

....oltre lo specchio....

Meraviglie e sorprese
della Meccanica
Quantistica

Alessandro Scordo
Liceo Azarita di Roma

14/03/2014



La Fisica alla fine dell' 800

MECCANICA

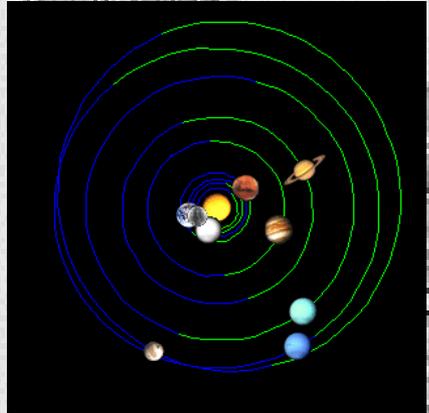
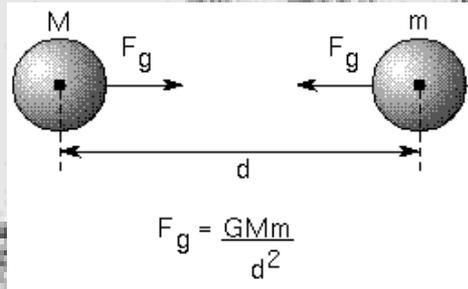


Newton 1686

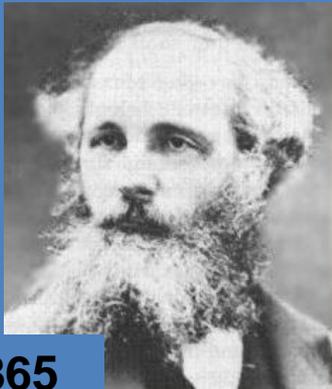
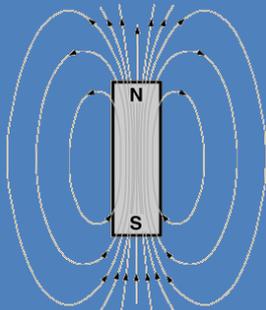
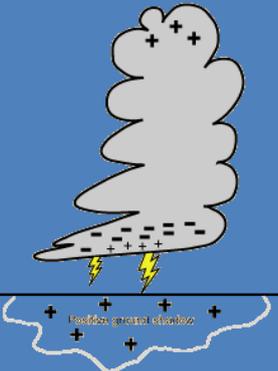
$$F = m a$$

Equazione del moto

GRAVITAZIONE UNIVERSALE



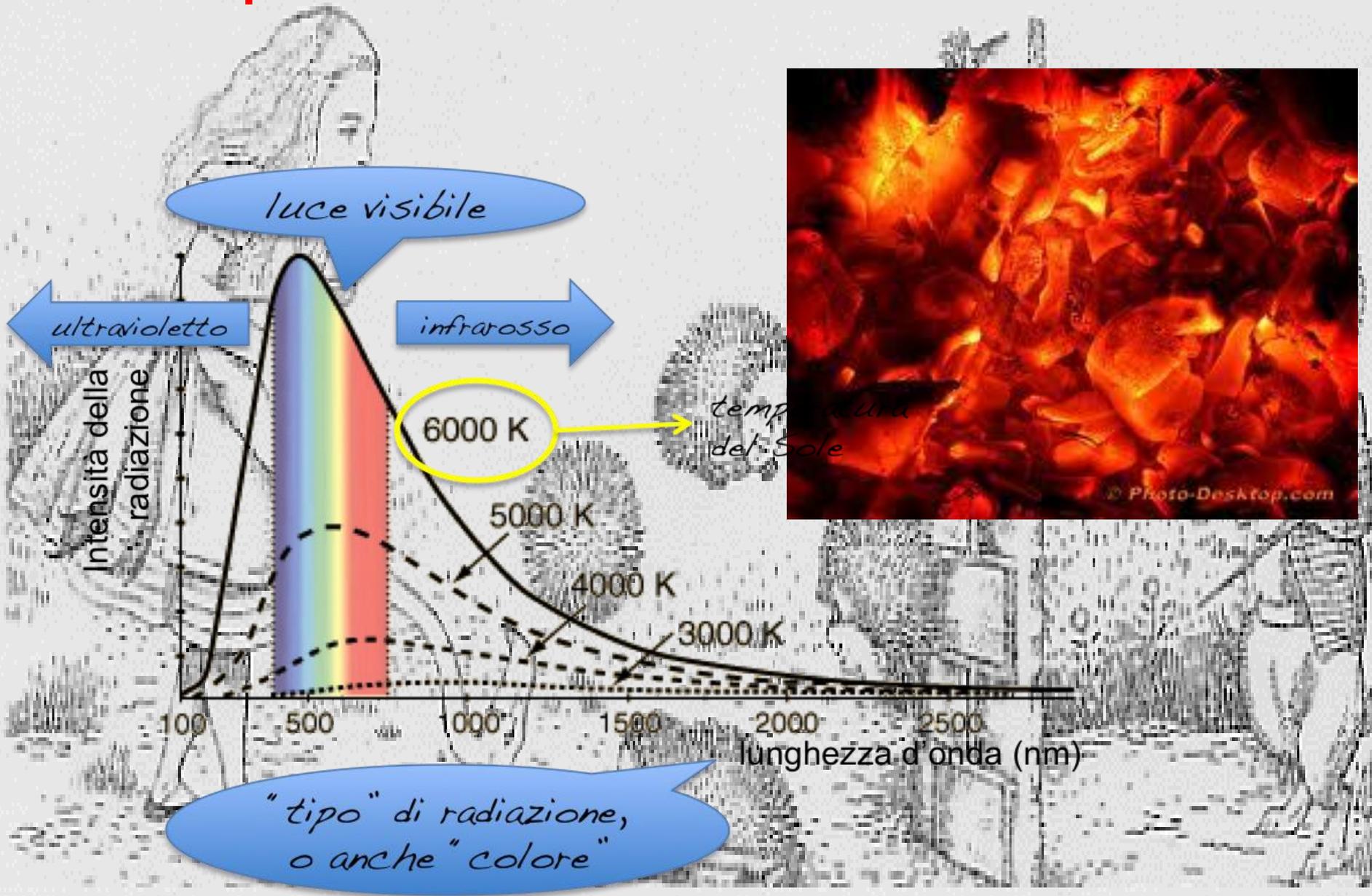
ELETTRO-MAGNETISMO



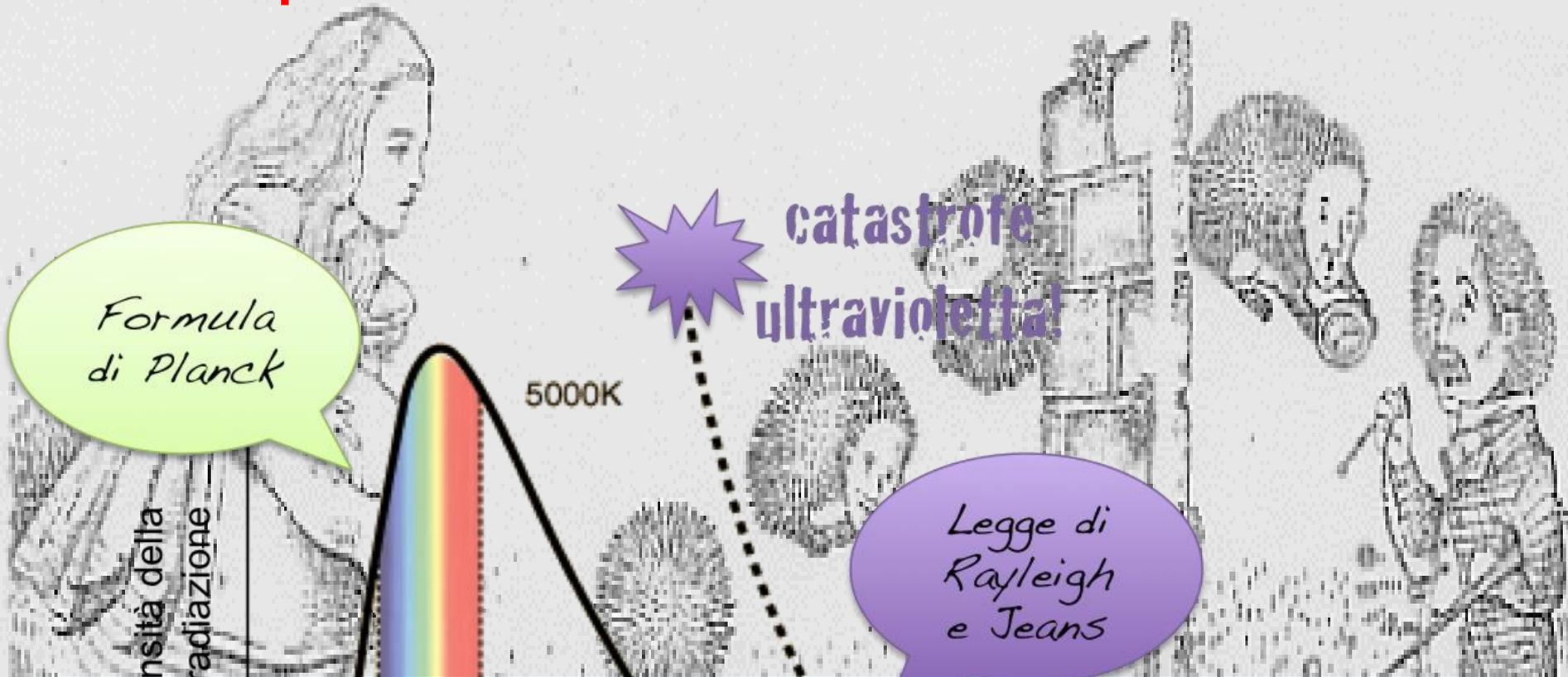
Maxwell 1865



Primi problemi....radiazione termica!



Primi problemi....radiazione termica!

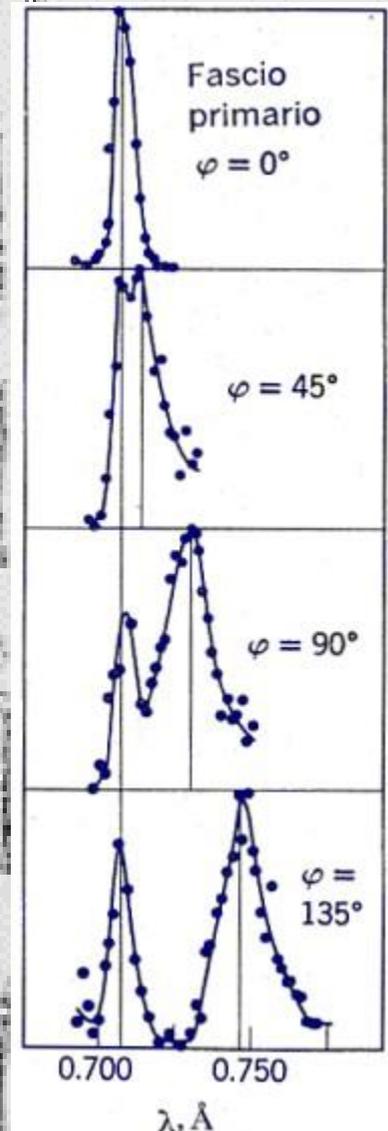
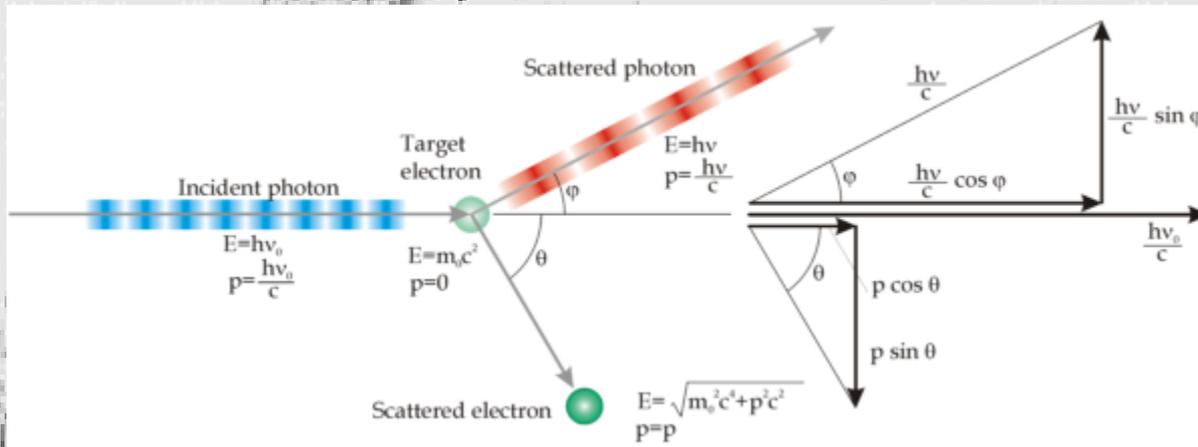


Curiosità....

perchè il cielo è blu?
tramonto è rosso?

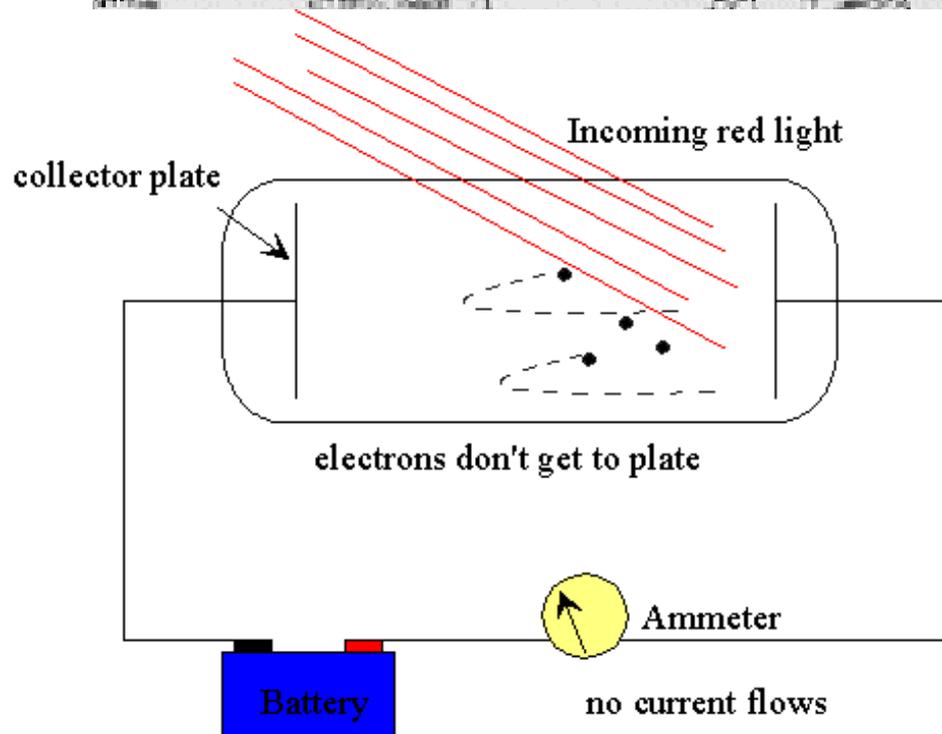
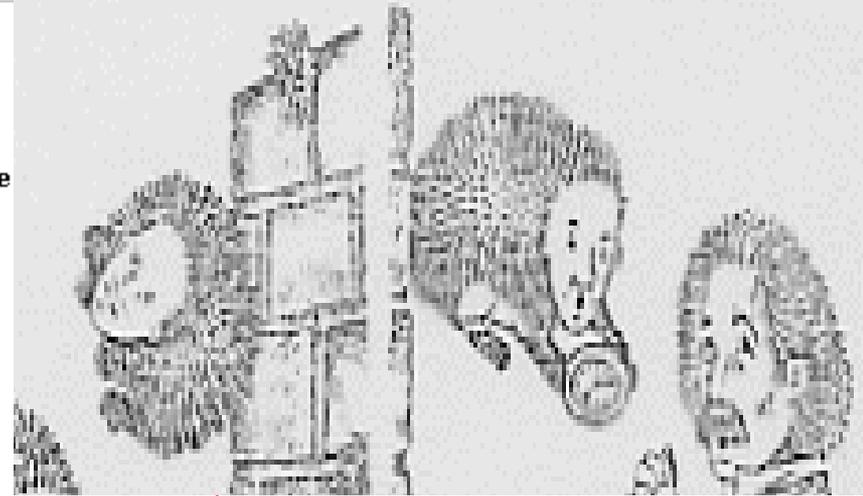
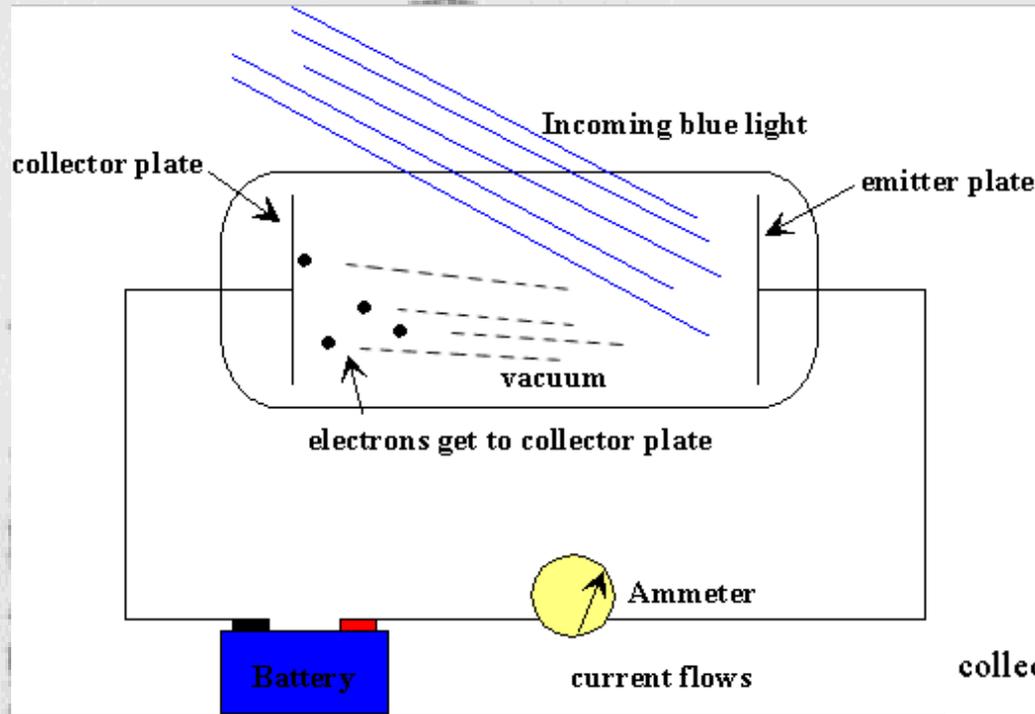
$$\frac{dI}{d\lambda} = \frac{dI}{d\lambda} \cdot \frac{2\pi c}{\lambda} = \frac{dI}{dE} \cdot \frac{d\lambda}{dE} \propto E^2$$

Altri problemi....effetto Compton!



Inspiegabile con la
Meccanica Classica!

Ancora problemi....effetto fotoelettrico!



Ancora problemi....effetto fotoelettrico!

Aspetti sperimentali:

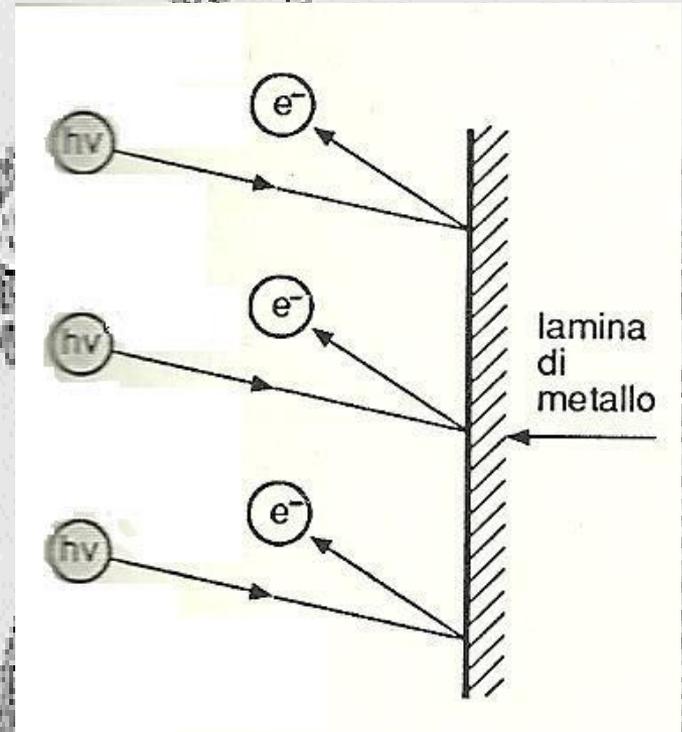
• *Energia e- emessi:*

1. non dipende
dall'intensità della luce

2. Dipende dalla
frequenza della luce

• L'emissione degli e- è
praticamente istantanea (<10⁻⁹
sec)

• Numero di e- emessi dipende
dall'intensità della radiazione



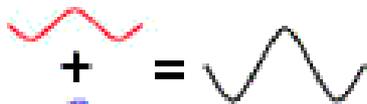
Einstein
(Nobel, 1905)

$$E = hf = \frac{h}{2\pi} 2\pi f \equiv h\omega$$

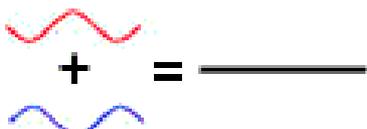
Insomma....onda o particella???



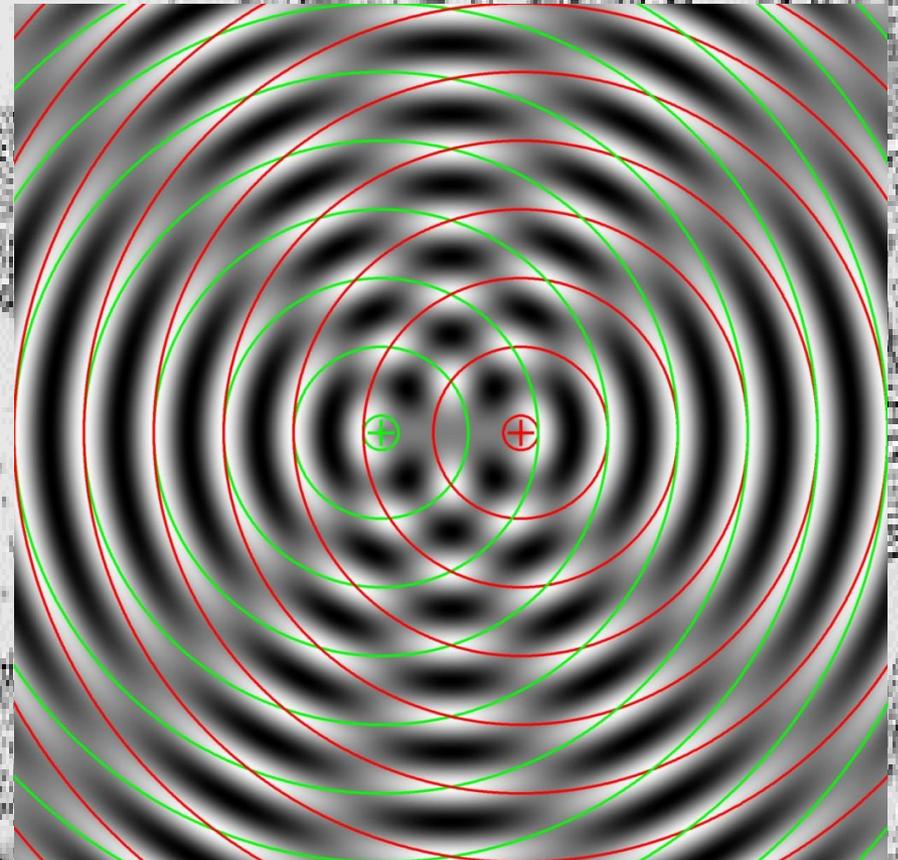
Le onde presentano il fenomeno dell'interferenza...è un buon test?



**interferenza
costruttiva**

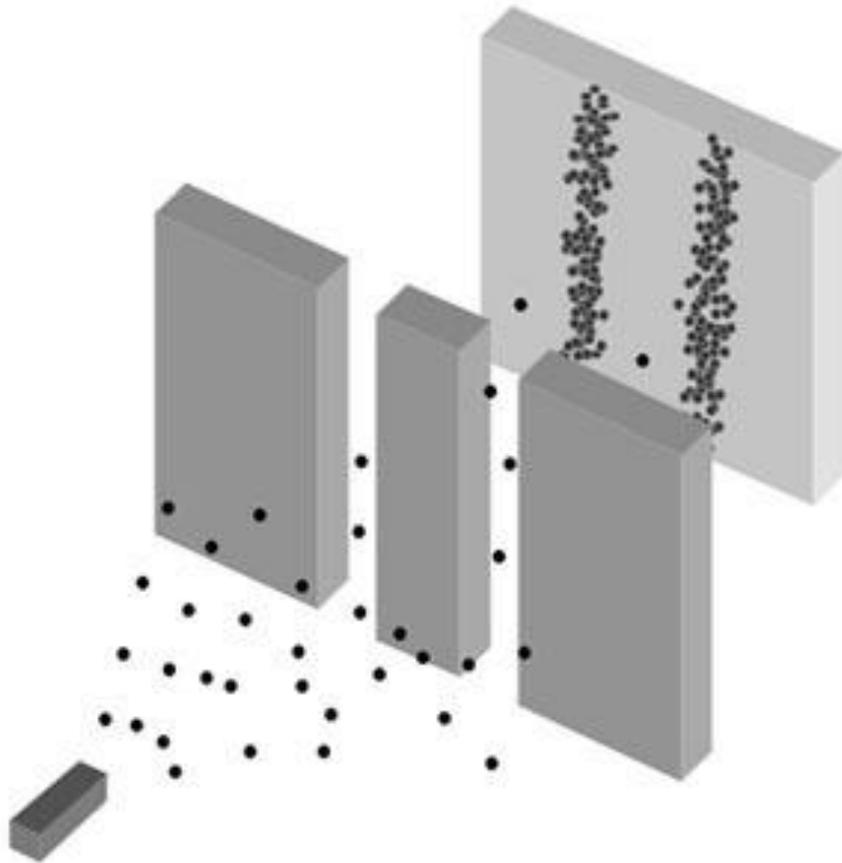


**interferenza
distruttiva**

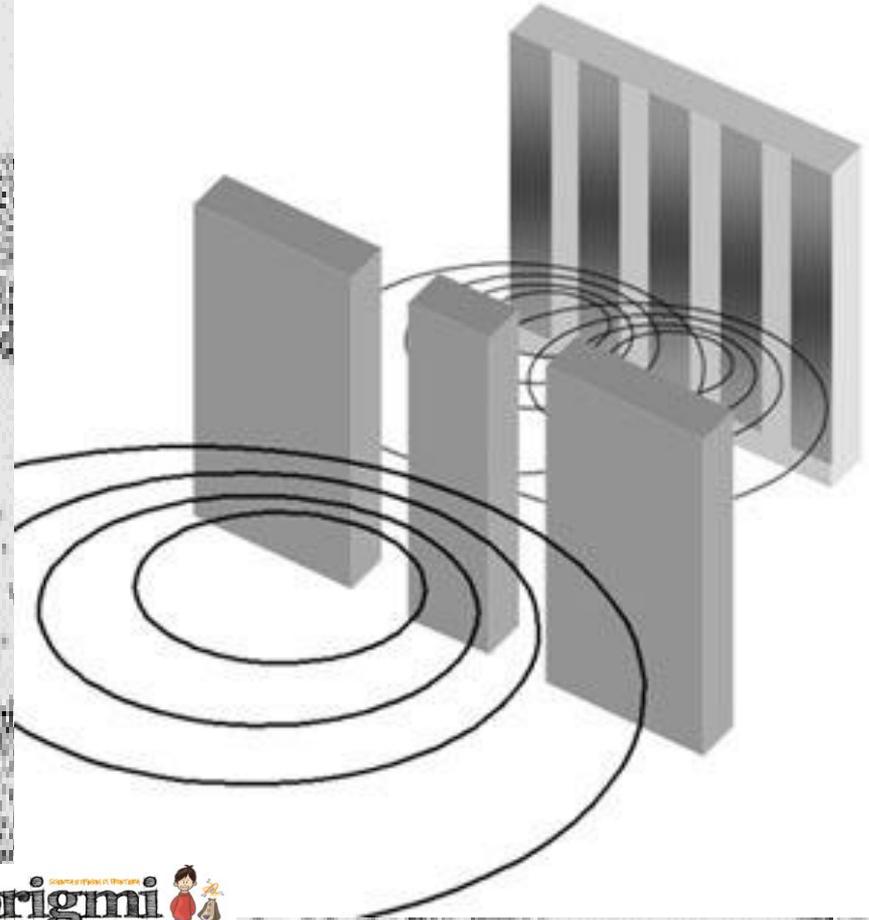


Insomma....onda o particella???

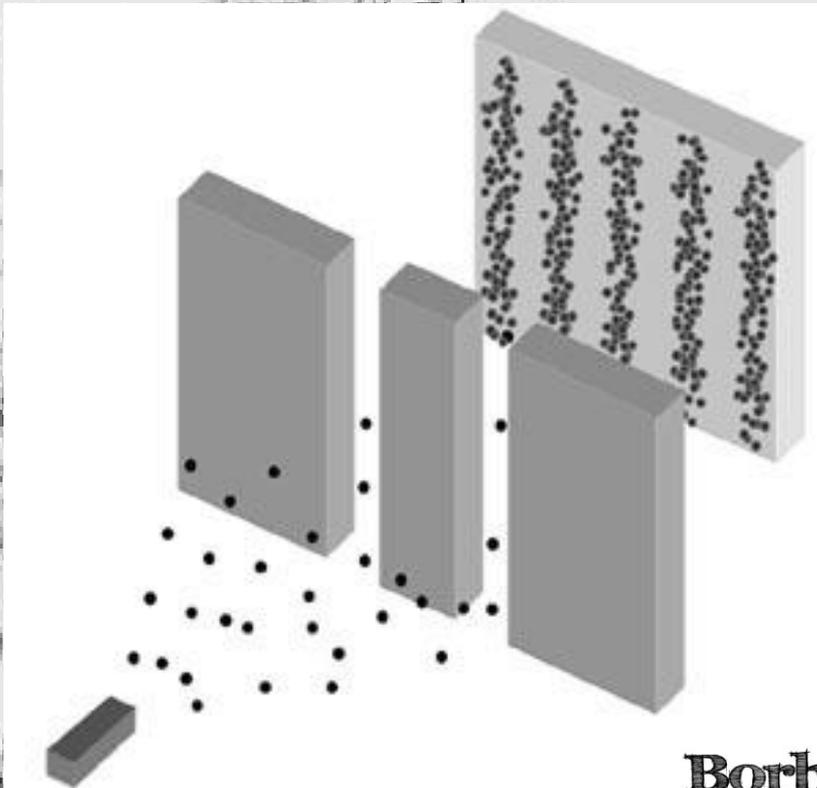
Se la luce è una
particella....



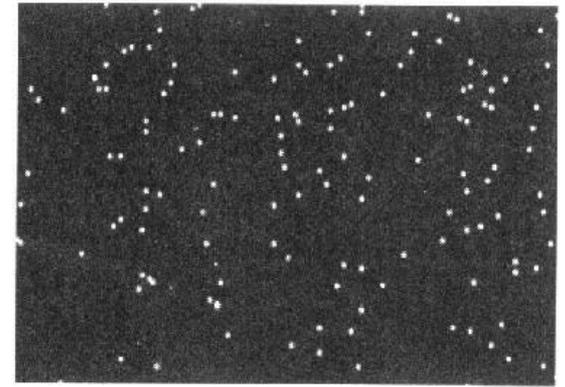
Se la luce è un' onda...



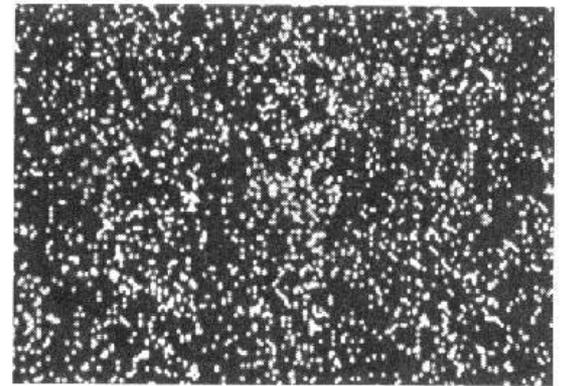
Proviamo (con gli elettroni)!!!



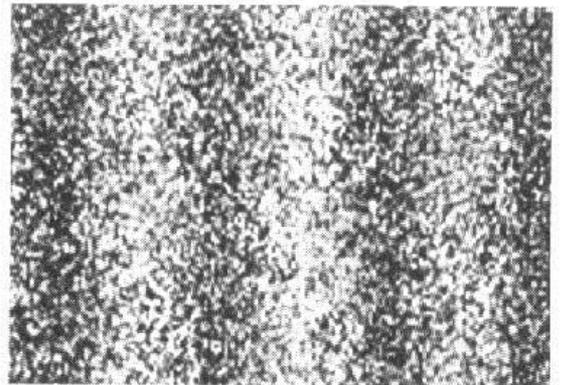
Borborigmi
di un fisico renitente



(b) After 100 electrons



(c) After 3000 electrons



(d) After 70 000 electrons

Che succede??? Si comportano come onde...

Ma allora è un'onda o una particella???

1923 De Broglie: Un e- si comporta talvolta come un'onda e talvolta come una particella

Particella

Impulso (**p**)

Energia (**E**)

Onda

Lunghezza d'onda (**λ**)

Frequenza (**ν**)

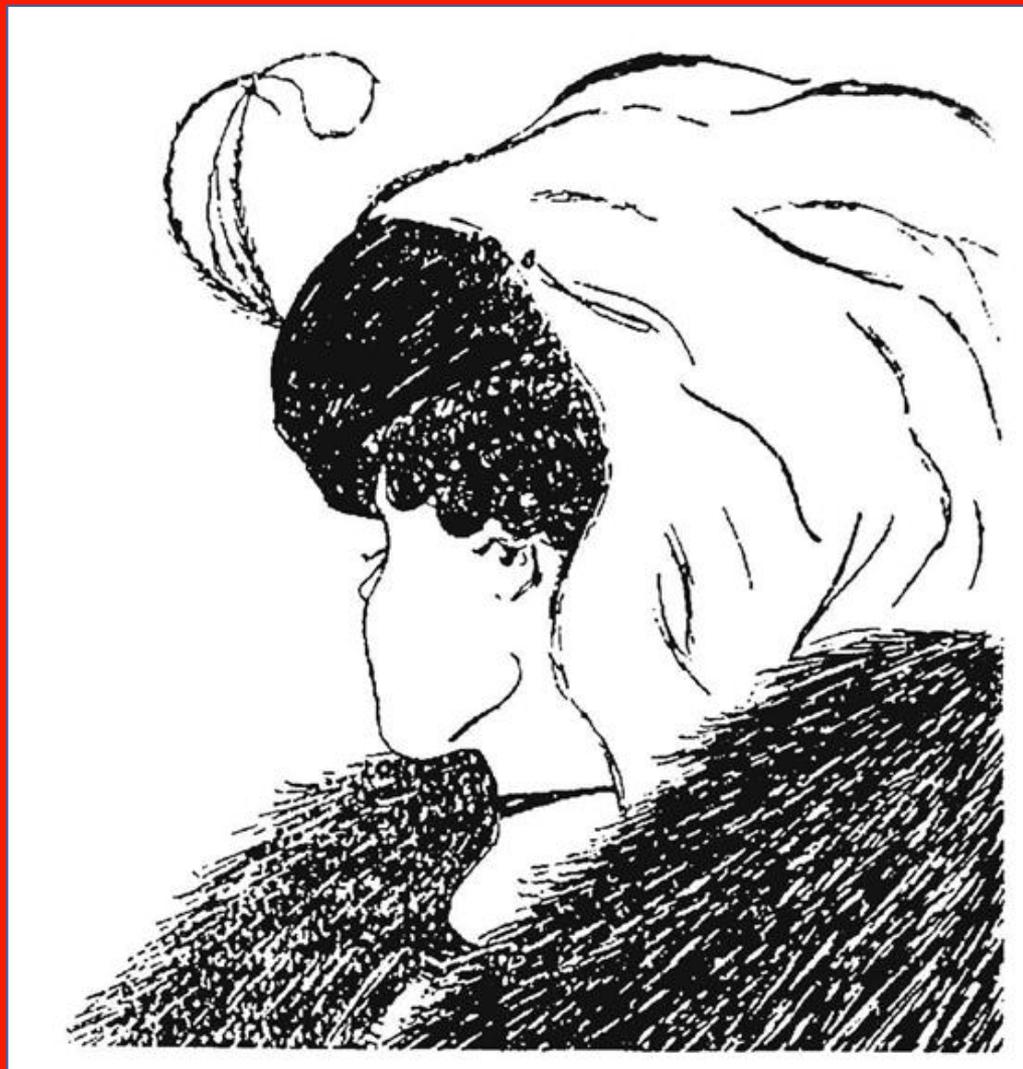
...ad ogni particella è associata un'onda:

$$\mathbf{p} = \mathbf{h}/\lambda \quad \mathbf{E} = \mathbf{h} \nu$$

con $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ Jsec

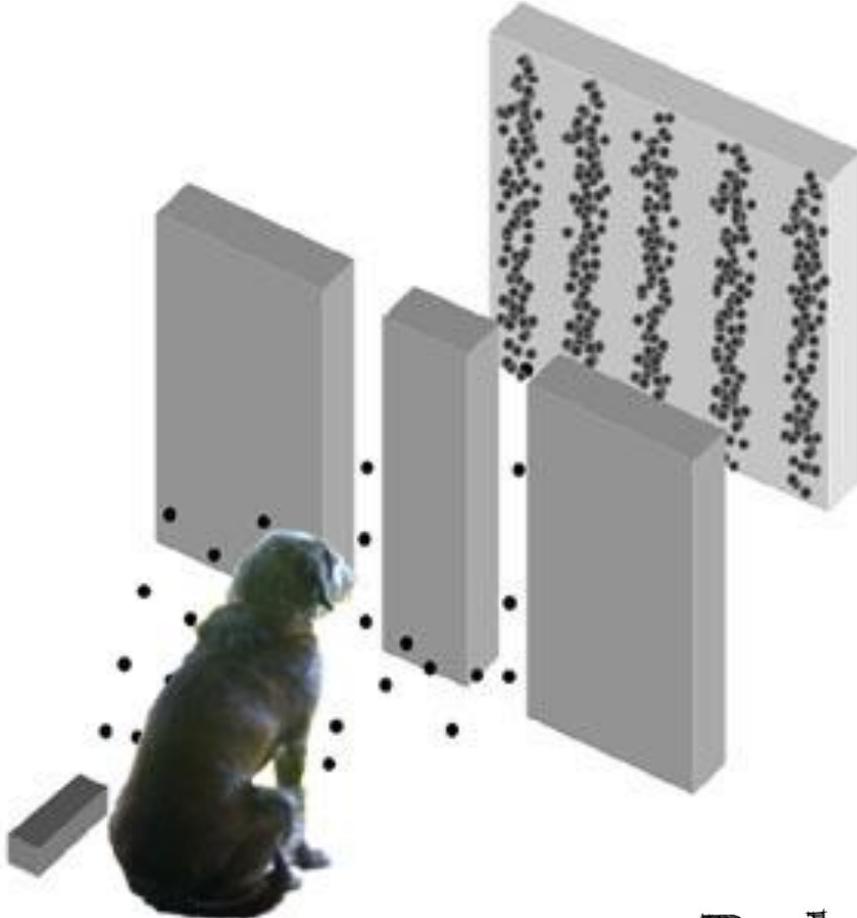
$$\lambda = \frac{h}{m\nu} = \frac{(6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js})}{(9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(10^7 \text{ m/s})} = 7.28 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

Complementarità e figure ambigue

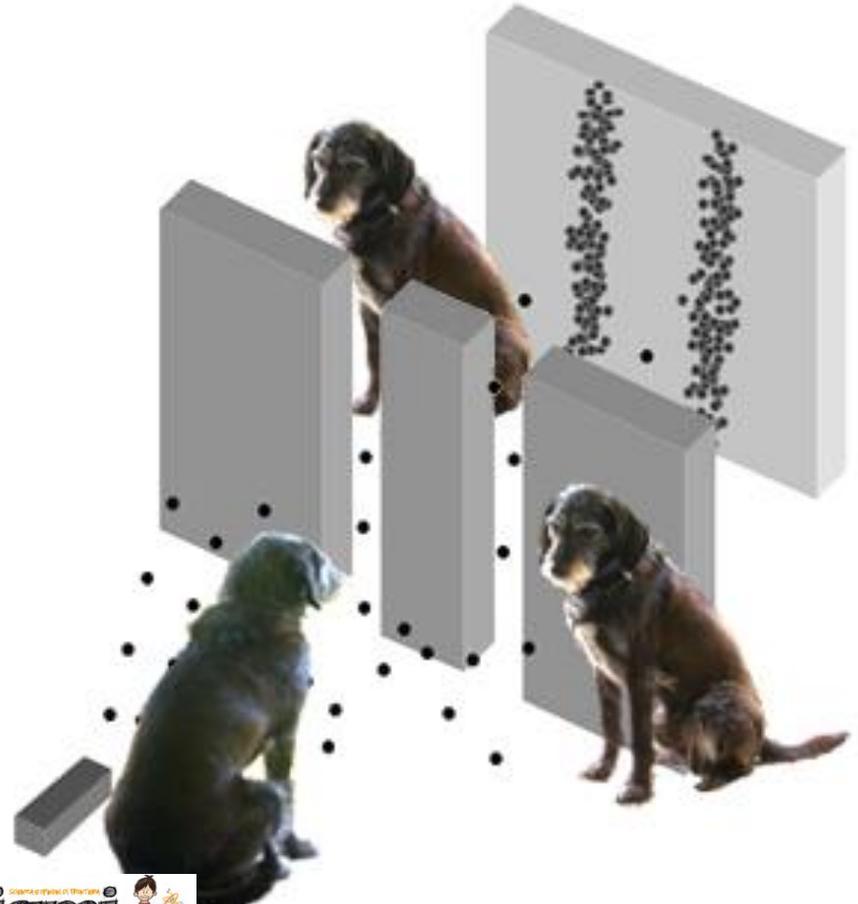


Mettiamo un osservatore...

Controlliamo che sia un solo elettrone per volta

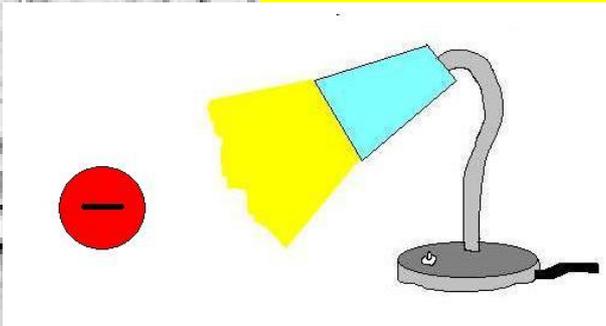


Vediamo dove passa!



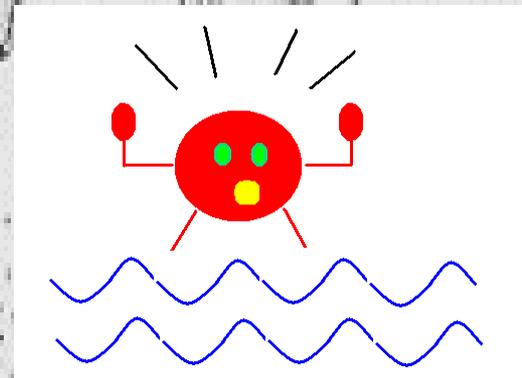
Osservatore in Meccanica Quantistica

La fisica si occupa esclusivamente di ciò che può essere osservato



Questa interazione perturba l'oggetto (ad es. un elettrone) osservato

Per osservare qualcosa dobbiamo farlo interagire con uno strumento di misura



Esiste un limite intrinseco all'accuratezza delle osservazioni che possiamo compiere.

ncipio di Indeterminazione di Heisenberg

Il processo di misura perturba irreparabilmente ciò che stiamo misurando

E' possibile conoscere con precisione arbitraria la posizione di una particella

E' possibile conoscere con precisione arbitraria la sua velocità

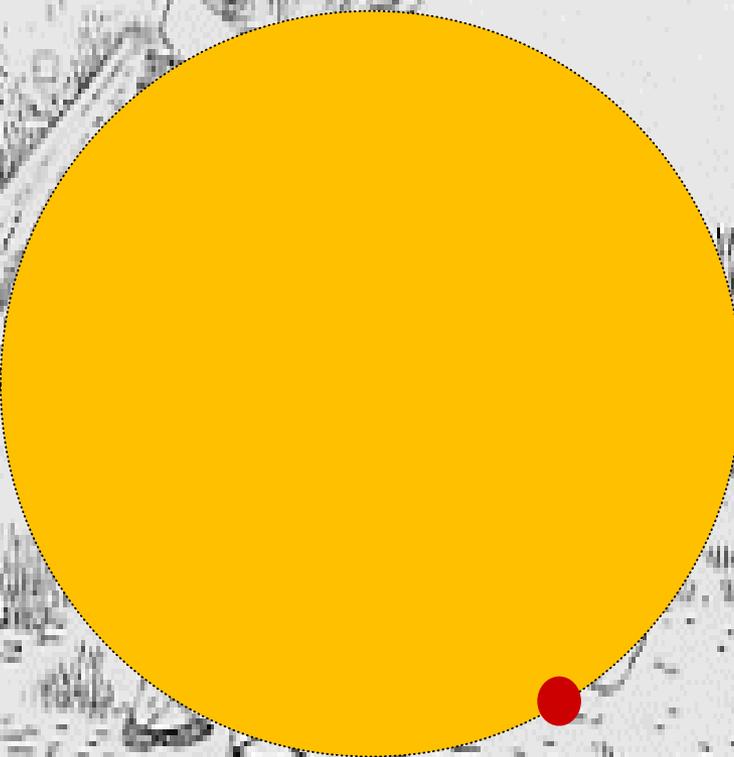
Non è possibile conoscere entrambe queste variabili con precisione qualsiasi

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2}$$



Il problema dell'atomo

Modello atomico di Rutherford
o modello planetario... va bene così?

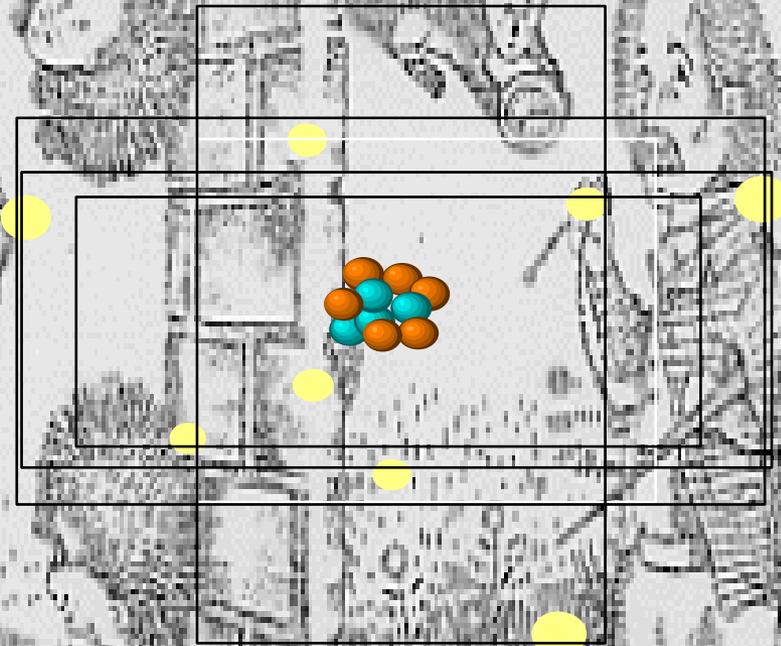


...un atomo così non dura
più di 10^{-8} sec!!!

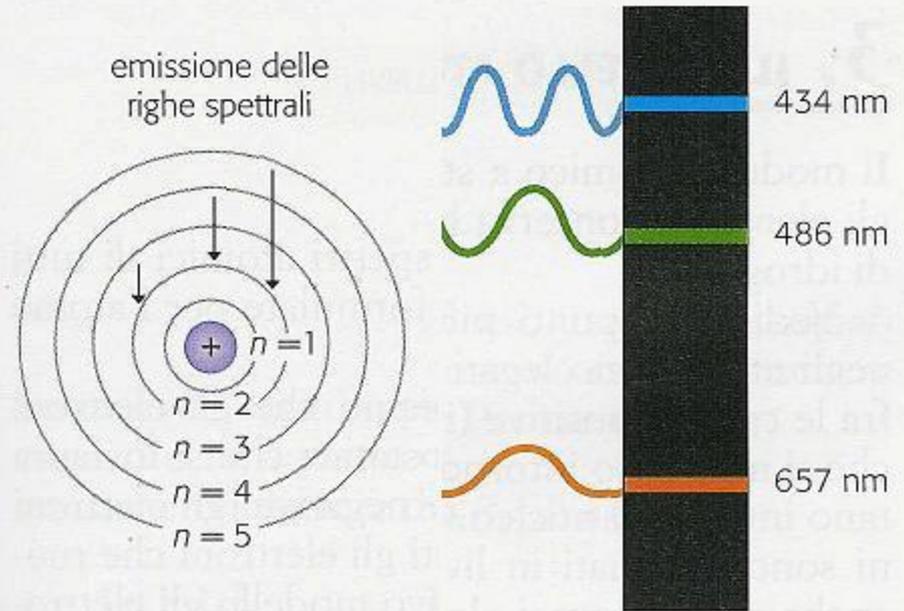
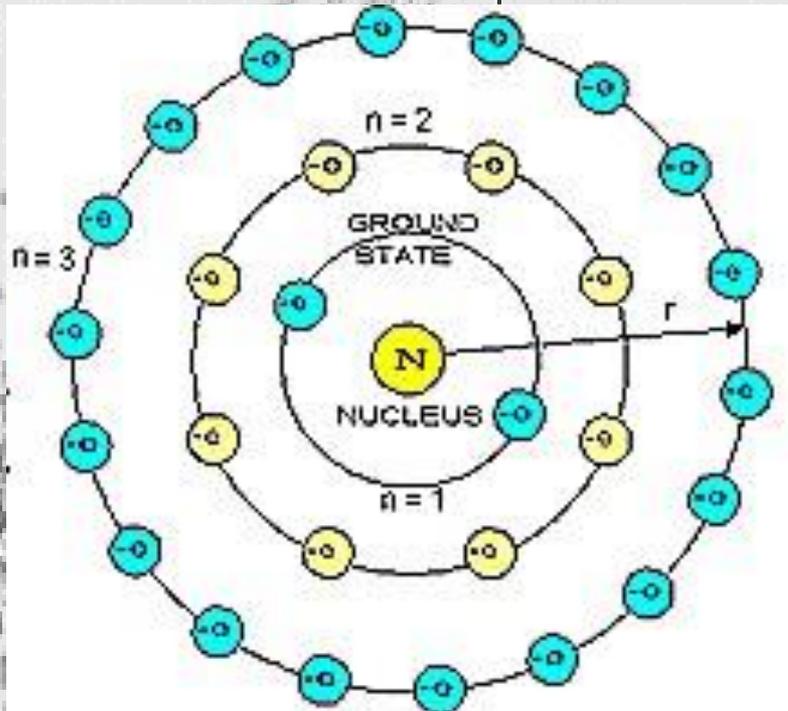
...infatti carica che accelera
irraggia energia

Il problema dell'atomo

- .Qualunque orbita ellittica dovrebbe essere consentita
- .Gli elettroni, essendo soggetti a un moto accelerato, dovrebbero irraggiare e cadere nel nucleo
- .Lo spettro dell'irraggiamento dovrebbe essere continuo



Il modello di Bohr



$$f = \frac{E_i - E_f}{h} = k_e \frac{e^2}{2a_0 h} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Idee interessanti e implicazioni “filosofiche” della meccanica quantistica

1.Osservare un fenomeno altera il fenomeno stesso

...e l'effetto non può essere reso più piccolo migliorando lo strumento!

1.I concetti di posizione esatta e impulso esatto non sono più validi

...non c'è posto in una teoria per concetti non definibili con una misura

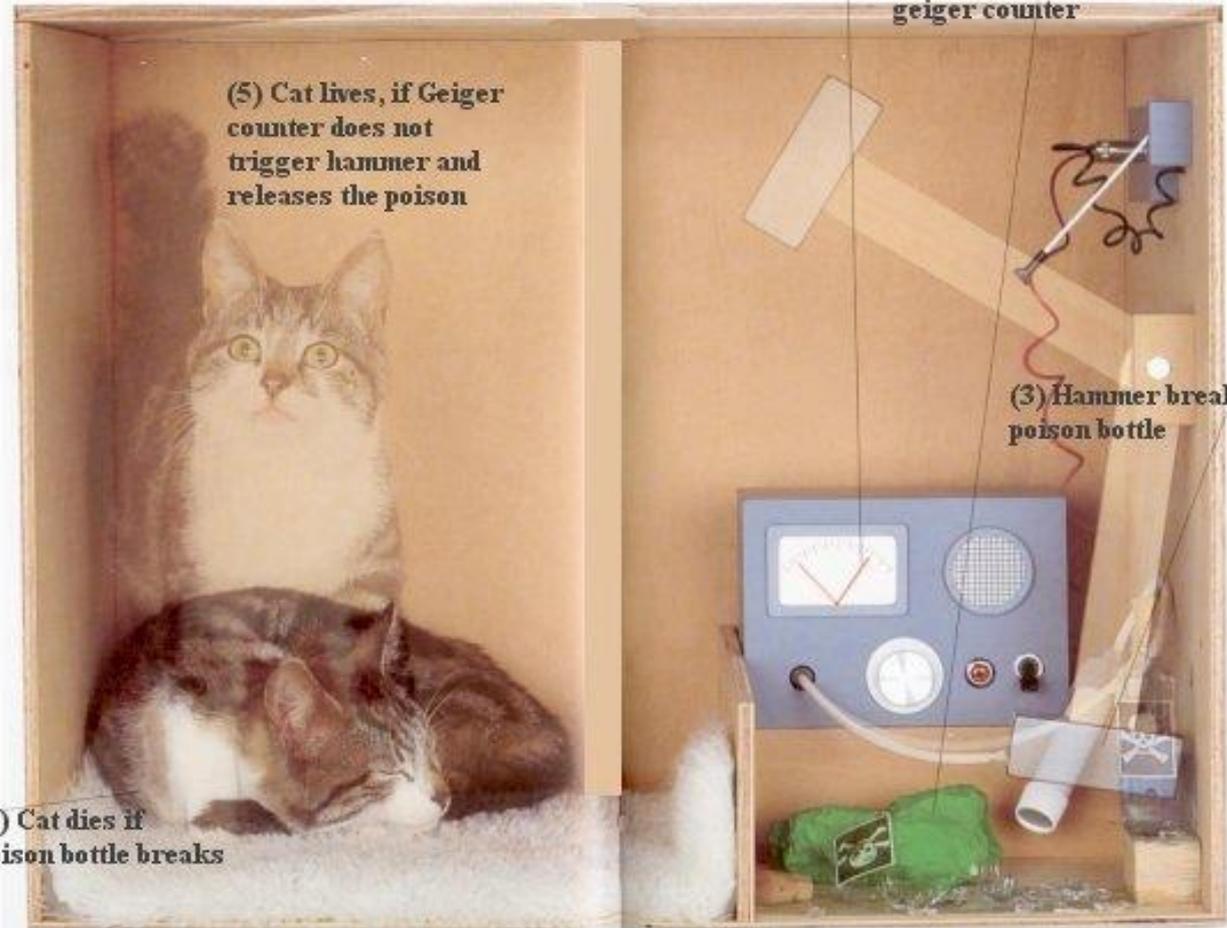
1.Il concetto di traiettoria lascia il posto a quello di probabilità

...il moto effettivo indicherà solo una possibilità e la meccanica quantistica fornirà la traiettoria più probabile

4. Principio di causalità

Effetti strani...il gatto di Schroedinger!

Schrodinger's Cat

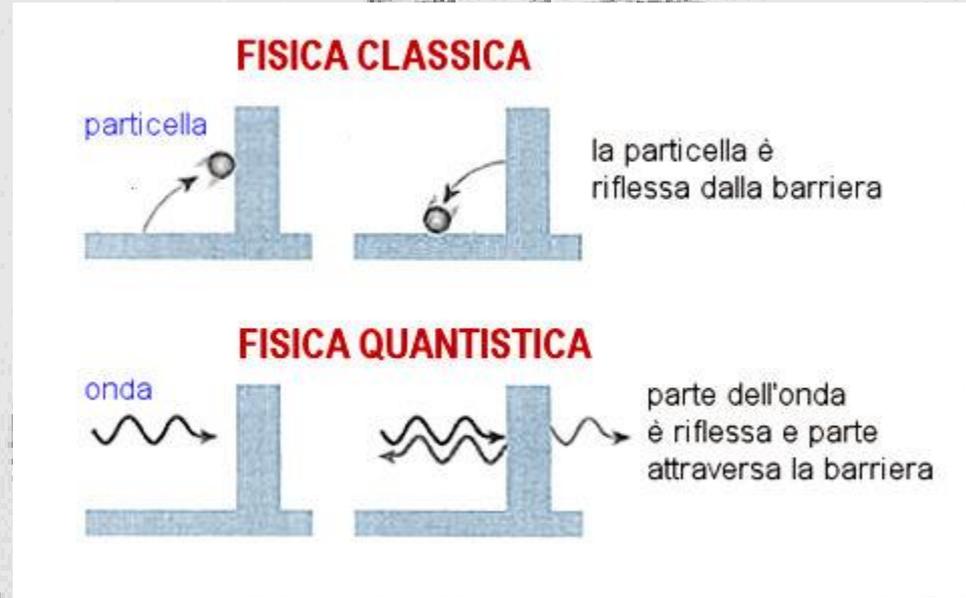


Perchè non succede nella realtà?

Effetti strani...effetto tunnel



Effetti strani...effetto tunnel



Perchè non succede nella realtà (o invece si)?

L'idea di Dirac

Nel 1928 da **Dirac** che scrive un'equazione per descrivere il moto di un elettrone combinando meccanica quantistica e relatività speciale. Ma l'equazione ha un problema: ha **due soluzioni!** Una per un elettrone con energia positiva e una per un "elettrone" con energia negativa.

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

Relatività

Meccanica
quantistica

Dirac interpreta la soluzione negativa inventando una particella identica all'elettrone, ma con carica elettrica e parità opposta. Questa ipotetica particella, mai osservata fino ad allora, viene denominata da Dirac antielettrone o "**positrone**".



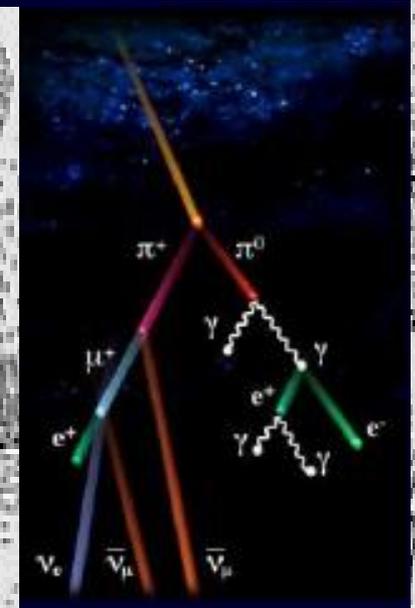
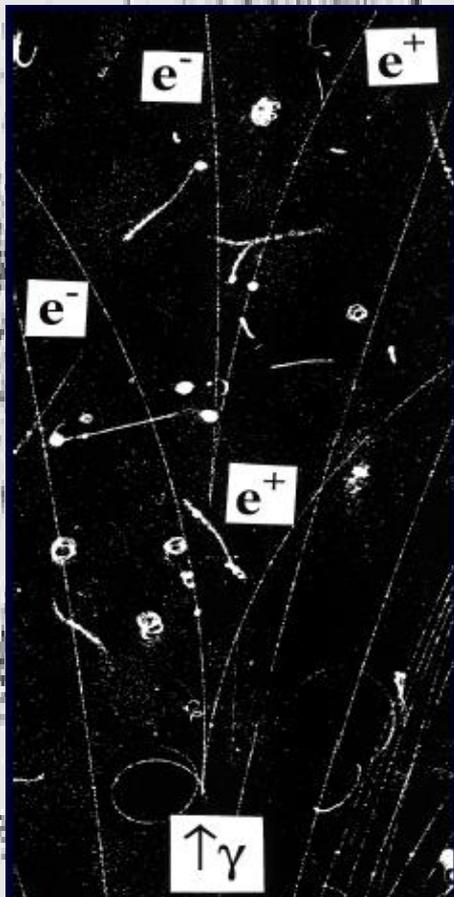
La ricerca della misteriosa particella comincia nel 1930... alcuni anni prima era stata scoperta una sorgente naturale di particelle di alta energia: **i raggi cosmici!** Particelle di alta energia provenienti dallo spazio urtano gli atomi dell'atmosfera terrestre e producono immensi sciami di particelle di energia più bassa.

Positroni!!!

Nel 1932 **Carl Anderson** osserva in una camera a nebbia una particella con carica positiva e con la stessa massa dell'elettrone: è la conferma della nuova particella prevista da Dirac.

Dirac prende il **Nobel** nel 1933. Nel seminario ottenuto in occasione del Nobel Dirac specula su universi di antimateria paralleli al nostro...

PAUL A. M. DIRAC
Theory of electrons and positrons
Nobel Lecture, December 12, 1933



Il Modello Standard

	Fermioni			Bosoni	
Quarks	u up	c charm	t top	g gluone	Mediatori di Forze
	d down	s strange	b bottom	γ fotone	
	ν_e e-neutrino	ν_μ μ -neutrino	ν_τ τ -neutrino	W bosone	
Leptoni	e elettrone	μ muone	τ tau	Z bosone	
	I	II	III	Bosone di Higgs	
Famiglie di materia					

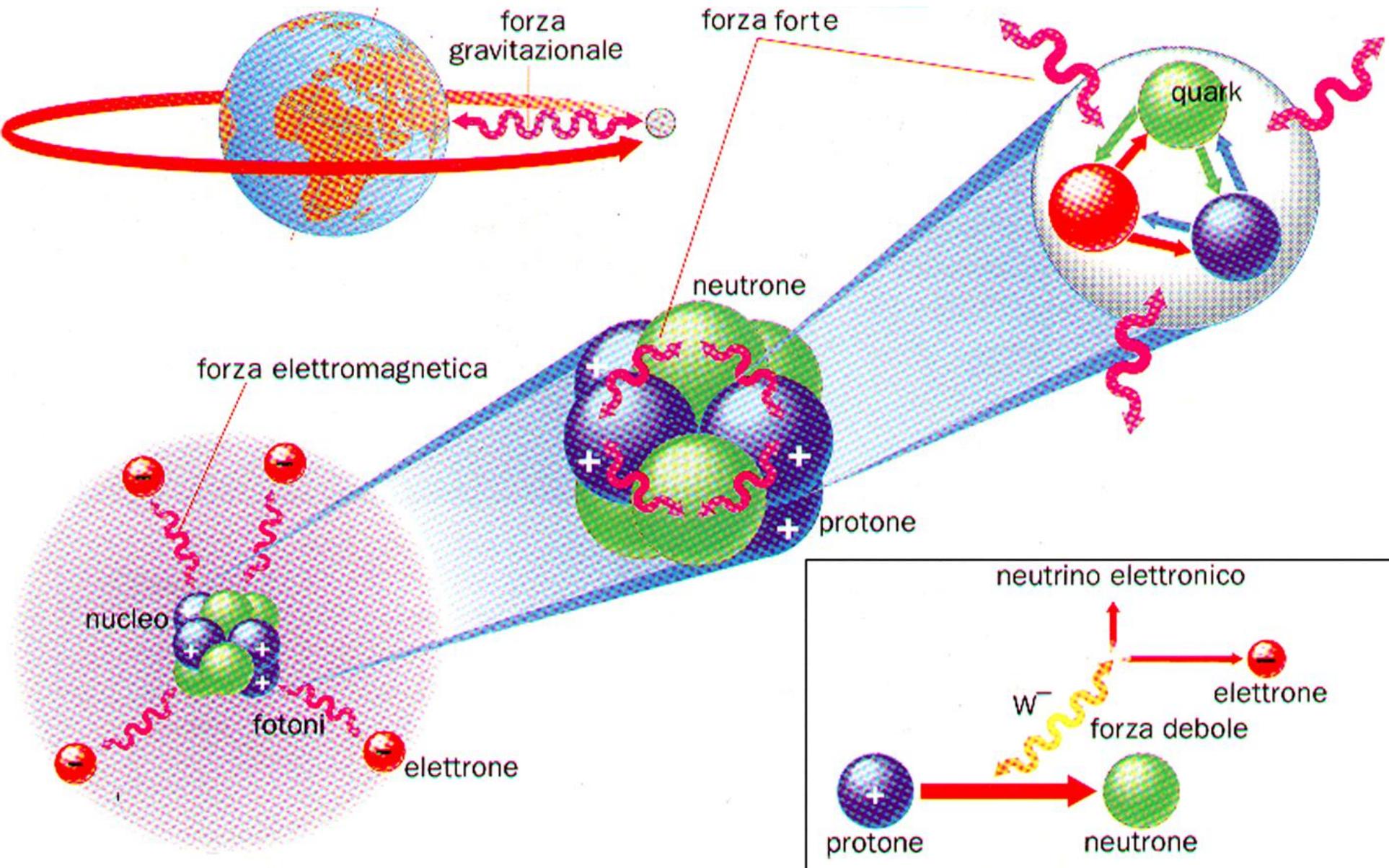
Gravità



il fantasma dell'opera



LE FORZE DELLA NATURA



LEPTONI

Particelle soggette alla forza debole.

Hanno spin $\frac{1}{2}\hbar$

Diametri inferiori a 10^{-19} m.

Nome Simbolo Carica Massa Vita media (s)	Elettrone e^- -1 0,511 MeV > 1030	Neutrino elettronico ν_e 0 < 7 eV > 1030
Nome Simbolo Carica Massa Vita media (s)	Muone μ^- -1 105,7 MeV $2,2 \cdot 10^{-6}$	Neutrino muonico ν_μ 0 < 0,25 MeV > 1030
Nome Simbolo Carica Massa Vita media (s)	Tauone τ^- -1 1,777 GeV $2,91 \cdot 10^{-13}$	Neutrino tauonico ν_τ 0 < 31 MeV -



QUARK

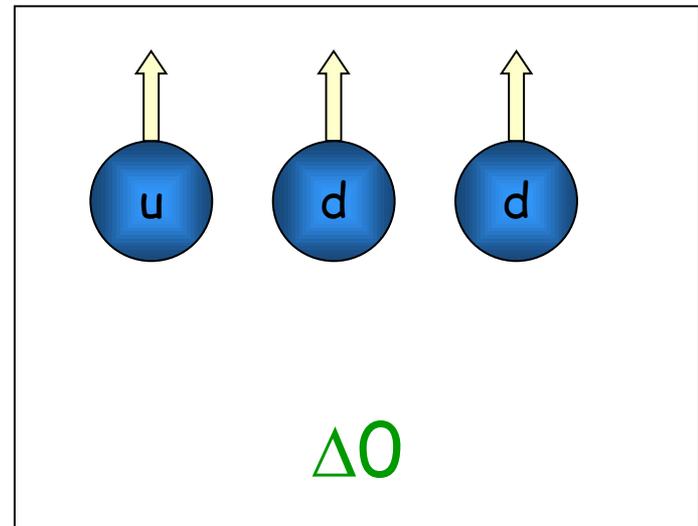
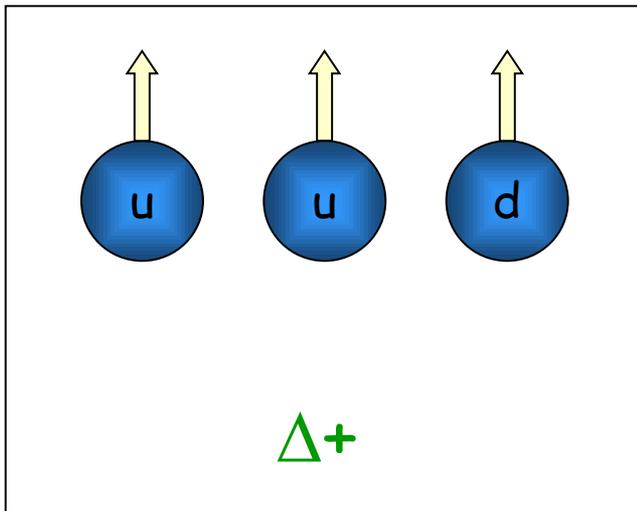
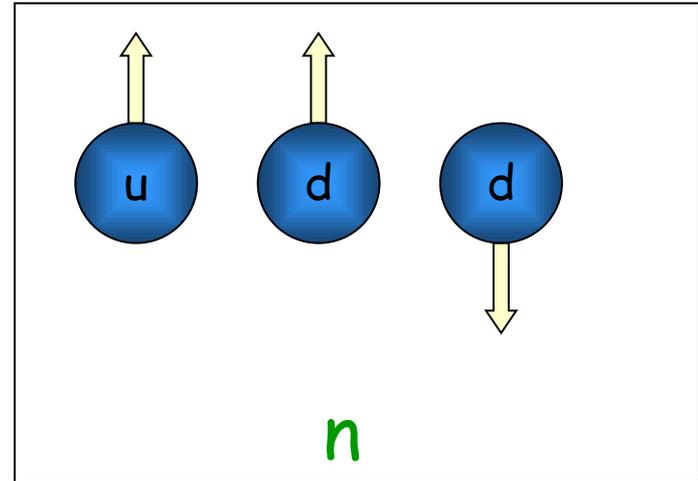
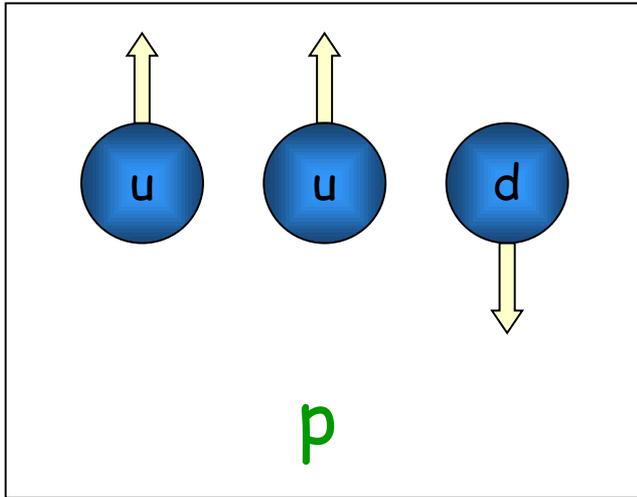
Hanno carica frazionaria.

Hanno spin $\frac{1}{2}\hbar$

Nome Simbolo Carica Massa	up u +2/3 3,5 MeV	down d -1/3 3,5 MeV
Nome Simbolo Carica Massa	charm c +2/3 1,8 GeV	strange s -1/3 520 MeV
Nome Simbolo Carica Massa	top t +2/3 172 GeV	bottom b -1/3 5,2 GeV

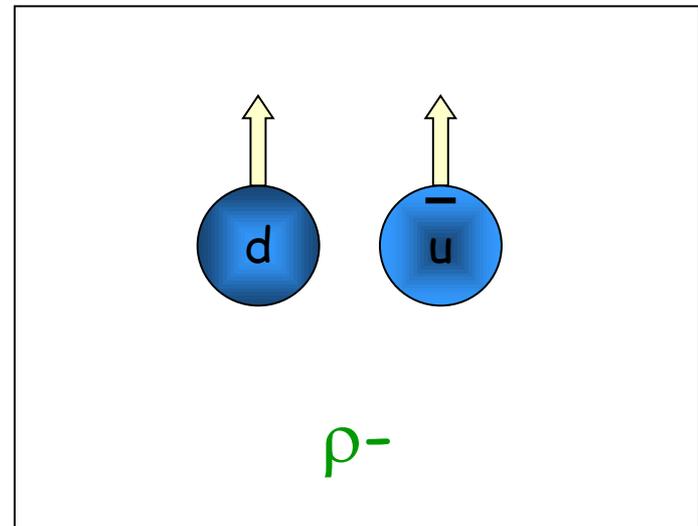
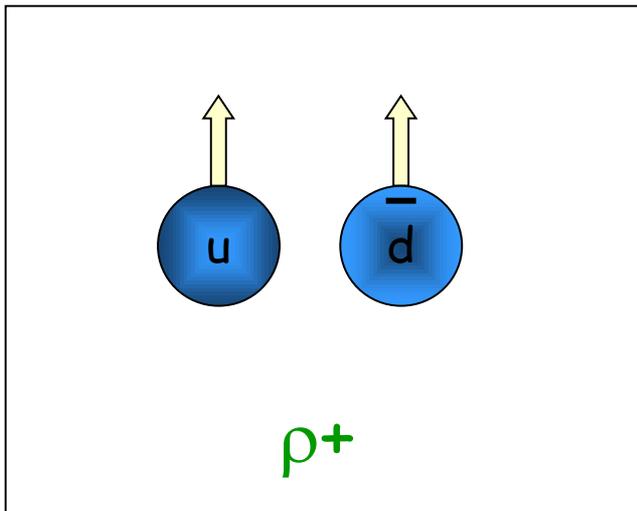
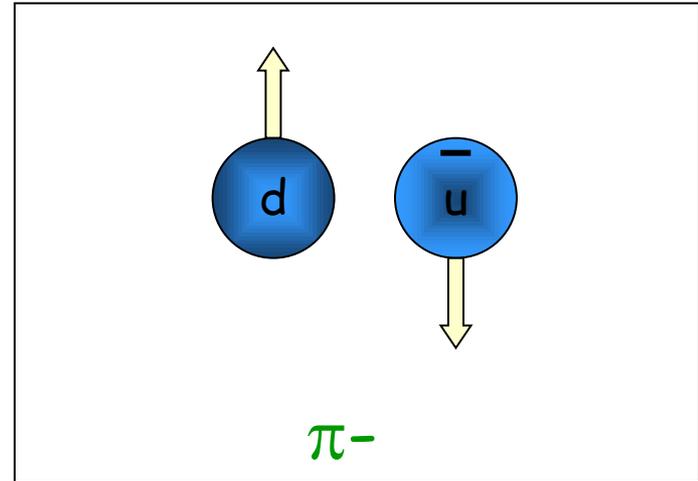
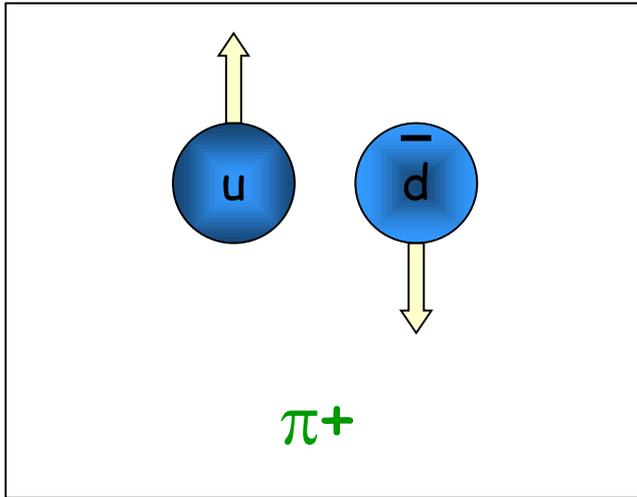
PROPRIETA' DEI QUARK

Barioni



PROPRIETA' DEI QUARK

Mesoni



CARICA DI COLORE

Il principio di esclusione di Pauli, secondo il quale in un atomo due elettroni non possono avere simultaneamente gli stessi numeri quantici, può essere generalizzato a tutte le particelle con spin semintero.

I quark avendo spin $\frac{1}{2}$ devono ubbidire al principio di esclusione di Pauli.

Ci sono alcuni adroni che hanno quark dello stesso tipo e con lo stesso spin
(per esempio il protone e il neutrone)

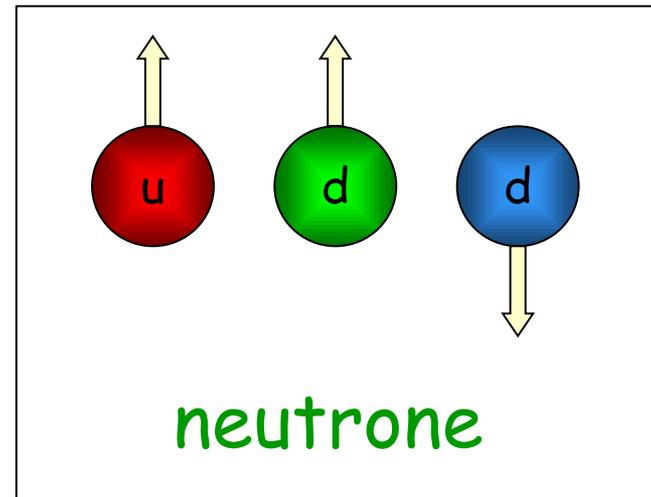
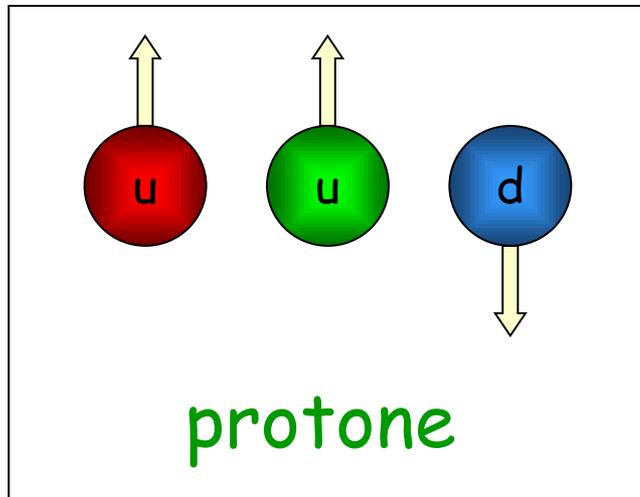
Ogni quark deve avere una proprietà addizionale che viene chiamata
carica di colore.

Sono possibili tre diverse cariche di colore: **rosso**, **verde**, **blu**.

CARICA DI COLORE

Tutti i barioni sono costituiti da quark rossi, verdi e blu.

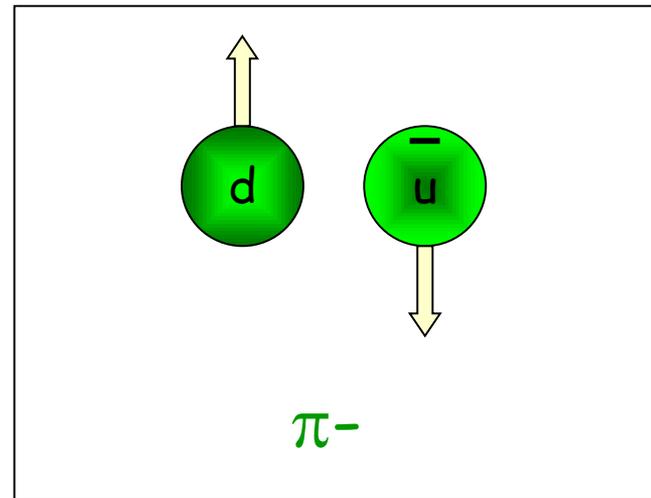
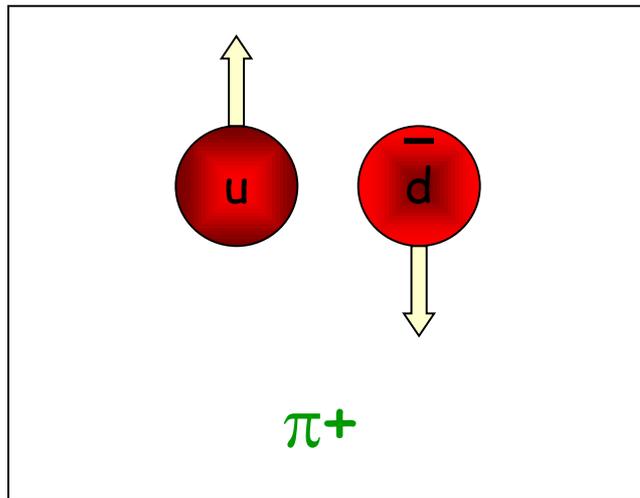
Come per i colori veri e propri la combinazione di tutti i colori primari dà il bianco, così la combinazione dei quark colorati dà barioni incolori.



CARICA DI COLORE

Come un quark ha un antiquark, ogni colore ha il suo anticolore.

I mesoni sono costituiti da un quark di un colore e un antiquark che porta l'anticolore.



CARICA DI COLORE

Le varietà di quark (up, down, ecc.) sono dette sapori (flavors).

Ogni sapore si presenta in tre colori

$$(6 \text{ sapori}) \times (3 \text{ colori}) = 18 \text{ quark}$$

Ai 18 quark sono associati 18 antiquark.

Ognuno dei 6 leptoni ha un'antiparticella (12 in tutto)

Totale 48 particelle elementari.

Saranno troppe ?

A black and white illustration of a village scene. In the foreground, a dog is lying on the ground. In the background, several people are walking or standing. One person is carrying a large bundle on their back. The scene is set in a rural area with a fence and some buildings in the distance.

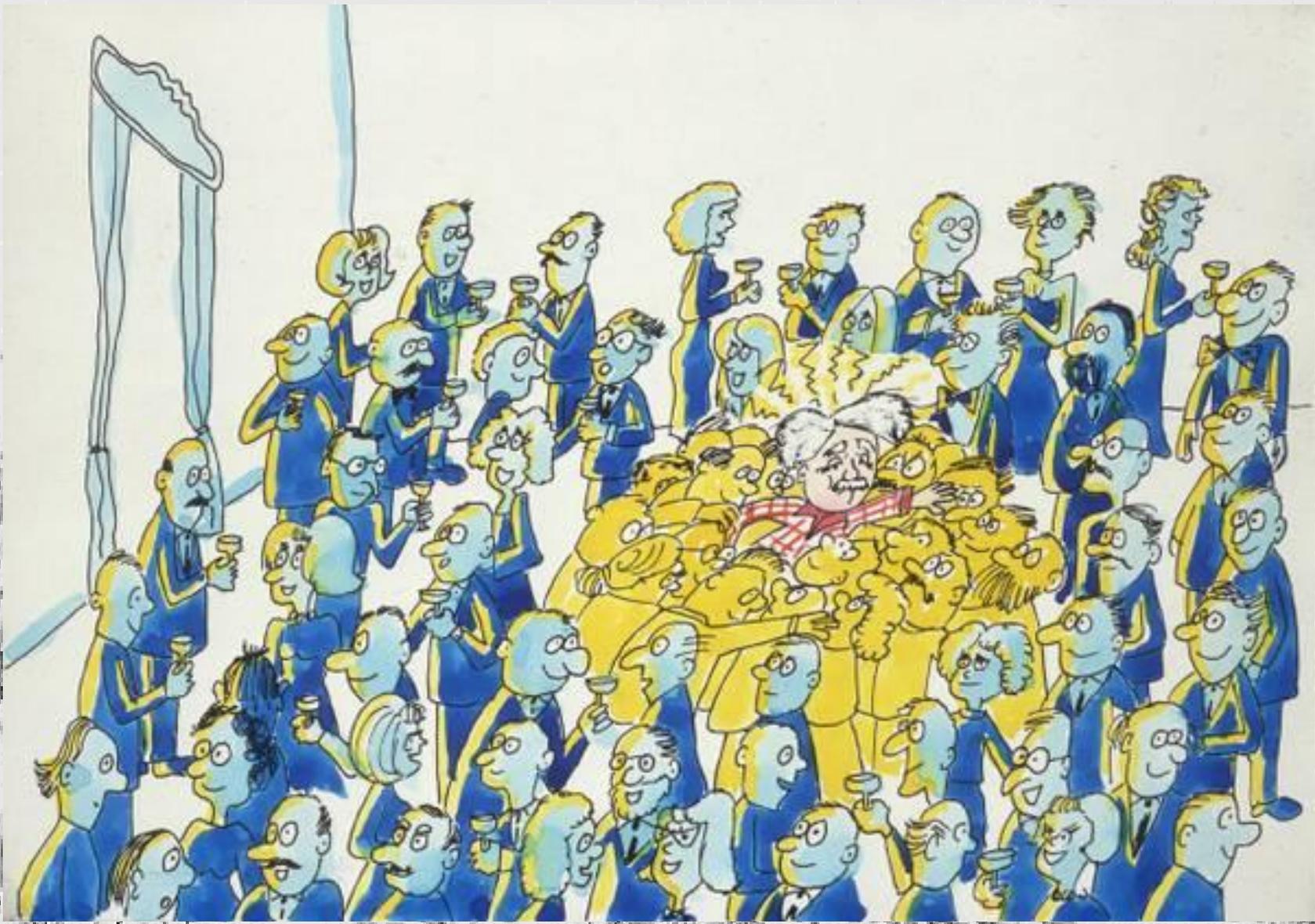
**Il meccanismo di
Higgs:
perchè le particelle
hanno massa???**



Immaginiamo una stanza piena di fisici che stanno tranquillamente discutendo fra loro e immaginiamo che questo sia lo spazio occupato dal campo di Higgs...



...uno scienziato famoso entra nella sala determina una perturbazione nel momento in cui attraversa la stanza e ad ogni passo che fa attira gruppi di ammiratori...



questa situazione causa un aumento della resistenza al movimento, in altre parole lo scienziato famoso acquisisce massa, proprio come fa una particella che attraversa il campo di Higgs.

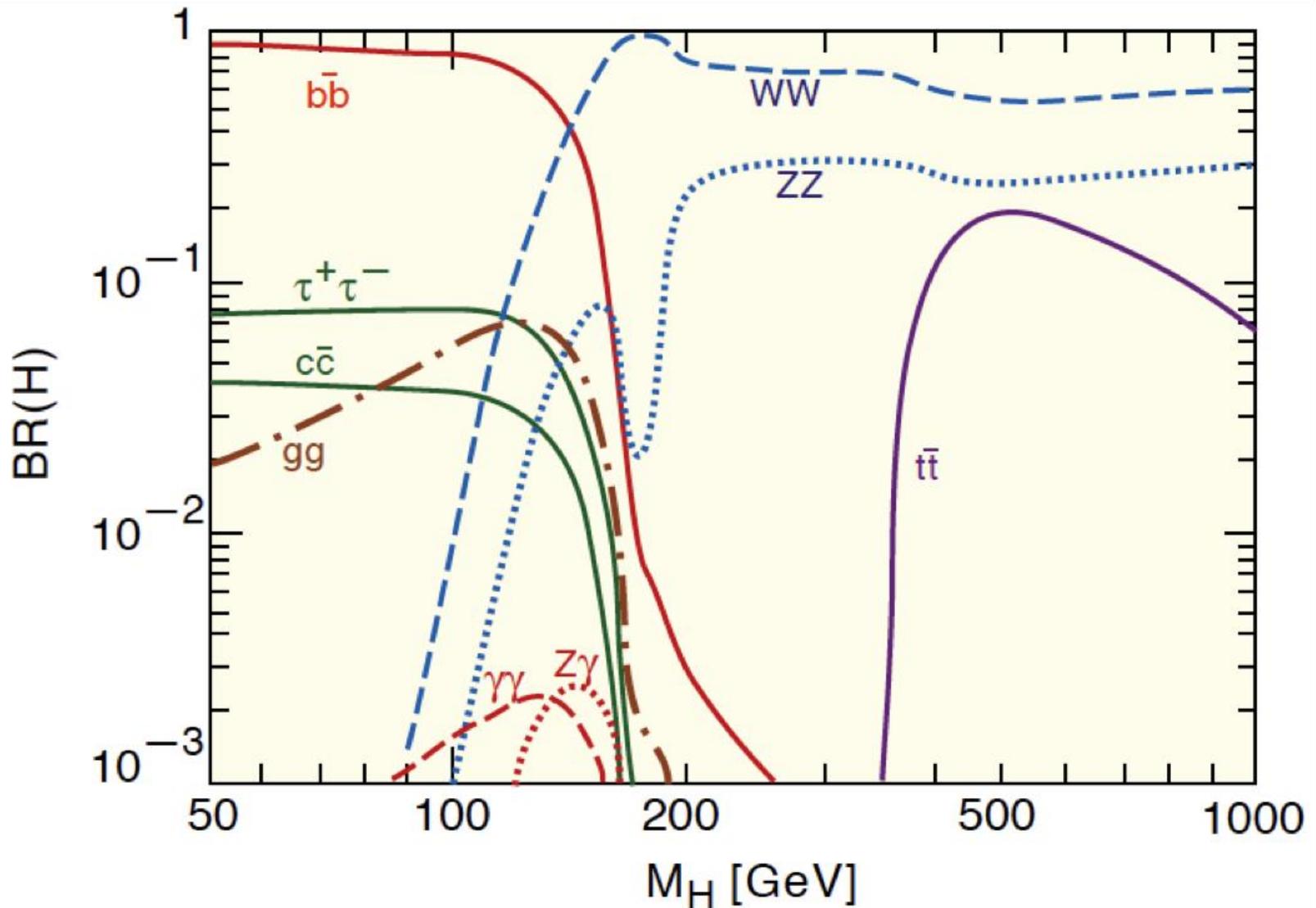


Un effetto analogo si può osservare se all'improvviso nella sala qualcuno fa circolare una voce ...

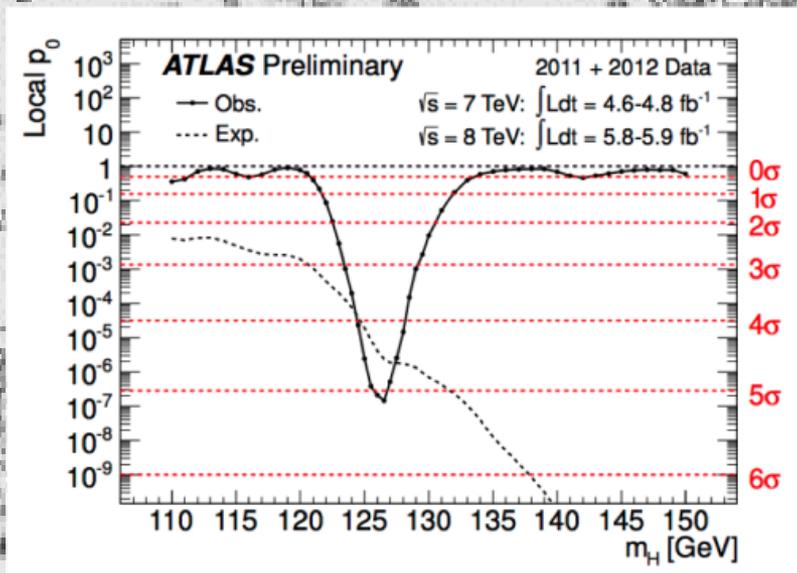
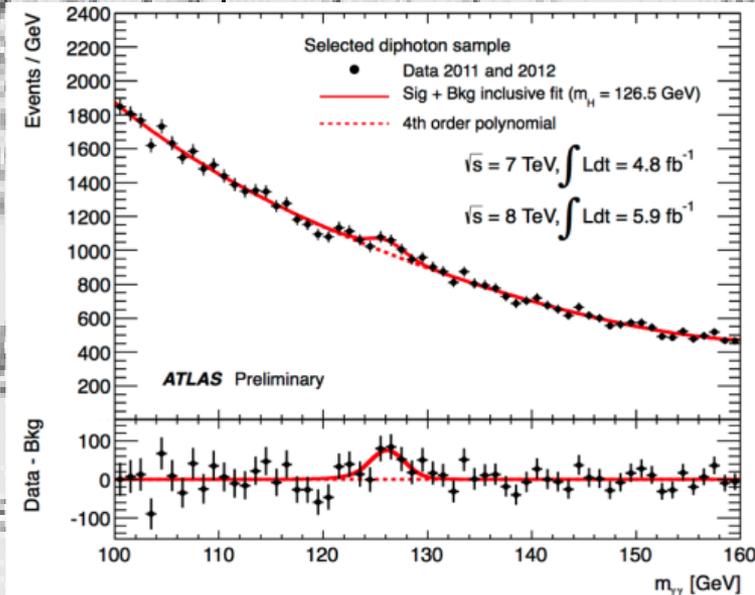
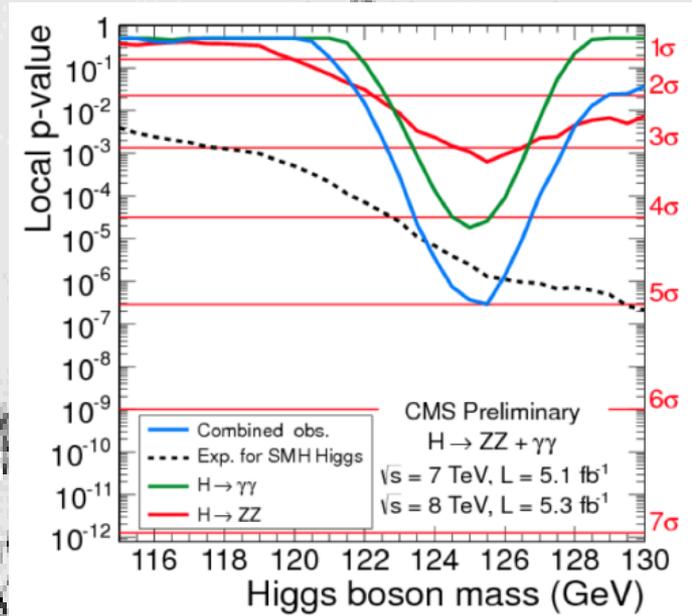
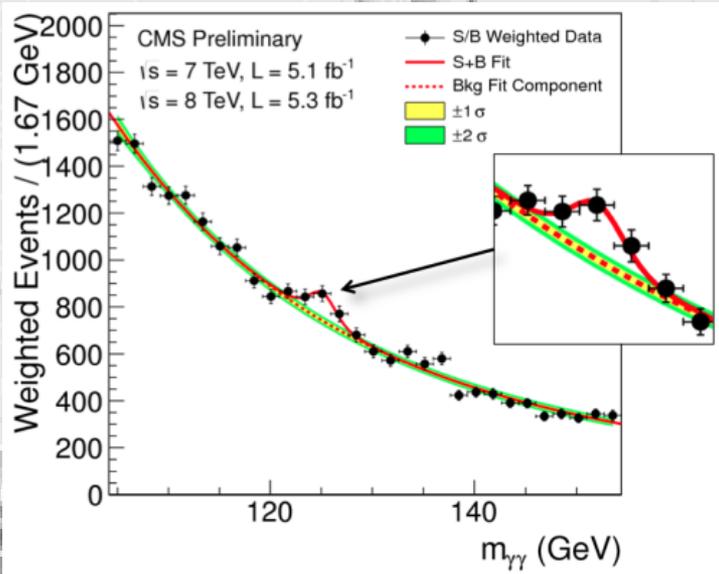


questa porta le persone presenti a riunirsi in gruppi: questi ultimi sono le particelle di Higgs

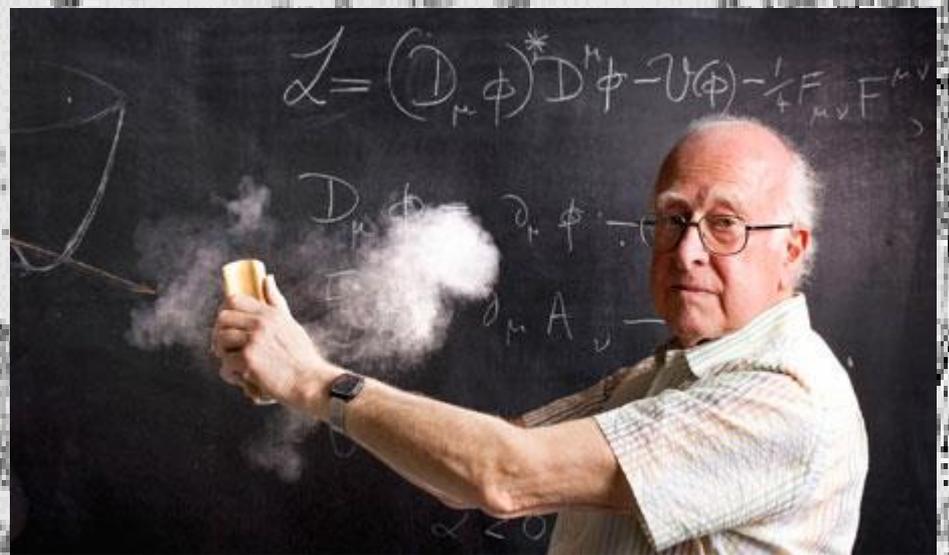
Dove e come lo troviamo?



Dove e come lo abbiamo trovato!!!



5 Luglio 2012



Oltre il Modello Standard

Il Modello Standard risponde a molte domande sulla struttura e l'equilibrio della materia.

Ma non è una teoria completa perché non è ancora in grado di spiegare pienamente la natura del mondo.

Perché ci sono tre generazioni di quark, e tre di leptoni?

I quark e i leptoni sono davvero fondamentali, o sono a loro volta composti di particelle più elementari?

Perché il Modello Standard non è in grado di predire la massa di una particella?

In base agli esperimenti, ci dovrebbero essere uguali quantità di materia e antimateria nell'universo: allora perché, in base alle osservazioni, l'universo risulta composto principalmente di materia?

Come rientra la gravità nel Modello Standard ?

Sappiamo che nell'universo ci deve essere molta più materia di quella che possiamo osservare. Questa invisibile materia oscura, che cosa è?

Domande come queste spingono i fisici delle particelle a costruire e adoperare acceleratori sempre più avanzati e più potenti, in modo che collisioni ad un'energia ancora più alta possano fornire indizi per risolvere i misteri.

Il Modello Standard non riesce a spiegare *perché* alcune particelle esistono così come sono.

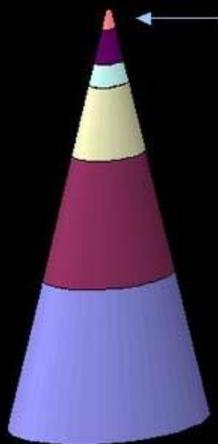
Per esempio i fisici, pur conoscendo da anni le masse di tutti i quark (tranne quella del top), non sono stati capaci di predire con precisione la massa del top.

Hanno avuto bisogno dell'osservazione sperimentale, perché il Modello Standard non ha un modello matematico che spieghi le masse delle particelle.

La materia oscura

La materia di cui siamo fatti noi, la terra, le stelle e tutto quello che riusciamo a vedere ha in comune il fatto di emettere quella che è definita come "radiazione elettromagnetica": un "mezzo di trasporto" dell'energia da un punto all'altro dello spazio.

Composition of the universe



We are here

Other elements	0.03%
Neutrinos	0.3%
Stars	0.5%
Free H and He	4%
Dark matter	23%
Dark energy	72%

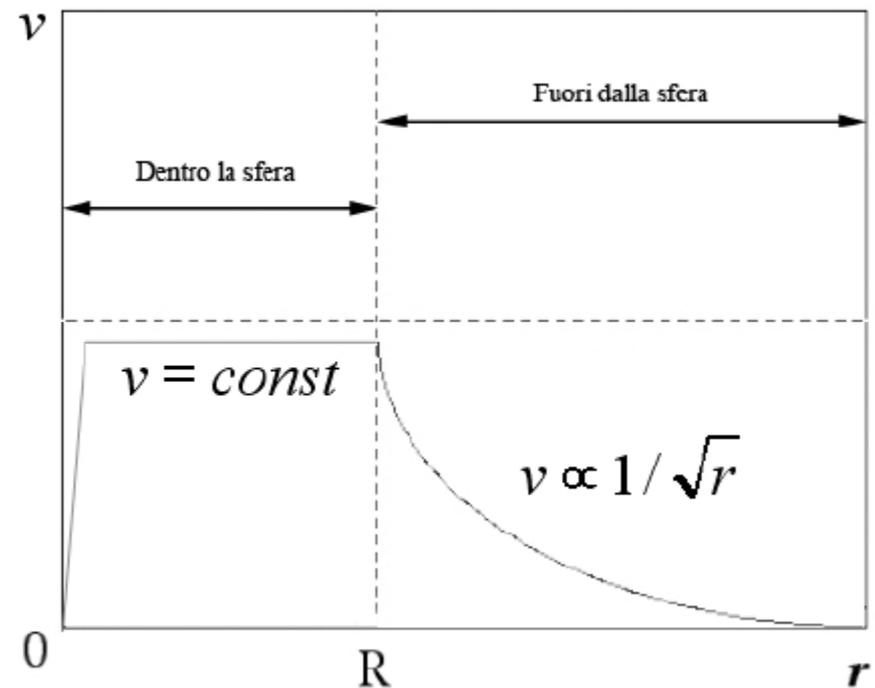
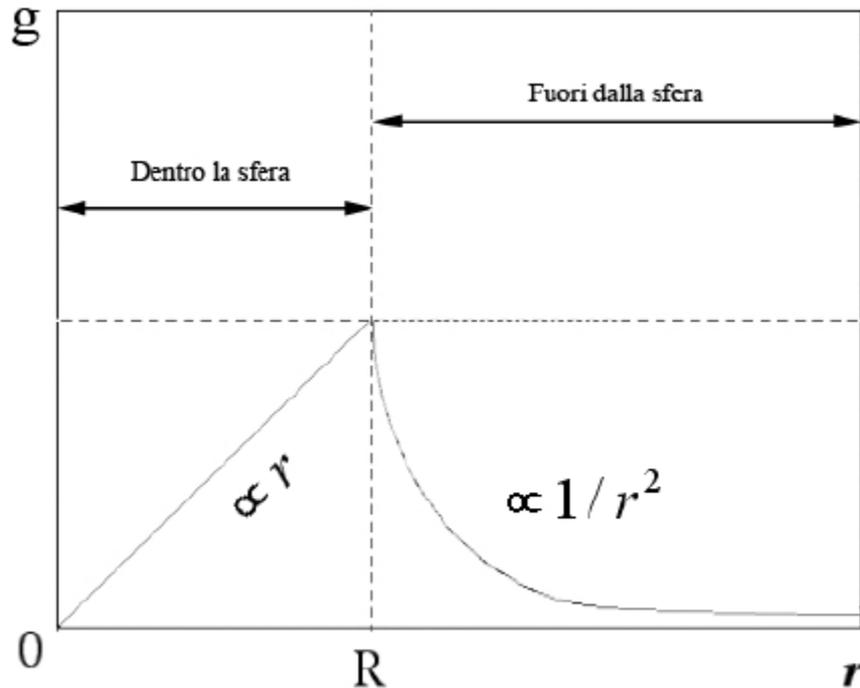
We do not know what makes up 95% of the universe.

il 95% dell'universo è formato da un qualche cosa che non conosciamo, non emette luce visibile, raggi x, raggi gamma o qualsiasi altra forma di radiazione elettromagnetica

Ma allora come ce ne siamo accorti?

Qual è l'andamento della gravità e della velocità dentro e fuori ad una distribuzione di massa? (Keplero, Newton...)

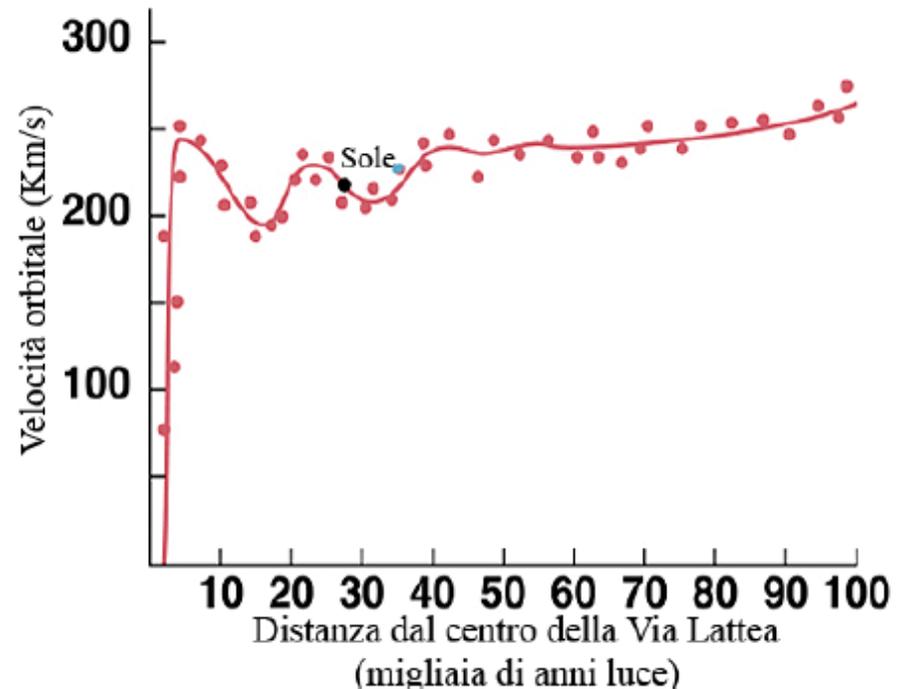
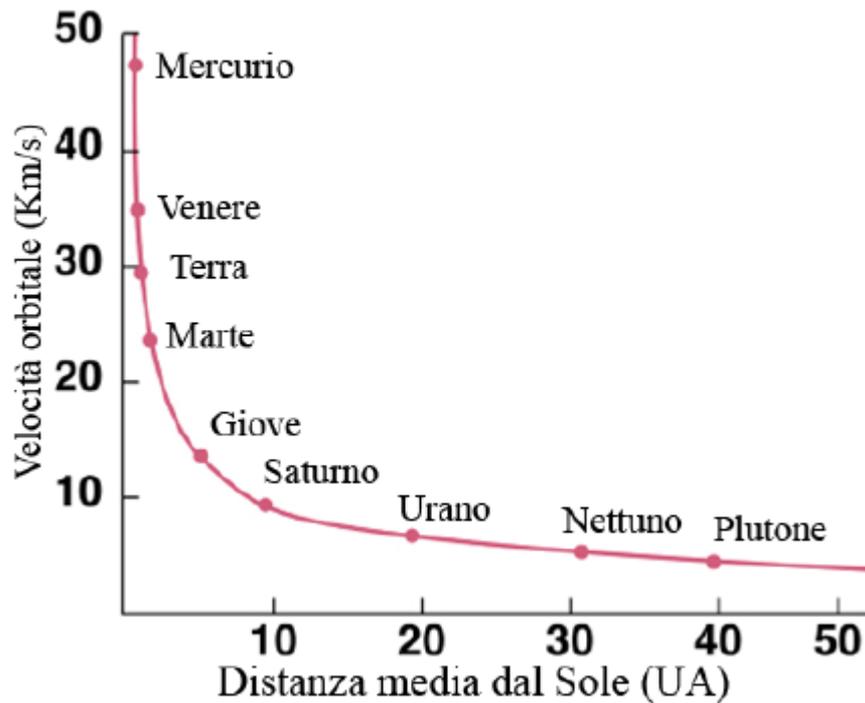
$$|\omega| = \frac{\sqrt{GM}}{|r^{3/2}|}$$



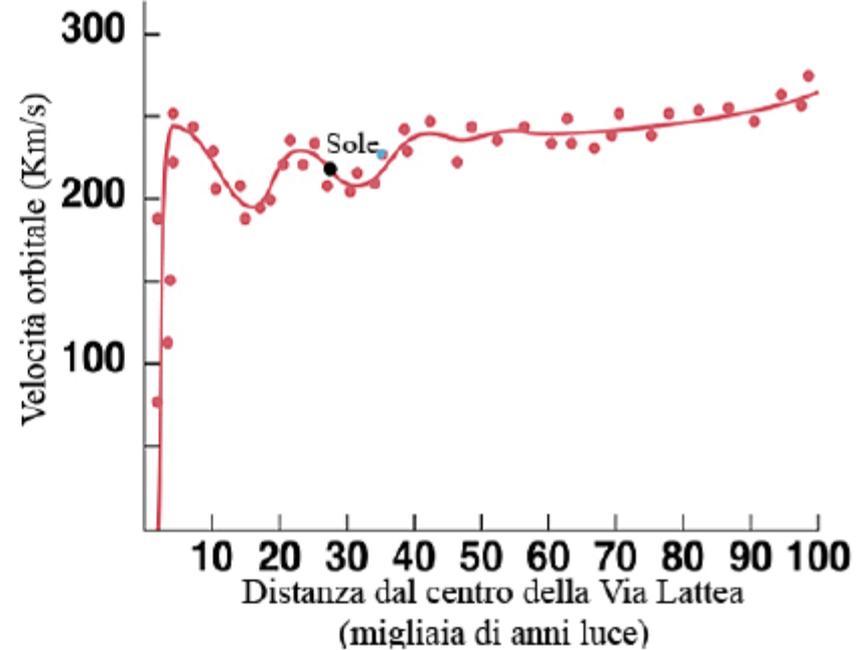
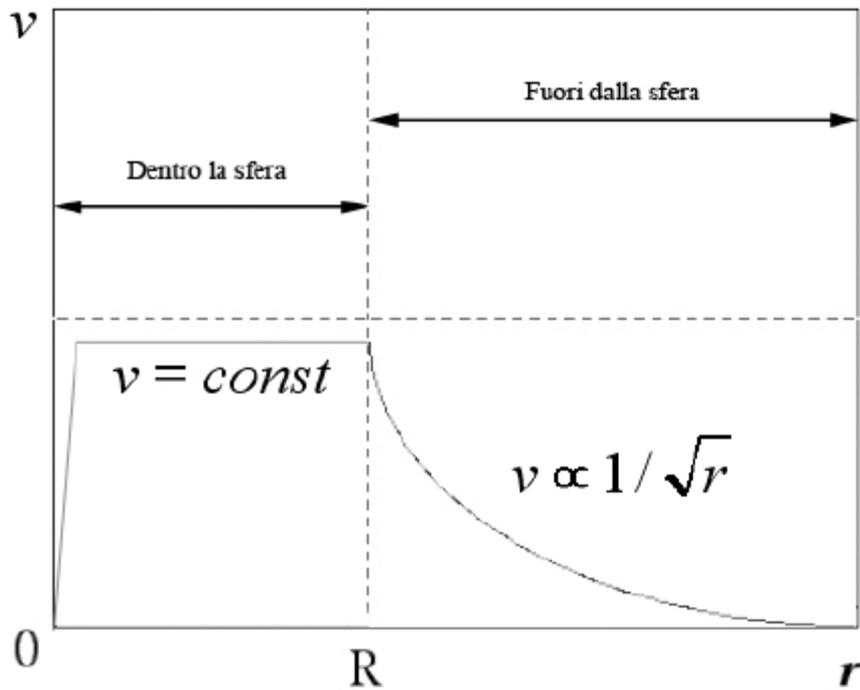
...e funziona?

Si.....

No!!!!!!



Cosa vuol dire?



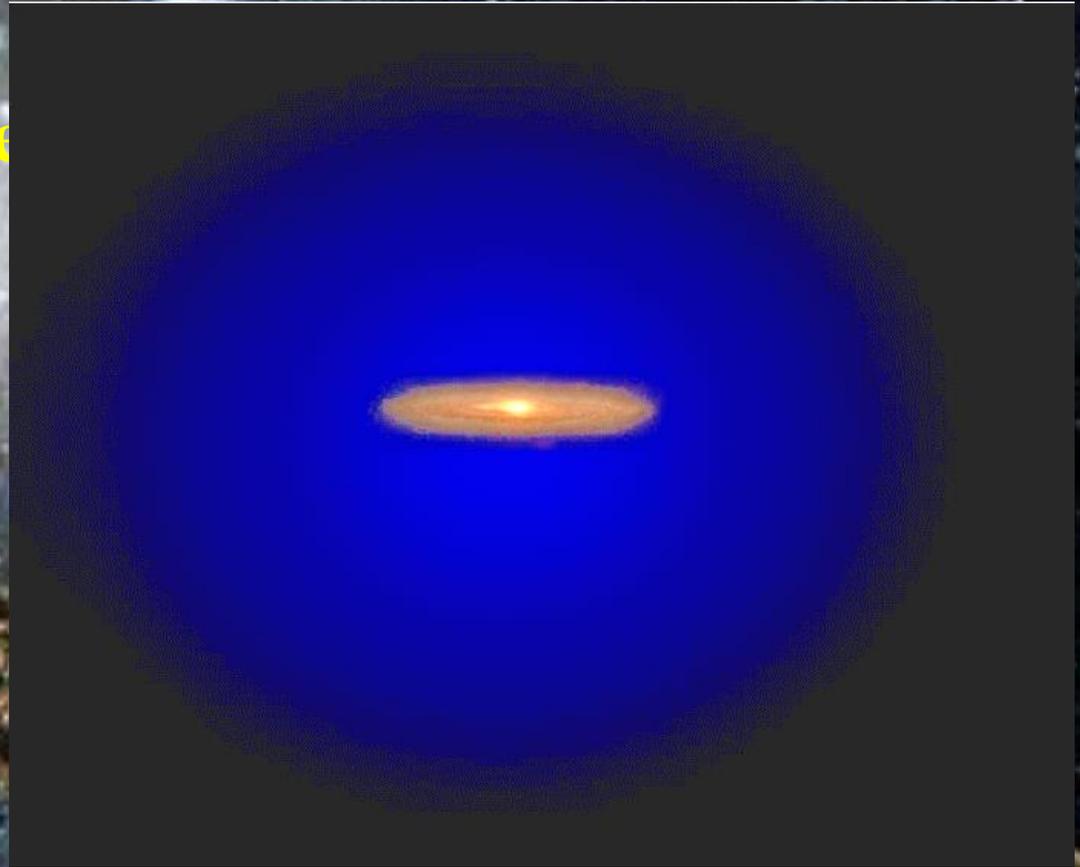
**La nostra galassia si comporta
come se in realtà fosse piena di
materia!!!!**

Altre prove?

Velocità orbitale delle galassie negli ammassi

Velocità orbitale delle stelle nelle periferie delle galassie

Lenti gravitazionali



E l'energia oscura?



Photo: Roy Kaltschmidt. Courtesy:
Lawrence Berkeley National Laboratory

Saul Perlmutter



Photo: Belinda Pratten, Australian
National University

Brian P. Schmidt

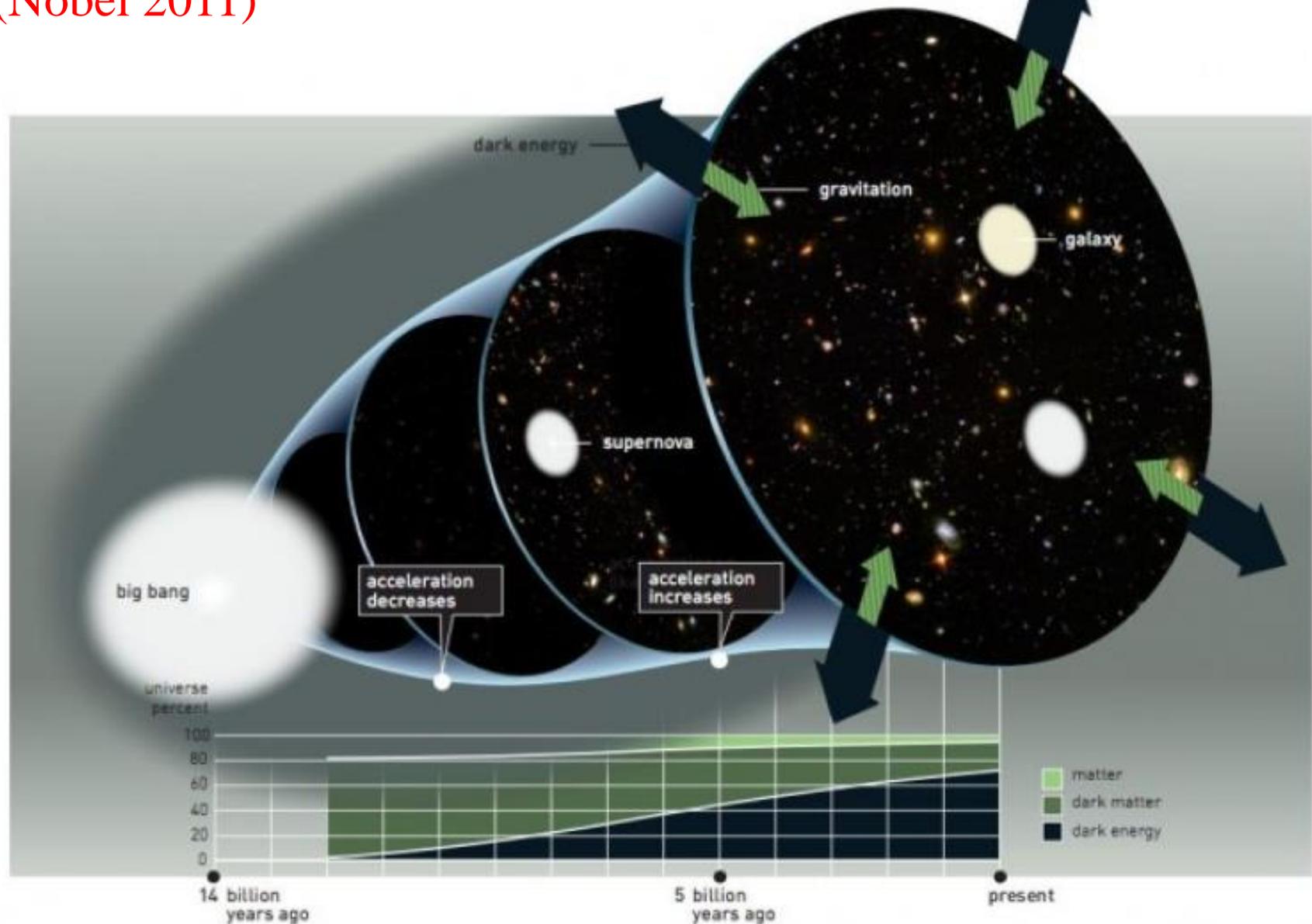


Photo: Homewood Photography

Adam G. Riess

Studiando supernove molto distanti volevano misurare la velocità di espansione dell'universo e la sua accelerazione (negativa)...ovvero quanto stesse rallentando!!!

Scoprirono però che non stiamo rallentando affatto.....
(Nobel 2011)

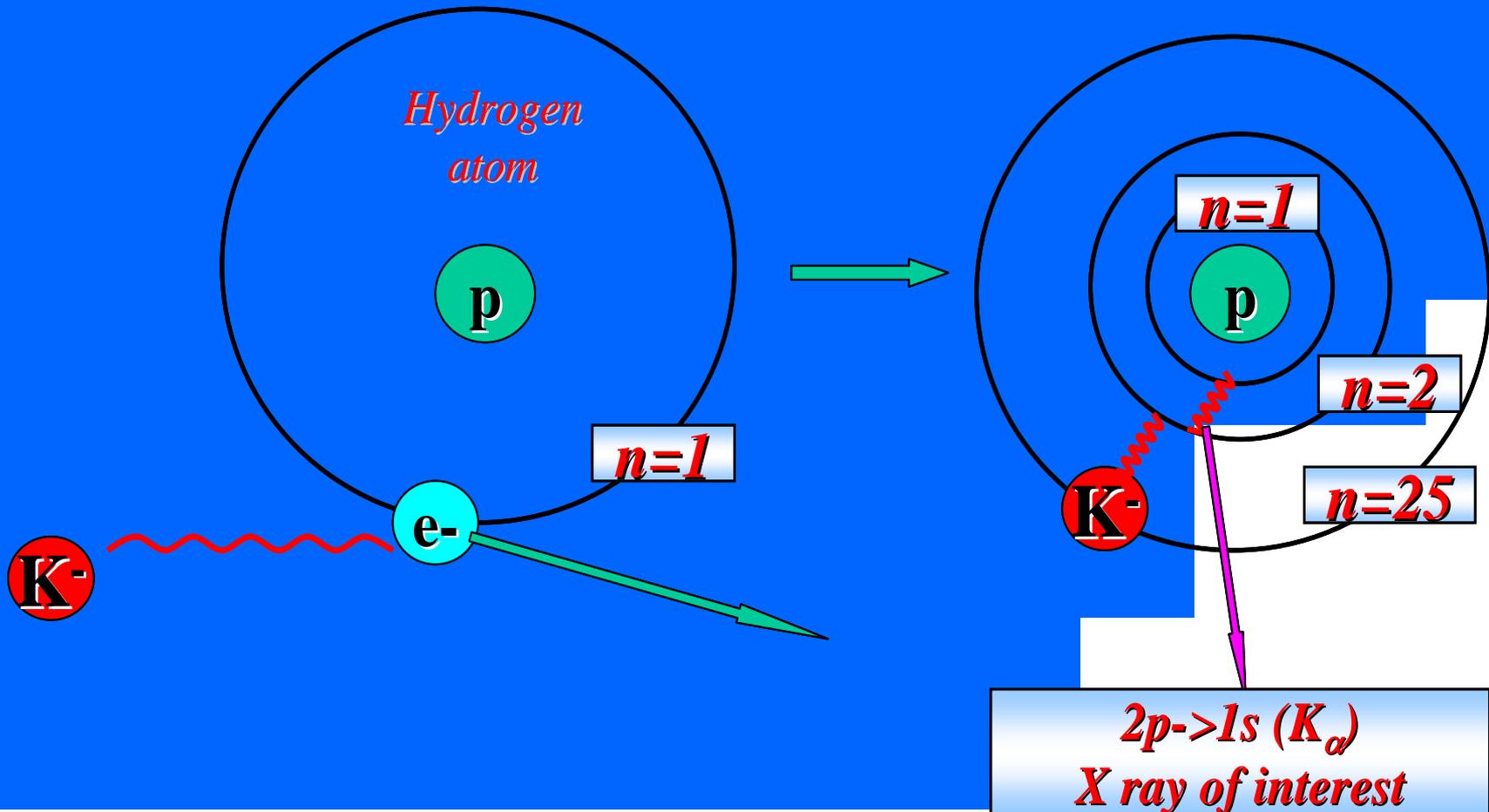


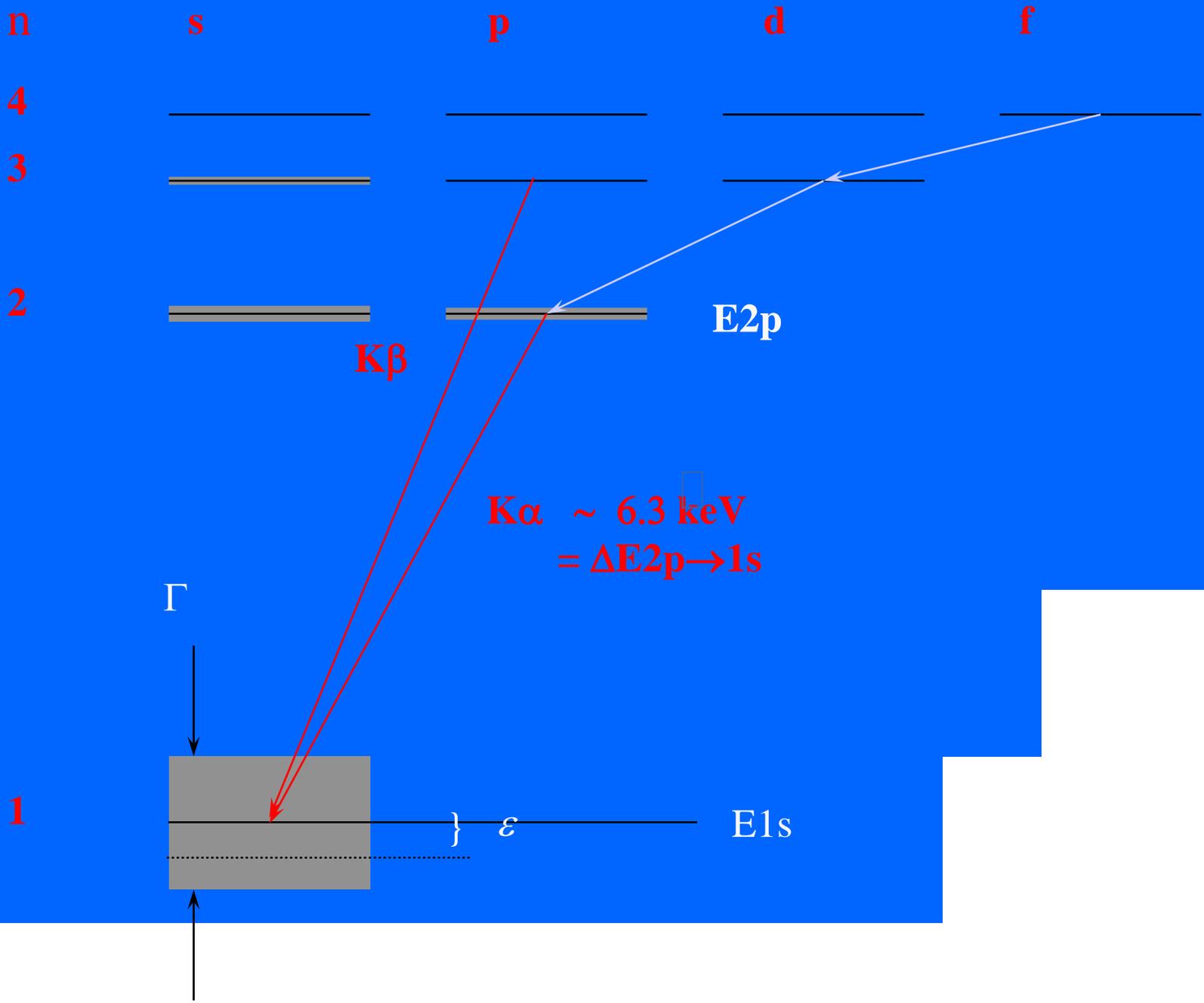


Atomi esotici.....

Electronic hydrogen

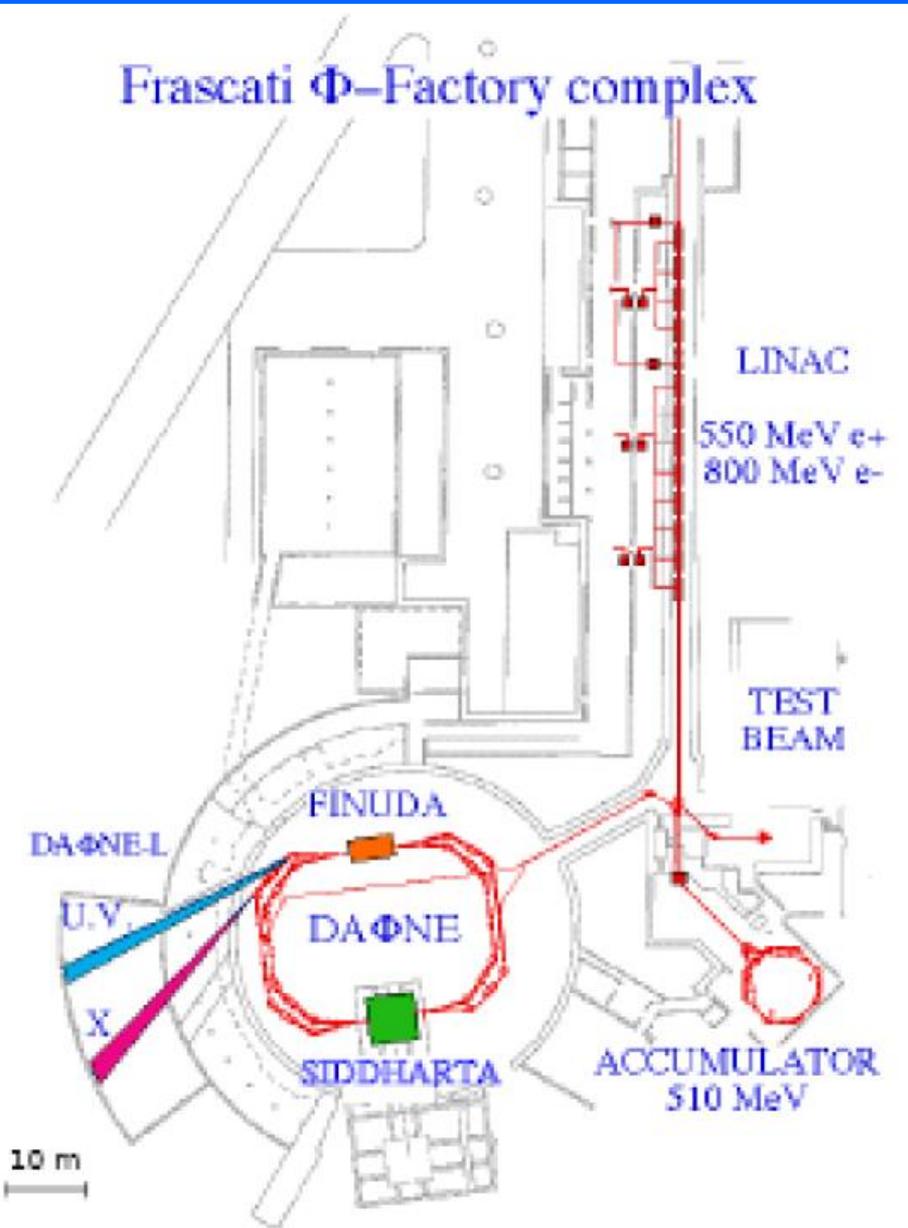
Kaonic hydrogen





DAΦNE

Frascati Φ -Factory complex



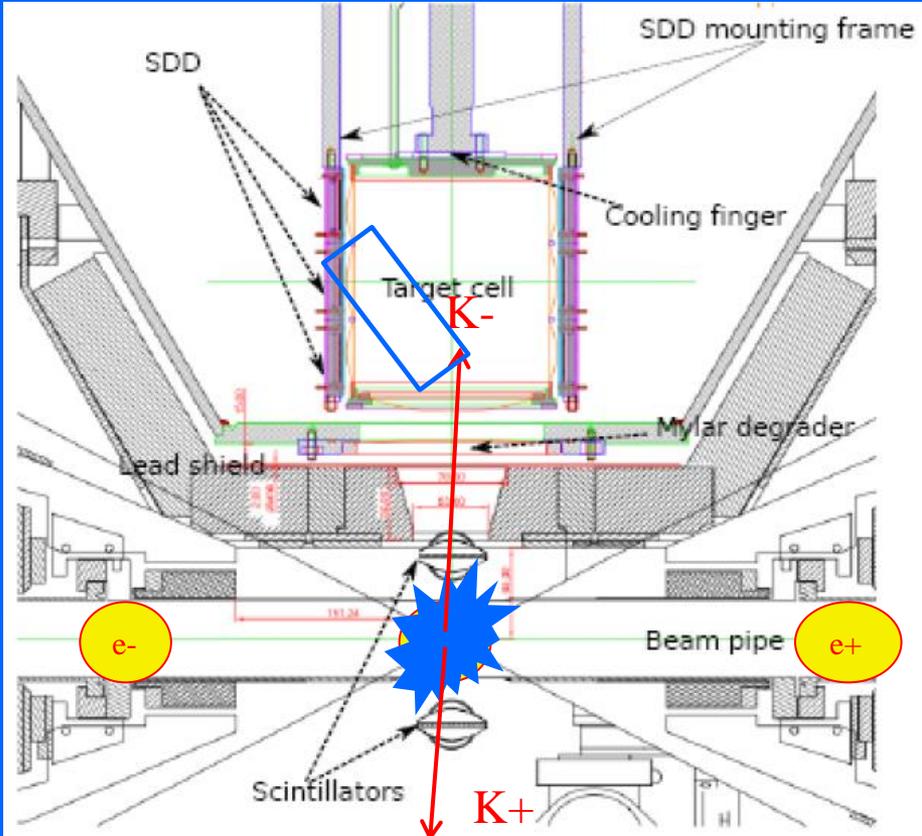
$e^+ e^-$ at 510 MeV

3 μ barn of peak cross section

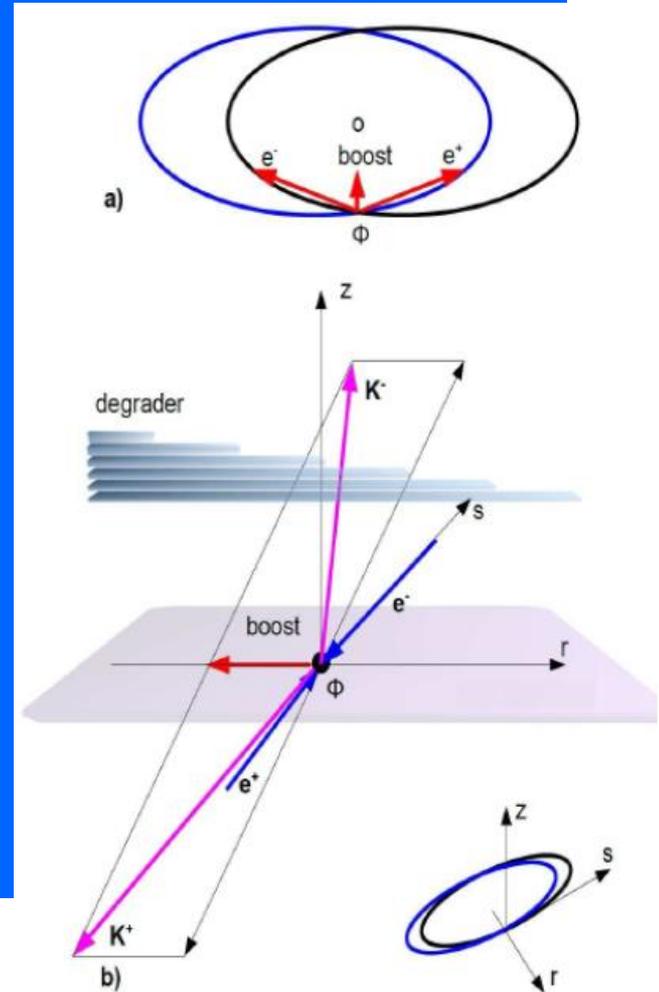
Φ resonance decays at
49.2 % in $K^+ K^-$ back to
back pair

Currents of 2 A (e^-) and
1 A (e^+)

The SIDDHARTA setup

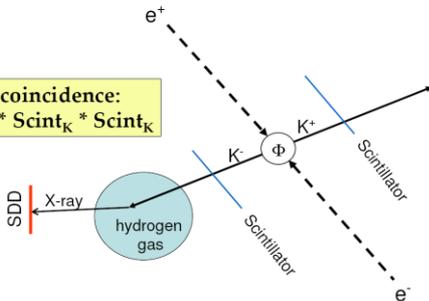


A boost of ~ 50 MeV is present in the interaction region due to crossing angles of the beams (~ 50 mrad)!

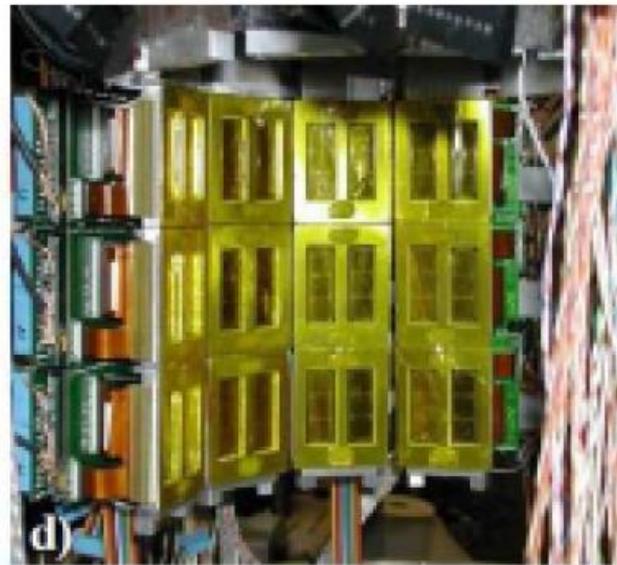
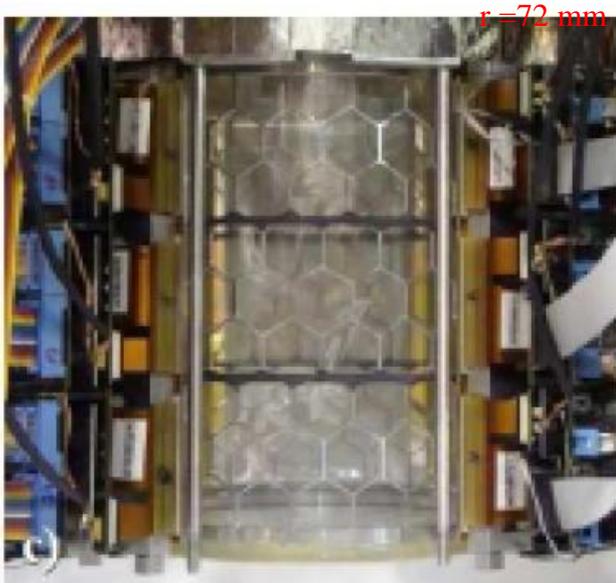


Degrader:
6 slices of $100 \mu\text{m}$ thickness
 $20 \times 120 \text{ mm}^2$

Triple coincidence:
 $\text{SDD}_x * \text{Scint}_K * \text{Scint}_K$



The SIDDHARTA setup

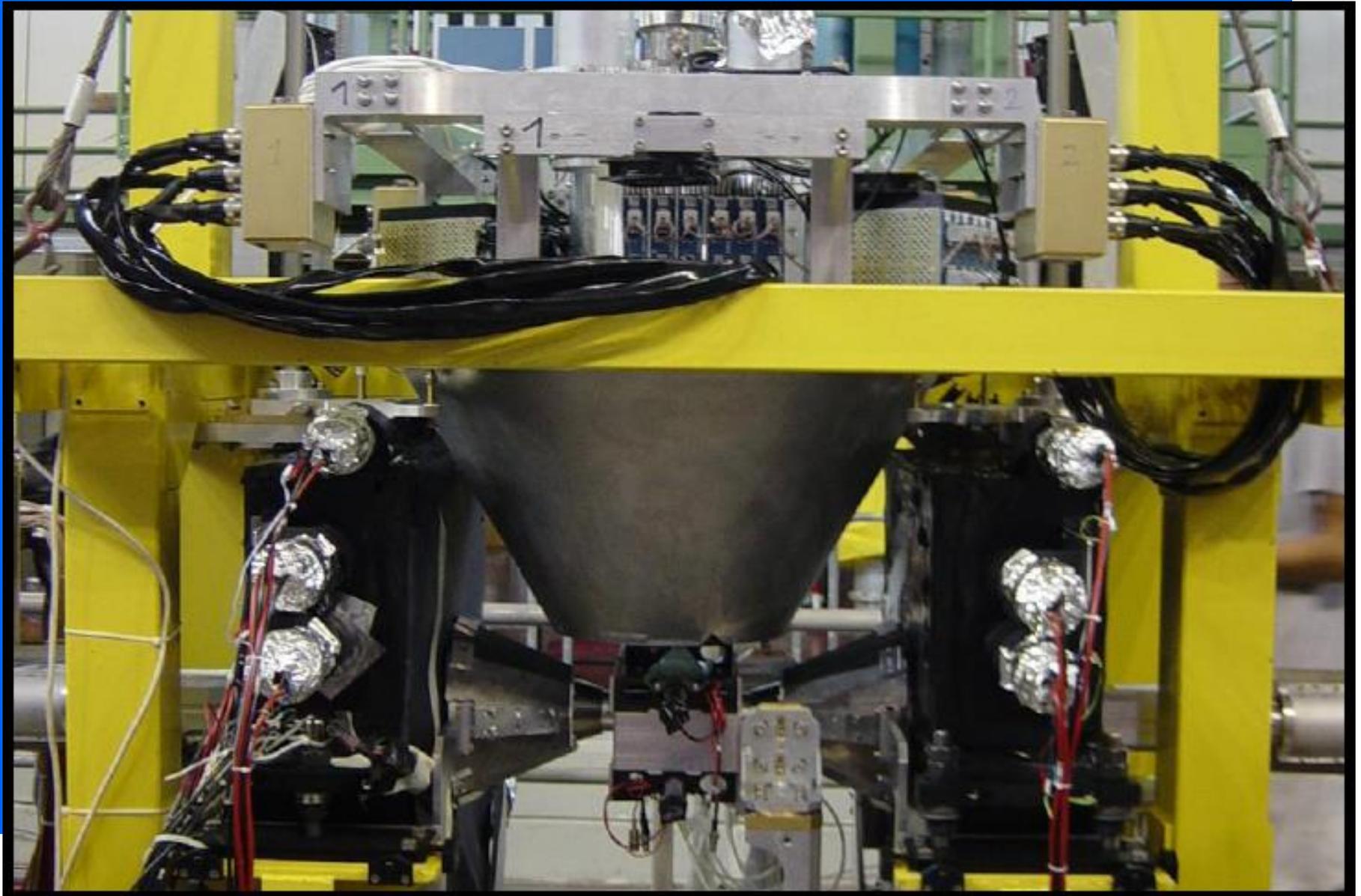


Gaseous helium
 $T = 27 \text{ K}$
 $P = 0.95 \text{ bar}$



$\rho \sim 10 \times \rho_{\text{STP}}$

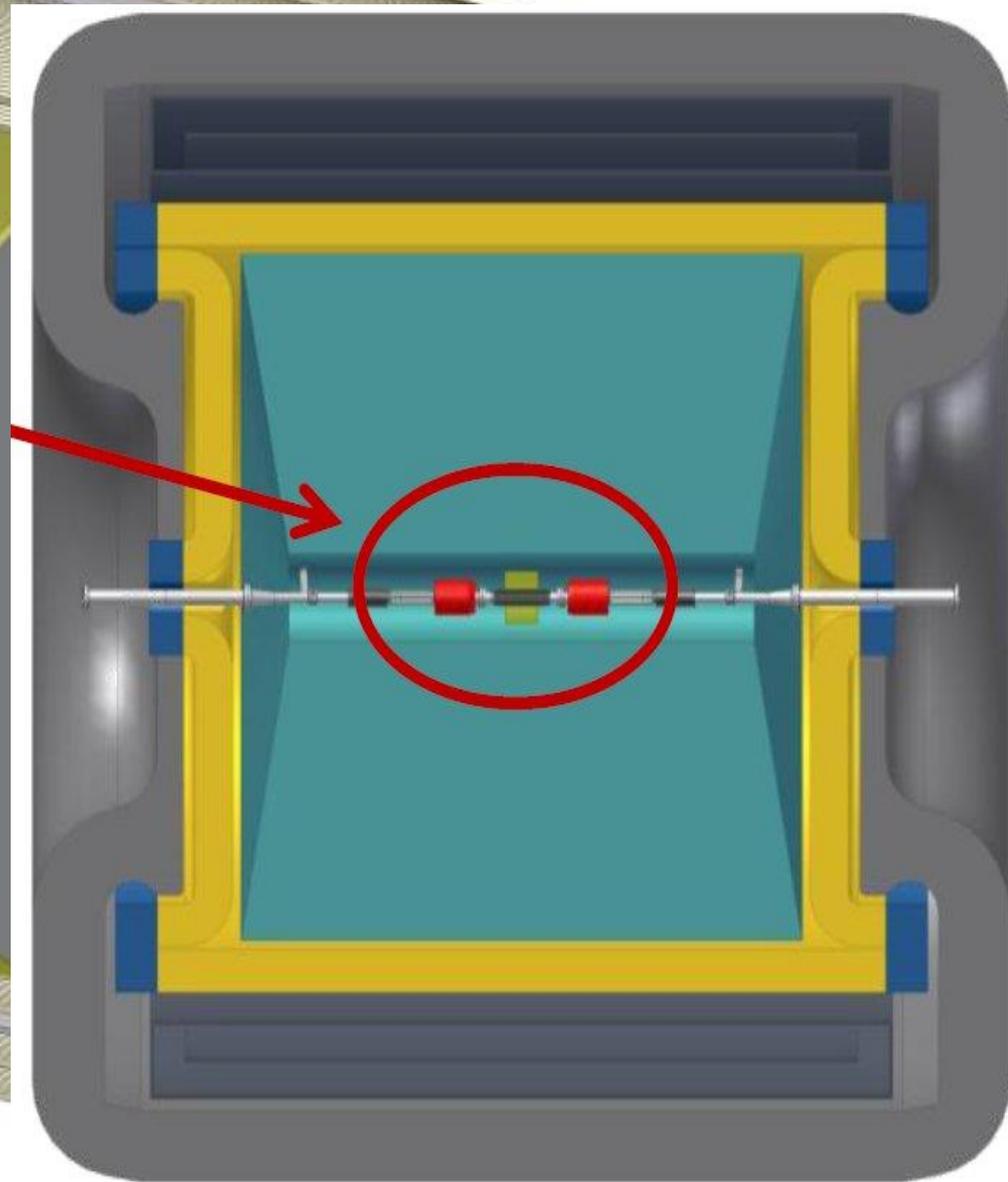
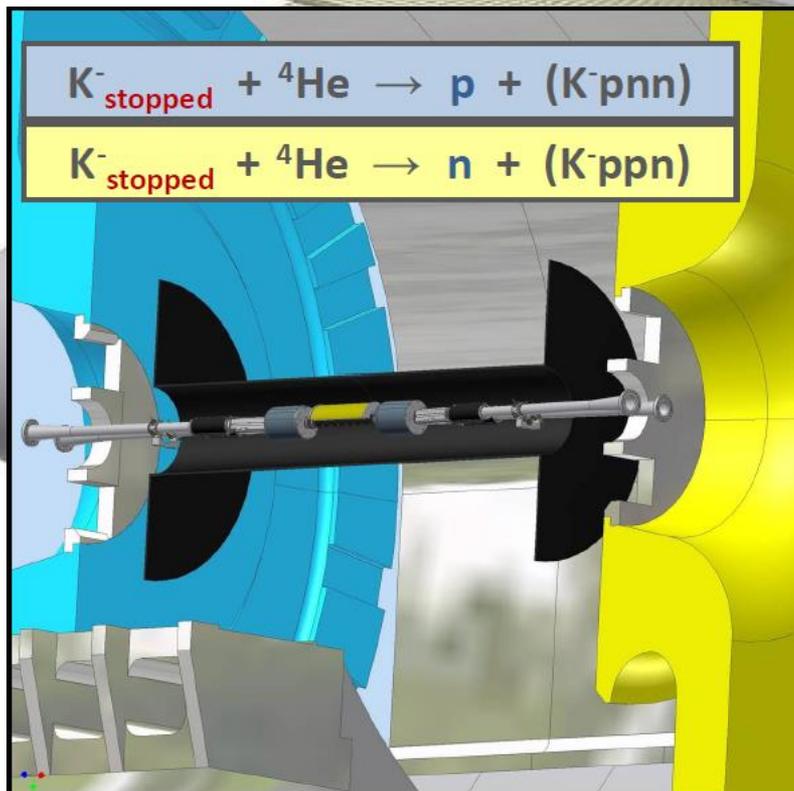
The SIDDHARTA setup





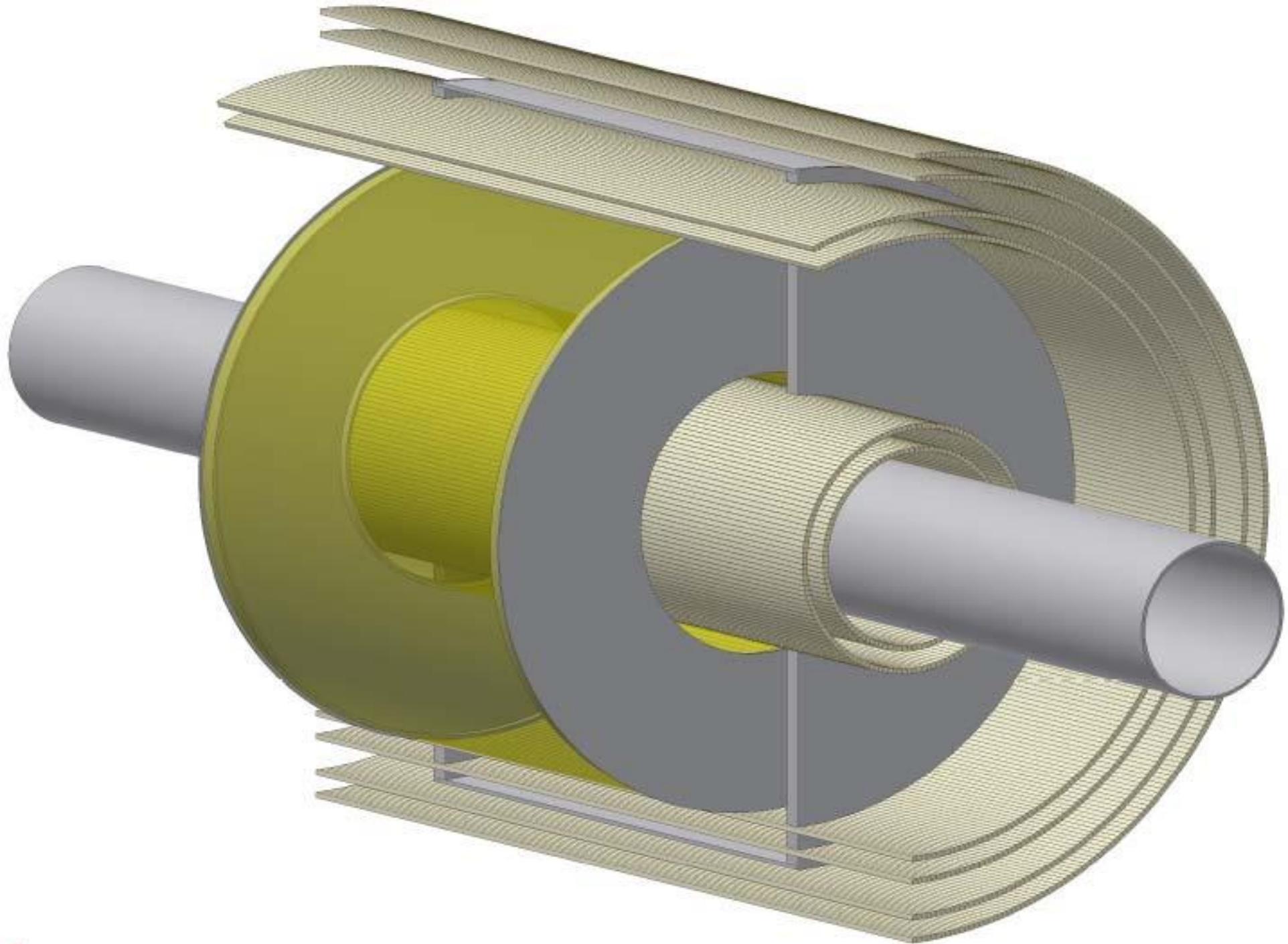
**...e nuclei
esotici !**

The AMADEUS experiment: a brief introduction



Target: A gaseous He target for a first phase of study

First 4π fully dedicated setup!



Un po' di libri....

