

Anno Accademico

2004-05

**LA FISICA
E
L'UNIVERSO**

Docenti: (Attilio Ferrari) e Piero Galeotti

Fisica e astronomia nell'antichità

Si deve ai popoli dell'antichità (babilonesi, caldei, egizi, sumeri, fenici, ecc..) la nascita della nostra civiltà.

Il mondo ellenistico fece una sintesi delle loro conoscenze e diede origine alla scienza classica.

Talete importò nel mondo greco la matematica e la fisica di egizi e babilonesi. **Pitagora** riteneva la Terra sferica.

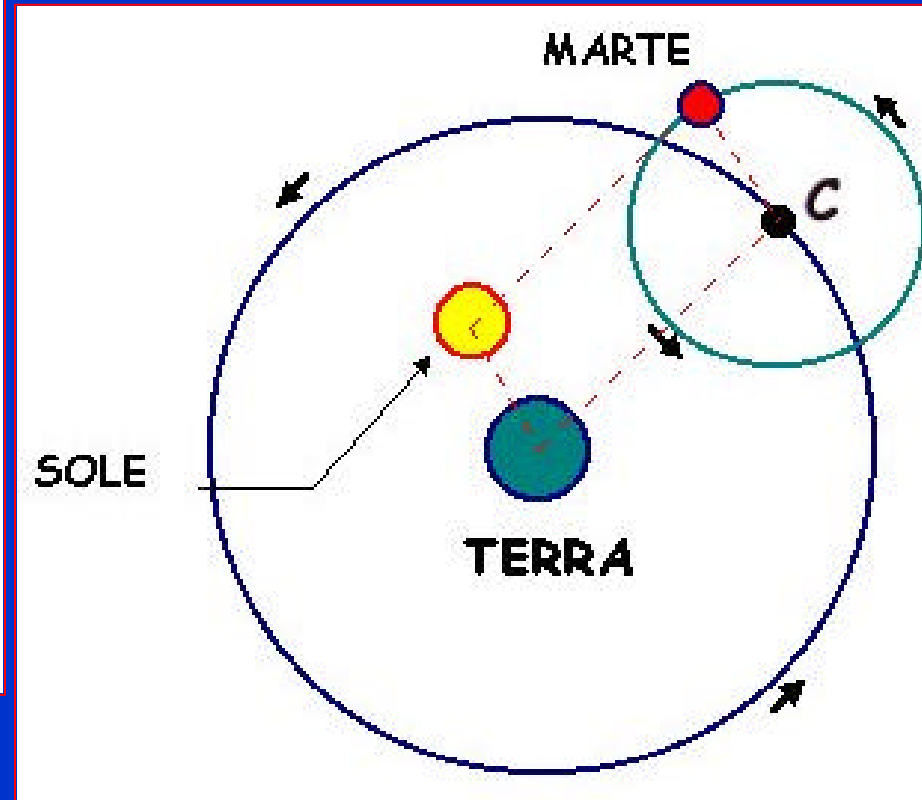
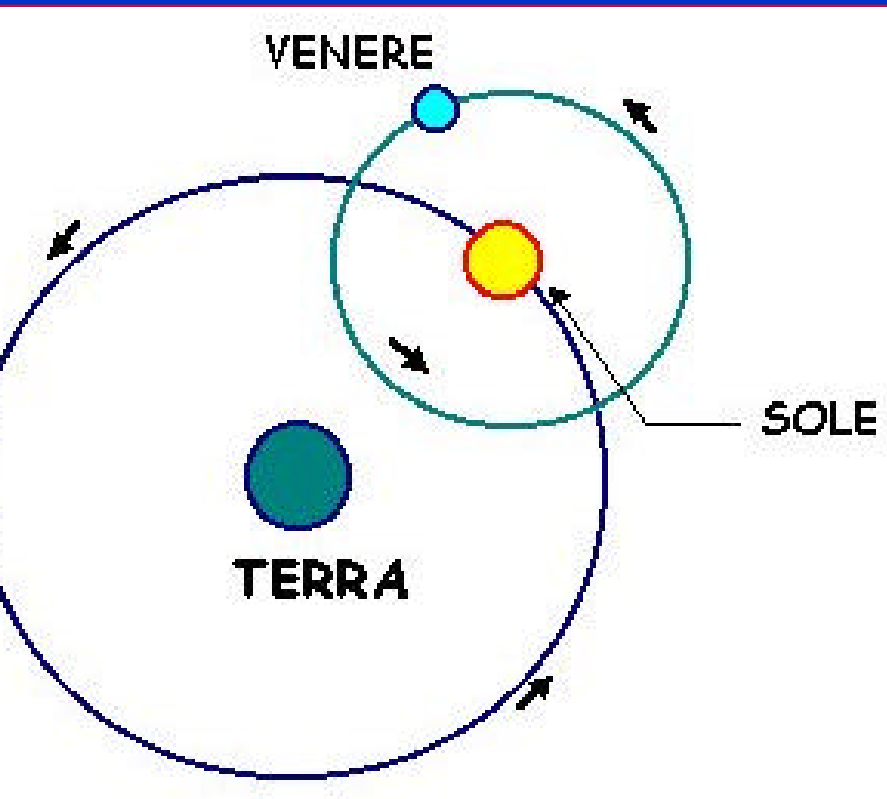
Aristarco e **Eratostene** fecero le prime misure sul sistema solare (ritenuto eliocentrico). **Aristotele** definì gli

elementi fondamentali di natura (terra, acqua, aria, e fuoco) e le forze che agiscono tra loro. **Democrito**, **Epicuro** e **Lucrezio** formularono la teoria atomistica. **Tolomeo** e

Ipparco introdussero l'astronomia e la cosmologia.

Le nuove idee: **Bruno** (1548, 17/2/1600) e **Campanella**.

Eraclide Pontico 388-315 a.C.



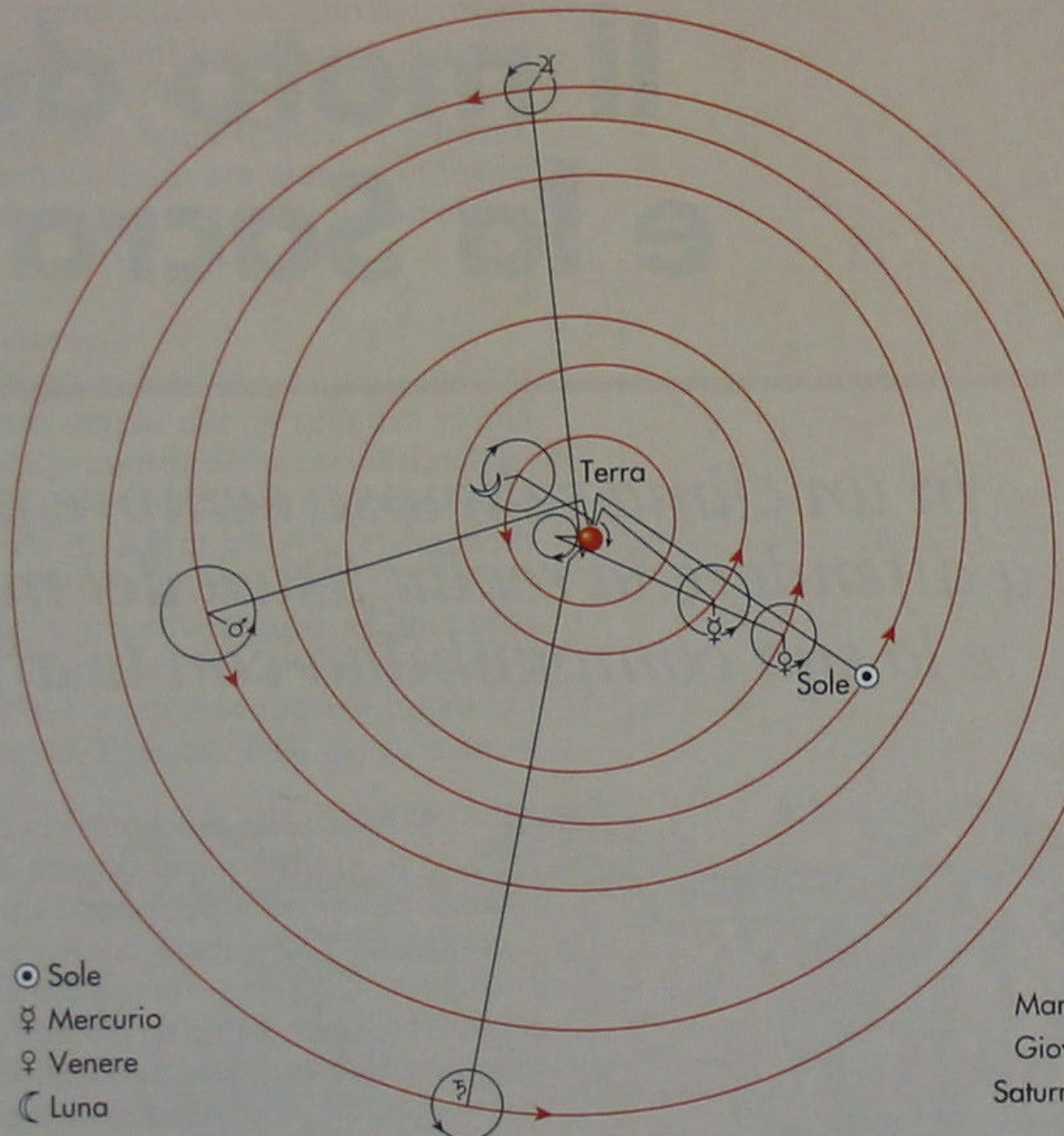
Mercurio e Venere ruotano intorno al Sole e la Terra ruota su se stessa



Tolomeo



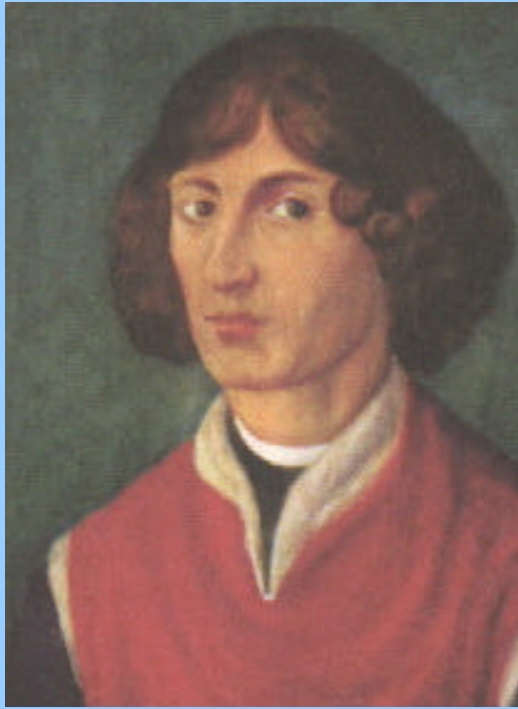
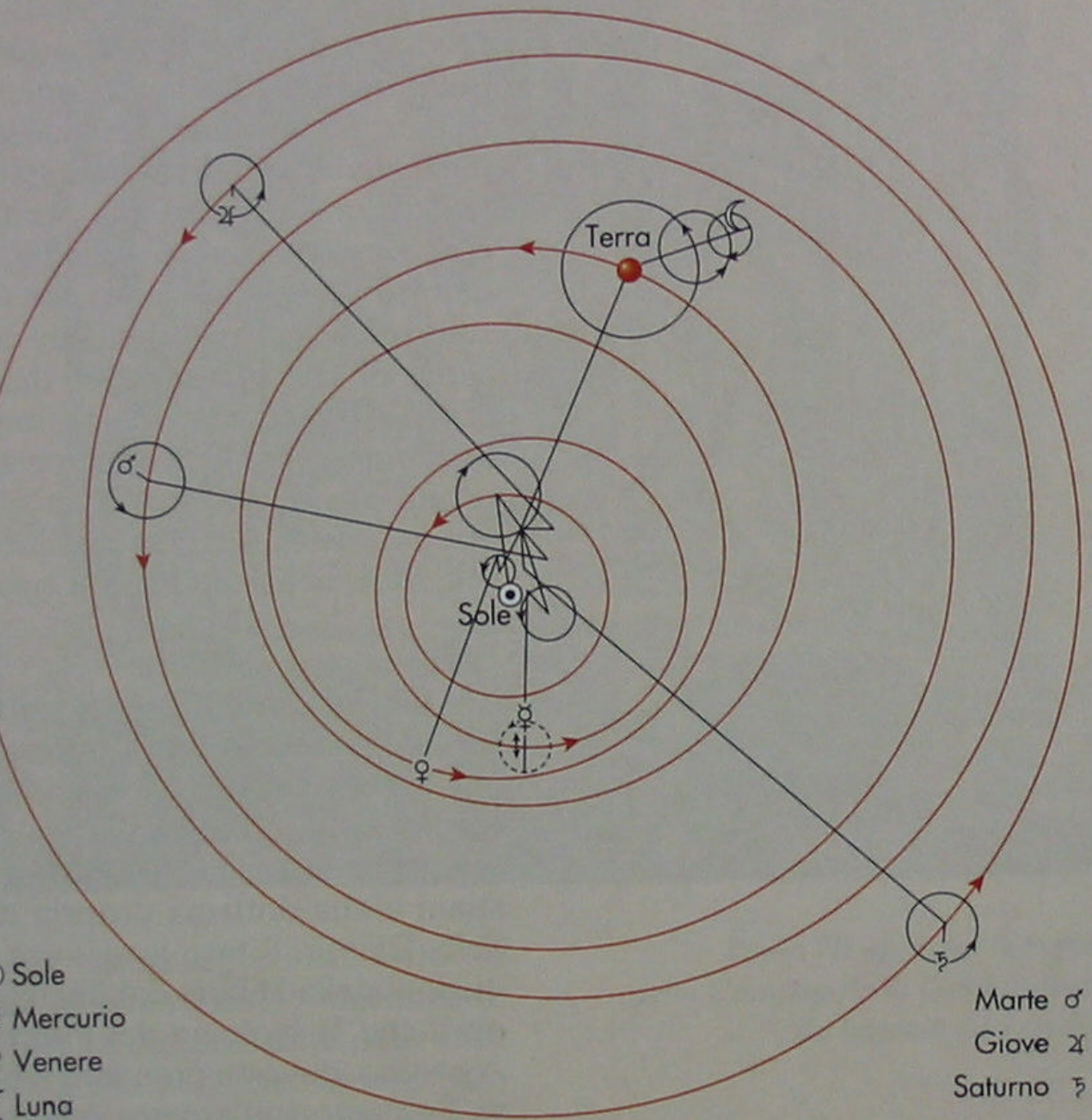
P. Galeotti



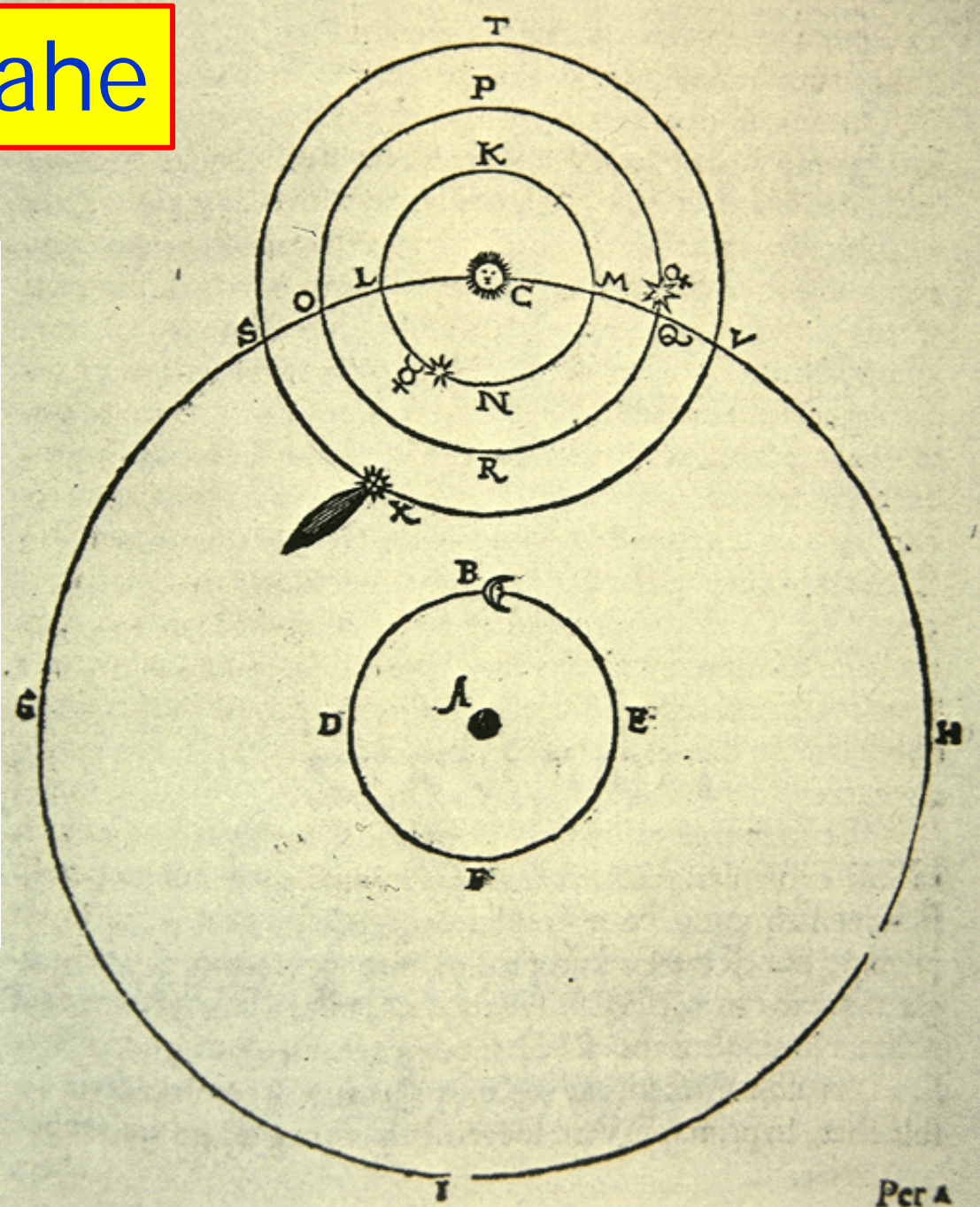
- ☉ Sole
- ☿ Mercurio
- ♀ Venere
- ☾ Luna

Mars
Giove
Saturno

Copernico



Tycho Brahe



DIALOGO

DI

GALILEO GALILEI LINCEO

MATEMATICO SOPRAORDINARIO

DELLO STUDIO DI PISA.

E Filosofo, e Matematico primario del

SERENISSIMO

GR.DVCA DI TOSCANA.

Doue ne i congressi di quattro giornate si discorre
sopra i due

MASSIMI SISTEMI DEL MONDO
TOLEMAICO, E COPERNICANO;

*Proponendo indeterminatamente le ragioni Filosofiche, e Naturali
tanto per l'una, quanto per l'altra parte.*

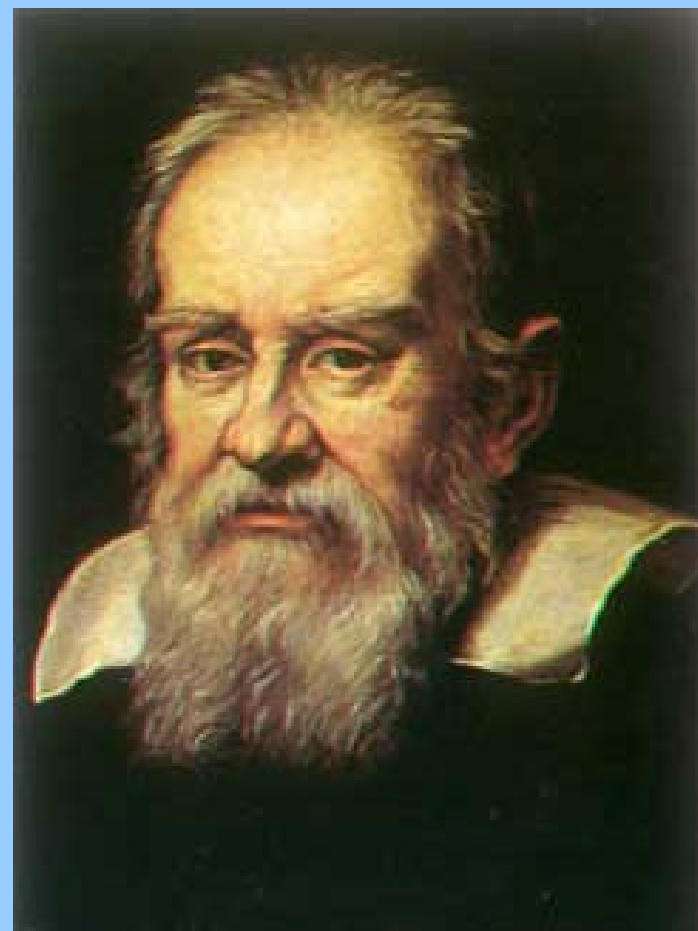
CON PRI



VILEGI.

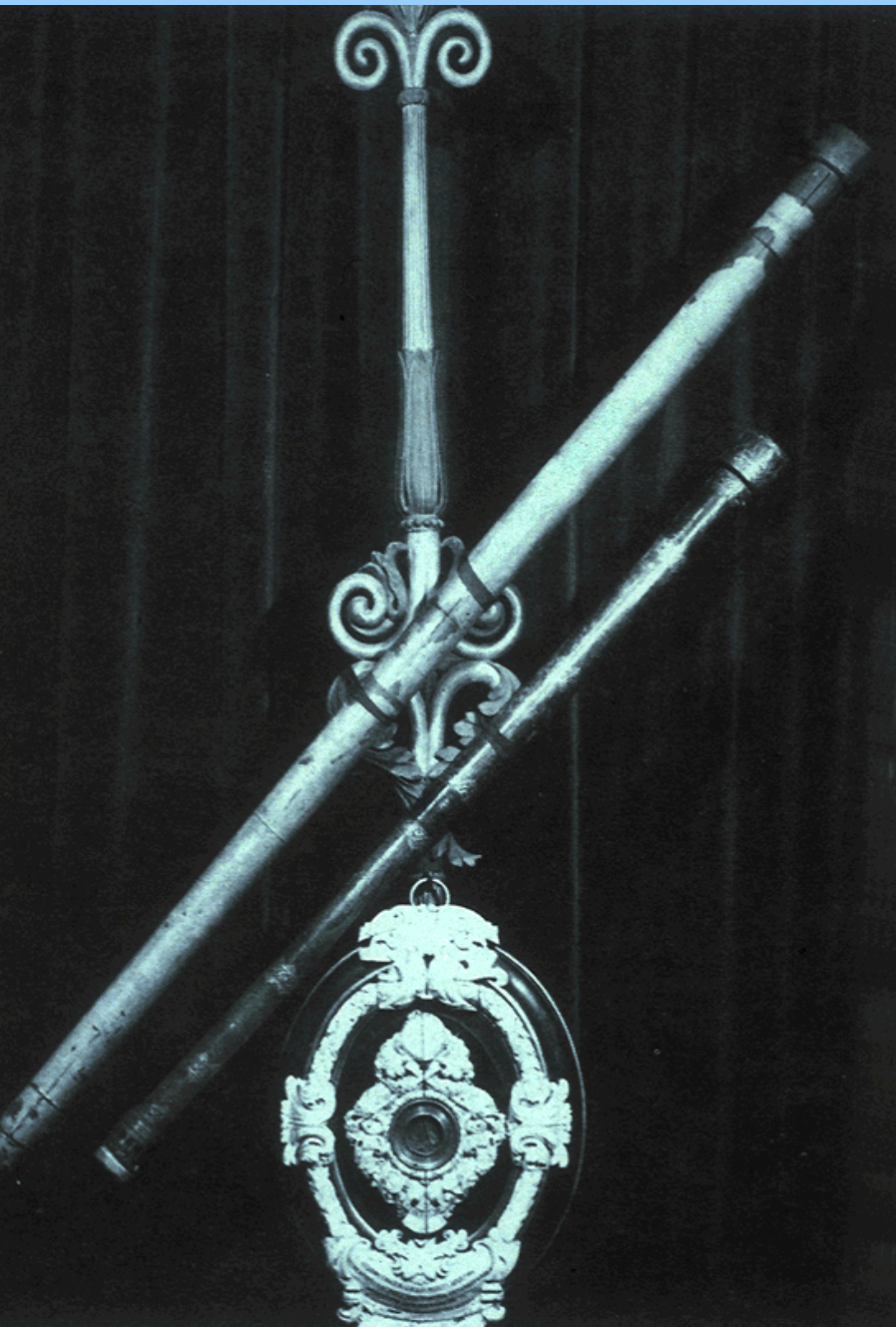
IN FIRENZA, Per Gio:Batista Landini MDCXXII.

CON LICENZA DE' SUPERIORI.



Fisica e astronomia nell'epoca classica



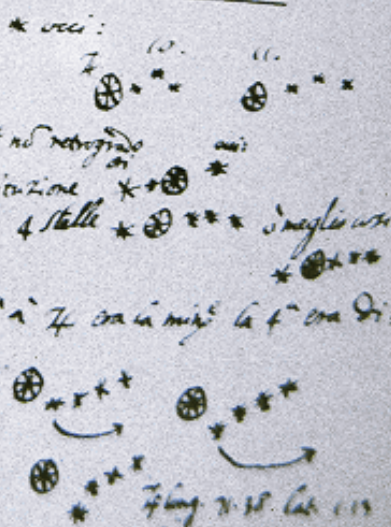


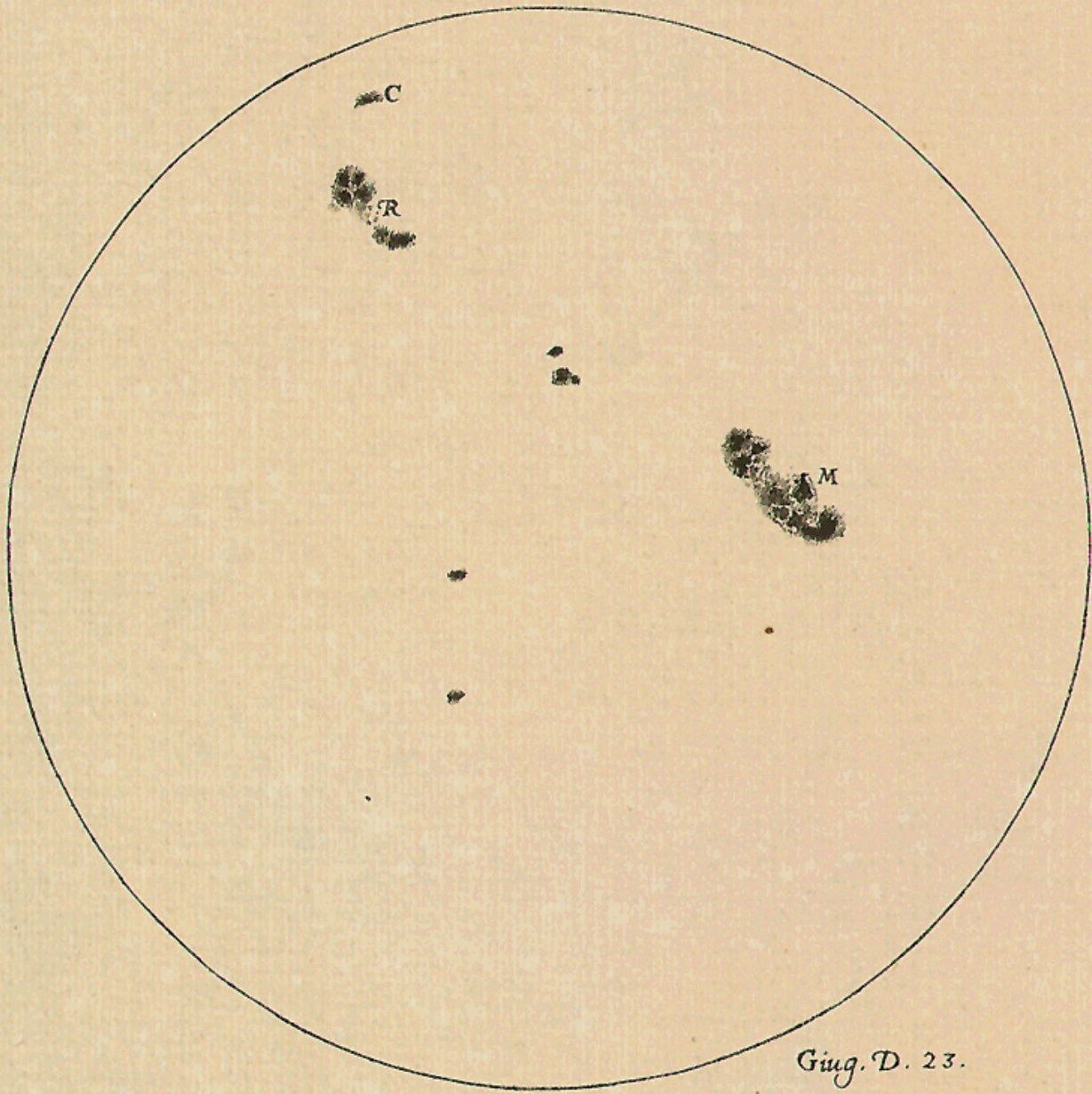
Sex^{mo} Principe.

Galileo Galilei Familiari. Seruo della Ser.^a V.^a inuigila
 do assiduamente, et lo ogni spirito se borese no solo in satisfat
 aliaro che non della littera di Mathematici nelle Scu
 dio di Padova,

Inuere Inuere determinato di presentare al Sex^{mo} Principe
 l'Orchiale et a se essere di giuamento inestimabile se ogni
 negocio et in inea marittima o terreste stimo di tenere qu
 sto nuovo artificio nel maggior secreto et solam a disposizione
 di V.^a Ser.^a L'Orchiale conato dalle piu uolte speculazioni di
 prospettiva ha l'uantaggio di scoprire Legni et Vele dell' inimico
 et aue hore et pu di tempo prima che egli scuopra noi et distinguere
 il numero et la qualita de i Vasselli giudicare la sua forte
 palloirsi alla caccia al combattimento o alla fuga, o pure an
 nella campagna aperta uedere et particularm^{te} distinguere ogni
 posto et preparatione.

Adi 7. di Gennaio
 Gioue si uede u^{ti} * * * * *
 Adi 8 u^{ti} * * * * *
 * * * * * era d'uy diretto et no retrogrado
 Adi 12. si uede in tale costituzione * * * * *
 Il 13. si uede u^{ti} in Gioue 4 Stelle * * * * * in meglio u^{ti}
 Adi 14 è angelo * * * * *
 Il 15 * * * * * la pressi^a a 7^a ora in mig^{li} la 4^a ora di
 stante dalla 3^a il doppio tanto
 Lo spazio delle 3 u^{ti} è tale no con
 maggiore del diametro di 7^a et e
 u^{ti} in linea retta.



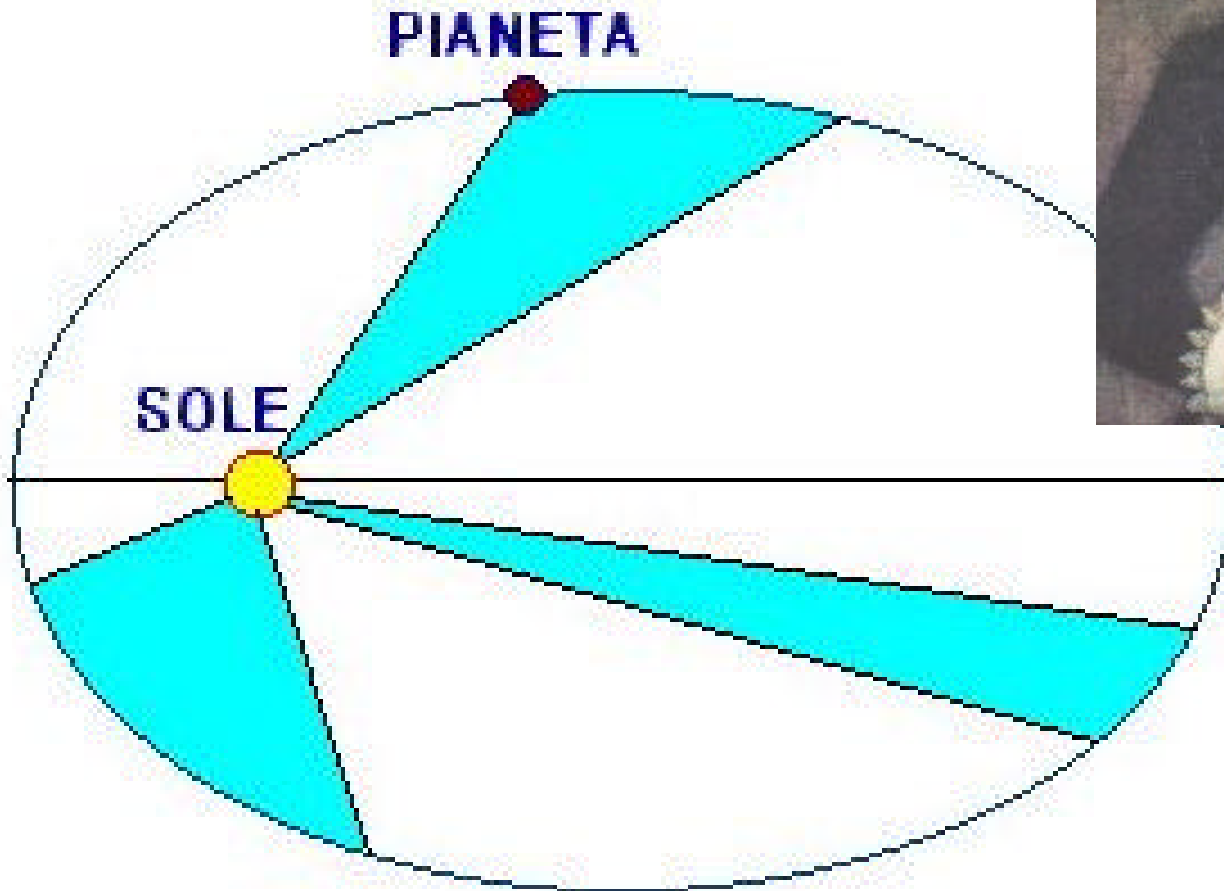


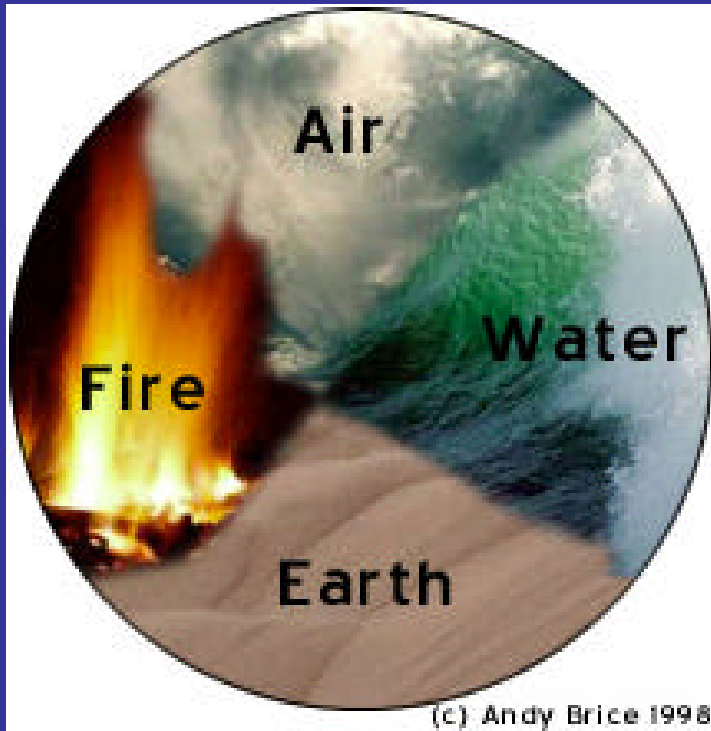
Giug. D. 23.

Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, pubblicato nel febbraio 1632 e sequestrato nel luglio dello stesso anno insieme all'ingiunzione a Galileo stesso di costituirsi davanti al Sant'Uffizio. Dopo aver discusso le differenze tra il moto degli uccelli e quello dei corpi morti, Galileo fa esporre a Salviati la seguente argomentazione (da [Galileo Galilei: Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo](#), Ed. Einaudi, 1970, pag. 227):

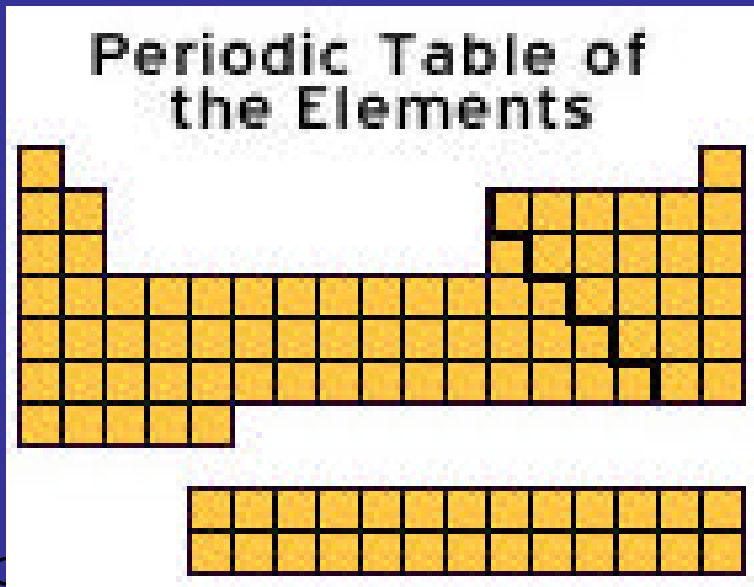
«...mi par tempo e luogo di mostrar il modo di **sperimentarle** tutte facilissimamente. Rinserratevi con qualche amico nella maggior stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: e stando ferma la nave osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno **andar notando indifferentemente per tutti i versi**; le **stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto**; e voi gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze siano eguali; e saltando voi, come si dice, a pie' giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti.

dubbio ci sia che **mentre il vassello sta fermo** non debbano succeder così, **fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e là)** voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma: voi saltando **passerete nel tavolato i medesimi spazii che prima**, né, perché la nave si muova velocissimamente, farete maggior salti verso la poppa che verso la prua, benché, nel tempo che voi state in aria, il tavolato sottopostovi scorra verso la parte contraria al vostro salto; e gettando alcuna cosa al compagno, non con più forza bisognerà tirarla, per arrivarlo, se egli sarà verso la prua e voi verso poppa, che se voi fuste situati per l'opposito; **le goccioline cadranno come prima nel vaso inferiore**, senza caderne pur una verso poppa, benché, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi; i pesci nella lor acqua non con più fatica noteranno verso la precedente che verso la susseguente parte del vaso, ma con pari agevolezza verranno al cibo posto su qualsivoglia luogo dell'orlo del vaso; e finalmente **le farfalle e le mosche continueranno i lor voli indifferentemente verso tutte le parti**, né mai accaderà che si riduchino verso la parete che riguarda la poppa, **quasi che fussero stracche in tener dietro al veloce corso della nave, dalla quale per lungo tempo, trattenendosi per aria, saranno state separate...**»



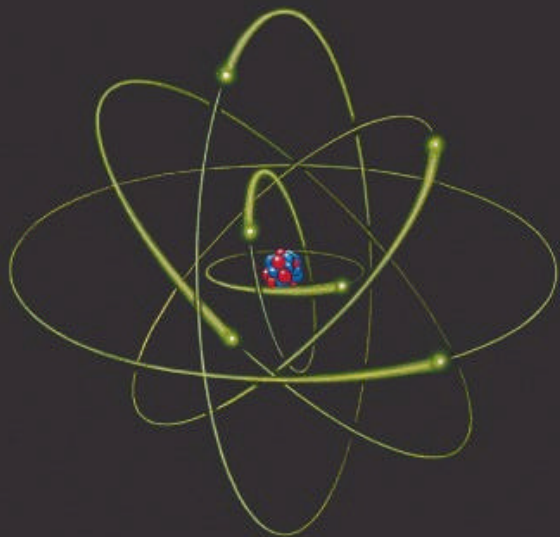


Nell' antichità



Nel XIX secolo

La **prima rivoluzione scientifica**: Copernico, Galileo, Keplero, Cartesio, Newton, Eulero, Boyle, Laplace. La **seconda rivoluzione scientifica** e la nascita della scienza moderna. Teorie, esperimenti e osservazioni. Einstein e la **relatività**. Planck e la **meccanica quantistica**. L'atomo di Bohr e la nascita della **fisica atomica**. La **fisica nucleare**. Radioattività, fissione e fusione nucleare.



- **Particelle elementari**: quark e leptoni (teoria delle stringhe?)
- **Astrofisica**: evoluzione stellare
- **Cosmologia**: Big Bang e Big Rip
- **Radiazione cosmica**
- **Fisica astroparticellare**.

LA NASCITA DELLA FISICA MODERNA

Dalla visione classica ad un nuovo concetto di realta`

FATTI E TEORIE

30 anni che hanno cambiato il mondo:

<u>1896</u> Becquerel	<u>1897</u> Michelson e Morley
<u>1900</u> Planck	<u>1905</u> Einstein
<u>1911</u> Herzsprung e Russel	
<u>1911</u> Rutherford	<u>1912</u> Hess
<u>1913</u> Bohr	<u>1924</u> DeBroglie
<u>1925</u> Compton	<u>1925</u> Pauli
<u>1927</u> Heisenberg	<u>1929</u> Hubble

Calendario dell'evoluzione dell'universo

e l'età reale dell'universo ($13,7 \cdot 10^9$ anni) fosse 1 anno

Big Bang	1 gennaio
Formazione della Galassia	7 febbraio
Formazione del sistema solare	14 agosto
Prime forme di vita sulla Terra	4 settembre
Estinzione dei dinosauri	30 dicembre
Primi ominidi	31 dicembre ore 22:00:00
Primi esseri umani	23:43:00
Antichità (le piramidi)	23:59:49
Nascita dell'era moderna (Galileo)	23:59:58
Nascita della fisica moderna	24:00:00

SULLA NATURA DELLA LUCE

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

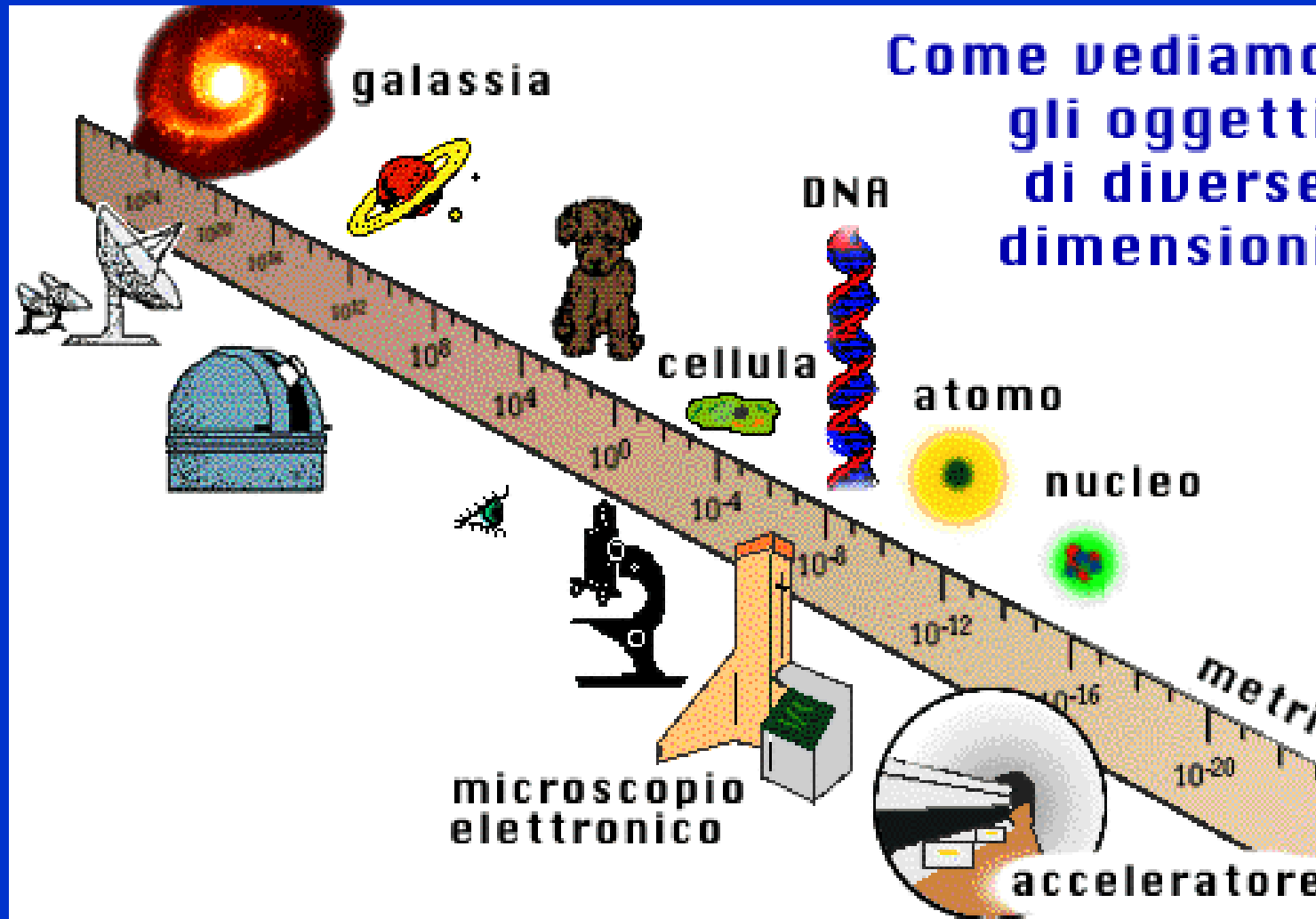
Secondo **Galeno** (II secolo d.c.), l'occhio proietta uno “spirito visuale” per mezzo del quale il mondo esterno viene percepito

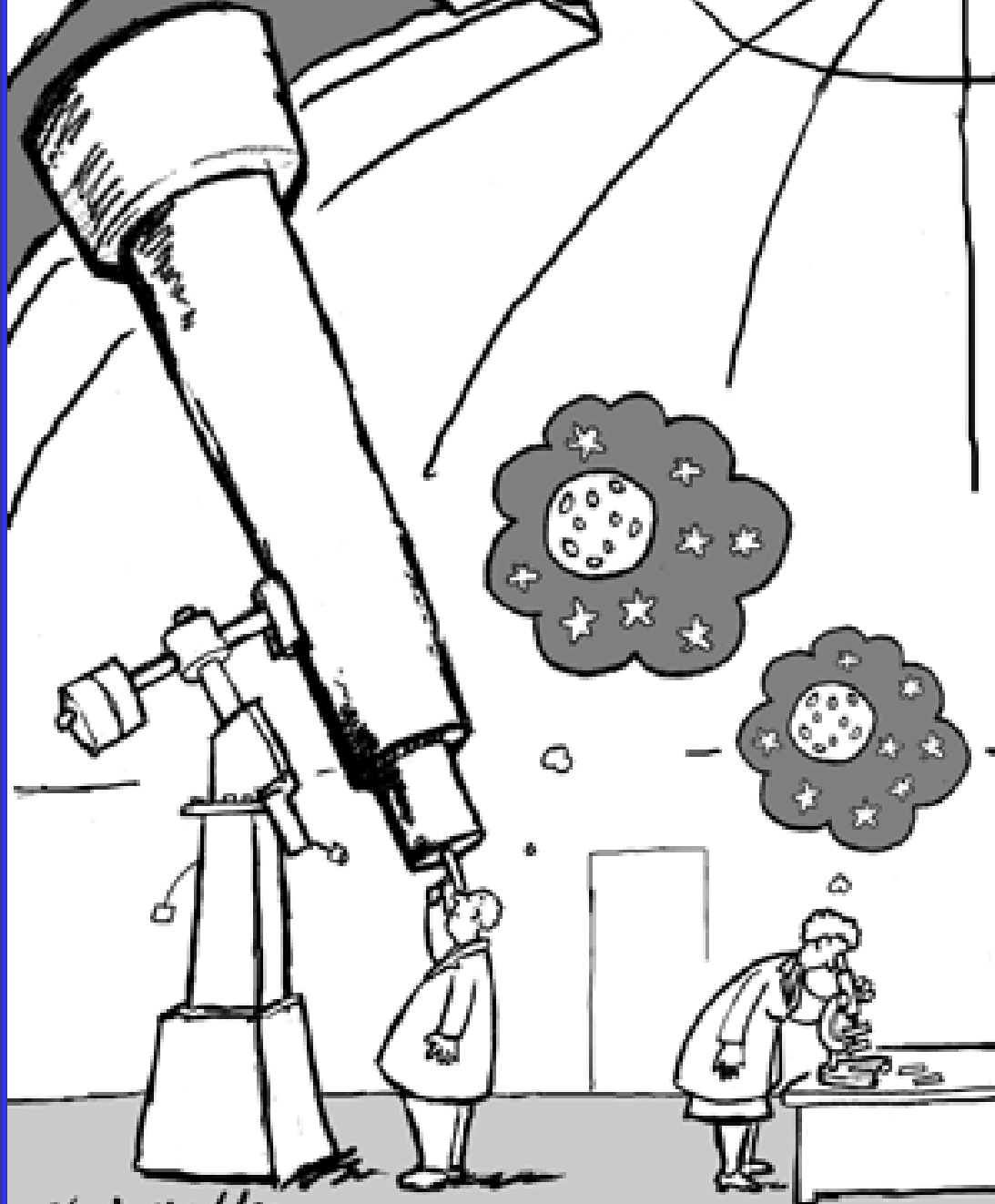
Keplero e **Cartesio** agli inizi del '600 svilupparono la conoscenza della rifrazione della luce

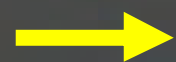
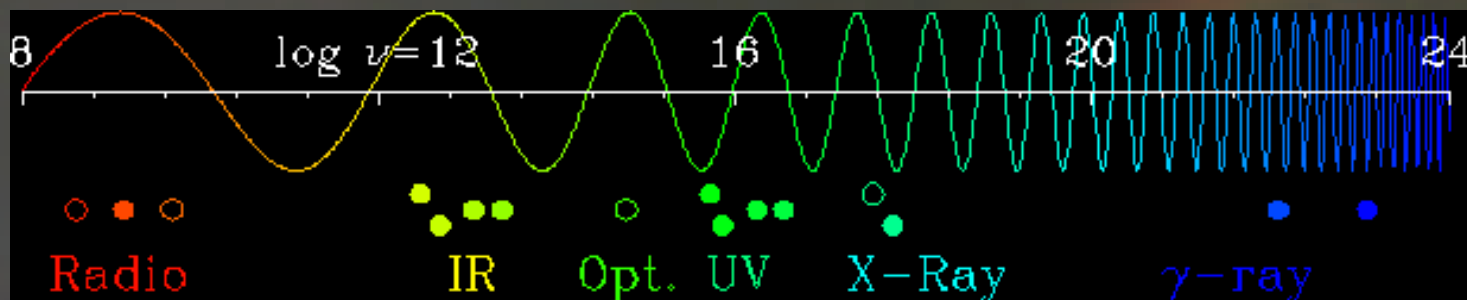
Newton sviluppò una teoria corpuscolare della radiazione, considerando cioè la luce come formata di particelle

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

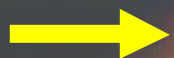
La fisica classica studia fenomeni su **scala umana**. La fisica moderna studia anche **l'infinitamente piccolo e l'infinitamente grande**.





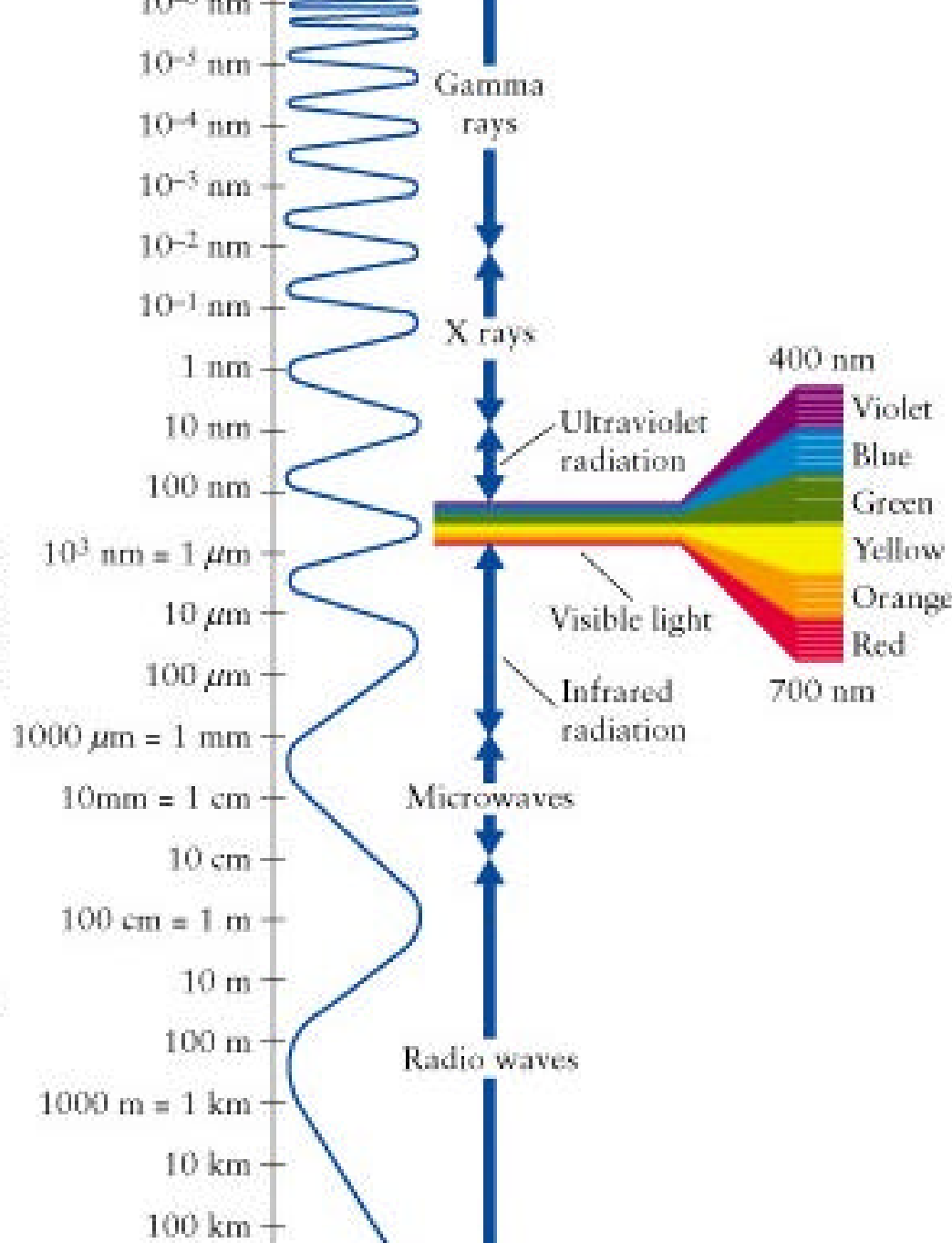


56 Ottave (7 „Piani a coda“)



1 Ottava





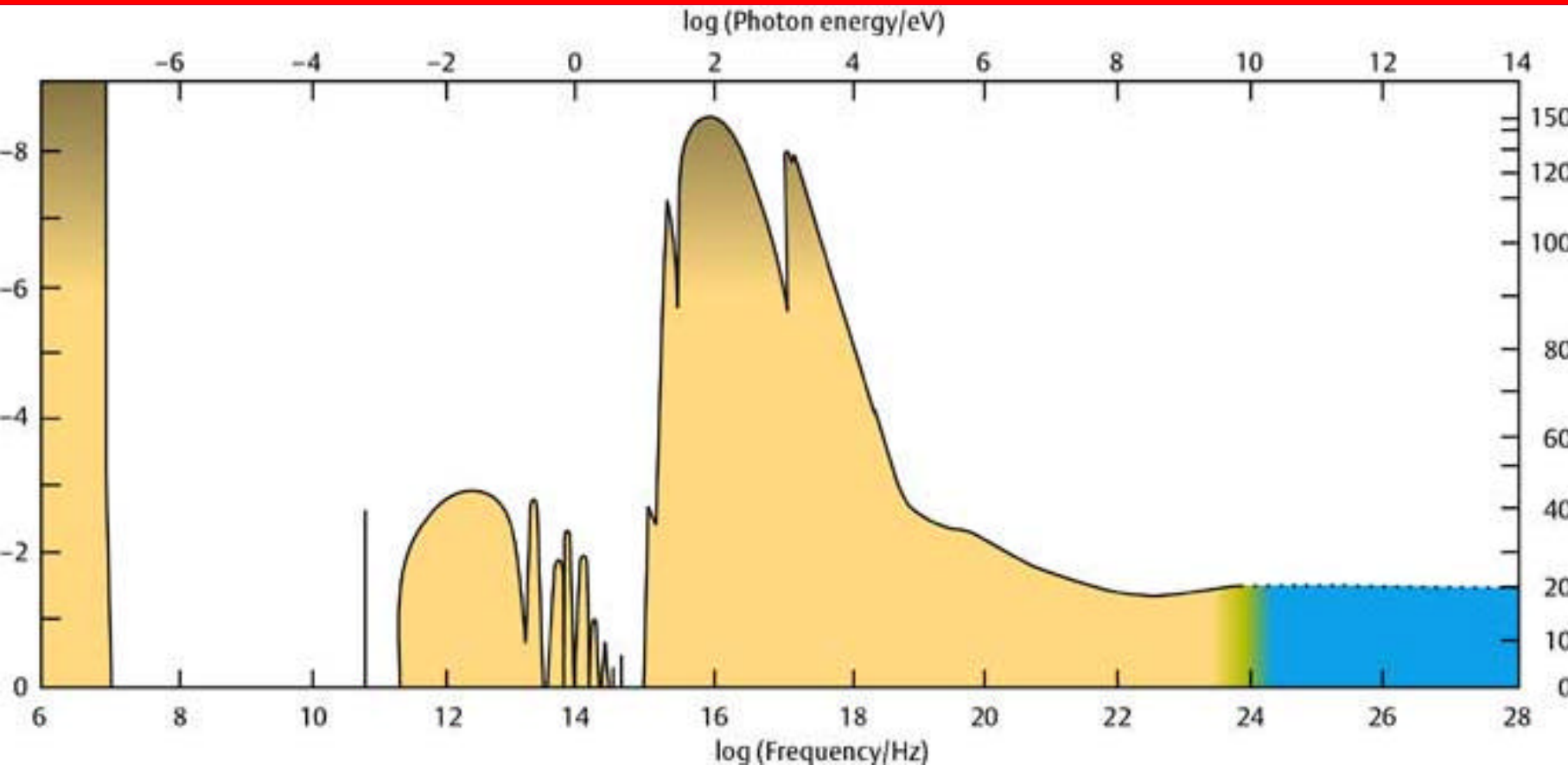
La luce visibile è una parte molto piccola della radiazione elettromagnetica

La radiazione e.m. viaggia alla velocità della luce, nel vuoto

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

in un mezzo $v = c/n$

Trasparenza dell'atmosfera terrestre alla radiazione elettromagnetica





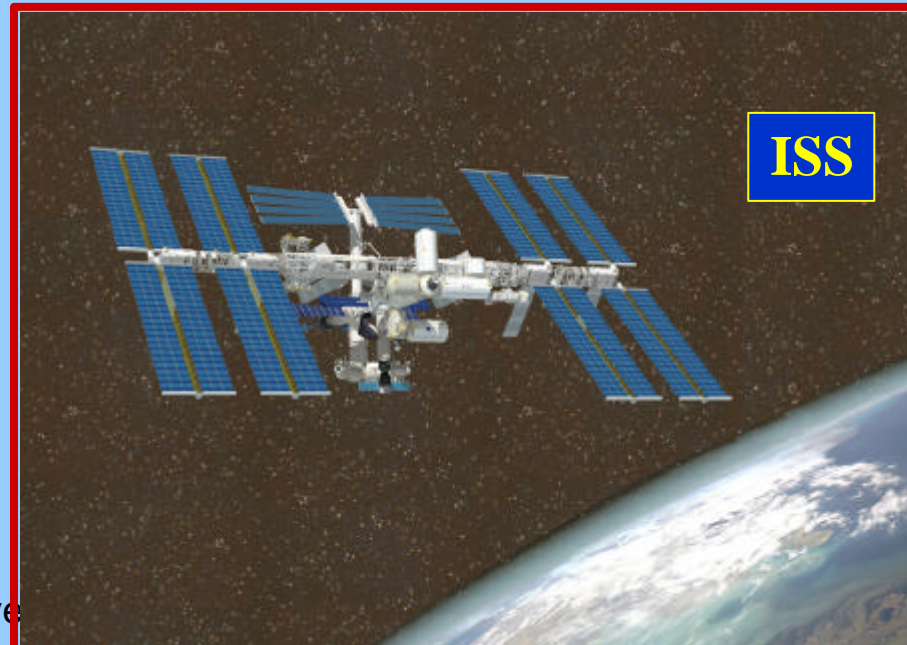
TNG



VLA



Beppo SAX



ISS

Osservazioni a diverse lunghezze d'onda rivelano dettagli invisibili in ottico

UV



a

IR

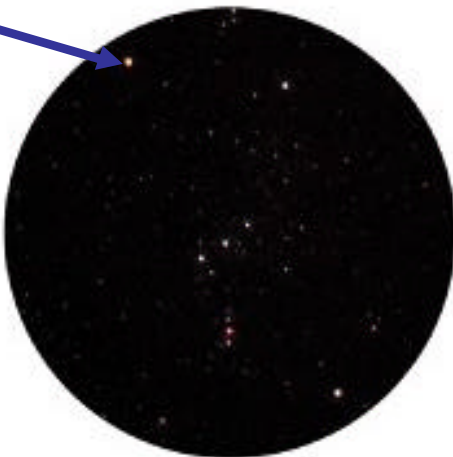


b

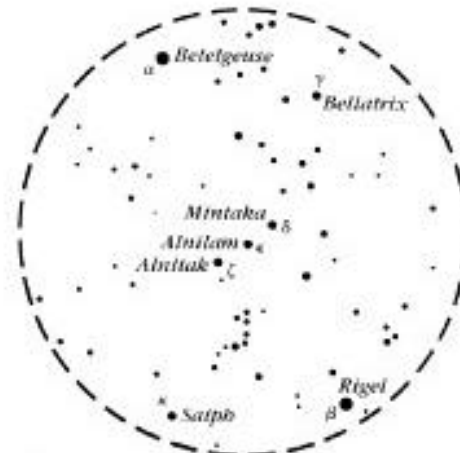
Betelgeuse



Visibile



c



d

Mappa della regione di Orione

Lo spettro visibile varia da ~ 400 a ~ 800 nm, ossia di un fattore 2. L'intero spettro varia invece di ~ 21 ordini di grandezza, dalle dimensioni di un nucleo a oltre 10 km.

Le energie ($E = h\nu = hc/\lambda$) tipiche dei valori estremi dello spettro elettromagnetico sono:

$$\mathbf{E \sim 10^{-5} \text{ J} \sim 10^{14} \text{ eV per raggi gamma}}$$

$$\mathbf{E \sim 10^{-26} \text{ J} \sim 10^{-7} \text{ eV per onde radio}}$$

essendo $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ Js e $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}$ J.

Se in equilibrio termico, a queste energie corrispondono temperature:

$$\mathbf{T \sim E/k \sim 10^{-3} \div 10^{18} \text{ }^\circ\text{K}}$$

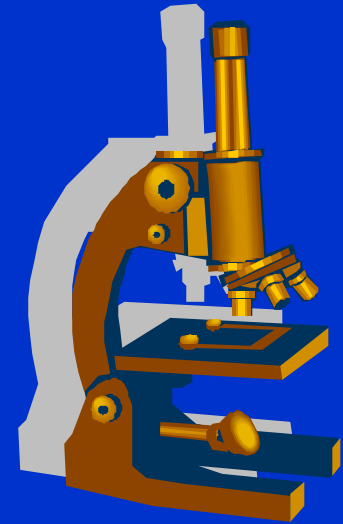
essendo $k = 1.4 \cdot 10^{-23}$ J/ $^\circ\text{K} \sim 10^{-4}$ eV/ $^\circ\text{K}$.

RADIOATTIVITA` NATURALE

Nel **1815 W.Prout** suggerì l'esistenza di una relazione tra gli elementi chimici.

Nel **1864 J.Newlands** osservò che le proprietà chimiche si ripetevano ogni otto elementi.

Nel **1869 D.Mendeleev e L.Meyer** formularono la tabella degli elementi chimici (quelli noti nel 1895 erano 65, ora sono 118).



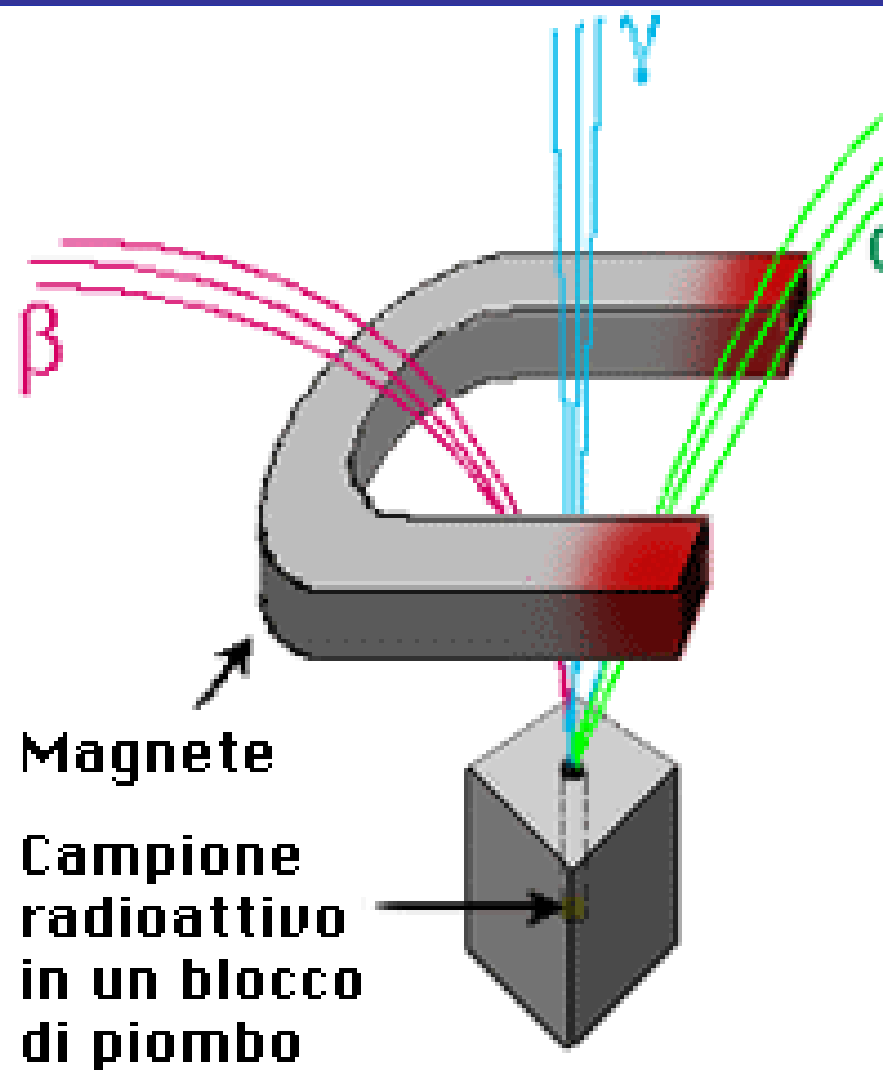
La radioattività`

I decadimenti radioattivi:

a sono nuclei di He ($Z=+2$)

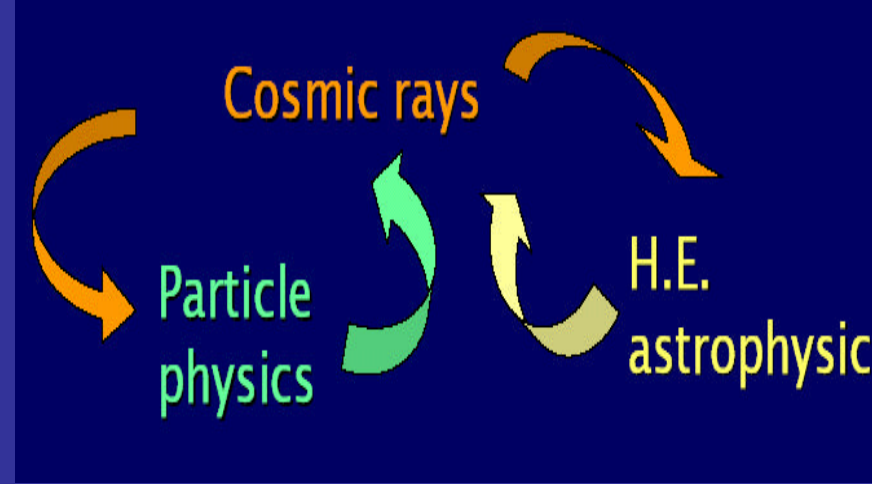
b sono elettroni ($Z=-1$)

g sono fotoni ($Z=0$)





Victor Hess after his 1912 balloon flight, during which he discovered cosmic rays from space. © National Geographic.

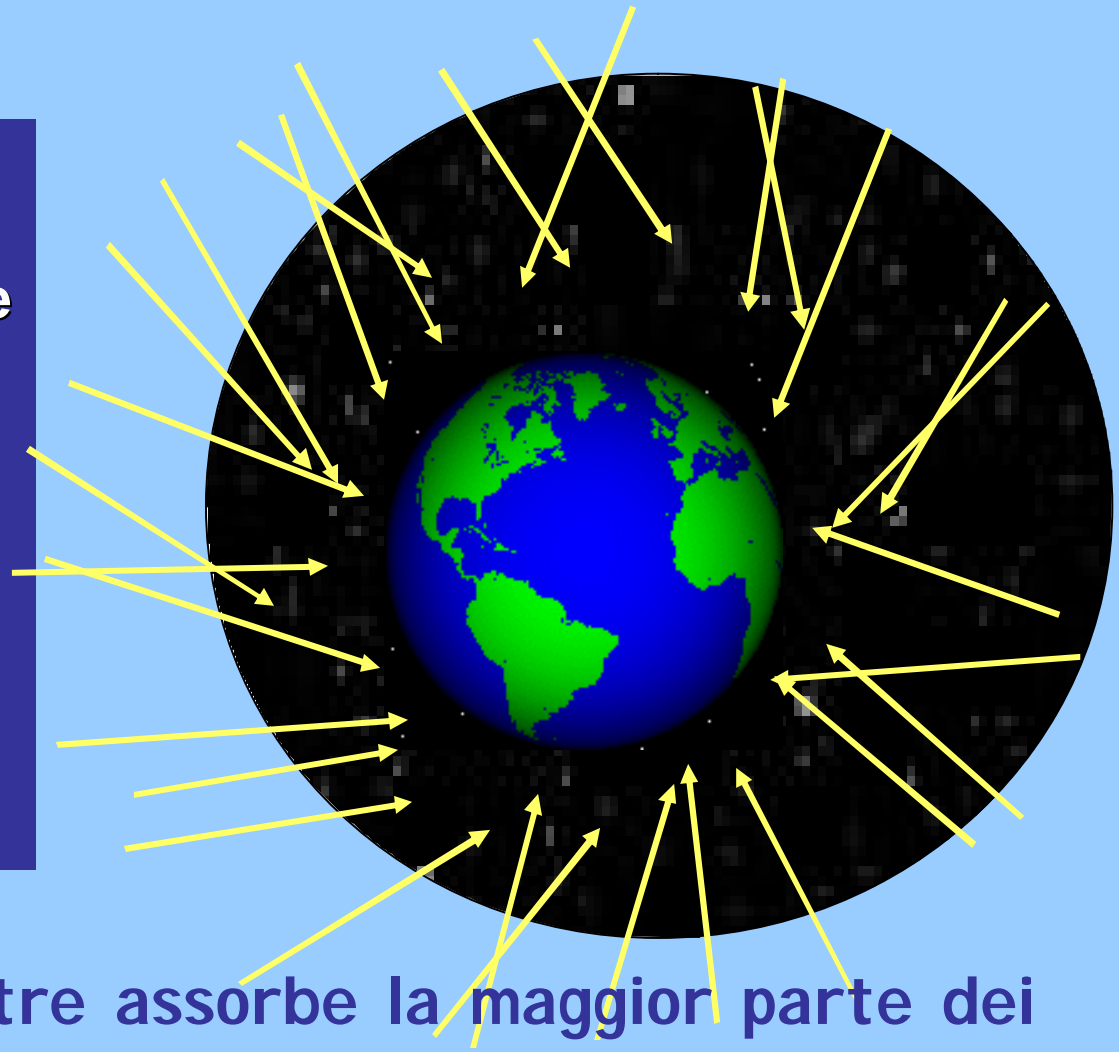


Con lo studio dei raggi cosmici nasce la fisica delle particelle elementari

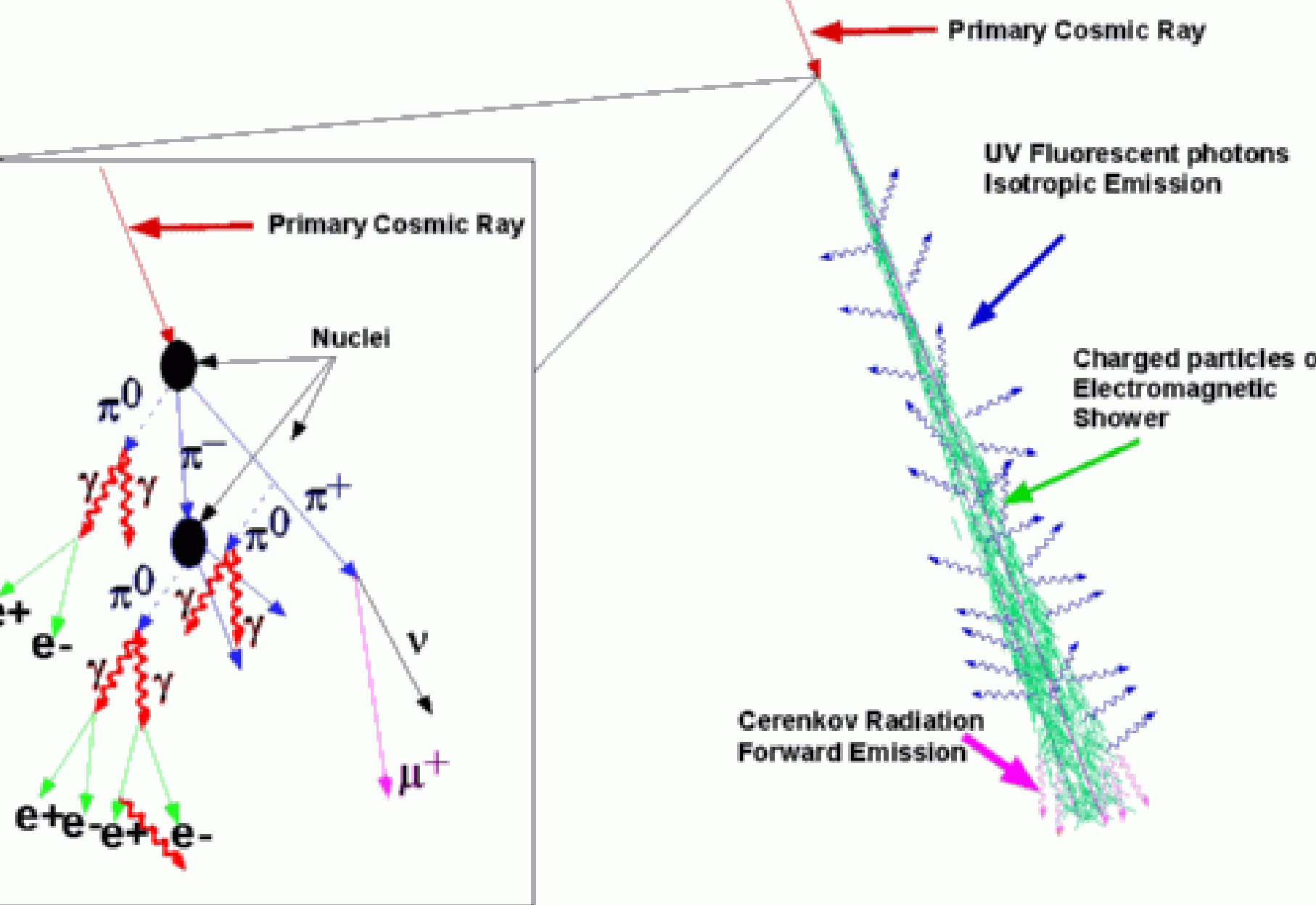
Cosa sono i raggi cosmici (CR)

raggi cosmici sono particelle subatomiche cariche molto energetiche che bombardano continuamente la Terra.

Il **spettro energetico** inizia da circa 10^9 eV e sembra non avere un limite superiore.



L'atmosfera terrestre assorbe la maggior parte dei raggi cosmici.



... le particelle elementari ...

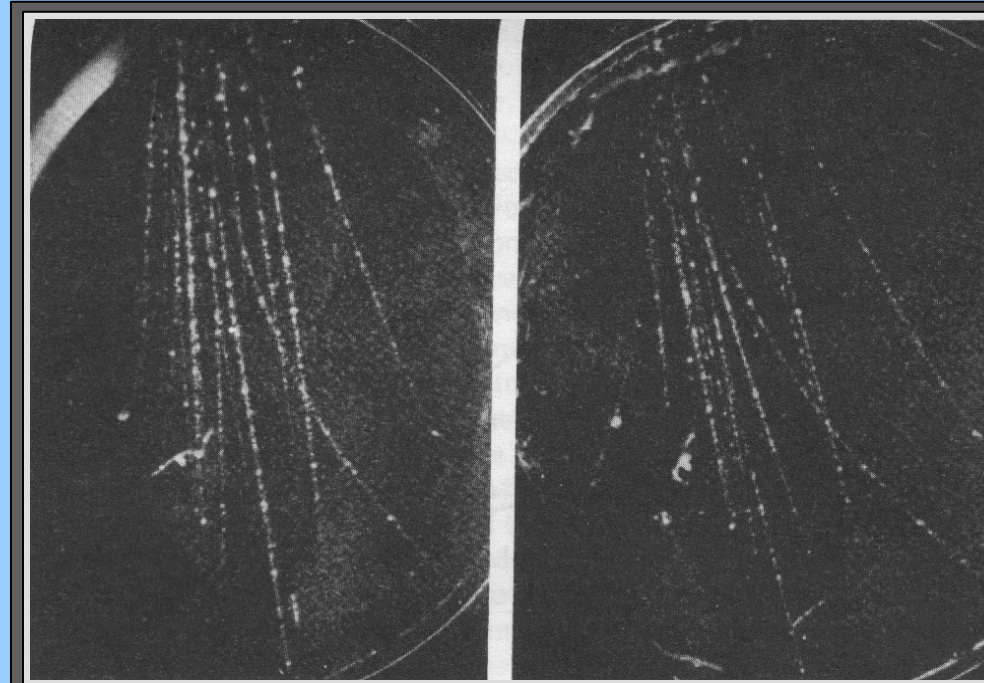
... continuano le osservazioni in laboratorio (camera a nebbia) e ...

1927 Dimitry Skobelzyn
fotografa le prime tracce da
particelle di raggi cosmici

1932 Carl Anderson scopre
il positrone

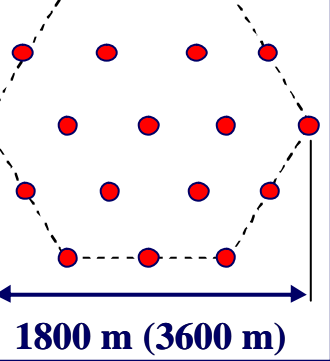
1933 Patrick Blackett e
Giuseppe Occhialini
fotografano la coppia
positrone-elettrone

1937 Seth Neddermeyer e
Carl Anderson scoprono il
muone



*Fotografia stereoscopica di uno sciame
(P. Blackett & G. Occhialini, 1933)*

... prende vita la scienza della fisica delle particelle elementari ...



1957-1963 Volcano Ranch, New Mexico, array esagonale, 19 scintillatori plastici



1959 John Linsley e Livio Scarsi rilevano un raggio cosmico primario di energia $E_0 = 6 \times 10^{19}$ eV. Lo sciame secondario contiene $3 \cdot 10^{10}$ particelle

1962 Il diametro dell'array viene portato a 3.6 km e Linsley rileva il primo RC di energia $E_0 = 10^{20}$ eV. Lo sciame secondario contiene 50 miliardi di particelle (10^{20} eV è un'energia sufficiente a sollevare una massa di 1.5 kg ad un'altezza di un metro)

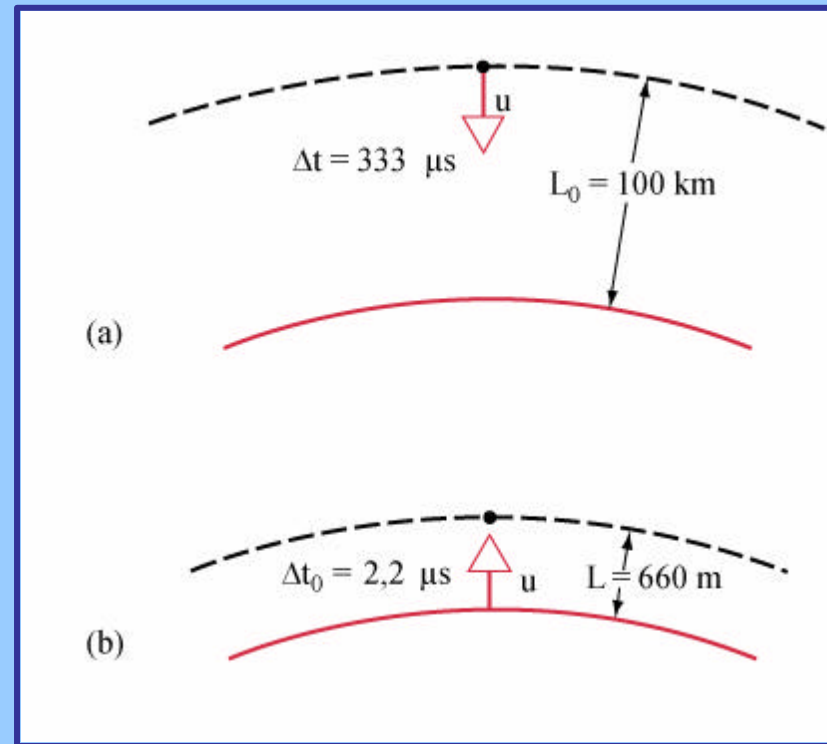
Solo i muoni e i neutrini riescono a penetrare sotto grandi spessori di roccia.



ha dimostrato la validita' della relativita' speciale. Secondo la meccanica classica queste particelle (avendo $v = 0.99 c$, $\gamma = 7.1$, $t_0 = 2.2 \mu\text{s}$) dovrebbero percorrere la distanza

$$d = v t_0 = (0.99)(2.998 \cdot 10^8)(2.2 \cdot 10^{-6}) \sim 660 \text{ m}$$

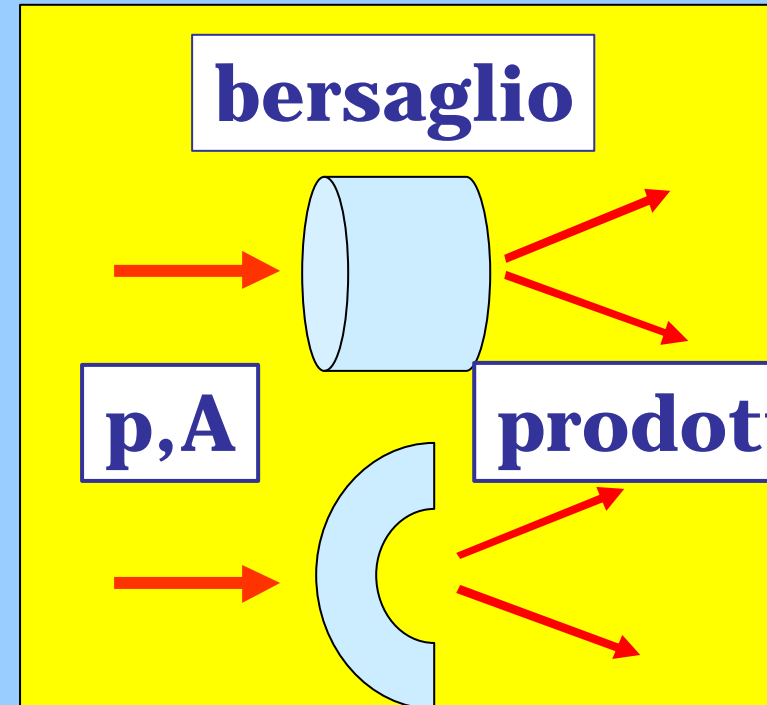
Secondo la meccanica relativistica essi devono percorrere la distanza $\gamma t_0 = 7.1 \cdot 660 \text{ m} = 4.7 \text{ km}$ come se la loro vita media fosse $\gamma t_0 = 15.6 \mu\text{s}$. I μ si osservano infatti anche nei laboratori sotterranei.



LA FISICA ASTROPARTICELLARE

La fisica nucleare e delle particelle elementari è nata con lo studio dei **raggi cosmici** e si è sviluppata con gli acceleratori di particelle.

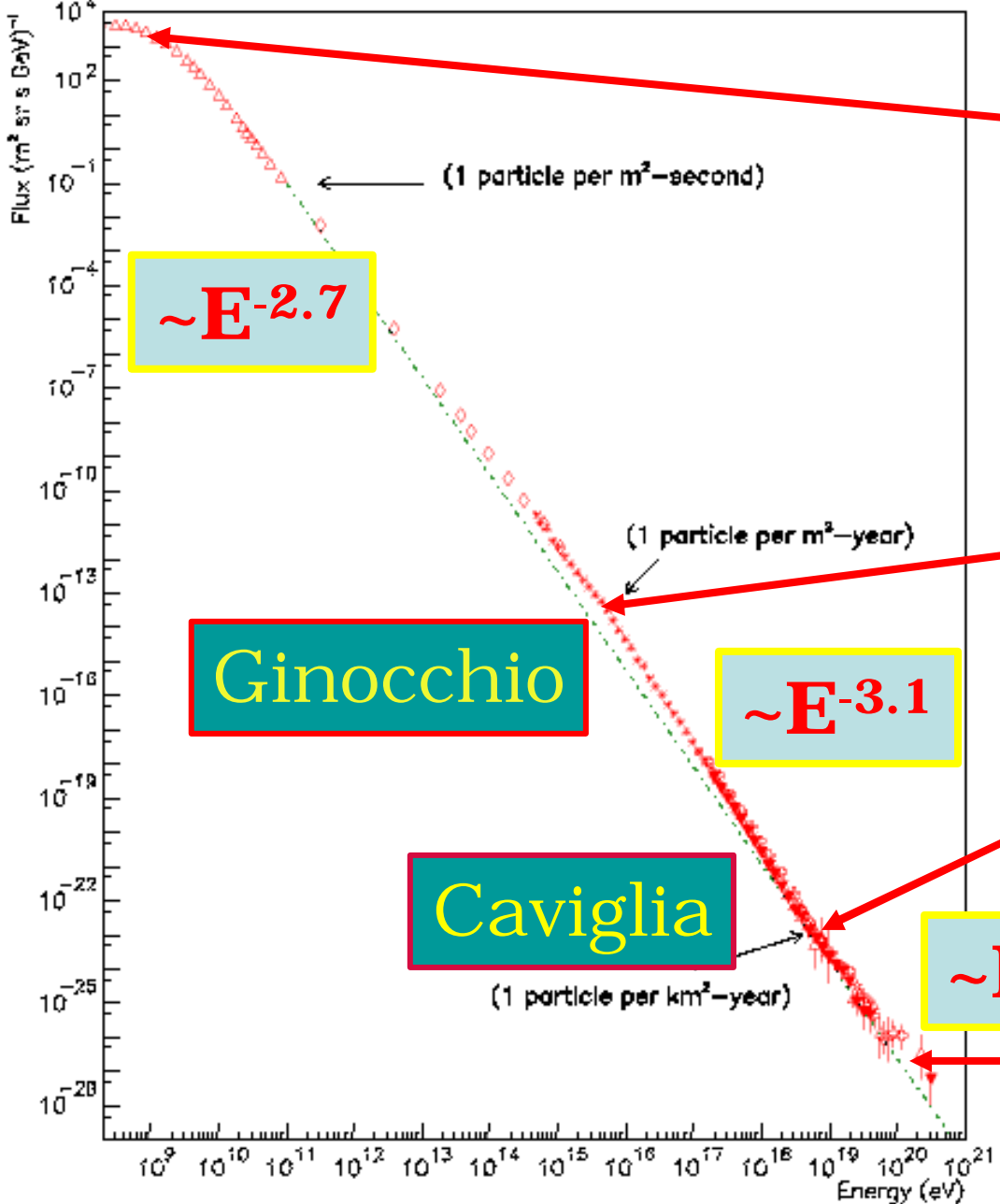
Raggiunte le energie più elevate, si sta tornando allo studio dei raggi cosmici e dei fenomeni naturali, in particolare alla cosmologia, per studiare processi la cui energia non può essere riprodotta in laboratorio.



Lo studio dei raggi cosmici fornisce dati sperimentali e permette di formulare modelli sulla struttura e evoluzione dell'universo.

Negli urti di **raggi cosmici primari** con l'atmosfera terrestre si producono particelle secondarie di alta energia che decadono o interagiscono con i nuclei atmosferici e consentono di compiere ricerche altrimenti impossibili alle energie di laboratorio.

Le **ricerche astrofisiche** si basano su importanti risultati di fisica atomica (per es. **atmosfere stellari**), di fisica nucleare (per es. **interni stellari**) o di fisica delle particelle elementari (per es. **astrofisica neutrinica**).



$\sim 10^2 / \text{m}^2 / \text{secondo}$

$\sim E^{-2.7}$

$\sim 1 / \text{m}^2 / \text{anno}$

Ginocchio

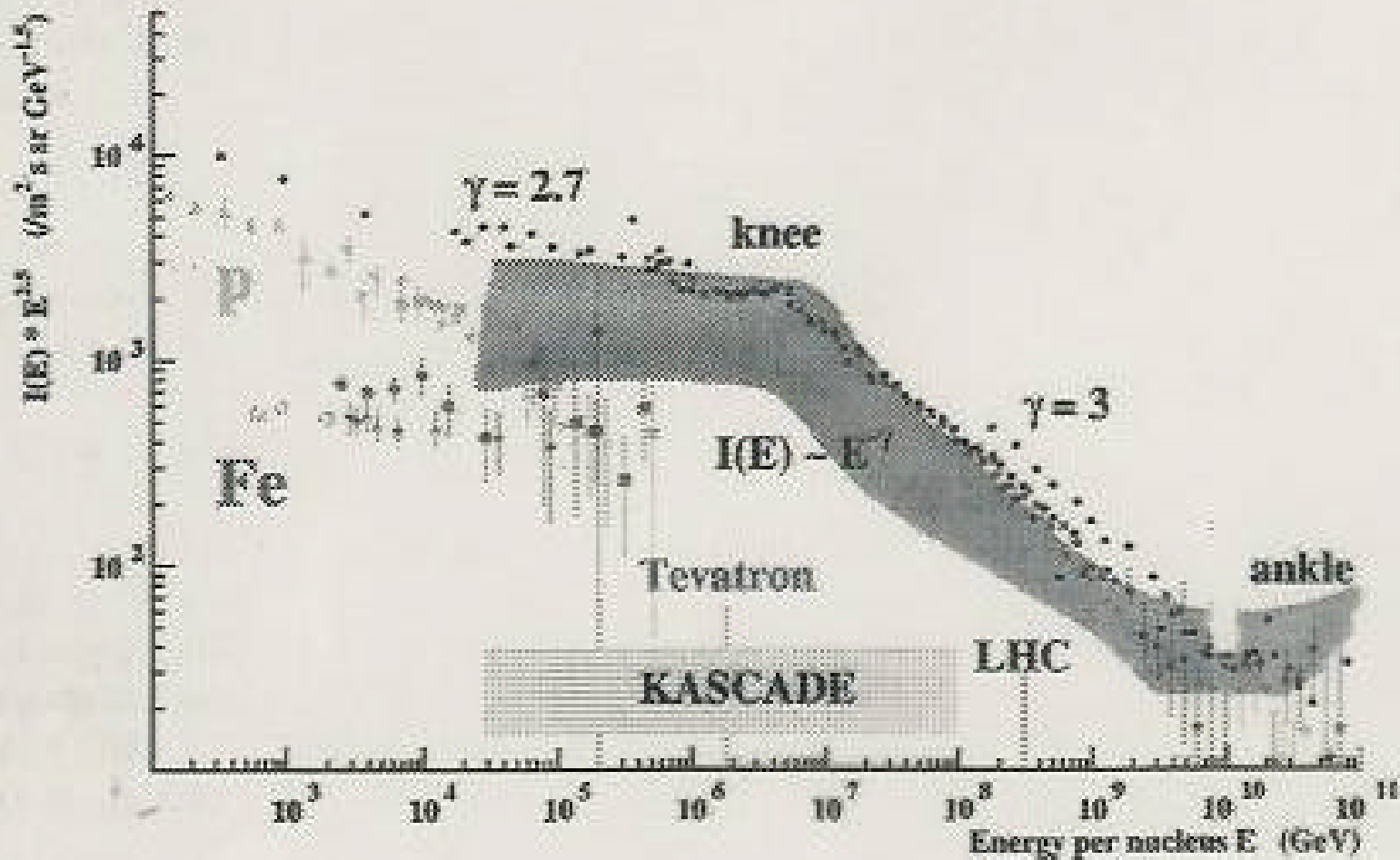
$\sim E^{-3.1}$

$\sim 1 / \text{km}^2 / \text{anno}$

Caviglia

$\sim E^{-2.7}$

$\sim 1 / \text{km}^2 / \text{secolo}$



Se i RC fossero termici le temperature sarebbero:

ν (Hz)	$\sim 10^{10}$ radio	$\sim 10^{14}$ ottico	$\sim 10^{20}$ raggi X	$\sim 10^{25}$ raggi γ	R.C.
E (eV)	$\sim 10^{-4}$	~ 5	10^5	10^{10}	10^{21}
T ($^{\circ}$ K)	1	10^4	10^{10}	10^{15}	10^{26}

Nei RC si possono avere particelle (anche γ) di energia talmente elevata da richiedere origine cosmologica.

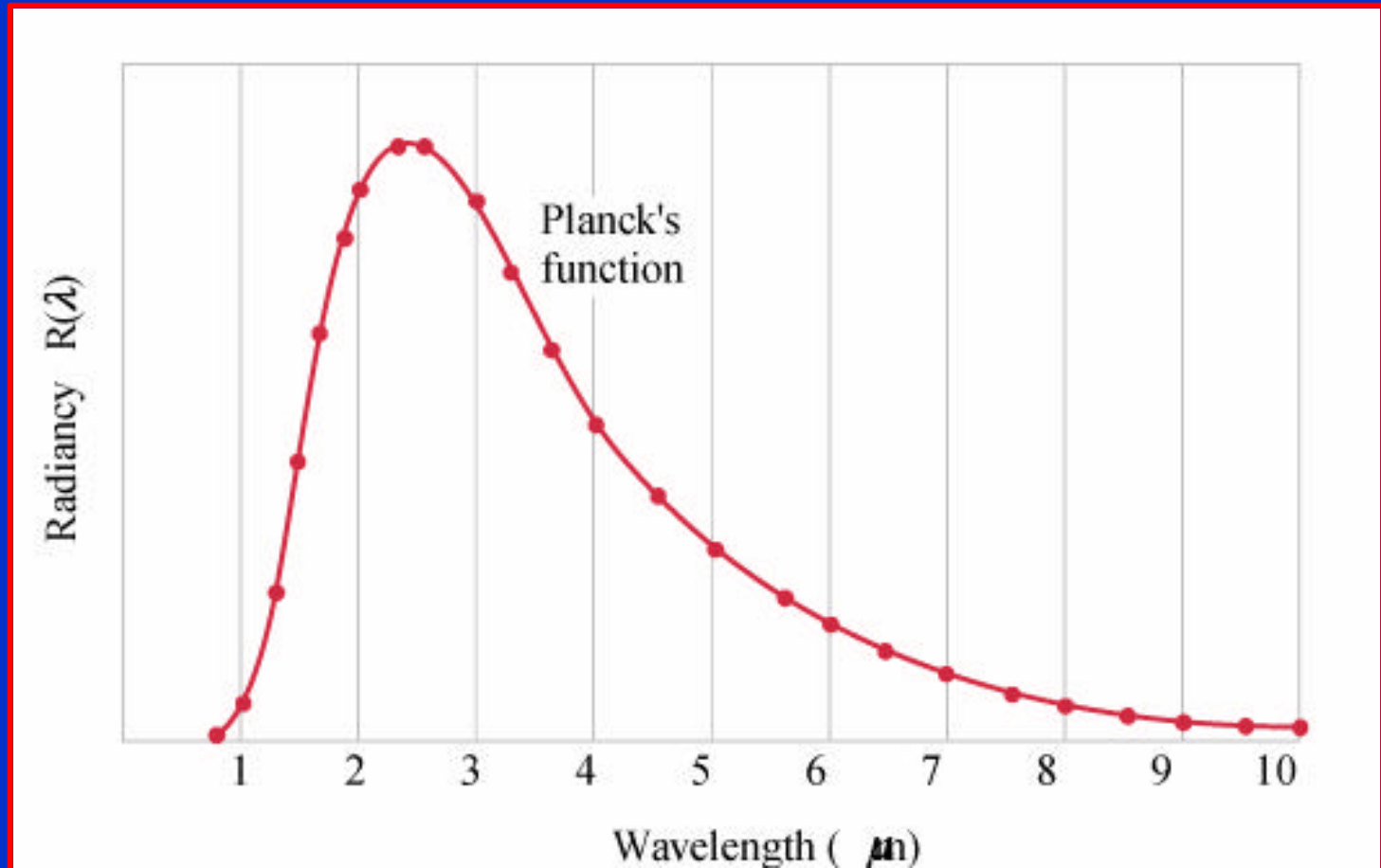
$$p + p \rightarrow p^{\pm}(K^{\pm}) + X$$

$$\downarrow \rightarrow m^{\pm} + n_m(\bar{n}_m)$$

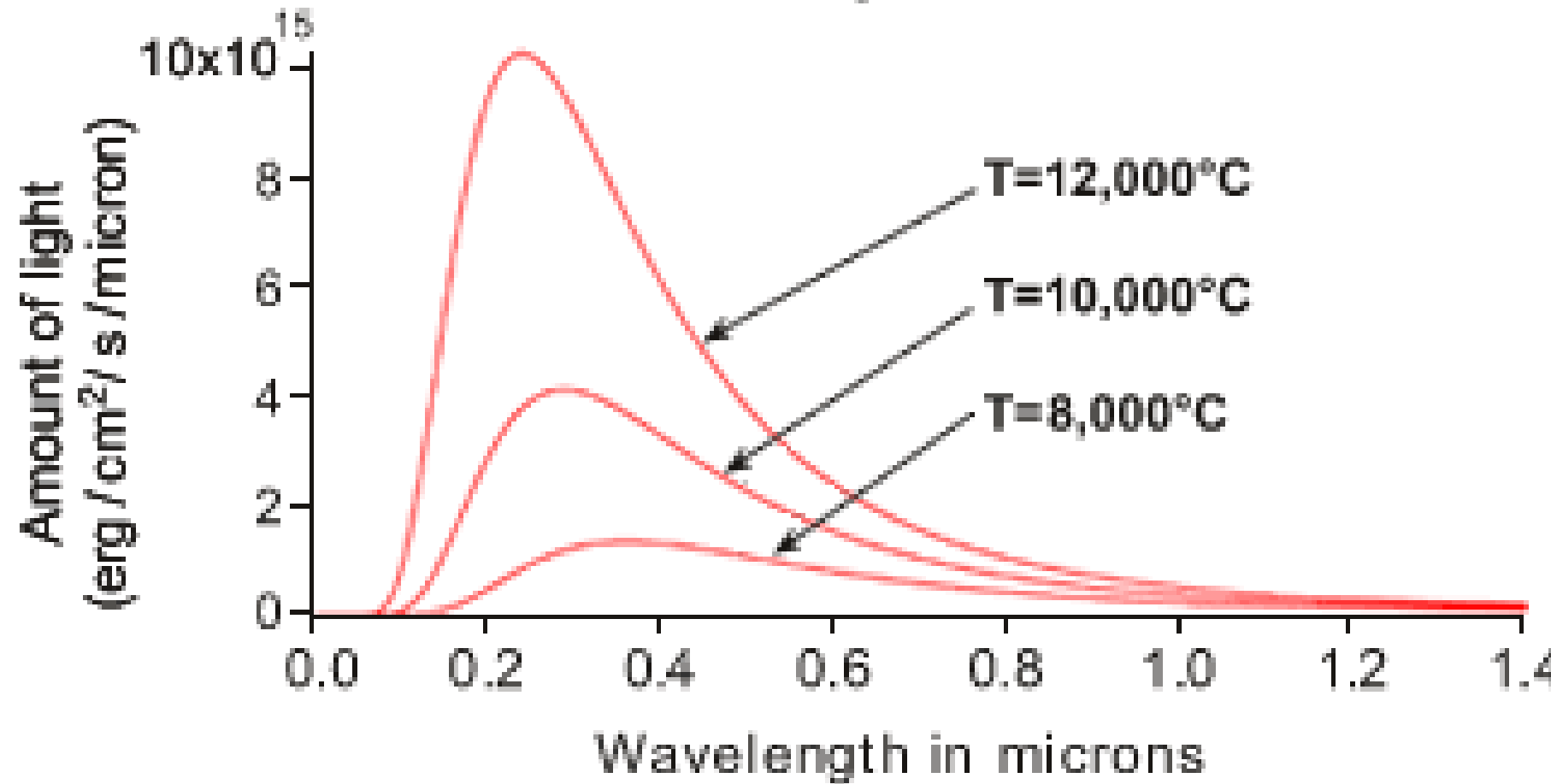
$$p + p \rightarrow p^0 \rightarrow g + g$$

$$\downarrow \rightarrow e^{\pm} + \bar{n}_m(n_m) + n_e(\bar{n}_e)$$

Nel 1900 Planck propose che **la radiazione fosse quantizzata**, ossia composta di **quanti di energia multipli di un valore minimo e_0** . Le leggi di **Wien** e di **Stefan** sono due casi particolari della legge di Planck



Blackbody curves



Sorgenti termiche

Distribuzione della radiazione emessa da un corpo a temperatura T

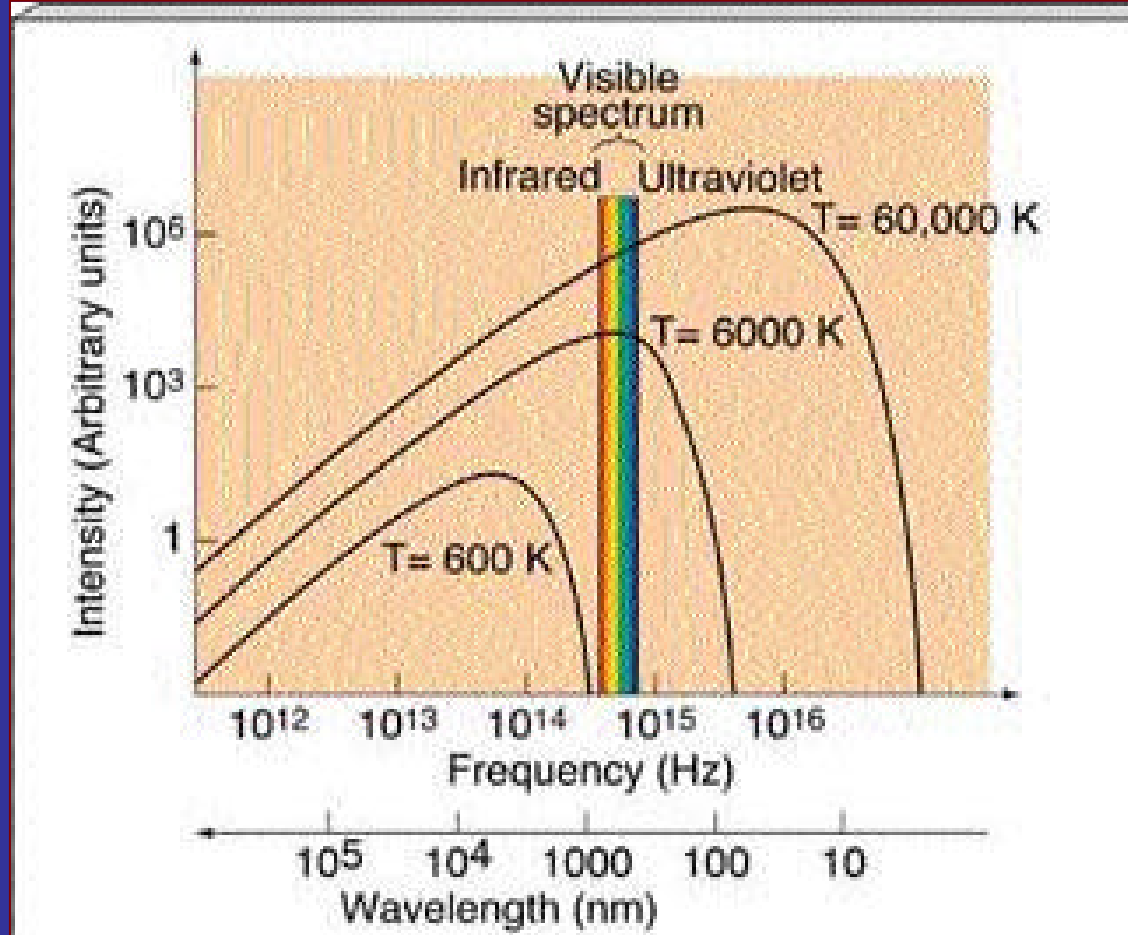
Curva di Planck per l'intensità del corpo nero

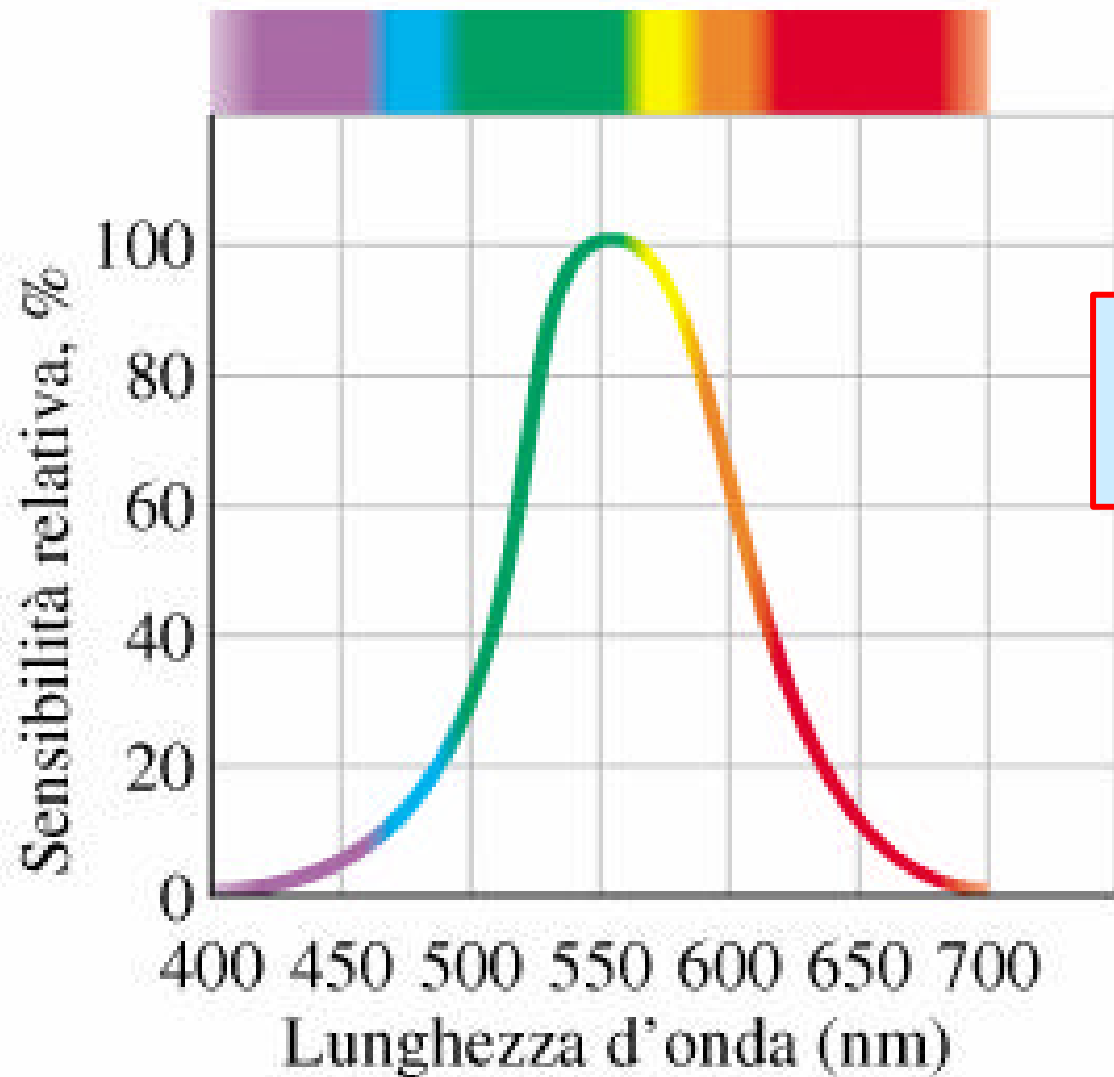
Legge di Wien

$$I_{\max} T = \text{costante}$$

Legge di Stefan

$$I_{\text{tot}} = \sigma T^4$$





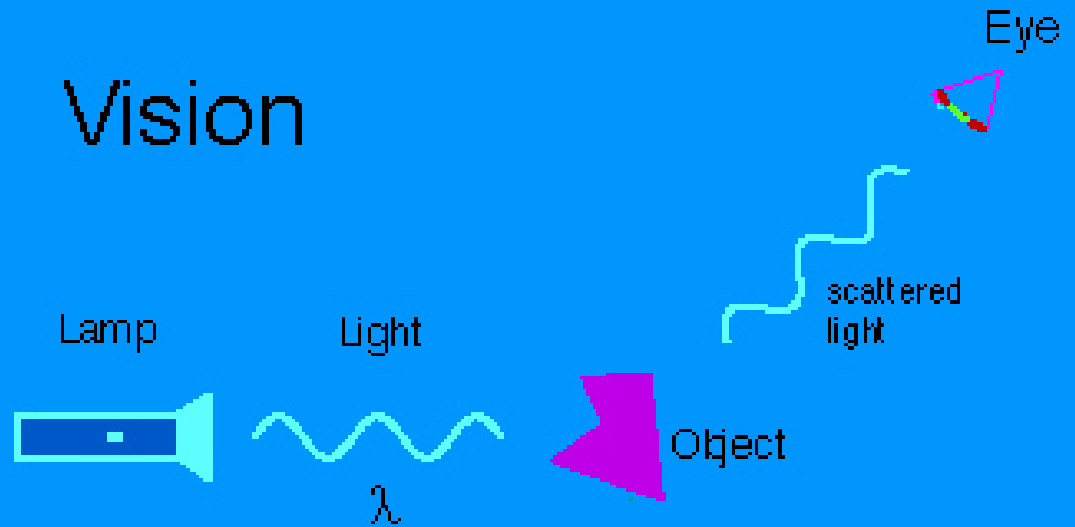
Sensibilità
dell'occhio umano

$$E = h\nu$$

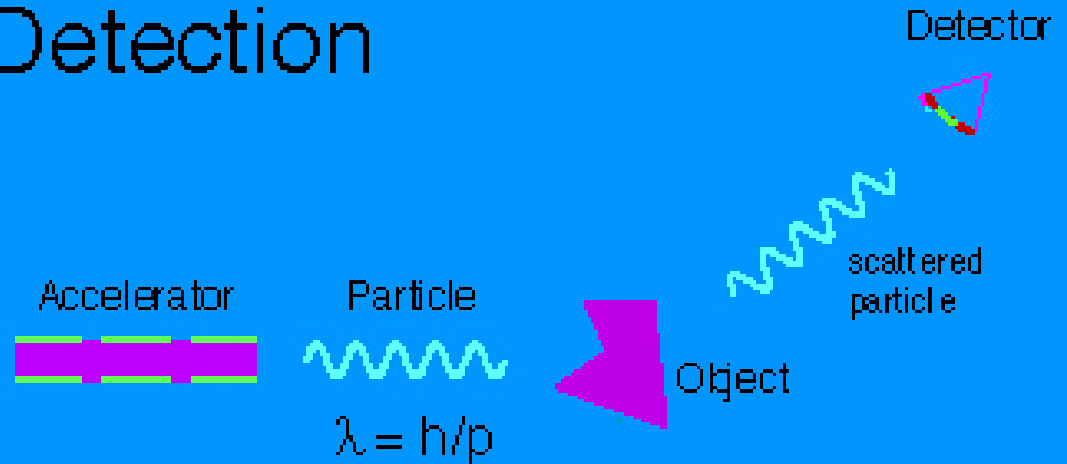
$$l\nu = c$$

$$E = \frac{hc}{l}$$

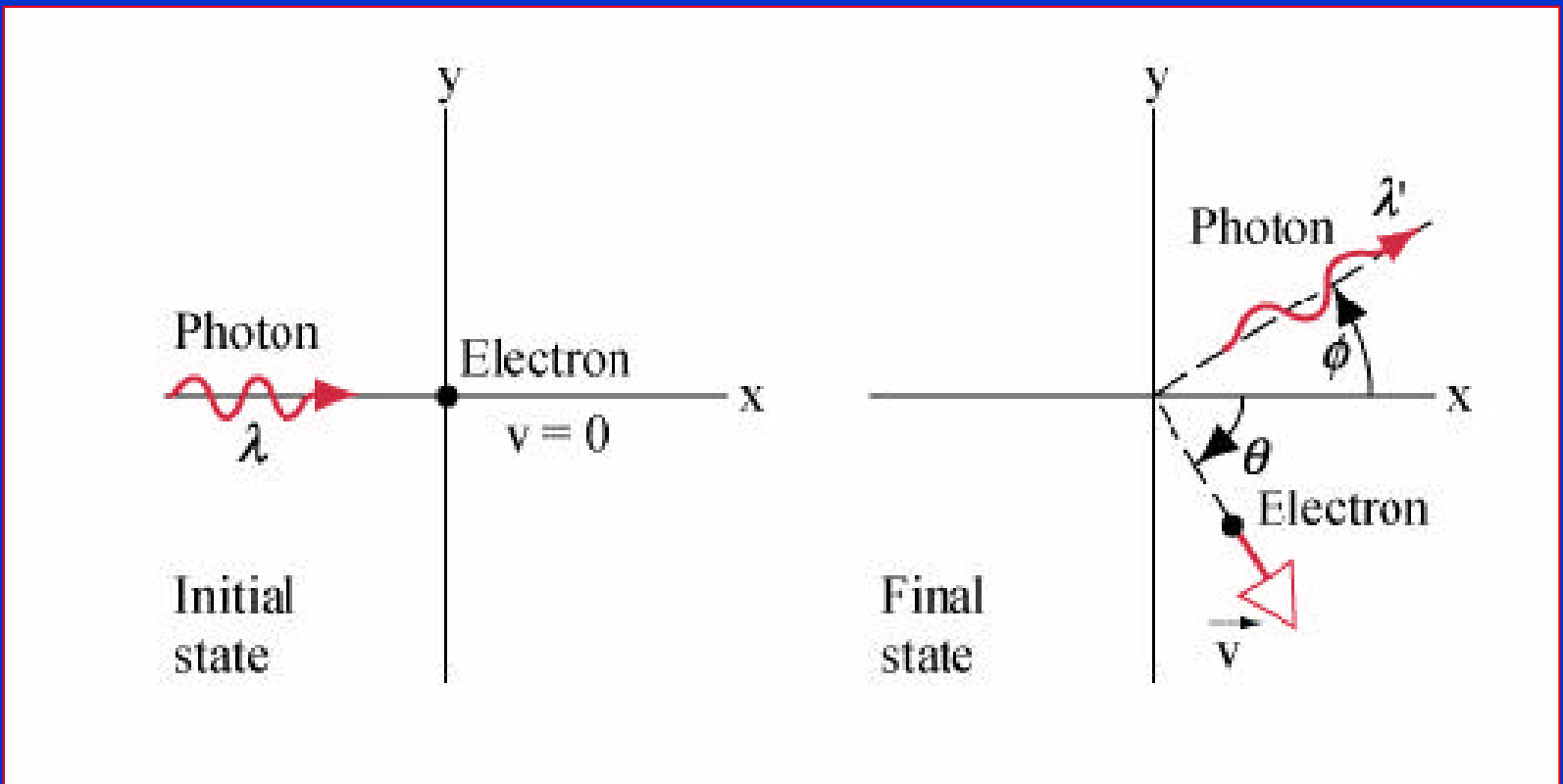
Vision



Detection



Per spiegare l'effetto Compton, nel 1916 Einstein propose di associare al fotone non solo un'energia ma anche un impulso. L'effetto si spiega con la conservazione dell'energia e della quantità di moto.



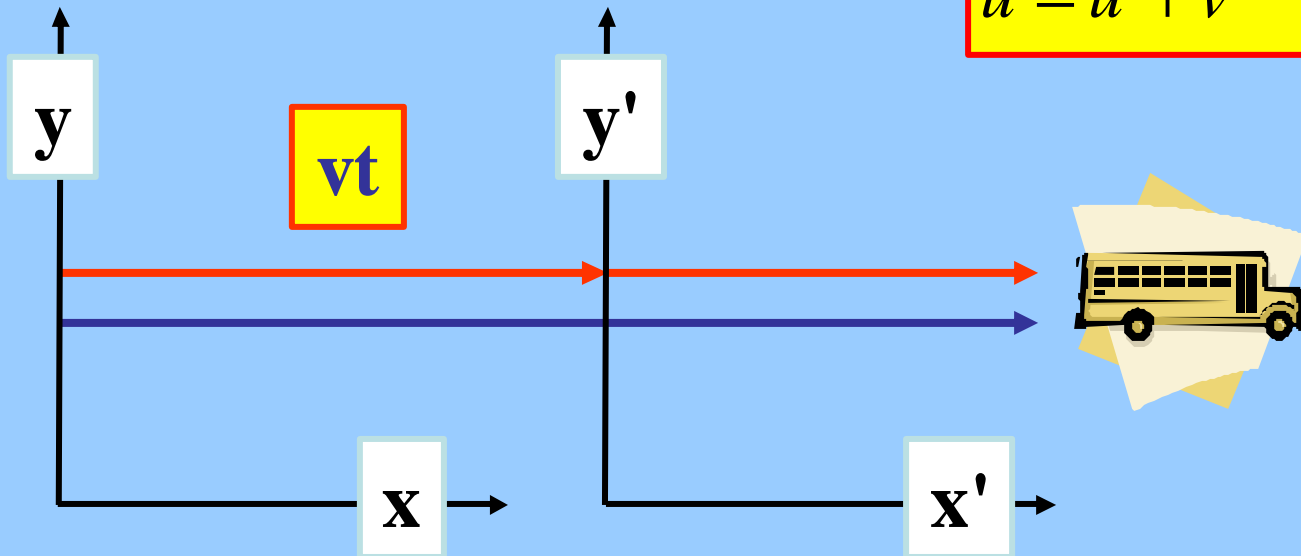
LA RELATIVITA'

La relatività newtoniana e le trasformazioni galileiane:

$$x = x' + vt, \quad t' = t$$

comportano

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx'}{dt} + v$$
$$u = u' + v$$



Una barca si muova alla velocità costante $v = 5 \text{ m/s}$ e percorra un fiume in direzione della corrente (nei 2 versi) o perpendicolare alla corrente. Si ha:

$$v = 5 - 3 = 2 \text{ m/s} \text{ nel verso contro corrente}$$

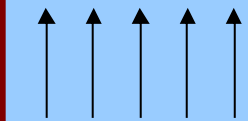
$$v = 5 + 3 = 8 \text{ m/s} \text{ nel verso della corrente}$$

$$v = \sqrt{5^2 - 3^2} = 4 \text{ m/s} \text{ perpendicolare alla corrente}$$

I tempi di percorrenza (A/R) sono

$$\text{tratto verde : } t = \frac{l}{v} = \left(\frac{100}{2} + \frac{100}{8} \right) = 62,5 \text{ s}$$

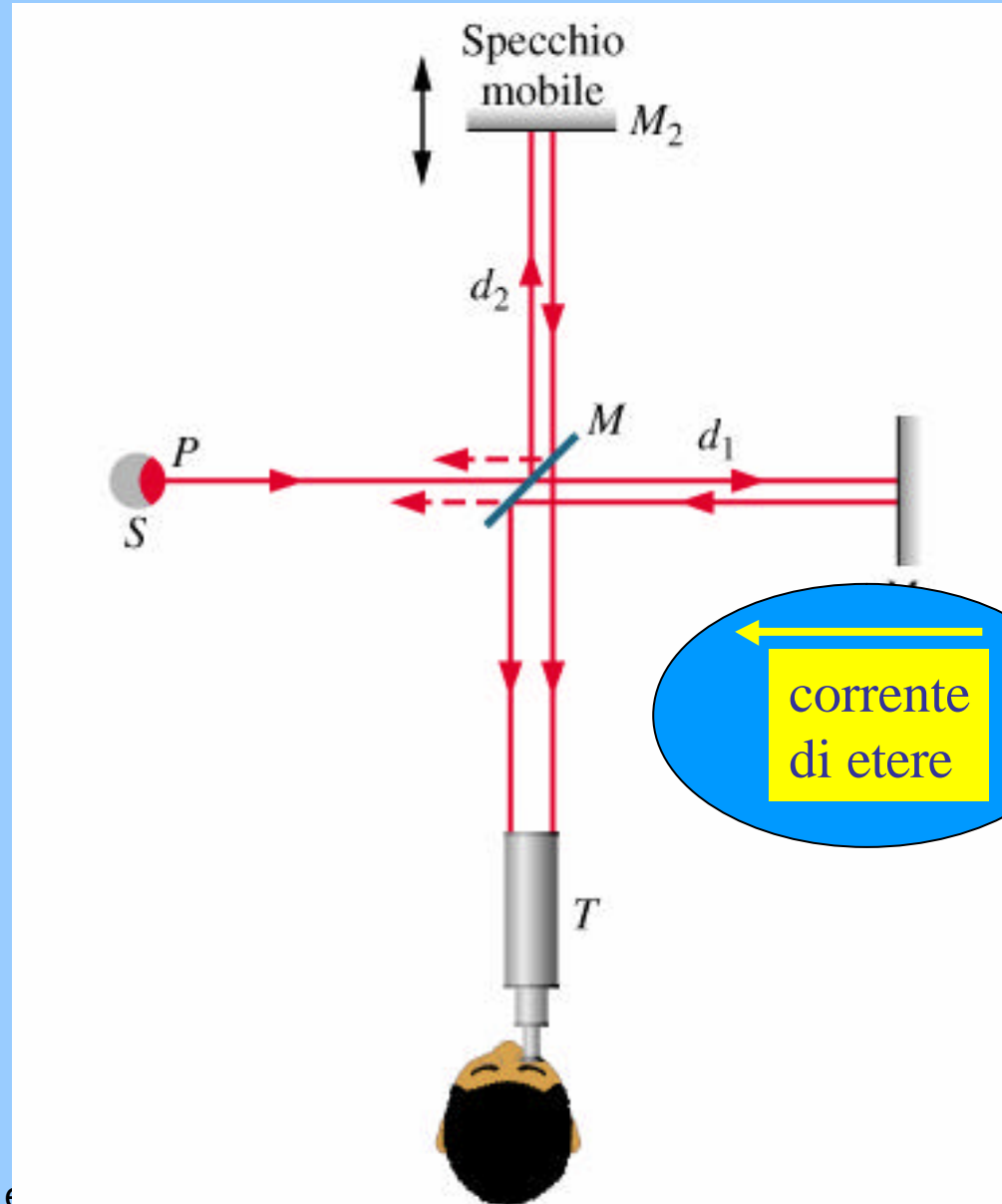
$$\text{tratto rosso : } t = \frac{l}{v} = \frac{200}{4} = 50 \text{ s}$$

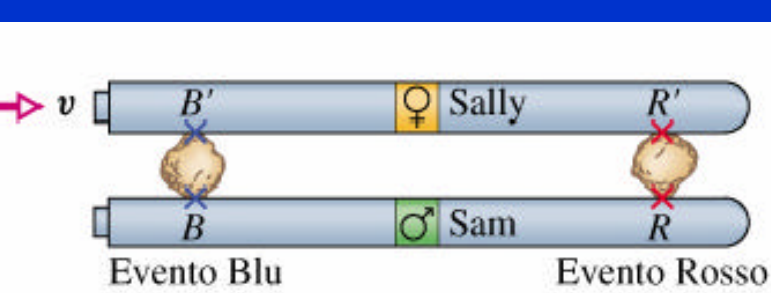


$$v = 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$
$$l = 100 \text{ m}$$

Esperimento di Michelson-Morley

La Terra ruota su se stessa (v circa 1.700 km/h all'equatore), si muove intorno al Sole (v circa 100.000 km/h) e il Sole ruota intorno al centro della Galassia (v circa 900.000 km/h). I risultati mostrano che la velocità della luce rimane costante lungo ogni direzione e vale **$c = 300.000 \text{ km/s}$** .

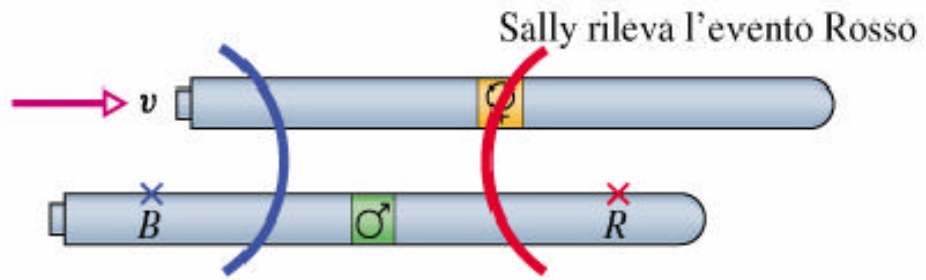




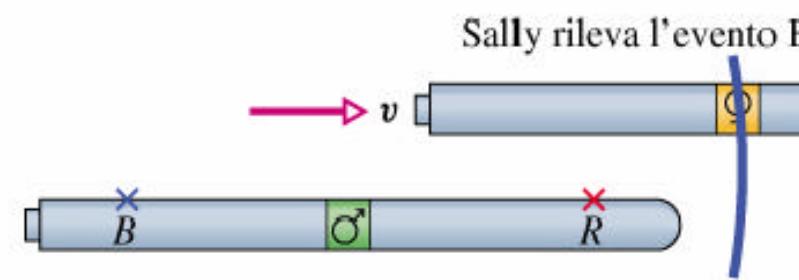
(a)



(c)



(b)



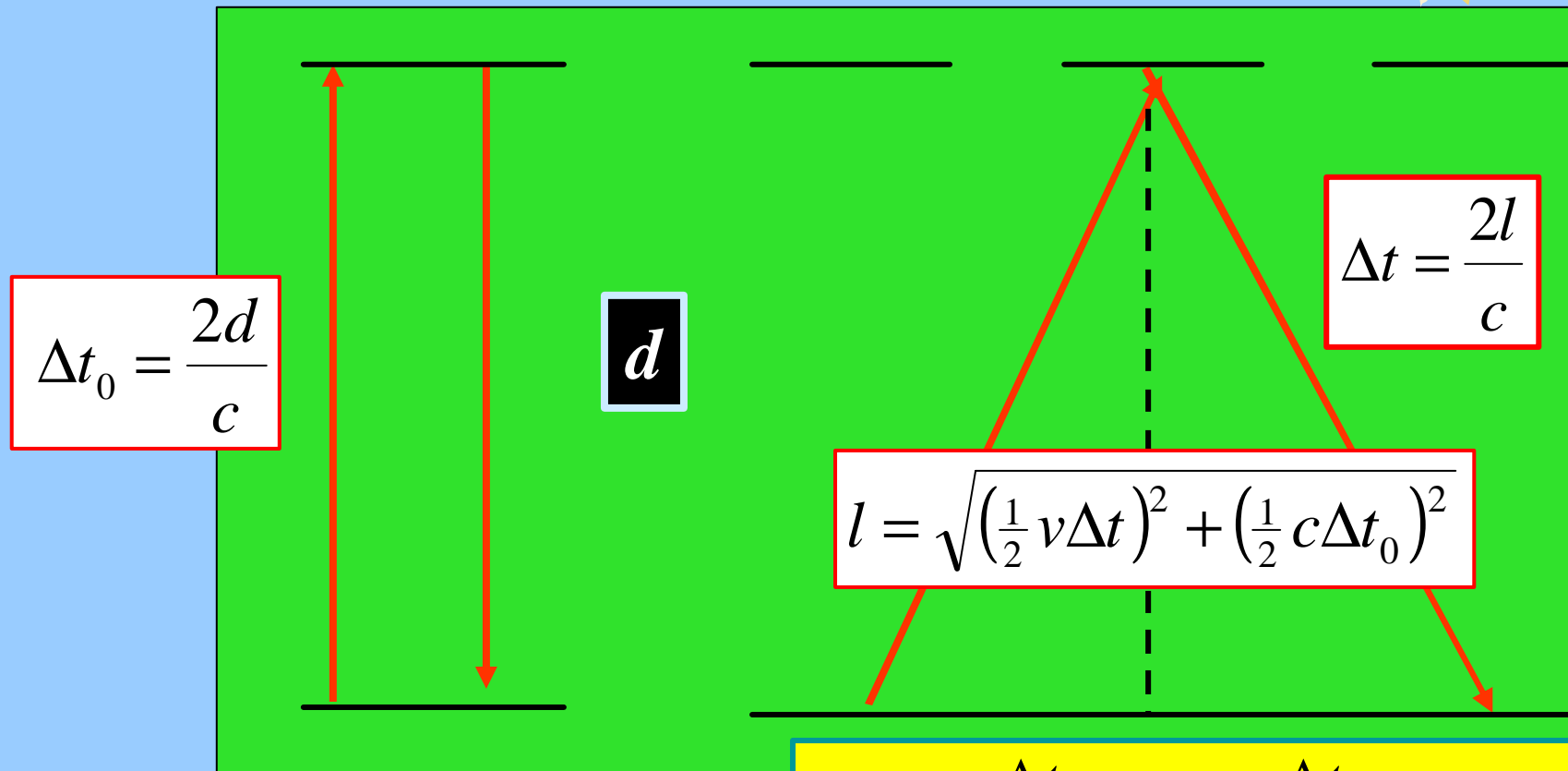
(d)

La simultaneità è relativa

Dilatazione dei tempi e contrazione delle lunghezze

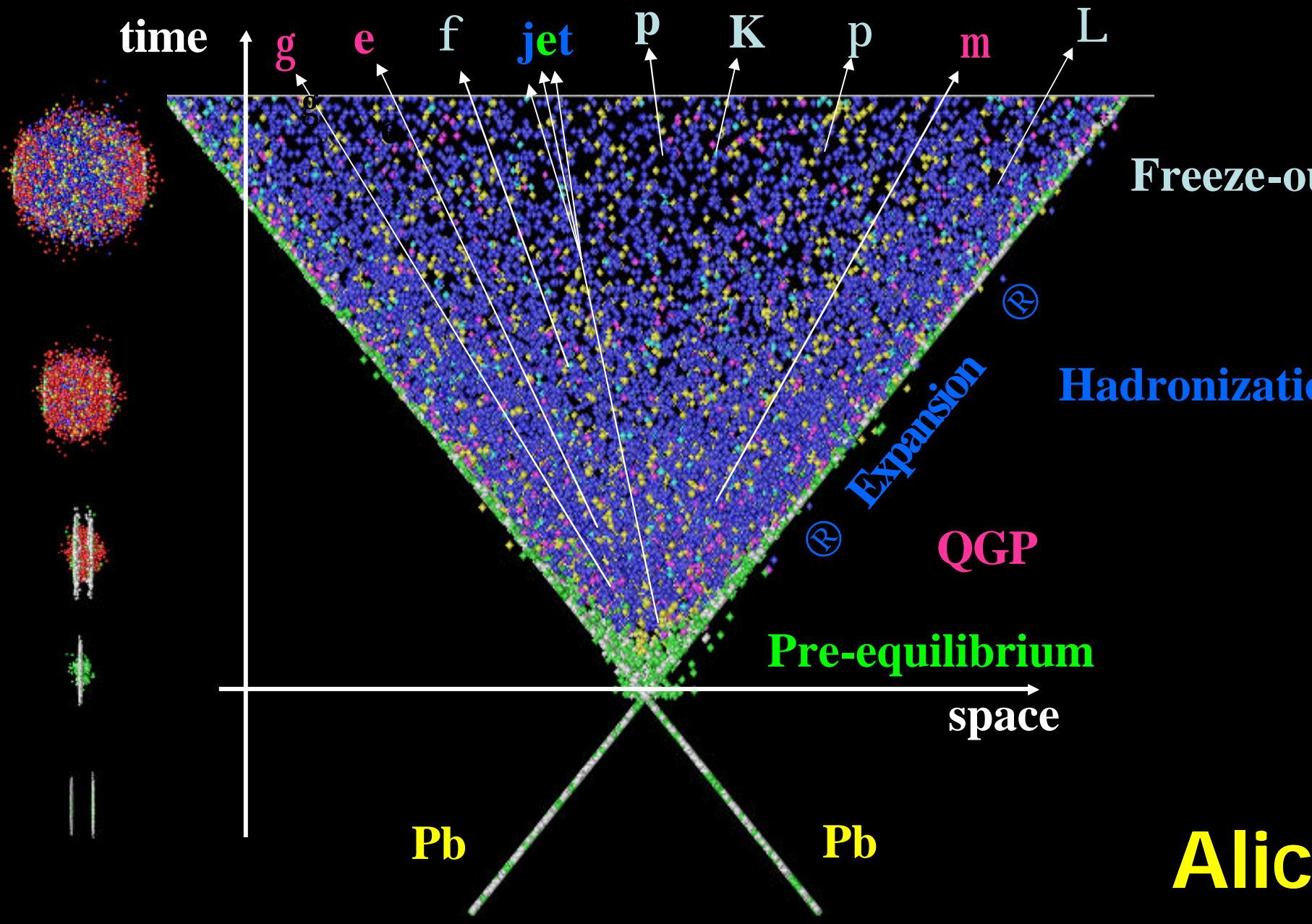


La simultaneità è relativa

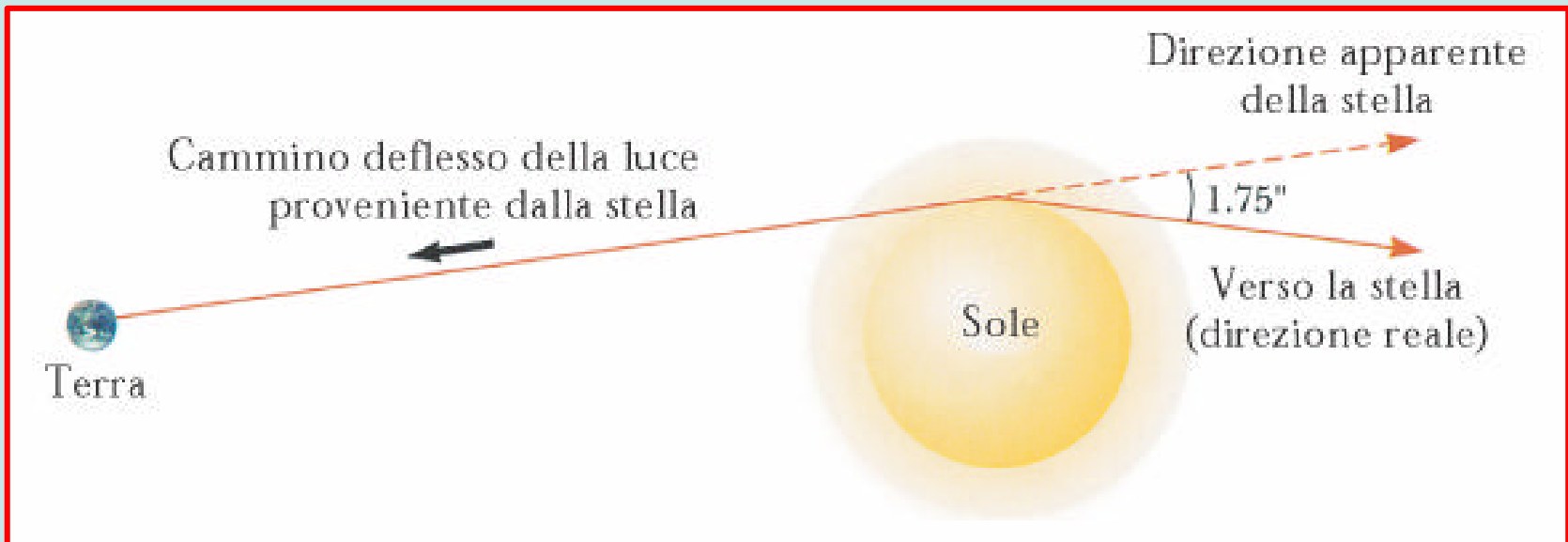
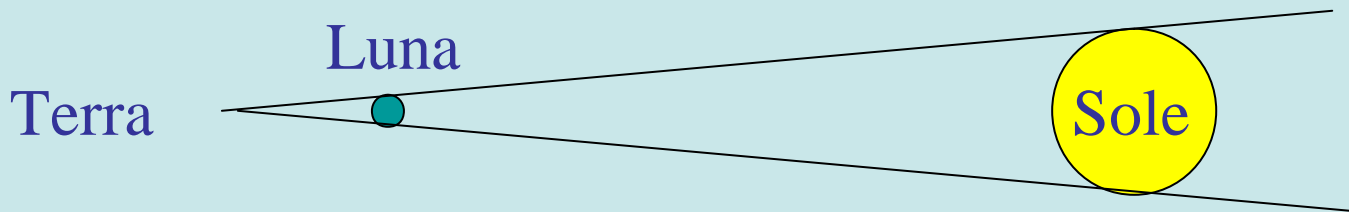


$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma \Delta t_0$$

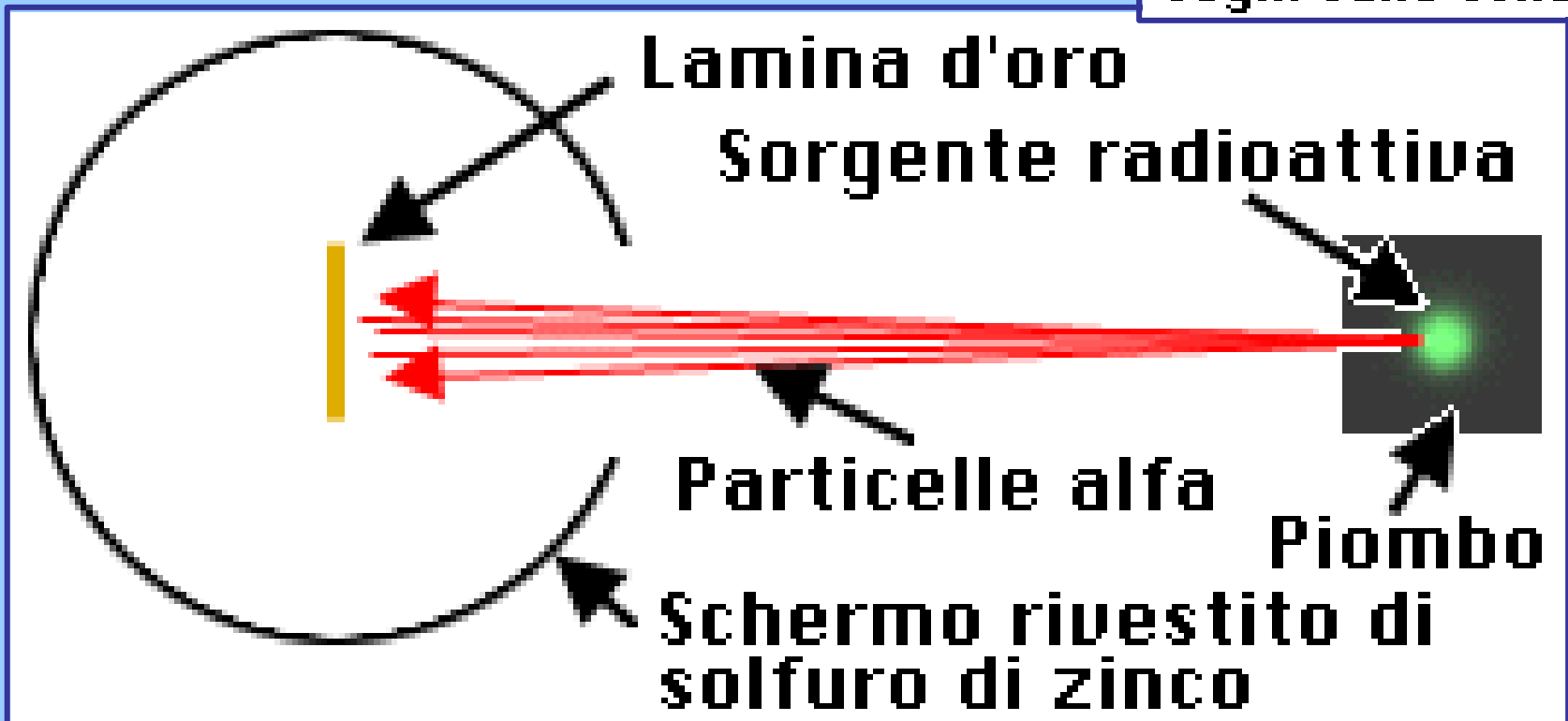
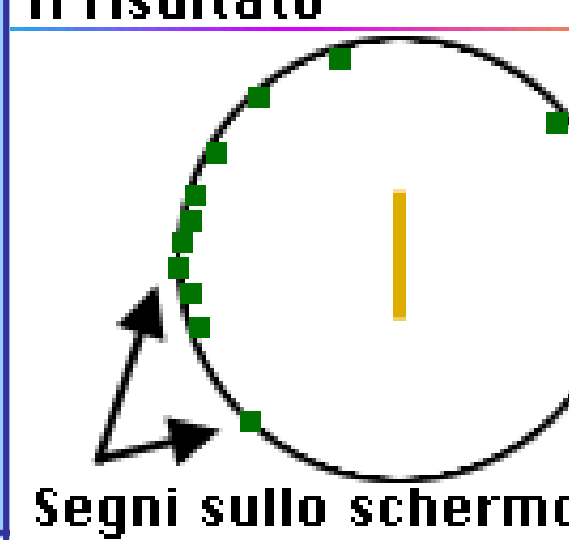
Space-time Evolution of Collisions



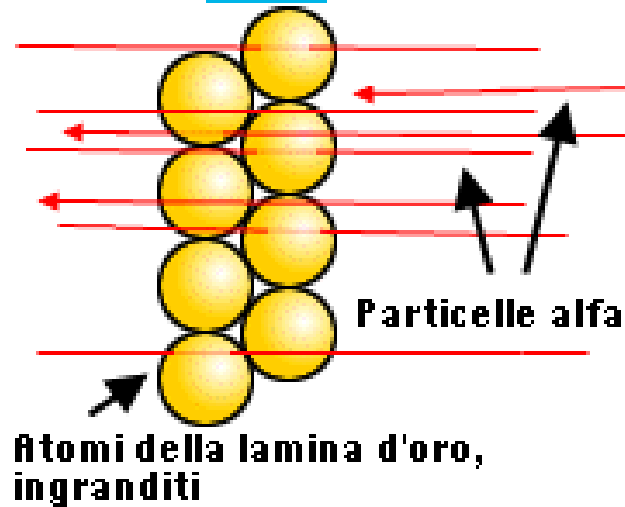
Durante l'eclisse solare del 29 Maggio 1919 (e confermato in seguito) Eddington ha verificato che la luce (energia) di una stella viene deviata dall'effetto gravitazionale della massa del Sole.



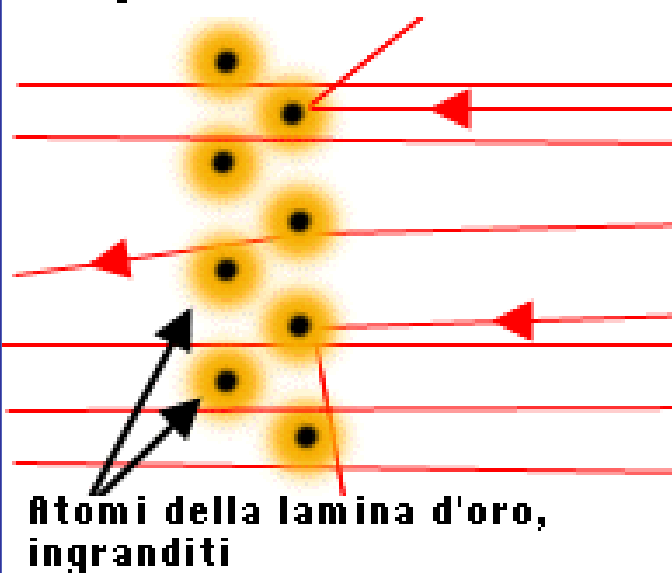
La **struttura dell'atomo** e la scoperta del **nucleo atomico** è stata ottenuta da **Rutherford** in un classico esperimento del 1911.



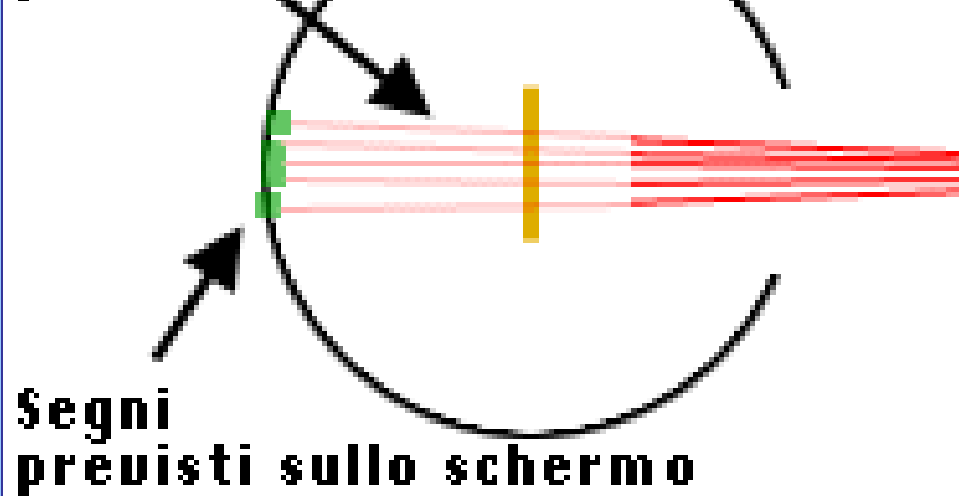
Dettaglio della lamina d'oro
secondo il vecchio modello atomico



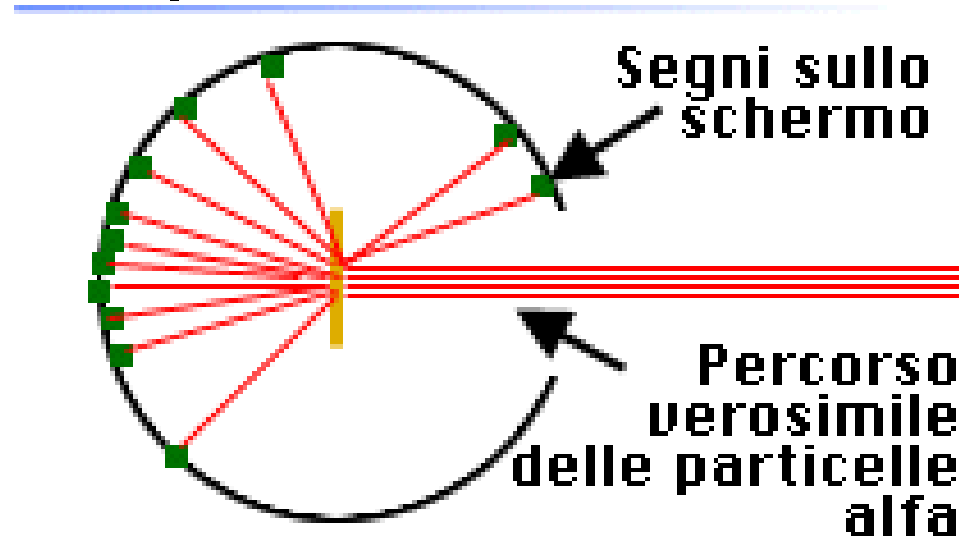
La teoria di un nucleo positivo spiega la deviazione delle alfa



Percorso previsto



Interpretazione del risultato



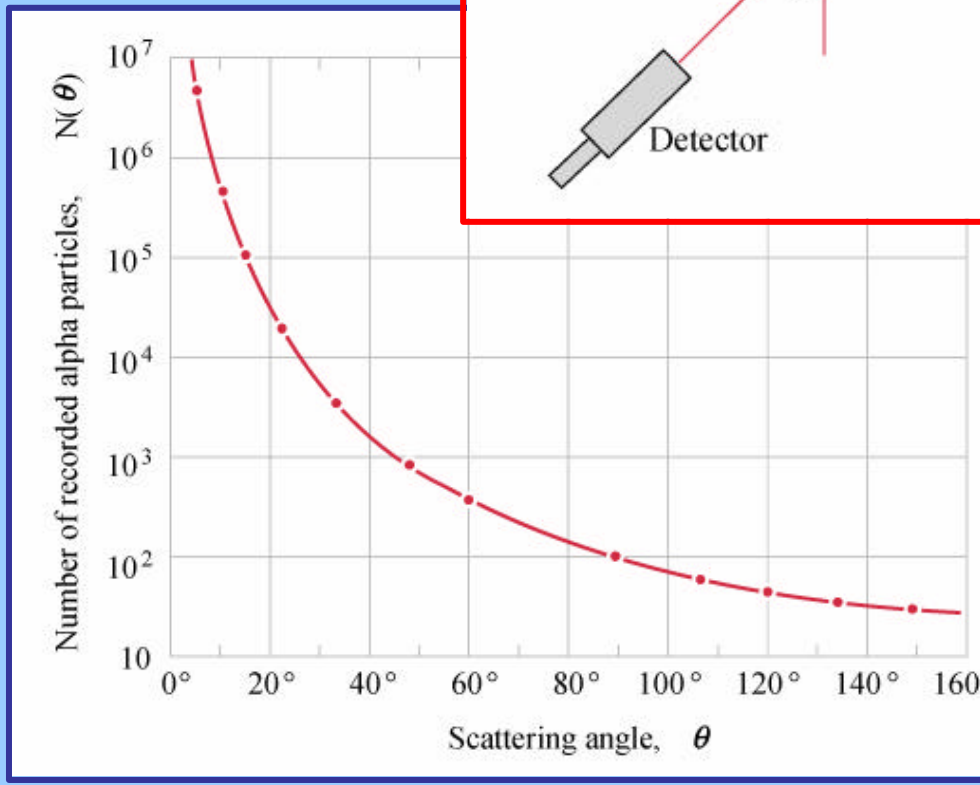
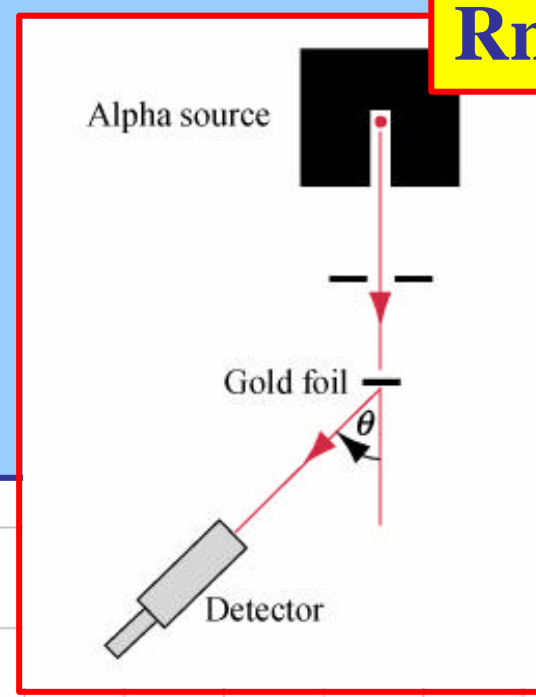
L'esperimento di Rutherford, realizzato da Geiger e Marsden, portò alla scoperta dei nuclei degli atomi.

Dalla legge di conservazione dell'energia si può calcolare facilmente la minima distanza a cui arriva una particella α da un nucleo di Au ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)

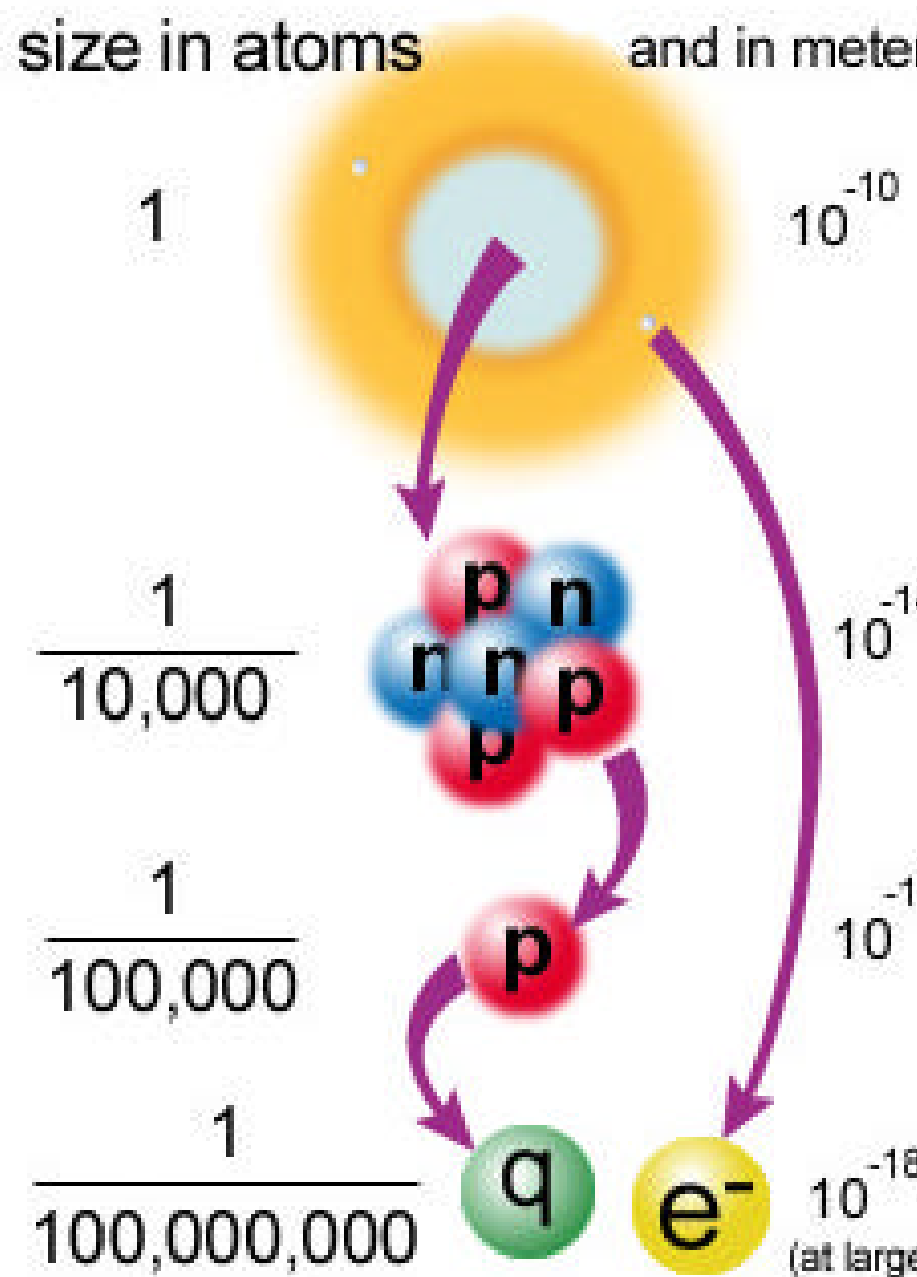
$$E_{\text{Cin}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_a q_{\text{Au}}}{d} = 5,3 \text{ MeV}$$

$$d = \frac{2 \cdot 79 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{4\pi\epsilon_0 (8,8 \cdot 10^{-12}) \cdot 5,3} =$$

$$= 4,3 \cdot 10^{-14} \text{ m} = 43 \text{ fm}$$



Le dimensioni in gioco

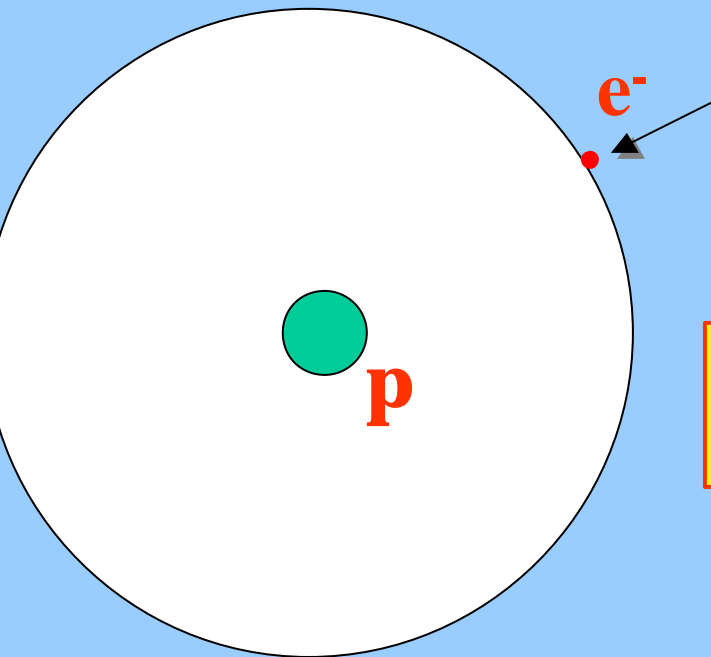


orbita dell'elettrone $\sim 10^{-10}$ m
dimensione del nucleo $\sim 10^{-15}$ m

$$\frac{10^{-10} \text{ m}}{10^{-15} \text{ m}} = 10^5$$

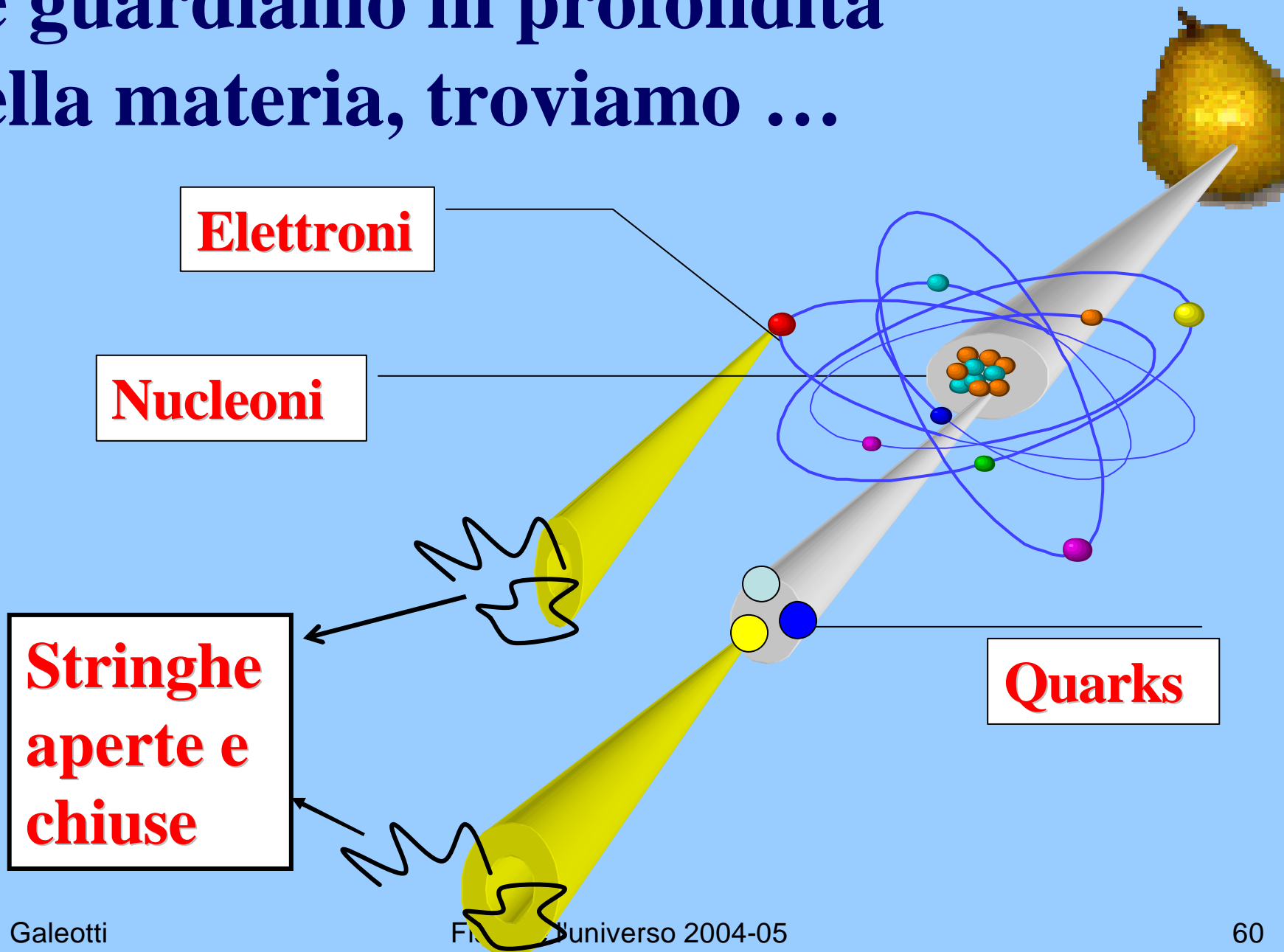
Se il nucleo avesse
dimensioni di 1 cm

**L'orbita dell'elettrone
sarebbe a 10^5 cm = 1 km**

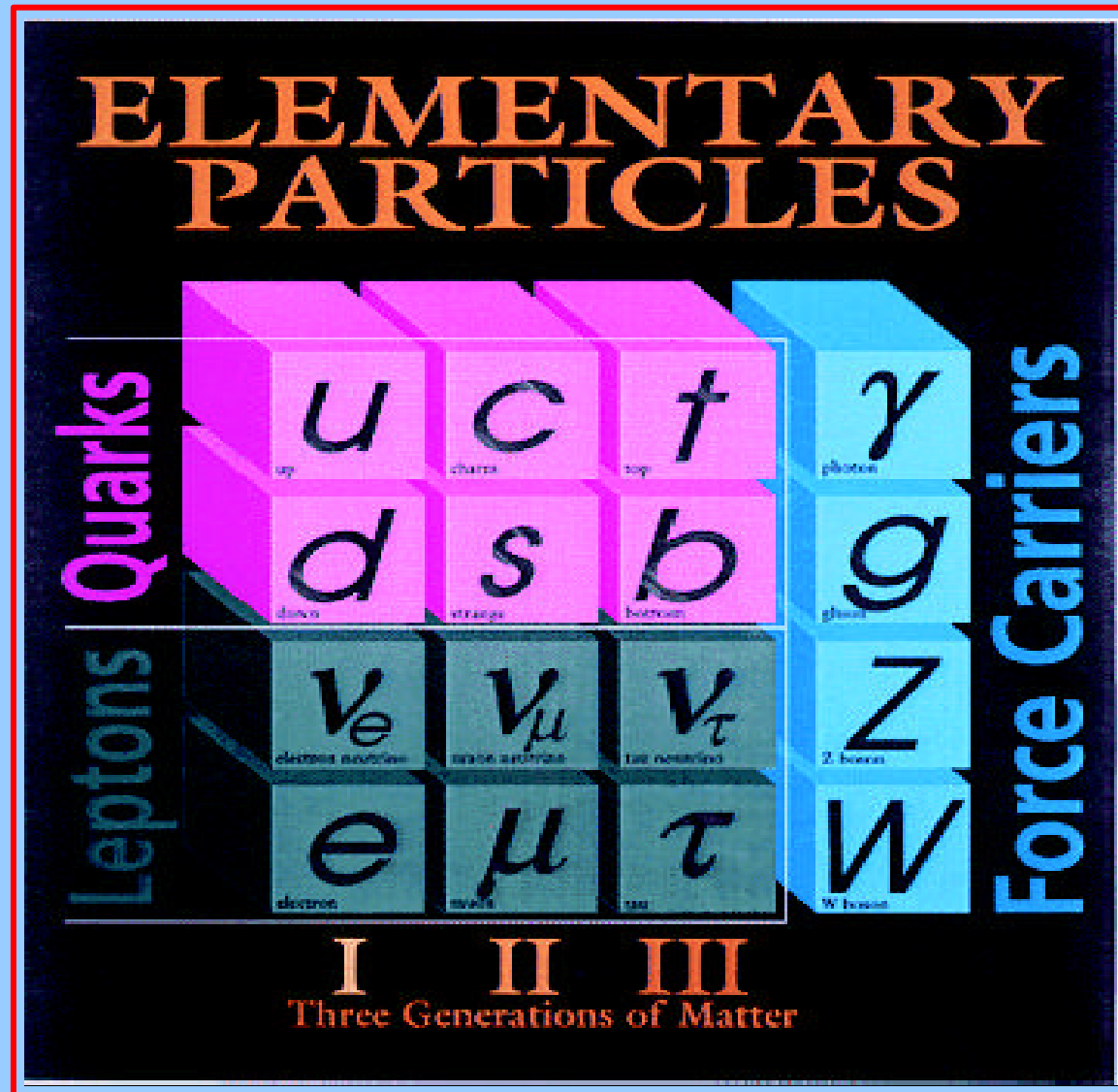
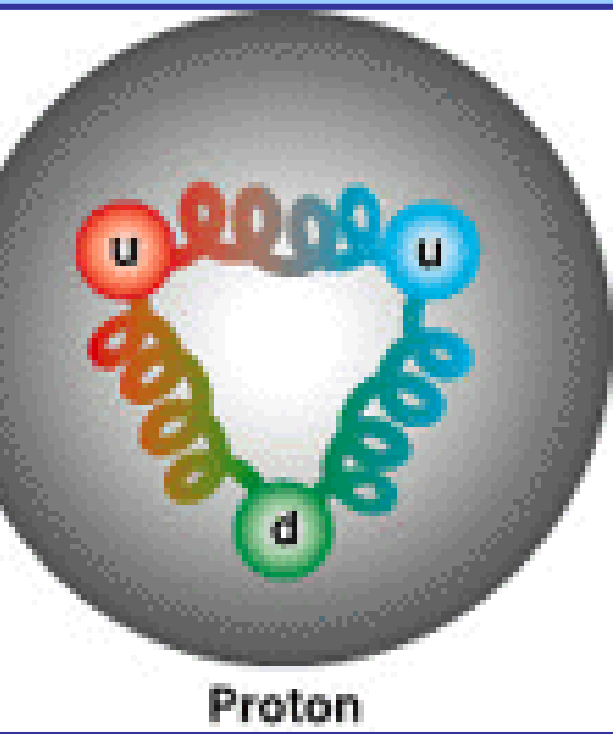


Lo spazio è vuoto

Se guardiamo in profondità nella materia, troviamo ...



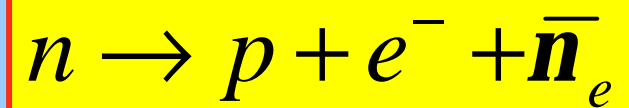
Le 3 generazioni della materia e le particelle di scambio



	LEPTONI		QUARK	
famiglia I	e (0,51 MeV)	n_e (≤ 3 eV)	u (2/3) (da 1 a 5 MeV)	d (-1/3) (da 3 a 9 MeV)
famiglia 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)
famiglia 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)

In parentesi sono riportati i valori delle masse e, per i quark, delle loro cariche elettriche frazionarie. L'unità di misura delle energie è l'elettronvolt, che corrisponde all'energia acquistata da 1 elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1 volt.

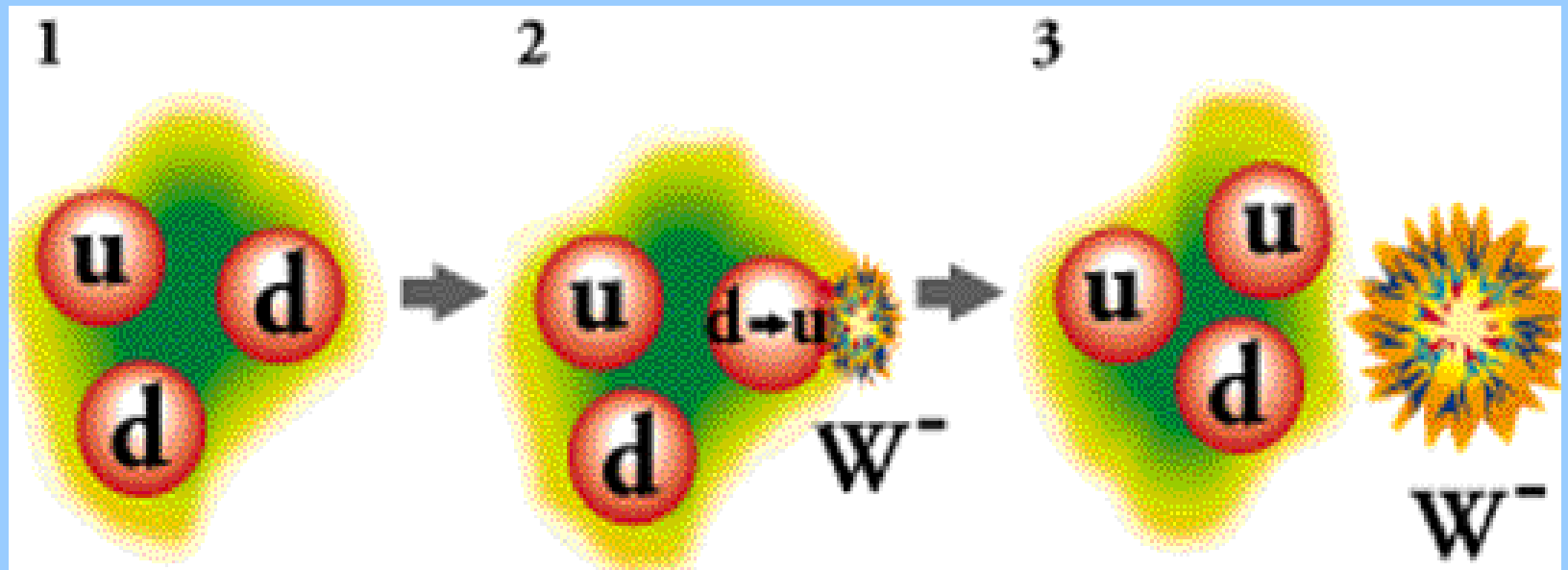
Decadimento β del neutrone:



Un neutrone decade in un protone, un elettrone e un antineutrino elettronico. Il processo è detto decadimento beta del neutrone, perché gli elettroni prodotti nei decadimenti nucleari venivano chiamati raggi beta prima che si scoprisse che fossero elettroni. Il neutrone libero decade spontaneamente ($\tau \sim 14,8$ min) perché la sua massa è superiore a quella del protone $m_n - m_p = \Delta m \sim 1,3 \text{ MeV}/c^2$.

- 1 - Un neutrone (carica = 0) è costituito di **1 quark up** e **2 quark down**.

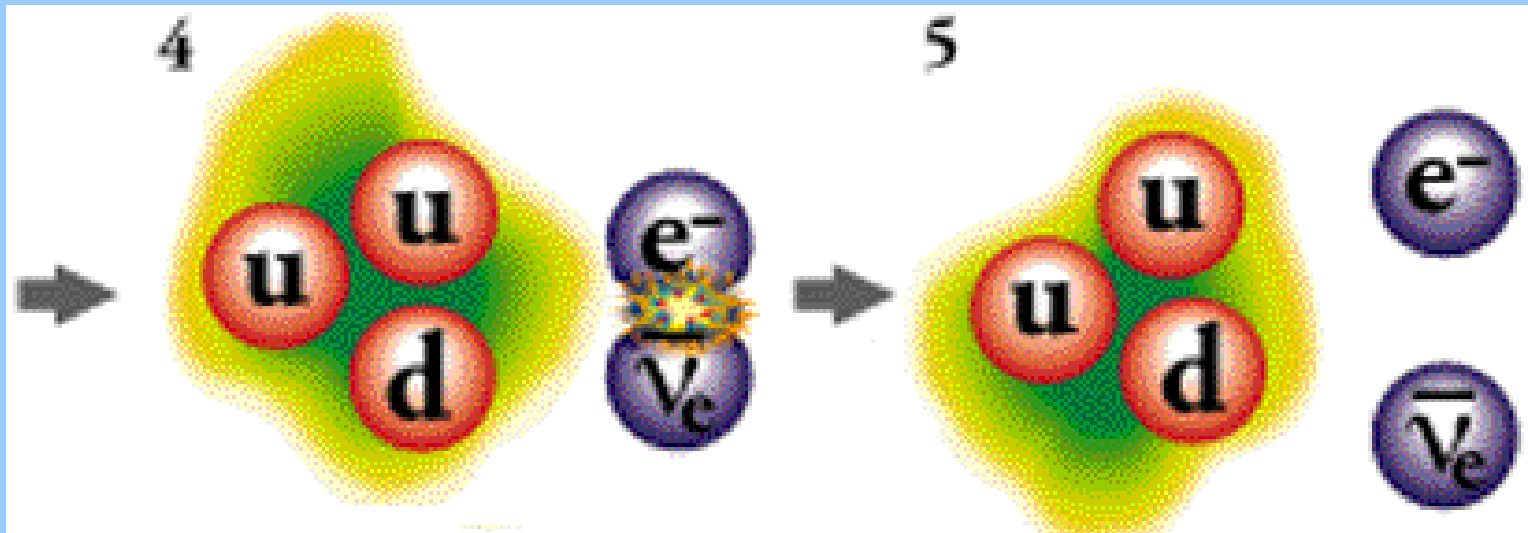
- 2 - Uno dei quark down si trasforma in un quark up. Dato che il down ha carica $-1/3$ e l'up $2/3$, per conservare la carica bisogna che il processo sia mediato da una particella W^- virtuale, che porti via la carica -1 .
- 3 - Il neutrone così è diventato un protone. La W^- emessa si allontana.



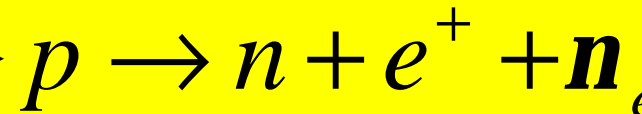
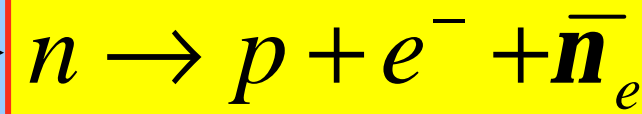
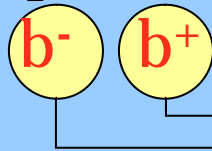
4 - Un elettrone e un antineutrino si materializzano dal bosone virtuale W^- .

5 - Il protone, l'elettrone e l'antineutrino si allontanano l'uno dall'altro.

Le fasi intermedie di questo processo avvengono in meno di un milionesimo di milionesimo di secondo, e non sono osservabili

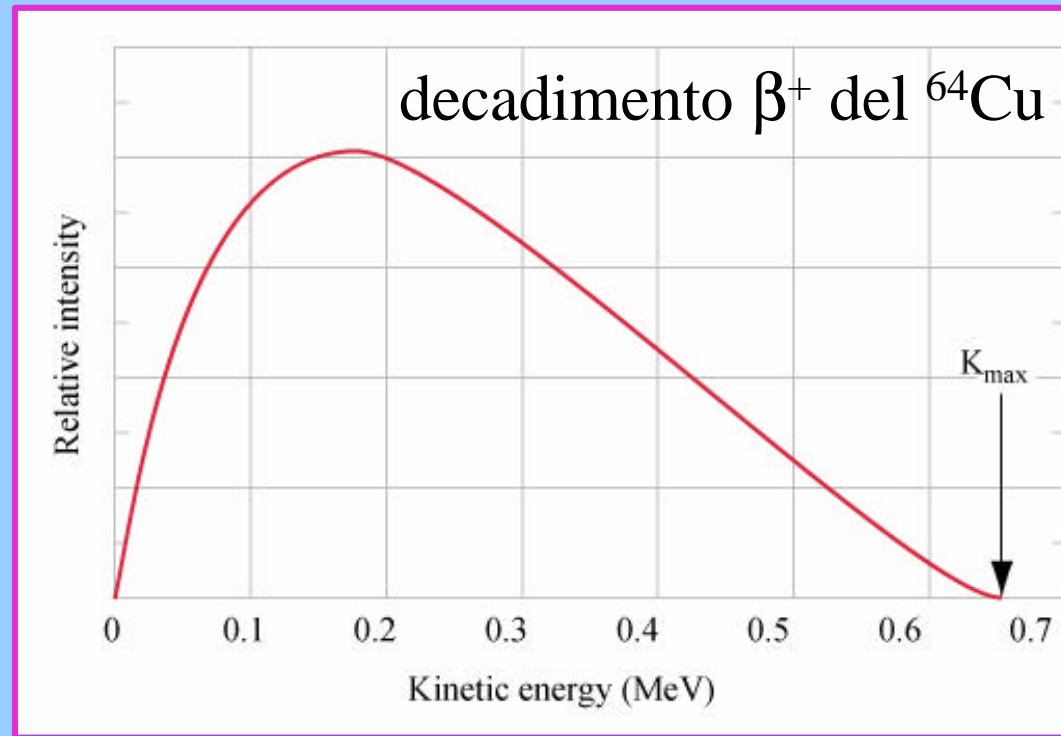


A livello nucleare i decadimenti β sono trasformazione di protoni in neutroni e viceversa:



Nel 1930 Pauli ipotizzò l'esistenza del neutrino e nel 1934 Fermi formulò la teoria del decadimento β

Devono valere le leggi di conservazione:
 dell'energia,
 dell'impulso,
 del numero barionico,
 del numero leptonico.



LE PARTICELLE DI SCAMBIO (mediatori delle interazioni)

Elettrodebole			Forte o di colore		
bosone	massa (GeV/c ²)	carica elettrica	bosone	massa (GeV/c ²)	carica elettrica
γ	0	0	gluone	0	0
W^+	80	+1			
W^-	80	-1			
Z^0	91	0			

spin = 1

I processi deboli con scambio di W^\pm sono detti interazioni a correnti cariche; quelli con scambio di Z^0 a correnti neutre.

Fermioni

Bosoni

Leptoni
Quark

Spin

$$\frac{1}{2}$$

1

Bosoni
mediatori
 $\gamma W^+ W^- Z^0 g$

Barioni
(qqq)

$$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$$

0, 1,
2, ...

Mesoni
(q \bar{q})

Il **principio di esclusione** di Pauli
vale solo per i Fermioni

Le interazioni fondamentali



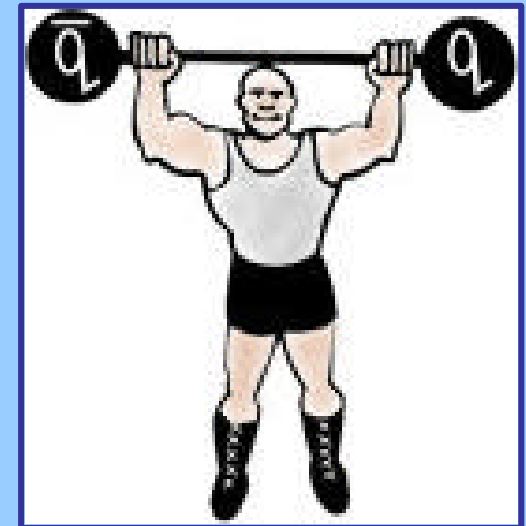
gravità



elettromagnetismo



debole



forte

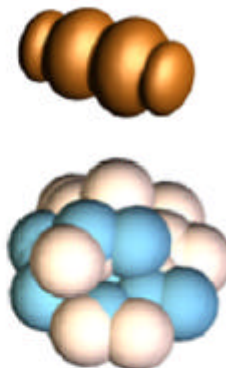
Interazione	Intensità	Raggio d'azione	Particelle scambiate	Particelle soggette	Esempi
Gravitazionale	$G_N = 6 \cdot 10^{-39} m_p^{-2}$	∞ (μr^{-2})	gravitoni	tutte	corpi celesti
Debole	$G_F = 10^{-5} m_p^{-2}$	10^{-16} cm	bosoni (W^\pm e Z^0)	leptoni e adroni	decadimenti b
Elettromagnetica	$a = 1/137$	∞ (μr^{-2})	fotoni	con carica elettrica	strutture atomiche
Forti	$g^2 = 1$	10^{-13} cm	adroni	adroni	strutture nucleari

Leptons

	Electric Charge		
Tau	-1	0	Tau Neutrino
Muon	-1	0	Muon Neutrino
Electron	-1	0	Electron Neutrino

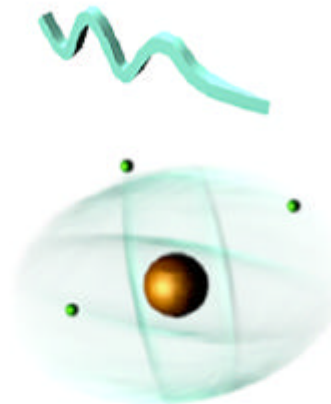
Strong

Gluons (8)



Electromagnetic

Photon



Quarks

	Electric Charge		
Bottom	-1/3	2/3	Top
Strange	-1/3	2/3	Charm
Down	-1/3	2/3	Up

each quark: *R*, *B*, *G* 3 colours

Gravitational

Graviton ?

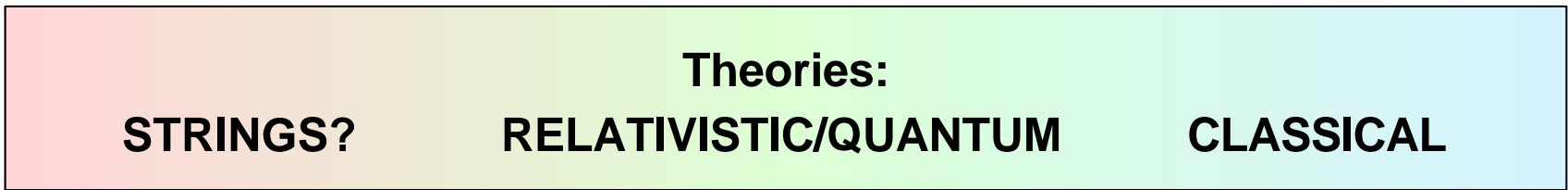
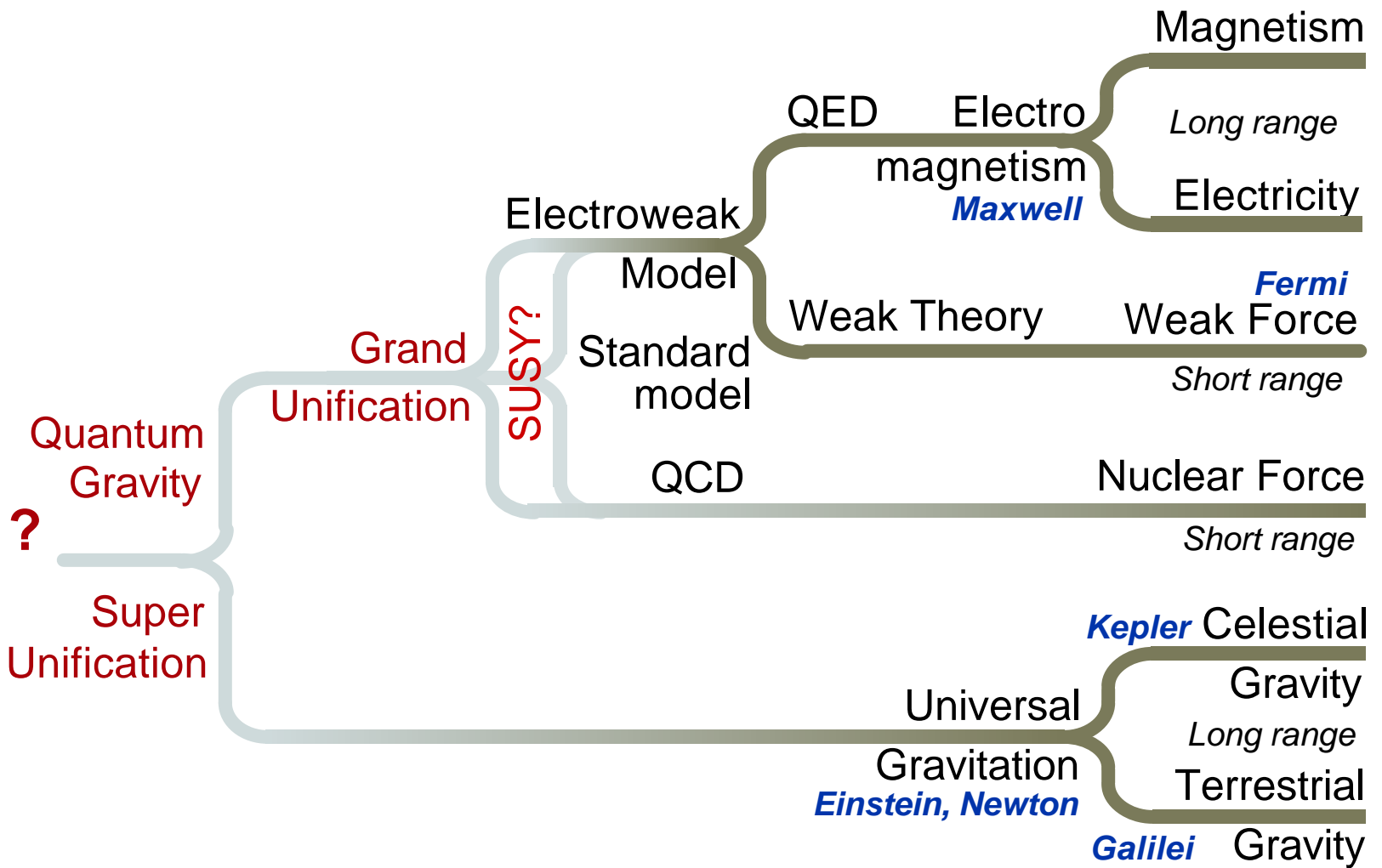


Weak

Bosons (W,Z)

Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino interactions
Burning of the sun

The particle drawings are simple artistic representations



Onde di de Broglie nell'atomo di idrogeno

dalla relazione di de Broglie
$$\mathbf{l}_n = \frac{h}{p_n} = \frac{h}{m_e v_n}$$

e dalla quantizzazione del momento angolare

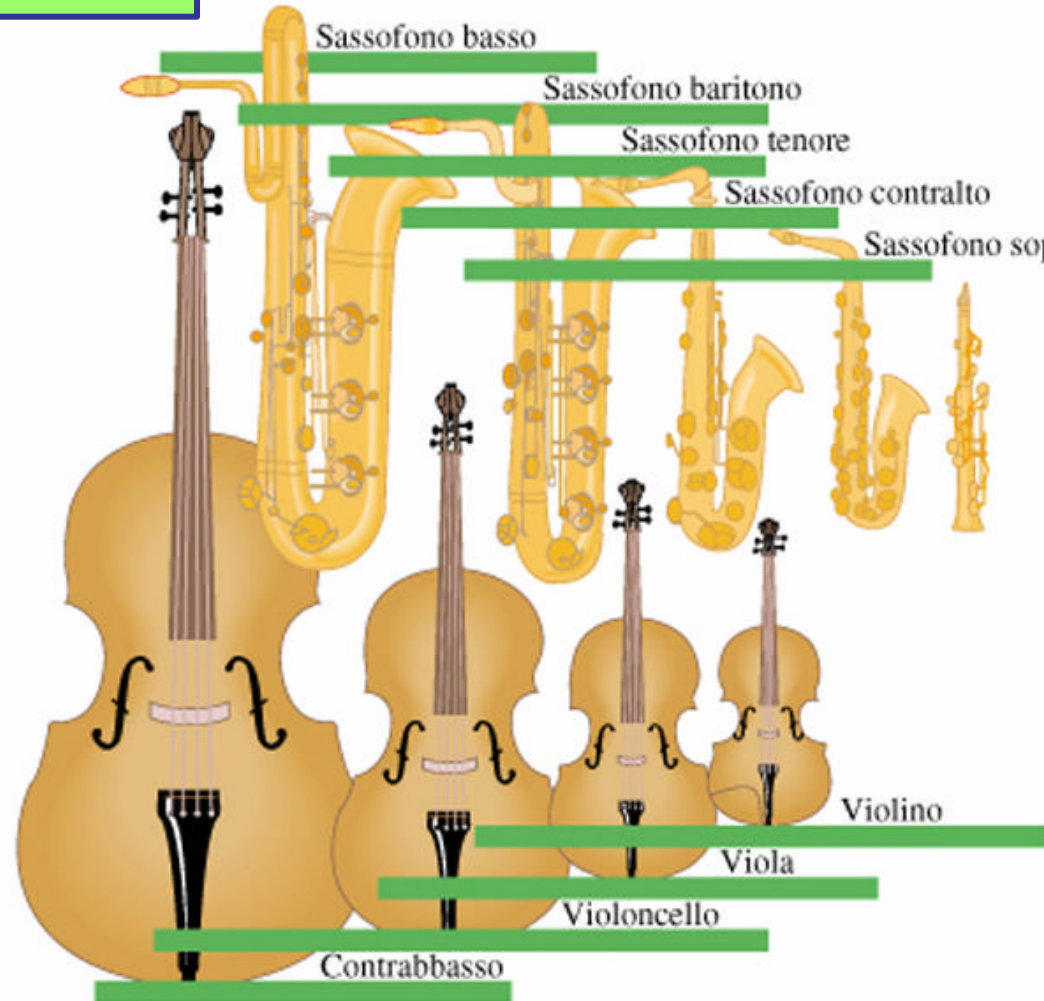
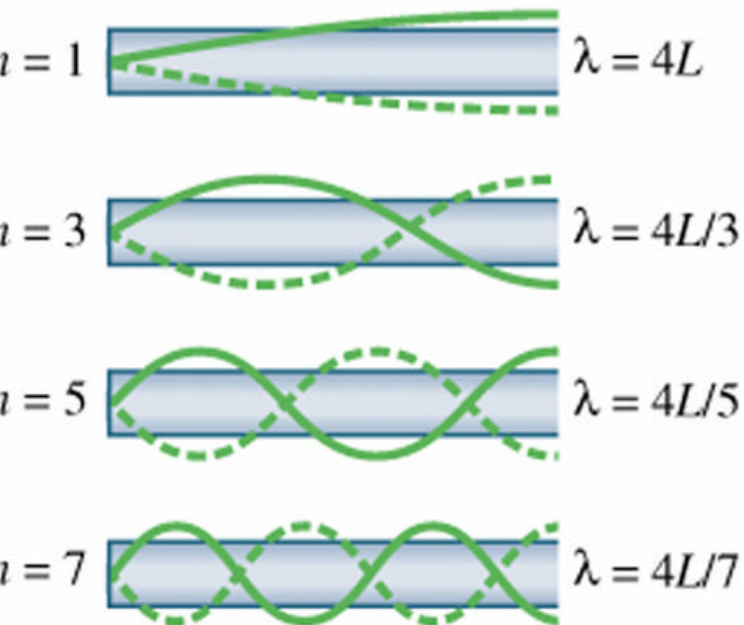
$$L_n = m_e v_n r_n = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar, \text{ da cui } m_e v_n = \frac{nh}{2\pi r_n}$$

si ottiene subito
$$\mathbf{l}_n = \frac{h}{\left(\frac{nh}{2\pi r_n}\right)} = \frac{2\pi r_n}{n}, \text{ ossia } 2\pi r_n = n\mathbf{l}_n$$

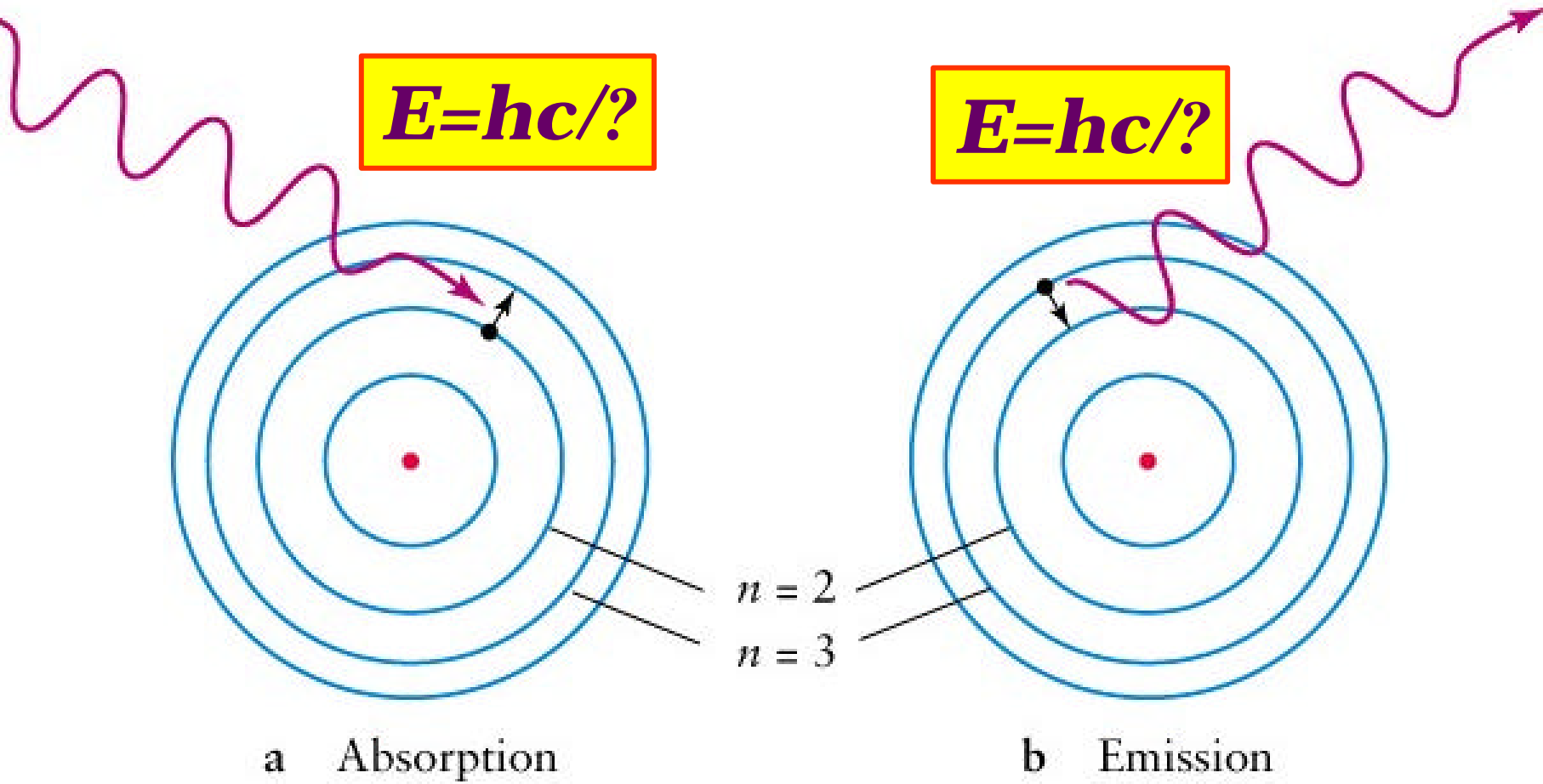
Quindi la circonferenza dell'*n*-esima orbita deve contenere esattamente *n* lunghezze d'onda dell'elettrone

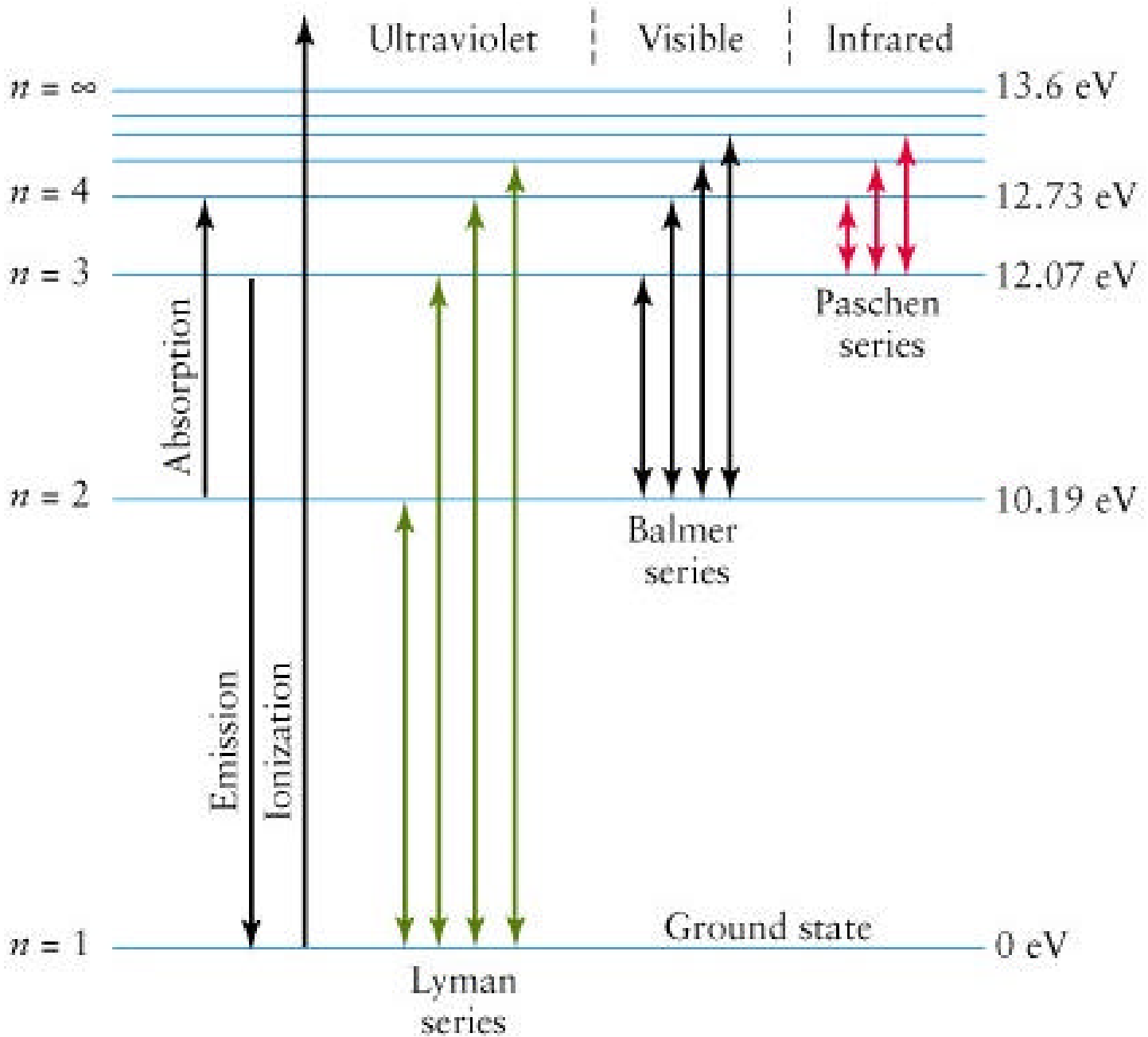
Onde di materia

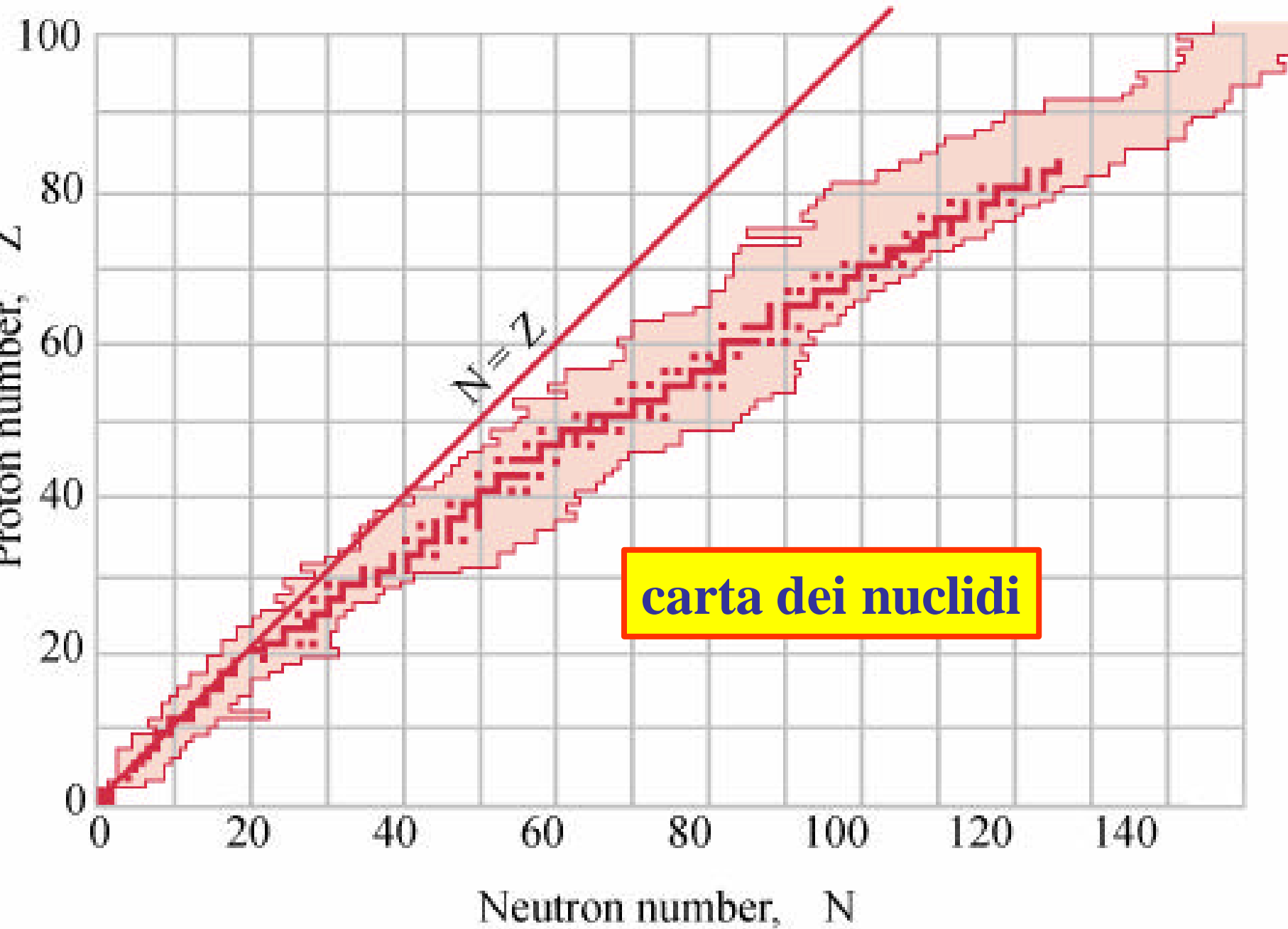
ata la natura ondulatoria,
particelle devono
ddisfare alle leggi delle
nde (come avviene nelle
orde vibranti).



I fotoni sono emessi da salti di elettroni tra livelli energetici

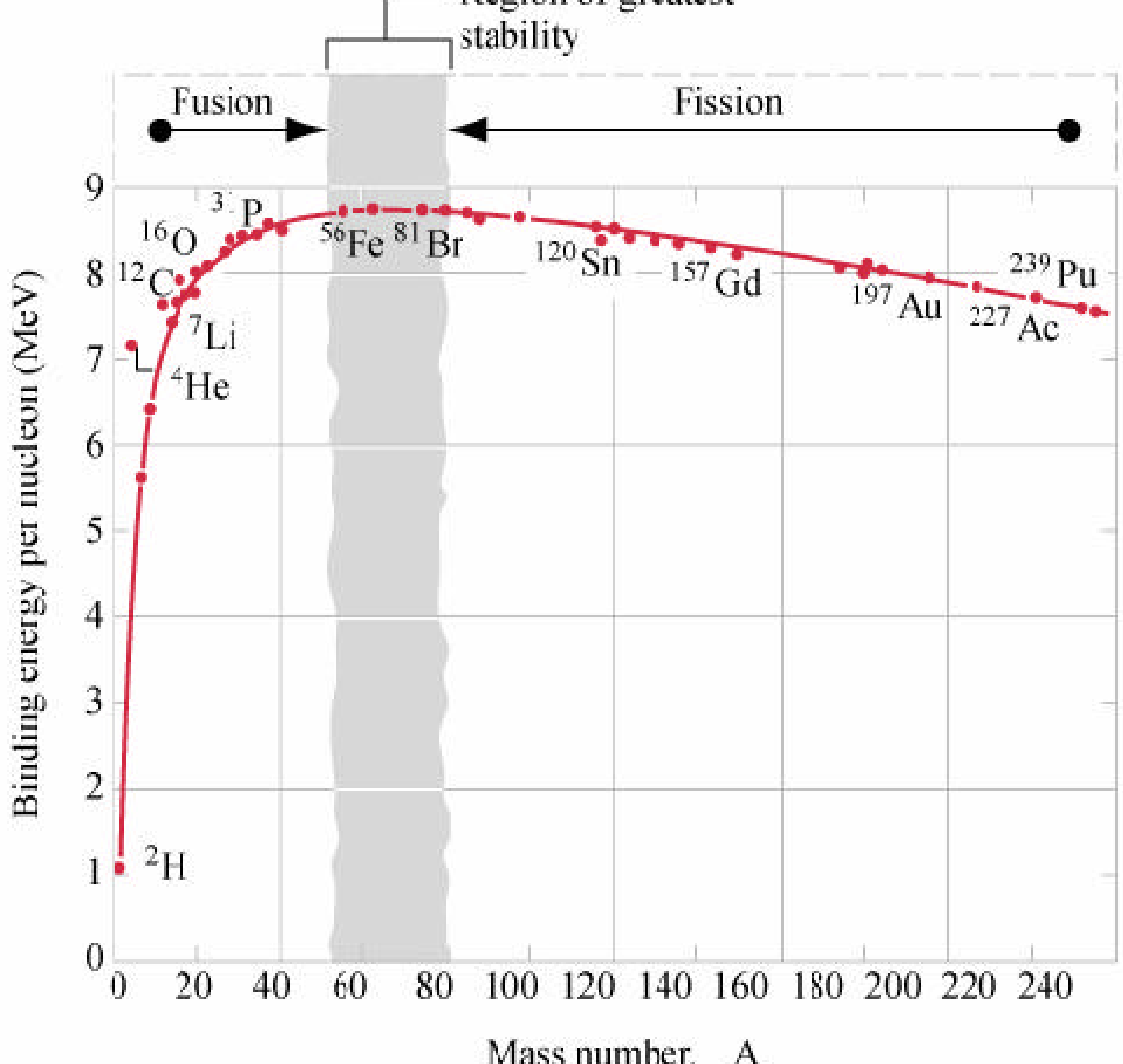






Schema dei decadimenti di un nucleo e prodotti finali del decadimento

numero di protoni			α, n	α, γ
	p, n	p, γ d, n	d, γ α, d	α, p
	γ, n p, d		n, γ d, p	
	p, α	γ, d d, α	n, d γ, p	n, p
	γ, α	n, α		
			numero di neutroni	



Le interazioni delle particelle con la materia sono rappresentabili con la **formula di Bohr e Bethe**, dalla quale si ottiene il percorso r (**range**).

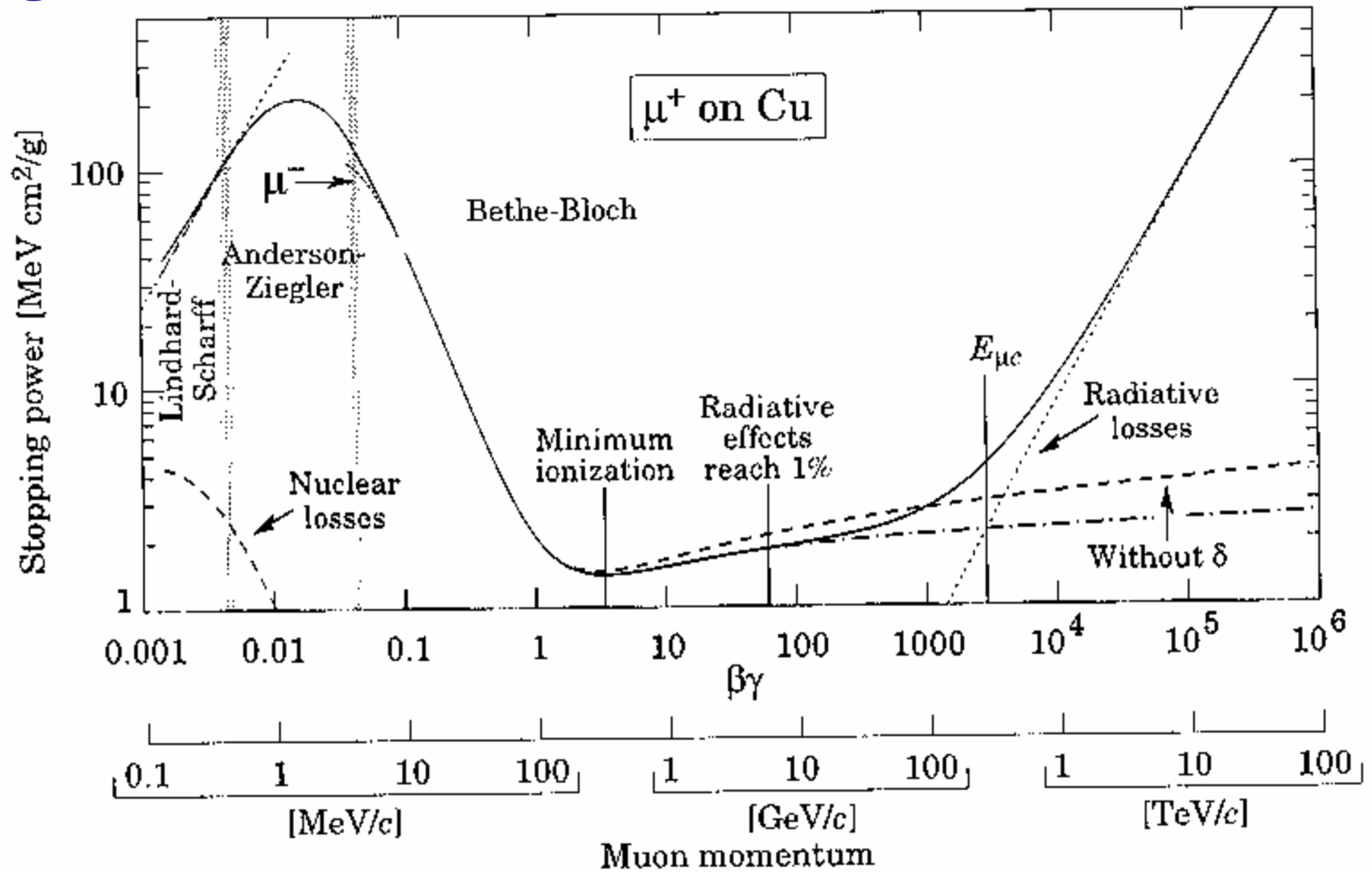
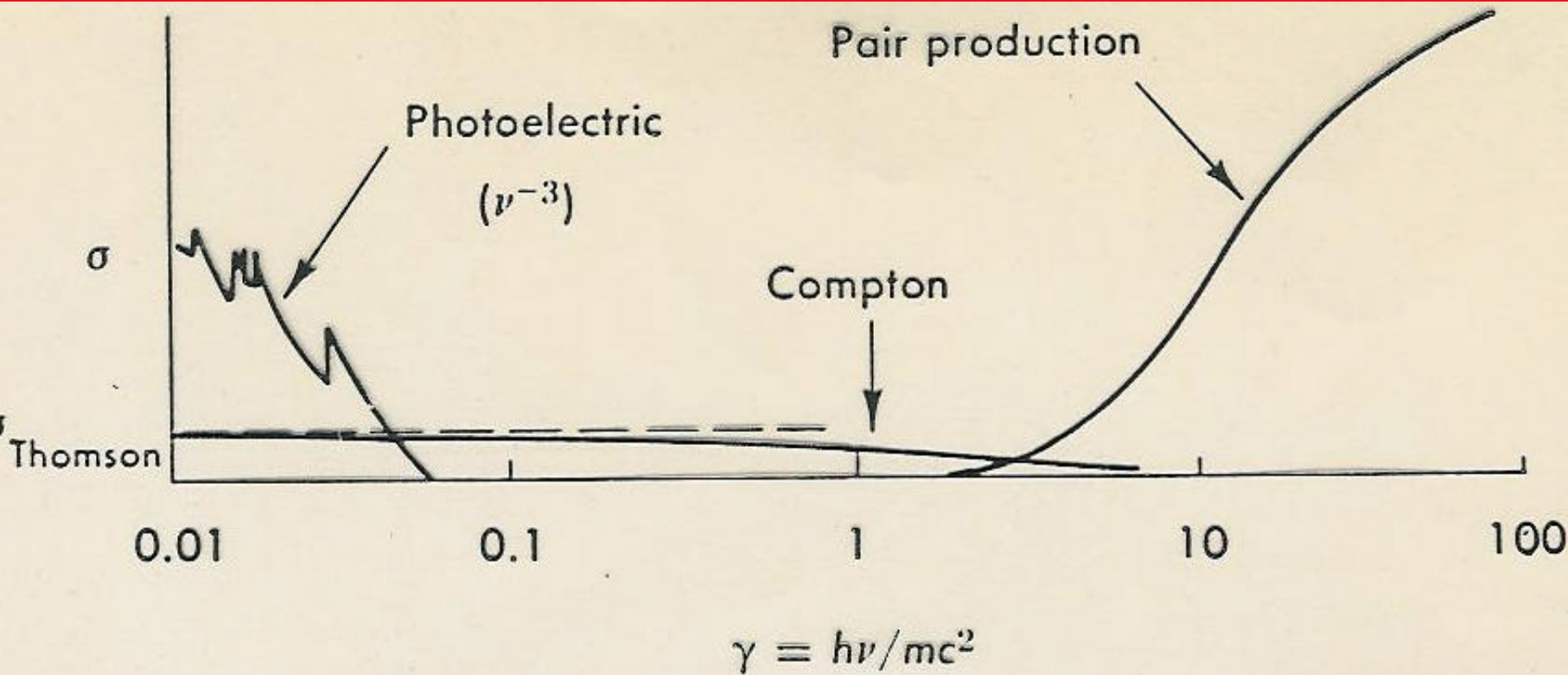


Fig. 23.1: Stopping power ($= \langle -dE/dx \rangle$) for positive muons in copper as a function of $\beta\gamma = p/Mc$ over nine orders of magnitude in momentum (12 orders of magnitude in kinetic energy) [1]. Solid curves indicate the total stopping power. Data below the break $\beta\gamma \approx 0.1$ are taken from ICRU 49 [2], and data at higher energies are from Ref. 1. Vertical bands indicate boundaries between different approximations discussed in the text. The short dotted lines labeled " μ^- " illustrate the "Barkas effect," the dependence

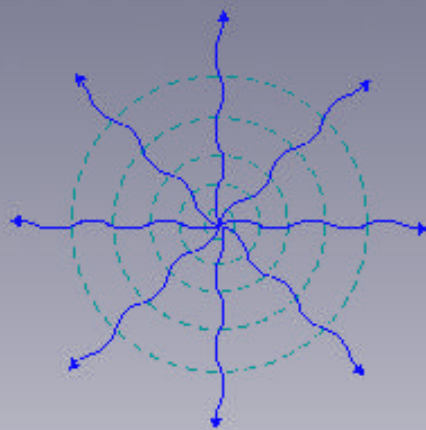


$$\sigma_T = \frac{8\pi r_e^2}{3} = 0,67 \text{ barn}$$

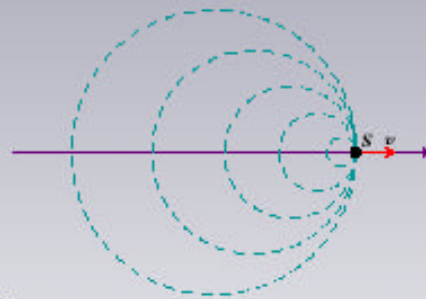
(1 barn = 10^{-28} m^2)

Luce Čerenkov

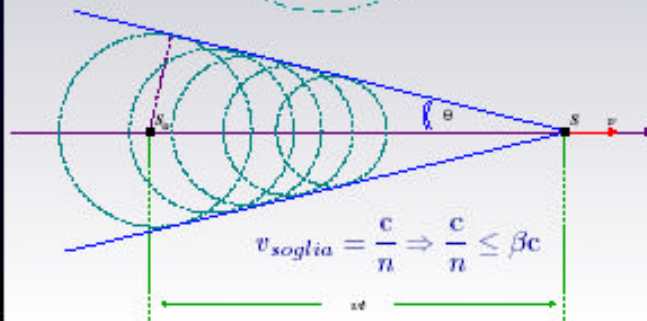
Fronti d'onda



Fronte d'onda per una sorgente ferma

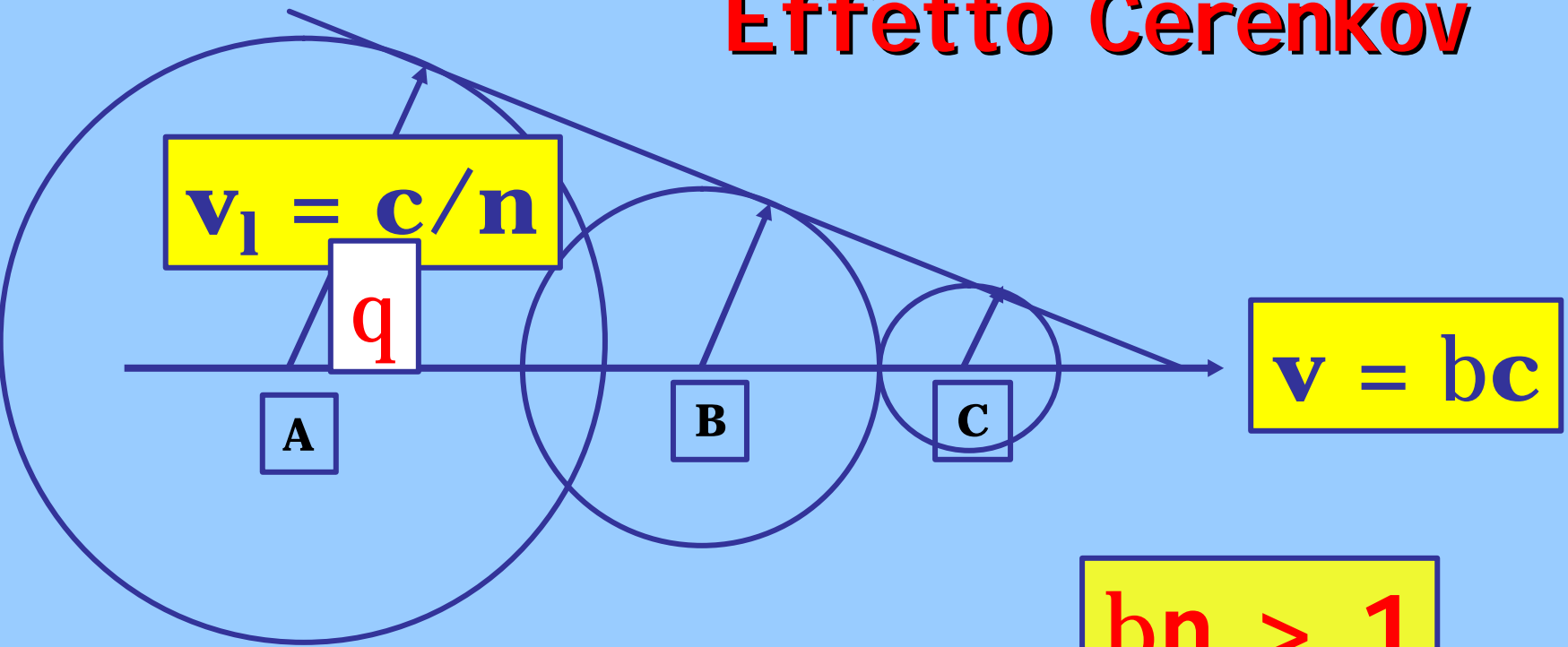


Fronte d'onda per una sorgente in moto a velocità v



Fronte d'onda per una sorgente in moto a velocità $> v_c$

Effetto Cerenkov



$$J = \arccos \frac{1}{bn}$$

$$J_{\max} = \arccos \frac{1}{n}$$

In acqua ($n = 1,33$, $v_1 = 2,25 \cdot 10^8$ m/s) si ha effetto Cerenkov se $\beta = 0,75$, ossia se:
 La luce Cerenkov viene emessa con un angolo $\theta \sim 41$ gradi.

$$g = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = 1,52$$

In aria ($n = 1,0003$) si ha emissione solo per particelle ultrarelativistiche, lungo un cono di luce di semiapertura $\theta \sim 1,3$ gradi.

Le energie cinetiche minime corrispondenti ad un fattore di Lorentz $\gamma = 1,52$ sono le seguenti:

particelle	e	m	k	p	a
mc^2 (MeV)	0,51	106	493	938	3752
T_{\min} (MeV)	0,78	162	753	1432	5034

Hubble deep field





Hubble Deep Field

HST WFPC2

- **L'astronomia è una scienza perché si basa sull'osservazione quantitativa e critica di fenomeni naturali.**
- **È legata alla fisica perché ne applica le leggi alla formulazione di modelli che interpretino la struttura dell'Universo.**
- **Il metodo scientifico è basato sulla misura, quindi l'astronomia è la scienza che misura l'Universo.**
- **La misura dell'Universo è particolarmente difficile perché indiretta.**

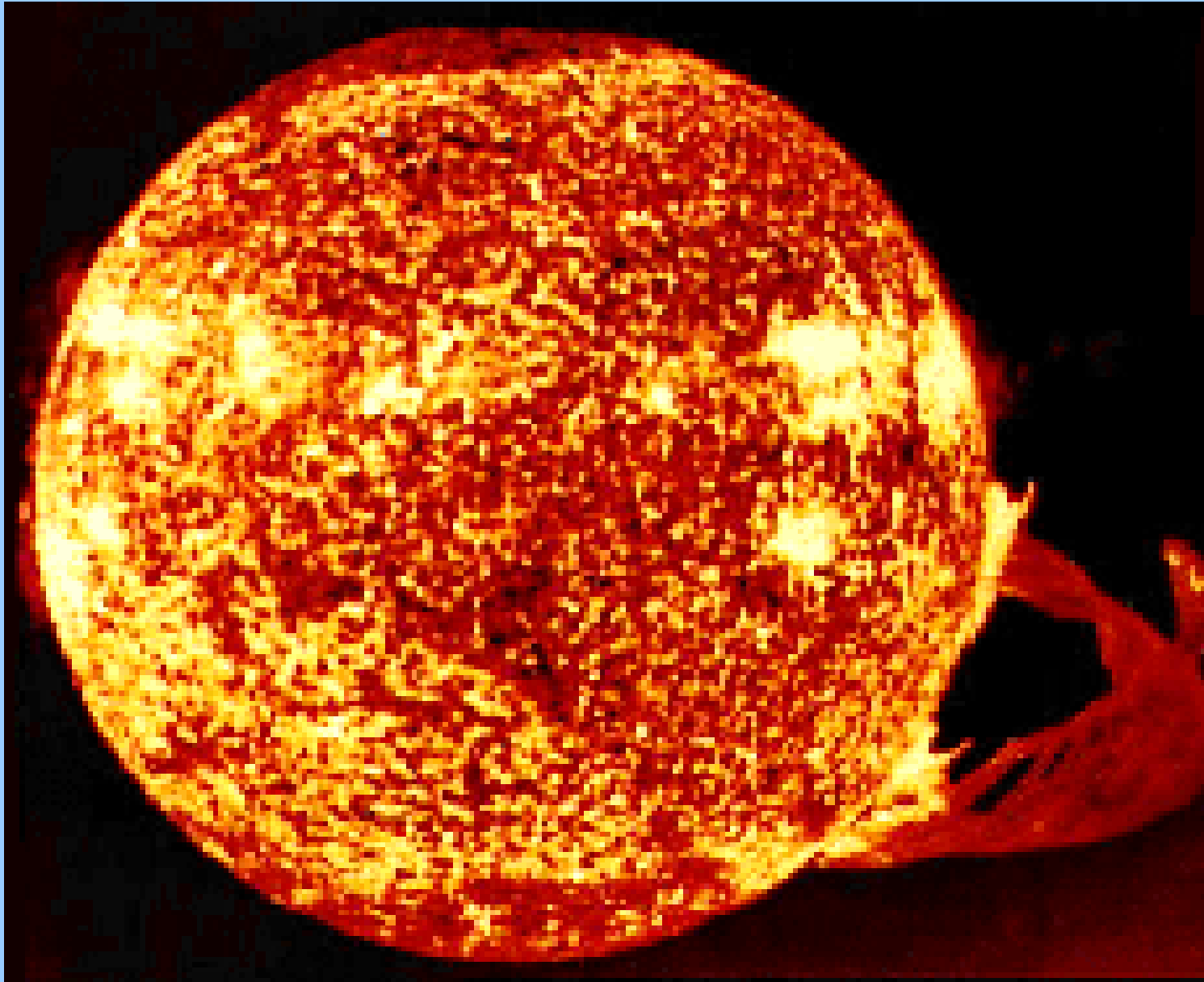
L'astronomia è una scienza con molte "componenti":

- **Astrometria**
- **Astrofisica**
- **Cosmologia**
- **Osservazioni da Terra e dallo spazio**
- **Tecniche osservative di alto contenuto sperimentale**
- **Modelli fenomenologici e modelli teorici**
- **Verifica delle teorie fisiche**

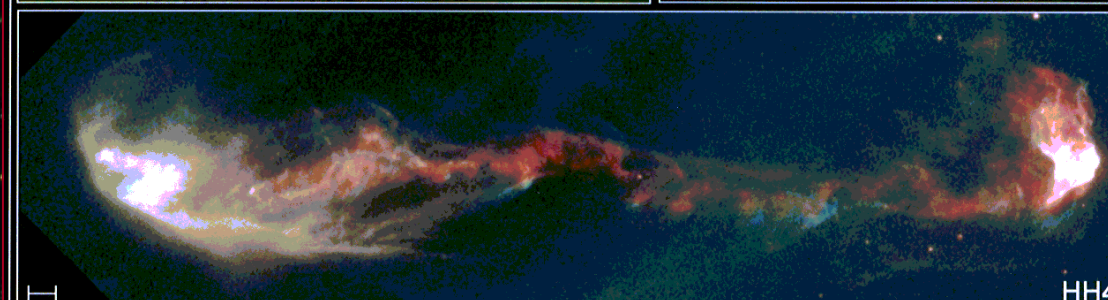
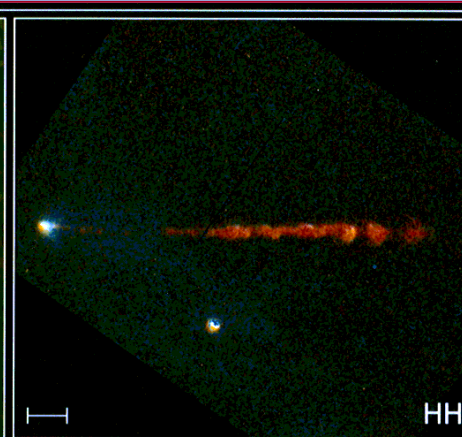
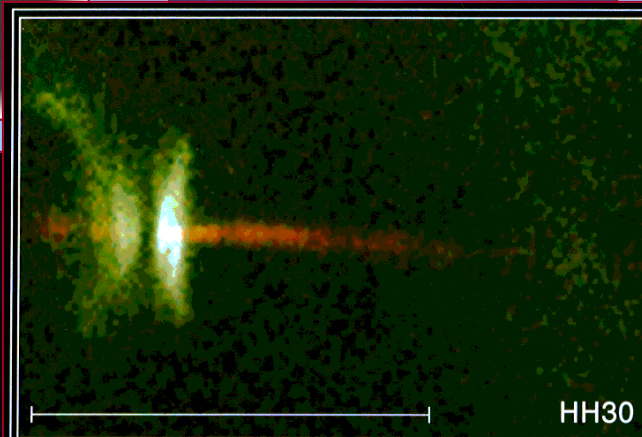
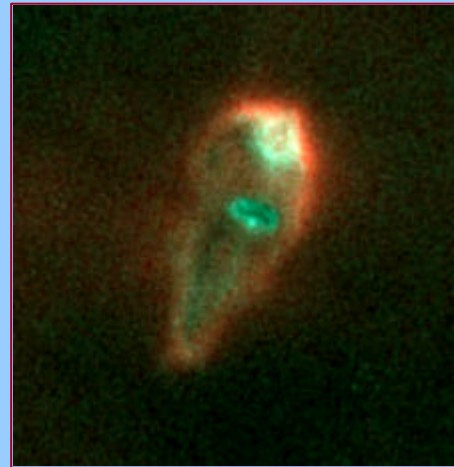
Come lavora l'astronomia ?

- Misure di posizione e moti: coordinate
- Misure di potenza: fotometria
- Misure di temperatura: spettroscopia
- Misure di distanza: parallassi
 - indicatori di distanza
 - legge di Hubble $v = H d$
- Misure di massa: III legge di Keplero
 - $a^3/P^2 = M_1 + M_2$
 - dinamica $\Rightarrow \frac{1}{2} v^2 = GM/R$
- Telescopi, interferometri, radiotelescopi, osservatori orbitanti, sonde spaziali, rivelatori ad alta efficienza
- Modelli teorici e loro verifica

Il Sole visto dallo Skylab



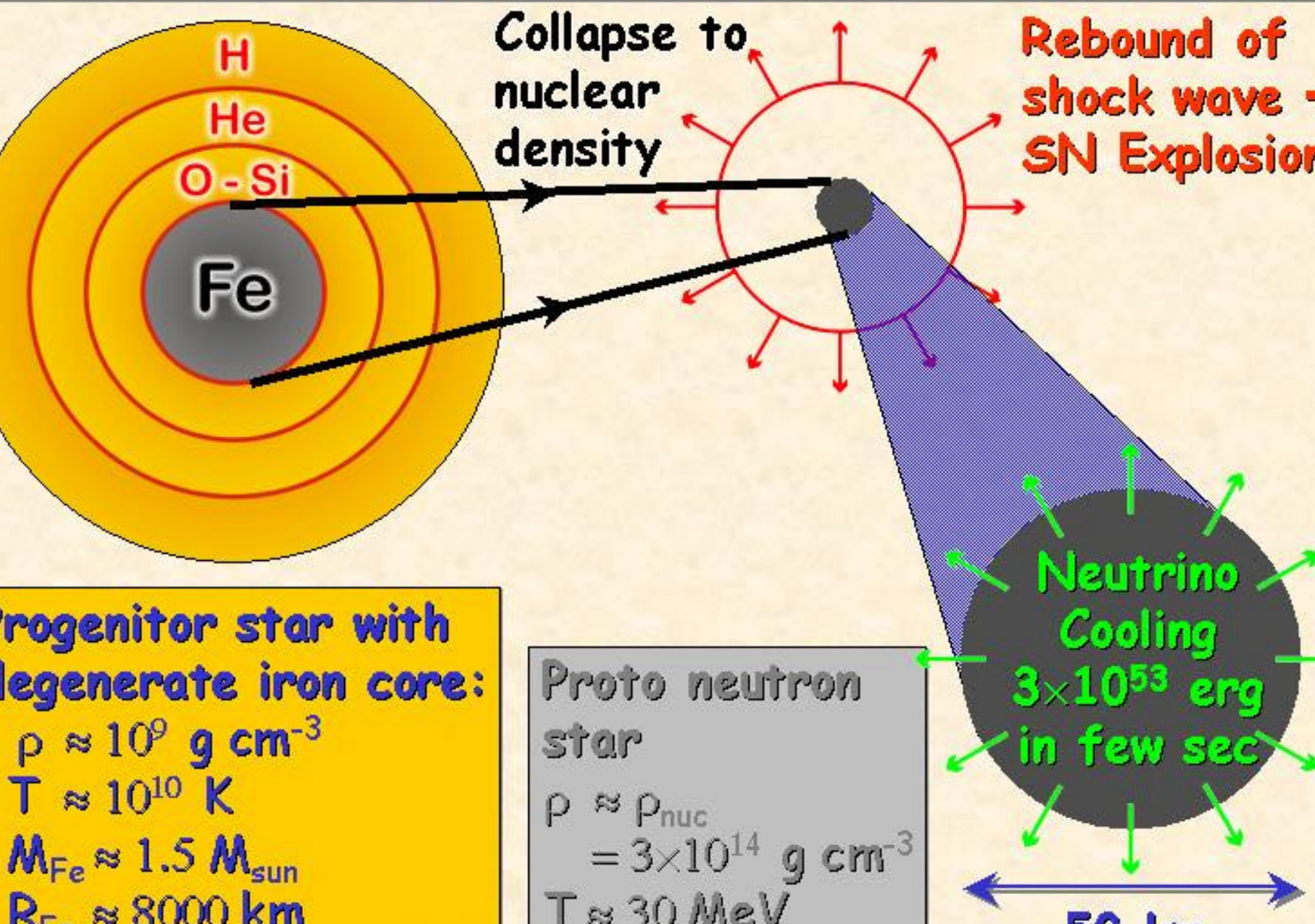
Fasi dinamiche





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

Stellar Collapse and Supernova Explosion

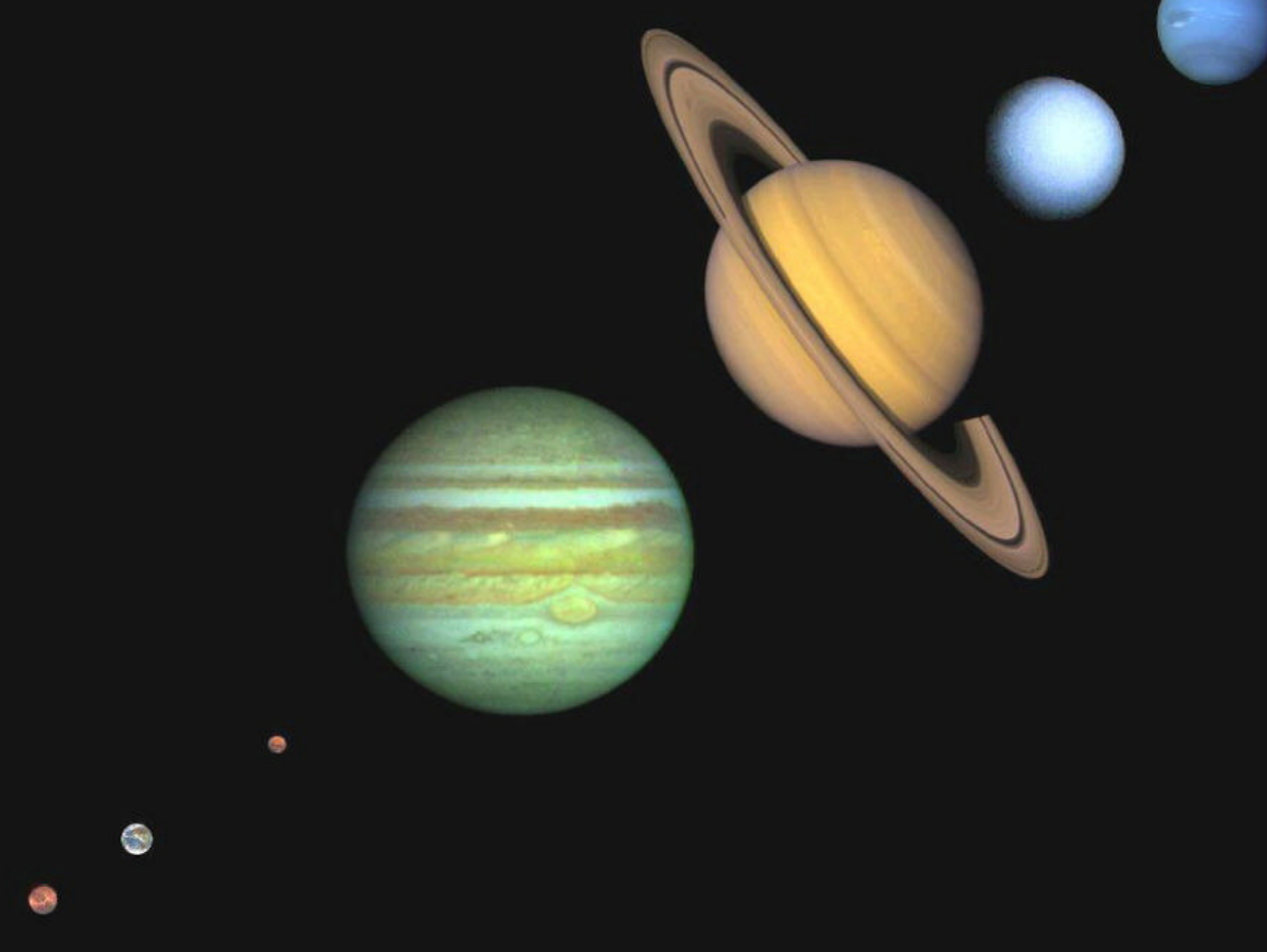


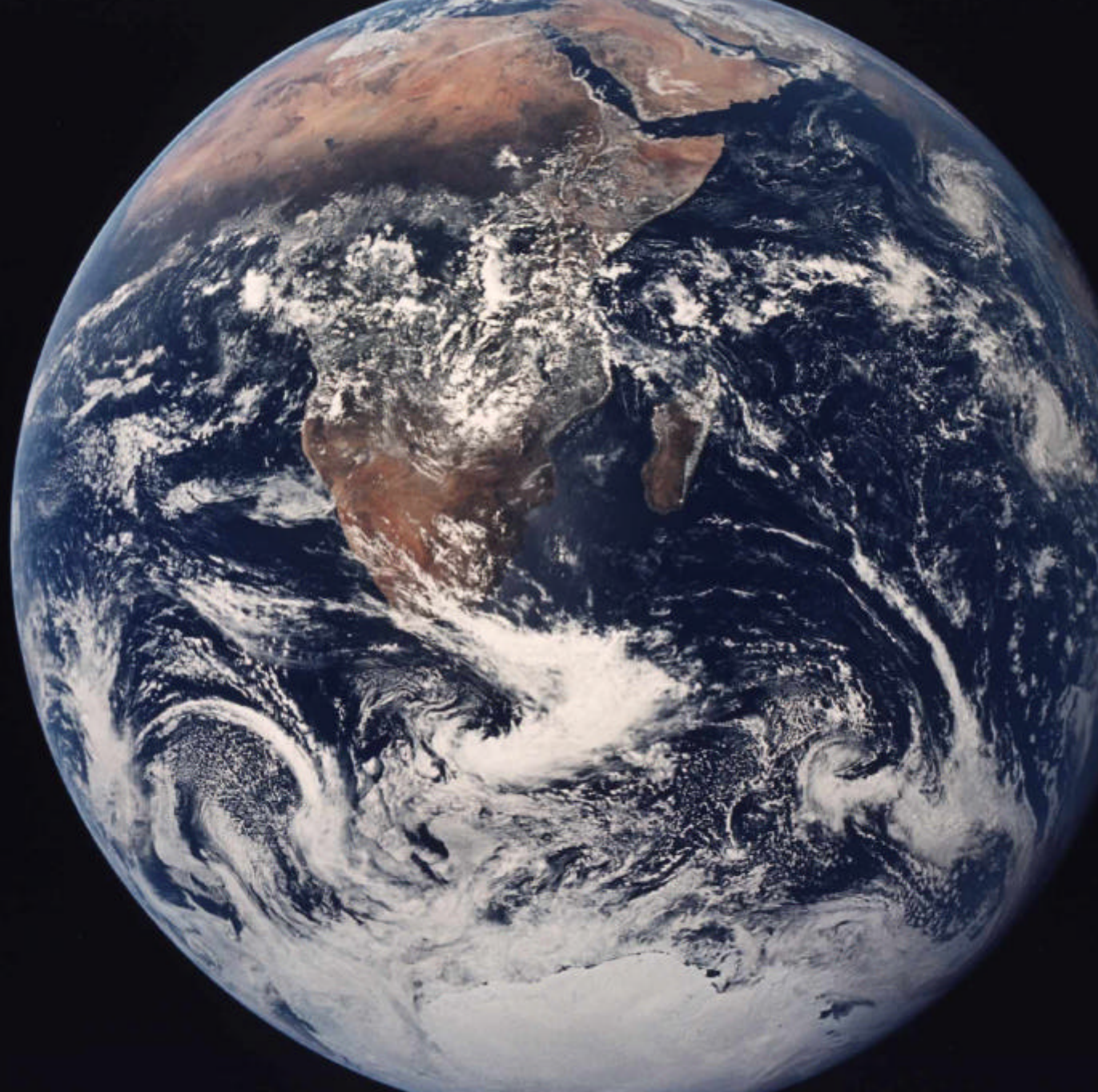
Progenitor star with degenerate iron core:
 $\rho \approx 10^9 \text{ g cm}^{-3}$
 $T \approx 10^{10} \text{ K}$
 $M_{\text{Fe}} \approx 1.5 M_{\text{sun}}$
 $R_{\text{Fe}} \approx 8000 \text{ km}$

Proto neutron star
 $\rho \approx \rho_{\text{nuc}} = 3 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$
 $T \approx 30 \text{ MeV}$

Neutrino Cooling
 $3 \times 10^{53} \text{ erg}$
in few sec
50 km

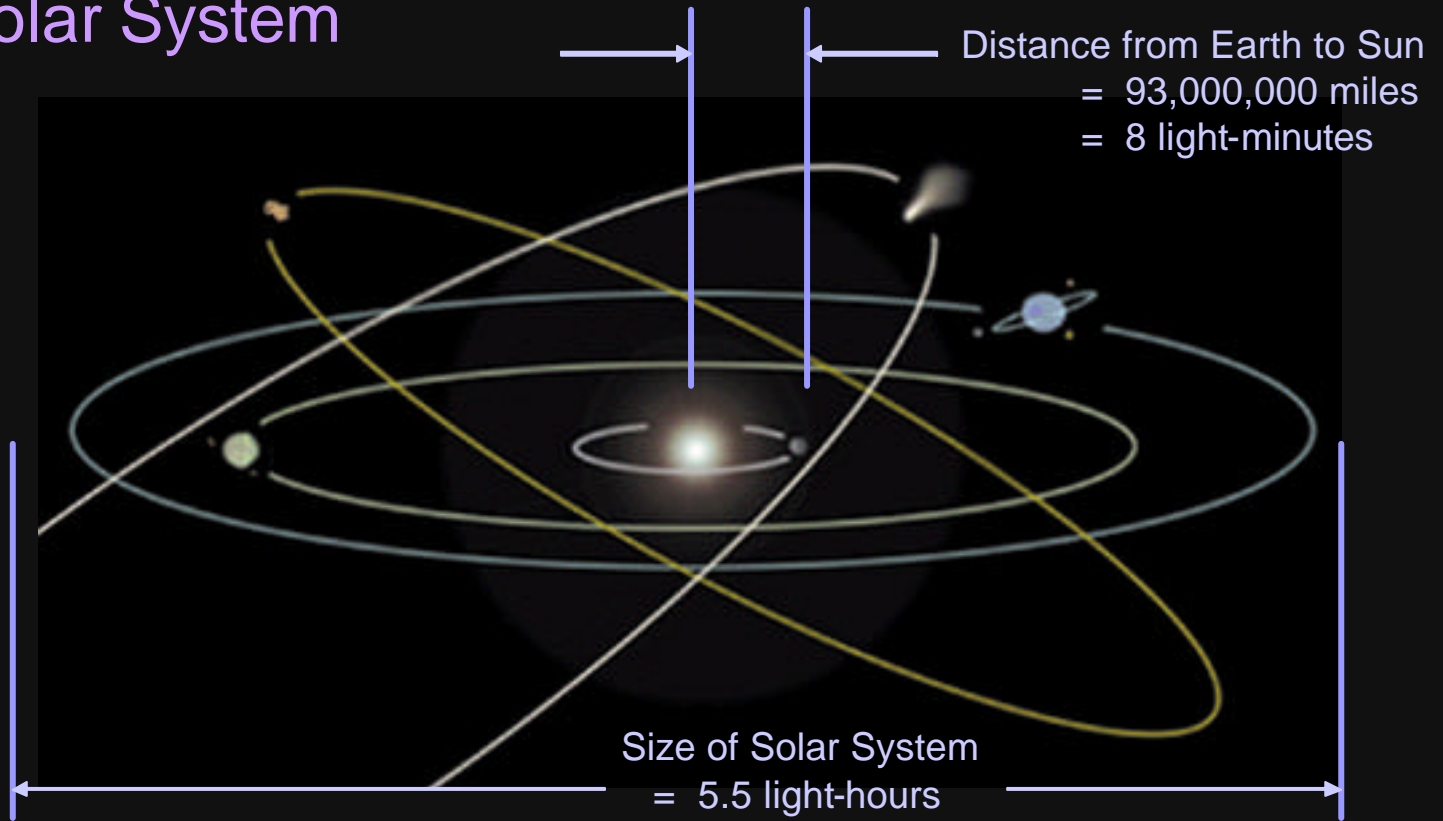




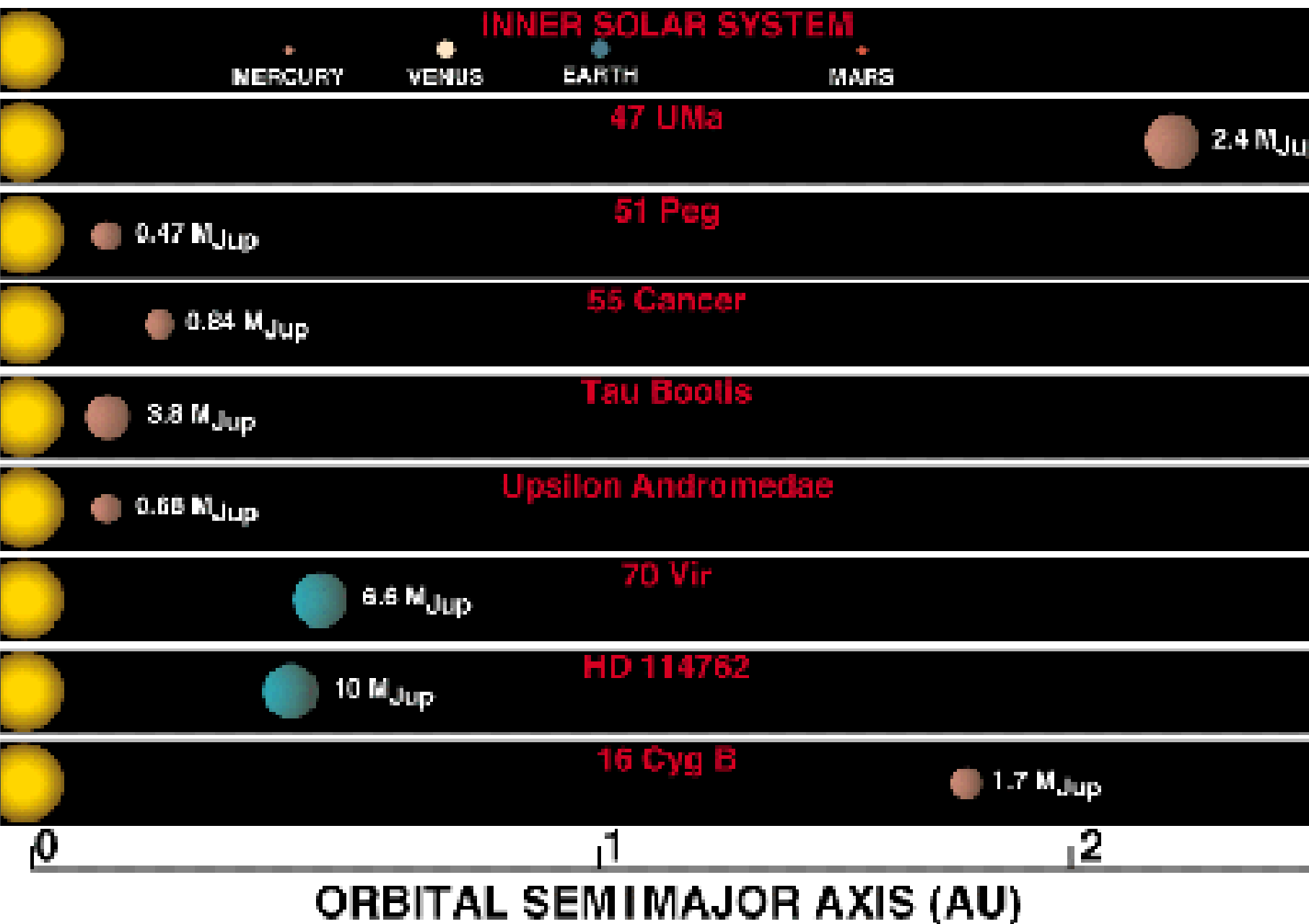


What is a Galaxy ?

Solar System



PLANETS AROUND NORMAL STARS



What is a Galaxy?

Stellar Region

Sun
(solar system
too small to be
seen on this scale)

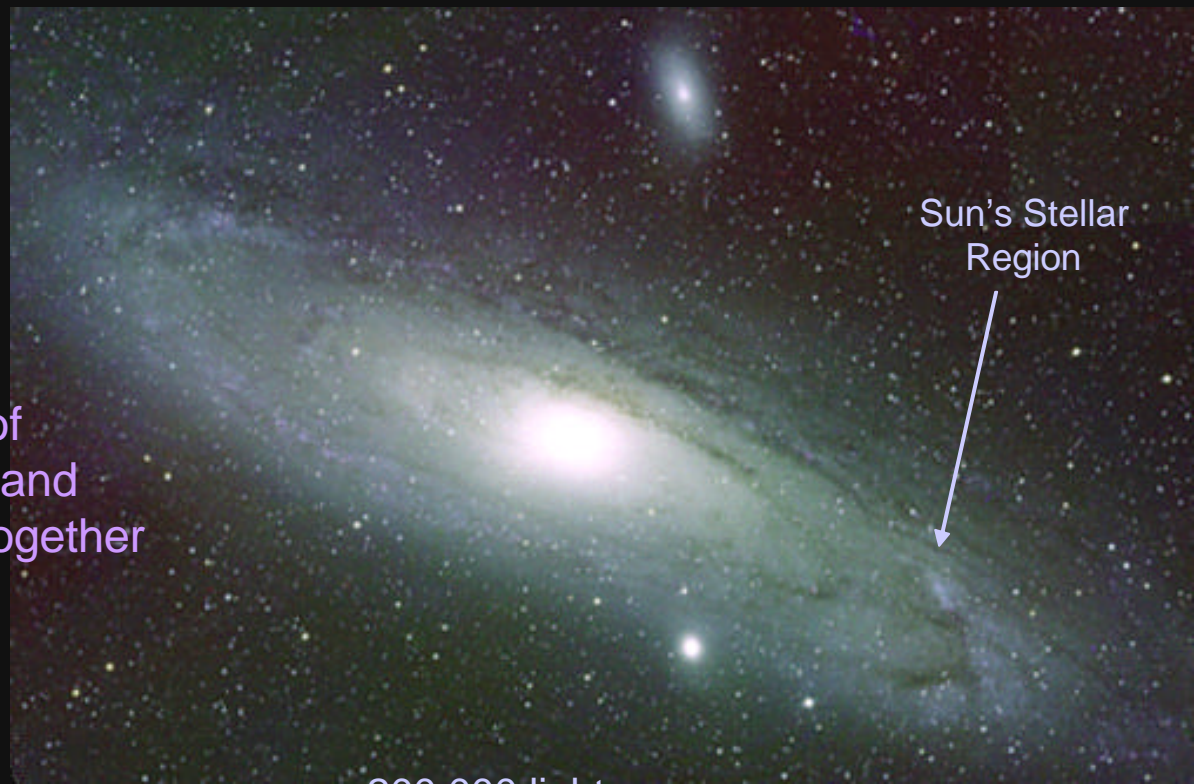


30
light-years

What is a Galaxy?

Galaxy

a massive collection of stars, gas, and dust kept together by gravity



Sun's Stellar Region

200,000 light-years

Le dimensioni dell'Universo (1)

- La misura delle distanze in astronomia: la mancanza di prospettiva a grandi distanze
- L'angolo di parallasse
- Esempio: la larghezza di un dito a 30 metri copre un'angolo di parallasse di 1 minuto d'arco, corrispondente alla massima risoluzione angolare degli occhi
- Le parallassi possono essere ricostruite con osservazioni separate (triangolazioni)

Lo spostamento
Doppler permette
di misurare
velocità radiali



Earth

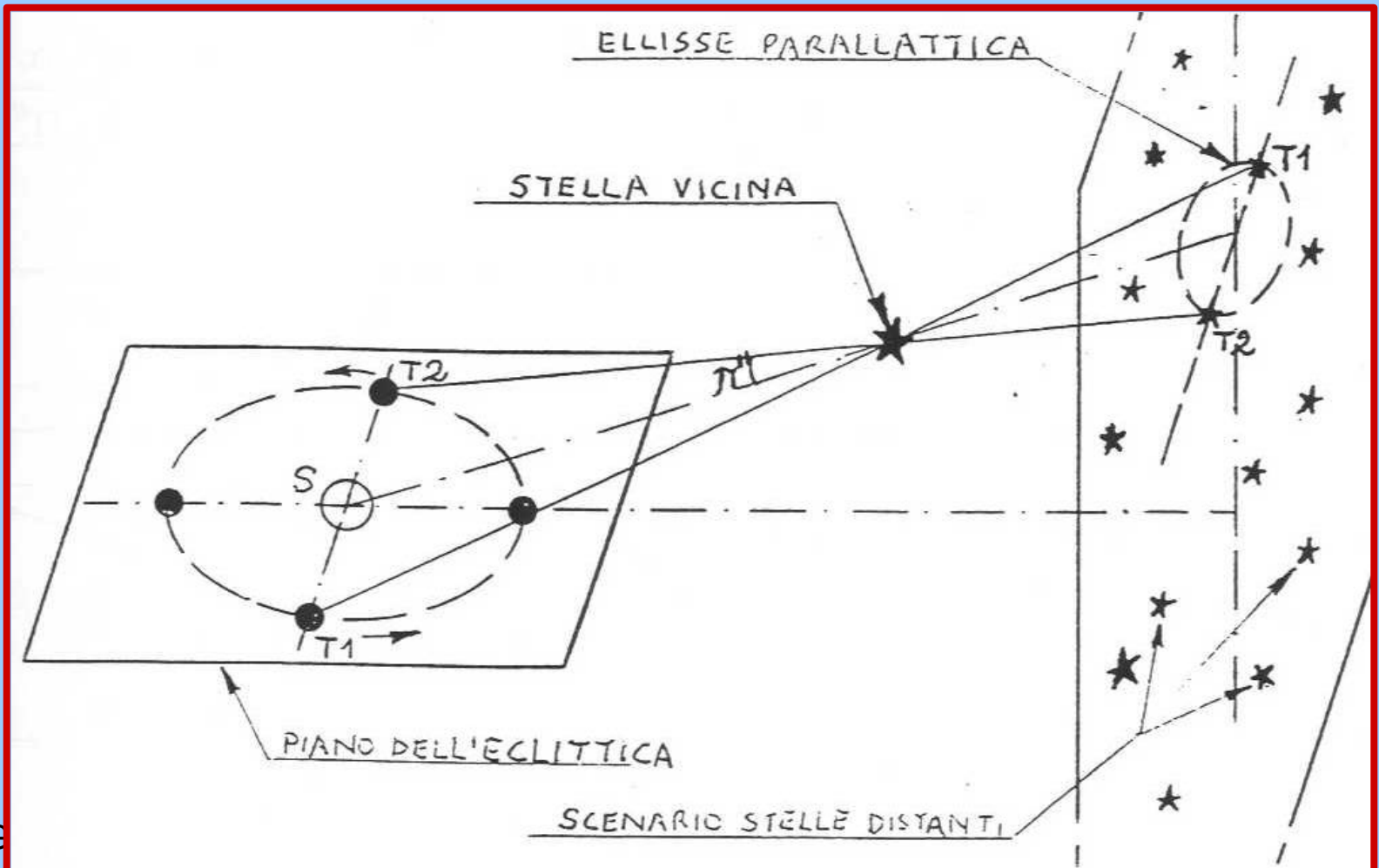
Proper
motion

Radial
velocity

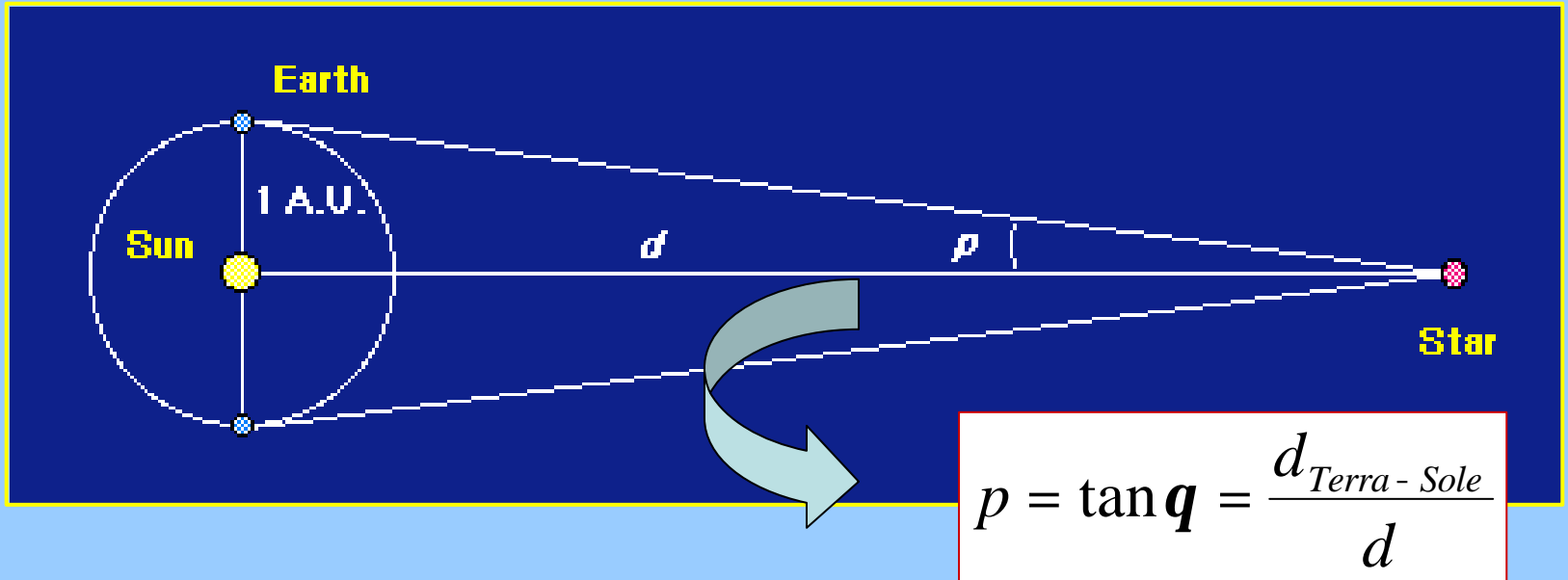


Parallasse annua

Parallasse misurata con "occhi" distanti 300 milioni di km



Bessel (1784-1864) misura la distanza di 61 Cygni con il metodo della parallasse annua



$$1 \text{ sec} = p / 180 \cdot 60 \cdot 60 = 4.8 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$

La parallasse $p = 1$ secondo d'arco corrisponde alla distanza $d = 1$ parsec, il cui valore numerico è: $1.5 \times 10^{13} / 4.8 \times 10^{-6} = 3.1 \times 10^{16} \text{ m} = 3,26 \text{ a.l.}$

Le dimensioni dell'Universo (2)

- Limiti strumentali alla risoluzione angolare:

limite di diffrazione

$$\theta = 1.22 \lambda / D$$

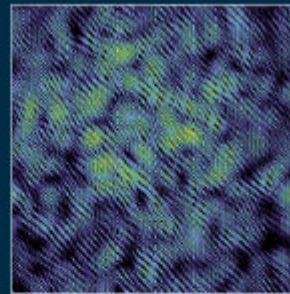
- Per misurare piccoli angoli di parallasse occorre avere un piccolo λ / D , quindi un grande D
- Effetti atmosferici nelle bande ottiche (*seeing*): la turbolenza atmosferica "sfoca" le immagini

INTERFEROMETRY WITH THE VLT

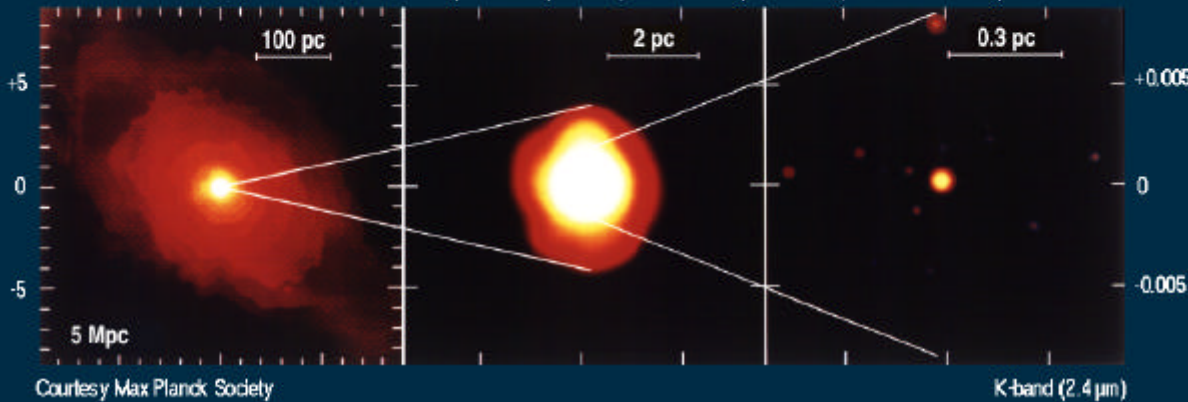
Coherent combination of light from two or more telescopes results in interference fringes.

Through computer analysis of the fringes, a high-resolution image of the source can be constructed.

The VLTI resolving power equals that of a 130 m telescope



Natural Seeing ($0''.5$ Res) Adaptive Optics ($0''.06$ Res) VLTI ($0''.0024$ Res)



Courtesy Max Planck Society

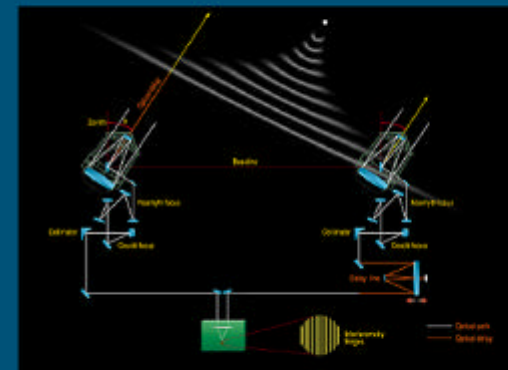
K-band ($2.4 \mu\text{m}$)

ESO VLT V3 29

© ESO EPR

Optical path length differences are caused by

- the static geometric path length difference between the telescopes in a certain configuration
- the diurnal motion of the astronomical source during observation due to Earth's rotation
- the rapid path length variations due to atmospheric disturbances and/or mechanism vibrations along the optical path length



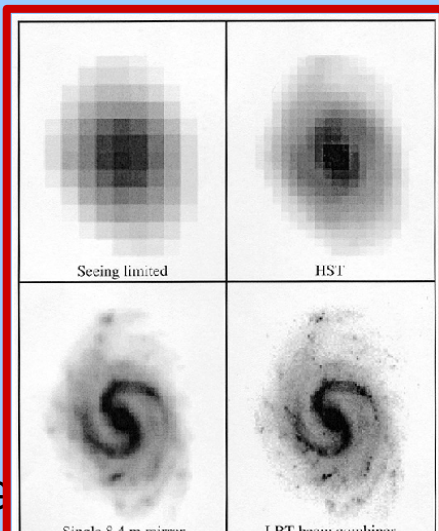
Optical path length differences must be corrected by the Delay Line System.

Interferometria

P. Galeotti

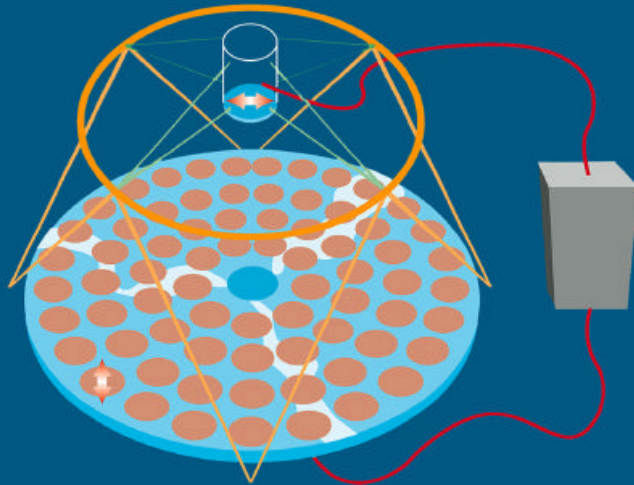
Fisica e l'universo

Interferometria con LBT



Ottiche attive e adattive

ACTIVE OPTICS

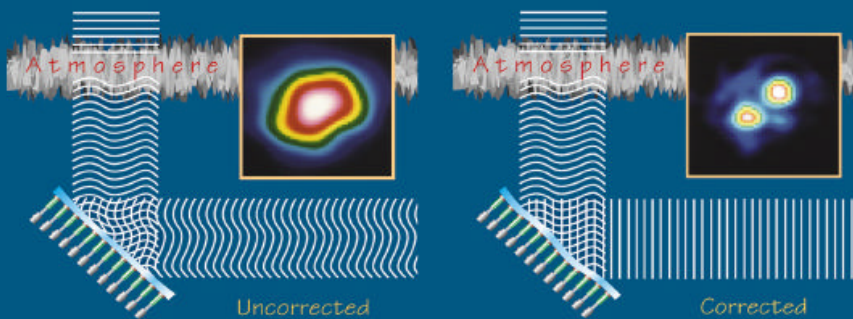


Correction of the deformation/
displacement of the primary and
secondary mirrors caused by:

- gravitation
- polishing inaccuracies
- tube flexure, etc.

Correction is achieved through
an active computer controlled
mirror support

ADAPTIVE OPTICS



Correction of the deformation of
the wavefront (of the light)
caused by turbulence

Correction is achieved by means
of a flexible mirror in front of the
detector (+ tip/tilt secondary
mirror)

Le dimensioni dell'Universo (3)

Da Terra si ottengono precisioni fino a 0.1 secondi d'arco, cioè si misurano distanze fino a 10 parsec

Con metodi interferometrici e con l'uso delle ottiche adattive si raggiungeranno i 0.001 secondi d'arco, cioè i 1000 parsec

Dallo spazio (HIPPARCOS e HST) oggi si giunge ai 100 - 1000 parsec e si punta al milione di parsec con la missione GAIA

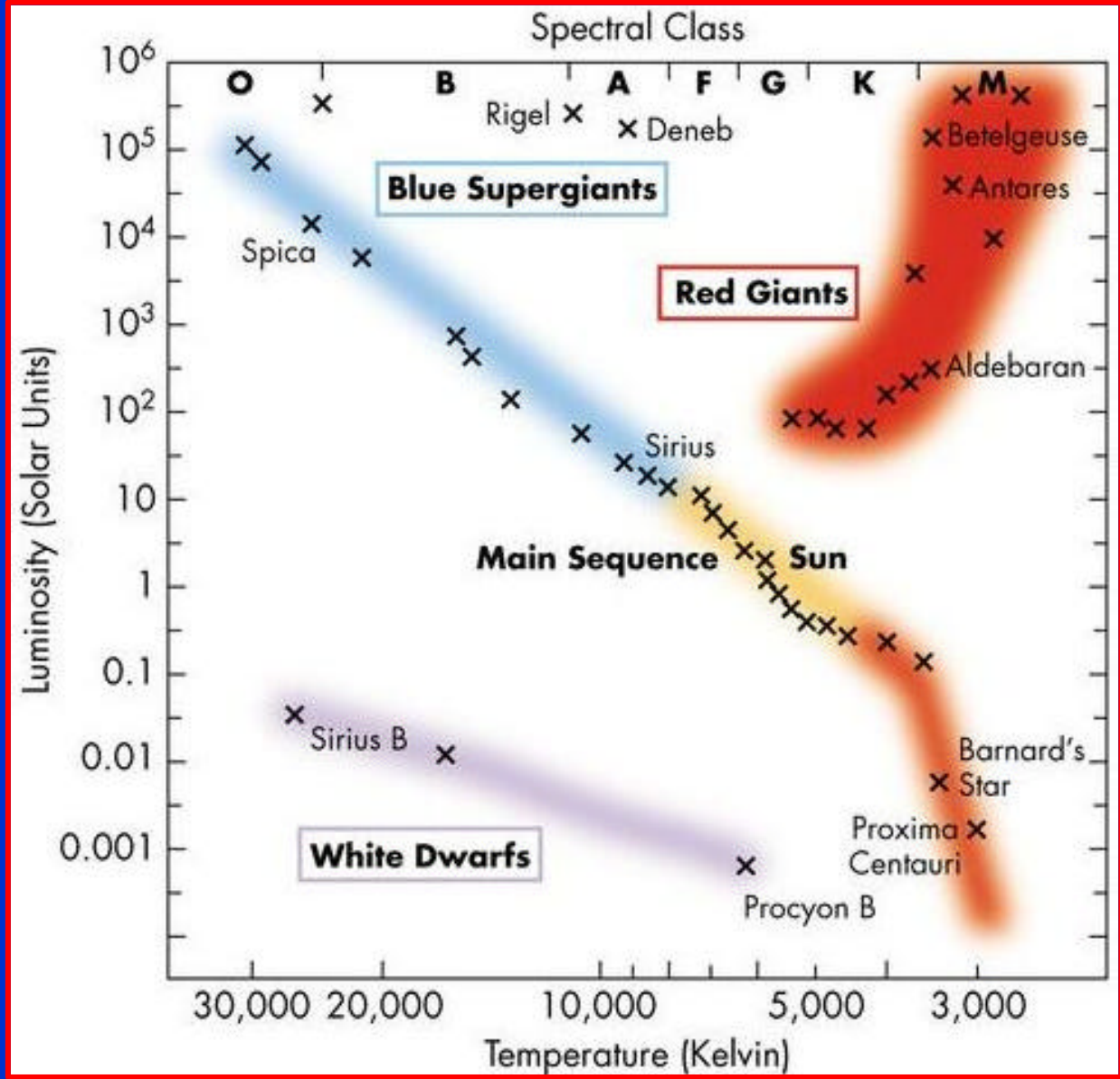
In radioastronomia VLBI (spaziale) si arriva fino ai 100 mila parsec

Qui si arrestano le misure dirette

Dalla legge di Stefan

$$S = aT^4$$

segue

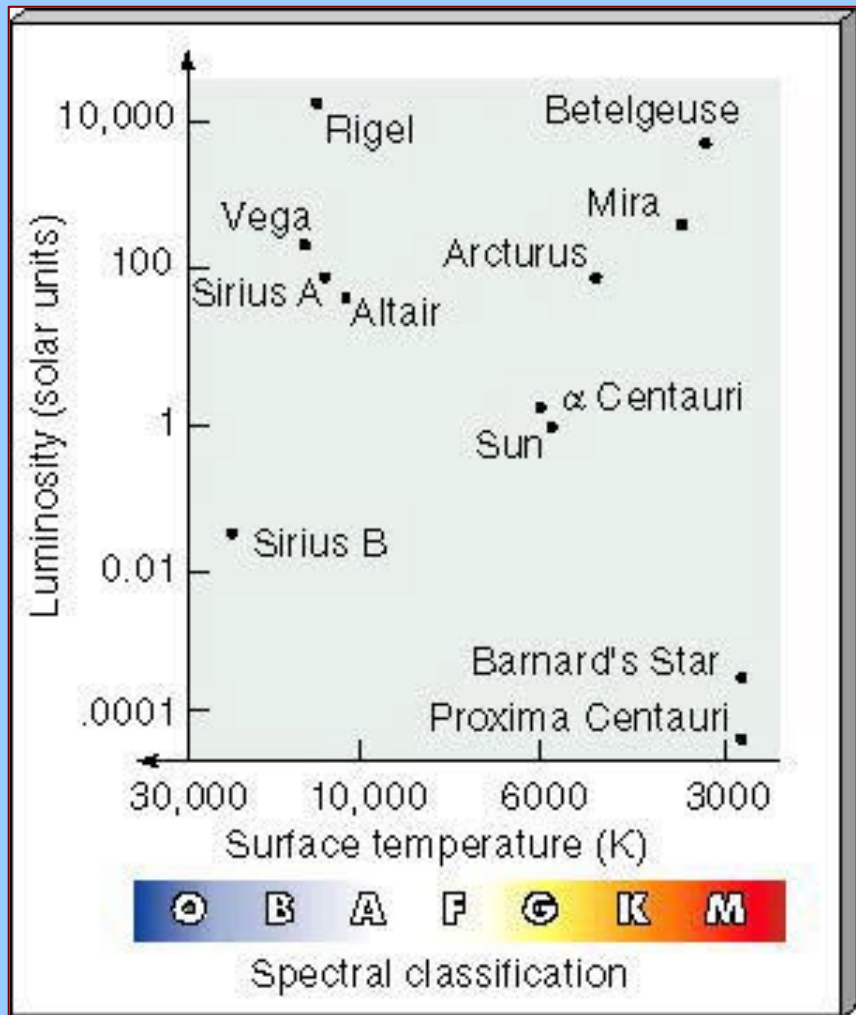


$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$$

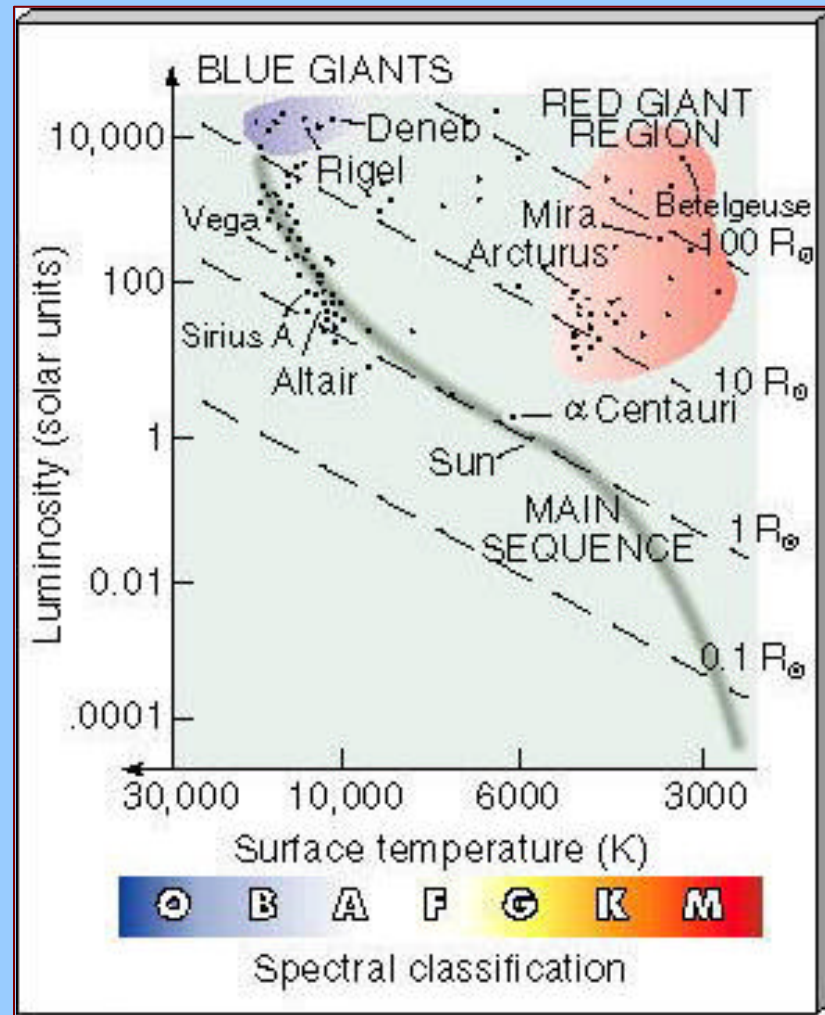
Diagramma di Hertzsprung-Russell

Correlazione fra luminosità e tipo spettrale

Stelle vicine



Sequenza principale e giganti

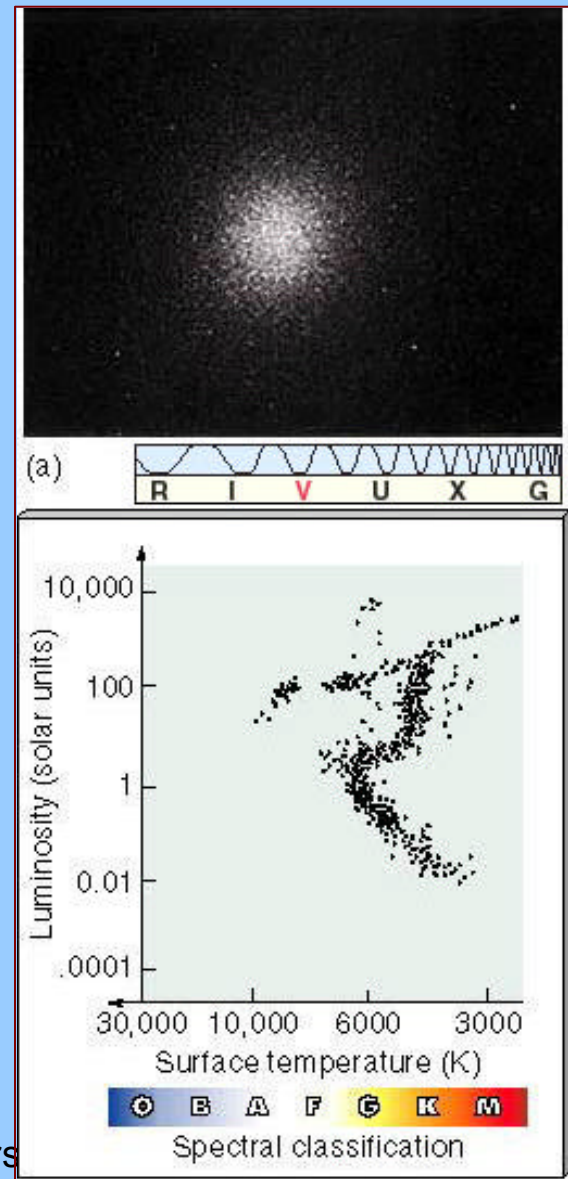
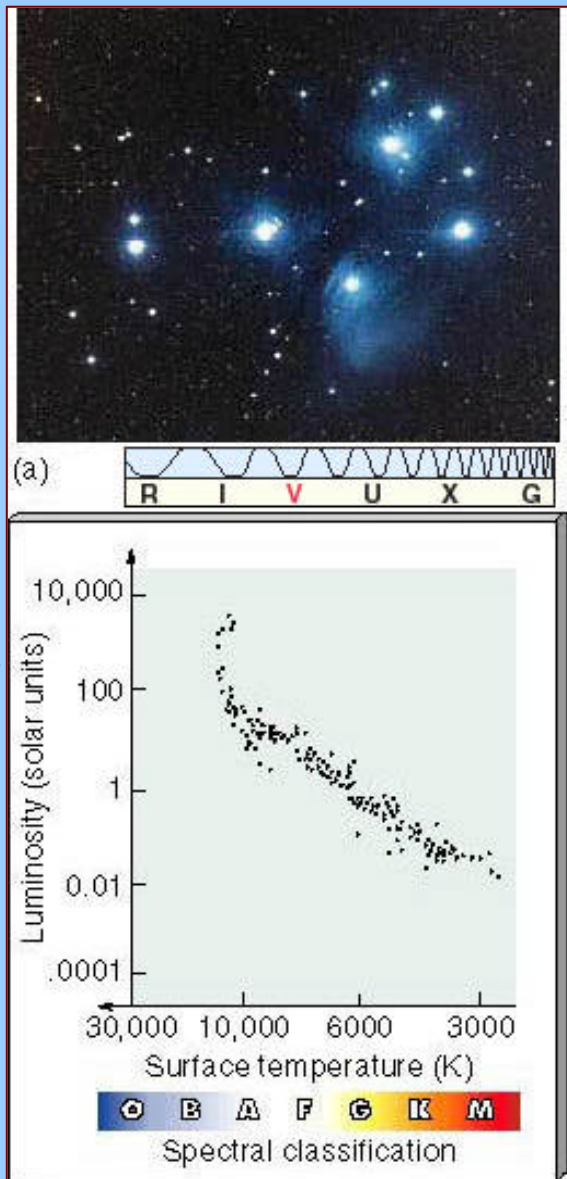


Diagrammi HR di ammassi stellari

Ammassi aperti

Meno di 10^3 stelle (pop. I)

Grandi masse



Ammassi globulari

Fino a 10^5 stelle (pop. II)

Piccole masse

Le dimensioni dell'Universo (4)

Parallassi spettroscopiche:
le stelle sono "lampadine"
speciali: tutte le stelle di
un dato colore
(temperatura) hanno la
stessa luminosità intrinseca

Il confronto tra luminosità
apparente (misurata) e
luminosità intrinseca
(stimata su stelle vicine
con parallasse nota)
permette la misura di
distanza

$$L_{app} = L_{intr} \frac{10^{\frac{m - M}{5}}}{r^2}$$

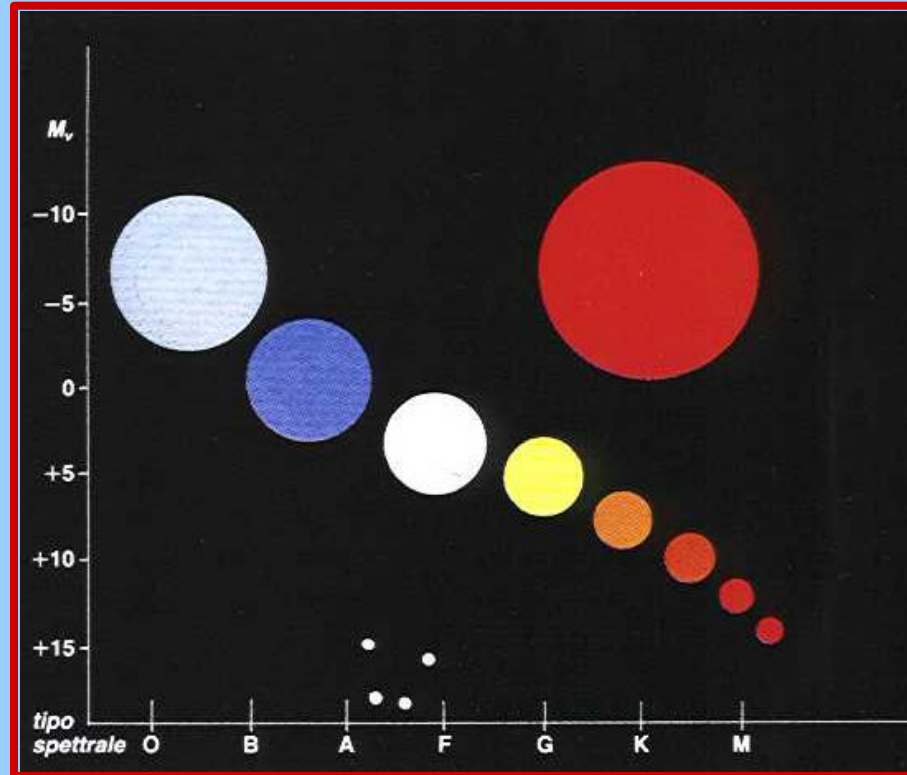


Diagramma di
Hertzsprung - Russell
(1911)

Modulo di distanza

$$m = m_0 - 2,5 \log \frac{F}{F_0} \quad \text{legge di Pogson}$$

$$F = \frac{LS}{4p d^2} \quad \text{per la costanza del flusso}$$

$$m = m_0 - 2,5 \log L + 2,5 \log(4p) + 5 \log d + 2,5 \log \frac{F_0}{S} = -2,5 \log L + 5 \log d + K$$

$$M = -2,5 \log L + 5 + K \quad \text{alla distanza di 10 pc}$$

$$m - M = 5 \log d - 5$$

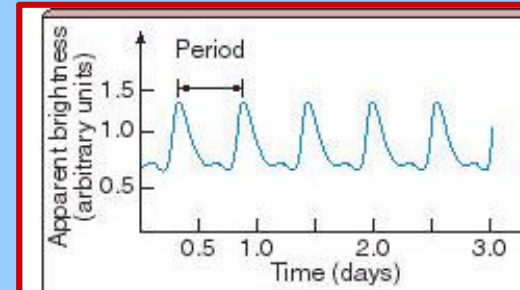
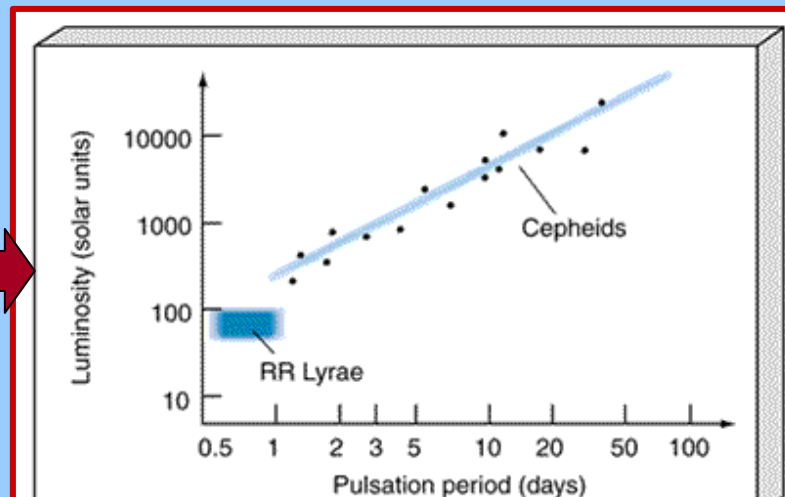
Stella	D (pc)	m	M
α Cen	1.3	0.3	4.7
Vega	8	0.03	0.5
Aldebaran	20	0.8	-0.8
Polare	200	2.12	-4.5

Indicatori di distanza

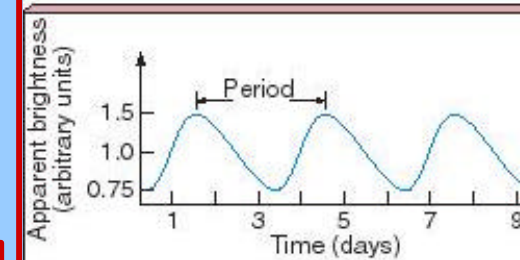
- Oggetti di cui si può stimare la luminosità assoluta
- Novae, supernovae, ammassi globulari, stelle variabili
- Le Cefeidi: variabili regolari con periodo proporzionale alla luminosità intrinseca (Henrietta Leavitt 1912)

$$\log \left(\frac{L_{media}}{L_{Sole}} \right) = 5 \log P_{giorni} + 2.47$$

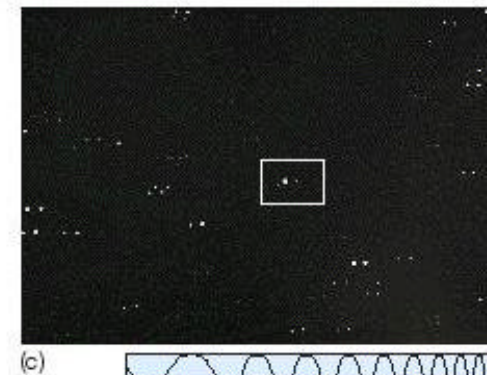
P. Galeotti



(a)



(b)



(c)

Cepheids in IC 4182

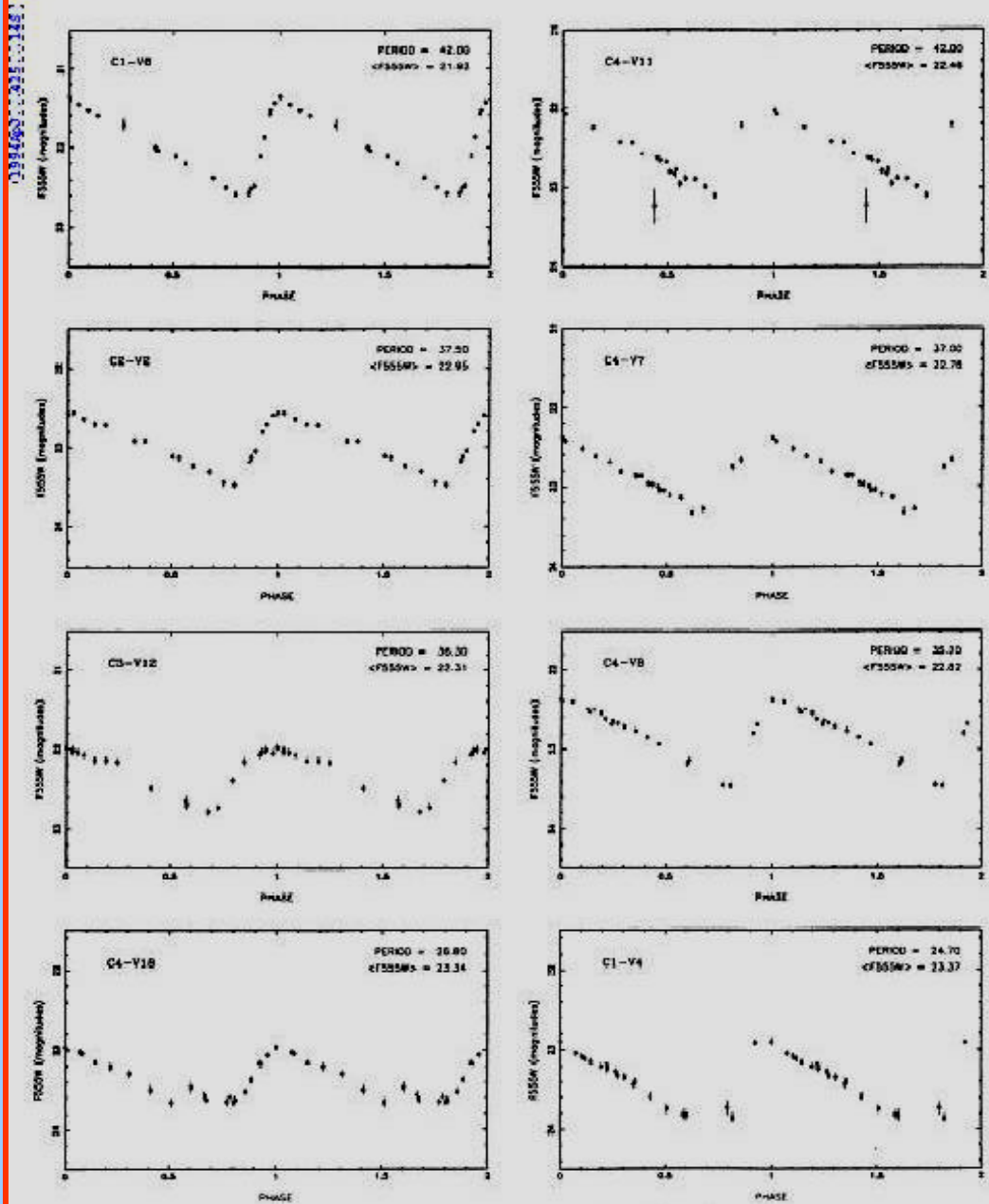


FIG. 4.—Light curves, mean magnitudes, and periods for variable stars discovered

P-L relations for IC 4182 Cepheids

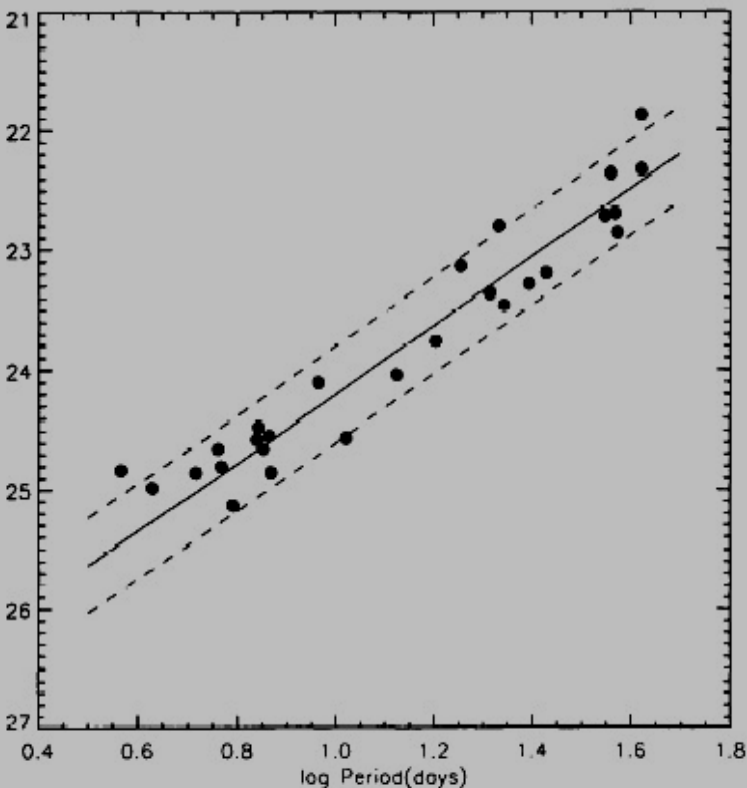


FIG. 7a

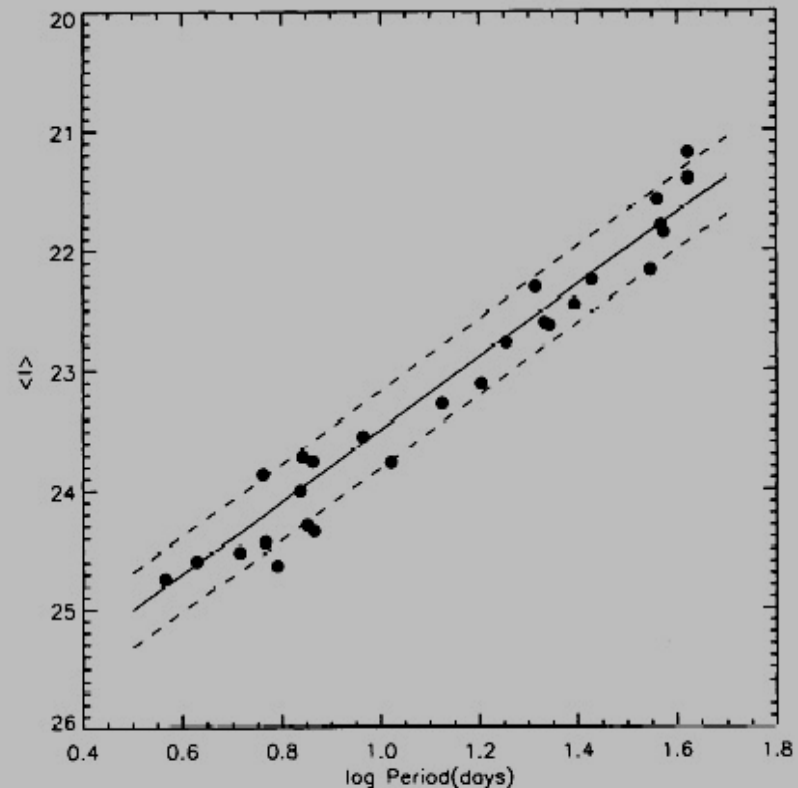


FIG. 7b

FIG. 7.—(a) *P-L* relation for Cepheids in IC 4182 in *V* (see § 5 for details). (b): *P-L* relation for Cepheids in IC 4182 in *I* (see § 5 for details).

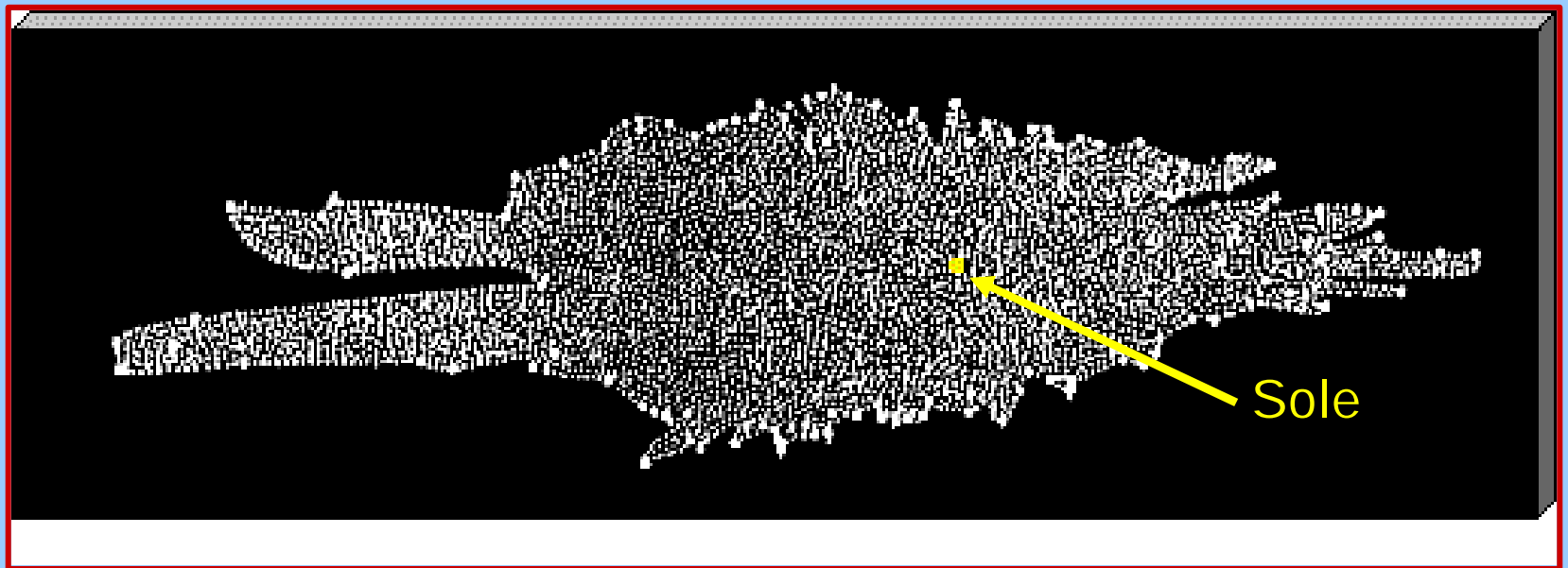
Distance = 4.7 ± 0.2 Mpc, $H_0 = 52 \pm 9$ km s⁻¹ Mpc⁻¹

Le dimensioni dell'Universo (5)

Via Lattea

Modello a disco di William Herschel (1780)

$D=2$ kpc



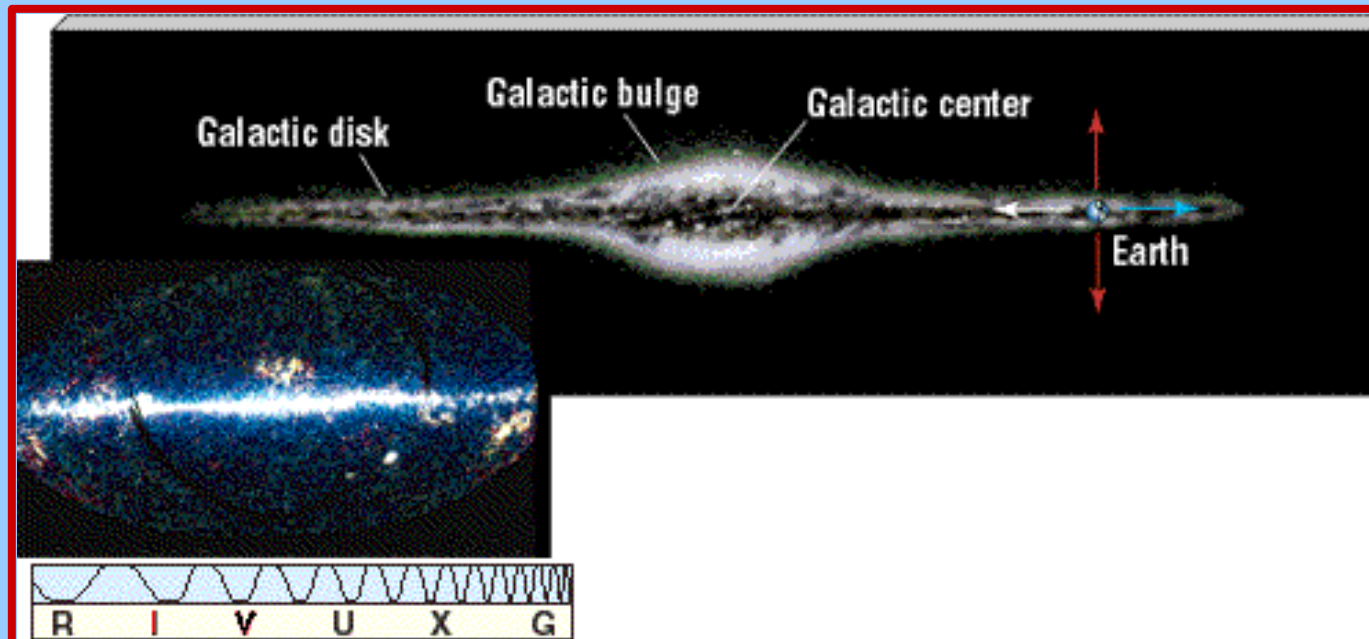
La Via Lattea

Il dibattito Kapteyn - Shapley (1920) sulla struttura della Galassia.

L'assorbimento interstellare permette di osservare solo fino a circa 2 kpc.

Si può guardare "fuori dal disco" riferendosi agli ammassi globulari.

Il diametro della Galassia è $D=50$ kpc, lo spessore del disco 100 pc



Le dimensioni dell'Universo (6)

Hubble e la distanza della
nebulosa di Andromeda col
metodo delle Cefeidi (1923):

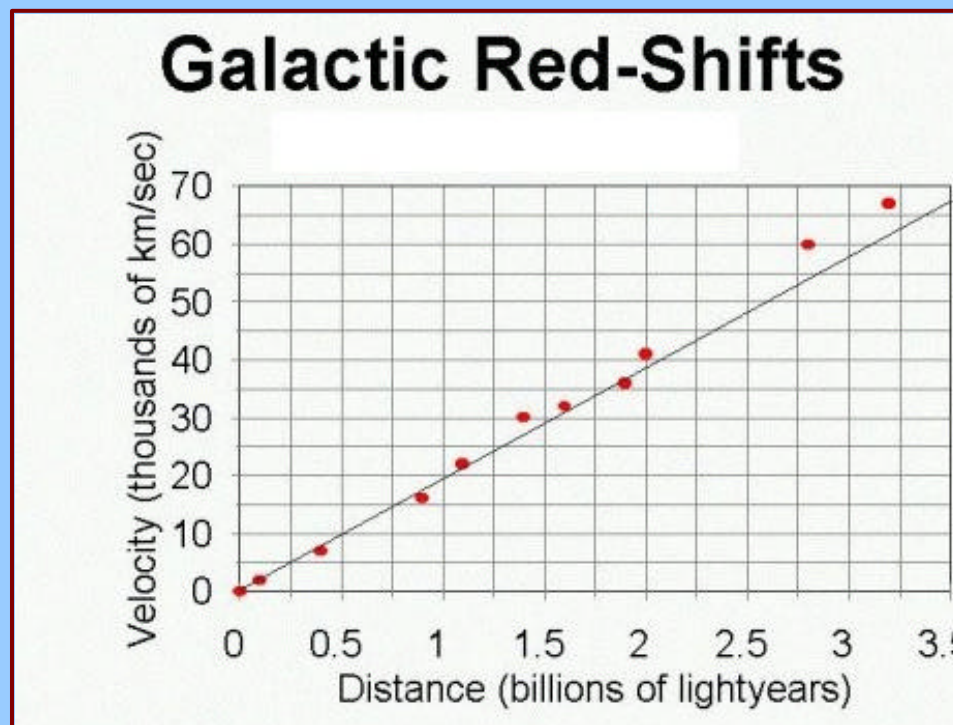
$$d=1 \text{ Mpc}$$

Spettroscopia, effetto
Doppler: $\lambda/\lambda_0 = v/c$

Le galassie esterne

La legge di Hubble
sulla recessione delle
galassie (1929):

$$v=Hd$$



Le dimensioni dell'Universo (7)

● Distanze dirette: 100 pc

● Distanze spettroscopiche: 50 kpc

● Distanze con indicatori: 20 Mpc

● Distanze con la legge di Hubble:

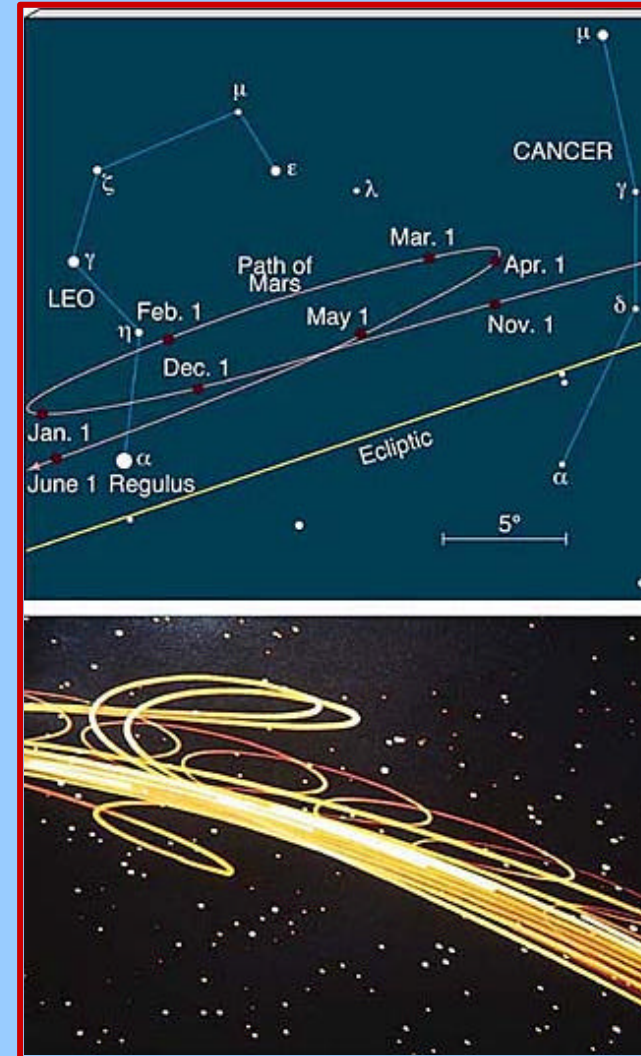
100 Mpc --> 10 Gpc

● E oltre ? L'Universo è finito o infinito ?

Le forme dell'Universo (1)

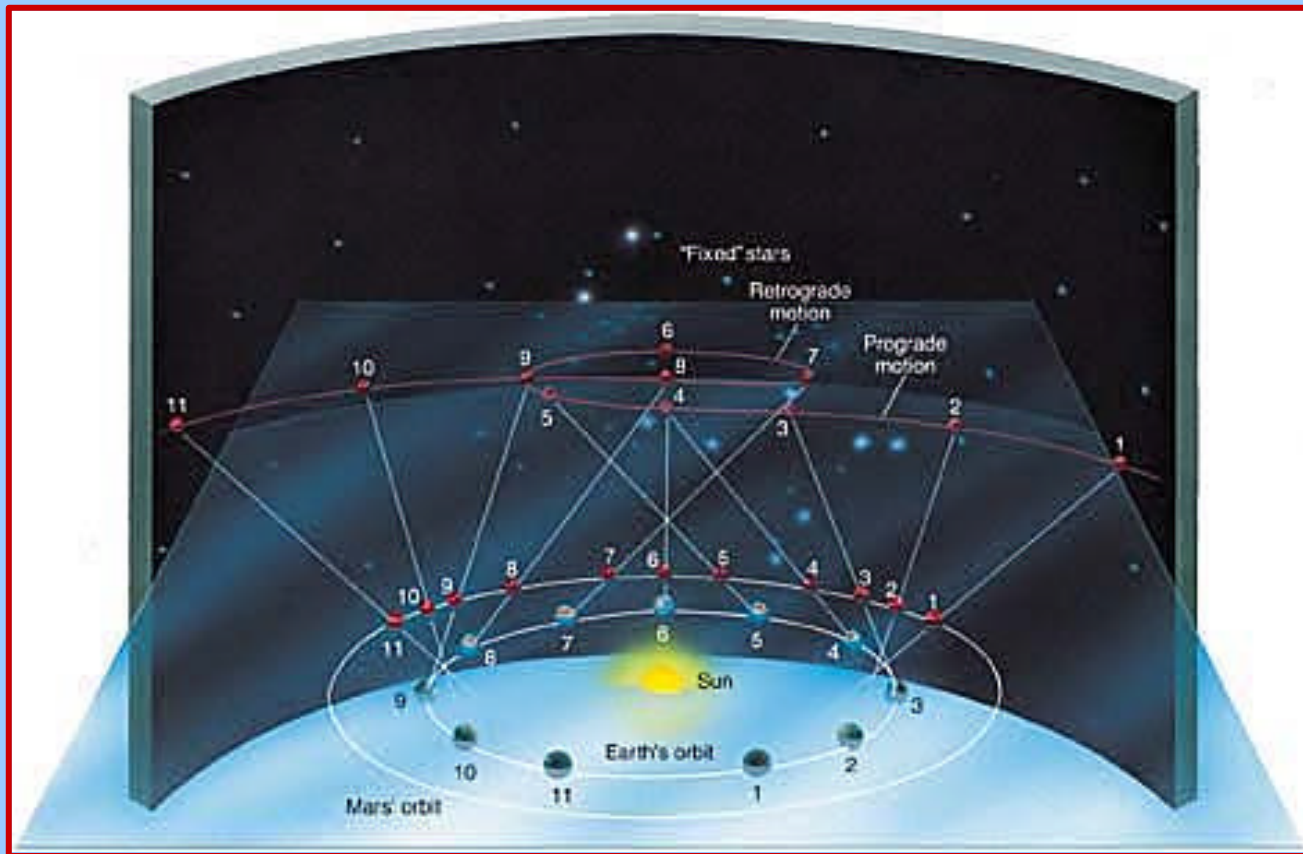
Forma tolemaica geocentrica:

- l'Universo geometrico (euclideo)
- Terra (centro), Sole, pianeti, stelle
- sfera celeste, orbite circolari



● Forma copernicana eliocentrica:

➤ Sole, pianeti (Terra), stelle



● Forma newtoniana:

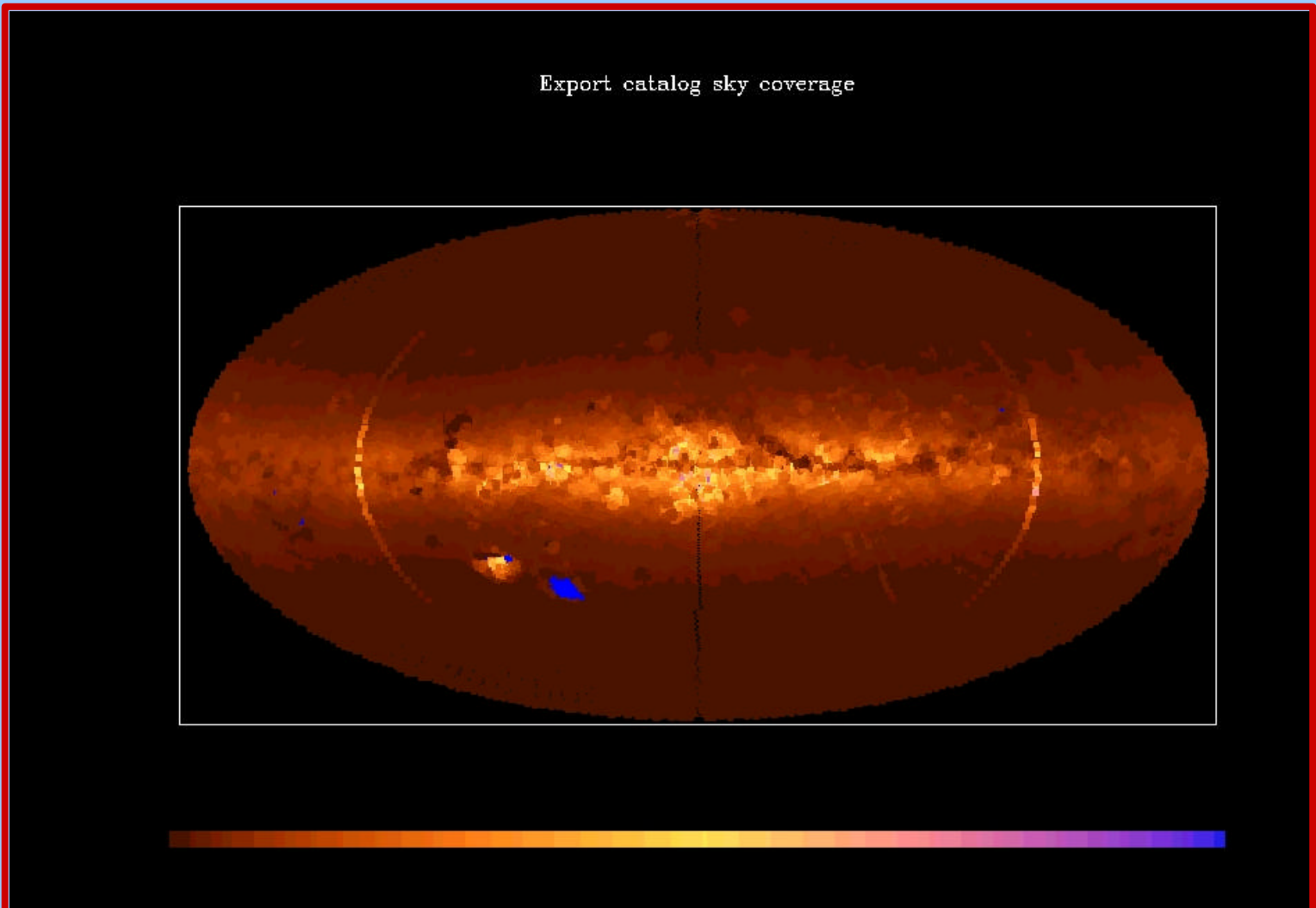
- Universo dinamico
- stelle, Galassia, galassie esterne

● Forma relativistica:

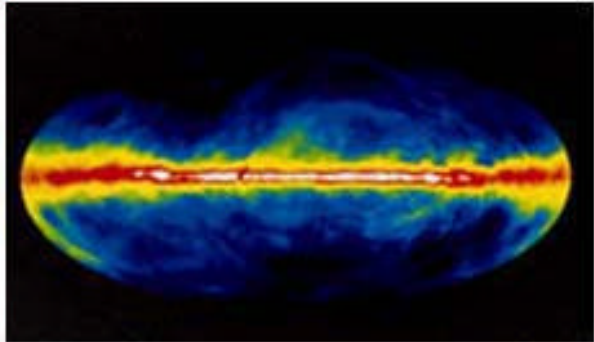
- la dinamica gravitazionale come geometria
- la geometria dell'Universo a grande scala

Le forme dell'Universo (2)

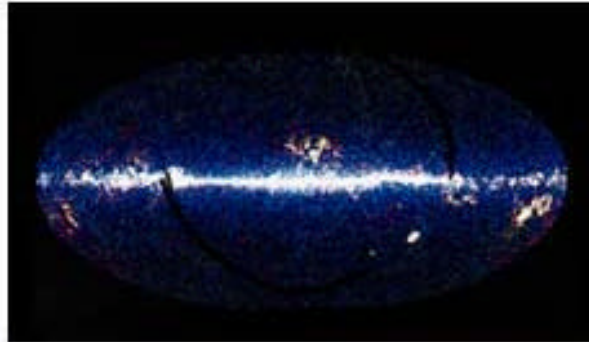
Moderne mappe celesti (GSC-2), le stelle



L'Universo a diverse lunghezze d'onda



(a) 



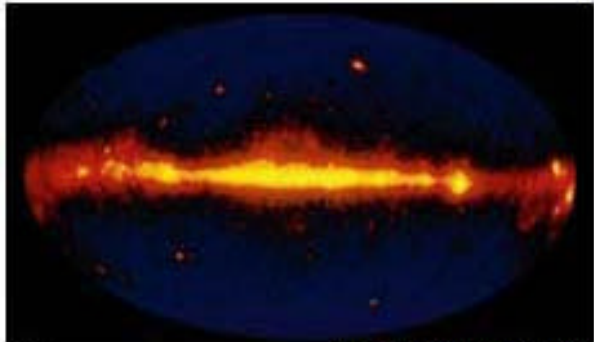
(b) 



(c) 



(d) 

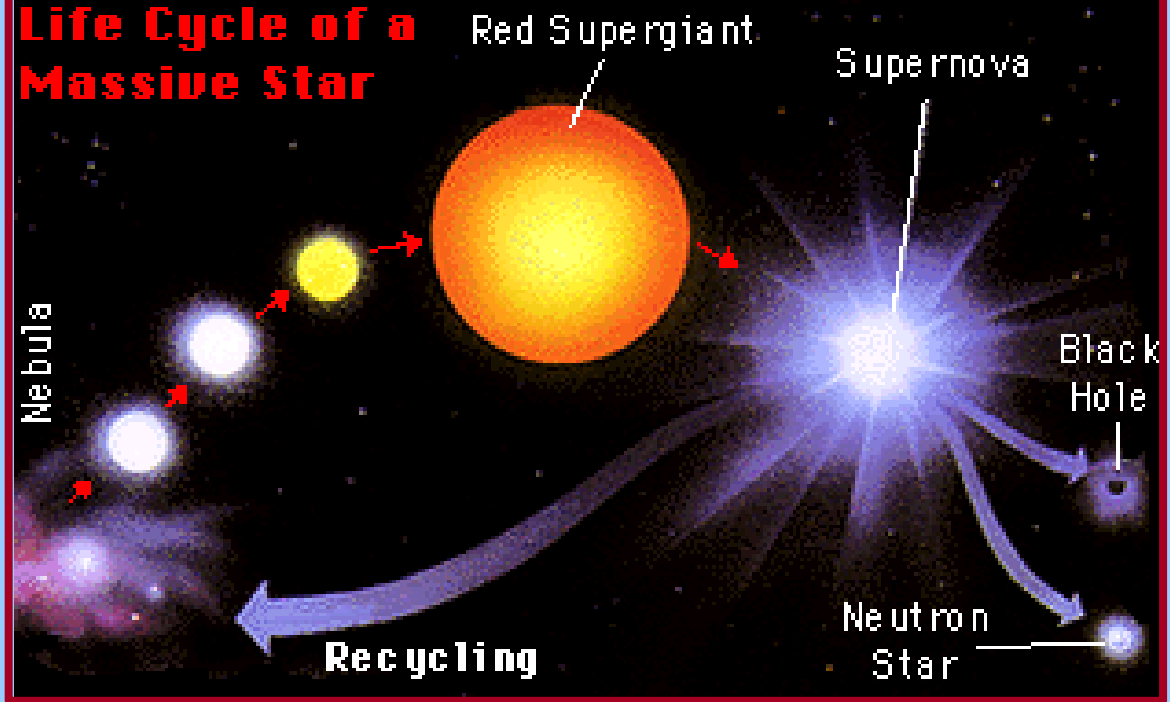


(e) 

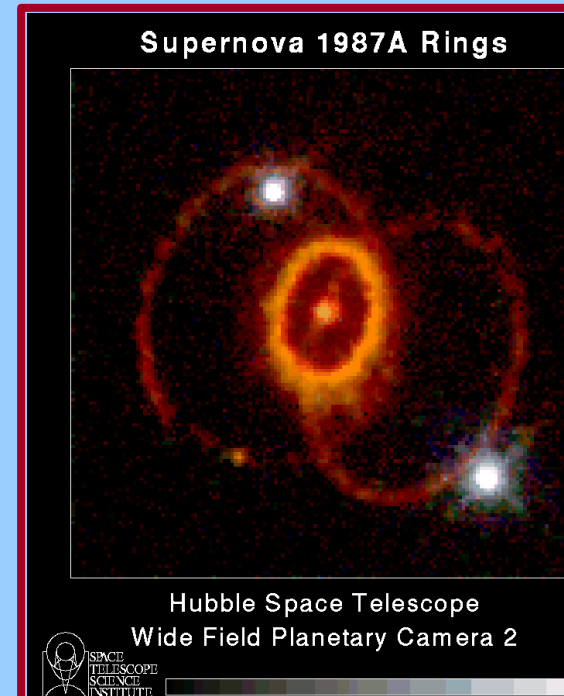
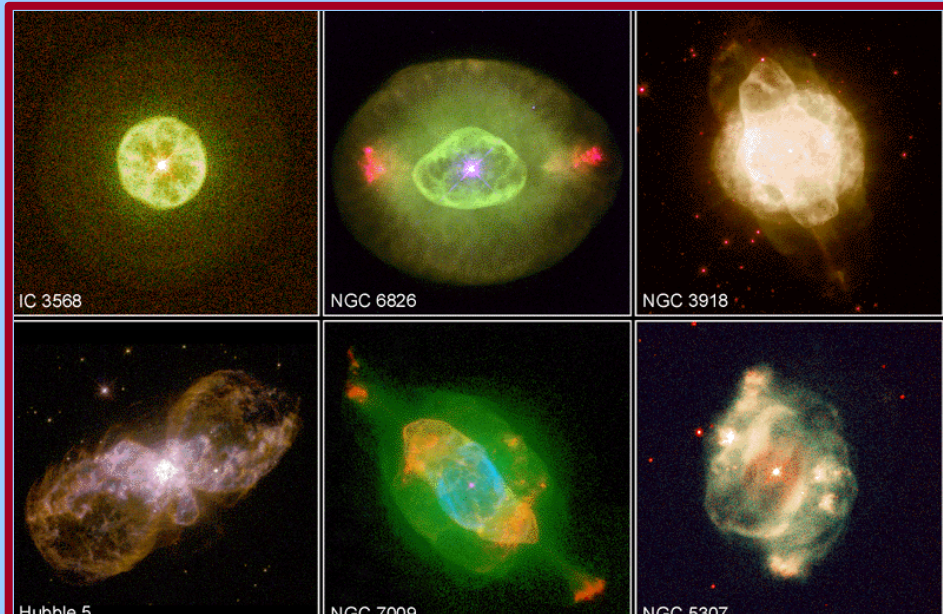
- a) Radio
- b) Infrarosso
- c) Ottico
- d) Raggi X
- e) Raggi gamma

Vedute
complementari,
non identiche

Life Cycle of a Massive Star



Stelle e pianeti



so 2004-05

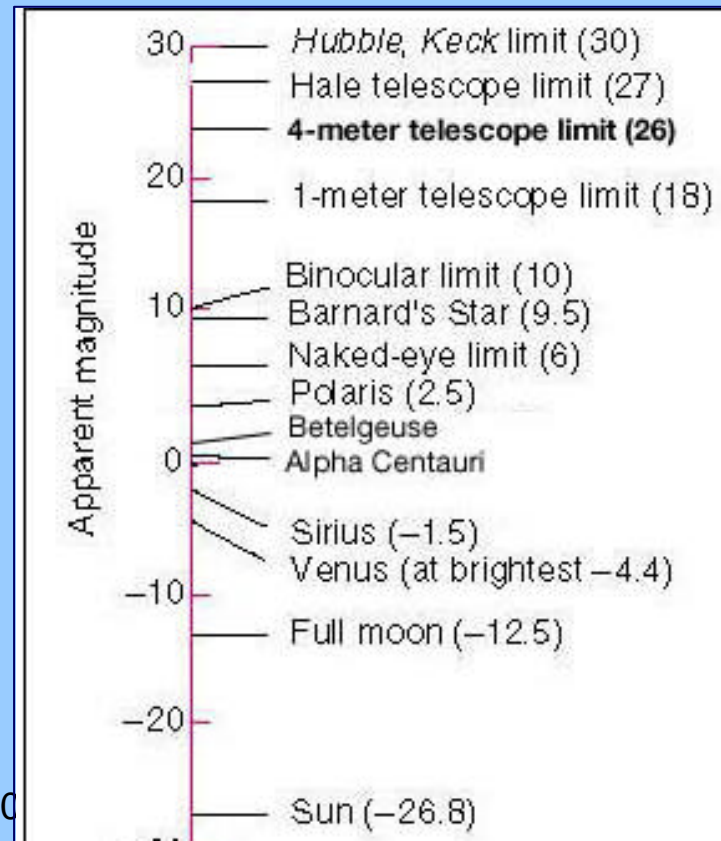
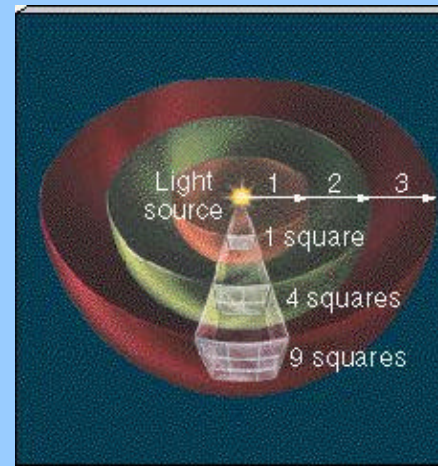


Le forme dell'Universo (3)

- Galassie esterne
- Interazioni dinamiche fra galassie
- Galassie attive
- Mezzo interstellare

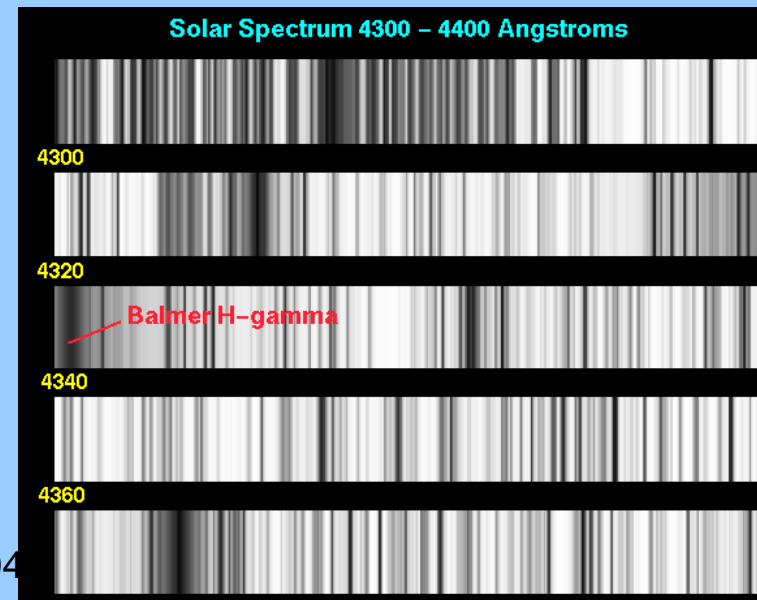
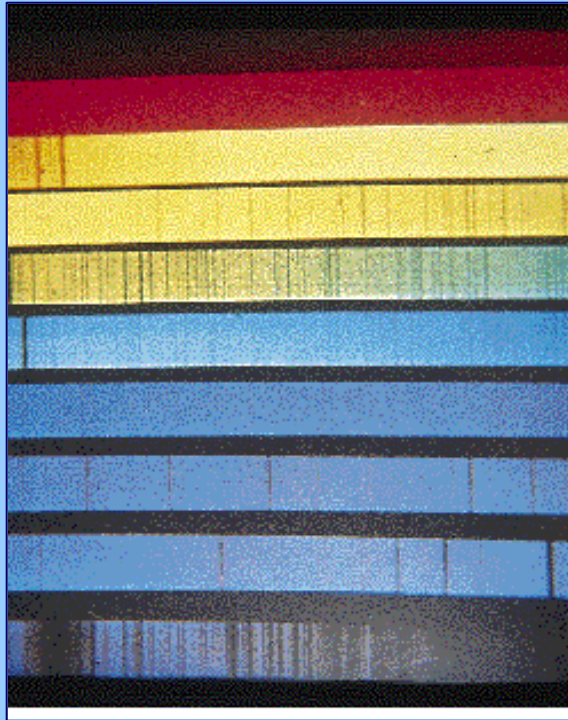
Luminosità delle stelle

- Classificazione di Tolomeo delle luminosità in magnitudini
- L'occhio risponde al logaritmo della luminosità (Pogson)
- Magnitudine apparente
 $m = -2.5 \log I + \text{costante}$
 I è la luminosità apparente della stella
- Magnitudine assoluta
 $M = -2.5 \log L + \text{costante}$
 L è la luminosità che la stella avrebbe posta a 10 pc dal Sole
- Fotometria, sistemi fotometrici moderni in varie bande
- Le costanti sono definite opportunamente



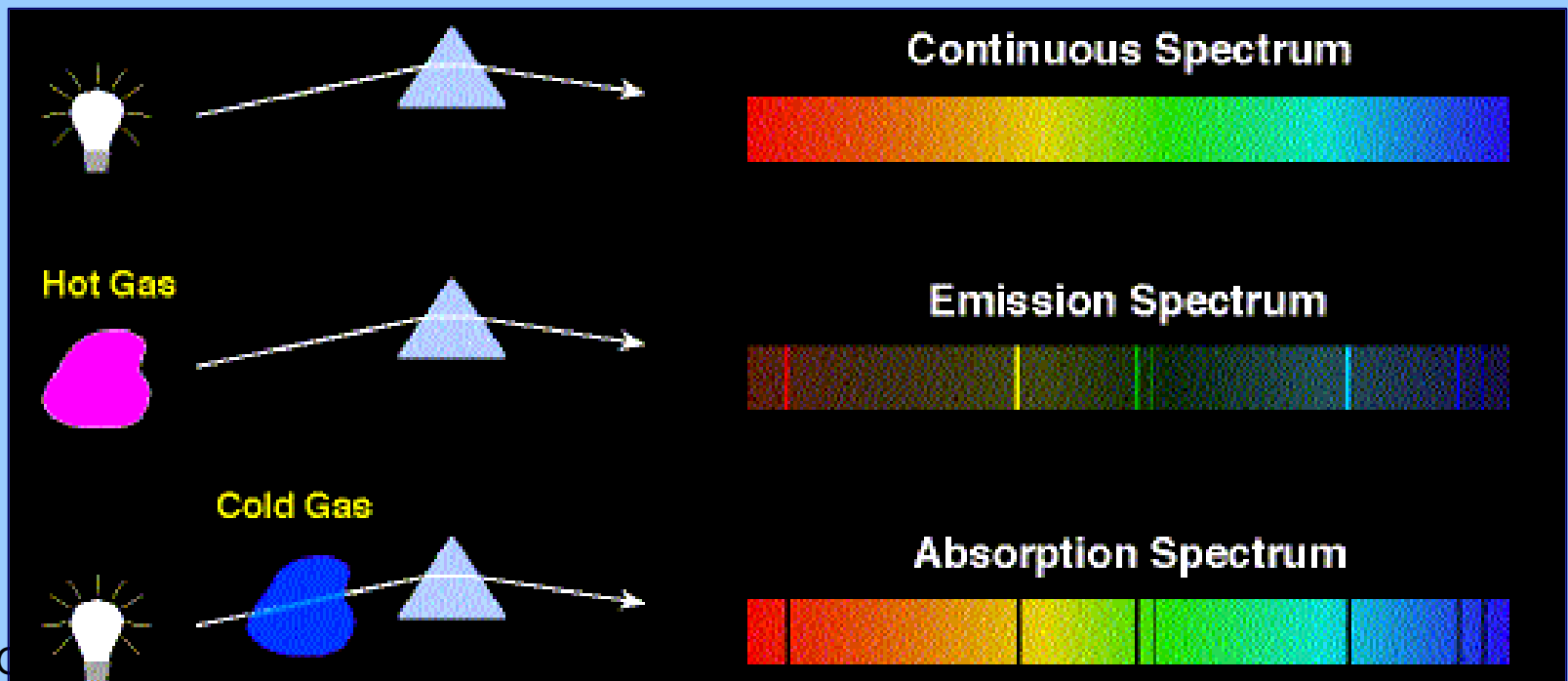
Righe spettrali

- Fraunhofer nel 1812 cataloga in dettaglio le righe oscure che attraversano lo spettro del Sole

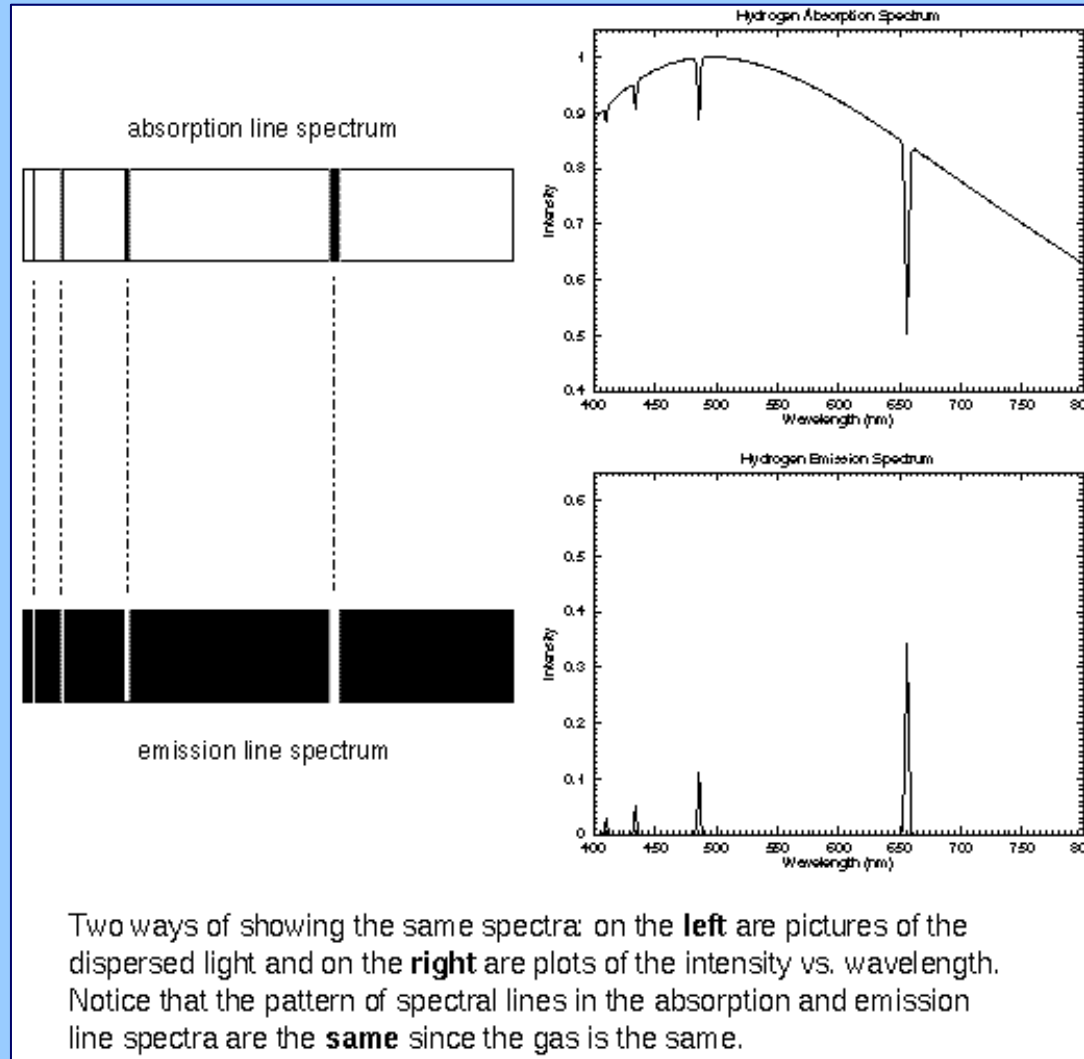


Kirchhoff nel 1859 formula le leggi che definiscono gli spettri delle sorgenti:

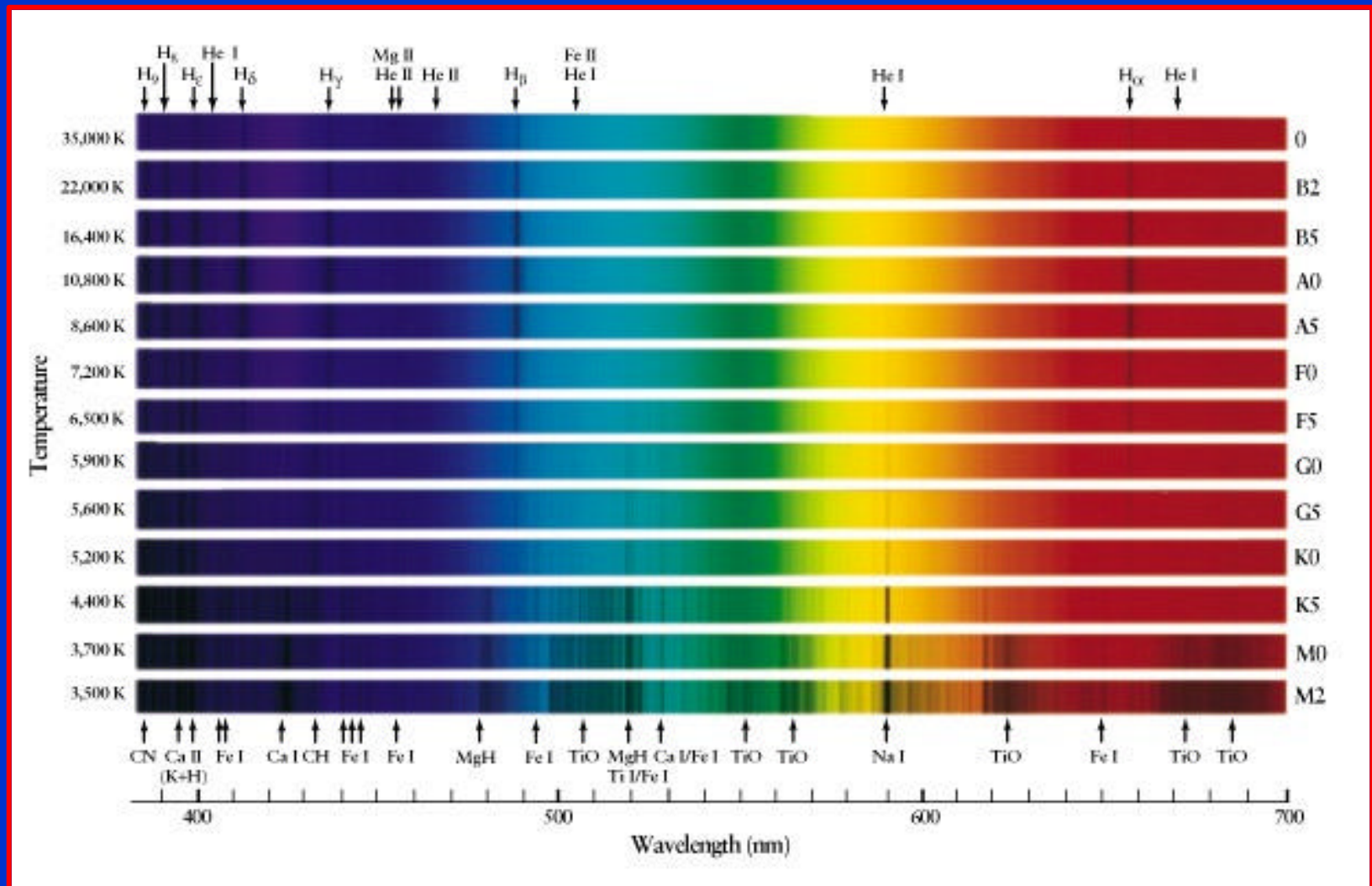
- Spettro continuo (da metalli, liquidi o gas densi - opachi)
- Righe di emissione (da gas rarefatti)
- Righe di assorbimento su continuo (prodotte da gas freddi posti di fronte a sorgente opaca)



Righe di emissione
e di assorbimento
hanno lunghezze
d'onda
caratteristiche
del gas che
emette o assorbe



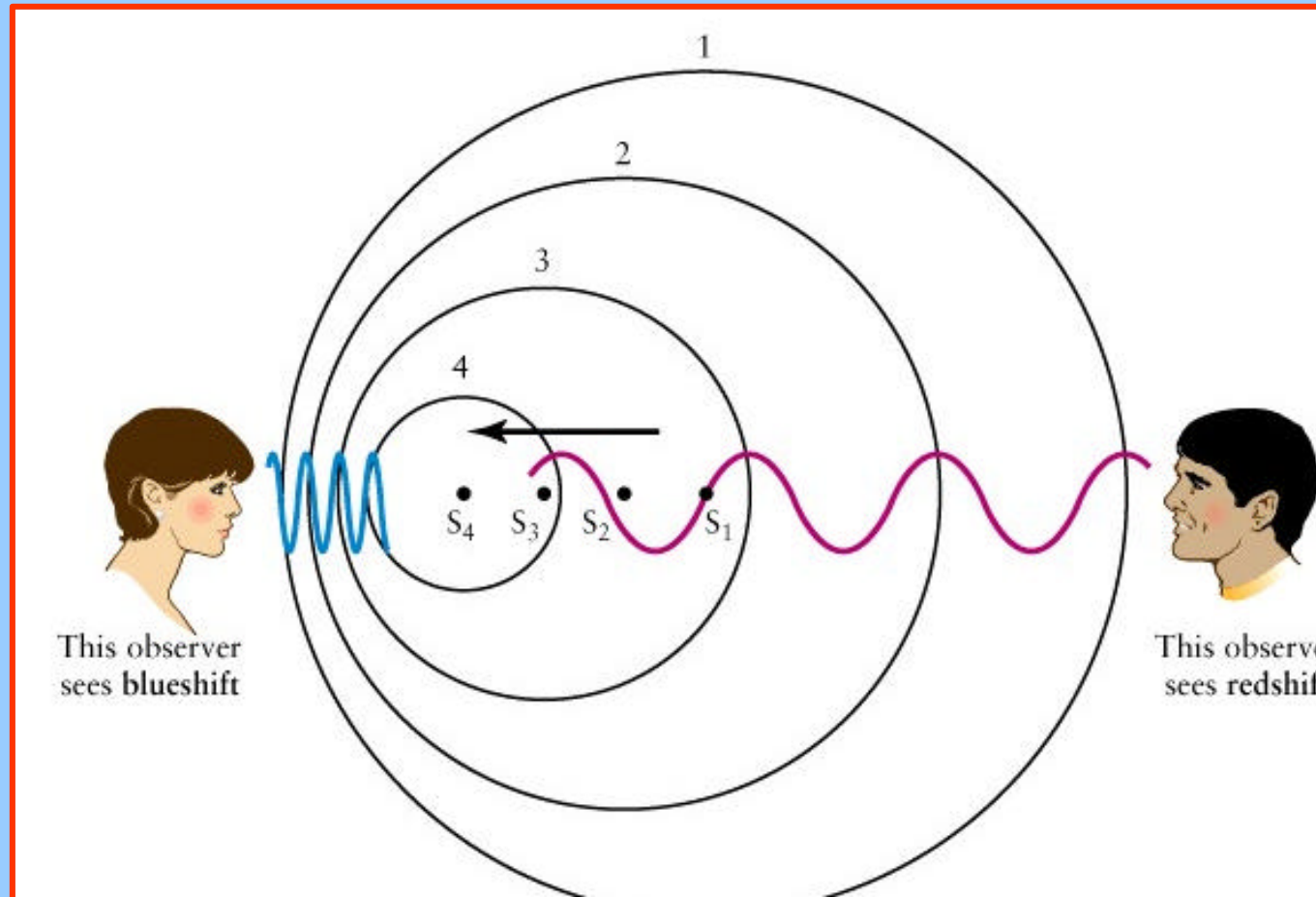
Le stelle sono classificate per il loro spettro come tipi spettrali O, B, A, F, G, K, M



Effetto Doppler

La frequenza ricevuta da una sorgente in moto relativamente all'osservatore aumenta se la sorgente si avvicina, diminuisce se si allontana

Misure di velocità relative e di dinamica



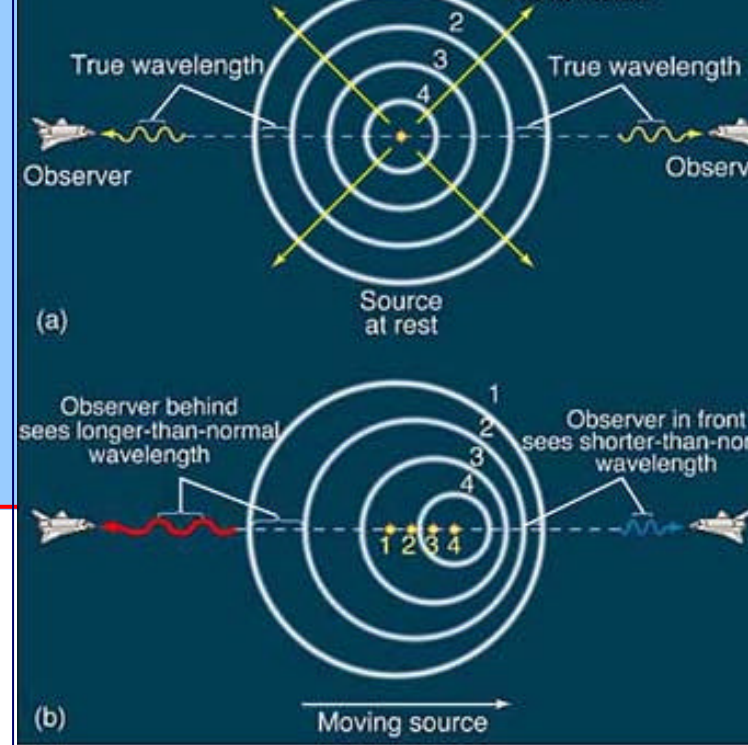
La velocità si misura per effetto Doppler. La distanza dalla scala delle distanze.

$$\lambda = c \Delta t \pm v \Delta t$$

$$c \Delta t = \lambda_0 \quad \Rightarrow \quad \lambda = \lambda_0 \pm v \Delta t$$

$$\Delta t = \frac{\lambda_0}{c} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \lambda_0 \pm \frac{v}{c} \lambda_0$$

$$\boxed{\frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 \pm \frac{v}{c}}$$

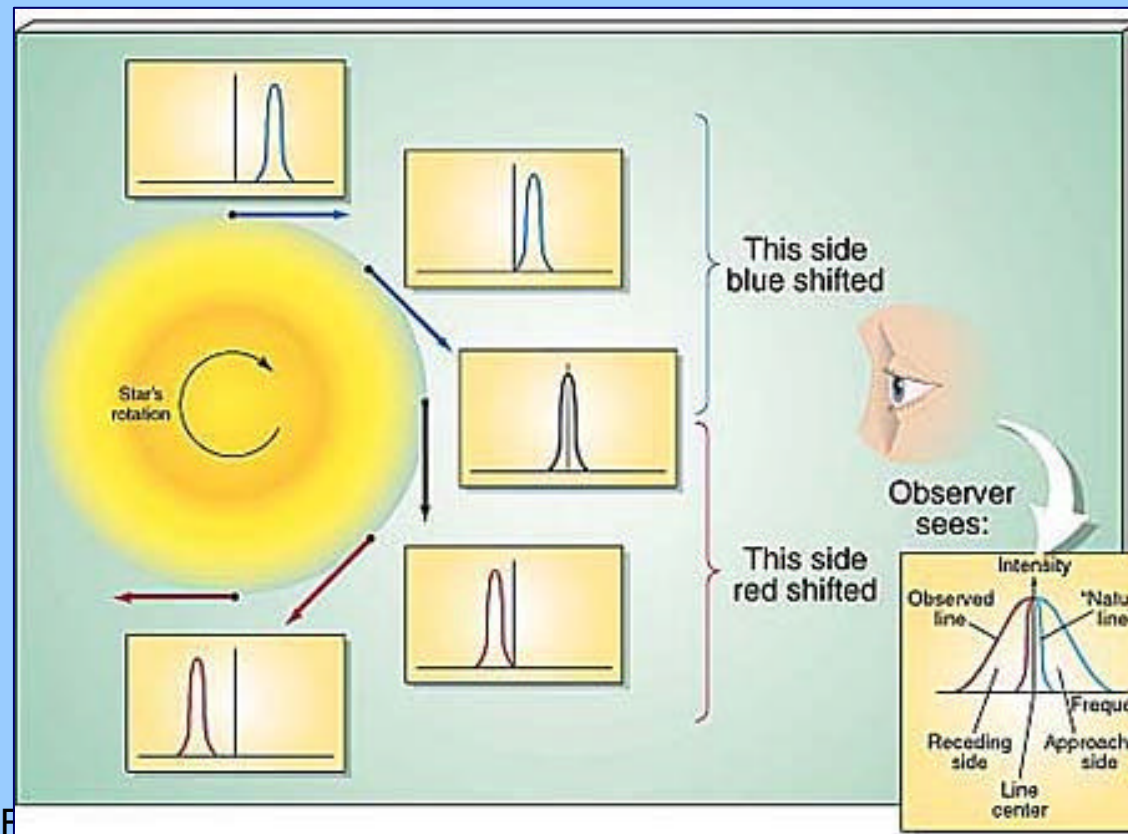
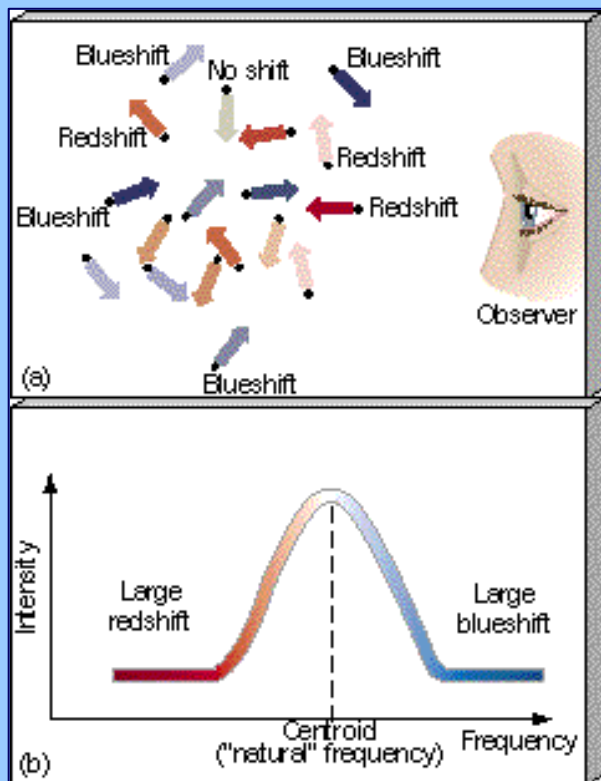


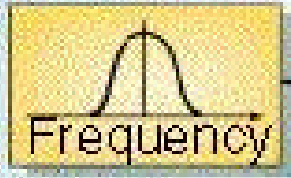
$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{I - I_0}{I_0} = \pm \frac{v}{c}$$

$$z = \frac{I}{I_0} = \pm \frac{v}{c} + 1$$

Profili delle righe

- Il profilo delle righe dipende dallo stato dinamico della sorgente





Observer sees
combined beam:



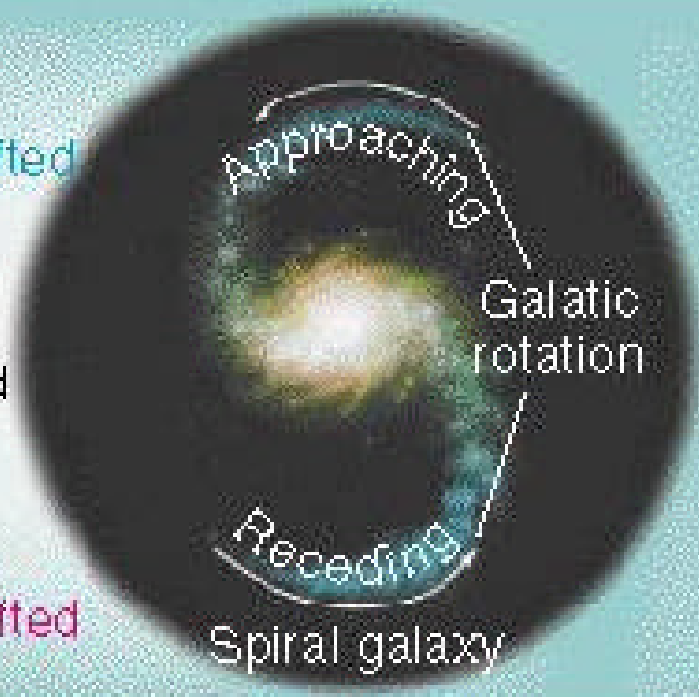
Blueshifted



Unshifted



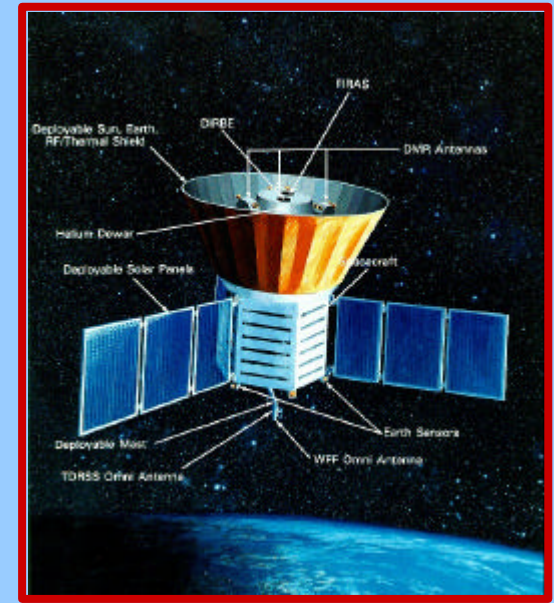
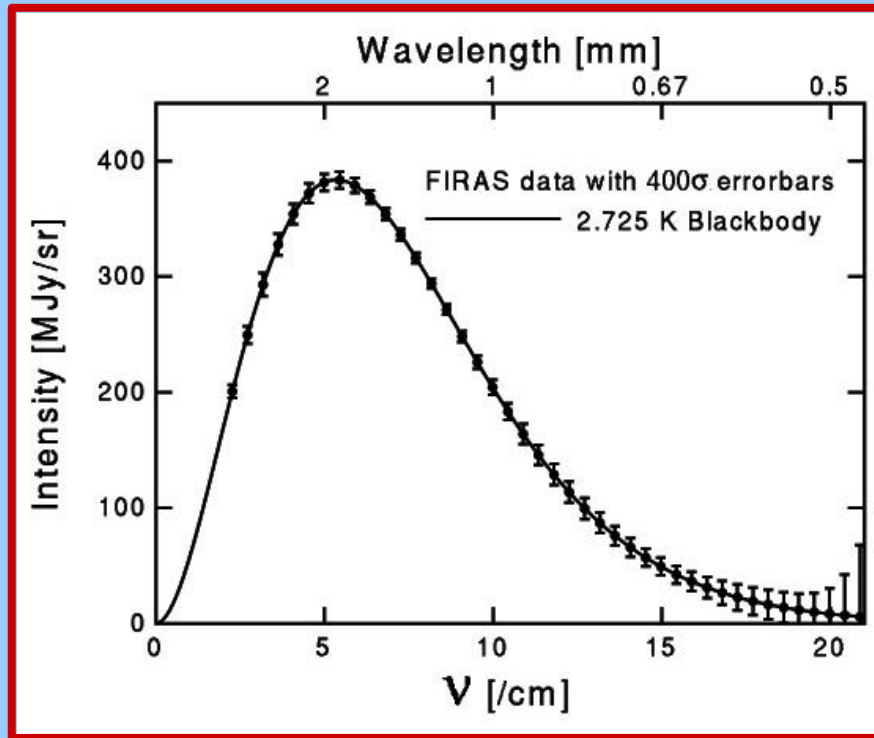
Redshifted



L'Universo è pieno di fotoni freddi

La radiazione di fondo primordiale (CMBR), Penzias & Wilson (1969)

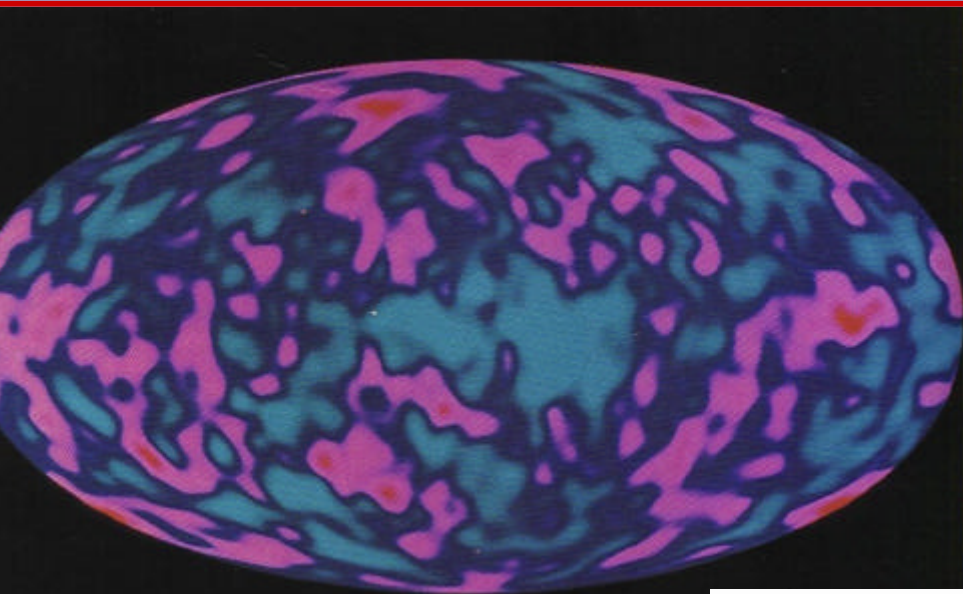
Spettro di corpo nero alla temperatura $T=2.725$ K



COBE

Da dove vengono ? Se l'Universo si è espanso da una forma più compatta, all'origine la sua temperatura doveva essere elevatissima (Gamow 1940)

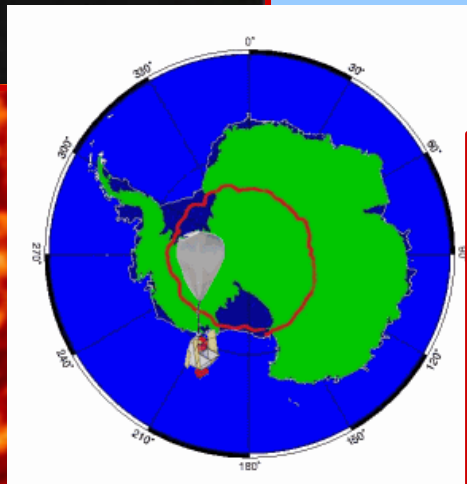
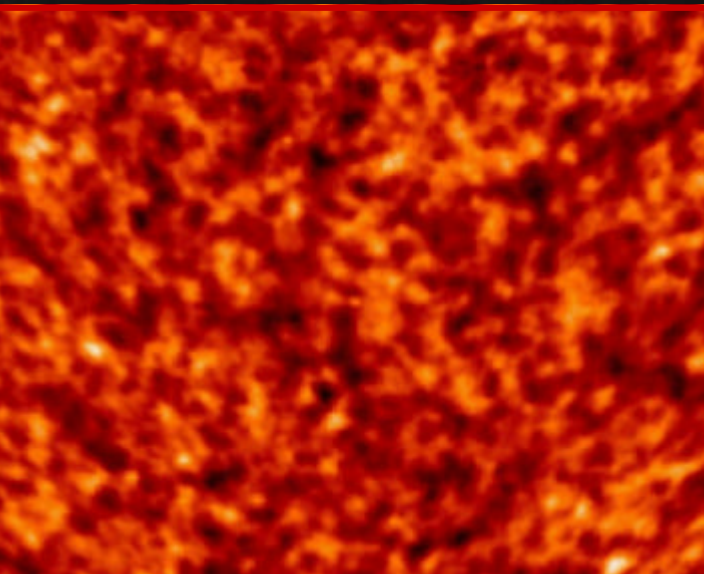
Anisotropie della CMBR



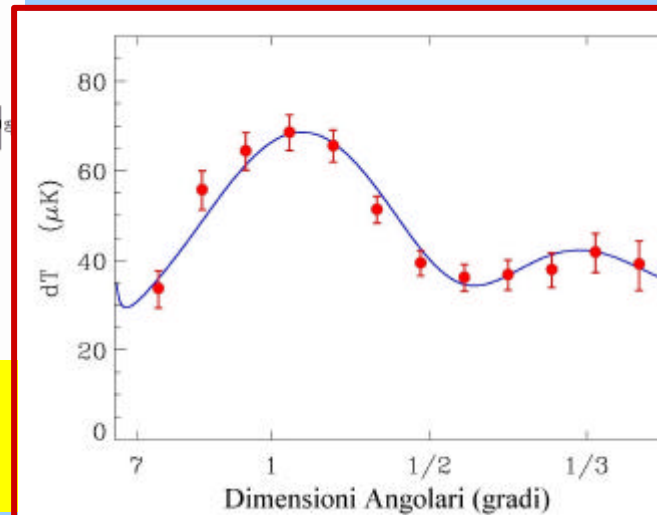
← COBE

$$\Delta T / T \gg 10^{-5} K$$

Spettro delle scale delle variazioni di temperatura tra punti separati da un angolo ?
disomogeneità primordiali

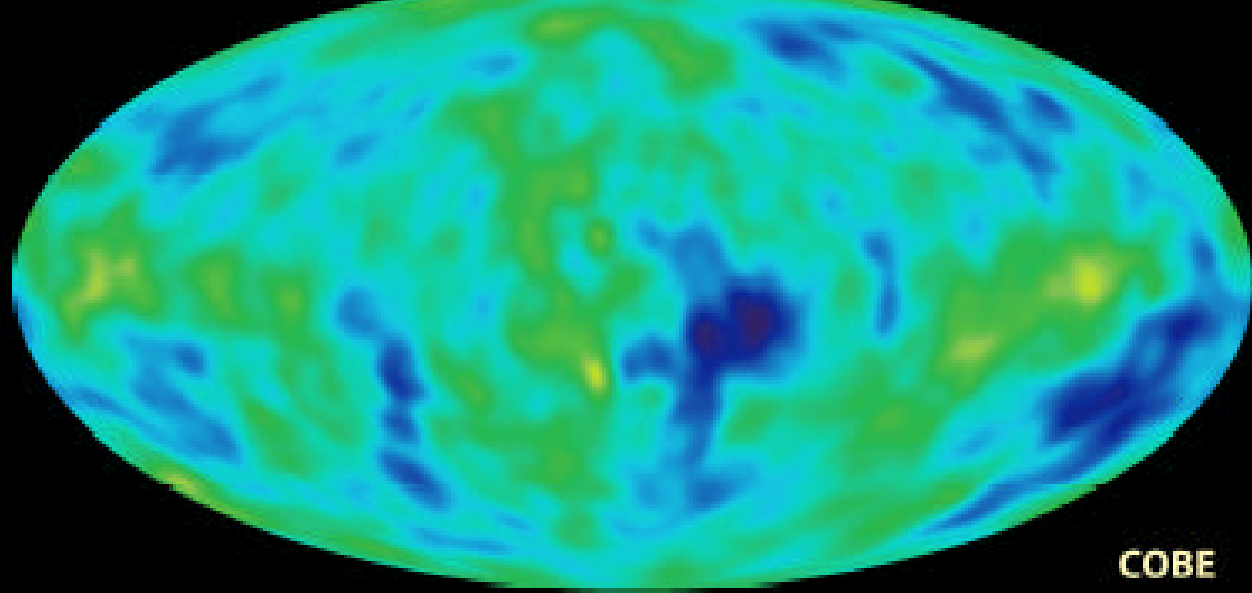


BOOMERANG
risoluzione $\sim 1^\circ$

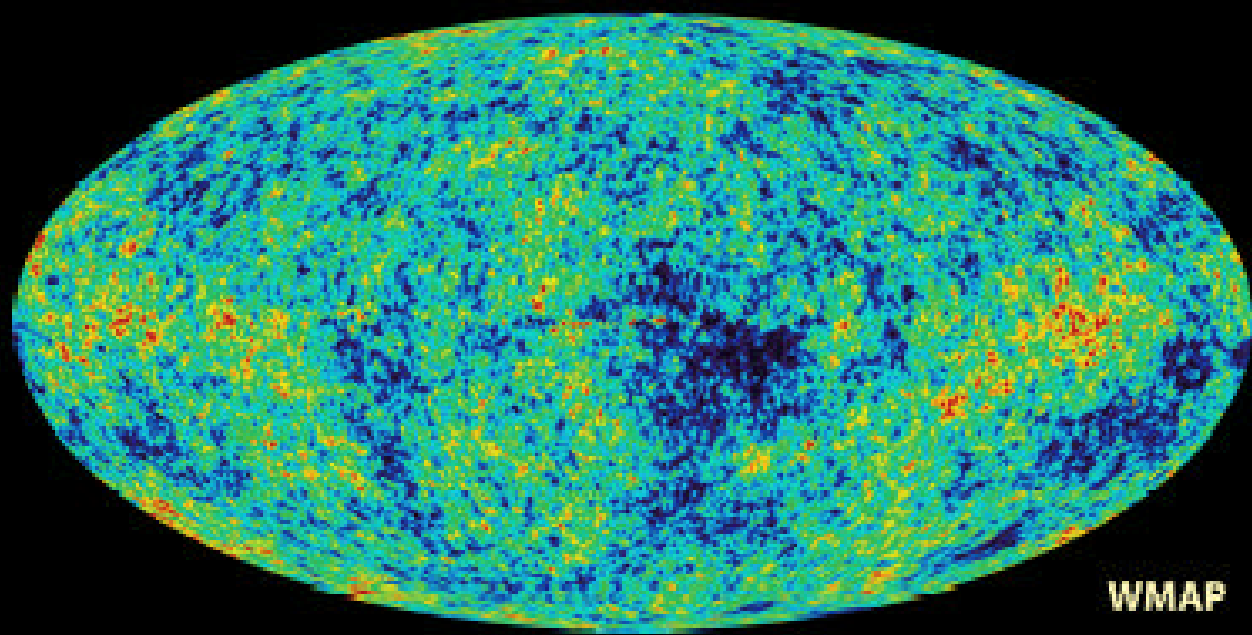


Boomerang



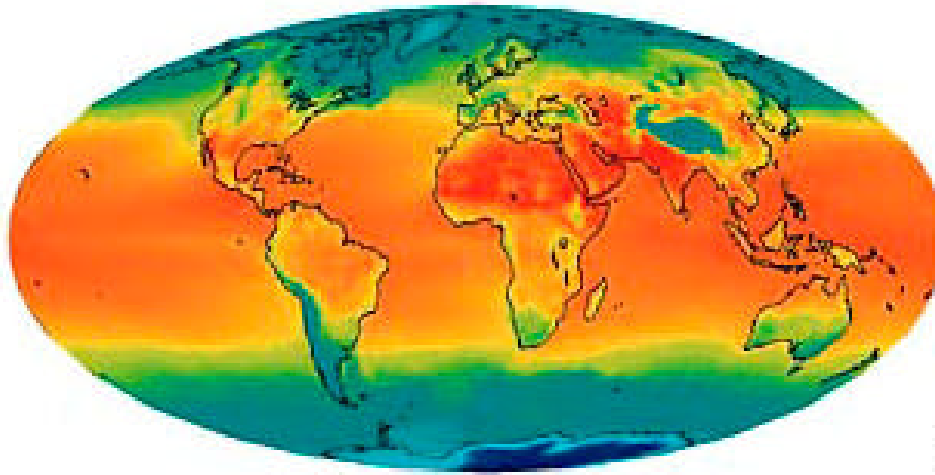


COBE

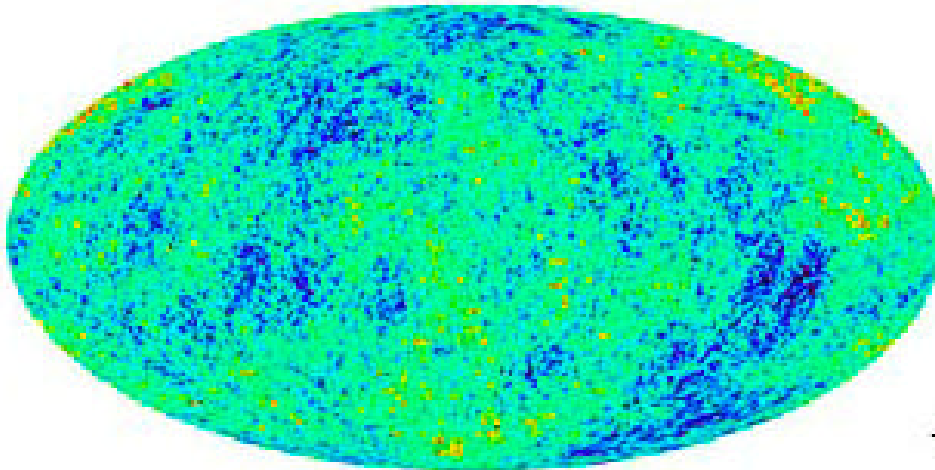


WMAP

distribuzione della temperatura a Terra



$$DT/T \sim 0.3$$



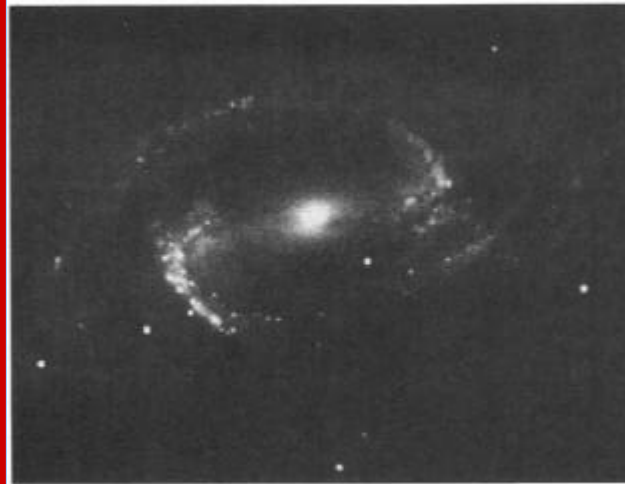
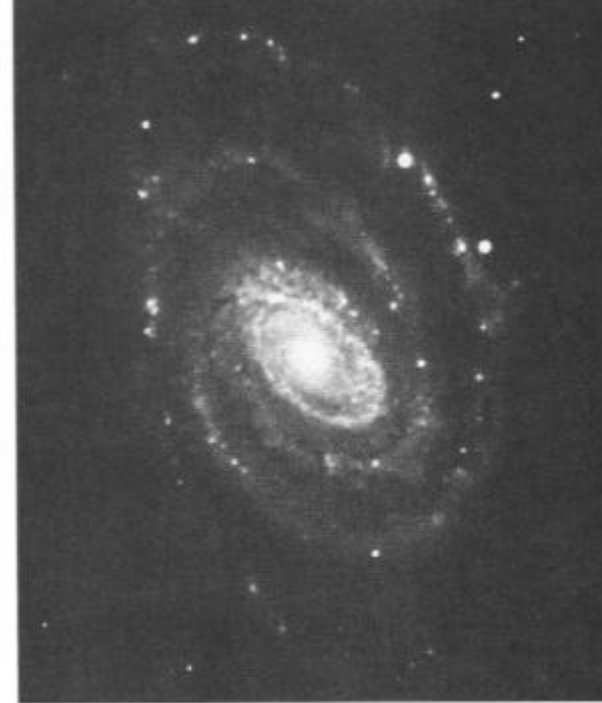
$$DT/T \sim 3 \cdot 10^{-5}$$



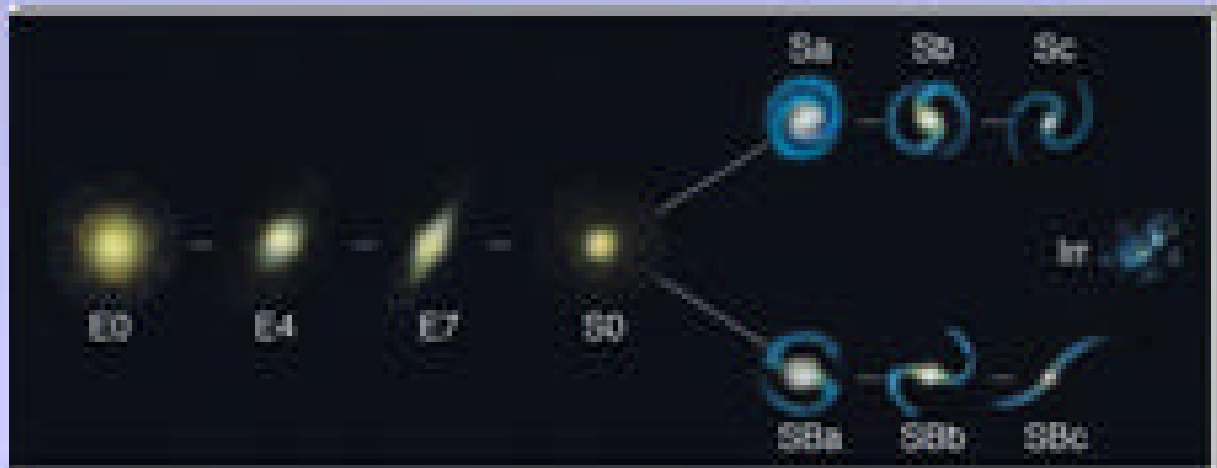
distribuzione della temperatura nell'universo

Morfologia delle galassie

1. Ellittica
2. Spirale
3. Spirale barrata
4. Irregolare



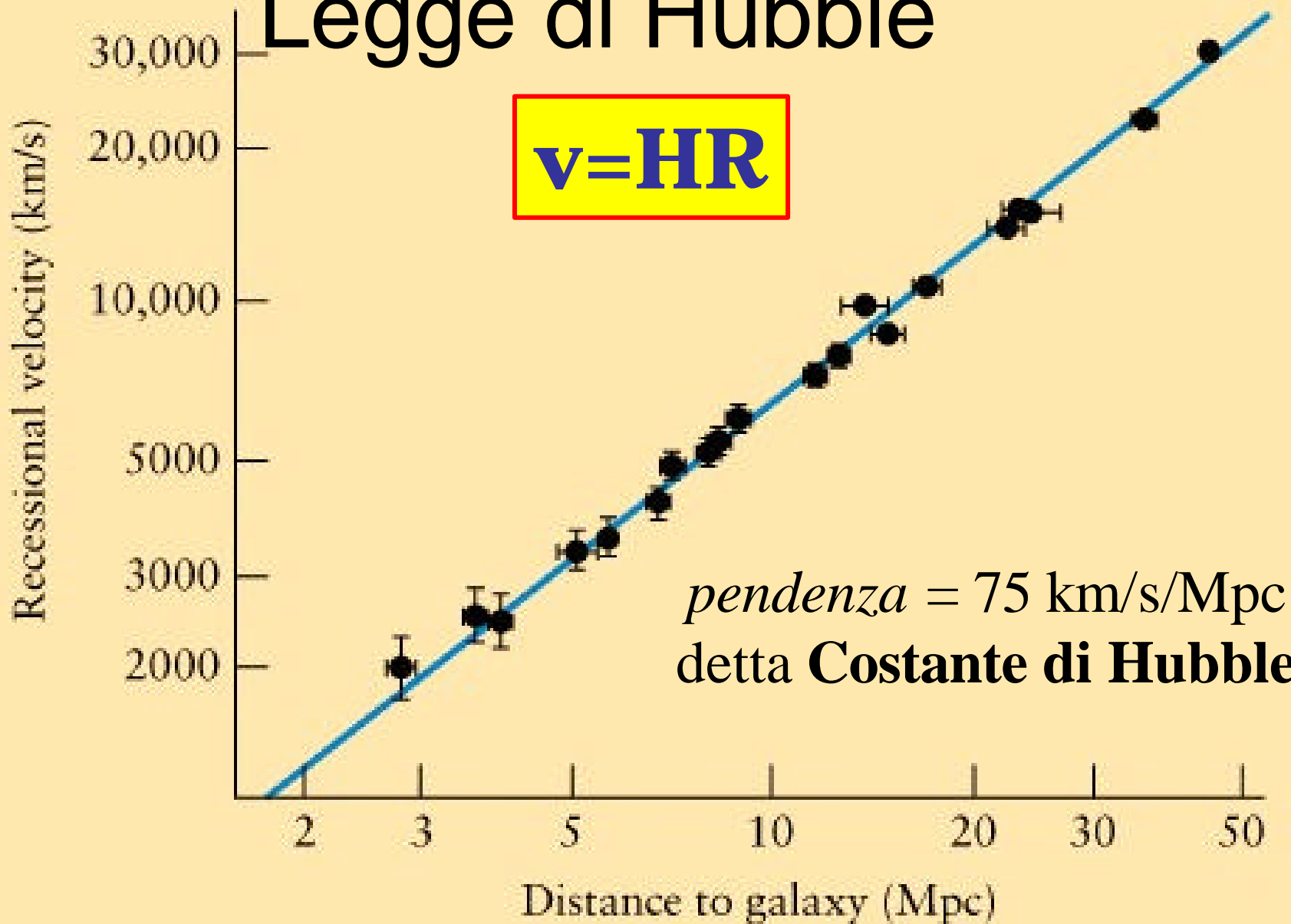
Il diagramma di Hubble



- Sequenza morfologica e/o evolutiva ?
- La contrazione delle ellittiche genera le spirali ?
- Galassie ellittiche, stelle vecchie, pochi metalli, piccolo momento angolare
- Galassie spirali, stelle giovani, gas, grande momento angolare
- È la coalescenza di spirali che genera le ellittiche

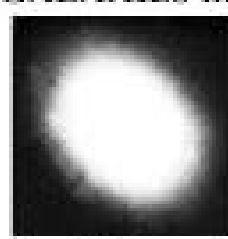
Legge di Hubble

$$v=HR$$

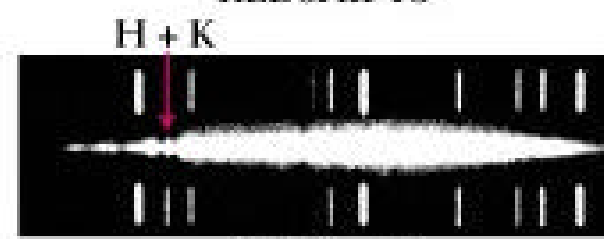


spostamento
verso il rosso
(red-shift)
delle righe
spettrali
delle galassie

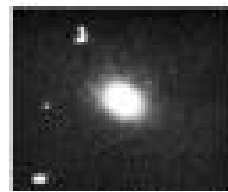
$$\Delta\lambda / \lambda = \pm v/c$$



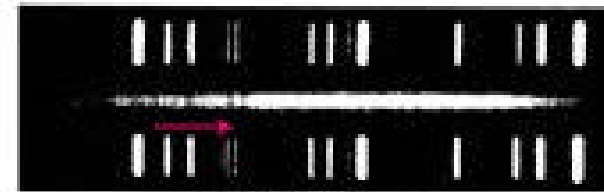
Virgo



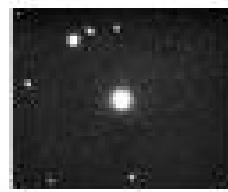
1,200 km/s



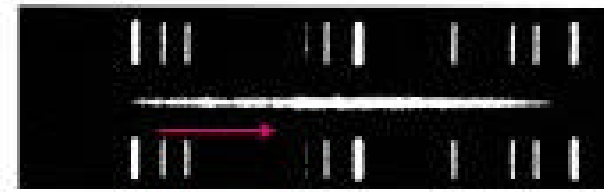
Ursa Major



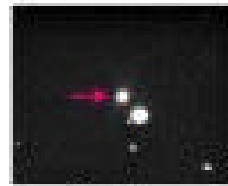
15,000 km/s



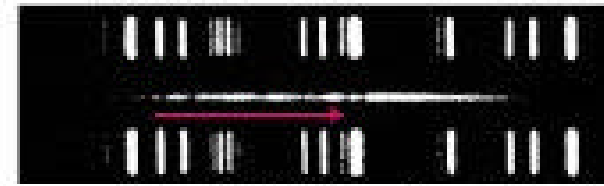
Corona Borealis



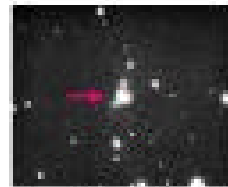
22,000 km/s



Boötes



39,000 km/s



Coma

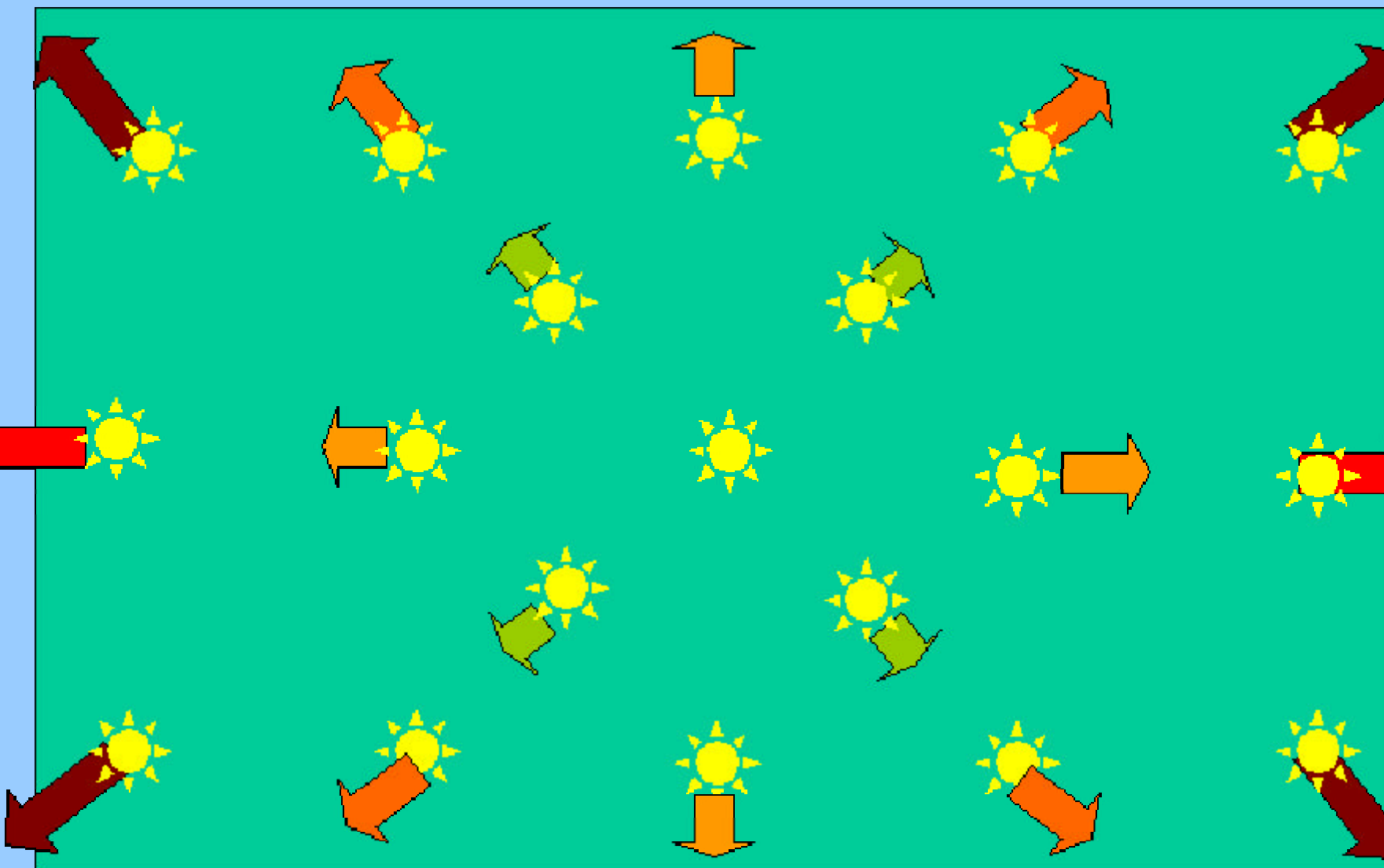


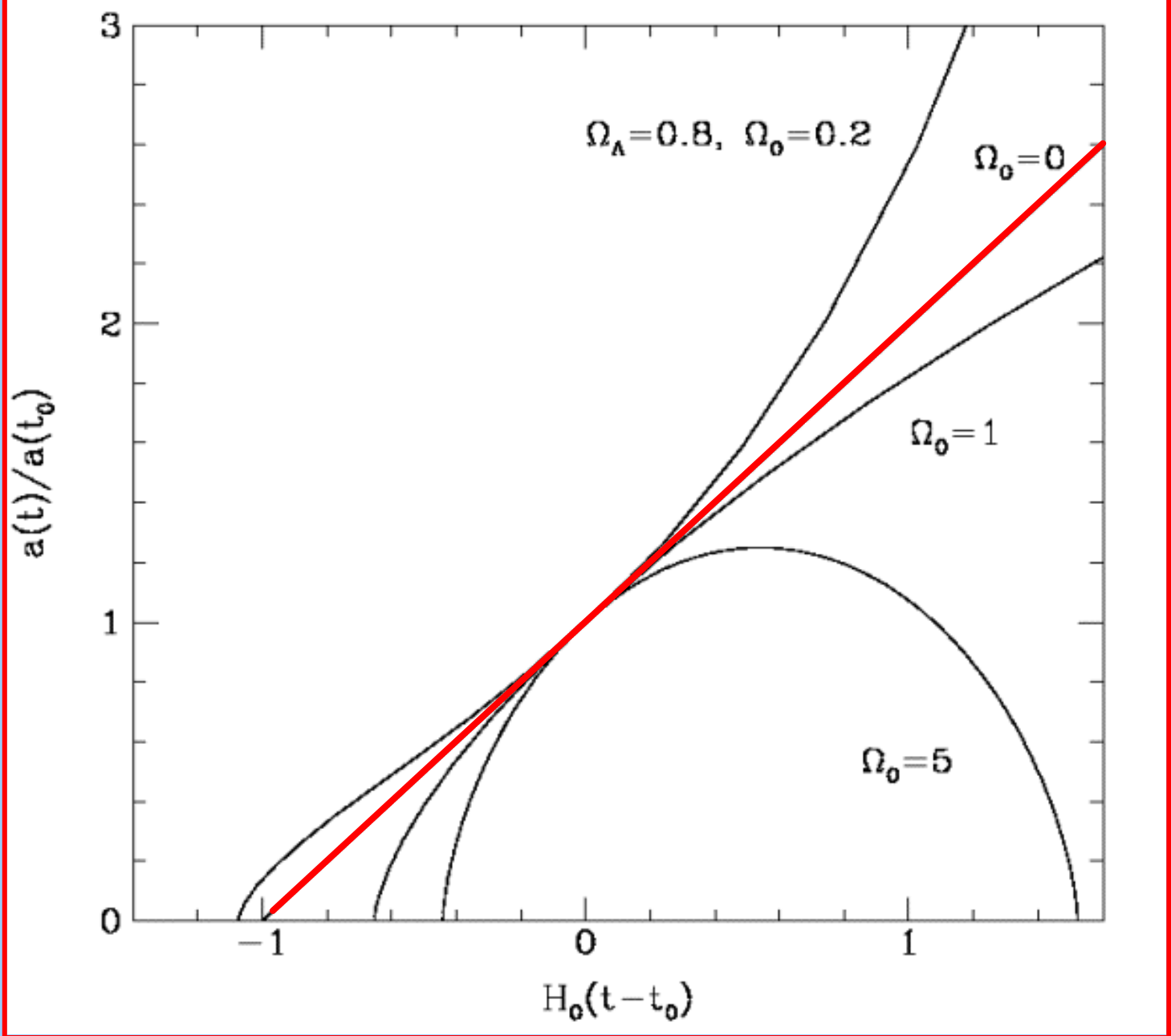
41,000 km/s

"Standard Candles"

If we know how luminous an object is then we can translate it's apparent brightness into it's distance.

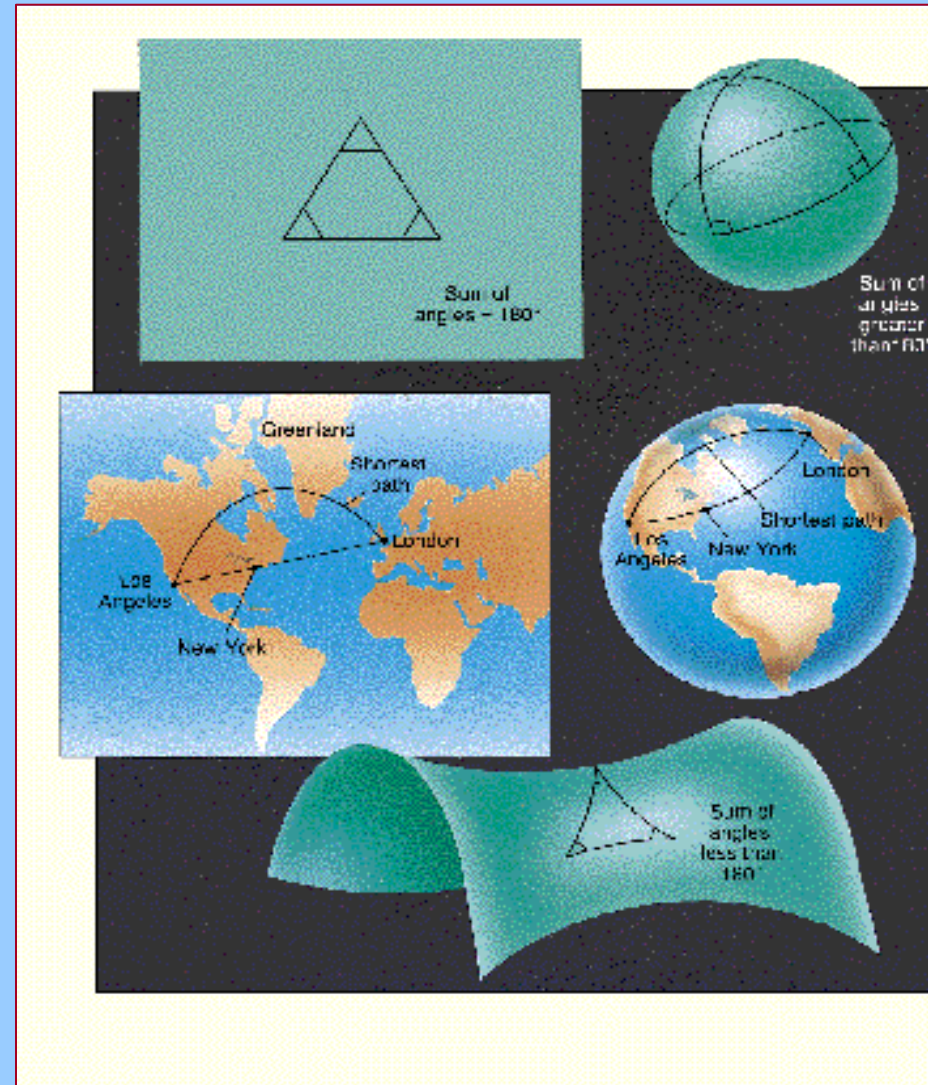






La geometria dell'Universo

- La propagazione dei raggi luminosi "sente" la gravità
- Illustrazione bidimensionale della fisica in uno spazio tridimensionale
- Tre tipi di superficie (spazio): piana, sferica e iperbolica



La scoperta dell'espansione dell'universo (la **legge di Hubble**: $v = HR$) e la sua immediata conseguenza che l'universo era in passato più compresso di ora (e quindi più caldo), permette di studiare fenomeni che non si possono studiare in altri modi.

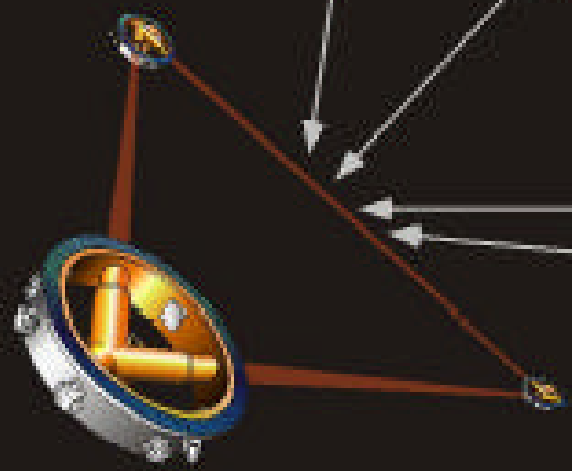
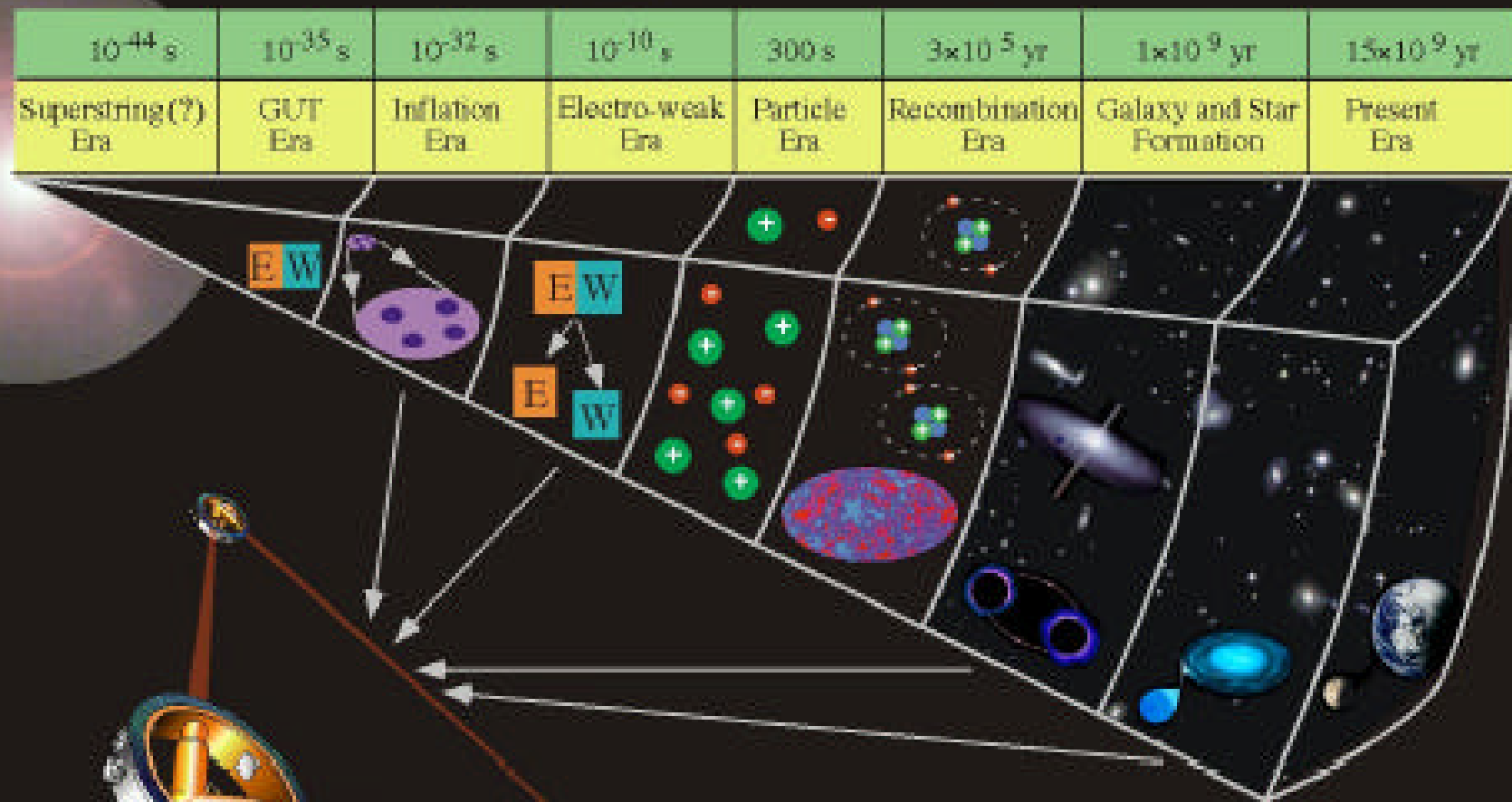
Con metodi astronomici si può caratterizzare l'universo attuale per quanto riguarda la sua età ($t_H \sim H^{-1} \sim 14 \cdot 10^9$ anni), le sue dimensioni ($R \sim 10^{26}$ m) e la sua temperatura ($T \sim 2,7$ K). Con i modelli cosmologici si può ricostruirne il passato e prevederne l'evoluzione futura: la **densità di materia-energia** stabilisce se l'universo è **aperto**, **chiuso** o **piatto**.

Lo studio del passato dell'universo richiede di utilizzare tutti i metodi della fisica moderna:

- la **fisica atomica** è indispensabile per poter interpretare l'origine della **radiazione cosmica di fondo** ($t \sim 10^5$ anni, $T \sim 10^4$ K),
- la **fisica nucleare** per poter interpretare l'origine dei **nuclei** ($t \sim 10^2$ s, $T \sim 10^8$ K),
- la **fisica delle particelle** per poter descrivere epoche in cui le **interazioni fondamentali erano unificate** ($t \sim 10^{-12}$ s, $T \sim 10^2$ GeV/c²).
- la **fisica teorica** per poter interpretare **la grande unificazione** delle interazioni e lo stesso big bang al **tempo di Planck**.

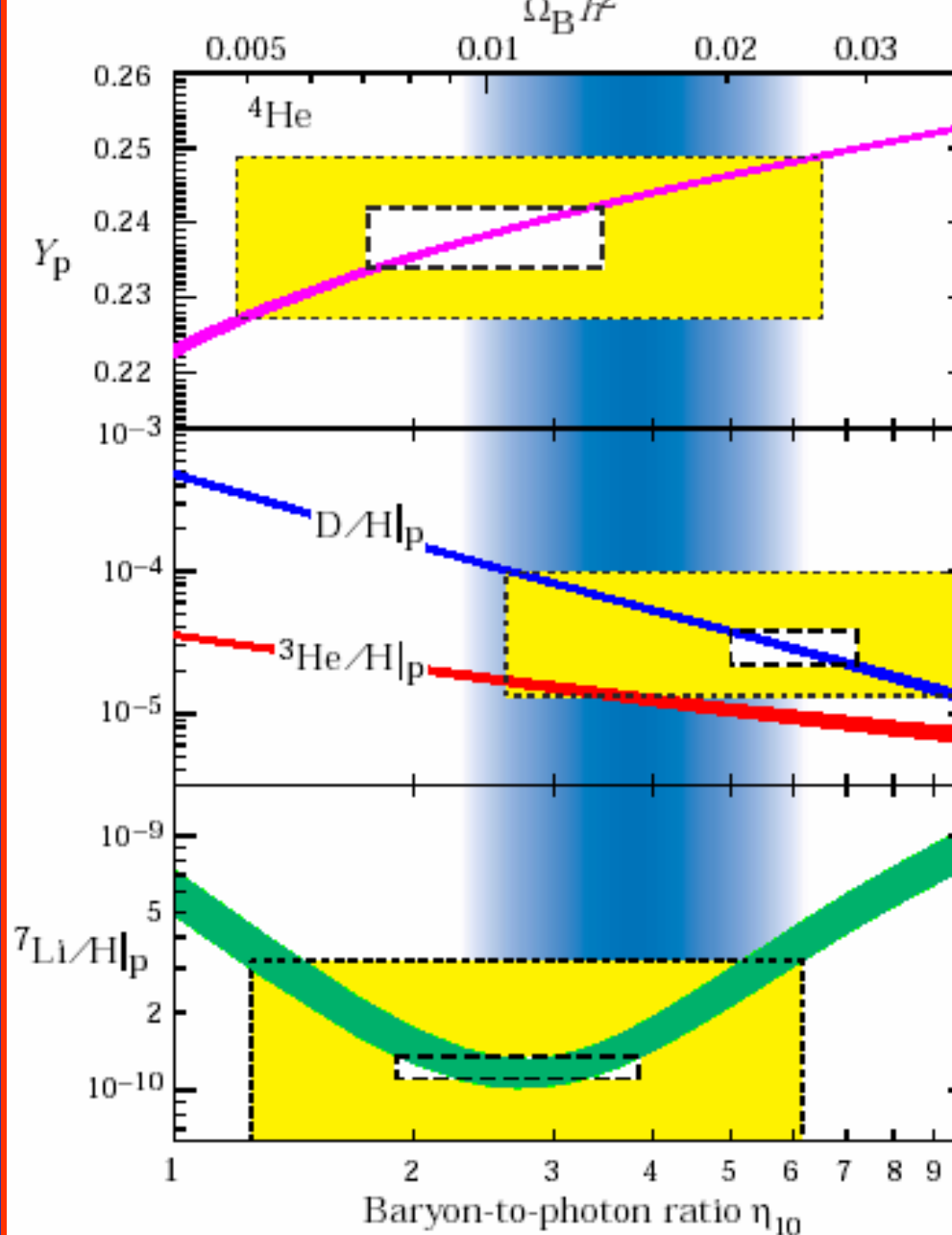
Big Bang

Time \longrightarrow

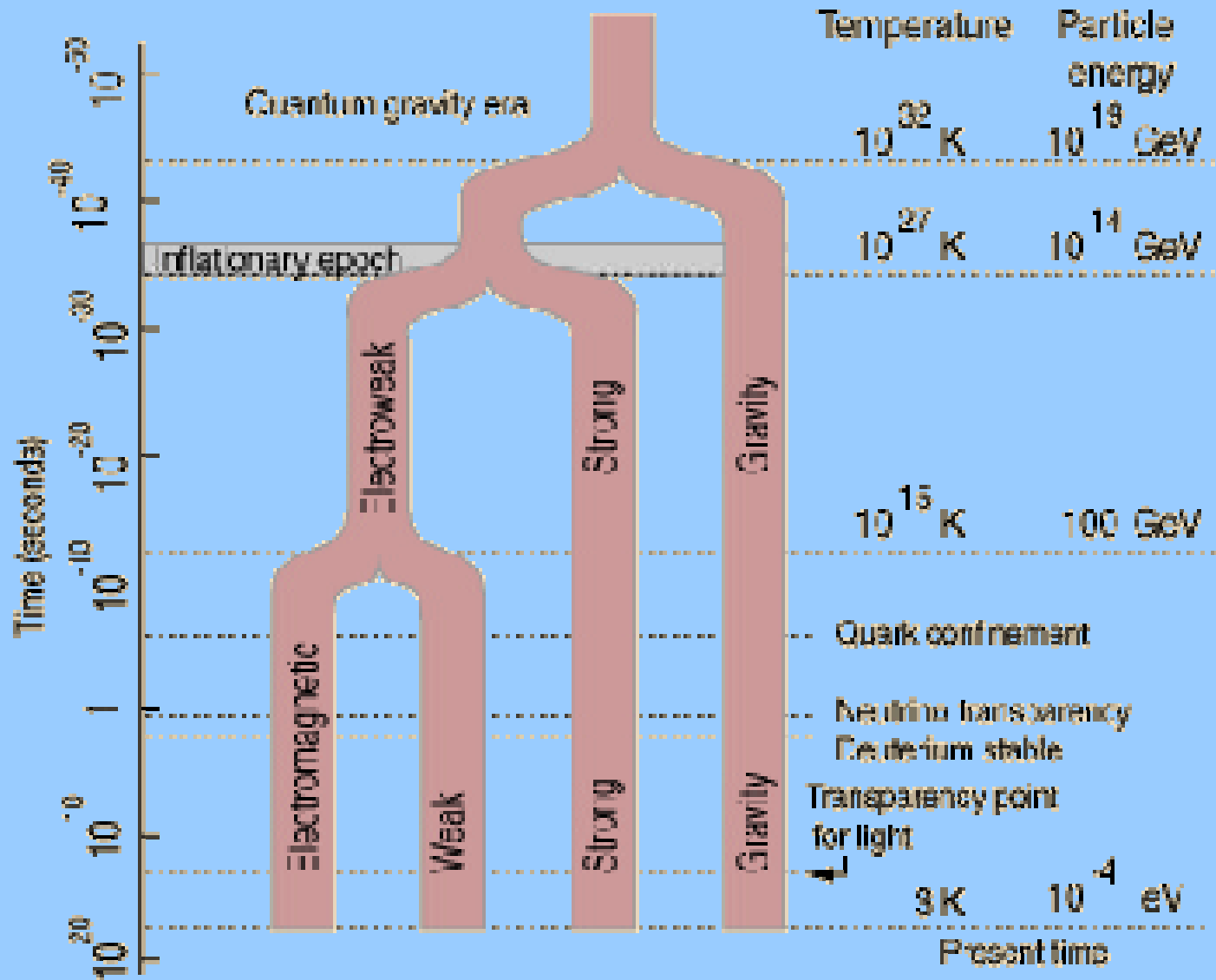


nucleosintesi

La maggior parte degli elementi chimici sono stati prodotti nell'interno delle stelle. Solo gli elementi leggeri (H, He, Li) sono stati prodotti in ambito cosmologico.



L'unificazione delle forze

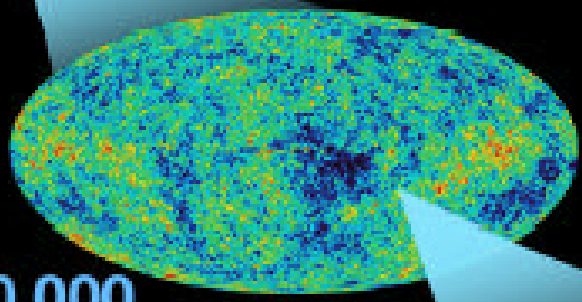


**DAWN
OF
TIME**



**tiny fraction
of a second**

inflation



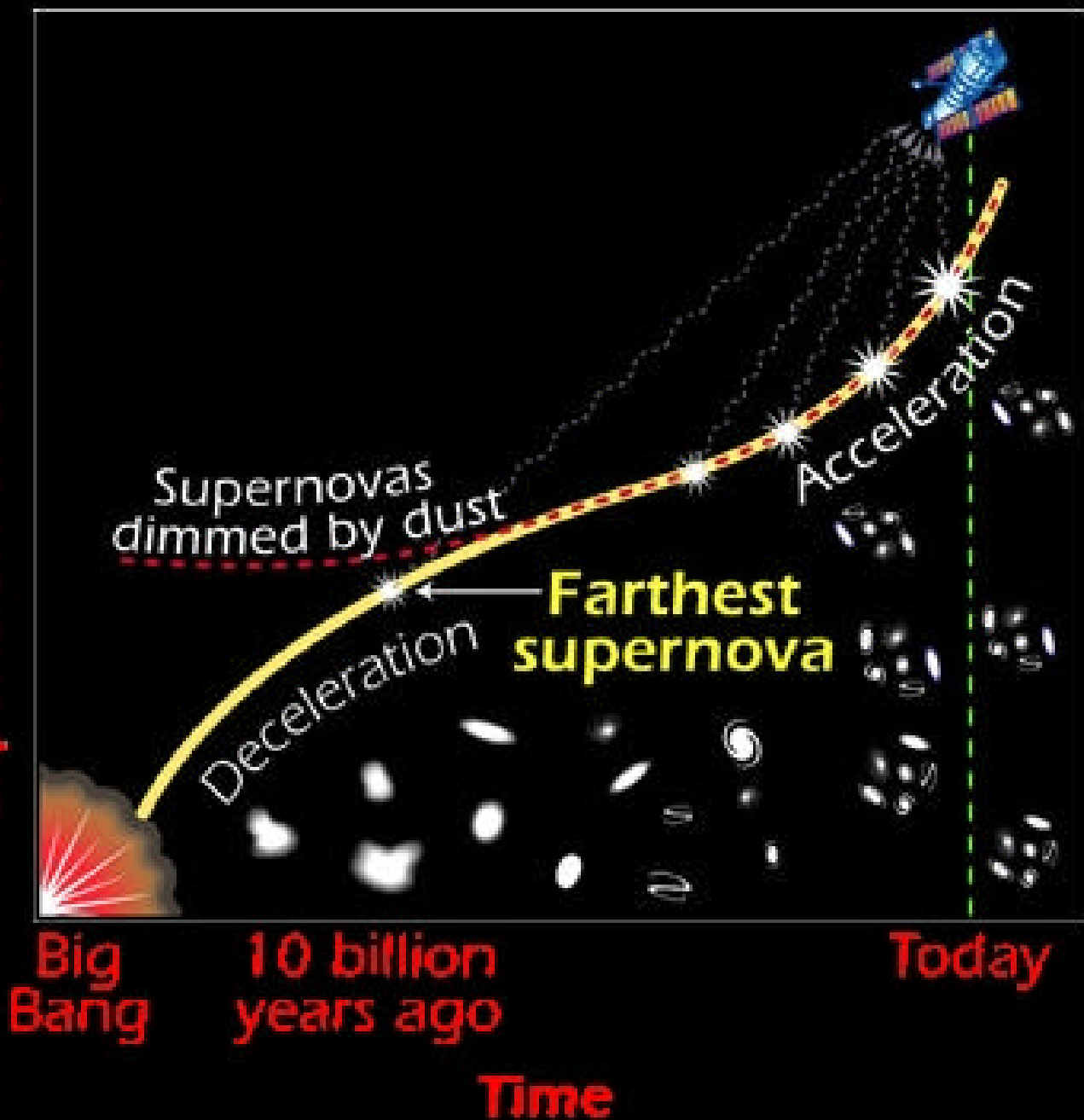
**380,000
years**



**13.7
billion
years**

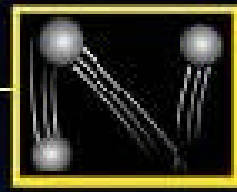
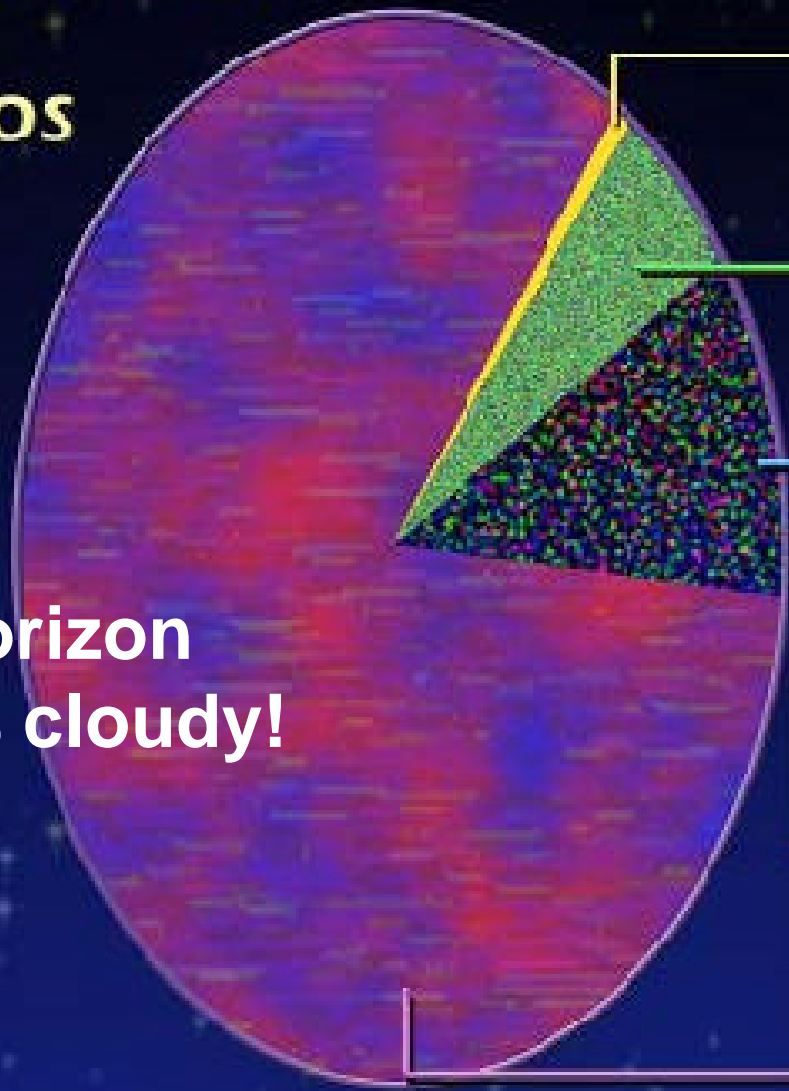
Big Rip

Expansion of universe

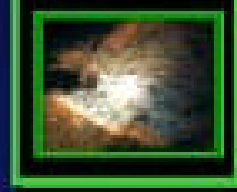


Composition of the Cosmos

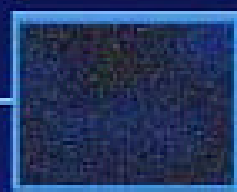
The horizon is 95% cloudy!



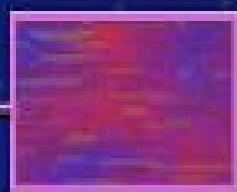
Neutrinos:
0.6%



Baryons (atoms) comprising stars, heavy elements, and helium and free hydrogen:
4.4%



Dark matter:
22%



Dark energy:
73%