

La ricerca dei costituenti della materia



Paolo Bagnaia

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



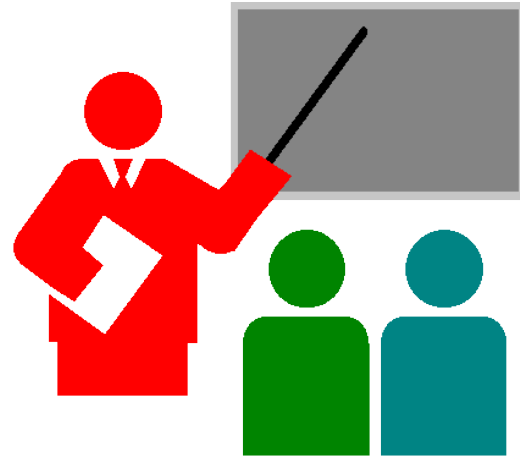
**Liceo Dante
Alighieri**

Liceo Ginnasio Statale

21/1/2019

(è buona educazione presentarsi)

- Roma, 1952.
- Liceo classico (*inter nos, ottima scelta*).
- Laurea alla Sapienza, poi al CERN (Ginevra), poi di nuovo a Roma-Sapienza (*percorso canonico*).
- dal 2000 Professore ordinario alla Sapienza.
- Corso di "Particle Physics" (*yes, in English !*) – Laurea Magistrale in Fisica I anno (= 4^o anno univ.).
- ex-presidente del CAD in Fisica (= *coordinatore della struttura dei corsi e dei programmi*).



- esperimenti a bersaglio fisso (1975-83), poi Collider $\bar{p}p$ (1983-89), LEP (1989-2000), LHC (fino ad oggi),
- un migliaio abbondante di pubblicazioni, tra cui la scoperta dei bosoni Z (nel 1983) e Higgs (nel 2012),
- ... e non finirà qui ...

sommario

Oggi vi parlo di questi soggetti:

- come si fa a "vedere" un oggetto ? il metodo dipende dalla grandezza dell'oggetto stesso ?
- perché per scoprire particelle piccolissime servono esperimenti grandissimi, e quindi costosissimi, e quindi migliaia di persone?
- a piccole scale, il metodo principale: le COLLISIONI (urti);
- quanto sono grandi le particelle della fisica moderna (protoni, quark, elettroni, bosoni di Higgs) ? e come si fa a saperlo ?
- un esempio antico e famoso: la scoperta del nucleo di E.Rutherford;

- un esempio moderno: ATLAS@LHC:
 - descrizione e metodologia;
 - risultati ad oggi;
 - prospettive future (→ **voi ?**).



prologo: fino al 1600

- motivazione : **curiosità** : **vogliamo capire come è fatto il mondo**(*).
- la ricerca della **struttura della materia** è vecchia come il genere

umano [*gli Assiro-Babilonesi, i pre-socratici dell'antica Grecia ... aria acqua terra fuoco ... Ἀριστοτέλης ... gli alchimisti del medio evo ...*]



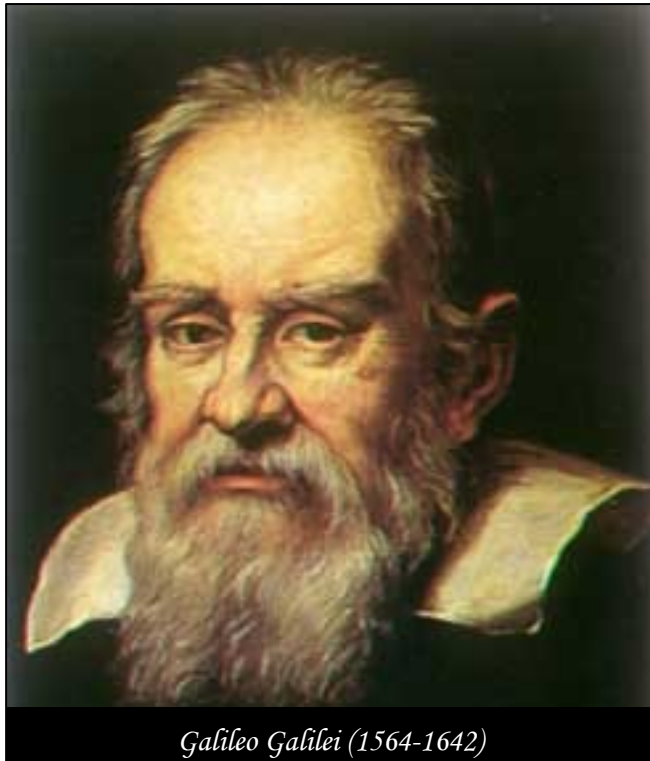
Jan Brueghel e Hendrick van Balen – Cerere e i Quattro Elementi - Kunsthistorisches Museum (Vienna)

(*) Nota bene: le ricerche producono molti altri risultati (economici, medici, ohimé militari), ma questi, secondo me, non sono il principale obiettivo (e non ne parliamo qui).

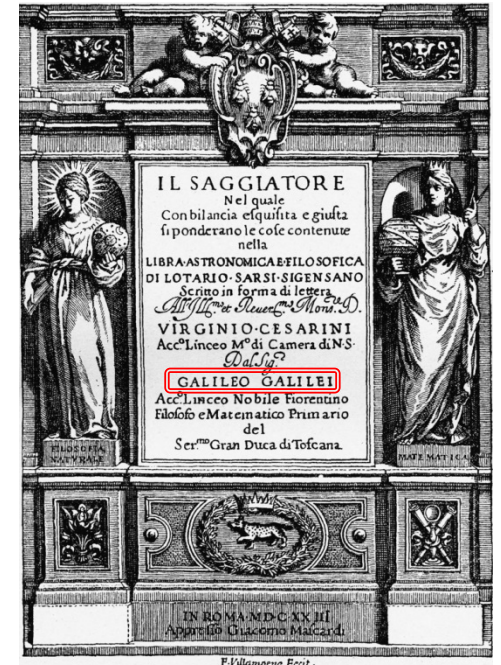
prologo: la "rivoluzione scientifica"

La svolta arriva nel 1600 con il **metodo scientifico** (Galileo): procedure rigorose e riproducibili, che consentono di definire leggi matematiche, "verificabili" e facilmente comunicabili.

*"La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto **in lingua matematica**, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, **senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola**; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto" [il Saggiatore, cap 6].*



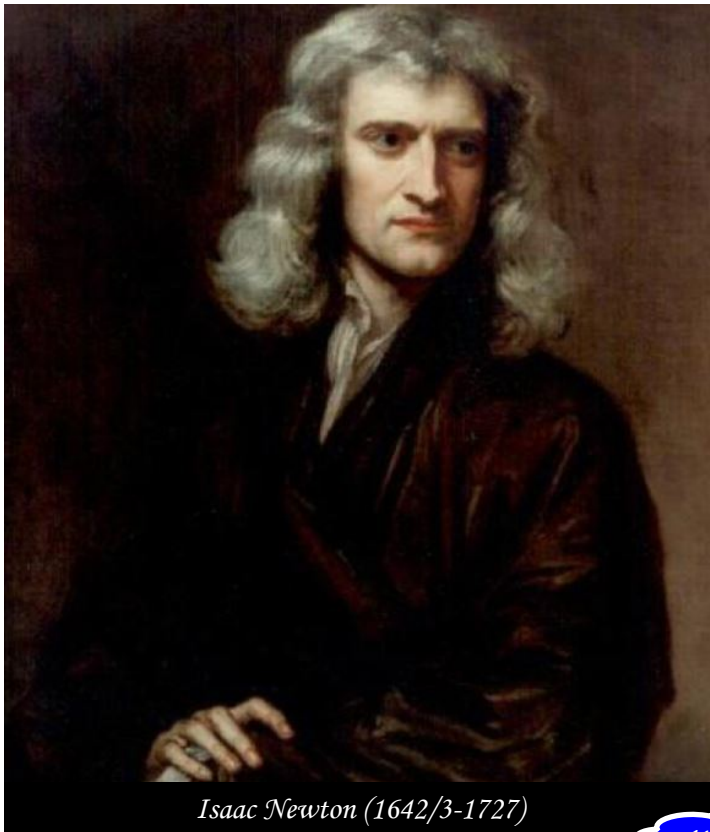
Galileo Galilei (1564-1642)



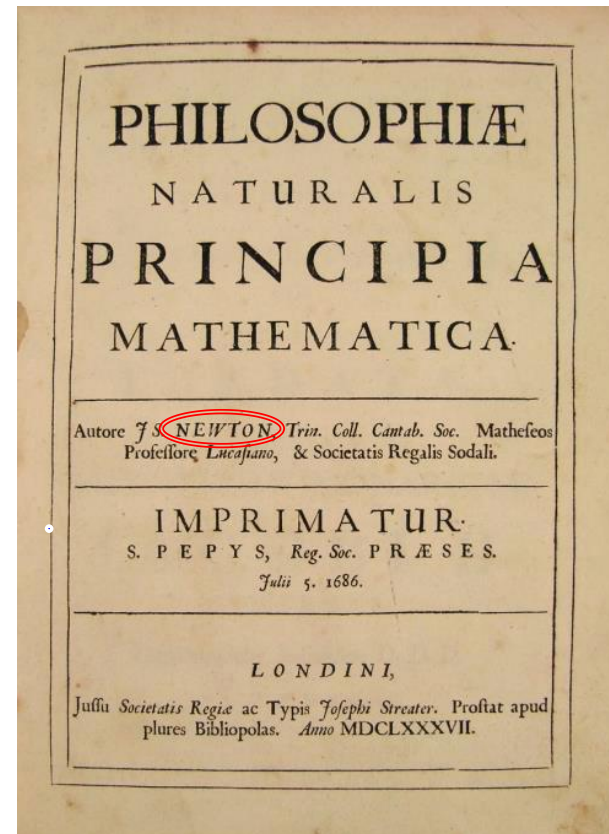
prologo: la "rivoluzione scientifica"

- la fisica diviene una scienza esatta di tipo deterministico;
- in seguito, dopo la meccanica celeste e quella terrestre, vengono

fisicizzati i liquidi, il calore, le cariche elettriche, i campi magnetici e pressoché tutti i fenomeni "del cielo e della terra".



1642/3 ???



prologo: il 1900

- al principio del 1900, grande crisi: la soluzione richiede una migliore comprensione dei fondamenti della meccanica (la **teoria della relatività**)

e l'abbandono del determinismo ingenuo (**meccanica quantistica**: dualismo onde-particelle, principio di indeterminazione).

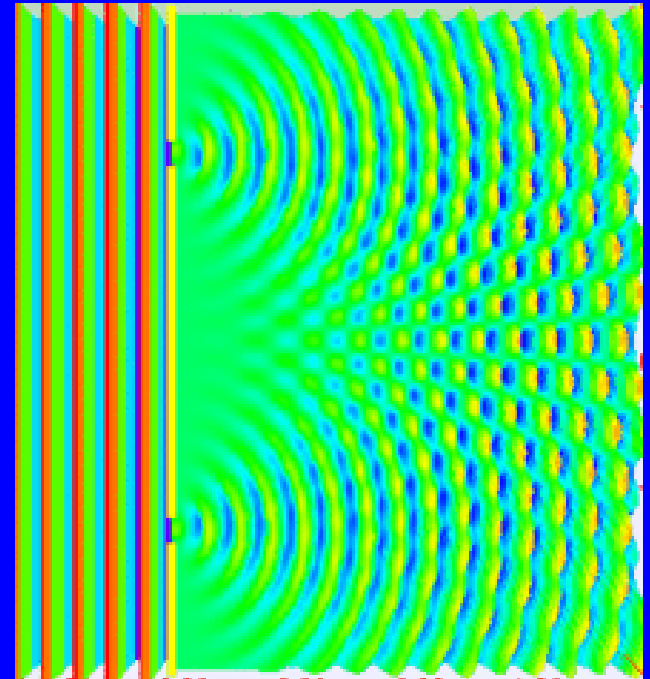
A.Einstein
(1905)



$$W = \mu V^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} - 1 \right\}.$$

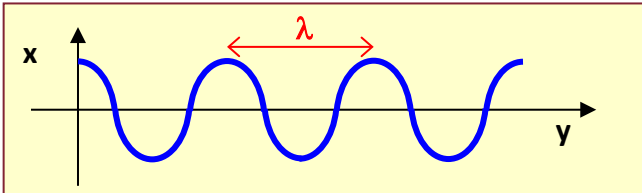
meglio nota come **$E = m c^2$**

molti autori
(1925-27)



Un'onda piana, se incontra due fenditure, viene **diffratta** (ottica classica). Lo stesso effetto è prodotto con **particelle** (ex. elettroni).

per "vedere" serve la luce (= onda elettromagnetica)

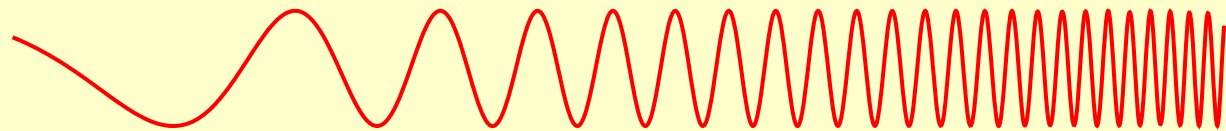


λ (m) = lunghezza d'onda
 ν (Hz=1/s) = frequenza
 c (m/s) = velocità della luce
 (c è lo stesso per tutti i λ e ν)




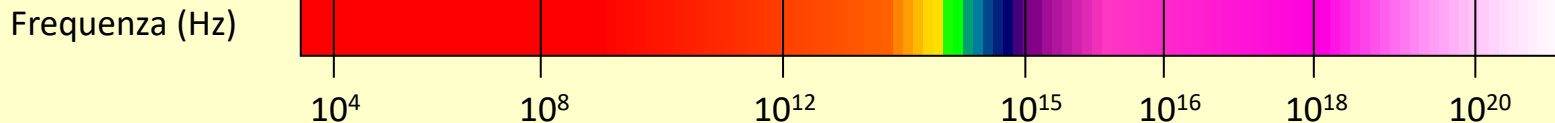
$$\text{velocità} = \frac{\text{spazio}}{\text{tempo}} = \text{spazio} \times \text{frequenza}$$

$$c = 300,000 \text{ km/s} = \lambda \nu \Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda}$$



tipo di radiazione	radio	microne	infrarosso	visibile	ultravioletto	raggi X	raggi gamma
lunghezza d'onda (m)	10^3	10^{-2}	10^{-5}	5×10^{-7}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}

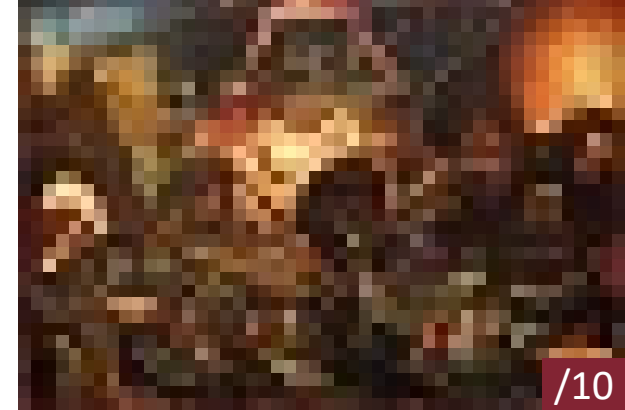
scala approssimativa								
	edifici	esseri umani	farfalle	punta di un ago	protozoi	molecole	atomi	nuclei atomici



[da wikipedia, con modifiche]

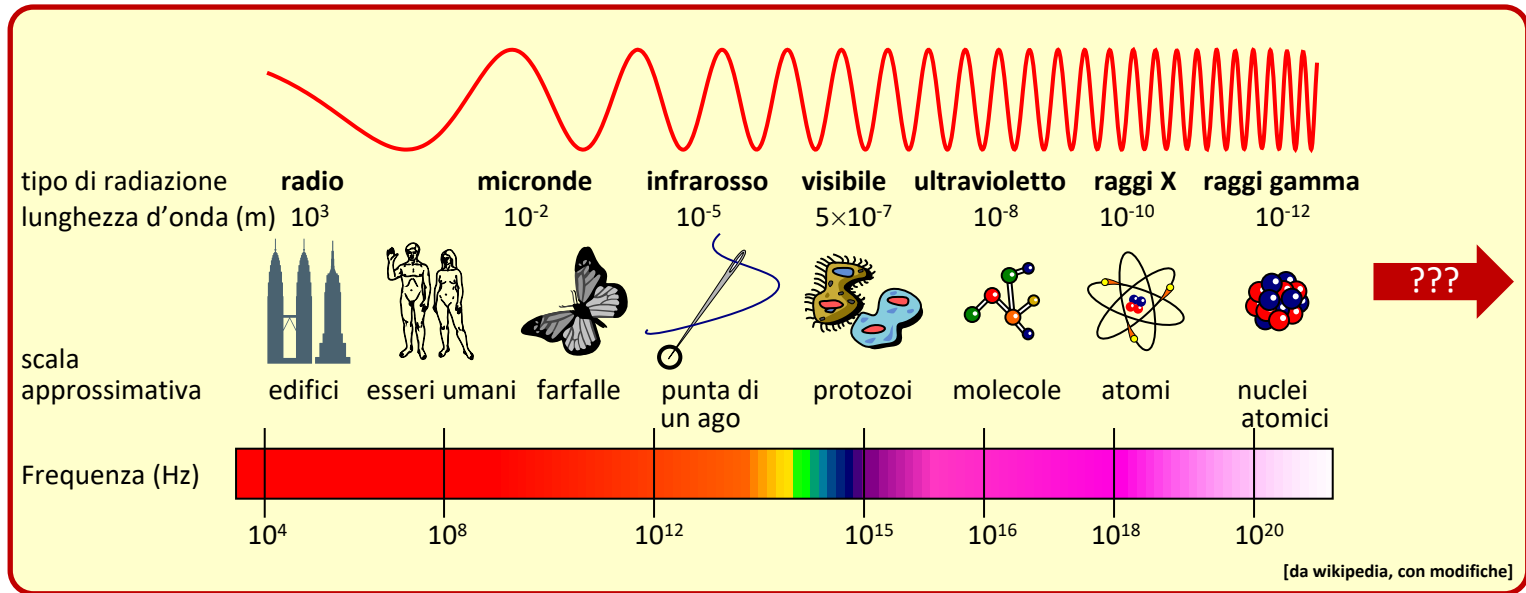
"vedere" richiede onde *piccole*

- La luce (= onda e.m.) che colpisce un oggetto viene poi riemessa ad opportuni valori di λ (il **colore** dell'oggetto stesso);
- la rivelazione di queste onde è proprio la "visione" dell'oggetto;
- ma qualsiasi valore di λ ci consentirebbe di "vedere" qualsiasi oggetto ?
- facciamo un piccolo esperimento virtuale: prendiamo un famoso quadro e facciamo più grandi i pixel (cioè sostituiamo a $n \times n$ pixel contigui la loro media);
- capite ? al diminuire della risoluzione, l'immagine diventa confusa e poi sparisce;
- è (quasi) ovvio: con luce di valore λ , **non** si possono vedere oggetti più piccoli di λ !



seguace di Hieronymus Bosch – Cristo nel Limbo (particolare)

il limite imposto da λ



- torniamo allo spettro della luce
- con un microscopio ottico (a luce visibile) si possono vedere (confusamente) i protozoi, ma niente di più piccolo
- oggetti più piccoli richiedono luce di minore λ

- e inoltre, a distanze ancora minori, viene a mancare il meccanismo di assorbimento e riemissione della luce

che fare ?

"vedere" mediante collisioni

- idea: invece della luce, usiamo particelle (e.g. elettroni);
- dualismo onda-particella: una particella di energia E corrisponde ad un'onda $E = h\nu$ ($h =$ costante di Planck $= 4.14 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$);
- pertanto, per un oggetto di grandezza $r^{(*)}$, servono particelle con λ piccoli $\rightarrow \nu$ grandi \rightarrow alta energia:

$$r > \frac{c}{2\pi\nu} = \frac{hc}{2\pi E} \rightarrow E > \frac{hc}{2\pi r}$$

Oggetto	Dimensione (m)	Energia corrispondente
atomo	10^{-10}	0.00001 GeV
nucleo	10^{-14}	0.01 GeV
nucleone	10^{-15}	0.1 GeV
quark	$< 10^{-19}$	> 1000 GeV

"eV" = elettron-volt
= unità di misura dell'energia

1 eV = energia ceduta ad un e^- da una d.d.p. di 1 Volt

GeV = 10^9 eV.

(*) Il fattore 2π richiede argomenti più complicati, però il nocciolo del ragionamento è corretto.

dimensioni delle particelle

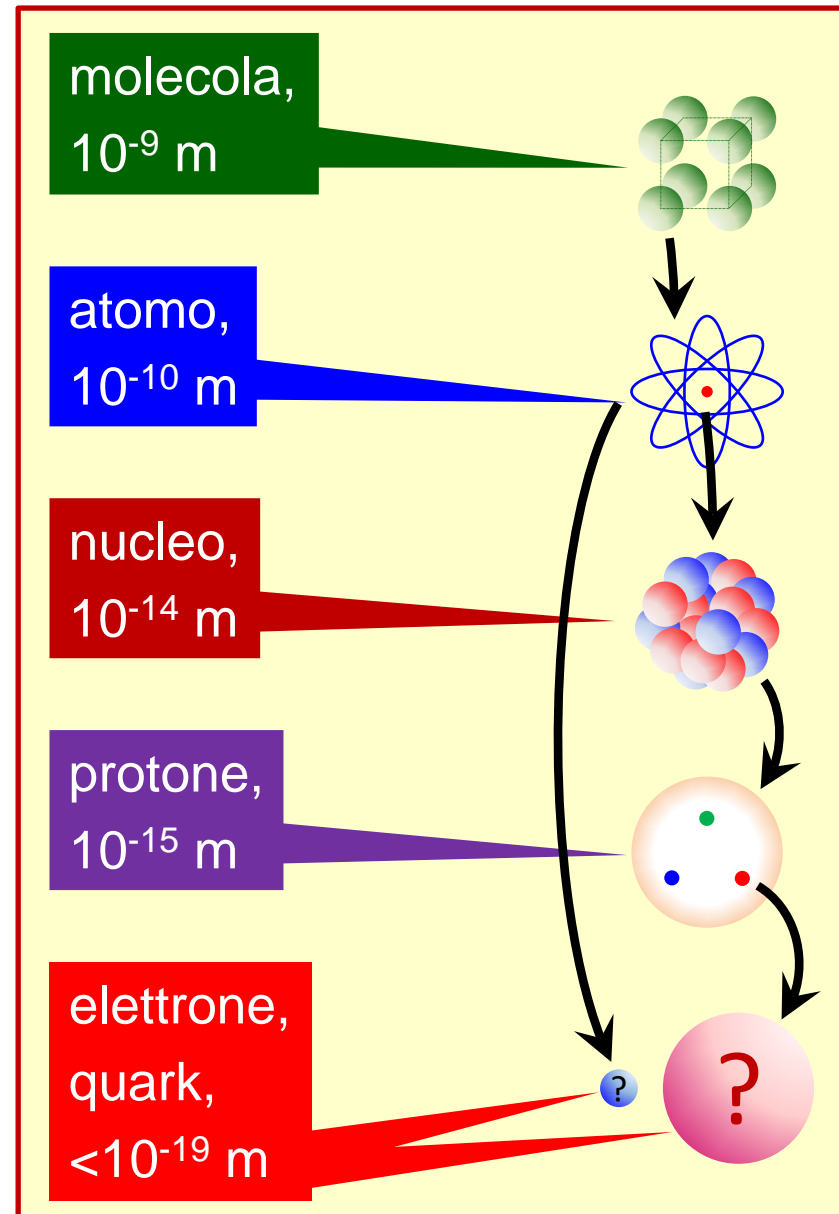
Esempio : un solido o un gas;

- le **molecole** sono gli oggetti più piccoli che conservano le proprietà della sostanza;
- le m. sono composte da **atomi** (ex. H, O, C);
- gli a. sono formati da un **nucleo**, pesante e piccolo, attorno a cui si trovano **elettroni**;
- i n. sono formati da **nucleoni** (**protoni** e **neutroni**);
- i n. sono composti da **quark** e **gluoni**.

Elettroni, quark, e particelle simili hanno dimensioni piccole (per ora ignote), oppure sono puntiformi.

Come abbiamo misurato i numeri citati ?

- molti esperimenti, ma con una caratteristica comune: **urti** con piccole e veloci particelle-sonda, e studio della collisione.



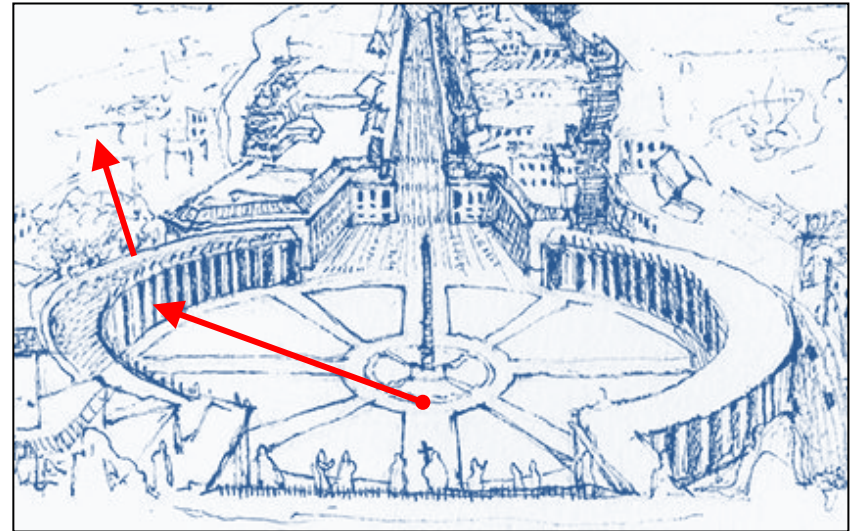
un esperimento ideale (... da non fare)

Dovete misurare numero, forma, dimensioni e struttura delle colonne di S.Pietro, senza che possiate vederle:

- andate a Piazza S.Pietro all'interno del colonnato e cominciate a scagliare palline da ping-pong in tutte le direzioni; un amico, fuori dal colonnato, misura numero, velocità e direzione di tutte le palline;
- [*i calcoli sono difficili, non li facciamo qui, però ...*] è intuitivo che funziona.

Ma servono palline piccole, veloci e leggere (+ la meccanica quantistica, se il "colonnato" è microscopico).

... e inoltre molto tempo, tenacia (e soldi).

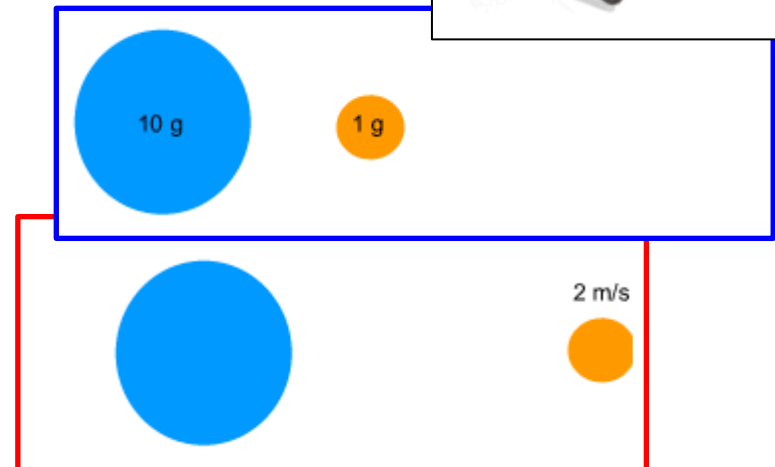
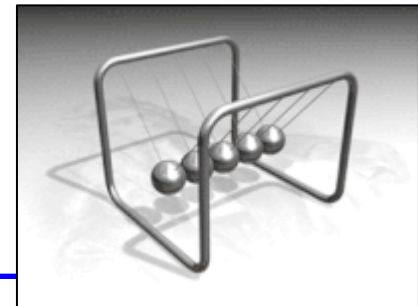




- Per "vedere" la struttura della materia, il metodo migliore (anzi, l'unico metodo) è sondarla con piccole particelle energetiche e studiare il risultato della collisione;
- quindi, seguendo Galileo, bisogna studiare matematicamente le collisioni (aka "urti"), anche se sembra un soggetto molto lontano dai nostri reali obiettivi;
- le prossime slide (quelle con la piccola icona degli attrezzi in alto a destra) elencano alcune formule che ci serviranno nel seguito
- ... e alcune giustificazioni plausibili delle formule stesse;
- esse **NON** sono un manuale di

fisica *ad usum delphini* e non sostituiscono le lezioni che avete seguito o seguirete;

- se avete già seguito un corso di Fisica, potete saltarle
- ... oppure utilizzarle come un (utile ?) ripasso.



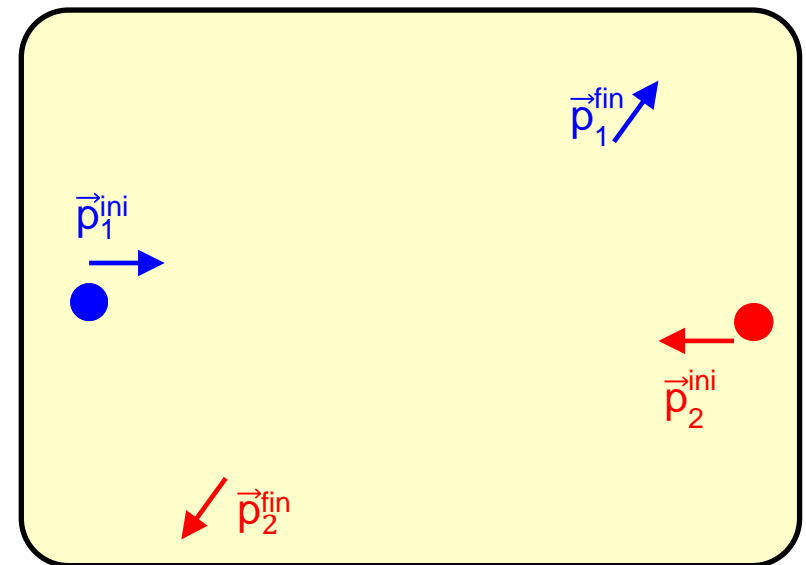


- Dato un corpo che viaggia nello spazio 3D, si definiscono:
 - ❖ m : massa del corpo;
 - ❖ \vec{v} : velocità (modulo, direzione, verso, la " $\vec{}$ " significa questo);
 - ❖ $\vec{p} = m\vec{v}$: "momento" (aka "quantità di moto");
 - ❖ v, p, etc (oppure $|\vec{v}|, |\vec{p}|, \dots$) : moduli di \vec{v}, \vec{p}, \dots ;
 - ❖ $K = \frac{1}{2}mv^2$: "energia cinetica".
- Si definiscono "urti" le collisioni di due corpi *Ab*;
- negli urti NON è indispensabile che i due corpi vengano fisicamente in contatto, come nell'urto di due automobili;

- è sufficiente che, a causa delle forze a distanza tra i due corpi, uno (o entrambi) modifichino la loro traiettoria [vedi figura] *Ab*;

[FINE ANIMAZIONE]

Ab qua e là c'è qualche "semplificazione" eccessiva → chiedere al docente.



La fisica degli urti elastici - b



- Le forze d'urto sono interne al sistema dei due corpi che collidono; ~~fu~~ pertanto, durante l'urto si conserva la quantità di moto totale:

$$\begin{aligned}\vec{p}_1^{\text{ini}} + \vec{p}_2^{\text{ini}} &= m_1 \vec{v}_1^{\text{ini}} + m_2 \vec{v}_2^{\text{ini}} = \\ &= \vec{p}_1^{\text{fin}} + \vec{p}_2^{\text{fin}} = m_1 \vec{v}_1^{\text{fin}} + m_2 \vec{v}_2^{\text{fin}}.\end{aligned}$$

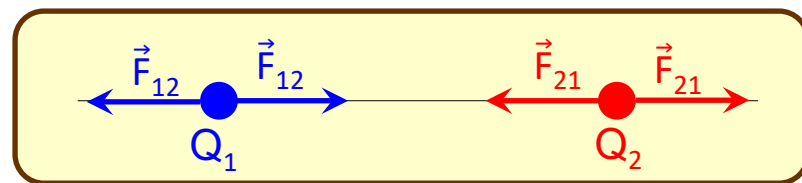
- negli urti elastici l'energia potenziale prima e dopo l'urto è la stessa (forze d'urto nulle fuori della collisione), e quindi l'energia cinetica si conserva:

$$\begin{aligned}K_1^{\text{ini}} + K_2^{\text{ini}} &= \frac{1}{2}m_1(v_1^{\text{ini}})^2 + \frac{1}{2}m_2(v_2^{\text{ini}})^2 = \\ &= K_1^{\text{fin}} + K_2^{\text{fin}} = \frac{1}{2}m_1(v_1^{\text{fin}})^2 + \frac{1}{2}m_2(v_2^{\text{fin}})^2.\end{aligned}$$

- nel seguito (esp. di Rutherford) la forza responsabile dell'urto è quella elettrostatica (cd. *forza di Coulomb*):

$$\vec{F} = \pm \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \hat{r}$$

- " $1/(4\pi\epsilon_0)$ " è un coefficiente costante: lo scriviamo per non sbagliare, ma non è importante per capire;
- " $Q_1 Q_2 / r^2$ " significa che, in ogni istante, la forza è proporzionale alle cariche dei due corpi e inversamente proporzionale alla loro distanza al quadrato;
- " \hat{r} " è un modo simbolico di indicare che la forza va lungo la linea tra le cariche; inoltre \vec{F} è:
 - attrattiva se le cariche sono una positiva e una negativa;
 - repulsiva se sono entrambe positive (il nostro caso) o entrambe negative.



[FINE ANIMAZIONE]

La domanda fondamentale

In ultima analisi, tutto il contenuto di questo seminario + buona parte della fisica del passato, si riassume nella domanda:

Quale è la struttura della materia a livello elementare ?

ovvero

La materia è omogenea e continua oppure granulare e discreta ?

ovvero

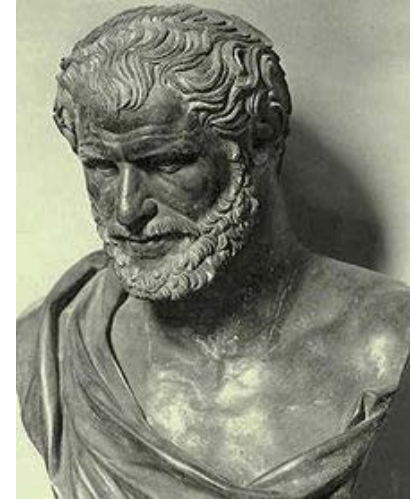
Se ci sono sottostrutture, qual è la struttura delle sottostrutture ? e.g. alcune sono continue e altre discrete (= un sacco di pallini di piombo, ciascuno omogeneo) ? oppure tutte continue ? oppure tutte discrete ?

[in realtà tutte queste domande sono differenti aspetti della stessa questione]

Δημόκριτος è generalmente considerato il campione della teoria discreta (= "atomista"), anche se allora era difficile portare argomenti convincenti a sostegno dell'ipotesi.

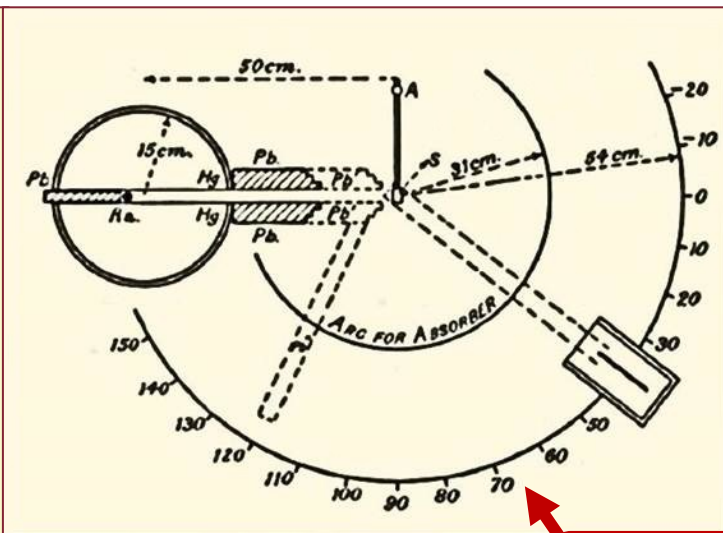
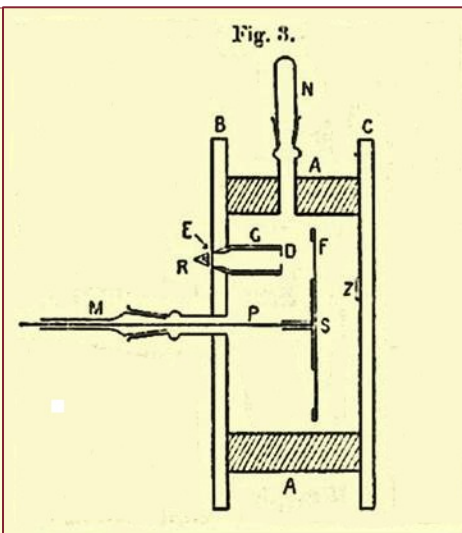
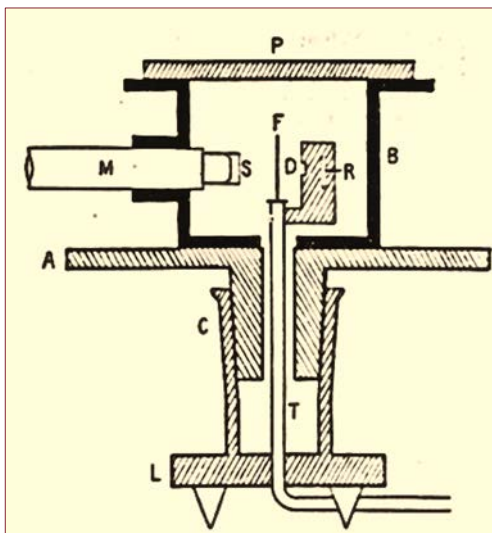
Anche Newton si dichiarò atomista e i chimici (da Dalton a Mendeleev) ovviamente lo erano.

[imho è sbagliato classificare gli scienziati in questo modo. Il contenuto della scienza è nella scoperta e interpretazione dei fenomeni, e non nella verifica di fantomatici principi primi, immutabili nel tempo. Molti scienziati fino al 1900 consideravano la materia continua, forse perché i loro strumenti di calcolo, ex. il calcolo differenziale, si adattavano meglio a questa ipotesi. E i calcoli teorici erano in ottimo accordo con gli esperimenti.]

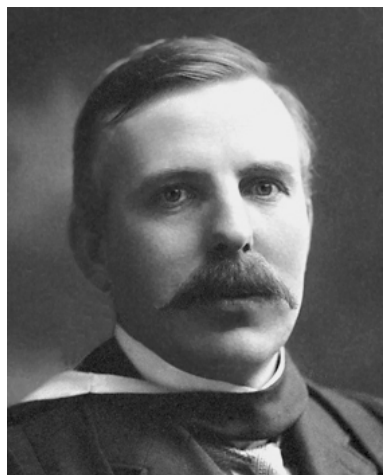


Ma la situazione cambiò alla fine dell'ottocento.

Rutherford 1909-11 : α Au

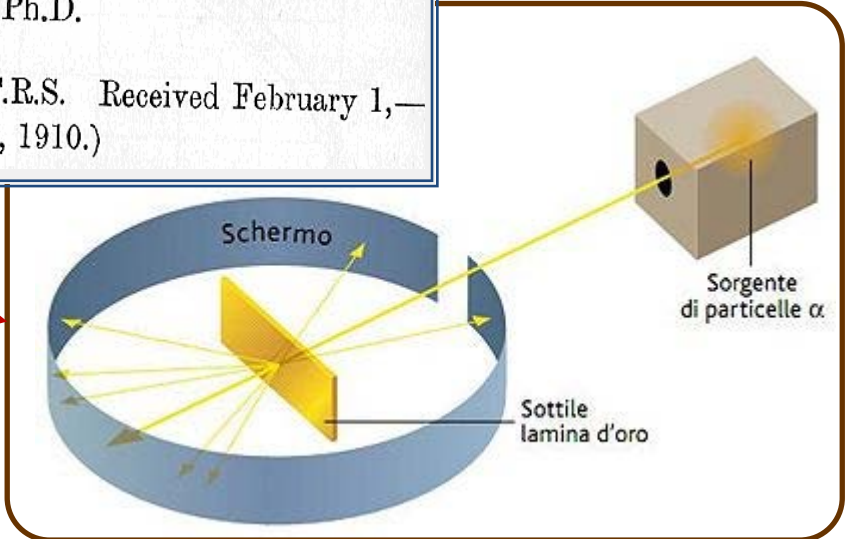


disegni originali



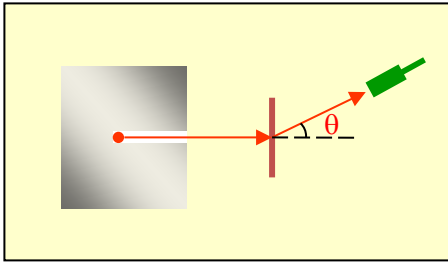
The Scattering of the α -Particles by Matter.
 By H. GEIGER, Ph.D.
 (Communicated by Prof. E. Rutherford, F.R.S. Received February 1,—
 Read February 17, 1910.)

schema moderno

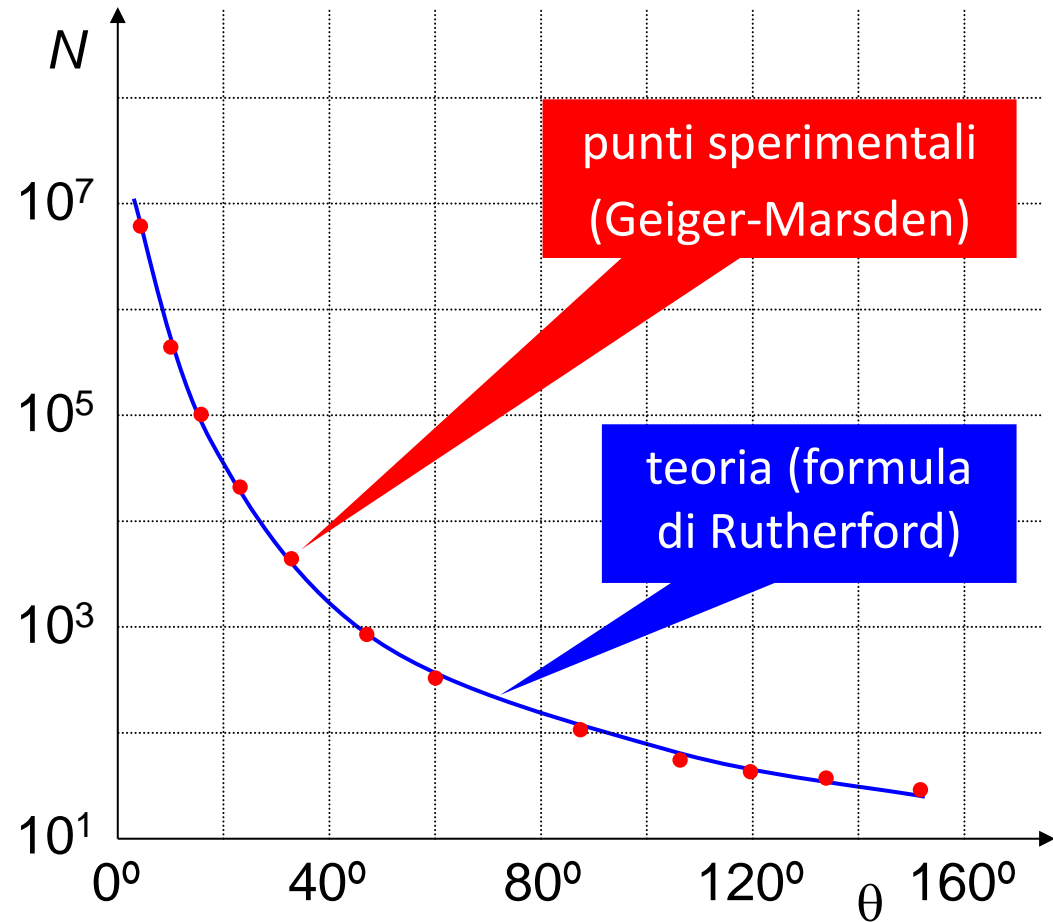
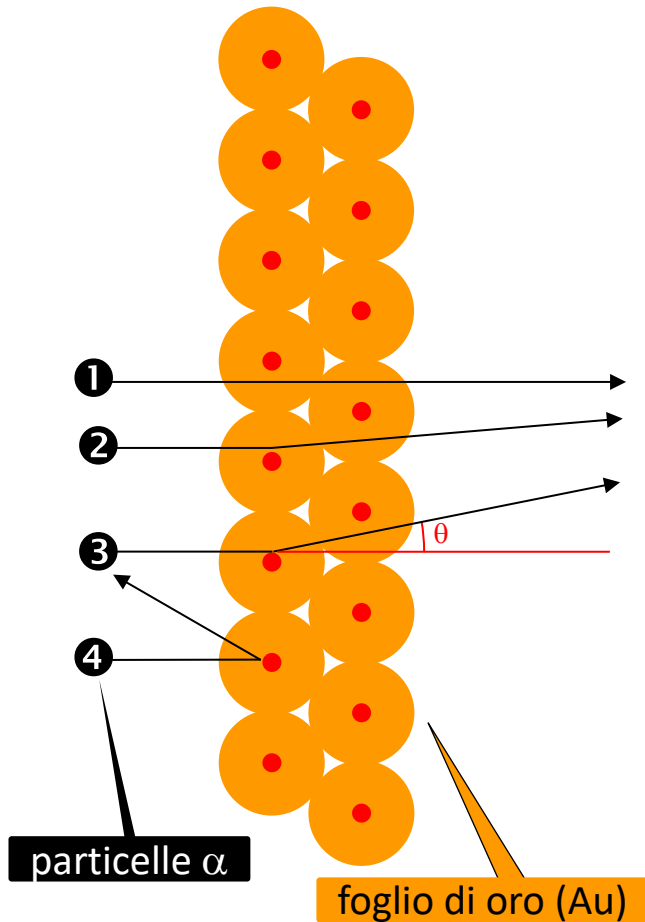


simulazione
https://phet.colorado.edu/sims/html/rutherford-scattering/latest/rutherford-scattering_it.html

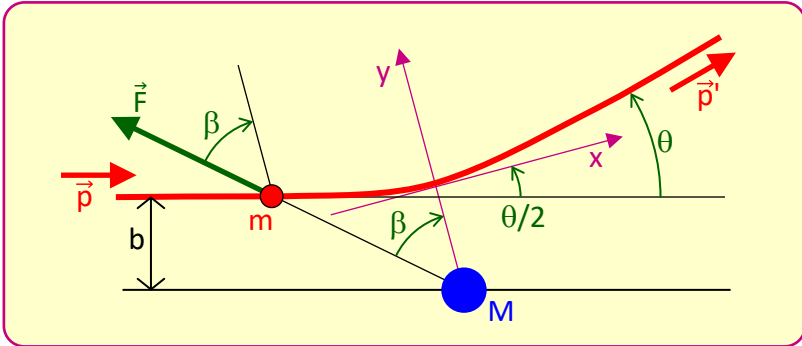
risultati dell'esperimento di Rutherford



→ la scoperta del nucleo atomico



calcolo della traiettoria - 1



- α (m, z) \rightarrow nucleus (M, Z):
- $\vec{v}_{\alpha, \text{init}} = \vec{v}$, $\vec{v}_{\alpha, \text{final}} = \vec{v}'$, $\vec{v}_{\text{nucleus}} = 0$;
- $\vec{p} = m\vec{v}$, $\vec{p}' = m\vec{v}'$, $m \ll M$;
- Coulomb force only (\vec{F});
- $v \ll c \rightarrow$ non-relativistic;
- elastic $\rightarrow |\vec{p}'| = |\vec{p}|$;
- conserve E, ang. mom \vec{L} ;
- $\Delta p_x = 0$ because of symmetry, only Δp_y matters;
- integral over β , the angle wrt \hat{y} ;
- if attractive force (e.g. $+ -$), $M \rightarrow$ the other focus of the hyperbola.

$$\Delta p = |\vec{p}' - \vec{p}| = 2p \sin(\theta/2);$$

$$|\vec{L}| = pb = |\vec{r} \times m\vec{v}| = |\vec{r} \times m(\frac{dr}{dt}\hat{r} + r\frac{d\beta}{dt}\hat{\beta})| = mr^2 \frac{d\beta}{dt};$$

$$\begin{aligned} \Delta p_y &= 2p \sin(\theta/2) = \int_{-\infty}^{+\infty} dt F_y = \int_{-\infty}^{+\infty} dt \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\cos\beta}{r(t)^2} = \\ &= \int_{-(\pi-\theta)/2}^{(\pi-\theta)/2} \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\cos\beta}{\chi^2} \frac{m\chi^2}{pb} d\beta = \frac{zZe^2}{2\pi\epsilon_0} \frac{m}{pb} \cos(\theta/2); \end{aligned}$$

$$\tan(\theta/2) = \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{m}{p^2 b} \rightarrow db = -\frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{m}{p^2} \frac{d\theta}{2\sin^2(\theta/2)}.$$

$$d\sigma = 2\pi b db = 2\pi \left(\frac{zZe^2 m}{4\pi\epsilon_0 p^2} \right)^2 \frac{d\theta}{2 \tan(\theta/2) \sin^2(\theta/2)};$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{zZe^2 m}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{4p^4 \sin^4(\theta/2)} = \left(\frac{zZe^2 m}{2\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{|\vec{p}' - \vec{p}|^4}.$$

$$d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta = 4\pi \sin(\theta/2) \cos(\theta/2)$$

calcolo della traiettoria - 2

corso
università

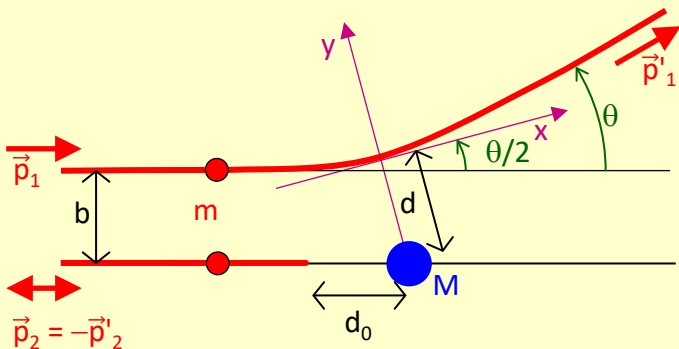
Useful formulas

$$d_0 = r_{\min}(b=0) = \frac{zZe^2}{2\pi\epsilon_0 m v^2};$$

$$\frac{\theta}{2} = \tan^{-1} \left[\frac{d_0}{2b} \right];$$

$$d = r_{\min}(b) = \frac{d_0 + \sqrt{d_0^2 + 4b^2}}{2} = \frac{d_0}{2} \left(1 + \frac{1}{\sin(\theta/2)} \right);$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d_0^2}{16\sin^4(\theta/2)} \xrightarrow{\theta \rightarrow 0} \frac{d_0^2}{\theta^4}.$$



- [if force attractive (e.g. $+ -$), $\vec{F} \rightarrow -\vec{F}$, then $\theta \rightarrow -\theta$, but everything else equal, e.g. same $d\sigma/d\Omega$];
- consider a particle \vec{p}_2 with $b=0 \rightarrow \theta_2 = 180^\circ$;
- define d_0 = "distance of closest approach" the min r for it (when $r=d_0$, the particle is at rest);
- d_0 is easily computed from energy conservation;
- define d_0 also for particles $b \neq 0$ as r_{\min} for a particle with the same momentum and $b=0$;
- redefine θ and $d\sigma/d\Omega$ as a function of d_0 [*not necessary, but useful*];
- define d as r_{\min} , also for $b \neq 0$;
- d is computed from E and \vec{L} conservation [*hint in the box, v_0 is the velocity in d*]:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{L} \text{ conserv} \rightarrow mbv = mdv_0 \\ E \text{ conserv} \rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_0^2 + \frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0 d} \end{array} \right\} \rightarrow$$

$$\rightarrow \left(\frac{v_0}{v} \right)^2 = \left(\frac{b}{d} \right)^2 = 1 - \frac{d_0}{d} \rightarrow \dots$$

calcolo della traiettoria - 3

Non dimostro tutte le formule citate [non è impossibile, ma mi servirebbe un sacco di tempo e non sarebbe divertente]. Mi limito alla prima formula (r_{min}), che è anche la più facile.

- consideriamo una particella α (vedi figura), la cui traiettoria sia diretta esattamente verso il centro del nucleo (cd "urto centrale");
- i parametri della α sono (massa m , carica ze);
- quelli del nucleo di Au sono (M , Ze);
- il nucleo è molto più massivo della α , quindi resta immobile (cfr una palla contro un'automobile);
- tutto (forze, traiettorie), si svolge lungo l'asse orizzontale, quindi non useremo " \rightarrow ";
- a grande distanza dal nucleo [r_{ini}], dove la forza di Coulomb è trascurabile, la α ha velocità v_{ini} , energia cinetica $K_{ini} = \frac{1}{2}mv_{ini}^2$ e energia potenziale $v_{ini} = 0$.
- **vedi animazione** la α rallenta, fino a un punto a r_{min} dal nucleo, poi torna indietro.

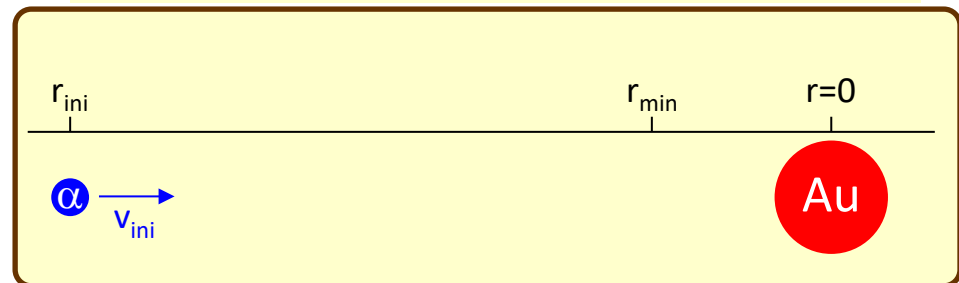
- nel punto di massimo avvicinamento $v_{min} = 0$, $K_{min} = \frac{1}{2}mv_{min}^2 = 0$, $V_{r=r_{min}} =$ (vedi);
- si conserva l'energia e si ricavano r_{min} e v_{fin} ;
- r_{min} aumenta all'aumentare delle cariche elettriche (più forza) e diminuisce all'aumentare di v_{ini} (più penetrazione);
- $v_{fin} = v_{ini}$, cambiata di segno.

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_\alpha Q_{Au}}{r} \quad \rightarrow \quad V_{r=r_{min}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{zZe^2}{r_{min}};$$

$$V_{ini} + K_{ini} = V_{r=r_{min}} + K_{min} = V_{fin} + K_{fin} =$$

$$= 0 + \frac{1}{2}mv_{ini}^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{zZe^2}{r_{min}} + 0 = 0 + \frac{1}{2}mv_{fin}^2;$$

$$r_{min} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{zZe^2}{mv_{ini}^2}; \quad |v_{fin}| = |v_{ini}|.$$



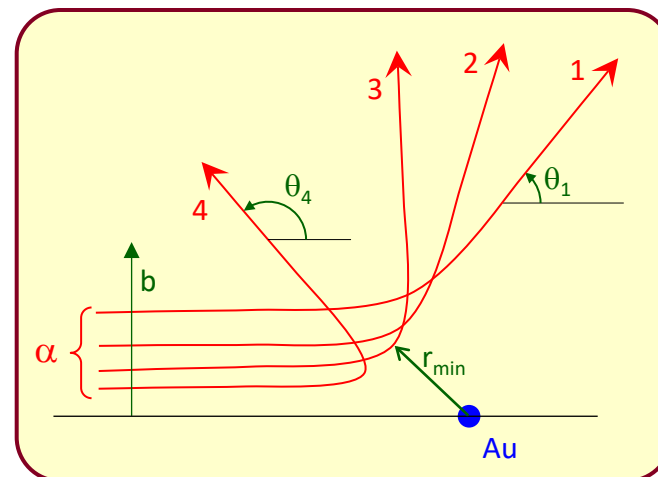
la scoperta del nucleo atomico

In sintesi, i risultati dell'esperimento di Rutherford:

- particelle α (cioè He^{++}) \rightarrow foglio Au;
- $K_{\alpha} [= \frac{1}{2}m_{\alpha}v_{\alpha}^2] =$ qualche MeV;
- se materia soffice $\rightarrow \theta > 90^{\circ}$ impossibile; in realtà raro (Ruth.: "1/8000"), ma non impossibile;
- spiegazione: la "materia" è concentrata in piccoli corpuscoli pesanti (R. li chiamò "nuclei");
- la "materia" è quasi tutta vuota;
- notare il ruolo strumentale della forza di Coulomb; all'epoca le forze nucleari non erano note; perciò Ruth. utilizzò particelle cariche e scrisse la formula di un urto con la forza di C. (e andò bene);
- altro punto chiave: le particelle α di Ruth. non avevano sufficiente energia

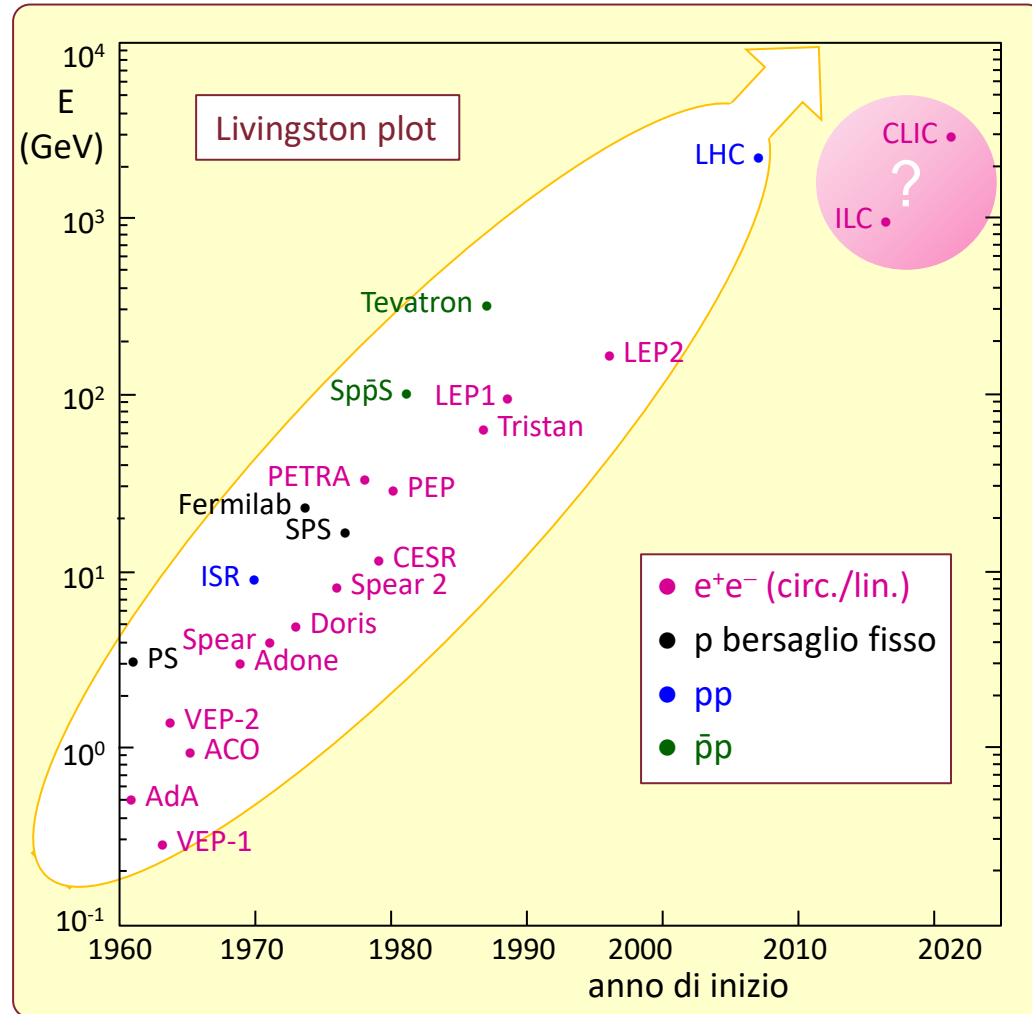
per penetrare all'interno del nucleo e quindi misurarne le dimensioni;

- l'esperimento di R. è molto importante, sia in sé, sia nel contesto storico:
 - la natura è una successione di strutture (molecole, atomi, ...), ciascuna qualitativamente diversa;
 - (forse) questa successione è infinita;
 - le collisioni sonda-materia sono il "giusto" metodo di indagine.



multi anni dopo ...

- Dopo il 1950 sono entrati in funzione acceleratori di energia più alta [vedi "Livingston plot", qui mostrato tra il 1960 e oggi];
- guadagno di un fattore 10 ogni 10 anni [*ritmo difficile da mantenere*];
- il primo effetto è stato "vedere" le dimensioni del nucleo e romperlo, rivelando protoni (p) e neutroni (n) come componenti;
- ... e la storia si è ancora ripetuta dopo il 1970, rivelando i quark all'interno di p e n;
- ma dopo il 1980 i nuovi esperimenti non hanno mostrato nessuna nuova sub-struttura;
- il limite attuale è ~ 1 TeV ($\sim 10^{-19}$ m);
- sorprese in vista ?



ricapitoliamo ... (2)

- Le "particelle elementari" (???) sono piccole, $\leq 10^{-15}$ m;
- per "vederle", serve luce di lunghezza d'onda ancora minore, e processi adeguati;
- la meccanica quantistica ci dice che invece di onde luminose, si possono usare altre particelle,
- facendole urtare contro la materia, e misurando le collisioni.

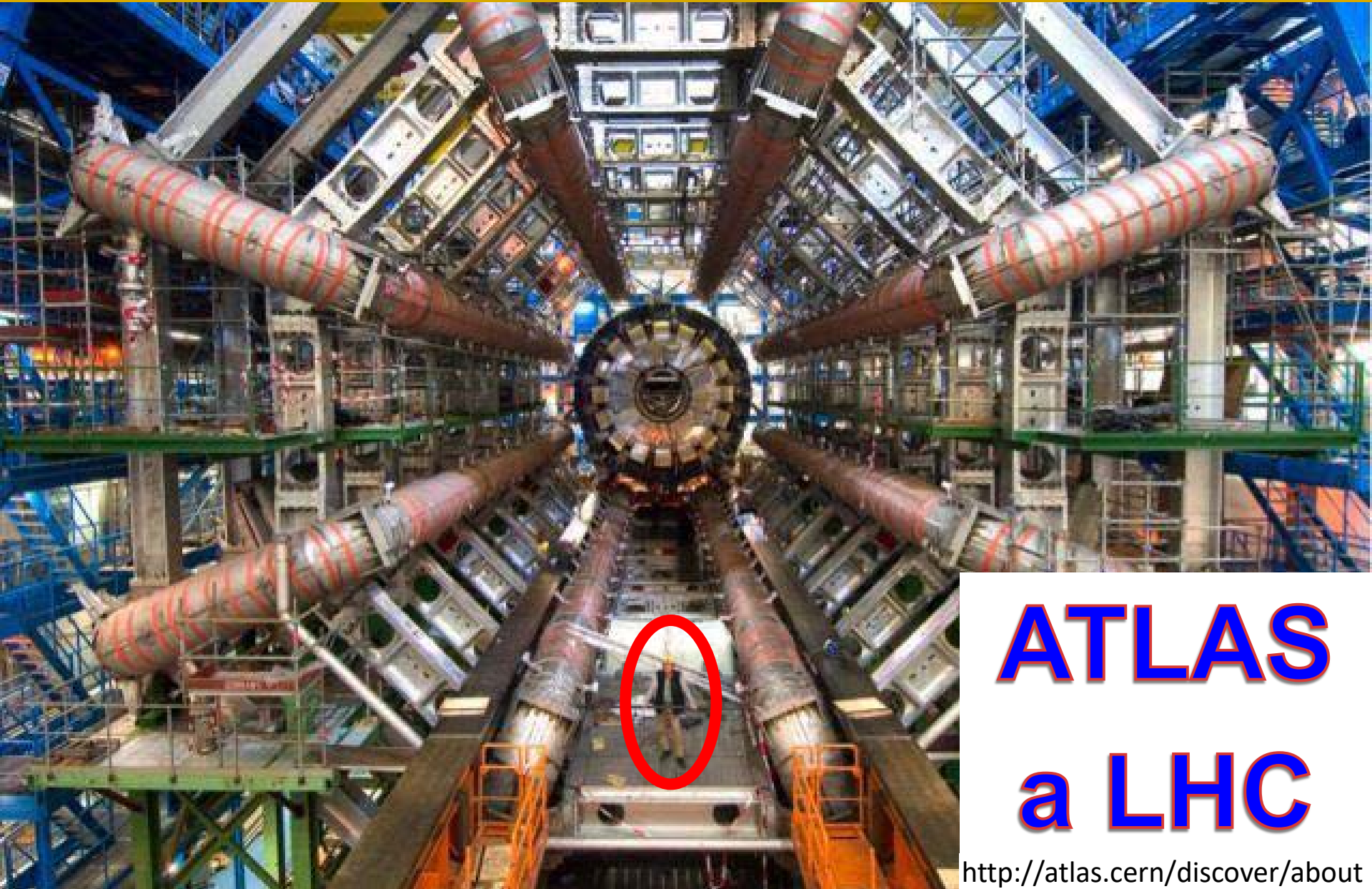
Ma questo richiede strumenti eccezionali:

- acceleratori grandi molti km, per creare particelle di alta energia,
- (meglio, collisori per aumentare l'energia degli scontri,)

- esperimenti grandi decine di metri, per rivelare le collisioni,
- qualcuno che faccia (bene) l'analisi e i calcoli
- ... e quindi tanto tempo, energia, persone (e purtroppo tanti soldi).



un "tipico" esperimento di particelle



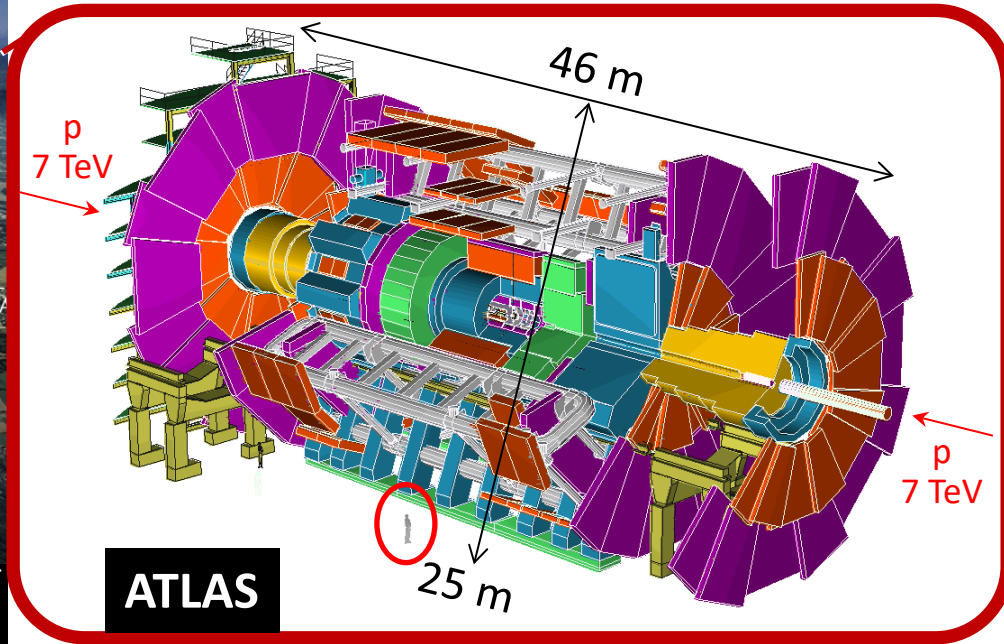
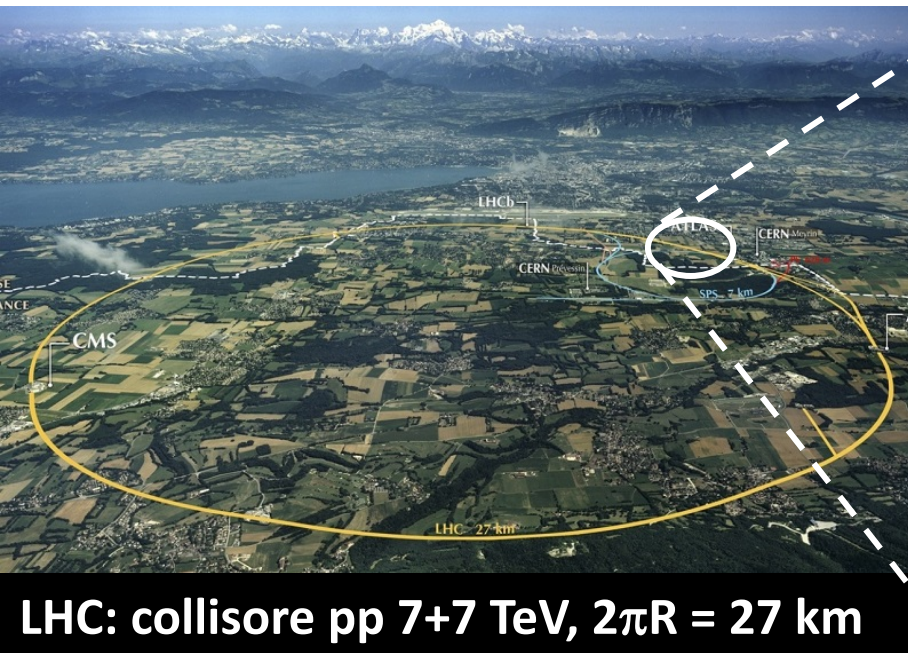
ATLAS
a LHC

<http://atlas.cern/discover/about>

ATLAS

- LHC al CERN : anello di 27 km, pp a $(7 + 7) \times 10^{12}$ eV [= 14 TeV];
- ATLAS : il più grande rivelatore esistente: 46 × 25 m, 7000 t, 10^8 sensori indipendenti;

- > 3000 fisici (tra cui **1200 studenti**) da 182 università di 38 nazioni;
- > 30 dei quali dalla Sapienza (sono stato il responsabile del gruppo);
- altri esperimenti (CMS, ALICE, LHCb).



presa dati

Ricerca di processi rari, ex. Higgs:

- 4×10^7 collisioni/secondo tra due pacchetti di 10^{11} protoni;
- circa 20 eventi / collisione;
- quasi 10^9 eventi/secondo (*se fossero registrati tutti, 10^5 CD/secondo*);
- analisi veloce ("trigger") per cercare caratteristiche interessanti (*=analisi di 10^{10} telefonate contemporanee*);
- 200 eventi/secondo registrati su supporto permanente (disk) (=27 CD /minuto);
- analisi conclusiva del campione finale degli eventi selezionati, confronti con la teoria.

Conclusione :

- 1 Higgs / 10^{13} eventi (= 1 / 3 h);
- frequenze simili per altri processi rari (ex. ricerca di supersimmetrie).

40 eventi/c
nel 2018



Gli studenti (e i professori) in genere lavorano su questi aspetti, e nella realizzazione dei rivelatori.



Non ne parliamo qui, ma riflettete sulle possibili ricadute tecnologiche

risultati (ad oggi) – bosoni e fermioni

Dopo quasi 100 anni di esperimenti, abbiamo il **Modello Standard**^(*):

- due tipi di particelle: fermioni e bosoni;
- i fermioni (= la materia) obbediscono alla statistica di Fermi-Dirac e al principio di Pauli⁽¹⁾;
- i bosoni (= le forze) obbediscono alla statistica di Bose-Einstein;
- in più, il misterioso "bosone di Higgs", che conferisce la massa a tutte le altre particelle.

(*) I più saggi tra noi sospettano che, a più alta energia (quando distanze più piccole saranno rivelabili) scopriremo altre strutture e altre forze: non è sicuro, ma è già successo tutte le altre volte.

Nella figura manca il "gravitone", il bosone delle forze gravitazionali, non ancora scoperto (né incorporato nella teoria).

u	c	t	γ
d	s	b	g
ν_e	ν_μ	ν_τ	Z
e	μ	τ	W^\pm
			H

⁽¹⁾Principio di Pauli (Wikipedia) :
"due fermioni identici non occupano simultaneamente lo stesso stato quantico".

i fermioni

Quark (u d c s t b) :

- costituiscono protoni (p) e neutroni (n), e quindi i nuclei;
- NON possono esistere liberi, ma solo all'interno di p e n .
- sentono tutte le forze: "forti", "deboli", "elettromagnetiche", "gravitazionali";
- ciascun quark può esistere in tre stati identici, detti "colori";

Leptoni ($e^- \mu^- \tau^- \nu_e \nu_\mu \nu_\tau$) :

- esistono liberi, ex. all'esterno dei nuclei;
- solo forze deboli, e.m., gravit.;
- niente colore.

Quark e leptoni:

- possiedono antiparticelle ($\bar{u} \bar{d} \bar{c} \bar{s} \bar{t} \bar{b} e^+ \mu^+ \tau^+ \bar{\nu}_e \bar{\nu}_\mu \bar{\nu}_\tau$);
- tre "famiglie" (f.1, f.2, f.3);
- possono avere carica elettrica.

f.1	f.2	f.3	carica (unità e)	colore
u 0.002	c 1.3	t 173	$\frac{2}{3}$	× 3
d 0.005	s 0.1	b 4.2	$-\frac{1}{3}$	
e 0.000511	μ^- 0.106	τ^- 1.777	-1	no (× 1)
ν_e 0.002 ?	ν_μ < 0.0002 ?	ν_τ < 0.02 ?	0	

Masse in GeV. Le m. dei quark sono "maldefinite" e quelle dei neutrini sono misurate con difficoltà.

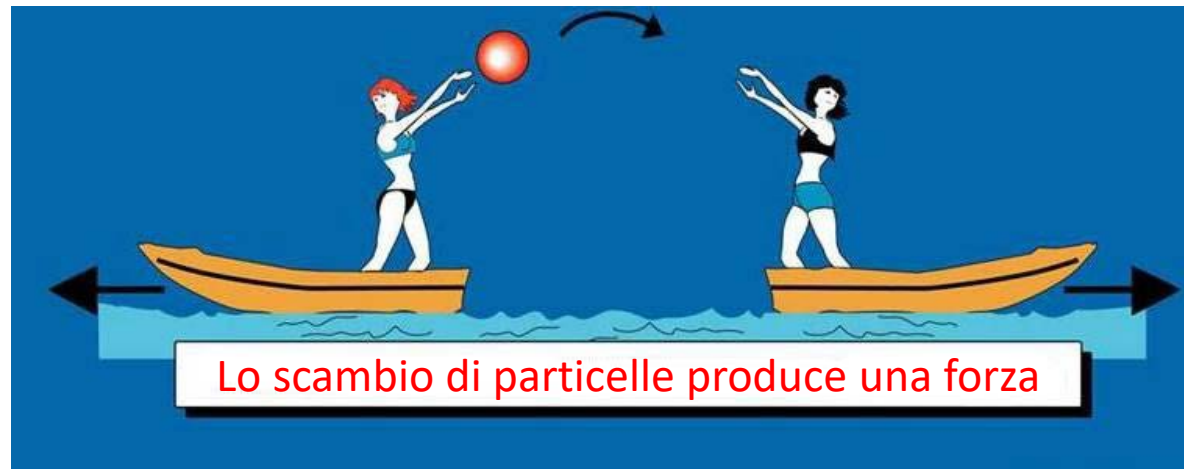
i bosoni

In fisica moderna, una "forza" (un'interazione) corrisponde allo "scambio" di un mediatore:

- **elettromagnetismo**: onde e.m. → **fotoni**;
- **interazioni deboli**: bosoni W^\pm , Z ;
- **interazioni forti**: "gluoni" (8 bosoni dotati di colore);
- **gravitazione**⁽¹⁾ : onde gravitazionali → "gravitone".

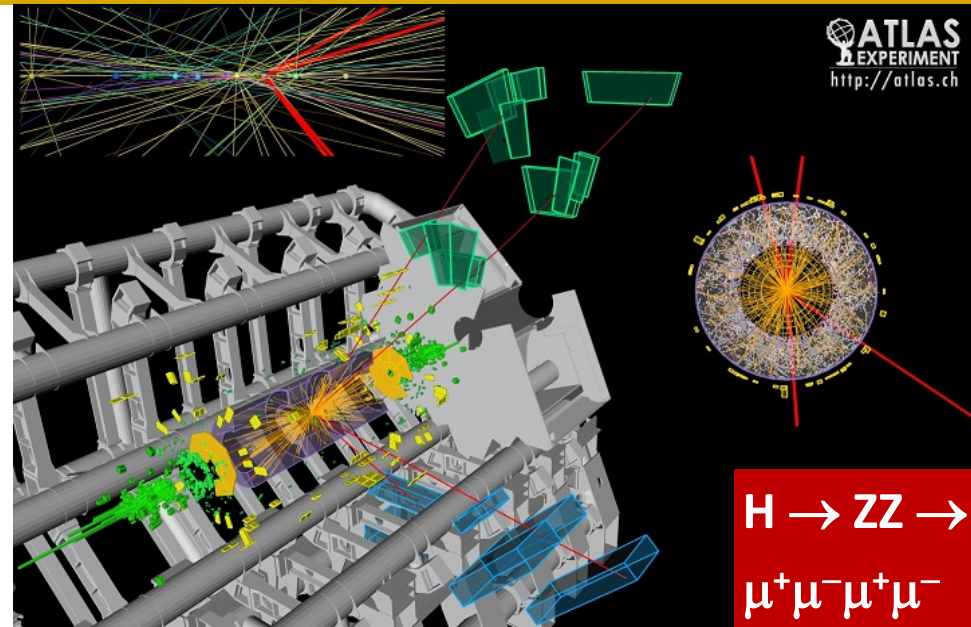
forza	media-tore	N.	massa (GeV)	carica
elettromagnetismo	fotone (γ)	1	0	0
interazioni deboli	W^\pm	2	80.379	± 1
	Z	1	91.1876	0
interazioni forti	gluoni (g)	8	0	0
gravitazione (???)				

⁽¹⁾ Abbiamo recentemente scoperto le onde gravitazionali, però non siamo (ancora) riusciti a fare una teoria sensata dei gravitoni, cioè a "fondere" relatività e meccanica quantistica.



il bosone di Higgs

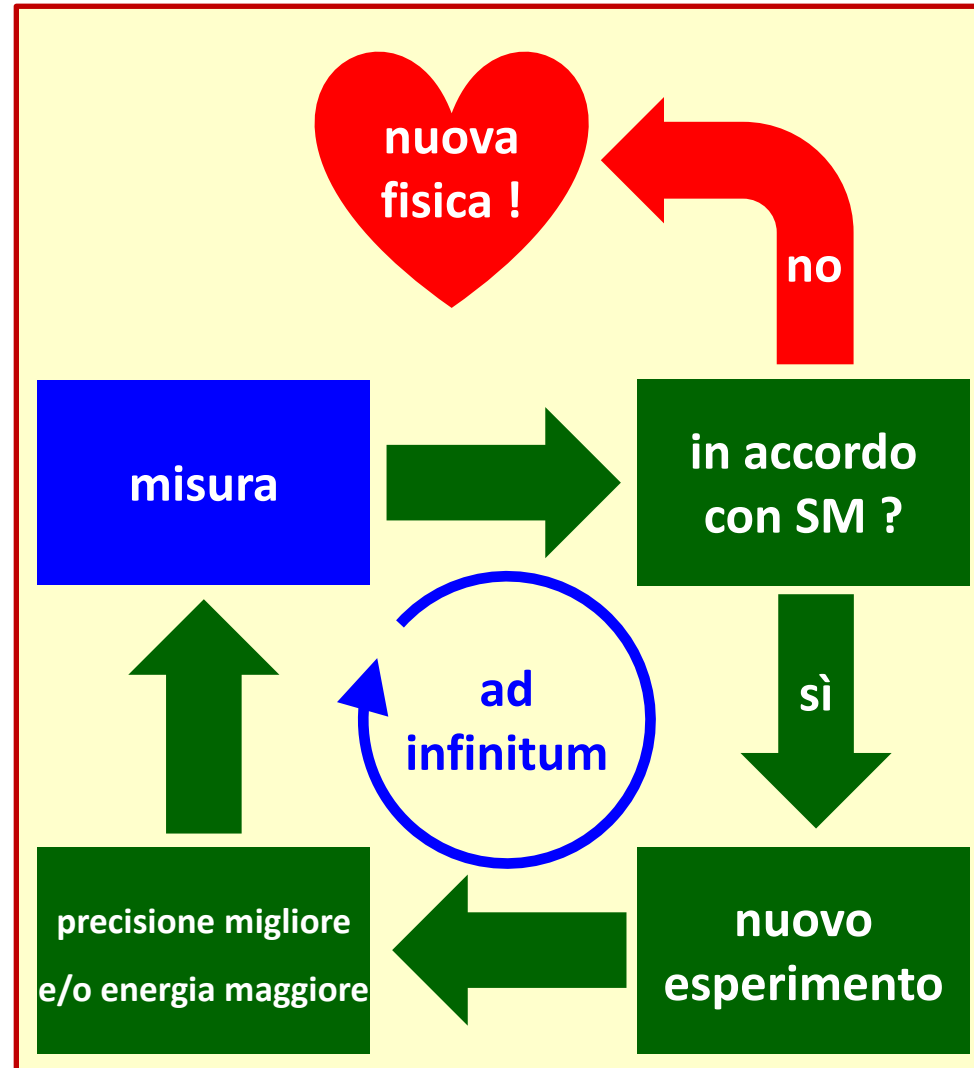
- L'ultimo arrivato, sia nella teoria, sia nella scoperta;
- introdotto 50 anni fa da P.Higgs e altri, richiesto dalla teoria;
- scoperto nel 2012, $m=125$ GeV, carica=0.
- forza dipende dalla massa [un modo snob di definire la massa: *la m . di una particella è il suo coefficiente di accoppiamento con il bosone di Higgs*];
- *il brutto anatroccolo della teoria (o il Sacro Graal, dipende dal punto di vista).*



le domande "facili"

[cioè i problemi esistenti che ancora non sappiamo risolvere]

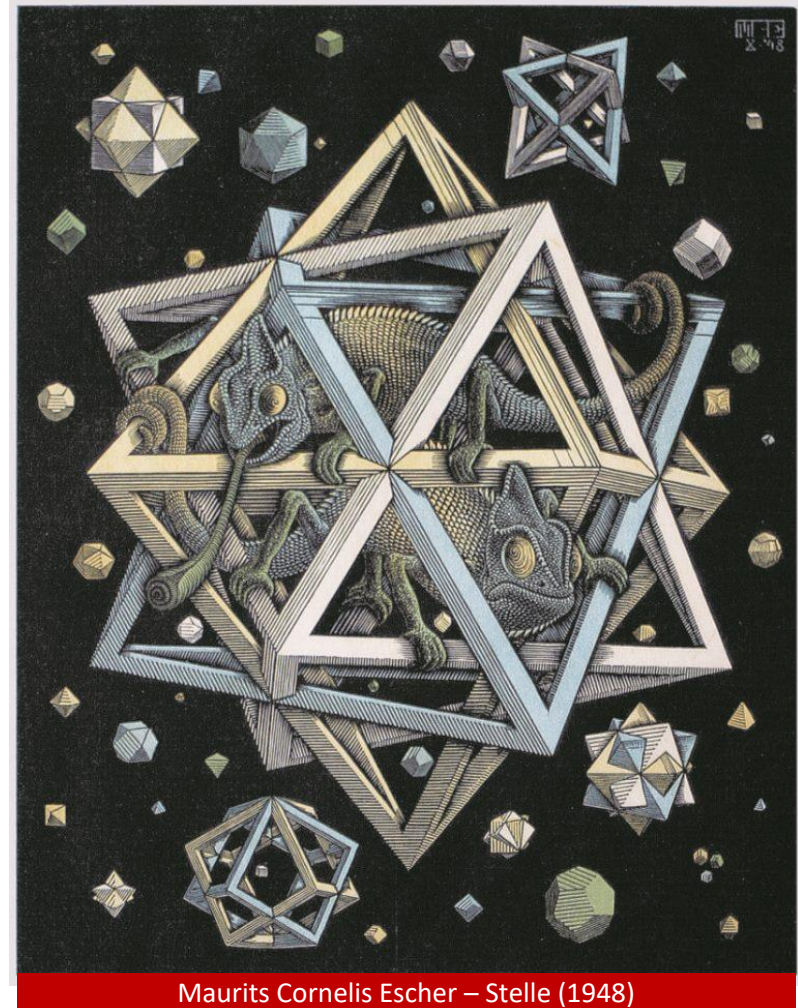
- incorporare la gravitazione nel Modello Standard (SM);
- capire la "materia oscura" (*effetti gravitazionali, che implicano l'esistenza di materia ed energia non rivelata*);
- misurare il settore dei neutrini (*non lo discuto in questo seminario, ma è affascinante*);
- e molte altre misure, in cui una discrepanza rispetto alle previsioni SM, indicherebbe nuova fisica (*insistere con le misure, vedi box*).



... e la domanda "impossibile"

Il futuro ci riserva nuove scoperte inattese (cioè "sorprese") ? quali ?

- non si possono prevedere le sorprese [direbbe La Palice], ma ragioniamo per similitudini storiche [non è una certezza, ma un metodo euristico, talvolta funziona];
- nel passato, quando la ricerca ha migliorato la **risoluzione spaziale** del "microscopio" (mediante l'**energia** delle sonde, ricordate il **dualismo onda-particella**) ...
- ... e prodotto **nuovi rivelatori** di qualità,
- la coppia energia/rivelatori ha generato nuove **scoperte** e nuove **idee**: i microbi ... le molecole ... i nuclei, gli elettroni, i quark;
- e poi ? la fine del viaggio non c'è mai ! e questo è il bello !!!



Maurits Cornelis Escher – Stelle (1948)



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

The End

**Grazie per l'attenzione,
spero di avervi interessato.**

P B