

La diffusione di elettroni: un microscopio sul mondo dei quark

Andrea Celentano

*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Genova*

20 Febbraio 2019

L'universo e la materia

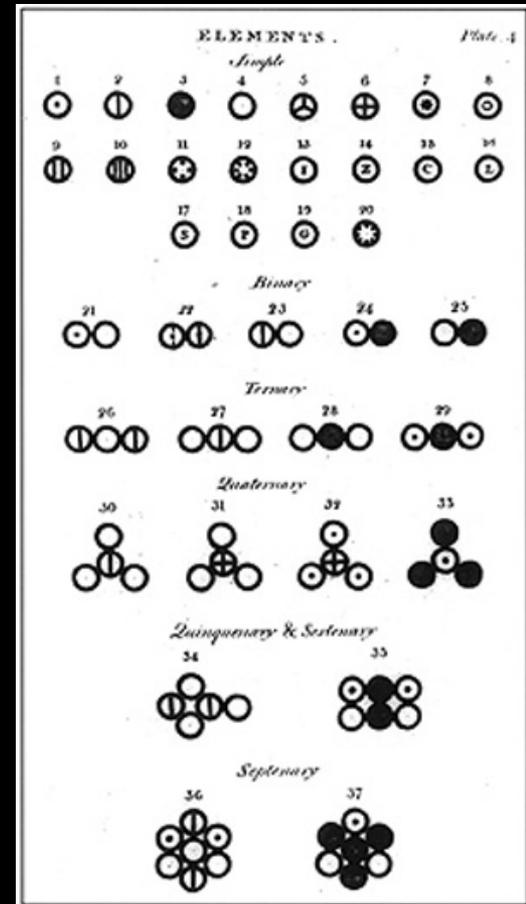
- Comprendere la struttura della materia che ci circonda è uno dei traguardi della scienza moderna
- Già nell'antichità, l'uomo ipotizzò che la complessità e la diversità dell'universo potesse nascondere una struttura *semplice* e che la materia potesse essere composta da pochi *costituenti elementari*
 - I fenomeni naturali furono spiegati in termini di *elementi classici* : la terra, il fuoco, l'acqua e l'aria
 - Filosofi indiani e greci ipotizzarono che la materia non avesse una struttura continua, ma che fosse costituita da particelle microscopiche e indivisibili, chiamate *atomi*

Più di 2000 sono stati necessari per dimostrare scientificamente che questi concetti filosofici avevano un riscontro nella realtà ...

L'atomo

La nostra attuale conoscenza della struttura dell'atomo è frutto del lavoro di molti scienziati e delle loro scoperte

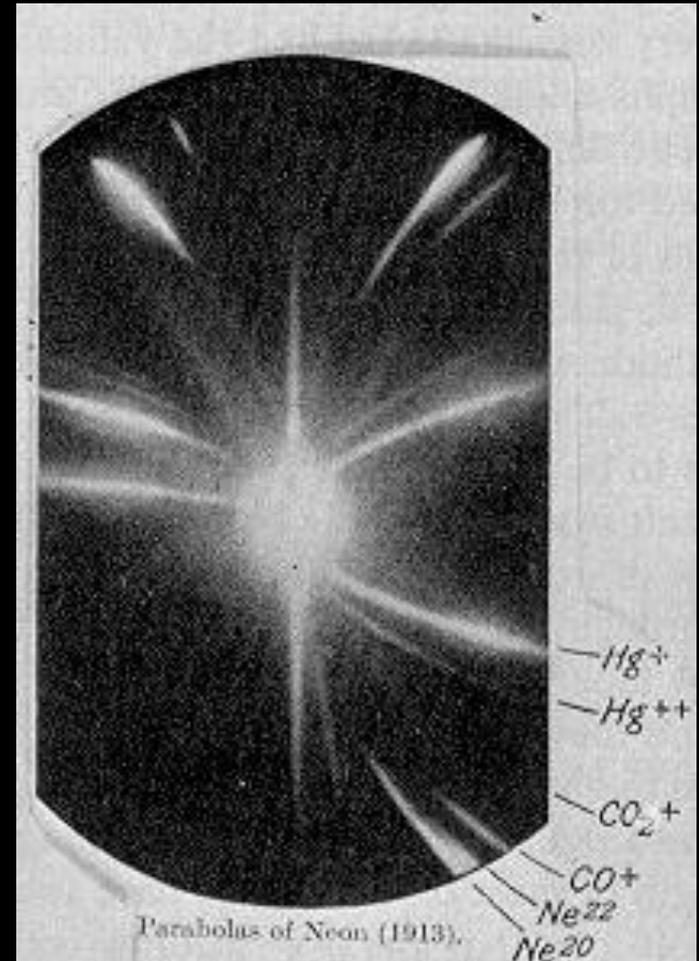
- Nel 1803 J. Dalton postulò l'esistenza degli elementi chimici (gli atomi!!) per spiegare la varietà dei composti noti



L'atomo

La nostra attuale conoscenza della struttura dell'atomo è frutto del lavoro di molti scienziati e delle loro scoperte

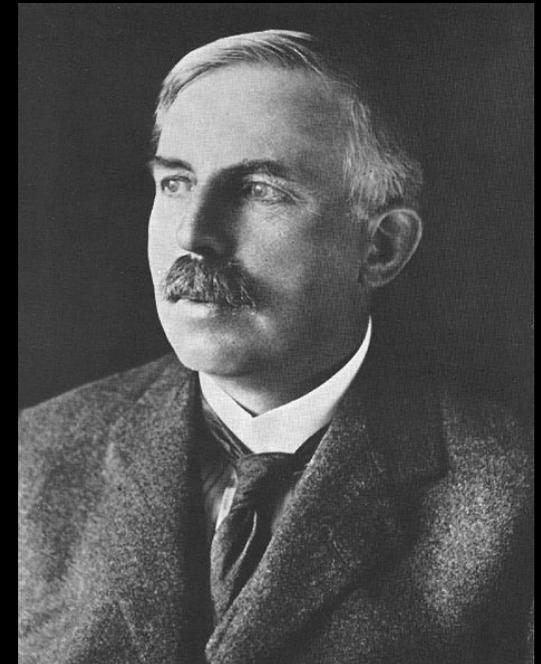
- Nel 1803 J. Dalton postulò l'esistenza degli elementi chimici (gli atomi!!) per spiegare la varietà dei composti noti
- Nel 1867 JJ. Thomson, con i suoi studi sui raggi catodici e la scoperta dell'elettrone, distrusse il concetto di atomo come particella indivisibile



L'atomo

La nostra attuale conoscenza della struttura dell'atomo è frutto del lavoro di molti scienziati e delle loro scoperte

- Nel 1803 J. Dalton postulò l'esistenza degli elementi chimici (gli atomi!!) per spiegare la varietà dei composti noti
- Nel 1867 JJ. Thomson, con i suoi studi sui raggi catodici e la scoperta dell'elettrone, distrusse il concetto di atomo come particella indivisibile
- L'esperimento di E. Rutherford e lo sviluppo della meccanica quantistica portarono ai modelli atomici moderni



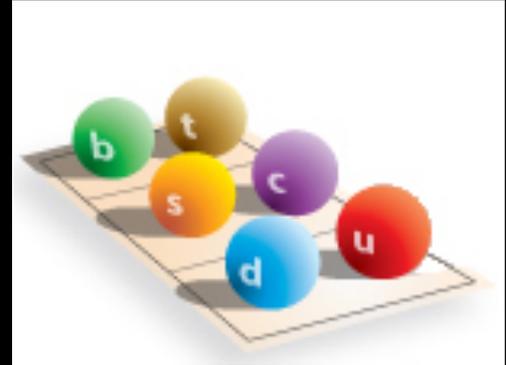
I quark e i gluoni

Oggi sappiamo che anche i protoni e neutroni che compongono il nucleo atomico non sono particelle indivisibili ma hanno una struttura interna ...

... sono infatti formati da quark e gluoni

I quark

- I quark sono particelle elementari, cioè indivisibili, ed esistono in 6 diversi tipi, chiamati *sapori*
- Hanno carica elettrica e un nuovo tipo di carica chiamata *colore* (R,G,B)



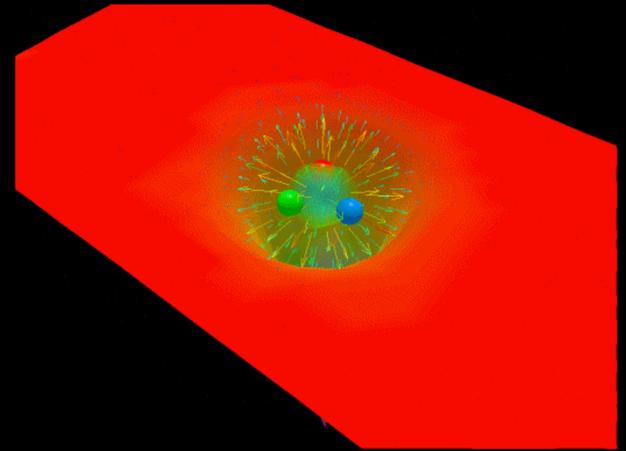
6 sapori:
*up, down, strange,
charm, bottom, top*

Carica elettrica:
 $\pm 1/3, \pm 2/3$

Carica di Colore:
R, G, B

I quark e i gluoni

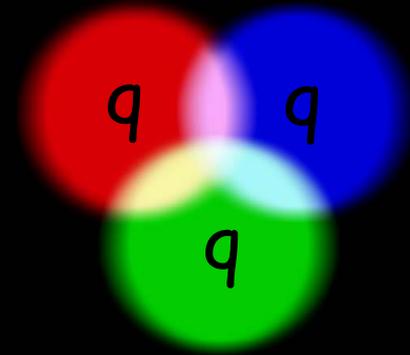
- I quark sono particelle elementari, cioè indivisibili, ed esistono in 6 diversi tipi, chiamati *sapori*
- Hanno carica elettrica e un nuovo tipo di carica chiamata *colore* (R,G,B)
- I quark interagiscono tramite la *forza nucleare forte*, che si manifesta attraverso lo scambio di vettori della forza chiamati *gluoni*
- Non sono mai stati osservati dei quark *liberi*



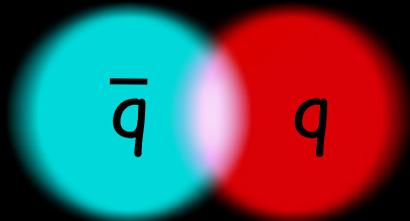
I quark e i gluoni

- I quark sono particelle elementari, cioè indivisibili, ed esistono in 6 diversi tipi, chiamati *sapori*
- Hanno carica elettrica e un nuovo tipo di carica chiamata *colore* (R,G,B)
- I quark interagiscono tramite la *forza nucleare forte*, che si manifesta attraverso lo scambio di vettori della forza chiamati *gluoni*
- Non sono mai stati osservati dei quark *liberi*
- I quark si uniscono formando oggetti "bianchi" chiamati *adroni*: le configurazioni note sono i *barioni* (3q) e i *mesoni* (q \bar{q})

barioni



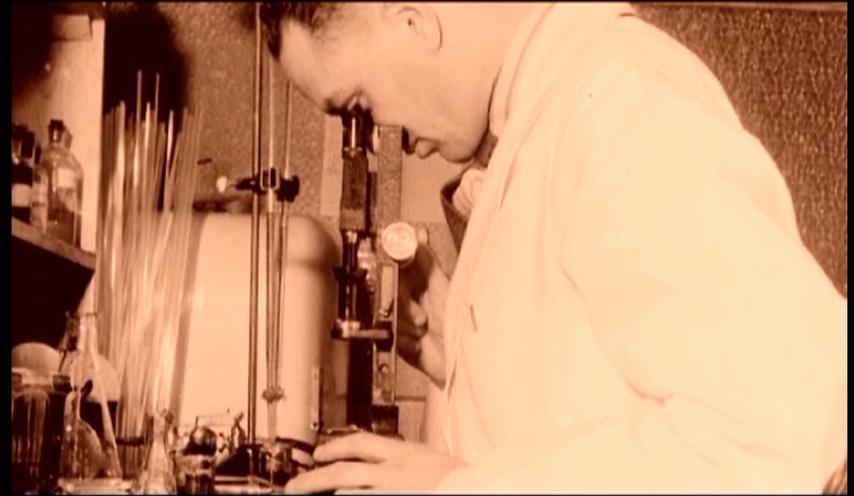
mesoni



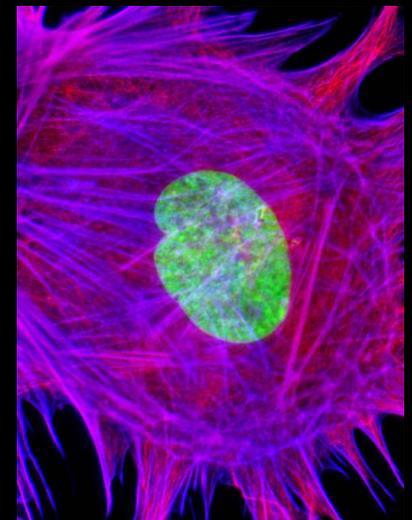
**Con quali strumenti si possono
“vedere” i quark e studiare le
loro proprietà?**

Il microscopio

Nel passato gli scienziati cercarono di studiare oggetti microscopici, invisibili all'occhio umano, utilizzando prima lenti di ingrandimento e poi strumenti sempre più sofisticati



Il microscopio ottico permise di scoprire l'esistenza di organismi microscopici e di studiare il tessuto organico



Il microscopio



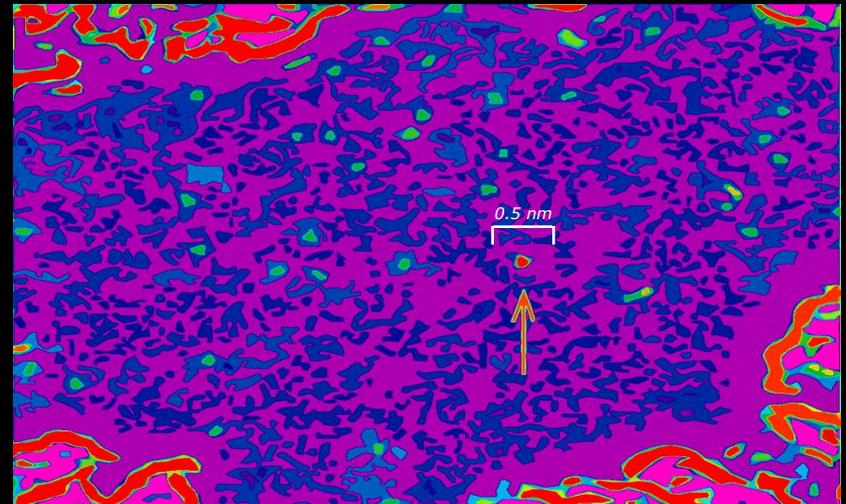
- i **fotoni** sono la **sonda** che ci permette di studiare l'oggetto che guardiamo
- il nostro **occhio** è il **rivelatore**
- il nostro **cervello** è il **calcolatore** che raccoglie le informazioni e le elabora

Il microscopio

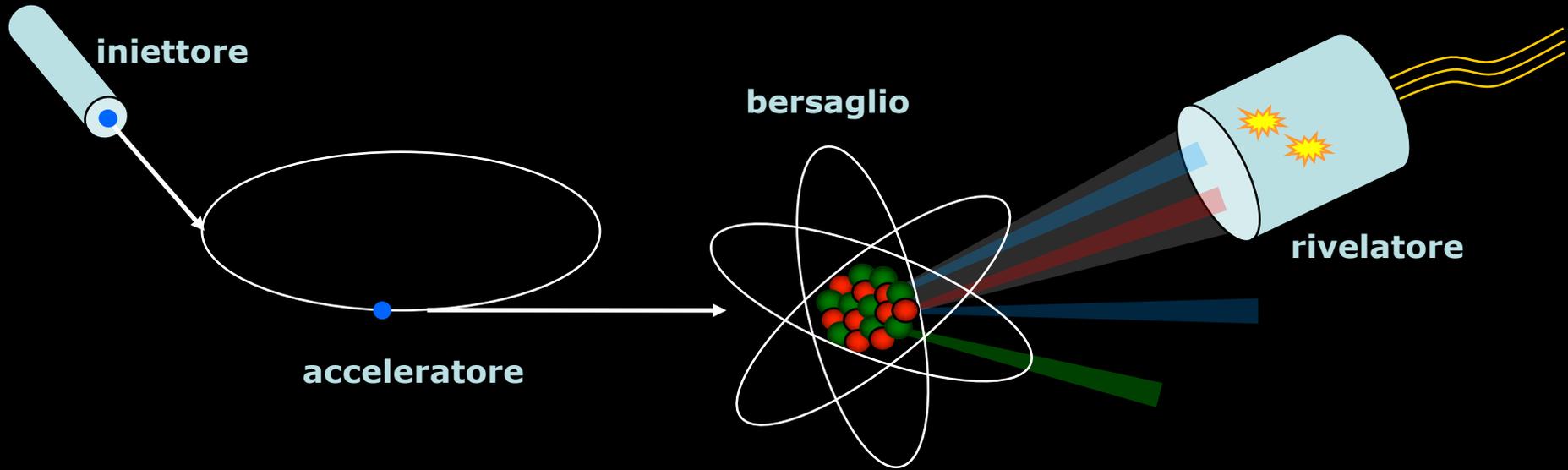
Oggi, microscopi più sofisticati arrivano a risoluzioni molto migliori del 'vecchio' microscopio ottico

Il microscopio elettronico consente di visualizzare oggetti delle dimensioni dell'atomo

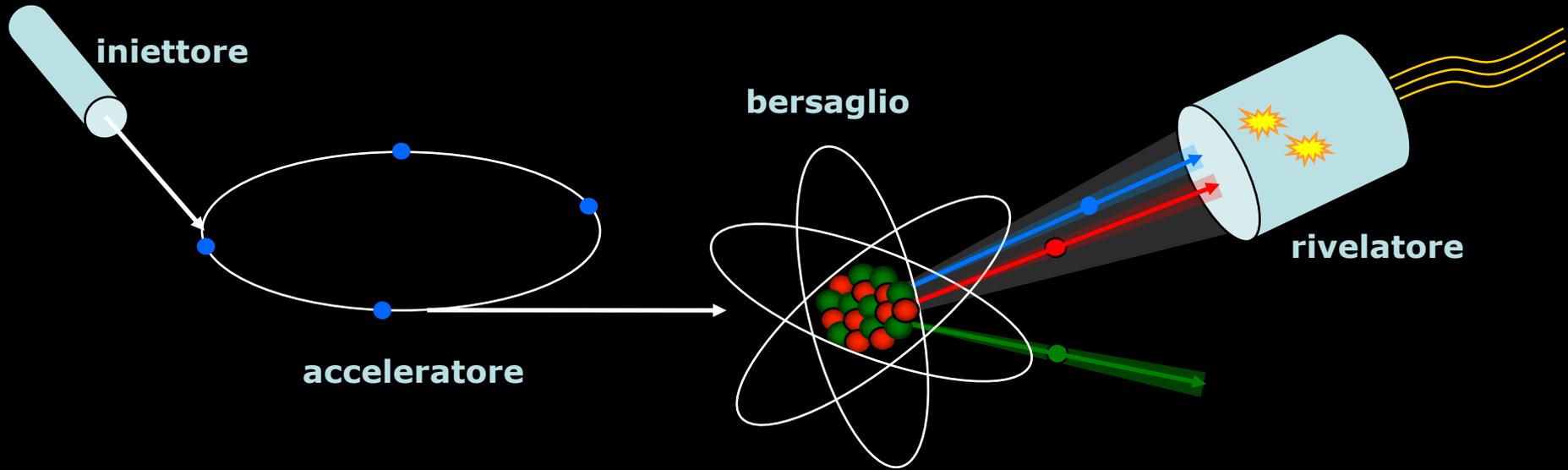
Ma come si può arrivare a "vedere" i quark?



La diffusione di elettroni

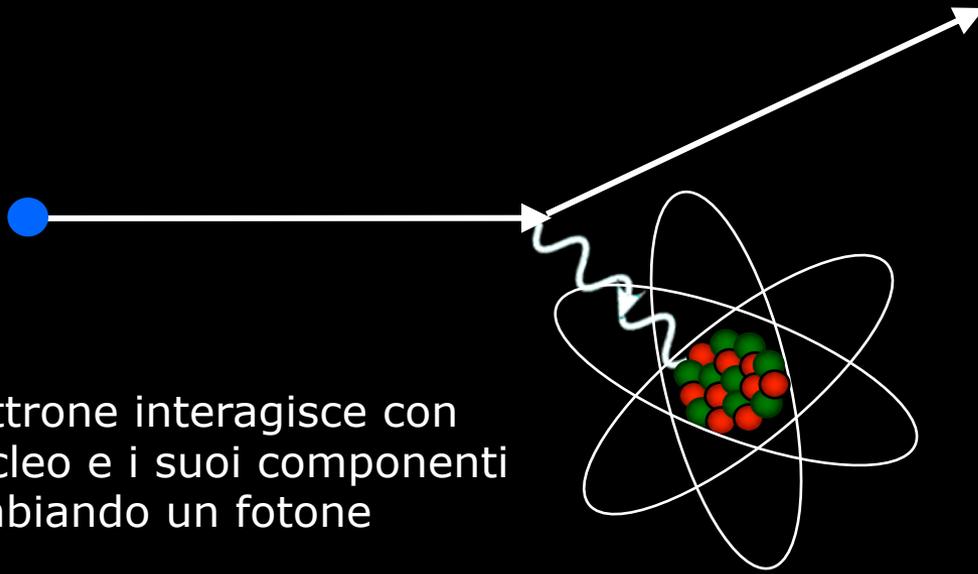


La diffusione di elettroni



Cosa succede quando un elettrone interagisce con nucleo e con i protoni e i neutroni al suo interno?

La diffusione di elettroni

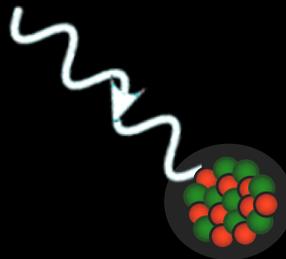


L'elettrone interagisce con il nucleo e i suoi componenti scambiando un fotone

La lunghezza d'onda del fotone dipende dall'energia e dall'angolo di diffusione dell'elettrone

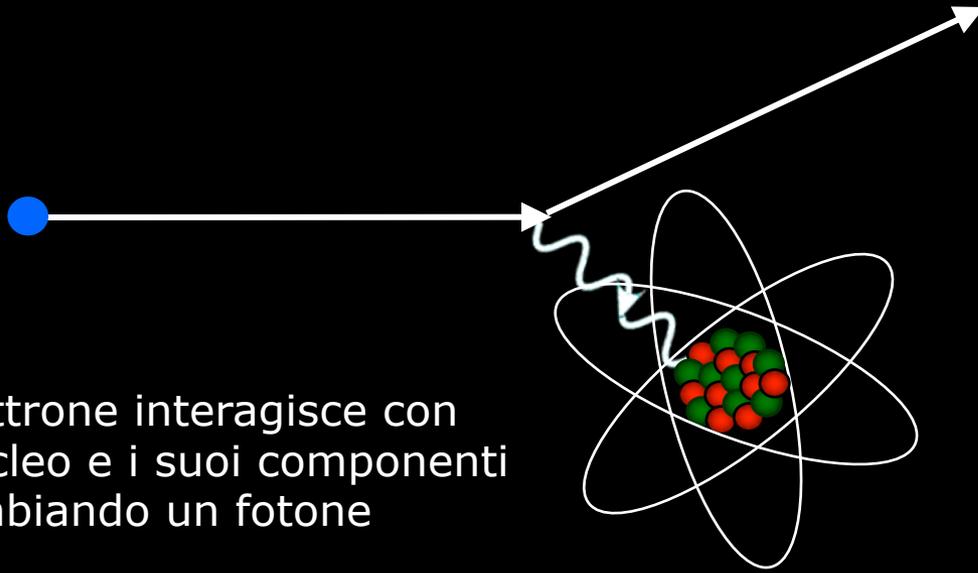
A lunghezze d'onda elevate, paragonabili alle dimensioni del nucleo

$$\lambda \gg 10^{-15} \text{ m}$$



Il fotone interagisce con l'intero nucleo e non è possibile distinguere i suoi componenti

La diffusione di elettroni

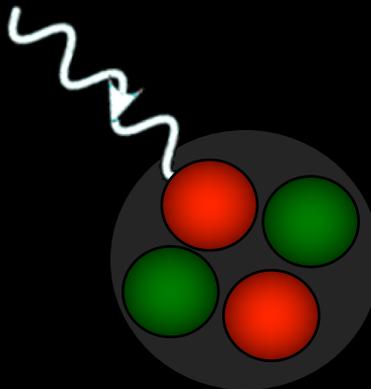


L'elettrone interagisce con il nucleo e i suoi componenti scambiando un fotone

La lunghezza d'onda del fotone dipende dall'energia e dall'angolo di diffusione dell'elettrone

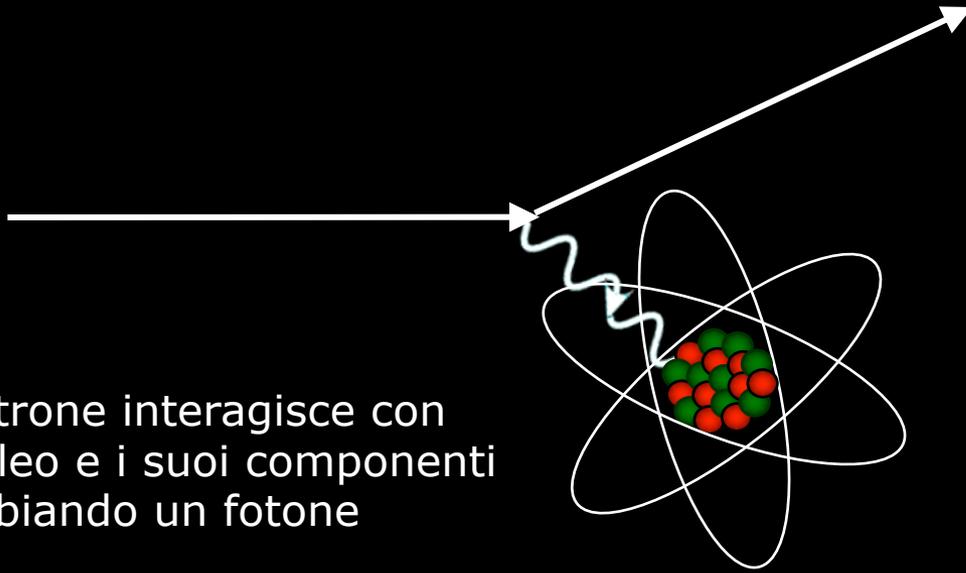
A lunghezze d'onda intermedie, dell'ordine delle dimensioni dei nucleoni

$$\lambda \sim 10^{-15} \text{ m}$$



Il fotone interagisce con i singoli protoni e neutroni che compongono il nucleo

La diffusione di elettroni

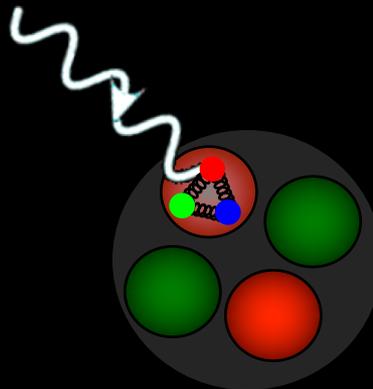


L'elettrone interagisce con il nucleo e i suoi componenti scambiando un fotone

La lunghezza d'onda del fotone dipende dall'energia e dall'angolo di diffusione dell'elettrone

A lunghezze molto piccole, inferiori alle dimensioni del protone

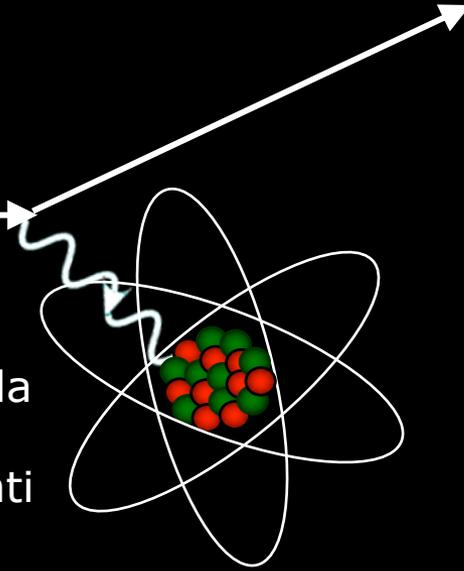
$$\lambda \ll 10^{-15} \text{ m}$$



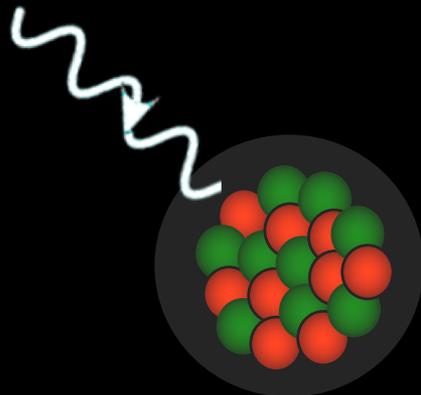
Il fotone interagisce con i costituenti dei singoli nucleoni, cioè quark e gluoni

La diffusione di elettroni

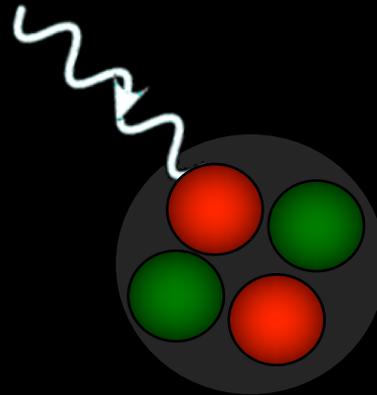
Variando la lunghezza d'onda possiamo sondare il nucleo atomico e di suoi componenti a diverse profondità ...



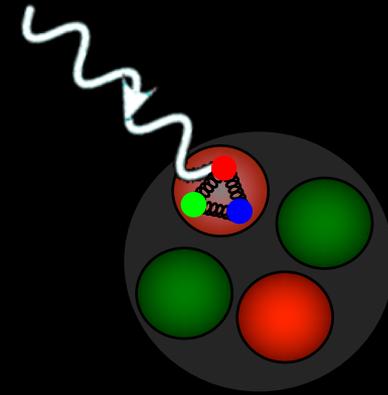
... e studiare come da quark e gluoni si formano i nucleoni e i nuclei



$$\lambda \gg 10^{-15} \text{ m}$$

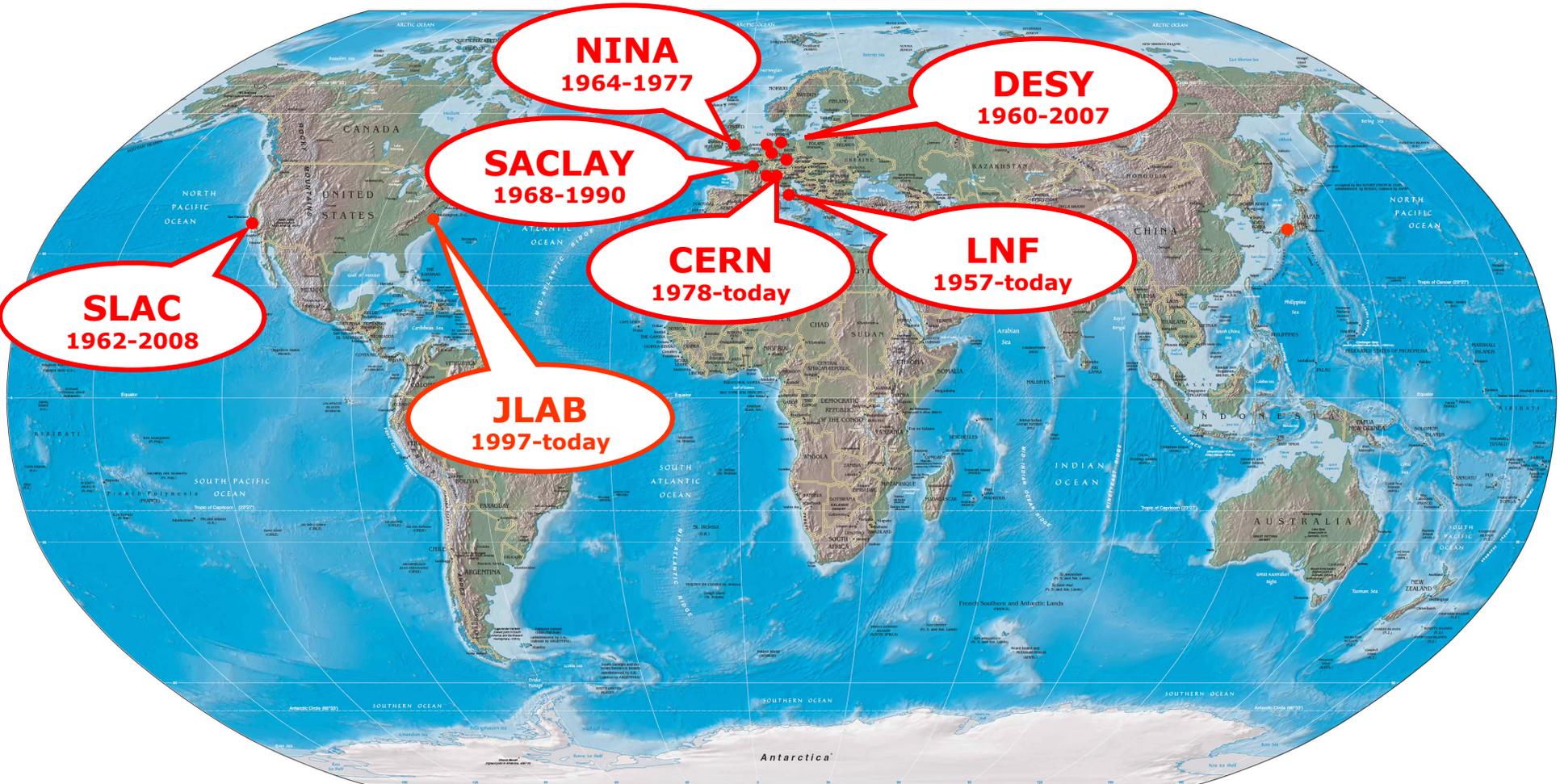


$$\lambda \sim 10^{-15} \text{ m}$$



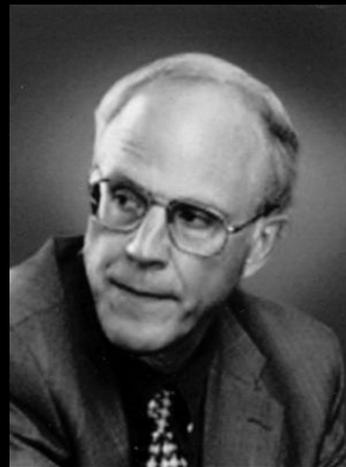
$$\lambda \ll 10^{-15} \text{ m}$$

I laboratori nel mondo



I premi Nobel

- 1969 - **Murray Gell-Mann**
"Quark model for particle classification"
- 1990 - **Jerome I. Friedman**
Henry W. Kendall
Richard E. Taylor
"Deep inelastic scattering experiments leading to the discovery of quarks"
- 2004 - **David J. Gross**
H. David Politzer
Frank Wilczek
"Discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"



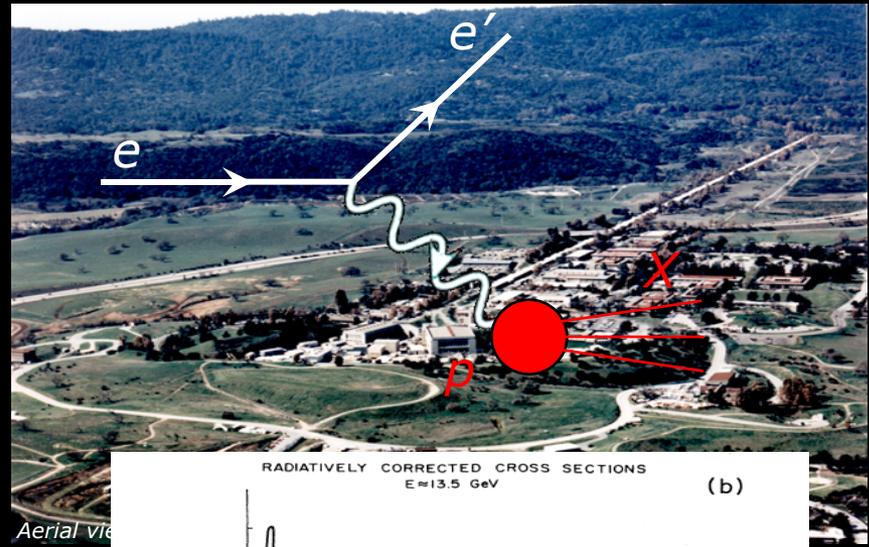
SLAC e la scoperta dei quark

Esperimenti di diffusione elettrone-protone furono condotti a SLAC (Stanford) negli anni '60

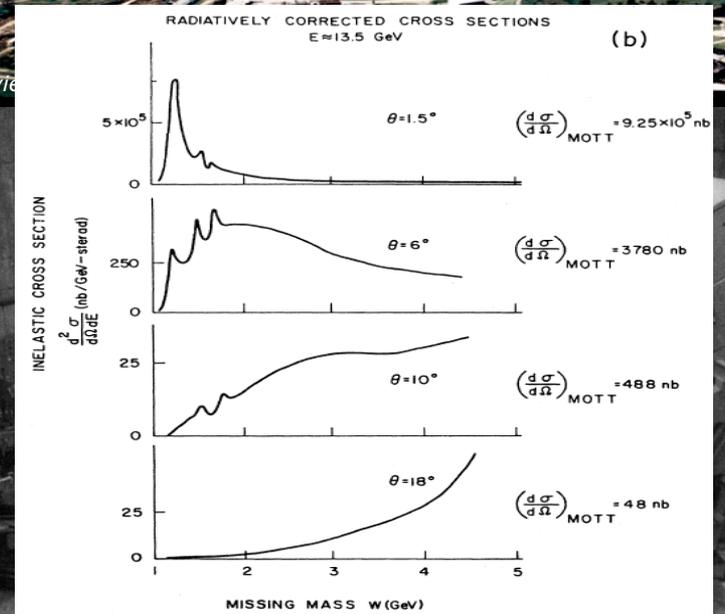
L'elettrone diffuso su bersagli di idrogeno liquido veniva misurato in spettrometri ad alta risoluzione

La sezione d'urto misurata aveva un andamento peculiare, del tutto inatteso ... spiegabile assumendo che l'elettrone stesse diffondendo su **particelle puntiformi e cariche all'interno del protone** che vennero chiamate **partoni**

Anni dopo si comprese che questi partoni erano i **quark!**



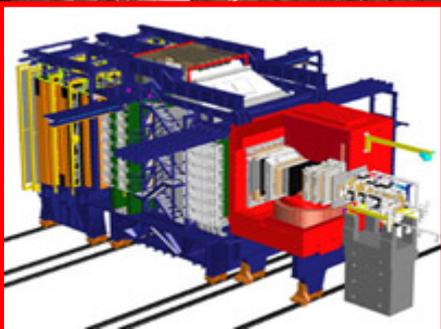
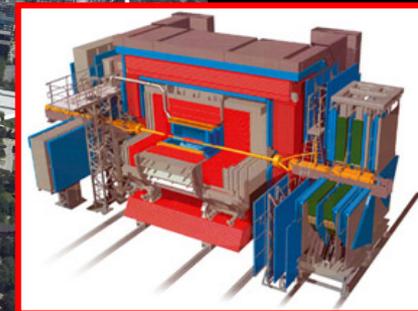
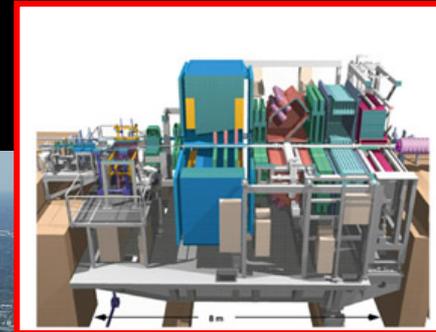
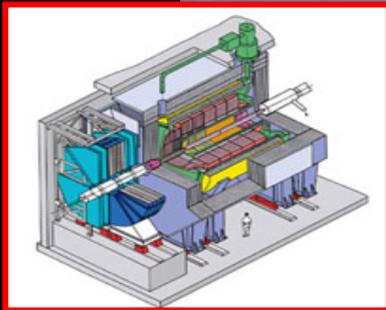
Aerial view



8 and 20 GeV Spectrometers, Station A
J. L. Friedman, H. W. Kendall, and S. F. Taylor,
Rev. Mod. Phys. 63 (1991) 597-629

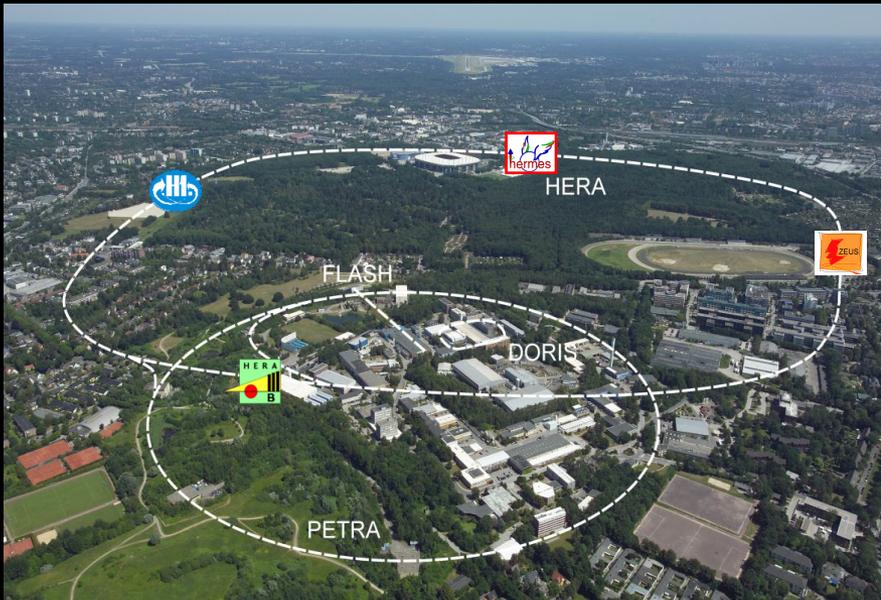
Gli esperimenti a DESY

Misure di diffusione elettrone-protone sono state condotte a DESY (Amburgo) utilizzando il collider HERA e i quattro rivelatori HERMES, H1, HERA-B e ZEUS

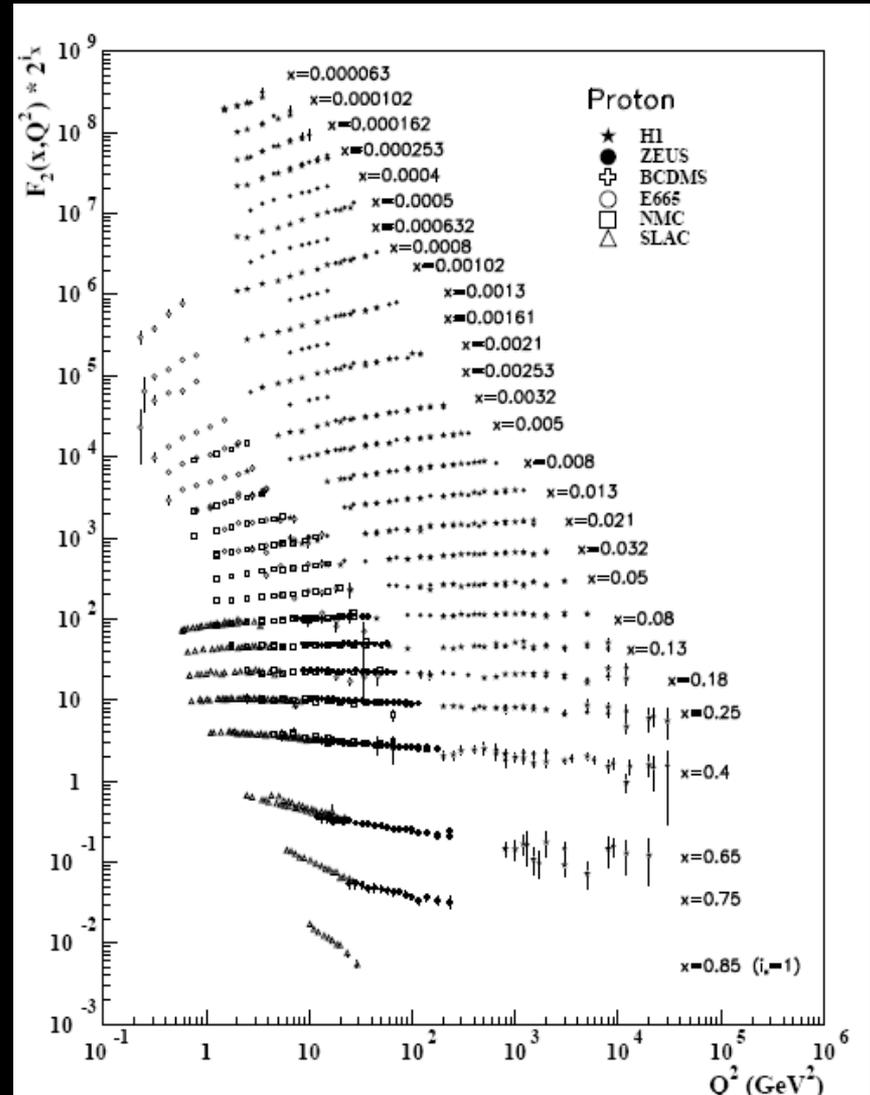


Gli esperimenti a DESY

Misure di diffusione elettrone-protone sono state condotte a **DESY** (Amburgo) utilizzando il collider HERA e i quattro rivelatori **HERMES**, **H1**, **HERA-B** e **ZEUS**



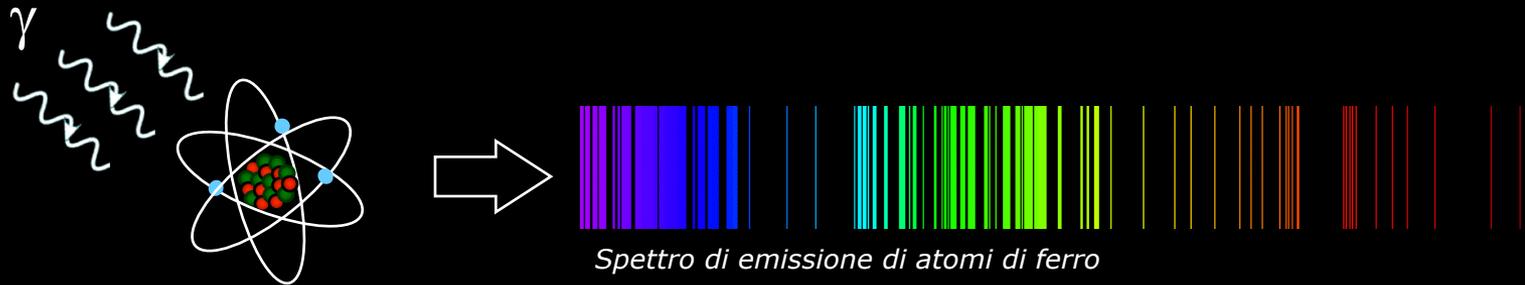
Gli esperimenti H1 e ZEUS hanno misurato con straordinaria precisione le **funzioni di struttura** che descrivono le **distribuzioni dei quark** nel protone



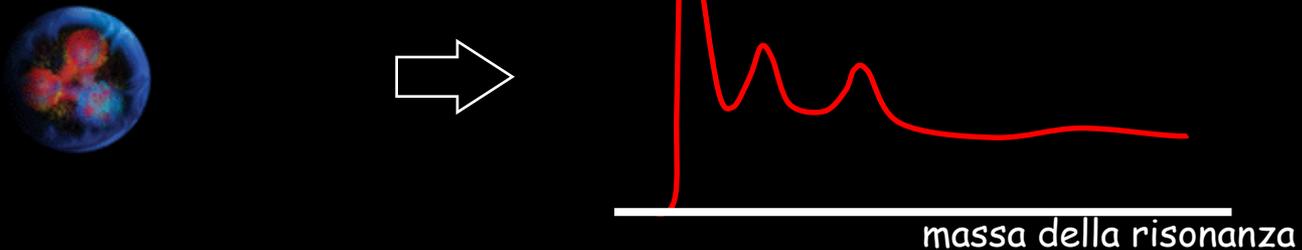
Le risonanze del nucleone

L'esistenza delle *risonanze* del nucleone è una dimostrazione che protone e neutrone non sono particelle elementari ma hanno una struttura interna

Gli atomi possono trovarsi in stati eccitati da cui decadono emettendo radiazione

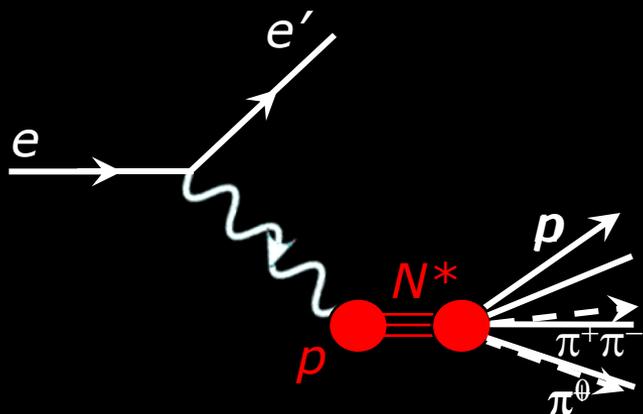


I nucleoni possono trovarsi in stati eccitati, chiamati *risonanze*, da cui decadono emettendo particelle



Il numero e lo spettro delle risonanze dipende dal numero di quark esistenti e dalle loro proprietà

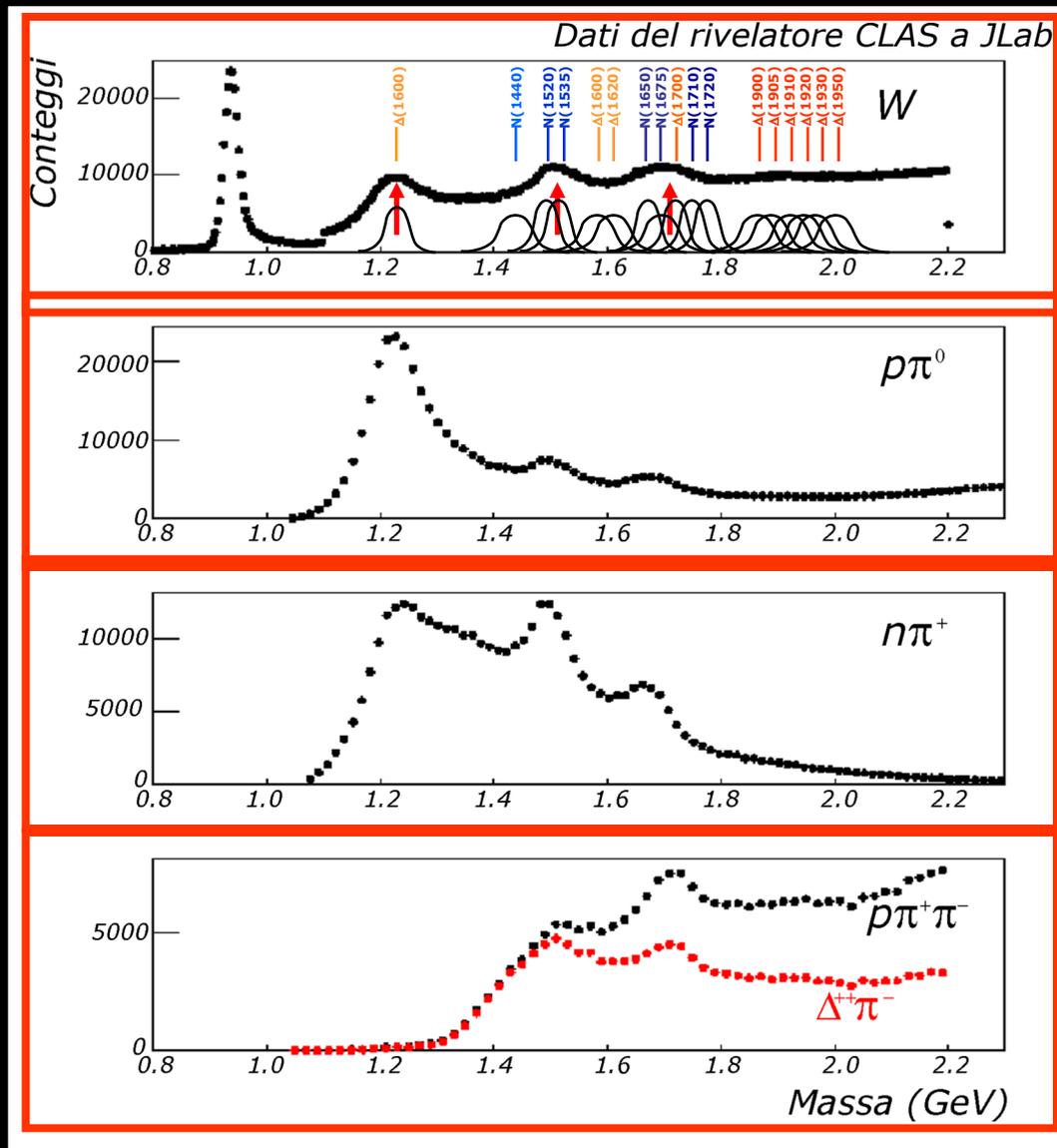
Lo studio delle risonanze



Le risonanze appaiono nello spettro di massa come strutture la cui larghezza dipende dalla loro vita media

Le risonanze possono essere studiate rivelando i loro prodotti di decadimento

La misura di stati finali differenti permette di separare le diverse risonanze



I misteri del mondo dei quark

Dalla scoperta dei quark ad oggi ci sono stati enormi sviluppi nella nostra comprensione delle loro proprietà, ma rimangono ancora molte domande a cui dobbiamo rispondere ...

- qual è la struttura interna di protoni e neutroni
- cosa governa la transizione da quark e gluoni a nucleoni e pioni
- qual è il ruolo dei gluoni nei nucleoni e nei nuclei
- esistono adroni con configurazione diversa da 3 quark o quark-antiquark e se non esistono perché?

...

Jefferson Lab



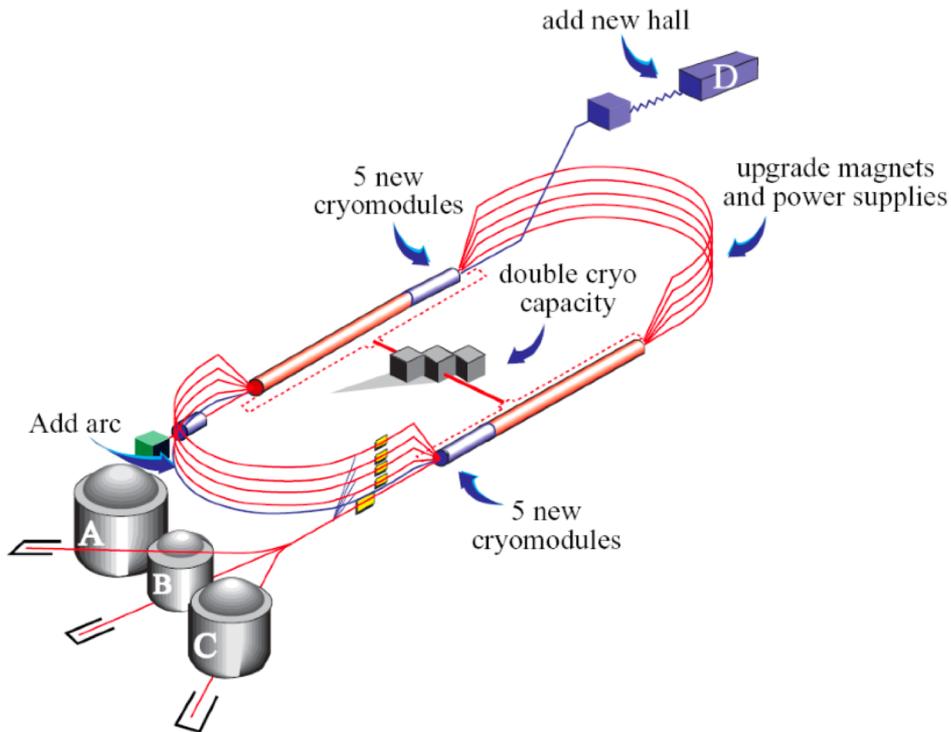
- il Jefferson Laboratory si trova a Newport News (VA)
- Costruito a partire dal 1987 su finanziamenti del Dipartimento dell'Energia americano
- Operativo dal 1997

Dispone di un acceleratore superconduttore di elettroni con energia massima di 12 GeV e di quattro sale sperimentali
(1 GeV = $1.6 \cdot 10^{-10}$ Joule)



L'acceleratore CEBAF

Continuous
Electron
Beam
Accelerator
Facility



La fisica di JLab12

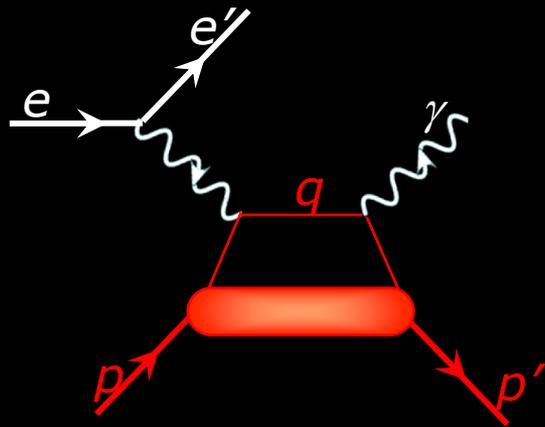
Jefferson Lab a 12 GeV porterà avanti un programma di fisica molto vasto per fornire risposte definitive ai quesiti della fisica adronica:

- “imaging” tridimensionale del protone e del neutrone per rivelare gli aspetti nascosti della sua dinamica interna
- Studio della transizione tra la descrizione dei nuclei in termini di barioni e mesoni e in termini di quark e gluoni
- Ricerca di adroni esotici, previsti sulla base della Cromodinamica Quantistica come conseguenze del confinamento
- Test di fisica oltre il Modello Standard a bassa energia, come complemento delle misure programmate alle energie più alte attualmente accessibili

La tomografia del protone

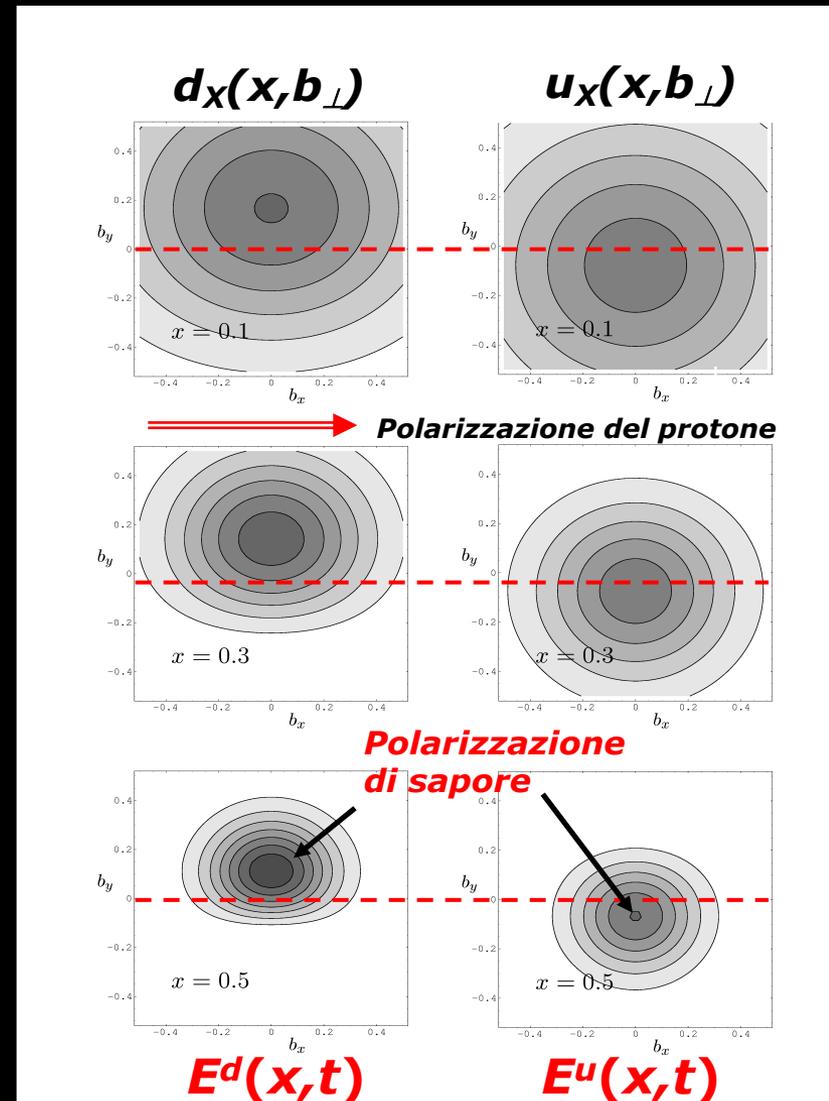
In medicina la tomografia permette di fare scansioni dei tessuti su piani successivi da cui ricostruire un'immagine 3D

La misura di reazioni esclusive come il DVCS è sensibile alla struttura tridimensionale del protone

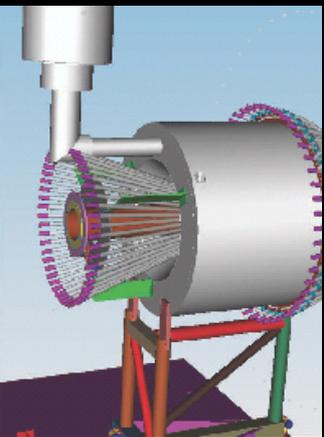


Dall'analisi di queste reazioni, è possibile fare una scansione delle distribuzioni dei quark nello spazio trasverso

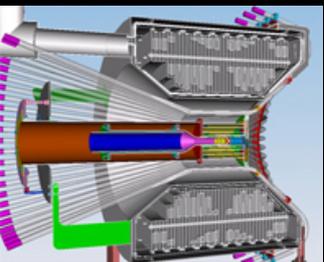
.... la TAC del protone



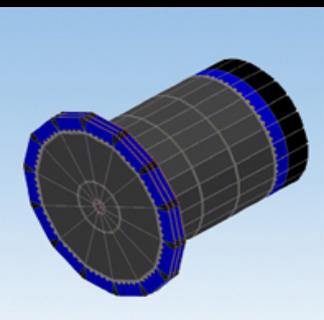
Il rivelatore CLAS12 a Jlab (sala B)



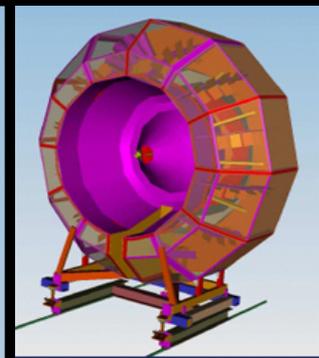
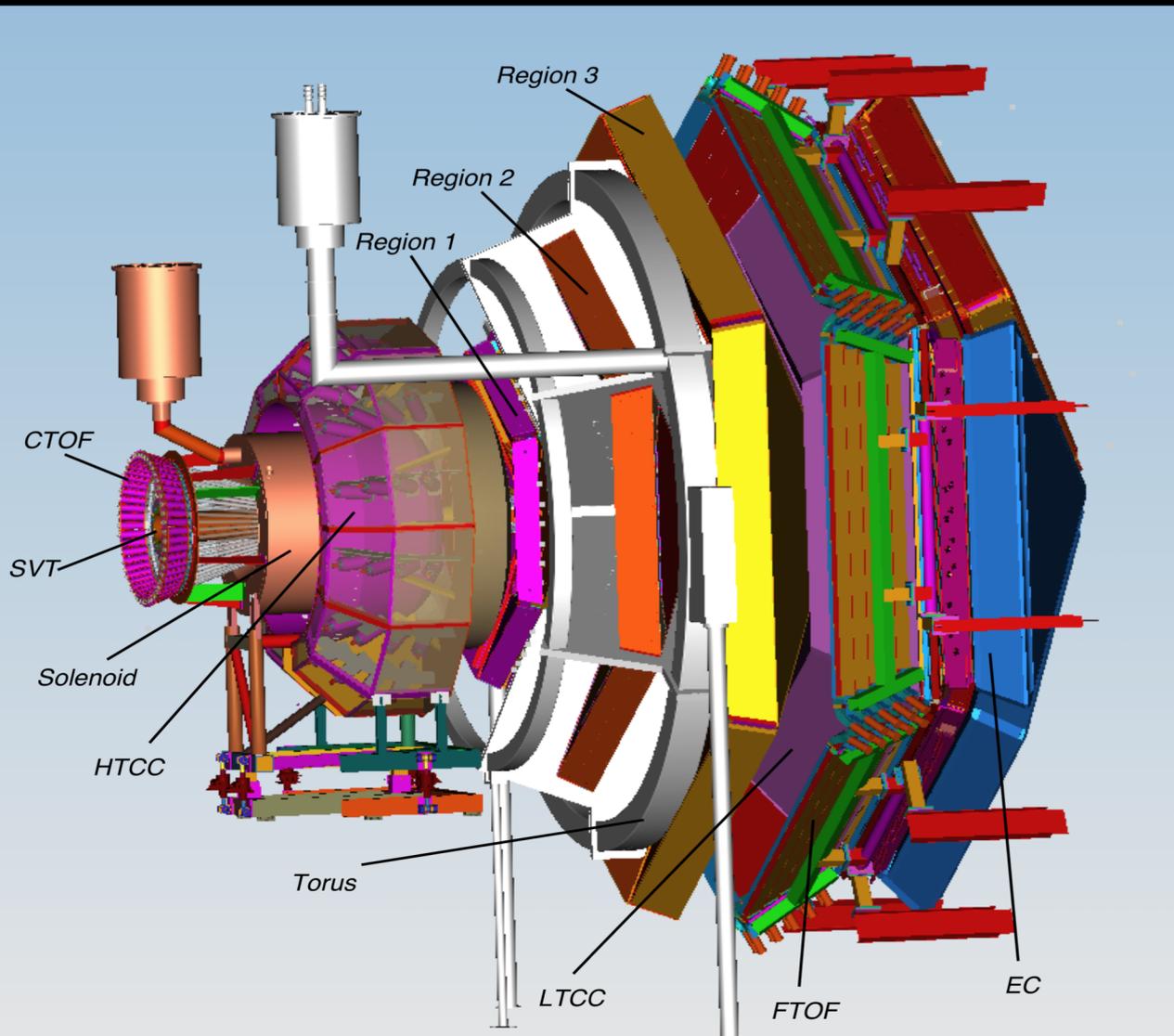
CLAS12 Central Detector



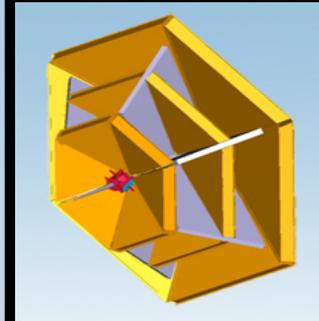
CLAS12 Solenoid



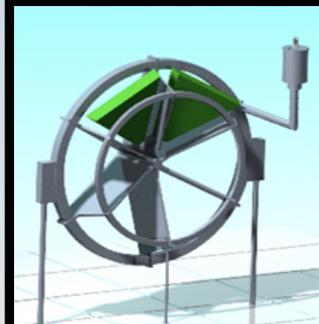
CLAS12 Silicon Tracker



CLAS12 HTCC



CLAS12 Drift Chambers

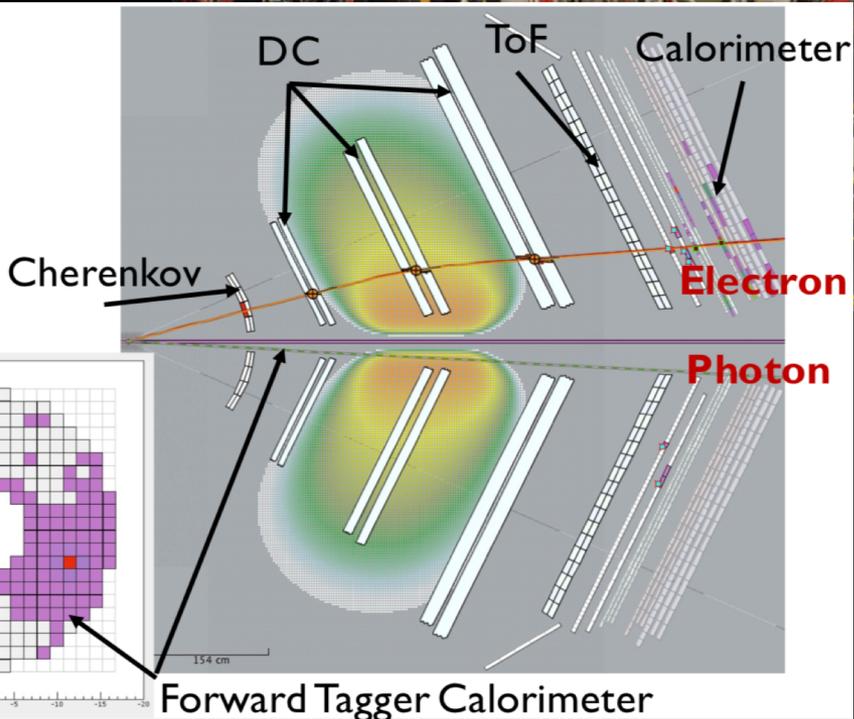
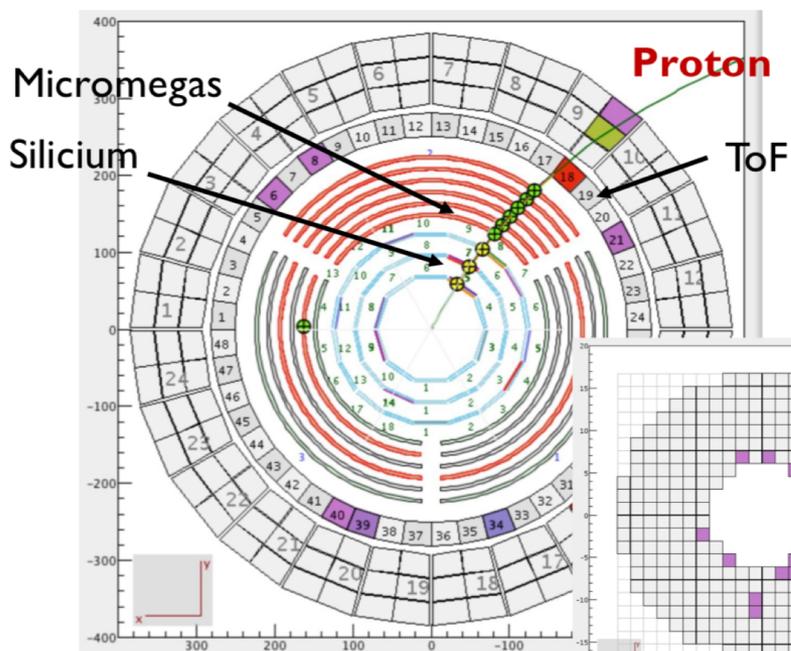
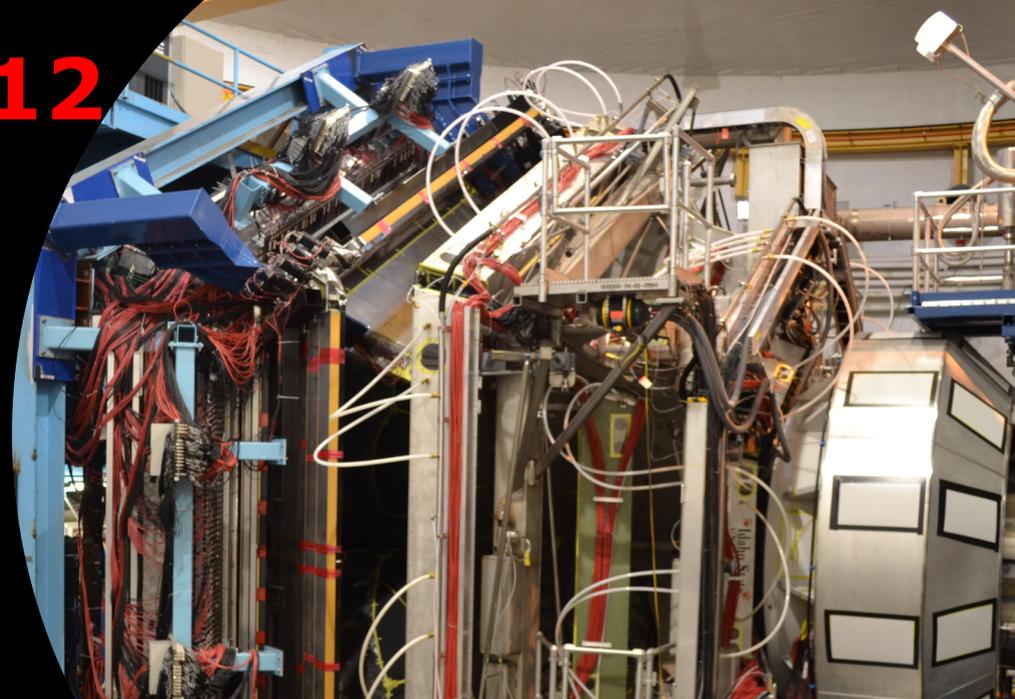


CLAS12 Torus

Il rivelatore CLAS12

CLAS12 e' un rivelatore ottimizzato per la misura di reazioni indotte dalla diffusione di un fascio di elettroni su un bersaglio fisso, con molteplici particelle prodotte dalla collisione.

E' stato realizzato con un forte contributo della sezione INFN di Genova



Grazie!