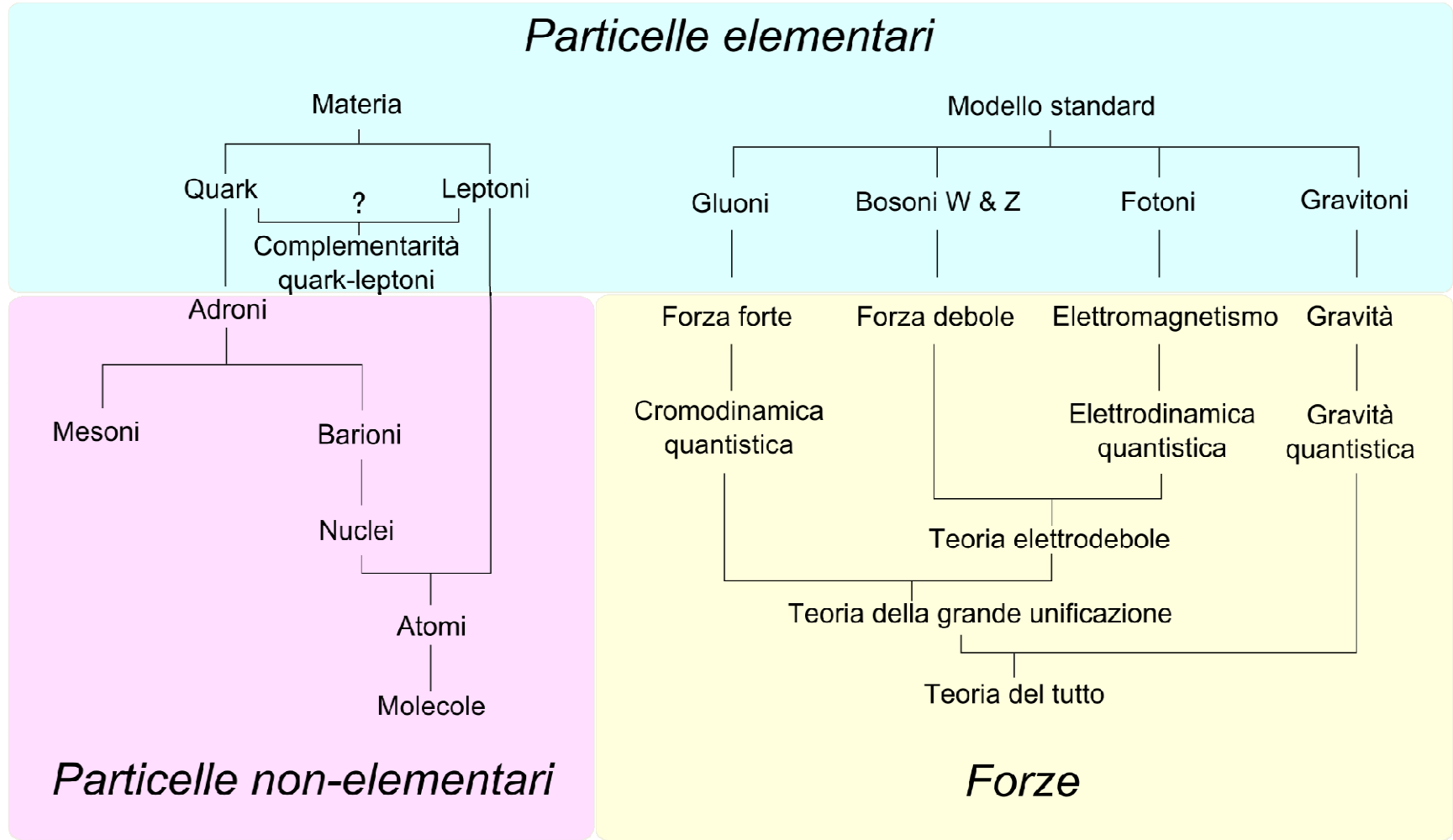
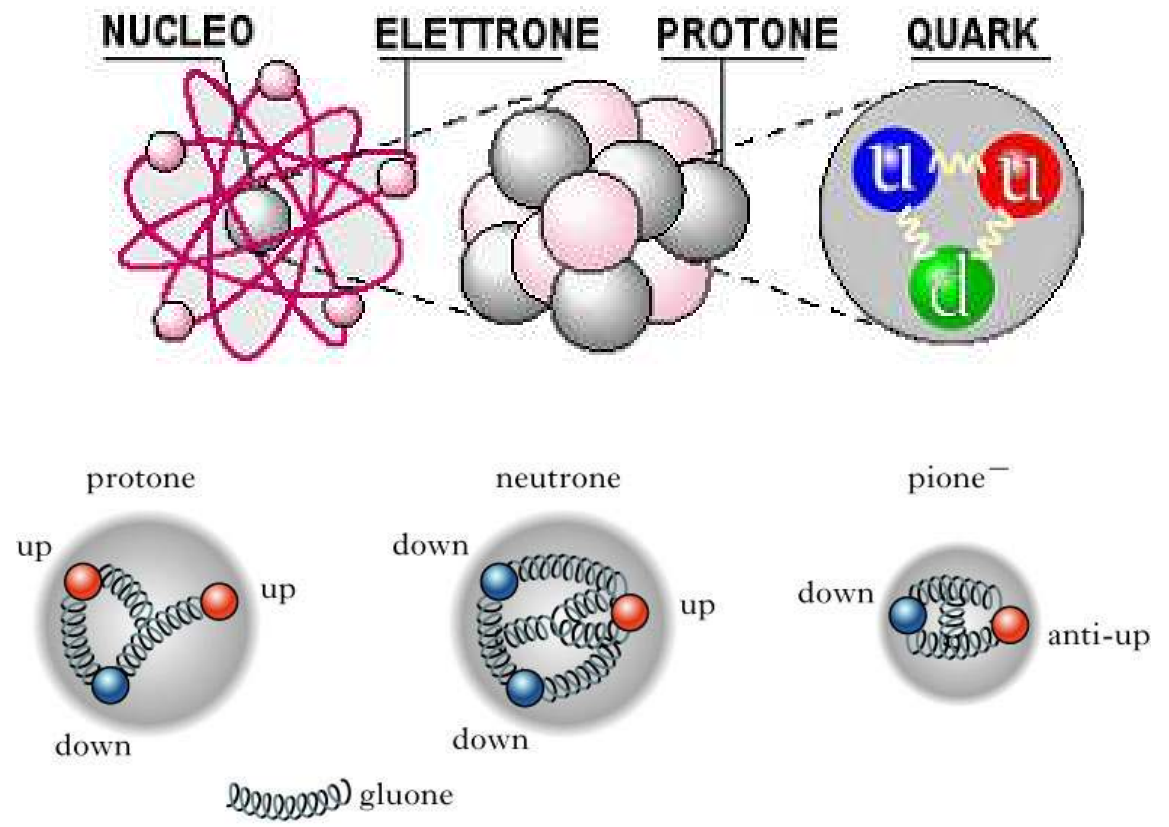


# Particelle elementari



MATERIA			
 u up	 c charm	 t top	QUARK
 d down	 s strange	 b beauty	
 $\nu_e$ neutrino e	 $\nu_\mu$ neutrino $\mu$	 $\nu_\tau$ neutrino $\tau$	
 e elettrone	 $\mu$ muone	 $\tau$ tau	
1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup> famiglia	3 <sup>a</sup>	

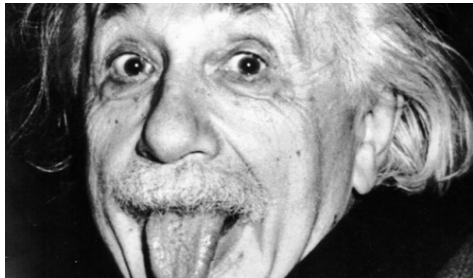


# Elettromagnetismo

relatività

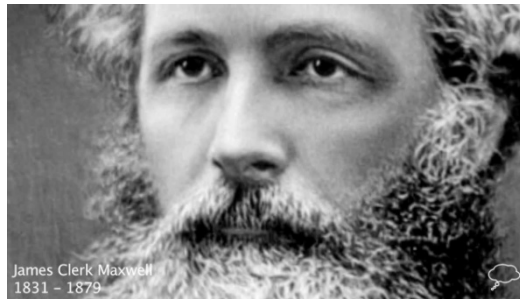
Elettromagnetismo  
classico

meccanica  
quantistica



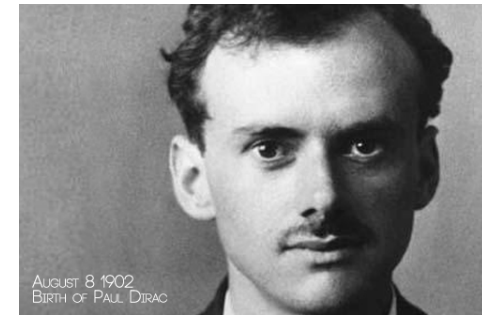
Einstein - 1905

Fallisce all'esame d'ingresso al [Politecnico di Zurigo](#) nel [1895](#), tentato nonostante non avesse l'età minima richiesta e non superato per insufficienza nelle materie letterarie



Maxwell - 1865

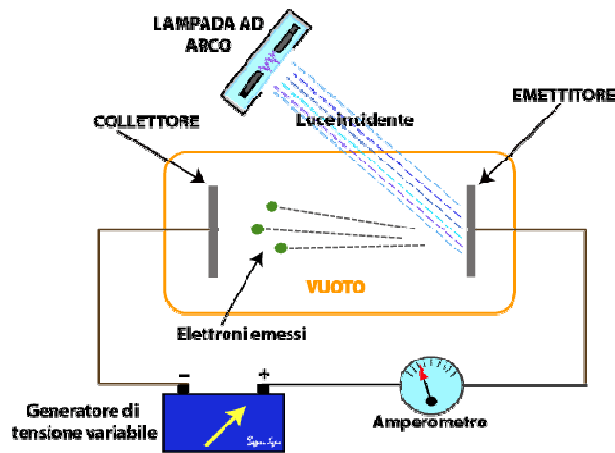
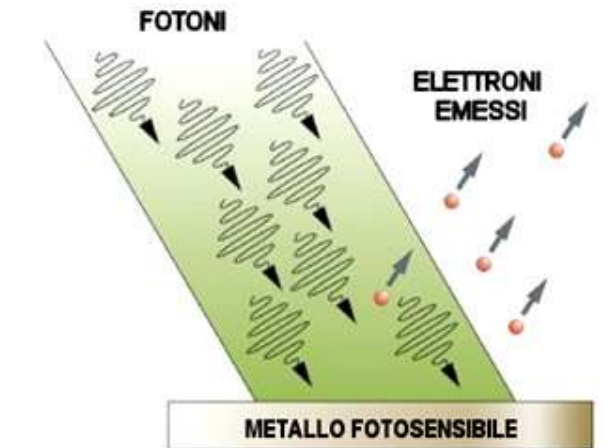
Nel [1846](#), a 14 anni, scrisse un articolo sulle ellissi dove generalizza la definizione di un'ellisse come il luogo dei punti dove la somma di  $m$  volte la distanza da un punto fissato più  $n$  volte la distanza da un secondo punto fissato è costante.



Dirac – 1926 (Planck)

Dirac era noto per un aspetto curioso della personalità, l'estrema riluttanza a parlare. I suoi colleghi a Cambridge avevano istituito ironicamente il "*Dirac*", come unità di misura della loquacità: un dirac valeva l'emissione di una parola ogni ora

# Aspetti quantistici: natura ondulatoria e corpuscolare delle onde elettromagnetiche



Exp. Lenard

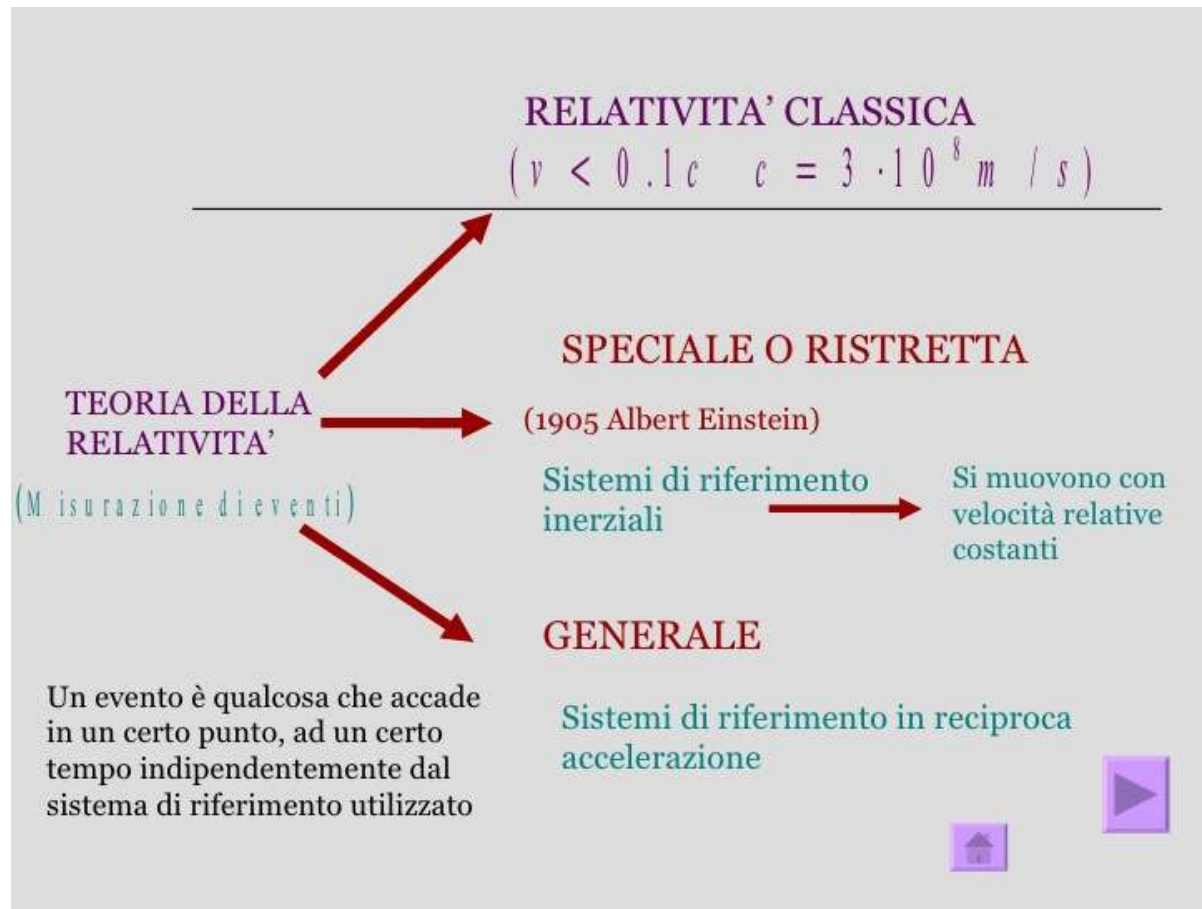


$$E_K = \frac{1}{2} m v^2 = h \nu - W_0$$

## Relatività

*Non vi può essere alcun dubbio che gli spazi interplanetari e interstellari non siano vuoti ma occupati da una sostanza o corpo materiale che è certamente il più vasto e probabilmente il più uniforme di cui abbiamo una qualche conoscenza... (Maxwell sull'etere)*

*...Nessuna caratteristica dei fatti osservati corrisponde al concetto di un etere assoluto; [...] per tutti i sistemi di coordinate per i quali valgono le equazioni della meccanica, valgono anche le equivalenti equazioni dell'elettrodinamica e dell'ottica [...]. In quanto segue facciamo questa ipotesi e introduciamo l'ulteriore postulato, un postulato a prima vista inconciliabile colle ipotesi precedenti, che la luce si propaga nello spazio vuoto con una velocità  $c$  che è indipendente dalla natura del moto del corpo che la emette. Queste due ipotesi sono del tutto sufficienti a darci una semplice e consistente teoria dell'elettrodinamica dei corpi in movimento basata sulla teoria di Maxwell per i corpi in riposo. (Einstein)*



***Albert Einstein in compagnia della prima moglie Mileva Marić (Titel, 19 dicembre 1875 – Zurigo, 4 agosto 1948), sua compagna di studi di origini serbe. Alcuni ritengono che, senza il suo fondamentale contributo di matematica, Einstein non sarebbe mai giunto alla formulazione della Relatività Ristretta. Infatti Einstein versò interamente a lei l'ammontare del Premio Nobel vinto nel 1921. La Relatività, dunque, è donna!***



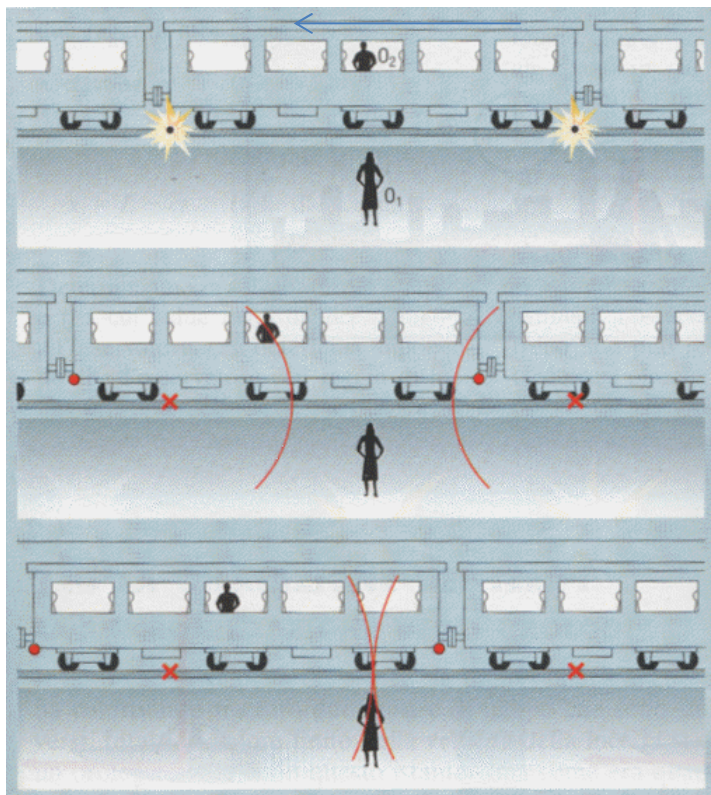
### Postulati della relatività speciale:

- Le leggi della fisica assumono la stessa forma in ogni sistema di riferimento inerziale.
- La velocità della luce nel vuoto è indipendente dal moto dell'osservatore o della sorgente.

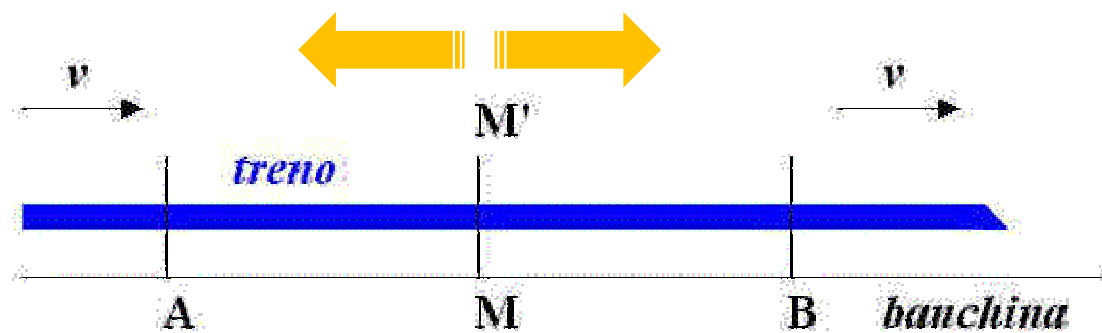
Simultaneità

**Se per un osservatore due eventi avvengono nello stesso luogo ma in istanti di tempo diversi, in generale per un altro osservatore i due eventi non avvengono nello stesso luogo**

**Se per un osservatore due eventi avvengono nello stesso istante di tempo ma in luoghi diversi, in generale per un altro osservatore i due eventi non avvengono nello stesso istante di tempo**

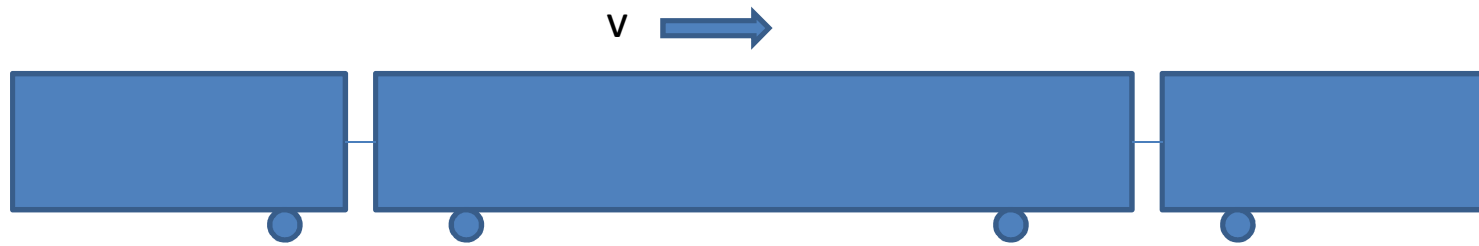


Per chi è a terra le esplosioni sono simultanee

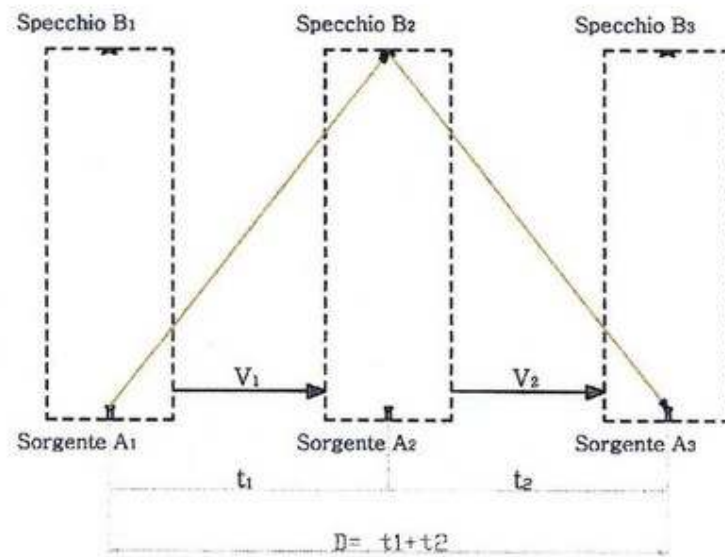




# Dilatazione dei tempi



Orologio a luce fermo



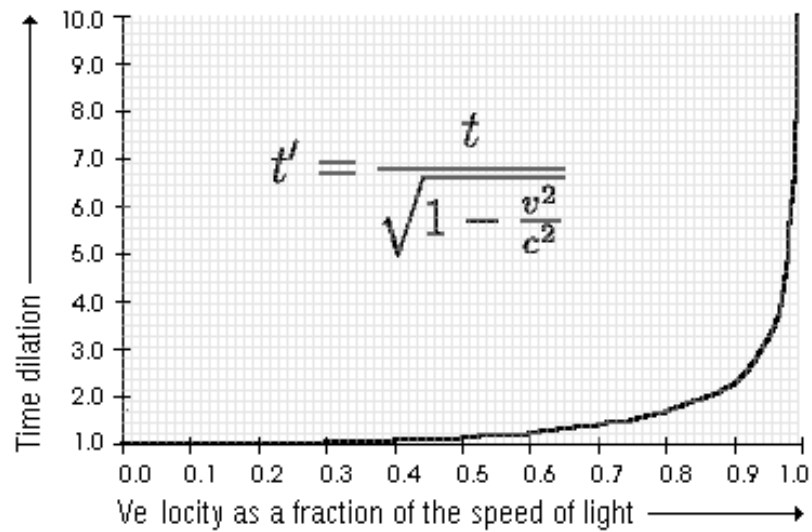
Orologio a luce in moto

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

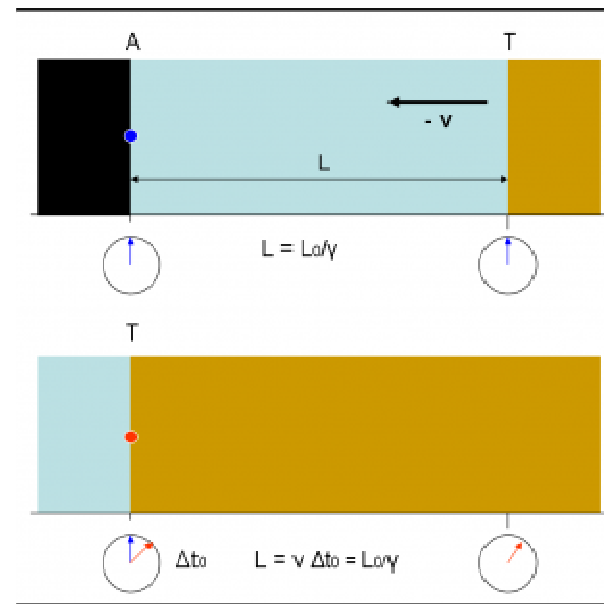
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Figura 8.1 rappresentazione dell'esperimento per la spiegazione della dilatazione del tempo con un orologio a luce secondo l'ipotesi relativistica



Contraazione delle lunghezze



$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

## Esempio dei gemelli

Un gemello sta sulla terra, l'altro parte a velocità  $v = 0.8c$  verso una stella  
Distante 8 anni luce

$$1/\gamma = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0,6$$

Nel sistema di riferimento della Terra l'astronave percorre 8 anni luce in 10 anni, sia durante il viaggio di andata, che durante il viaggio di ritorno: essa quindi arriva dopo 20 anni.

Sull'astronave, però, il tempo scorre al 60% rispetto alla Terra, quindi l'orologio dell'astronauta avanza di 6 anni all'andata e altrettanti durante il ritorno: all'arrivo il calendario dell'astronave segna 12 anni trascorsi. Il fratello rimasto sulla Terra è perciò, dopo il viaggio, **otto anni** più vecchio del suo gemello.

Nei sistemi di riferimento dell'astronave (andata e ritorno), dove il sistema Terra-stella si muove a  $0,8 c$ , per effetto della contrazione delle lunghezze, la distanza fra la Terra e la stella si accorcia al 60%, misura cioè 4,8 anni luce: a  $0,8 c$  questa distanza viene percorsa in 6 anni durante l'andata e 6 durante il ritorno per un totale di 12 anni di viaggio, coerentemente con quanto calcolato nel sistema di riferimento della Terra.

## Effetti relativistici effettivamente osservati

Muone: particella instabile prodotta dai raggi cosmici che incontrano l'atmosfera Terrestre (vita media 2.2  $\mu\text{s}$ , dopodichè decadono solitamente in elettrone e coppia neutrino-antineutrino).

Arrivano veloci ( $v=99.92\%$  di  $c$ ) quindi dovrebbero percorrere 660 m prima di Decadere. In realtà vengono osservati anche sulla superficie terrestre (circa metà) Quindi percorrono 15 km (l'atmosfera).

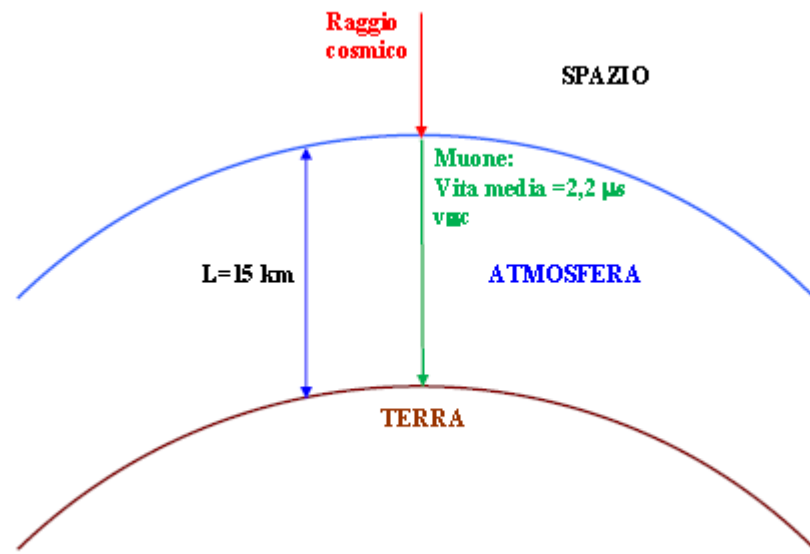
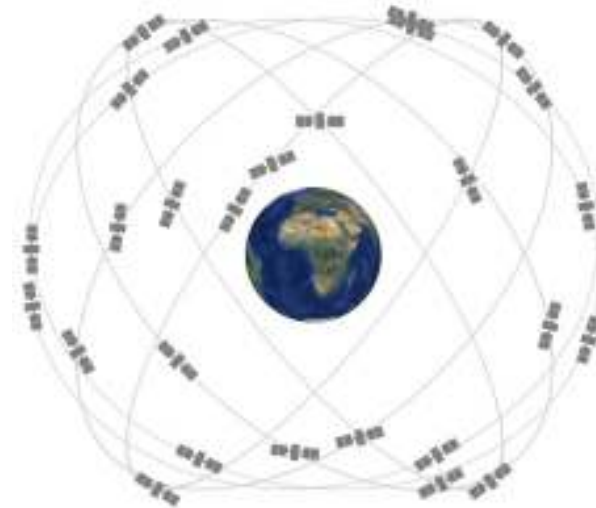


Figura 1. I muoni e la dilatazione del tempo

## Correzioni relativistiche GPS

24 satelliti + riserve a 20000 km di orbita  
 $v = 3.8 \text{ km/s}$

ogni satellite ha un orologio atomico al cesio  
con precisione di 1 su  $10^{14}$



1 GIORNO

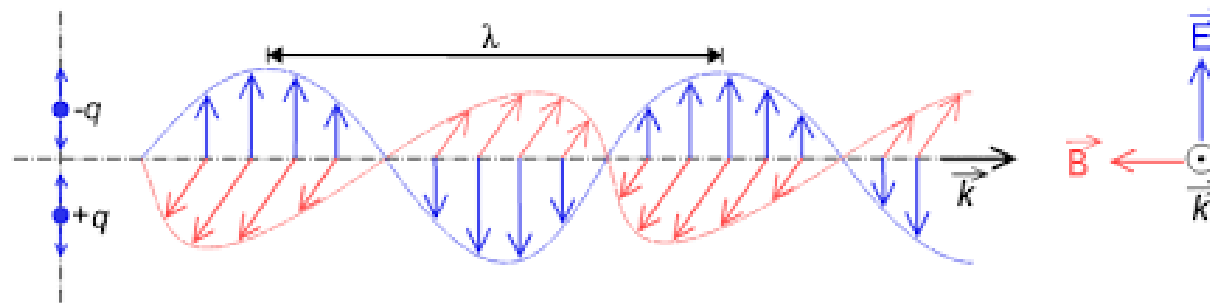
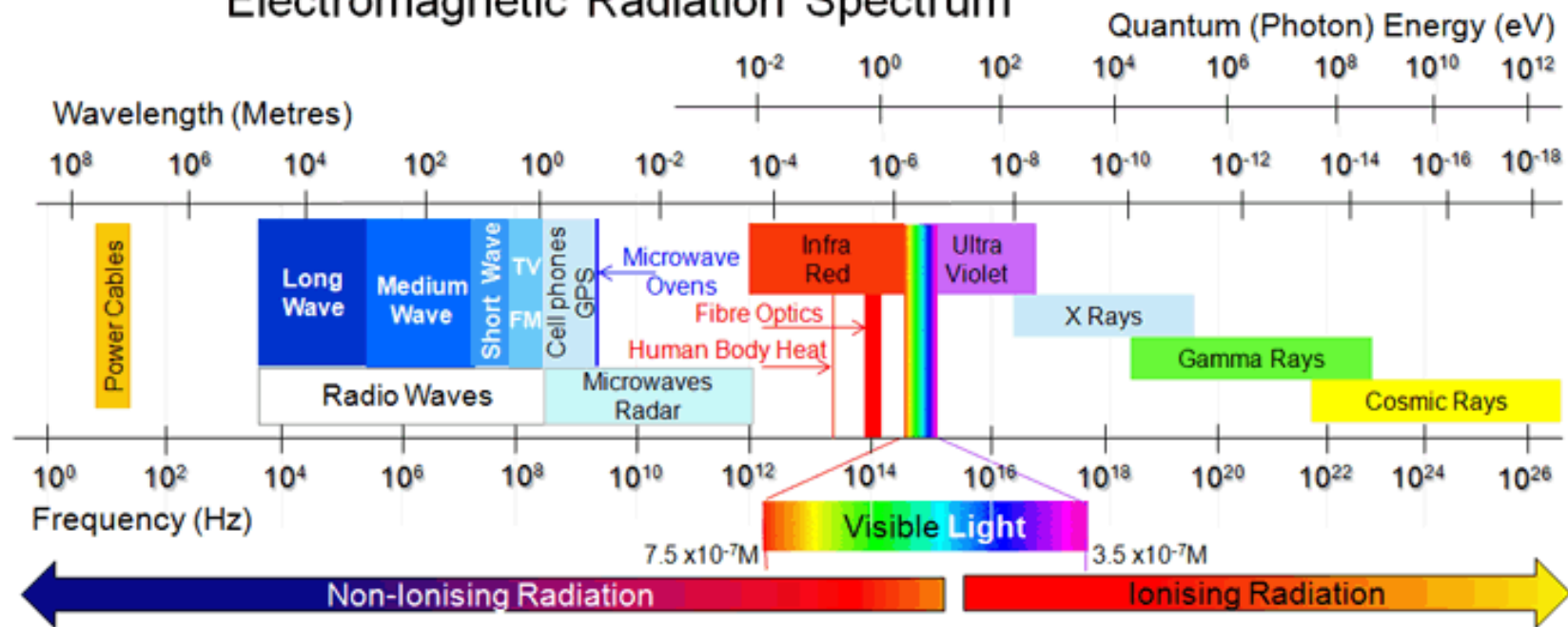
ERRORE in 1 giorno  $24 \times 60 \times 60 = 86400 \text{ s}$ .

$86400 \text{ s} / 10^{14} = 8.6 \cdot 10^{-10} \text{ s} = 0.86 \text{ ns}$  (**30 cm** errore teorico)

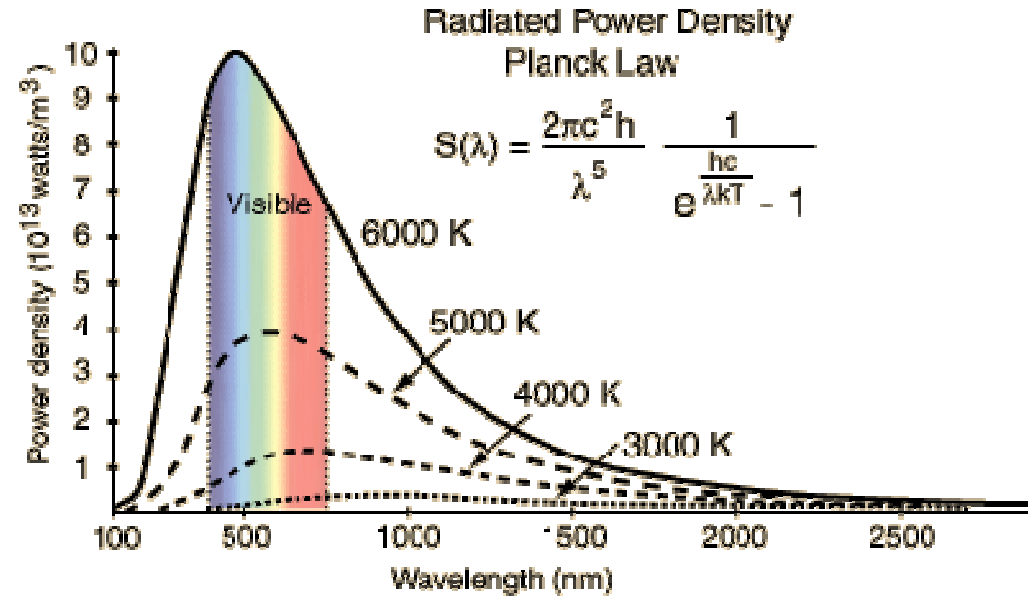
- Relatività ristretta: i satelliti si muovono rispetto al ricevitore, e il loro orologio va più piano (7 us al giorno, -> **2.2 km**)
- Relatività Generale: i campi gravitazionali cambiano sia la velocità degli orologi, sia la propagazione dei segnali radio (45 us al giorno, **15 km**)
- La Terra ruota su se stessa, inducendo ulteriori effetti (Sagnac)

Clock a terra: 10.23 MHz, clock a bordo 10.2299999954326 MHz

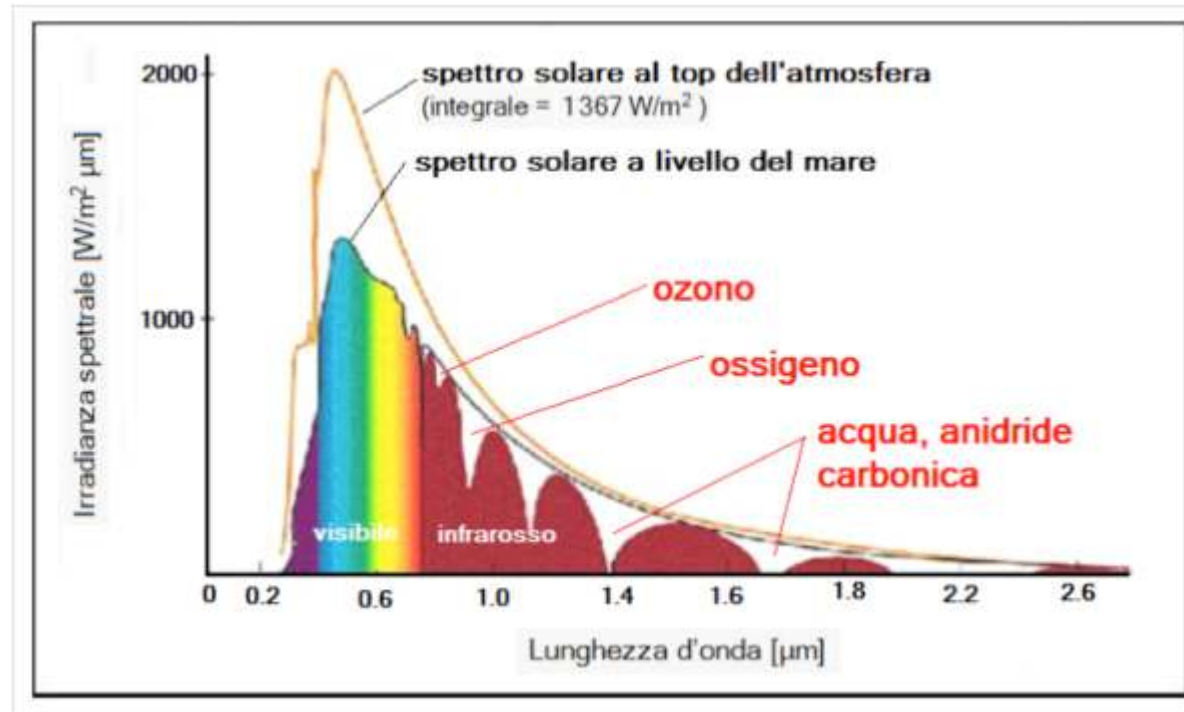
# Electromagnetic Radiation Spectrum



# Spettro di emissione



Sole



## Sorgenti di onde elettromagnetiche

C	S	F	P	D	V	
VLF	Saldatrici elettriche	10 kHz		{30 - 70} cm		2000 $\mu$ T 60 $\mu$ T
	Saldatrici elettriche	25 kHz		{0.1 - 1} m		
LF	Riscaldatori ad induzione	100 kHz		0.1 m		1 mT
	Schermi video	400 kHz		0.5 m	1 V/m	0.1 $\mu$ T
MF	Trasmettitori radio in AM	{525 - 1605} kHz	{2 - 600} kW	{10 - 300} m	{1 - 25} V/m	
	Riscaldatori industriali ad induzione			{0.1 - 1} m		{0.2 - 12} A/m
HF	Incollatrici della plastica	27.12 MHz	10 kW	5 m	??	??
	Presse dielettriche	27.12 MHz	1.5 kW	0.5 m	200 V/m	
	Induratrici ad induzione	27.12 MHz		0.5 m		0.5 A/m
	CB, Walkie Talkies	27.12 MHz	5 kW	0.2 m	100 V/m	0.2 A/m
	Diatermia	27.12 MHz		0.5 m	<500 V/m	



VHF	Trasmettitori TV VHF	(47 - 230) MHz	5 kW	50 m	<5 V/m	
	Trasmettitori radio in FM	(87.5 - 108) MHz	10 kW	70 m	<10 V/m	

UHF	Trasmettitori TV-UHF	(470 - 862) MHz	10 kW	100 m	<50 V/m	
	Stazione Radio Base GSM	(890 - 960) MHz	50 W/canale	20 m	3 V/m	
			10 W/canale	20 m	0.5 V/m	
	Apparecchi mobili GSM	(1.71 - 1.88) GHz	2 W	0.1 m	10-30 V/m	
	Stazioni satellitari, sistemi di sicurezza	(1.5 - 1.8) GHz		In direzione del fascio principale	8 W/m <sup>2</sup>	
Forni a microonde	2.45 GHz		(0.05 - 0.3) m	(0.06 - 0.6) W/m <sup>2</sup>		

SHF	Sistemi di protezione antitaccheggio	(0.9 - 10) GHz		In direzione del fascio principale	2 mW/m <sup>2</sup>	
	Sistemi per il controllo del traffico aereo	(1 - 10) GHz	(0.2-20) kW	100 m	(0.5-10) W/m <sup>2</sup>	
	Radar di puntamento	(4 - 6) GHz		In direzione del fascio principale	4000 V/m 42000 W/m <sup>2</sup>	

EHF	Segnali video analogici e trasmissioni digitali	(30 - 55) GHz			Massima potenza di uscita prima dell'antenna: 1 W	
-----	---	---------------	--	--	--	--

# Programma modulo 1: ONDE

## **Introduzione**

1. Le onde elettromagnetiche nella teoria classica. L'introduzione degli aspetti corpuscolari della radiazione elettromagnetica: il fotone. Cenni storici. Gli aspetti relativistici delle onde elettromagnetiche: cenni storici e principi elementari.
2. Lo spettro elettromagnetico. Onde radio, onde infrarosse, visibili e ultraviolette, raggi X e raggi gamma, raggi cosmici. Interazione con la materia: onde ionizzanti e non ionizzanti.

## **Onde in spazio libero**

1. Richiami sulle equazioni di Maxwell, sulle funzioni d'onda e su alcuni teoremi dell'elettromagnetismo
2. Equazioni di Maxwell nel dominio del numero d'onda
3. Onde piane uniformi e non uniformi (onde in mezzi ideali, buoni dielettrici, buoni conduttori, mezzi qualsiasi, onde nei plasmi)
4. Polarizzazione delle onde (polarizzazione lineare, circolare, ellittica)
5. Riflessione e trasmissione delle onde piane (angolo critico, angolo di polarizzazione)
6. Multistrati (effetto tunnel, effetto guidante)
7. Decomposizione di un campo assegnato in onde piane

## **Onde guidate**

1. I potenziali di Hertz e la propagazione guidata: modi in mezzo omogeneo (TE, TM, TEM). Onde ibride
2. Velocità di fase e di gruppo (dispersione temporale)
3. La guida d'onda rettangolare e circolare
4. Propagazione guidata da uno slab dielettrico: le fibre ottiche (slab lineare, guida circolare a salto d'indice)

## **Radiazione**

1. I potenziali ritardati e la radiazione elettromagnetica
2. Il dipolo Hertziano, campi vicini e campi lontani
3. Diagramma di radiazione e parametri di antenna (cenni)

## **Applicazioni**

1. Le applicazioni delle onde: le bande per radionavigazione e radiolocalizzazione, bande amatoriali, radiomobili civili e militari, broadcast radiofonico e televisivo, bande civili e dedicate ai trasporti, ponti radio e radiomobili terrestri, satelliti meteo e televisivi, radar.
2. Altre applicazioni delle onde elettromagnetiche: la diagnostica del terreno in bassa frequenza (CSEM e induction logging), il ground penetrating radar (GPR), le applicazioni industriali (forni ed essicatori), i sistemi RFid, la diagnostica medica (NMR e pet) e il trattamento, l'astronomia ottica e la radioastronomia.

## Materiale didattico: ONDE

- G.G. Gentili, C. Riva, **Appunti di onde elettromagnetiche con esercizi**, Maggioli editore.
- D. M. Pozar, **Microwave Engineering**, J. Wiley.
- U.S. Inan, A.S. Inan, **Electromagnetic waves**, Prentice Hall.
- G. Conciauro, **Introduzione alle onde elettromagnetiche**, McGraw-Hill.
- C. A. Balanis: **Advanced Engineering Electromagnetics**, J. Wiley.
- R. E. Collin: **Field Theory of Guided Waves**, IEEE Press.

## Organizzazione del corso: ONDE

Lezioni svolte alla lavagna, esercitazioni numeriche