Parte Prima
Introduzione:

LA NASCITA DELLA FISICA MODERNA

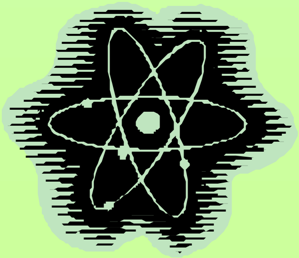
INVITO ALLA FISICA

Che cos'e` la fisica**: da Aristotele a Galileo, da Newton a Einstein, a oggi la fisica e` lo studio dei **fenomeni naturali (per esempio: moto dei pianeti, arcobaleno, buio della notte, colore del cielo, struttura della materia, atomi e nuclei, isolanti e conduttori elettrici, natura della luce, ecc).

Chi e` il fisico: una persona curiosa.

GRANDEZZE FISICHE

QUANTITA` MISURABILI



CENNI STORICI

Si deve ai popoli dell'antichita` (babilonesi, caldei, egizi, sumeri, fenici, ecc..) la nascita della nostra civilta`.
Il mondo ellenistico fece una sintesi delle loro conoscenze e diede origine alla scienza classica.

La **Fisica di Aristotele**: gli elementi fondamentali della natura (terra, acqua, aria, fuoco) e le forze che agiscono tra loro.
La **teoria atomistica**: Democrito, Pitagora, Lucrezio.
Astronomia e cosmologia degli antichi greci: Tolomeo e Ipparco.
Le nuove idee: Bruno e Campanella.

La nuova scienza: **Copernico, Galileo, Keplero, Newton, Cartesio**.

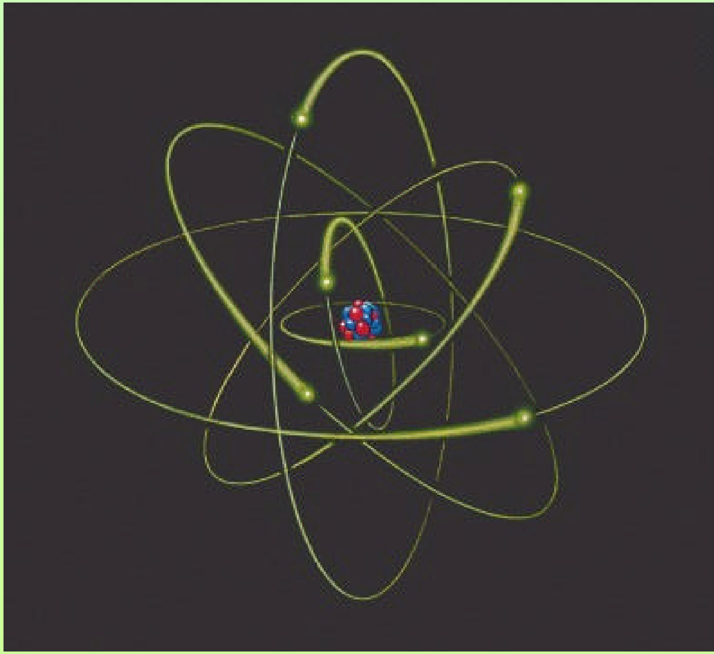
La **seconda rivoluzione scientifica** e la nascita della scienza moderna. Teorie, esperimenti e osservazioni.

Einstein e la relativita`. Meccanica quantistica.

L'atomo di **Bohr** e la nascita della **fisica atomica**.

Fisica nucleare, decadimenti radioattivi, fissione e fusione.

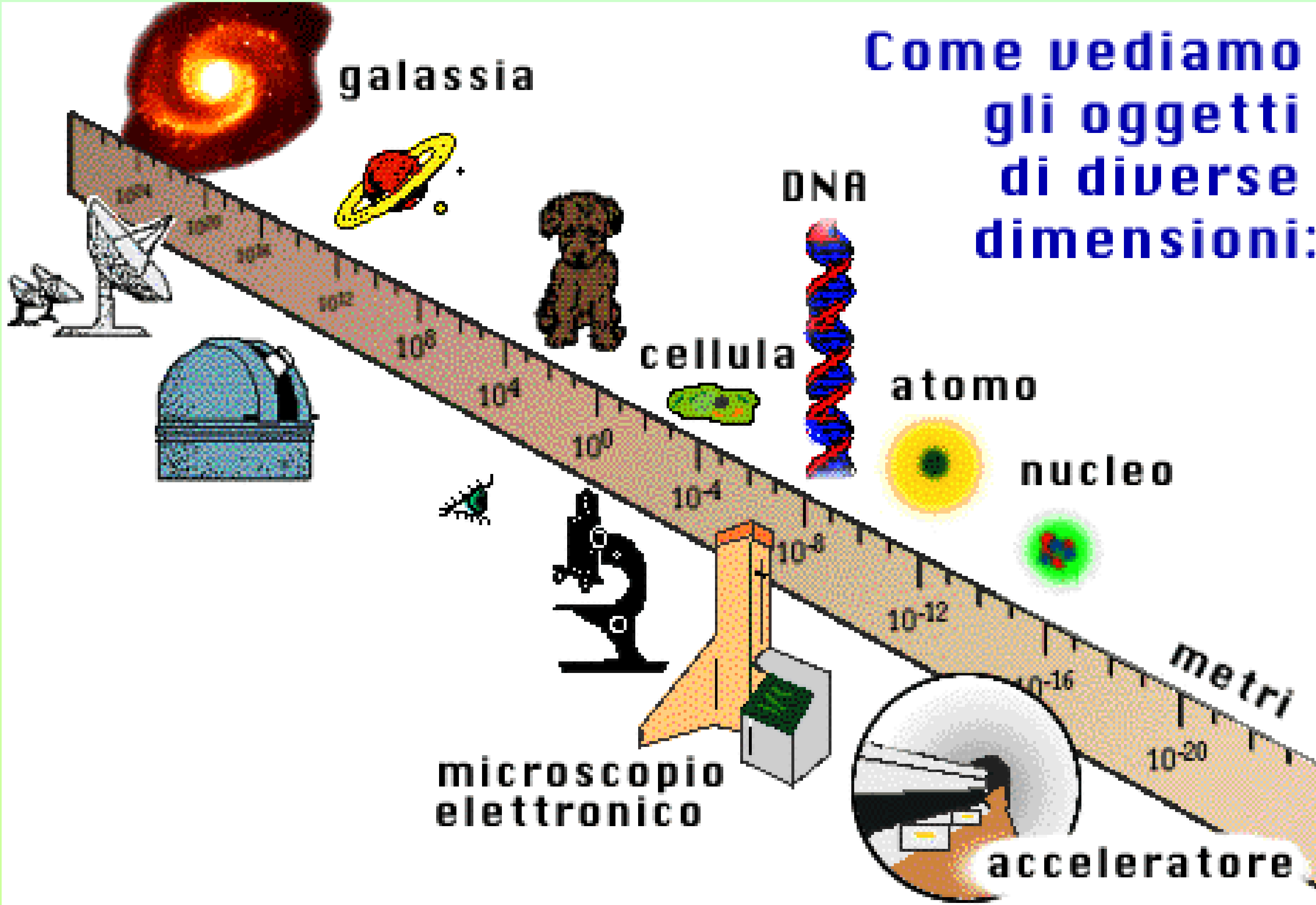
- Particelle elementari: **quark** e **leptoni.**
- Astrofisica e cosmologia moderne: il **Big Bang**.
- Radiazione cosmica e **Fisica astroparticellare**.



見十一日沒三年三月乙巳出東南方大中祥符四
年正月丁丑見南斗魁前天禧五年四月丙辰出軒轅
前星西北大如桃速行經軒轅大星入太微垣掩右執
法犯次將歷屏星西北凡七十五日入濁沒明道元
年六月乙巳出東北方近濁有芒彗至丁巳凡十三
日沒至和元年五月己丑出天關東南可數寸歲餘
稍沒熙寧二年六月丙辰出箕度中至七月丁卯犯
箕乃散三年十一月丁未出天囷元祐六年十一月
辛亥出參度中犯掩側星壬子犯九游星十二月癸
酉入奎至七年三月辛亥乃散紹興八年五月守婁

宋史志卷九

La fisica classica studia fenomeni su *scala umana*, la fisica moderna studia **l'infinitamente piccolo** e **l'infinitamente grande**.



SULLA NATURA DELLA LUCE

Ippocrate e **Aristotele** pensavano che l'occhio emettesse raggi per mezzo dei quali potesse "sentire" gli oggetti

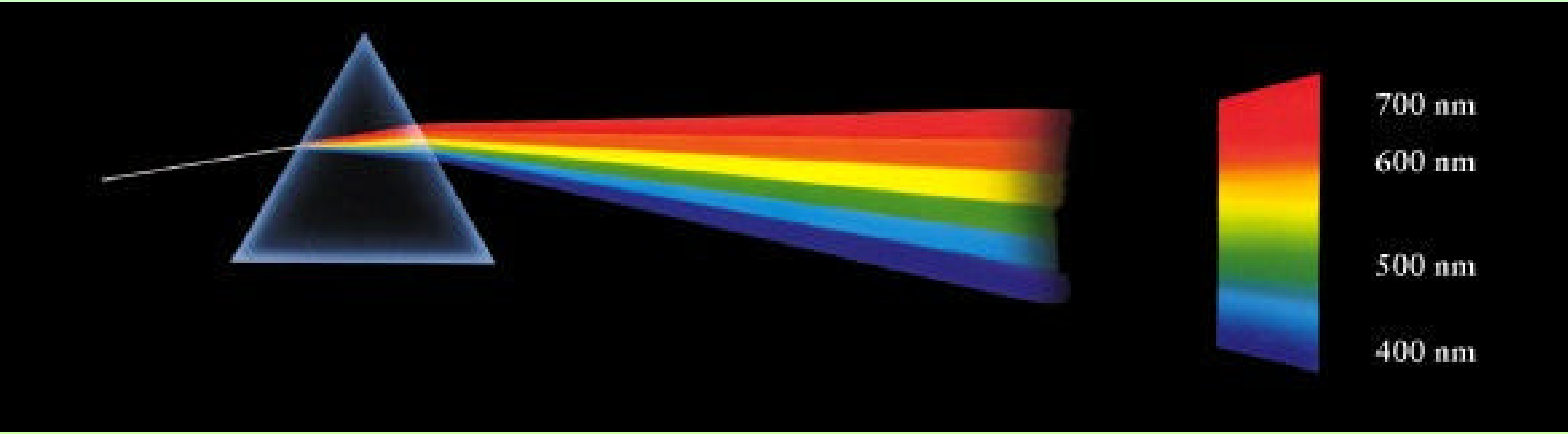
Secondo **Galeno** (II secolo d.c.), l'occhio proietta uno "spirito visuale" per mezzo del quale il mondo esterno viene percepito

Keplero e **Cartesio** agli inizi del '600 svilupparono la conoscenza della rifrazione della luce

Newton sviluppò una teoria corpuscolare della radiazione, considerando cioè la luce come formata di particelle

Nello stesso periodo **Huygens** compì una serie di esperimenti che dimostrarono che la luce ha caratteristiche di onda (diffrazione e interferenza)

La luce bianca attraverso un prisma viene scomposta nei suoi colori componenti

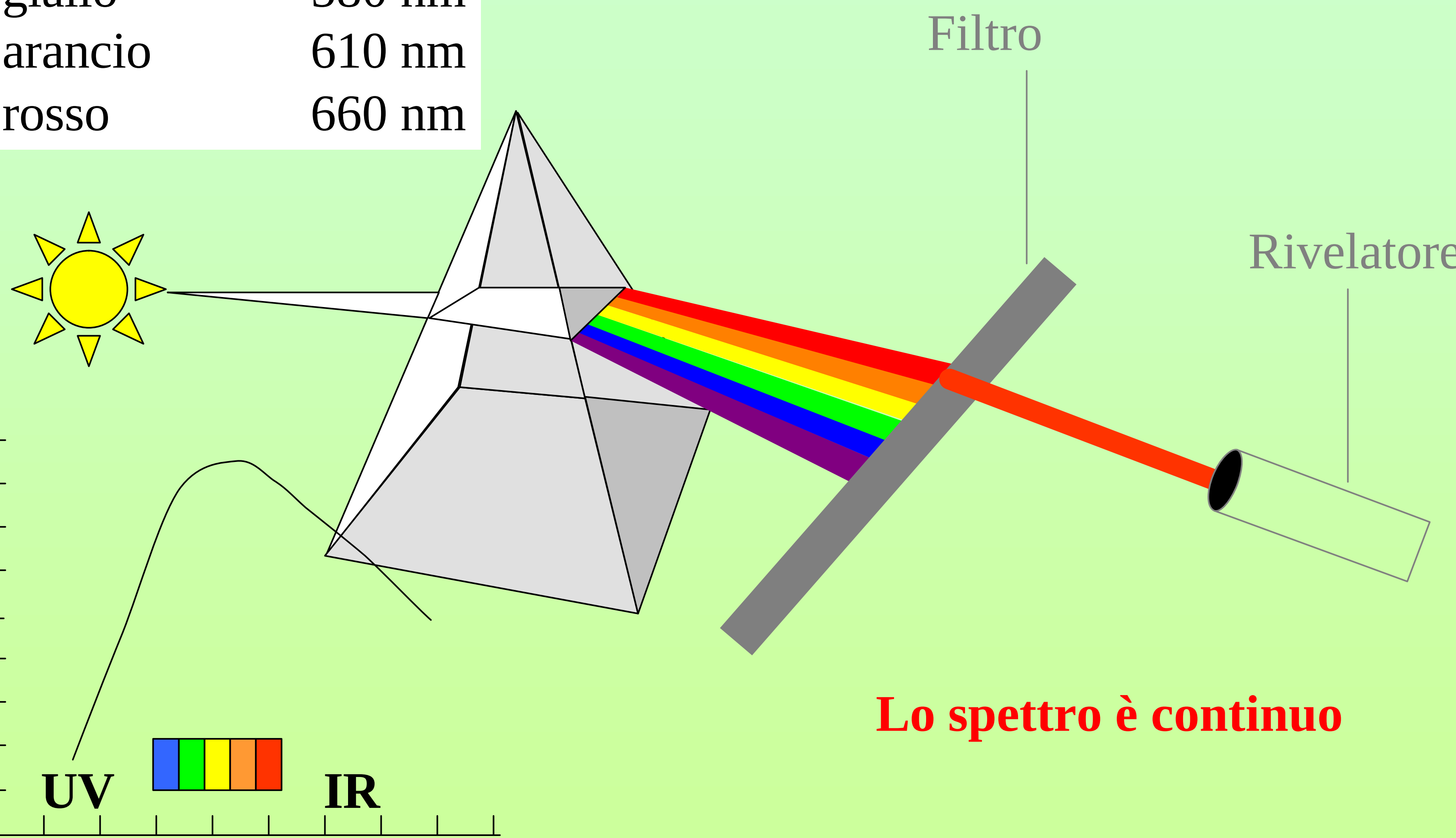


r.a.g.v.b.i.v.

Onde lunghe ↔ **Onde corte**

blu	460 nm
verde	530 nm
giallo	580 nm
arancio	610 nm
rosso	660 nm

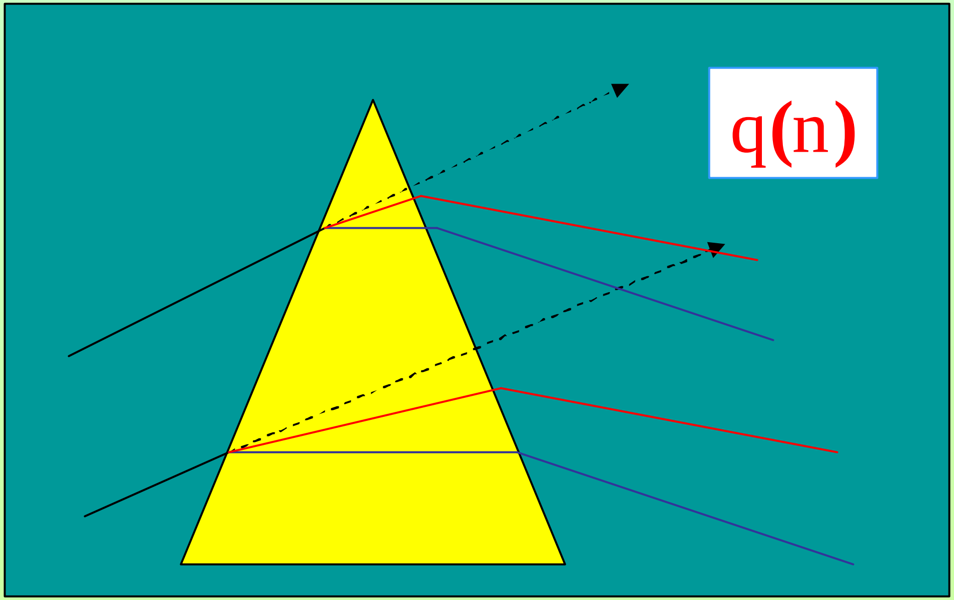
Newton



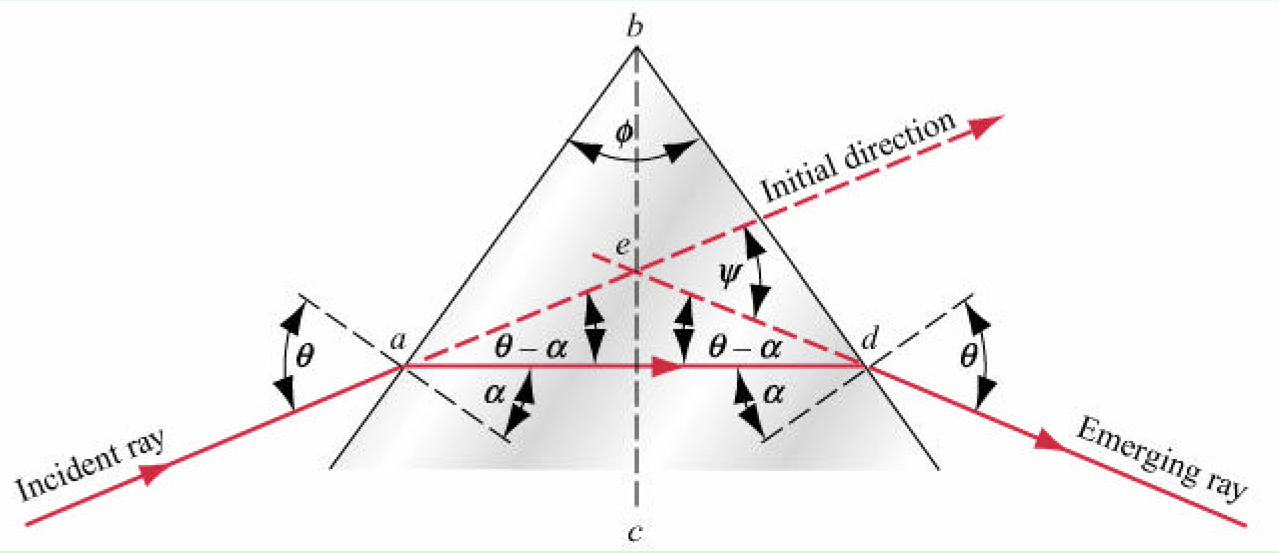
Lo spettro è continuo

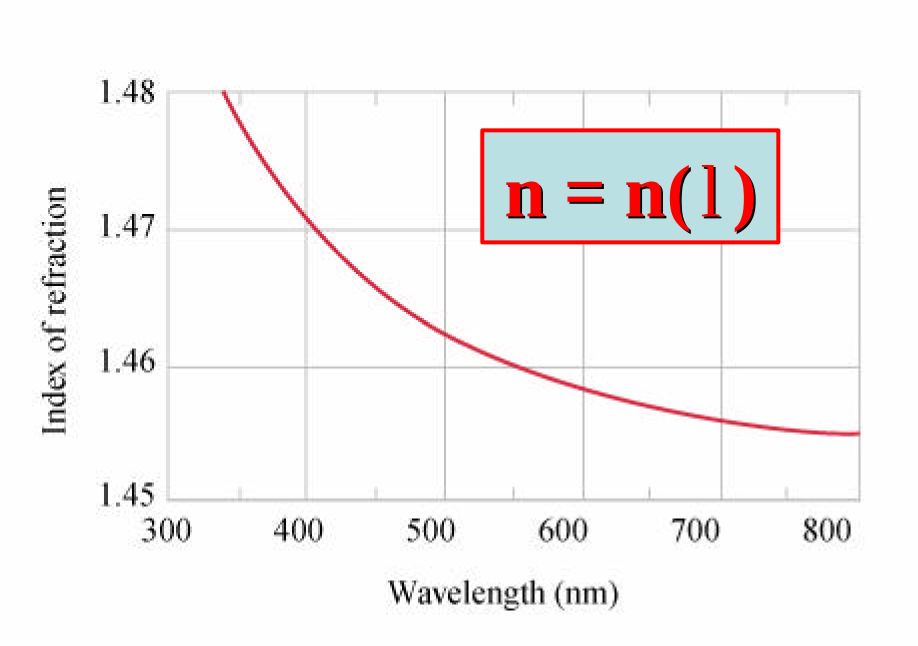
Dispersione della luce

La luce visibile, bianca, e` in realta` composta di radiazioni di diversa lunghezza d'onda le quali, attraversando un qualsiasi mezzo disperdente (prisma, goccia d'acqua, ecc…) vengono rifratte ad angoli diversi.

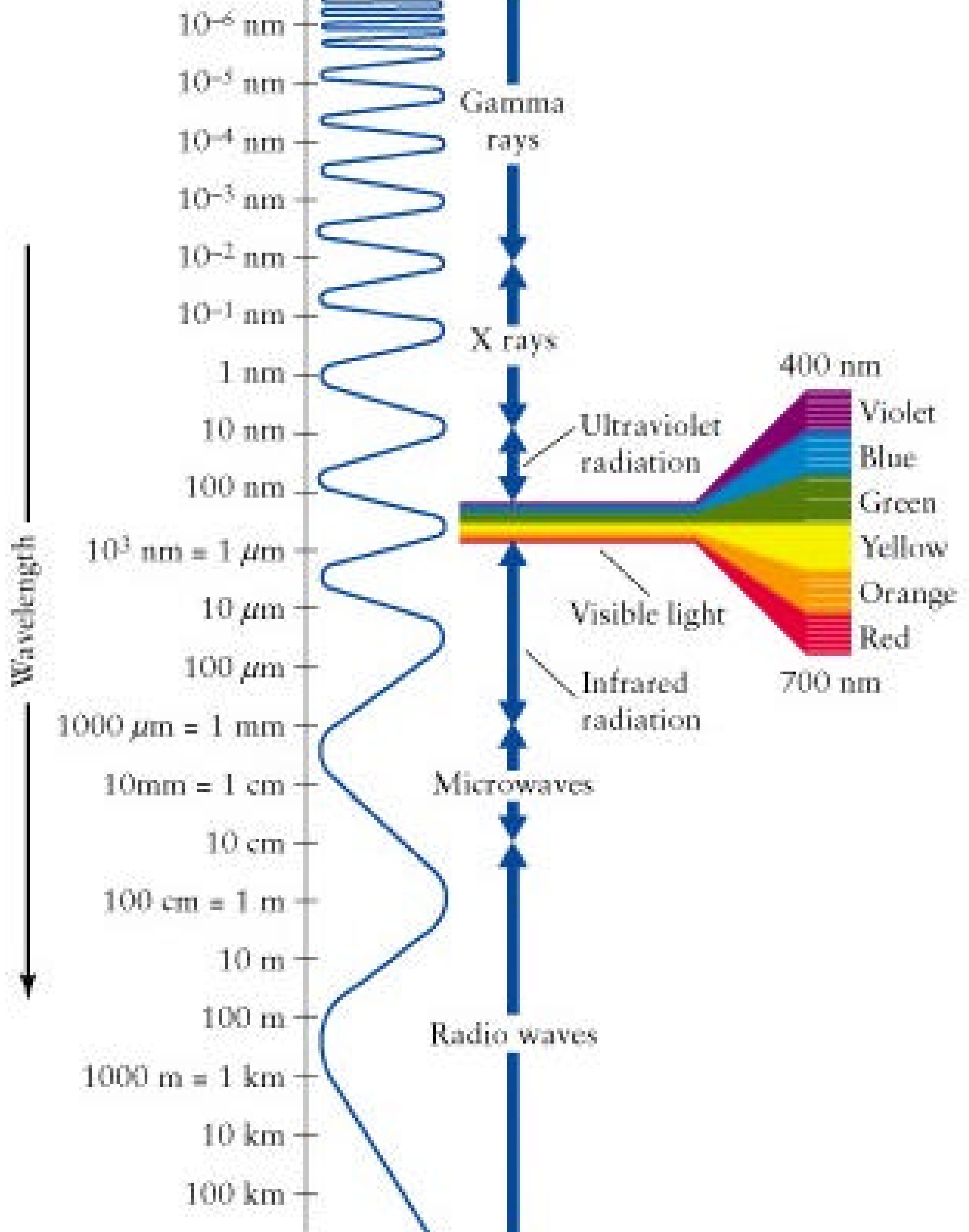


Il fenomeno e` noto come dispersione della luce, ed e` caratterizzato da angoli di deviazione piccoli per radiazioni di frequenza piccola (grande lunghezza d'onda) e grande deviazione per radiazione di frequenza grande. L'**arcobaleno** e` un tipico esempio naturale della dispersione della luce.





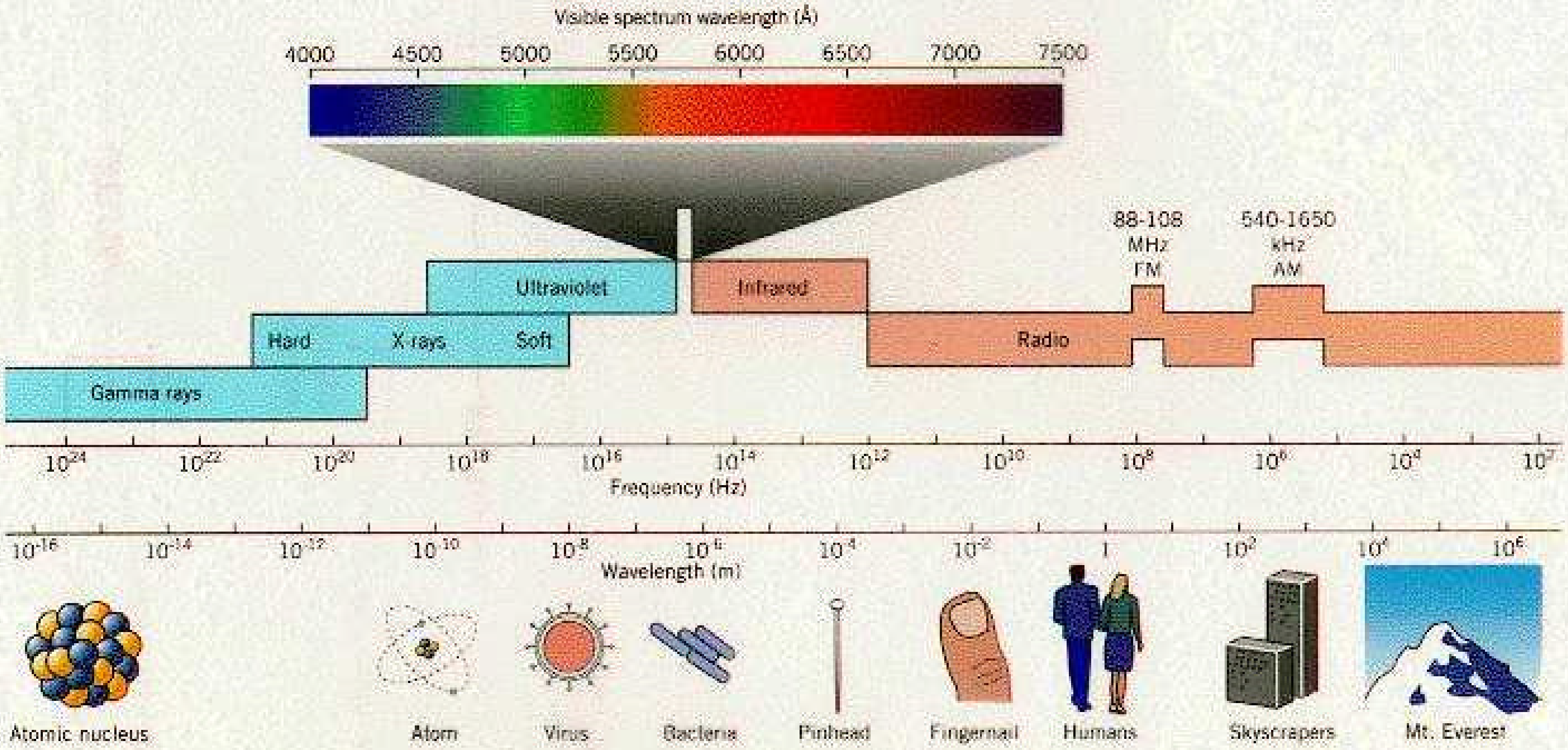
L'indice di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda della luce



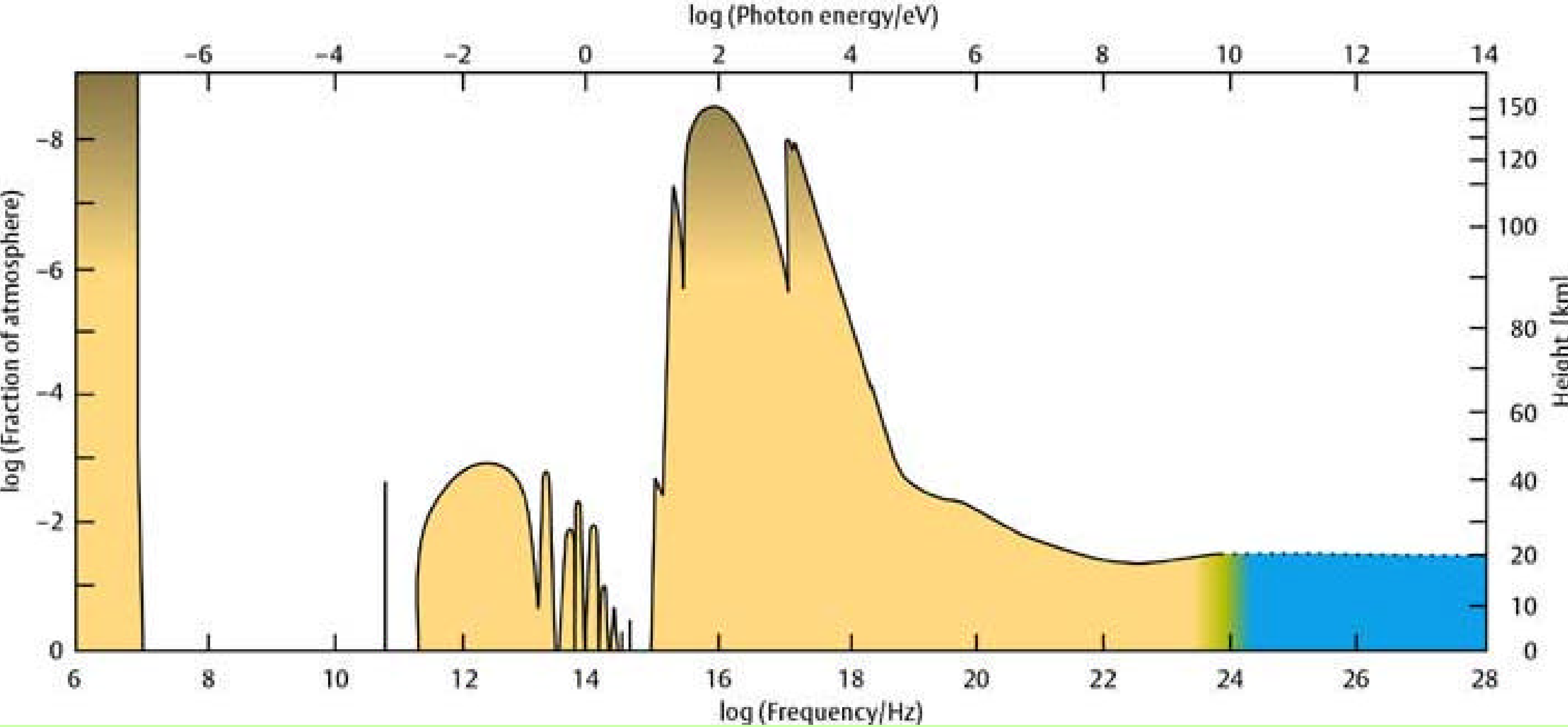
La luce visibile è solo un tipo di radiazione elettromagnetica emessa dai corpi

Ogni tipo di radiazione EM viaggia alla velocità della **luce: 300.000 km/s**

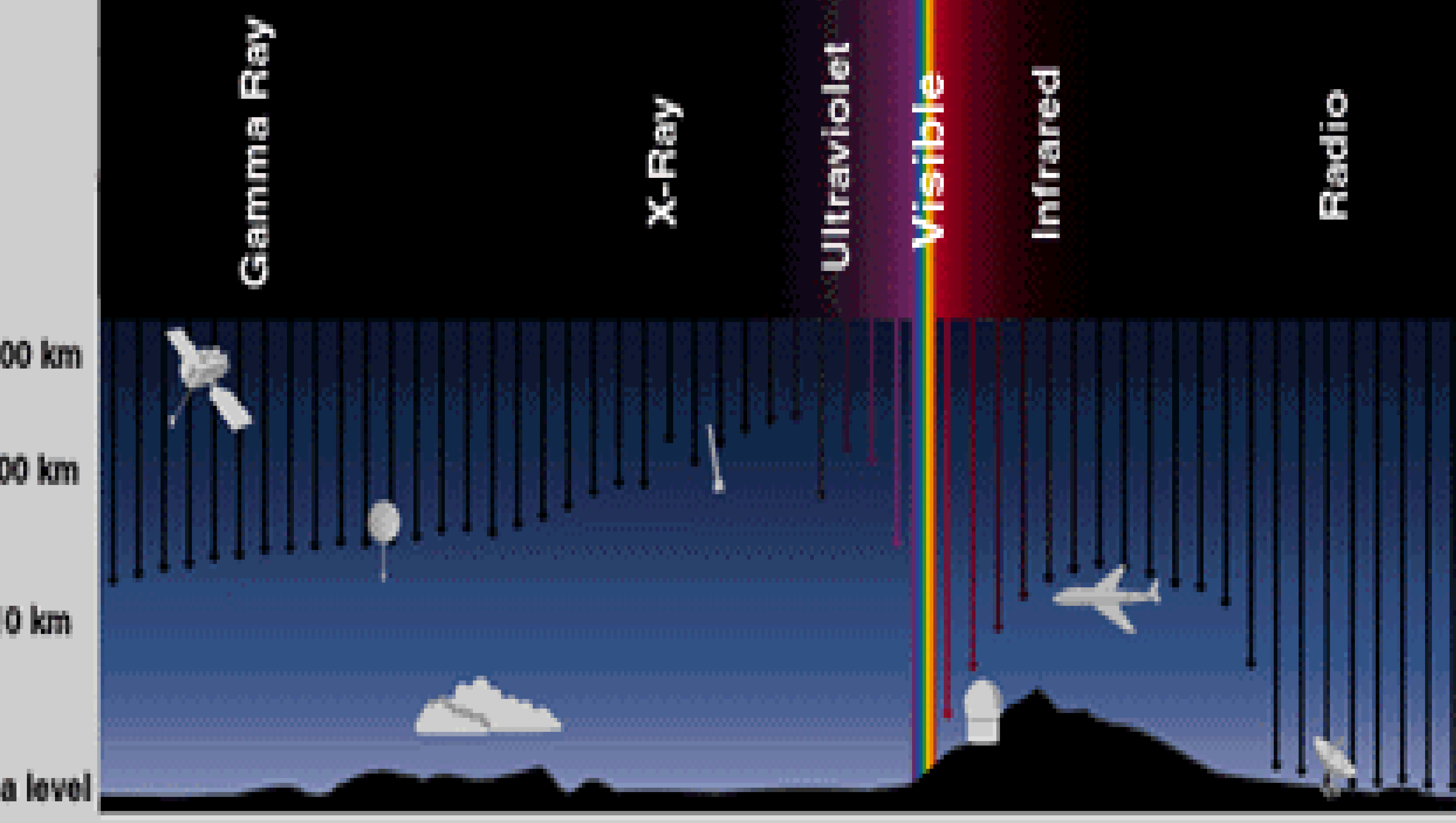
LO SPETTRO ELETTROMAGNETICO



Lo spettro visibile varia da circa 400 a circa 700 nm, ossia di un fattore 2. L'intero spettro elettromagnetico varia invece di 20 ordini di grandezza, dalle dimensioni di un nucleo a ~10 km

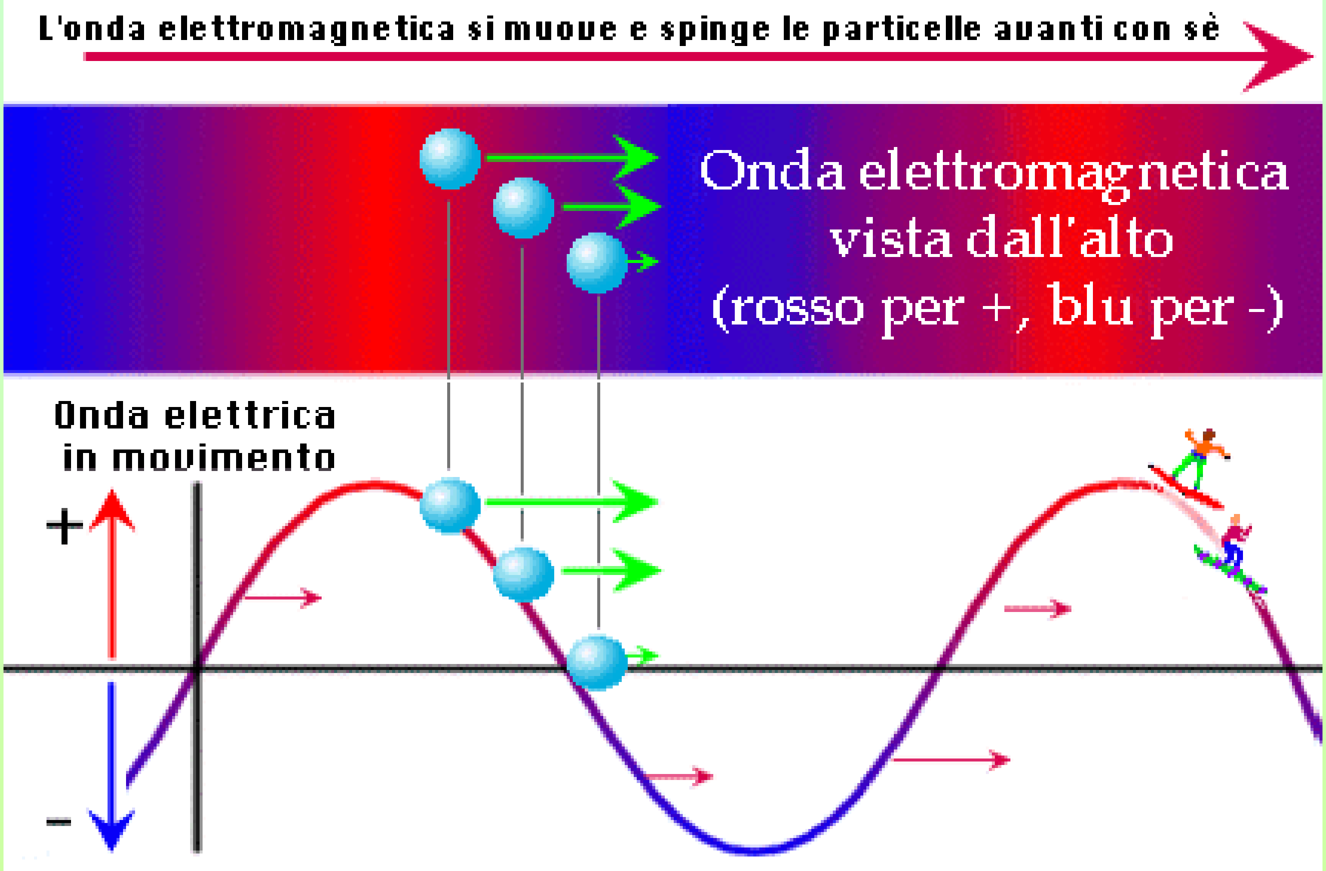


Trasparenza dell'atmosfera alla radiazione elettromagnetica



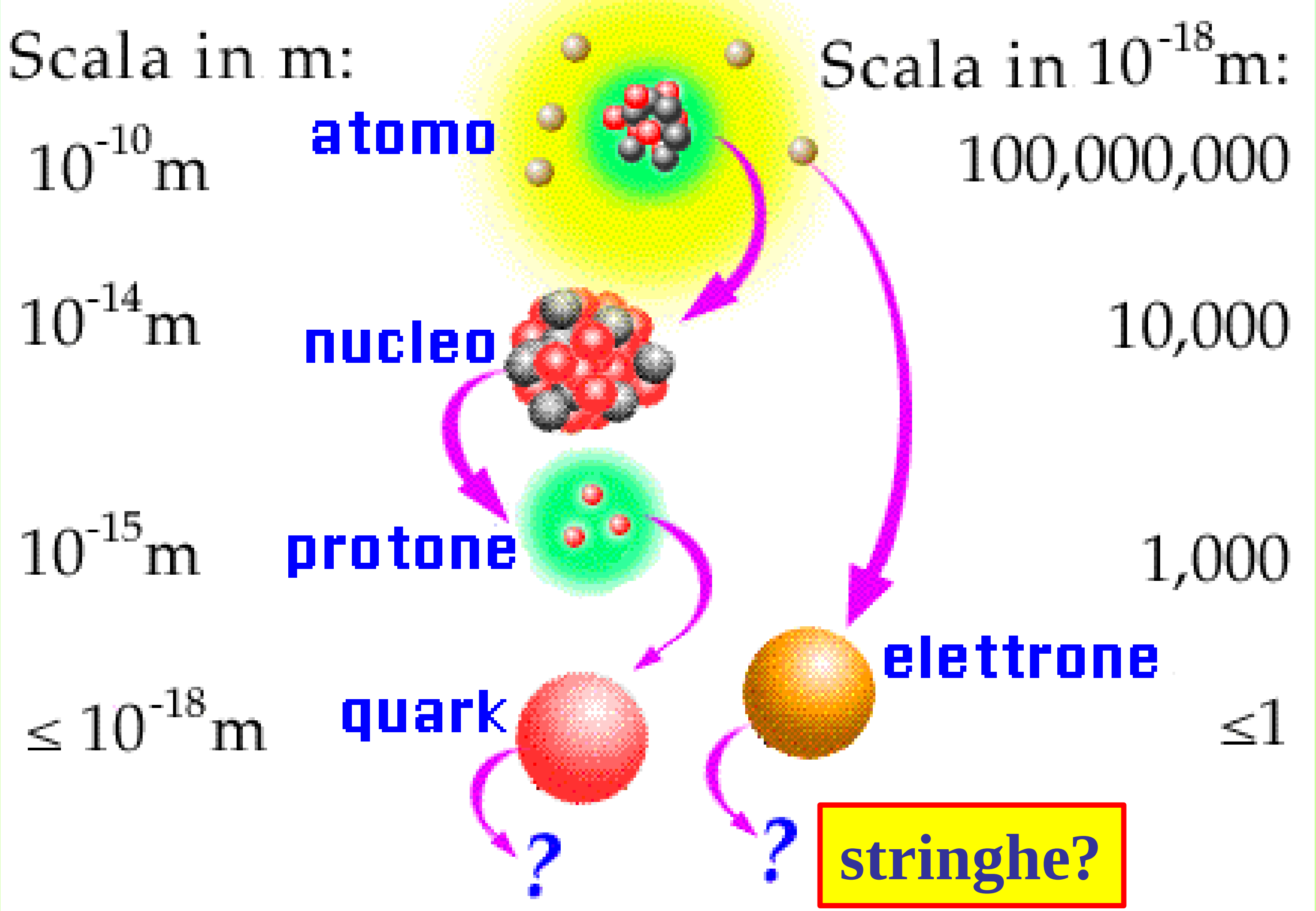
Si usano tecniche differenti per rilevare la luce a differenti lunghezze d'onda

Principio di funzionamento di un acceleratore



Le particelle con carica positiva vicino alla cresta dell'onda E-M ricevono una grossa spinta in avanti, le particelle verso il centro ricevono una spinta minore, il risultato è che tutte le particelle si muovono insieme all'onda.

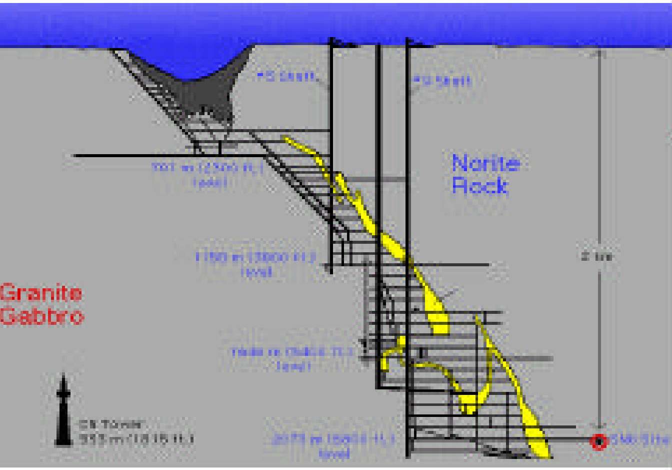
Si ritiene ora che i componenti elementari della materia siano quark e leptoni, e le particelle elementari siano: adroni (3 quark) mesoni (2 quark) e i leptoni.



LVD ai LNGS

1000 tons di scintillatore liquido

Sudbury Neutrino Observatory



1000 tonnes D_2O

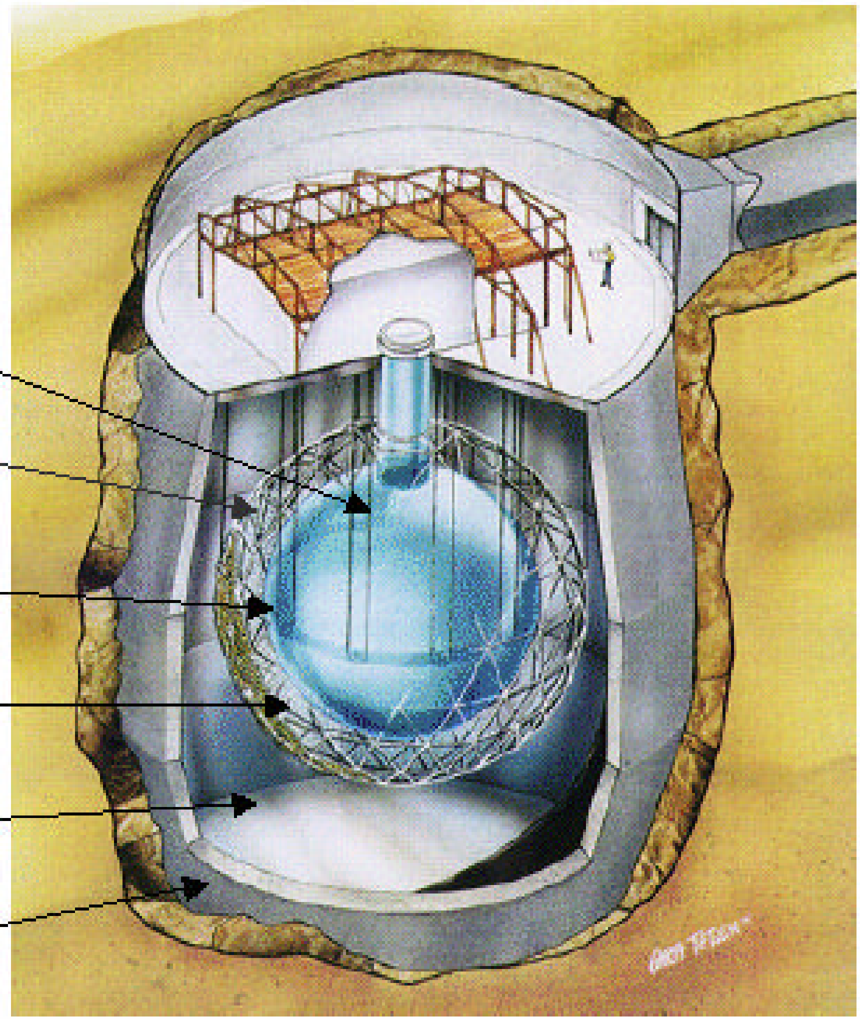
Support Structure for 9500 PMTs, 60% coverage

12 m Diameter Acrylic Vessel

1700 tonnes Inner Shielding H_2O

5300 tonnes Outer Shield H_2O

Urylon Liner and Radon Seal



	LEPTONI		QUARK	
amiglia I	**e (0,51 MeV)**	n_e **($\leq$ 3 eV)**	**u (2/3) (da 1 a 5 MeV)**	**d (-1/3) (da 3 a 9 MeV)**
amiglia II	m **(105,6 MeV)**	n_m **($\leq$ 0,19 MeV)**	**s (-1/3) (da 75 a 170 MeV)**	**c (2/3) (da 1,15 a 1,35 GeV**
amiglia III	t **(1777 MeV)**	n_t **($\leq$ 18,2 MeV)**	**b (-1/3) (da 4,0 a 4,4 GeV)**	**t (2/3) (174,3 GeV)**

eptoni e quark. In parentesi sono riportati i valori delle masse e, er i quark, delle loro cariche elettriche frazionarie. L'unita` di nisura delle energie e` l'elettronvolt, che corrisponde all'energia cquistata da 1 elettrone accelerato da una differenza di potenziale li 1 volt (1 MeV = 10^6 eV, 1 GeV = 10^9 eV). Teoria delle stringhe.

ntera- ione	Intensita`	Raggio d’azione	Particelle scambiate	Particelle soggette	Esemp
Gravita- ionale	6 10^{-39} m_p^{-2}	¥ (µ r^{-2})	gravitoni	tutte	corpi celesti
Debole	10^{-5} m_p^{-2}	10^{-16} cm	bosoni ($W^\pm$ e Z^0)	leptoni e adroni	decadi- menti b
Elettro- nagnetica	1/137	¥ (µ r^{-2})	fotoni	cariche	struttur atomich
Forte	1	10^{-13} cm	adroni	adroni	struttur nuclear

Come detto, i **dati sperimentali**
ono alla base della Fisica.
l metodo di analisi richiede l’uso
lella **Statistica** (distribuzioni di
robabilita`, valor medio e
arianza, coefficiente di
orrelazione, ecc..) e della **teoria
legli errori** (propagazione, errori
tatistici e errori sistematici)

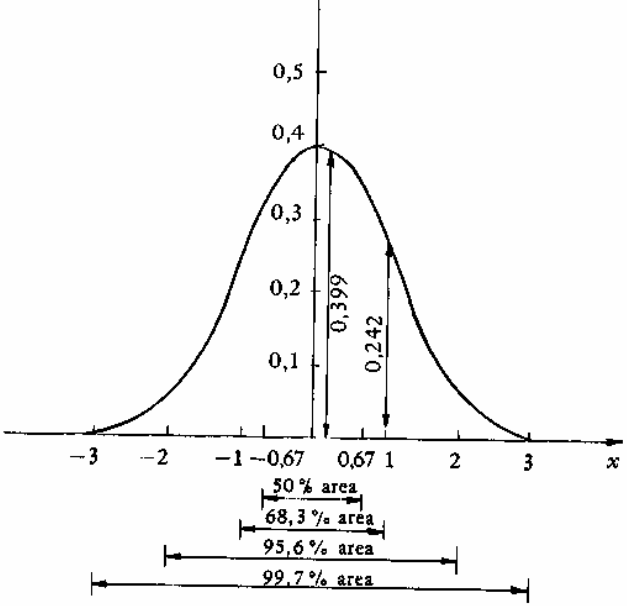


Fig. 18 A - Funzione densità di probabilità di una v.a. normale ridotta.

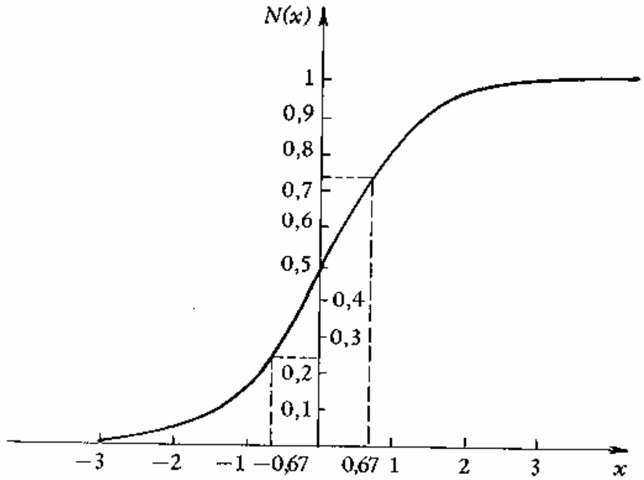


Fig. 18 B - Funzione di ripartizione di una v.a. normale ridotta.

Molto spesso la distribuzione **normale** (o quella di **Poisson** per gli eventi rari) permettono di interpretare i dati di molti esperimenti

Si sono definite unita`di misura fondamentali e derivate.
Nel **S.I.** le unita` fondamentali sono riportate in tabella.

Grandezza	Nome	Simbolo
lunghezza	metro	m
massa	kilogrammo	kg
tempo	secondo	s
corrente	ampere	A
temperatura	kelvin	K
quantita` di sostanza	mole	mol
intensita` luminosa	candela	cd

Esistono inoltre grandezze dimensionali e adimensionali (tra queste ultime, per es. il **radiante**, ossia il rapporto tra l’arco e il raggio definito da un angolo).

Potenze di 10: da meno di 10^{-12} (**pico**) a oltre 10^{12} (**tera**) ma anche molto piu` piccole (per es. $10^{-43}$ s, il tempo di Plank) o molto piu` grandi (per es. 10^{26} m, il raggio dell’universo oppure 10^{30} kg, la massa del Sole).

IL MOVIMENTO

Cinematica

1 - <u>**velocita` e accelerazione**</u> come **grandezze scalari**

- velocita` media $v_m = \Delta s/\Delta t = s/t$
  velocita` istantanea $\mathbf{v = ds/dt}$

- accelerazione media $a_m = \Delta v/\Delta t$
  accelerazione istantanea $\mathbf{a = dv/dt = d^2s/dt^2}$

Leggi della dinamica

1ª legge (principio di inerzia)

Ogni corpo mantiene il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme fino a che non interviene una forza a variarlo.
Esistono sistemi di riferimento inerziali (per es. il sistema del laboratorio, un treno a velocita` costante, il sistema eliocentrico, ecc...) e sistemi non inerziali (accelerati).

Leggi della dinamica

2^a legge (secondo principio della dinamica)

Questo principio introduce il **concetto di massa**, una conseguenza del fatto che l'effetto dinamico di forze diverse sullo stesso corpo produce accelerazioni diverse, ma tali da avere un rapporto costante tra forza e accelerazione: $F_1/a_1 = F_2/a_2 = ... = \text{costante} = m$, ossia:

$$\boxed{\mathbf{F = ma}}$$

Vale il principio di sovrapposizione $S\mathbf{F_i} = \mathbf{m}\ S\mathbf{a_i}$ delle forze (proprieta additiva);

Nel S.I. il Kg e` l'unita` di massa e il Newton e` l'unita` per le forze [$1N=1kg\ m/s^2$].

Nel sistema cgs l'unita` derivata **F** e` la dina ($1\ N = 10^5$ dine).

Leggi della dinamica

3ª legge (terzo principio della dinamica)

o principio di azione e reazione: ad ogni forza corrisponde una reazione uguale in modulo e direzione e di verso opposto, ovvero $\mathbf{F}_A = -\,\mathbf{F}_B$, da cui :

$$\mathbf{F_A + F_B = 0}$$

o piu\` generalmente $\mathbf{SF_i = 0}$

I sistemi di propulsione (naturale o artificiale) sono basati su questo principio e non sarebbero applicabili se non ci fossero le forze di attrito

LAVORO E ENERGIA

Da L = F·s = ma·s si ricava:

$$L = \frac{ma(v_2^2 - v_1^2)}{2a} = \tfrac{1}{2} m(v_2^2 - v_1^2)$$

Poichè si definisce energia cinetica la quantità $K = \tfrac{1}{2} mv^2$ ne segue $L = K_2 - K_1$ (noto come **teorema delle forze vive** o dell'energia cinetica), ossia: il lavoro totale svolto corrisponde alla variazione di energia cinetica: S**L**$_i$ **=** D**K**.

Per forze conservative **L = W$_1$ – W$_2$,** da cui D**W +** D**K =** D**E = 0:** l'energia totale **E** (cinetica piu` potenziale) **si conserva.**

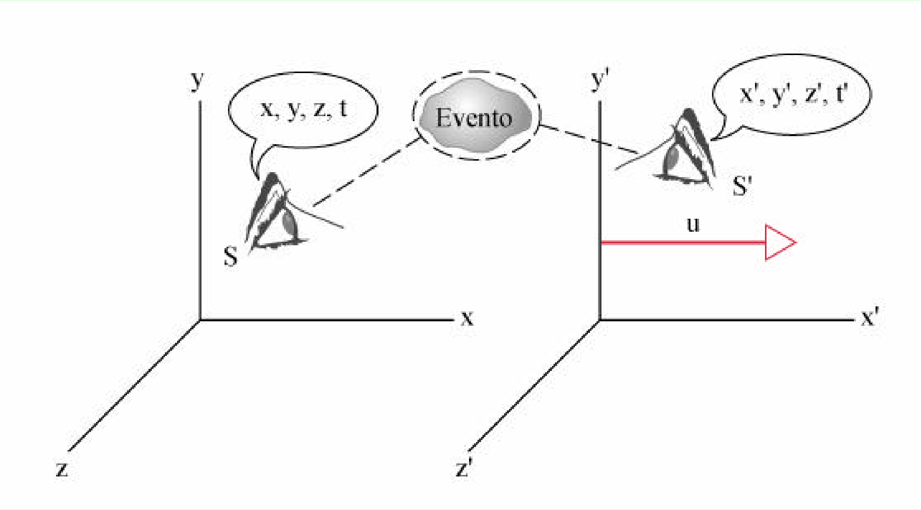
La **potenza** e` definita come $P = L/\Delta t = F \cdot v$ e si misura in Watt [1W=1J/1s].

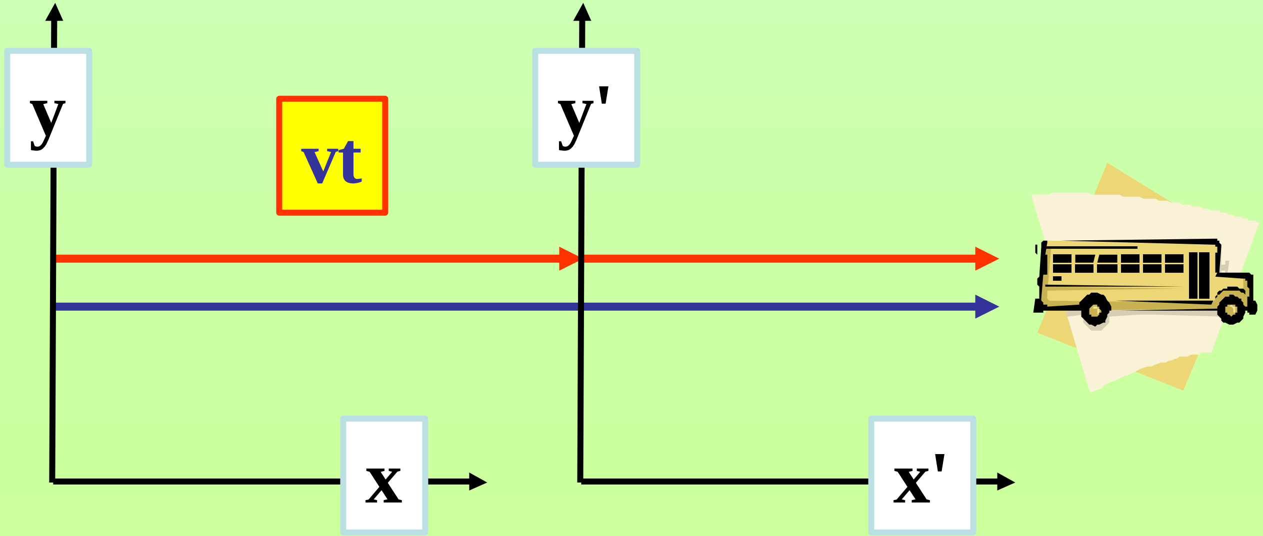
LA RELATIVITA`

La relativita` newtoniana e le trasformazioni galileiane:

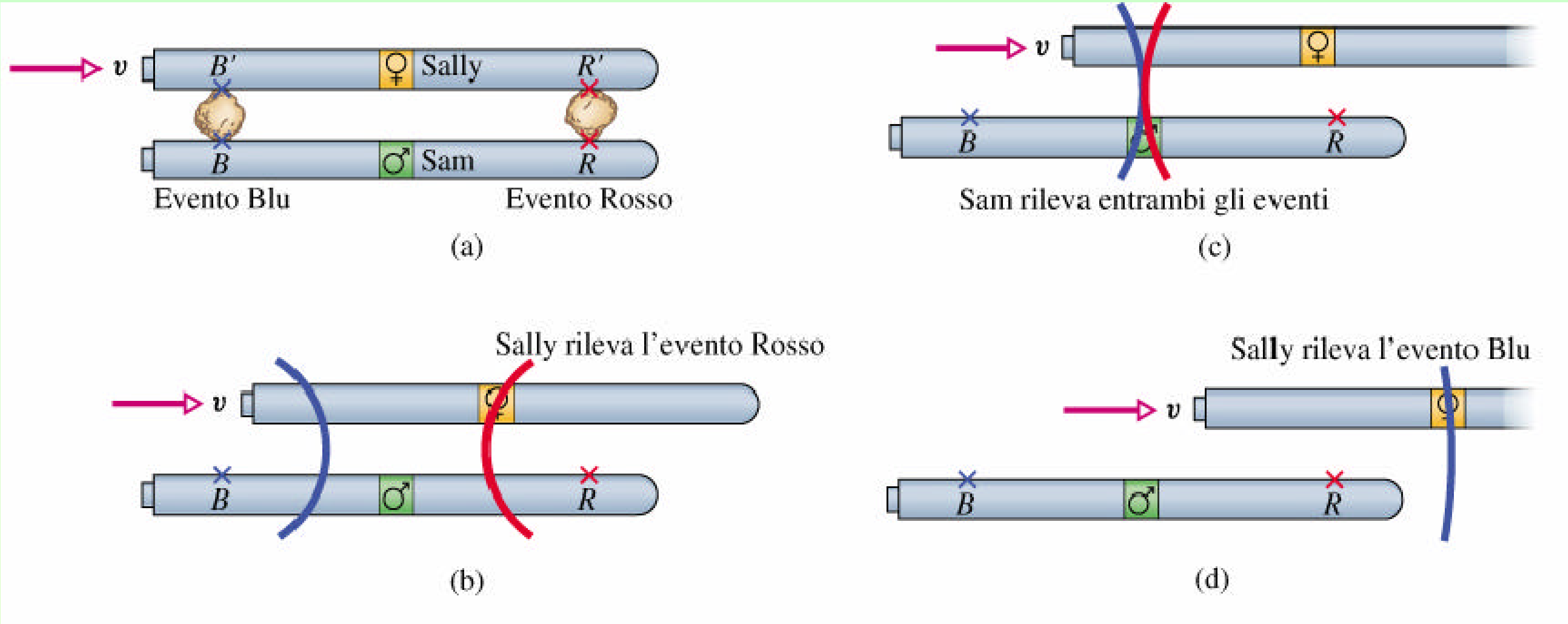
$$x' = x - vt, \; t' = t$$

comportano: **u = u’ + v**





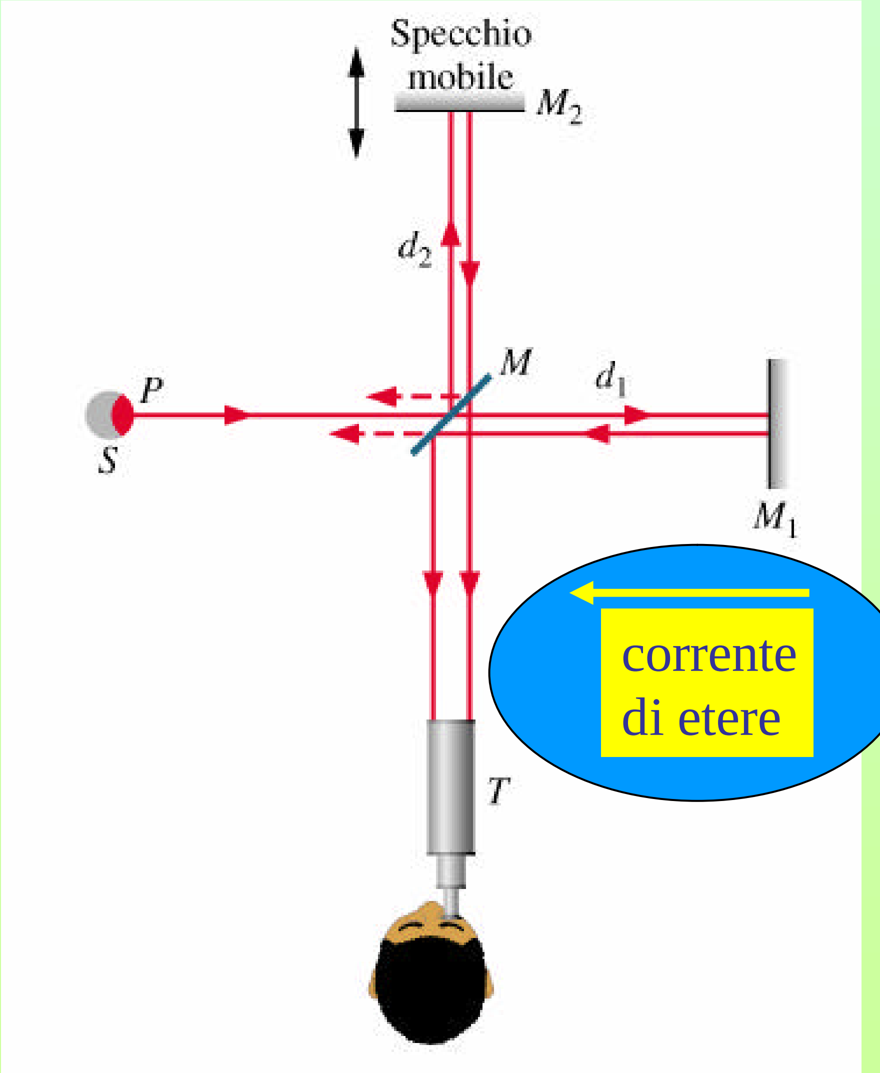
La simultaneita` e` relativa



Fino al XIX secolo si riteneva che la luce si propagasse in un mezzo (detto **etere**). Michelson-Morley in un famoso esperimento di interferometria del 1887 dimostrarono invece la non esistenza dell'etere, perche` la velocita` della luce non dipende dalla direzione del moto della Terra.

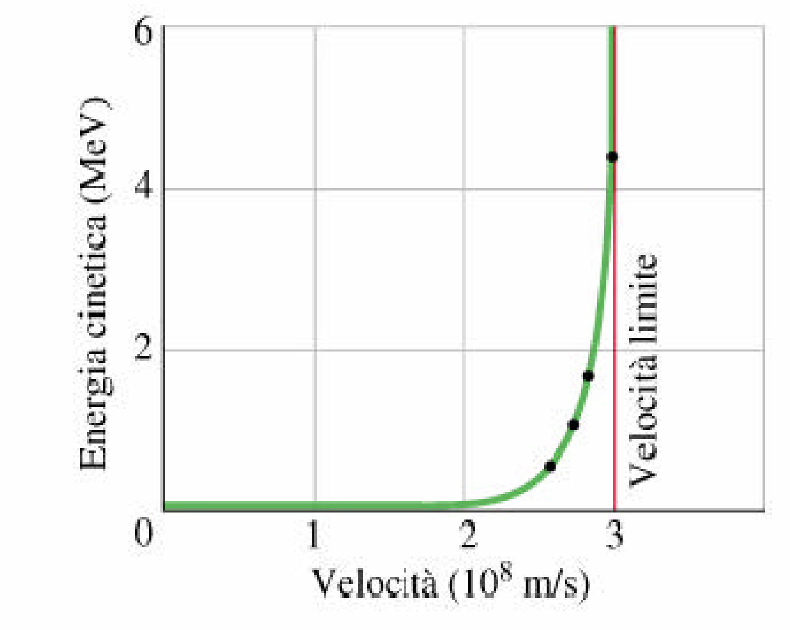
Esperimento di Michelson-Morley

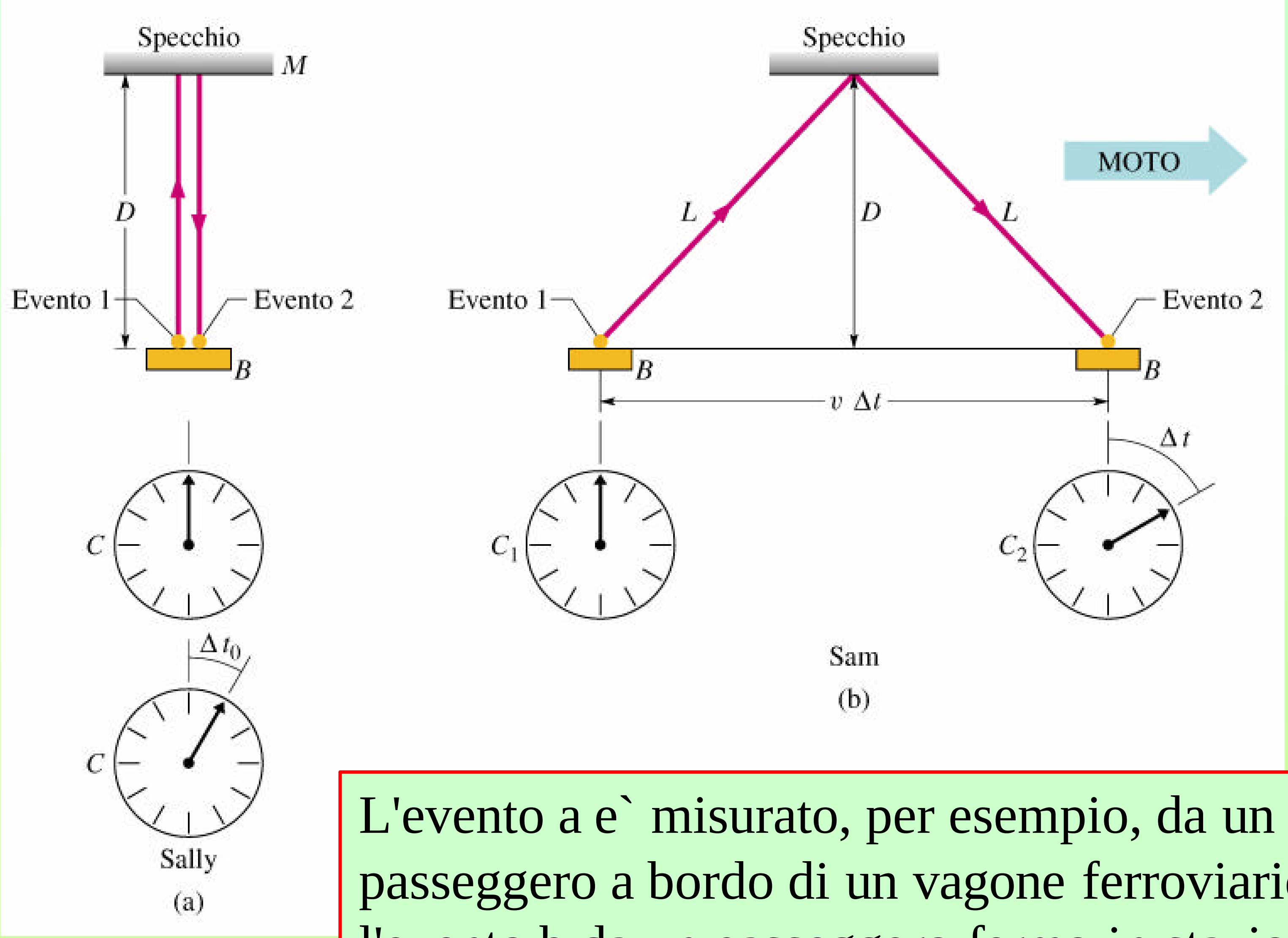
La differenza di cammino ottico $2d_2 - 2d_1$ produce frange di interferenza tra la luce riflessa dai due specchi M_1 e M_2.
Se $d_2 = d_1$ le due onde riflesse giungono in fase all'osservatore.
La Terra ruota su se stessa (v ~ 0,4 km/s), si muove intorno al Sole (v ~ 30 km/s) e il Sole ruota intorno al centro della Galassia (v ~ 240 km/s). I risultati mostrano che la velocita` della luce rimane costante lungo ogni direzione.



Per spiegare questo risultato, nel 1905 Einstein propose la teoria della relativita` speciale, basata su due postulati:

- le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali (**non esiste un sistema di riferimento privilegiato**)
- la velocita` della luce nel vuoto ha lo stesso valore **c** in tutte le direzioni e in tutti i sistemi di riferimento inerziali (**c e` una costante universale**).

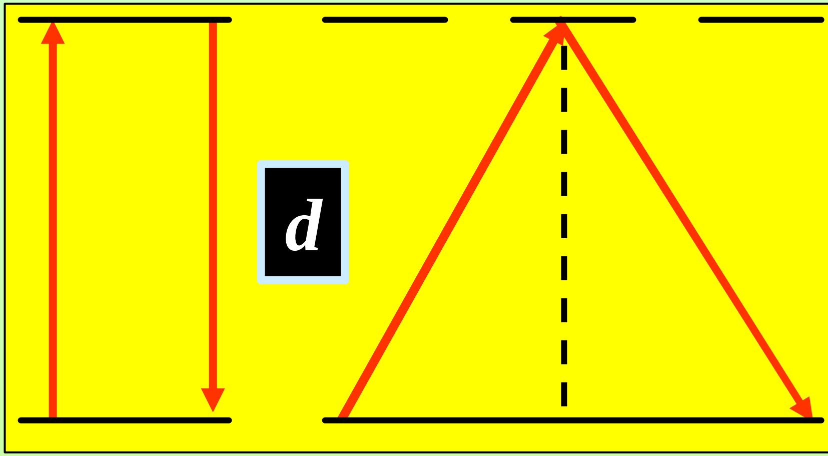




L'evento a e` misurato, per esempio, da un passeggero a bordo di un vagone ferroviario; l'evento b da un passeggero fermo in stazione.

La principale conseguenza della relativita` speciale e` che non si hanno piu` lunghezze assolute o un tempo universale, in quanto queste grandezze dipendono dal sistema di riferimento in cui sono misurate. Questi fenomeni sono noti come: **contrazione della lunghezza** e **dilatazione del tempo**.

Se, per esempio, consideriamo uno specchio fermo, distante d da una sorgente luminosa, si ha:



$$2d = c\Delta t_0 \,,\text{ossia } \Delta t_0 = \frac{2d}{c}$$

Se invece lo specchio si muove rispetto a noi (o noi rispetto allo specchio) alla velocita v, la distanza percorsa *l* e` data da:

$$l = \sqrt{\left(\tfrac{1}{2}v\Delta t\right)^2 + d^2} = \sqrt{\left(\tfrac{1}{2}v\Delta t\right)^2 + \left(\tfrac{1}{2}c\Delta t_0\right)^2}$$

Poiche` anche in questo caso $\Delta t = \dfrac{2l}{c}$ eliminando *l* si ottiene

$$\boxed{\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-b^2}} = g\Delta t_0}$$

dove $\boxed{g = \dfrac{1}{\sqrt{\left(1-b^2\right)}}}$

` detto fattore di Lorentz.

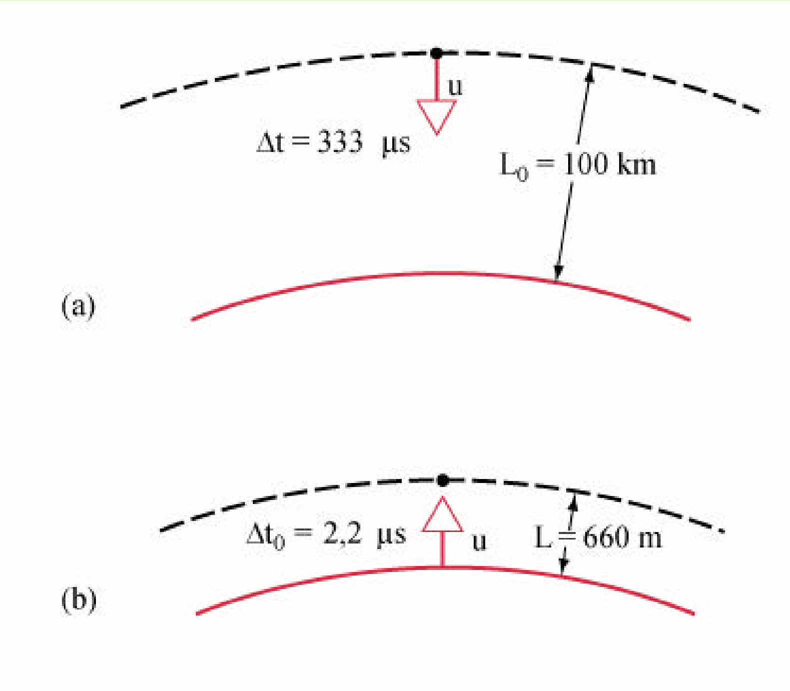
Gli intervalli di tempo misurati dai due osservatori sono ugual solo se v << c (per cui β ~ 0 e γ ~ 1). Se v ? c (ossia β ? 1 e quindi γ ? 8) si ha Δt ? 8 per qualsiasi valore di Δt_0.

Ne segue il fenomeno della **dilatazione del tempo**: il tempo non e` piu` assoluto (come nella meccanica newtoniana), ma dipende dall’osservatore: se misurato da un osservatore esterno e` sempre maggiore del ***tempo proprio t_0*** (D**t** > D**t**$_0$).

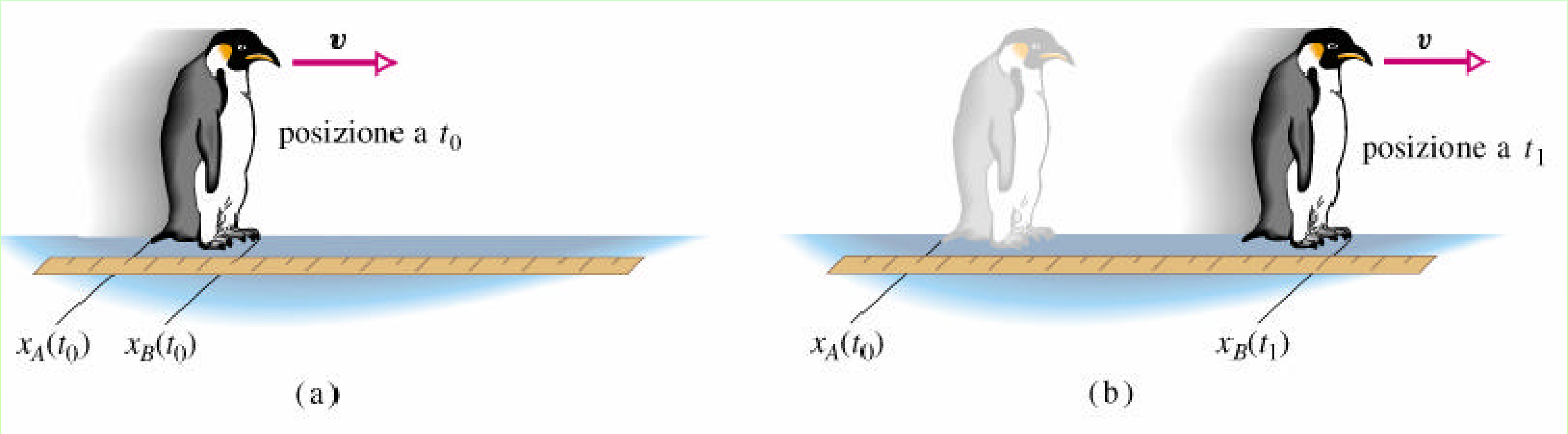
Per comprendere la dilatazione del tempo, spesso si dice che ***un orologio in moto e` piu` lento di uno fermo***.

Famosi sono il paradosso dei gemelli e l'esperimento sui *m* dei raggi cosmici (v = 0.99 *c*, $\gamma = 7.1$, $t_0 = 2.2\ \mu s$). Secondo la meccanica classica queste particelle dovrebbero percorrere la distanza $d = v\ t_0 = (0,99)(2,998 \cdot 10^8)(2,2 \cdot 10^{-6}) \sim 660$ m

Secondo la meccanica relativistica essi devono percorrere la distanza $\gamma v t_0 = 7,1 \cdot 660$ m = 4.7 km (come se avessero una vita media $\gamma t_0 =$ 15,6 μs). Muoni con $\gamma \sim 150$, a cui corrisponde v = 0,99996 c, possono percorrere anche 100 km.

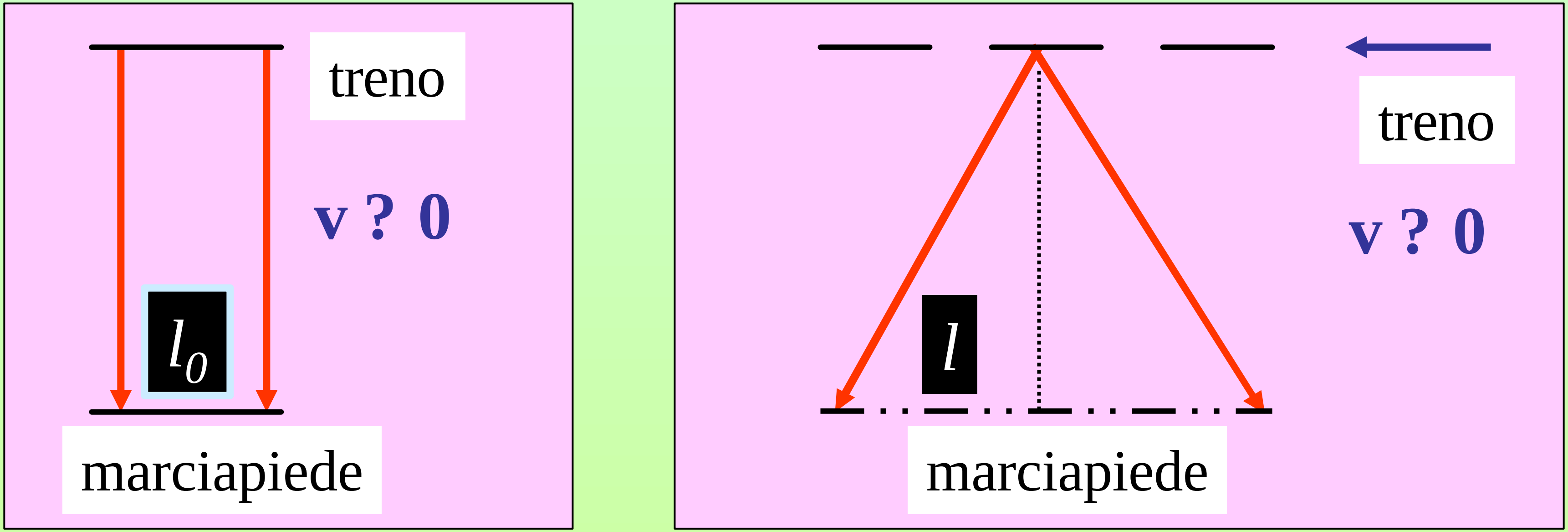


Consideriamo ora due oggetti posti alla ***distanza propria l_0*** tra loro, per es. le estremita` di un righello (o la lunghezza di un pinguino dal becco alla coda).



Un osservatore fermo misura *contemporaneamente* le estremita` del righello ( o del pinguino) e ne ricava la lunghezza $l_0$. Cio` non e` piu` vero se l'osservatore (o l'oggetto) sono in **moto relativo** tra loro.

Un osservatore fermo (per es. sul marciapiede di una stazione) misura la lunghezza l_0 del righello (posato sul marciapiede) e nota che questa stessa lunghezza viene percorsa in un tempo $\Delta t = l_0/v$ da un treno che si muove alla velocita` v.

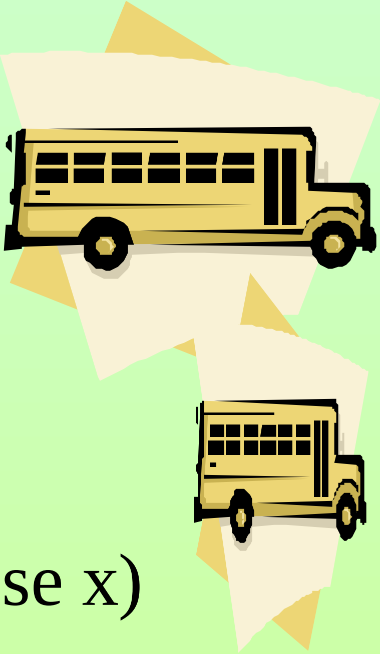


Un osservatore sul treno vede il marciapiede (e quindi anche il righello) prima avvicinarsi e poi allontanarsi e, con il suo orologio, misurera` la lunghezza del righello $l = v\Delta t_0$.

Eliminando la velocita` si ottiene:

$$l = l_0 \frac{\Delta t_0}{\Delta t} = l_0 \sqrt{1 - b^2} = \frac{1}{g} l_0$$

La lunghezza si contrae nella direzione del moto e *l* ? 0 per γ ? 8 (v ? c).



L’estensione delle trasformazioni di Galileo

$x' = x - vt,\ t' = t$ (qui scritte per l’asse x)

sono le **trasformazioni di Lorentz**:

$$x' = g(x - vt), \quad t' = g\left(t - {vx}/{c^2}\right) \text{ oppure } x = g(x' + vt'), \quad t = g\left(t' + {vx'}/{c^2}\right)$$

Ne segue che **anche la velocita`di un oggetto e` relativa**.

Sia infatti u = Δx/Δt la velocita` misurata da un osservatore e sia u' = Δx'/Δt' quella misurata da un altro osservatore in moto rispetto al primo alla velocita` v. Si deve avere:

$$u = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{\Delta t'}\left(\Delta x' + v\Delta t'\right)}{\frac{1}{\Delta t'}\left(\Delta t' + v\,\Delta x'/c^2\right)}, \text{ da cui } \boxed{u = \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2}}$$

Effetto Doppler. La frequenza della uce cambia con la velocita` relativa ra sorgente e osservatore.

$$n = n_0 \sqrt{\frac{1 \mp b}{1 \pm b}},$$

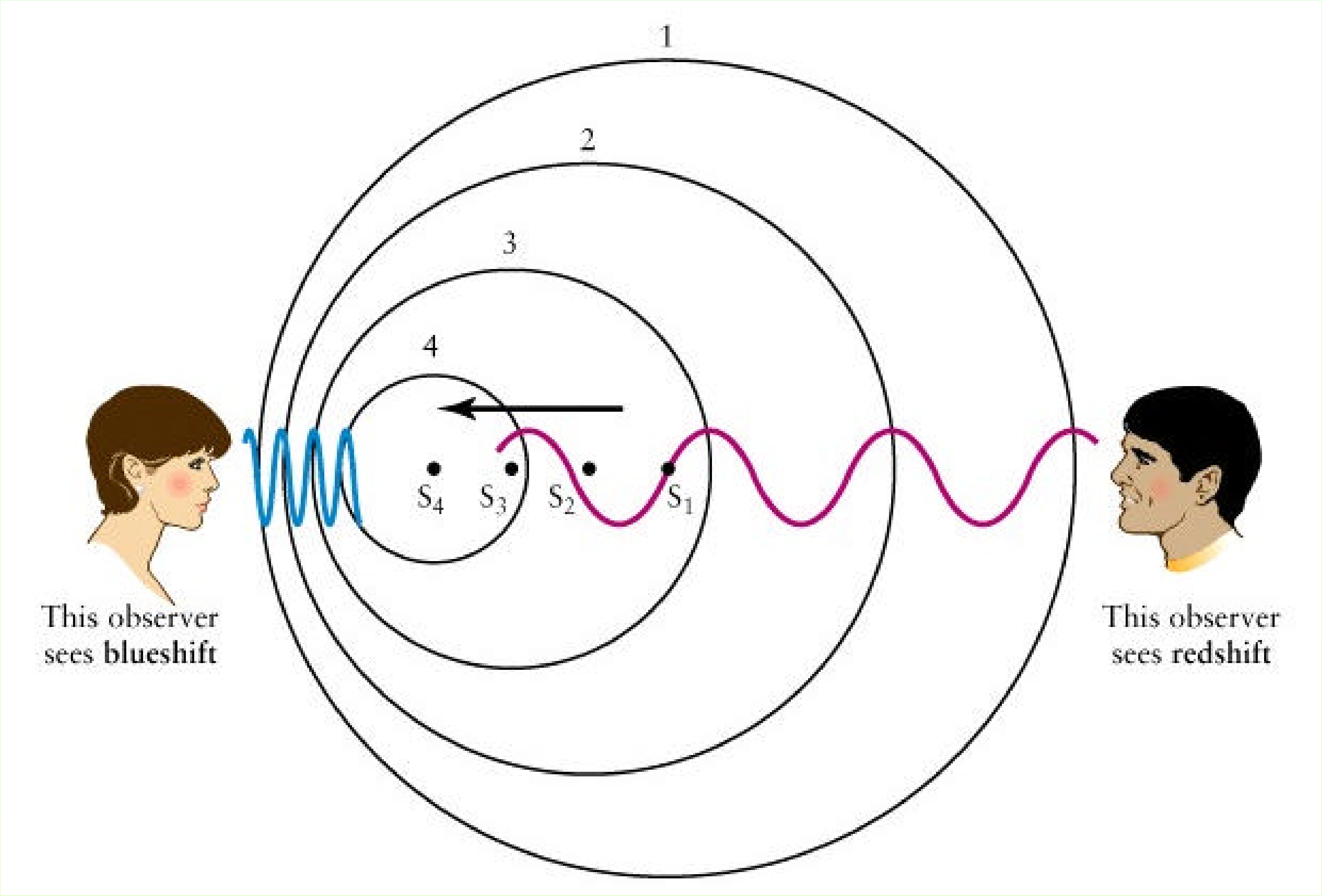
per piccole velocita`

(caso di allontanamento)

$$n \to n_0\left(1 - b + \tfrac{1}{2} b^2\right) \approx n_0\left(1 - b\right.$$

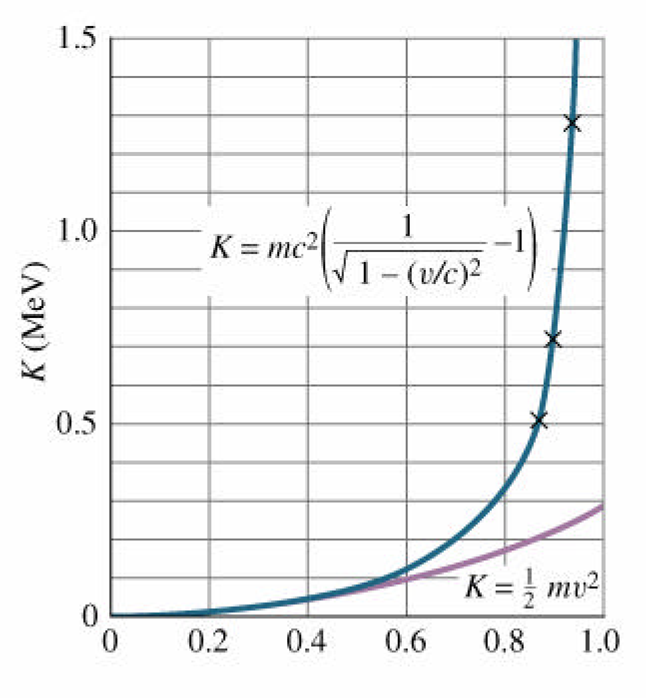
$$\boxed{\frac{c}{l} = \frac{c}{l_0}\left(1 \pm \frac{v}{c}\right) \text{ da cui } v = \pm \frac{\Delta l}{l} c}$$

La frequenza della luce cambia per il moto relativo tra sorgente e osservatore



In meccanica classica la quantita` di moto di un corpo in movimento si conserva: $$p = mv = m\frac{\Delta x}{\Delta t} = \text{costante}$$

In relativita`, nel sistema di riferimento del corpo in moto si ha: $$p = m\frac{\Delta x}{\Delta t_0} = m\frac{\Delta x}{\Delta t}\frac{\Delta t}{\Delta t_0} = gm\frac{\Delta x}{\Delta t} = gmv$$



Ne segue che un corpo con massa a riposo (massa propria) m_0 possiede la massa $$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-b^2}}$$ se misurata da un osservatore in moto

Infine, poiche`: $K = \frac{1}{2}mv^2,\ p = mv$

in meccanica classica si ha: $p^2 = 2Km$ in relativita`: $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$

Dunque, in relativita`, la massa puo` considerarsi una forma di energia

$$E_0 = mc^2,\ E = E_0 + K = gmc^2$$

Energia equivalente di alcuni corpi

Corpo	Massa (kg)	Energia equivalente	
Elettrone	$9.11 \cdot 10^{-31}$	$8.19 \cdot 10^{-14}$ J	(= 511 keV)
Protone	$1.67 \cdot 10^{-27}$	$1.50 \cdot 10^{-10}$ J	(= 938 MeV)
Atomo d'uranio	$3.95 \cdot 10^{-25}$	$3.55 \cdot 10^{-8}$ J	(= 225 GeV)
Granello di polvere	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{4}$ J	(= 2 kcal)
Monetina	$3.1 \cdot 10^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{14}$ J	(= 78 GW · h)

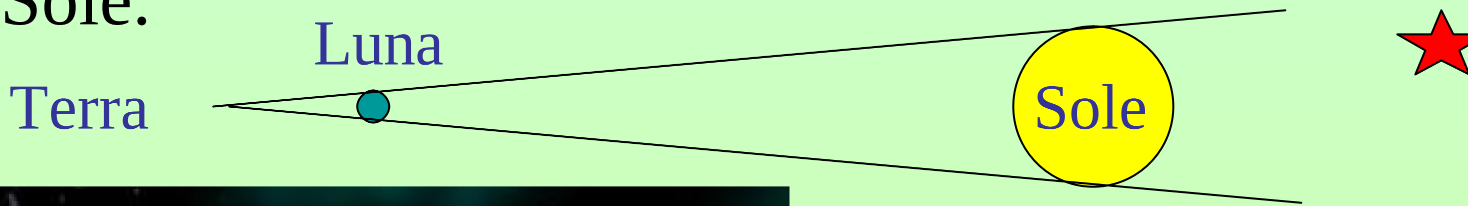
Dato il grande valore di $c^2 = 9\ 10^{16}\ (m/s)^2$, anche una massa piccola produce un grande valore di energia di massa; per questo motivo, le unita` di misura del S.I. sono poco utilizzate. Si usano invece:

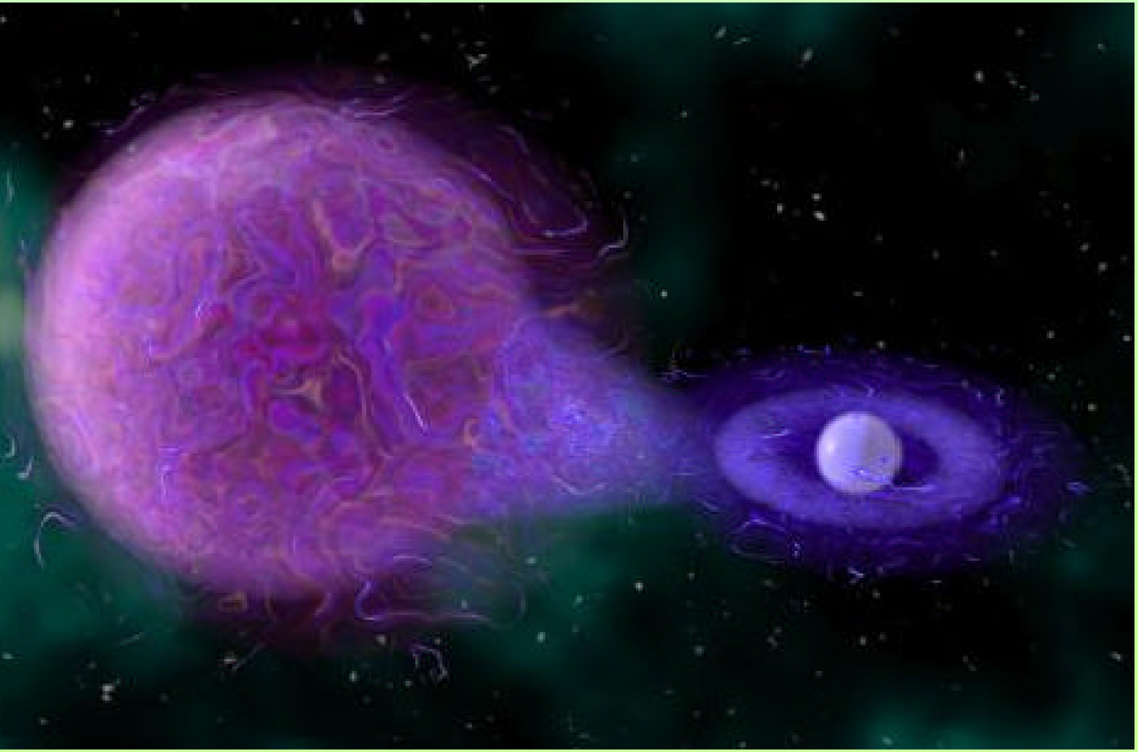
1 u.m.a. = $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg, 1 eV = $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ J

Relativita` generale

Finora si sono considerati moti a velocita` costante.
Per moti accelerati la relativita` speciale non e` piu` adatta e si deve usare la relativita` generale (formulata da Einstein nel 1916) che e` una **teoria della gravitazione**.
Il punto di partenza e` il **principio di equivalenza**: massa inerziale e massa gravitazionale sono identiche.
Ne segue che gli effetti di un campo gravitazionale sono equivalenti a quelli prodotti da un sistema in moto accelerato: in un laboratorio terrestre o su un razzo in moto con accelerazione g, ogni esperimento produrrebbe gli stessi risultati, e lo sperimentatore non si accorgerebbe di essere a Terra o sul razzo.

Durante l'eclisse solare del 29 Maggio 1919 (e confermato in seguito) Eddington ha verificato che la luce (energia) di una stella viene deviata dall'effetto gravitazionale della massa del Sole.



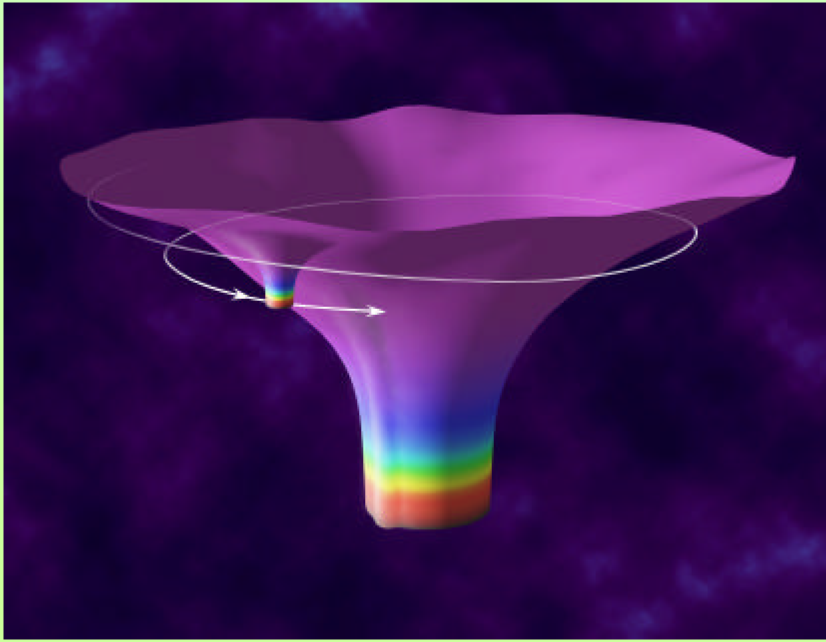


Essendo la massa una forma di energia, in natura si conserva la ***massa-energia***, e una forma si puo` trasformare nell’altra.

La ***curvatura dello spazio-tempo*** e` il concetto che subentra a quello di gravitazione universale: e` la massa a determinare la curvatura dello spazio-tempo, ed e` quest'ultima ad imporre il moto alla massa.

Una massa attrae la luce e ne modifica la traiettoria, dando luogo al fenomeno di ***lente gravitazionale***, gia` osservata nel caso di corpi di grande massa: Sole, stelle e galassie.

Secondo la relativita` generale e` prevista anche l'esistenza di ***onde gravitazionali*** prodotte in processi di perdita di energia del campo gravitazionale.

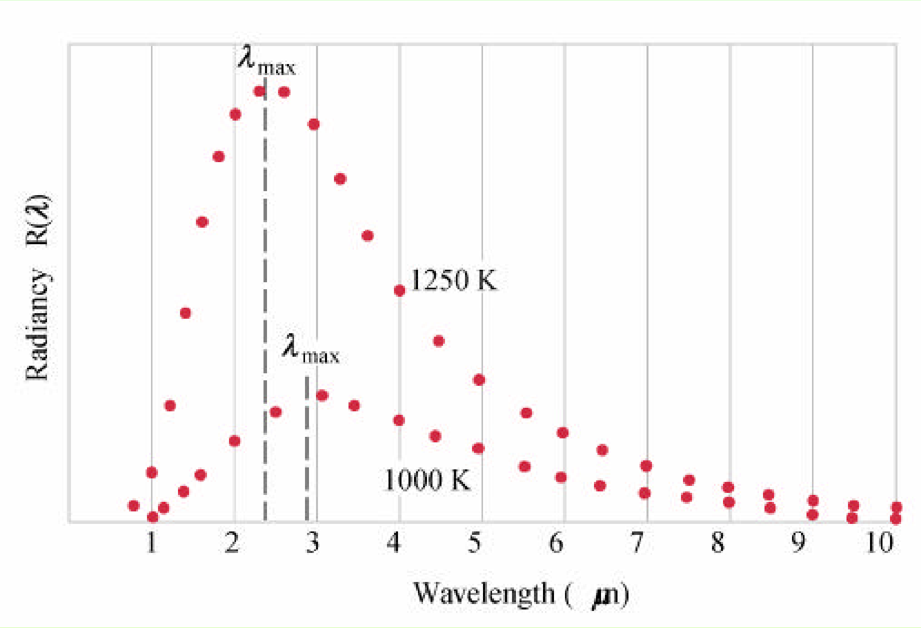


LA MECCANICA QUANTISTICA

Alla fine del XIX secolo la statistica classica si dimostro` inadeguata a spiegare le curve di emissione di corpo nero e, in particolare, comportava una ***catastrofe ultravioletta***.

Infatti, mentre le leggi di Wien e di Stefan:

$$\boxed{\begin{array}{l} l_{\max} T = \text{costante} \\ \int \mathrm{u}_n \, dn = aT^4 \end{array}}$$

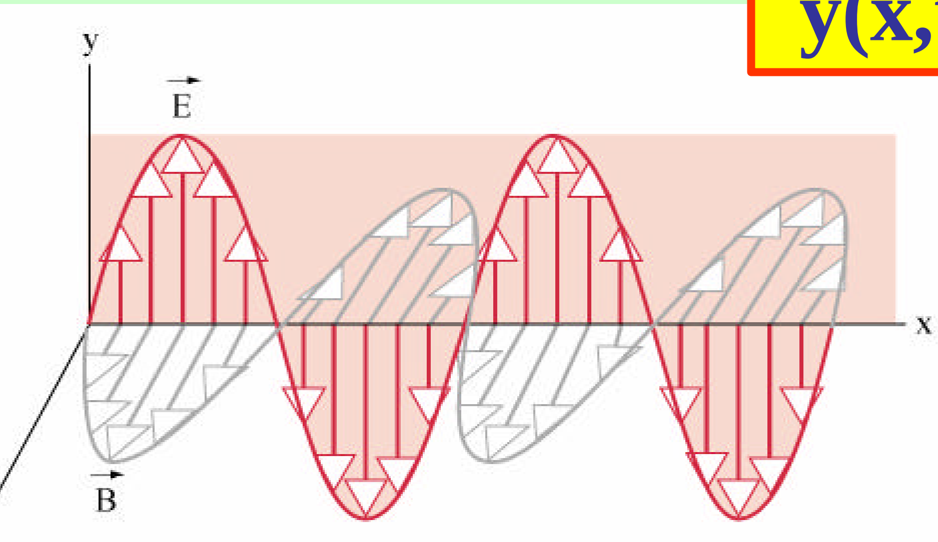


risultavano verificate, non lo era la legge di Rayleigh-Jeans sulla distribuzione energetica della radiazione (brevemente luce) data da:

$$u_n = \frac{8pn^2}{c^3} kT$$

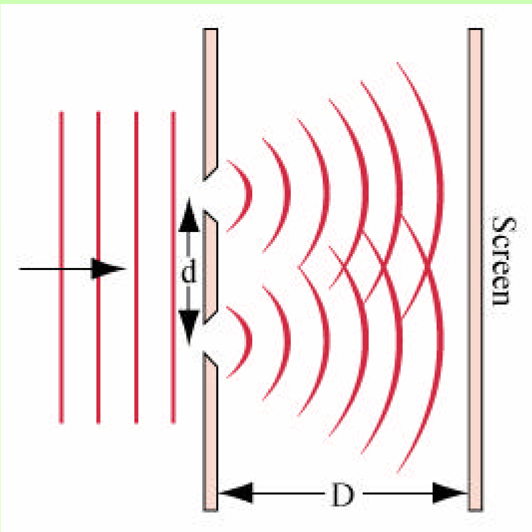
(infatti $u_n \to \infty$ per $n \to \infty$)

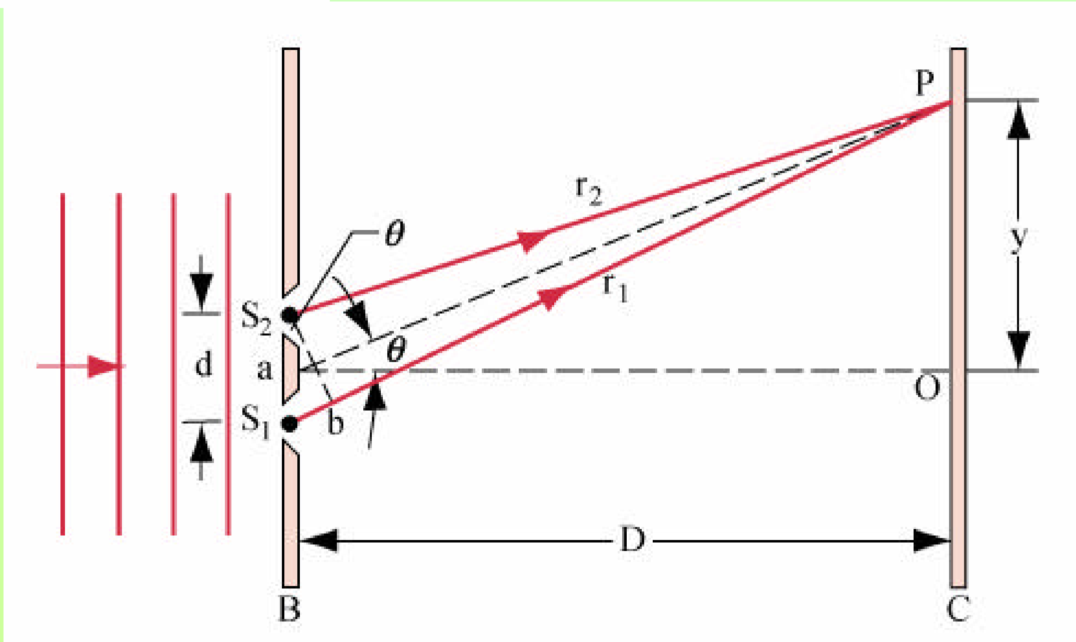
$$y(x,t) = A \sin[2p(x/l\ - t/T)]$$



$$y(x,t) = y_m \sin(kx - \omega t),$$

La luce deve avere natura ondulatoria





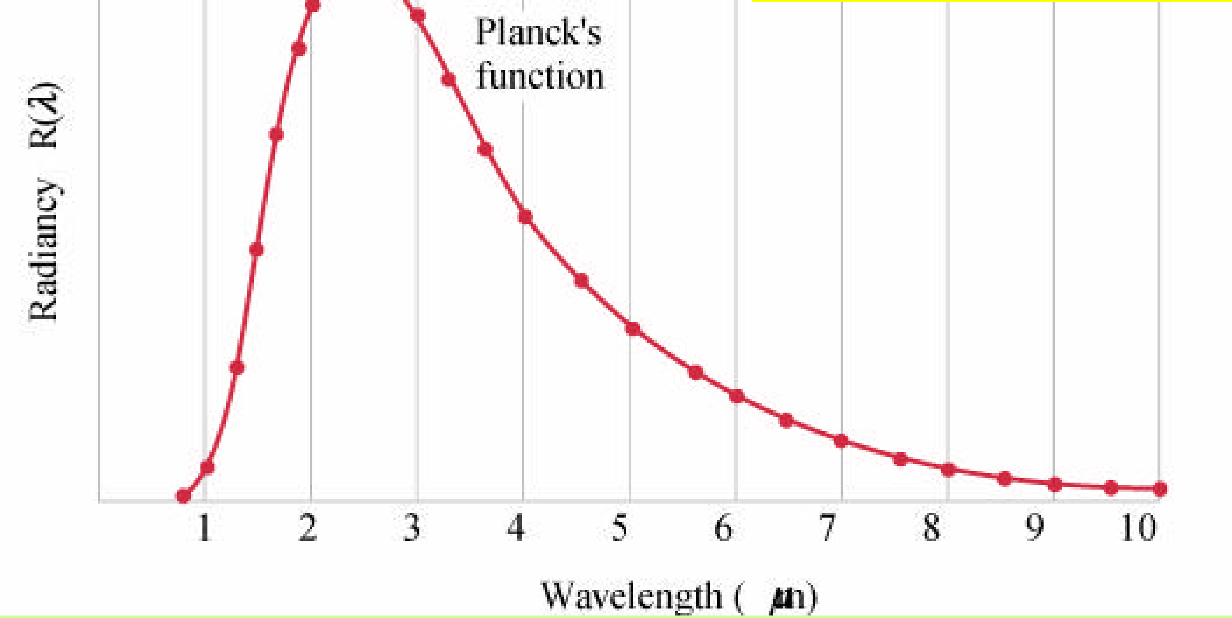
Nel 1900 Planck propose che **la radiazione fosse quantizzata**, ossia composta di **quanti di energia multipli di un valore minimo ε_0** ($n\varepsilon_0$, con $n \geq 1$).
La legge proposta da Plank sulla distribuzione energetica della radiazione e` data dalla relazione:

$$u_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\frac{1}{e^{h\nu/kT}-1}$$

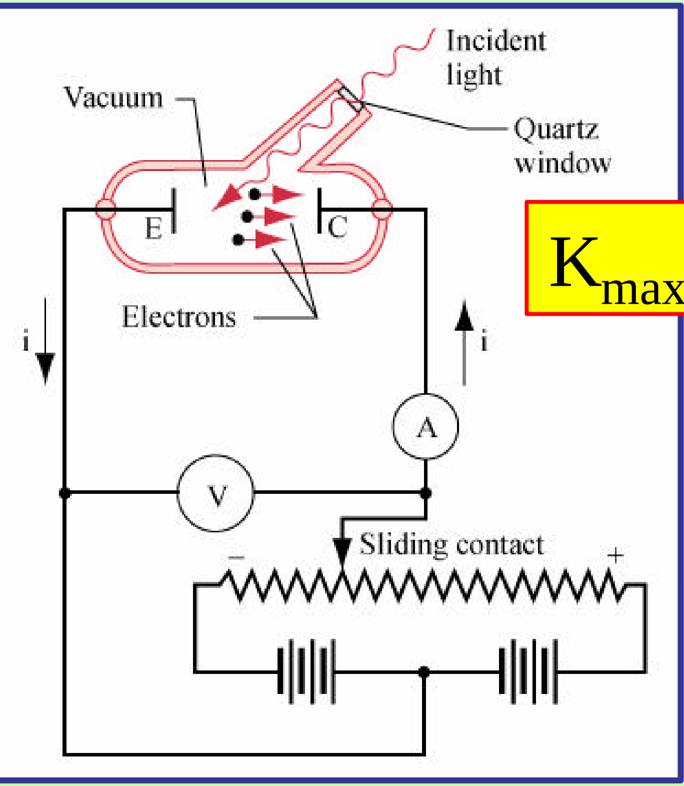
Le leggi di Wien e di Stefan sono due casi particolari della legge di Plank, validi per piccole o grandi frequenze (*energie*):

$$\frac{h\nu}{kT} \ll 1 \text{ (Rayleigh - Jeans)}$$

$$\frac{h\nu}{kT} \gg 1 \text{ (Wien)}$$

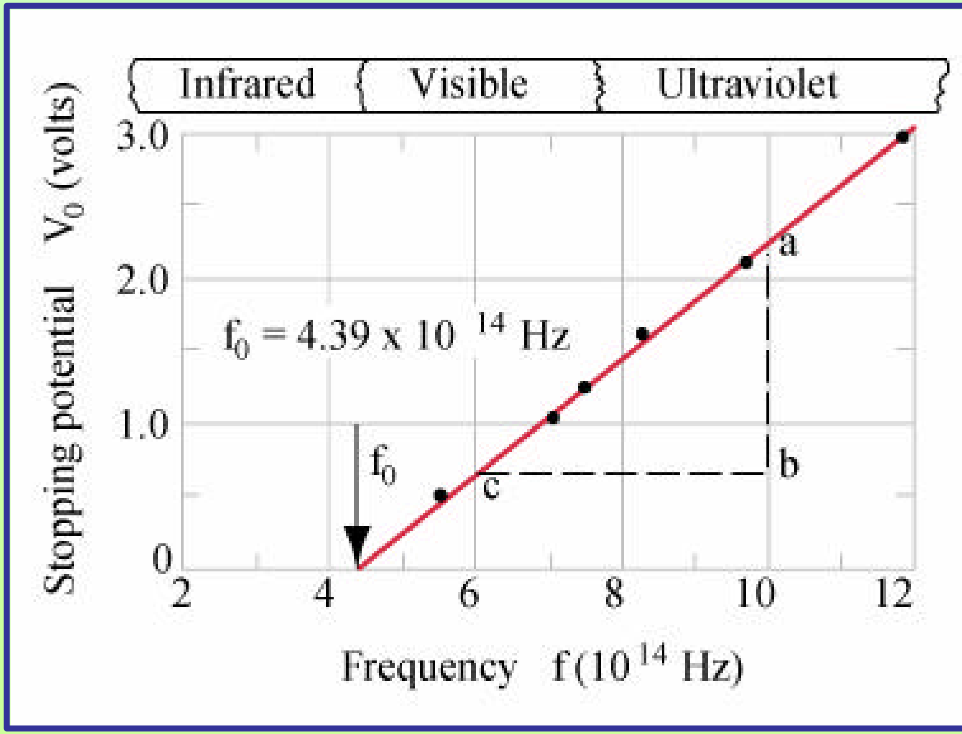


La teoria di Plank sulla radiazione permise di spiegare **l'effetto fotoelettrico** e **l'effetto Compton**.



Il potenziale d'arresto non dipende dall'intensita` della luce.

$$K_{max} = ½mv^2 = eV_{stop}$$



La frequenza di taglio non dipende dall'intensita` della luce.

Dunque **la luce non ha solo natura ondulatoria**, perche` sotto la frequenza di taglio non vengono emessi elettroni anche se si tratta di luce di grande intensita`. La luce (o piu` generalmente la radiazione) deve avere **anche natura corpuscolare**, come proposto da Einstein nel 1905, che introdusse il quanto elementare di luce, il **fotone**. Al fotone di frequenza ν viene associata l'energia **E = h**n, dove la costante di Plank h ha il valore h = $6.63 \cdot 10^{-34}$ J·s = $4,14 \cdot 10^{-15}$ eV·s.

Dato il potenziale di ionizzazione Φ, l'effetto fotoelettrico si spiega con la legge di conservazione dell'energia.

$$hn = \Phi + K_{\max} = \Phi + \tfrac{1}{2} m v^2$$

$$V_{stop} = \frac{K_{\max}}{e} = \frac{h}{e} n - \frac{\Phi}{e}$$

Dalla seconda relazione si vede che V_{stop} cresce linearmente con la frequenza e si puo` misurare il valore di h.

Per spiegare l'effetto Compton, nel 1916 Einstein propose di associare al fotone non solo un'energia ma anche un impulso.

$$p = \frac{hn}{c} = \frac{h}{l}$$

$$hn = hn' + K = hn' + mc^2(g-1)$$

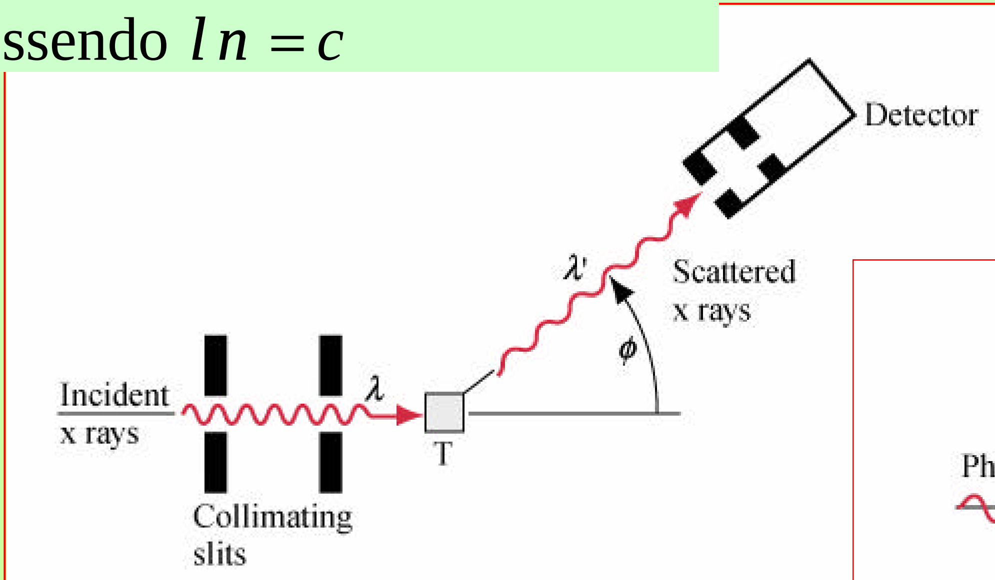
$$\frac{h}{l} = \frac{h}{l'} + mc(g-1)$$

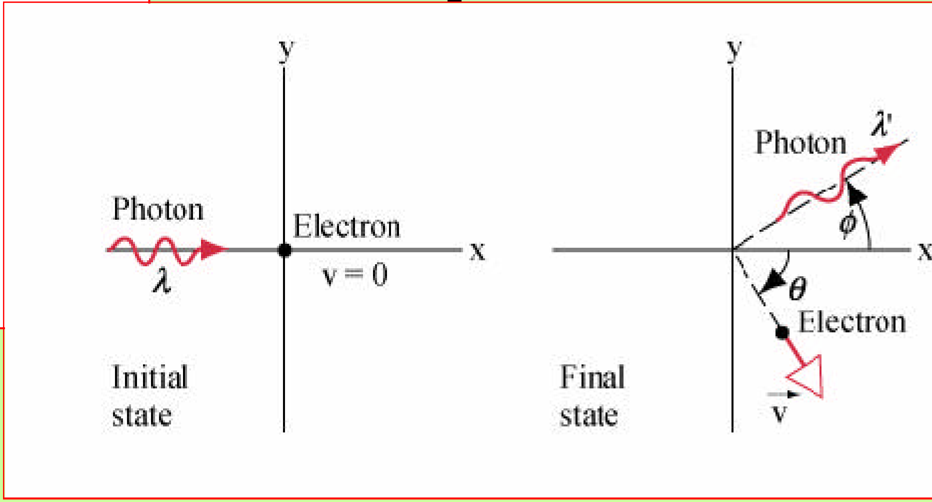
essendo $l\,n = c$

L'effetto si spiega con la conservazione dell'energia e della quantita` di moto

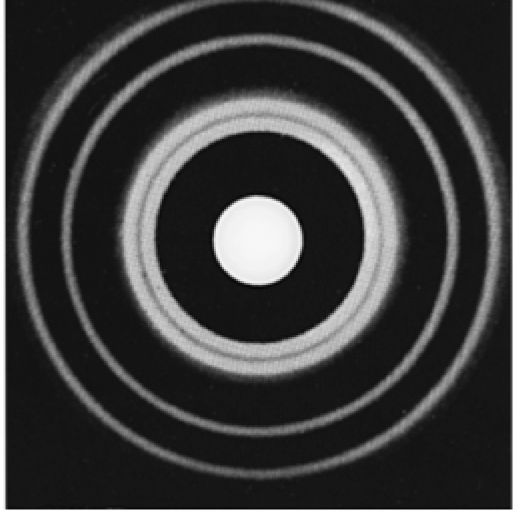
$$\Delta l = \frac{h}{mc}(1-\cos f)$$

$\frac{h}{mc}$ e` una costante detta lunghezza d'onda Compton

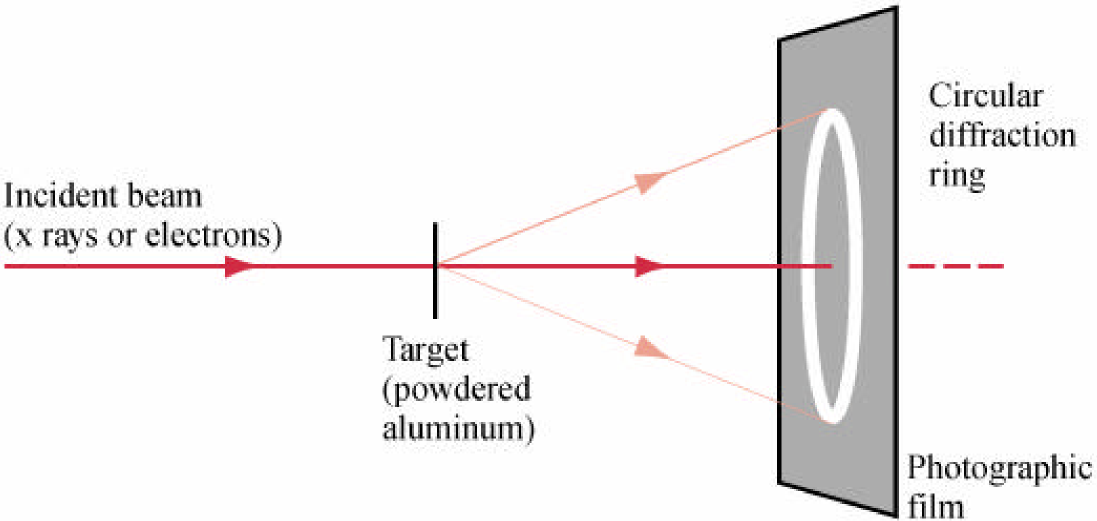




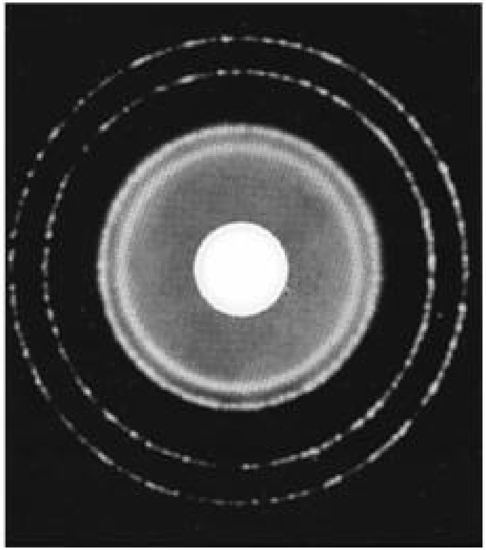
Le particelle hanno le stesse proprieta` delle onde (in particolare interferenza e diffrazione) e natura di onda-corpuscolo: ***sono rivelabili in un punto come corpi materiali, ma la probabilita`di rivelarli ha la natura di un'onda***.



(c)



(a)



(b)

Per simmetria, nel 1924 De Broglie ipotizzo`che anche **le particelle avessero natura ondulatoria**: come la radiazione possiede l'impulso p = h/λ, anche una particella possiede la lunghezza d'onda (detta di De Broglie) **l = h/p = h/mv**.

Nel 1926 Schrödinger diede l'interpretazione matematica della meccanica quantistica, introducendo la **funzione d'onda** Y, che nei casi piu` semplici di onde di materia puo` essere scritta come:

$$\boxed{y\,(x, y, z, t) = y\,(x, y, z)e^{-iwt}}$$

dove ω = 2πν e` la pulsazione dell'onda. Si tratta di un'equazione delle coordinate spaziali e temporale, che stabilisce la probabilita` di trovare una particella in una data posizione sapendo le condizioni energetiche del sistema.

Considerando il moto lungo l'asse x di una particella libera, l'equazione di Schroedinger puo` essere posta nella forma:

$$\frac{d^2y}{dx^2}+\frac{8p^2m}{h^2}\left[E-E_{pot}(x)\right]y=0,\quad \frac{d^2y}{dx^2}+k^2y=0,$$

$$\text{per}\quad E_{pot}(x)=0,\quad \frac{8p^2m}{h^2}\left(\tfrac{1}{2}mv^2\right)=\left(2p\,\frac{p}{h}\right)^2$$

la cui soluzione generale e` del tipo:

$$y(x,t)=y(x)e^{-iwt}=$$

$$=(Ae^{ikx}+Be^{-ikx})e^{-iwt}=$$

$$=Ae^{i(kx-wt)}+Be^{-i(kx+wt)}$$

cio` che ha significato fisico e` la densita` di probabilita` $|\Psi^2|$, una quantita` reale e positiva che fornisce la probabilita` di trovare la particella in un determinato volume elementare.

Dalle formule di Eulero

$$\boxed{\begin{aligned} e^{iq} &= \cos q + i \sin q, \\ e^{-iq} &= \cos q - i \sin q, \end{aligned}}$$

e dalla $\left|e^{ikx}\right|^2 = e^{ikx}e^{-ikx} = 1$

si ottiene

$$|y|^2 = \left|y_0 e^{ikx}\right|^2 = \left(y_0^2\right)\left|e^{ikx}\right|^2 = y_0^2 = \text{costante}$$

Ossia, una particella libera, per la quale $E_{pot}(x) = 0$, che si muove lungo l'asse x ha la stessa probabilita` di essere individuata in qualsiasi punto.

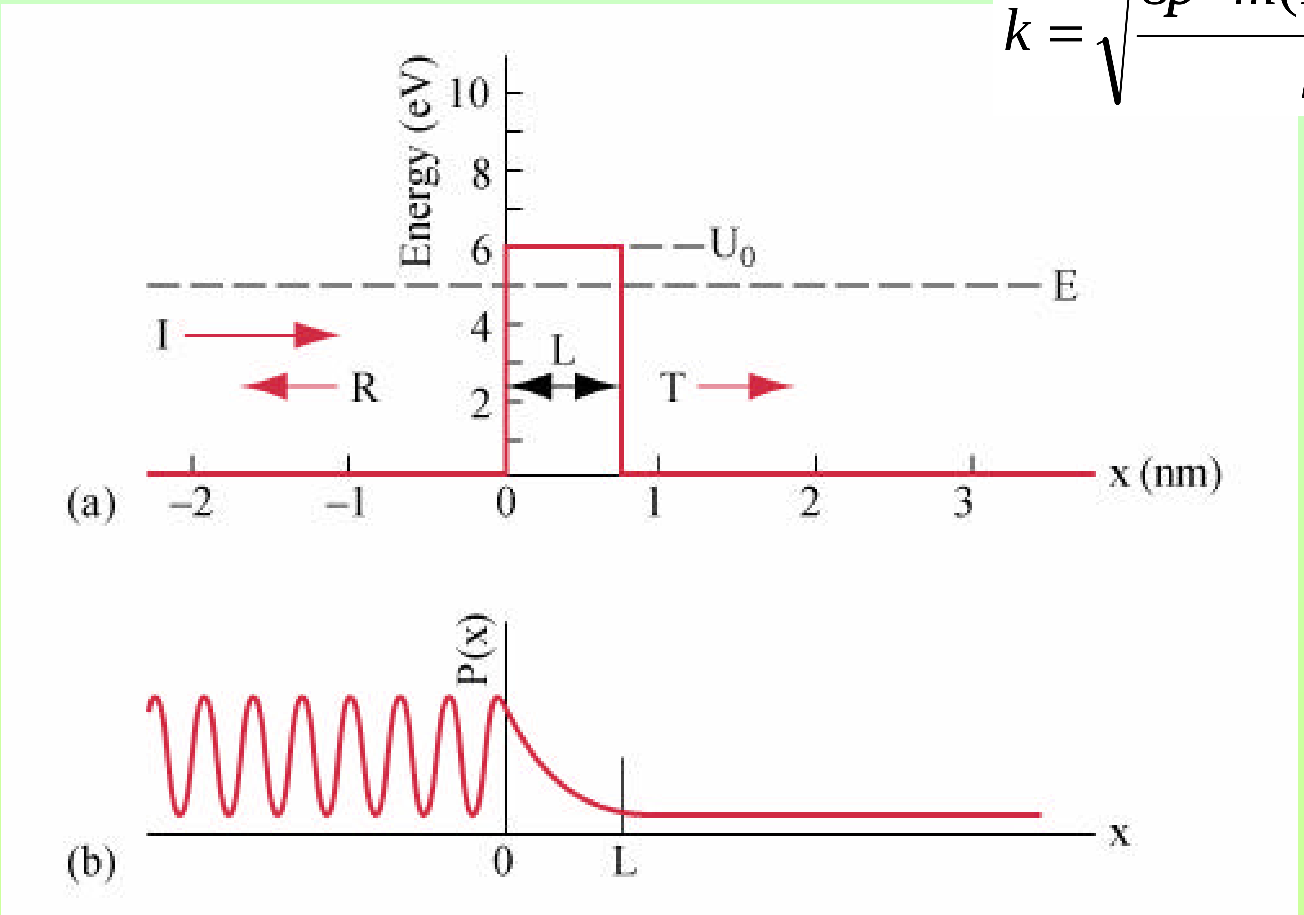
La possibilita` di prevedere solo in modo probabilistico la posizione di una particella e` un esempio del **principio di indeterminazione**, formulato da Heisenberg nel 1927.
Questo principio stabilisce che non e` possibile determinare in modo preciso, e contemporaneamente, alcune coppie di grandezze fisiche tra cui, per esempio:

$$D\mathbf{E}\cdot D\mathbf{t} \geq \mathbf{h/2}p \qquad\qquad D\mathbf{x}\cdot D\mathbf{p} \geq \mathbf{h/2}p$$

dove h e` la costante di Plank (spesso si usa **h** = h/2π).
Le conseguenze del principio sono fondamentali nella fisica atomica e nucleare (quando Δx ? 0) e del big bang (quando Δt ? 0).

Infine, essendo un'onda di probabilita`, per le particelle vale l'effetto tunnel: si puo` avere Ψ?0 anche dopo la barriera di potenziale, con coefficiente di trasmissione **$T \sim e^{-2kL}$**, dove

$$k = \sqrt{\frac{8p^{2}m(E_{pot} - E)}{h^{2}}}$$



Fine della
Prima Parte