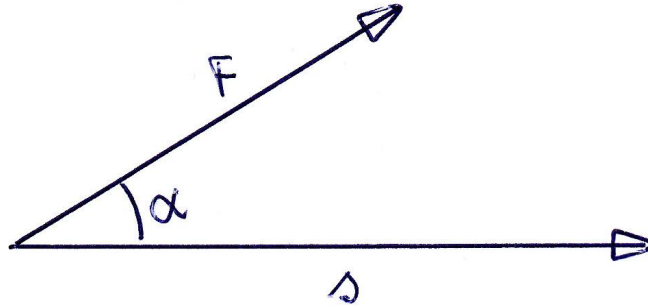


Il metacentro è il punto di applicazione della risultante delle forze di spinta di galleggiamento di un natante, dovute al principio di Archimede. A differenza del baricentro, che in un dato corpo ha una posizione costante, la posizione del metacentro varia in funzione della porzione del natante che è sommersa di volta in volta. Il calcolo della posizione del metacentro (in tutte le condizioni ambientali ipotizzabili) costituisce uno degli aspetti più importanti dell'ingegneria navale.

## Il lavoro

Si dice lavoro di una forza  $\mathbf{F}$ , e si indica con  $\mathbf{L}$ , il prodotto scalare della forza per lo spostamento subito dal corpo

$$\mathbf{L} = \mathbf{F} \times \mathbf{s} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s} \cdot \cos \alpha$$



Dalla definizione si deduce che:

- Se la forza è **parallela** allo spostamento il lavoro è il **prodotto della forza per lo spostamento**
- Se la forza è **perpendicolare** allo spostamento il lavoro è **nullo**.

L'unità di misura del lavoro nel sistema MKS è il **Joule (J)**, che si definisce come il lavoro della forza di **1 N** per lo spostamento di **1 m**

Nella pratica si usa come unità di misura il **Kilogrammetro (Kgm)**, che si definisce come il lavoro della forza di **1 Kg** per lo spostamento di **1 m**

Essendo  $1 \text{ Kg} \approx 9,8 \text{ N}$ , si ha che  **$1 \text{ Kgm} \approx 9,8 \text{ J}$**

## La potenza

Si definisce **potenza** il lavoro svolto nell'unità di tempo

$$\text{Potenza} = \text{lavoro}/\text{tempo} \text{ e quindi } \text{Lavoro} = \text{potenza} \times \text{tempo}$$

L'unità di misura della potenza è il **Watt (W)**, definito come il lavoro di **1 J** svolto in **1 s**:

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

Unità di potenza più comunemente usate nella pratica sono:

il **Kilowatt (KW)**, equivalente a 1000 W e il **cavallo vapore (CV, o in inglese HP)**, equivalente a **75 Kgm/s**

Un'altra unità di misura del lavoro usata in pratica è il **Kilowattora (KWh)**, che è la potenza di **1 KW (=1000W)** applicata per un'ora, per cui

$$1 \text{ KWh} = 1000 \times 3600 \text{ J} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$$

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

La tabella che segue, ricavata in base a semplici calcoli, riassume i fattori di conversione fra le varie unità di misura della potenza.

	W	KW	Kgm/s	HP
W	1	1000	$\approx 9,8$	
KW	$10^{-3}$	1	$\approx 9,8/1000$	$\approx 0,735$
Kgm/s	$\approx 1/9,8$		1	75
HP		$\approx 1,36$	1/75	1

### Macchine semplici

Le macchine semplici sono dispositivi elementari che servono ad equilibrare due forze, di solito di differente intensità: la forza agente, che prende il nome di **potenza** e si indica con **P**, e la forza resistente, che per l'appunto prende il nome di **resistenza** e si indica con **R**.

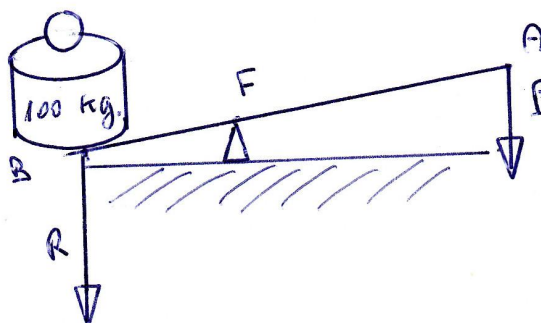
**Attenzione:** questi nomi hanno un'origine storica, e non hanno nulla a che vedere con la “potenza” vera e propria, che è, come abbiamo visto, il lavoro nell'unità di tempo, né con la “resistenza” che è una quantità elettrica.

### La leva

Si dice leva un corpo rigido (generalmente di forma oblunga, tipicamente una sbarra), di massa trascurabile e girevole intorno ad un asse fisso, detto **fulcro**.

Serve, come tutte le macchine semplici, per equilibrare le due forze, di solito di intensità differente: la **resistenza (R)** e la **potenza (P)**.

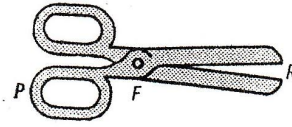
La distanza tra il punto di applicazione della resistenza dal fulcro si chiama **braccio della resistenza**, ed analogamente la distanza tra il punto di applicazione della potenza dal fulcro si chiama **braccio della potenza** (v. figura).



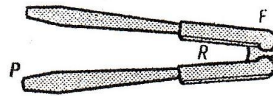
## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Tradizionalmente le leve si dividono in tre generi, a seconda di quale elemento sia posto in mezzo:

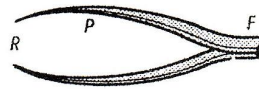
- leva di **primo genere**, dove in mezzo c'è il **fulcro**;
- leva di **secondo genere**, dove in mezzo c'è il **punto di applicazione della resistenza**;
- leva di **terzo genere**, dove in mezzo c'è il **punto di applicazione della potenza**



Leva di primo genere



Leva di secondo genere



Leva di terzo genere

Affinché la leva sia in equilibrio è sufficiente che siano eguali il momento della potenza ed il momento della resistenza rispetto al fulcro (v. figura):

$$AF \wedge P = BF \wedge R \text{ o anche}$$

$$AF : R = BF : P$$

**Una leva si dice vantaggiosa quando la potenza applicata è minore della resistenza, e viceversa si dice svantaggiosa quando la potenza applicata è maggiore della resistenza.**

Dalla relazione sopra, si deduce che una leva è vantaggiosa quando il braccio della potenza è maggiore del braccio della resistenza, e viceversa.

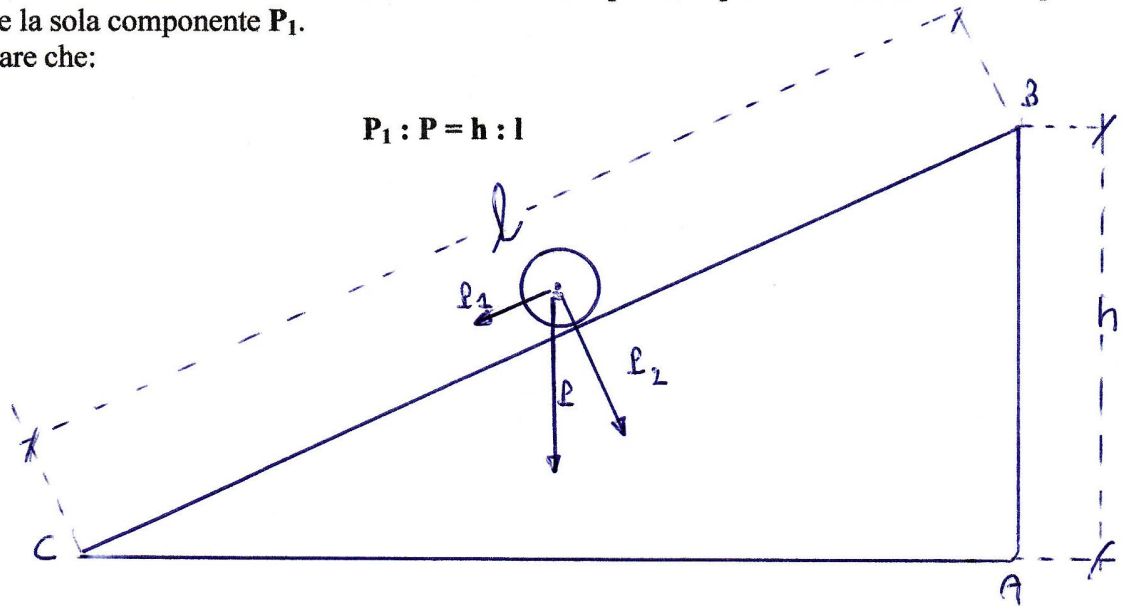
In conclusione:

- La leva di **primo genere** può essere **vantaggiosa, svantaggiosa o indifferente** a seconda della posizione del fulcro rispetto ai punti di applicazione della potenza e della resistenza;
- la leva di **secondo genere** è sempre **vantaggiosa**;
- la leva di **terzo genere** è sempre **svantaggiosa**.

## Il piano inclinato

Il piano inclinato si può rappresentare schematicamente come un triangolo rettangolo poggiato su un suolo orizzontale, la cui ipotenusa, indicata con  $l$ , sia la lunghezza, ed il cateto verticale, indicato con  $h$ , sia l'altezza.

Poggiamo sul piano un corpo di peso  $P$ , e scomponiamo la forza peso secondo una componente parallela al piano, indicata con  $P_1$ , ed una componente perpendicolare al piano, indicata con  $P_2$ . La componente  $P_2$  sarà annullata dalla reazione vincolare del piano, e per il movimento del corpo sarà disponibile la sola componente  $P_1$ . Si può dimostrare che:

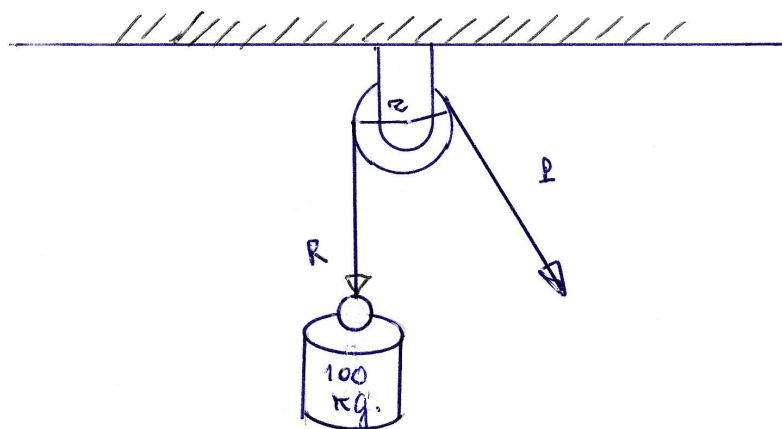


## La carrucola

Dicesi **carrucola semplice** una ruota di raggio  $r$  girevole intorno ad un asse fissato rigidamente a un supporto, che serve ad equilibrare due forze di eguale intensità, direzioni e versi differenti.

Affinché il sistema resistenza-potenza sia in equilibrio è sufficiente che sia nullo il momento risultante rispetto al centro di rotazione O, cioè:

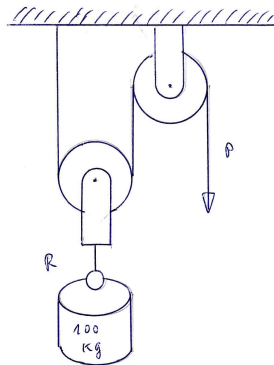
$$Pr = Rr, \text{ e cioè } P = R$$



## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

La carrucola mobile è un sistema di due (o più) carrucole non fissate rigidamente

Si può dimostrare che nel caso di un sistema di due carrucole (v. figura) è  $P = R/2$

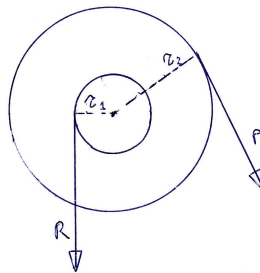


### Il verricello

Il verricello è costituito da due cilindri coassiali, di raggio rispettivamente  $r_1$  e  $r_2$ .

Affinché il sistema resistenza potenza sia in equilibrio deve essere nullo il momento risultante rispetto all'asse di rotazione:

$Rr_1 = Pr_2$ , e cioè  $P:R = r_1 : r_2$



### VERO O FALSO

1. Dicesi forza la causa che mantiene un corpo in moto.
2. Nelle macchine semplici per “potenza” non si intende il lavoro eseguito nell'unità di tempo, ma la forza applicata.
3. La forza è una grandezza vettoriale, il peso una grandezza scalare.
4. Nella leva di primo genere si ha sempre vantaggio: ciò significa che con un dato lavoro della potenza si può ottenere un lavoro maggiore della resistenza.
5. Un tronco di cono appoggiato sulla sua base minore è in posizione di equilibrio stabile.
6. Nella torre di Pisa la verticale che passa per il baricentro cade di 3 metri fuori dalla base di appoggio.
7. Nel sistema M.K.S. l'unità di forza è il joule, quella di lavoro il newton.
8. Il lavoro occorrente per portare un peso da un punto A a un punto B è lo stesso qualunque sia il cammino percorso.
9. La potenza misura l'attitudine di una forza a produrre lavoro.
10. Nella leva di secondo genere la resistenza si trova tra il fulcro e la potenza.
11. Il lavoro fatto per alzare un grave da terra a una certa altezza e poi riportarlo alla posizione di partenza è nullo.

### Attrito

In fisica l'attrito (o forza d'attrito) è una forza dissipativa che si esercita tra due superfici a contatto tra loro opponendosi al loro moto relativo. La forza d'attrito che si manifesta tra superfici in quiete tra loro è detta di attrito statico, mentre tra superfici in moto relativo si parla invece di attrito dinamico.

L'attrito è un fenomeno macroscopico sempre presente nel mondo reale presentando vantaggi e svantaggi a seconda del contesto di analisi e la cui origine fisica è fatta risalire alle forze di adesione o coesione tra materiali in interazione tra loro, le quali a sua volta derivano in ultima analisi dall'interazione elettrostatica tra i materiali in questione.

Il primo a occuparsi in modo scientifico dell'attrito fu Aristotele, il quale tuttavia non isolò il fenomeno dell'attrito, legandolo inscindibilmente alla dinamica di un corpo: nel suo modello per principio un corpo tenderebbe naturalmente a fermarsi se non mosso da qualche forza, in accordo con le proprie osservazioni del mondo quotidiano. Fu invece Galilei a rendersi conto grazie agli esperimenti sul piano inclinato che era un fenomeno variabile in base al tipo di contatto tra i corpi, e che non era quindi "proprio" dei corpi stessi.

Coulomb proseguì lo studio fino ad arrivare all'enunciazione di tre leggi classiche riguardanti in particolare l'attrito radente: questo dipende linearmente dal carico di compressione delle superfici, non dipende dall'estensione della superficie di contatto tra i due corpi, ed infine non dipende dalla velocità relativa di strisciamento di un corpo sull'altro.

Queste tre "leggi" sono in realtà approssimazioni, in quanto valide solo sotto particolari ipotesi riduttive. In particolare l'ultima legge è valida solo per velocità di strisciamento piuttosto ridotte, poiché all'aumentare della velocità il coefficiente di attrito diminuisce; la seconda legge è valida per superfici mediamente piane e non eccessivamente ridotte, mentre al loro tendere al minimo (forza concentrata) il coefficiente di attrito può diminuire; infine la prima legge (di linearità) è valida fintanto che i materiali a contatto siano sufficientemente elastici e poco viscosi.

Un esempio quotidiano della non validità dell'ultima legge si manifesta oggi nei freni automobilistici: la forza frenante non dipende solo dal coefficiente  $\mu_{rd}$  e dalla forza che preme il tamburo sul cerchione o la pastiglia sul disco (mentre è sostanzialmente indipendente dall'estensione dell'area di quest'ultimo), ma dipende anche dalla velocità di strisciamento tra pastiglia e disco, e di conseguenza una frenata di intensità costante ha una efficacia che aumenta al diminuire della velocità, causando il classico effetto di "contraccollo" al momento dell'arresto.

La causa dell'attrito radente fu però sempre individuata nelle asperità tra le superfici a contatto fino a Hertz, che invece dimostrò come l'attrito radente sia dovuto soprattutto a fenomeni di adesione (legami chimici) tra le superfici a contatto, e modificò quindi il modello matematico del fenomeno. Si osserva in particolare che lastre metalliche lucidate a specchio in condizioni di vuoto spinto possiedono un coefficiente di attrito enorme.

Secondo l'interpretazione classica, esistono tre diversi tipi di attrito:

### Attrito radente

L'attrito radente è dovuto allo strisciamento (ad esempio, l'interazione tra due superfici piane che rimangono a contatto mentre scorrono l'una rispetto all'altra).

Il coefficiente d'attrito dipende dai materiali delle due superfici a contatto e dal modo in cui sono state lavorate. Esso corrisponde al rapporto tra la forza di attrito tra due corpi ( $F_r$ ) e la forza che li tiene in contatto ( $F_{\perp}$ ). Il coefficiente di attrito statico  $\mu_{rs}$  è sempre maggiore o uguale al coefficiente d'attrito dinamico  $\mu_{rd}$  per le medesime superfici. Come visto, esso è dovuto alle forze di interazione tra gli atomi dei materiali a contatto. Questo implica che la forza necessaria al primo distacco (cioè per far sì che i corpi inizino a strisciare) è superiore a quella necessaria a tenerli in strisciamento.

<b>Alcuni valori del coefficiente di attrito radente.</b>		
<b>Superfici</b>	<b><math>\mu_{rs}</math> (statico)</b>	<b><math>\mu_{rd}</math> (dinamico)</b>
Legno – legno	0,50	0,30
Acciaio - acciaio	0,78	0,42
Acciaio - ottone	0,51	0,44
Acciaio - teflon	0,04	0,04
Acciaio - ghiaccio	0,027	0,014
Acciaio - piombo	0,90	n.d.
Acciaio - grafite	0,10	n.d.
Acciaio - plexiglas	0,80	n.d.
Rame - acciaio	1,05	0,29
Gomma - asfalto (asciutto)	1,0	0,8
Gomma - asfalto (bagnato)	0,7	0,6
Vetro - vetro	0,9 - 1,0	0,4
Legno sciolinato - neve	0,10	0,05

### **Attrito volvente**

Il rotolamento di norma è reso possibile dalla presenza di attrito radente statico tra la ruota e il terreno; se questo attrito non ci fosse, o fosse molto piccolo (come nel caso di un terreno ghiacciato), la ruota striscerebbe senza riuscire a compiere un rotolamento puro, nel qual caso entrerebbe subito in gioco l'attrito radente dinamico che si oppone allo slittamento e, riducendo progressivamente la velocità relativa fra i corpi striscianti, tende a ripristinare le condizioni di puro rotolamento. Un caso in cui il puro rotolamento può avvenire senza l'aiuto dell'attrito statico si ha quando una ruota che sta già rotolando su un piano orizzontale con velocità angolare  $\omega = V/r$ , dove  $V$  è la velocità del centro di massa della ruota, viene lasciata a sé stessa: in tal caso l'attrito statico assume il valore zero e solo l'attrito volvente può frenare il rotolamento.

Se si applica un momento alla ruota, essa inizia a rotolare senza strisciare fintanto che il momento applicato è minore di una quantità prefissata, che dipende dai materiali a contatto e dal raggio della ruota. Se il momento supera questo valore, la forza motrice applicata alla superficie della ruota supera l'attrito statico massimo e la ruota slitta mentre rotola; è la classica "**sgommata**" ottenuta accelerando da fermi in modo repentino.

A parità delle altre condizioni la resistenza opposta dall'attrito volvente è tanto minore quanto maggiore è il raggio di curvatura del corpo che rotola.

### Alcuni valori del coefficiente di attrito volvente.

Superfici	$\mu_v$
Acciaio - acciaio	0,0005 m/R
Legno - acciaio	0,0012 m/R
Gomma - asfalto	0,02 m/R
Ruota ferroviaria - rotaia	0,3÷0,5
Sfere rotolanti (cuscinetti)	0,0025÷0,01

Più in generale, il coefficiente di attrito volvente è all'incirca direttamente proporzionale al coefficiente di attrito statico e inversamente proporzionale al raggio della ruota.

L'attrito statico è sempre maggiore dell'attrito dinamico e l'attrito radente è sempre maggiore dell'attrito volvente, da cui il successo dell'invenzione della ruota.

### Attrito viscoso

Quando un corpo si muove all'interno di un fluido (liquido o gas) è soggetto ad una forza di attrito dovuta all'interazione del corpo con le molecole del fluido.

**Se il corpo si muove a bassa velocità la forza di attrito è proporzionale alla velocità del corpo nel fluido.**

**Per le alte velocità, invece, l'attrito viscoso dipende dal quadrato della velocità.**

### Effetti dell'attrito

Gli effetti dell'attrito sono la dispersione dell'energia meccanica (energia cinetica) in calore, il che riduce il rendimento del movimento, ma in alcuni casi questo attrito può essere utile, qualora non si cerchi un movimento ma un'adesione/controllo, soprattutto in ambito stradale, o nelle attività fisiche, permettendo gli spostamenti e azioni che altrimenti non sarebbero possibili, difatti la tenuta stradale e la camminata/passeggiata sono possibili anche grazie all'attrito con il suolo.

### APPENDICE: Le leggi della fisica al volante

In questo paragrafo illustreremo come le leggi della fisica si applichino ad un'esperienza quotidiana, quale è la guida di un autoveicolo: per maggiore chiarezza ripeteremo qui alcune definizioni ed alcuni concetti già visti.

Ricordiamo che un veicolo, sotto l'aspetto dinamico, è un corpo mobile, vincolato nei suoi movimenti dal piano stradale. Per effetto di varie forze, parzialmente regolabili dal conducente attraverso i comandi (acceleratore, cambio, manubrio/volante e freno), il veicolo può muoversi su tale piano in modo controllato, sempre nei limiti consentiti dall'aderenza.

Può però superare l'aderenza e sbandare, come pure può ruotare attorno a vari assi ed anche ribaltarsi e tutto ciò in conformità alle leggi della fisica.

Sono queste le leggi che ogni conducente deve conoscere poiché costituiscono la premessa per la comprensione ed applicazione delle norme che regolano la circolazione, nonché le basi per la salvaguardia della propria incolumità sulla strada.

### Velocità

Si definisce velocità di un veicolo in moto uniforme la distanza percorsa nell'unità di tempo; si misura normalmente in chilometri all'ora [km/h] o in metri al secondo [m/s]. La velocità è definita quando sono noti: la sua intensità, la sua direzione ed il suo verso.

Per passare dalla velocità  $v$  [m/s] alla velocità  $V$  [km/h] occorre moltiplicare per 3,6; viceversa, nota la velocità  $V$  [km/h] si ottiene la velocità  $v$  [m/s] dividendo per il coefficiente 3,6.

Il tempo impiegato nel percorrere una data distanza è inversamente proporzionale alla velocità. Ciò significa che, se si vuole ridurre il tempo a metà, ad un terzo, ad un quarto ecc., la velocità deve essere raddoppiata, triplicata, quadruplicata, ecc. In altre parole, ad aumenti sempre maggiori della velocità, corrispondono diminuzioni sempre più piccole del tempo impiegato a percorrere una data distanza. A velocità elevate, quindi, il guadagno di tempo per coprire un determinato tragitto è così esiguo da non valere il rischio che si corre per l'aumentata velocità. La legge fisica può sintetizzarsi nel detto:

« più si corre e meno tempo si guadagna ».

La valutazione della velocità, o meglio della differenza di velocità tra due veicoli, è molto importante in caso di sorpasso.

Consideriamo ad esempio di voler sorpassare un autotreno lungo 18 metri che viaggia a 35 km/h (circa 10 m/s); anche spingendo il mezzo al massimo, cioè, se motorino, a 45 km/h (circa 12,5 m/s), saranno necessari quasi 20 secondi per terminare il sorpasso: in questo tempo si saranno percorsi quasi 250 metri. Consideriamo poi che un eventuale veicolo che proceda in senso opposto, durante questi 20 secondi percorre anch'esso un bel tratto di strada (dipendente dalla sua velocità), che va a sommarsi alla distanza percorsa da chi sorpassa.

Serve quindi un tratto di strada con visibilità molto ampia per poter pensare ad una manovra del genere.

### La sensazione di velocità e la percezione del rischio

Molto spesso, dopo un po' che viaggiamo, perdiamo la percezione della velocità e del rischio a cui essa ci espone ed abbiamo comunque difficoltà a fare una stima attendibile della velocità nostra e di quella degli altri.

Siamo infatti molto più sensibili a percepire l'accelerazione (cioè i cambi di velocità), che non il valore assoluto della velocità stessa quando essa sia costante. Spesso, infatti, dopo che si è raggiunta la "velocità di crociera", si riacquista coscienza del valore di velocità a cui si sta viaggiando solo al momento in cui si debba bruscamente frenare per qualche pericolo improvviso; purtroppo però, in alcuni casi, è troppo tardi.

Oltre a ciò, mentre ci spaventa molto la velocità in senso verticale (caduta), siamo ormai "assuefatti" (e quindi poco responsabili) a valutare "benevolmente" la velocità in senso orizzontale. Quasi nessuno di noi, infatti, si lascerebbe cadere di testa sul pavimento, neanche da 10 - 20 centimetri di altezza. Eppure la velocità con cui urteremmo il suolo sarebbe di soli 5 km/h, corrispondente a quella del passo d'uomo.-

Saltando da circa due metri di altezza (cosa che non tutti farebbero a cuor leggero) si atterrebbe a soli 20 km/h circa (circa 6 m/s), velocità di crociera di un tranquillo ciclista. Se circoliamo a 45 km/h veniamo molto spesso superati da veicoli che vanno più veloci: eppure è come se ci si stesse buttando dal terzo piano di un palazzo! Chi non si sentirebbe in pericolo?

### Accelerazione

Si definisce accelerazione (o decelerazione in caso di accelerazione negativa), la variazione della velocità nell'unità di tempo. Tale grandezza viene misurata in metri al secondo per secondo ( $\text{m/s}^2$ ).

Esempio: se l'accelerazione è di  $5 \text{ m/s}^2$ , significa che il veicolo ogni secondo aumenta la sua velocità di  $5 \text{ m/s}$  ( $18 \text{ km/h}$ ). In altre parole, se il veicolo era fermo, dopo tre secondi ha acquistato una velocità di  $15 \text{ m/s}$  ( $54 \text{ km/h}$ ). L'accelerazione di gravità è quella prodotta dalla forza di gravità [o attrazione terrestre o peso], si indica con la lettera  $g$  e vale circa  $9,8 \text{ m/s}^2$ .

L'accelerazione presenta anche aspetti negativi quali:

- l'introduzione di notevoli forze resistenti dovute all'inerzia, con conseguente maggior consumo;
- la variazione del peso sugli assi e quindi della relativa aderenza, col rischio di sbandamento e ribaltamento
- l'essere causa di danni anche mortali all'organismo umano, in altre parole non è la velocità che uccide in un incidente, bensì l'accelerazione, o meglio la brusca decelerazione dovuta a urti o scontri.

Ancora, in un moto circolare si definisce accelerazione centripeta cioè diretta verso il centro della circonferenza percorsa dal veicolo, la variazione della velocità per effetto del cambio di direzione che occorre inevitabilmente effettuare per mantenere la traiettoria curvilinea.

E' però presente anche un'accelerazione centrifuga cioè diretta verso l'esterno della curva, molto pericolosa perché tende a far uscire il veicolo dalla traiettoria (e quindi dalla strada).

Ciò che permette di tenere in strada il veicolo è la forza d'attrito tra pneumatici e strada. A parità di velocità, più piccolo è il raggio (cioè più stretta è la curva), maggiore deve essere la forza di attrito, forza che trova però un limite nel valore del coefficiente di aderenza. Si deduce quindi che, per ogni valore del coefficiente di aderenza, esiste un raggio di curvatura limite, riducendo il quale il veicolo che viaggia ad una determinata velocità esce di strada. Ovviamente si può anche dire che, stabilito il coefficiente ed il raggio di curvatura, esiste un valore massimo della velocità oltre il quale il veicolo "parte per la tangente".

### Energia cinetica, frenata ed urto

L'energia cinetica rappresenta il lavoro compiuto per far acquistare ad un corpo una data velocità, per arrestare un veicolo occorre dissipare tutta l'energia cinetica che esso ha accumulato raggiungendo una certa velocità.

Per fare ciò ci viene in aiuto il 1° principio della termodinamica il quale afferma che l'energia meccanica (quale è ad esempio l'energia cinetica di un veicolo in moto) può essere trasformata in energia termica. Questo è il principio che sta alla base degli impianti frenanti dei veicoli: lo sfregamento di apposite superfici tra loro ("pastiglie sul disco" nei freni a disco e "ganasce contro il tamburo" nei freni a tamburo) permette la trasformazione dell'energia cinetica in calore sviluppato dai freni, calore che a sua volta deve essere disperso rapidamente in atmosfera (per evitare il surriscaldamento degli elementi frenanti con i conseguenti problemi).

Oltre al metodo sopracitato, esiste un secondo modo, più spettacolare ma meno raccomandabile, per arrestare un veicolo: convertire l'energia in lavoro di deformazione (ad esempio indirizzando il veicolo contro un ostacolo fisso). Questa soluzione ha però l'inconveniente di deformare anche il conducente contro il volante, un muretto, la sede stradale, ecc., con conseguenze spesso mortali. Si stenta a crederci, ma non sono pochi coloro che ogni anno adottano questa seconda soluzione, non si sa se per imprudenza, per incapacità o per ignoranza.

In buona sostanza l'urto è una brusca variazione di velocità, detta comunemente accelerazione, o decelerazione se si vuole precisare che si tratta di una riduzione di velocità.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

In sostanza è quindi l'accelerazione (o meglio, la decelerazione) elevata che uccide in caso d'urto. La formula dell'energia cinetica ( $E_c = m \cdot v^2/2$ , v. più avanti) evidenzia il fatto che, se raddoppia la velocità, l'energia cinetica quadruplica (proporzionalità quadratica).

### L'arresto in sicurezza di un veicolo

Da tutto quanto detto finora si possono facilmente trarre alcune conclusioni che sono di vitale importanza per continuare a frequentare il "club dei viventi":

- più veloce si va, maggiore sarà la distanza impiegata ad arrestare il mezzo, anzi la distanza aumenta con il quadrato della velocità, cioè a velocità doppia corrisponde uno spazio di frenata quadruplo, ecc;
- la distanza di arresto, a parità di velocità, dipende da numerosi fattori, i più importanti dei quali sono:
  - stato e condizioni della strada (cioè coefficiente di aderenza)
  - stato del veicolo (cioè capacità frenante e buone condizioni di manutenzione),
  - attenzione e prontezza di riflessi al momento di frenare (si tenga presente che, a parità di condizioni fisiche, minore è l'esperienza di guida più lenti sono i riflessi);
- per quanto buoni ed efficienti siano i freni del veicolo essi hanno una potenza comunque limitata dalle leggi della fisica;
- la frenata migliore si ottiene senza bloccare le ruote (perciò un uso troppo brusco od eccessivo del freno peggiora le cose).

Tutte queste considerazioni permettono di stabilire quale distanza sarà necessaria per arrestare il veicolo. Ovviamente non sono riflessioni che si possono fare in quei pochi attimi a disposizione per frenare: devono perciò diventare valutazioni che gli occhi e la testa fanno automaticamente e senza intoppi, un po' come una lampadina che si accende nello stesso attimo in cui si schiaccia l'interruttore; ciò però può realizzarsi solo con l'esperienza e con la pratica.

### 4.3. Dinamica

La dinamica è il ramo della Meccanica che studia le cause dei movimenti.

#### Il primo principio della dinamica

**La velocità di un corpo non soggetto ad alcuna forza è un vettore costante.**

In altre parole:

- Se un corpo è fermo rimane fermo
- Se si muove di moto rettilineo uniforme continua a muoversi con la stessa velocità, in modulo, direzione, verso.

Il principio prende anche il nome di **principio di inerzia**.

Il principio di inerzia fu scoperto da Galileo Galilei e dettagliatamente descritto in due sue opere, rispettivamente, nel 1632 e nel 1638: il *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* e *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica* (sic) e *i movimenti locali*. La sua prima enunciazione formale è di Isaac Newton (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*): se un corpo è fermo o si muove di moto rettilineo uniforme, vuol dire che non è soggetto a forze oppure che la risultante delle forze che agiscono su di esso è nulla. Viceversa, se la risultante delle forze applicate a un corpo è nulla, esso è fermo o si muove di moto rettilineo uniforme.

Un sistema di riferimento fermo, o dotato di moto rettilineo uniforme si chiama **sistema di riferimento inerziale**; un osservatore solidale con il sistema di riferimento inerziale, senza contatti con l'esterno (pensiamo ad esempio ad passeggero di un treno in movimento con le tendine tirate su rotaie rettilinee e perfettamente lisce), non ha modo di accorgersi del moto del sistema di riferimento (in questo caso il treno); viceversa, se il treno da fermo si mette in moto, oppure inizia a frenare, oppure affronta una curva, il sistema cessa di essere inerziale e l'osservatore se ne accorge.

#### Il secondo principio della dinamica

**La forza agente su un corpo di massa  $m$  è proporzionale all'accelerazione subita dal corpo, secondo la legge**

$$F = ma$$

La massa così identificata, essendo quella che in un certo senso “si oppone” al movimento, prende il nome di “**massa inerziale**”.

L'unità di misura della forza è il **Newton (N)**, definito come

**La forza che imprime alla massa di 1 Kg l'accelerazione di  $1 \text{ m.s}^{-2}$**

### La gravitazione universale

Due corpi di masse rispettivamente  $m_1$  e  $m_2$ , posti a distanza  $r$  (più precisamente:  $r$  è la distanza fra i rispettivi baricentri), si attraggono reciprocamente con una forza data da:

$$F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$$

Dove  $G$  è la costante gravitazionale universale, e vale  $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{Kg}^2$

La massa, in tale relazione, prende il nome di “**massa gravitazionale**”.

Si postula (e la relatività generale ne ha dato una giustificazione teorica) che la massa inerziale e la massa gravitazionale siano la stessa cosa, e l'assunto è stato verificato sperimentalmente con l'approssimazione di poche parti per miliardo.

Con un semplice ragionamento algebrico possiamo vedere come un corpo in caduta libera in un campo gravitazionale subisca un'accelerazione indipendente dalla massa, e cioè verificare quanto già sostenuto da Galileo, che i corpi cadono con la stessa velocità, a prescindere dal loro peso; infatti:

Un corpo di massa  $m$  soggetto ad una forza  $F$  subisce un'accelerazione data da:

$$a = F/m \quad (1)$$

ma:  $F = G \cdot m \cdot m_T / r^2$ , dove  $m_T$  è la massa della Terra, ed  $r$  è la distanza fra il corpo e il centro della Terra stessa.

Sostituendo nella relazione (1) si ha

$$a = G \cdot m_T / r^2$$

che, come si vede, è indipendente dalla massa del corpo  $m$

Sulla Terra l'accelerazione dovuta alla gravità vale circa  $9,8 \text{ m.s}^{-2}$ , e si indica con  $g$

$$g \approx 9,8 \text{ m.s}^{-2}$$

È opportuno introdurre un'altra unità di forza comunemente usata, il **kilogrammo-peso**, definito come

**La forza che agisce sulla massa di un kilogrammo dovuta all'attrazione di gravità presente sulla Terra**

$$1 \text{ Kg}_p \approx 9,8 \text{ N}$$

### Il terzo principio della dinamica

Definiamo innanzitutto due quantità fisiche, l'**impulso** e la **quantità di moto**.

Data una forza  $F$  che agisce per un tempo  $t$ , si definisce **impulso** il prodotto

$$I = F \cdot t$$

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Dato un corpo di massa  $\mathbf{m}$  che si sposta ad una velocità  $\mathbf{v}$ , si definisce **quantità di moto** il prodotto

$$\mathbf{Q} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{v}$$

È facile dimostrare che  $\mathbf{I} = \mathbf{Q}$ , infatti:

$\mathbf{I} = \mathbf{F}t = \mathbf{m}a\mathbf{t}$  (dato che per la seconda legge della dinamica  $\mathbf{F} = \mathbf{m}a$ ), e quindi, dato che  $a\mathbf{t} = \mathbf{v}$  (per la legge del moto uniformemente accelerato):

$$\mathbf{I} = \mathbf{F}t = \mathbf{m}a\mathbf{t} = \mathbf{m}\mathbf{v} = \mathbf{Q}$$

Notiamo che, essendo la forza e la velocità **vettori**, anche l'impulso e la quantità di moto sono **vettori**.

**Il terzo principio della dinamica, noto anche come principio di azione e reazione, afferma che per ogni azione c'è una reazione uguale e contraria.**

Questo principio, esposto secondo la sua formulazione originale, non è del tutto chiaro, anche perché non abbiamo definito il concetto di azione; è preferibile dargli la sua formulazione moderna, che dice:

**In un sistema isolato (cioè senza interferenze con l'esterno) la quantità di moto è costante nel tempo.**

Esempio 1

Sia dato un sistema cannone-proiettile, e supponiamo che il cannone sia libero da vincoli col suolo (cioè libero di spostarsi); in questa ipotesi il sistema cannone-proiettile si può considerare isolato; sia inoltre il proiettile di massa  $\mathbf{m}_p$  e il cannone di massa  $\mathbf{m}_c$ .

Prima dello sparo la quantità di moto del sistema sarà  $\mathbf{0}$ , essendo il cannone ed il proiettile entrambi fermi.

Al momento dello sparo il proiettile sarà spinto in avanti con velocità  $\mathbf{v}_p$ , e di conseguenza il cannone sarà proiettato all'indietro (il cosiddetto "rinculo") con velocità  $\mathbf{v}_c$ , in modo che

$$\mathbf{Q} = \mathbf{v}_p + \mathbf{v}_c = \mathbf{0}$$

Esempio 2

Il terzo principio è la base per il funzionamento dei motori a reazione ed i motori a razzo; infatti vengono espulsi gas ad altissima velocità, e quindi l'aereo a reazione, o il razzo, sono spinti in senso opposto per conservare la costanza della quantità di moto (non perché, come si potrebbe credere, i gas "spingono" sull'aria come su una sorta di piattaforma, infatti i motori a razzo funzionano benissimo anche nel vuoto, purché sia assicurata la combustione).

### Energia cinetica ed energia potenziale

Dato un corpo di massa **m** che viene accelerato da velocità **0** a velocità **v** da una forza **F**, si definisce **energia cinetica** il lavoro che deve essere compiuto sul corpo durante il processo.

$$E_C = L = Fs = mas \text{ (2° principio della dinamica)}$$

Dove **s** è lo spostamento compiuto dal corpo durante l'accelerazione.

Ricordiamo, dalla legge del moto uniformemente accelerato che  $s = \frac{1}{2} at^2$

$$\text{sostituendo: } E_C = ma \frac{1}{2} at^2 = \frac{1}{2} m a^2 t^2 = \frac{1}{2} m (at)^2 = \frac{1}{2} mv^2$$

Questa formula ci dice che l'energia cinetica è in relazione di **proporzionalità quadratica** con la velocità.

Sia dato adesso un corpo di massa **m** che si trova in un campo gravitazionale, p. es. ad altezza **h** dal suolo

**Si definisce energia potenziale il lavoro svolto dal campo per portare il corpo al suolo.**

Ricordiamo che sulla Terra l'accelerazione di gravità è  $g \approx 9,8 \text{ ms}^{-2}$

$$E_P = L = Fh = mgh$$

La velocità del corpo al momento in cui giunge al suolo è, come ricordiamo dal moto uniformemente accelerato:  $v = \sqrt{2gh}$

$$\text{Di conseguenza la sua energia cinetica sarà } E_C = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m 2gh = mgh = E_P$$

Se adesso consideriamo il corpo all'inizio del movimento, la sua energia potenziale è  $= mgh$ , mentre la sua energia cinetica è  $= 0$ , per cui:

$$E_P + E_C = mgh$$

Alla fine del movimento la sua energia potenziale è  $= 0$ , mentre la sua energia cinetica è  $= \frac{1}{2} mv^2$ , per cui

$$E_P + E_C = \frac{1}{2} mv^2$$

Ma, essendo  $\frac{1}{2} mv^2 = mgh$ , abbiamo che

$$E_P + E_C = mgh$$

**Cioè l'energia totale (energia cinetica + energia potenziale) è costante.**

Si può dimostrare che la costanza vale in qualunque punto del percorso, e pertanto abbiamo introdotto il concetto di **conservazione dell'energia**.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

### VERO O FALSO

1. La massa di un corpo è la stessa in tutti i punti della superficie terrestre.
2. Un corpo, cui è applicata una forza costante, si muove di moto uniforme.
3. Due corpi di massa e dimensioni diverse, lanciati verticalmente verso l'alto con la stessa velocità iniziale, raggiungono la stessa altezza massima
4. La causa che impedisce a un corpo, lanciato verso l'alto lungo un piano inclinato, di salire indefinitamente, va ricercata nella presenza dell'attrito.
5. Un pendolo lungo ha frequenza maggiore di uno corto.
6. Per alterare la direzione del moto di un corpo si richiede l'applicazione di una forza.
7. Una palla da biliardo può, urtando un'altra, fermarsi e trasmettere il suo moto alla seconda.
8. Si vuol far cadere un corpo da una finestra al piano della strada in modo che esso arrivi con la minima velocità possibile. Disponendo di due piani inclinati di lunghezza diversa si userà a tale scopo quello più lungo.
9. Il tempo di caduta da un dislivello assegnato è lo stesso sia che un corpo cada lungo un piano inclinato o liberamente.
10. Due pendoli identici compiono rispettivamente delle oscillazioni di ampiezza uguale a  $2^\circ$  e a  $1^\circ$ . Il periodo del secondo pendolo è minore di quello del primo.

NB I quesiti 3-8-9 vanno considerati in assenza di attrito

### Momento di inerzia

Il momento di inerzia è una misura della resistenza del corpo a mutare la sua velocità angolare ed è una grandezza fisica utile per descrivere il comportamento dinamico dei corpi in rotazione attorno ad un asse. Tale grandezza tiene conto non solo della massa del corpo, ma anche di come è distribuita la massa stessa attorno all'asse di rotazione e dà una misura dell'inerzia del corpo rispetto alle variazioni del suo stato di moto rotatorio.

Il concetto fu introdotto da Eulero nel libro "*Theoria motus corporum solidorum seu rigidorum*" del 1765. Il momento d'inerzia di un corpo rispetto a un asse dato descrive quanto è difficile cambiare il suo moto angolare attorno al proprio asse. Per esempio, si considerino due dischi (A e B) della stessa massa. Il disco A ha un raggio più grande del disco B. Assumendo che abbiano spessore e massa distribuita uniformemente, è più difficile accelerare il disco A (cambiare la sua velocità angolare) poiché la sua massa è distribuita in maniera più distante del suo asse di rotazione: la massa che è più distante dall'asse deve avere, fissata la velocità angolare, più velocità, e quindi più energia rispetto alla massa che è più vicina al centro di rotazione. In questo caso il disco A ha un momento d'inerzia maggiore del disco B.

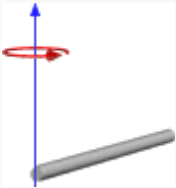
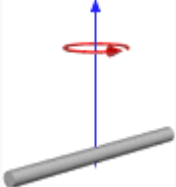
Il momento di inerzia di un corpo è funzione della sua geometria, in particolare di come è distribuita la massa al suo interno. Il concetto di momento d'inerzia è utile per risolvere numerosi problemi, per esempio spiega perché oggetti diversi che rotolano (sfere, cilindri, anelli, ...) su un piano inclinato con attrito lo fanno con accelerazioni diverse. Per esempio un anello rotolerà più lentamente di un disco della stessa massa e raggio. Infatti la massa dell'anello è disposta lontano dal centro di rotazione e quindi, a parità di velocità, l'energia cinetica accumulata dal corpo è maggiore. Nel sistema internazionale l'unità di misura del momento di inerzia di massa è il **kg · m<sup>2</sup>**.

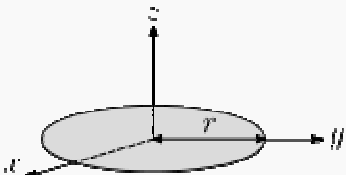
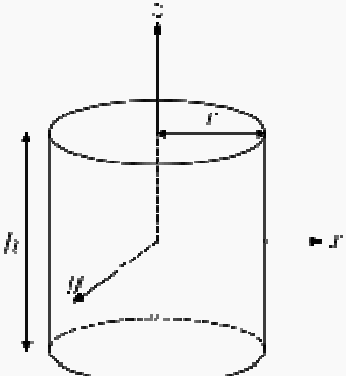
**Nei moti rotatori, il momento d'inerzia gioca il ruolo che ha la massa nei moti lineari, e cioè "si oppone" al movimento, in questo caso la rotazione.**

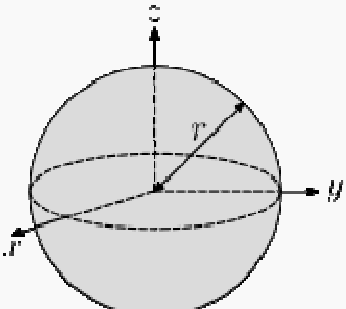
## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Di seguito un elenco riassuntivo dei principali momenti di inerzia; i corpi sono supposti di densità uniforme.

Descrizione	Figura	Momento di inerzia	Commento
Massa puntiforme $m$ a distanza $r$ dall'asse di rotazione.		$I = mr^2$	Per esempio, un pianeta di massa $m$ che ruota intorno al Sole a distanza $r$ (supponendo in prima approssimazione che l'orbita sia circolare e non ellittica come è in realtà)

Asta di lunghezza $L$ e massa $m$ (asse di rotazione alla fine dell'asta)		$mL^2/3$	Questa espressione assume che l'asta sia un filo infinitamente sottile ma rigido.
Asta di lunghezza $L$ e massa $m$		$mL^2/12$	Questa espressione assume che l'asta sia un filo infinitamente sottile ma rigido.

Descrizione	Figura	Momento di inerzia	Commento
Disco solido e sottile, di raggio $r$ e massa $m$		$I_z = \frac{mr^2}{2}$	Questo è un caso particolare del cilindro solido, con $h = 0$ .
Cilindro solido di raggio $r$ , altezza $h$ e massa $m$		$I_z = \frac{mr^2}{2}$	Questo è un caso particolare del tubo cilindrico con pareti spesse ed estremità aperte

Sfera (piena) di raggio $r$ e massa $m$		$I = \frac{2mr^2}{5}$	
---	---	-----------------------	--

### Momento angolare

Il momento angolare, o anche momento della quantità di moto, è riferito a moti rotatori, ed è l'analogo della quantità di moto dei moti rettilinei.

Così come  $\mathbf{Q} = m\mathbf{v}$  per i moti rettilinei, per i moti rotatori vale la relazione

$$\mathbf{M} = \omega \mathbf{I},$$

dove  $\mathbf{M}$  è il momento angolare

$\omega$  è la velocità angolare

$\mathbf{I}$  è il momento di inerzia del corpo considerato

### Legge di conservazione del momento angolare

La Legge di conservazione del momento angolare, anche detta “bilancio del momento angolare della quantità di moto”, è un importante principio fisico, che afferma che il momento angolare totale  $\mathbf{M}$  di un sistema è costante nel tempo se è nullo il momento delle forze esterne che agiscono su di esso.

### Fenomeni fisici

La costanza del momento angolare è estremamente utile per l'analisi delle orbite di pianeti e satelliti, e per lo studio dei modelli atomici come quello di Bohr.

La conservazione del momento angolare spiega diversi altri fenomeni fisici, come l'accelerazione angolare di un pattinatore su ghiaccio che porta le proprie braccia e gambe vicine all'asse verticale di rotazione, o anche dei tuffatori acrobatici, che si raggruppano per ruotare più velocemente.

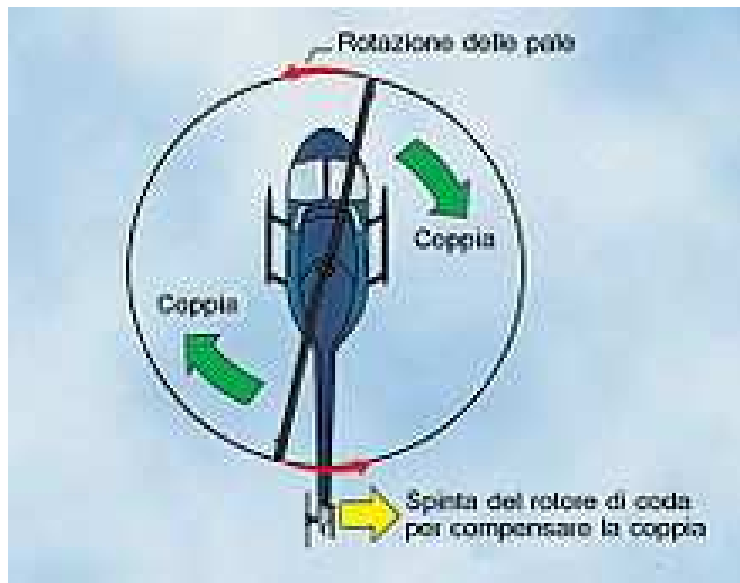


Tuffatrici che minimizzano il loro momento d'inerzia per aumentare la loro velocità di rotazione.

Portando una parte della massa del proprio corpo più vicino all'asse, decresce il momento di inerzia del proprio corpo. Poiché il momento angolare è costante in assenza di coppie di forze esterne, la velocità angolare (velocità rotazionale)  $\omega$  del pattinatore o del tuffatore deve aumentare.

Lo stesso fenomeno dà luogo alla rotazione estremamente veloce delle stelle compatte (come le nane bianche, le stelle di neutroni e i buchi neri) quando si formano a partire da stelle di dimensioni enormemente più grandi, ma con velocità di rotazione più lente.

Il sistema Terra-Luna è influenzato dalle forze di marea che la Luna esercita sulla Terra. Per la conservazione del momento angolare, nel sistema si verifica un trasferimento di momento dalla Terra alla Luna. Ciò causa un rallentamento della velocità di rotazione della Terra (approssimativamente di 42 nanosecondi/giorno), ed un aumento graduale del raggio dell'orbita della Luna (di circa 4,5 cm/anno).



Compensazione delle coppie che agiscono su di un elicottero

Negli elicotteri con un solo rotore principale l'impianto motore applica una forza per far girare il rotore e quindi crea una coppia che squilibra il momento angolare complessivo della massa. Per effetto di questo fenomeno, la fusoliera dell'elicottero tende a girare nella direzione opposta del rotore per la legge di conservazione. Per mantenere il controllo del velivolo, si adottano vari accorgimenti, il più comune dei quali è quello dell'installazione di un rotore "anti-coppia" sulla coda.

#### 4.4. Leggi di Keplero ed altri cenni di astronomia

Le tre leggi del movimento dei pianeti sono il principale contributo di Johannes Kepler, detto Keplero, all'astronomia e alla meccanica. Keplero le derivò in parte studiando le osservazioni di Tycho Brahe. Isaac Newton avrebbe più tardi giustificato teoricamente tali leggi alla luce della teoria della gravitazione universale.

##### Prima legge (1608)

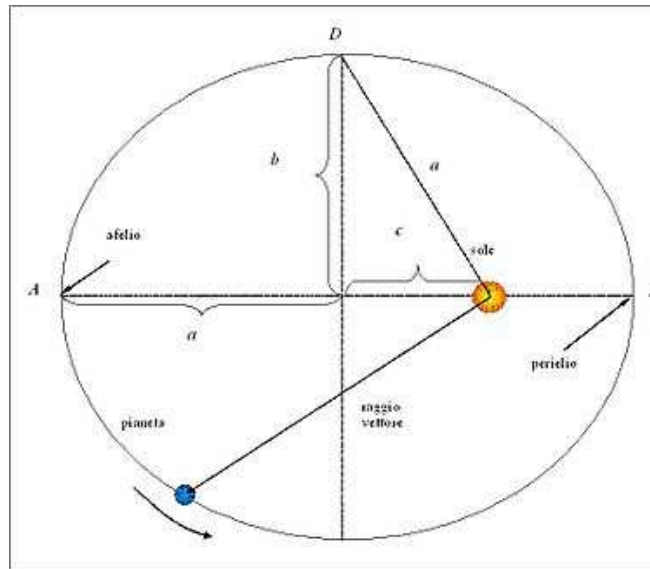
**L'orbita descritta da un pianeta è un'ellisse, di cui il Sole occupa uno dei due fuochi.**

Keplero propone un modello eliocentrico in cui non vengono più considerate le orbite circolari, le forme perfette, ed è supportato nel farlo dai dati sperimentali ottenuti da Tycho Brahe. Osserviamo che, poiché l'ellisse è una figura piana, i moti dei pianeti avvengono in un piano, detto piano orbitale. Per la Terra tale piano è detto eclittica. Nella figura è rappresentata un'orbita ellittica, con indicati i suoi parametri caratteristici: semiasse maggiore (a), semiasse minore (b), semi-distanza focale (c), eccentricità (e).

Tra questi parametri esistono le relazioni seguenti:

$$c = \sqrt{a^2 - b^2}$$

$$e = \frac{c}{a}$$



L'ellisse in figura ha un'eccentricità di circa 0,5 e potrebbe rappresentare l'orbita di un asteroide. I pianeti hanno in realtà eccentricità molto più piccole: 0,0167 per la Terra, 0,0934 per Marte e 0,2482 per Plutone (pianeta nano).

La distanza dei pianeti dal Sole non è costante, ma varia da un massimo (afelio) ad un minimo (perielio). È possibile considerare la prima legge di Keplero collegata alla conservazione del momento angolare.

### Seconda legge (1609) - Legge delle aree

**Il segmento (raggio vettore) che unisce il centro del Sole con il centro del pianeta descrive aree uguali in tempi uguali.**

Le conseguenze di questa legge sono:

- La velocità areolare è costante.
- La velocità orbitale non è costante, ma varia lungo l'orbita. Le due aree evidenziate nella figura sono infatti uguali e vengono quindi percorse nello stesso tempo. In prossimità del perielio, dove il raggio vettore è più corto che all'afelio, l'arco di ellisse è corrispondentemente più lungo. Ne segue quindi che la velocità orbitale è massima al perielio e minima all'afelio.
- Il momento angolare orbitale del pianeta si conserva.
- La velocità lungo una determinata orbita è inversamente proporzionale al modulo del raggio vettore. Si può dimostrare che anche questa legge è una conseguenza della conservazione del momento angolare.
- Sul pianeta viene esercitata una forza centrale, cioè diretta secondo la congiungente tra il pianeta e il Sole.

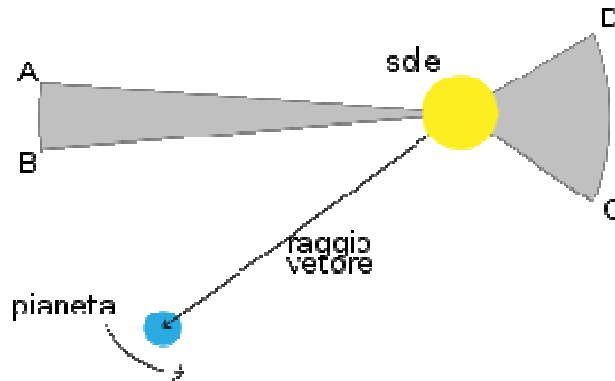


Illustrazione della legge delle aree

### Terza legge (1619)

**Il rapporto tra il cubo del semiasse maggiore dell'orbita e il quadrato del periodo di rivoluzione è lo stesso per tutti i pianeti**

Questa legge è valida anche per i satelliti che orbitano intorno ai pianeti e può essere espressa in forma matematica nel modo seguente:

$$a^3/T^2=K$$

dove  $a$  è il semiasse maggiore dell'orbita,  $T$  il periodo di rivoluzione e  $K$  una costante (a volte detta di Keplero), che dipende dal corpo celeste attorno al quale avviene il moto di rivoluzione (ad esempio, se si considera il moto di rivoluzione dei pianeti del sistema solare attorno al Sole e misurando le distanze in U.A. e il tempo in anni solari,  $K$  vale 1).

### Limiti di validità delle leggi di Keplero

Va specificato che le leggi di Keplero sono precise nella misura in cui sono soddisfatte le seguenti ipotesi:

- la massa del pianeta è trascurabile rispetto a quella del Sole;
- si possono trascurare le interazioni tra diversi pianeti (tali interazioni portano a leggere perturbazioni sulla forma delle orbite).

## Legge di Titius-Bode

La legge di Titius-Bode (o semplicemente di Bode) è una formula empirica che descrive con buona approssimazione i semiassi maggiori delle orbite dei pianeti del sistema solare.

La relazione fu individuata nel 1766 da Johann Daniel Titius e pubblicata formalmente da Johann Elert Bode nel 1772, da cui il nome. Secondo alcune fonti la scoperta sarebbe invece da attribuire a Christian Wolff, nel 1724.

Formulazione originaria: **La formulazione originale era:**  $a = (n+4)/10$

Dove  $a$  è il semiasse maggiore dell'orbita considerata, e  $n$  assume i valori 0, 3, 6, 12, 24, 48...

**Formulazione moderna:** Assumendo la distanza Terra-Sole pari ad una unità astronomica ("UA"), i semiassi maggiori ( $a$ ) delle orbite di ciascun pianeta seguono approssimativamente la relazione

$$a = (0,4 + 0,3 \times k) UA$$

Dove  $k$  assume (dal secondo valore) valori corrispondenti alle potenze di due: 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128...

Confronto con le osservazioni: Il prospetto seguente pone a confronto i valori forniti dalla legge di Titius-Bode e quelli realmente osservati:

Pianeta	$k$	Distanza teorica	Distanza osservata
Mercurio	0	0,4 UA	0,39 UA
Venere	1	0,7 UA	0,72 UA
Terra	2	1,0 UA	1,00 UA
Marte	4	1,6 UA	1,52 UA
Cerere	8	2,8 UA	2,77 UA
Giove	16	5,2 UA	5,20 UA
Saturno	32	10,0 UA	9,54 UA
Urano	64	19,6 UA	19,2 UA
Nettuno	128	38,8 UA	30,1 UA
Eris	256	77,2 UA	67,7 UA

Fra gli otto pianeti, Nettuno è l'unico a discostarsi in maniera rilevante dal valore teorico.



Johann Daniel Titius



Johann Elert Bode

### Giustificazione teorica della legge

Non esistono teorie confermate che giustifichino la legge di Titius-Bode, e potrebbe trattarsi, in verità, di una semplice e curiosa coincidenza, piuttosto che di una regola universale.

È utile osservare che all'epoca della scoperta la legge era soddisfatta da tutti i pianeti noti all'epoca, da Mercurio a Saturno, ma c'era un vuoto tra Marte e Giove. Un'importante conferma si ebbe nel 1781 con la scoperta di Urano, che occupava esattamente la posizione prevista. In seguito a questa conferma, Bode segnalò come urgente la necessità di scoprire il pianeta mancante nello spazio tra il quarto ed il quinto pianeta. Circa vent'anni dopo fu scoperto Cerere, il pianeta nano più interno.

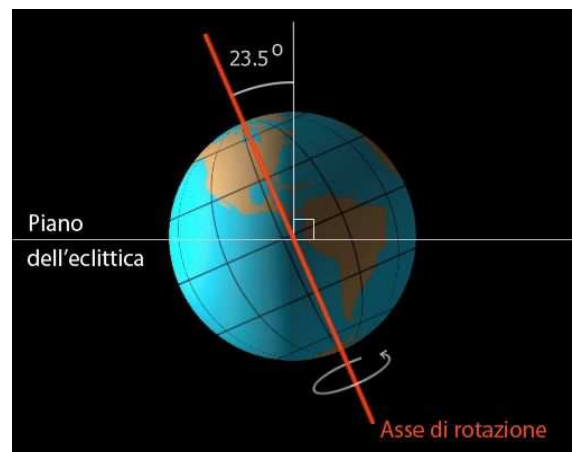
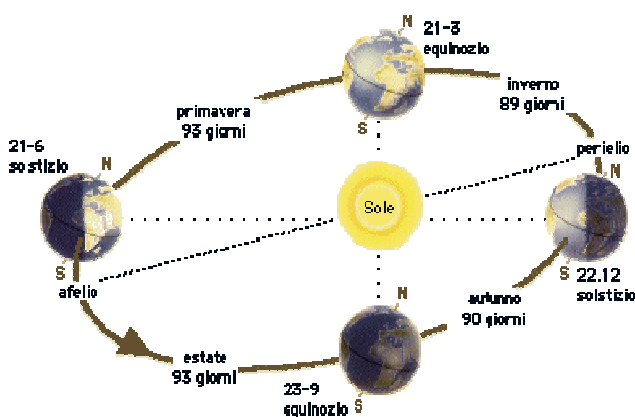
La legge di Titius-Bode, pur essendo stata ricavata empiricamente, godette quindi di generale consenso fino alla scoperta di Nettuno nel 1846, che invece non corrispondeva alle previsioni.

La spiegazione attualmente più accreditata per la legge è che la risonanza orbitale dei pianeti esterni crei regioni attorno al Sole prive di orbite stabili a lungo termine. Simulazioni della formazione ed evoluzione del sistema solare sembrano accreditare l'ipotesi che la legge di Titius-Bode possa derivare direttamente dai meccanismi di formazione planetaria.

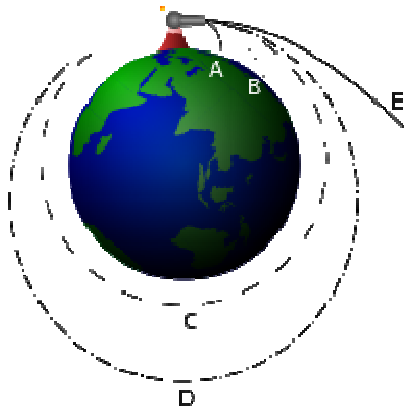
Si è pensato di verificare se la legge fosse valida anche in altri sistemi planetari, ma gli attuali telescopi possono vederne solo un numero molto limitato, e la verifica dovrà attendere telescopi migliori.

### Intermezzo: Cosa accadrebbe se l'asse terrestre fosse verticale?

L'asse terrestre è inclinato di 23 gradi e 27 primi sul piano dell'eclittica, cioè rispetto al piano sul quale orbita il pianeta. Se fosse perpendicolare, non ci sarebbero le stagioni, perché i raggi solari colpirebbero ogni luogo sempre con la stessa inclinazione. Avremmo quindi su tutta la Terra un clima (dal greco klima = inclinazione) completamente diverso. All'equatore le giornate sarebbero molto torride, perché il Sole si troverebbe sempre sulla verticale, mentre alle latitudini più prossime ai poli si avrebbero temperature ancora più rigide: la vita sarebbe limitata alle fasce temperate, dove però si avrebbero escursioni termiche meno accentuate di quelle che conosciamo. Inoltre avremmo sempre giorni e notti della durata di 12 ore, perché il Sole illuminerebbe sempre esattamente metà del globo terrestre.



## Velocità di fuga



Analisi di Newton della velocità di fuga. Dalla cima di una montagna, un cannone spara dei proiettili con velocità sempre più grande. I proiettili A e B ricadono a terra. Il proiettile C percorre un'orbita circolare, D, invece, una ellittica. Il proiettile E si allontana dal pianeta.

La velocità di fuga è la velocità minima iniziale a cui un oggetto (senza ulteriore propulsione) deve muoversi per potersi allontanare indefinitamente da una sorgente di campo gravitazionale, senza considerare altri fattori come l'attrito (es. aria).

Un razzo che si allontana da una sorgente gravitazionale non ha quindi bisogno di raggiungere la velocità di fuga, ma può allontanarsi a qualsiasi velocità con un adeguato sistema di propulsione.

Si assume usualmente che la massa del corpo da allontanare indefinitamente dalla sorgente di gravità sia molto minore di quella della sorgente stessa, in modo che il suo campo gravitazionale non perturbi significativamente il campo gravitazionale della sorgente.

La velocità di fuga può essere definita più formalmente come la velocità iniziale necessaria per andare da un punto in un campo gravitazionale, a distanza  $r$  dal centro del campo, fino all'infinito con velocità residua nulla, relativamente al campo stesso.

Nell'uso comune, il punto iniziale è posto sulla superficie di un pianeta o di una luna. Una velocità così definita è una quantità teorica, perché presume che un oggetto sia sparato nello spazio come un proiettile, cioè con una spinta iniziale di brevissima durata al cui termine la velocità dell'oggetto è la velocità di fuga. Nella realtà si utilizza quasi sempre un mezzo di propulsione per entrare nello spazio e quindi in pratica non è necessario arrivare a velocità così elevate.

Sulla superficie della Terra la velocità di fuga è pari a circa 11,2 km/s (40320 km/h), mentre a 9000 km dalla superficie è leggermente inferiore a 7,1 km/s. È possibile ottenere tale velocità con un'accelerazione continua dalla superficie fino a quell'altezza. A questo punto non è più necessario arrivare alla velocità di 11,2 km/s, anche senza propulsione l'oggetto si può allontanare dalla Terra indefinitamente.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

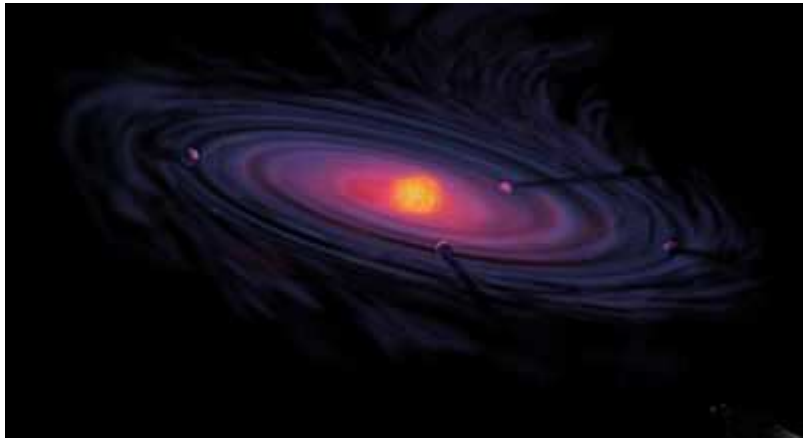
Astro	Velocità di fuga alla superficie		
	in m/s	in km/s	in km/h
Sole	617.300	617,3	2.222.280
Mercurio	4.435	4,435	15.966
Venere	10.400	10,4	37.440
Terra	11.200	11,2	40.320
Marte	5.040	5,04	18.000
Giove	59.500	59,5	214.560
Saturno	35.600	35,6	127.800
Urano	21.300	21,3	76.680
Nettuno	23.300	23,3	83.880
Luna	2.380	2,38	8.280

Velocità di fuga dal Sole, dai pianeti del sistema solare e dalla Luna

### VERO O FALSO

1. La forza di gravità sulla superficie della Terra è minore che su quella di Marte.
2. L'attrazione fra due corpi è diversa a seconda che essi si trovino nel vuoto o in un altro mezzo (ad esempio l'acqua).
3. Un razzo che andasse dalla Terra alla Luna dovrebbe vincere una forza di gravità sempre minore.
4. La causa per cui l'accelerazione  $g$  di gravità è maggiore al Polo che non all'equatore risiede nel fatto che la crosta terrestre è più densa al Polo che non all'equatore.
5. Le orbite ellittiche descritte dai pianeti attorno al Sole sono conseguenza del fatto che tra pianeti e Sole si esercita l'attrazione gravitazionale data dalla legge di Newton.
6. Un corpo cade perché attratto dalla Terra: durante la caduta però la Terra è egualmente attratta verso il corpo che cade.

### 4.5. Formazione, struttura ed evoluzione del Sistema Solare



Elaborazione artistica raffigurante un disco proto planetario

Le teorie riguardanti la formazione e l'evoluzione del sistema solare sono varie e investono numerose discipline scientifiche, dall'astronomia alla fisica, alla geologia. Molte nei secoli sono state le teorie proposte per l'origine del sistema solare, è tuttavia dal XVIII secolo che iniziano a prendere forma le teorie moderne. L'inizio dell'era spaziale, le immagini di altri pianeti del sistema solare, i progressi nella fisica nucleare e nell'astrofisica hanno contribuito a modellare le attuali teorie sull'origine e sul destino del sistema solare.

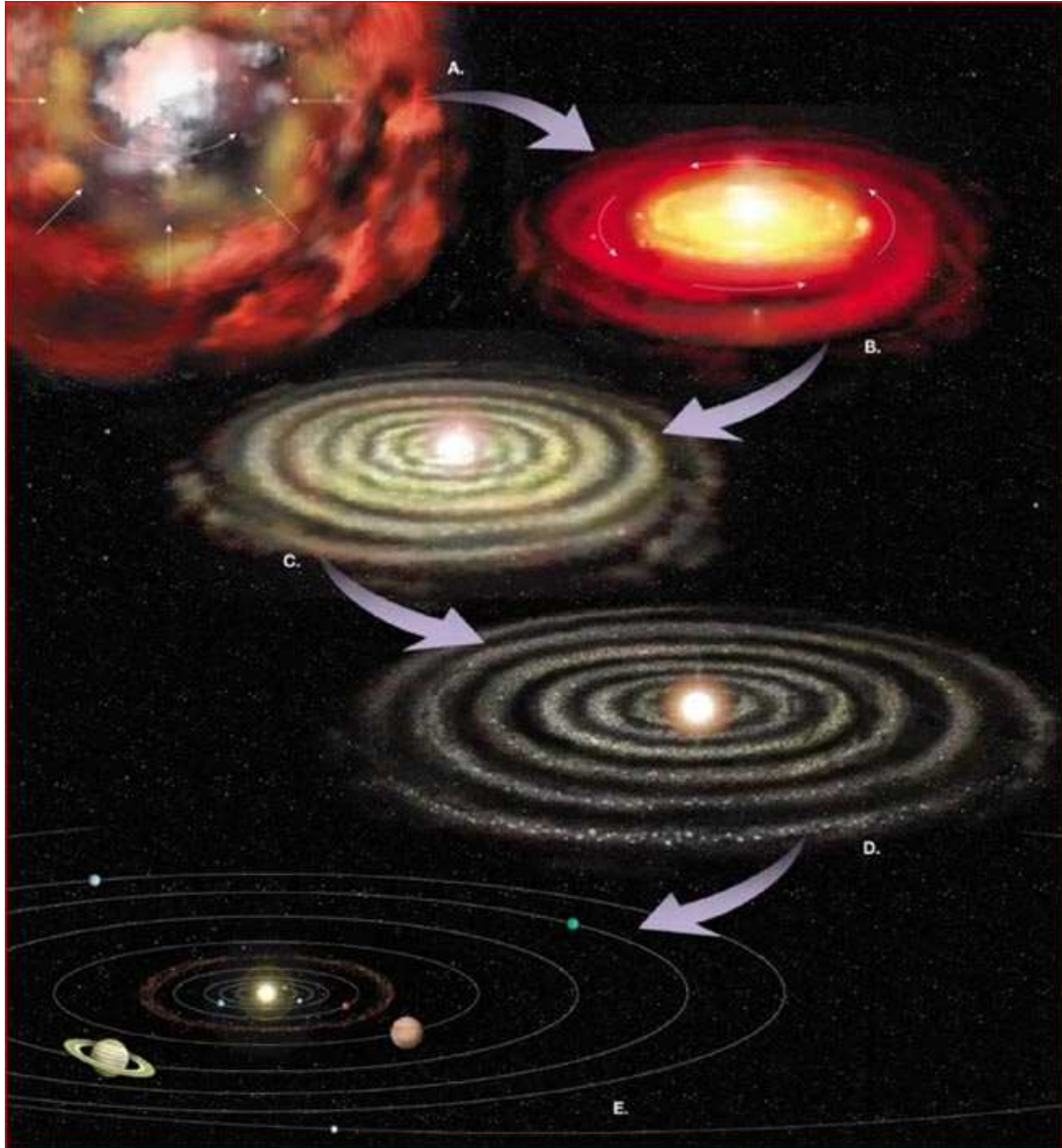
#### L'ipotesi nebulare

L'ipotesi sull'origine del sistema solare che attualmente gode di maggior credito è quella della nebulosa, proposta inizialmente da Immanuel Kant nel 1755 e indipendentemente da Pierre-Simon Laplace. La teoria nebulare, come oggi viene chiamata, afferma che il sistema solare ha avuto origine dal collasso gravitazionale di una nube gassosa, la nebulosa solare. Si calcola che la nebulosa avesse un diametro di circa 100 UA (UA = Unità Astronomica = distanza media fra la Terra e il Sole = circa 150.000.000 di Km.) e una massa circa 2-3 volte quella del Sole. Si ipotizza che nel tempo una forza interferente (probabilmente una vicina supernova) abbia compresso la nebulosa spingendo materia verso il suo interno ed innescandone il collasso. Durante il collasso la nebulosa avrebbe iniziato a ruotare più rapidamente (secondo la legge di conservazione del momento angolare) ed a riscaldarsi. Col procedere dell'azione della gravità, della pressione, dei campi magnetici e della rotazione la nebulosa si sarebbe appiattita in un disco protoplanetario con una protostella al suo centro in via di contrazione.

La teoria prosegue ipotizzando che da questa nube di gas e polveri si formarono i diversi pianeti. Si stima che il sistema solare interno fosse talmente caldo da impedire la condensazione di molecole volatili quali acqua e metano. Vi si formarono pertanto dei planetesimi relativamente piccoli (fino allo 0,6% della massa del disco) e formati principalmente da composti ad alto punto di fusione, quali silicati e metalli. Questi corpi rocciosi si sono evoluti successivamente nei pianeti di tipo terrestre. Più esternamente, oltre la "linea delle nevi", si svilupparono invece i giganti gassosi Giove e Saturno, mentre Urano e Nettuno catturarono meno gas e si condensarono attorno a nuclei di ghiaccio.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

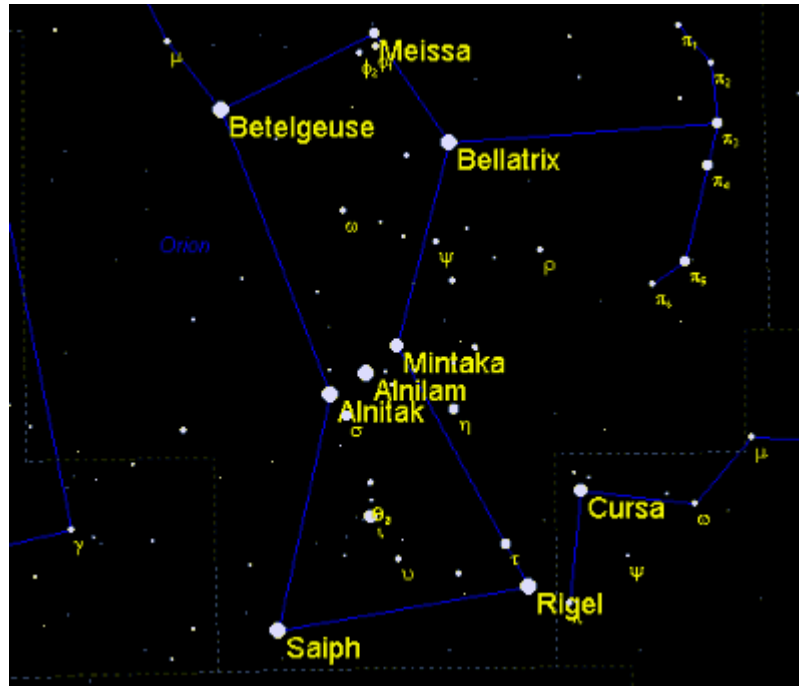
Grazie alla loro massa sufficientemente grande i Giganti gassosi hanno trattenuto l'atmosfera originaria sottratta alla nebulosa mentre i pianeti di tipo terrestre l'hanno perduta. La loro atmosfera è frutto di vulcanismo, impatti con altri corpi celesti e, nel caso della Terra, l'evoluzione della vita. Secondo questa teoria dopo cento milioni di anni la pressione e la densità dell'idrogeno nel centro della nebulosa divennero grandi a sufficienza per avviare la fusione nucleare nella protostella. Il vento solare prodotto dal neonato Sole spazzò via i gas e le polveri residui del disco allontanandoli nello spazio interstellare e fermando così il processo di crescita dei pianeti.



Rappresentazione artistica dell'evoluzione nel tempo durante la formazione del Sistema Solare

È possibile vedere molti processi di formazione stellare nella “vicina” (1270 a.l. circa) Nebulosa di Orione.

### Costellazione di Orione



Dimensione apparente della Luna piena (circa) rispetto alla Costellazione di Orione sopra: **O**

Orione o il Cacciatore (in latino Orion) è un'importante costellazione, forse la più conosciuta del cielo, grazie alle sue stelle brillanti e alla sua posizione vicino all'equatore celeste, che la rende visibile dalla maggior parte del pianeta.

### Stelle principali della costellazione di Orione

- **Rigel** (β Orionis) è la stella più luminosa della costellazione (magnitudine 0,2). Situata all'altezza del ginocchio sinistro, è una supergigante blu estremamente calda e luminosa.
- **Betelgeuse** (α Orionis), di magnitudine 0,5, è una supergigante rossa di notevoli dimensioni; se fosse messa al posto del Sole, i suoi strati più esterni ingloberebbero l'orbita del pianeta Giove.
- **Mintaka, Alnilam e Alnitak** (δ Orionis, ε Orionis e ζ Orionis) compongono la Cintura di Orione. Queste tre stelle brillanti messe in fila sono sufficienti per identificare la costellazione.
- **Saiph** (κ Orionis) è una stella azzurra di magnitudine 2,0: si trova all'altezza del ginocchio destro di Orione.
- **Bellatrix** (γ Orionis) è una supergigante blu, in corrispondenza dalla spalla destra di Orione, con magnitudine 1,64

## Nebulosa di Orione



Immagine in falsi colori della Nebulosa di Orione  
(© NASA, ESA and the Hubble Heritage Team )

Visibile anche a occhio nudo come una debole macchia luminosa posta subito sotto le tre stelle che formano la cintura di Orione, questa nebulosa che prende il nome dall'omonima costellazione è in realtà un vero scrigno di tesori astronomici.

Al suo interno, grazie alle dettagliatissime immagini realizzate da Hubble in oltre 10 anni di osservazioni, gli astronomi hanno infatti potuto scoprire grandi masse di gas, oltre 3000 stelle ancora in formazione e 150 dischi di polvere che si trasformeranno in nuovi pianeti. La caratteristica luminosità di questa nebulosa è data dall'intensa radiazione ultravioletta emessa dalle stelle più giovani, racchiuse in un ammasso chiamato trapezio che si trova nelle zone più interne del corpo celeste.



Un disco protoplanetario in formazione nella nebulosa di Orione

### Problemi dell'ipotesi nebulare

Uno dei problemi è posto dal momento angolare. Con la concentrazione della grande maggioranza della massa del disco al suo centro, anche il momento angolare avrebbe dovuto concentrarsi allo stesso modo, invece la velocità di rotazione del Sole è inferiore a quanto previsto dal modello teorico e i pianeti, pur rappresentando meno dell'1% della massa del sistema solare, contribuiscono a oltre il 90% del momento angolare totale. Una possibile spiegazione è che la rotazione del nucleo centrale della nebulosa sia stata rallentata dall'attrito con gas e polveri.

Anche i pianeti "al posto sbagliato" sono un problema per il modello a nebulosa. Urano e Nettuno si trovano in una regione in cui la loro formazione è poco probabile, data la ridotta densità della nebulosa a tale distanza dal centro. Si introduce pertanto una successiva ipotesi secondo la quale le interazioni tra la nebulosa ed i planetesimi avrebbero prodotto dei fenomeni di migrazione planetaria.

Anche alcune proprietà dei pianeti pongono problemi. L'ipotesi della nebulosa prevede necessariamente che tutti i pianeti si formino esattamente sul piano dell'eclittica, invece le orbite dei pianeti presentano tutte delle inclinazioni (piccole, ma non trascurabili) rispetto a tale piano. Più precisamente, le inclinazioni variano da un minimo di  $0,77^\circ$  per Urano a un massimo di  $3,4^\circ$  per Venere, volendo trascurare Mercurio ( $7^\circ$ ) per la grande influenza del vicino Sole, e Plutone ( $17^\circ$ ) che è stato declassato a pianeta nano.

Al contrario di quanto prevede la teoria, inoltre, le osservazioni mostrano che la maggior parte dei pianeti giganti ha un'apprezzabile inclinazione assiale, Urano ha addirittura una notevole inclinazione ( $98^\circ$ ) che fa sì che il pianeta "rotoli" sulla sua orbita.

Un ulteriore elemento di incongruenza tra teoria ed osservazione è dato dalle grandi dimensioni della Luna terrestre e le orbite irregolari di altri satelliti che sono incompatibili col modello a nebulosa. Per giustificare la teoria si introduce una ulteriore ipotesi secondo la quale tali discrepanze siano il frutto di avvenimenti accaduti successivamente alla nascita del sistema solare.

### Una stima dell'età

Attraverso misure radiometriche su delle meteoriti alcuni ricercatori hanno stimato che l'età del sistema solare sia di circa 4,5 miliardi di anni. Le più vecchie rocce della Terra sono vecchie circa 3,9 miliardi di anni. Rocce di questa età sono rare dato che la superficie terrestre è soggetta ad un continuo rimodellamento dovuto a erosione, vulcanismo e movimento delle placche continentali.

Vista la difficoltà di reperire rocce la cui età sarebbe compatibile, per stimare l'età del sistema solare si studiano le meteoriti che sono precipitate sul pianeta: affinché l'età della terra sia databile con questo metodo è necessario che abbia la medesima età delle rocce spaziali. Diventa quindi necessario ipotizzare che queste si siano formate nelle prime fasi di condensazione della nebulosa solare, contemporaneamente ai pianeti, e che non si siano formate successivamente e non siano pervenute dall'esterno del sistema. Le meteoriti più vecchie (come quella di Canyon Diablo) sono state datate 4,6 miliardi di anni, pertanto questo è un limite inferiore dell'età del sistema solare.

### Evoluzione successiva

Fino alla fine del XX secolo si è pensato che i pianeti occupino oggi orbite simili e vicine a quelle che avevano in origine; questa visione è andata cambiando radicalmente in tempi recenti e si pensa che l'aspetto del sistema solare alle sue origini fosse molto diverso da quello attuale. Si ipotizza oggi che i corpi presenti nel sistema solare interno alla fascia degli asteroidi con massa non inferiore a quella di Mercurio fossero cinque (e non gli attuali quattro), che il sistema solare esterno fosse più compatto di com'è oggi e che la fascia di Kuiper occupasse un'orbita più distante dell'attuale.

Gli impatti tra corpi celesti, ancorché rari sulla scala dei tempi della vita umana, sono considerati una parte essenziale dello sviluppo e dell'evoluzione del sistema solare. Oltre all'impatto da cui si ipotizza abbia avuto origine la Luna terrestre, anche il sistema Plutone-Charonte si pensa derivi da un impatto tra oggetti della fascia di Kuiper. Esempi recenti di collisioni sono lo schianto della cometa Shoemaker-Levy 9 su Giove nel 1994 ed il cratere Meteor Crater che si trova in Arizona.

### **Sistema solare interno**

Stando alle ipotesi che godono attualmente di maggior credito, il sistema solare interno fu teatro di un gigantesco impatto tra la Terra ed un corpo di massa analoga a quella di Marte (il "quinto corpo" cui si è accennato in precedenza, chiamato Theia). Da tale impatto si formò la Luna. Si ipotizza che tale corpo si sia formato in uno dei punti lagrangiani stabili del sistema Terra-Sole ( $L_4$  o  $L_5$ ) e sia nel tempo andato alla deriva.

### **Giove “guardiano” della Terra**



Un'immagine di Giove ottenuta nel 1990 a partire dai dati inviati dalla sonda Voyager 1 nel 1979. NASA

Giove (dal latino Iovem, accusativo di Iuppiter) è il quinto pianeta del sistema solare in ordine di distanza dal Sole ed il più grande di tutto il sistema planetario: la sua massa corrisponde a 2 volte e mezzo la somma di quelle di tutti gli altri pianeti messi insieme. È classificato, al pari di Saturno, Urano e Nettuno, come gigante gassoso.

Giove ha una composizione simile a quella del Sole: infatti è costituito principalmente da idrogeno ed elio con piccole quantità di altri composti, quali ammoniaca, metano ed acqua. Si ritiene che il pianeta possieda una struttura pluristratificata, con un nucleo solido, presumibilmente di natura rocciosa e costituito da carbonio e silicati di ferro, sopra il quale gravano un mantello di idrogeno metallico ed una vasta copertura atmosferica che esercitano su di esso delle altissime pressioni. L'atmosfera esterna è caratterizzata da numerose bande e zone di tonalità variabili dal color crema al marrone costellate da formazioni cicloniche ed anticicloniche, tra le quali spicca la Grande Macchia Rossa. La rapida rotazione del pianeta gli conferisce l'aspetto di uno sferoide oblato e genera un intenso campo magnetico che dà origine ad un'estesa magnetosfera.

A causa delle sue dimensioni e della composizione simile a quella solare, Giove è stato considerato per lungo tempo una "stella fallita": in realtà solamente se avesse avuto l'opportunità di accrescere la propria massa sino a 75-80 volte quella attuale il suo nucleo avrebbe ospitato le condizioni di temperatura e pressione favorevoli all'innesco delle reazioni di fusione dell'idrogeno in elio, il che avrebbe reso il sistema solare un sistema stellare binario.

**L'intenso campo gravitazionale di Giove influenza il sistema solare nella sua struttura perturbando le orbite degli altri pianeti e lo "ripulisce" da detriti che altrimenti rischierebbero di colpire i pianeti più interni.**

Intorno a Giove orbitano numerosi satelliti e un sistema di anelli scarsamente visibili.

### Fascia degli asteroidi

Secondo l'ipotesi della nebulosa la fascia degli asteroidi conteneva inizialmente una quantità di materia più che sufficiente per formare un pianeta, tuttavia i planetesimi che vi si formarono non poterono fondersi in un unico corpo a causa dell'interferenza gravitazionale prodotta da Giove venutosi a formare prima. Allora come oggi le orbite dei corpi nella fascia degli asteroidi sono in risonanza con Giove, tale risonanza causò la fuga di numerosi planetesimi verso lo spazio esterno e impedì agli altri di consolidarsi in un corpo massiccio. Sempre secondo questa ipotesi gli asteroidi osservati oggi sono i residui dei numerosi planetesimi che si sarebbero formati nelle prime fasi della nascita del sistema solare.

L'effetto di Giove avrebbe scalzato dall'orbita la maggior parte della materia contenuta originariamente nell'orbita della fascia e la massa degli asteroidi residui oggi è circa  $2,3 \times 10^{21}$  kg. La perdita di massa sarebbe stato il fattore cruciale che impedì agli oggetti della fascia degli asteroidi di consolidarsi in un pianeta. Gli oggetti di grande massa hanno un campo gravitazionale sufficiente ad impedire la perdita di grandi quantità di materia in seguito ai violenti impatti con altri corpi celesti (i frammenti ricadono sulla superficie del corpo principale). I corpi più massicci della fascia degli asteroidi non sarebbero stati invece sufficientemente grandi: le collisioni li hanno frantumati ed i frammenti sono sfuggiti alla reciproca attrazione gravitazionale. La prova delle avvenute collisioni è osservabile nelle piccole lune che orbitano attorno agli asteroidi più grandi che possono essere considerati frammenti la cui energia non è stata sufficiente per poterli separare dal corpo principale.

### I pianeti esterni

È opinione diffusa oggi che la parte esterna del sistema solare sia stata foggata dalle migrazioni planetarie. Molti degli oggetti della fascia di Kuiper (v. oltre) furono scagliati verso il sistema solare interno da Saturno, Urano e Nettuno, mentre Giove spesso spinse questi oggetti fuori dal sistema solare. Come risultato di queste interazioni Giove migrò su orbite più strette verso il Sole, mentre Saturno, Urano e Nettuno migrarono verso l'esterno. Un grande passo per la comprensione di come tali fenomeni abbiano modellato il sistema solare esterno è avvenuto nel 2004, quando nuove simulazioni computerizzate hanno mostrato che se Giove avesse compiuto meno di due rivoluzioni attorno al Sole nel tempo in cui Saturno ne compie una, la migrazione dei due pianeti avrebbe portato a orbite in risonanza 2:1 in cui il periodo di rivoluzione di Giove diventa esattamente la metà di quello di Saturno. Questa risonanza avrebbe avuto inoltre l'effetto di spingere Urano e Nettuno su orbite molto ellittiche, con un 50% di probabilità che questi si scambiassero di posto. Il pianeta più esterno (Nettuno) sarebbe quindi stato spinto ulteriormente verso l'esterno, dentro l'orbita occupata allora dalla fascia di Kuiper.

Le interazioni tra i pianeti e la fascia di Kuiper successive allo stabilirsi della risonanza 2:1 tra Giove e Saturno possono spiegare le caratteristiche orbitali e le inclinazioni assiali dei pianeti giganti più esterni. Urano e Saturno occupano le loro posizioni attuali per via della loro reciproca interazione e dell'interazione con Giove, mentre Nettuno occupa l'orbita attuale perché è su quella interagente con la fascia di Kuiper.

La dispersione degli oggetti della fascia di Kuiper può spiegare il bombardamento dei corpi del sistema solare interno avvenuto circa 4 miliardi di anni fa.

### Satelliti naturali

La maggior parte dei pianeti del sistema solare possiede delle lune. La loro formazione può spiegarsi con una di tre possibili cause:

- formazione contemporanea al pianeta dalla condensazione di un disco proto-planetario (tipica dei giganti gassosi),

- formazione da frammenti da impatto (con un impatto sufficientemente violento ad un angolo poco profondo),
- cattura di un oggetto vicino.

I giganti gassosi hanno un sistema di lune interne originatesi dal disco proto-planetario. Lo dimostrano le grandi dimensioni di tali lune e la loro vicinanza al pianeta - queste proprietà sono incompatibili con la cattura, mentre la natura gassosa dei pianeti giganti rende impossibile la formazione di satelliti per condensazione di frammenti da impatto. Le lune esterne dei giganti gassosi sono invece piccole, con orbite molto ellittiche e dalle varie inclinazioni, questo fa pensare che si tratti di satelliti catturati dal campo gravitazionale del pianeta.

Per i pianeti interni e per gli altri corpi del sistema solare, la collisione sembra essere il meccanismo principale per la formazione di satelliti, in cui una parte consistente del materiale planetario, espulsa dalla collisione, finisce in orbita attorno al pianeta e si condensa in una o più lune. La Luna terrestre, come detto, si pensa essere originata da un evento simile.

Dopo la loro formazione, i sistemi satellitari continuano ad evolvere, l'effetto più comune è la modifica dell'orbita dovuta alle forze di marea. L'effetto è dovuto al rigonfiamento che la gravità del satellite crea nell'atmosfera e negli oceani del pianeta (e in misura minore anche nel corpo solido stesso). Se il periodo di rotazione del pianeta è inferiore a quello di rivoluzione della luna, il rigonfiamento precede il satellite e la sua gravità causa un'accelerazione del satellite che tende ad allontanarsi lentamente dal pianeta (è il caso della Luna); se invece la luna orbita più rapidamente di quanto il pianeta ruoti su se stesso o se ha un'orbita retrograda attorno al pianeta, allora il rigonfiamento segue il satellite e ne causa il rallentamento, provocando un restringimento dell'orbita nel tempo. La luna marziana di Fobos sta lentamente avvicinandosi a Marte per questa ragione.

Un pianeta può creare a sua volta un rigonfiamento nella superficie del satellite, questo rallenta la rotazione della luna fino a quando il periodo di rotazione e di rivoluzione coincidono. In tal caso, la luna mostrerà al pianeta sempre la stessa faccia. È il caso della Luna terrestre e di molti altri satelliti del sistema solare, tra cui la luna di Giove, Io. Nel caso di Plutone e Caronte, sia il pianeta che il satellite sono legati l'uno all'altro da forze di marea.

### Fascia di Kuiper

La Fascia di Kuiper (o Fascia di Edgeworth-Kuiper, dal nome dei due astronomi Kenneth Edgeworth e Gerard Kuiper), è una regione del Sistema Solare che si estende dall'orbita di Nettuno (alla distanza di 30 UA) fino a 50 UA dal Sole. Si tratta di una fascia di asteroidi esterna rispetto all'orbita dei pianeti maggiori.

Nella fascia sono stati scoperti più di 800 oggetti (**Kuiper belt objects, o KBO**). Il più grande è il pianeta nano Eris, scoperto nel 2005; prima di allora si riteneva che il primato spettasse a Plutone, assieme al suo satellite Caronte; intanto a partire dall'anno 2000 sono stati trovati altri oggetti di dimensioni ragguardevoli: 50000 Quaoar, scoperto nel 2002, è grande la metà di Plutone, e quindi è più grande del maggiore degli asteroidi tradizionali, Cerere. Gli altri KBO sono progressivamente più piccoli. L'esatta classificazione di questi oggetti non è chiara, perché sono probabilmente molto differenti dagli asteroidi più interni.

La maggior parte dei KBO, come si è visto usando la spettroscopia, sono costituiti da ghiaccio ed hanno la stessa composizione chimica delle comete, e così come nelle comete è evidente la presenza di composti organici.

Molti astronomi pensano che siano appunto comete che, non avvicinandosi mai al Sole, non emettono la loro coda. La distinzione tra cometa e asteroide non è molto chiara e le incertezze abbondano, come mostrato dal caso dell'asteroide 2060 Chirone.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Simulazioni al computer hanno mostrato che la fascia di Kuiper si è formata sia a causa di Giove (all'inizio della storia del Sistema Solare, la considerevole gravità del pianeta ha fatto sì che molti piccoli oggetti fossero espulsi dalle regioni interne del sistema, ma non completamente), sia spontaneamente. Le stesse simulazioni e altre teorie predicono che nella fascia dovrebbero trovarsi anche oggetti di massa considerevole, paragonabili a Marte o alla Terra.

Alcuni KBO hanno orbite eccentriche che intersecano quella di Nettuno. Questi oggetti si trovano in risonanza orbitale, in vari rapporti: 1:2, 2:3 (questo è il caso di Plutone, e di oggetti simili chiamati plutini), 2:5, 3:4, 3:5, 4:5, 4:7.

Questa fascia non deve essere confusa con la nube di Oort, che non si trova solo sul piano generale del Sistema Solare, ed è molto più distante.

I primi astronomi a suggerire l'esistenza di questa fascia furono Frederick C. Leonard nel 1930 e Kenneth E. Edgeworth nel 1943. Nel 1951, Gerard Kuiper ipotizzò che la fascia fosse presente all'epoca della formazione del sistema solare, ma che ora fosse scomparsa. Congetture più dettagliate furono esposte da Al G. W. Cameron nel 1962, Fred L. Whipple nel 1964, e Julio Fernandez nel 1980. La fascia e gli oggetti in essa contenuti furono chiamati col nome di Kuiper dopo la scoperta di 1992 QB1, il primo oggetto conosciuto.

È difficile stimare il diametro degli oggetti della fascia di Kuiper. Per oggetti di cui si conoscono molto bene gli elementi orbitali, in pratica solo Plutone e Caronte, i diametri possono essere misurati con precisione dall'occultazione delle stelle.

Per altri KBO di grandi dimensioni, il diametro può essere stimato da misure termiche nell'infrarosso. Se un corpo ha un'elevata albedo è probabilmente freddo, quindi non produce molta radiazione nell'infrarosso; al contrario, un corpo dall'albedo ridotta produce più radiazione infrarossa.

Gli oggetti della fascia di Kuiper sono così lontani dal Sole da essere molto freddi e producono una radiazione con una lunghezza d'onda attorno ai 60 micrometri. Questa radiazione è assorbita dall'atmosfera terrestre e non può essere osservata dal suolo: gli astronomi devono quindi osservare la radiazione residua nel lontano infrarosso e il diametro stimato è affetto da una grossa incertezza. Inoltre, la radiazione emessa è molto debole e solo i corpi più grandi possono essere osservati con questo metodo.

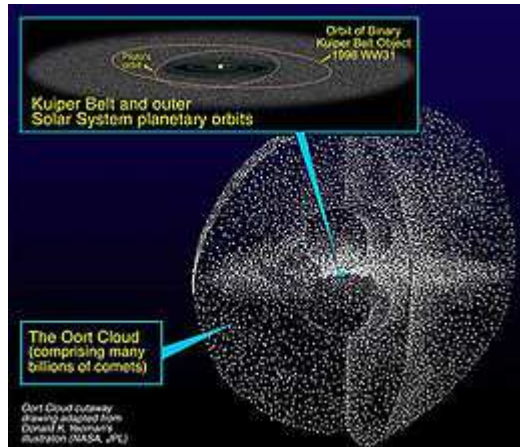
I più grandi KBO conosciuti sono:

Numero	Nome	Diametro equatoriale (km)	Albedo	Distanza media dal Sole (UA)	Data della scoperta	Metodo usato per la misura del diametro
136199	Eris	$2326 \pm 12$	0.96	67,6	2005	occultazione
134340	Plutone	$2306 \pm 20$	0,575	39,4	1930	occultazione
136472	Makemake	$1800 \pm 200$	$0,8 \pm 0,2$	45,7	2005	albedo stimata
136108	Haumea	~1500	~0,6	43,3	2005	albedo stimata
90482	Orcus	~1500	~0,1 stimato	39,4	2004	albedo stimata

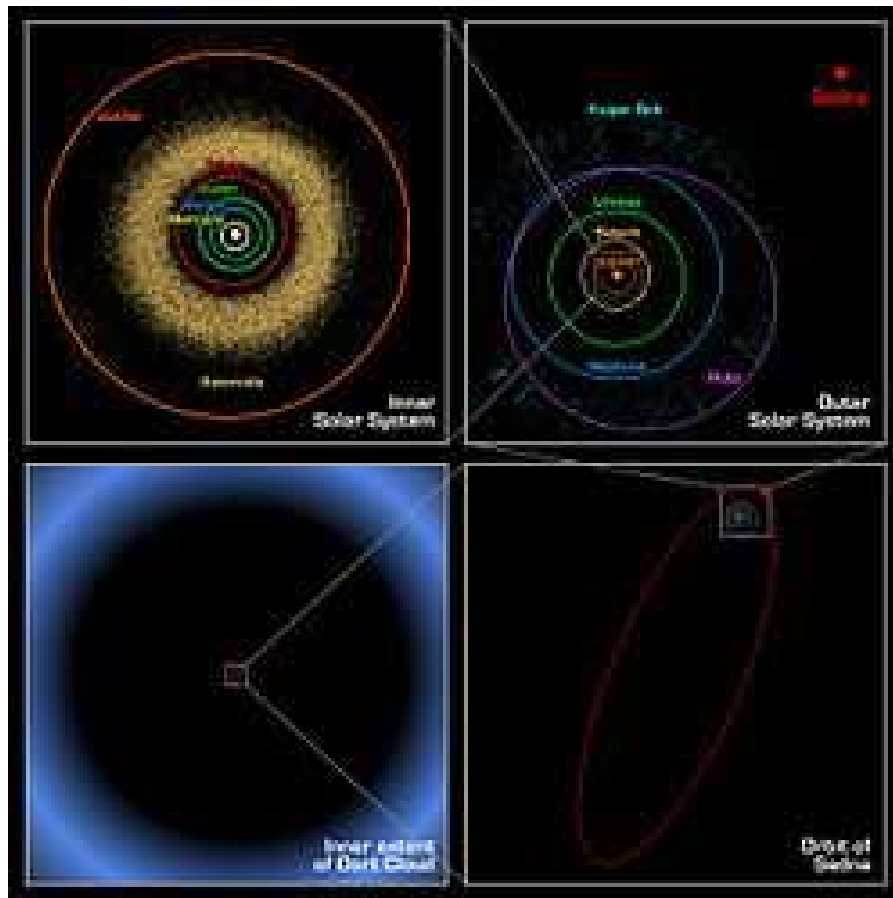
### Pianeti ipotetici della Fascia di Kuiper

Nella zona di spazio al di là di Nettuno, alcuni ritengono vi sia un pianeta ipotetico (detto Pianeta X), basandosi sui calcoli astronomici di Percival Lowell, effettuati agli inizi del XX secolo, sulle perturbazioni orbitali di Nettuno. In realtà, tali perturbazioni, qualora fossero reali, dovrebbero essere causate da una massa molto maggiore di quella di Plutone. In seguito, più precisi calcoli dimostrarono che tali perturbazioni erano solo apparenti ed imputabili ad un'imprecisa conoscenza della massa di Nettuno. Plutone fu scoperto per caso nel 1930 da Clyde Tombaugh.

### Nube di Oort



Rappresentazione artistica della Fascia di Kuiper e della nube di Oort



L'immagine mostra le distanze delle orbite di diversi oggetti nel sistema solare, da in alto a sinistra e in senso orario: i pianeti interni, i pianeti esterni, l'orbita di Sedna e la nube di Oort

La nube di Oort è un'ipotetica nube sferica di comete posta tra 20.000 e 100.000 UA, o 0,3 e 1,5 anni luce dal Sole, cioè circa 2400 volte la distanza tra il Sole e Plutone.

Questa nube non è mai stata osservata perché troppo lontana e buia perfino per i telescopi odierni, ma si ritiene che sia il luogo da cui provengono le comete di lungo periodo (come la Hale-Bopp e la Hyakutake, recentemente avvistate) che attraversano la parte interna del sistema solare. Le comete dette di corto periodo (tra le quali la Halley è la più famosa) potrebbero invece venire dalla fascia di Kuiper.

Una controversa teoria prevede che a perturbare lo stato delle comete nella nube di Oort sia un'ipotetica stella compagna del Sole chiamata Nemesis. La nube di Oort è un residuo della nebulosa originale da cui si formarono il Sole e i pianeti cinque miliardi di anni fa ed è debolmente legata al sistema solare. Si pensa che anche le altre stelle abbiano una nube di Oort e che i bordi esterni delle nubi di due stelle vicine possano a volte sovrapporsi, causando un'occasionale "intrusione" cometaria. Attualmente sono noti solo due oggetti che potrebbero appartenere alla nube di Oort.

### **Ipotesi**

Nel 1932, un astronomo estone, Ernst Öpik ipotizzò che le comete di lungo periodo potessero originarsi in una nube di corpi celesti posizionata al confine estremo del Sistema Solare.

Nel 1950, l'idea venne ripresa dall'astronomo olandese Jan Oort, che si proponeva di risolvere uno dei più interessanti paradossi astronomici. L'orbita delle comete è molto instabile, essendo la dinamica ciò che determina se esse sono destinate a collidere con il sole o con qualche altro pianeta, o se, viceversa, sono destinate ad essere espulse a causa della perturbazione dei corpi celesti del sistema solare.

Inoltre, il ghiaccio e gli altri elementi piuttosto volatili di cui sono composte le comete consentono la dispersione graduale a causa della radiazione elettromagnetica fino a raggiungere il punto in cui la cometa si divide e si assottiglia fino a raggiungere uno strato di crosta isolante che rallenta la perdita di ulteriori gas. A seguito di ciò, Oort realizzò che le comete non potevano essersi formate nella loro orbita attuale e che perciò dovevano essersi tratteneute in una lontana regione spaziale, un deposito, per la maggior parte della loro esistenza. Esistono due principali classi di cometa: le comete di corto periodo, che presentano orbite inferiori alle 10 UA e le comete di lungo periodo che mostrano orbite maggiori alle 1.000 UA. Oort analizzò quest'ultime e riscontrò che la maggior parte possedevano un Afelio (la distanza maggiore dal sole) di circa 20.000 UA, e sembravano provenire da tutte le direzioni, ciò rafforzava la sua ipotesi e suggerivano un deposito di forma sferica. Le poche comete che possedevano Afelio di 10.000 UA dovevano essere passate attraverso il Sistema solare e dovevano aver avuto le loro orbite modificate verso l'interno dalla forza di gravità generata dai pianeti.

### **Composizione e struttura**

Si pensa che la nube di Oort si estenda tra le 2.000 e le 5.000 UA fino ad arrivare alle 50.000 UA dal Sole. Altre stime collocano il confine della nube di Oort tra le 100.000 e le 200.000 unità astronomiche.

È possibile suddividere la nube di Oort in due regioni: la nube di Oort esterna (20.000-50.000 UA), di forma sferica e la nube di Oort interna (2.000-20.000 UA) di forma toroidale.

### Futuro del Sistema Solare

Escludendo qualche fenomeno imprevisto, si ipotizza che il sistema solare come lo conosciamo oggi durerà per altri 5 miliardi di anni circa, quando il Sole aumenterà gradualmente la propria luminosità di circa il 10% oltre i livelli attuali; tale aumento di radiazione renderà la superficie della Terra inabitabile, mentre la vita potrà ancora resistere negli oceani più profondi. In questo periodo è possibile che la temperatura della superficie di Marte aumenti gradualmente e l'anidride carbonica e l'acqua attualmente congelate sotto la superficie del suolo vengano liberate nell'atmosfera creando un effetto serra in grado di riscaldare il pianeta fino ad ottenere condizioni paragonabili a quelle odierne della Terra e fornendo una futura dimora potenziale per la vita. In circa 3,5 miliardi di anni le condizioni climatiche della Terra saranno simili a quelle che oggi caratterizzano Venere: gli oceani saranno evaporati e la vita - nelle forme che oggi conosciamo - sarà impossibile.

In circa 5,4 miliardi di anni il Sole terminerà le riserve di idrogeno. In circa 7,59 miliardi di anni da oggi il Sole entrerà nella fase di gigante rossa iniziando a bruciare gli strati di idrogeno più esterni dell'inerte nucleo di elio formatosi, espandendosi a circa 256 volte l'attuale diametro, 1,2 UA. Con l'espansione del Sole Mercurio e Venere verranno inghiottiti. Il destino della Terra è possibile che sarà il medesimo, anche se ci sono alcuni studi che parlano di un allontanamento dell'orbita terrestre dal Sole a causa della graduale perdita di massa di quest'ultimo.

Durante questo periodo è possibile che corpi esterni in orbita attorno alla Fascia di Kuiper, su cui è presente ghiaccio, ad esempio Plutone e Caronte, possano raggiungere condizioni ambientali compatibili con quelle richieste dalla vita umana.

Successivamente l'elio prodotto nello strato esterno cadrà nel nucleo della stella aumentandone la densità fino al livello sufficiente per innescare la fusione dei nuclei di elio in nuclei di carbonio. A questo punto il Sole dovrebbe contrarsi ad una dimensione poco maggiore dell'attuale e consumare il proprio elio per circa altri 100 milioni di anni. Nuovamente andrà poi incontro ad un'espansione come gigante rossa in cui consumerà l'elio degli strati più esterni per altri 100 milioni di anni e successivamente collasserà di nuovo espellendo una grande quantità di materia nello spazio attorno a sé, formando un guscio di gas noto come nebulosa planetaria.

Sarà una transizione relativamente tranquilla, niente di paragonabile ad una supernova, dato che la massa del nostro Sole è ampiamente insufficiente per arrivare a quel livello. Se vi saranno ancora terrestri per osservare il fenomeno, registreranno un massiccio incremento del vento solare, ma senza che questo provochi la distruzione del pianeta.

Ciò che infine resterà del Sole sarà una nana bianca, un oggetto straordinariamente caldo e denso, di massa circa metà di quella originale, ma compressa in un volume simile a quello della Terra. Visto dalla Terra apparirà come un punto di luce grande poco più di Venere ma dalla luminosità di centinaia di soli.

Con la morte del Sole verrà indebolita la sua attrazione gravitazionale sugli altri oggetti del sistema solare; le orbite di Marte e degli altri corpi andranno espandendosi. La configurazione finale del sistema solare sarà raggiunta quando il Sole avrà completato la sua trasformazione in nana bianca: se la Terra e Marte esisteranno ancora, sarà su un'orbita approssimativamente simile a quella 1,85 e 2,80 UA. Dopo altri due miliardi di anni il nucleo del Sole, costituito da carbonio, inizierà a cristallizzare trasformandosi in un diamante di dimensioni planetarie, destinato a spegnersi e cessare di splendere in qualche altro miliardo di anni.

### Storia delle ipotesi sulla formazione del sistema solare

Verso la fine del XIX secolo l'ipotesi della nebulosa di Kant-Laplace fu criticata da James Clerk Maxwell, che sosteneva l'impossibilità della materia di collassare a formare pianeti coesi se la materia fosse stata distribuita in un disco attorno al Sole, per via delle forze indotte dalla rotazione differenziale. Un'altra obiezione era il momento angolare del Sole, inferiore a quanto previsto dal modello di Kant-Laplace. Per molti decenni la maggior parte degli astronomi preferì l'ipotesi della "mancata collisione", ovvero della formazione dei pianeti a partire dalla materia che una stella in transito vicino al Sole avrebbe perso e avrebbe strappato al Sole per azione reciproca delle loro forze di marea.

Furono avanzate obiezioni anche all'ipotesi della "mancata collisione" e, durante gli anni quaranta i modelli matematici a sostegno dell'ipotesi nebulare furono migliorati e convinsero la comunità scientifica. Nella versione modificata si assunse che la massa della protostella fosse maggiore e la discrepanza di momento angolare attribuita alle forze magnetiche, ovvero alle onde di Alfvén, attraverso cui il neonato Sole trasferisce parte del suo momento angolare al disco protoplanetario e ai planetesimi, come osservato avvenire in alcune stelle, per esempio T Tauri.

Il modello della nebulosa riveduto e corretto fu basato interamente su osservazioni condotte sui corpi del nostro sistema solare, in quanto l'unico conosciuto fino a metà degli anni '90. Non si era del tutto certi della sua applicabilità ad altri sistemi planetari, benché la comunità scientifica fosse ansiosa di verificare il modello a nebulosa trovando nel cosmo altri dischi protoplanetari o persino pianeti extrasolari.

Nebulose stellari e dischi protoplanetari sono stati osservati nella nebulosa di Orione e in altre regioni di formazione delle stelle grazie al telescopio spaziale Hubble. Alcuni di questi dischi hanno diametri maggiori di 1 000 UA.

Al gennaio 2006 risultano scoperti 180 pianeti extrasolari, che hanno riservato numerose sorprese. Il modello della nebulosa ha dovuto essere rivisto per spiegare le caratteristiche di questi sistemi planetari. Non c'è consenso su come spiegare la formazione degli osservati pianeti giganti su orbite molto vicine alla loro stella ("hot Jupiters", v. più avanti), anche se tra le ipotesi possibili vi sono la migrazione planetaria e il restringimento dell'orbita dovuto ad attrito con i residui del disco protoplanetario.

In tempi recenti è stato sviluppato un modello alternativo basato sulla cattura gravitazionale, che nelle intenzioni dei suoi propugnatori dovrebbe spiegare alcune caratteristiche del sistema solare non spiegate dalla teoria della nebulosa.

### Esopianeti

Un pianeta extrasolare o esopianeta è un pianeta non appartenente al sistema solare, orbitante cioè attorno a una stella diversa dal Sole.

Al 8 giugno 2014 erano conosciuti 1.795 pianeti extrasolari in 1114 sistemi planetari diversi (di cui 461 multipli) e 201 altri pianeti in attesa di conferma o controversi. L'elenco completo dei pianeti extrasolari conosciuti può essere trovato nella Lista dei pianeti extrasolari confermati e nella Lista dei pianeti extrasolari non confermati o controversi. Il traguardo simbolico del 1000° pianeta conosciuto è stato raggiunto il 22 ottobre 2013, con l'annuncio di 11 pianeti gioviani caldi da parte del progetto SuperWASP.

La scoperta della maggior parte degli esopianeti è resa possibile da metodi di osservazione indiretta piuttosto che da osservazioni al telescopio. A causa dei limiti delle tecniche di osservazione attuali, la maggior parte dei pianeti individuati sono giganti gassosi come Giove e, solo in misura minore, pianeti rocciosi massivi del tipo Super Terra, anche se ultimamente la frazione di pianeti più piccoli sta notevolmente crescendo, soprattutto grazie alla missione Kepler.

Gli esopianeti conosciuti appartengono a sistemi planetari che orbitano attorno a una stella. Esistono, tuttavia, numerose osservazioni non confermate di oggetti di massa planetaria non legati a vincoli gravitazionali con alcuna stella (cosiddetti pianeti interstellari): tali corpi celesti non sono definibili come "pianeti" secondo l'attuale definizione dell'Unione Astronomica Internazionale.

L'interesse scientifico sugli esopianeti è cresciuto sempre più a partire dal 1992, anno della prima scoperta confermata (PSR B1257+12). Inizialmente il ritmo delle scoperte è stato molto lento, ma negli ultimi anni ha conosciuto una vera e propria impennata, passando dai 20 pianeti scoperti nel 2000 ai 189 del 2011.

La possibilità di presenza di sistemi planetari attorno a stelle simili al Sole è valutata in modo molto diverso: molti astronomi ritengono che questa sia la norma, mentre altri stimano che solo il 10% delle stelle di tipo solare posseggano un sistema planetario.

Spesso la ricerca di esopianeti coincide con la ricerca di mondi in grado di ospitare una forma di vita extraterrestre. A oggi, Kepler-22b - ruotante attorno ad una nana gialla, Kepler-22, distante approssimativamente 600 anni luce dal Sistema Solare - sembra essere il miglior esempio di esopianeta di tipo terrestre (classificato tra le Super Terre) orbitante nella zona abitabile del proprio sistema; esso avrebbe infatti una temperatura superficiale media di circa 22 °C, il che consente la presenza di acqua allo stato liquido, presupposto per la presenza di vita (o per lo meno della vita come la conosciamo). Sempre una pianeta scoperto da Kepler, Kepler-62e, è ad oggi ritenuto essere il pianeta più simile alla Terra mai individuato.

Sono in costruzione attualmente diversi telescopi progettati appositamente per l'individuazione di pianeti extrasolari, tra cui l'Automated Planet Finder. Anche le missioni spaziali Gaia (agosto 2013), SIM (prevista per il 2015) e Terrestrial Planet Finder (prevista dopo il 2015), avranno come scopo principale la ricerca di pianeti extrasolari.

### Storia delle scoperte degli esopianeti

Pienamente confermata solo nel 1995, l'esistenza di pianeti extrasolari fu per lungo tempo ritenuta più che plausibile tanto che speculazioni scientifiche di questo tipo risalgono almeno all'inizio del XVIII secolo: la prima ipotesi dell'esistenza di questi corpi celesti fu formulata, infatti, da Isaac Newton nel 1713.

Annunci di presunte scoperte si susseguirono per tutto il XIX secolo, ma le tecniche di osservazione dell'epoca non erano sufficientemente accurate e tecnologicamente sviluppate per confermarle con sicurezza. Un caso significativo, in tal senso, fu la controversia che riguardò la stella binaria 70 Ophiuchi. Nel 1855, il capitano W. S. Jacob, dall'osservatorio di Madras della Compagnia delle Indie, misurò anomalie tali, nell'orbita della stella, da fargli ritenere "altamente probabile" che queste fossero dovute alla presenza di un pianeta. Tra il 1896 e il 1899 Thomas J. J. See, astronomo dell'Università di Chicago, e l'Osservatorio Navale degli Stati Uniti sostennero che le anomalie erano dovute alla presenza di un compagno oscuro con un periodo orbitale di 36 anni connesso ad una delle due stelle del sistema binario. A questa tesi si oppose Forest Ray Moulton che nel 1899 pubblicò proprie analisi secondo le quali un sistema di tre corpi con i parametri orbitali descritti da See sarebbe risultato altamente instabile.

Il primo annuncio in grande stile della scoperta di un pianeta extrasolare risale al 1963: Peter van de Kamp sostenne di aver scoperto - tramite misurazioni astrometriche protratte per 20 anni - un compagno invisibile orbitante attorno alla stella di Barnard e con un massa pari a 1,6 volte quella di Giove. Tuttavia, dieci anni più tardi, nel 1973, John Hershey dimostrò l'inesistenza del pianeta: l'anomalia misurata da van de Kamp era il prodotto di un errore sistematico nella meccanica del telescopio da lui utilizzato.

Nel 1984 si aprì un nuovo orizzonte nella scienza dei pianeti extrasolari: venne scoperto un disco circumstellare attorno alla stella  $\beta$  Pictoris. A 20 anni di distanza da quella scoperta sono note molte centinaia di dischi circumstellari che rappresentano le regioni in cui è in corso la formazione di nuovi pianeti oppure i residui di questo processo.

Pochi anni più tardi, nel 1989, venne annunciata da David Latham la scoperta di un compagno substellare attorno alla stella HD 114762. Il presunto pianeta (HD 114762b) ha una massa non inferiore a 11 volte quella di Giove. Alla data del 2006 non era ancora chiara la sua natura: potrebbe essere un gigante gassoso supermassivo, ma anche - considerato un ipotetico limite superiore di 145 masse gioviane - una nana bruna o una nana rossa.

Nel 1992, gli astronomi Alexander Wolszczan e Dale Frail annunciarono la scoperta di due pianeti molto esotici di massa non inferiore a 3,4 e 2,8 volte quella terrestre e orbitanti rispettivamente a 0,36 e 0,47 UA attorno alla pulsar PSR B1257+12 nella costellazione della Vergine.

La scoperta dei due pianeti proviene dall'analisi dei dati - pubblicata tra il 1992 e il 1994 - di una campagna di osservazioni realizzata nel 1990 dall'osservatorio di Arecibo che aveva già condotto i due astronomi a identificare la pulsar sopracitata.

Nel 1994 viene individuato anche un terzo pianeta, di massa pari a due volte la Luna e orbitante a 0,19 UA. Si tratta della prima scoperta di un sistema planetario extrasolare.

L'anno successivo, nel 1995, Gordon Walker sostenne l'ipotesi che le oscillazioni della velocità radiale della stella Alrai ( $\gamma$  Cephei) potrebbero derivare dalla presenza di un pianeta di massa pari a due volte quella di Giove come effettivamente confermato da osservazioni più accurate condotte nel 2002.

Il 5 ottobre 1995, Michel Mayor e Didier Queloz, dell'Osservatorio di Ginevra, annunciarono di avere scoperto il primo pianeta extrasolare di massa paragonabile a quella di Giove attorno alla stella 51 Pegasi. Pochi giorni più tardi, il 12 ottobre, gli americani Geoff Marcy e Robert Butler - nel condurre una campagna di osservazione simile a quella degli astronomi svizzeri - confermarono anch'essi l'esistenza del pianeta.

### Metodi di individuazione

I pianeti, in confronto alle stelle, emettono molta meno luce nel cosmo. Per questo motivo l'individuazione diretta di pianeti extrasolari risulta estremamente difficile: in condizioni normali di visibilità, i pianeti hanno solitamente una luminosità pari a circa un milione di volte meno di quella di una stella. In aggiunta a questa intrinseca difficoltà di rilevazione, la maggiore luminosità delle stelle, attorno alle quali orbitano i pianeti, causa un bagliore che tende a coprire la luce debolmente riflessa dai corpi celesti del rispettivo sistema.

Per tali ragioni i telescopi attuali possono fornire solo informazioni indirette sui parametri fisici e orbitali degli esopianeti e la loro presenza può essere rilevata solo in circostanze straordinarie utilizzando tecniche di indagine indirette. Nello specifico è possibile individuare i pianeti più massivi (considerevolmente più grandi di Giove), sufficientemente distanti dalla propria stella e di recente formazione (così che, essendo più caldi, siano capaci di intense emissioni nello spettro infrarosso).

Fino al 2008 sono stati determinati sei metodi di osservazione indiretta dei pianeti extrasolari. La maggior parte degli esopianeti conosciuti sono stati scoperti con tecniche di questo tipo.

- **Astrometria:** L'astrometria consiste nella misurazione precisa della posizione di una stella nel cielo e nell'osservare in che modo questa posizione cambia nell'arco del tempo. Se la stella ha un pianeta, allora l'influenza gravitazionale del pianeta stesso causerà alla stella un leggero movimento circolare o un'orbita ellittica attorno a un comune centro di massa. Questo movimento è determinato con l'effetto Doppler.
- **Velocità radiali:** Questo metodo è conosciuto anche col nome di metodo Doppler. Le variazioni nella velocità con cui la stella si avvicina o si allontana dalla Terra — questa velocità è definita appunto come velocità radiale della stella rispetto alla Terra — possono far dedurre la presenza di un pianeta, a causa di sbilanciamenti della linea spettrale della stella, in accordo con l'effetto Doppler. Col passare del tempo, questa è diventata la tecnica più produttiva usata dai "cacciatori di pianeti". Con questo metodo si possono determinare la massa e il peso di un pianeta extrasolare.

- **Variazioni degli intervalli di emissioni di una Pulsar:** Una pulsar (il residuo piccolo e ultradenso di una stella che è esplosa in una supernova), ruotando, emette onde radio a intervalli estremamente regolari. Leggere anomalie negli intervalli delle emissioni possono essere usate per tracciare cambiamenti nel moto della pulsar, causati dalla presenza di uno o più pianeti.
- **Metodo del transito:** Se un pianeta attraversa (o transita) di fronte alla propria stella, allora è osservabile una riduzione della luminosità della stella eclissata. L'ammontare della variazione dipende dalla dimensione del pianeta e della stella stessa. Con questo metodo si possono determinare le dimensioni del pianeta extrasolare.
- **Microlente gravitazionale:** L'effetto della lente gravitazionale avviene quando i campi gravitazionali di due corpi celesti cooperano per focalizzare la luce di una stella lontana. Se il primo corpo celeste (quello più vicino all'osservatore) è un pianeta, ciò sta a significare che possiede un campo gravitazionale tale da contribuire in modo importante all'effetto della microlente gravitazionale.
- **Dischi circumstellari e protoplanetari:** Le nubi di polveri circondano molte stelle, ed esse possono essere individuate poiché in grado di assorbire la luce stellare e riemetterla sotto forma di radiazione infrarossa. Analizzando attentamente le nubi di polveri, è possibile individuare elementi che suggeriscono la presenza di pianeti e/o protopianeti.

Per il futuro sono in programma numerose missioni spaziali che miglioreranno le tecniche di individuazione dei pianeti extrasolari. Le misurazioni astronomiche fatte dallo spazio permettono una maggiore sensibilità rispetto a quelle fatte dalla superficie della Terra: infatti, viene annullato l'effetto distortore dell'atmosfera terrestre, e gli strumenti agli infrarossi possono individuare anche le radiazioni che vengono bloccate dall'atmosfera. Alcune di queste missioni dovrebbero essere capaci di individuare pianeti di tipo terrestre. Grandi telescopi spaziali, infine, potrebbero ottenere immagini dirette degli esopianeti.

### Stranezze dei sistemi extrasolari

Molti astronomi si domandano perché molti pianeti extrasolari siano giganti gassosi di grandi dimensioni e perché si trovino molto vicini alla loro stella, rispetto a quelli del nostro sistema solare. Per esempio,  $\tau$  Bootis ha un pianeta 4 volte più grande di Giove a meno di un quarto di unità astronomica (UA) di distanza (cioè un quarto della distanza Terra-Sole). HD 114762 ha un pianeta 11 volte più grande di Giove, a meno di mezza UA. Una possibile risposta è che i metodi di ricerca odierni favoriscano l'individuazione di questo tipo di sistemi: un grande pianeta posto a piccola distanza amplifica le oscillazioni della stella, ed esse sono facilmente visibili come effetto Doppler. Un pianeta più piccolo, a distanza più grande, provoca oscillazioni molto più piccole e difficili da vedere.

Un'altra spiegazione è che i pianeti si siano formati a distanze maggiori, per poi muoversi verso l'interno a causa delle reciproche interazioni gravitazionali. Tale modello è stato chiamato modello dei Giovi Saltellanti, nome che rende bene l'idea.

Analisi di alcuni pianeti extrasolari inoltre hanno rivelato la presenza di venti molto veloci sulla superficie con punte di 14.000 chilometri orari. Questi venti mantengono la temperatura di questi pianeti costante su tutta la superficie con escursioni termiche molto ridotte.

Analisi dei processi di fotosintesi terrestri hanno spinto dei ricercatori NASA a ipotizzare che, su alcuni pianeti extrasolari, possano esistere degli organismi in grado di sfruttare parzialmente anche la banda dell'infrarosso per la fotosintesi. Secondo questi ricercatori i futuri telescopi spaziali dovranno tenere conto di questa possibilità durante la fase di costruzione.

### Pianeti extrasolari scoperti

La pietra miliare dei pianeti extrasolari venne posta nel 1992 dagli astronomi Wolszczan e Frail che pubblicarono sulla rivista Nature i risultati di una loro osservazione, iniziata due anni prima presso il radiotelescopio di Arecibo. I due astronomi avevano scoperto la presenza di due pianeti attorno alla pulsar PSR B1257+12: si trattava dei primi pianeti extrasolari individuati con sicurezza, ma la loro rilevanza è legata soprattutto al fatto che orbitavano attorno ad una pulsar, una condizione fino ad oggi piuttosto rara. La maggior parte degli astronomi, all'epoca della scoperta, si aspettava di scoprire pianeti solo attorno alle stelle appartenenti alla sequenza principale e ancor oggi sono solo due le pulsar sicuramente dotate di sistema planetario, PSR B1620-26 e PSR B1257+12.

In seguito le scoperte si sono succedute sempre più rapidamente, con l'introduzione di strumentazione più avanzata e precisa e nuovi metodi di rivelazione.

Nel novero dei pianeti extrasolari ora sono compresi pianeti che orbitano attorno a nane rosse, stelle di sequenza principale, giganti, residui stellari, o due stelle contemporaneamente, i cosiddetti pianeti circumbinari. Si conoscono pianeti con masse da quella di Mercurio a svariate volte quella di Giove, fino a porre il quesito di dove si ponga la linea di demarcazione tra pianeti e nane brune, mentre i periodi orbitali variano da poche ore a millenni. Tramite le microlenti gravitazionali è stato persino individuato un candidato pianeta nella Galassia di Andromeda, PA-99-N2b, ma non potrà mai essere confermato, poiché gli allineamenti che producono il microlensing sono unici e irripetibili.

La caccia al gemello della Terra ha fornito candidati sempre più simili, fino a Kepler-62 e, che con un Earth Similarity Index dell'83% è attualmente considerato il pianeta più simile al nostro mai scoperto.

### Le distanze in astronomia

#### Introduzione

La misura di una distanza è una delle cose più difficili in astronomia. Sulla Terra possiamo utilizzare un righello, un'asta o una corda per misurare in modo diretto la distanza tra due oggetti, ma certo questo non si può fare con una stella o un pianeta.

Ci sono però alcuni metodi indiretti per calcolare la distanza di una stella a partire da altri dati, che si dividono in due grandi categorie: tecniche geometriche e candele campione, o meglio metodi diretti (per gli astri più vicini della nostra galassia) o indiretti che fanno uso degli indicatori di distanza, cioè corpi celesti dalle proprietà particolari che consentono di ricavare la loro distanza. Le tecniche geometriche hanno il vantaggio di non dipendere dalle proprietà fisiche degli oggetti considerati ma, poiché si basano sulla misura di dimensioni angolari o spostamenti angolari (in alcuni casi anche sulle deviazioni del cammino ottico della luce), hanno un intervallo di applicabilità spesso limitato.

Le candele campione d'altro canto sono classi di oggetti la cui luminosità o dimensione intrinseca è assunta essere la stessa per tutti i membri della classe, cosicché le eventuali differenze possono essere attribuite a differenze di distanza.

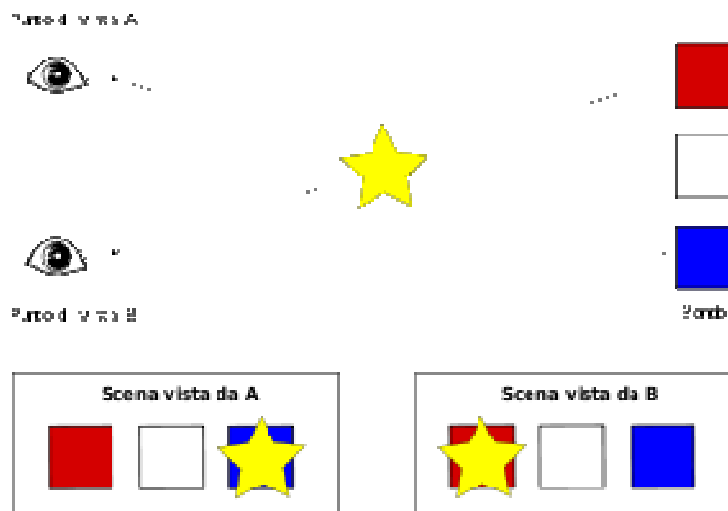
#### Gli indicatori primari

Prima di discutere gli osservabili astrofisici è opportuno definire alcune unità di misura delle distanze astronomiche ed accennare alla distanza di alcune sorgenti e grandezze di particolare interesse. All'interno del sistema solare risulta abbastanza comodo utilizzare come unità di riferimento la distanza media Terra - Sole. Questa viene indicata come Unità Astronomica (UA) e risulta:  $1 \text{ UA} = 149\,597\,870,691 \text{ km}$ . (v. più avanti)

Al di fuori del sistema solare le distanze sono molto maggiori e conviene definire altre unità di misura. L'unità più comunemente usata deriva da uno dei pochi metodi diretti di misura delle distanze stellari. La tecnica consiste nel misurare la variazione angolare con cui si osserva una stella relativamente vicina a distanza di 6 mesi. Per fare questo si considera che le stelle più lontane non cambiano la loro posizione angolare nel corso dell'anno. Tale tecnica è definita “della parallasse”.

### Parallasse

La parallasse è il fenomeno per cui un oggetto sembra spostarsi rispetto allo sfondo se si cambia il punto di osservazione.



Quando osservate qualcosa che sta davanti a voi e poi vi muovete prima verso destra e poi verso sinistra noterete che la posizione dell'oggetto sembra cambiare. Questo fenomeno è chiamato parallasse.

Da un punto di vista quantitativo, con il termine parallasse si indica il valore dell'angolo di spostamento.

Il termine deriva dal greco *παράλλαξις* (paràllaxis), che significava originariamente accavallamento, ha anche assunto il significato scientifico attuale.

Misurando l'angolo della parallasse e la distanza tra i due punti di osservazione è possibile calcolare la distanza dell'oggetto per mezzo della trigonometria. Questo è un caso particolare della triangolazione, in cui dato un lato e due angoli oppure un angolo e due lati è possibile calcolare l'intero triangolo. Nella misura della parallasse il triangolo è in genere molto stretto e lungo, con una piccola base e gli angoli prossimi a  $90^\circ$ . Per questo le misure devono essere effettuate con grande precisione.

La tecnica viene usata in astronomia per determinare la distanza di corpi celesti non eccessivamente lontani. Il punto di osservazione dalla Terra può cambiare sia in seguito alla rotazione terrestre e allora si ha la parallasse diurna, oppure in seguito alla rivoluzione annuale intorno al Sole, ed in tal caso si ha la parallasse annua.

Dopo che Keplero formulò il modello del sistema solare basato sulle leggi da lui scoperte, mancava ancora una scala delle dimensioni. I rapporti tra le orbite erano determinati, per cui sarebbe stato sufficiente misurare direttamente la distanza Terra-Sole, chiamata Unità Astronomica (UA).

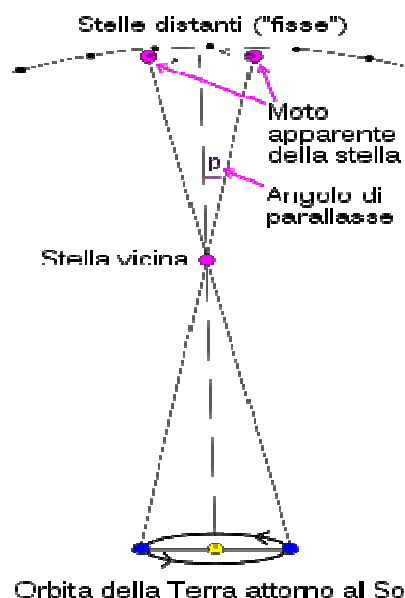
Un primo metodo per determinare la distanza dal Sole fu proposto nell'antichità da Aristarco da Samo. Se il Sole non era eccessivamente distante, il momento del primo ed ultimo quarto delle fasi lunari non cade esattamente a metà tra il plenilunio ed il novilunio. I tentativi di calcolo erano però basati sull'ipotesi di orbite circolari, ed i risultati ottenuti furono molto imprecisi.

Nel 1716 Edmund Halley suggerì che il transito di Venere sul disco solare potesse essere impiegato per ricavare la parallasse solare.

I transiti di Venere sono piuttosto rari, e le prime misure furono fatte solamente nel 1761 e nel 1769. Il metodo è viziato però da un margine di incertezza a causa dell'effetto black drop che rende difficile stabilire con precisione gli istanti di contatto tra i dischi dei corpi celesti.

Agli inizi del XX secolo, per determinare con maggiore precisione la scala del sistema solare, fu misurata la parallasse di alcuni asteroidi, in particolare Eros, che passa periodicamente a soli 22 milioni di km dalla Terra. Studi sulle riflessioni radar di Venere (1958) e di asteroidi come Icaro hanno permesso di misurare direttamente queste distanze e calcolare meglio la parallasse solare. Oggi l'unità astronomica è determinata con precisione per mezzo della telemetria effettuata con sonde spaziali.

### Parallasse stellare.



Per determinare la parallasse stellare si sfrutta il cambiamento di posizione assunto dalla Terra durante il suo moto orbitale. La tecnica sottintende la conoscenza del diametro dell'orbita terrestre e richiede l'osservazione dello stesso oggetto celeste a sei mesi di distanza per determinarne lo spostamento apparente rispetto allo sfondo. Più una stella è vicina, più la sua parallasse è grande. Più precisamente si definisce parallasse annua quella derivata da uno spostamento pari alla distanza media tra Terra e Sole (raggio medio dell'orbita).

Questa tecnica ha introdotto in astronomia l'uso di una nuova unità di misura delle distanze, il **parsec (parallasse-secondo**, abbreviato con "pc"), definito come la distanza alla quale la parallasse annua è esattamente di un secondo d'arco, ed equivale a **3,26 anni luce**. Ad esempio: la stella a noi più vicina dopo il Sole, Proxima Centauri, presenta una parallasse di 0,750" (secondi d'arco). Ne consegue che la sua distanza è  $1/0,750 = 1,33$  parsec, ovvero 4,3 anni luce. Anche con questa precisione le distanze massime misurabili direttamente sono nell'ordine di poche centinaia di parsec. Il satellite Gaia, lanciato nel corso del 2013, migliorerà sostanzialmente la situazione.

### Metodi Indiretti

Oltre i 300 pc di distanza è impossibile, anche per Gaia o altri eventuali satelliti, stimare la distanza degli astri con metodi geometrici. Bisogna allora basarsi sulle cosiddette candele standard, che sono oggetti di cui per qualche motivo è nota la luminosità.

In generale, comunque, per stimare le distanze astronomiche si utilizza una qualsiasi relazione nota tra due quantità osservate, una dipendente dalla distanza, come luminosità o diametro, e una indipendente, come colore o periodo di oscillazione (nel caso di stelle variabili). In questi casi, la ricostruzione della suddetta relazione per un campione di stelle o galassie a distanza molto simile, come le stelle di un ammasso, permette di stimare la distanza dell'ammasso. La relazione quindi gioca il ruolo di candela standard, con un duplice vantaggio: primo, è molto più facile in astrofisica trovare relazioni utili piuttosto che oggetti con luminosità o estensione nota a priori; secondo, utilizzando molti oggetti per determinare la distanza di un singolo ammasso si riduce l'errore di misura sulla distanza.

### Variabili Cefeidi

Una variabile Cefeide è un membro di una particolare classe di stelle variabili, notevole per una correlazione molto stretta tra il loro periodo di variabilità e la luminosità stellare assoluta.

Grazie a questa correlazione, e alla grande precisione con cui viene misurato il periodo pulsazionale, le variabili Cefeidi possono essere usate come candele standard per determinare la distanza degli ammassi globulari e delle galassie in cui sono contenute. Poiché la relazione periodo-luminosità può essere calibrata con grande precisione usando le stelle Cefeidi vicine, le distanze trovate con questo metodo sono tra le più accurate disponibili.

Il nome di questa classe di stelle deriva da  $\delta$  Cephei, la prima variabile di questo tipo osservata nella nostra galassia.

Successive osservazioni hanno individuato stelle cefeidi in altre galassie, in primis nelle due nubi di Magellano.



Delta Cephei (al centro), il prototipo delle variabili cefeidi.

Una Cefeide è in genere una stella gigante gialla giovane di massa intermedia che pulsa regolarmente espandendosi e contraendosi, mutando così la sua luminosità in un ciclo estremamente regolare. La luminosità delle stelle Cefeidi è in genere compresa tra 1000 e 10000 volte quella del Sole e il periodo di oscillazione va dall'ordine del giorno alle centinaia di giorni.

Il profilo di luminosità di una stella cefeide durante un ciclo pulsazionale è tipicamente non simmetrico, con il braccio ascendente più corto e ripido di quello discendente, e oltre al picco principale la sua curva di luminosità presenta spesso un secondo picco, o "bump", la cui posizione rispetto a quello principale varia a seconda del periodo di oscillazione del pulsatore stesso.

Il fenomeno di oscillazione (espansione, contrazione) è un fenomeno limitato alla sola superficie stellare e non è dovuto ad alcun mutamento nella quantità di energia prodotta dalle fusioni nucleari che avvengono nelle regioni più interne delle strutture, e dunque l'oscillazione in luminosità è causata unicamente dalla maggiore o minore dimensione della superficie esterna irraggiante e dalla variazione di temperatura superficiale durante il ciclo di pulsazione.

### Uso delle Cefeidi come candela standard

La luminosità di un oggetto varia con l'inverso del quadrato della distanza dall'osservatore, ad esempio la luce di un lampione osservata a 100 metri di distanza apparirà 4 volte più brillante di uno a 200 metri e 9 volte più brillante di uno a 300 metri. Pertanto dalla conoscenza dell'intensità luminosa assoluta del lampione, in candele [cd], misurando con un fotometro l'intensità luminosa del lampione osservato, si può calcolare la sua distanza dall'osservatore. La luminosità assoluta delle stelle non è nota a priori perché dipende da fattori quali le dimensioni, la temperatura e altro, parametri non misurabili per stelle che si trovano a grandi distanze. La luminosità assoluta di una stella Cefeide è invece nota a priori perché è legata in modo stretto al proprio periodo di pulsazione. Una Cefeide con un periodo di tre giorni ha una luminosità pari ad 800 volte quella del Sole. Una Cefeide con un periodo di trenta giorni è 10000 volte più luminosa del Sole. Questa scala è stata calibrata usando stelle Cefeidi molto vicine, per le quali la distanza era già conosciuta e misurabile con il metodo del parallasse stellare, tecnica che risulta sufficientemente precisa, per oggetti che si trovano a distanze non superiori ai 100 anni luce.

La loro elevata luminosità e la loro presenza osservata in molte galassie rendono le stelle Cefeidi la candela standard ideale per misurare la distanza di ammassi globulari e le galassie esterne. La misura della distanza con questo metodo è affetta da errori nella determinazione della luminosità assoluta della Cefeide a causa della riduzione di luminosità per l'invecchiamento della stella stessa, della presenza di polveri interstellari e dalla mancata conoscenza della posizione precisa della variabile Cefeide all'interno dell'ammasso o galassia; questi errori sono in genere piccoli in questo tipo di misure. Anche le supernove di tipo 1A sono utilizzate come candele standard poiché esplodono con un'emissione nota di luminosità, e nel 2012, la supernova 2012fr deflagrata nella galassia dello Scultore, contenente variabili cefeidi già note, ha permesso di calibrare con precisione tutte le misurazioni precedenti, rendendo molto preciso questo strumento di misura.

Le stelle Cefeidi sono visibili a grandi distanze. Edwin Hubble identificò per primo alcune Cefeidi nella Galassia di Andromeda, provando la sua natura extragalattica. Più recentemente, il telescopio spaziale Hubble è riuscito ad identificare alcune Cefeidi nell'ammasso della Vergine, ad una distanza di 60 milioni di anni luce.

In definitiva, l'importanza delle Cefeidi è dovuta al fatto che:

- hanno una relazione periodo luminosità molto semplice;
- hanno una segnatura di variabilità molto riconoscibile che le rende facilmente identificabili;
- sono molto comuni (calibrazione relativamente facile).

### Legge di Hubble e redshift

Già prima di capire la natura extra-galattica delle nebulose, era stato notato che gli spettri di queste nebulose mostrano quasi sempre uno spostamento verso il rosso (redshift), ma molto raramente verso il blu. In altri termini la popolazione delle nebulose risultava in media allontanarsi da noi (dalla Via Lattea). Nel dibattito tra Shapley e Curtis, questa evidenza venne utilizzata dal primo come argomento contrario alla natura galattica delle nebulose: il disco galattico esercita qualche forma ignota di repulsione nei loro confronti, il che ha senso solo se le nebulose sono interne alla Galassia. La discussione fu risolta da Hubble, il quale misurò la distanza di Andromeda (M31) tramite le stelle Cefeidi (sbagliando la calibrazione, ma questo è un dettaglio!). Il passo successivo da parte di Hubble fu quello di stimare la distanza di un campione più grande di galassie. Nel 1929 venne resa pubblica una correlazione tra la distanza della galassia e la sua velocità di recessione:

$$v = H_0 d$$

In altre parole, la velocità di allontanamento (“**v**”) delle galassie è proporzionale alla rispettiva distanza da noi (“**d**”).

La costante **H<sub>0</sub>** è detta costante di Hubble per la quale le stime attuali forniscono un valore di

$$74 \text{ km/s per Mpc}$$

### Alcune grandezze tipiche dell’Universo

Di seguito sono riportati gli ordini di grandezza degli oggetti e dei sistemi presenti nell’Universo.

Oggetto	Dimensioni (a.l.)
Sistema solare	1
Galassie	$10^5$
Gruppi di galassie	$10^6$
Ammassi di galassie	$10^7$
Super ammassi	$10^8$

### Unità astronomica

In astronomia l'unità astronomica (simbolo ufficiale: **ua** secondo il BIPM e lo standard ISO/IEC 80000; l'Unione Astronomica Internazionale raccomanda invece **au** più comune nei paesi anglofoni) è un'unità di misura pari a circa la distanza tra il pianeta Terra e il Sole. Sebbene non rientri tra le unità di misura del Sistema internazionale il suo uso è esteso tra gli astronomi ancora oggi. La sua scala è la più atta a rappresentare le distanze nel Sistema Solare, e quindi le dedichiamo qualche riga.

Nella sua orbita la Terra viene a trovarsi, durante l'anno, a distanze diverse dal Sole, da un minimo di circa 147 milioni di chilometri (perielio) a un massimo di circa 152 milioni di chilometri (afelio). La distanza media è di 149 597 870,700 km. Espressa in unità SI risulta essere circa  $1,496 \times 10^{11}$  m.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Nel corso della 28<sup>a</sup> Assemblea Generale dell'Unione Astronomica Internazionale, tenutasi a fine agosto 2012 a Pechino, in Cina, l'unità astronomica è stata ridefinita al valore fisso di 149 597 870 700 m (valore fisso raccomandato) (ovvero  $4.8481 \times 10^{-6}$  pc, o  $15.812 \times 10^{-6}$  a.l.). Un anno-luce vale dunque approssimativamente 63 286 UA.

Per le sue dimensioni l'unità astronomica viene utilizzata soprattutto per misurare distanze all'interno del Sistema Solare; per misure superiori, intra o extra-galattiche, gli astronomi preferiscono utilizzare l'anno luce o il parsec.

### Le distanze nel sistema solare

Questo è l'elenco dei pianeti del sistema solare con la relativa distanza media dal Sole in unità astronomiche:

Mercurio	0,387 ua
Venere	0,723 ua
Terra	1 ua (per definizione)
Marte	1,524 ua
Cerere	2,765 ua
Giove	5,209 ua
Saturno	9,539 ua
Urano	19,18 ua
Nettuno	30,06 ua
Plutone	39,44 ua
Haumea	43,34 ua
Makemake	45,39 ua
Eris	68,07 ua

NB: Haumea, Makemake ed Eris sono i cosiddetti “pianeti nani”, appartenenti alla fascia di Kuiper, così come Plutone, recentemente declassato.

Per confronto, la stella più vicina (Proxima Centauri, parte del sistema di Alpha Centauri) si trova a circa 268 000 ua di distanza.

### Esempi di distanze spaziali espresse in unità astronomiche

- La Fascia di Kuiper inizia a circa 35 ua e finisce a 50-55 ua
- L'orbita del pianeta nano Sedna è compresa tra 76 e 942 ua dal Sole; Sedna è ora a circa 90 ua dal Sole.
- 100 ua: fine dell'Eliosfera
- 108 ua: Voyager 1 ha raggiunto questa distanza il 16 novembre 2008, ed è l'oggetto più lontano dalla Terra mai creato dall'uomo.
- La nube di Oort inizia a 500-3000 ua e si estende fino a un massimo di circa 100 000 ua:
- 125 000 ua: estensione massima della regione di spazio dominata dal campo gravitazionale del Sole e inizio dello spazio interstellare. Questa distanza è di circa 1,8-2,0 anni luce.
- La distanza del Sole dal centro della Via Lattea è circa di 1 700 000 000 ua (26 881 al).

### 5. MECCANICA DEI FLUIDI

#### 5.1. Pressione

La pressione è una grandezza fisica definita nel modo più semplice come il rapporto tra il modulo della forza agente ortogonalmente su una superficie e la sua area.

$$P = F/S$$

I fluidi subiscono soltanto l'effetto della pressione (legge di Pascal, v.), mentre i solidi risentono più in generale della tensione. La pressione, come la tensione, rientra nel concetto di sollecitazione.

#### Pressione assoluta e pressione relativa

La pressione può essere classificata in due modi:

- **pressione assoluta o reale** (misurata nel sistema tecnico in ata, atmosfera tecnica assoluta): è la pressione misurata assumendo come riferimento il vuoto;
- **pressione relativa** (misurata nel sistema tecnico in atr, atmosfera tecnica relativa): è la pressione misurata assumendo come riferimento un'altra pressione (tipicamente quella atmosferica).

Se ad esempio all'interno di un recipiente in pressione insiste una pressione (assoluta) di 10 atmosfere e all'esterno di esso è presente la pressione (assoluta) atmosferica, vuol dire che la pressione relativa all'interno del recipiente (ovvero la differenza di pressione tra l'interno e l'esterno del recipiente) è di 9 atmosfere. Si noti che una pressione relativa può assumere valori al disotto della pressione atmosferica (si parla in questo caso di "depressione" o "vuoto").

#### Unità di misura

Le unità di misura della pressione più comunemente usate sono:

- **pascal (Pa)**, nel Sistema Internazionale, 1 newton su metro quadrato (1 N/m<sup>2</sup>);
- **bar** (10<sup>5</sup> Pa = 10 N/cm<sup>2</sup>) (sono di larga diffusione anche alcuni dei sottomultipli del bar, in particolare il millibar è molto usato in meteorologia e il microbar in acustica);
- **torr**, pressione esercitata da una colonna di mercurio alta 1 mm (133,3 Pa);
- **mm** di colonna d'acqua, pressione esercitata da una colonna di acqua alta 1 mm (9,81 Pa);
- **atmosfera (atm)**, approssimativamente pari alla pressione esercitata dall'atmosfera terrestre al livello del mare (101325 Pa = 760mmHg = 760 torr);
- **kilogrammo forza (kg<sub>f</sub>), al cm<sup>2</sup> o al m<sup>2</sup>.**

#### Atmosfera standard

L'atmosfera standard o atmosfera (abbreviata in atm) è un'unità di misura, definita con precisione a sei cifre nel Sistema Internazionale, per approssimare una quantità che varia costantemente a seconda del luogo e del momento. È all'incirca uguale alla pressione tipica dell'aria a livello del mare ed è definita come: **1 atm = 101 325 pascal**.

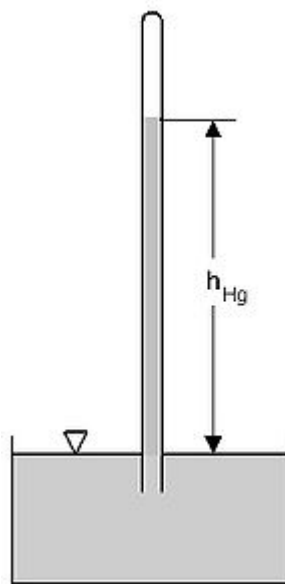
La pressione viene a volte misurata, non come assoluta, ma relativamente alla pressione atmosferica.

Un esempio è la pressione dell'aria all'interno di uno pneumatico d'automobile, ad esempio una pressione di "2,2 atmosfere" (pressione relativa), in realtà significa 2,2 atmosfere oltre la pressione atmosferica, ovvero 3,2 atmosfere (pressione assoluta).

### Tubo di Torricelli



Stampa raffigurante Evangelista Torricelli mentre esegue il suo esperimento



Schema del barometro di Torricelli

Il tubo di Torricelli o barometro di Torricelli, chiamato così dal nome del suo inventore, Evangelista Torricelli, fu il primo strumento realizzato appositamente per misurare la pressione atmosferica. È costituito da un tubo di vetro chiuso a un'estremità riempito di mercurio, posto in una vaschetta, anch'essa contenente mercurio, in modo da creare un sistema di vasi comunicanti. La scelta del mercurio è data dalla sua alta densità, che permette di lavorare a grandi pressioni con volumi relativamente piccoli.

L'esperimento consiste in un tubo, lungo 1 m, della sezione di  $1 \text{ cm}^2$  e sigillato a un'estremità, che viene riempito di mercurio e posto, con l'apertura verso il basso tenuta chiusa in modo che non entri aria, in una bacinella anch'essa piena di mercurio. A questo punto viene aperta l'estremità inferiore e si constata che il tubo non si svuota e che il mercurio scende solo per un certo tratto. (Vi è da notare il fatto che l'esperimento è valido con tubi di qualsiasi sezione).

Torricelli misurò l'altezza che la colonna di mercurio aveva raggiunto, pari a 760 mm, e dedusse che il peso di questa colonna era antagonista ad una forza, generata da quella che oggi chiamiamo pressione atmosferica. Il mercurio contenuto nel tubo non è infatti soggetto alla pressione esterna, al contrario di quello nella vaschetta. Torricelli notò che il mercurio contenuto nel tubo si abbassava fino ad un certo punto. Infatti la pressione agiva solo sulla vaschetta e non nel tubo (non essendovi aria dentro questo), e faceva ostacolo al mercurio nel tubo. Per ottenere il valore della pressione atmosferica in pascal sarà quindi sufficiente calcolare il valore della pressione della colonna di mercurio, di cui è nota l'altezza e la densità, applicando la legge di Stevino.

Da questo esperimento e dal suo inventore prende nome un'unità di misura della pressione, il Torr, chiamato anche "millimetro di mercurio" (mmHg dove Hg è il simbolo chimico del mercurio), in quanto indica la pressione generata da una colonna di mercurio alta 1 mm.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

La scelta del mercurio non è casuale: questo materiale, infatti, ha anche allo stato liquido una densità notevole, tale da poter eguagliare la pressione atmosferica con una colonna alta, appunto soltanto 76 cm; ripetendo lo stesso esperimento con dell'acqua, per esempio, sarebbe necessario un tubo lungo 10,33 metri ma l'esperimento fallirebbe perché l'acqua alla sommità della colonna tende a evaporare in un luogo chiuso, creando saturazione, e aumentando il suo volume; in questo caso si creerebbe un aumento di pressione che spingerebbe l'acqua contenuta nel tubo verso il basso, rendendo inattendibile il valore indicato; il mercurio invece ha una bassissima tensione di vapore a temperatura ambiente e rimane liquido.

Pochi mesi dopo, sia alcuni parenti di Torricelli che il fisico francese Blaise Pascal, confermarono il suo esperimento. Quest'ultimo ripeté le misurazioni alle pendici e sulla cima del Monte Ventoux, dimostrando come al variare dell'altezza variava anche la pressione esercitata sul mercurio.

### Unità manometriche

Obsolete unità manometriche di pressione, come i pollici d'acqua o i millimetri di mercurio, si basano sulla pressione esercitata dal peso di qualche fluido tipo, sotto una gravità tipo.

Esse sono effettivamente tentativi di definire un'unità che esprima la lettura di un manometro.

Le unità manometriche di pressione non devono essere usate per scopi scientifici o ingegneristici, a causa della mancanza di ripetibilità inerente alla loro definizione.

Resta però di utilizzo comune il mmHg utilizzato in medicina per misurare la pressione del sangue.

Tabella di conversione

	Pa	bar (daN/cm <sup>2</sup> )	atm	torr (mmHg)
Pa	1	10 <sup>-5</sup>	9,87 × 10 <sup>-6</sup>	0,0075
bar	10 <sup>5</sup>	1	0,987	750
atm	101 325	1,013	1	760
torr (mmHg)	133	0,00133	0,00132	1

### Legge di Boyle-Mariotte

La legge di Boyle e Mariotte afferma che in condizioni di temperatura costante la pressione di un gas perfetto è inversamente proporzionale al suo volume, ovvero che il prodotto della pressione del gas per il volume da esso occupato è costante:

$$p \cdot V = \text{costante}$$

Tale costante è funzione (crescente) della temperatura assoluta, della natura del gas e di altri parametri.

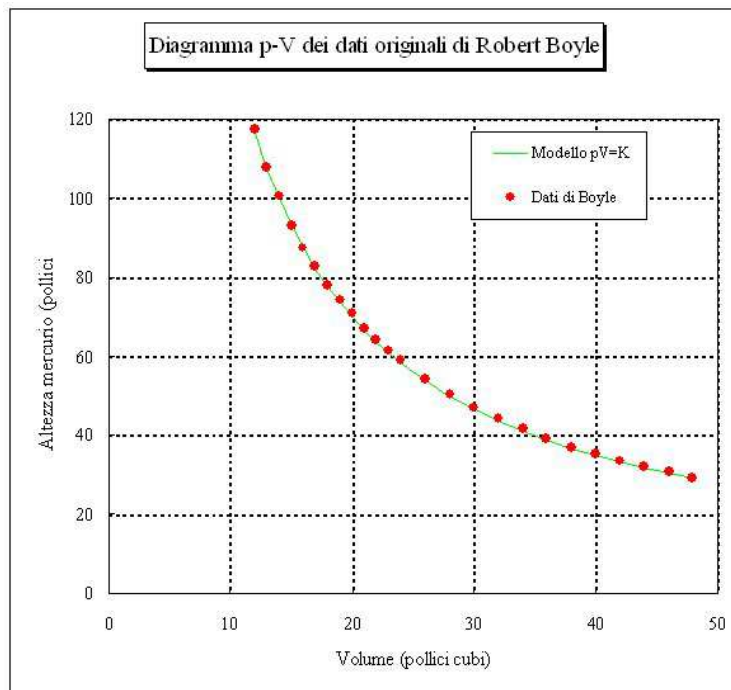
La legge può essere scritta anche con la seguente notazione più completa:

$$[p \cdot V]_T = K(T)$$

nella quale viene indicato che la costante varia con la temperatura e che la legge vale a temperatura costante.

La legge di Boyle-Mariotte fu enunciata per la prima volta da Robert Boyle (1627-1691) che nel 1662 pubblicò "*A Defence of the Doctrine Touching the Spring And Weight of the Air*". Questa legge venne riformulata in modo più preciso da Edme Mariotte (1620-1684) nel 1676, che confermando i dati di Boyle specificò che la legge vale soltanto se la temperatura del gas è costante. Al gas, che spontaneamente tende ad espandersi, viene applicata una forza peso che lo mantiene compresso.

Il grafico sotto riporta i dati dell'esperimento originale di Boyle; sull'asse delle x è riportato il volume espresso nelle unità del tempo in pollici cubi, mentre l'asse delle y riporta l'altezza della colonna di mercurio in pollici, che per la legge di Stevin (latinizzato in "Stevino") è proporzionale alla pressione a cui è sottoposto il gas. In questi dati il prodotto della pressione per il volume è effettivamente costante con un errore percentuale dell'1,4%.



La legge di Boyle e Mariotte è sperimentalmente verificata per gas che si comportano come un gas ideale, oppure per gas in condizioni di pressione non troppo elevate (gas rarefatto) e temperature non troppo prossime alla temperatura di liquefazione. La legge non è valida per i liquidi, il cui volume varia assai poco con il variare della pressione (la variazione di densità è del tutto trascurabile fino a livelli di pressione veramente elevati). Inoltre, ad esempio nel mare, al crescere della profondità aumenta la pressione, ma la temperatura diminuisce (anziché aumentare) fino a stabilizzarsi oltre i 100-200 metri.

La legge di Boyle e Mariotte costituisce uno dei fondamenti sui quali poggia la tecnica e la tecnologia dell'immersione. Infatti il comportamento di un gas (nella fattispecie aria o miscela) è in funzione della pressione idrostatica a cui è sottoposto e le modificazioni del suo volume mostrano l'applicazione pratica della legge. L'esempio classico è costituito dalla campana subacquea pneumatica consistente in un cilindro cavo all'interno e pieno d'aria con l'estremità inferiore aperta che viene calato verticalmente in acqua a profondità progressivamente crescenti. Alla profondità di 10 metri la pressione ambientale raddoppia passando da 1 bar della superficie a 2 bar, l'acqua penetra quindi nella campana riducendo il volume dell'aria in essa contenuta della metà. Per avere un ulteriore dimezzamento di volume dell'aria (cioè  $\frac{1}{4}$  del volume originale) si dovrà calare la campana quindi a 30 metri di profondità, dove la pressione è di 4 bar (1 bar della superficie + 1 bar per ogni 10 metri circa).

### Legge di Henry

La legge di Henry, formulata da William Henry nel 1803, regola la solubilità dei gas in un liquido. In particolare essa sostiene che:

**Un gas che esercita una pressione sulla superficie di un liquido vi entra in soluzione finché avrà raggiunto in quel liquido la stessa pressione che esercita sopra di esso.**

La legge di Henry dice che a temperatura costante la solubilità di un gas è direttamente proporzionale alla pressione che il gas esercita sulla soluzione. Raggiunto l'equilibrio, il liquido si definisce saturo di quel gas a quella pressione. Tale stato di equilibrio permane fino a quando la pressione esterna del gas resterà inalterata, altrimenti, se essa aumenta, altro gas entrerà in soluzione; se diminuisce, il liquido si troverà in una situazione di soprassaturazione ed il gas si libererà tornando all'esterno fino a quando le pressioni saranno nuovamente equilibrate.

La velocità con cui un gas entra in soluzione o si libera varia in funzione della differenza delle pressioni (esterna e interna) ed è condizionata dalla sua composizione molecolare e dalla natura del liquido solvente.

Il fenomeno di decompressione, se avviene velocemente (a causa di una repentina diminuzione della pressione esterna del gas), si dice tumultuoso perché provoca la formazione di numerosissime bolle, così come succede quando stappiamo una birra o uno spumante.

Un aspetto fondamentale sta nel fatto che ogni gas entra in soluzione o si libera indipendentemente da ciò che fanno gli altri gas presenti.

**L'importanza dei fenomeni fisici e chimici legati alla applicazione della legge di Henry è fondamentale nel campo subacqueo, soprattutto per le ripercussioni di ordine fisiologico (soluzione dei gas inerti nei tessuti organici del sommozzatore, patologia embolica, problemi fisiologici e tecnici connessi alla decompressione).**

### Emisferi di Magdeburgo



Gli emisferi originali e la pompa a vuoto di von Guericke in esposizione al Deutsches Museum.

Gli emisferi di Magdeburgo sono una coppia di emisferi di rame con bordi perfettamente combacianti. Quando vengono incastrati tra loro e viene aspirata via l'aria, al loro interno si forma il vuoto e non possono essere separati da due opposte schiere di cavalli. Furono progettati nel 1650 da Otto von Guericke, che con essi volle fornire una dimostrazione della macchina pneumatica che aveva inventato e del concetto di pressione atmosferica (il primo vuoto creato artificialmente fu prodotto alcuni anni prima da Evangelista Torricelli e aveva ispirato von Guericke nella realizzazione della prima pompa a vuoto al mondo). Gli emisferi originali sono conservati al Deutsches Museum di Monaco di Baviera.

Gli emisferi hanno un diametro di circa 60 centimetri. Uno di essi ha un tubo con una valvola di chiusura, che va collegato alla pompa. Nel momento in cui l'aria viene estratta e la valvola viene chiusa, il tubo può essere staccato e gli emisferi restano saldati tra loro grazie alla pressione atmosferica. La forza che li tiene fermi è uguale all'area descritta dal loro bordo (che per un cerchio di diametro di 50 centimetri vale circa  $0,2 \text{ m}^2$ ), moltiplicata per la differenza di pressione tra l'interno e l'esterno (pari alla pressione atmosferica, che su una superficie di  $1 \text{ m}^2$  esercita una forza di circa  $10000 \text{ kg}_f$ ; nel caso in esame sono in gioco, pertanto, circa  $2000 \text{ kg}_f$  su una superficie di circa  $0,2 \text{ m}^2$ ); ciò comporta una forza di circa  $20000 \text{ N}$  (essendo  $\text{kg}_f$  pari a circa  $10 \text{ N}$ ), l'equivalente della forza necessaria per trascinare una autovettura o un piccolo elefante.

Von Guericke eseguì l'esperimento degli emisferi l'8 maggio 1654 a Ratisbona alla presenza del Reichstag e dell'imperatore Ferdinando III; in quell'occasione vennero impiegati 30 cavalli, divisi in due gruppi di 15, che non riuscirono a dividere gli emisferi finché non fu riaperta la valvola ed eliminato così il vuoto. Nel 1656 fu ripetuto con 16 cavalli nella sua città natale, Magdeburgo, di cui era borgomastro. Gaspar Schott fu il primo a descrivere l'esperimento nel libro *“Mechanica Hydraulico-Pneumatica”* del 1657. Nel 1663 si tenne un'altra dimostrazione con 24 cavalli a Berlino, a cui assistette Federico Guglielmo I di Brandeburgo.

L'esperimento fu riportato dallo stesso von Guericke nella sua opera *“Experimenta nova, ut vocant, Magdeburgica de vacuo spatio”* del 1672.

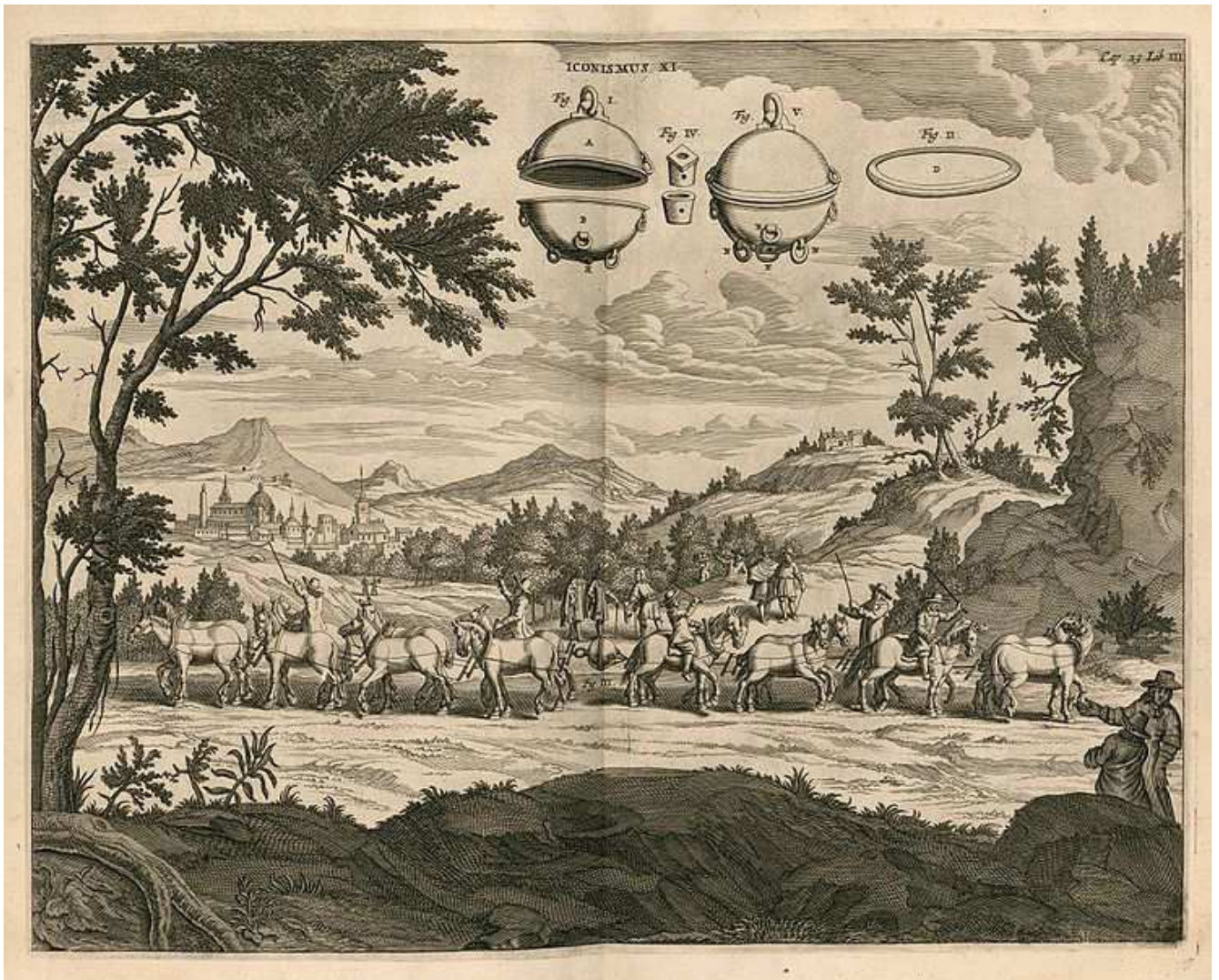


Illustrazione di Gaspar Schott sull'esperimento degli emisferi di Magdeburgo

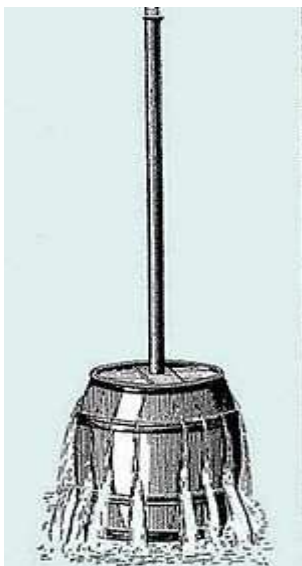
## Legge di Pascal

**Una pressione esercitata in un punto di una massa fluida si trasmette in ogni altro punto e in tutte le direzioni con la stessa intensità, perpendicolarmente alle superfici che incontra.**

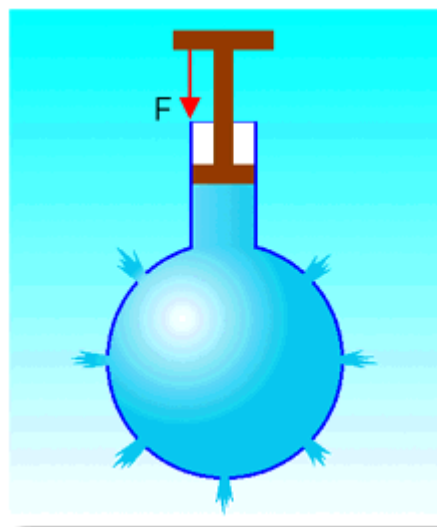
Gli effetti del principio di Pascal, scoperto dal fisico francese nel suo famoso esperimento della botte del 1646.

Il principio di Pascal o legge di Pascal è una legge della fisica dei fluidi che stabilisce che quando avviene un aumento nella pressione in un punto di un fluido confinato, tale aumento viene trasmesso anche ad ogni punto del contenitore. La pressione esercitata in un punto qualsiasi di un fluido si trasmette in ogni altro punto del fluido con la stessa intensità, indipendentemente dalla direzione. Tale legge è stata scoperta dal fisico e matematico francese Blaise Pascal nel famoso esperimento della botte del 1646 ed enunciata nel trattato del 1653 *"Sur l'équilibre des liqueurs"*.

Nell'esperimento, Pascal inserì un tubo verticale lungo 10 m in una botte piena d'acqua. A quel punto Pascal iniziò a versare l'acqua nel tubo verticale fino a riempire il medesimo tubo e osservò un aumento della pressione, che raggiunse una intensità tale da rompere la botte.



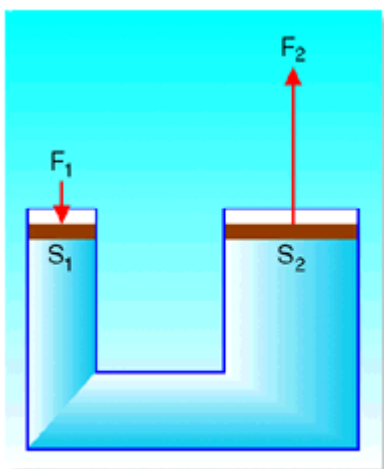
L'esperimento di Pascal



Schema del principio di Pascal

### Pistone idraulico

Un interessante dispositivo basato sul principio di Pascal è il pistone idraulico. Il pistone idraulico è una macchina che consente di equilibrare una forza molto intensa applicandone una piccola. In questo modo è possibile sollevare un'automobile con uno sforzo minimo.



Schema di funzionamento di un pistone idraulico



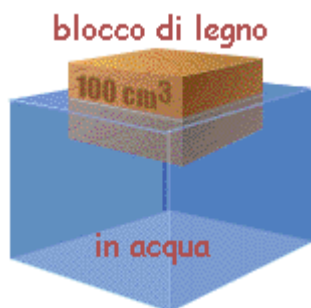
Braccio di una gru azionato col pistone idraulico

La pressione applicata mediante il pistone piccolo si trasmette con la stessa intensità su tutte le pareti.

Sul pistone grande agisce una forza molto elevata grazie alla grande superficie:  $F_2 = P \times S_2$

### Principio di Archimede

**Un corpo immerso in un fluido riceve una spinta verso l'alto pari al peso del fluido spostato**



Galleggiamento nel Mar Morto

### La corona di Gerone

La leggenda completa è questa. Gerone II, tiranno di Siracusa, fece costruire da un valente orafo una corona d'oro, a forma di rami intrecciati, per porla a decoro di una statua rappresentante un dio o una dea. Tuttavia quando ricevette la bellissima corona ebbe il sospetto che l'orafo potesse aver sostituito, all'interno della corona, l'oro con l'argento. Per questo il Tiranno chiese ad Archimede di determinare se la corona fosse d'oro massiccio oppure se contenesse all'interno il meno pregiato argento. Ma poiché la corona, di pregevole fattura, doveva ornare il capo di una divinità, era essa stessa un oggetto sacro. Quindi il Tiranno pose ad Archimede la condizione che la corona doveva restare integra (oggi diremmo che Archimede doveva sottoporre la corona a un esame non distruttivo). Archimede trovò la soluzione mentre stava entrando nella vasca da bagno osservando che, nell'immersersi, l'acqua traboccava dalla vasca. Intuendo ciò che noi oggi chiamiamo densità (materiali differenti di egual massa occupano volumi differenti), egli capì come poter risolvere il quesito che il Re gli aveva posto.

Bastava porre in una vasca una quantità d'oro puro di peso pari a quello della corona e poi riempire la vasca fino all'orlo. Quindi bisognava togliere l'oro e immergervi la corona: se vi fosse stato argento, che a parità di massa occupa un volume maggiore di quello dell'oro, l'acqua sarebbe traboccata. Archimede fu così felice della sua scoperta che si alzò repentinamente dalla vasca e corse per Siracusa gridando, appunto,

# Εύρηκα

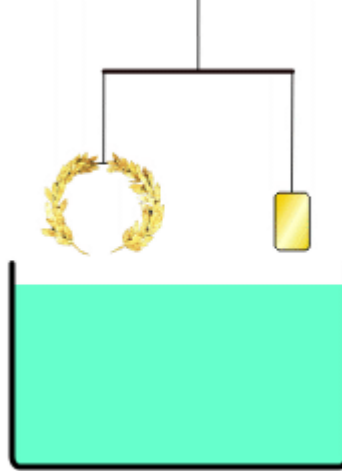
("Eurèca", = "Ho trovato!")

Come riferisce l'architetto romano Vitruvio nel primo secolo avanti Cristo, Archimede riuscì in questo modo a scoprire la frode che l'orafo commise nei confronti di Gerone II.

Vitruvio riferisce che il problema sarebbe stato risolto misurando i volumi della corona e di un eguale peso d'oro immergendoli in un recipiente colmo d'acqua e misurando l'acqua traboccata. Si tratta però di un procedimento poco plausibile, sia perché comporta un errore troppo grande, sia perché non ha alcuna relazione con l'idrostatica sviluppata da Archimede.

Secondo una ricostruzione più attendibile, attestata nella tarda antichità, Archimede aveva suggerito di pesare la corona e un quantitativo di oro uguale in peso immersi entrambi in acqua. Se la corona fosse stata d'oro puro la bilancia sarebbe stata in equilibrio.

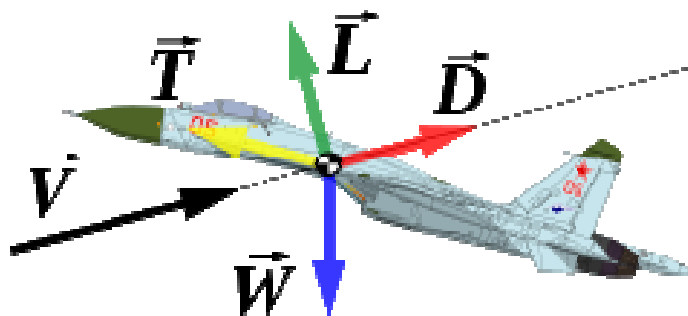
Poiché invece la bilancia si abbassò dalla parte dell'oro, si poté dedurre che, essendo pari i pesi, la corona aveva subito una spinta idrostatica verso l'alto maggiore, quindi doveva avere un maggiore volume, il che implicava che doveva essere stata fabbricata impiegando anche altri metalli, in quanto tali metalli (come per esempio l'argento) avevano densità minore dell'oro.



### 5.2. Portanza di un'ala di aereo

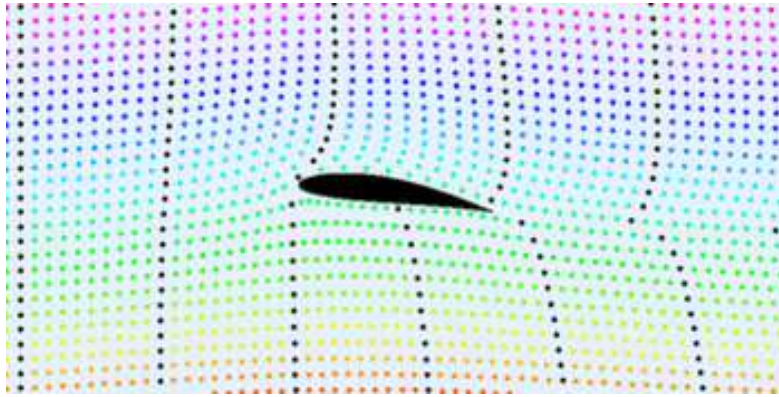
La portanza (spesso abbreviata con la lettera L, dalla parola inglese Lift) è la componente della forza aerodinamica globale calcolata in direzione perpendicolare alla direzione della velocità. Non è una forza reale ma un'espressione matematica utilizzata per semplificare i calcoli essendo la forza aerodinamica l'unica forza reale risultante dalle azioni aerodinamiche.

Comunemente associata all'ala di un aeroplano, la portanza è generata anche dal moto delle pale del rotore principale di un elicottero, dalle vele e dalla chiglia di una barca a vela, dagli aliscafi o dagli alettoni di un'automobile da corsa. Nella meccanica del volo è la forza che permette il sostentamento in volo di un velivolo o un uccello, quando questa risulta maggiore o uguale alla forza di gravità.



Un tipico schema qualitativo nel quale si rappresentano le principali forze agenti su di un velivolo: portanza (L), resistenza (D), peso (W) e spinta (T). Con V si è indicata la direzione del vento apparente

Allora un possibile modo per calcolare la distribuzione pressione attorno al profilo è l'utilizzo della **legge di Bernoulli**, che consente di legare la velocità sul profilo alla pressione: **dove le particelle fluide hanno una velocità maggiore corrisponde una diminuzione di pressione e viceversa**. Si ottiene quindi un profilo alare "aspirato" verso l'alto dove il maggior contributo alla portanza lo dà la depressione dorsale.



Flusso potenziale attorno ad un profilo con un angolo di attacco di  $8^\circ$ . La velocità del flusso sul dorso del profilo è superiore a quella sul ventre.



albero di sequoia gigante

### **Capillarità ed osmosi:** una breve spiegazione della risalita dell'acqua negli alberi

Nelle piante superiori si sono sviluppati particolari tessuti di conduzione: strutture attraverso le quali l'acqua raggiunge le foglie dove sono sintetizzate le sostanze organiche e le distribuisce a tutte le parti della pianta.

Anche nelle piante non vascolari il trasporto avviene nei due sensi, ma i tessuti di conduzione sono meno differenziati. Negli alberi ad alto fusto, come ad esempio le sequoie, l'acqua deve percorrere distanze che possono raggiungere anche diverse decine di metri (50 m per le sequoie in Europa; anche oltre 100 m in quelle americane). Nelle piante non sono presenti strutture che spingono l'acqua fino alle foglie dei rami più alti ma processi chimico fisici diversi agiscono sinergicamente per la risalita dell'acqua e comunque ricollegabili alle sue caratteristiche polari.

Come vedremo, è grazie alle caratteristiche polari delle molecole d'acqua che è possibile il trasporto delle sostanze dalle foglie alle radici e dalle radici alle foglie.

- **osmosi:** l'acqua del terreno passa per osmosi all'interno dei peli radicali attraverso la membrana costituita dalle cellule epidermiche. I peli radicali, assumendo dal terreno soluzioni di ioni inorganici e di piccole molecole di sali minerali, permettono l'instaurarsi di un gradiente di concentrazione tra l'esterno (soluzioni poco concentrate nel terreno) e l'interno della pianta (soluzioni molto concentrate nelle cellule).

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

- Si genera così la cosiddetta "pressione radicale" che può essere sufficiente a spingere l'acqua fino ad altezze maggiori di quanto permetta la capillarità, ma che non è certo in grado di farle raggiungere le sommità di grossi alberi o dei lunghi steli delle piante rampicanti. Infatti, la pressione richiesta in questi casi è notevolmente più elevata di quella sviluppata per osmosi, e nemmeno l'aspirazione può dare ragione del fenomeno: anche se in qualche modo si potesse produrre il vuoto spinto all'interno dell'albero, una colonna d'acqua non potrebbe superare i 10 metri circa.
- **capillarità:** se si considerano i minuscoli diametri dei vasi xilematici in cui scorrono acqua e sali minerali, è chiaro che la risalita capillare, unitamente alla pressione radicale, può svolgere un ruolo importante potenziando l'ascesa della linfa. In particolare, le caratteristiche polari delle molecole di cellulosa, costituente principale delle pareti cellulari delle piante, rendono questa sostanza altamente idrofila e in grado, quindi, di instaurare forze di adesione particolarmente intense con le molecole d'acqua.  
Tuttavia, anche prendendo in considerazione la capillarità e la pressione radicale non si riesce a spiegare la risalita delle molecole d'acqua fino a quote considerevoli. Però, si può trovare un nuovo elemento di aiuto alla comprensione del fenomeno in questione se si considera che più del 90 per cento dell'acqua assorbita da una pianta viene persa per traspirazione, eliminata attraverso le foglie.  
Ora, in questo processo che sembrerebbe uno spreco di energia e di acqua, vi è un diretto collegamento con la risalita della linfa grezza, in quanto, perdendo acqua per traspirazione dalle foglie, si genera nei tubicini rigidi dello xilema la necessaria depressione che appunto aspira linfa grezza verso l'alto.
- **pressione negativa:** la depressione esercitata per evaporazione ovviamente dipende dalla natura e dimensione della chioma, dall'intensità del calore solare e della traspirazione; eliminando gli attriti, si calcola che rimane una depressione di circa 15 atmosfere, tale da consentire la risalita della linfa grezza fino agli oltre 100 metri delle sequoie.

Dal punto di vista energetico, l'energia necessaria per la risalita della linfa è fornita dal sole, che scaldando le foglie porta l'acqua dallo stato di liquido a quello di vapore permettendo così la traspirazione.

Pressione radicale, capillarità e traspirazione cooperano sinergicamente alla salita dell'acqua fino alle foglie: le prime due spingono dal basso, la traspirazione tira dall'alto.

### VERO O FALSO

- 1) Un fluido non ha una forma né un volume definiti.
- 2) Un aerostato galleggia nell'aria quando la forza che si esercita sotto la sua parete inferiore è eguale al peso del fluido da esso spostato.
- 3) Il mercurio sale nella canna barometrica perché la gravità viene diminuita eliminando l'aria.
- 4) La ragione per cui un sottomarino non può abbassarsi al disotto di una certa profondità va ricercata nel fatto che con l'abbassamento le sue pareti vengono sottoposte a pressioni sempre crescenti.
- 5) Una proprietà caratteristica dei liquidi è quella di bagnare le pareti dei recipienti in cui sono contenuti.
- 6) Una data massa di gas alla pressione di 1 atmosfera occupi il volume di 1 litro. Portata alla pressione di 10 atmosfere, essa occuperà il volume di 10 litri.
- 7) La pressione che si esercita sul fondo di una botte piena d'acqua alta 1 metro è la stessa che si ha nelle acque del lago di Como a 1 metro di profondità.
- 8) L'esperienza non è in grado di decidere se l'aria pesi o no.
- 9) L'elevatore idraulico che si impiega per sollevare le automobili si fonda su un'applicazione della legge di Pascal.

### 5.3. Le Onde



Onda superficiale nell'acqua

In fisica con il termine onda si indica una perturbazione che nasce da una sorgente e si propaga nel tempo e nello spazio, trasportando energia o quantità di moto senza comportare un associato spostamento della materia.

Le onde possono propagarsi sia attraverso un materiale, sia nel vuoto. Ad esempio la radiazione elettromagnetica può esistere e propagarsi anche in assenza di materia, mentre altri fenomeni ondulatori esistono unicamente in un mezzo, che deformandosi produce le forze elastiche di ritorno in grado di permettere all'onda di propagarsi.

#### Definizione

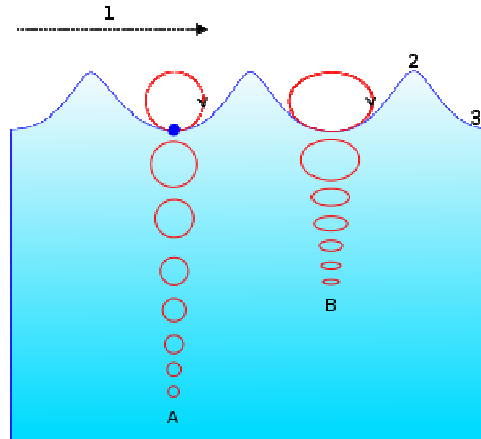
Non è semplice dare una definizione autonoma e precisa del termine onda, sebbene questo termine sia comunemente molto usato in contesti molto differenti fra loro. La definizione delle caratteristiche necessarie e sufficienti che identificano il fenomeno ondulatorio è flessibile. Intuitivamente il concetto di onda è qualificato come il trasporto di una perturbazione nello spazio senza comportare un trasporto netto della materia del mezzo, qualora presente, che occupa lo spazio stesso. Einstein e Infeld hanno cercato di rispondere alla domanda "Cos'è un'onda?" unendo questo fatto all'esperienza comune:

« Un po' di pettegolezzo che parte da Washington raggiunge molto rapidamente New York, anche se nessun singolo individuo che prende parte allo spargimento della voce viaggia fra queste due città. Ci sono due movimenti abbastanza differenti in questione, quello della voce, da Washington a New York, e quello delle persone che spargono la voce. Il vento, che passa sopra un campo di grano, genera un'onda che si sparge lungo tutto l'intero campo. Qui dobbiamo distinguere ancora fra il movimento dell'onda ed il movimento delle singole piante, che subiscono soltanto le piccole oscillazioni [...] Le particelle che costituiscono il mezzo realizzano soltanto piccole vibrazioni, ma l'intero movimento è quello di un'onda progressiva. La cosa essenzialmente nuova qui è quella che per la prima volta consideriamo il movimento di qualcosa che non sia materia, ma di energia propagata attraverso la materia. »

(Albert Einstein e Leopold Infeld, What is a wave? In *"The Evolution of Physics"*)

Una vibrazione può essere definita come il moto avanti e indietro intorno a un punto definito  $x$ , tuttavia una vibrazione non è necessariamente un'onda. Infatti in un'onda sulla superficie dell'acqua, oppure lungo una stringa, l'energia vibrazionale si muove dalla sorgente sotto forma di perturbazione senza un moto collettivo delle particelle dell'acqua o della corda in cui si propaga. Per le onde elettromagnetiche (ad esempio la luce), però, bisogna considerare che il concetto di mezzo non può essere applicato.

## Caratteristiche



A = Onde di acqua profonda.

B = Onde marine superficiali.

1 = Direzione di propagazione dell'onda

2 = Cresta

3 = Ventre

Un'onda può essere caratterizzata da una singola oscillazione oppure da un treno o successione di onde aventi caratteristiche simili, come ad esempio la periodicità intrinseca. In generale le onde sono caratterizzate da una cresta (punto alto), da un ventre (punto più basso) e da fronti d'onda di propagazione nel caso di treni di onde e sono in prima istanza classificabili come longitudinali o trasversali.

Nelle onde trasversali la vibrazione è perpendicolare alla direzione di propagazione (ad esempio le onde su una corda, in cui le parti infinitesime si muovono in alto e in basso in verticale, mentre l'onda si propaga orizzontalmente).

Le onde longitudinali sono invece caratterizzate da una vibrazione concorde con la direzione di propagazione dell'onda (ad esempio le onde sonore, in cui le particelle dell'aria si muovono nella stessa direzione di propagazione del suono). Esistono onde che sono sia longitudinali che trasversali e sono dette onde miste (ad esempio le onde sulla superficie del mare). Parametri di riferimento di un'onda sono l'ampiezza, la lunghezza d'onda, il periodo, la frequenza, la fase, la velocità di propagazione, l'energia e la potenza ad essa associata.

## Descrizione dell'onda

La periodicità dell'onda è identificata dal periodo **T**, che rappresenta il tempo necessario affinché un ciclo completo di oscillazione venga completato. La frequenza **f** dell'onda è inoltre il numero di periodi per unità di tempo; se l'unità di tempo è il secondo la frequenza si misura in **Hertz**.

Periodo e frequenza sono legate dalla relazione:

$$f = 1/T$$

Ad un periodo temporale corrisponde un periodo spaziale detto lunghezza d'onda  $\lambda$ , e vale la relazione:

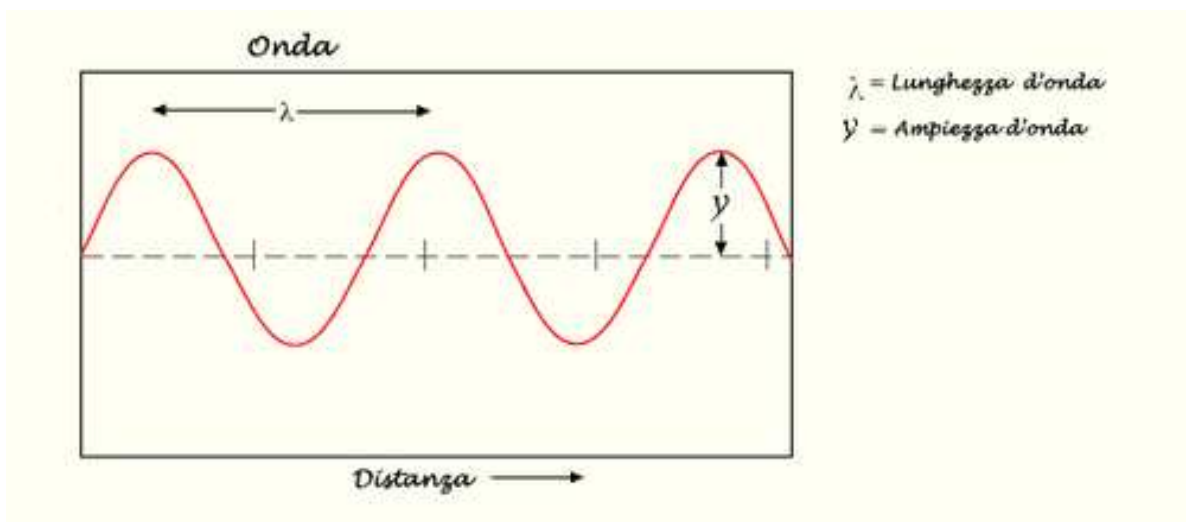
$$v = \lambda f$$

La velocità delle onde elettromagnetiche è la velocità della luce, circa  $3 \times 10^8$  m/s. Quindi, per fare un esempio, la lunghezza d'onda di un segnale a 100 MHz (un'onda radio), è circa  $3 \times 10^8$  m/s diviso  $100 \times 10^6$  Hz = 3 metri.

### Effetti

Tutte le onde hanno un comportamento comune in situazioni standard e possono subire i seguenti effetti o fenomeni:

- **Attenuazione** dell'ampiezza durante la propagazione nel mezzo.
- **Riflessione**, il cambio di direzione di propagazione a causa di uno scontro con un materiale riflettente.
- **Rifrazione**, il cambio di direzione di un'onda causata dal cambio del mezzo di propagazione (ad esempio di densità diversa).
- **Diffrazione**, la diffusione delle onde, per esempio quando passano attraverso una fessura stretta.
- **Interferenza**, la somma vettoriale (possono annullarsi) di due onde che entrano in contatto tra loro.
- **Effetto Doppler**, lo spostamento di frequenza di un'onda periodica viaggiante rispetto alla direzione di osservazione.
- **Polarizzazione**: un'onda è polarizzata se può oscillare solo in una direzione. La polarizzazione di un'onda trasversale descrive la direzione di oscillazione, nel piano perpendicolare alla direzione di moto. Onde longitudinali come quelle sonore non hanno polarizzazione, in quanto per queste onde la direzione di oscillazione è lungo la direzione di moto. Un'onda può essere polarizzata con un filtro polarizzatore.



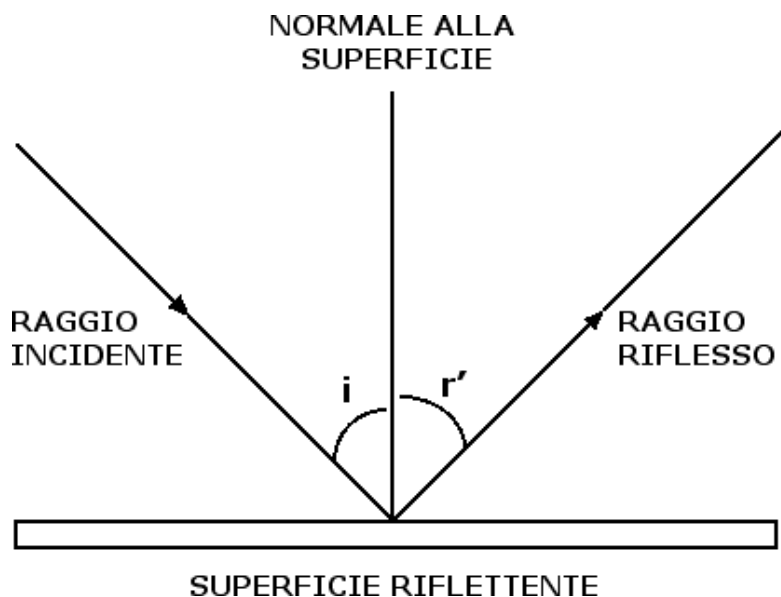
### Riflessione

In fisica la riflessione è il fenomeno per cui un'onda, che si propaga lungo l'interfaccia tra differenti mezzi, cambia di direzione a causa di un impatto con un materiale riflettente.

In acustica la riflessione causa gli echi ed è utilizzata nel sonar. In geologia è importante nello studio delle onde sismiche.

La riflessione di onde elettromagnetiche è regolata da due leggi fondamentali (v. figura), ricavabili dal principio di Fermat e dal principio di Huygens-Fresnel:

- Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale al piano nel punto di incidenza giacciono sullo stesso piano.
- L'angolo di incidenza e l'angolo di riflessione sono uguali.

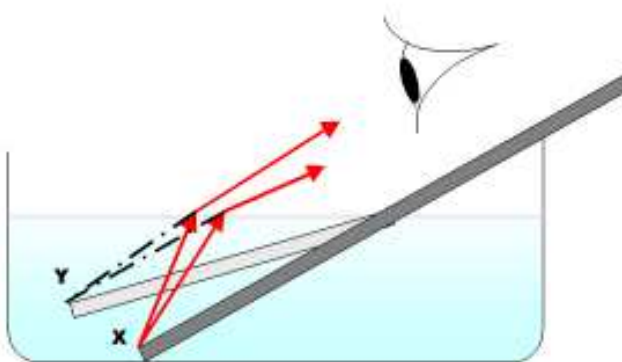


Si può dimostrare che il cammino percorso dal raggio che si riflette è il minimo possibile.

### Rifrazione

La rifrazione è la deviazione subita da un'onda che ha luogo quando questa passa da un mezzo ad un altro nel quale la sua velocità di propagazione cambia. La rifrazione della luce è l'esempio più comunemente osservato, ma ogni tipo di onda può essere rifratta, per esempio quando le onde sonore passano da un mezzo ad un altro o quando le onde dell'acqua si spostano a zone con diversa profondità.

In ottica, la rifrazione avviene quando una onda luminosa passa da un mezzo con un indice di rifrazione a un mezzo con un diverso indice di rifrazione. Sul bordo dei due mezzi, la velocità dell'onda è modificata, cambia direzione e la sua lunghezza d'onda è aumentata o diminuita mentre la sua frequenza rimane costante. Per esempio, i raggi di luce si rifrangono quando entrano o escono dal vetro; la comprensione di questo concetto ha consentito l'invenzione delle lenti e del telescopio a rifrazione.



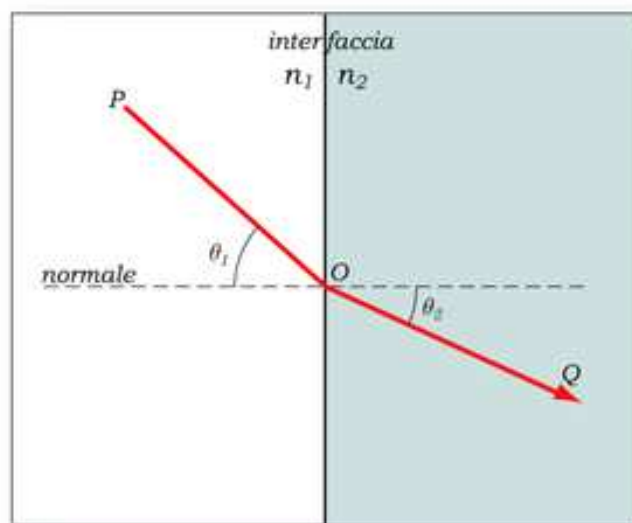
La cannuccia sembra piegata, a causa della rifrazione della luce tra l'acqua e l'aria.

La rifrazione può essere osservata guardando all'interno di un bicchiere pieno d'acqua (v. figura). L'aria ha un indice di rifrazione di circa 1.0003, mentre l'acqua ha un indice di circa 1.33. Se si guarda un oggetto dritto, come una cannuccia parzialmente immersa e inclinata, l'oggetto appare piegato dalla superficie dell'acqua. Cercheremo, adesso, di entrare nei dettagli per comprendere ciò che accade. L'estremità  $x$  della cannuccia, interessata dall'energia radiante, si comporta come sorgente secondaria di radiazione ed emette raggi di luce in tutte le possibili direzioni dello spazio. Consideriamo adesso il percorso di due di questi raggi, quelli evidenziati, per l'appunto, in tratto continuo in figura. Tali raggi, in corrispondenza alla superficie di discontinuità fra l'acqua e l'aria si piegano, allontanandosi dalla normale alla superficie condotta nel punto in cui i raggi stessi incidono. I raggi rifratti vengono catturati dall'occhio umano e l'intersezione dei loro prolungamenti determina un punto virtuale, indicato con  $y$  in figura, dal quale l'occhio umano ha la sensazione che provenga l'immagine. In altre parole, l'occhio dell'osservatore non vede l'estremità  $x$  della cannuccia, ma una sua immagine virtuale, ottenuta dal prolungamento dei due raggi rifratti.

La rifrazione è responsabile degli arcobaleni e della scomposizione della luce bianca nei colori dell'arcobaleno che avviene quando la luce passa attraverso un prisma. Il vetro ha un alto indice di rifrazione rispetto all'aria e le diverse frequenze della luce viaggiano a velocità diverse (dispersione), causando la rifrazione dei colori a diversi angoli, e quindi la scomposizione. La differenza nella frequenza corrisponde nella diversità della tonalità.

Altri fenomeni ottici sono il miraggio e la fata Morgana (v.). Questi sono causati dal cambiamento dell'indice di rifrazione in funzione della temperatura dell'aria.

### Legge di Snell



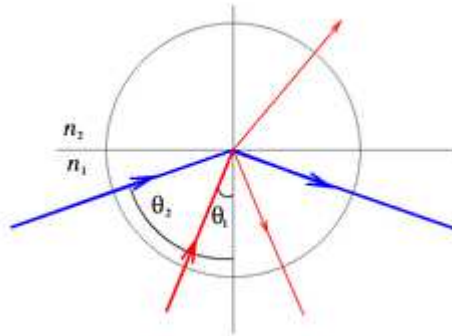
La rifrazione della luce all'interfaccia tra due mezzi con indice di rifrazione diverso.

La legge di Snell descrive quanto i raggi sono deviati quando passano da un mezzo ad un altro. Se il raggio proviene da una regione con indice di rifrazione  $n_1$  ed entra in un mezzo ad indice  $n_2$  gli angoli di incidenza  $\theta_1$  e di rifrazione  $\theta_2$  sono legati dall'espressione:

$$\sin\theta_1/\sin\theta_2 = v_1/v_2 = n_2/n_1$$

dove  $v_1$  e  $v_2$  sono le velocità della luce nei mezzi.

## Riflessione interna totale



L'angolo di incidenza del raggio  $\theta_2$  è maggiore dell'angolo critico: il raggio di luce viene riflesso

La riflessione totale è il fenomeno, governato dalla legge della riflessione, per cui un'onda elettromagnetica che colpisce una superficie di separazione tra due mezzi, in parte prosegue il suo percorso deviandolo al di là della superficie, mentre in parte torna nella direzione da cui proveniva. Quando  $\theta_i > \theta_{\text{crit}}$  non appare alcun raggio rifratto: la luce incidente subisce una riflessione interna totale ad opera dell'interfaccia.

## Arcobaleno

L'arcobaleno è un fenomeno ottico e meteorologico che produce uno spettro quasi continuo di luce nel cielo quando la luce del Sole attraversa le gocce d'acqua rimaste in sospensione dopo un temporale, o presso una cascata o una fontana.

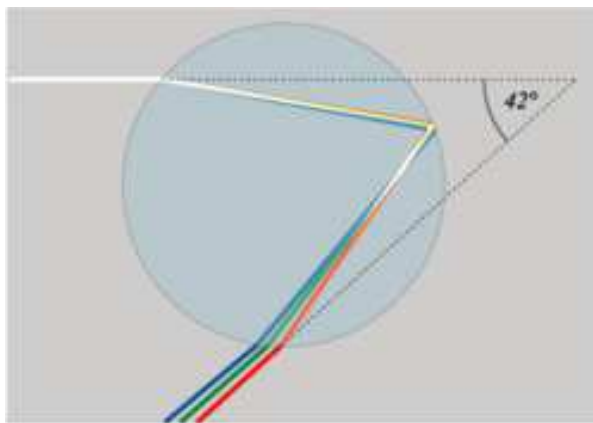
Visivamente è un arco multicolore, rosso sull'esterno e viola sulla parte interna, senza transizioni nette tra un colore e l'altro. Comunemente, tuttavia, lo spettro continuo viene descritto attraverso una sequenza di bande colorate; la suddivisione tradizionale è: rosso, arancione, giallo, verde, blu, indaco e violetto. Esso è la conseguenza della dispersione e della rifrazione della luce solare contro le pareti delle gocce stesse.

In rari casi un arcobaleno lunare, o notturno, può essere visto nelle notti di forte luce lunare. Ma, dato che la percezione umana dei colori in condizioni di poca luminosità è scarsa, gli arcobaleni lunari sono percepiti come bianchi.

Gli arcobaleni possono essere osservati ogni qualvolta ci siano gocce di acqua nell'aria e con luce solare proveniente da dietro l'osservatore ad una bassa altezza. L'arcobaleno più spettacolare si può vedere quando metà del cielo è ancora scuro per le nuvole di pioggia e l'osservatore si trova in un punto con il cielo pulito sopra. L'effetto dell'arcobaleno è anche comune vicino alle cascate o alle fontane.

L'aspetto di un arcobaleno è provocato dalla dispersione ottica della luce solare che attraversa le gocce di pioggia. La luce viene prima rifratta quando entra nella superficie della goccia, riflessa sul retro della goccia e ancora rifratta uscendo dalla goccia.

La quantità di luce che viene rifratta dipende dalla sua lunghezza d'onda, e quindi dal suo colore. La luce blu (onde più corte) viene rifratta ad un angolo più grande di quella rossa, ma siccome l'area nel retro di una gocciolina ha un punto focale al suo interno, lo spettro lo attraversa, e così la luce rossa appare più alta nel cielo, formando i colori esterni dell'arcobaleno.



La luce bianca si separa in diversi colori (lunghezze d'onda) quando entra nella goccia poiché la luce rossa viene rifratta di un angolo maggiore rispetto alla luce blu. Lasciando la goccia, i raggi rossi hanno deviato di un angolo maggiore rispetto a quelli blu, producendo un arcobaleno.

Un arcobaleno non è qualcosa di concreto che abbia esistenza effettiva in una particolare posizione del cielo. Si tratta solo di un fenomeno ottico la cui posizione apparente dipende dal punto in cui si trova l'osservatore e dalla posizione del sole. La posizione di un arcobaleno nel cielo è sempre dalla parte opposta rispetto al sole, e l'interno è sempre leggermente più luminoso dell'esterno. Tutte le gocce di pioggia rifrangono la luce solare nello stesso modo, ma solo la luce di alcune di esse raggiunge l'occhio dell'osservatore. Questa luce è quella che costituisce l'arcobaleno per quel determinato osservatore.

### Miraggio o “Fata Morgana”

Il miraggio è un'illusione ottica naturale (fenomeno ottico).

Esso si verifica quando i raggi del Sole incontrano uno strato d'aria più calda rispetto agli strati sovrastanti dove l'aria più fredda è di densità maggiore. Così i raggi di luce subiscono una riflessione totale ed è possibile vedere le immagini come se fossero veramente riflesse al suolo.

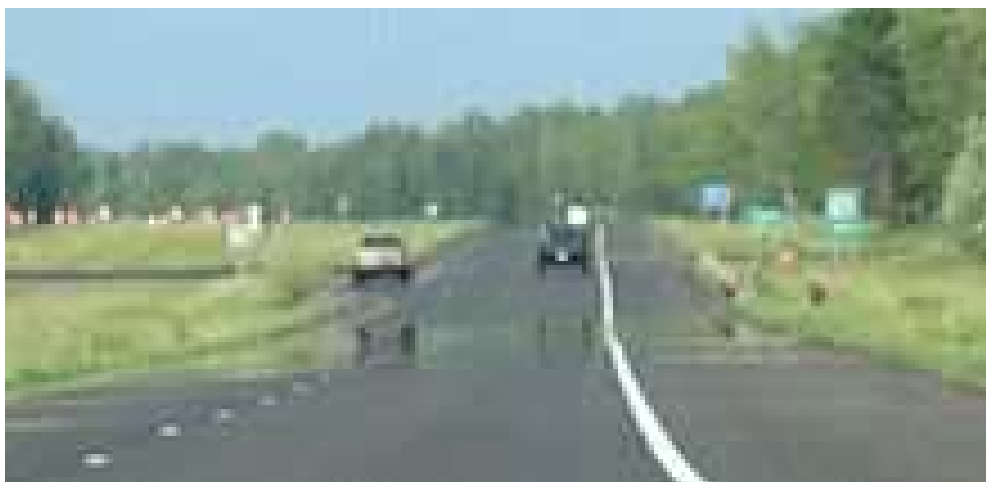


Foto di un miraggio su strada asfaltata.

Se ci troviamo nel deserto possiamo vedere il riflesso del cielo sul terreno sabbioso in lontananza e pensare erroneamente di scorgere un lago; ancora, se ci troviamo d'estate a percorrere una strada asfaltata, può capitare di vedere il riflesso delle macchine in lontananza sull'asfalto e si ha l'impressione che vi sia una pozzanghera che riflette gli oggetti sufficientemente distanti. Questo fenomeno ottico si spiega in maniera relativamente semplice con i principi dell'ottica ed in particolare con quelli della rifrazione. Gli strati di aria più prossimi al suolo sono molto più caldi (e quindi meno densi) rispetto agli strati superiori. In tal caso si ha che l'indice di rifrazione dell'aria calda è minore di quello dell'aria fredda e perciò se consideriamo un raggio proveniente da oggetti relativamente lontani (che quindi formano un angolo con l'orizzontale inferiore all'angolo critico) questo raggio viene riflesso totalmente verso l'osservatore che può quindi osservare una immagine capovolta e posizionata al di sotto dell'oggetto originale dando l'effetto che vi sia una pozzanghera che consente all'oggetto di specchiarsi.

### **Riflessione delle onde radio nella ionosfera**

Le onde radio (che, come vedremo, sono una parte dello spettro elettromagnetico e precisamente quella con frequenza minore) in assenza di "perturbazioni" si propagano in linea retta, come avviene per la luce. Se fosse sempre così l'unico modo per trasmettere onde radio a lunga distanza sarebbe utilizzare satelliti artificiali o ponti radio, "a vista", cioè fra stazioni in portata ottica fra di loro. In realtà non sempre è così, principalmente per due motivi: la rifrazione e la diffrazione.

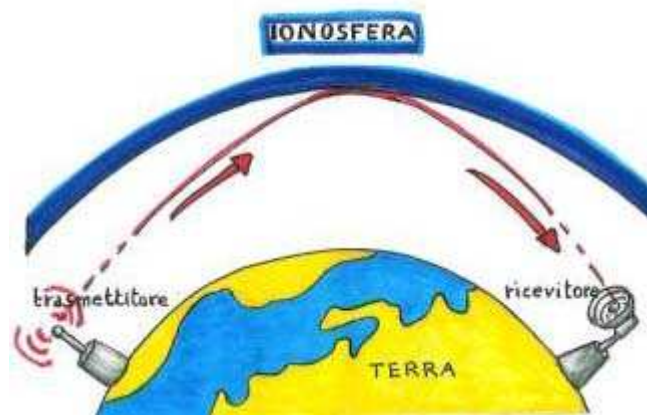
E' esperienza di tutti che la luce non sempre si propaga in linea retta: in certe condizioni curva, come nel caso in cui passi attraverso materiali con indici di rifrazione diversi, per esempio dall'aria alla plastica degli occhiali. Per quanto riguarda la diffrazione abbiamo esperienza più con un altro tipo di onde, cioè quelle sonore: anche se fra noi e chi ci parla c'è un ostacolo (purché non troppo grosso) riusciamo ad ascoltarlo. Così onde elettromagnetiche lunghe riescono ad aggirare ostacoli (come edifici o colline) purché non troppo grossi rispetto alla "lunghezza" dell'onda.

Ma anche in questo modo la trasmissione avviene su scala locale, poiché le onde elettromagnetiche non hanno nessun motivo per seguire la curvatura terrestre.

Ma torniamo alla rifrazione, che è la causa della riflessione nella ionosfera. Un fenomeno molto simile alla riflessione attraverso la ionosfera è il miraggio. Il più comune miraggio, come abbiamo visto, è quello che si ha quando si viaggia d'estate su una distesa d'asfalto o nel deserto: in lontananza appaiono delle "pozze d'acqua" che scompaiono man mano che ci avviciniamo.

Cosa accade? Esattamente quello che accade nella ionosfera: vicino al suolo l'aria è molto più calda ed ha un indice di rifrazione minore, perciò la luce proveniente dall'alto "curva" dapprima rendendosi parallela al suolo e poi risale leggermente verso l'alto.

E' un fenomeno simile alla riflessione totale che si ha nel passaggio della luce da un mezzo più denso ad uno meno denso (per esempio sott'acqua è quasi impossibile guardare fuori: la superficie sembra uno specchio) solo che in questo caso la "transizione" fra i due mezzi (cioè fra i due indici di rifrazione) è graduale e non discontinua.



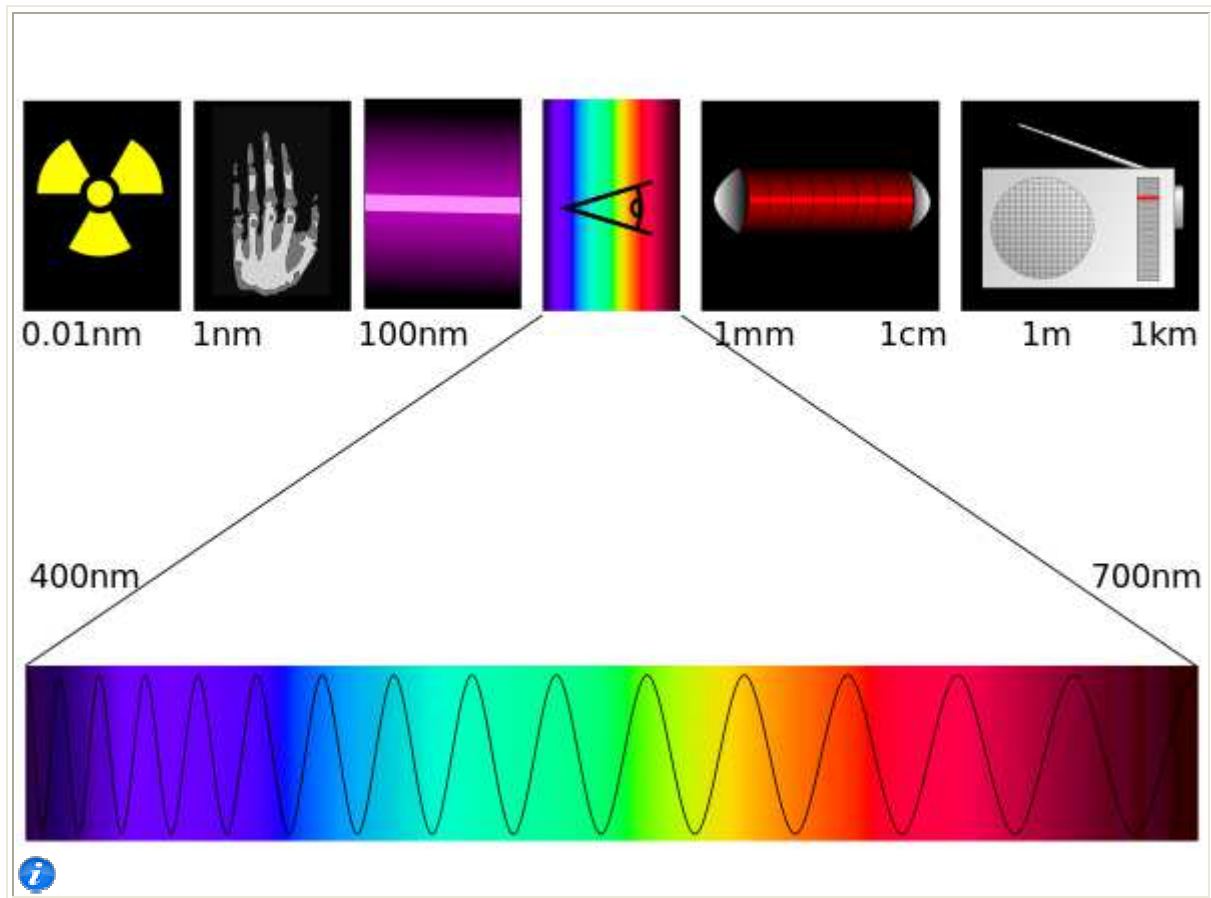
La figura si può interpretare come il percorso di un'onda elettromagnetica nella ionosfera. Nella transizione tra la stratosfera e la ionosfera c'è un forte cambiamento di indice di rifrazione per le onde elettromagnetiche, dovuto al fatto che il gas ionizzato ha proprietà elettriche ben diverse dai gas non ionizzati. Così il percorso di un'onda radio che va verso l'alto (e che si "perderebbe" nello spazio) viene deflesso e riesce a seguire (per più o meno strada) la curvatura terrestre, ridiscendendo al suolo anche a notevole distanza.

Spesso, in questi casi, a distanze intermedie l'onda non arriva e curiosamente la stazione si può "ascoltare" solo molto vicino o molto lontano.

Il fatto che solo certe frequenze (e alcune in maniera più "intensa") vengano ricevute a distanza è dovuto al diverso indice di rifrazione per le differenti frequenze. Infatti ogni frequenza subisce una deflessione diversa (come in un prisma ogni colore segue un percorso diverso e la luce bianca viene scomposta nei colori dell'iride). Questo è il motivo per cui le trasmissioni radiofoniche, caratterizzate da lunghezze d'onda relativamente grandi, subiscono il fenomeno della "riflessione totale" nella ionosfera, e percorrono così lunghe distanze, superando indenni la curvatura terrestre, mentre le onde televisive, più corte (e quindi con frequenza più alta), "perforano" la ionosfera e si disperderebbero nello spazio se non ci fossero opportuni sistemi di rimando, una volta i ripetitori a terra e oggi i satelliti.

Le variazioni del "vento solare" (particelle ionizzate provenienti dal sole) causano variazioni delle altitudini e densità della ionosfera, provocando a volte dei problemi di trasmissione.

## Lo spettro della luce



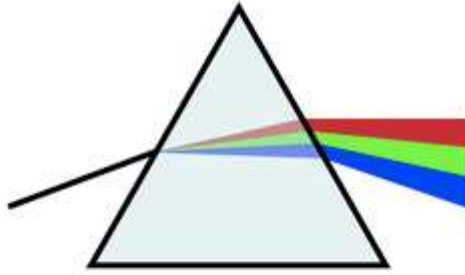
Le varie tipologie di onde elettromagnetiche e le rispettive lunghezze d'onda

## Spettro visibile

Lo spettro visibile è quella parte dello spettro elettromagnetico che cade tra il rosso e il violetto includendo tutti i colori percepibili dall'occhio umano. La lunghezza d'onda della luce visibile nell'aria va indicativamente dai 380 ai 760 nm; le lunghezze d'onda corrispondenti in altri mezzi, come l'acqua, diminuiscono proporzionalmente all'indice di rifrazione. In termini di frequenze, lo spettro visibile varia tra i 400 e i 790 terahertz. La massima sensibilità media dell'occhio umano probabilmente si ha ai 560 nm (540 THz) dello spettro elettromagnetico, più o meno in corrispondenza del colore giallo citrino anche se la temperatura media della superficie della fotosfera solare di 5777 Kelvin dà: un picco ai 510-511 nm (verde-ciano) fuori dall'atmosfera terrestre e mediamente ai 560 nm sulla Terra a causa della rifrazione atmosferica ovvero nel giallo-verde pieno.

Le radiazioni con lunghezza d'onda minore (e quindi frequenza maggiore) sono gli ultravioletti, i raggi x e i raggi gamma; quelle con lunghezza maggiore (e frequenza minore) sono gli infrarossi, le microonde e le onde radio. Tutte queste radiazioni hanno la stessa natura, sono infatti tutte onde elettromagnetiche. Lo spettro visibile rappresenta la parte centrale dello spettro ottico che comprende anche infrarosso e ultravioletto.

Lo spettro visibile non contiene, come si può pensare, tutti i colori che l'occhio e il cervello possono distinguere: il marrone, il rosa, il magenta, per esempio, sono assenti, in quanto si ottengono dalla sovrapposizione di diverse lunghezze d'onda.



Un prisma separa la luce nei colori che compongono lo spettro visibile.

Le lunghezze d'onda visibili occupano la cosiddetta "finestra ottica", una regione dello spettro elettromagnetico che può attraversare indisturbata l'atmosfera della Terra (benché come è noto il blu venga diffuso più del rosso, dando al cielo il suo colore caratteristico). Esistono anche "finestre" per l'infrarosso vicino (NIR), medio (MIR) e lontano (FIR), ma sono al di là delle capacità umane di percezione.

Alcune specie animali, come per esempio le api, possono "vedere" in differenti regioni dello spettro elettromagnetico, in questo caso l'ultravioletto, per facilitare la ricerca del nettare dei fiori, i quali cercheranno quindi di attirare gli insetti mostrandosi "invitanti" proprio a quelle lunghezze d'onda. All'altro capo dello spettro alcuni serpenti non vedono gli infrarossi perché, pur essendo animali a sangue freddo, la loro retina sarebbe comunque più calda del corpo da vedere. Dato che un rilevatore IR deve essere più freddo della radiazione da rilevare (vedi quelli del telescopio Hubble, raffreddati con elio liquido pur essendo nello spazio esterno), eventuali recettori IR in un occhio interno sarebbero accecati dal sangue e dal corpo stesso del serpente, per questo l'animale ha appunto dei ricettori termici sulla pelle ai lati del cranio, nella posizione più adatta, che gli permettono di cacciare anche al buio.

I primi studi sullo spettro visibile furono condotti da Isaac Newton, nel suo trattato intitolato "*Opticks*", e da Goethe, nel saggio "*Teoria dei colori*", benché osservazioni precedenti furono eseguite in questo senso da Roger Bacon, quattro secoli prima di Newton.



Il cerchio dei colori di Newton, che mostra i legami tra i diversi colori, le note musicali e i pianeti.

Newton per primo usò il termine spettro (dal latino spectrum, con il significato di "apparenza" o "apparizione"), in una stampa del 1671, dove descriveva i suoi esperimenti di ottica. Egli osservò che quando un raggio di luce colpiva una superficie di un prisma di vetro con un certo angolo, una parte del raggio veniva riflessa, mentre la parte restante attraversava il prisma e ne usciva scomposta in bande colorate. Newton ipotizzò che la luce fosse composta da particelle di differenti colori, e che ogni colore viaggiasse con una propria velocità, compresa tra quella del rosso (il più veloce) e quella del violetto (il più lento). Ne conseguiva che ciascun colore subiva la rifrazione in maniera diversa, cambiando traiettoria e separandosi dagli altri.

Newton divise lo spettro in sette diversi colori: rosso, arancione, giallo, verde, blu, indaco e violetto. La scelta di sette colori non poggiava su basi scientifiche, ma filosofiche, in particolare sulla teoria sofistica della connessione tra colori, note musicali (sette), pianeti (allora erano ritenuti essere sette) e giorni della settimana (sempre sette). L'occhio umano d'altra parte riesce solo con difficoltà a distinguere l'indaco dal blu e dal violetto, fatto che ha spinto molti a ritenere di dover eliminarlo dal novero dei colori dello spettro.

Johann Wolfgang von Goethe si limitò invece a una descrizione qualitativa del fenomeno: invece di "restringere" il raggio di luce per accentuare la presenza dello spettro, osservò solo che "allargando" il raggio di luce bianca lo spettro scompariva.

La luce nel vuoto viaggia sempre alla medesima velocità; in presenza di altri mezzi, viaggia ad una velocità inferiore, e il rapporto tra le due velocità è detto indice di rifrazione del mezzo. Tale indice dipende dalla frequenza dell'onda luminosa e dal momento che la luce è composta da differenti frequenze elettromagnetiche, essa verrà dispersa nel passaggio dal vuoto (o dall'aria) ad un altro mezzo. L'acqua e il vetro sono ottimi materiali per sperimentare tale fenomeno: un prisma di vetro, come si è visto prima, rende visibile lo spettro ottico mentre l'arcobaleno è l'esempio ideale della rifrazione naturale della luce nell'acqua.

### **La velocità della luce**

#### **La misurazione di Roemer**

Nel 1610, Galileo scoprì i quattro maggiori satelliti di Giove: Io, Europa, Ganimede e Callisto.

Nel loro movimento attorno a Giove i quattro satelliti, osservati da Terra, entrano regolarmente nel cono d'ombra del pianeta e, non essendo più illuminati dal Sole, risultano invisibili. Questo fenomeno, dovuto ad una causa analoga a quelle che produce le eclissi di Luna, è detto eclisse. L'eclisse non va confusa con l'occultazione che si ha invece quando il satellite passa dietro il disco di Giove. Poiché il loro periodo di rivoluzione è, con ottima approssimazione, costante, il tempo intercorrente tra due successive eclissi, in condizioni sostanzialmente statiche, coincide con il loro periodo di rivoluzione.

Il movimento di questi satelliti è talmente regolare che Galileo pensò che la sua accurata rilevazione poteva rispondere non solo ad un interesse scientifico ma anche ad uno scopo pratico molto importante ed ancora irrisolto alla fine del 16° secolo, cioè la misura esatta delle longitudini geografiche. Galileo non poté realizzare la sua idea per la mancanza di orologi sufficientemente precisi.

La sua idea fu ripresa da Cassini nel 1668 che riuscì ad applicarla con successo grazie al perfezionamento degli strumenti di osservazione e all'invenzione dell'orologio (Huygens, 1657).

Durante l'inverno del 1671-1672, Picard e Roemer (da Uraniborg, l'osservatorio di Tycho Brahe sull'isola di Hven, allora nel regno di Danimarca, ora in Svezia) e Cassini (dall'osservatorio di Parigi), osservarono simultaneamente l'inizio di un'eclisse di Io nell'ombra di Giove. Da queste misure poterono risalire alla differenza di longitudine tra Uraniborg e Parigi.

Dal 1672 in poi, Roemer lavorò all'osservatorio di Parigi e continuò l'osservazione delle eclissi dei satelliti di Giove e scoprì che gli intervalli tra gli inizi (o tra le fini) di due successive eclissi di Io risultavano diversi in vari periodi dell'anno e precisamente quando la Terra si stava allontanando da Giove risultavano maggiori di quando la Terra si stava avvicinando a Giove.

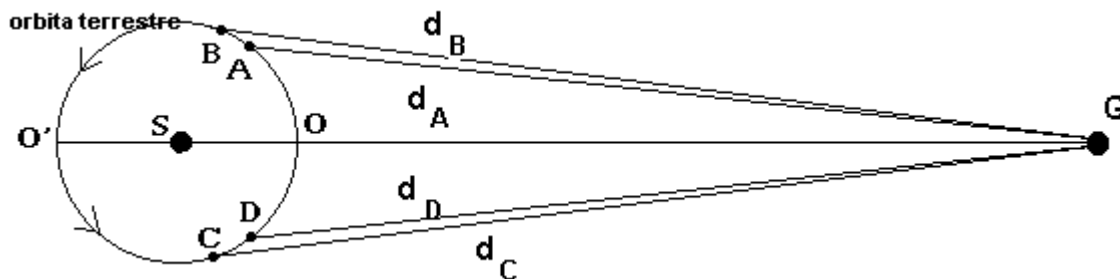
Fu grazie a questa scoperta che Roemer fu in grado di provare per la prima volta che la velocità della luce è finita ponendo fine ad una controversia scientifica che divideva nel '600 gli scienziati europei: da una parte personaggi come Keplero, Descartes, Cassini, seguendo l'antica opinione aristotelica, sostenevano che la velocità della luce è infinita; dall'altra personaggi come Galileo sostenevano che la velocità della luce era finita ma non avevano potuto provare sperimentalmente questa loro opinione.

Questa prova fu pubblicata nel 1676 nel Journal des Savants.

Si assume, per semplicità espositiva, che l'orbita della Terra attorno al Sole (S) sia circolare.

Quando la Terra è in O, Giove (G) è in opposizione al Sole.

Quando la Terra è in O', Giove è in congiunzione con il Sole.



Si assume inoltre che, durante piccoli spostamenti in senso antiorario della Terra, Giove possa essere considerato immobile.

Gli intervalli tra gli inizi o tra le fini di due successive eclissi di Io risultano costanti quando la rilevazione dei tempi viene fatta in prossimità di O o di O': in questi casi si ottiene  $T = 1\text{d } 18\text{h } 28\text{m } 35\text{s} = 152915\text{ sec}$ .

Ma quando la Terra è in una situazione intermedia tra O e O', ad esempio nei punti A (tra una opposizione e una congiunzione) o C (tra una congiunzione e una opposizione) le misure di questi intervalli risultano maggiori (in A) o minori (in C) di quelle effettuate in O o in O'.

Va notato che quando la Terra è tra una opposizione e una congiunzione (A) da Terra si osservano solo le fini delle eclissi perché all'inizio il satellite è occultato; viceversa quando la Terra è tra una congiunzione e una opposizione (C) si osservano solo gli inizi perché l'eclisse termina in occultazione.

Roemer capì che queste diverse misure erano imputabili al movimento relativo della terra rispetto a Giove e alla finitezza della velocità della luce.

La velocità della luce così calcolata diede l'eccellente valore di 210.000 Km/sec, con un errore di solo il 20% rispetto al reale.

### L'apparato di Fizeau-Foucault

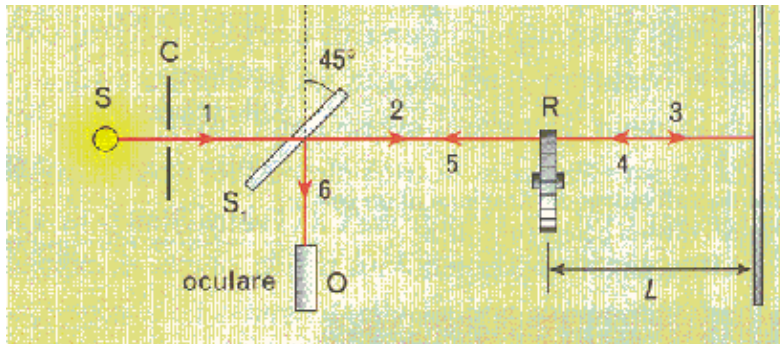
L'apparato di Fizeau-Foucault è un dispositivo per il calcolo della velocità della luce.

Nel 1849 Hippolyte Fizeau ideò un apparato nel quale un lampo di luce veniva inviato su uno specchio situato a 8 chilometri di distanza; lo specchio lo rifletteva fino all'osservatore: il tempo trascorso per percorrere i 16 chilometri non superava di molto  $1/20\,000$  di secondo, ma Fizeau riuscì a misurarlo ponendo sul percorso del raggio luminoso una ruota dentata in rapida rotazione; il lampo, passato fra un dente e l'altro all'andata, colpiva il dente successivo al ritorno; quindi Fizeau, situato dietro la ruota non lo vedeva.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Aumentando la velocità della ruota il raggio passava nel successivo intervallo fra due denti, così, regolando e misurando la velocità di rotazione della ruota, Fizeau trovò che la velocità della luce era pari a 315 000 chilometri al secondo.

Nel 1850, Léon Foucault perfezionò il metodo utilizzando uno specchio ruotante al posto della ruota dentata. Ora il tempo trascorso veniva misurato da un leggero cambiamento di direzione del raggio di luce riflesso. Questa misurazione fornì, come velocità della luce nell'aria, l'eccellente valore di 298.000 chilometri al secondo.



Apparato di Fizeau-Foucault

In fisica, la **velocità della luce** è la **velocità di propagazione di un'onda elettromagnetica**. Nel vuoto ha un valore pari a  $c = 299\,792,458 \text{ km/s}$  (ovvero circa  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ).

### I colori dello spettro

I colori dell'arcobaleno nello spettro includono tutti quei colori che sono prodotti da un raggio di luce visibile di una precisa lunghezza d'onda (raggio monocromatico o puro).

Benché lo spettro sia continuo e non vi siano "salti" netti da un colore all'altro, si possono comunque stabilire degli intervalli approssimati per ciascun colore.

Colore	Frequenza	Lunghezza d'onda
Violetto	668-789 THz	380–450 nm
Blu	631-668 THz	450–475 nm
Ciano	606-631 THz	476-495 nm
Verde	526-606 THz	495–570 nm
Giallo	508-526 THz	570–590 nm
Arancione	484-508 THz	590–620 nm
Rosso	400-484 THz	620–750 nm

### Spettroscopia

Lo studio di oggetti basato sullo spettro della luce visibile che essi emettono è chiamato spettroscopia; un importante campo di ricerca della spettroscopia si ritrova nell'astronomia, dove essa è fondamentale per l'analisi delle proprietà fisiche dei corpi celesti. In generale, la spettroscopia astronomica utilizza reticoli di diffrazione con alto potere di dispersione, in modo da ottenere un'altissima risoluzione.

Si possono rilevare in questo modo gli elementi chimici che compongono il corpo celeste attraverso le linee di emissione e di assorbimento; l'elio fu scoperto proprio attraverso l'analisi spettroscopica della luce solare.

Misurando inoltre lo spostamento delle linee spettrali, si può ricavare il valore del redshift o del blueshift dell'oggetto, come conseguenza dell'effetto Doppler sulla luce emessa. Il primo esopianeta fu scoperto analizzando tale spostamento, che era causato da variazioni di velocità della stella (influenzata gravitazionalmente dal pianeta) dell'ordine di pochi metri al secondo.

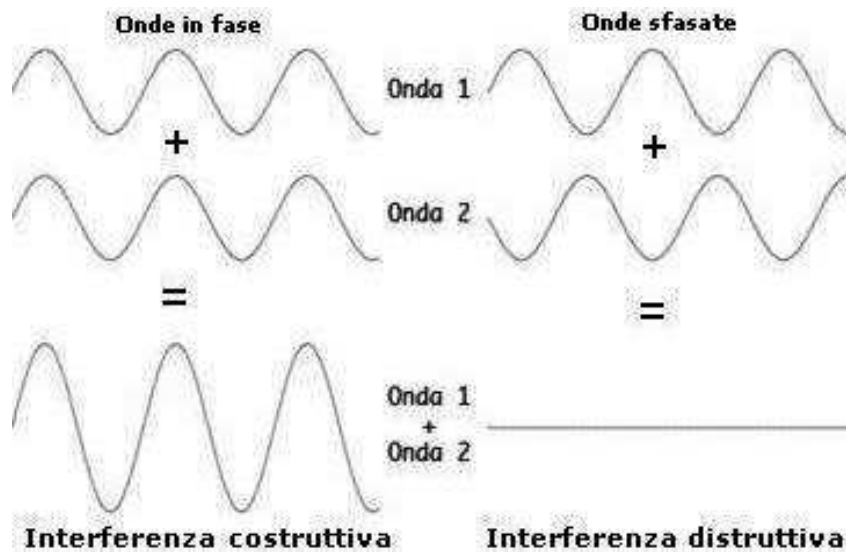
### Interferenza

E' quel fenomeno per cui quando due o più onde interagiscono fra loro si verifica una interferenza, che può essere costruttiva o distruttiva, a seconda che le onde si intensifichino o si indeboliscano (fino ad annullarsi) a vicenda.

### Interferenza costruttiva e distruttiva

Consideriamo due onde di uguale lunghezza d'onda e di uguale ampiezza. Quando esse interagiscono in modo che la cresta della prima onda coincida con la cresta della seconda onda, le due onde sommano algebricamente la loro ampiezza e si ha pertanto una interferenza costruttiva con formazione di una unica onda elettromagnetica con ampiezza doppia.

Quando invece interagiscono in modo che la cresta della prima onda coincida con il ventre della seconda onda, le due onde sommano algebricamente (= sottraggono) la loro ampiezza e si ha pertanto una interferenza distruttiva con annullamento dell'onda (v. figura).



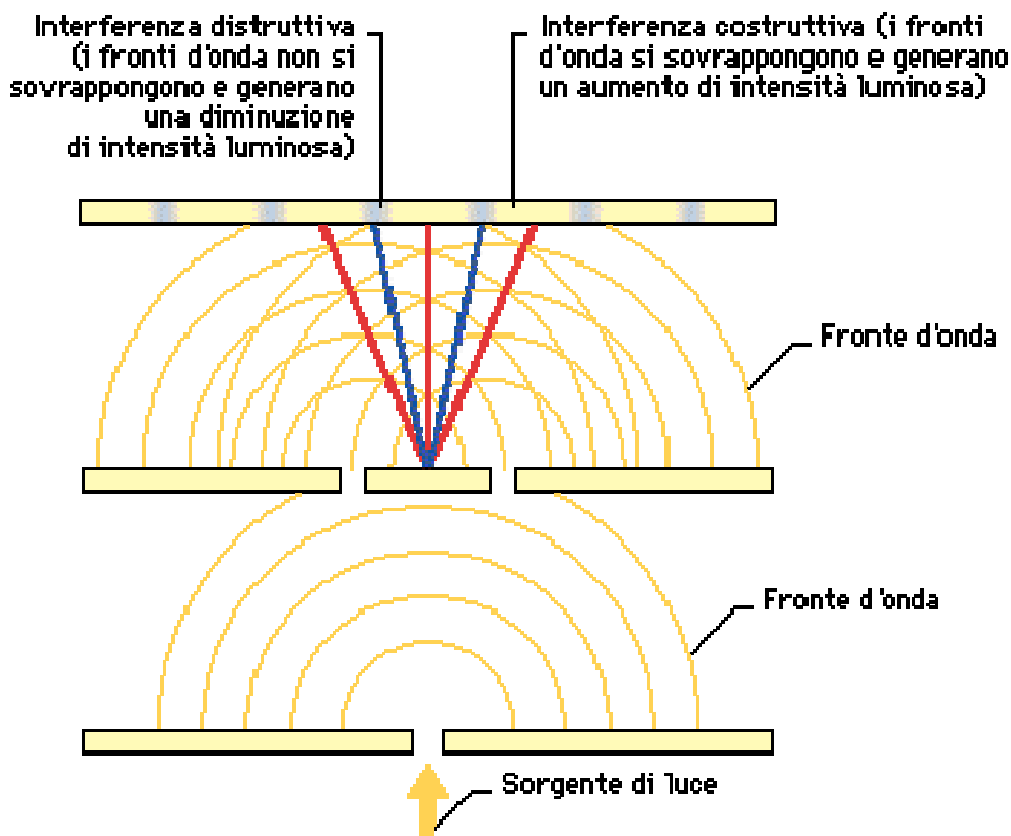
### Diffrazione

In fisica è un fenomeno tipicamente ondulatorio per il quale un'onda che attraversa una piccolissima fenditura o che supera lo spigolo vivo di un corpo, anziché procedere nella direzione iniziale, si propaga seguendo percorsi differenti. Affinché la diffrazione appaia evidente occorre che le dimensioni della fenditura siano simili a quelle della lunghezza d'onda della radiazione incidente. Suono, onde sismiche, luce e altre radiazioni elettromagnetiche: il fenomeno interessa qualunque tipo di onda.

Se si indirizza un fascio di luce contro un pannello su cui sia praticata una fenditura di dimensioni visibili, uno schermo situato al di là del pannello raccoglie un'immagine relativamente nitida della fenditura, circondata da una zona d'ombra. Restringendo via via l'ampiezza della fenditura l'immagine che si raccoglie sullo schermo non si restringe in modo proporzionale, ma si allarga e si offusca a causa del fenomeno della diffrazione.

Le onde luminose che incidono ai bordi della fessura, infatti, non proseguono in direzione rettilinea, ma invadono la zona d'ombra, deviando di un angolo che dipende dalla lunghezza d'onda e dalle dimensioni dell'ostacolo.

Il fenomeno è dimostrabile alla luce del principio di Huygens-Fresnel dell'interferenza. Tale principio dice che ogni punto di un fronte d'onda è sorgente di un'onda semicircolare che si propaga in tutte le direzioni. Così, nel caso della fenditura, ogni punto del fronte luminoso che si affaccia su di essa dà vita ad un'onda secondaria che si propaga in fase come la prima, andando a colpire lo schermo in punti normalmente in ombra. Come per l'interferenza, la sovrapposizione delle onde secondarie così prodotte genera una figura di diffrazione costituita da una successione di massimi e minimi più o meno intensi (v. figura).



Quando un fascio luminoso attraversa una fenditura di dimensioni molto piccole, paragonabili alla lunghezza d'onda della luce, l'approssimazione geometrica non è più valida e bisogna tenere conto degli effetti dei bordi della fenditura, che diventano a loro volta sorgenti di onde elementari, generando complessivamente un fronte d'onda sferico, fatto di numerose componenti elementari

Se la luce viene fatta passare attraverso una coppia di fenditure, i treni d'onda che si dipartono da ciascuna di esse si sovrappongono, dando luogo al fenomeno dell'interferenza: nei punti di sovrapposizione tra due creste d'onda l'intensità luminosa si somma producendo un massimo di luminosità (interferenza costruttiva); nei punti di sovrapposizione tra una cresta e un ventre, invece, l'intensità dell'una cancella quella dell'altra col risultato che sullo schermo si osserva un minimo di luminosità (interferenza distruttiva).

Fenomeni di diffrazione possono essere osservati quotidianamente, in particolare quelli che interessano la luce: per esempio, le tracce incise sulla superficie di un CD o di un DVD agiscono come un reticolo di diffrazione, creando il familiare effetto arcobaleno; anche i piccoli ologrammi, ad esempio delle carte di credito, si basano sulla diffrazione.

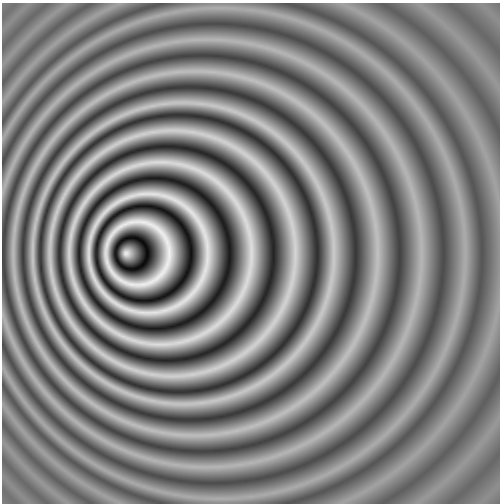
In natura, si possono osservare colori cangianti dovuti a diffrazioni interferenziali, come quelli delle piume del pavone, o della corazza di alcuni coleotteri, o delle ali di molte farfalle, che sono colorate grazie all'interferenza delle onde diffratte da parte di microscopiche scaglie disposte regolarmente.

Per ottenere fenomeni di interferenza con i raggi X bisogna utilizzare un reticolo di diffrazione che abbia una distanza fra le rigature paragonabile alla lunghezza d'onda della radiazione (dell'ordine di  $1 \text{ \AA}$ ). Le distanze fra i piani di un cristallo sono appunto di quest'ordine di grandezza.

Se si fa passare un fascio di raggi X attraverso un cristallo, i raggi vengono diffratti dai vari piani del cristallo, formando in uscita varie figure di interferenza.

Ad occuparsi del fenomeno della diffrazione furono diversi scienziati. Le scoperte più rilevanti ci giungono da Grimaldi, Fraunhofer, Fresnel e Rowland.

### Effetto Doppler



Una sorgente di onde in movimento verso sinistra; la frequenza è maggiore a sinistra piuttosto che a destra



Effetto Doppler sulle increspature attorno ad un cigno

L'effetto Doppler è un fenomeno fisico che consiste nel cambiamento della frequenza o della lunghezza d'onda di un'onda percepita da un osservatore che si trova in movimento o in quiete rispetto alla sorgente delle onde, anch'essa in movimento o in quiete. Per quelle onde che si trasmettono in un mezzo, come le onde sonore, la velocità dell'osservatore e dell'emettitore vanno considerate in relazione a quella del mezzo in cui sono trasmesse le onde. L'effetto Doppler totale può quindi derivare dal moto di entrambi, ed ognuno di essi è analizzato separatamente.

### Storia

L'effetto fu analizzato per la prima volta da Christian Andreas Doppler nel 1845. Procedette quindi a verificare la sua analisi in un famoso esperimento: si piazzò accanto ai binari della ferrovia, e ascoltò il suono emesso da un vagone pieno di musicisti, assoldati per l'occasione, mentre si avvicinava e poi mentre si allontanava. Confermò che l'altezza del suono era più alta quando l'origine del suono si stava avvicinando, e più bassa quando si stava allontanando, dell'ammontare predetto. Hippolyte Fizeau scoprì indipendentemente lo stesso effetto nelle onde elettromagnetiche nel 1848 (in Francia, l'effetto è a volte chiamato "effetto Doppler-Fizeau").

### Spiegazione del fenomeno

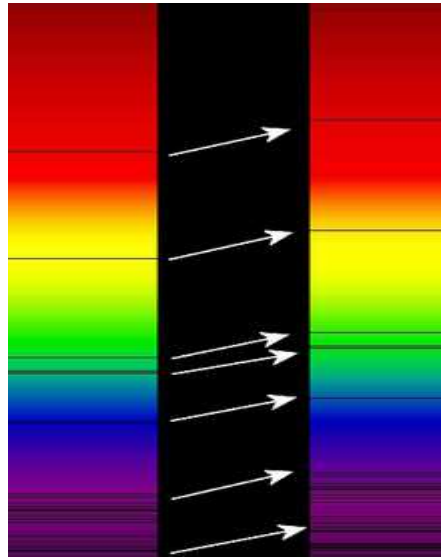
È importante notare che la frequenza del suono emesso dalla sorgente non cambia nel sistema di riferimento solidale alla sorgente. Per comprendere il fenomeno, consideriamo la seguente analogia: se siamo fermi sulla spiaggia, vediamo arrivare le onde supponiamo ogni cinque secondi, quindi ad una determinata frequenza; se ora entriamo in acqua e navighiamo verso il mare aperto, andiamo incontro alle onde, quindi le incontriamo più frequentemente (la frequenza aumenta), mentre se navighiamo verso riva, nella stessa direzione delle onde, la frequenza con cui le incontriamo diminuisce. Per fare un altro esempio: qualcuno lancia una palla ogni secondo nella nostra direzione. Assumiamo che le palle viaggino con velocità costante. Se colui che le lancia è fermo, riceveremo una palla ogni secondo. Ma, se si sta invece muovendo nella nostra direzione, ne riceveremo un numero maggiore nel medesimo lasso di tempo (ovvero, a una frequenza maggiore), perché esse dovranno percorrere meno spazio. Al contrario, se si sta allontanando ne riceveremo di meno nell'unità di tempo. Ciò che cambia è quindi la frequenza nel sistema di riferimento del rilevatore; come conseguenza, l'altezza del suono percepito cambia.

Il primo tentativo di estendere l'analisi di Doppler alle onde luminose fu fatto poco dopo da Fizeau. Ma le onde luminose non richiedono un mezzo per propagarsi, e un corretto trattamento dell'effetto Doppler per la luce richiede l'uso della relatività speciale (effetto Doppler relativistico). Nel caso di onde meccaniche, come quelle sonore, il mezzo in cui le onde si propagano individua un sistema di riferimento privilegiato. C'è perciò una differenza fisica tra il caso in cui l'osservatore è fermo e la sorgente in moto, e quello in cui la sorgente è a riposo e l'osservatore in moto. Per la luce, però, tutti i sistemi di riferimento sono fisicamente equivalenti. Nell'espressione relativistica lo spostamento Doppler deve dipendere soltanto dalla velocità relativa della sorgente e dell'osservatore.

### Vita quotidiana

Oggi è molto facile constatare l'effetto Doppler: basta ascoltare la differenza nel suono emesso dalla sirena di un mezzo di soccorso quando si avvicina e quando si allontana, oppure quella nel fischio di un treno in avvicinamento prima e in allontanamento poi. L'effetto è tanto più evidente quanto più il mezzo è veloce. L'effetto è anche più evidente quando l'oggetto o la fonte che emette il suono si trova vicino ad un osservatore. La sirena dell'ambulanza o il fischio del treno inizieranno ad essere percepiti più alti del loro tono effettivo, si abbasseranno mentre passano accanto all'osservatore, e continueranno più bassi del loro tono effettivo mentre si allontanano dall'osservatore.

## L'effetto Doppler in astronomia



Esempio di spostamento verso il rosso

L'effetto Doppler, applicato alle onde luminose, è fondamentale nella astronomia radar. Interpretandolo come dovuto ad un effettivo moto della sorgente (esistono anche interpretazioni alternative, ma meno diffuse), è stato usato per misurare la velocità con cui stelle e galassie si stanno avvicinando o allontanando da noi, per scoprire, p. es., che una stella apparentemente singola è, in realtà, una stella binaria con componenti molto vicine tra loro, e anche per misurare la velocità di rotazione di stelle e galassie.

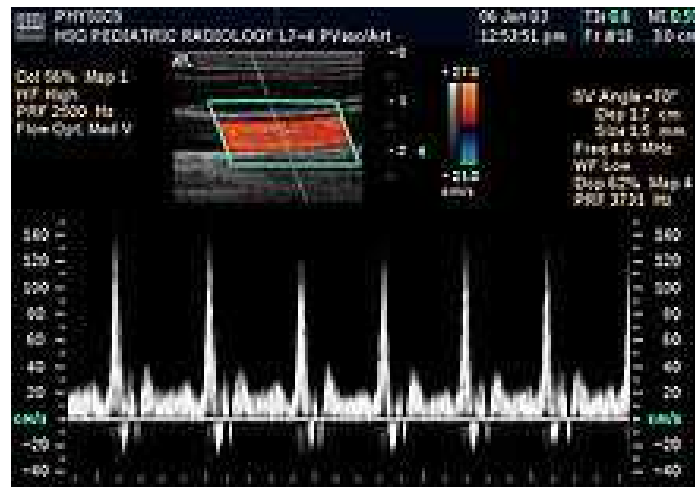
L'uso dell'effetto Doppler in astronomia si basa sul fatto che lo spettro elettromagnetico emesso dagli oggetti celesti non è continuo, ma mostra delle linee spettrali a frequenze ben definite, correlate con le energie necessarie ad eccitare gli elettroni di vari elementi chimici. L'effetto Doppler è riconoscibile quando le linee spettrali non si trovano alle frequenze ottenute in laboratorio, utilizzando una sorgente stazionaria. La differenza in frequenza può essere tradotta direttamente in velocità utilizzando apposite formule. Poiché i colori posti ai due estremi dello spettro visibile sono il blu (per lunghezze d'onda più corte) e il rosso (per lunghezze d'onda più lunghe), l'effetto Doppler è spesso chiamato in astronomia spostamento verso il rosso se diminuisce la frequenza della luce, e spostamento verso il blu se l'aumenta.

L'effetto Doppler ha condotto allo sviluppo delle teorie sulla nascita ed evoluzione dell'Universo come il Big Bang, basandosi sul sistematico spostamento verso il rosso mostrato da quasi tutte le galassie esterne. Tale effetto è stato codificato nella legge di Hubble.

### Applicazione dell'effetto Doppler al radar

L'effetto Doppler è anche usato in alcune forme di radar per misurare la velocità degli oggetti rilevati. Un fascio radar è lanciato contro un oggetto in movimento, per esempio un'automobile, nel caso dei radar in dotazione alle forze di polizia di molti Paesi del mondo. Se l'oggetto si sta allontanando dall'apparecchio radar, ogni onda di ritorno ha dovuto percorrere uno spazio maggiore della precedente per raggiungere l'oggetto e tornare indietro, quindi lo spazio tra due onde successive si allunga, e la frequenza delle onde radio cambia in modo misurabile. Usando le formule dell'effetto Doppler si può risalire alla velocità dell'oggetto. Questa tipologia di radar è molto utilizzata per le previsioni meteorologiche perché permettono di individuare con precisione distanza, velocità e direzione dei fronti nuvolosi.

### Applicazione dell'effetto Doppler in medicina



Flussimetro Eco-Doppler in esecuzione

L'effetto Doppler è anche usato in medicina per la rilevazione della velocità del flusso sanguigno. Tale principio infatti è sfruttato dai Flussimetri Eco-Doppler (ADV, ovvero Acoustic Doppler Velocimeter), nei quali una sorgente di onde sonore, generalmente ultrasuoni, viene orientata opportunamente. Queste onde acustiche vengono poi riflesse con una nuova frequenza, a seconda della velocità vettoriale delle particelle sanguigne, rilevata e rielaborata in modo da ottenere tale misura di velocità.

### Risonanza

La risonanza è una condizione fisica che si verifica quando un sistema oscillante forzato viene sottoposto a sollecitazione periodica di frequenza pari all'oscillazione propria del sistema stesso.

Nel 1665 il fisico e matematico olandese Christian Huygens, tra i primi a postulare la teoria ondulatoria della luce, osservò che, disponendo a fianco e sulla stessa parete due pendoli, questi tendevano a sintonizzare il proprio movimento oscillatorio, quasi che "volessero assumere lo stesso ritmo". Dai suoi studi deriva quel fenomeno che oggi chiamiamo "risonanza". Nel caso dei due pendoli, si dice che uno fa risuonare l'altro alla propria frequenza. Allo stesso modo e per lo stesso principio, se si percuote un diapason, che produce onde alla frequenza fissa di 440 Hz, e lo si pone vicino a un secondo diapason "silenzioso", dopo un breve intervallo quest'ultimo comincia anch'esso a vibrare.

Un fenomeno di risonanza provoca in genere un aumento significativo dell'ampiezza delle oscillazioni, che corrisponde ad un notevole accumulo di energia all'interno del sistema sollecitato.

In un fenomeno di risonanza un sistema interagisce con una forza periodica esterna, che corrisponde a una certa quantità di energia trasmessa e ad un corpo che si muove con moto armonico. Un esempio è quello del ragazzo seduto nell'altalena, dove abbiamo: l'eccitatore (ragazzo che spinge) e il sistema altalena + ragazzo seduto (risonatore). Se la spinta è di una certa entità, nel punto in cui si inverte la direzione del moto dell'altalena, questa raggiungerà un'altezza maggiore ad ogni spinta. Il valore che deve avere la spinta dipende dalle proprietà del risonatore. L'eccitatore e il risonatore si dicono in sincronismo. La risonanza può arrivare a distruggere il sistema per l'eccessivo accumulo energetico.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Spesso per condizione di risonanza si intende proprio quando la frequenza di sollecitazione è quella che genera la massima ampiezza di oscillazione del sistema.

Un corpo capace di vibrare con una determinata frequenza, se viene investito da un'onda della stessa frequenza inizia a vibrare, ma tutti gli altri, di frequenza diversa, no.

La frequenza di risonanza della molecola d'acqua è intorno ai 2.4 Gigahertz, ed è il principio su cui si basa il forno a microonde (v.).

Esempi del fenomeno di risonanza

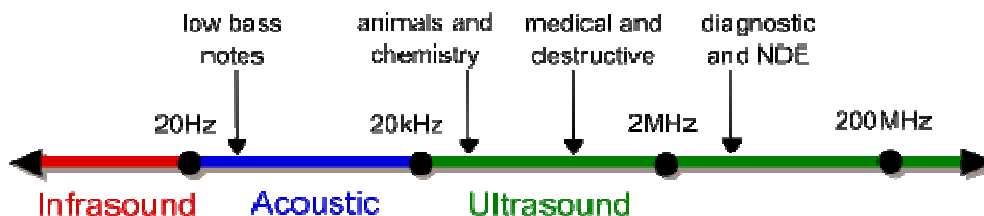
- Risonanza armonica: si manifesta nel moto armonico forzato senza e con smorzamento, in sistemi reali come molla o pendolo matematico a piccole oscillazioni, entrambi sotto l'azione di forze cicliche.
- Risonanza parametrica: si manifesta nel moto parametrico, in sistemi reali come l'altalena e altri
- Risonanza acustica: si manifesta nei sistemi acustici
- Risonanza di Helmholtz: fenomeno di risonanza acustica dell'aria in una cavità
- Risonanza elettrica: si manifesta nei circuiti elettrici
- Risonanza Schumann: riguarda il pianeta Terra

### Velocità del suono

La seguente tabella dà qualche esempio della velocità del suono per alcuni materiali

Materiale	Velocità del suono [m/s]		Materiale	Velocità del suono [m/s]
Aria	343		PVC (morbido)	80
Acqua	1 484		PVC (duro)	1 700
Ghiaccio	3 200		Calcestruzzo	3 100
Vetro	5 300		Faggio	3 300
Acciaio	5 200		Granito	6 200
Piombo	1 200		Peridotite	7 700
Titanio	4 950		Sabbia (asciutta)	10-300

### Ultrasuoni



Frequenze approssimate corrispondenti agli ultrasuoni a seconda del loro campo di applicazione.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Gli ultrasuoni sono delle onde meccaniche sonore. A differenza dei fenomeni acustici propriamente detti, le frequenze che caratterizzano gli ultrasuoni sono superiori a quelle mediamente udibili da un orecchio umano. La frequenza convenzionalmente utilizzata per discriminare onde soniche da onde ultrasoniche è fissata in 20 kHz. Lo stesso termine ultrasuono chiaramente indica ciò che è al di là (ultra) del suono, identificando con suono solo il fenomeno fisico udibile.

Come ogni altro tipo di fenomeno ondulatorio gli ultrasuoni sono soggetti a fenomeni di riflessione, rifrazione e diffrazione e possono essere definiti mediante parametri quali la frequenza, la lunghezza d'onda, la velocità di propagazione, l'intensità (misurata in decibel).

Nonostante, come detto, l'essere umano non sia in grado di udire gli ultrasuoni, altri animali hanno tale capacità.

Ad esempio: i cani (per i quali sono in commercio appositi fischietti di richiamo agli ultrasuoni); i delfini e le balene che li usano per comunicare tra loro; i pipistrelli che li usano per vedere gli ostacoli mentre volano di notte.



Un pipistrello mentre effettua una cattura nella notte, grazie al suo sistema sensoriale ad ultrasuoni.

### Onde Anomale

In oceanografia le onde anomale sono un fenomeno marino di cui non si conoscono ancora né le cause né l'origine. Come definizione un'onda è considerata anomala se supera 2,2 volte l'altezza significativa del treno d'onde a cui appartiene. Sono state osservate onde anomale alte da 25 a 30 metri e che sembrano formarsi in modo imprevedibile. La differenza principale tra le onde anomale propriamente dette e gli tsunami sta nel fatto che le onde anomale si producono anche in pieno oceano, mentre gli tsunami si amplificano solo avvicinandosi verso le coste; sta di fatto che è invalso un abuso di linguaggio che identifica le onde di maremoto come “onde anomale”, ma tale definizione non è del tutto corretta.

Tali onde possono essere estremamente pericolose poiché sono in grado di affondare navi anche di grande stazza. Mancando prove scientifiche della loro esistenza, fino a poco tempo fa questo fenomeno era ritenuto da molti esperti una pura invenzione dei marinai.

I pochi sopravvissuti hanno sempre riportato racconti ritenuti non realistici, anche perché secondo i modelli statistici la probabilità di formarsi un'onda di tali altezze era di una ogni 10.000 anni. È stato calcolato che negli ultimi vent'anni sono scomparse in mare più di 200 grosse navi e alcuni pensano che nella maggior parte dei casi la causa vada ricercata nelle onde anomale e non nel maltempo (causa indicata nella maggior parte dei rapporti). Il gran numero di grosse navi scomparse è dovuto anche al fatto che sono tutte progettate per resistere senza problemi a onde alte fino a un massimo di 15 metri.

Nella storia di tutti i marinai vi è il ricordo di onde mostruose che si formano all'improvviso, indipendentemente dal tempo, che possono spezzare in due anche una petroliera come fosse un fucello. A volte si formano senza alcuna causa, altre volte sembrano collegate ad eventi eccezionali come uragani o tempeste. Recentemente uno strumento ha registrato il record per un'onda-mostro, di ben 32,3 metri d'altezza, al largo di Taiwan. Il record precedente, anche se non registrato da strumenti, venne segnalato nel febbraio del 1995 quando la nave da crociera Queen Elizabeth II, investita da un uragano nel Nord Atlantico, si imbatté in un'onda anomala di 29 metri di altezza. Il precedente record assoluto mai rilevato da uno strumento, invece, era stato segnalato nel 2004 con 27,9 metri durante l'uragano Ivan, nel Golfo del Messico. Mentre i calcoli indicano che onde ancora più alte sono possibili, anzi probabili, è evidentemente difficile che uno strumento di rilevamento si trovi esattamente dove e quando questo avviene. Nel caso dell'onda record invece, lo strumento, una boa oceanografica, si trovava al posto e al momento giusti.

Il record mondiale assoluto è stato stabilito dalle onde misurate durante un tifone nella zona fra la Cina e le Filippine. Il 6 ottobre 2007 il tifone Krosa, di categoria 4, ha centrato in pieno l'isola di Taiwan quando una boa nell'area nord-orientale dell'isola si è trovata nella zona peggiore. Nell'arco di 10 minuti, intorno alle ore 13, la boa ha misurato diverse onde superiori a 25 m. E si è raggiunta la massima altezza di una singola onda mai misurata, con 32,3 metri.

Teoricamente potrebbero raggiungere un'altezza di 65 m.

Per poter studiare il fenomeno e documentare queste formazioni ondose è stato creato il progetto MaxWave, un consorzio formato da 11 organizzazioni presenti in 6 paesi dell'Unione Europea. Grazie all'utilizzo dei satelliti Ers-1 ed Ers-2, che hanno una risoluzione di 10 metri e sfruttano potenti radar in grado di prelevare immagini della superficie marina in ogni condizione atmosferica, si è potuto finalmente fotografare il fenomeno dallo spazio. Sono state inizialmente analizzate ed elaborate oltre 30.000 immagini risalenti al 2001, periodo in cui sono avvenuti due avvistamenti: tra febbraio e marzo del 2001 due grosse navi da crociera (la Bremen e la Caledonian Star) erano state investite e gravemente danneggiate da due onde anomale. Malgrado il periodo preso in esame fosse di durata così breve, sono state individuate una decina di onde anomale alte più di 25 metri, fino a un massimo di 30 metri e lunghe parecchi chilometri. Questi rilevamenti hanno permesso l'avvio di vari progetti volti a studiare il fenomeno e a poterlo prevedere. Un ulteriore caso documentato si è verificato il 3 marzo 2010 nel Golfo del Leone, dove un'onda di 8 metri ha danneggiato la nave da crociera cipriota Louis Majestic causando due vittime e il ferimento di diversi passeggeri.

Il fenomeno delle onde anomale è ancora argomento di ricerca, ed è troppo presto per poter stabilire quali siano le cause principali o come cambino da luogo a luogo. Le zone maggiormente a rischio sembrano essere quelle dove una forte corrente marina si muove in senso contrario alla direzione principale del moto delle onde: la zona vicino a Capo Agulhas nell'estremità meridionale dell'Africa è una di queste. Le tesi proposte non spiegano l'esistenza di tutte le onde anomale osservate, quindi molti altri meccanismi di formazione sono possibili con locali varianti.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

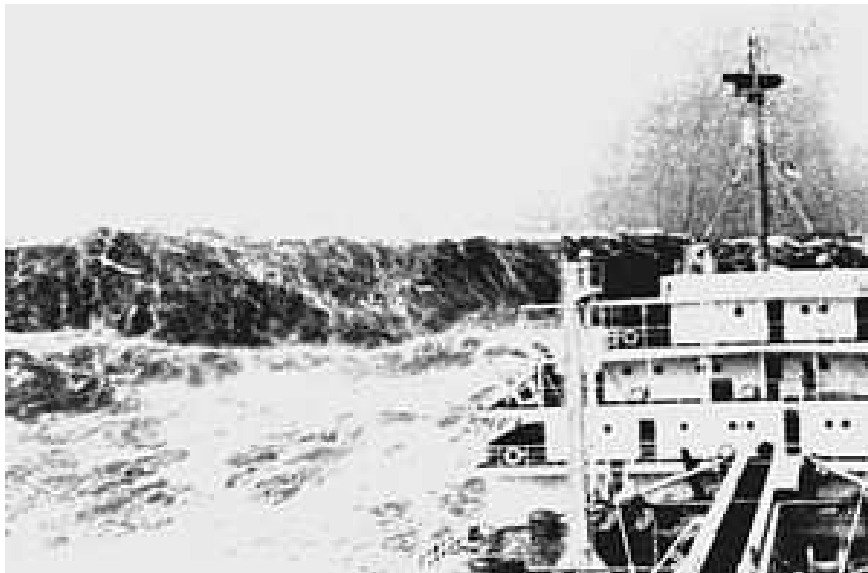
Alcuni meccanismi proposti per la formazione di onde anomale sono:

- messa a fuoco per diffrazione (diffractive focusing);
- messa a fuoco a causa di correnti;
- effetti non lineari (simile ai solitoni);
- condizioni di crossed-sea, ovvero l'incontro casuale tra due treni di onde (quindi una sovrapposizione non lineare tra due treni d'onda diversi, frequentemente tra onde swell provenienti da un'altra zona di tempesta che interagiscono con il campo d'onde locali generate dal vento.)

Secondo alcune ricerche è possibile che si generi naturalmente un'onda anomala da un fondo casuale di onde più piccole. In questo caso, è ipotizzato, un insolito e instabile tipo di onda si può formare assorbendo energia dalle altre onde, sviluppando spontaneamente un "mostro" quasi verticale prima di diventare instabile e crollare in breve tempo.

Sembrano esistere tre categorie di onde anomale:

- "Muri d'acqua" che viaggiano per al massimo 10 km nell'oceano;
- "Tre Sorelle", gruppi di tre onde (colpirono la "Caledonian Star" il 2 marzo 2001);
- Singola onda di tempesta gigante, (colpì la "MS Bremen" il 22 febbraio 2001).



Onda anomala nel Golfo di Biscaglia



Il ponte della superpetroliera “Esso Languedoc” spazzato da una gigantesca onda anomala

### **L'incidente della Michelangelo**

Era la mattina del 12 Aprile 1966, la Michelangelo stava procedendo verso New York con 745 passeggeri a bordo.

Quel giorno si sviluppò una tempesta di enorme potenza, molte navi si trovarono in difficoltà, 5 marinai furono spazzati via dal ponte di coperta della nave da carico inglese Chuscal.

Erano circa le 10 del mattino quando un'onda anomala si presentò di fronte alla nave proprio nel momento più sfavorevole per essere affrontata.

Il comandante Giuseppe Soletti, alla sua ultima traversata, deviò verso sud dalla rotta standard, per evitare il centro della tempesta. Venne consigliato ai passeggeri di stare in cabina, per evitare di essere sbattuti per i corridoi. A bordo c'era anche lo scrittore tedesco Gunther Grass con la moglie, e l'ammiraglio Giurati, il presidente dell'Italia Navigazione.

Claudio Suttora, il Primo Ufficiale, racconta: “Le onde diventavano sempre più alte e violente, e proprio alla fine di un grande beccheggio ci siamo trovati davanti quell'onda enorme. La Michelangelo, che fino a quel momento era stata in grado di risalire le onde, infilò dritta la prua in quell'enorme, spaventoso e insuperabile muro d'acqua.. nessuno di noi si rese conto di cosa stesse per succedere, quell'onda ci si è formata davanti quasi all'improvviso..., per fortuna l'urto non fu così forte da danneggiare anche il timone, così riuscimmo presto a rimettere la nave contro le onde”.

Claudio Cosulich, all'epoca vice comandante della Michelangelo, racconta: “Quando arrivò l'onda, non ero sul ponte di comando, un'onda precedente aveva scoperchiato una presa d'aria sul ponte di prua ed ero andato con quattro volontari a riparare il danno, per evitare che l'acqua entrasse. Avevamo appena finito e stavamo scendendo una scaletta sotto il ponte... cademmo tutti rovinosamente... fu come incassare in pieno una cannonata da 305 mm.”

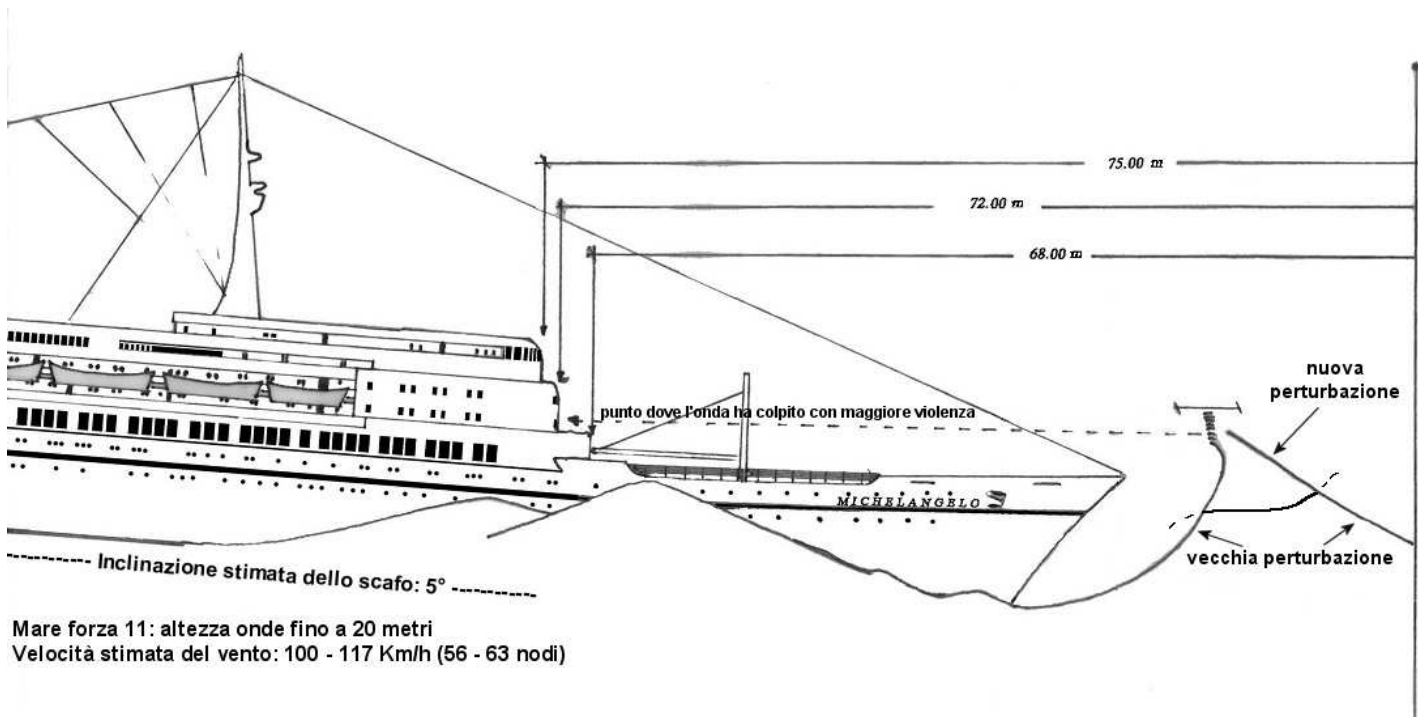
## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

L'onda scavalcò la prua alta circa 18 metri e sfondò le lamiere dalla parte frontale della nave, distanti più di 70 metri dalla cima della prua, e molti oblò spessi quasi 2 centimetri fin sul ponte di comando, a 25 metri dalla linea di galleggiamento.

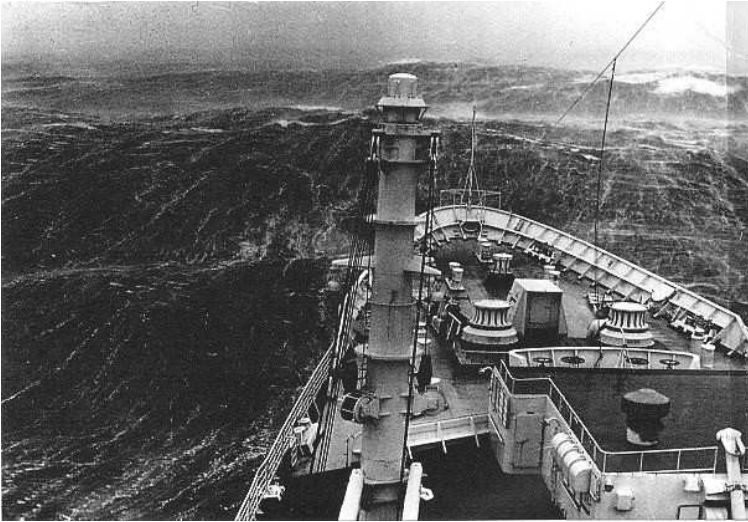
Due passeggeri, che avevano la cabina nella parte colpita dall'onda, morirono quasi subito, un membro dell'equipaggio morì poco dopo. I feriti furono più di 50, 10 dei quali gravi. Lo stesso Cosulich, che in seguito divenne l'ultimo comandante della Michelangelo, riportò una serie di fratture al braccio sinistro.

Poco dopo l'incidente la Michelangelo venne raggiunta da una nave militare americana che fornì assistenza medica supplementare, mentre i medici della Michelangelo lavorarono ininterrottamente fino all'arrivo a New York.

A New York la Michelangelo si fermò 3 giorni per le riparazioni temporanee, consistenti nella copertura della parte colpita, mentre al ritorno in Italia venne adeguatamente riparata e rinforzata, sostituendo le lamiere della parte frontale, fatte in lega di alluminio, con lamiere di acciaio in modo da renderla più resistente in futuro. Lo stesso lavoro venne eseguito sulla Raffaello. Per diminuire il peso delle navi e ridurre il consumo di carburante, l'alluminio era infatti utilizzato per le sovrastrutture di molte navi moderne negli anni '60, così dopo l'incidente della Michelangelo anche altre navi come il France e lo United States ebbero la parte frontale rinforzata in acciaio.



Ricostruzione grafica dell'incidente della Michelangelo



Un'onda come quella che ha colpito la "Michelangelo"



I danni causati dall'onda

**VERO O FALSO**

1. La velocità del suono è maggiore nel vuoto che non nei mezzi materiali.
2. Il diagramma orario di un'onda è una sinusoidale.
3. Il fenomeno dell'interferenza può essere considerato come una prova del carattere ondulatorio dei suoni.
4. Gli ultrasuoni sono prodotti da vibrazioni aventi frequenza superiore al massimo di udibilità.
5. L'effetto Doppler consiste in una variazione apparente della frequenza di un suono provocata dal moto della sorgente o dell'osservatore.
6. Due suoni che interferendo si elidono hanno la stessa frequenza, la stessa ampiezza e fase opposta.
7. Le onde sonore nei gas hanno carattere trasversale.
8. Un'onda dicesi longitudinale se le vibrazioni di una particella del mezzo in cui essa si propaga avvengono lungo la direzione di propagazione dell'onda; trasversale se tali vibrazioni avvengono in direzione perpendicolare a quella di propagazione.
9. Le particelle di un mezzo investito da un'onda sonora vibrano attorno a una posizione di equilibrio senza essere trasportate dall'onda stessa.
10. L'angolo di rifrazione è eguale all'angolo di incidenza.
11. La luce gialla si distingue da quella rossa per il diverso valore delle rispettive lunghezze d'onda.
12. La luce non può trasmettersi in uno spazio assolutamente vuoto.
13. La velocità della luce nell'acqua è maggiore che non nell'aria.
14. Luce visibile, infrarossa, ultravioletta, radioonde, raggi X e gamma sono tutte vibrazioni di natura elettromagnetica.
15. La luce in un mezzo disomogeneo si propaga sempre in linea retta.
16. La velocità della luce in un mezzo è in relazione con l'indice di rifrazione di questo.
17. Le onde sonore e quelle luminose sono della stessa natura: esse differiscono per frequenza di vibrazione.
18. Quando la luce bianca attraversa un prisma di vetro essa viene scomposta colori (spettro). Ciò è dovuto al fatto che la luce bianca è costituita dalla luce di tante radiazioni monocromatiche aventi indici di rifrazione diversi.

## 6. TERMOLOGIA E TERMODINAMICA

### 6.1. Temperatura

La temperatura è la proprietà fisica che indica lo stato termico di un sistema. La differenza di temperatura tra due sistemi, che sono in contatto termico, determina un flusso di calore in direzione del sistema più freddo, raggiungendo l'equilibrio termico.

Quando due sistemi si trovano in equilibrio termico non avviene nessun trasferimento di energia e si dice che sono alla stessa temperatura. Quando esiste una differenza di temperatura il calore tende a muoversi dal sistema che viene detto a temperatura più alta verso il sistema che diremo a temperatura più bassa, fino al raggiungimento dell'equilibrio termico.

Il trasferimento di calore può avvenire per **conduzione**, **convezione** (dal latino cum “con” e veho “trasporto”) o **irraggiamento**.

Le proprietà formali della temperatura vengono studiate dalla termodinamica. La temperatura svolge un ruolo importante in quasi tutti i campi della scienza, in particolare in fisica, chimica, biologia.

La temperatura non è una misura della quantità di energia termica o calore di un sistema, però è ad essa correlata. Se ad un sistema viene fornito calore la sua temperatura aumenta, mentre se gli viene sottratto calore la sua temperatura diminuisce; in altre parole un aumento di temperatura del sistema corrisponde a un assorbimento di calore da parte del sistema, mentre un abbassamento di temperatura del sistema corrisponde a una cessione di calore da parte del sistema.

Su scala microscopica, nei casi più semplici, la temperatura di un sistema è legata in modo diretto al movimento casuale dei suoi atomi e delle sue molecole, cioè un incremento di temperatura corrisponde a un incremento del movimento degli atomi. Per questo, la temperatura viene anche definita come l'indice dello stato di agitazione molecolare del sistema (così come l'entropia viene definita come lo stato di disordine molecolare, v. più avanti).

### Cenni storici

Il concetto di temperatura nasce come tentativo di quantificare le nozioni comuni di "caldo" e "freddo".

In seguito la comprensione via via maggiore dei fenomeni termici estende il concetto di temperatura e mette in luce il fatto che le percezioni termiche al tatto sono il risultato di una complessa serie di fattori (calore specifico, conducibilità termica, eccetera) che include la temperatura. Purtroppo la corrispondenza tra le impressioni sensoriali e la temperatura è approssimativa, infatti in genere al tatto il materiale a temperatura più alta appare più caldo, però ci sono numerose eccezioni. Un pezzo d'argento, per esempio, appare più freddo di un pezzo di plastica avente la stessa temperatura. I primi tentativi di dare un numero alla sensazione di caldo o di freddo risalgono ai tempi di Galileo e dell'Accademia del Cimento. Il primo termometro ad alcool di tipo moderno viene attribuito tradizionalmente all'inventiva del granduca di Toscana Ferdinando II de' Medici. Ma si va affermando la convinzione che il termometro a liquido in capillare chiuso sia stato inventato da altri, molto prima. Il termometro a mercurio viene attribuito a Gabriel Fahrenheit, che nel 1714 introdusse una scala di temperature in uso ancora oggi; un'altra, detta all'epoca della definizione “scala centigrada”, si deve a Anders Celsius nel 1742.

La relativa precocità delle misure di temperatura non implica che il concetto di temperatura fosse ben chiaro a quei tempi. La distinzione chiara fra calore e temperatura è stata posta solo dopo la metà del 1700, da Joseph Black. In ogni caso, il termometro consente di definire il concetto di equilibrio termico.

### Differenza fra temperatura e calore

La temperatura è la oggettivazione della sensazione soggettiva di caldo e di freddo. Si definisce una "scala" delle temperature, fissando uno stato termico come stato di riferimento, ed attribuendo convenzionalmente a tale stato una data temperatura.

Nella scala Kelvin si è scelto come stato di riferimento la coesistenza, in equilibrio fra loro, di ghiaccio, acqua e vapore e gli è stata attribuita la temperatura di 273,16 K, che corrisponde, come vedremo ai nostri Zero Gradi.

Il calore è energia che passa da un corpo ad un altro avente temperatura minore del primo. Come si vede sono grandezze molto diverse e non vanno confuse. Il calore è una quantità di energia mentre la temperatura è l' "altezza" di questa energia.

Per analogia paragoniamo il calore alla quantità di acqua contenuta in un serbatoio e la temperatura all'altezza di detto serbatoio rispetto al suolo. Mettendo in comunicazione due serbatoi, l'acqua passerà dal serbatoio posto più in alto a quello più in basso fino a quando non si raggiunge lo stesso livello in entrambi i serbatoi (principio dei vasi comunicanti), mentre non si avrà nessun passaggio di liquido se sono alla stessa altezza. In modo analogo avviene con il calore: tra due corpi si ha uno scambio di calore solo se sono a temperatura diversa l'uno dall'altro.

Fino al 1842 (in cui fu formulato il 1° principio della termodinamica) energia e calore sono stati sviluppati in modo indipendente e il calore erroneamente associato al concetto di temperatura (cioè, semplificando brutalmente, alla misura di quanto è caldo o freddo un corpo). In analogia con i sistemi idraulici, in passato si ipotizzò l'esistenza del "calorico", un fluido imponderabile e indistruttibile capace di passare da un corpo all'altro. Il calorico poteva essere introdotto in un corpo o estratto da esso, ma non tutti i fenomeni osservati riuscivano ad essere spiegati in modo soddisfacente.

Il calore è invece una forma di energia (è energia termica) trasformabile in altre forme di energia. La temperatura e le proprietà termiche dei corpi vengono spiegate facendo riferimento al comportamento degli atomi o delle molecole che li formano (visione dal punto di vista microscopico). Salvo casi particolari, il calore è energia che passa da un corpo a un altro in conseguenza di una differenza di temperatura. Ma nel linguaggio quotidiano sono però rimaste locuzioni legate alla superata teoria del calorico. Spesso si dice "calore scambiato", ma si dovrebbe dire in modo fisicamente più corretto "energia scambiata sotto forma di calore".

Il calore è dunque, per così dire, una forma di "energia in transito" che può essere definita solo mentre si trasmette. Per focalizzare meglio questo concetto importante si può ricorrere a un'analogia, quella della pioggia: la pioggia si può definire come tale solo mentre cade; finché è in cielo, è condensa in sospensione e dopo che è caduta, diventa pozzanghere o corsi d'acqua. Così, una volta trasferito, il calore o energia termica diventa parte dell'energia totale delle molecole che compongono il corpo o il sistema di corpi considerato, cioè entra a far parte dell'energia interna.

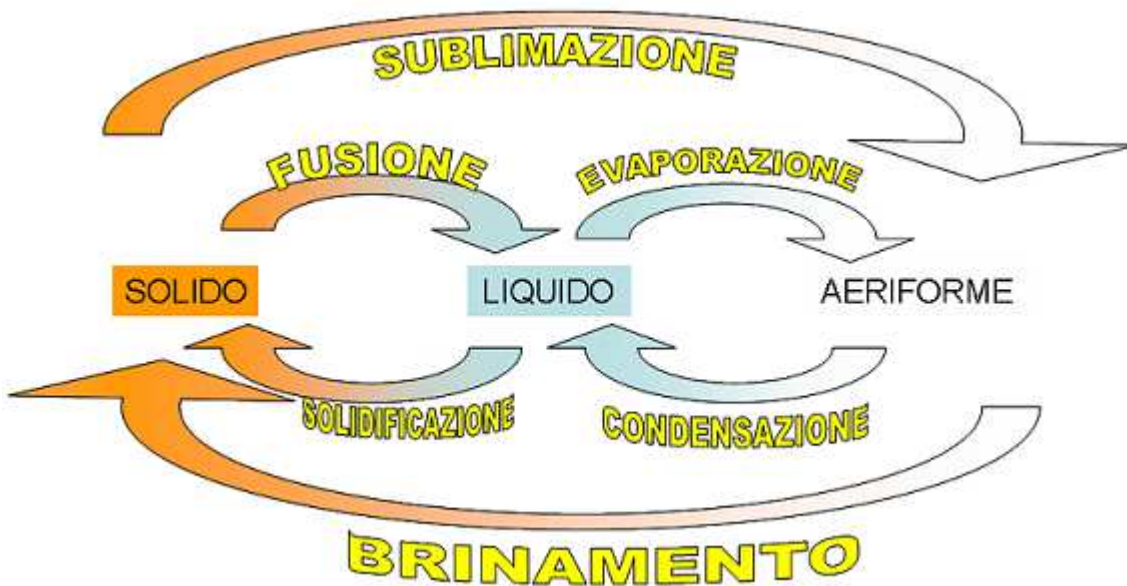
L'energia interna di un corpo è data dalla somma di tutte le energie possedute dalle sue molecole. E non tutte le energie che hanno le molecole contribuiscono direttamente a determinare la temperatura del corpo. A livello microscopico la temperatura è infatti legata al movimento traslatorio casuale delle molecole del corpo (energia cinetica di traslazione). E attenzione! Un corpo o un sistema di corpi con temperatura più alta di un altro corpo o sistema di corpi non implica automaticamente che abbia un'energia interna maggiore. L'energia interna di un sistema dipende anche dalla sua massa, ossia dal numero di molecole che lo forma.

Come energia in transito il calore può essere misurato facendo riferimento alle quantità di energia perdute o acquistate dai corpi (calorimetria) ed è possibile utilizzare le stesse unità di misura (Joule) impiegate per qualsiasi altra forma di energia, come per es. quella meccanica.

Storicamente c'è un'altra unità di misura del calore non del S.I., la kilocaloria. La kilocaloria è definita come la quantità di calore che si deve fornire a una massa di 1 kg di acqua alla pressione di 1 atmosfera per elevarne la temperatura di 1 °C da 14,5 °C a 15,5 °C. Simbolo: kcal. Se anziché 1 kg di acqua si considera 1 g di acqua, allora si ha la caloria, pari a 1/1000 di kilocaloria. Simbolo: cal.

Molti scienziati studiarono il rapporto tra calore ed energia. Nel 1849 James P. Joule determinò l'equivalente meccanico del calore con il famoso esperimento del mulinello (v.). L'acqua aumenta di temperatura come se si fosse introdotto in modo fittizio del calore; è invece introdotta energia meccanica, misurabile in termini di aumento di temperatura (per es. di 1 °C di 1 kg d'acqua). Per mezzo di tale esperimento Joule determinò un valore dell'equivalente meccanico del calore pari a 4186 J/kcal, valore di straordinaria precisione per quei tempi. Quindi: 1 kcal = 4186 J o anche 1 cal = 4,186 J.

### CAMBIAMENTO DI STATO



Quando il calore fornito a una sostanza provoca unicamente un passaggio di fase, la temperatura resta costante durante tutto il cambiamento. Durante un cambiamento di fase l'energia termica fornita viene spesa per compiere il lavoro necessario per rompere i legami intermolecolari e per separare tra loro le molecole, anziché per provocare un aumento di temperatura.

La quantità di calore  $\lambda$  per unità di massa  $m$  che viene fornita o sottratta a una sostanza che subisce un cambiamento di fase viene detta calore latente. Ne segue che il calore che si deve fornire o sottrarre per far cambiare di fase una massa  $m$  di sostanza è  $Q = m\lambda$ .

A seconda del cambiamento di fase si hanno diversi calori latenti e precisamente:

- $\lambda_f$  : calore latente di fusione (solido  $\rightleftharpoons$  liquido)
- $\lambda_v$  : calore latente di vaporizzazione (liquido  $\rightleftharpoons$  aeriforme)

### Misurazione della temperatura

Sono stati sviluppati molti metodi per la misurazione della temperatura. La maggior parte di questi si basano sulla misurazione di una delle proprietà fisiche di un dato materiale, che varia in funzione della temperatura.

Uno degli strumenti di misura più comunemente utilizzati per la misurazione della temperatura è il termometro a liquido. Esso consiste di un tubicino capillare di vetro riempito con mercurio o altro liquido. L'incremento di temperatura fa espandere il liquido e la temperatura viene determinata misurando il volume del fluido all'equilibrio. Questi termometri possono essere calibrati in modo che sia possibile leggere le temperature su una scala graduata, osservando il livello del fluido nel termometro.

Un altro tipo di termometro è il termometro a gas.

Altri strumenti importanti per la misurazione della temperatura sono:

- Termocoppia
- Termistore
- Resistance Temperature Detector (RTD)
- Pirometro

### Unità di misura della temperatura

L'unità di misura base della temperatura nel Sistema Internazionale è il **kelvin** (simbolo: **°K**). Un kelvin (1 °K) viene formalmente definito come la frazione 1/273,16 della temperatura del punto triplo dell'acqua (il punto in cui acqua, ghiaccio e vapore acqueo coesistono in equilibrio).

### Scala Celsius

In Europa nelle applicazioni di tutti i giorni è comunemente usata e tollerata la scala **Celsius** (“scala centigrada”) nella quale si assume il valore di 0 °C corrispondente al punto di fusione del ghiaccio e il valore di 100 °C corrispondente al punto di ebollizione dell'acqua a livello del mare.

Il simbolo °C si legge «grado Celsius» perché la dizione «grado centigrado» non è più accettata dal SI.

In questa scala una differenza di temperatura di un grado Celsius (1 °C) è pari a un kelvin (1 °K), quindi questa scala è la stessa della scala kelvin, ma con uno scostamento alla temperatura del punto triplo dell'acqua: (273,15 °K).

La seguente equazione converte la temperatura espressa in gradi Celsius in quella espressa in kelvin:

$$T(^{\circ}\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$$

### Scala Fahrenheit

Un'altra scala, usata spesso nei paesi anglosassoni, è la scala Fahrenheit. Su questa scala il punto di congelamento dell'acqua corrisponde a 32 °F e quello di ebollizione a 212 °F.

Le seguenti equazioni convertono i gradi Fahrenheit in gradi Celsius e viceversa:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 5/9 \times [T(^{\circ}\text{F}) - 32]$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = 9/5 \times T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

### Scala Réaumur

La scala Réaumur ha ormai solo un interesse storico, essendo stata abbandonata da tutti. Essa fu proposta da René Antoine Ferchault de Réaumur, nel 1731 basandosi sulla dilatazione dell'alcool. I suoi due punti termodinamici sono quello di fusione del ghiaccio fissato a 0 gradi Réaumur, e quello di ebollizione dell'acqua fissato ad 80 gradi Réaumur. I punti di riferimento fissati sono dunque gli stessi della scala Celsius, ma l'intervallo è suddiviso in 80 parti (anziché 100).

## Alcune temperature notevoli

Descrizione	Kelvin	Celsius	Fahrenheit	Réaumur
Zero assoluto	0	-273,15	-459,67	-218,52
Temperatura più fredda registrata sulla superficie terrestre. (Base Vostok, Antartide - 21 luglio 1983)	184	-89,2	-128,2	-71,2
Temperatura di congelamento dell'acqua a pressione standard.	273,15	0	32	0
Temperatura media della superficie terrestre	288	15	59	12
Temperatura media di un corpo umano.	310,0	36,8	98,2	29,6
Temperatura più calda mai registrata sulla superficie terrestre. (Death Valley, USA - 18 luglio 1960, 17 luglio 1998, 19 luglio 2005 e 6 luglio 2007)	331	53,9	129,0	46,4
Temperatura di ebollizione dell'acqua a pressione standard.	373,15	100	212	80
Temperatura di fusione del titanio.	1941	1668	3034	1334
Temperatura della fotosfera del Sole.	5800	5526	9980	4421

## Capacità termica

La temperatura è legata alla quantità di energia termica posseduta dal sistema. Tranne che nei passaggi di stato, quando a un sistema viene fornito calore la sua temperatura aumenta proporzionalmente a quella quantità di calore. La costante di proporzionalità viene detta capacità termica e corrisponde alla “capacità” del materiale di immagazzinare calore.

## Il ruolo della temperatura in natura

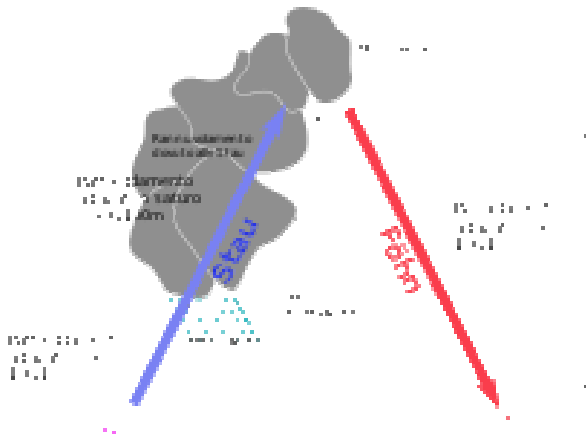
Molte proprietà dei materiali, tra cui gli stati (solido, liquido, gassoso o plasma), la densità, la solubilità, la pressione di vapore, e la conducibilità elettrica dipendono dalla temperatura. La temperatura gioca anche un ruolo importante nel determinare la velocità con cui avvengono le reazioni chimiche. Questa è una delle ragioni per cui il corpo umano ha vari e complessi meccanismi per mantenere la temperatura attorno ai 37 °C, dal momento che pochi gradi in più o in meno possono provocare reazioni dannose, con conseguenze anche fatali.

La temperatura controlla anche il tipo e la quantità di radiazione termica emessa da una superficie. Un'applicazione di questo effetto è la lampada a incandescenza, dove un filamento di tungsteno è scaldato elettricamente, fino a raggiungere una temperatura alla quale sono emesse quantità significative di radiazione visibile.

Per un ulteriore esempio, vediamo come la temperatura influenza la velocità del suono:

T in °C	v in m/s
-10	325,4
0	331,5
10	337,5
15	340,5
20	343,4
30	349,2

### Föhn



Rappresentazione schematica della formazione del Föhn.



Tipiche nubi dovute all'effetto del Favonio in Svizzera

Il Föhn, o Favonio, è un vento caldo e secco che può presentarsi, in differenti configurazioni bariche, su entrambi i lati della catena alpina.

Si presenta quando una corrente d'aria, nel superare una catena montuosa, perde parte della propria umidità in precipitazioni (pioggia, neve o altro). Quando la corrente sale verso l'alto, infatti, l'aria si espande, si raffredda, dopodiché possono verificarsi due possibilità: se l'umidità in essa contenuta non viene persa (rimanendo sotto forma di semplice nuvola), l'aria, nel ricadere sul versante opposto si comprime e si riscalda tornando alle condizioni di partenza; ma se la condensazione del vapore acqueo sfocia in precipitazioni, non si ritorna alle condizioni dalle quali si è partiti e l'aria arriva a valle con una temperatura più alta di quella di partenza.

A causa del calore latente emesso dalla condensazione dell'acqua, infatti, l'aria si raffredda piuttosto lentamente lungo la salita (secondo il gradiente adiabatico saturo, cioè di  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ogni 1000 m in ascesa). L'aria poi supera la cresta, scende verso il basso sul versante opposto sottovento e si scalda per effetto della compressione adiabatica (secondo il gradiente adiabatico secco, questa volta di circa  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ogni 1000 m in discesa), diventando calda e secca e causando giornate soleggiate.

Il Favonio può causare un aumento delle temperature anche di  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  in poche ore. Per questo motivo è detto anche "mangianeve", perché fa fondere rapidamente la neve a causa dell'effetto congiunto dell'innalzamento termico e della bassa umidità.

I nomi Favonio e Föhn derivano dal latino Favonius (da favere, "far crescere"), nome con il quale i Romani chiamavano il vento di ponente (il greco Zefiro).

Il nome è conservato nella regione delle Alpi, degli Appennini e degli altri rilievi maggiori della penisola italiana e della Svizzera italiana con il significato attuale, ma lo stesso fenomeno è presente in varie regioni del mondo dove ha assunto nomi diversi: in Argentina è noto come Zonda, Chinook nelle Montagne Rocciose, vento del diavolo nell'area della baia di San Francisco, venti di Santa Ana nella California del Sud, Sharav o Hamsin in Israele, Hamsin in Arabia, Nor'wester a Christchurch, Nuova Zelanda e nelle pianure di Canterbury e ha'fny nei Carpazi, Mistral in Francia meridionale e nella Valle del Rodano (anche se quest'ultimo si riferisce soprattutto al nome francese del Maestrale, le Mistral).

Il termine Föhn è presente nel lessico italiano anche quale sinonimo di asciugacapelli. In questo caso è più frequentemente scritto phon e fon.

### Frigorifero

Il frigorifero (dal latino frigus, "freddo" e fero, "io porto"), anche detto frigidaire o abbreviato frigo (in alcune zone del nord Italia viene usata anche l'inflessione dialettale frigor), è un elettrodomestico che serve alla preservazione del cibo attraverso bassa temperatura: in questo modo si rallenta la cinetica delle molecole e quindi la decomposizione e la crescita dei batteri. È un apparecchio relativamente nuovo in cucina: sostituisce la vecchia ghiacciaia.

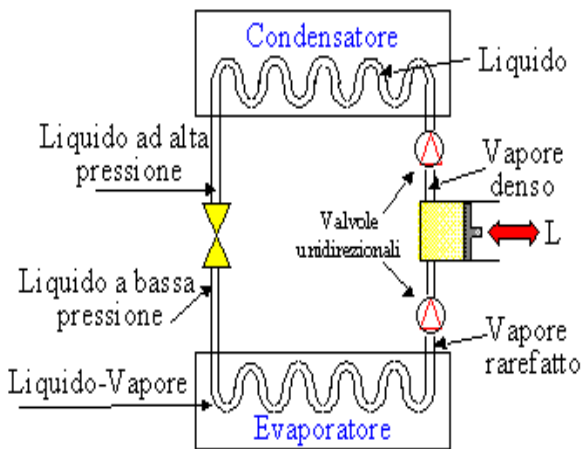
Durante il XIX secolo vi sono state importanti rivoluzioni nel campo dell'alimentazione. In particolare, fu molto importante "la conquista del freddo", ossia l'invenzione della macchina frigorifera, avvenuta e brevettata nel 1851 dall'americano John Gorrie e poi nel 1915 da Albert Einstein, successivamente perfezionata dal tedesco Windhausen, dall'inglese Reece e dal francese Tellier. A differenza del primo, questi ultimi recuperavano il gas evaporato, che il primo perdeva completamente.

A quest'ultimo si deve anche la realizzazione del primo impianto frigorifero su un piroscafo, le frigorifique, che nel 1876 trasportò in Francia un carico di carne precedentemente macellata in Argentina, dopo un viaggio di 105 giorni. La tecnica venne poi applicata ai vagoni ferroviari, come nel caso del treno intercontinentale che partiva dalla California. Sul piano alimentare tutto questo significò il superamento delle tecniche tradizionali di conservazione (per salagione, per essiccazione, ecc.) la cui comune caratteristica era quella di alterare le qualità nutrizionali e organolettiche degli alimenti. Con la conquista del freddo invece i prodotti si riuscivano a trasportare e conservare per lunghi periodi mantenendo caratteristiche simili a quelle originali.

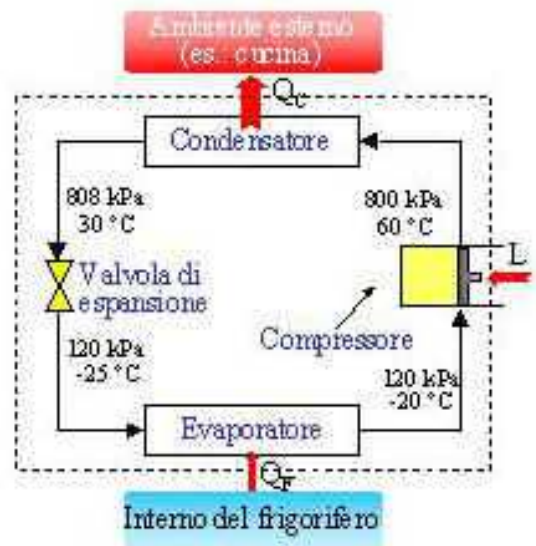
Il primo frigo domestico venne messo in vendita nel 1913. Dal 1931 l'ammoniaca fino allora usata venne sostituita col freon, fino al 1990 quando esso venne proibito per l'uso frigorifero.

Il principio di funzionamento di un frigorifero si basa sul fenomeno dell'espansione Joule-Thomson di un fluido: il fluido, nell'attraversare una strozzatura, si raffredda. Il dispositivo delegato a questo scopo è la cosiddetta valvola di espansione (v. figura).

- Il fluido operatore, detto anche refrigerante, entra nella valvola di espansione ad una pressione che, per esempio può essere di 8 atm, realizzata grazie ad un compressore elettromeccanico, e ne fuoriesce ad una pressione di poco superiore a quella atmosferica.
- Nell'espansione il gas si raffredda; la sua temperatura può passare, per esempio, da circa 30 °C a -25 °C.
- Il fluido freddo entra nell'evaporatore, una serpentina fredda disposta all'interno del frigorifero, dove evapora assorbendo calore dal sistema da raffreddare.
- Successivamente raggiunge l'ingresso a bassa pressione del compressore. In uscita dal compressore la pressione e la temperatura del fluido crescono.
- Il fluido caldo attraversa il condensatore, la serpentina calda disposta sulla parete posteriore del frigorifero, e disperde calore nell'ambiente pre-raffreddandosi prima di rientrare nella valvola di espansione.



Schema di principio di un frigorifero



Parti costituenti di un frigorifero domestico

I frigoriferi più moderni adottano la tecnologia "No Frost" che evita la formazione di ghiaccio, eliminando quindi la necessità della sbrinatoria periodica. Questa tecnologia viene spesso accompagnata da una ventilazione interna del frigorifero. Questi due accorgimenti tecnologici permettono agli alimenti una maggiore durata e una maggiore resistenza alle muffe.

### Accorgimenti

Per poter mantenere il frigorifero sempre funzionante, è necessario attuare certe cure:

- Permettere alla parte calda di cedere il calore, per sua natura un frigorifero raffredda l'interno trasportando il calore fuori. Quindi è necessario che il frigorifero possa cedere il calore all'ambiente in modo facile, quindi si deve far in modo che sia messo in un posto ben ventilato e lontano da fonti di calore.
- Distanza dal muro, la distanza dal muro deve essere adeguata per garantire un sufficiente ricambio d'aria.
- Pulizia serpentine, la loro pulizia è molto importante, dato che se queste sono sporche nel caso di quella esterna o ricoperta da ghiaccio per quella interna, si ha una riduzione dell'efficienza, quindi di tanto in tanto è necessario pulire la griglia posteriore e far scongelare il frigorifero.

Questi accorgimenti sono obsoleti nei frigoriferi moderni che adottano la tecnologia No Frost, la ventilazione interna e dove la serpentina viene celata alla vista da un pannello posteriore.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

### Temperature e quantità di calore notevoli

#### Punti di fusione e calore di fusione di alcune sostanze

Sostanza	Punto di fusione	Calore latente di fusione	
	(°C)	(J/kg) x 10 <sup>3</sup>	(cal/g)
Alluminio	658	356	85
Argento	961	105	25
Ferro	1530	272	65
Oro	1063	67	16
Piombo	327	24	5,7
Rame	1083	209	50
Stagno	232	57	14
Zolfo	119	46	11
Ghiaccio	0	335	80

#### Calore specifico di alcune sostanze

Materiale	Calore specifico	
	[J/kg.K]	[cal/(G.°C)]
Alluminio	879	0,21
Argento	233	0,056
Ferro	440	0,105
Mercurio	138	0,033
Nichel	442	0,106
Oro	129	0,031
Piombo	128	0,031
Rame	379	0,091
Stagno	225	0,054
Zinco	381	0,091
Acciaio	465	0,111
Legno	2512	0,6
Mattone	837	0,20
Acqua	4186	1
Ghiaccio	2060	0,492
Glicerina	2428	0,58
Olio minerale	1884	0,45

### Conduzione termica

Per conduzione termica si intende la trasmissione di calore che avviene in un mezzo solido, liquido o aeriforme all'interno di un corpo solo dalle zone a temperatura maggiore verso quelle con temperatura minore. Oltre alla conduzione termica, esistono altre due modalità di trasferimento di calore, che sono l'irraggiamento e la convezione.

#### Buoni conduttori e cattivi conduttori

Sono buoni conduttori di calore tutti i metalli, ma non tutti lo trasmettono egualmente bene. Per esempio, il rame conduce il calore meglio del ferro. Questo fatto si prova riscaldando alle estremità due sbarre, una di ferro e l'altra di rame, che portano all'estremità opposta una pallina fissata con una goccia di cera: la sbarra di rame lascia cadere la pallina molto prima della sbarra di ferro.

Il miglior conduttore di calore è l'argento. Un buon conduttore è anche l'oro.

Sono esempi di cattivi conduttori di calore tutti i semimetalli, il vetro, il legno e il sughero.

In genere i materiali che sono buoni conduttori di calore sono anche buoni conduttori di corrente elettrica. Bisogna comunque notare che nel caso dei metalli la corrente elettrica corrisponde ad un movimento ordinato di elettroni, mentre la conduzione di calore corrisponde ad un'oscillazione degli elettroni rispetto alla posizione iniziale, per cui mentre nel primo caso si ha un flusso di materia nel secondo caso si ha un flusso di calore ma non si ha un flusso di materia.

### Irraggiamento

In termodinamica ed elettromagnetismo, per irraggiamento si intende il trasferimento di energia tra due corpi a mezzo di onde elettromagnetiche.

Nel caso dell'irraggiamento di energia termica, si parla più precisamente di irraggiamento termico.

L'irraggiamento è uno dei tre modi attraverso cui avviene la propagazione del calore. In particolare, al contrario della conduzione e della convezione, l'irraggiamento non prevede contatto diretto tra gli scambiatori, e non necessita di un mezzo per propagarsi.

Quindi è un fenomeno che interessa ogni aggregato materiale, non importa se solido, liquido o gassoso, e avviene anche nel vuoto. Questo è giustificato dal fatto che il trasferimento di calore per irraggiamento avviene sotto forma di onde elettromagnetiche.

Fisicamente l'irraggiamento consiste nell'emissione di onde elettromagnetiche generate dagli atomi e molecole eccitati dall'agitazione termica, che si diseccitano emettendo fotoni di frequenza proporzionale alla loro temperatura: per esempio i corpi a temperatura ambiente emettono in prevalenza fotoni nella gamma degli infrarossi, che per questo sono anche detti raggi termici; corpi molto freddi irradiano microonde (quelli vicini allo zero assoluto semplici onde radio), mentre i corpi molto caldi arrivano ad emettere luce visibile, dapprima rossa (temperatura del cosiddetto calor rosso, circa 700 °C) poi sempre più bianca (temperatura del calor bianco, circa 1200 °C): man mano che la temperatura aumenta, la frequenza della luce emessa aumenta fino al bianco-azzurro, per poi passare ai raggi ultravioletti, e ai raggi X nel caso di plasmi stellari a temperature dell'ordine di milioni di gradi.

Il calore scambiato per irraggiamento si trasmette prevalentemente dal corpo a temperatura maggiore a quello a temperatura minore; in realtà, l'energia si propaga in entrambe le direzioni, ma con minore intensità da quello freddo a quello caldo. Infatti, se un corpo emanasse soltanto e non assorbisse mai energia elettromagnetica, la sua temperatura raggiungerebbe lo zero assoluto.

### Convezione

Il fenomeno della convezione termica si ha quando un fluido (come l'acqua o l'aria) entra in contatto con un corpo la cui temperatura è maggiore di quella del fluido stesso. Aumentando di temperatura per conduzione, il fluido a contatto con l'oggetto si espande e diminuisce di densità, e a causa della spinta di Archimede sale essendo meno denso del fluido che lo circonda che è più freddo, generando così moti convettivi, in cui il fluido caldo sale verso l'alto e quello freddo scende verso il basso (convezione naturale).



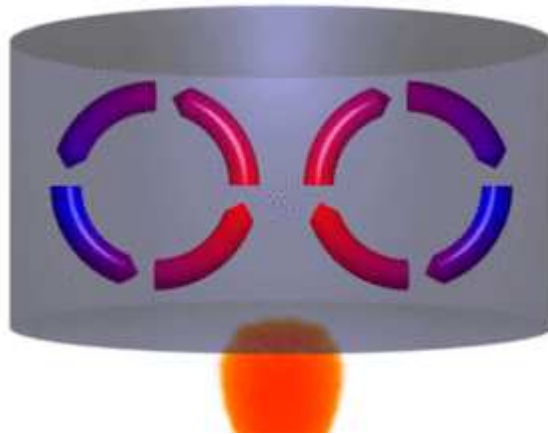
Come esempio si può immaginare un sistema isolato dall'esterno, con due corpi a diverse temperature, quello più freddo in alto e quello più caldo in basso, separati da acqua: siccome l'acqua calda tende a salire e quella fredda a scendere (per la diversa densità), si avrà un moto convettivo per cui nella zona centrale l'acqua essendosi riscaldata a contatto col corpo caldo, sale verso il corpo freddo; invece nelle zone esterne si ha un movimento verso il basso, perché l'acqua raffreddandosi a contatto col corpo freddo si dirige verso il basso. Se si dovessero invertire i corpi, quello caldo in alto e quello freddo in basso non si avrebbe nessun moto convettivo, l'acqua rimarrebbe ferma ed il corpo caldo cederebbe calore al più freddo solo per conduzione.

In generale la convezione è qualsiasi flusso che:

- raccoglie calore da una parte;
- lo deposita in un'altra;
- è tenuto in movimento dal trasporto del calore.

Il suolo della Terra viene riscaldato dai raggi del Sole per irraggiamento, il calore fa espandere l'aria che diventa meno densa e galleggia come una bolla verso l'alto, arrivando negli strati alti dell'atmosfera cede il suo calore ad altre masse d'aria, ovvero lo spazio esterno, si raffredda ed altre bolle che provengono dal basso la spingono di lato e comincia a scendere, questo movimento è un altro esempio di moto convettivo.

### Tettonica a zolle



La trasmissione di calore per convezione è la responsabile della “Tettonica a zolle”.

Fino all'inizio del novecento i geologi erano convinti che i continenti e i bacini oceanici fossero forme stabili e immobili della superficie terrestre, ma nel corso degli ultimi decenni una grande quantità di nuove informazioni e dati ha contribuito a mutare radicalmente la nostra interpretazione circa l'attività della Terra e i conseguenti fenomeni che osserviamo sulla sua superficie (vulcani, terremoti, ecc...). Adesso interpretiamo la crosta non più rigida ma anzi formata da circa 20 zolle, o placche, di cui le maggiori sono sei: quella africana, quella euroasiatica, quella pacifica, la zolla nordamericana, quella sudamericana e infine quella antartica. Nella cartina sotto le principali placche e i punti caldi (hot spots) presenti.



Tutte queste placche poggiano sul mantello, che non è un substrato rigido e quindi permette un certo movimento alle zolle. L'idea che i continenti, in particolare il Sud America e l'Africa si potessero fare coincidere a formare un unico continente, era già stata fatta presente nel 1858 da Antonio Pellegrini ma senza nessuna base scientifica se non il fatto che le coste di queste due placche potevano coincidere in modo quasi perfetto (v. figura). Ma si deve al meteorologo Alfred Wegener il merito di presentare l'idea della deriva dei continenti (1915) accompagnata da una serie di prove ed osservazioni; ipotizzò che un tempo fosse esistito un supercontinente, che chiamò Pangea, e questo circa 200 milioni di anni fa avesse iniziato a frammentarsi in pezzi più piccoli che sono andati alla "deriva" verso le posizioni attuali.

## 6.2. Termodinamica

La termodinamica è quella branca della fisica che descrive le trasformazioni subite da un sistema in seguito a processi che coinvolgono la trasformazione di massa ed energia.

La termodinamica classica si basa sul concetto di sistema macroscopico, ovvero una porzione di massa fisicamente o concettualmente separata dall'ambiente esterno, che spesso per comodità si assume non perturbato dallo scambio di energia con il sistema. Lo stato di un sistema macroscopico che si trova in condizione di equilibrio è specificato da grandezze dette variabili termodinamiche o funzioni di stato come la temperatura, la pressione, il volume, la composizione chimica.

La Termodinamica, come scienza, nasce dalle applicazioni del vapore per ottenere forza motrice, i cui precursori furono Newcomen e Watt (se non vogliamo considerare Papin, la cui “pentola”, però, era più una curiosità di laboratorio che non un’applicazione industriale).

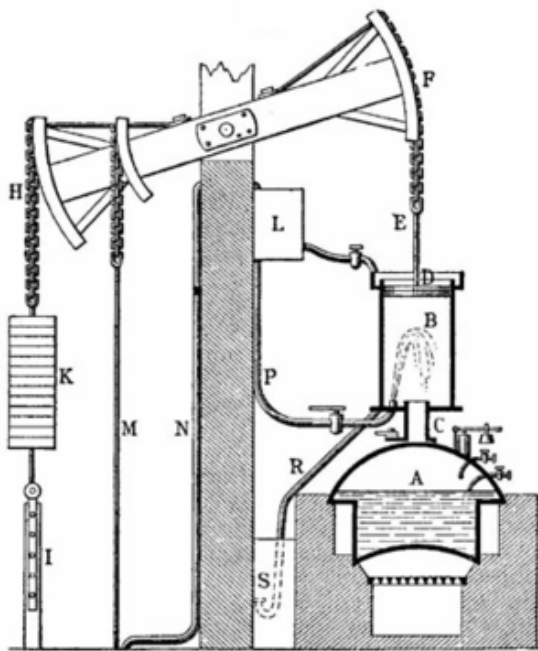
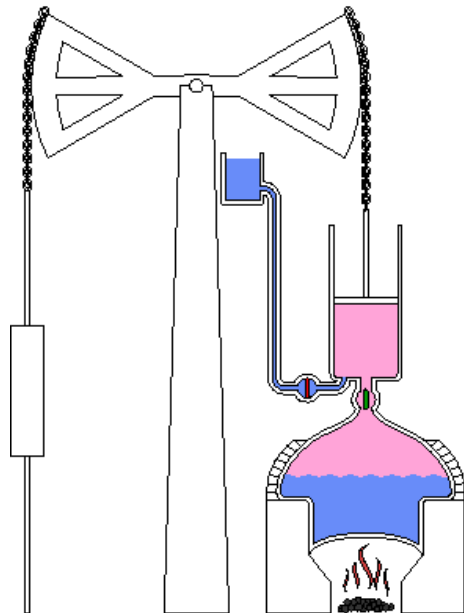


Immagine originale della macchina di Newcomen.



Schema della macchina di Newcomen.

### Funzionamento

(Con riferimento all'immagine storica a sinistra) La caldaia A produce vapore, che si espande nella camera B (il cilindro del motore), raggiungendo la pressione che compete alla temperatura raggiungibile dall'acqua. Il pistone D si solleva (la forza, e quindi la pressione necessaria, è limitata grazie al contrappeso K).

Nel suo movimento, il pistone libera il bilanciere H - F che, grazie al contrappeso, si sposta verso il basso nel lato (nella figura) sinistro. Quando il pistone raggiunge il punto morto superiore, dal serbatoio L viene alimentata acqua, sia sulla faccia superiore del pistone sia all'interno del cilindro.

Il vapore presente all'interno di questo è così condensato, e la pressione interna cade a valori molto bassi: la pressione atmosferica agisce allora sul pistone facendolo scendere, e quindi abbassando il braccio destro del bilanciere e contemporaneamente sollevando il sinistro; il pistone della pompa I si solleva, estraendo acqua (o comunque compiendo lavoro meccanico). Al termine dell'estrazione, l'acqua viene drenata, e il ciclo si ripete.

Il serbatoio L, nella configurazione originale, era alimentato, tramite la tubazione N, da una pompa ausiliaria azionata dal tirante/puntone M. La forza esercitata sul tirante H dipendeva evidentemente dalla dimensione del cilindro; un cilindro con alesaggio 1 piede (304,8 mm) consentiva il pompaggio di circa 600 litri di acqua (incluse le forze necessarie al movimento del contrappeso), per una portata dell'ordine dei  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ , di tutto rispetto per i tempi. La macchina di Newcomen, del 1705, era però grande, poco potente e costosa, quindi veniva in genere usata solo per l'estrazione di acqua dalle miniere, e cioè come installazione fissa.

Questa macchina fu poi perfezionata da James Watt, che concepì il condensatore esterno, consentendo così sia lo sfruttamento della pressione del vapore, normalmente superiore all'atmosferica, sia il funzionamento del cilindro su ambo i lati

Agli inizi il motore a vapore funzionava a bassa pressione, ovvero man mano che il vapore veniva prodotto usciva subito dalla caldaia al cilindro; tali motori erano di conseguenza enormi rispetto alla potenza erogata; l'installazione su veicoli semoventi richiedeva quindi la progettazione di motori più piccoli e leggeri a parità di potenza; per questo motivo vennero creati motori ad alta pressione, ovvero che accumulavano la pressione all'interno della caldaia anziché espellere nel cilindro il vapore man mano che si produceva.

Solo più tardi però, grazie all'invenzione del condensatore esterno, della distribuzione a cassette e del meccanismo biella-manovella (che consentiva di creare un movimento rotatorio anziché solo alternativo come fino allora), tutte attribuite a James Watt a partire dal 1765, si è potuti passare da applicazioni sporadiche ad un utilizzo generalizzato nei trasporti e nelle industrie.

La macchina di Watt riduceva costi, dimensioni e consumi, e aumentava la potenza disponibile. Dal primo modello con 4,4 kW si è passati in meno di 20 anni a locomotive da 0.4 MW.

Schematicamente la macchina a vapore è costituita da un contenitore, il bollitore, al cui interno, grazie all'azione di una fonte di calore, viene riscaldata acqua fino a temperature vicine all'ebollizione per ottenere vapore, che tende a espandersi in tutto il bollitore, o in un secondo contenitore in cui si riversa, esercitando una pressione sulle pareti tanto maggiore quanto più alta è la concentrazione del vapore stesso. Il vapore può venire convogliato su un pistone o una turbina, che sono messe in moto dalla pressione che ricevono, producendo lavoro meccanico. Nel corso degli ultimi tre secoli sono stati costruiti tipi diversi di macchine a vapore, nell'intento di migliorarne soprattutto l'efficienza, vale a dire la quantità di energia termica effettivamente trasformata in lavoro meccanico, che in queste macchine è particolarmente bassa, specie in quelle a pistone.

La prima macchina a vapore moderna è dovuta allo scozzese J. Watt che, tra la fine del 18° e l'inizio del 19° sec., modificò la macchina ideata dal meccanico inglese T. Newcomen (1663-1729), dotata di un pistone che si alzava e si abbassava in base a un ciclo di espansione e di condensazione del vapore immesso in un cilindro.

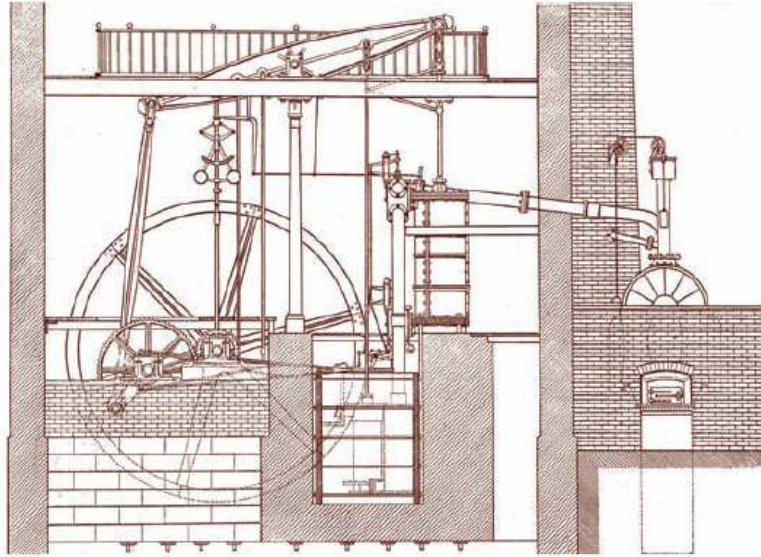
Watt ideò una macchina dotata di camera di condensazione del vapore separata, per ridurre la perdite di vapore, e realizzò un semplice meccanismo che trasformava il moto del pistone, rettilineo dal basso verso l'alto e viceversa, in un moto circolare continuo, grazie a un volano e a un meccanismo a biella, poi adottato in tutte le m. a v. moderne.

Infine, aumentò notevolmente l'efficienza del motore inserendo una seconda valvola che permetteva di introdurre vapore nel cilindro oltre che dal basso anche dall'alto, quando il pistone era giunto al massimo della sua corsa, per agevolarne il ritorno verso il basso della camera

Watt rilevò che il basso rendimento era imputabile alle perdite di calore in seguito alla condensazione che avveniva nel cilindro.

Eseguita una serie di ricerche sulla condensazione, giunse nel 1765 alla sua prima grande invenzione, quella del condensatore separato; lo scopo dell'innovazione era quello di permettere alle pareti del cilindro di restare calde come il vapore al suo ingresso e a tal fine egli introdusse anche la camicia di vapore attorno al cilindro. Proseguendo sulla via dei perfezionamenti, Watt attuò gran parte dei dispositivi di cui sono ancora munite le macchine moderne.

Limitò l'immissione del vapore a una frazione della corsa introducendo la fase di "espansione", che costituisce la seconda grande invenzione di Watt; portò il vapore ad agire su ambo le facce dello stantuffo, realizzando il "doppio effetto"; applicò il regolatore di velocità a forza centrifuga da lui stesso ideato ("pendolino di Watt"), e sostituì la sospensione a catena con il cosiddetto parallelogramma guidante l'asta dello stantuffo, il cui moto alternativo trasformò, per mezzo del bilanciere e del meccanismo di biella e manovella, in moto rotatorio, rendendo così la macchina adatta per uso industriale come motrice per le più svariate applicazioni.



La macchina a vapore di Watt

Secondo Watt una macchina a vapore comprende:

- a) il generatore di vapore (o caldaia) per la trasformazione dell'acqua in vapore;
- b) l'apparato motore;
- c) un apparecchio di alimentazione (per lo più pompa), con il quale si rimanda in caldaia o il condensato dal pozzo caldo o nuova acqua dal serbatoio di alimentazione, se la macchina è a scarico libero.

### Breve sviluppo storico della termodinamica



Sadi Carnot (1796-1832): uno dei padri della termodinamica.

Fu **Sadi Carnot** nel 1824 il primo a dimostrare che si può ottenere lavoro dallo scambio di calore tra due sorgenti a temperature differenti. Attraverso il teorema di Carnot e la macchina ideale di Carnot (basata sul Ciclo di Carnot) lo scienziato quantificò questo lavoro e introdusse il concetto di rendimento termodinamico.

Nel 1848 **Lord Kelvin**, utilizzando la macchina ideale di Carnot, introdusse il concetto di temperatura termodinamica effettiva e a lui si deve un enunciato del secondo principio della termodinamica.

Nel 1850 **Joule** dimostrò l'uguaglianza delle due forme di energia (allora si credeva esistesse ancora il fluido calorico).

A questo punto si era posto il problema che, se era possibile ottenere calore dal lavoro in modo totale, non era possibile ottenere l'inverso! A questo risultato approdò anche **Clausius** che nel 1855 introdusse la sua disuguaglianza per riconoscere i processi reversibili da quelli irreversibili e la funzione di stato entropia.

Nel 1876 Willard Gibbs pubblicò il trattato "*On the Equilibrium of Heterogeneous Substances*" (Sull'equilibrio delle sostanze eterogenee) in cui mostrò come una trasformazione termodinamica potesse essere rappresentata graficamente e come studiando in questo modo l'energia, l'entropia, il volume, la temperatura e la pressione si potesse prevedere l'eventuale spontaneità del processo considerato.

Il caso della termodinamica è emblematico nella storia e nell'epistemologia della scienza: si tratta infatti di uno di quei casi in cui la pratica ha precorso la teoria stessa: prima è stata ideata la macchina a vapore, poi è stato sistematizzato il suo funzionamento teorico attraverso i suoi principi di base.

### Sistemi termodinamici

Un "sistema termodinamico" è una qualunque porzione dell'universo a cui ci si sta interessando come oggetto d'indagine (la rimanente parte dell'universo si definisce invece ambiente). Questa porzione di spazio è separata dal resto dell'universo, cioè dall'ambiente esterno, mediante una superficie di controllo (superficie reale o immaginaria, rigida o deformabile), ed è sede di trasformazioni interne e scambi di materia o energia con l'ambiente esterno. Questi stessi scambi causano perciò la trasformazione del sistema, poiché esso passa da una condizione di partenza ad una differente. In pratica un sistema si trasforma quando passa da uno stato d'equilibrio iniziale ad uno finale.

L'ambiente rimane invece approssimativamente "inalterato", poiché il sistema rispetto ad esso è talmente piccolo che uno scambio di energia o materia risulterebbe ininfluente per l'ambiente rispetto alla totalità degli stessi al suo interno, altrimenti non si parlerebbe di ambiente ma di un altro sistema (al quale l'ambiente per definizione non corrisponde).

Gli scambi di massa o energia possono avvenire sotto forma di calore o lavoro. Questi due concetti non sono delle proprietà intrinseche del sistema, ma sussistono nel momento in cui esso interagisce con l'ambiente, cioè scambia energia con l'esterno. Quindi un sistema non possiede calore o lavoro, bensì energia; ogni variazione di energia è poi esprimibile in termini di calore, se il passaggio di energia è dovuto ad una differenza di temperatura tra ambiente e sistema, e lavoro (per qualunque variazione energetica che non sia dovuta alla differenza di temperatura, come ad esempio una forza meccanica che provochi uno spostamento, un trasferimento di energia elettrica o elastica).

Si possono distinguere vari tipi di sistemi, in dipendenza dal modo di scambiare energia con l'esterno:

- sistemi aperti: scambiano energia (calore e lavoro) e massa con l'ambiente.
- sistemi chiusi: scambiano energia, ma non massa con l'ambiente.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

- sistemi isolati: non scambiano né energia né massa con l'ambiente; l'universo è quindi per definizione un sistema isolato, non essendoci un "ambiente esterno" di riferimento con cui scambiare massa o energia.

I sistemi si possono classificare nel modo seguente:

- Sulla base dello scambio di calore in:
  - Sistemi adiabatici, se non consentono lo scambio di calore;
  - Sistemi diatermici, se invece lo consentono;
- Sulla base dello scambio di lavoro in:
  - Bordi rigidi, se non consentono lo scambio di lavoro;
  - Bordi flessibili, se invece lo consentono;
- Sulla base dello scambio di massa in:
  - Bordi permeabili, se consentono il passaggio di ogni specie chimica
  - Bordi semipermeabili, se consentono il passaggio di alcune specie chimiche
  - Bordi impermeabili, se invece non consentono il passaggio di alcuna specie chimica.

Un sistema aperto ha bordi permeabili o semipermeabili, diatermici e flessibili. Un sistema isolato ha bordi impermeabili, rigidi e adiabatici.

### Trasformazioni termodinamiche

Quando un sistema passa da uno stato di equilibrio ad un altro, si dice che avviene una trasformazione termodinamica: si distingue tra trasformazioni reversibili, ovvero quelle trasformazioni che consentono di essere ripercorse in senso inverso (si ritorna precisamente al punto di partenza, ripercorrendo all'indietro gli stessi passi dell'andata), e trasformazioni irreversibili, ovvero quelle trasformazioni che, se ripercorse all'indietro, non faranno ritornare al punto iniziale, ma ad uno diverso. Le trasformazioni termodinamiche possono essere anche dei seguenti tipi:

- Isobare, se la pressione si mantiene costante;
- Isocore, se il volume si mantiene costante (e il lavoro scambiato tra sistema ed esterno è dunque nullo);
- Isoterme, se la temperatura si mantiene costante;
- Adiabatiche, se il calore totale scambiato è nullo;
- Isoentropiche, o adiabatiche reversibili, se la variazione di entropia è nulla.

### I principi della termodinamica

I principi della termodinamica vennero enunciati nel corso del XIX secolo e regolano le trasformazioni termodinamiche, il loro procedere, i loro limiti. Sono dei veri e propri assiomi, non dimostrati e indimostrabili, fondati sull'esperienza, sui quali si fonda tutta la teoria che riguarda la termodinamica.

#### Primo principio

Quando un corpo viene posto a contatto con un altro corpo relativamente più freddo avviene una trasformazione che porta a uno stato di equilibrio nel quale sono uguali le temperature dei due corpi. Per spiegare questo fenomeno gli scienziati del XVIII secolo supposero che una sostanza, presente in maggior quantità nel corpo più caldo, passasse nel corpo più freddo. Questa sostanza ipotetica, detta calorico, era pensata come un fluido capace di muoversi attraverso la massa chiamata impropriamente materia. Il primo principio della termodinamica invece identifica il calore come una forma di energia che può essere convertita in lavoro meccanico ed essere immagazzinata, ma che non è una sostanza materiale.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

È stato dimostrato sperimentalmente che il calore, misurato originariamente in calorie, e il lavoro o l'energia, misurati in joule, sono effettivamente equivalenti. Ogni caloria equivale a 4,186 joule, come trovato nel famoso esperimento del “calorimetro di Joule” (v. più avanti).

Il primo principio è dunque un principio di conservazione dell'energia. In ogni macchina termica una certa quantità di energia viene trasformata in lavoro: non può esistere nessuna macchina che produca lavoro senza consumare energia. Una simile macchina, se esistesse, produrrebbe infatti il cosiddetto moto perpetuo di prima specie.

Il primo principio viene tradizionalmente enunciato come:

**La variazione dell'energia interna di un sistema termodinamico chiuso è uguale alla differenza tra il calore fornito al sistema e il lavoro compiuto dal sistema sull'ambiente.**

In altre parole, il primo principio sancisce l'equivalenza tra lavoro e calore.

La corrispondente formulazione matematica si esprime come:

$$\Delta U = Q - L$$

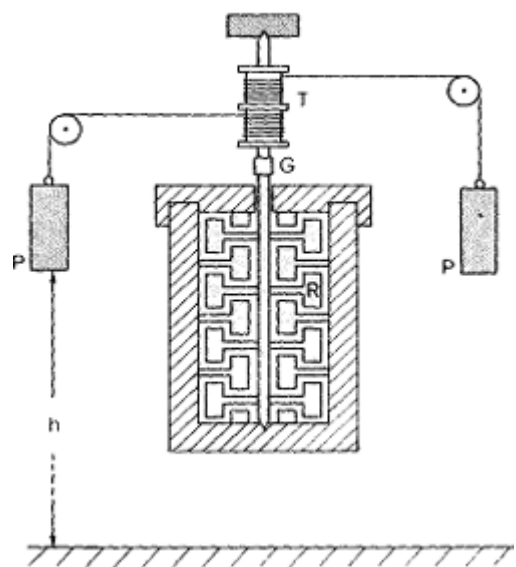
dove  $U$  è l'energia interna del sistema,  $Q$  il calore fornito al sistema e  $L$  il lavoro compiuto dal sistema.

Per energia interna si intende la somma delle energie cinetiche e di interazione delle diverse particelle di un sistema.  $Q$  è il calore scambiato tra ambiente e sistema (positivo se fornito al sistema, negativo se invece ceduto dal sistema) e  $L$  il lavoro compiuto (positivo se compiuto dal sistema sull'ambiente, negativo invece se compiuto dall'ambiente sul sistema). La convenzione dei segni risente del legame con lo studio dei motori termici, nei quali il calore viene trasformato (parzialmente) in lavoro.

### Calorimetro di Joule



Un calorimetro simile a quello usato da Joule



Schema di funzionamento del calorimetro

Il calorimetro (o mulinello) di Joule è lo strumento con cui il fisico inglese James Prescott Joule, nel 1850, determinò l'equivalente meccanico del calore.

Si tratta sostanzialmente di un particolare tipo di calorimetro contenente acqua; le palette sono soggette ad una coppia di forze dovuta alla caduta di due grossi pesi, liberi di muoversi sotto l'effetto dell'accelerazione di gravità. Si instaura così un regime viscoso tra le palette del mulinello e la struttura del mulinello stesso, con conseguente creazione di ingenti forze viscosi. Come conseguenza di questo processo, il sistema costituito dai pesi più il mulinello stesso raggiunge rapidamente una velocità di regime, così che si ha un aumento della temperatura dell'acqua e la caduta rallentata dei pesi. Quando i pesi hanno raggiunto il suolo, si misura l'innalzamento di temperatura dell'acqua contenuta nel calorimetro, ricavando la variazione di energia interna derivante dall'azione meccanica del mulinello.

Si conclude quindi, a fronte dell'innalzamento di temperatura, che tutto è avvenuto come se si fosse somministrato calore (cosa peraltro impossibile perché il calorimetro è isolato termicamente) ed è quindi possibile determinare il rapporto tra l'energia meccanica immessa e la variazione di energia interna misurata in calorie intesa come calore fittizio introdotto, e dato dal prodotto della massa d'acqua per l'innalzamento di temperatura.

Per mezzo di tale esperimento, Joule determinò un valore dell'equivalente meccanico del calore pari a **4,186 J/cal**, valore di straordinaria precisione per i tempi.

In seguito, tramite altre e più sofisticate esperienze di elettromagnetismo, si pervenne al valore di 4,1855 J/cal.

### Secondo principio

Esistono diversi enunciati del secondo principio, tutti equivalenti, e ciascuna delle formulazioni ne mette in risalto un particolare aspetto. Esso afferma che

**«è impossibile realizzare una macchina ciclica che abbia come unico risultato il trasferimento di calore da un corpo freddo a uno caldo»** (enunciato di Clausius) o, equivalentemente, che

**«è impossibile realizzare una trasformazione il cui risultato sia solamente quello di convertire in lavoro meccanico il calore prelevato da un'unica sorgente»** (enunciato di Kelvin).

Quest'ultima limitazione nega la possibilità di realizzare il cosiddetto moto perpetuo di seconda specie.

### Terzo principio

È strettamente legato al secondo, e in alcuni casi è considerato come una conseguenza di quest'ultimo. Può essere enunciato dicendo che

**«è impossibile raggiungere lo zero assoluto con un numero finito di trasformazioni»**

e fornisce una precisa definizione della grandezza chiamata entropia. Esso afferma inoltre che l'entropia per un solido perfettamente cristallino, alla temperatura di 0 kelvin è pari a 0.

### Macchine termiche

Sono tutti i dispositivi che convertono in lavoro una parte del calore che ricevono.

Siano:

$Q_1$  Il calore fornito al sistema da una sorgente a temperatura  $T_1$

$Q_2$  Il calore ceduto dal sistema nel corso del processo a un “condensatore” a temperatura  $T_2$ ,

dove, naturalmente, è:  $T_1 > T_2$  e  $Q_1 > Q_2$

Si definisce rendimento della macchina il rapporto  $R = (Q_1 - Q_2)/Q_1$

E si dimostra che è  $R = (T_1 - T_2)/T_1$

Poiché, per il terzo principio della termodinamica,  $T_2$  non potrà mai essere  $= 0$ , il rendimento delle macchine termiche sarà sempre  $< 100\%$  (in realtà i motori a vapore hanno rendimenti inferiori al 25%, ed anche i migliori motori a combustione interna hanno rendimenti intorno al 40%).

Quanto sopra detto prende il nome di “enunciato di Carnot”, la cui più importante conseguenza è

**Il calore è una forma di energia di seconda specie poiché non si può trasformare interamente in altre forme di energia.**

### VERO O FALSO

- 1) Il fatto che le sensazioni di caldo e di freddo sono in larga misura soggettive si oppone a una definizione quantitativa della temperatura.
- 2) Ogni assorbimento di calore da parte di un corpo è sempre accompagnato da un aumento di temperatura.
- 3) La caloria è la quantità di calore necessaria a portare da  $14,5^\circ$  a  $15,5^\circ$  la temperatura di un grammo di acqua.
- 4) Le molecole di cui è costituito il vapor acqueo sono più leggere di quelle di cui è costituito il ghiaccio.
- 5) La teoria cinetica dei gas spiega l'esistenza della pressione con gli urti che le molecole esercitano sulle pareti del recipiente che racchiude il gas.
- 6) Ogni moto molecolare cessa allo zero assoluto.
- 7) Il secondo principio della Termodinamica afferma che nessuna macchina termica può trasformare l'intero calore che riceve in lavoro utile.
- 8) I calori specifici dell'acqua e del ghiaccio sono diversi.
- 9) I thermos servono per mantenere una sostanza a una temperatura superiore a quella ambiente e non per mantenerla a una temperatura inferiore a quella ambiente.

### 6.3. Moto browniano

Nel 1827, il botanico Robert Brown osservò con un microscopio che un granello di polline sospeso nell'acqua si muove velocemente a zig-zag, con un moto incessante e del tutto irregolare. Dal suo nome questo fenomeno è detto moto browniano.

Anche un granello di polvere nell'acqua, visto al microscopio, si muove in modo casuale e disordinato.

Secondo Einstein i granelli si muovono così perché sono continuamente bombardati dalle molecole d'acqua.

L'acqua è costituita da tantissime molecole che si trovano in uno stato continuo di agitazione. Nel modello che Einstein propose nel 1905 le molecole d'acqua colpiscono molto spesso il granello di polline (circa  $10^{21}$  volte al secondo) e gli urti avvengono, in media, con la stessa frequenza e con la stessa forza in tutte le direzioni.

Il movimento di un granello di polvere testimonia che l'acqua è composta da un numero enorme di "grani" invisibili dotati di un movimento continuo, veloce e disordinato.

Il moto browniano è responsabile dei fenomeni che osserviamo ogni giorno.

Le particelle di fumo di una sigaretta accesa si disperdono a causa degli urti con le molecole che costituiscono l'aria.

## 7. ELETTRICITÀ

### 7.1. La legge di Coulomb e il “Coulomb”

Il **Coulomb** (simbolo C) è l'unità di misura della carica elettrica ed è definita in termini di ampere: **1 coulomb è la quantità di carica elettrica trasportata in 1 secondo dal flusso di corrente di 1 ampere:**

$$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$$

1 coulomb è all'incirca  $6,24 \times 10^{18}$  volte la carica di un elettrone. Prende il nome da Charles Augustin de Coulomb (1736 - 1806), il primo scienziato a studiare qualitativamente le cariche e le forze che ne regolano il moto.

#### La legge di Coulomb

Se si utilizza questa grandezza per calcolare la forza esercitata tra una carica positiva ed una negativa poste ad una distanza di  $5,291 \times 10^{-11}$  m si ottiene che tale forza ha una intensità pari a  $F_e = 9 \times 10^{-8}$  N. Sembra una forza debole, ma se viene confrontata con la forza gravitazionale si scopre che:

$$\frac{F_e}{F_g} \cong 10^{39}$$

La forza elettrica è  $10^{39}$  (1 seguito da 39 zeri) volte più potente della forza gravitazionale.

Le cariche elettriche trasmettono forze l'una sull'altra; nel 1785 Coulomb calcolò sperimentalmente l'entità di queste forze, servendosi di una bilancia a torsione (v. più avanti). Il risultato ottenuto da Coulomb per due cariche elettriche puntiformi  $Q_1$  e  $Q_2$  separate dalla distanza  $r$ , è che la forza agente tra le cariche puntiformi  $Q_1$  e  $Q_2$  è direttamente proporzionale al prodotto delle cariche e inversamente proporzionale al quadrato della distanza che le separa. La direzione della forza risultante è data dalla retta congiungente le due cariche, questo risultato è noto come legge di Coulomb.

In simboli:

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Dove  $k$  è la costante di Coulomb

Possiamo anche dire che tra due corpi elettricamente carichi si esercita una forza, attrattiva se i due corpi hanno cariche di segno opposto, repulsiva nel caso contrario.

Analogie e differenze fra le forze di Coulomb e Newton (elettrostatica e gravitazione).

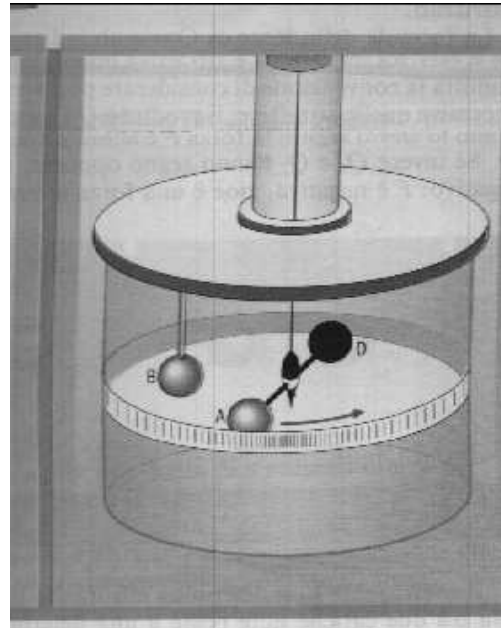
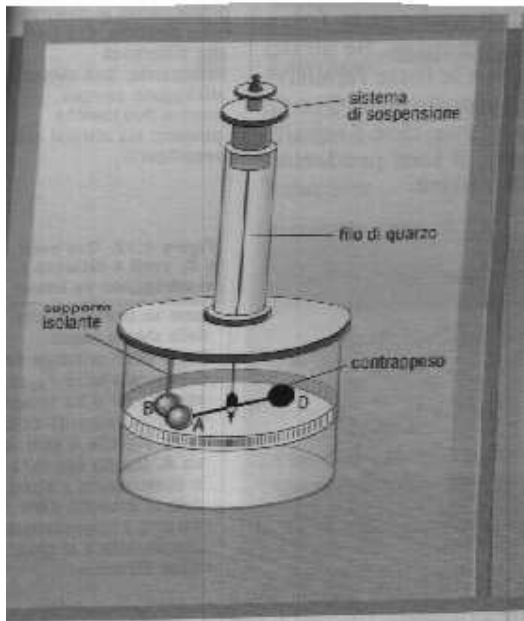
Analogie:

1. entrambe le forze agiscono a distanza
2. entrambe decrescono con il quadrato della distanza, sono cioè ad esso inversamente proporzionali
3. la forza agisce in entrambe lungo la congiungente i due centri (delle masse e delle cariche)
4. generano entrambe campi conservativi

Differenze:

1. la forza gravitazionale si esercita fra tutti i corpi, quella elettrica solo fra corpi elettricamente carichi
2. le sorgenti della forza gravitazionale sono le masse, di quella elettrica sono le cariche
3. la forza gravitazionale è solo attrattiva, quella elettrica sia attrattiva sia repulsiva
4. la forza elettrica risente del mezzo di propagazione, quella gravitazionale rimane invariata

### Il pendolo di torsione di Coulomb



Il pendolo di torsione è uno strumento con cui si **misura la forza tra due sfere A e B cariche dello stesso segno**. La sfera B è fissa e isolata elettricamente. La sfera A può invece ruotare. Essa è sospesa mediante un manubrio a un filo isolante ed è tenuta in equilibrio dalla sfera scarica D che fa da contrappeso.

Misurando l'angolo di rotazione del manubrio sulla scala graduata, si può risalire all'**intensità della forza tra le due sfere**.

### Elettroscopio a foglie d'oro

L'elettroscopio è uno strumento che permette di effettuare un'analisi qualitativa sulla carica elettrica di un corpo, ovvero permette di individuare se un corpo è carico elettricamente o meno senza però quantificare l'entità di questa carica. Questo strumento è quindi, di fatto, un rilevatore di carica.

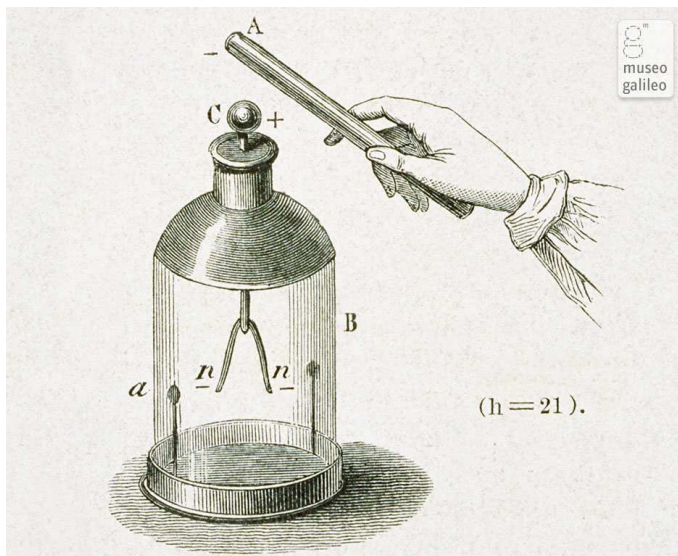
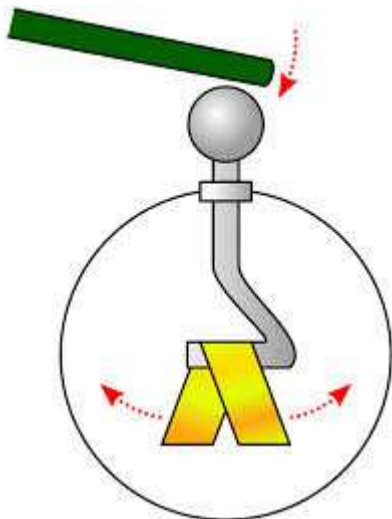
L'apparecchio è stato messo a punto da Alessandro Volta intorno al 1780.

Lo strumento è composto da un pomello metallico collegato, tramite un'asta, anch'essa di metallo, a due sottili lamine in oro, dette "foglioline". Queste sono racchiuse in un recipiente di vetro per isolarle da correnti di aria esterne.

Avvicinando un corpo caricato elettricamente, ad esempio una bacchetta di plastica strofinata con un panno di lana, al pomello metallico, senza toccarlo, si vedranno le due lamine divergere.

La vicinanza del corpo elettricamente carico produce un fenomeno fisico detto induzione elettrostatica sul pomello.

La parte dell'elettroscopio più vicina alla bacchetta si caricherà della carica di segno opposto rispetto alla carica della bacchetta, mentre sulle foglioline si concentrerà la carica dello stesso segno di quella della bacchetta.

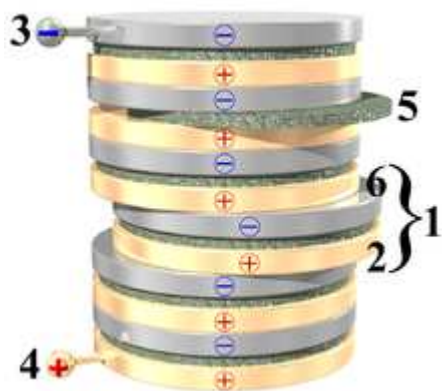


### 7.2. La Pila di Volta

La pila di Volta fu il primo generatore statico di energia elettrica mai realizzato.

Inventata da Alessandro Volta intorno al 1800, essa costituisce il prototipo della batteria elettrica moderna.

#### Descrizione



Schema della pila di Volta:

Pila di Volta in esposizione a Treviglio

- ) un elemento della pila; 2). strato di rame;
- 3). contatto negativo; 4) contatto positivo;
- 5.) feltro o cartone imbevuto in soluzione acquosa;
- 6) strato di zinco.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

La pila di Volta è costituita fondamentalmente da una colonna di più elementi simili sovrapposti, cosiddetti elementi voltaici, ciascuno dei quali consiste in un disco di zinco sovrapposto ad uno di rame, uniti attraverso uno strato intermedio di feltro o cartone imbevuto in acqua salata o acidulata. Al posto del rame è possibile usare anche l'argento; al posto dello zinco si può usare anche lo stagno.

Collegando gli estremi superiore ed inferiore della pila per mezzo di un conduttore elettrico si produce un circuito nel quale passa corrente continua.

Per avere un flusso di cariche elettriche occorre mantenere una differenza di potenziale tra i due poli: a questo scopo si usano i generatori di corrente elettrica. Il primo generatore di elettricità della storia è appunto la pila.



Nel 1801 Alessandro Volta illustra la sua invenzione a Napoleone Bonaparte.



Disegni della pila a corona di tazze e varie configurazioni di pila a colonna, inclusi nella lettera inviata da Volta a sir Joseph Banks per annunciargli la sua invenzione.

L'invenzione della pila è il risultato di esperimenti condotti da Volta verso la fine del XVIII secolo che riprendevano studi precedenti di Luigi Galvani sull'elettricità.

L'invenzione venne annunciata in una lettera rivolta a Joseph Banks, presidente della Royal Society di Londra, datata 20 marzo 1800, in cui lo stesso Volta ne dà anche la prima descrizione.

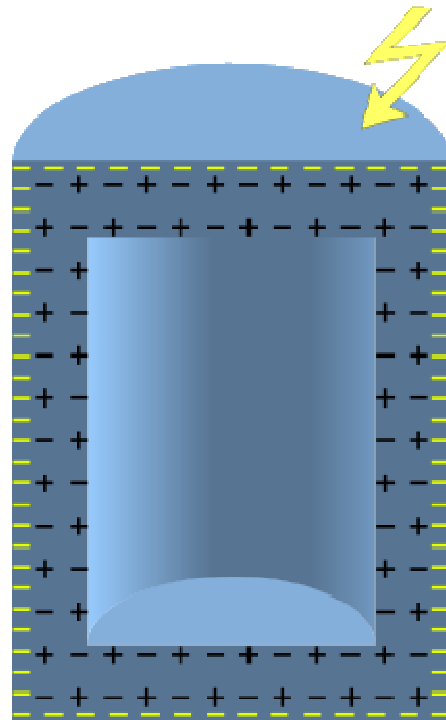
Denominata inizialmente organo elettrico artificiale oppure apparato elettromotore, venne battezzata poi pila per via della sua struttura caratteristica. Questo nome è rimasto in italiano a designare genericamente tutte le batterie per apparecchi elettrici, indipendentemente dalla loro forma.

La pila valse a Volta fama ed onori internazionali: il 7 novembre 1801 ne illustrò il funzionamento all'Institut de France a Parigi di fronte a Napoleone Bonaparte, che in tale occasione lo insignì di una medaglia d'oro e lo propose per un cospicuo premio in denaro.

### 7.3. La Gabbia di Faraday



La gabbia di Faraday protegge chi sta all'interno dalle scariche elettriche.



Distribuzione delle cariche in una Gabbia di Faraday.

Con gabbia di Faraday si intende qualunque sistema costituito da un contenitore in materiale elettricamente conduttore (o cavo conduttore) in grado di isolare l'ambiente interno da un qualunque campo elettrostatico presente al suo esterno, per quanto intenso questo possa essere.

È utilizzato il termine gabbia per sottolineare che il sistema può essere costituito, oltre che da un foglio metallico continuo, anche da una rete o una serie di barre opportunamente distanziate.

Questo effetto schermante è utilizzato per proteggere ambienti e apparati da campi esterni, come per esempio quelli generati dai fulmini.

Un'altra applicazione si ha in elettronica per eliminare le interferenze di campi elettromagnetici esterni in apparecchi radio e per telecomunicazioni, oppure per evitare la fuoriuscita di campi elettromagnetici da un ambiente, come nel caso del forno a microonde (v.). In quest'ultimo è presente una rete metallica sullo sportello: in questo modo durante il suo utilizzo si è schermati dalle microonde mantenendo la possibilità di vedere le pietanze.

Sono gabbie di Faraday: l'auto, la casa, gli aerei e una qualsiasi costruzione metallica con possibilità di alloggi interni ed è per questo che il luogo più sicuro durante un temporale è un'automobile.

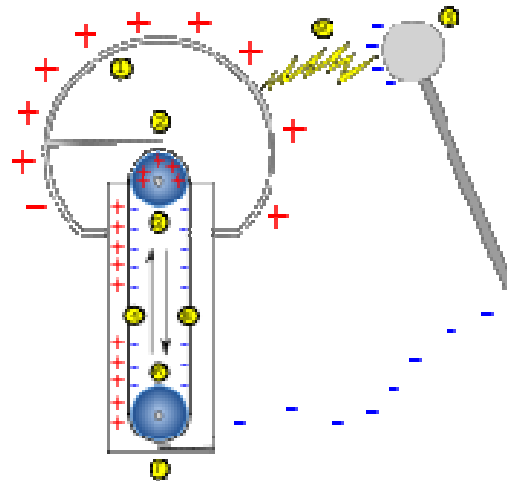
#### La scoperta di Faraday

Nel 1836, Michael Faraday osservò che in un conduttore cavo, elettricamente carico, le cariche si concentrano sulla superficie esterna e non hanno alcuna influenza su ciò che si trova all'interno. Per dimostrarlo costruì una stanza rivestita da un foglio metallico e applicò dall'esterno l'alta tensione prodotta da un generatore elettrostatico. Utilizzando un elettroscopio mostrò che all'interno della stanza non era presente carica elettrica.

#### 7.4. Generatore di Van Der Graaf



Un generatore di Van der Graaf.



Schema del generatore.

Il generatore di Van der Graaf è una macchina elettrostatica in grado di accumulare una notevole quantità di carica elettrica in un conduttore, creando tra questo ed un elettrodo di riferimento, solitamente messo a terra, un'altissima tensione (si può arrivare fino a milioni di Volt).

Fu inventata verso la fine del 1929 dal fisico statunitense Robert Van der Graaf (1901-1967), da cui prende il nome.

Per la sua relativa semplicità è comune nei laboratori di molte scuole, ma ha anche applicazioni pratiche ad esempio in fisica nucleare, dove l'elevata differenza di potenziale generata viene utilizzata per accelerare particelle dotate di carica elettrica.

##### Principio di funzionamento

Un generatore di questo tipo è composto sostanzialmente da una cinghia di materiale isolante (caucciù) tesa tra due pulegge e mantenuta in rotazione da un motore. La cinghia viene caricata per induzione da una serie di punte metalliche (effetto punta) poste in prossimità di una delle due pulegge e collegate ad un generatore di tensione continua (ad esempio una batteria). Queste cariche vengono poi trasportate per azione del motore all'interno di un conduttore di forma sferica isolato, dove un secondo pettine metallico collegato elettricamente alla sfera le trasferisce sulla superficie di quest'ultima. Se non si spegne la macchina il processo si arresta quando la tensione della sfera è sufficiente a produrre scariche elettriche attraverso gli isolanti di sostegno (rottura dielettrica) o attraverso l'aria circostante (ionizzazione dell'aria).

Il tipico esperimento che si fa nelle scuole è quello di avvicinare alla sfera in tensione un conduttore posto a massa e di osservare la scarica che si genera in modo analogo ai fulmini.

### Tensione di funzionamento

In questo tipo di generatori si raggiungono tensioni che sono proporzionali al raggio dell'elettrodo ad alta tensione. Una macchina con elettrodo di un metro di raggio, può raggiungere una tensione massima di  $10^6$  V. Per raggiungere tale tensione occorre però che l'elettrodo sia distante da ogni altro oggetto e che l'aria sia quasi priva di umidità. Per ottenere tale caratteristica, dopo il 1935, tutti i generatori sono stati realizzati racchiusi in un recipiente cilindrico di acciaio contenente un gas (aria deumidificata oppure elio), ad una pressione di 10-20 atm. Con la pressione infatti aumenta la capacità del gas di sopportare campi elettrici elevati senza dar luogo a scintille. Dopo il 1940 sono stati usati gas diversi dall'aria (ossido di carbonio, freon, azoto), e realizzati generatori con tensioni da 1 MV fino a 5,5 MV (con contenitore di 2,5 m di diametro e 8 m di altezza).

### 7.5. Resistenza

La resistenza elettrica è la grandezza fisica che misura la tendenza di un componente elettrico di opporsi al passaggio di una corrente elettrica quando è sottoposto ad una tensione.

Questa opposizione si manifesta con un riscaldamento del componente (Effetto Joule) e dipende dal materiale con cui è realizzato, dalle sue dimensioni, dalla sua temperatura e (nel caso di correnti alternate) e dalla frequenza

La resistenza determina l'intensità della corrente che fluisce attraverso il circuito, ai cui capi è applicata una differenza di potenziale.

Con il termine resistenza  $R$  si definisce il rapporto fra la tensione agli estremi di un conduttore e l'intensità della corrente  $I$  che fluisce al suo interno.

$$R = V / I$$

Nel SI l'unità di misura della resistenza è l'ohm ( $\Omega$ ) quindi  $1 \Omega = 1 \text{ V} / 1 \text{ A}$

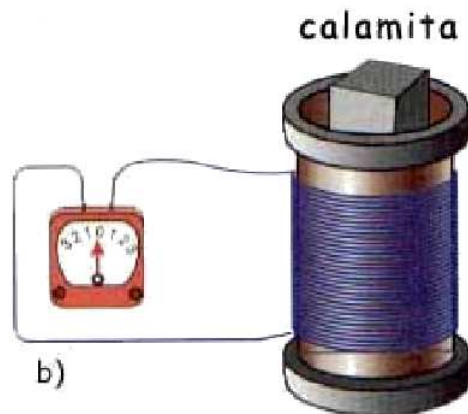
Un ohm è la resistenza elettrica fra due punti di un conduttore, attraverso il quale passa una corrente di 1 ampere, quando gli viene applicata una differenza di potenziale di 1 volt.

### 7.6. L'induzione elettromagnetica e la dinamo

Costruendo gli elettromagneti vedremo che con la corrente elettrica che circola in una bobina si può produrre un campo magnetico (effetto magnetico della corrente elettrica).

Subito dopo questa scoperta, gli scienziati si chiesero se non fosse possibile il fenomeno inverso: un campo magnetico, posto nelle vicinanze di un conduttore, può produrre corrente elettrica?

La risposta affermativa arrivò nel 1831 grazie agli esperimenti del fisico inglese Faraday: egli dimostrò che un campo magnetico in movimento tra le spire di una bobina crea una corrente elettrica.

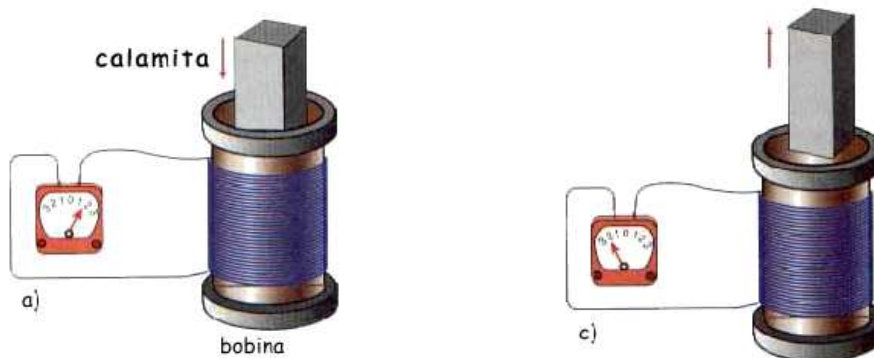


Costruiamo una bobina avvolgendo del filo di rame isolato su un tubo di cartone o di plastica. Inseriamo nel tubo una calamita e colleghiamo le due estremità del filo a un galvanometro (strumento che misura correnti molto deboli); lo strumento non segna passaggio di corrente perché nel circuito che abbiamo costruito non è presente alcun generatore (fig. b).

Se invece introduciamo velocemente nella bobina una calamita (fig. a) osserveremo che l'ago del galvanometro si muoverà in una certa direzione, segnalando così un passaggio di corrente.

Anche quando si estrae la calamita dalla bobina (fig. c) il galvanometro rileva un passaggio di corrente ma, questa volta, nel verso opposto a prima.

Questo stesso effetto si riproduce se, tenendo ferma la calamita, muoviamo la bobina avvicinandola o allontanandola da essa.



Se però la calamita (nel primo caso) o la bobina (nel secondo caso) non sono in movimento, nel filo non circola corrente (fig. b).

Possiamo concludere che, il movimento di una calamita rispetto ad un avvolgimento di filo di rame o di un avvolgimento rispetto ad una calamita, produce una corrente elettrica che dura fino a quando dura il movimento.

Questa corrente è detta corrente indotta ed il fenomeno che la produce si chiama induzione elettromagnetica.

La scoperta dell'induzione elettromagnetica fu importantissima e lo è ancora adesso: fino ad allora, gli unici generatori di corrente erano le pile; con tale scoperta, invece, divenne possibile costruire meccanismi capaci di sfruttare l'energia meccanica di un oggetto in movimento per produrre quantità rilevanti di energia elettrica.

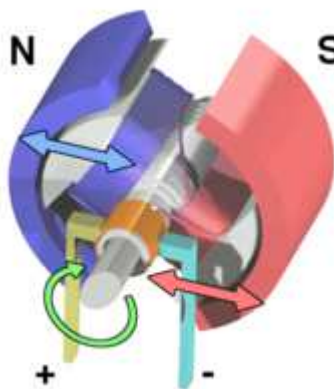
## **Alternatore**



Molti generatori di corrente, dalla piccola "dinamo" che fa accendere il fanale della bicicletta, agli enormi alternatori in funzione nelle centrali elettriche, si basano sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica.



La dinamo della bicicletta è in realtà un piccolo alternatore. Nell' immagine sotto si possono osservare le parti che la compongono.



Una semplice costruzione di dinamo

### Descrizione

Nella sua forma più semplice un alternatore consiste di una spira conduttrice (rotore) immersa in un campo magnetico (generato ad esempio da una coppia di magneti permanenti, i quali formano lo statore) e messa in rotazione da un albero. Per la legge di Faraday per l'induzione un conduttore che si muove in un campo magnetico (purché non parallelamente ad esso) vede nascere una forza elettromotrice indotta ( $f_{EM}$ ); chiudendo quindi la spira su un carico elettrico (ad esempio una lampadina, o un accumulatore) si può misurare una corrente scorrere nella spira stessa e nel carico (la lampadina si accende).

### Campi di utilizzo

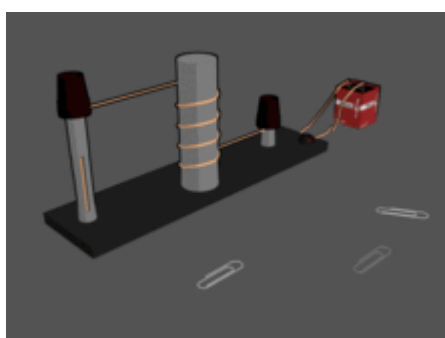
Le dinamo sono oggi utilizzate soprattutto per le piccole potenze. La dinamo è una macchina elettrica reversibile ovvero può funzionare anche al contrario: a partire da energia elettrica produrre lavoro meccanico come motore elettrico. Se infatti si invia ai morsetti del collettore una tensione continua la corrente che scorre nelle spire interagisce con il campo magnetico dello statore generando una forza (detta forza di Lorentz) tangenziale su tutte le spire del rotore, causando la rotazione del rotore stesso e generando così una coppia motrice sull'albero di uscita. Questo è detto motore in CC ed è utilizzato per potenze da pochi watt (nei modellini radiocomandati e in tutti gli utensili ed elettrodomestici a batteria) fino ad alcuni megawatt (in tutte le motrici ferroviarie escluse quelle di ultima generazione, che utilizzano motori asincroni trifase).

### Invenzione

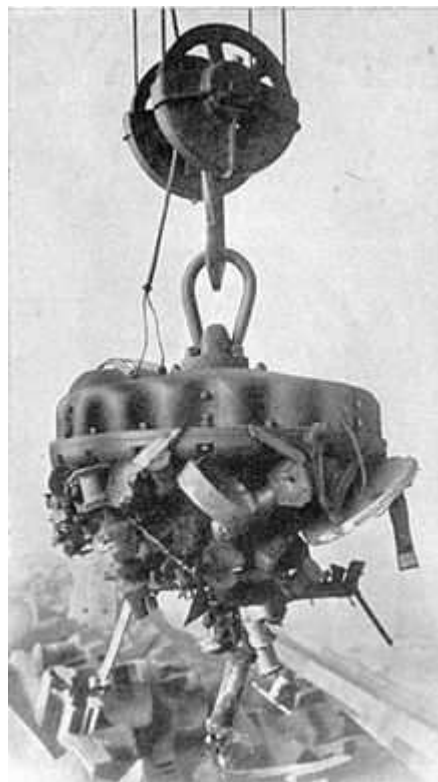
Prima dell'invenzione della dinamo l'unico modo di produrre corrente elettrica era tramite la pila e la batteria piombo-acido, metodi molto costosi e poco efficienti, tanto che l'unico utilizzo pratico dell'elettricità riguardava unicamente il telegrafo. L'origine del concetto di elettricità prodotta mediante moto si fa risalire a quando nel 1831 Michael Faraday e Joseph Henry notarono che un conduttore spostandosi all'interno di un campo magnetico produceva corrente elettrica. La prima dinamo basata sui principi di Faraday fu costruita nel 1860 in Italia da Antonio Pacinotti. In Francia l'invenzione della dinamo è attribuita a Zénobe Gramme e datata nel 1869. L'invenzione di Pacinotti (anche detta anello di Pacinotti) viene considerata solo un prototipo. La macchina era costituita da un magnete che veniva fatto ruotare con una manovella. I poli nord e sud del magnete passavano ripetutamente davanti a un pezzo di acciaio avvolto da un cavo elettrico, producendo impulsi di corrente in direzioni opposte. Dopo l'aggiunta di un convertitore, Pacinotti fu capace di trasformare la corrente alternata in corrente continua. L'apparato fu chiamato dal suo inventore macchina magnetoelettrica.

Nel 1870 l'accoppiamento della dinamo alla turbina idraulica diede avvio alla produzione commerciale di energia elettrica. Ciò diede impulso allo sviluppo della ricerca sugli utilizzi pratici dell'elettricità degli anni seguenti, i cui capofila furono Thomas Alva Edison e Nikola Tesla ("seconda rivoluzione industriale").

### 7.7. Elettromagneti



Rappresentazione di un elettromagnete



Elettromagnete usato per la raccolta del ferro

L'elettromagnete, chiamato anche elettrocalamita, è un elemento elettrotecnico costituito da un nucleo in materiale ferromagnetico (di solito ferro dolce) su cui è avvolto un solenoide, ovvero una bobina di molte spire di filo elettrico. Lo scopo dell'elettromagnete è di generare un campo magnetico da una corrente elettrica e si differenzia per questo dall'induttore, dove il fenomeno dell'induttanza è sfruttato per accumulare energia.

Il primo elettromagnete fu costruito nel 1824 dall'ingegnere britannico William Sturgeon (1783 - 1850), come diretta conseguenza delle relazioni tra correnti e magnetismo scoperte pubblicate da Hans Christian Ørsted del 1820. Un ruolo fondamentale nello studio e nello sviluppo di questo dispositivo elettrico si deve al fisico statunitense Joseph Henry .

#### Caratteristiche

L'intensità del campo magnetico generato può essere calcolata con le regole dell'induzione magnetica ed essenzialmente:

- è proporzionale al numero di spire che costituiscono l'avvolgimento, L'aumento del numero di spire e quindi della lunghezza del filo riduce però la corrente circolante (a parità di tensione) in conseguenza della legge di Ohm, per ovviare al problema si deve aumentare la sezione del filo.
- è proporzionale alla corrente circolante nell'avvolgimento; l'attraversamento di corrente, però, genera calore (effetto Joule); bisogna quindi porvi rimedio con lo smaltimento.

Per quanto riguarda la forza sviluppata dal campo magnetico, la sua intensità diminuisce con il quadrato della distanza tra le parti, per questo l'elettromagnete è efficace solo a breve distanza.

## 7.8. Trasformatori

Il trasformatore è una macchina elettrica statica (perché non contiene parti in movimento) e reversibile, che serve per variare (trasformare) i parametri in ingresso (tensione e intensità di corrente) rispetto a quelli in uscita, mantenendo costante la potenza elettrica. Il trasformatore trasferisce energia elettrica da un circuito elettrico (“primario”) a un altro (“secondario”) tramite dei conduttori accoppiati induttivamente: gli avvolgimenti del trasformatore. Una corrente elettrica variabile nell'avvolgimento primario genera un flusso magnetico variabile nel nucleo del trasformatore e di conseguenza un campo magnetico variabile attraverso l'avvolgimento secondario (legge di Faraday e legge di Lenz). Questo campo magnetico variabile induce una forza elettromotrice, o tensione, nell'avvolgimento secondario. Questo effetto è chiamato mutua induzione. Il trasformatore è una macchina in grado di operare essenzialmente in corrente alternata, perché in genere sfrutta i principi dell'elettromagnetismo legati ai flussi variabili. Il rendimento di un trasformatore è molto alto e le perdite sono molto basse (nel ferro, per effetto dell'isteresi e delle correnti parassite, e nel rame, per effetto Joule). Vi è da aggiungere che nel caso di circuiti interamente superconduttori un trasformatore può operare senza limitazione di frequenza inferiore. Se un carico elettrico è collegato all'avvolgimento secondario, una corrente elettrica vi scorre e l'energia, tramite il trasformatore, viene trasferita dal circuito primario al carico. In un trasformatore ideale, la tensione indotta nell'avvolgimento secondario è in proporzione alla tensione primaria ( $V_P$ ), ed è data dal rapporto fra il numero delle spire dell'avvolgimento secondario ( $N_S$ ) e il numero di spire dell'avvolgimento primario ( $N_P$ ) come segue:

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P}$$

Con un'appropriata scelta del rapporto delle spire, il trasformatore consente quindi che una tensione a corrente alternata sia aumentata facendo  $N_S$  maggiore di  $N_P$ , oppure diminuita facendo  $N_S$  minore di  $N_P$ .

Nella grande maggioranza dei trasformatori, gli avvolgimenti si trovano attorno a un nucleo ferromagnetico, essendo i trasformatori in aria delle eccezioni.

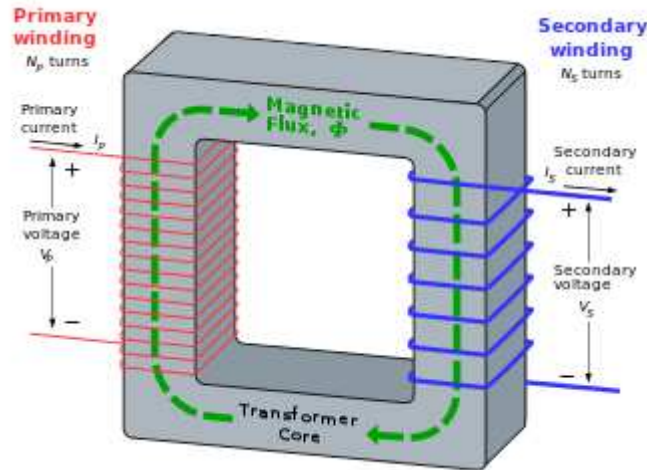
### Principio di funzionamento

Il trasformatore più semplice è costituito da due conduttori elettrici (solenoidi) avvolti su un anello di materiale ferromagnetico detto nucleo magnetico. L'avvolgimento al quale viene fornita energia viene detto primario, mentre quello dal quale l'energia è prelevata è detto secondario. I trasformatori sono macchine reversibili, per cui l'avvolgimento primario potrebbe essere anche visto come secondario e viceversa.

Quando sul primario viene applicata una tensione elettrica alternata sinusoidale, per effetto dell'induzione magnetica si crea nel nucleo un flusso magnetico con andamento sinusoidale. Per la legge di Faraday-Neumann-Lenz, questo flusso variabile induce nel secondario una tensione sinusoidale.

Il trasformatore è fondato su due principi:

- una corrente elettrica variabile produce un campo magnetico;
- un flusso variabile nel tempo di campo magnetico induce all'interno di un conduttore elettrico una tensione, a sua volta variabile nel tempo, ai suoi capi. Variando la corrente nell'avvolgimento primario varia il campo magnetico sviluppato. Il flusso magnetico induce una tensione nell'avvolgimento secondario.



Trasformatore ideale

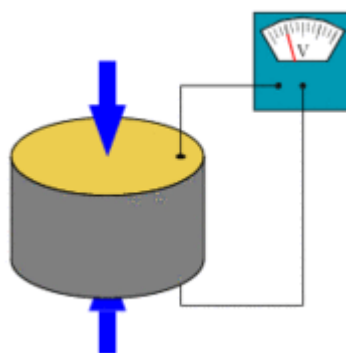
### Perdite di energia

Un trasformatore ideale non avrebbe nessuna perdita di energia e sarebbe efficiente al 100%. Nei trasformatori reali l'energia viene dissipata negli avvolgimenti, nuclei e strutture circostanti. I trasformatori più grossi sono generalmente i più efficienti: quelli progettati per la distribuzione dell'energia elettrica normalmente hanno un'efficienza di conversione del **98%**.

Trasformatori sperimentali, dotati di avvolgimenti superconduttori, conseguono efficienze del **99,85%**. Sebbene l'aumento di efficienza sia piccolo, influisce notevolmente sulle perdite dei grandi trasformatori, diminuendole.

Un piccolo trasformatore in generale offre un'efficienza dell'**85%**, con perdite notevoli addirittura quando non alimenta nessun carico. Sebbene le perdite di energia individuali siano piccole, le perdite complessive da parte dell'elevato numero di carichi è consistente.

### 7.9. Piezoelettricità



Un disco piezoelettrico genera una differenza di potenziale quando deformato

La piezoelettricità (la parola deriva dal greco  $\pi\acute{\epsilon}\zeta\epsilon\iota\nu$ , premere, comprimere) è la proprietà di alcuni cristalli di generare una differenza di potenziale quando sono soggetti ad una deformazione meccanica. Tale effetto è reversibile e si verifica su scale dell'ordine dei nanometri.

Il funzionamento di un cristallo piezoelettrico è abbastanza semplice: quando viene applicata una pressione (o decompressione) esterna, si posizionano, sulle facce opposte, cariche di segno opposto. Il cristallo, così, si comporta come un condensatore al quale è stata applicata una differenza di potenziale. Se le due facce vengono collegate tramite un circuito esterno, viene quindi generata una corrente elettrica detta corrente piezoelettrica. Al contrario, quando si applica una differenza di potenziale al cristallo, esso si espande o si contrae.

### Applicazioni

La caratteristica di produrre una differenza di potenziale in seguito alla compressione ha diverse applicazioni industriali. La più comune riguarda i normali accendigas da cucina nonché accendini "usa e getta" dove un cristallo sottoposto manualmente a pressione tramite un tasto fa scoccare una scintilla senza bisogno di pile di alimentazione.

I materiali piezoelettrici vengono inoltre impiegati nella costruzione degli elementi elastici, organi fondamentali di alcuni strumenti atti alla misurazione delle vibrazioni meccaniche, detti strumenti sismici.

Un'applicazione analoga trova spazio in ambito musicale, dove si utilizzano i cosiddetti pick-up piezoelettrici, dispositivi in grado di rilevare le variazioni di pressione esercitate da una corda in vibrazione di uno strumento musicale generando un segnale elettrico che poi viene amplificato.

Altri strumenti in cui tali materiali vengono usati sono i microfoni, il più noto dei quali è il microfono al quarzo, il cui funzionamento si basa sul rilevamento delle onde sonore che sono determinate dal susseguirsi di zone di compressione e rarefazione del mezzo in cui si propagano; tali onde di pressione, captate dal microfono, determinano una variazione di potenziale, che viene poi filtrata e amplificata..

In maniera opposta ai microfoni, i materiali piezoelettrici trovano applicazione come altoparlante (nelle vecchie radio "a cristallo" erano frequenti gli auricolari piezoelettrici), funzionando in maniera opposta, le cui onde sonore vengono generate a seconda della differenza di potenziale ivi applicata.

Un altro tipico materiale piezoelettrico è la galena, usata come rilevatore nelle radio a galena (in seguito rimpiazzate dai diodi al germanio), che funzionavano senza bisogno di batterie o generatori di forza elettromotrice.

Altri strumenti in cui i materiali piezoelettrici vengono usati sono gli orologi; ancora una volta il materiale più usato è il quarzo: sono molto diffusi gli orologi al quarzo piezoelettrico, strumenti in cui la compressione periodica del materiale determina una variazione altrettanto periodica della tensione. Il periodo o la frequenza del segnale in uscita opportunamente trattato, viene usato come unità base per contare il tempo; il segnale elettrico, a dire il vero, viene inviato ad una successione di circuiti detti divisori di frequenza, così da poter scegliere un segnale di tensione alla voluta frequenza (in effetti il segnale all'uscita del sistema lamina di quarzo ha una frequenza elevata, normalmente per gli orologi è pari a 32768 cicli al secondo; per tale motivo vengono usati i circuiti divisori di frequenza che, se posti in serie, sono in grado di ridurre la frequenza). Il segnale elettrico così ridotto viene infine inviato ad un contatore elettronico, attraverso il quale è possibile, se il comando è esterno, misurare l'intervallo di tempo intercorso tra due eventi oppure, se si basa sul conteggio del numero dei picchi di tensione, è in grado di determinare il numero degli eventi in un certo periodo di tempo fissato.

La piezoelettricità, infine, è sfruttata in buona parte delle stampanti a getto d'inchiostro attualmente in commercio.

### 7.10. Forno a microonde



Un tipico forno a microonde domestico

Il forno a microonde è un tipo di forno da cucina in cui la cottura del cibo è principalmente dovuta all'effetto riscaldante delle microonde.

Questo modo di riscaldamento è completamente diverso rispetto al metodo convenzionale: nel caso di cibi molto ricchi di acqua o lipidi al loro interno, l'interno stesso si riscalderà più velocemente rispetto allo strato esterno più secco, che assorbe dunque meno radiazione a microonde. Al contrario, in un forno elettrico normale il calore può passare per irraggiamento e conduzione solo dagli strati più esterni a quelli interni.

#### Storia

La possibilità di cuocere i cibi con le microonde fu scoperta negli Stati Uniti da Percy Spencer, impiegato della Raytheon, mentre realizzava magnetron per apparati radar. Un giorno, mentre lavorava su un radar acceso notò improvvisamente che una tavoletta di cioccolato che aveva in tasca si era sciolta. Detentore di 120 brevetti, Spencer intuì immediatamente cosa era accaduto. Il primo cibo che provò intenzionalmente a cuocere fu il pop corn, successivamente provò con un uovo che però esplose in faccia a uno degli sperimentatori.

Nel 1946 la Raytheon brevettò il processo di cottura a microonde e nel 1947 realizzò il primo forno commerciale, chiamato Radarange. Era alto 1,8 metri, pesava 340 kg, aveva un sistema di raffreddamento ad acqua e produceva una potenza in radioonde di 3 kW, che è da 2 a 4 volte la potenza dei forni domestici attuali. Il successo fu elevato e per espandere il mercato la Raytheon acquistò la Amana, produttrice di elettrodomestici dell'Iowa. Negli anni sessanta la holding Litton Industries acquistò da Studebaker gli stabilimenti Franklin Manufacturing per la produzione di magnetron e forni a microonde simili al Radarange. La Litton sviluppò quindi la configurazione ancora comune nei forni moderni, anche se il nome fu particolarmente noto nell'ambito della ristorazione. L'alimentazione del magnetron fu modificata in modo che questo potesse sopravvivere indefinitamente a un funzionamento senza carico. Il nuovo prodotto fu esposto in una fiera commerciale a Chicago, aprendo la strada alla grande diffusione del forno a microonde in tutte le cucine (soprattutto negli Stati Uniti).

Si stima che circa il 95% delle famiglie americane abbia un forno a microonde.

In Italia il forno a microonde inizia a fare capolino piuttosto tardi, anche per via di vari pregiudizi contro questa tecnologia. I forni a microonde in Italia iniziano a essere pubblicizzati negli anni ottanta. Tuttavia è solo all'alba del terzo millennio che il forno a microonde in Italia ha conosciuto una diffusione di massa, e inizia a essere considerato un apparecchio che non serve solamente a scaldare o scongelare i cibi, ma può essere usato anche per la cottura. Tale larga diffusione è stata fortemente agevolata dall'abbattimento dei costi per i modelli più semplici, dalle varie migliorie e funzioni aggiunte via via nel tempo ai modelli più evoluti, e al diminuire dei pregiudizi su questa tecnologia (anche grazie a pubblicazioni e trasmissioni televisive).

### Descrizione e funzionamento



Un magnetron



Forno a microonde aperto: si vede il trasformatore in basso ed il magnetron (coperto da una calotta metallica) immediatamente sopra

Un comune forno a microonde consiste delle parti seguenti:

- un magnetron;
- un circuito elettronico di controllo e alimentazione del magnetron;
- una guida d'onda;
- una camera (o tecnicamente cavità) di cottura;
- una rete metallica (sullo sportello).

Il magnetron, alimentato ad alta tensione in corrente continua di 2.000 volt, genera un flusso di microonde, normalmente alla frequenza di 2,450 gigaHz (lunghezza d'onda di 12,2 cm) con una potenza solitamente compresa tra 800 W ed 1 kW, che la guida d'onda invia alla camera di cottura. L'acqua, i grassi e i carboidrati che costituiscono il cibo assorbono l'energia delle microonde in un processo chiamato riscaldamento dielettrico, qui di seguito descritto: le molecole suddette sono essenzialmente dei dipoli, ovvero hanno una estremità con carica elettrica positiva e un'altra con carica negativa; sono per questo trascinate dal campo elettrico alternato delle microonde e indotte a ruotare. Questo movimento genera calore attraverso forze di attrito con le molecole vicine, e si ha quindi un riscaldamento.

Il riscaldamento avviene anche per il fenomeno della risonanza (v.) delle molecole d'acqua alla frequenza delle microonde, dato che la frequenza di risonanza dell'acqua è 2,4 gigahertz. Le microonde riscaldano con più efficienza l'acqua, ma in misura minore anche grassi, zuccheri e ghiaccio.

La camera di cottura è sostanzialmente una gabbia di Faraday che impedisce la fuoriuscita di microonde.

Il portello del forno è di vetro per permettere la visione della pietanza all'interno, ma include uno strato di rete metallica fine come schermo elettromagnetico. Poiché la larghezza delle maglie è inferiore alla lunghezza d'onda delle microonde (12 cm), la radiazione non può attraversare la rete mentre la luce, di lunghezza d'onda molto più piccola delle maglie, può passare. Il meccanismo di chiusura del portello include appositi interruttori che spengono il magnetron in caso di apertura evitando la fuoriuscita di microonde.

Sebbene i forni prevedano la regolazione della potenza di cottura, il magnetron viene fatto funzionare sempre a pieno regime per mantenere al massimo l'efficienza. La modulazione della potenza viene fatta regolando il rapporto tra il periodo di accensione ed il periodo di spegnimento secondo una tecnica chiamata modulazione di larghezza di impulso. Per ottenere ad esempio una potenza pari alla metà di quella massima si accende il magnetron per pochi secondi spegnendolo poi per un tempo identico e così via fino al termine del tempo prefissato di cottura.

Considerando costante l'energia irradiata dal magnetron, vi è un rapporto di proporzionalità diretta fra la massa da riscaldare ed il tempo necessario, cioè a parità di energia usata se si raddoppia la quantità di cibo inserita nel forno si impiegherà il doppio del tempo per ottenere il riscaldamento voluto, oppure a parità di energia e di tempo, il doppio del cibo si scalderà la metà.

### **Vantaggi e limiti in cucina**

Il principale vantaggio del forno a microonde rispetto ai sistemi di cottura tradizionali risiede nella grande rapidità. L'energia, infatti, viene inviata direttamente nell'interno del cibo trasportata dalle microonde e non è necessario riscaldare l'aria che normalmente scalda anche il contenitore del cibo e le pareti del forno come avviene in forno elettrico o a gas. È possibile scongelare cibi surgelati in breve tempo e cuocerli immediatamente, mentre il piatto di portata resta freddo fino a quando il cibo divenuto caldo lo scalda per contatto. Un altro vantaggio è quello di poter usare contenitori di plastica usa e getta, purché siano realizzati con un materiale plastico idoneo del tutto trasparente alle microonde, oltre che naturalmente adatti all'uso alimentare.

Uno svantaggio è invece il riscaldamento non omogeneo ma concentrato in particolari zone che assorbono l'energia delle microonde. Tale problema viene superato facendo ruotare il cibo durante la cottura. Un buon accorgimento è quello di posizionare la pietanza non al centro del piatto rotante ma da un lato.

Un limite per i forni di prima generazione, che portava molti cuochi professionisti a considerare il forno a microonde di scarsa utilità, era quello di cuocere a temperatura relativamente bassa, non idonea per i tipici prodotti da forno come torte, arrostiti ben dorati e altri cibi. Questo limite venne superato abbinando alle microonde un sistema a raggi infrarossi (grill) in grado di dorare la superficie dei cibi e conferire maggiore sapore. Forni di questo tipo sono detti combinati. Dalla penultima generazione in avanti, molti forni dispongono di un'ulteriore funzione, comunemente nota come crisp (nome commerciale di un noto produttore, ma con altri nomi la funzione è comunque presente in tutte le marche), la quale, in unione al grill e alle microonde, migliora drasticamente la cottura di particolari piatti; parte dell'energia emessa viene assorbita infatti da una speciale teglia estraibile in alluminio antiaderente che contiene la pietanza, distribuendo così il calore in modo uniforme. La combinazione di questi tre modi di riscaldamento garantisce una cottura paragonabile a quella del forno tradizionale.

L'ultima generazione di forni abbina alle microonde e al grill anche la cottura tipica di un forno tradizionale ventilato o statico, che può essere abbinata o meno alle microonde. Questi apparecchi di fascia alta, particolarmente versatili, sono in grado quindi di sostituire completamente il forno tradizionale sia per quanto riguarda i risultati di cottura sia per quanto riguarda i tipi di cibo che vi si possono inserire, mantenendo (in tutti i casi ove è possibile l'abbinamento) anche i vantaggi e i tempi ridotti tipici della cottura a microonde.

Alcuni cibi non possono essere cotti nel microonde, come le uova che esplodono se inserite intere. L'uovo esplode perché al suo interno evapora un po' d'acqua e il vapore, che occupa più spazio del liquido, causa un aumento della pressione interna e provoca quindi la rottura improvvisa del guscio; è per questo motivo che le pietanze "ermeticamente chiuse", come patate e mele, vanno bucherellate con uno stuzzicadenti prima di essere cucinate in un forno a microonde per permetterne la fuoriuscita del vapore durante la cottura.

Tuttavia la tecnologia ha rimediato al problema delle uova che esplodono progettando particolari contenitori a doppia camera che in pratica realizzano una cottura a vapore: le microonde riscaldano l'acqua nella camera inferiore che sale in forma di vapore nella camera superiore contenente le uova. Le onde non possono raggiungere direttamente le uova perché la camera superiore è in metallo e comunica con quella inferiore solo attraverso piccoli fori. Sempre riguardo alla cottura a vapore, alcuni forni di fascia alta dispongono di una vaporiera che permette di cuocere cibi come pesce o verdure abbinando le microonde e il vapore; il forno stesso in base ad un sensore di umidità rileva quando l'acqua della vaporiera (grazie alle microonde) ha raggiunto l'ebollizione e da quel momento fa partire il timer della cottura a vapore vera e propria del cibo. Come per la cottura a microonde normale, questo tipo di cottura permette, in pochissimi minuti, di cuocere senza l'uso di grassi o condimenti e mantenendo gran parte del sapore e delle proprietà naturali dei cibi.

Il forno a microonde si presta ottimamente anche per il riscaldamento e la cottura di pietanze liquide, per portare l'acqua all'ebollizione e per scongelare i cibi. Nei forni di migliore qualità un microprocessore permette di impostare il peso dell'alimento per determinare automaticamente il tempo di scongelamento.

### Rendimento

In un forno a microonde non tutta l'energia elettrica assorbita è convertita in microonde. Un tipico forno domestico assorbe 1100 W producendo 700 W di microonde. I rimanenti 400 W sono dissipati come calore dai componenti del forno, principalmente dal magnetron, che è raffreddato da una ventola. Minori perdite sono dovute alla lampadina di illuminazione del forno, al trasformatore di alimentazione, alla ventola di raffreddamento, al motore del piano rotante e ai vari circuiti di controllo. Quasi tutto questo calore viene espulso all'esterno come aria calda e non contribuisce alla cottura.

Normalmente l'energia a microonde generata dal magnetron viene tutta assorbita dai cibi in cottura. Se la camera di cottura è vuota o contiene troppo poco cibo, l'energia ritorna al magnetron che può surriscaldarsi o danneggiarsi e costituire un possibile principio di incendio. Per questo motivo si deve evitare di accendere il forno a vuoto.

### Pericoli immediati



DVD esposto a microonde

I liquidi riscaldati al microonde in contenitori dalle pareti lisce possono raggiungere lo stato supercritico, ovvero una condizione in cui la temperatura è superiore di alcuni gradi a quella di ebollizione ma la sostanza rimane liquida. Quando il liquido viene in qualche modo perturbato, per esempio afferrando il contenitore per estrarlo dal forno, l'ebollizione può iniziare in modo esplosivo e può essere causa di gravi ustioni.

I contenitori chiusi, così come le uova, quando riscaldati nel microonde possono esplodere a causa della pressione del vapore che si produce all'interno.

Diversi materiali, se riscaldati troppo a lungo, possono carbonizzare e prendere fuoco. È consigliabile sorvegliare sempre il forno acceso.

Fogli di alluminio, stoviglie in ceramica decorate con metalli e oggetti contenenti metalli possono produrre scintille se esposti alle microonde. Il metallo può fondere e contaminare il cibo e si possono generare vapori tossici dai materiali investiti dalla scarica. Sotto l'effetto delle microonde, i compact disc si danneggiano formando sulla superficie una serie di motivi circolari, emettendo contestualmente fumi tossici.

Porre nel microonde oggetti in metallo solido, come per esempio un cucchiaino, è sicuro, purché sia presente cibo o acqua per assorbire le microonde riflesse dall'oggetto. Alcuni forni prevedono infatti tra gli accessori dei piani in metallo. Tuttavia l'utilizzo di materiali in metallo solido è generalmente sconsigliato a causa della difficoltà di discriminare il caso pericoloso da quello sicuro.

Più di ogni altro elettrodomestico, il forno a microonde presenta gravi insidie al suo interno ed è assolutamente da evitare l'apertura ed ogni tentativo di riparazione se non a tecnici specificamente preparati.

Le fonti di pericolo sono principalmente due:

- La presenza di un grosso condensatore che potrebbe mantenere una carica elettrica ad alta tensione in quantità letale anche per giorni, dopo lo spegnimento dell'apparecchio, se non è stato previsto un resistore di scarica ai suoi capi. Normalmente allo spegnimento questa energia si scarica sul magnetron in una frazione di secondo, ma ciò non è sempre certo, soprattutto nel caso di apparecchi guasti.
- L'emissione di microonde all'esterno dell'apparecchio, che può essere causa di ustioni e opacizzazione del cristallino con conseguente formazione di cataratta e cecità. Normalmente il portello del forno incorpora speciali interruttori di interblocco che spengono immediatamente il forno in caso di apertura. Per nessun motivo questi interruttori devono essere esclusi o manomessi e non si deve fare funzionare il forno in assenza dei pannelli di chiusura o se il portello di chiusura è rotto.

### Compatibilità elettromagnetica

Con la sempre maggiore diffusione delle reti wireless, che operano nel campo delle microonde a frequenze vicine a quelle usate nei forni, crescono le preoccupazioni per le interferenze che possono essere causate da questi apparecchi. Se da un lato è dimostrato che queste interferenze hanno scarsi effetti sulle comunicazioni Wi-Fi (quelle utilizzate dai PC), è stato altresì dimostrato che un forno a microonde può effettivamente disturbare le trasmissioni di alcuni apparecchi. Un esempio immediato sono i ripetitori di segnali televisivi che si utilizzano per trasmettere un segnale televisivo da una stanza all'altra. Poiché questi apparecchi sono solitamente collocati in cucina (di solito per poter ricevere il segnale del decoder anche nella TV di cucina), può capitare di osservare un forte disturbo sull'immagine se nel raggio di qualche metro dal ricevitore si trova un forno a microonde acceso.

Anche i radioastronomi hanno sollevato preoccupazioni per i disturbi che le pur minime perdite dei forni a microonde possono indurre nelle sensibilissime antenne utilizzate per ricevere i segnali a microonde dal cosmo.

### 7.11. Correnti parassite

Le correnti parassite o correnti di Foucault sono delle correnti indotte in masse metalliche conduttrici che si trovano immerse in un campo magnetico variabile o che, muovendosi, attraversano un campo magnetico costante o variabile. In ogni caso è la variazione del flusso magnetico che genera queste correnti.

Il fenomeno fu scoperto dal fisico francese Jean Bernard Léon Foucault nel 1851.

#### Descrizione del fenomeno

Le correnti parassite sono causate dal movimento (o variazione) del campo magnetico che attraversa un conduttore. Il moto relativo genera la circolazione di elettroni, cioè corrente, nel conduttore. Questi elettroni muovendosi in vortici generano a loro volta un campo magnetico in direzione opposta alla variazione del campo magnetico applicato. Il fenomeno si accentua:

- con l'aumentare del campo magnetico applicato
- con l'aumentare della conducibilità del conduttore attraversato dal campo magnetico
- con l'aumentare della velocità relativa tra campo magnetico e conduttore
- se il campo magnetico è variabile in modo periodico con l'aumentare della sua frequenza

In tal caso maggiore è l'intensità delle correnti vorticosi che si sviluppano e più forte il campo magnetico che esse generano (e si oppongono al campo magnetico originario).

Le correnti parassite generano perdite di energia riscaldando il conduttore (Effetto Joule). Questo fenomeno in molte applicazioni risulta negativo in quanto questa generazione di calore non ha nessun effetto utile. Ad esempio nei trasformatori e nei motori elettrici determina una diminuzione dell'efficienza.

Si possono attenuare queste perdite scegliendo un nucleo magnetico che abbia una bassa conducibilità (ad esempio: ferriti, acciaio al silicio) o suddividendo il nucleo magnetico in sottili strati, elettricamente isolati (laminazione). In questo modo gli elettroni non possono attraversare lo strato isolante tra i lamierini e l'area racchiusa dal loro percorso viene ridotta.

Quindi più grande è il numero di lamierini per unità di superficie, perpendicolari al campo magnetico applicato, maggiore è la riduzione delle correnti disperse. Non sempre le perdite per correnti parassite sono un fenomeno non voluto. Vi sono applicazioni che si basano su di esso, di cui diamo un breve elenco

#### Applicazioni

- Sistema di frenatura usato sui treni. Durante la frenata, alla ruota metallica viene applicato un campo magnetico mediante un elettromagnete che genera le correnti di dispersione nella ruota. Queste correnti trovano una resistenza nel fluire attraverso il metallo generando calore e questo aumenta l'attrito, permettendo frenature più intense con minore probabilità di slittamento delle ruote sui binari.
- Riciclaggio dei rifiuti: servono per separare le lattine di alluminio, inducendo in esse un campo magnetico.
- Test strutturali non distruttivi (NDT). Le correnti di dispersione sono usate comunemente per esami non distruttivi e per esaminare eventuali difetti in una grande quantità di strutture metalliche, ad esempio: scambiatori di calore, fusoliere e altre parti strutturali di aerei.
- Fornelli a induzione.
- Microfoni dinamici.
- Cercametalli.
- Sensori di prossimità.

### Fornello a induzione



Piano cottura con quattro fornelli a induzione



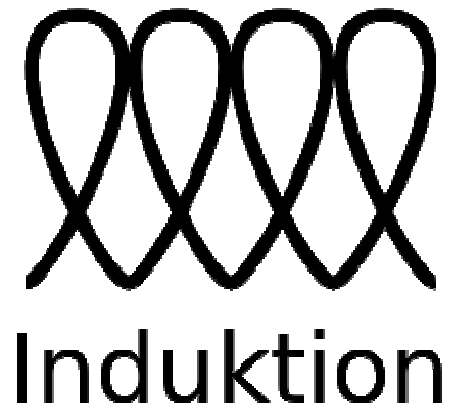
Interno di un piano cottura a induzione, con una delle 4 bobine in vista

### Funzionamento

Il fornello a induzione è un tipo di fornello che sfrutta il principio dell'induzione elettromagnetica per scaldare le pentole utilizzate per la cottura dei cibi. È costituito da una bobina entro cui viene fatta scorrere una corrente elettrica alternata o comunque variabile nel tempo. La corrente che scorre nella bobina produce un campo magnetico variabile nel tempo al pari della corrente che lo genera. Per la legge di Faraday, una variazione del flusso del campo magnetico nel tempo produce una forza elettromotrice indotta. Questa forza elettromotrice dà luogo a correnti elettriche indotte, chiamate correnti parassite, che finiscono per circolare nel materiale dei recipienti disposti sul fornello e, per effetto Joule, dissipano energia sotto forma di calore provocando il riscaldamento (si tratta di fenomeni dissipativi che, similmente all'attrito in meccanica, dissipano energia sotto forma di calore).

### Particolari caratteristiche necessarie al funzionamento

- Corrente variabile nel tempo (corrente alternata, non corrente continua), per creare un campo magnetico variabile nel tempo e quindi una forza elettromotrice indotta.
- Materiali con resistenza elettrica sufficientemente bassa da favorire il passaggio delle correnti parassite e da aumentarne l'intensità. Quindi i materiali metallici o comunque conduttori in genere sono ottimi per questo tipo di applicazioni, mentre gli isolanti elettrici sono pessimi.
- Materiali la cui resistenza elettrica non sia troppo bassa, perché le correnti indotte nel materiale dissipano energia termica solo in presenza di una resistenza, anche minima, ma pur sempre tale. Per cui i materiali superconduttori non andrebbero bene. Il compromesso sta nel fatto di riuscire a trovare un materiale con una resistenza elettrica né troppo alta né troppo bassa. Per questo scopo i metalli sono i materiali ideali.
- Materiali la cui forma favorisca lo scorrere delle correnti parassite. Poiché queste scorrono circolarmente, le forme ideali per i materiali da scaldare sono quelle circolari o a simmetrie circolari (dischi, tori), mentre le forme squadrate (quadrati, rettangoli, triangoli) sono meno efficienti e le forme lineari o dal fondo non liscio o irregolare sono pessime.



Trasferimento di energia attraverso fogli di giornale senza rischi di combustione

Il simbolo del solenoide al di sotto di una pentola indica l'idoneità alla cottura a induzione.

### Vantaggi

- Assenza di fiamme e dei rischi a esse legati
- Assenza di emissioni dovute alla combustione
- Assenza di rischi legati a perdite di gas
- Se nel locale cucina non sono presenti altri apparecchi a gas viene meno l'obbligo di avere un'apertura di ventilazione a norma, con conseguente risparmio energetico nei mesi in cui è attivo il riscaldamento.
- Efficienza elevata (90%) con conseguente risparmio energetico
- Cottura uniforme, dovuta alla diffusione omogenea del calore su tutto il fondo della pentola
- Velocità di riscaldamento
- Possibilità di regolare la potenza con elevata precisione
- Nessuna parte del piano si scalda (la pentola stessa si scalda ma il piano resta freddo e anche se venisse toccato non causerebbe ustioni)
- Nessun rischio di combustione o carbonizzazione dei cibi o dei liquidi accidentalmente caduti sul piano
- Le zone di cottura dispongono di riconoscimento automatico della pentola; si attivano esclusivamente in presenza di pentolame con fondo magnetico e si disattivano non appena il pentolame viene tolto
- Impossibilità di scottarsi o di subire folgorazioni
- Comodità nella pulizia del piano in vetroceramica, completamente liscio
- Stabilità al ribaltamento delle pentole, che poggiano su un piano completamente liscio
- Se utilizzato con energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili, risulta una modalità di cucina ecologica.

### Svantaggi

- Per un uso intensivo è necessario un allacciamento superiore ai 3 kW che rappresenta, normalmente, lo standard per le forniture di energia elettrica a utenti privati in Italia. Un allacciamento da 4,5 kW o 6 kW è possibile, ma comporta un leggero aggravio di costi fissi in bolletta e un costo una tantum per il passaggio a potenza superiore. Soprattutto, in tal caso necessita di una verifica dell'impianto elettrico ed eventuale conseguente adeguamento delle linee di alimentazione. Molti dei piani di cottura venduti oggi in Italia dispongono di funzioni per limitare la potenza massima assorbita in modo da poter essere utilizzati tranquillamente anche con un allacciamento da 3 kW.

- Costo molto elevato dei piani di cottura rispetto ai piani tradizionali. Nel corso del tempo si sono comunque resi disponibili piani a induzione a prezzi paragonabili a quelli a gas.
- Richiede l'uso di pentole adatte (in genere sul fondo è presente il simbolo del solenoide), a fondo piatto e in materiale ferromagnetico. Quelle in ceramica possono essere usate a patto di interfacciarle attraverso un adattatore o pannello ferromagnetico: poiché, in quest'ultimo caso, la trasmissione per calore avviene per contatto, si perde, però, l'efficienza nel trasferimento dovuto ai campi elettromagnetici.
- L'operatività dipende dalla presenza di tensione di rete: l'elettrodomestico non può funzionare, ad esempio, durante un black-out. Va detto che però anche alcune moderne cucine a gas dipendono, in qualche misura, dalla tensione di rete, come, ad esempio, per i dispositivi di ignizione.
- I campi elettromagnetici possono interferire con impianti elettromedicali (come, ad esempio, il pacemaker cardiaco): i soggetti portatori devono evitare il contatto ravvicinato, o meglio dovrebbero discutere con il proprio medico della possibilità di utilizzare una cucina a induzione. Apparecchi radioricevitori posti nelle vicinanze possono subire interferenze elettromagnetiche.
- È consigliabile non adoperare utensili, mestoli e posate in metallo (usati ad esempio per girare i cibi nelle pentole), per evitare che correnti derivate li attraversino e arrivino nel corpo.
- Comporta un assorbimento di energia passivo, detto anche di stand-by, dell'ordine di qualche Watt quando non in funzione (dipendente dai modelli). Consigliabile l'installazione di un interruttore magneto-termico a monte che potrebbe anche fungere da limitatore di potenza.
- Non sono facilmente sostituibili ai piani cottura a gas per via della maggiore profondità richiesta del foro nel piano cucina. La dimensione passa da 48 cm a 49 cm richiedendo quindi un taglio di 1 cm del piano cucina. Attualmente (2014) ci sono pochissimi modelli con profondità 48 cm.

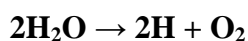
### 7.12. Elettrolisi

L'elettrolisi (pronuncia elettrolisi o elettrolisi) è un processo che consiste nello svolgimento di trasformazioni chimiche grazie all'apporto di energia elettrica; si ha quindi la conversione dell'energia elettrica in energia chimica.

Il processo inverso dell'elettrolisi è la generazione di energia elettrica attraverso una pila; la pila infatti produce energia elettrica sfruttando trasformazioni chimiche, mentre l'elettrolisi sfrutta l'energia elettrica per fare avvenire trasformazioni chimiche. Il processo di produzione di energia elettrica in una pila è un processo spontaneo, mentre il processo di elettrolisi non avviene spontaneamente (infatti è necessario fornire dall'esterno energia elettrica al sistema perché il processo possa avvenire).

#### Elettrolisi e dissociazione elettrolitica

Il termine "elettrolisi" deriva dal greco e significa "rompere con l'elettricità", dato che in molti casi sottoporre ad elettrolisi una sostanza significa scomporla nei suoi elementi costitutivi. Ad esempio attraverso l'elettrolisi dell'acqua (la cui molecola è composta da due atomi di idrogeno e un atomo di ossigeno) si ottengono gli elementi di cui è composta, cioè idrogeno (H<sub>2</sub>) e ossigeno (O<sub>2</sub>). Nei casi in cui l'elettrolisi porta effettivamente alla scissione di una sostanza nei suoi elementi costitutivi, si parla più precisamente di dissociazione elettrolitica.



Per applicazione di una corrente elettrica continua, subiscono dissociazione elettrolitica tutte quelle sostanze che, in soluzione o fuse, si scompongono in ioni, ossia gli acidi, le basi, i sali e l'acqua.

Il fenomeno della dissociazione elettrolitica può comunque avvenire anche senza apporto di energia elettrica dall'esterno e d'altro canto la dissociazione elettrolitica è solo uno dei tanti fenomeni che avvengono durante il processo di elettrolisi (ad esempio avvengono fenomeni di deposizione all'elettrodo e polarizzazione), per cui i termini "elettrolisi" e "dissociazione elettrolitica" non sono sinonimi.

### Legge di Faraday

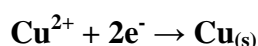
Uno studio sistematico sull'elettrolisi fu compiuto da Michael Faraday, che nel 1832 enunciò la sua legge sull'elettrolisi, scoperta in modo indipendente anche da Carlo Matteucci:

**la quantità di elementi prodotti da un processo di elettrolisi è direttamente proporzionale alla quantità di corrente che ha attraversato la cella elettrolitica**

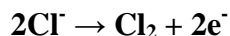
### Esecuzione dell'elettrolisi

In laboratorio gli esperimenti di elettrolisi vengono in genere condotti sulle soluzioni acquose; nella soluzione acquosa vengono immersi due elettrodi ai quali viene applicata una corrente elettrica continua. Per attrazione tra le cariche opposte, gli ioni positivi (cationi) vengono attratti dall'elettrodo negativo (catodo) e gli ioni negativi (anioni) dall'elettrodo positivo (anodo).<sup>1</sup>Nelle normali ossidoriduzioni gli elettrodi hanno funzioni opposte cioè il catodo è quello positivo ed attrae anioni e l'anodo ovviamente ha il compito opposto cioè quello di attrarre cationi; solo nel caso dell'elettrolisi si ha questo "scambio" poiché la riduzione viene forzata somministrando elettroni e quindi "gli elettrodi si invertono di ruolo".

Quando uno ione positivo entra in contatto con l'elettrodo negativo (il catodo in questo caso) è forzato ad acquisire da esso elettroni, ossia subisce una riduzione. Ad esempio, nell'elettrolisi di un sale rameico, gli ioni rameici ( $\text{Cu}^{2+}$ ) sono trasformati in rame metallico ( $\text{Cu}_{(s)}$ ), che si deposita sulla superficie dell'elettrodo, secondo il processo:



Quando uno ione negativo entra in contatto con l'elettrodo positivo (l'anodo in questo caso) cede a questo i suoi elettroni, cioè subisce un'ossidazione. Uno ione cloruro, ad esempio, viene trasformato in un atomo di cloro; due atomi di cloro vicini si combinano in una molecola biatomica di cloro gassoso, che si allontanerà sotto forma di gas, secondo il processo:



Similmente, l'elettrolisi dell'acqua produce idrogeno ed ossigeno gassosi, attraverso processi analoghi.

### Applicazioni

La sostanza più comunemente prodotta per elettrolisi in ambito industriale è il cloro, a partire dalla salamoia (soluzione di cloruro di sodio) o dal cloruro di sodio fuso.

Un'altra applicazione dell'elettrolisi è l'elettrogravimetria, una metodica analitica molto accurata, utile in particolare per determinare il titolo di una lega pesando la quantità di metallo depositatasi sul catodo.

La galvanostegia e la galvanoplastica sono importanti applicazioni tecnologiche che permettono di ricoprire la superficie di vari materiali con uno strato di metallo più nobile, per scopi protettivi nei confronti della corrosione o semplicemente per scopi decorativi o estetici. Un esempio in tal senso è il processo di cromatura.

Un altro esempio di applicazione delle celle elettrolitiche è il generatore di idrogeno, utilizzato per realizzare il processo di elettrolisi dell'acqua.

Importanti e più recenti applicazioni riguardano i trattamenti di inquinanti contenuti nei reflui industriali, tra i quali particolare attenzione è rivolta ai composti organici clorurati, alcuni dei quali sono cancerogeni e non eliminabili mediante trattamenti di tipo biologico (ovvero "biorefrattari"); essi provengono in particolare dalla produzione di polivinilcloruro (PVC), ottenuto dal cloruro di vinile monomero (VCM). In questi casi i processi di dealogenazione per riduzione elettrochimica appaiono particolarmente promettenti, dato che consentono di trasformare i composti policlорurati in idrocarburi, che sono biodegradabili, mentre gli atomi di cloro vengono trasformati in cloruri inorganici.

### Galvanostegia

La galvanostegia è una tecnica, usata per lo più in ambito industriale, che permette di ricoprire un metallo non prezioso con un sottile strato di un metallo più prezioso o più nobile o passivabile sfruttando la deposizione elettrolitica.

Questo processo viene solitamente sfruttato per proteggere strutture metalliche dalla corrosione, ma può anche avere scopo decorativo. Ad esempio tramite galvanostegia è possibile ricoprire il rame con l'argento oppure l'acciaio con zinco, stagno, nichel o cromo.

### Cenni storici

La scoperta della tecnica galvanica inizia nel 1791 quando Luigi Galvani scoprì il "fluido elettrico", è per questo che tutti i procedimenti di elettrolisi si chiamano galvanostegia che deriva dal suo cognome Galvani.

La prima apparecchiatura per lo svolgimento della galvanostegia fu messa a punto da Johann Wilhelm Ritter nel 1800, utilizzando la corrente elettrica prodotta da una pila voltaica. Durante le sue esperienze sulla galvanostegia, Ritter scoprì che la quantità di metallo depositato dipende dalla distanza alla quale sono posti gli elettrodi.

Il termine "galvanizzazione" è stato usato per la prima volta dal francese Albert Sorel, che nel 1837 ottenne i primi brevetti per la zincatura a caldo.

### Esecuzione pratica

In una vasca, che costituisce il cosiddetto bagno galvanico, contenente una soluzione acquosa del sale del metallo da depositare, sono immersi due elettrodi: il catodo è costituito dall'oggetto da ricoprire, mentre l'anodo può essere costituito dal metallo che deve essere depositato, da un altro metallo inerte o da grafite. A questi due elettrodi viene imposta una differenza di potenziale mediante un generatore di corrente. In tali condizioni i cationi del metallo da depositare si muoveranno verso il catodo (caricato negativamente), mentre gli anioni si muoveranno verso l'anodo (caricato positivamente).

Ai due elettrodi si hanno i seguenti fenomeni:

- acquisto di elettroni al catodo (riduzione);
- produzione di elettroni all'anodo (ossidazione).

Sul catodo si depositano quindi i cationi, che acquistano elettroni all'anodo e si trasformano in atomi metallici. In tal modo il catodo viene lentamente ricoperto da un sottile strato metallico mentre l'anodo, quando è sacrificale, viene lentamente consumato rilasciando ioni in soluzione. In relazione allo strato metallico che si intende depositare, che solitamente è di decine di micron o meno, per un determinato valore di densità di corrente (espressa in  $A/dm^2$ ) alla quale lavora il bagno e conoscendo la velocità di deposizione, basta impostare il tempo necessario per formare un deposito dello spessore desiderato. Alcuni bagni, come quelli utilizzati per il deposito di metalli nobili quali l'argento o l'oro, utilizzano anche una soluzione di ioni cianuro e per tale motivo sono detti "bagni al cianuro". Questo tipo di bagni richiede, per legge, operatori abilitati all'utilizzo del cianuro, abilitazione riconosciuta tramite concessione di un patentino rinnovabile. Rodio, nichel, rame, cromo e zinco sono altri metalli che vengono comunemente utilizzati in galvanostegia.

### Applicazioni

Alcune applicazioni della galvanostegia sono:

- zincatura (o galvanizzazione): ricopertura con uno strato di zinco di materiali ferrosi, ad esempio acciaio e acciaio dolce (talvolta impropriamente detto "ferro"); viene impiegata per contrastarne l'ossidazione (formazione di ruggine);
- cromatura: ricopertura con uno strato di nichel con un flash di cromo, anch'essa praticata soprattutto su acciaio e acciaio dolce, sia per aumentarne la resistenza sia per impedirne la corrosione;
- nichelatura: ricopertura di diversi metalli con uno strato di nichel; contribuisce ad aumentarne la resistenza meccanica e la resistenza alla corrosione.
- doratura elettrolitica: permette di realizzare dorature uniformi con minime quantità d'oro; è impiegata nell'oreficeria e nell'industria elettronica.

### 7.13. Aurora polare



Aurora boreale sul Bear Lake in Alaska



Un'aurora boreale a Salangen, in Norvegia

L'aurora polare, spesso denominata aurora boreale o australe a seconda dell'emisfero in cui si verifica, è un fenomeno ottico dell'atmosfera terrestre, caratterizzato principalmente da bande luminose di colore rosso-verde-azzurro, detti archi aurorali.

Le aurore possono comunque manifestarsi con un'ampia gamma di forme e colori, rapidamente mutevoli nel tempo e nello spazio.

Il fenomeno è causato dall'interazione di particelle cariche (protoni ed elettroni) di origine solare (vento solare) con la ionosfera terrestre (atmosfera tra i 100 – 500 km). Tali particelle eccitano gli atomi dell'atmosfera che diseccitandosi in seguito emettono luce di varie lunghezze d'onda. A causa della geometria del campo magnetico terrestre, le aurore sono visibili in due ristrette fasce attorno ai poli magnetici della Terra, dette ovali aurorali.



Il campo magnetico terrestre

Le aurore visibili ad occhio nudo sono prodotte dagli elettroni, mentre quelle di protoni possono essere osservate solo con l'ausilio di particolari strumenti, sia da terra sia dallo spazio.

### VERO O FALSO

1. La forza di attrazione fra due corpi carichi è proporzionale alla loro distanza.
2. Le azioni elettriche si trasmettono anche nel vuoto.
3. Una macchina elettrostatica è un dispositivo per generare corrente elettrica.
4. Le onde elettromagnetiche non possono propagarsi nel vuoto.
5. La teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell ha condotto a supporre che la luce sia un fenomeno elettromagnetico.
6. Il fondamento scientifico della radiotelegrafia, realizzata da Marconi, risiede nella teoria di Maxwell..

## 8. STRUTTURA DELLA MATERIA

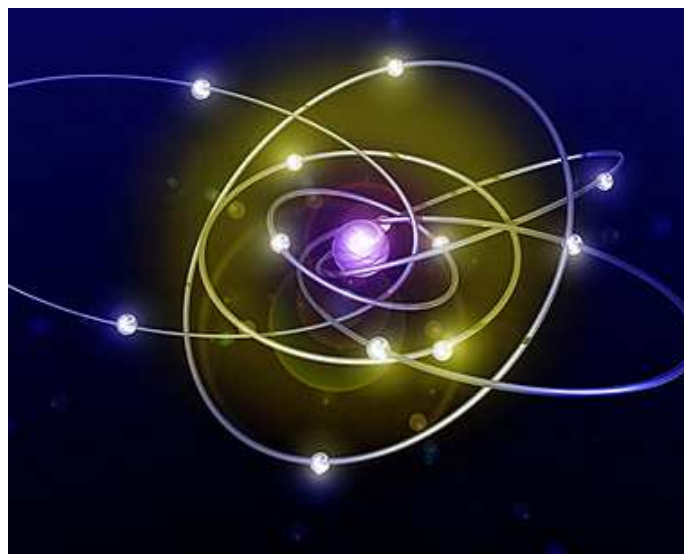
### 8.1. Struttura dell'atomo

Alla fine del XIX secolo gli scienziati erano convinti che la materia fosse costituita di atomi, ma non avevano idea di come fossero fatti. Essi pensavano, inoltre, che l'atomo fosse la più piccola particella costitutiva della materia e che non la si potesse scindere in altre particelle più piccole. Oggi sappiamo invece che gli atomi sono formati da **particelle subatomiche**: protoni, neutroni ed elettroni (almeno in prima approssimazione).

Nel 1911 il fisico neozelandese Ernest Rutherford descrisse la struttura dell'atomo con un modello in cui l'atomo è per lo più spazio vuoto, e la maggior parte della sua massa è concentrata in un **nucleo** centrale, attorno al quale ruotano gli **elettroni**, particelle con carica elettrica negativa. Il nucleo, a sua volta, è formato da **protoni**, particelle con carica elettrica positiva, e da **neutroni**, particelle elettricamente neutre. Allo stato naturale ogni atomo è elettricamente neutro, perché il numero degli elettroni è uguale al numero dei protoni e quindi le loro cariche si bilanciano.

Questo modello atomico è noto come **modello planetario**, perché ricorda un minuscolo Sistema Solare con il Sole al centro e i pianeti degli ruotano attorno. Ma se tutti gli atomi sono formati dalle stesse particelle subatomiche, come mai in natura esistono più di 90 elementi chimici diversi? Ciò che rende diverso un elemento da ogni altro è il numero dei protoni presenti nel suo nucleo: il numero dei protoni (e di conseguenza quello degli elettroni) è detto **numero atomico**. Per esempio, ogni atomo di idrogeno, H, ha un solo protone nel nucleo: il suo numero atomico è 1. Un atomo di Elio, He, ha due protoni nel nucleo e uno di carbonio, C, ne ha sei. Nella tavola periodica (v.), gli elementi sono disposti secondo il loro numero atomico crescente

Nel nucleo, come sappiamo, sono presenti anche i neutroni: la somma del numero dei neutroni e dei protoni, cioè di tutte le particelle che costituiscono il nucleo di un atomo, si chiama **numero di massa** o anche **peso atomico**.



Rappresentazione artistica di un atomo secondo il modello planetario

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Il modello planetario dell'atomo fu in seguito sostituito da un nuovo modello, chiamato **modello quantomeccanico**. Secondo il nuovo modello, gli elettroni non ruotano attorno al nucleo su orbite definite come quelle percorse dei pianeti attorno al Sole; il loro comportamento è descritto invece da orbitali. Un **orbitale** è una regione di spazio intorno al nucleo, simile a una nube, all'interno della quale esiste una certa probabilità di trovare un elettrone. Gli orbitali sono raggruppati in strati, o **livelli energetici**, che possiamo immaginare come una serie di gusci concentrici, con un contenuto di energia crescente via via che ci si allontana dal nucleo.

### 8. 2. Caratteristiche degli elementi chimici

**Tabella degli elementi chimici**

Num. Atom.	Simb.	Nome		Num. Atom.	Simb.	Nome		Num. Atom.	Simb.	Nome
1	H	Idrogeno		36	Kr	Krypton		71	Lu	Lutezio
2	He	Elio		37	Rb	Rubidio		72	Hf	Afnio
3	Li	Litio		38	Sr	Stronzio		73	Ta	Tantalio
4	Be	Berillio		39	Y	Ittrio		74	W	Tungsteno
5	B	Boro		40	Zr	Zirconio		75	Re	Renio
6	C	Carbonio		41	Nb	Niobio		76	Os	Osmio
7	N	Azoto		42	Mo	Molibdeno		77	Ir	Iridio
8	O	Ossigeno		43	Tc	Tecnecio		78	Pt	Platino
9	F	Fluoro		44	Ru	Rutenio		79	Au	Oro
10	Ne	Neon		45	Rh	Rodio		80	Hg	Mercurio
11	Na	Sodio		46	Pd	Palladio		81	Tl	Tallio
12	Mg	Magnesio		47	Ag	Argento		82	Pb	Piombo
13	Al	Alluminio		48	Cd	Cadmio		83	Bi	Bismuto
14	Si	Silicio		49	In	Indio		84	Po	Polonio
15	P	Fosforo		50	Sn	Stagno		85	At	Astato
16	S	Zolfo		51	Sb	Antimonio		86	Rn	Radon
17	Cl	Cloro		52	Te	Tellurio		87	Fr	Francio
18	A	Argon		53	I	Iodio		88	Ra	Radio
19	K	Potassio		54	Xe	Xeno		89	Ac	Attinio
20	Ca	Calcio		55	Cs	Cesio		90	Th	Torio
21	Sc	Scandio		56	Ba	Bario		91	Pa	Protoattinio
22	Ti	Titanio		57	La	Lantanio		92	U	Uranio
23	V	Vanadio		58	Ce	Cerio		93	Np	Nettunio
24	Cr	Cromo		59	Pr	Praseodimio		94	Pu	Plutonio
25	Mn	Manganese		60	Nd	Neodimio		95	Am	Americio
26	Fe	Ferro		61	Pm	Promezio		96	Cm	Curio
27	Co	Cobalto		62	Sm	Samarium		97	Bk	Berkelio
28	Ni	Nickel		63	Eu	Europio		98	Cf	Californio
29	Cu	Rame		64	Gd	Gadolinio		99	Es	Einsteinio
30	Zn	Zinco		65	Tb	Terbio		100	Fm	Fermio
31	Ga	Gallio		66	Dy	Disprosio		101	Md	Mendelevio
32	Ge	Germanio		67	Ho	Olmio		102	No	Nobelio
33	As	Arsenico		68	Er	Erbio		103	Lw	Lawrencio
34	Se	Selenio		69	Tm	Tulio				
35	Br	Bromo		70	Yt	Itterbio				

## Tavola periodica degli elementi

La tavola periodica degli elementi (o semplicemente tavola periodica) è lo schema con il quale vengono ordinati gli elementi chimici sulla base del loro numero atomico e del numero di elettroni presenti nell'orbitale atomico più energetico.

La tavola periodica degli elementi è stata ideata dal chimico russo **Dmitrij Mendeleev** nel 1869, contemporaneamente ed indipendentemente dal chimico tedesco **Julius Lothar Meyer** (1830 - 1895); inizialmente contava numerosi spazi vuoti, previsti per gli elementi che sarebbero stati scoperti in futuro, alcuni nella seconda metà del Novecento.

La **tavola periodica di Mendeleev**, che è la prima versione e anche quella attualmente più utilizzata, è la tavola periodica per antonomasia.

1 H																	2 He	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
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
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
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
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 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo

* Lantanoidi	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
** Attinoidi	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

Nella tavola periodica moderna gli elementi sono posti progressivamente in ciascun periodo da sinistra a destra secondo la sequenza dei loro numeri atomici, iniziando una nuova riga dopo un gas nobile. Il primo elemento nella riga successiva è sempre un metallo alcalino con un numero atomico più grande di un'unità rispetto a quello del gas nobile (ad esempio dopo il krypton, un gas nobile con il numero atomico 36, inizia una nuova riga con il rubidio, un metallo alcalino con il numero atomico 37).

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

### Pesi specifici di alcuni elementi

Elemento	Densità (g/dm <sup>3</sup> )
Alluminio	2600
Argento	10500
Azoto	1,251
Elio	0,179
Ferro	7880
Idrogeno	0,089
Iridio	22610
Mercurio	13590
Nichel	8600
Oro	19250
Osmio	22660
Ossigeno	1,429
Palladio	12023
Piombo	11340
Platino	21400
Rame	8890
Stagno	7280
Titanio	4870
Tungsteno	19250
Uranio	19050
Zinco	7100

### 8.3. Interazioni fondamentali

In fisica il termine **interazioni** o **forze fondamentali** si riferisce alle interazioni o forze della natura non riconducibili ad altre forze, che sono alla base dei fenomeni fisici e responsabili della struttura della materia e dell'universo.

Sono state individuate quattro forze o interazioni fondamentali:

- interazione gravitazionale
- interazione elettromagnetica
- interazione nucleare debole
- interazione nucleare forte.

Per energie dell'ordine dei 100 GeV (= 1 miliardo di eV, v. più avanti la definizione di elettronvolt, "eV") la forza elettromagnetica e la forza debole si presentano come un'unica interazione, definita elettrodebole.

## **Caratteristiche delle forze**

Interazione (o "forza")	Mediatore	Magnitudine relativa	Raggio d'azione
Interazione forte	gluone	$10^{38}$	$1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
Interazione elettromagnetica	fotone	$10^{36}$	$\infty$
Interazione debole	Bosoni W e Z	$10^{25}$	$10^{-18} \text{ m}$
Interazione gravitazionale	gravitone (?)	1	$\infty$

### **8.4. Antimateria**

In fisica l'antimateria è l'insieme delle antiparticelle, corrispondenti per massa alle particelle che costituiscono la materia ordinaria, ma con carica di segno opposto. Ad esempio un atomo di "antidrogeno" è composto da un antiprotone caricato negativamente, attorno al quale orbita un positrone (antielettrone) caricato positivamente.

Se particella e antiparticella vengono a contatto queste si trasformano in fotoni ad alta energia (raggi gamma) o in altre coppie di particelle-antiparticelle, tali che la somma dell'energia totale, precedente e seguente l'impatto, rimanga costante.

### **Storia**

Il termine antimateria fu usato per la prima volta nel 1898 da Arthur Schuster in due lettere inviate alla rivista Nature, nelle quali speculava sulla possibile esistenza di un sistema solare costituito di antimateria in cui anche la gravità era di segno opposto, cioè repulsiva.

La prima seria ipotesi dell'esistenza dell'antimateria fu nel 1928 ad opera del fisico Paul Dirac, che dedusse l'esistenza dell'antiparticella dell'elettrone, dotata di carica positiva, quale soluzione della versione relativistica dell'equazione di Schrödinger, detta appunto equazione di Dirac. Nel 1932 Carl David Anderson diede la conferma sperimentale dell'esistenza dell'antielettrone e lo chiamò positrone, contrazione di "positive electron". Charles Janet nel 1929 immaginò addirittura una tavola periodica degli elementi costituita di antimateria.

Nel 1959 i fisici Emilio Segrè e Owen Chamberlain scoprirono l'antiprotone e grazie a questa scoperta ricevettero il premio Nobel.

Nel 1965, al CERN di Ginevra con l'acceleratore di particelle PS (protosincrotrone), il gruppo di ricerca condotto da Antonino Zichichi scoprì il primo nucleo di antimateria, un nucleo di antideuterio, contemporaneamente a un gruppo del Laboratorio Nazionale di Brookhaven a New York con l'AGS (Alternating Gradient Synchrotron).

Nel 1978 ricercatori italiani e francesi guidati da Giorgio Giacomelli scoprirono nuclei di antitritio (un antiprotone e due antineutroni) e di antielio 3 (due antiprotoni e un antineutrone). Con l'acceleratore di Serpukhov scienziati russi ottennero analoghi risultati.

Nel 1997 al CERN ricercatori svizzeri, italiani, inglesi, danesi, giapponesi e brasiliani, nell'ambito del progetto ATHENA (Apparatus for High precision Experiments with Neutral Antimatter; in italiano: apparato per esperimenti di alta precisione con antimateria neutra), crearono i primi atomi di antidrogeno, in numero di circa 50.000.

La stessa collaborazione riuscì a sintetizzare il protonio, un atomo instabile composto da un protone e da un antiprotone.

Il 17 novembre 2010 nel corso dell'esperimento Alpha, i ricercatori del CERN di Ginevra imprigionano per la prima volta 38 atomi di antidrogeno per qualche decimo di secondo.

## **APPUNTI DEL CORSO DI FISICA**

Nel 2010 il Fermi Gamma-ray Space Telescope ha rilevato raggi di antimateria creati all'interno di tempeste terrestri.

Nel 2011 il più grande nucleo (anti-elio 4, particella alfa) di antimateria mai catturato al mondo venne imprigionato nei laboratori nazionali di Brookhaven.

Il 4 giugno 2011, sempre nel corso dell'esperimento Alpha, i ricercatori del CERN di Ginevra riuscirono a creare e intrappolare circa 300 atomi di anti-idrogeno per il tempo record di 1.000 secondi (oltre 16 minuti): 5.000 volte più a lungo rispetto al tempo ottenuto dallo stesso esperimento a novembre.

Inoltre nel 2011 la NASA ha rilevato, tramite il satellite Enrico Fermi, che in alcuni temporali tropicali al di sopra di 15 km dalla superficie terrestre, il flusso di elettroni, scontrandosi con le molecole dell'aria, produce raggi gamma che, scontrandosi a loro volta con gli elettroni dell'atmosfera producono antimateria composta da pochissimi positroni.

### **Sperimentazioni future**

Nel futuro nella Stazione Spaziale Internazionale (ISS) si effettueranno esperimenti per rilevare nuclei di antielio e anticarbonio, in data ancora da stabilire.

### **Applicazioni dell'antimateria**

Sebbene utilizzata principalmente per studiare le interazioni tra particelle elementari, l'antimateria ha anche un'applicazione tecnologica: la tomografia ad emissione di positroni, o PET, uno strumento di diagnostica medica che utilizza l'emissione di positroni per realizzare immagini degli organi interni dei pazienti, cercando tumori in base al loro metabolismo. Associata contestualmente ad una macchina TAC, si ottiene una TAC-PET, che fornisce informazioni sia anatomiche sia metabolico-funzionali degli organi ispezionati.

### **Annichilazione e Big Bang**

L'antimateria ha vita breve e non può essere immagazzinata, in quanto si annichilisce al primo contatto con la materia. In base alle attuali conoscenze, non esistono quantità significative di antimateria in tutto l'universo, con l'eccezione dei piccolissimi quantitativi generati nei laboratori di fisica delle particelle presenti sul nostro pianeta, e nei processi astronomici più energetici.

Nella teoria del Big Bang, nell'universo iniziale materia e antimateria dovevano essere presenti in proporzioni uguali e di conseguenza dovettero dare luogo ad un immediato processo di annichilazione che avrebbe dovuto fare scomparire l'intero universo neoformato. Poiché questo non corrisponde alla realtà che osserviamo, si ritiene che un leggero squilibrio in favore della materia ha fatto sì che quest'ultima non venisse completamente annichilita, rendendo possibile la formazione dell'universo in cui viviamo.

Nuovi e più dettagliati sviluppi su questi aspetti, che coinvolgono le alte energie in gioco nei primi istanti dell'universo primordiale, sono emersi dagli esperimenti programmati al Large Hadron Collider del CERN di Ginevra.

### **Antimateria come fonte di energia**

Se una parte di antimateria si annichilisce a contatto con della materia ordinaria, tutta la massa delle particelle ed antiparticelle annichilite viene convertita in energia. Questo processo permetterebbe di ottenere enormi quantità di energia da quantità molto piccole di materia ed antimateria, al contrario di quanto avviene invece per le reazioni nucleari e chimiche, dove a parità di massa di combustibili utilizzati viene prodotta una quantità di energia molto più piccola.

La reazione di 1 kg di antimateria con 1 kg di materia produce  $1,8 \times 10^{17}$  J di energia (in base all'equazione  $E=mc^2$ ). Per contro, bruciare 1 kg di petrolio fornisce  $4,2 \times 10^7$  J, mentre dalla fusione nucleare di 1 kg di idrogeno si otterrebbero  $2,6 \times 10^{15}$  J. In altre parole, l'annichilazione della materia con l'antimateria produce circa 70 volte l'energia prodotta dalla fusione nucleare dell'idrogeno in elio e quattro miliardi di volte l'energia prodotta dalla combustione del petrolio.

A livello teorico, dato che l'energia prodotta dall'annichilimento materia/antimateria è nettamente superiore a quella prodotta da altri sistemi propulsivi, il rapporto tra peso del carburante e spinta prodotta sarebbe estremamente vantaggioso. L'energia ottenibile dalla reazione di pochi grammi di antimateria con altrettanti di materia sarebbe sufficiente a portare una piccola navicella spaziale sulla Luna.

Generare un singolo atomo di antimateria è immensamente difficile e dispendioso, di conseguenza non la si può considerare una fonte di energia. Per produrre antimateria sono necessari acceleratori di particelle ed enormi quantità di energia, molto superiori a quella rilasciata dopo l'annichilazione con la materia ordinaria, rendendo di fatto l'impresa energeticamente ed economicamente non conveniente. La cifra per produrre 10 milligrammi di positroni è stata stimata in 250 milioni di dollari, equivalenti a 25 miliardi di dollari per grammo. La NASA fece una stima di **62.500 miliardi di dollari** per produrre un grammo di antiprotoni, considerandolo quindi il materiale più costoso da produrre. Secondo le stime del CERN, la produzione di un milionesimo di grammo di antiparticelle (il quantitativo utilizzato negli esperimenti) è costato alcuni milioni di Franchi svizzeri.

Se fosse possibile produrre e allo stesso tempo immagazzinare facilmente antimateria, il suo uso potrebbe estendersi anche allo smaltimento dei rifiuti compresi quelli ad elevata tossicità come le scorie nucleari con grande produzione di energia. Tuttavia, a meno che non vengano scoperte fonti naturali di antimateria (la NASA ha anche valutato la possibilità di raccogliere con campi magnetici l'antimateria che si forma spontaneamente nelle fasce di van Allen attorno alla terra o attorno ai grandi pianeti come Giove), il suo possibile sfruttamento rimarrà problematico.

### 8.6. La carica dell'elettrone: l'esperimento di Millikan

Fra gli esperimenti di Robert Millikan, l'esperimento della goccia d'olio è stato sicuramente il più famoso: l'obiettivo dell'esperimento di misurare la carica elettrica dell'elettrone fu raggiunto nel 1909. Il valore ricavato da Millikan fu  $1.5924 \times 10^{-19}$  coulomb, con un errore inferiore all'1% rispetto a quello oggi comunemente accettato, pari a  $1.60217653 \times 10^{-19}$  coulomb.

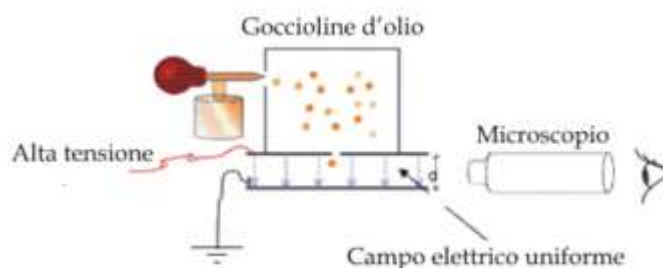


Diagramma dell'apparato sperimentale.

Il diagramma mostra una versione semplificata dell'apparato sperimentale della misura originaria di Millikan. Tramite un condensatore a facce piane e parallele si genera un campo elettrico costante ed uniforme la cui intensità può essere variata tramite un generatore di tensione.

Dell'olio viene nebulizzato in una cella al di sopra del condensatore e da lì cade per gravità nella regione dove è presente il campo elettrico. Durante questo procedimento alcune delle goccioline d'olio si elettrizzano per strofinio e quindi diventano elettricamente cariche.

Durante la loro caduta, in assenza di campo elettrico, queste sperimentano un attrito con l'aria e quindi raggiungono rapidamente una velocità di regime  $v_1$  (costante).

Questa velocità viene misurata osservando direttamente le goccioline d'olio, opportunamente illuminate, tramite un microscopio. Applicando un campo elettrico uniforme nel verso corretto, le goccioline ionizzate vengono sospinte verso l'alto e raggiungono una nuova velocità di regime (data dall'equilibrio fra la forza di gravità, la forza di Coulomb, e la forza d'attrito viscoso) che può essere misurata nello stesso modo.

Questa velocità dipende da molti parametri fra cui: il campo elettrico applicato (noto perché regolabile dall'esterno), la densità dell'olio e dell'aria (che possono essere misurate indipendentemente), la viscosità dell'aria (anch'essa misurabile indipendentemente) e le dimensioni delle singole goccioline che possono essere ricavate dalla prima misura di velocità. L'unica variabile ignota è la carica trasportata da ciascuna goccia d'olio che quindi può essere ricavata dalla misura della velocità di regime in presenza di campo elettrico. Ripetendo molte volte l'esperimento si ottiene che tutti i valori ottenuti sono multipli interi di una carica elettrica pari a circa  $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$  che viene quindi assunta essere una carica elementare ovvero la carica del singolo elettrone.

### 8.7. Rivelatori di particelle

I fenomeni della condensazione e della vaporizzazione vengono sfruttati per rivelare particelle nucleari. I rivelatori il cui principio di funzionamento si basa su questi fenomeni sono le cosiddette **camere a nebbia** e **camere a bolle**.

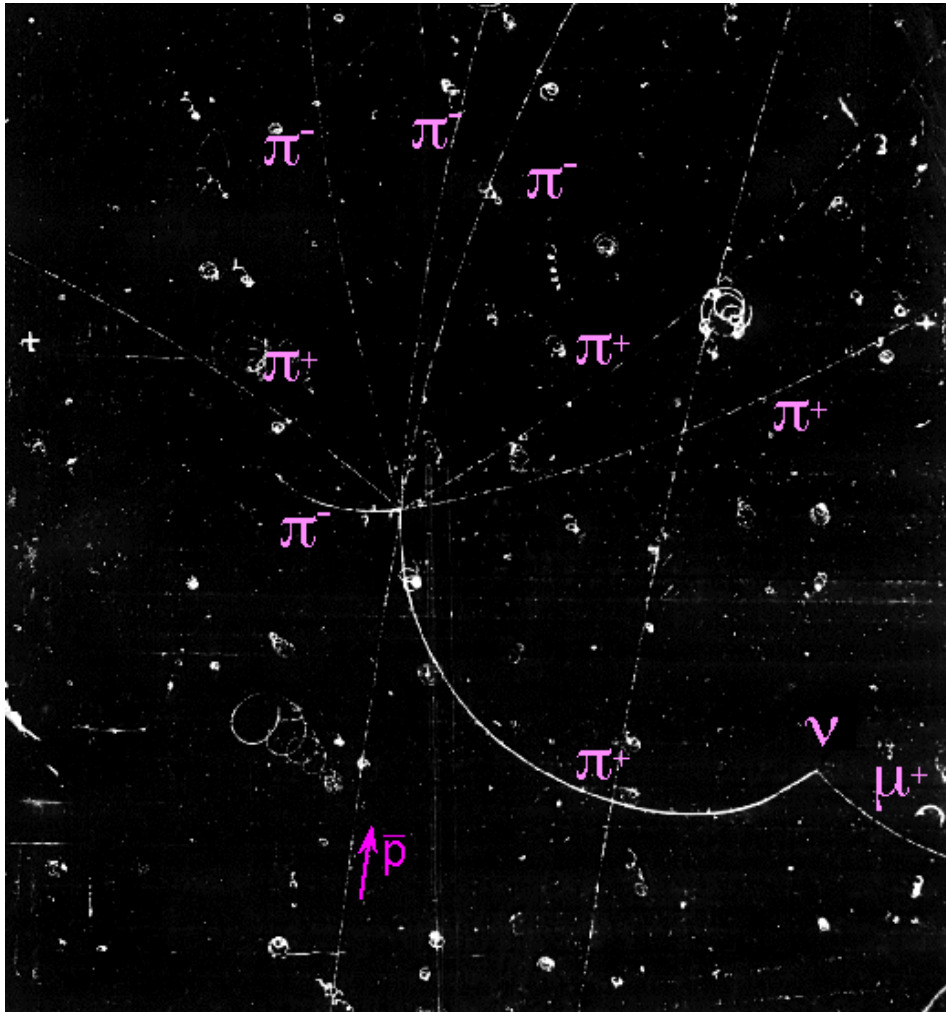
#### Camere a nebbia

In una camera a nebbia un gas saturo di vapor acqueo viene fatto espandere mediante lo spostamento di un pistone. L'espansione adiabatica raffredda il gas. L'aria diventa sovrassatura di vapore. Gli ioni prodotti dalle particelle che attraversano la camera agiscono come nuclei di condensazione. Si forma così una traccia di nebbia, che rivela la traiettoria delle particelle entranti e di quelle prodotte da reazioni nucleari.

#### Camere a bolle

Nelle camere a bolle un liquido mantenuto in prossimità del punto di ebollizione, è soggetto ad una brusca espansione prima di essere attraversato da particelle cariche ionizzanti. Queste trasferiscono energia agli atomi di liquido che incontrano lungo il cammino e li ionizzano. Gli ioni così prodotti favoriscono la formazione di bolle che, fotografate, indicano la traiettoria delle particelle.

La camera a bolle è un rivelatore più avanzato della camera a nebbia, ma molto meno potente dei rivelatori moderni.



Questa è una fotografia da una camera a bolle: si vede un antiprotone (che entra dal basso della figura) che si scontra con un protone (in quiete) annichilandosi e producendo altre particelle.

## 9. LA RELATIVITÀ

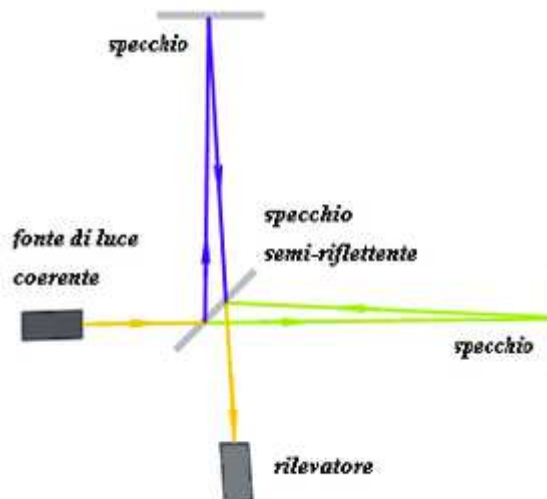
### 9.1. Esperimento di Michelson-Morley

L'esperimento di Michelson-Morley è uno dei più famosi ed importanti esperimenti della storia della fisica. Venne eseguito nel 1887 nell'attuale Case Western Reserve University ed è considerato la prima forte prova contro la teoria dell'etere luminifero.

La fisica nel XIX secolo postulava che le onde (luminose, sonore, etc.) dovessero avere un mezzo che consentisse la loro propagazione nello spazio. Nel caso della luce si era ipotizzata l'esistenza di un "etere luminifero" come mezzo di propagazione, anche al fine di conciliare le ultime conquiste dell'elettromagnetismo, riassunte nelle equazioni di Maxwell, con la relatività galileiana. Tali equazioni infatti risultavano avere forme diverse a seconda del sistema di riferimento inerziale scelto.

Durante il XVIII secolo si riteneva che lo spazio fosse formato da una sostanza invisibile a cui i fisici diedero il nome di etere e che ogni corpo in movimento nell'universo producesse un vento d'etere che si muoveva alla stessa velocità del corpo in movimento ma con direzione opposta. Per esempio, la Terra si muove nell'universo a 30 km/s perciò ci dovrebbe essere un vento a 30 km/s che spazzerebbe la Terra in direzione opposta al proprio cammino. Qualsiasi cosa immersa nell'etere sarebbe influenzata dal vento, compresa la luce.

#### L'esperimento



Un interferometro Michelson: l'esperimento originale utilizzò più specchi di quelli mostrati. La luce veniva riflessa avanti e indietro diverse volte prima di ricombinarsi.

Albert Abraham Michelson, che aveva insegnato fisica all'istituto di Cleveland in Ohio, decise di provare a misurare la velocità della luce in diverse direzioni per vedere se si trovava traccia del vento d'etere, usando a tale scopo uno strumento da lui stesso ideato che successivamente prese il nome di interferometro di Michelson. L'interferometro permette di suddividere un fascio di luce in due fasci che viaggiano seguendo cammini perpendicolari e vengono poi nuovamente fatti convergere su uno schermo, formandovi una figura di interferenza. Un eventuale vento d'etere avrebbe comportato una diversa velocità della luce nelle varie direzioni e, di conseguenza, uno scorrimento delle frange di interferenza al ruotare dell'apparato rispetto alla direzione del vento d'etere. Utilizzando questo dispositivo sperimentale Michelson effettuò nel 1881 un certo numero di misure, non rilevando lo spostamento minimo previsto delle frange di interferenza (i dati vennero pubblicati da Michelson nello stesso anno).

Tuttavia il suo apparecchio prototipale non aveva la precisione sufficiente per escludere con certezza l'esistenza del movimento nell'etere. Per questo decise di effettuare esperimenti più precisi e, nel 1887, si mise in contatto con Edward Morley, che offrì il suo seminterrato per il nuovo esperimento. A tale scopo venne utilizzato un interferometro montato su una lastra di pietra quadrata di 15 cm di lato e circa 5 cm di spessore. Per eliminare le vibrazioni la lastra veniva fatta galleggiare su mercurio liquido. Questo accorgimento permetteva di mantenere la lastra orizzontale e di farla girare attorno ad un perno centrale. Un sistema di specchi inviava il raggio di luce per un percorso di otto viaggi di andata e ritorno allo scopo di rendere il viaggio del raggio di luce più lungo possibile.

Anche con il nuovo esperimento non si trovò traccia di un vento d'etere in quanto la velocità della luce era indipendente dalla direzione e di poco inferiore a 300.000,0 km/s. La cosa non accadde neanche ripetendo l'esperimento a distanza di tempo e di luogo.

### Conseguenze

Con questi esperimenti, se si ipotizza che la Terra non sia ferma rispetto all'etere, fallisce la legge di composizione galileiana delle velocità nel caso della luce, poiché appunto la luce non viene "trascinata" da nessun mezzo fisico. Tre spiegazioni sono possibili al fallimento dell'esperienza di Michelson e Morley:

- la Terra è ferma rispetto all'etere;
- il braccio dell'interferometro nella direzione del moto dell'etere si accorcia (contrazione di Fitzgerald);
- la velocità della luce è la medesima in tutte le direzioni.

Einstein accettò la terza soluzione che va considerata come una riprova dell'isotropia dello spazio per tutti gli osservatori. La spiegazione di tale risultato secondo Einstein è che non vi è nessun etere. La conclusione che la velocità della luce è indipendente dal moto della sorgente e dell'osservatore, fu l'ipotesi da cui partì Einstein per sviluppare la teoria della relatività ristretta.

Henry Cavendish nel 1784 (in un manoscritto inedito) e Johann Georg von Soldner nel 1801 (in una pubblicazione del 1804) avevano sottolineato il fatto che la gravità newtoniana prevedeva che la luce delle stelle si curvasse attorno ad un oggetto massiccio. Lo stesso valore di Soldner venne calcolato da Einstein nel 1911 in base soltanto al principio di equivalenza. Tuttavia, Einstein notava nel 1915 mentre veniva completata la relatività generale, che il suo (e quindi di Soldner) risultato del 1911 era solo la metà del valore esatto. Einstein fu il primo a calcolare il valore corretto per la curvatura della luce.

### 9.2. L'Annus Mirabilis

Vengono chiamati con il nome Annus Mirabilis Papers (dal latino e dall'inglese: Articoli dell'anno meraviglioso) i quattro articoli pubblicati da Albert Einstein nel 1905 sul prestigioso giornale scientifico **Annalen der Physik**.

Tali articoli affrontavano sotto una nuova ottica l'effetto fotoelettrico e il moto browniano, formulavano la relatività ristretta e stabilivano l'equivalenza massa-energia, rivoluzionando la fisica classica.

La definizione di Annus Mirabilis venne data al 1905 proprio in seguito alla pubblicazione, a breve distanza l'uno dall'altro, di questi quattro brevi ma rivoluzionari articoli fondativi della fisica moderna.

Gli articoli sono:

- "*Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*" ("Un punto di vista euristico sulla produzione e la trasformazione della luce") sull'**effetto fotoelettrico**;
- "*Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*" (Il moto di piccole particelle sospese in liquidi in quiete, secondo la teoria del calore) sul **moto browniano**;
- "*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*" (Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento) sulla **relatività speciale**;
- "*Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*" (L'inerzia di un corpo dipende dal contenuto di energia?) sull'**equivalenza tra massa e energia**.

### 9.3. I capisaldi della relatività

- La velocità della luce nel vuoto è **costante**, e non dipende dalla velocità della sorgente.
- La velocità della luce nel vuoto non può essere superata.
- Il tempo di un oggetto che si muove ad una velocità  $v$  si "dilata" secondo la formula

$$t_v = t_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

dove  $t_v$  è il tempo dell'oggetto,  $t_0$  è il tempo di un osservatore,  $c$  è la velocità della luce

- La lunghezza di un oggetto che si muove ad una velocità  $v$  si "contrae" lungo la direzione del movimento secondo la formula

$$L_v = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- La massa e l'energia sono equivalenti secondo la formula  **$E = mc^2$**
- Un campo gravitazionale "incurva" lo spazio.

### 9.4. L'esperimento di Sir Eddington

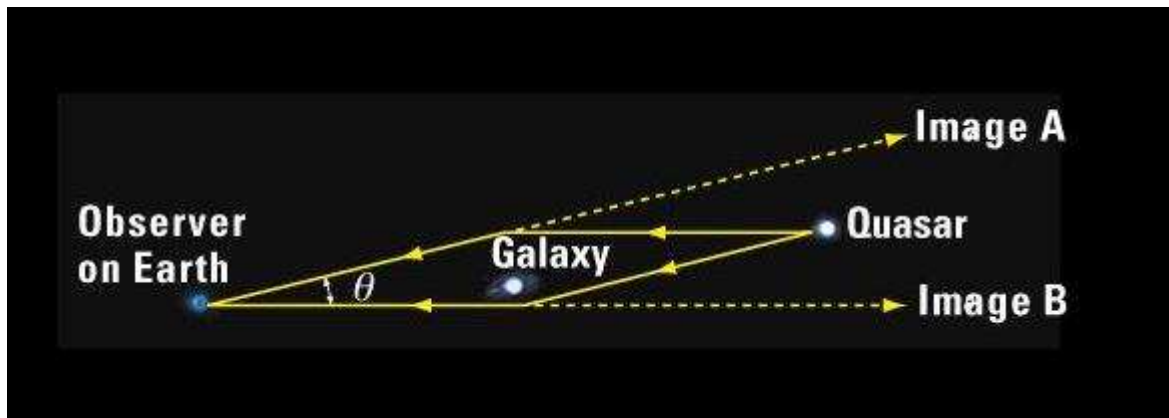
La prima osservazione di deflessione della luce venne effettuata per vedere il mutamento nella posizione delle stelle quando si trovavano a passare in prossimità del Sole sulla sfera celeste. Le osservazioni vennero eseguite nel 1919 da Arthur Eddington e suoi collaboratori durante un'eclissi solare totale, in modo da poter vedere le stelle vicine al Sole. Le osservazioni vennero effettuate simultaneamente nelle città di Sobral (Brasile) e a São Tomé e Príncipe sulla costa occidentale dell'Africa.

Il risultato fu considerato una notizia straordinaria e finì sulle prime pagine di tutti i giornali più importanti, dando risonanza ad Einstein e alla sua teoria della relatività in tutto il mondo. Quando il suo assistente gli chiese quale sarebbe stata la sua reazione se la relatività generale non fosse stata confermata da Eddington e Dyson nel 1919, Einstein rispose con la famosa battuta: "Mi sarebbe dunque dispiaciuto per il caro signore, ma la teoria è corretta comunque".

Inizialmente, però, la precisione era piuttosto scadente. I risultati furono criticati da alcuni per essere affetti da errori sistematici, sebbene le moderne ri-analisi della quantità dei dati suggeriscono che l'analisi effettuata da Eddington fosse precisa. Le misurazioni furono ripetute da una squadra del Lick Observatory nell'eclissi del 1922, con risultati che concordano con quelli del 1919 e vennero ripetute più volte, in particolare nel 1973 da un gruppo dell'Università del Texas. Una indeterminazione notevole è rimasta in queste misurazioni per quasi cinquanta anni, fino a quando le osservazioni iniziarono ad essere effettuate per mezzo delle radiofrequenze. Solo alla fine degli anni '60 venne definitivamente dimostrato che la quantità di deflessione è l'esatto valore completo previsto dalla relatività generale, e non metà di quel numero.

### 9.5. Le lenti gravitazionali

La Relatività Generale di Albert Einstein ci dice che qualsiasi corpo dotato di massa, e qualsiasi forma di energia (anche la luce) allo stesso tempo generano e subiscono un campo gravitazionale. Nel caso di una lente gravitazionale si considera l'effetto dell'attrazione esercitata su un fascio di luce da parte di una qualsiasi distribuzione di massa nell'universo; sebbene in teoria anche la luce a sua volta attragga detta massa, l'effetto è infinitamente minore e viene trascurato. Qualsiasi massa nell'universo è perciò una lente gravitazionale, e come tale deflette la luce che, per così dire, le passa vicino. La Relatività Generale descrive questo effetto come una perturbazione locale dello spazio-tempo, che si manifesta con una sua curvatura. I raggi luminosi che si propagano attraverso questo spazio-tempo perturbato sentono la curvatura deviando il loro percorso e vengono per questo deflessi. L'ammontare della deflessione prodotta è proporzionale alla massa del corpo che agisce da lente ed è inversamente proporzionale alla distanza minima alla quale il raggio luminoso passa dalla lente stessa. L'effetto di lente gravitazionale ha alcune interessanti conseguenze, che hanno permesso l'osservazione di questo fenomeno in natura. Innanzi tutto, esso può dare origine alla formazione di immagini multiple di una stessa sorgente luminosa. Si supponga ad esempio di osservare una sorgente molto lontana e che interposta tra noi e questa sorgente ci sia un corpo massiccio, per esempio una stella o una galassia. Due raggi luminosi emessi dalla sorgente in direzioni diverse nello spazio, e passanti ai lati opposti del corpo massiccio, possono essere deflessi in modo tale da convergere sulla terra.



Schema del funzionamento di una lente gravitazionale. La quasar viene osservata da un osservatore della Terra, non nella sua posizione sullo sfondo delle galassia interposta, ma in due immagini speculari che sembrano provenire dalle direzioni A e B.

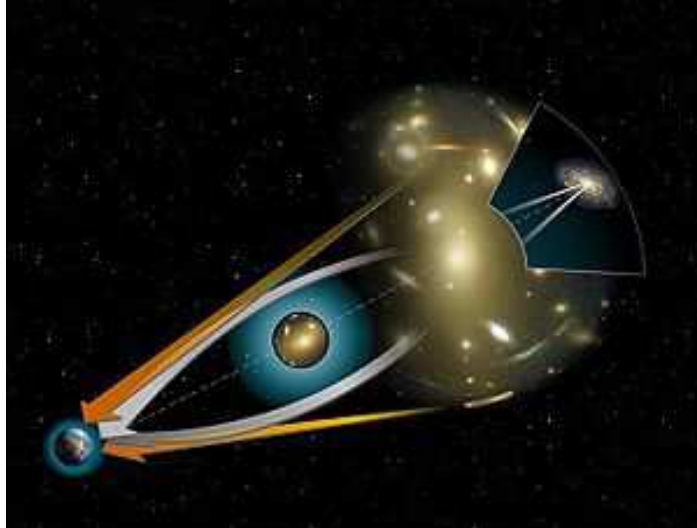
Vedremo quindi la luce emessa dalla stessa sorgente arrivarci da direzioni diverse in cielo e la sorgente ci apparirà doppia. Poiché la forma delle strutture che popolano l'universo e che agiscono da lenti gravitazionali è molto complicata (si pensi ad esempio ad una galassia o ad un ammasso di galassie), si può assistere talvolta all'apparizione anche di quattro immagini della stessa sorgente. Numerose galassie, ad esempio, producono immagini multiple di quasar lontani. Poiché una sorgente emette luce in “fasci” di raggi luminosi e ciascun raggio passa ad una distanza leggermente diversa dalla lente, la deflessione agisce in modo differenziale. In altri termini, parti diverse del fascio subiscono diverse deflessioni. La forma originale del fascio viene pertanto modificata, e così pure la forma della sorgente luminosa. Questo effetto si chiama “distorsione” e può portare ad un “ingrandimento” o ad un “restringimento” dell’immagine della sorgente. In questo senso, una lente gravitazionale agisce talvolta da vera e propria “lente di ingrandimento”, o “telescopio gravitazionale”, permettendoci di vedere sorgenti che in assenza di questo effetto risulterebbero troppo piccole o deboli per essere visibili.

La distorsione è osservabile soprattutto nelle immagini di sorgenti estese, come le galassie: in numerosi ammassi di galassie sono state osservate immagini di galassie lontane che appaiono sotto forma di “archi gravitazionali”. Si tratta per l'appunto del risultato dell'effetto di lente gravitazionale da parte dell'ammasso sulla luce proveniente da galassie più lontane. Le loro immagini vengono allungate a formare delle spettacolari strutture a forma di arco. Quando la Terra, la massa interposta (galassia) e l'oggetto sono perfettamente allineati si può assistere alla formazione di un'immagine circolare detta “Einstein Ring” (“Anello di Einstein”, v. più avanti).

Infine, quando la luce deflessa da una massa giunge ad un osservatore da direzioni diverse, come nel caso di immagini multiple discusso precedentemente, essa ha dovuto percorrere distanze diverse nello spazio. La luce viaggia ad una sua caratteristica velocità. Pertanto, anche se due raggi vengono emessi dalla sorgente nello stesso istante, dovendo fare percorsi diversi per raggiungere l'osservatore, giungono a destinazione in tempi diversi. Se ci sono immagini multiple e la sorgente emette un segnale luminoso la cui intensità varia nel tempo, tale variabilità verrà osservata nelle stesse immagini con un certo “ritardo”. Tale ritardo può essere, nel caso di lensing da parte di galassie su quasar lontani, dell'ordine di diverse decine di giorni. Ci sono numerosissime applicazioni del lensing gravitazionale. Principalmente, lo si può usare per studiare le proprietà dei corpi che agiscono da lente e delle sorgenti che subiscono l'effetto. Ad esempio, poiché l'effetto dipende dalla massa totale della lente, il lensing permette di evidenziare la presenza di materia oscura in galassie e ammassi di galassie. In alcuni casi, si è usato il lensing anche per individuare pianeti che orbitano attorno a stelle. Inoltre, poiché si tratta di un effetto di natura geometrica (cioè che dipende dalle distanze tra osservatore, lente e sorgente), esso può fornire importanti informazioni sulla geometria dell'universo.

In fisica, in particolare nella teoria della relatività generale, una lente gravitazionale è un fenomeno caratterizzato dalla deflessione della radiazione emessa da una sorgente luminosa a causa della presenza di una massa posta tra la sorgente e l'osservatore.

La modifica che un corpo massivo provoca alla curvatura dello spazio-tempo genera un effetto simile a quello ottico di una lente, che può andare dalla deformazione apparente della sorgente, allo sdoppiamento o alla visione multipla della sua immagine. Se la curvatura dello spazio-tempo generata dalla massa è sufficientemente marcata si verifica un'intensificazione della luminosità apparente della sorgente, causata da una convergenza dei raggi luminosi. La loro concentrazione può esser focalizzata relativamente a qualche specifico posto esterno (all'orizzonte della lente); in pratica il fascio di radiazioni è convogliato verso definite regioni del cosmo e solo in specifici punti riceventi è captabile un maggior impulso energetico oppure una più elevata e stabile luminosità: ciò vale per tutta la gamma o varietà di radiazioni dello spettro elettromagnetico. (Un po' come avviene con una piccola lente ottica qualora si tenti d'infiammare un frammento di carta o d'erba indirizzando e concentrando su un loro punto la luce solare altrimenti diffusa).



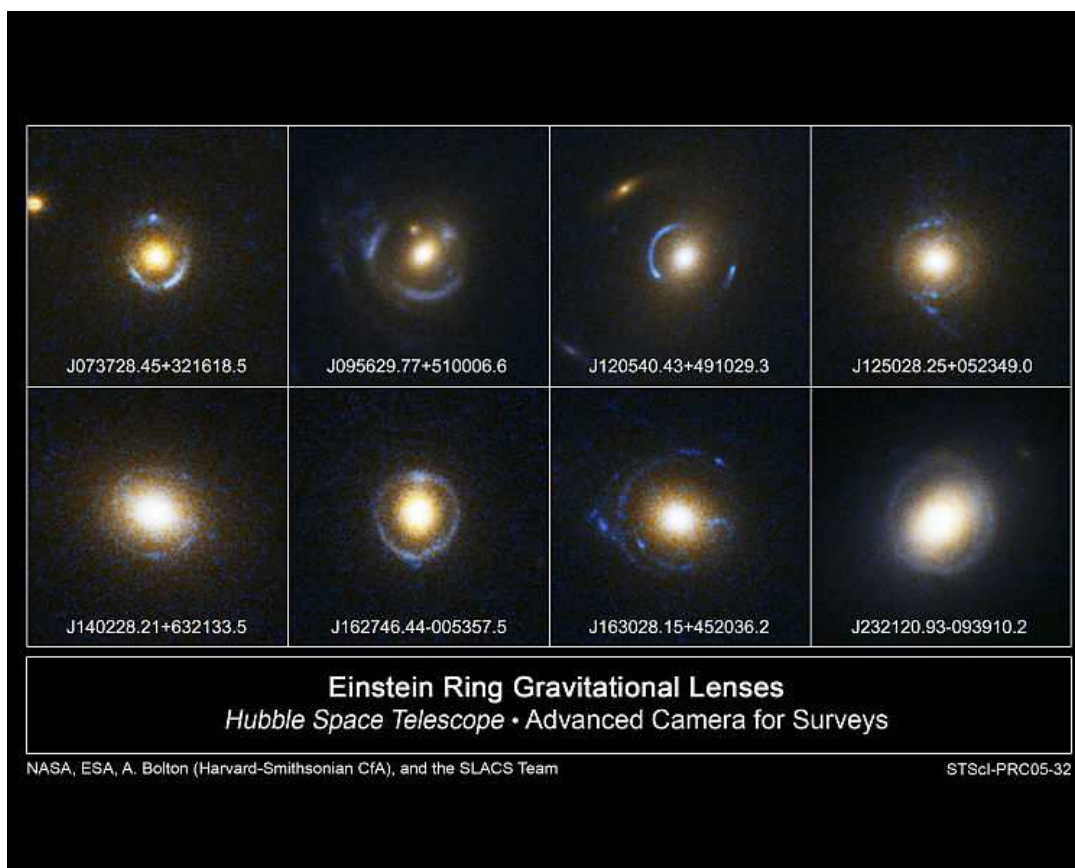
La deviazione della luce di una galassia distante intorno ad un oggetto massivo. Le frecce grigie indicano la posizione apparente della galassia distante. Le frecce bianche il reale percorso della luce



Lenti gravitazionali nell'ammasso di galassie Abell 1689; gli effetti della lente sono dei sottili archi luminosi visibili solo quando si ingrandisce questa immagine.

## L'Anello di Einstein

Tra i fenomeni più spettacolari prodotti dalle lenti gravitazionali v'è certamente il cosiddetto “anello di Einstein”. Esso si verifica quando la sorgente luminosa ed il corpo celeste che funge da lente gravitazionale risultino posti sulla stessa linea di vista rispetto all'osservatore: in questo caso, in conseguenza della simmetria circolare della configurazione ottica, si osservano non delle immagini multiple della sorgente, ma un anello luminoso centrato sulla posizione in cielo della lente gravitazionale. Però per un effetto abbastanza preciso con la visione di un vero anello è necessario che la fonte primaria di radiazione sia abbastanza compatta da apparire, rispetto al corpo che flette i suoi raggi, come un punto luminoso e altrettanto compatta deve essere la forma della lente, affinché il fascio di radiazione infine ottenuto sia il più regolare possibile. In genere è difficile che tali coincidenze si concretizzino e dunque appaiano, nella gran maggioranza dei casi, più che veri e propri anelli è possibile osservare dei semiarchi e delle striature incurvate.



Anelli di Einstein



La croce di Einstein.

## 9.6. Il GPS e la Relatività

Il sistema GPS: Global Positioning System

- 36 satelliti in orbita a circa 20000 km d'altezza, di cui 24 operativi e 12 di riserva
- 6 orbite inclinate di  $55^\circ$  sull'equatore
- almeno 4 sempre visibili ovunque
- ogni satellite ha un orologio atomico al cesio con precisione di 1 su  $10^{14}$

Errore in 1 giorno  $8.610^{-10} \text{ s} = 0.86 \text{ ns}$

Almeno 4 satelliti mandano frequentemente un segnale che contiene l'ora esatta (al ns circa) dell'istante in cui il segnale è partito e la posizione del satellite (orbite ellittiche).

Il dispositivo risolve il sistema di equazioni e trova il tempo e la posizione.

Con 0.86 ns di errore, la precisione può essere di circa 30 cm (in teoria)

Che c'entra la Relatività ??

Senza una conoscenza accurata della Teoria della Relatività Ristretta e della Teoria della Relatività Generale (la teoria completa della Gravitazione) il GPS non funzionerebbe per i seguenti motivi:

- Relatività Ristretta: i satelliti si muovono rispetto al ricevitore, e il loro orologio va più lentamente.
- Relatività Generale: i campi gravitazionali cambiano sia la velocità degli orologi, sia la propagazione dei segnali radio, effetto quest'ultimo dovuto alla "curvatura" dello spazio.

Alla base del sistema GPS c'è il postulato fondamentale della teoria della relatività, ovvero il fatto che la velocità della luce (e quindi la velocità di tutti i segnali radio) è costante, e indipendente dal moto della sorgente e del ricevitore.

La posizione di un ricevitore è determinata facendo una "triangolazione" ottenuta misurando il tempo di percorrenza del segnale emesso da alcuni satelliti in orbita terrestre

Se fosse vera la fisica di Galileo-Newton la velocità di un segnale emesso da un satellite in orbita dipenderebbe da direzione e velocità del satellite, rendendo impraticabile il calcolo.

Il fatto che la velocità della luce sia una costante universale implica che il nostro concetto intuitivo di spazio e tempo vada rivisto

Osservatori in moto relativo uno rispetto all'altro misurano intervalli di tempo e lunghezze diverse, in particolare, a bordo di un satellite in orbita il tempo si dilata, per effetto della Relatività Ristretta, quindi un orologio appare andare più lentamente

Se teniamo conto che la velocità del satellite è di circa 3.8 km/s, l'errore indotto dal moto del satellite a causa della relatività ristretta è di circa  $7.1 \mu\text{s} \cdot c$ , pari a circa 2.2 km.

Inoltre, per effetto della Relatività Generale, un campo gravitazionale curva lo spazio-tempo, e quindi, in presenza del campo gravitazionale terrestre, l'effetto senza correzioni porterebbe ad un errore di circa 15 Km.

Come fare? Una volta capita la fisica, la soluzione è semplice:

Gli orologi dei satelliti vanno volutamente ad una velocità diversa (quindi non sono uguali a quelli a Terra):

- I clock nominali a Terra vanno a 10.230000000000 MHz
- Quelli sui satelliti: 10.2299999954326 MHz

Vi sono ancora alcuni effetti periodici legati all'orbita non circolare dei satelliti, e al cosiddetto effetto Sagnac (legato alla rotazione della Terra) che sono corretti sul ricevitore perché dipendono dalla posizione relativa fra ricevitore e satelliti nonché dalla latitudine.

### 9.7. Elettronvolt

In fisica l'elettronvolt (simbolo eV) è un'unità di misura dell'energia, molto usata in ambito atomico e subatomico, definito come l'energia cinetica acquistata da un elettrone libero quando è accelerato da una differenza di potenziale elettrico di 1 volt nel vuoto. Sono molto usati i suoi multipli keV (kilo-eV, ossia 1000 elettronvolt), MeV (mega-eV, cioè un milione di elettronvolt), GeV (giga-eV, cioè un miliardo di elettronvolt) e TeV (tera-eV, cioè mille miliardi di elettronvolt).

#### Conversioni

Un elettronvolt è 1 volt (cioè 1 joule diviso per 1 coulomb) moltiplicato per la carica dell'elettrone; ne risulta un quantitativo molto piccolo di energia:

$$1\text{eV} = 1,60217653 \times 10^{-19} \text{ J}$$

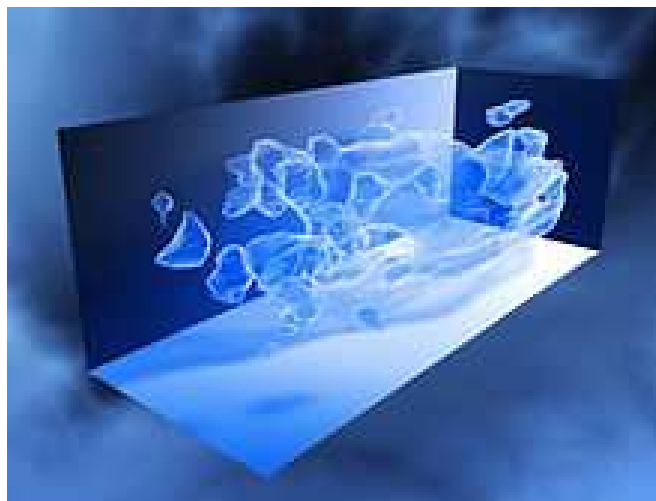
#### Usi

Nella fisica delle particelle, il megaelettronvolt ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ) e il gigaelettronvolt ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) sono utilizzati per misurare la massa delle particelle elementari, usando l'equazione di conversione della relatività ristretta:

$$E = mc^2$$

dove E sta per energia, m per massa e c è la velocità della luce nel vuoto. In queste unità, la massa di un elettrone è di  $0,511 \text{ MeV}/c^2$ , e quella di un protone di  $938 \text{ MeV}/c^2$

### 9.8. Materia oscura



Mappa tridimensionale della materia oscura elaborata da NASA, ESA e R. Massey (CALTECH)

In cosmologia, il termine materia oscura indica quella componente di materia che si manifesta attraverso i suoi effetti gravitazionali, ma non è direttamente osservabile.

### Generalità

Il concetto di materia oscura ha senso solo all'interno dell'attuale cosmologia basata sul Big Bang; infatti non si potrebbe altrimenti spiegare la formazione di galassie e ammassi di galassie nel tempo calcolato dall'evento iniziale. Non ci si spiega inoltre come le galassie, oltre ad essersi formate, si possano mantenere integre anche se la materia visibile non è in grado di sviluppare una sufficiente attrazione gravitazionale. Anche da questa prospettiva il concetto di materia oscura assume senso solo all'interno dell'attuale Modello Standard, che prevede come unica forza cosmologica quella gravitazionale: se il Modello Standard risultasse errato non si avrebbe necessità di materia oscura, giacché l'ipotesi della sua esistenza deriva solo dalla violazione di un modello matematico e non da alcuna evidenza sperimentale certa.

Nonostante dettagliate mappe dell'Universo vicino, che coprono lo spettro elettromagnetico dalle onde radio ai raggi gamma, si è riusciti ad individuare solo il 10% della sua massa, come dichiarato nel 2001 al New York Times da Bruce H. Margon, astronomo all'Università di Washington:

«È una situazione alquanto imbarazzante dover ammettere che non riusciamo a trovare il 90% [della materia] dell'Universo. »

Le più recenti misure indicano che la materia oscura costituisce circa l'86% della massa dell'universo e circa il 26% della sua energia.

Inizialmente veniva indicata come "massa mancante", nonostante effettivamente esista materia, in quanto sono osservabili gli effetti gravitazionali della sua massa. Tuttavia, questa materia non emette alcuna radiazione elettromagnetica e non risulta pertanto individuabile dagli strumenti di analisi spettroscopica, da cui l'aggettivo "oscura". Il termine massa mancante può essere fuorviante, dato che non è la massa a mancare, ma solo la sua luce.

### Cenni storici

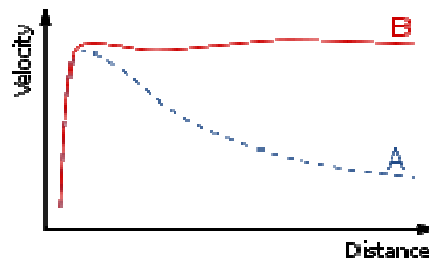
Nel 1933 l'astronomo Fritz Zwicky stava studiando il moto di ammassi di galassie lontani e di grande massa, nella fattispecie l'ammasso della Chioma e quello della Vergine. Zwicky stimò la massa di ogni galassia dell'ammasso basandosi sulla sua luminosità e sommò tutte le masse galattiche per ottenere la massa totale dell'ammasso. Ottenne poi una seconda stima indipendente della massa totale, basata sulla misura della dispersione delle velocità individuali delle galassie nell'ammasso; questa seconda stima di massa dinamica era 400 volte più grande della stima basata sulla luce delle galassie.

Sebbene l'evidenza sperimentale ci fosse già ai tempi di Zwicky, fu solo negli anni settanta che gli scienziati iniziarono ad esplorare questa discrepanza in modo sistematico e che l'esistenza della materia oscura iniziò ad essere considerata. La sua scoperta non avrebbe solo risolto la mancanza di massa negli ammassi di galassie, ma avrebbe avuto conseguenze di ben più larga portata sulla capacità dell'uomo di predire l'evoluzione e il destino dell'Universo.

Nel 2008, grazie allo studio di diversi ricercatori, tra cui francesi e canadesi coordinati dall'Istituto di Astrofisica di Parigi, si ebbe la definitiva evidenza della presenza di materia oscura. Difatti, utilizzando il telescopio Canada-France-Hawaii Telescope (Cfht), posto sul monte Mauna Kea nelle Hawaii, gli studiosi osservarono migliaia di immagini per verificare la deviazione che la luce subiva nel suo viaggio cosmico, constatando che essa veniva deviata anche in punti dove non erano visibili masse. Fu grazie a queste osservazioni dei suoi effetti gravitazionali che, pur non visibile, si scoprì la materia oscura.

### Potenziati evidenze della materia oscura

La rotazione delle Galassie



Curva di rotazione della galassia: (A): predetta; (B): osservata.

Un'importante evidenza osservativa della necessità della materia oscura fu fornita dalle curve di rotazione delle galassie spirali. Queste galassie contengono una vasta popolazione di stelle poste su orbite quasi circolari attorno al centro galattico. Come accade per le orbite planetarie, secondo la terza legge di Keplero le stelle con orbite galattiche più grandi dovrebbero avere velocità orbitali minori; ma la terza legge di Keplero è applicabile soltanto a stelle vicine alla periferia di una galassia spirale, poiché presuppone che la massa racchiusa dall'orbita sia costante. Tuttavia gli astronomi hanno condotto osservazioni delle velocità orbitali delle stelle nelle regioni periferiche di un gran numero di galassie spirali, e in nessun caso esse seguono la terza legge di Keplero. Invece di diminuire a grandi raggi, le velocità orbitali rimangono con ottima approssimazione costanti. L'implicazione è che la massa racchiusa da orbite di raggio via via maggiore aumenti, anche per stelle che sono apparentemente vicine al limite della galassia. Sebbene si trovino presso i confini della parte luminosa della galassia, questa ha un profilo di massa che apparentemente continua ben al di là delle regioni occupate dalle stelle.

Considerando le stelle presso la periferia di una galassia spirale, con velocità orbitali osservate normalmente di 200 chilometri al secondo, se la galassia fosse composta solo dalla materia visibile queste stelle la abbandonerebbero in breve tempo, dato che le loro velocità orbitali sono quattro volte più grandi della velocità di fuga dalla galassia. Dato che non si osservano galassie che si stiano disperdendo in questo modo, al loro interno deve trovarsi della massa di cui non si tiene conto quando si somma la massa di tutte le parti visibili.

### Le lenti gravitazionali

Un'altra possibile prova dell'esistenza della materia oscura è data dalle lenti gravitazionali (v. sopra). La massa visibile risulta insufficiente per creare una lente gravitazionale, per cui si prefigura la presenza di massicce quantità di materia oscura, ottenendo una massa totale in grado di deviare il percorso della luce.

### Aspetti sperimentali

Il 21 agosto 2006 la NASA ha rilasciato un comunicato stampa secondo cui il telescopio Chandra avrebbe trovato prove dirette dell'esistenza della materia oscura nello scontro tra due ammassi di galassie. All'inizio del 2007 gli astronomi del Cosmic Evolution Survey e Hubble Space Telescope, utilizzando le informazioni ottenute dal telescopio Hubble e da strumenti a terra, hanno tracciato una mappa della materia oscura rilevando che questa permea l'universo; ove si trova materia visibile deve essere presente anche grande quantità di materia oscura, ma questa è presente anche in zone dove non si trova materia visibile.

Il 3 aprile 2013, gli scienziati della NASA hanno riferito che una traccia di materia oscura potrebbe essere stata rilevata dalla Alpha Magnetic Spectrometer sulla Stazione Spaziale Internazionale. I primi risultati della "Space-borne Alpha Magnetic Spectrometer" evidenziano un eccesso di positroni ad alta energia nei raggi cosmici, per il quale una delle spiegazioni possibili è la presenza di materia oscura.

### 9.9. Reazioni nucleari

Un altro fenomeno fisico che si fonda su uno dei principi della relatività sono le reazioni di fissione e di fusione; in entrambi i casi si verifica una "perdita" di massa, che si converte in energia secondo la famosa equivalenza  $E = mc^2$ .

#### Fissione nucleare

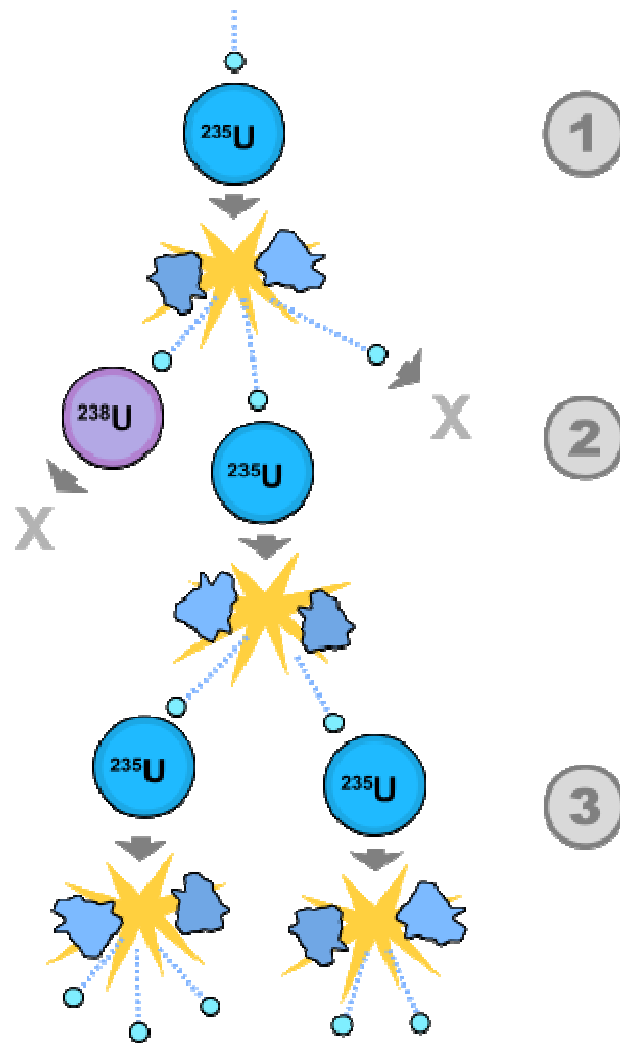
- 1) Un nucleo di uranio 235 viene "bombardato" da un neutrone e avviene la fissione che spezza il nucleo in due atomi (Krypton e Bario) e libera tre neutroni e dell'energia.
- 2) Uno di questi neutroni è assorbito da un altro nucleo di uranio 238 ed è perso nel bilancio. Un secondo neutrone può "fuggire" dal sistema o essere assorbito da un elemento che non continua la reazione. Il terzo neutrone viene assorbito da un nucleo di uranio 235 che si spezza in due atomi liberando due neutroni e dell'energia.
- 3) I due neutroni liberati si scontrano con due nuclei di uranio 235 e ogni nucleo libera da uno a tre neutroni che servono per continuare la reazione a catena.

In fisica nucleare la fissione nucleare è una reazione nucleare in cui il nucleo di un elemento pesante (ad esempio uranio-235 o plutonio 239) decade in frammenti di minori dimensioni, ovvero in nuclei di atomi a numero atomico inferiore, con emissione di una grande quantità di energia e radioattività. La fissione può avvenire spontaneamente in natura (fissione spontanea) oppure essere indotta artificialmente tramite opportuno bombardamento di neutroni.

È la reazione nucleare comunemente utilizzata nei reattori nucleari e nei tipi più semplici di arma nucleare, quali le bombe all'uranio (come "Little Boy", che colpì Hiroshima) o al plutonio (come "Fat Man", che colpì Nagasaki). Tutte le bombe a fissione nucleare vengono militarmente etichettate come Bombe A.

L'energia liberata è di circa **200 MeV** per ogni atomo che si fissiona. Per raffronto in un comune processo di combustione, l'ossidazione di un atomo di carbonio fornisce un'energia di circa **4 eV**, un'energia che è meno di un cinquantesimo di milionesimo di quella prodotta nella reazione nucleare di fissione.

(v. schema)



Schema di una reazione di fissione nucleare.

### Fusione nucleare

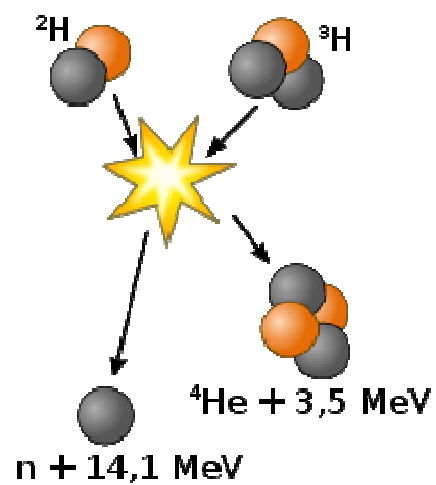


Diagramma della reazione esotermica D-T (deuterio-trizio) con la produzione di elio e l'emissione di energia.

In fisica nucleare la fusione è il processo di reazione nucleare attraverso il quale i nuclei di due o più atomi vengono compressi tanto da far prevalere l'interazione forte sulla repulsione elettromagnetica, unendosi tra loro e andando così a generare un nucleo di massa minore della somma delle masse dei nuclei reagenti nonché, talvolta, uno o più neutroni liberi; Il processo di fusione è il meccanismo che alimenta il Sole e le altre stelle.

In questo tipo di reazione il nuovo nucleo costituito e il neutrone liberato hanno una massa totale minore della somma delle masse dei nuclei reagenti, con conseguente liberazione di un'elevata quantità di energia, principalmente energia cinetica dei prodotti della fusione.

Affinché avvenga una fusione, i nuclei devono essere sufficientemente vicini, in modo che la forza nucleare forte predomini sulla repulsione coulombiana (i due nuclei hanno carica elettrica positiva, si respingono): ciò avviene a distanze molto piccole, dell'ordine di  $10^{-15}$  metri. L'energia necessaria per superare la repulsione coulombiana può essere fornita ai nuclei portandoli ad altissima pressione, altissima temperatura, circa  $10^7$  kelvin, e/o altissima densità.

La fusione nucleare, nei processi terrestri, è usata in forma incontrollata per le bombe a idrogeno e in forma controllata nei reattori a fusione termonucleare, ancora in fase sperimentale.

L'energia rilasciata nella maggior parte delle reazioni nucleari è notevolmente maggiore di quella delle reazioni chimiche. L'energia che viene rilasciata dalla reazione deuterio-trizio (D-T) mostrata in sopra è pari a **17,6 MeV**; in altre parole, con un grammo di deuterio e trizio si potrebbe produrre l'energia sviluppata da 11 tonnellate di carbone.

Gli atomi interessati dal processo di fusione nucleare, in natura e in ingegneria, sono gli isotopi dell'atomo di idrogeno, caratterizzati da minimo numero atomico, a cui corrisponde la minima energia di innesco. Tuttavia all'interno delle stelle più grandi è possibile anche la fusione di elementi più pesanti, si ritiene fino al ferro.

La fusione nucleare controllata potrebbe risolvere la maggior parte dei problemi energetici sulla terra, perché potrebbe produrre quantità pressoché illimitate di energia senza emissioni di gas nocivi o gas serra e con la produzione di limitate quantità scorie radioattive fra cui il trizio; una piccola quantità di radioattività residua interesserebbe solo alcuni componenti del reattore a fusione sottoposti a bombardamento neutronico durante i processi di fusione. Queste componenti sarebbero peraltro facilmente rimpiazzabili; i tempi di dimezzamento della radioattività residua sarebbero confrontabili con la vita media della centrale (decine d'anni). La quantità di deuterio e trizio ricavabile da tre bicchieri di acqua di mare e due sassi di medie dimensioni potrebbe supplire al consumo medio di energia di una famiglia di 4 persone per molto tempo.

### Il Sole

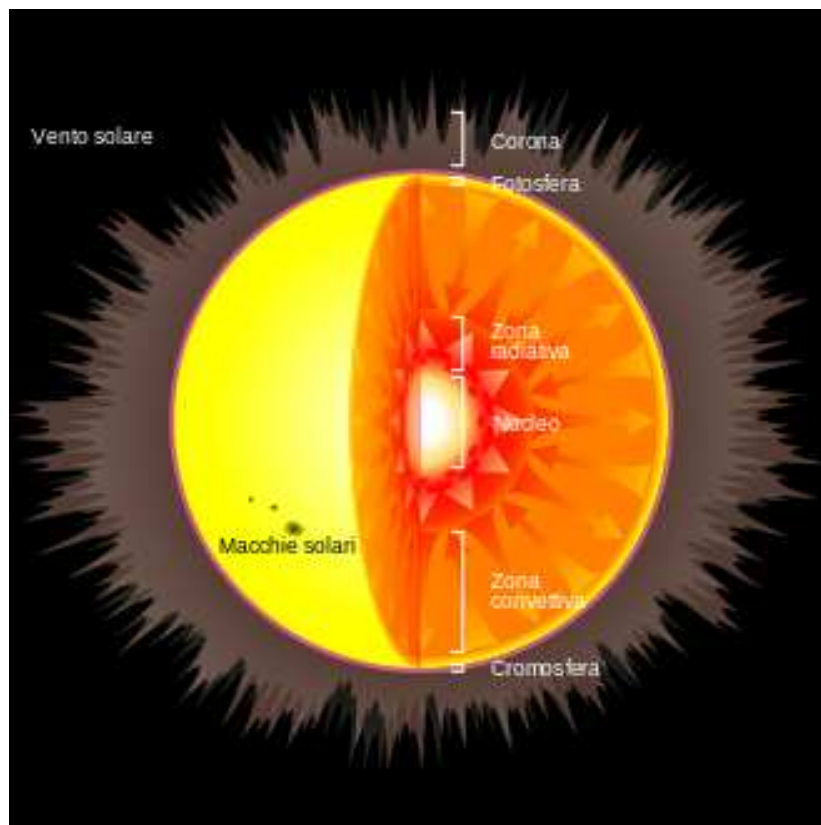
Il più spettacolare esempio di fusione nucleare è costituito dal nostro Sole (e da tutte le stelle, peraltro). Secondo le teorie odierne, il centro del Sole è composto prevalentemente da idrogeno. La temperatura si aggira sui 16 milioni di gradi, la pressione è elevatissima, intorno a 500 miliardi di atmosfere, e la densità del materiale nel nucleo è di circa  $150 \text{ g/cm}^3$ . Queste condizioni sono estreme per noi ma normali per una stella. Stelle più grandi del Sole hanno nuclei ancor più densi e caldi.

Gli atomi di idrogeno del nucleo non possono rimanere integri a queste temperature, e si separano in protoni ed elettroni. L'energia termica è così alta che più protoni, quando si incontrano casualmente, vincono la repulsione elettrica tra cariche dello stesso segno e si uniscono a formare un nucleo di elio. Ogni secondo, 594 milioni di tonnellate di idrogeno vengono convertite, rilasciando un'energia pari a 386 miliardi di miliardi di megajoule. Questa energia è pari alla massa di 4 milioni di tonnellate (le altre 590 vengono convertite in elio). Quindi il sole si alleggerisce ogni secondo di 4 milioni di tonnellate. La sua massa totale è abbastanza grande affinché, anche dopo 10 miliardi di anni di vita attiva, la sua massa si riduca solo impercettibilmente.

L'energia liberata dalla fusione nucleare si presenta inizialmente sotto forma di fotoni gamma, che partono per la tangente alla velocità della luce. Essi però non possono fare molta strada, perché vista l'alta densità saranno presto assorbiti da un atomo sul loro cammino, il quale li riemetterà in una direzione diversa e con uno spettro di frequenze più ampio. Il ciclo si ripeterà parecchie volte, finché i fotoni non raggiungono la superficie del Sole e lo lasciano alla volta dello spazio interplanetario. Si calcola che questo trasporto di energia dall'interno all'esterno del Sole duri ben 10 milioni di anni. In altre parole, se il nucleo del sole smettesse all'improvviso di produrre energia, la superficie continuerebbe a splendere ancora per lungo tempo. I neutrini, altro sottoprodotto delle reazioni di fusione nucleare, passano invece quasi indisturbati attraverso la materia, ed escono dal Sole in linea retta. Una piccolissima parte è intercettata dai pochi rivelatori di neutrini in attività sul pianeta.

Il processo di fusione è molto difficile. Alle condizioni vigenti nel centro del Sole il protone medio deve aspettare ben 13 miliardi di anni prima di fondersi con un altro e formare un nucleo di elio. Ciò significa che oggi la produzione di energia del Sole deriva dai protoni "fortunati", che hanno incontrato in anticipo il loro destino, e che via via che passa il tempo la probabilità delle reazioni aumenta. La luminosità solare aumenta quindi lentamente, il che ha indotto alcuni teorici ad ipotizzare che tra 500 milioni o un miliardo di anni il Sole sarà troppo caldo per consentire la vita sulla Terra.

Questo aumento è indipendente dall'evoluzione stellare a cui andrà incontro il Sole, e che lo porterà tra circa 5 miliardi di anni a trasformarsi in una gigante rossa. Il nucleo solare diventerà ancora più caldo e concentrato di oggi: la fusione dell'elio, tipica delle giganti rosse, richiede centinaia di milioni di gradi.



Il Sole, il corpo centrale del Sistema Solare, è una sfera di gas incandescente, per lo più idrogeno ed elio, della massa di  $2 \times 10^{33}$  g. (2 miliardi di miliardi di miliardi di tonnellate), pari al 99.9 % della massa totale del Sistema Solare stesso.

Il diametro del Sole è di ben 1.392.000 Km, 109 volte quello terrestre, e corrisponde, visto da Terra, ad un diametro angolare di circa 32 minuti d'arco, quasi pari a quello della Luna: questo dà luogo al fenomeno delle eclissi; cioè alla sovrapposizione apparente del disco lunare e di quello solare. La densità media del Sole è di  $1.4 \text{ g/cm}^3$ .

### Emissione di energia del Sole

Il Sole viene classificato come una stella di tipo spettrale G2; la sua temperatura superficiale è di circa 5.700 gradi ed esso emette radiazione elettromagnetica prevalentemente nella regione ottica e nel vicino infrarosso, tra 2.000 Angstrom e 3 micron, con una potenza di 400.000 miliardi di miliardi di KW ( $4 \cdot 10^{33}$  erg/sec).

Come visto, l'origine di questa emissione, che nel secolo scorso era stata attribuita alla contrazione gravitazionale del Sole e al conseguente riscaldamento del suo interno, risiede invece nella fusione nucleare che avviene nel centro: a causa della sua grande massa, le regioni interne del Sole vengono compresse fino a raggiungere temperature elevatissime (15 milioni di gradi) e ad innescare così la fusione, che richiede alte pressioni e temperature.

### L'energia solare, ossia quando la massa diventa energia

Nel Sole, che ha una temperatura interna di 15 milioni di kelvin, mediante le reazioni di fusione termonucleare (fusione protone-protone dei nuclei di idrogeno), ogni secondo 600 000 000 di tonnellate di idrogeno si trasformano in 595 500 000 tonnellate di elio. Quindi, dopo questa trasformazione, mancano all'appello 4 500 000 tonnellate di idrogeno (pari allo 0,75%) che sembrano svanite nel nulla; in realtà questa massa mancante si è trasformata direttamente in energia, ossia in radiazione elettromagnetica, secondo l'equazione di Albert Einstein  $E = mc^2$ .

Inserendo questo valore della massa nell'equazione di Einstein (dove l'energia è espressa in joule =  $Ws$ , la massa in kg e "c" in m/s), si calcola che ad esso corrisponde una potenza pari a:  $4\,500\,000\,000 \times (9 \times 10^{16}) = 405 \times 10^{24}$  watt, ossia a 405 000 miliardi di terawatt (TW), una quantità impensabile a livello terrestre.

Tutta la straordinaria potenza della nostra stella è dovuta alla conversione in energia di questa infinitesima, per il Sole, quantità di massa, paragonabile approssimativamente alla massa di un piccolo gruppo di montagne sulla terra.

Per capire l'enormità di questa energia, che espressa in wattora equivale a 112 500 000 000 TWh, il solo dato che può fungere da termine di paragone è la produzione mondiale di energia elettrica, che nel 2005 è stata di 17 907 TWh (equivalenti a 716,28 kg di massa).

Detto in altri termini, per eguagliare l'energia prodotta dal Sole in un solo secondo, tutti gli impianti di produzione di energia elettrica del nostro pianeta dovrebbero funzionare a pieno regime per i prossimi 6 282 459 anni.

### Megaton

Il Megaton (simbolo Mt) è un'unità di misura che non appartiene al sistema internazionale (SI) delle unità di misura. Essa serve per indicare l'energia emanata da una esplosione ed è frequentemente utilizzata per indicare l'energia liberata dall'esplosione di ordigni nucleari. Un'esplosione da 1 Mt sprigiona un'energia equivalente a quella liberata dall'esplosione di un milione di tonnellate di tritolo. Il Megaton rappresenta un'unità di misura della sola forza meccanica dell'esplosione, e non comprende gli altri effetti collaterali, come ad esempio l'emissione di radiazioni. Il Megaton è un'unità di misura di energia anche se, nel linguaggio comune, solitamente si dice che il Megaton indica la potenza esplosiva di una bomba. La potenza, come visto, ha dimensioni di un'energia per unità di tempo (la potenza, in un linguaggio fisicamente corretto, dovrebbe risultare dal rapporto tra l'energia liberata e la durata dell'esplosione).

Un Megaton equivale a  $4,184 \times 10^{15}$  J.

Per curiosità, la più potente bomba H fu fatta esplodere nel 1961 dall'URSS nella penisola di Novaja Zemlja; potenza 50 Mt, nome in codice "Big Ivan", soprannome "Zar".

## 9.10. Collasso gravitazionale, supernovae e buchi neri

### Le Supernovae

Una Supernova e' una stella che esplode. L'esplosione di Supernova rappresenta l'ultimo atto, distruttivo e spettacolare, del ciclo evolutivo di stelle molto massive. Durante l'esplosione viene liberata un'energia enorme e la stella diventa così luminosa da splendere più di una intera galassia (Figura 1). La luce emessa dalla stella in seguito all'esplosione dura qualche mese ed è paragonabile a quella che il nostro Sole e' in grado di emettere in un miliardo di anni!



Figura 1: L'esplosione di una supernova in una galassia spirale.

Esistono due tipi di Supernovae, che differiscono per il meccanismo di esplosione e per i “progenitori”, ovvero il tipo di stelle da cui si origina l'esplosione.

- Supernovae di Tipo I
- Supernovae di Tipo II
- 

Le Supernovae di tipo I non si originano da stelle singole ma da sistemi binari, costituiti da due stelle vicine che ruotano intorno ad un centro di gravità comune. I sistemi binari che possono dar luogo a una Supernova di tipo I sono quelli costituiti da una nana bianca fatta di carbonio e ossigeno e da una stella compagna. La materia di cui e' composta la nana bianca, a causa della densità e della pressione molto elevate, si trova in uno stato che si definisce “degenere”. Questo stato è stabile solo se la massa della stella e' inferiore a un valore limite detto “massa di Chandrasekar”, pari a 1,4 volte la massa del Sole. Nel caso in cui la nana bianca si trova in un sistema binario il suo campo gravitazionale può essere così forte che, se le stelle sono sufficientemente vicine, la stella compagna comincia a trasferire massa sulla nana bianca (Figura 2). In seguito al trasferimento di massa da parte della stella compagna, la nana bianca viene accresciuta fino a superare il limite di Chandrasekar e si contrae. La contrazione fa innescare le reazioni nucleari che fondono carbonio e ossigeno in nichel e l'energia rilasciata e' sufficiente per far esplodere completamente la stella. L'esplosione delle SNe I disintegra tutta la stella e nello spazio non rimangono che polveri, al contrario delle Supernovae di tipo II che possono lasciare una stella di neutroni.

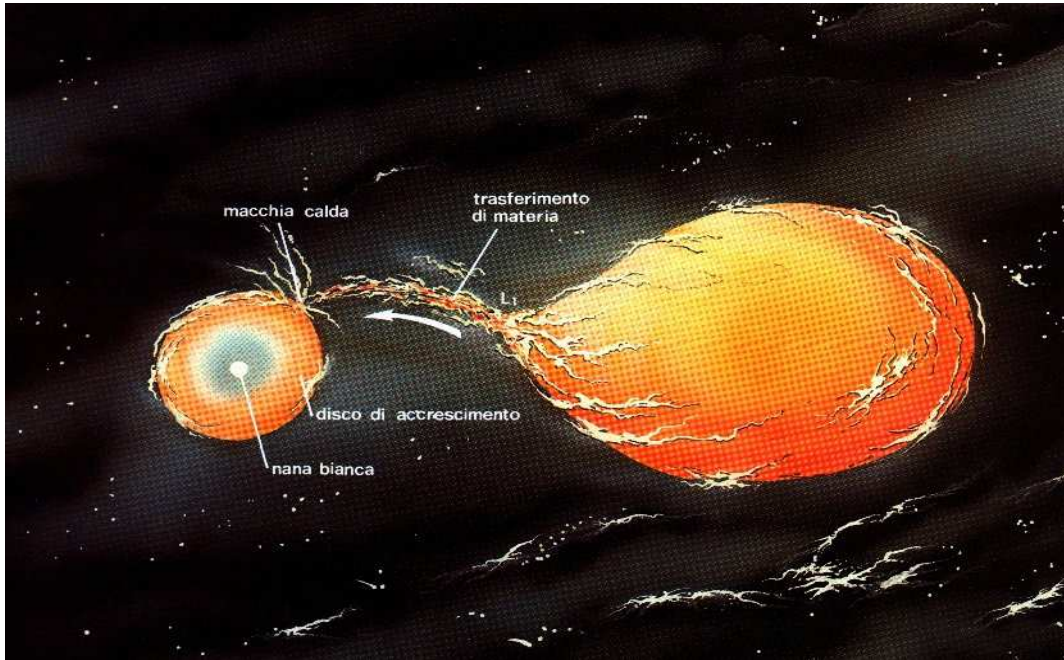


Figura 2: Trasferimento di massa in un sistema binario.

Le Supernovae di tipo II si originano da stelle molto massive (circa 10 volte la massa del nostro Sole). Questo tipo di stelle vivono fino a 10 milioni di anni (un tempo brevissimo, se pensiamo che la vita media stimata del nostro Sole è di circa 10 miliardi di anni) producendo energia dalla fusione termonucleare di idrogeno in elio e poi successivamente di elio in carbonio e ossigeno, di carbonio in sodio e magnesio e così via fino al ferro. Ogni volta che il combustibile nucleare al centro della stella finisce perché si è trasformato in un altro elemento, il nucleo si contrae sotto l'azione della gravità e riesce ad innalzare la temperatura fino ad innescare il bruciamento del nuovo elemento chimico. Sfortunatamente (per la stella) il ferro non può essere ulteriormente fuso per produrre energia e questa volta la contrazione del nucleo prosegue in maniera irreversibile. Quando la temperatura e la densità della materia all'interno del nucleo raggiungono un valore limite, i protoni e gli elettroni degli atomi si fondono a formare neutroni. In ognuna di queste reazioni di "neutronizzazione" viene prodotto un neutrino. In poche decine di secondi il diametro del nucleo si contrae da circa metà del raggio terrestre (3000 km) a poco più di 10 km. L'onda d'urto prodotta si propaga in circa due ore attraverso gli strati esterni della stella e, quando raggiunge la superficie, la stella esplode. Tutto il materiale di cui è composta la parte esterna della stella viene proiettato nello spazio circostante con una velocità approssimativa di 15000 km/s, lasciando come residuo il nucleo di neutroni che, a seconda della massa, può rimanere una stella di neutroni (pulsar) o diventare un buco nero (Figure 3 e 4).

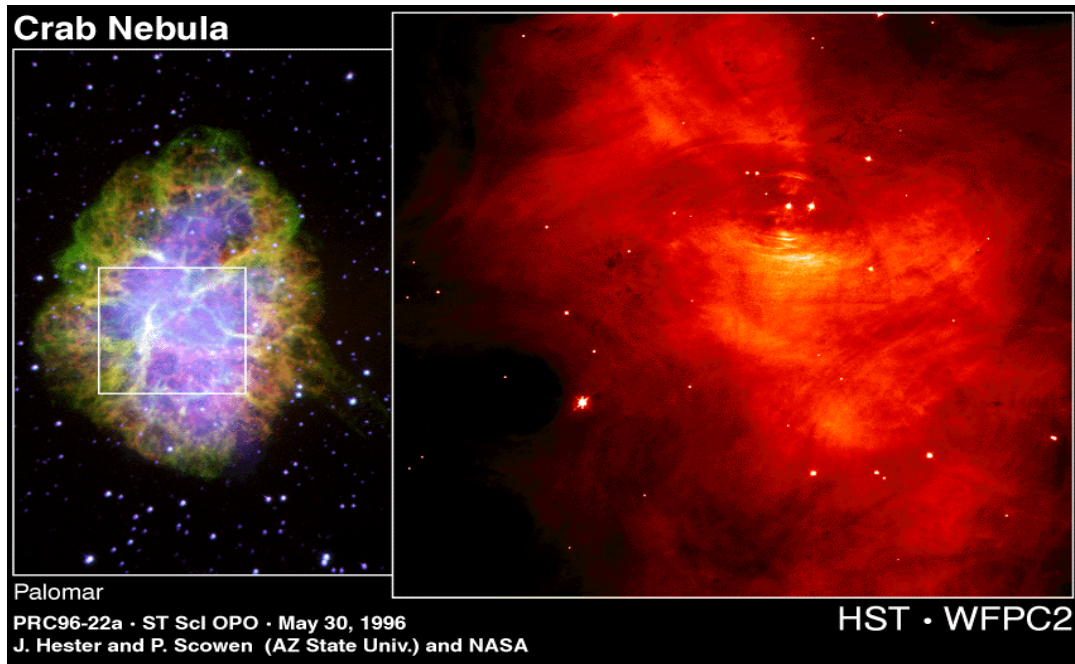


Figura 3: La Crab Nebula (Nebulosa del Granchio) si è formata dall'esplosione di una Supernova. Al suo centro c'è una stella di neutroni (pulsar).



Figura 4: Resto di una supernova

Verso il termine del proprio ciclo vitale, dopo aver consumato tramite fusione nucleare il 90% dell'idrogeno trasformandolo in elio, nel nucleo della stella si arrestano le reazioni nucleari. La forza gravitazionale, che prima era in equilibrio con la pressione generata dalle reazioni di fusione nucleare, prevale e comprime la massa della stella verso il suo centro.

Quando la densità diventa sufficientemente elevata può innescarsi la fusione nucleare dell'elio, in seguito alla quale c'è la produzione di litio, azoto e altri elementi (fino all'ossigeno e al silicio). Durante questa fase la stella si espande e si contrae violentemente più volte espellendo parte della propria massa. Le stelle più piccole si fermano ad un certo punto della catena e si spengono, raffreddandosi e contraendosi lentamente, attraversano lo stadio di nana bianca e nel corso di molti miliardi di anni diventano una sorta di gigantesco pianeta. In questo stadio la forza gravitazionale è bilanciata da un fenomeno quantistico, detto pressione di degenerazione, legato al principio di esclusione di Pauli. Per le nane bianche la pressione di degenerazione è presente tra gli elettroni.

Se invece il nucleo della stella supera una massa critica, detta limite di Chandrasekhar e pari a 1,44 volte la massa solare, le reazioni possono arrivare fino alla sintesi del ferro. La reazione che sintetizza il ferro per la formazione di elementi più pesanti è endotermica, richiede energia invece che emetterne, quindi il nucleo della stella diventa una massa inerte di ferro e non presentando più reazioni nucleari non c'è più nulla in grado di opporsi al collasso gravitazionale. A questo punto la stella subisce una contrazione fortissima che fa entrare in gioco la pressione di degenerazione tra i componenti dei nuclei atomici. La pressione di degenerazione arresta bruscamente il processo di contrazione, ma in questo caso può provocare una gigantesca esplosione, detta esplosione di supernova di tipo II.

Durante l'esplosione quel che resta della stella espelle gran parte della propria massa, che va a disperdersi nell'universo circostante. Quello che rimane è un nucleo estremamente denso e massiccio. Se la sua massa è abbastanza piccola da permettere alla pressione di degenerazione di contrastare la forza di gravità si arriva ad una situazione di equilibrio e si forma una stella di neutroni.

### **I buchi neri**

Se la massa supera le tre masse solari (limite di Volkoff-Oppenheimer) non c'è più niente che possa contrastare la forza gravitazionale. Inoltre, secondo la Relatività generale, la pressione interna non viene più esercitata verso l'esterno (in modo da contrastare il campo gravitazionale), ma diventa essa stessa una sorgente del campo gravitazionale rendendo così inevitabile il collasso infinito.

A questo punto la densità della stella morente, ormai diventata un buco nero, raggiunge velocemente valori tali da creare un campo gravitazionale talmente intenso da non permettere a nulla di sfuggire alla sua attrazione, neppure alla luce. Si ha una curvatura infinita dello spaziotempo che può far nascere dei cunicoli all'interno di buchi neri in rotazione. Alcuni scienziati hanno così ipotizzato che, almeno in linea teorica, sia possibile viaggiare nel passato, visto che i cunicoli collegano due regioni diverse dello spaziotempo.

A causa delle loro caratteristiche i buchi neri non possono essere "visti" direttamente ma la loro presenza può essere ipotizzata a causa degli effetti di attrazione gravitazionale che esercitano nei confronti della materia vicina e della radiazione luminosa in transito nei paraggi o "in caduta" sul buco.

Esistono anche altri scenari che possono portare alla formazione di un buco nero. In particolare una stella di neutroni in un sistema binario può rubare massa alla sua vicina fino a superare la massa di Chandrasekhar e collassare. Alcuni indizi suggeriscono che questo meccanismo di formazione sia più frequente di quello "diretto".

Un altro scenario permette la formazione di buchi neri con massa inferiore alla massa di Chandrasekhar. Anche una quantità arbitrariamente piccola di materia, se compressa da una gigantesca forza esterna, potrebbe in teoria collassare e generare un orizzonte degli eventi molto piccolo. Le condizioni necessarie potrebbero essersi verificate nel primo periodo di vita dell'universo, quando la sua densità media era ancora molto alta a causa di variazioni di densità o di onde di pressione. Questa ipotesi è ancora completamente speculativa e non ci sono indizi che buchi neri di questo tipo esistano.

### **Cosa è' un buco nero**

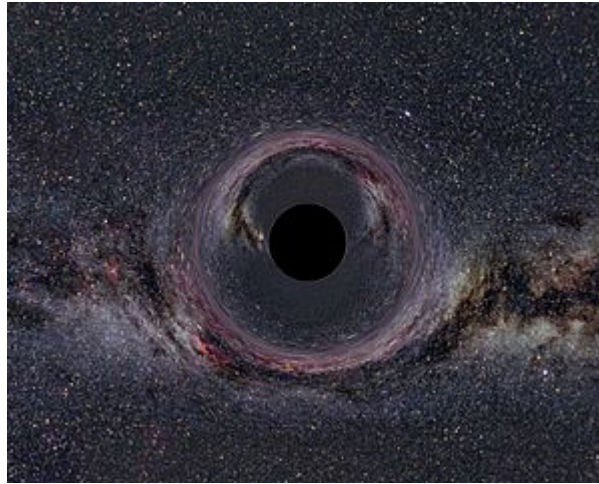
Si definisce buco nero un corpo celeste estremamente denso, dotato di un'attrazione gravitazionale talmente elevata da non permettere l'allontanamento di alcunché dalla propria superficie.

Questa condizione si ottiene quando la velocità di fuga dalla sua superficie è superiore alla velocità della luce.

Un corpo celeste con questa proprietà risulterebbe invisibile e la sua presenza potrebbe essere rilevata solo indirettamente, tramite gli effetti del suo intenso campo gravitazionale.

## APPUNTI DEL CORSO DI FISICA

Fino ad oggi sono state raccolte numerose osservazioni astrofisiche che possono essere interpretate (anche se non univocamente) come indicazioni dell'effettiva esistenza di buchi neri nell'Universo. Il termine "buco nero" è dovuto al fisico John Archibald Wheeler (in precedenza si parlava di dark stars o black stars). Poiché anche nella teoria gravitazionale newtoniana la velocità di fuga non dipende dalla massa del corpo in moto nel campo di gravità, già nel 1783 lo scienziato inglese John Michell suggerì in una lettera a Henry Cavendish (successivamente pubblicata nei rendiconti della Royal Society)[1] che la velocità di fuga di un corpo celeste potrebbe risultare superiore alla velocità della luce, dando luogo a quella che egli chiamò una dark star.



Rappresentazione artistica di un buco nero, se posto davanti ad uno sfondo ricco di stelle. Da notare la luce distorta dalla gravità e l'orizzonte degli eventi. Il buco è pensato con una massa pari a dieci volte quella del Sole, e visto da 600 km di distanza. In questa posizione sarebbe necessaria un'accelerazione pari a  $4 \times 10^8$  g (dove "g" è l'accelerazione di gravità sulla Terra) per mantenere il distacco costantemente.

Buchi neri, mostri oscuri del cielo. Se una stella è molto massiccia, più di 6-7 volte il Sole, quando esplode come supernova dà luogo all'oggetto più strano e affascinante del cosmo: un buco nero. Il nucleo della stella crolla sotto il proprio peso e non riesce a controbilanciarlo nemmeno comprimendosi al massimo. Niente può fermare la caduta della materia verso il centro della stella, finché l'intera massa del nucleo non si concentra in un unico punto! L'oggetto che si forma, il buco nero, è qualcosa di così strano e così estremo che non può essere descritto con le leggi della fisica che valgono sulla Terra.

La gravità di un buco nero, infatti, è così grande da comprimere la materia che lo compone fino ad una densità praticamente infinita.

Essa si trova quindi in uno stato fisico a noi sconosciuto.

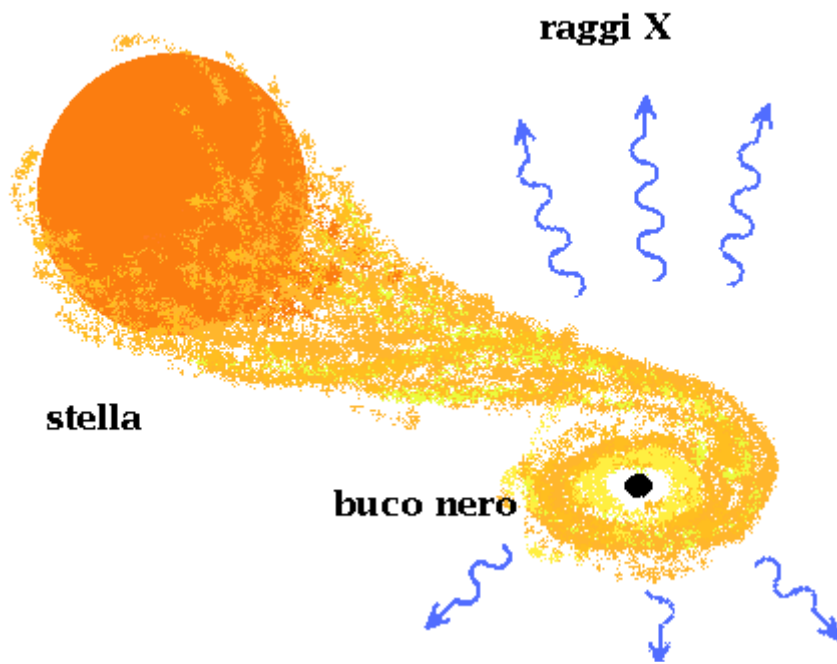
La forza di attrazione gravitazionale di un buco nero è immensa: qualunque cosa che gli passi troppo vicino viene catturata e vi cade dentro, senza poterne più uscire. Nemmeno un raggio di luce, che è la cosa più veloce che esista in natura, può sfuggire a questo mostro: non potendo emettere radiazione, esso è completamente oscuro e non può essere "visto".

Attenzione però. Spesso si pensa che un buco nero possa inghiottire tutto quello che gli sta intorno: in realtà, l'attrazione gravitazionale che esso esercita su un corpo dipende dalla distanza del corpo stesso, e segue le leggi di Keplero e di Newton; solo se un corpo si avvicina troppo viene catturato da questo gigantesco aspirapolvere spaziale.



Il disco di polvere che circonda un enorme buco nero. Misurando la velocità del gas si può sapere quanto è intenso il campo gravitazionale del buco nero e quindi conoscere la sua massa. (HST)

Come si rileva un buco nero ??



Un buco nero in un sistema binario che risucchia gas dalla stella compagna.

Tuttavia, esistono delle evidenze indirette dell'esistenza dei buchi neri. Quando un buco nero fa parte di un sistema binario di stelle, esso strappa il gas più esterno della compagna e lo risucchia. Questo gas si mette in rotazione, formando un disco attorno al buco nero, che ruota anch'esso sul proprio asse; da questo disco, pian piano cade dentro al buco nero. Lo si può vedere nel disegno qui sopra.

## 10. CENNI DI MECCANICA QUANTISTICA

### 10.1. Effetto Fotoelettrico

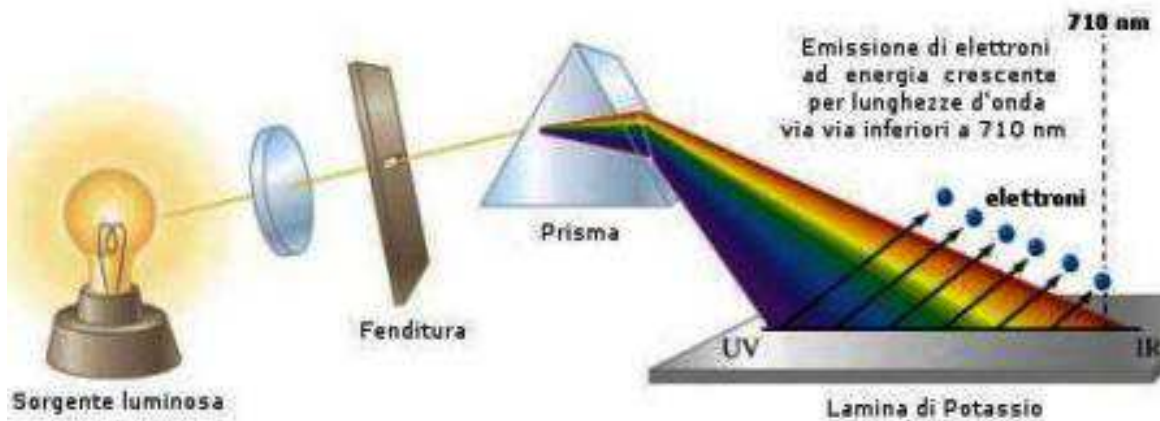
L'effetto fotoelettrico è quel fenomeno che consiste nell'emissione, da parte di un metallo, di elettroni quando viene investito da radiazione elettromagnetica avente una determinata energia.

Gli elettroni espulsi nel fenomeno dell'effetto fotoelettrico sono normalmente trattenuti all'interno del metallo da una certa energia e per espellerli all'esterno, occorre, naturalmente, investire il metallo con una radiazione elettromagnetica avente una energia  $E = hf$  almeno uguale all'energia che li trattiene, dove  $h$  è la costante di Planck, e  $f$  è la frequenza della luce incidente.

La frequenza di tale radiazione viene detta frequenza critica  $f_0$ , ed è caratteristica di ogni metallo.

Utilizzando una luce di frequenza  $f < f_0$ , anche se molto intensa, non si verifica alcun effetto.

Utilizzando una luce di frequenza  $f > f_0$ , gli elettroni emessi mostrano una energia cinetica tanto più grande quanto maggiore è la frequenza  $f$ .



La scoperta dell'effetto fotoelettrico indusse Einstein a confermare l'ipotesi che la luce potesse manifestare, oltre che una natura ondulatoria, anche una natura corpuscolare. Infatti, solo particelle cariche di sufficiente energia sarebbero in grado di spostare altre particelle (elettroni del metallo) e di impartire loro una accelerazione tanto maggiore quanto maggiore era la frequenza della luce impegnata.

In fisica dello stato solido l'effetto fotoelettrico è il fenomeno fisico caratterizzato dall'emissione di elettroni da una superficie, solitamente metallica, quando questa viene colpita da una radiazione elettromagnetica, ossia da fotoni aventi una certa frequenza.

Come comprese Einstein, riprendendo la teoria di Planck, l'effetto fotoelettrico evidenzia la natura quantistica della luce.

L'elettrone può uscire dal metallo solo se l'energia del fotone è almeno uguale al "lavoro di estrazione". Esiste, pertanto, una "soglia minima" di estrazione per ogni metallo, che fa riferimento alla frequenza del fotone incidente e, quindi, alla sua energia  $hf$ , la quale coincide con il "lavoro di estrazione".

Il valore di soglia varia in base al tipo di materiale considerato (in genere metalli) e dipende, pertanto, dalle sue caratteristiche atomiche; anche il grado di purezza del metallo influisce sul valore di soglia (per tale motivo i testi o i siti specializzati riportano spesso valori di soglia differenti per lo stesso metallo).

Con l'aumentare dell'energia dei fotoni incidenti (ossia quando aumenta la frequenza  $f$ ) aumenta anche l'energia cinetica degli elettroni estratti.

Va in proposito sottolineato che aumentando l'intensità della radiazione elettromagnetica (ossia il numero di fotoni al secondo, di pari energia, che colpiscono l'unità di superficie) aumenta il numero degli elettroni estratti ma non la loro energia cinetica, la quale dipende esclusivamente dall'energia dei fotoni incidenti.

Un caso particolare di effetto fotoelettrico è l'effetto fotovoltaico (o fotoelettrico).

La scoperta dell'effetto fotoelettrico va fatta risalire alla seconda metà del XIX secolo e ai tentativi di spiegare la conduzione nei liquidi e nei gas, con i contributi di Hertz, Righi e altri, fino a quando Einstein nel 1905 ne diede l'interpretazione corretta, intuendo che l'estrazione degli elettroni dal metallo si spiegava molto più coerentemente ipotizzando che la radiazione elettromagnetica fosse costituita da pacchetti di energia o quanti, poi denominati fotoni.

L'ipotesi quantistica di Einstein non fu accettata per diversi anni da una parte importante della comunità scientifica, tra cui Hendrik Lorentz, Max Planck e Robert Millikan (vincitori del Premio Nobel per la fisica, rispettivamente, nel 1902, 1918 e 1923), secondo i quali la reale esistenza dei fotoni era un'ipotesi inaccettabile, considerato che nei fenomeni di interferenza le radiazioni elettromagnetiche si comportano come onde. L'iniziale scetticismo di questi grandi scienziati dell'epoca non deve sorprendere dato che perfino Max Planck, che per primo ipotizzò l'esistenza dei quanti (anche se con riferimento agli atomi, che emettono e assorbono "pacchetti di energia"), ritenne, per diversi anni, che i quanti fossero un semplice artificio matematico e non un reale fenomeno fisico. Ma successivamente lo stesso Robert Millikan dimostrò sperimentalmente l'ipotesi di Einstein sull'energia del fotone, e quindi dell'elettrone emesso, che dipende soltanto dalla frequenza della radiazione, e nel 1916 effettuò uno studio sugli elettroni emessi dal sodio che contraddiceva la classica teoria ondulatoria di Maxwell.

Per i suoi studi sull'effetto fotoelettrico e la conseguente scoperta dei quanti di luce Einstein ricevette il Premio Nobel per la fisica nel 1921.

### 10.2. Diffrazione degli Elettroni

A conferma della teoria ondulatoria della materia (secondo la quale a ogni particella è associata un'onda la cui lunghezza d'onda, detta "di De Broglie", è legata alla quantità di moto del corpuscolo), la diffrazione può essere osservata anche nella propagazione di fasci di particelle, ad esempio di elettroni.

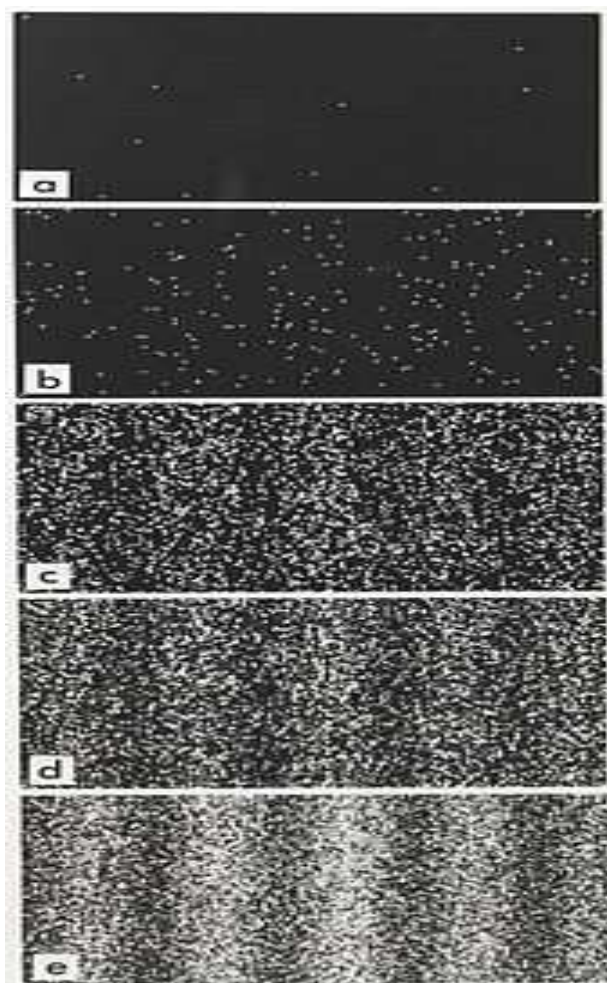
La diffrazione di particelle materiali come gli elettroni è uno dei maggiori punti di forza della meccanica quantistica: osservare la diffrazione di un elettrone o di un neutrone consente di verificare l'esistenza della dualità onda-particella, dato che la diffrazione è un fenomeno caratteristico delle onde; questa diffrazione è anche un utile strumento scientifico: la lunghezza d'onda di queste particelle è sufficientemente piccola da essere usata nella scansione della struttura atomica dei cristalli.

La lunghezza d'onda associata ad una particella è la cosiddetta lunghezza d'onda di De Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

dove  $h$  è la costante di Planck e  $v$  e  $m$  sono rispettivamente la velocità e la massa della particella;  $\lambda$  è caratteristica di qualsiasi oggetto materiale, anche se è rilevabile solo per entità con piccola massa, come gli atomi e altre particelle.

Persino la Terra ha una sua lunghezza d'onda (in effetti, qualunque oggetto dotato di una quantità di moto la possiede): avendo una massa di circa  $6 \times 10^{24}$  kg e una velocità orbitale media di circa  $30000 \text{ ms}^{-1}$ , essa ha una lunghezza d'onda di De Broglie pari a  $3.68 \times 10^{-63} \text{ m}$ .



Esperimento della doppia fenditura effettuato con elettroni. Le immagini sono prese dopo l'invio di 10 (a), 200 (b), 6000 (c), 40000 (d), 140000 (e) elettroni e mostrano una concentrazione della presenza di elettroni lungo una serie di bande, similmente a quanto accade nell'interferenza luminosa.

### 10.3. Principio di indeterminazione di Heisenberg



Foto di Werner Karl Heisenberg del 1927, quando il fisico tedesco si occupò dei principi della meccanica quantistica e in particolare del principio di indeterminazione.

Il principio di indeterminazione di Heisenberg è una relazione fondamentale della meccanica quantistica che coinvolge coppie di grandezze fisiche in relazione fra loro. Esso esprime i limiti nella conoscenza o determinazione dei valori che queste grandezze assumono in un sistema fisico. Enunciato per la prima volta nel 1927 dal fisico tedesco Werner Karl Heisenberg, nello specifico il principio, in una delle sue formulazioni odierne, assume la forma

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$

in cui  $\Delta x$  è l'errore sulla posizione e  $\Delta p$  quello sulla quantità di moto, mentre  $\hbar$  è la costante di Planck ridotta  $\hbar = h/2\pi$

In questi termini, il principio di indeterminazione di Heisenberg implica che ad una particella non è possibile assegnare, e quindi non è possibile conoscere, un definito valore della posizione e della velocità o quantità di moto nello stesso istante temporale con precisione assoluta, ovvero, incertezza nulla: tanto più si tenta di ridurre l'incertezza su una variabile, tanto più aumenta l'incertezza sull'altra.

Il principio esprime l'impossibilità di determinare contemporaneamente con errore minimo a piacere la posizione e la quantità di moto di una particella elementare mediante l'osservazione, in quanto l'una esclude l'altra, mentre non pone vincoli sulla misura di una singola grandezza, che può essere determinata con precisione arbitraria.

« Nell'ambito della realtà le cui connessioni sono formulate dalla teoria quantistica, le leggi naturali non conducono quindi a una completa determinazione di ciò che accade nello spazio e nel tempo; l'accadere (all'interno delle frequenze determinate per mezzo delle connessioni) è piuttosto rimesso al gioco del caso »

(*“Über quantenmechanische Kinematik und Mechanik”*, Mathematische Annalen, 1926)

Il principio non significa che esistano coppie di grandezze fisiche impossibili da misurare contemporaneamente, ma che, quanto più è precisa la misura di una grandezza, tanto maggiore sarà l'errore nella misura dell'altra, per cui l'osservatore dovrà scegliere quale misura privilegiare e disporre gli strumenti di conseguenza. Il principio di indeterminazione è legato al dualismo onda-particella: le particelle subatomiche esibiscono proprietà sia corpuscolari, sia ondulatorie, ma non entrambe nello stesso momento.

Il principio di indeterminazione rappresenta la chiave di volta della meccanica quantistica, confermato da oltre ottant'anni di esperimenti, e sancisce una radicale rottura rispetto alle leggi della meccanica classica.

Il principio di indeterminazione inizialmente fu spiegato da Werner Heisenberg sostenendo che la misura della posizione disturba necessariamente la quantità di moto della particella. In realtà, l'incertezza non sempre proviene dall'influenza perturbatrice della misura, ma dalla natura quantistica della particella stessa. È più accurato dire che, in meccanica quantistica, le particelle hanno alcune proprietà tipiche delle onde.

Si consideri la seguente analogia: supponiamo di avere un segnale che varia nel tempo, come un'onda sonora, e che si voglia sapere le frequenze esatte che compongono il segnale in un dato momento. Questo risulta essere impossibile: infatti, per poter determinare le frequenze accuratamente, è necessario campionare il segnale per un intervallo temporale, e si perde quindi la precisione sul tempo. (In altre parole, un suono non può avere sia un tempo preciso, come in un breve impulso, sia una frequenza precisa, come in un tono puro continuo). Il tempo e la frequenza dell'onda nel tempo, sono analoghi alla posizione e alla quantità di moto dell'onda nello spazio.

## **APPUNTI DEL CORSO DI FISICA**

Il principio di indeterminazione ha posto fine al determinismo così come lo aveva teorizzato in origine Isaac Newton e rielaborato in tempi più recenti dal marchese De Laplace. Per Newton era sufficiente conoscere posizione e velocità di un corpo in un dato momento per poter calcolare con le leggi della fisica classica tutti i suoi stati precedenti e futuri.

Laplace riprese questa teoria, affermando che doveva esistere un insieme di leggi fisiche tale da poter predire qualunque accadimento futuro e passato che si sarebbe verificato nell'universo. La meccanica quantistica introduce una novità di fondo nel metodo sperimentale: la teoria non predice più un numero, ma un insieme di valori associati a una probabilità.

Einstein rifiutò questa interpretazione, e l'aneddotica riporta la famosa frase "Il Grande Vecchio (Dio) non gioca ai dadi", al che un altro grande fisico (Bohr) ribatté: "E tu come lo sai?".

E PER FINIRE .....

## GLI INVITI PER IL GRAN BALLO DEGLI SCIENZIATI

Quando furono diramati gli inviti per il Gran Ballo degli Scienziati...

**Pierre e Marie Curie** irradiarono entusiasmo;  
**Einstein** pensò che sarebbe stato **relativamente** facile parteciparvi;  
**Volta** si sentì **elettrizzato**;  
**Ampère** non ne fu messo al **corrente**;  
**Ohm** al principio oppose **resistenza**;  
**Boyle e Mariotte** dissero che erano in un periodo di **pressione**;  
**Edison** pensò che sarebbe stata un'esperienza **illuminante**;  
**Stephenson** si mise a **sbuffare**;  
i **fratelli Wright** si sentirono **volare**;  
**Morse** avrebbe preso la **linea 2** e sarebbe arrivato alle 8 in **punto**;  
**Franklin** disse che sarebbe arrivato in un **lampo**;  
**Meucci** avrebbe **telefonato** per conferma;  
**Von Braun** sarebbe arrivato come un **missile**;  
**Fermi** disse che era una notizia **atomica**;  
**Bohr, Schrödinger e Dirac** volevano sapere **quanti** erano i partecipanti;  
**Heisenberg** era un po' **indeterminato**;  
la moglie di **Coulomb** si sentì **carica**;  
**Hertz e Maxwell** si sentirono sulla cresta dell'**onda**;  
**Joule** dovette rinunciare per problemi di **lavoro**;  
**Nobel** esplose di gioia per la notizia;  
**Kelvin** disse che era in **grado** di partecipare;  
**Avogadro** non fu avvisato: nessuno si ricordava il suo **numero**;  
**Galileo** sarebbe arrivato da Firenze con il **Pendolino**;  
**Keplero** non poteva partecipare per un'inflammazione alle **orbite**;  
**Archimede** si stava guardando allo **specchio** mentre **galleggiava** nel bagno;  
**Darwin** disse che la festa si sarebbe **evoluta** benissimo;  
**Leonardo** apparve veramente **giocondo**;  
**Newton** accettò con **gravità**.