

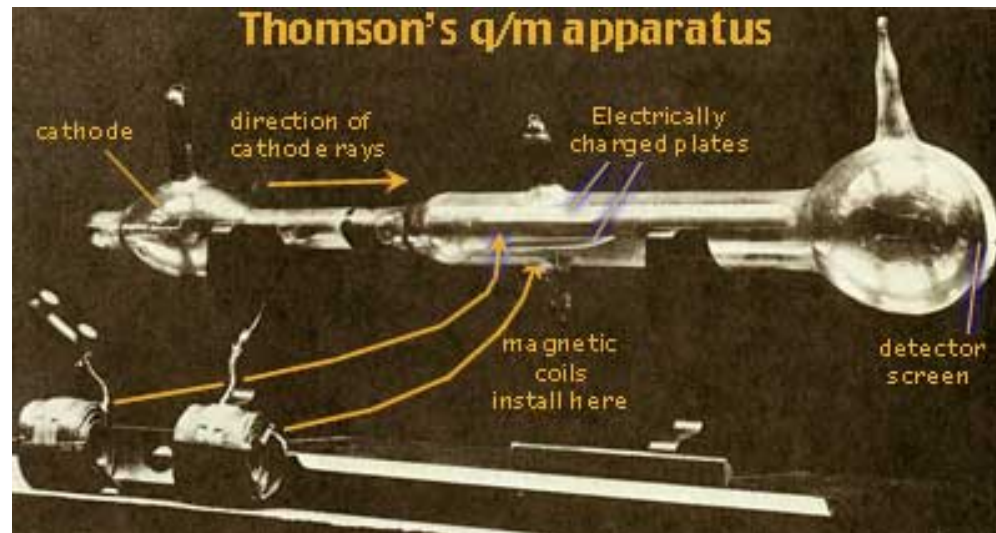
Proprieta' della carica elettrica

- Esperienza di Thomson
 - scoperta dell'elettrone e misure di e/m_e
- Esperienza di Millikan
 - misura di e
- EMR, NMR
 - misura di $\alpha_{em}, \mu_e, \mu_p, \mu_n$
- Esperienza di Rutherford
 - struttura atomica / struttura dei Nucleoni
- Misura di τ_e a Borexino
 - conservazione della carica elettrica

Le cariche elementari (Thomson 1896)

Estrazione di cariche dalla superficie di un conduttore

- Aumentando la temperatura (effetto termoionico)
- Illuminandole (effetto fotoelettrico)
- Applicando una opportuna differenza di potenziale tra la superficie (catodo) e un altro conduttore (anodo)

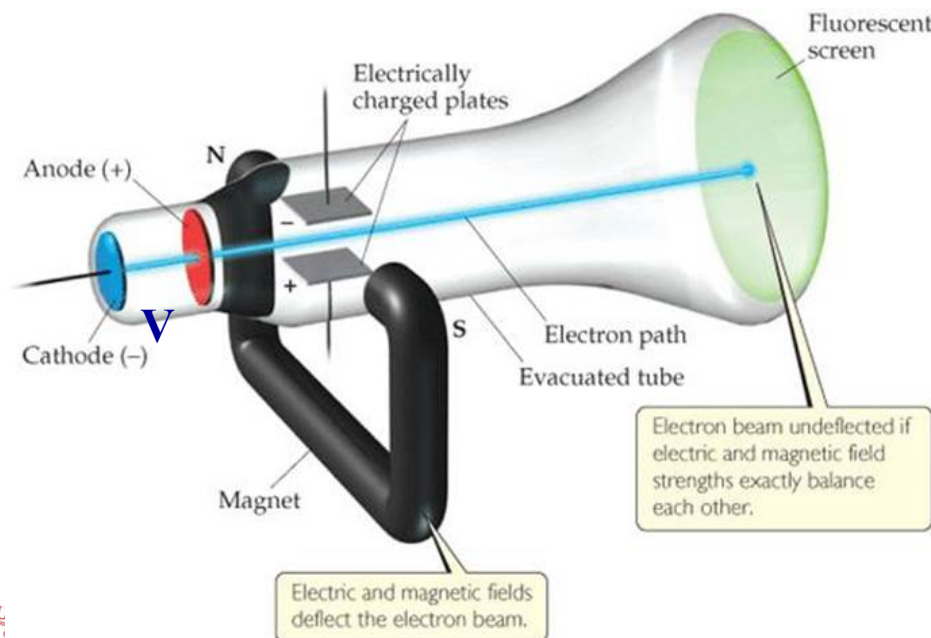


L'apparato di Thomson

Il potenziale V tra anodo e catodo accelera le cariche

Sullo schermo (fluorescente) immagine puntiforme

- raggi (catodici), prodotti da cariche puntiformi
- campo elettrostatico (E) deflette i raggi, spostando l'immagine
- campo magnetico (B) corregge la deflessione se $v = B/E$

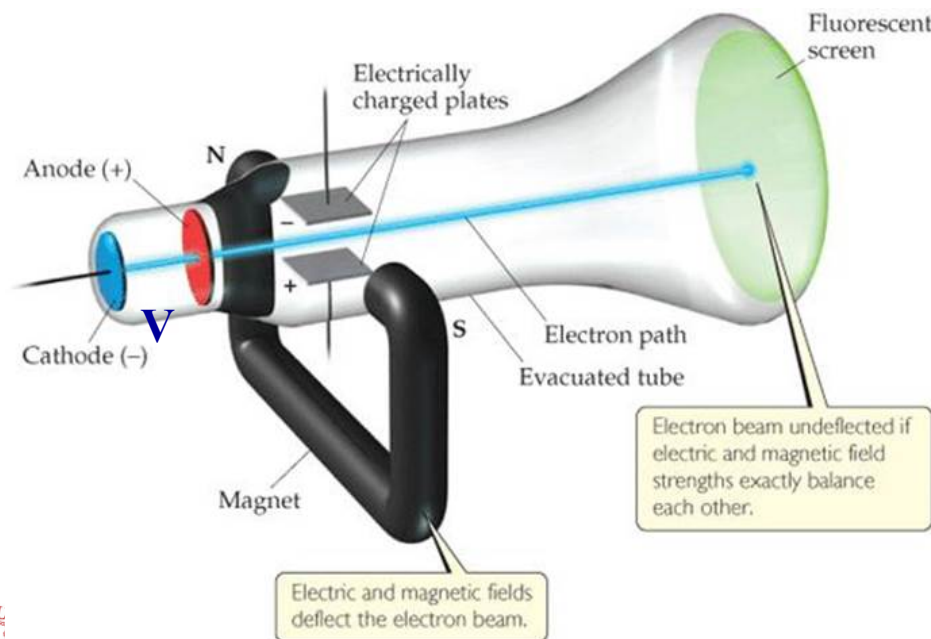


L'apparato di Thomson

Il potenziale V tra anodo e catodo accelera le cariche

Sullo schermo (fluorescente) immagine puntiforme

- raggi (catodici), prodotti da cariche puntiformi
- campo elettrostatico (E) deflette i raggi, spostando l'immagine
- campo magnetico (B) corregge la deflessione se $v = B/E$



$$\frac{1}{2}m_e v^2 = eV$$

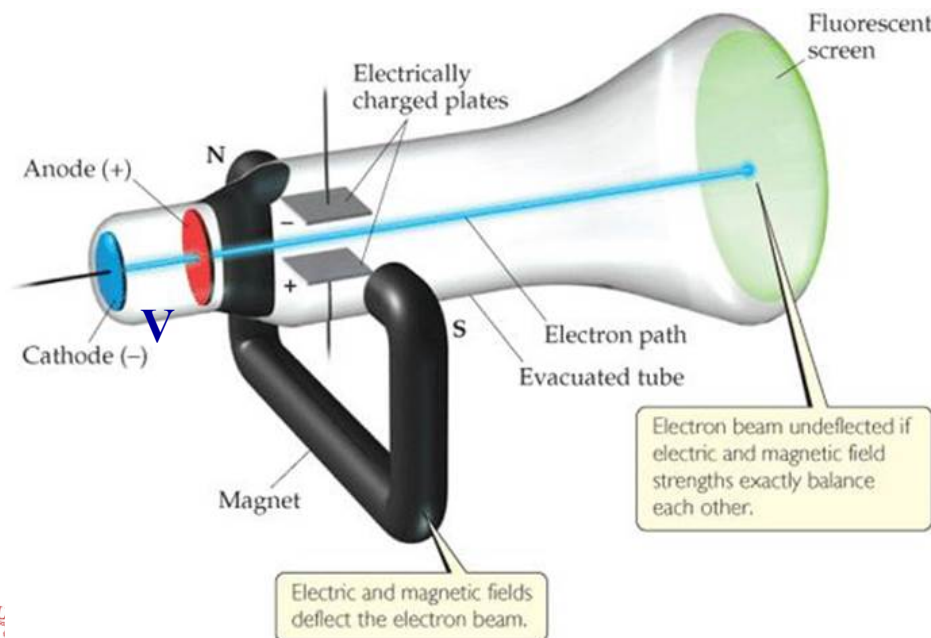
$$\frac{e}{m_e} = \frac{v^2}{V} = \frac{B^2}{EV}$$

L'apparato di Thomson

Il potenziale V tra anodo e catodo accelera le cariche

Sullo schermo (fluorescente) immagine puntiforme

- raggi (catodici), prodotti da cariche puntiformi
- campo elettrostatico (E) deflette i raggi, spostando l'immagine
- campo magnetico (B) corregge la deflessione se $v = B/E$

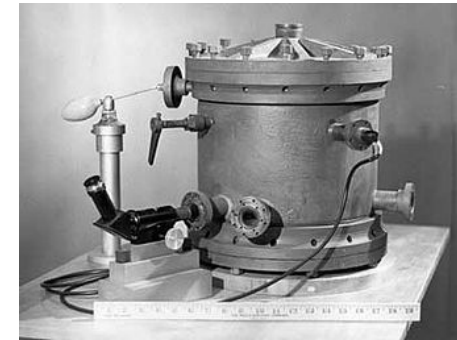


$$\frac{1}{2} m_e v^2 = eV$$

$$\frac{e}{m_e} = \frac{v^2}{V} = \frac{B^2}{EV}$$

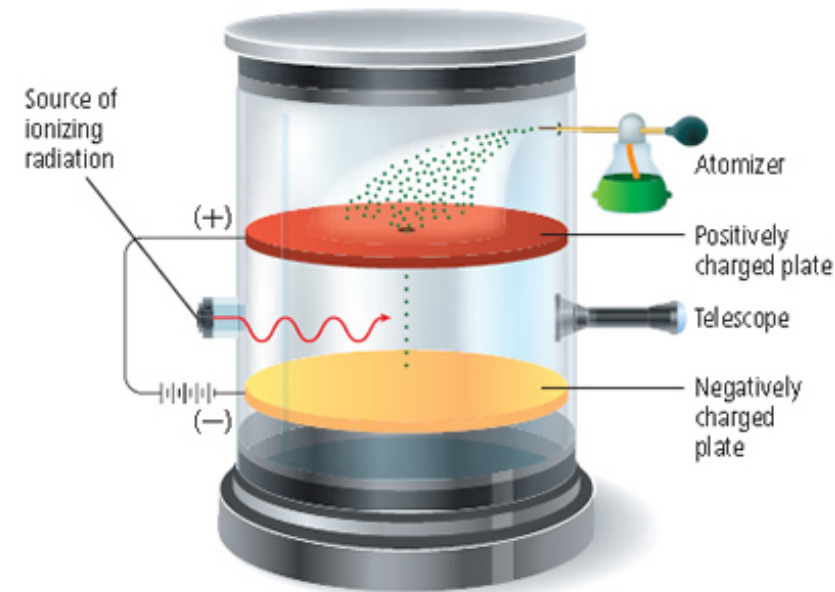
Esperienza di Millikan

- Gocce d'olio ionizzate per
 - sfregamento sulla fenditura
 - azione di raggi χ ionizzanti



- Misura la velocità di caduta sotto l'effetto combinato di

- | | | |
|---------------------|-----------------------------|---|
| – peso della goccia | $\frac{4\pi}{3}r^3\rho g$ | ▼ |
| – spinta dell'aria | $\frac{4\pi}{3}r^3\rho_a g$ | ▲ |
| – viscosità | $6\pi\eta r v$ | ▲ |
| – campo elettrico | qE | ▲ |



Esperienza di Millikan

- Velocità asintotica di caduta ($E=0$)

$$v_0 = \frac{2}{9} \frac{(\rho - \rho_a) g r^2}{\eta}$$

- Velocità asintotica di caduta ($E>0$)

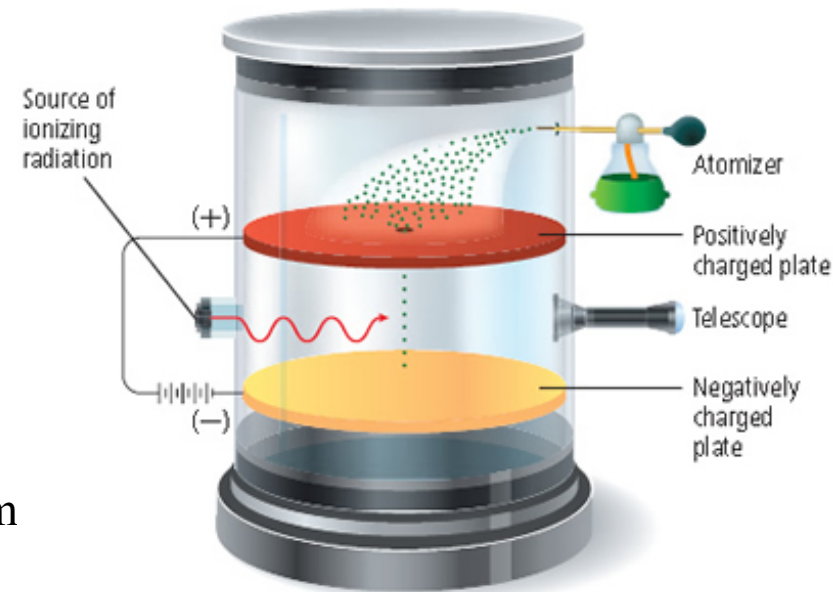
$$v_1 = v_0 - \frac{qE}{6\pi\eta r}$$

$$v_0 - v_1 = \frac{qE}{6\pi\eta r}$$

- Risultato :

– q sempre multiplo intero di quantità fondamentale, $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Esercizio: calcolare il valore di E per equilibrio con $r = 10^{-6} \text{ m}$, $\eta = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $\rho_a = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 874 \text{ kg/m}^3$



Misure moderne

- Costante di struttura fine

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$$

- da transizioni atomiche

$$\alpha^{-1}(\text{Cs06}) = 137.03600000(110)[8.0 \text{ ppb}]$$

$$\alpha^{-1}(\text{Rb06}) = 137.03599884(091)[6.7 \text{ ppb}]$$

- da precessione dello spin dell'elettrone in campo magnetico :

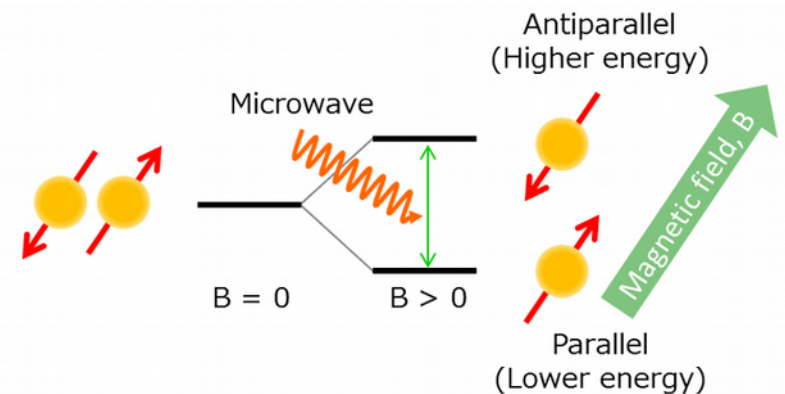
$$\alpha^{-1}(a_e) = 137.035999069(90)(12)(30)(3)$$

- precisione relativa $o(10^{-10})$!

Risonanza Magnetica dell'Elettrone (EMR)

- e in campo magnetico B :

$$U_{\pm} = -\vec{\mu}_e \cdot \vec{B} = g_s \mu_b s_z B = \pm \frac{1}{2} g_s \mu_b B$$



- Statistica di Boltzman:

- stato meno energetico leggermente più' popolato

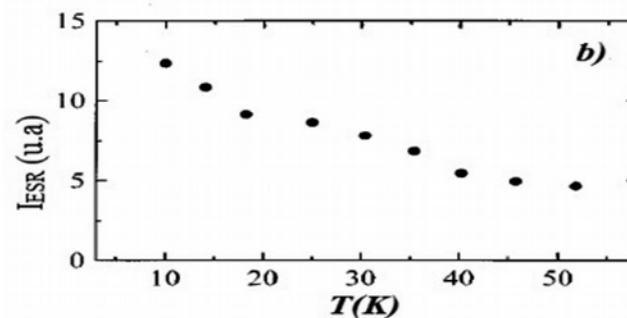
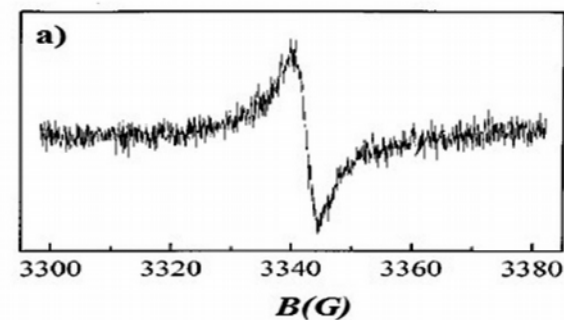
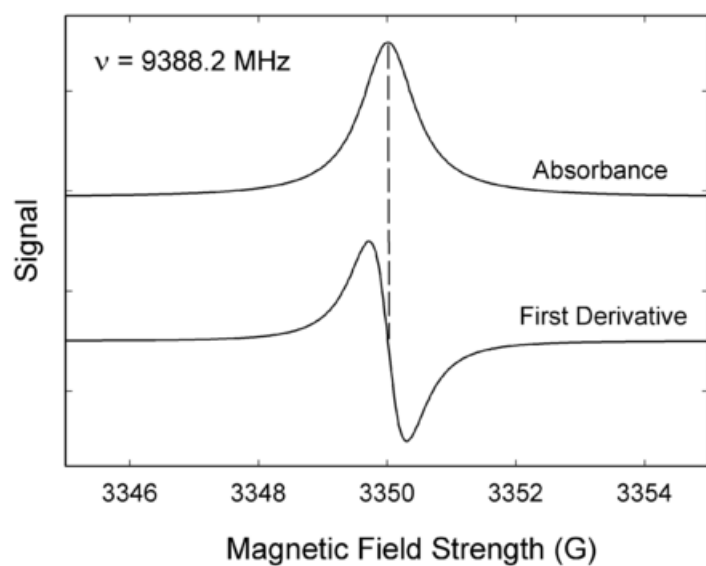
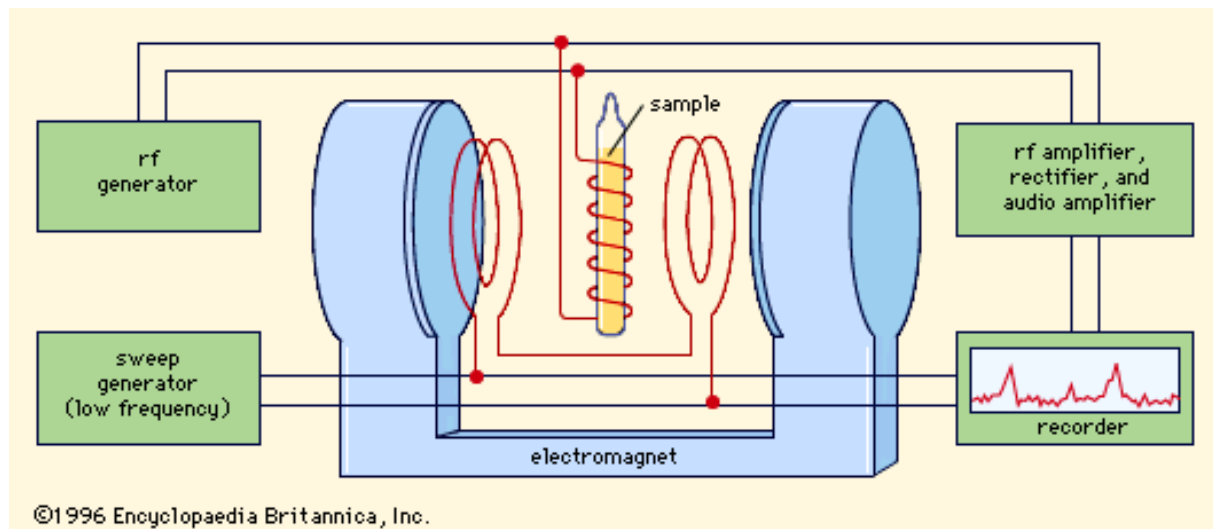
$$N^{\pm} = N_0 e^{-\frac{U_{\pm}}{kT}}, \quad N^{+}/N^{-} = e^{-\frac{\Delta U}{kT}}$$

- Energia Fotone in MQ: $U_{\gamma} = h\nu$

- Radiofrequenza con $\nu = \Delta U/h = (g_s e B)/m_e$ ($\sim 28 \text{ GHz}$ se $B=1 \text{ T}$)
induce transizione verso lo stato meno popolato

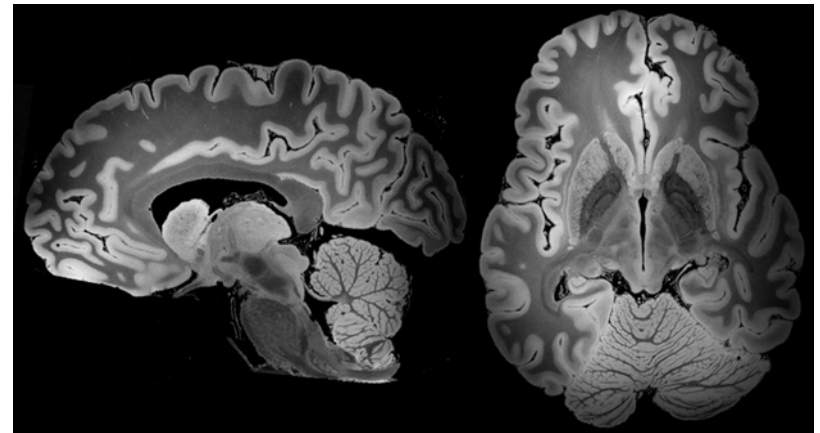
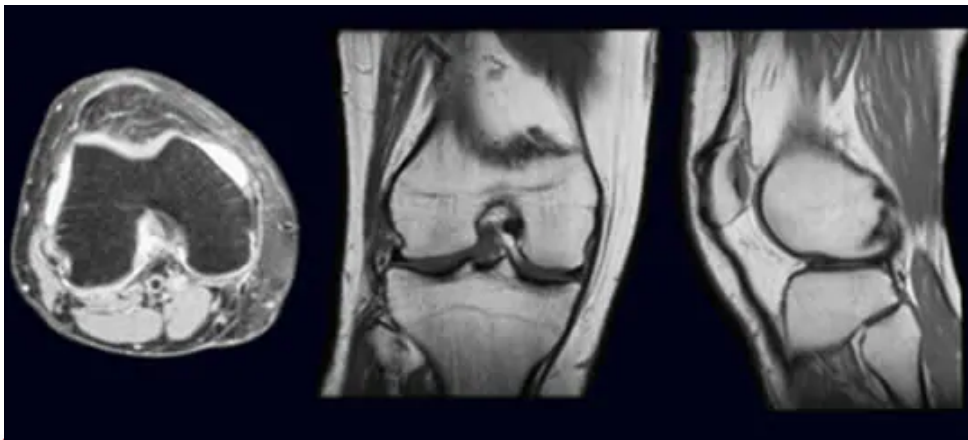
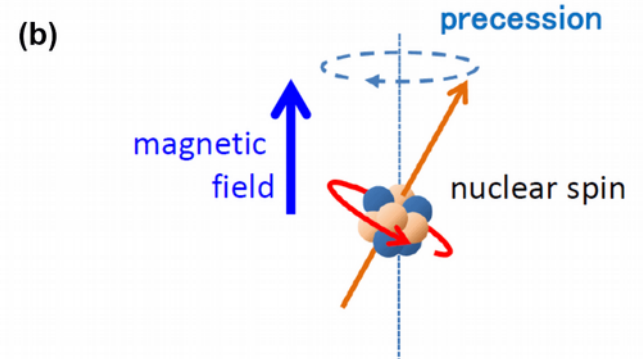
- assorbimento risonante di energia a quella frequenza

EMR



Nuclear Magnetic Resonance

- Stesso principio applicato ai nuclei:
 - $\nu \sim \text{Mhz}$ ($m_N \sim 2000 \times m_e$)
 - misuro g_N :
 $g_p = 2.8$
 $g_n = -1.9$
 - p e n non sono particelle puntiformi!
 - oppure identifico il tipo di nucleo da misura di g_N



Quantizzazione della carica

- Osservazione di Millikan rispettata da tutte le particelle elementari:
 - Leptoni carichi (e, μ, τ) $Q_l = -e$
 - Quark “up” (u, c, t) $Q_u = 2/3 e$
 - Quark down (d, s, b) $Q_d = -1/3 e$
 - Bosone vettore carico (W) $Q_W = e$
- Antiparticelle : carica opposta alla rispettive particelle

PERCHE ' ?

La struttura dell'atomo

- L'atomo (neutro) e' composto da un egual numero di costituenti di carica positiva positiva (protoni) e di carica negativa (elettroni) (...e in piu' i neutroni ...)
- Ma come e' distribuita la materia nell'atomo ?

Come posso risolvere una struttura $r \sim 10^{-10} \text{ m}$?



Una Sfida

- Uno dei due sacchi contiene solo sabbia, e un'altro anche pepite d'oro
- Come faccio a scegliere se non posso toccarli ?



La risposta del politico (1987)

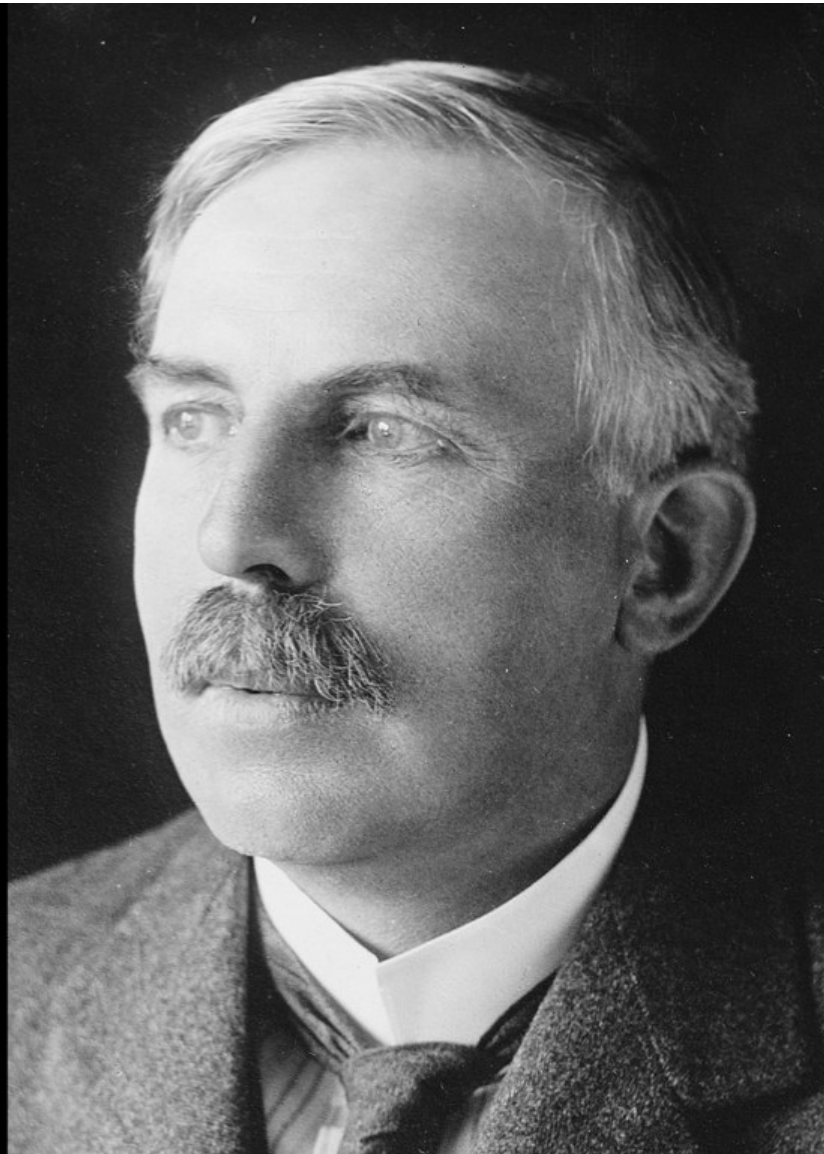


Ernest Rutherford

“All science is
either physics
or stamp
collecting.”

Ernest Rutherford, physicist,
born August 30, 1871

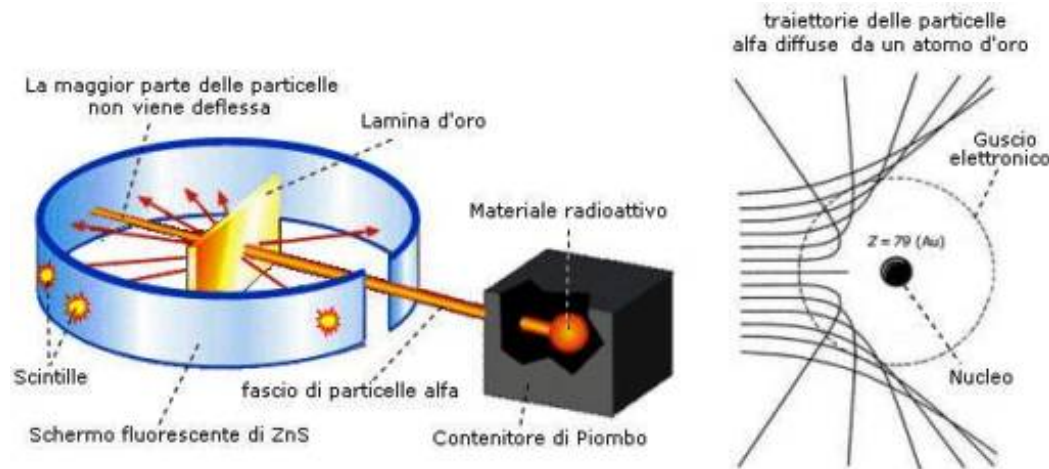
Dobson's Improbable Quote of the Day



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

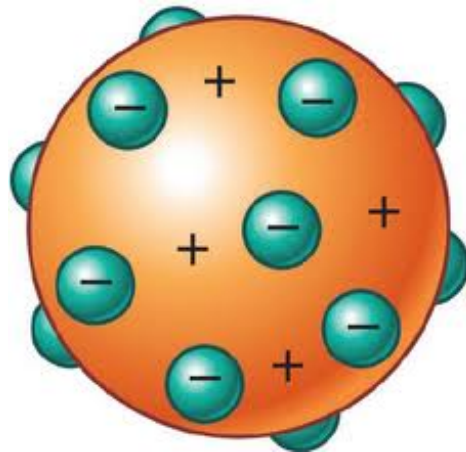
L'esperimento di Rutherford (1910)

- Pallottole : particelle α (nuclei ${}^4\text{He}^{++}$) prodotte da sorgente radioattiva
 - $q_{\alpha} = 2e$, $M_{\alpha} \sim 8000 m_e$
- Bersaglio : sottile lamina d'oro
 - $q_{\text{Au}} = 79e$, $M_{\text{Au}} \sim 50 m_{\alpha}$
- Osservo la deflessione delle particelle dopo l'urto



Il pregiudizio : modello di Thomson

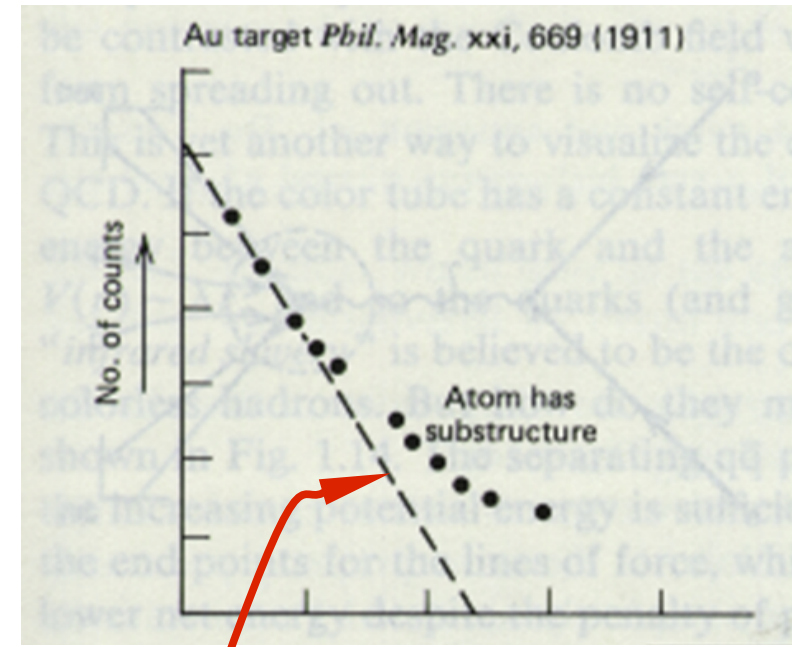
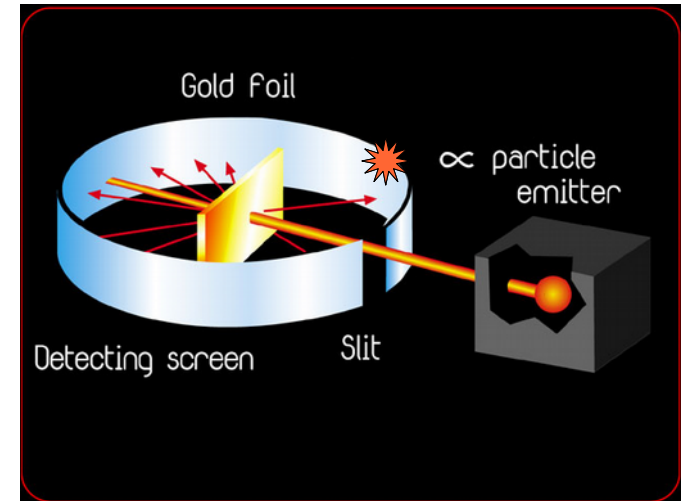
- Il panettone (plum cake): la carica positiva e' distribuita uniformemente su una sfera (la pasta) su cui sono incastonati gli elettroni (l'uvetta)
- Predizione: le particelle α devieranno poco



© 2008 Pearson Education, Inc. All rights reserved.

L'osservazione

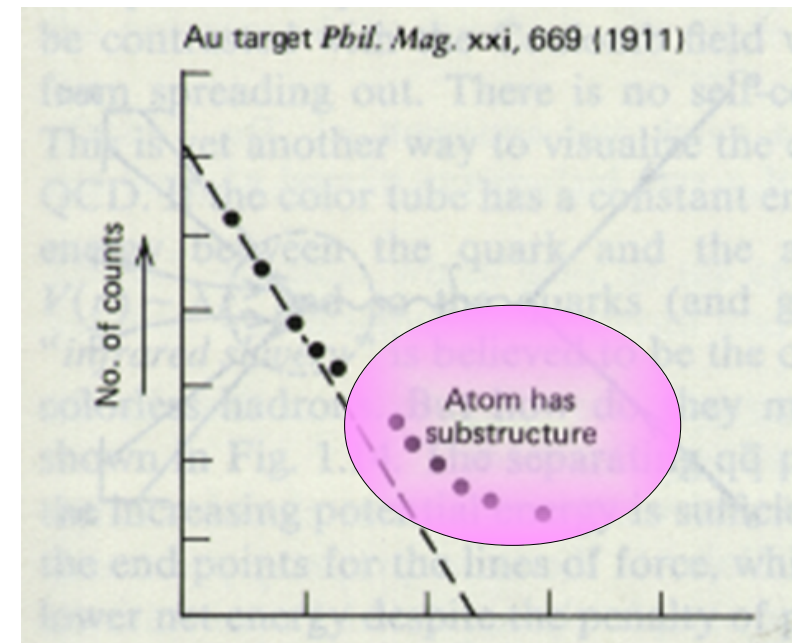
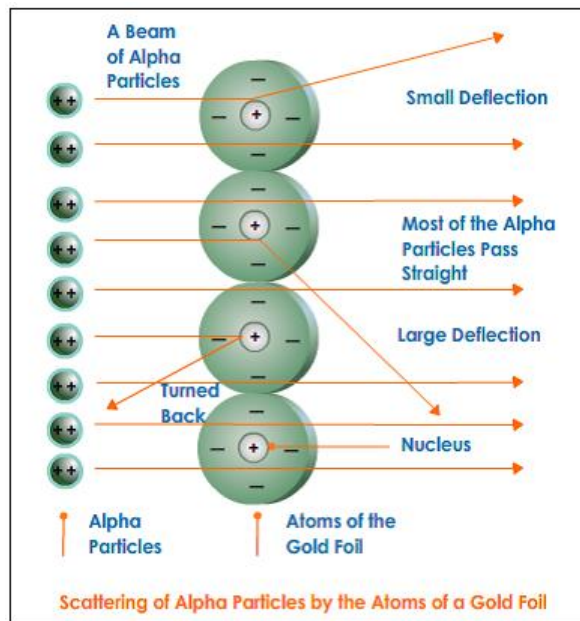
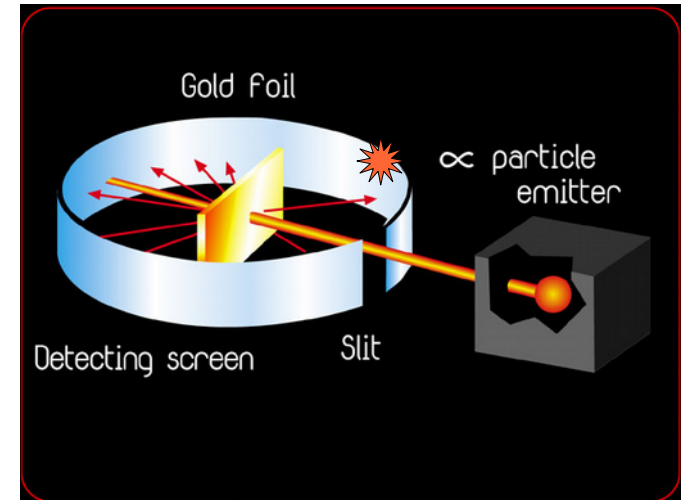
- Si osservano particelle deviate a grande angolo !



Predizione del modello a panettone

Il modello nucleare

- Si osservano particelle deviate a grande angolo !
- La carica positiva deve essere concentrata: trovate *le pepite*



Diffusione Rutherford

$$\frac{dN}{d\Omega} = -\frac{dN}{2\pi \sin\theta d\theta} = -\frac{1}{2\pi \sin\theta} \cdot \frac{dN}{db} \cdot \frac{db}{d\theta}$$

$$b = \frac{1}{2} \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0 U_{K,0}} \cot(\theta/2) \quad (\text{parametro d'impatto})$$

$$\frac{dN}{d\Omega} \propto \left[\frac{zZe^2}{U_{K,0}} \right]^2 \frac{1}{\sin^4 \theta/2}$$

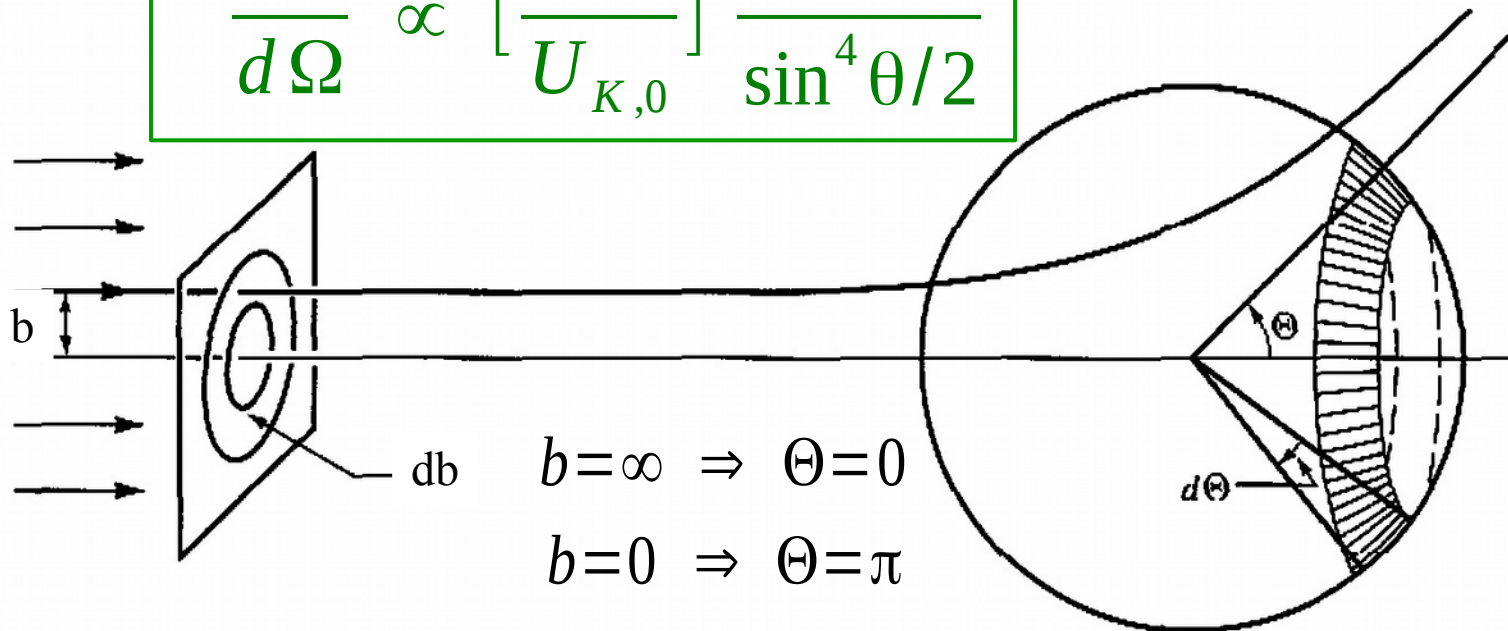


FIGURE 3.19 Scattering of an incident beam of particles by a center of force.

Suggerimenti e quesiti

- Fascio uniformemente popolato :

$$N \propto \pi b^2 \Rightarrow dN/db \propto 2\pi b$$

$$\frac{db}{d\theta} = -\frac{1}{2} \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0 U_{K,0}} \frac{1}{\sin^2\theta}$$

- Si trova :

$$\frac{dN}{d\Omega} \propto \left[\frac{zZe^2}{U_{K,0}} \right]^2 \frac{1}{\sin^4\theta/2}$$

- Spiegare :

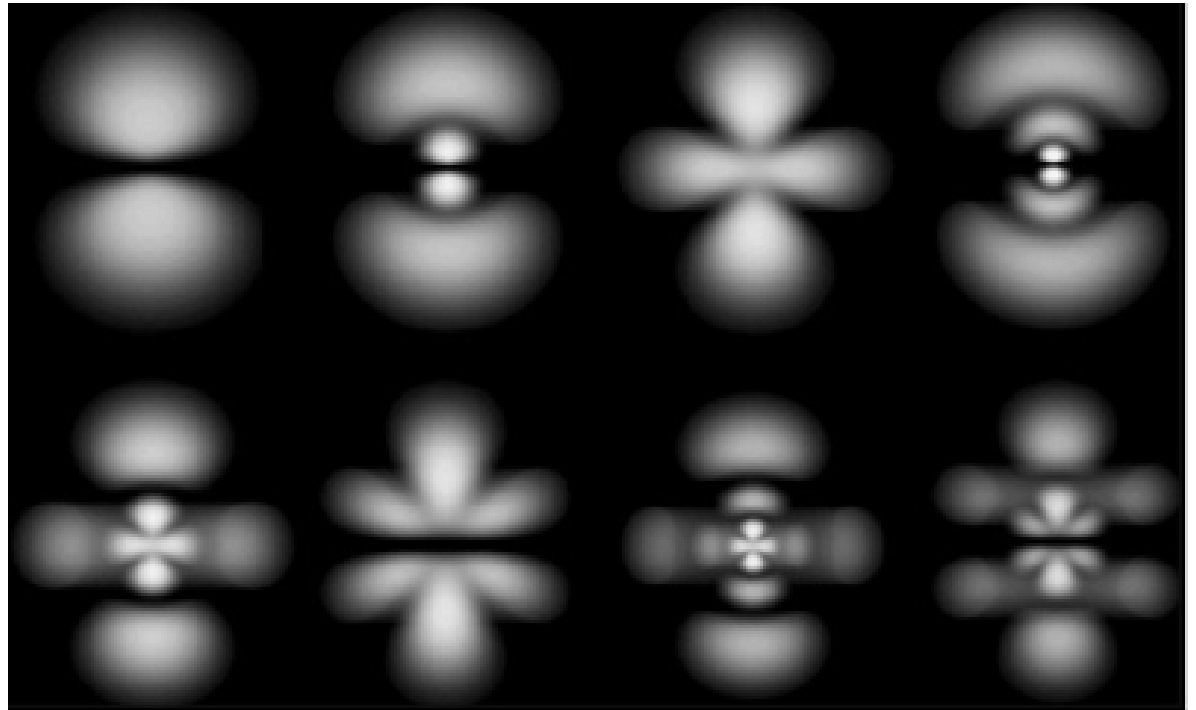
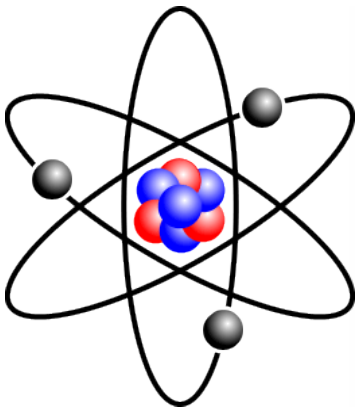
- l'origine della divergenza a basso angolo
- perche' il risultato non dipende dal segno del prodotto zZ

Il modello nucleare

- Ora sappiamo che :

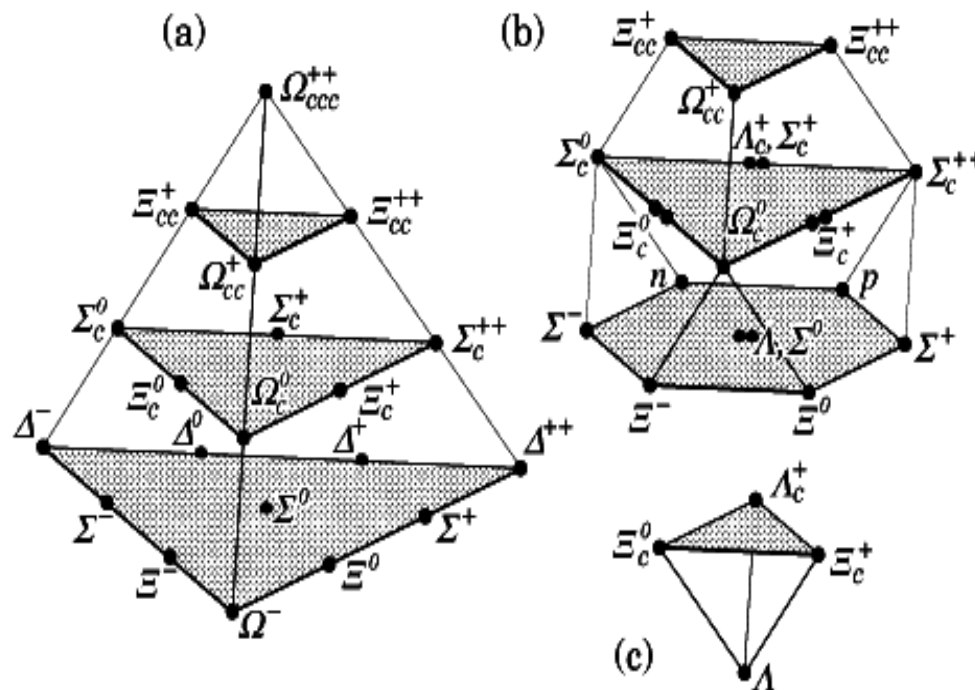
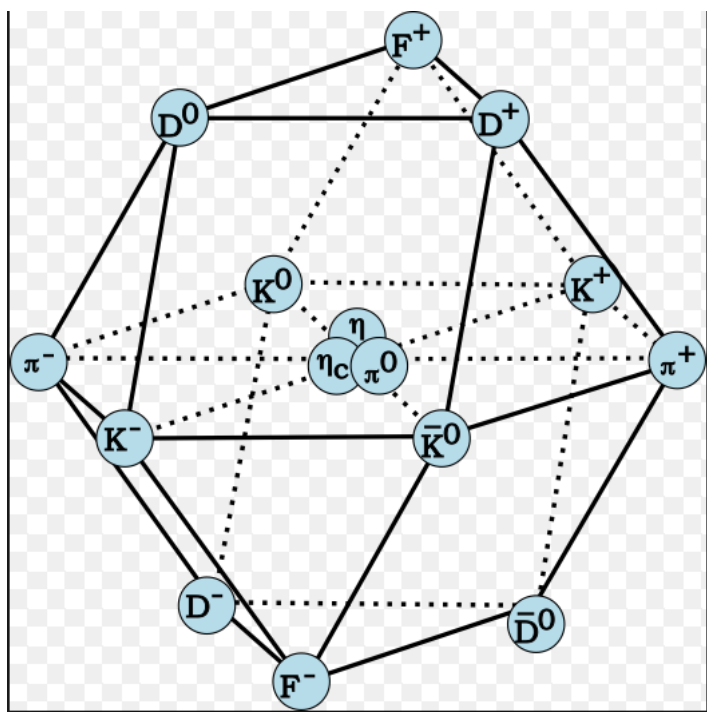
- $R_{\text{Atomo}} \sim 10^{-10} \text{ m}$

- $R_{\text{Nucleo}} \sim 10^{-15} \text{ m} \sim R_A / 100\,000$



Le Stesse Cose Ritornano

- 1940-1960: osservate centinaia di diverse particelle subnucleari instabili (che cioè decadono molto rapidamente), gli **ADRONI**
- Regolarità: catalogati in “multipletti”

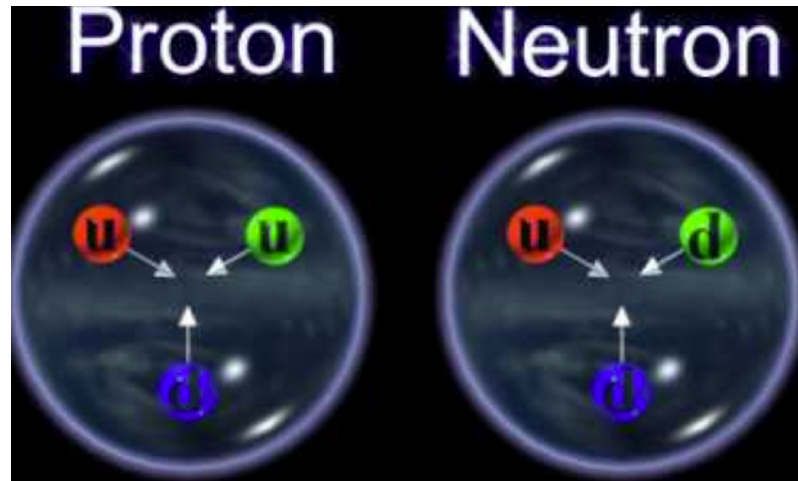


TANTE NUOVE TAVOLE PERIODICHE

La struttura del nucleone (1960)

- 1940-1960: osservate centinaia di diverse particelle instabili (che cioè decadono molto rapidamente), chiamate **ADRONI**
- Regolarità: catalogati in “multipletti”
- 1964: Gell-Mann & Zweig (indipendentemente) ipotizzano che gli adroni siano strutture complesse, composte da tre costituenti elementari, i

quark **u**p, **d**own, **S**trange



Diffusione Rutherford

$$\frac{dN}{d\Omega} = \frac{dN}{2\pi \sin\theta d\theta} = \frac{1}{2\pi \sin\theta} \cdot \frac{dN}{db} \cdot \frac{db}{d\theta}$$

$$b = \frac{1}{2} \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0 U_{K,0}} \cot(\theta/2)$$

$$\frac{dN}{d\Omega} \propto \left[\frac{zZe^2}{U_{K,0}} \right]^2 \frac{1}{\sin^4 \theta/2}$$

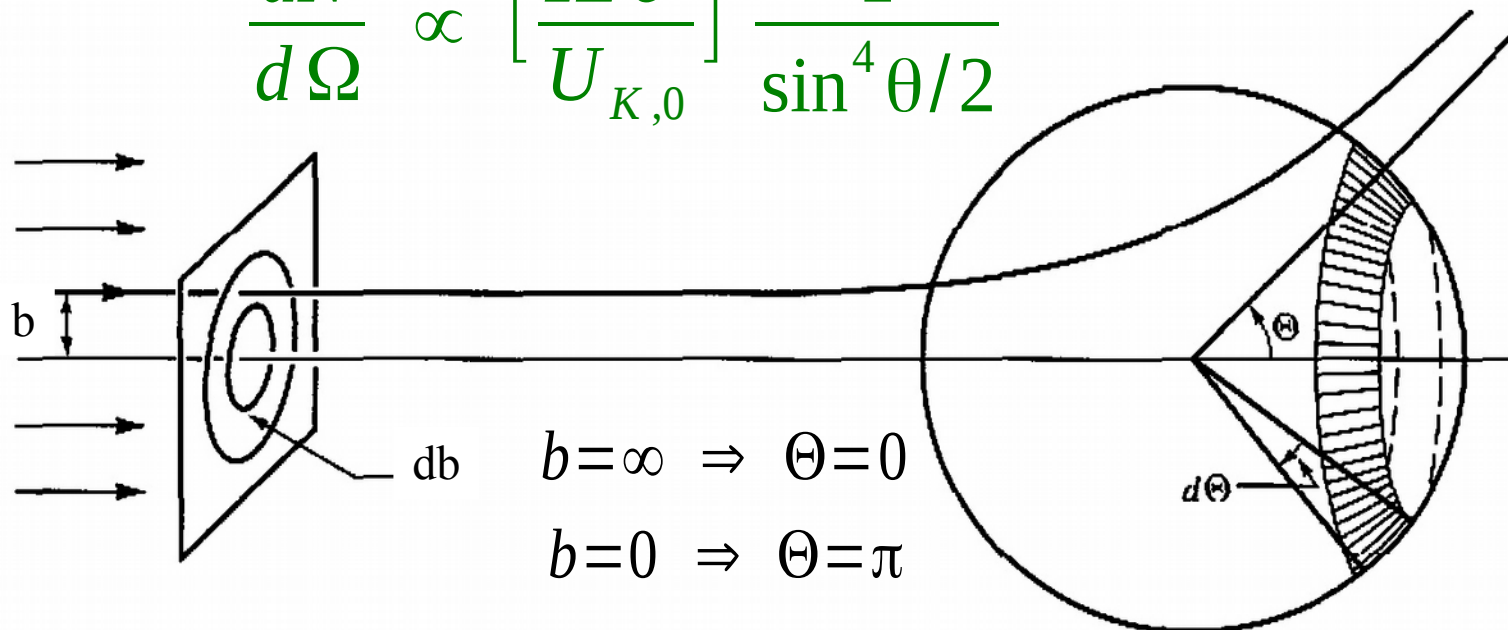
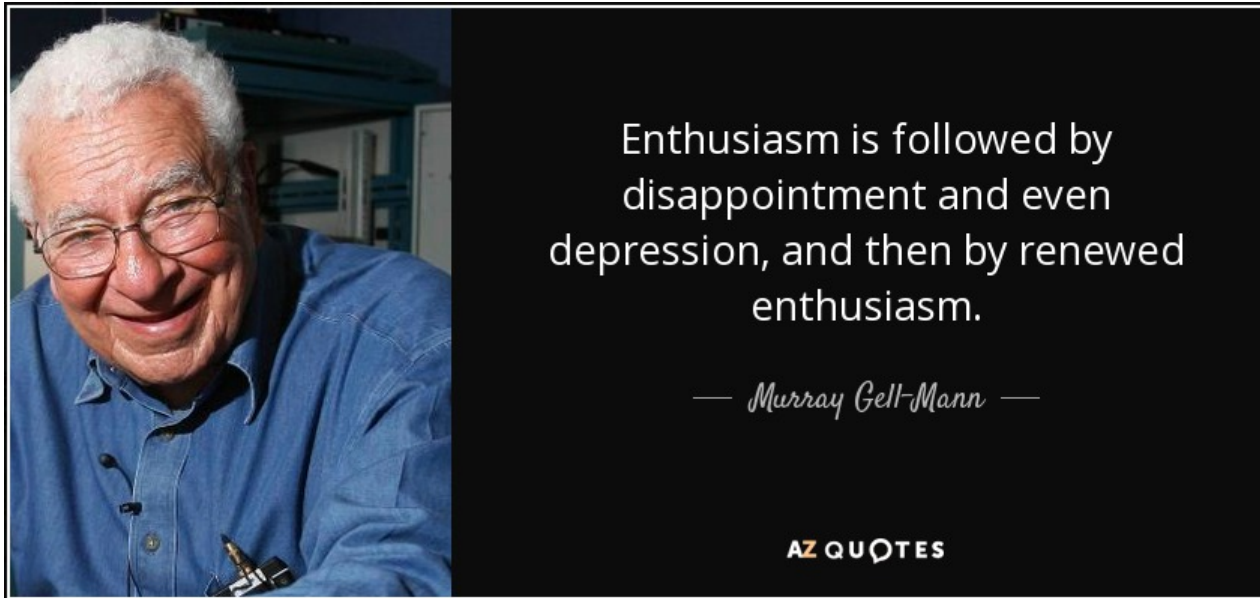


FIGURE 3.19 Scattering of an incident beam of particles by a center of force.

Murray Gell-Mann



Three quarks for Muster Mark



"Then, in one of my occasional perusals of *Finnegans Wake*, by James Joyce, I came across the word "quark" in the phrase "**THREE** quarks for Muster Mark".

In realta' i quark sono **SEI** (arrangiati in tre doppietti):



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Prof. Franco Simonetto Università' PD

Three quarks for Muster Mark



"Then, in one of my occasional perusals of *Finnegans Wake*, by James Joyce, I came across the word "quark" in the phrase "**THREE** quarks for Muster Mark".

A man's errors are his
portals to discovery
(Ulysses)



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

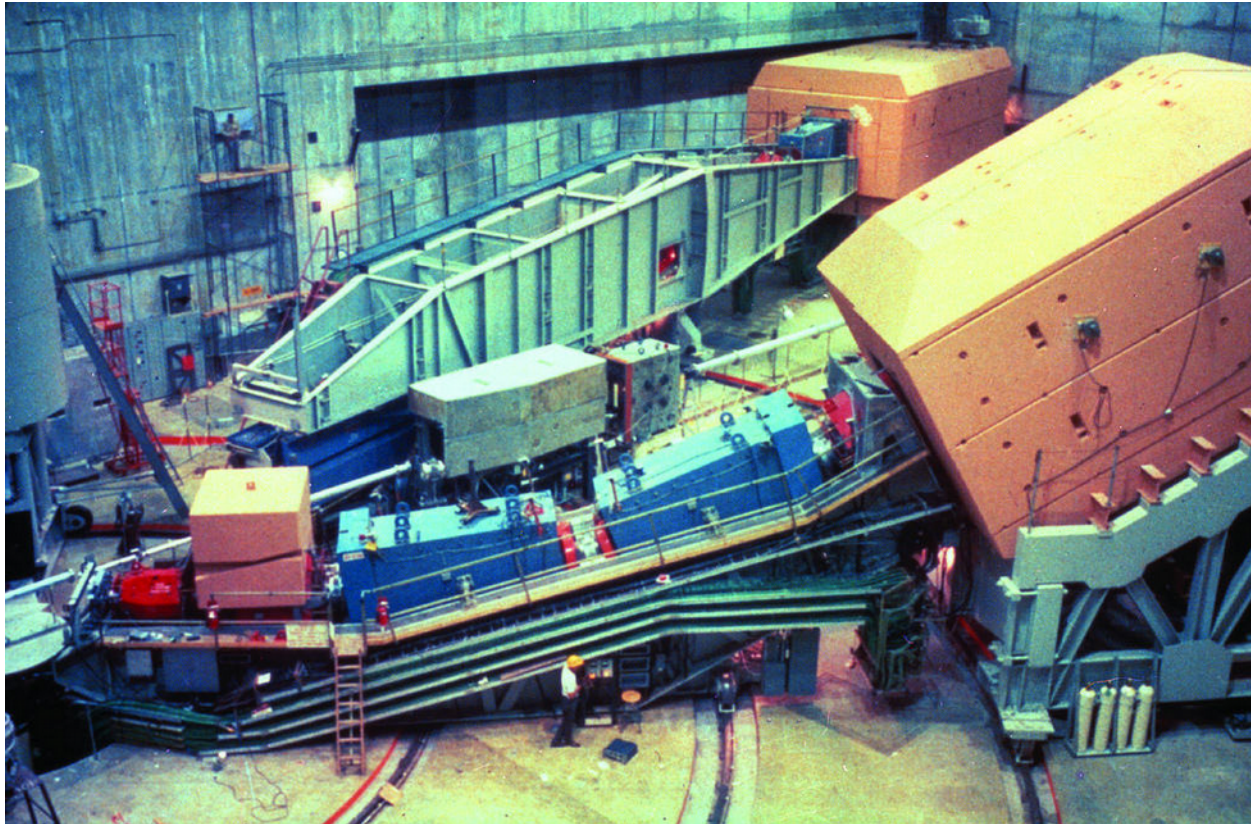
Prof. Franco Simonetto Università' PD

Le Stesse Cose Ritornano

L'ipotesi e' poi confermata da esperimenti "a la Rutherford":

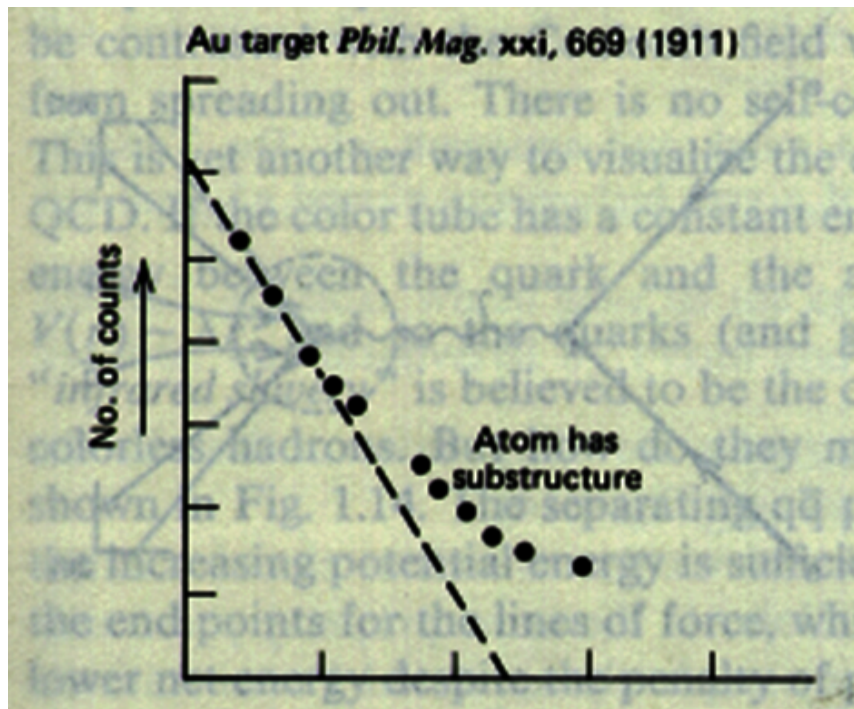
diffusione di elettroni da nuclei d'idrogeno (protoni)

(SLAC 1965 - DESY 1980)

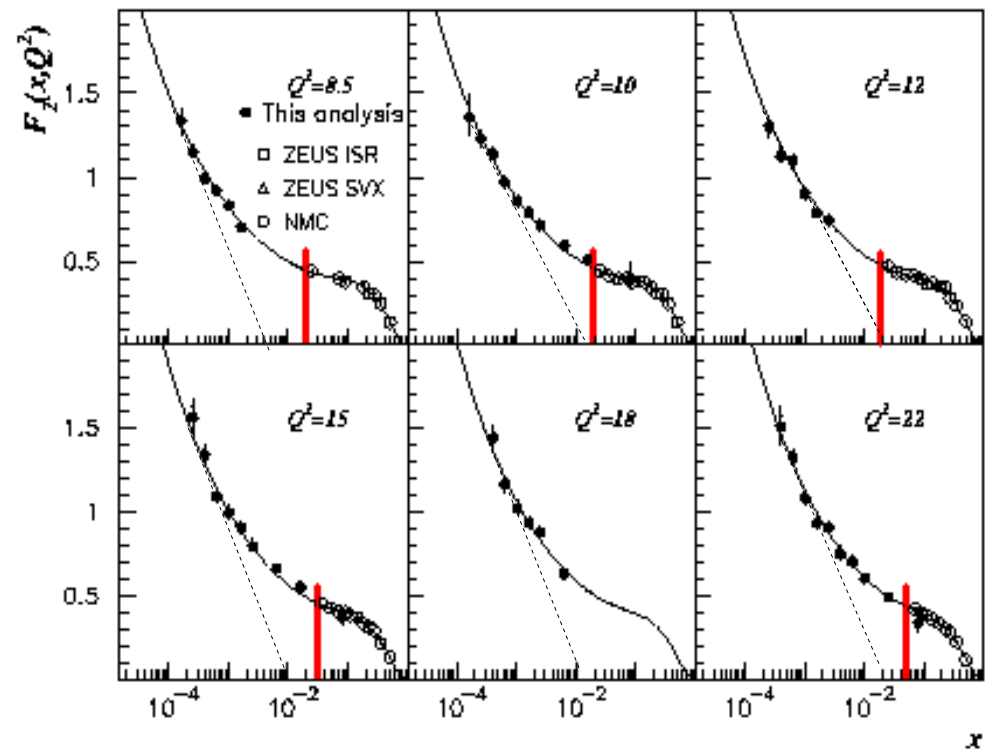


Le Stesse Cose Ritornano

- L'ipotesi e' poi confermata da esperimenti "a la Rutherford" di diffusione di elettroni da nuclei d'idrogeno (protoni) (SLAC 1965 - Desy 1980)



1910 : il nucleo nell'atomo



1980 : i quark nel protone

Conservazione della carica

- Rispettata in tutte le transizioni osservate :

$$n \rightarrow p^+ e^- \bar{\nu}_e$$

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$

$$\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$$

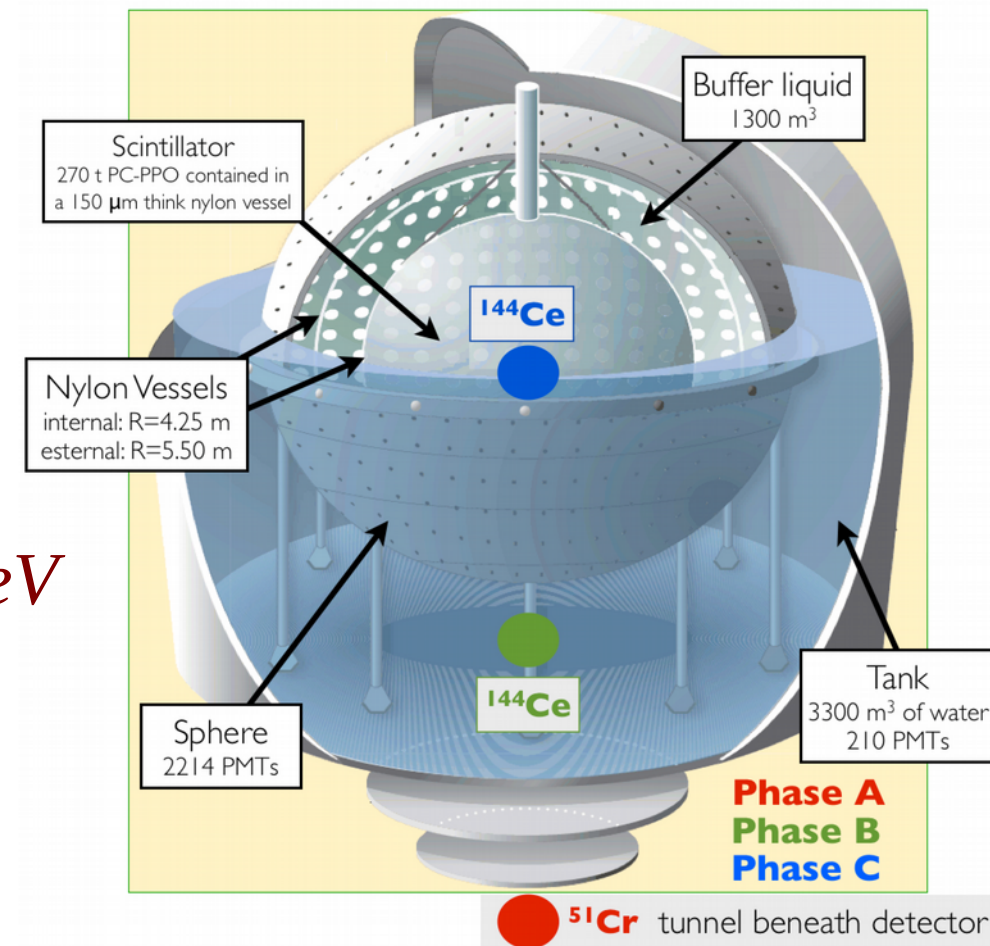
- Vincolo più stringente: stabilità dell'elettrone

$$\tau(e^-) > 10^{28} \text{ anni}$$

ottenuto dall'esperimento Borexino ai LNGS

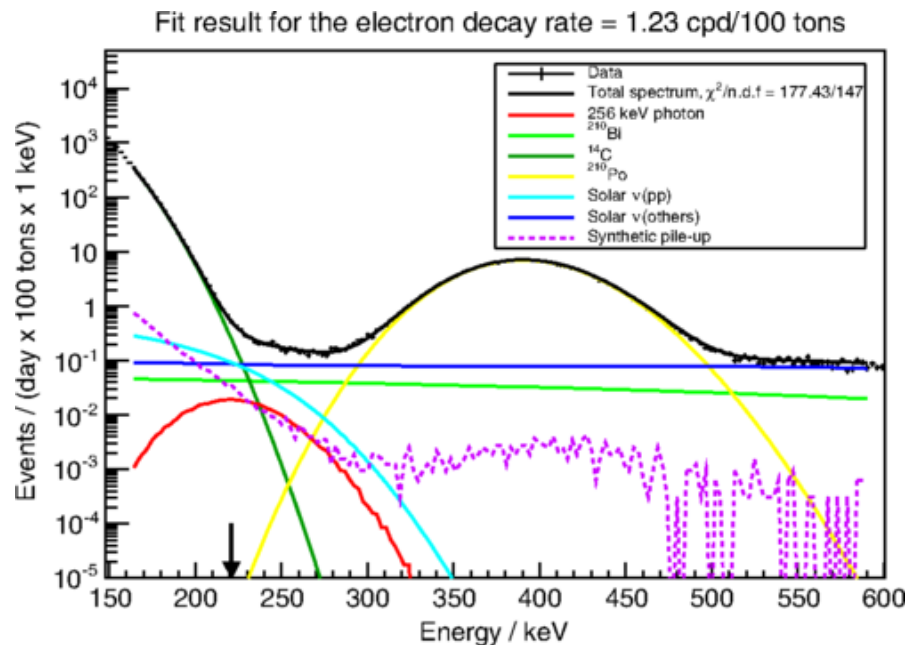
Vita media e a Borexino

- 270 ton di liquido scintillante per misurare flusso di neutrini solari
- contiene $N = 10^{32}$ elettroni
- ricerca decadimento $e^- \rightarrow \gamma \nu_e$
- segnale : fotone monoenergetico con $U_\gamma = 1/2 m_e c^2 = 256 \text{ KeV}$
- nessuna osservazione sopra i fondi in circa 500 giorni di presa dati



Borexino : risultati

- Nessuna osservazione in 500 giorni di osservazione
 - ... sopra i fondi attesi



Energy spectrum between 150 and 600 keV. The most prominent features are the ^{14}C β spectrum (green line), the peak at about 400 keV from ^{210}Po α decays, and the solar neutrinos, grouped in the blue curve except for the crucial pp neutrinos, which are shown in cyan. The effect of event pileup, mostly overlapping ^{14}C events, is shown in dashed pink. The hypothetical monoenergetic 256 keV γ line is shown in red at its 90% exclusion C.L. with an arrow indicating the mean value of the detected energy, which is lower than 256 keV because of quenching. The fit is done in the range 164–590 keV.

$$\tau(e) > 6.6 \cdot 10^{28} \text{ anni}$$

Indagine legge di Coulomb

- Deviazioni nell'espressione del campo :

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^{2+\delta}} \vec{u}_r$$

- Deviazioni nell'espressione del potenziale :

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^{-\mu_y r}}{r^2}$$

$$\mu_y = m_y c / \hbar$$

massa del fotone (Yukawa)

- Misure :

- Laboratorio
- Astronomico



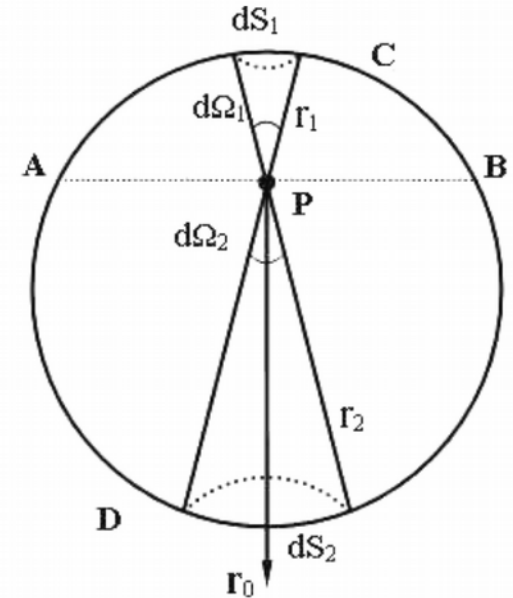
Verifiche in laboratorio

- Misure del campo all'interno di un conduttore carico
 - nullo se vale la legge di Gauss:

$$\vec{dE}_j(P) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\sigma dS_j}{r_j^{2+\delta}} \vec{u}_r = \frac{\sigma d\Omega}{4\pi\epsilon_0} r^{-\delta_j} \vec{u}_r$$

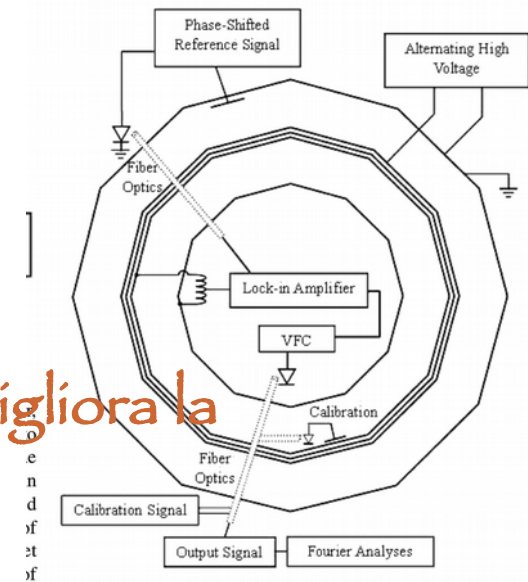
$$\vec{dE}(P) = \vec{dE}_1 + \vec{dE}_2 = \frac{\sigma d\Omega}{4\pi\epsilon_0} (r^{-\delta_2} - r^{-\delta_1}) \vec{u}_r$$

- Risultati espressi come limiti su δ (o su μ_γ)



Verifiche in Laboratorio

- In pratica si realizzano sistemi di conduttori innestati
 - vario il potenziale sui conduttori esterni
 - misuro il potenziale su quelli interni
 - uso di campi variabili nel tempo (radiofrequenze) migliora la precisione

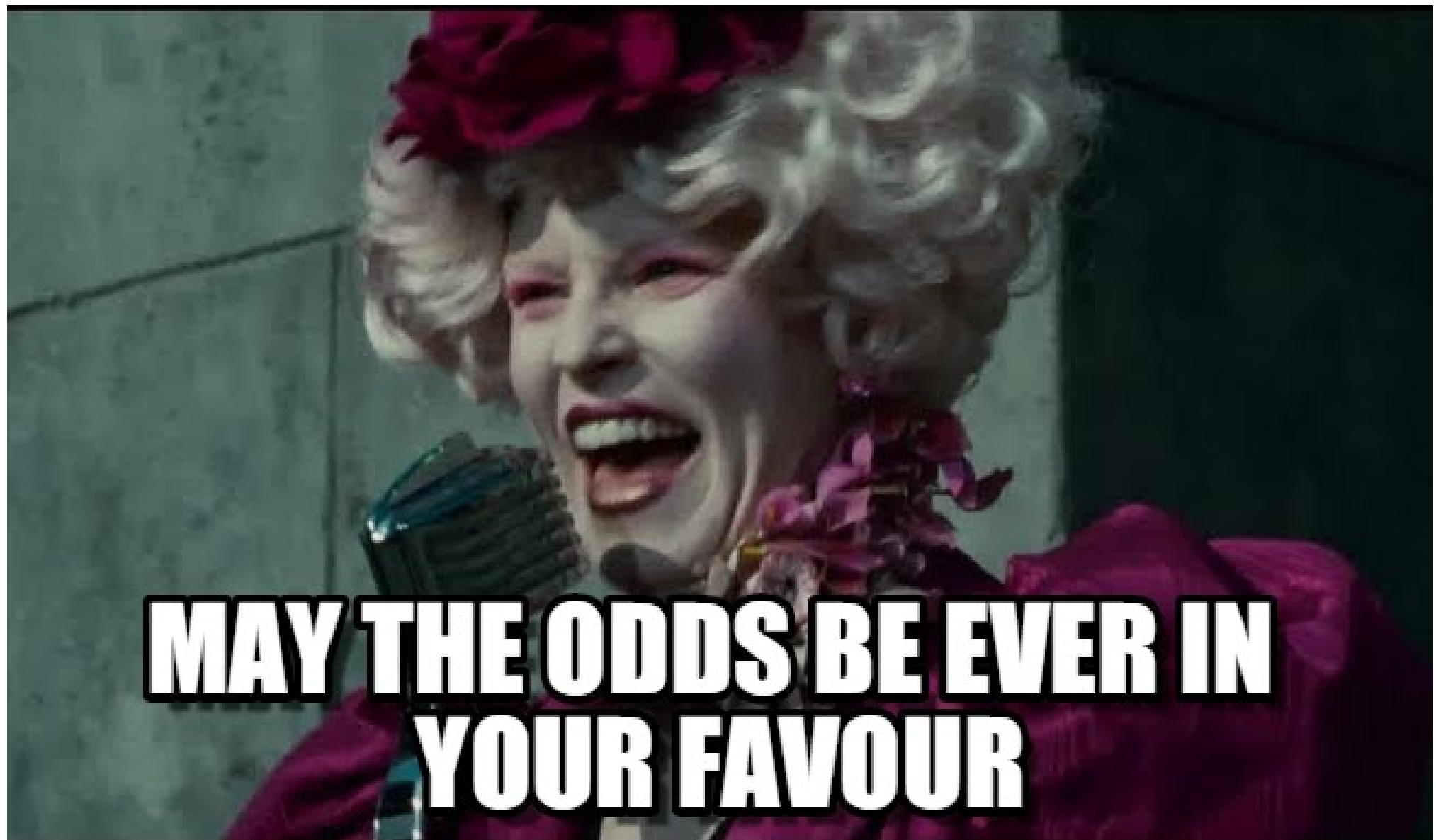


Author (date)	Experimental scheme	Deviation of q	Upper limit on m_Y/g
Robison (1769)	Gravitational torque on a pivot arm	6×10^{-2}	4×10^{-40}
Cavendish (1773)	Two concentric metal spheres	2×10^{-2}	1×10^{-40}
Coulomb (1785)	Torsion balance	4×10^{-2}	$\sim 10^{-39}$
Maxwell (1873)	Two concentric spheres	5×10^{-5}	1×10^{-41}
Plimpton and Lawton (1936)	Two concentric spheres	2×10^{-9}	3.4×10^{-44}
Cochran and Franken (1967)	Concentric cubical conductors	9.2×10^{-12}	3×10^{-45}
Bartlett <i>et al</i> (1970)	Five concentric spheres	1.3×10^{-13}	3×10^{-46}
Williams <i>et al</i> (1971)	Five concentric icosahedra	$(2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$	1.6×10^{-47}
Fulcher (1985)	Improved on Williams' experiment	$(1.0 \pm 1.2) \times 10^{-16}$	1.6×10^{-47}
Crandall <i>et al</i> (1983)	Three concentric icosahedra	6×10^{-17}	8×10^{-48}
Ryan <i>et al</i> (1985)	Cryogenic experiment		$(1.5 \pm 1.4) \times 10^{-42}$

Misure di m_γ

- Propagazione di onde elettromagnetiche da sorgenti (extra)galattiche

Author (date)	Ref.	Experimental scheme	Upper limit on m_γ/g
<i>Terrestrial results</i>			
Goldhaber <i>et al</i> (1971)	[4]	Speed of light	5.6×10^{-42}
Williams <i>et al</i> (1971)	[13]	Test of Coulomb's law	1.6×10^{-47}
Chernikov <i>et al</i> (1992)	[14]	Test of Ampere's law	8.4×10^{-46}
Lakes (1998)	[15]	Static torsion balance	2×10^{-50}
Luo <i>et al</i> (2003)	[16]	Dynamic torsion balance	1.2×10^{-51}
<i>Extraterrestrial results</i>			
de Broglie (1940)	[10]	Dispersion of starlight	0.8×10^{-39}
Feinberg (1969)	[17]	Dispersion of starlight	10^{-44}
Schaefer (1999)	[18]	Dispersion of gamma ray bursts	4.2×10^{-44}
Davis <i>et al</i> (1975)	[19]	Analysis of Jupiter's magnetic field	8×10^{-49}
Fischbach <i>et al</i> (1994)	[20]	Analysis of Earth's magnetic field	1.0×10^{-48}
Ryutov (1997)	[21]	Solar wind magnetic field and plasma	10^{-49}
Gintsburg (1964)	[22]	Altitude dependence of geomagnetic field	3×10^{-48}
Patel (1965)	[23]	Alfvén waves in Earth's magnetosphere	4×10^{-47}
Hollweg (1974)	[24]	Alfvén waves in interplanetary medium	1.3×10^{-48}
Barnes <i>et al</i> (1975)	[25]	Hydromagnetic waves	3×10^{-50}
DeBernadis <i>et al</i> (1984)	[26]	Cosmic background radiation	3×10^{-51}
Williams <i>et al</i> (1971)	[27]	Galactic magnetic field	3×10^{-56}
Chibisov (1976)	[5]	Stability of the galaxies	3×10^{-60}



Diffusione Rutherford

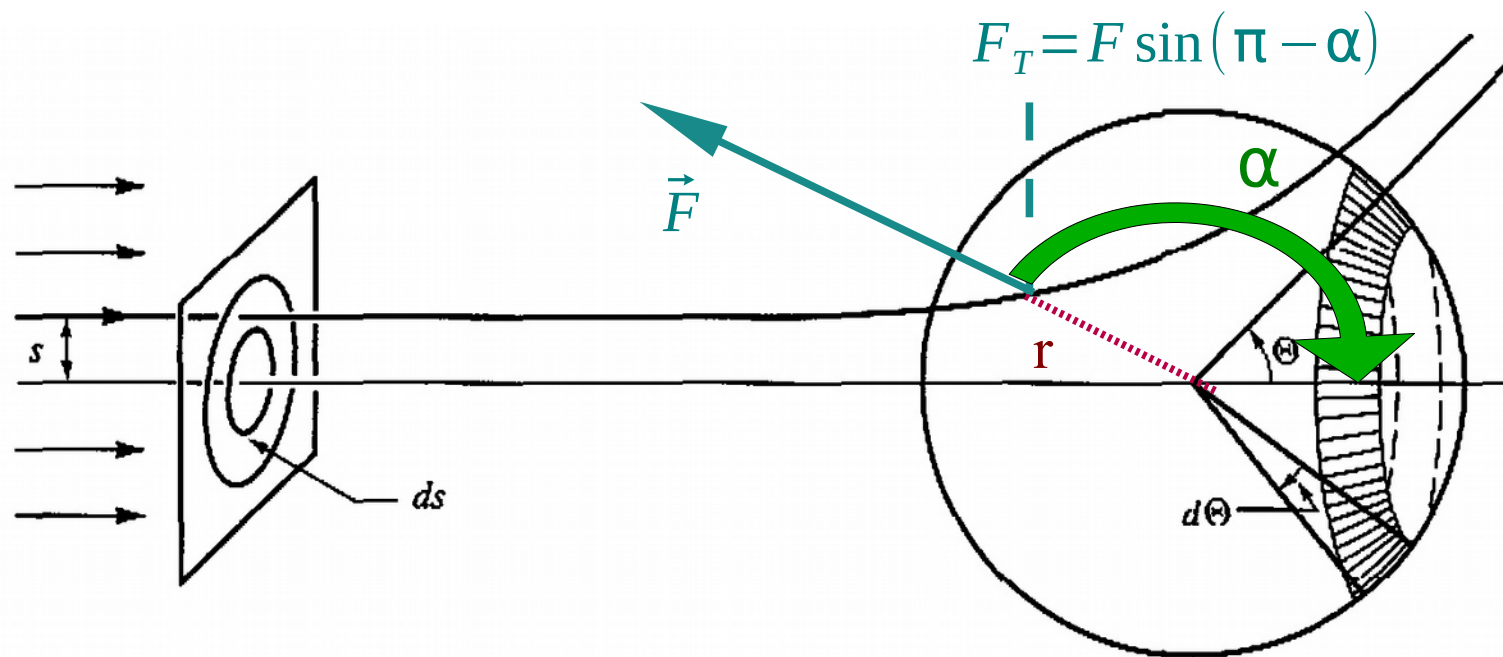


FIGURE 3.19 Scattering of an incident beam of particles by a center of force.