INTRODUZIONE ALLE TECNICHE DI MISURA

Unita' di misura e scala delle grandezze

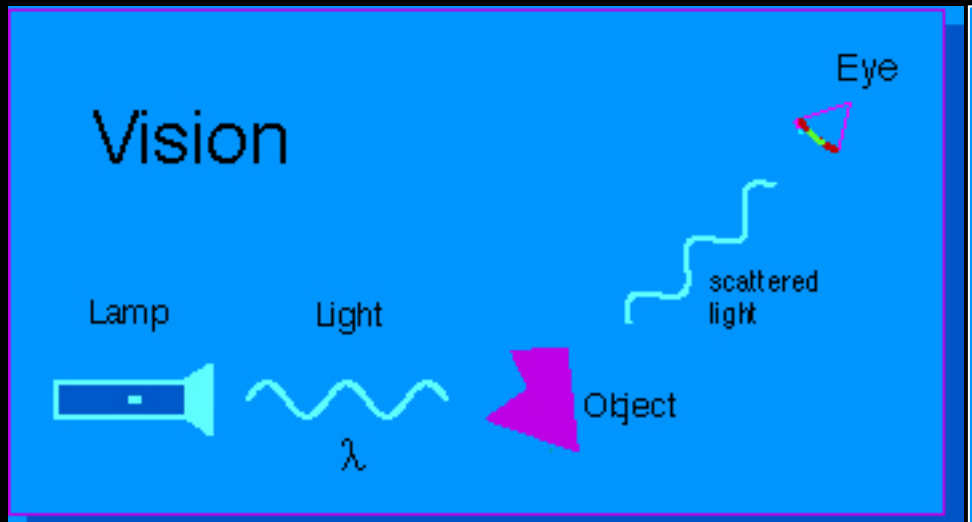
Strumenti di indagine: la sonda

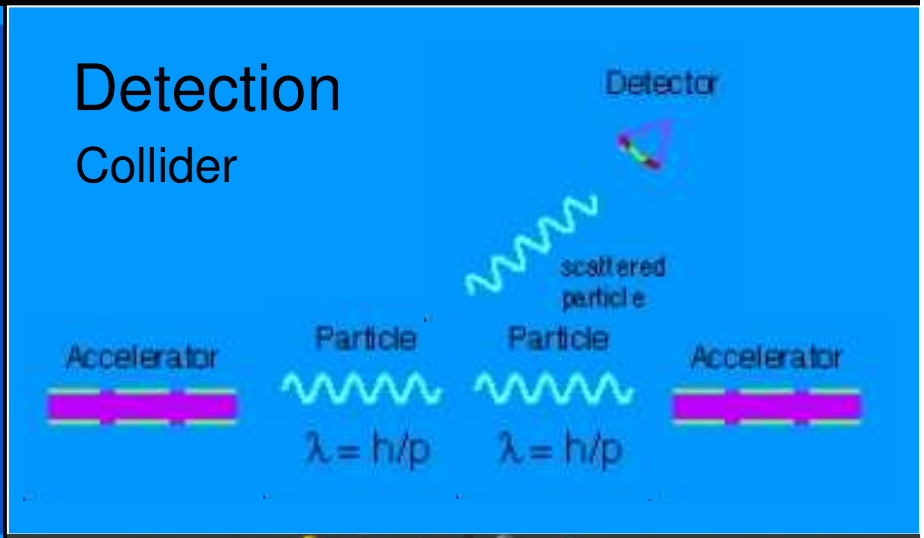
Strumenti di indagine: il rivelatore

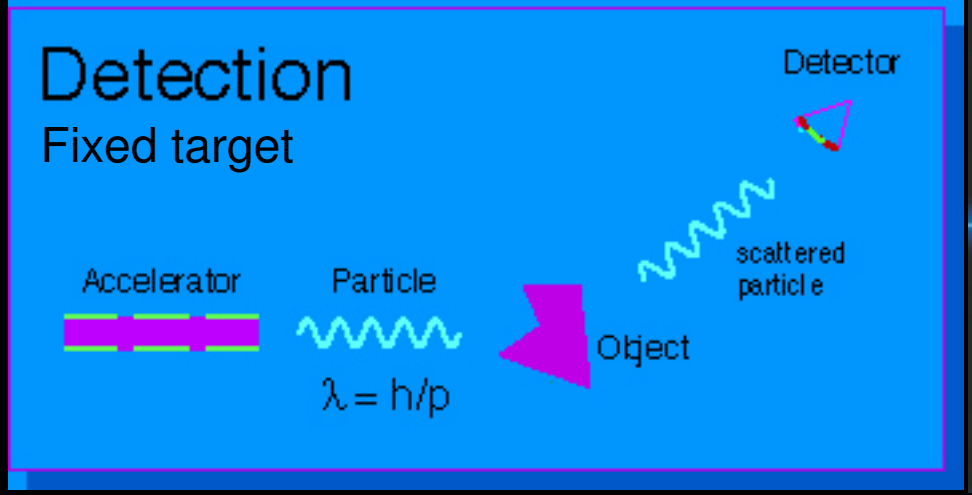
Il metodo

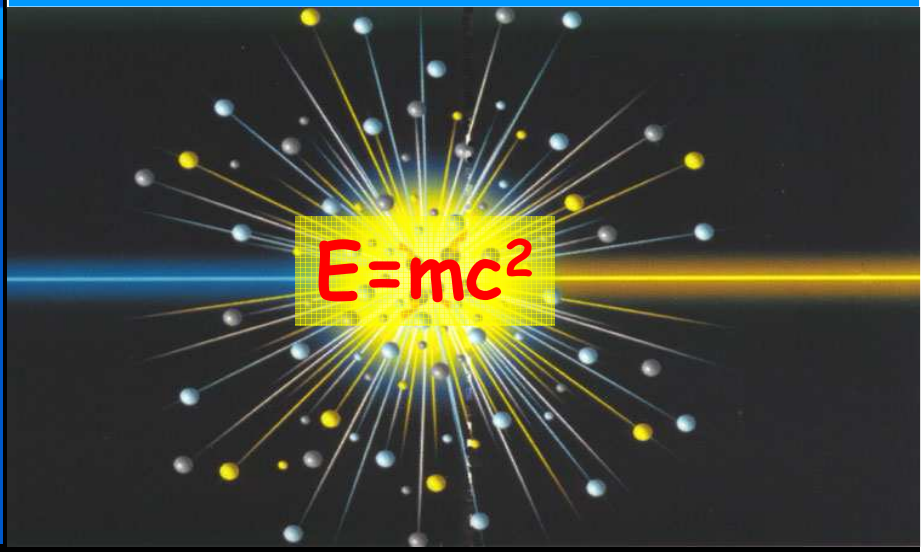
amedeo.staiano@to.infn.it

Osservazione e misura





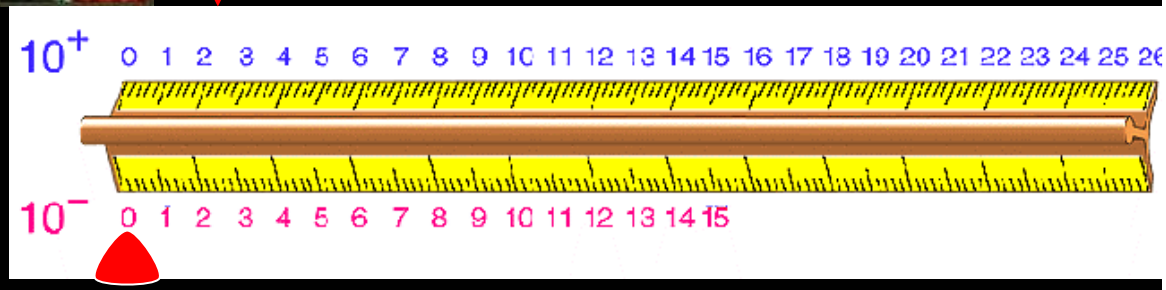




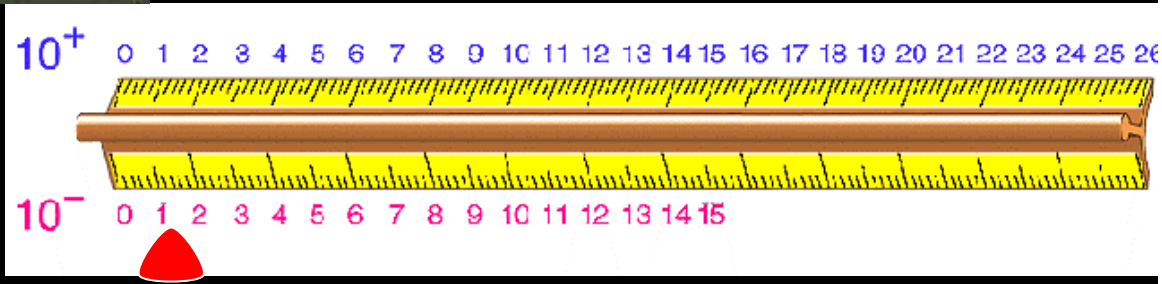
La scala delle grandezze:spazio

A quale scala operano le osservazioni le sperimentali che utilizzano fasci di particelle?

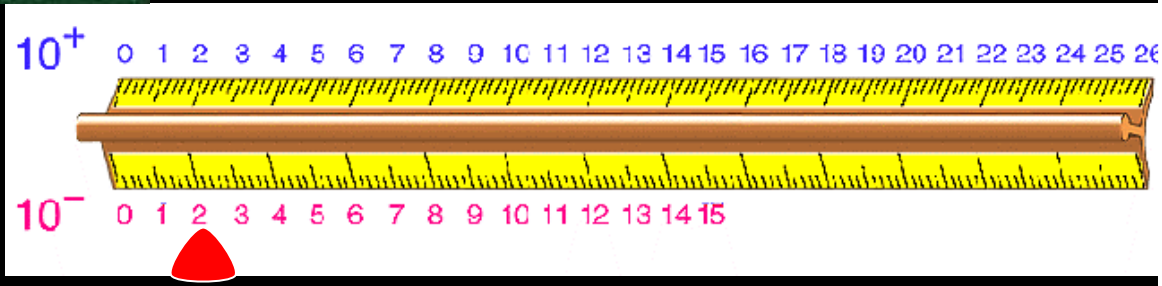
$10^0 = 1$ m



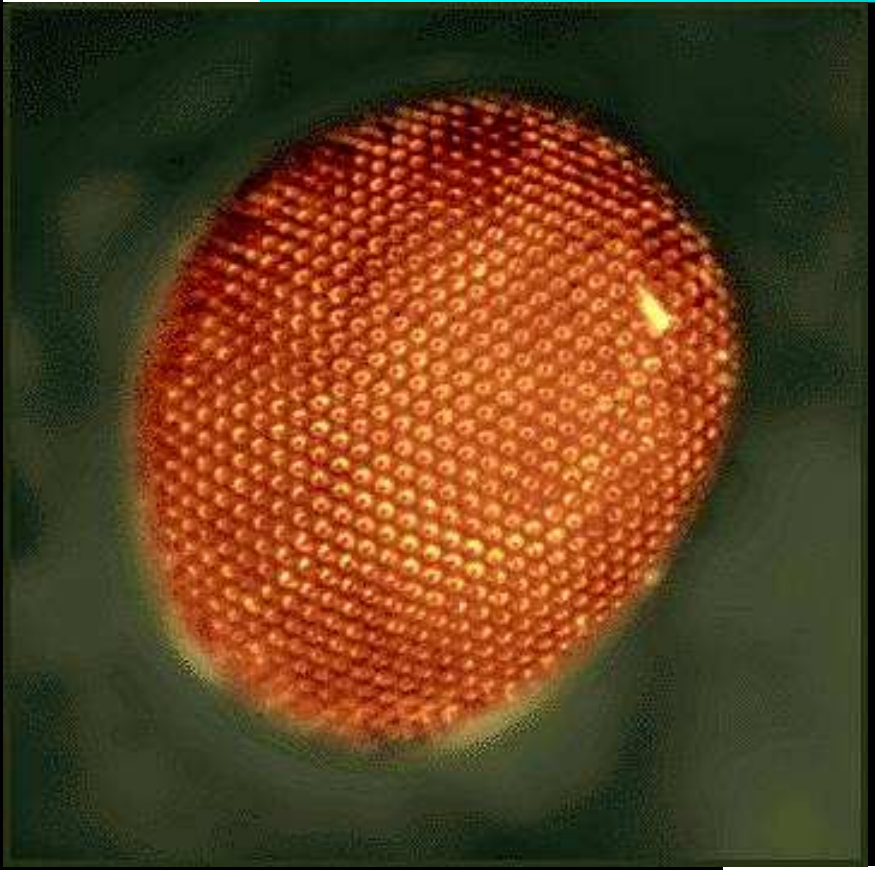
La scala delle grandezze:spazio



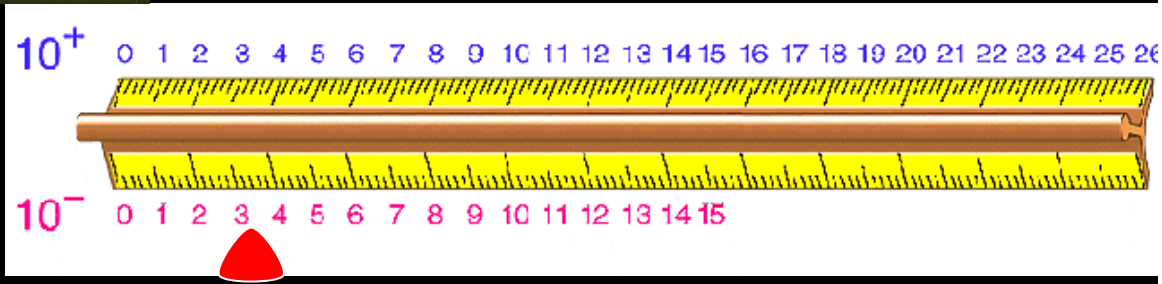
La scala delle grandezze:spazio



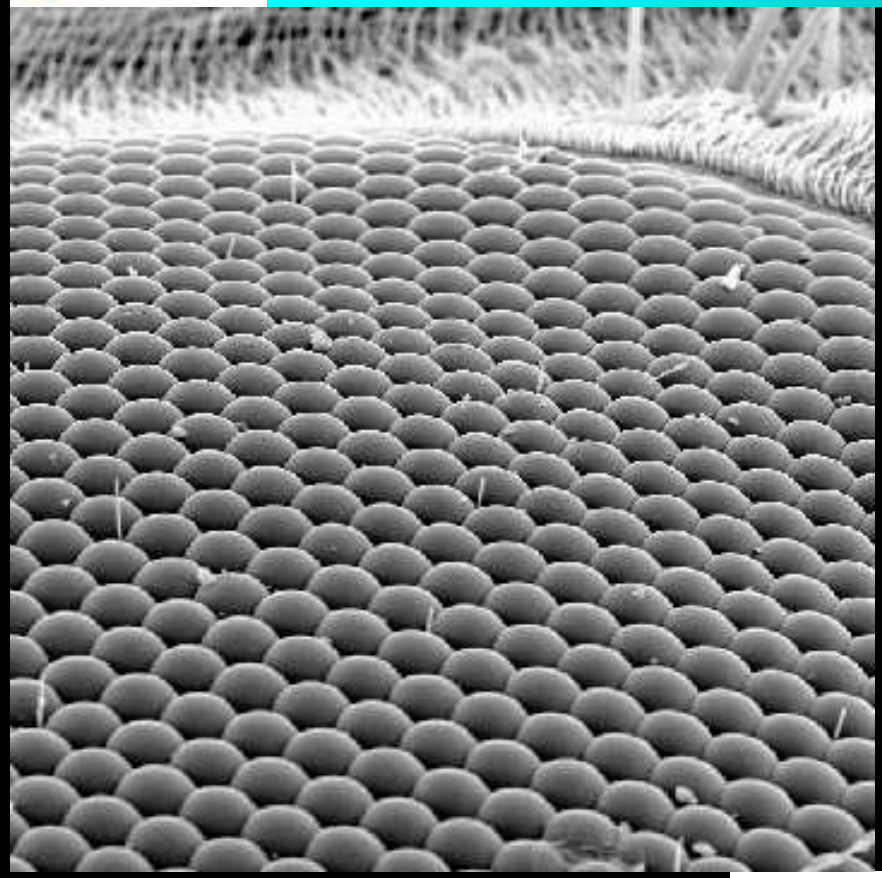
La scala delle grandezze:spazio

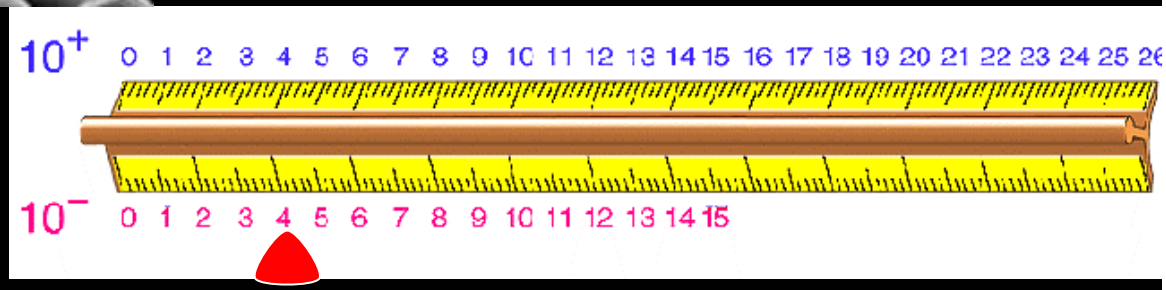


1 mm

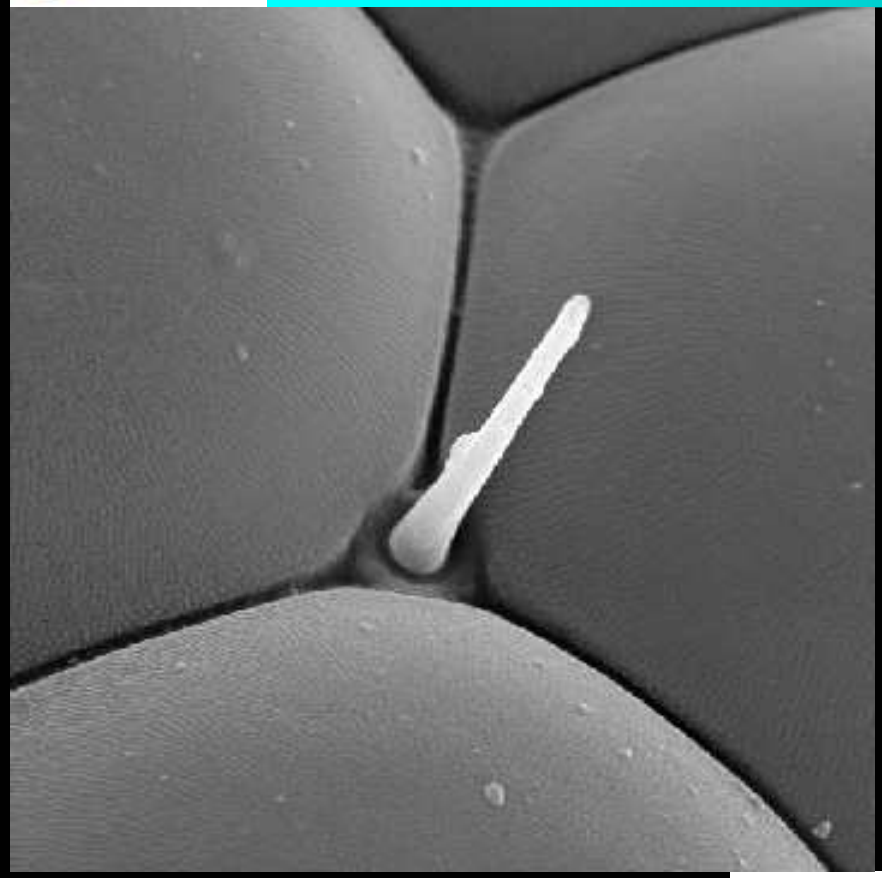


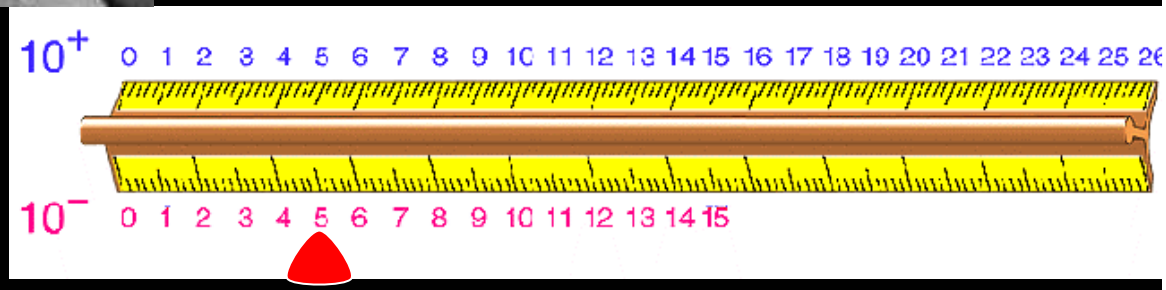
La scala delle grandezze:spazio



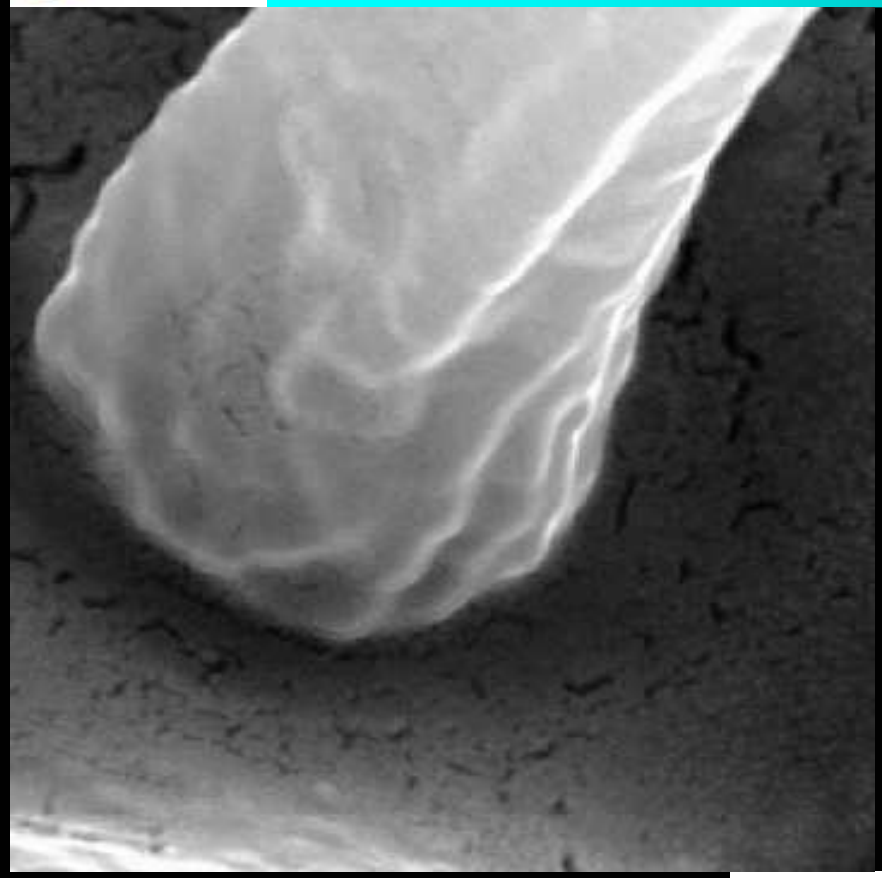


La scala delle grandezze:spazio

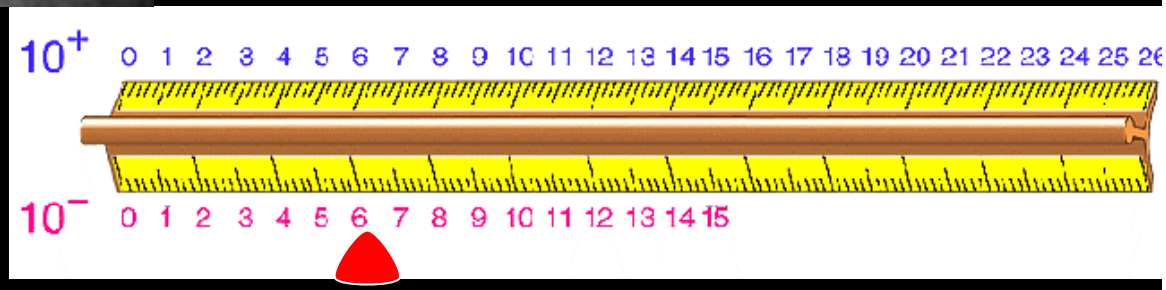




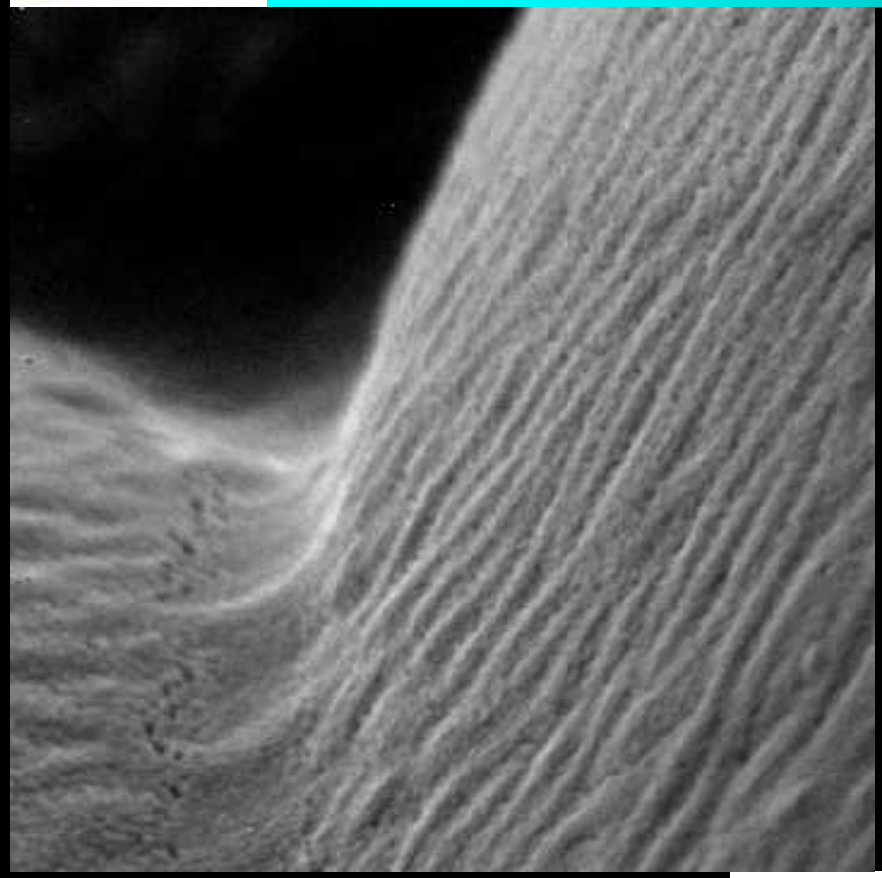
La scala delle grandezze:spazio

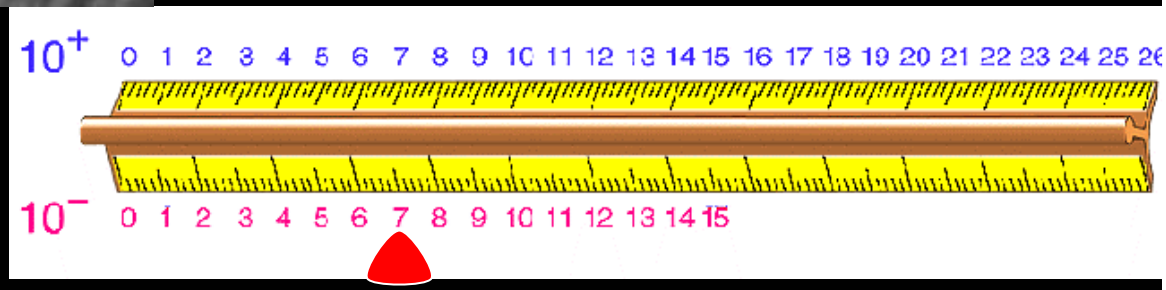


1 μm

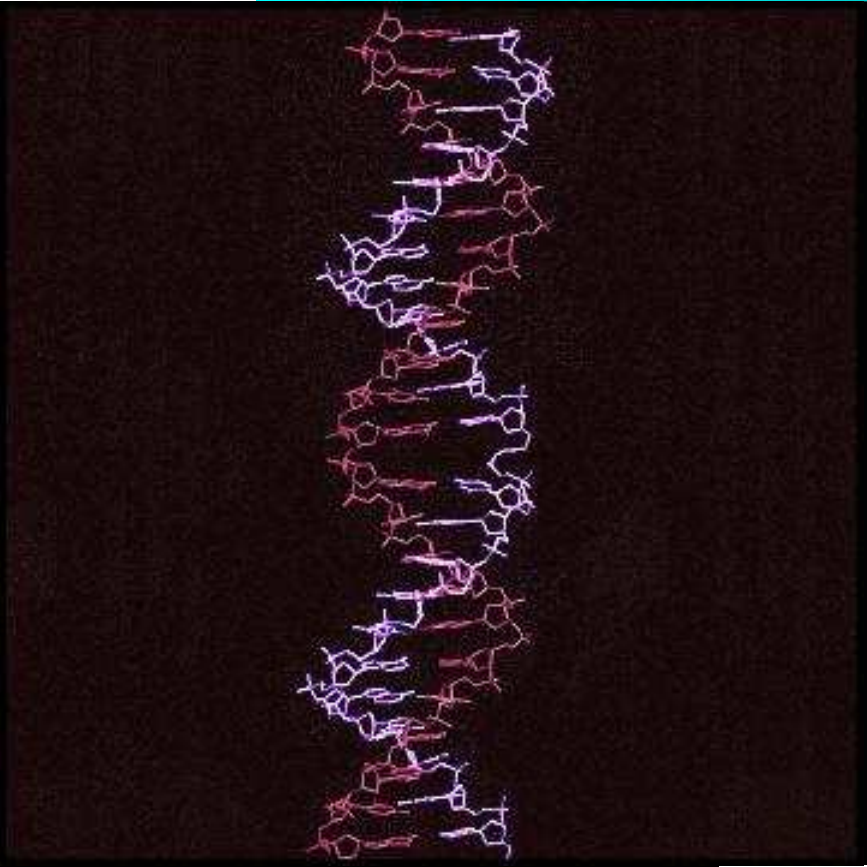


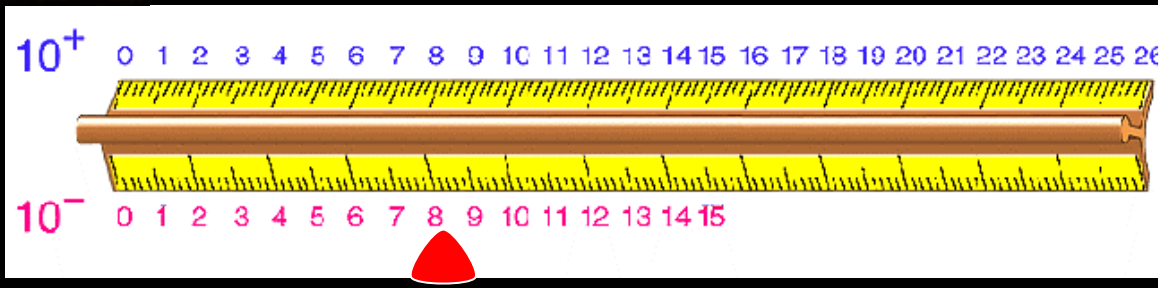
La scala delle grandezze:spazio



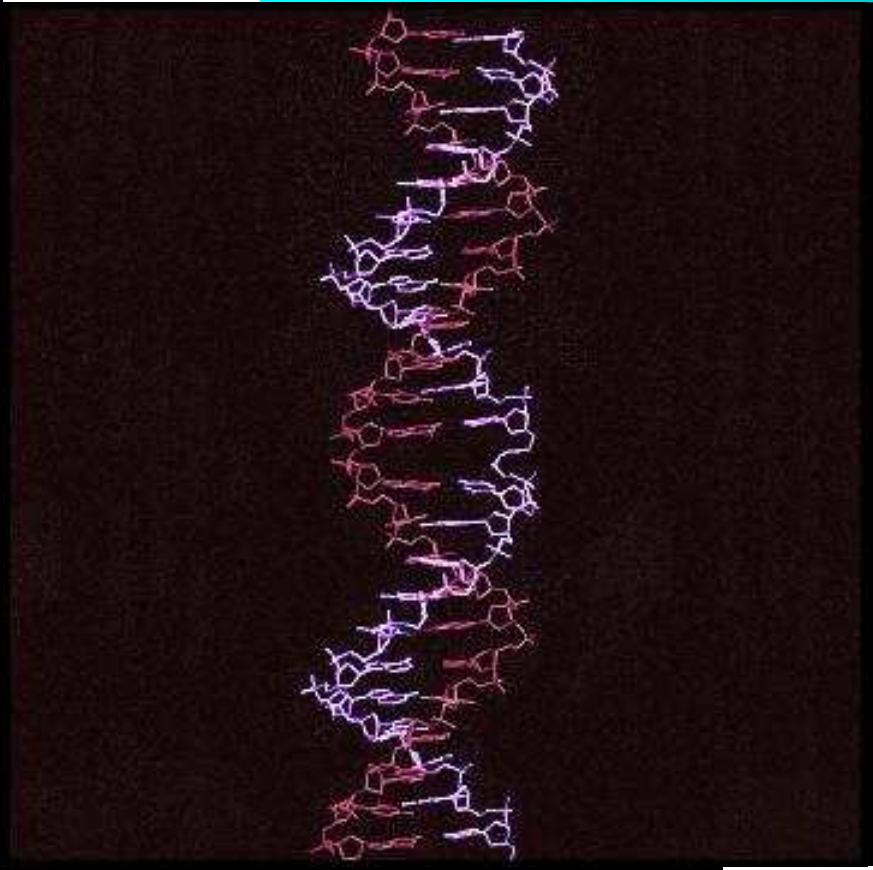


La scala delle grandezze:spazio

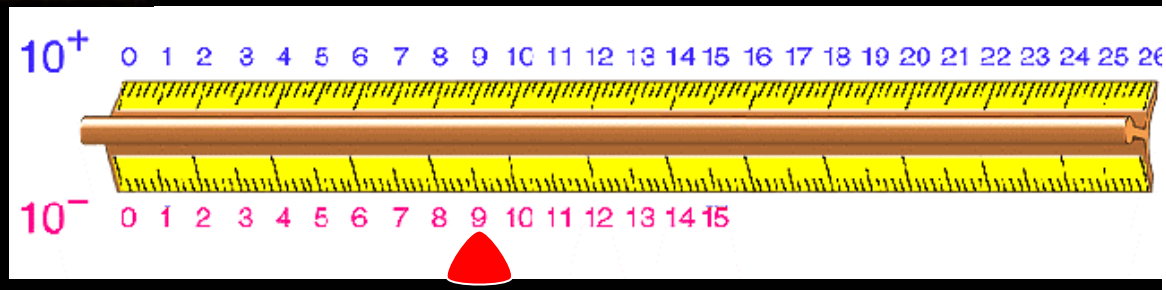




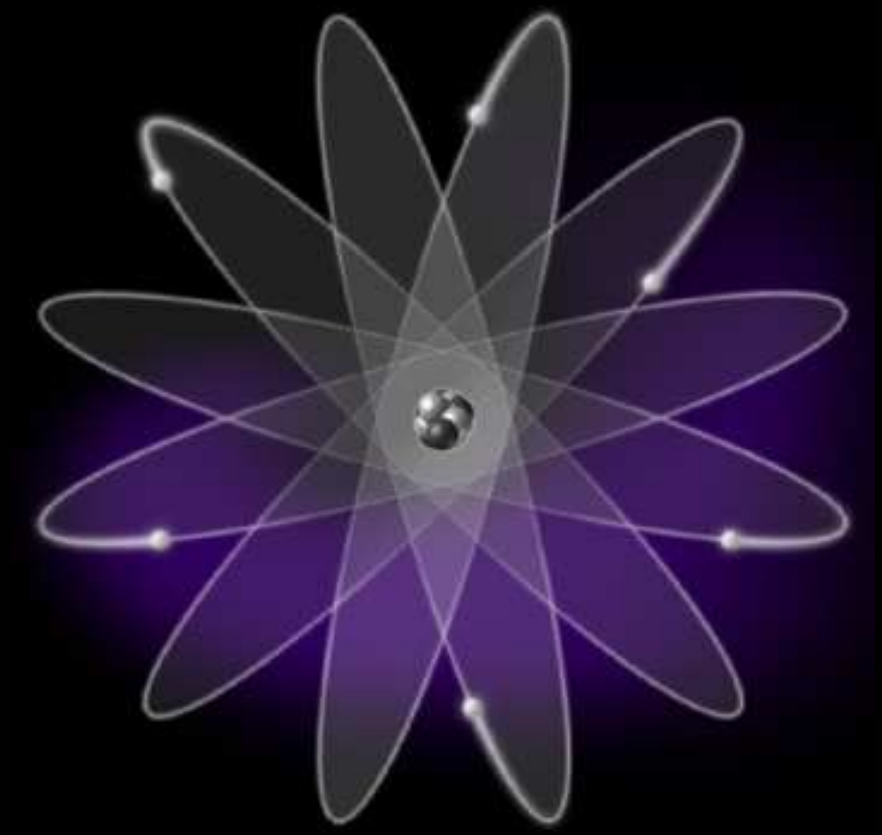
La scala delle grandezze:spazio

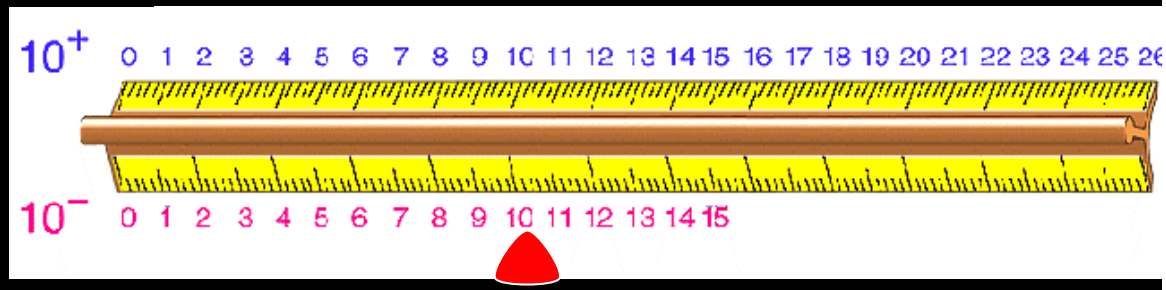


1 nm

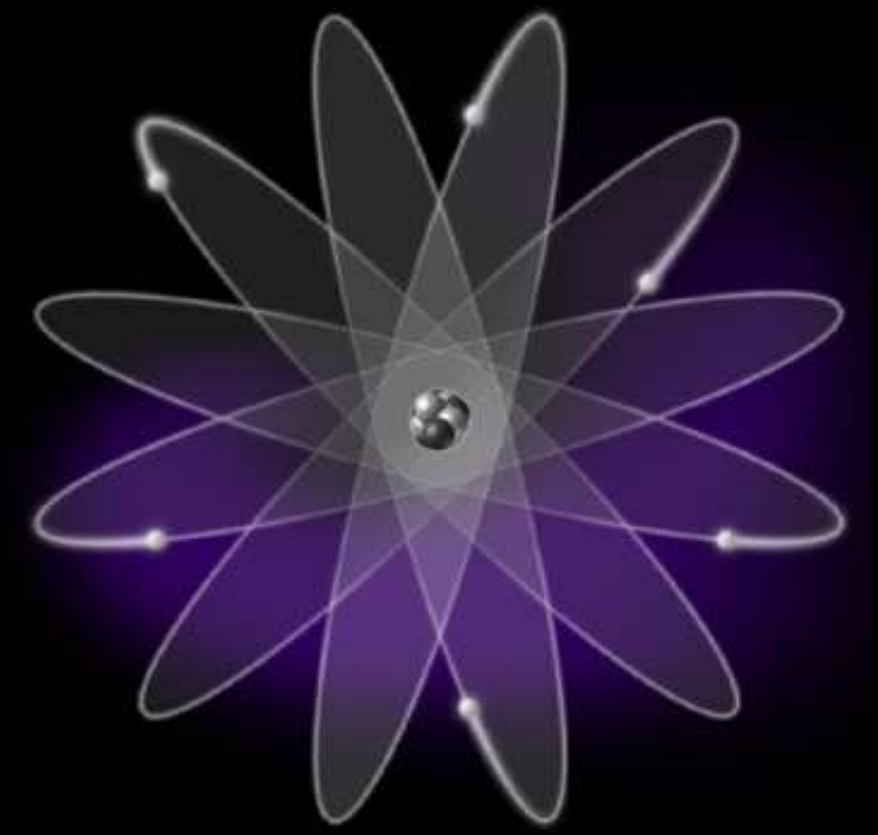


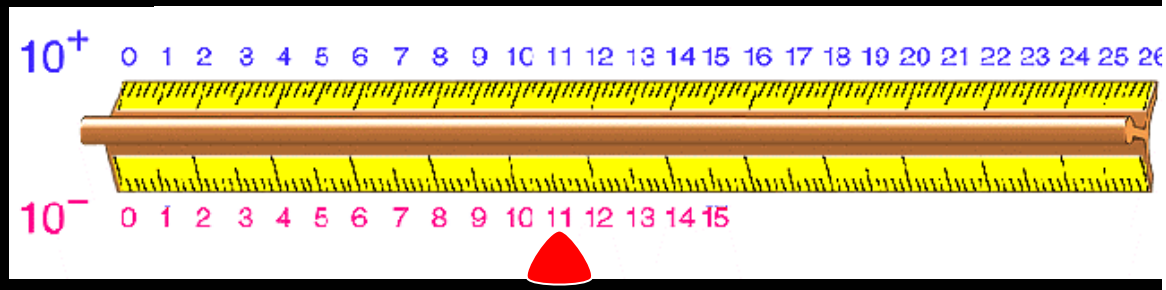
La scala delle grandezze:spazio



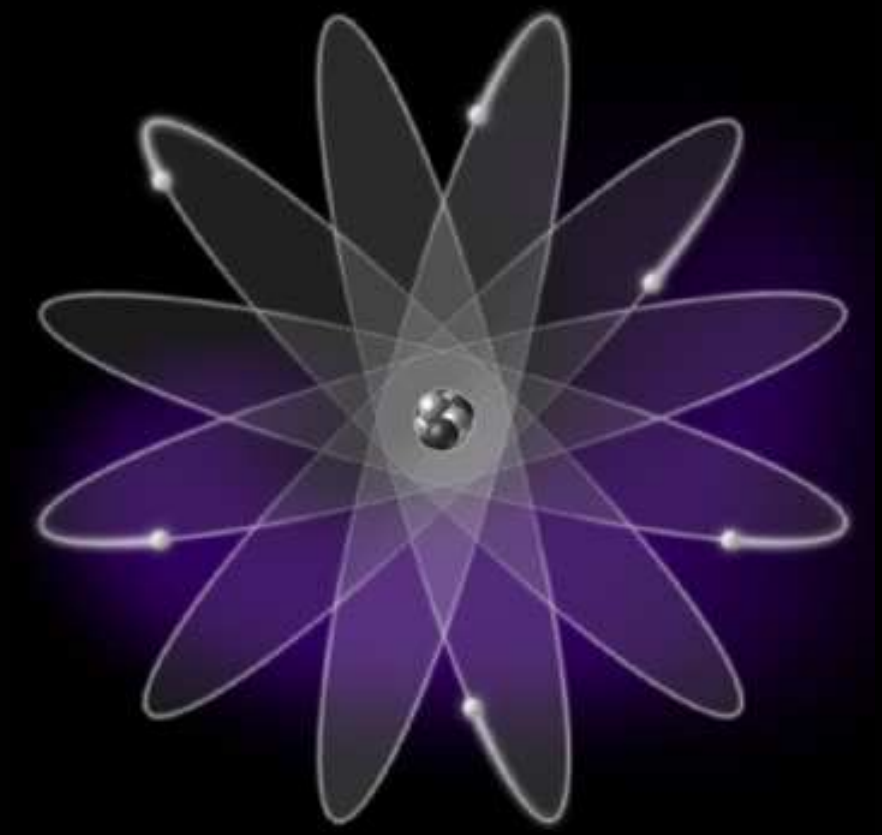


La scala delle grandezze:spazio

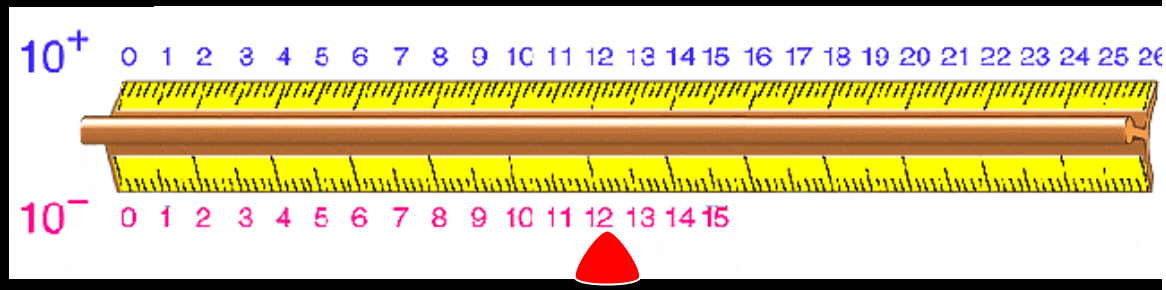




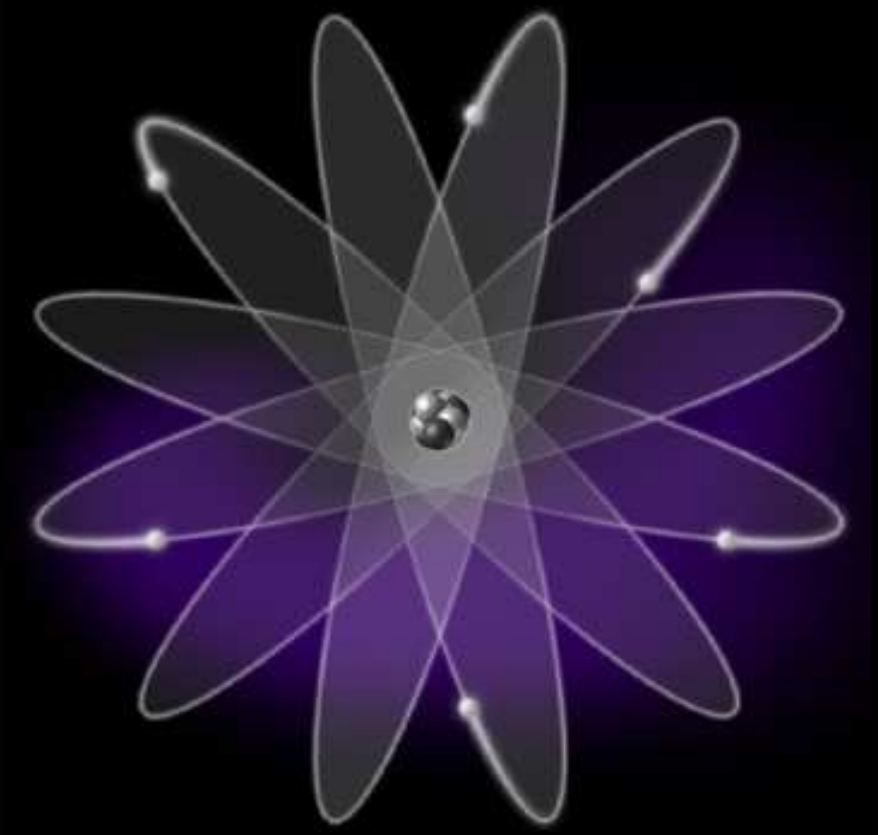
La scala delle grandezze:spazio

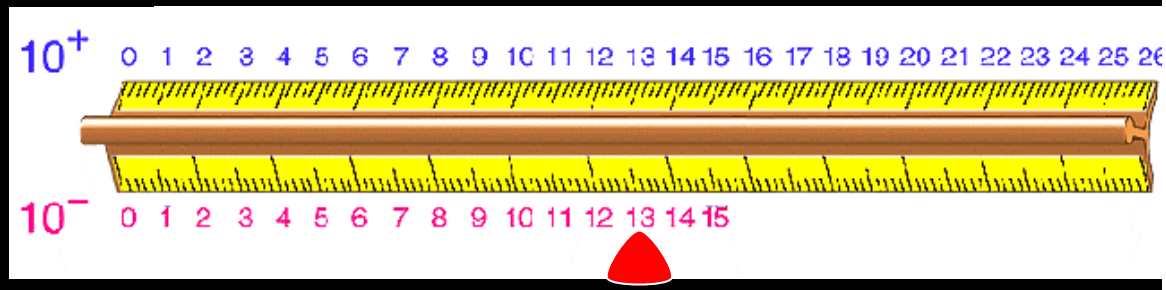


1 pm

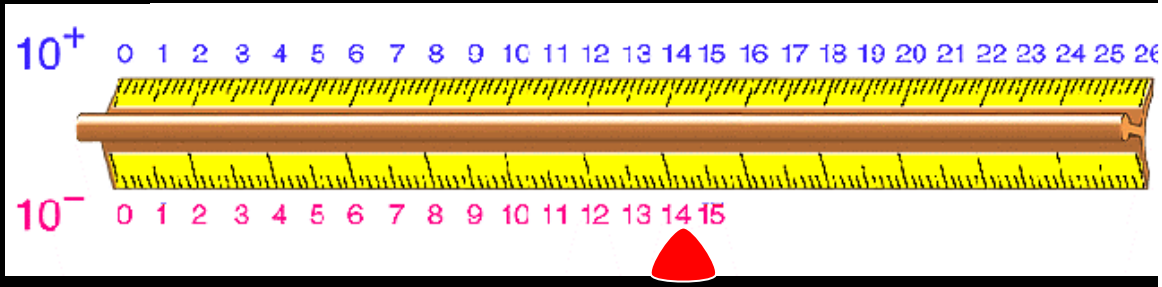


La scala delle grandezze:spazio





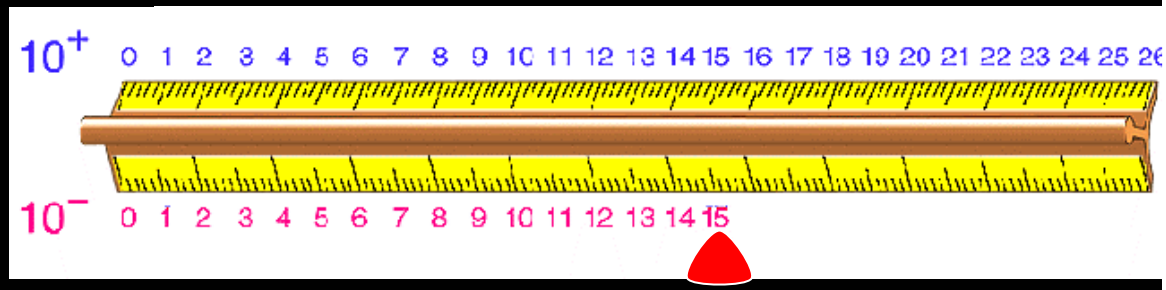
La scala delle grandezze:spazio



La scala delle grandezze:spazio

1 fm

ed entriamo nel mondo dei quark



La scala delle grandezze: tempo,spazio

tempo

Alcuni esempi:

10^{-3} sec = 1 msec	tempo di scatto di una macchina fotografica
10^{-6} sec = 1 μsec	tempi di deriva degli elettroni nei rivelatori a gas
10^{-9} sec = 1 nsec	la luce compie un percorso di 30cm
10^{-12} sec = 1 psec	vita media del mesone B
10^{-23} sec	vita media nei decadimenti forti

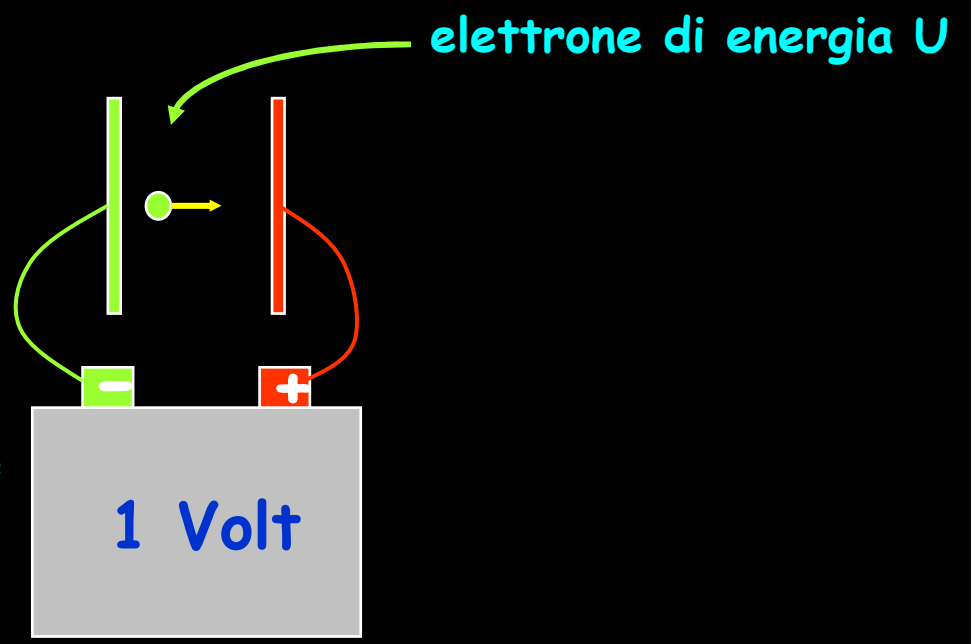
spazio

10^{-6} m = 1 μm	risoluzione dei rivelatori a stato solido
10^{-9} m = 1nm	lunghezza d'onda nel visibile
10^{-10} m =1 A	dimensione dell'atomo
10^{-15} m = 1 fm	dimensione del nucleone

La scala delle grandezze: energia

Unita' fondamentale

U = 1 eV = 1.6 x 10^{-19} Joule



1 keV	= 10^3 eV	raggi X
1 MeV	= 10^6 eV	2 x massa elettrone
1 GeV	= 10^9 eV	massa protone
1 TeV	= 10^{12} eV	LHC

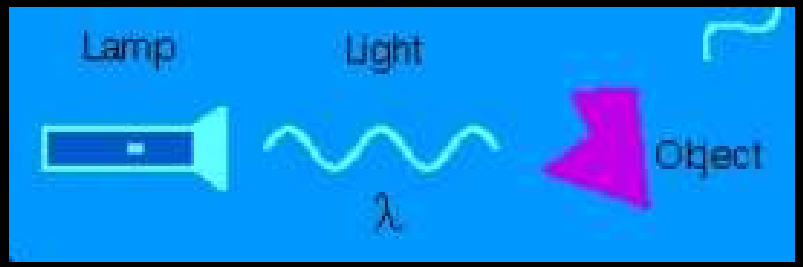
Dalla relazione di Einstein, $E=mc^2$ 1 eV/c^2 = 1.8 x 10^{-36} kg

Esempio: un uomo che fa jogging ha una energia di 10^{21} eV

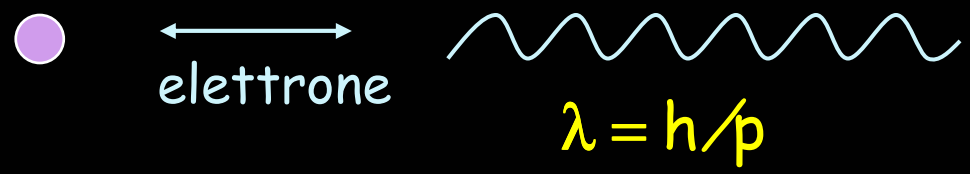
Con le correnti iniziali di LHC pero' il fascio avra' una energia pari a quella della *Ferrari GA2003* lanciata sul rettifilo tribune di Monza, e crescera' velocemente……

Strumenti di indagine: la sonda

All'aumentare del potere risolutivo richiesto dallo sperimentatore cambiano le caratteristiche delle sonde che possiamo utilizzare. In particolare aumenta l'energia e diminuisce quindi λ.



In meccanica quantistica le particelle hanno tutte una natura sia corpuscolare che ondulatoria



microscopi elettronici

primo esempio di strumento che utilizza particelle accelerate

Acceleratori di Particelle

Particelle accelerate possono essere prodotte

in natura

- Radiosotopi
- Raggi Cosmici

artificialmente

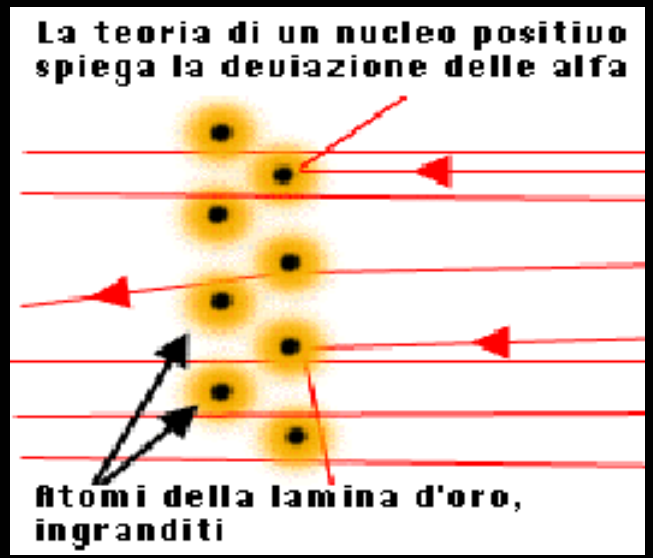
- Reattori nucleari
- Acceleratori di Particelle

Radioisotopi

Non vengono piu' utilizzati come sorgenti per la sperimentazione a causa della bassa energia delle particelle prodotte, ma rivestono un notevole interesse storico in quanto furono il primo strumento utilizzato per sondare la materia.

1896 Mme Curie scopre la radioattivita' naturale
1897 Thomson scopre l'elettrone
1907 Lord Rutherford e la sua equipe gettano le basi della fisica sperimentale moderna

Rivelatori (Geiger)

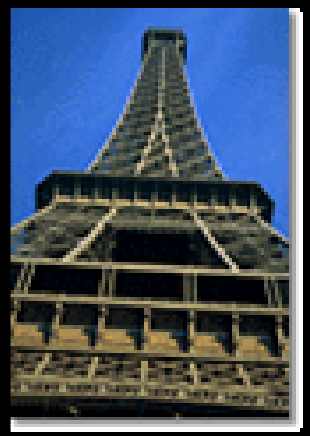


E.Rutherford: *Non sembra irragionevole sperare [...] che la radioattività [...] fornisca il mezzo adatto per ottenere informazioni sui processi che accadono all'interno dell'atomo».*

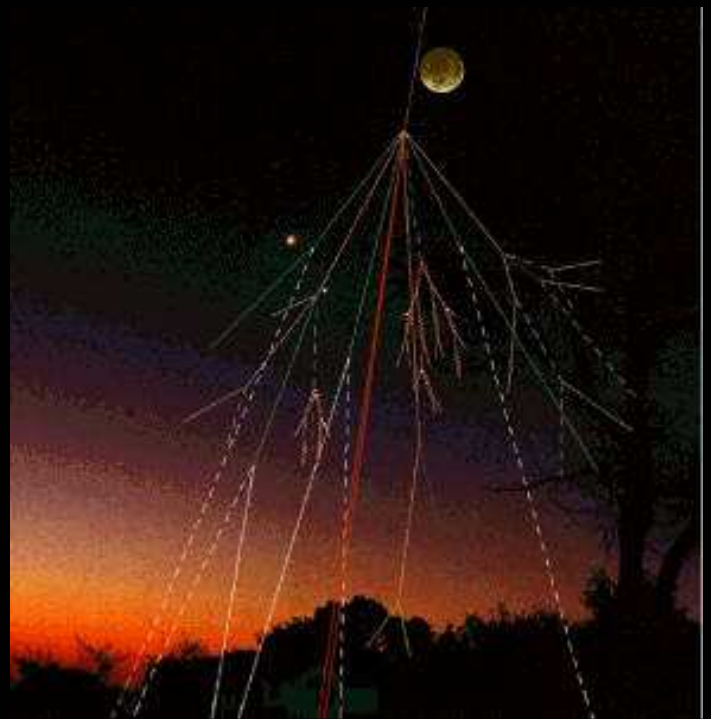
isotopo

….e scoprono con un esperimento di *scattering*, la struttura planetaria dell'atomo

Raggi Cosmici

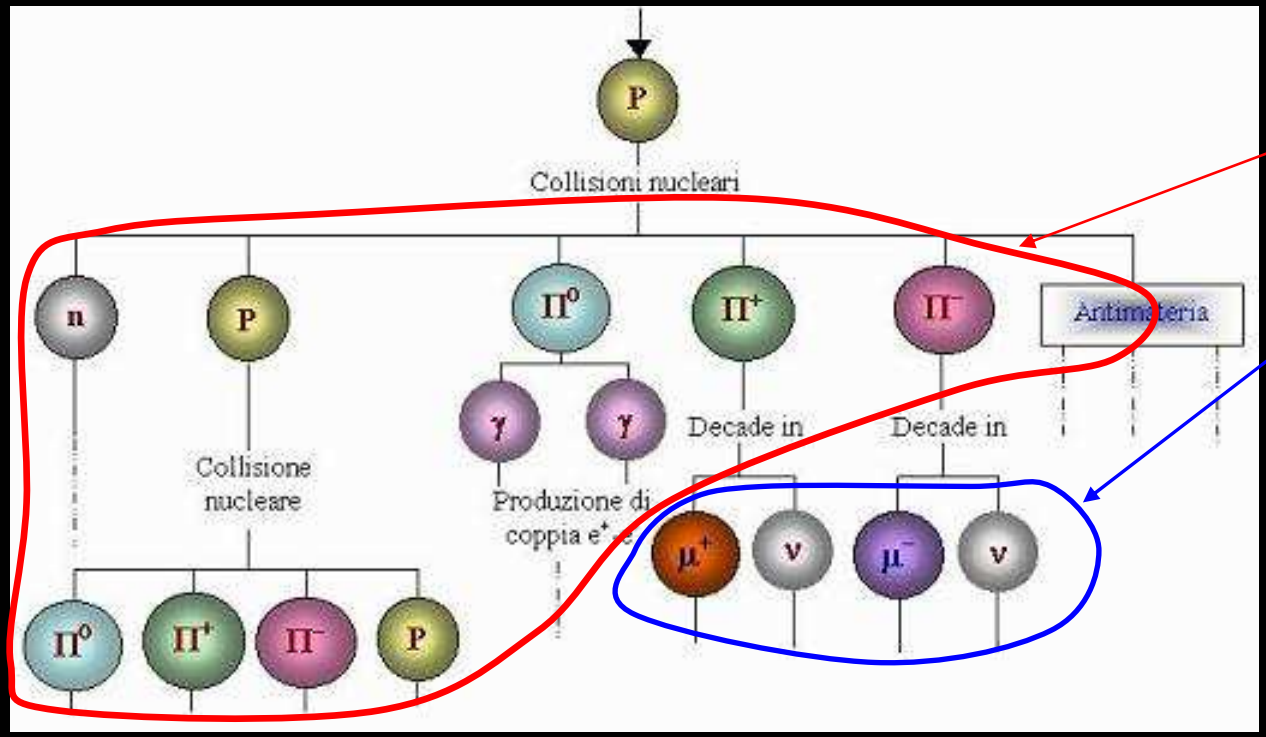


Nel 1910 lo scienziato Theodore Wulf portò un rivelatore per contare il passaggio di particelle cariche sulla cima della Torre Eiffel, e scoprì che contava un numero di particelle cariche maggiore di quante ne contava alla base della torre (dove sapeva che le particelle cariche sono prodotte dalla radioattività naturale delle rocce). Questa fu la prima evidenza dei raggi cosmici.



I raggi cosmici che colpiscono lo strato esterno dell'atmosfera sono detti raggi cosmici primari e sono principalmente protoni di alta energia. Nel loro rapido viaggio verso la superficie terrestre, essi collidono con gli atomi nell'aria, creando sciami di nuove particelle e di antiparticelle che costituiscono i raggi cosmici secondari. Questo fenomeno è all'origine della pioggia cosmica che investe la terra.

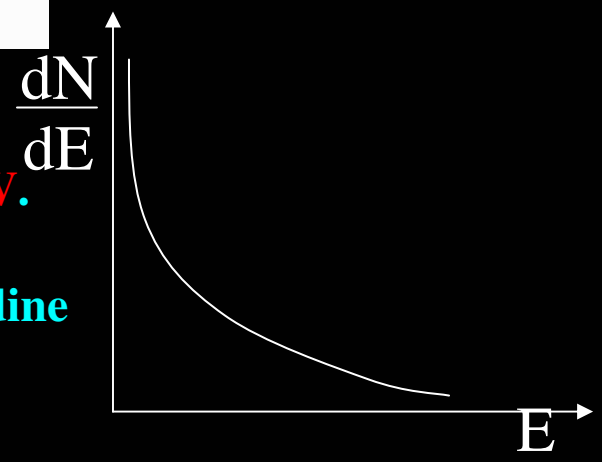
Raggi Cosmici (cont.)



Componente secondaria molle (30%) si ferma in meno di 1 m di assorbitore.

La componente dura (70%) puo' penetrare spessori maggiori (muoni) in ragione della sua energia.

Al livello del mare il flusso medio di particelle e' di 100 (particelle/m^2 sec sterad), con energia media di 2 GeV.



Sulla coda della distribuzione si arriva a primari dell'ordine di E=10^{20}eV, misteriosi giganti che arrivano da lontano (~200 milioni di anni luce)….

Raggi Cosmici (cont.)

I raggi cosmici hanno lo straordinario vantaggio di offrire allo sperimentatore sulla terra un fascio naturale di particelle in una banda di energia enorme ($10^9<E<10^{20}$eV), e il tutto GRATIS!!!
Si puo' fare (e si fa) moltissima sperimentazione con i raggi cosmici ma esistono anche limiti importanti (e invalicabili):

- **sono pochi *(per nostra fortuna!)***
- **…e quindi l'esperimento deve essere molto massivo (grosso e costoso)**
- **…e deve stare al riparo dal *noise* (e quindi in gallerie sotto terra)**
- **…e deve durare molto tempo (decine di anni)**
- **non si puo' selezionare banalmente la particella sonda**

Di fatto tutti gli esperimenti che utilizzano i raggi cosmici oggi non analizzano piu' problemi di fisica delle interazioni fondamentali in modo diretto ma concorrono nello studio di un nuovo campo di ricerca che ha preso il nome di *fisica astroparticellare*.

Acceleratori di Particelle

La storia degli acceleratori ha inizio negli anni *1925-30*, in seguito all'affermarsi della fisica nucleare come scienza sperimentale, grazie alle ricerche condotte da lord E. Rutherford. A J. D. Cockcroft, E. T. S. Walton e R. J. Van de Graaff si devono lo studio e la realizzazione dei primi acceleratori *elettrostatici*;

a G. I. Ising, R. Wideröe, D. H. Sloan e E. O. Lawrence, il principio di funzionamento e la costruzione degli acceleratori *lineari* a radiofrequenza, e del betatrone;

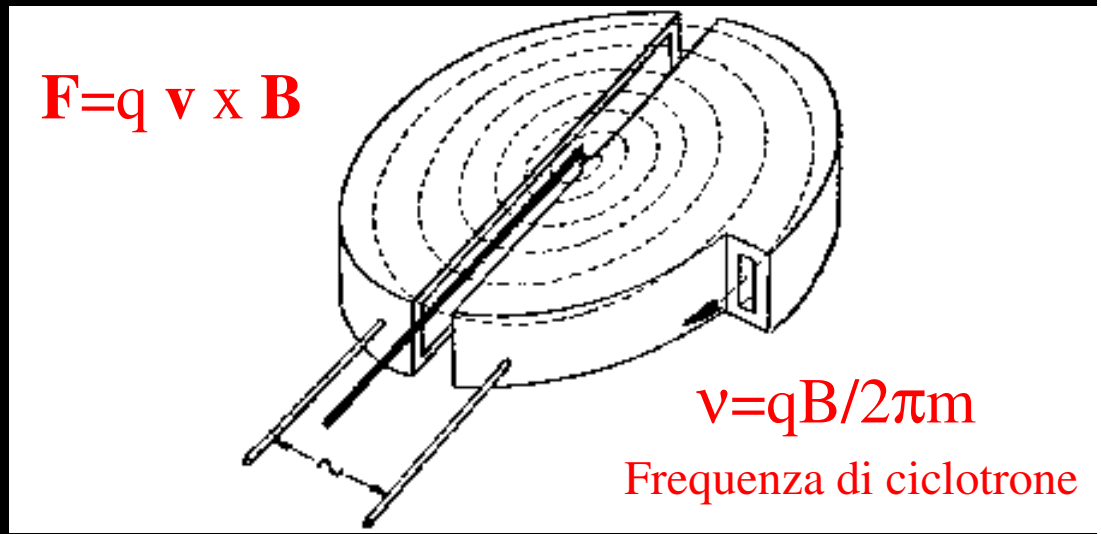
a E. O. Lawrence e M. S. Livingston, la creazione del primo ciclotrone e degli acceleratori *circolari* (*primo ciclotrone, premio Nobel per la fisica a Lawrence nel 1939, capostipite di tutti gli acceleratori circolari*). R. Wideröe e B.Tuschek furono poi i primi a proporre e costruire un collider (AdA e l'INFN).

Queste macchine, successivamente perfezionate, permisero di accelerare le particelle fino a un' energia di qualche decina di MeV.
La scoperta del principio di *stabilità di fase*, fatta da V. J. Veksler in U.R.S.S. e, indipendentemente, da E. M. McMillan negli U.S.A., consentì dopo il *1945* la costruzione degli acceleratori ad alta energia richiesti dall' esplorazione sempre più profonda del nucleo e della materia nucleare.
E le dimensioni degli acceleratori cominciano a crescere……

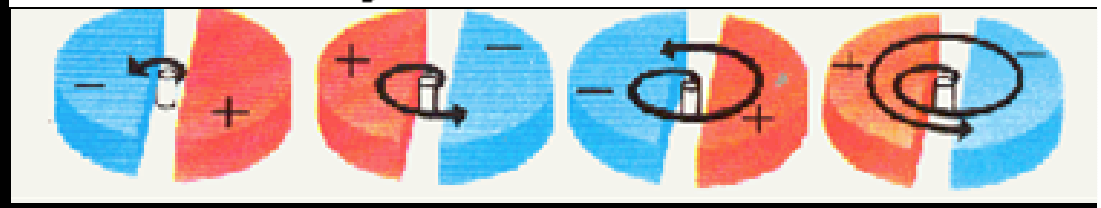
Principi di funzionamento

IL CICLOTRONE

Prendiamo gli acceleratori circolari….



La frequenza di ciclotrone e' costante. La particella acquista energia passando ad orbite via via piu' esterne (ogni semiorbita e' effettuata nello stesso tempo T=1/ν).



Queste macchine possono funzionare solo entro il limite non relativistico (v < 0.1c, E < 20MeV). Al di sopra il valore della massa cambia con la velocita' e occorre correggere

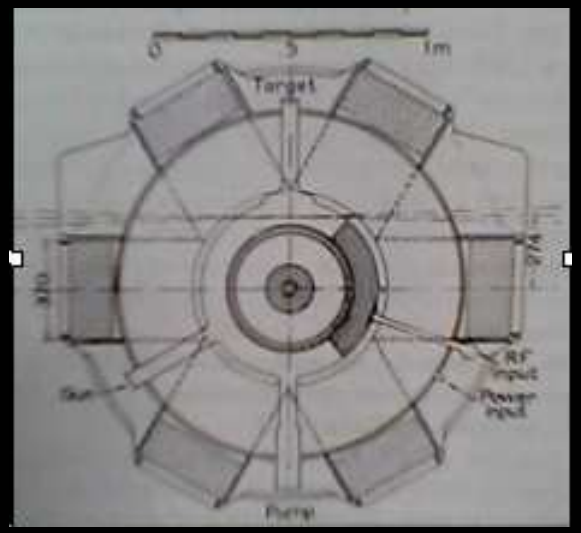
- o la frequenza di oscillazione del campo elettrico — SINCROCICLOTRONE
- o l'induzione del campo magnetico — SINCROTRONE

L'energia sale, i magneti sono distribuiti e l'accelerazione avviene per cavita' risonanti

Parentesi storica:

il betasincrotrone di Torino

Il nostro vecchio *sincro* rappresenta una macchina molto importante nel panorama della storia dello sviluppo degli acceleratori di particelle



Fu sviluppato da R.Wideroe nel 1953 su richiesta di G.Wataghin e L.Gonella, (e con l'appoggio di Colonnetti e dei medici delle Molinette) due anni dopo la fondazione del centro teorico e sperimentale di fisica di Torino, uno dei soci fondatori dell'INFN.

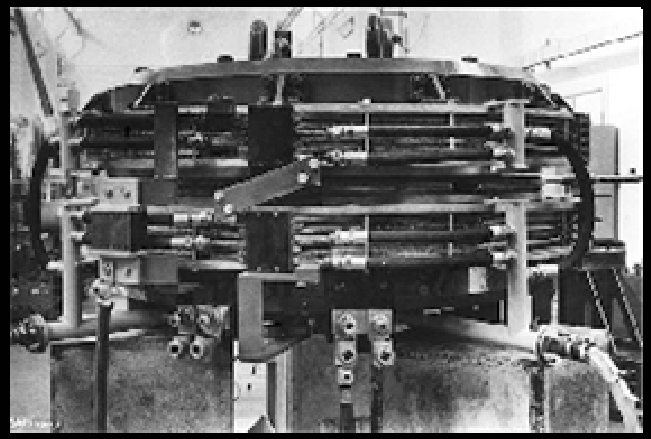
Finanziata 50% CNR+50% FIAT, era una macchina molto innovativa, perche' innestava la nuovissima tecnologia acceleratrice del sincrotrone, che aveva bisogno per funzionare di un iniettore, sulla ben nota tecnica del betatrone, che accellerava fino a 2 MeV gli elettroni, portati poi ad una energia di 100 MeV dal sincrotrone.

Resa operativa nel '59 formo' una intera generazione di fisici a Torino, in un momento in cui a Torino, all'avanguardia in Italia, si costruivano acceleratori, pagati dall'industria, e vi venivano a lavorare fisici importanti dagli USA (Debenedetti, Hanson ed altri).

Evoluzione degli acceleratori

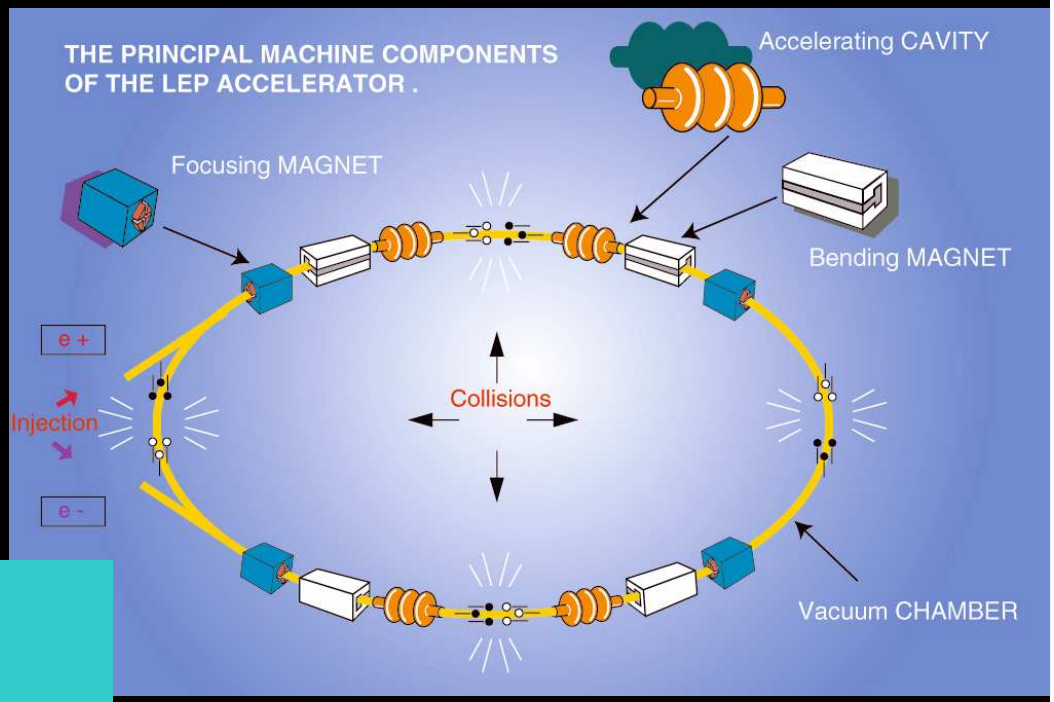
Dagli anni '50 ad oggi, con l'avvento delle macchine acceleratrici circolari, vi e' stato un costante aumento della circonferenza dell'anello dell'acceleratore, al fine di raggiungere energie sempre piu' elevate.

B.Tuschek



Ada, Frascati 1961, radius=0.5m

E ~ 0.3BR



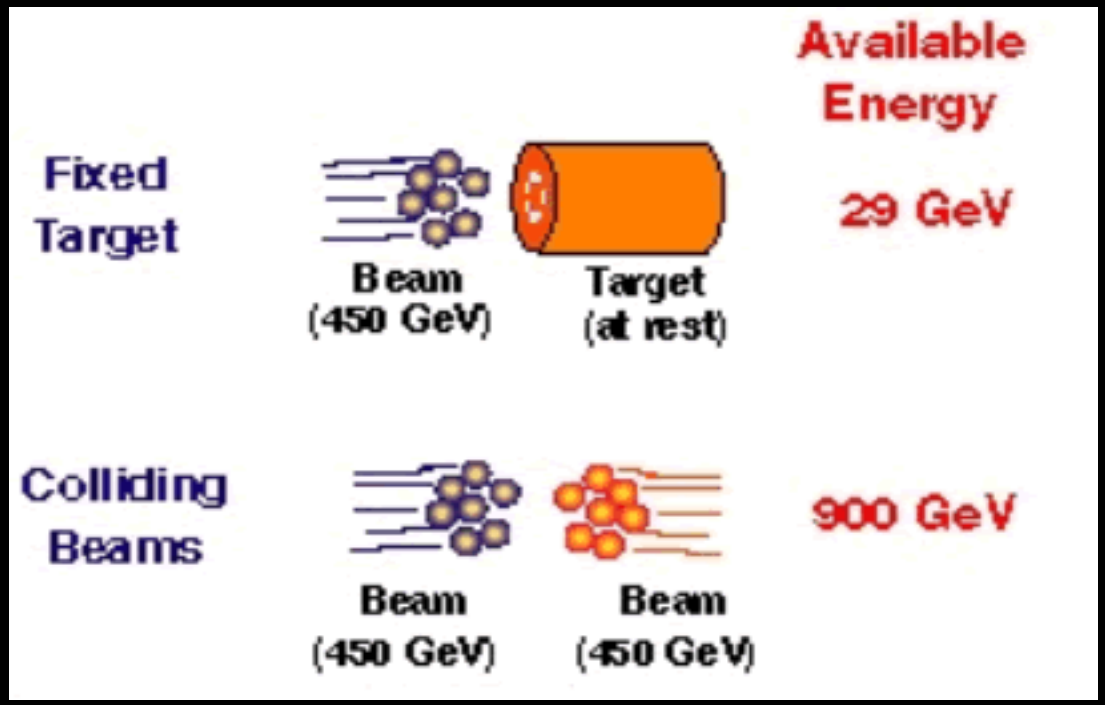
LEP, CERN 1989, radius=4300m

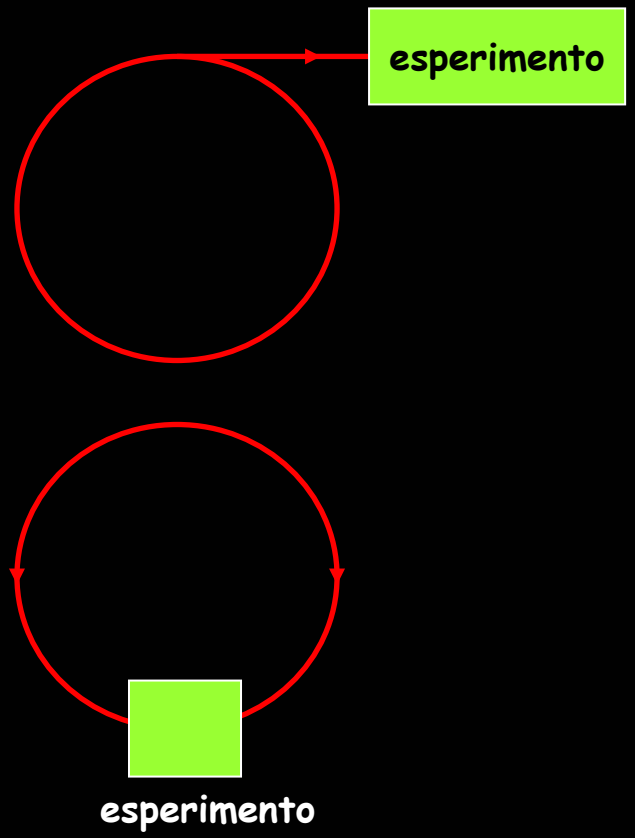
Elementi fondamentali:

1. Tubo a vuoto
2. Cavita' a radiofrequenza
3. Dipoli (magneti di incurvamento)
4. Multipoli (magneti di focheggiamento)

Evoluzione degli acceleratori

Sempre con questa finalita', gli esperimenti di fisica delle alte energie, hanno previlegiato set-up sperimentali su acceleratori di tipo *collider* rispetto agli esperimenti a *targhetta fissa*.





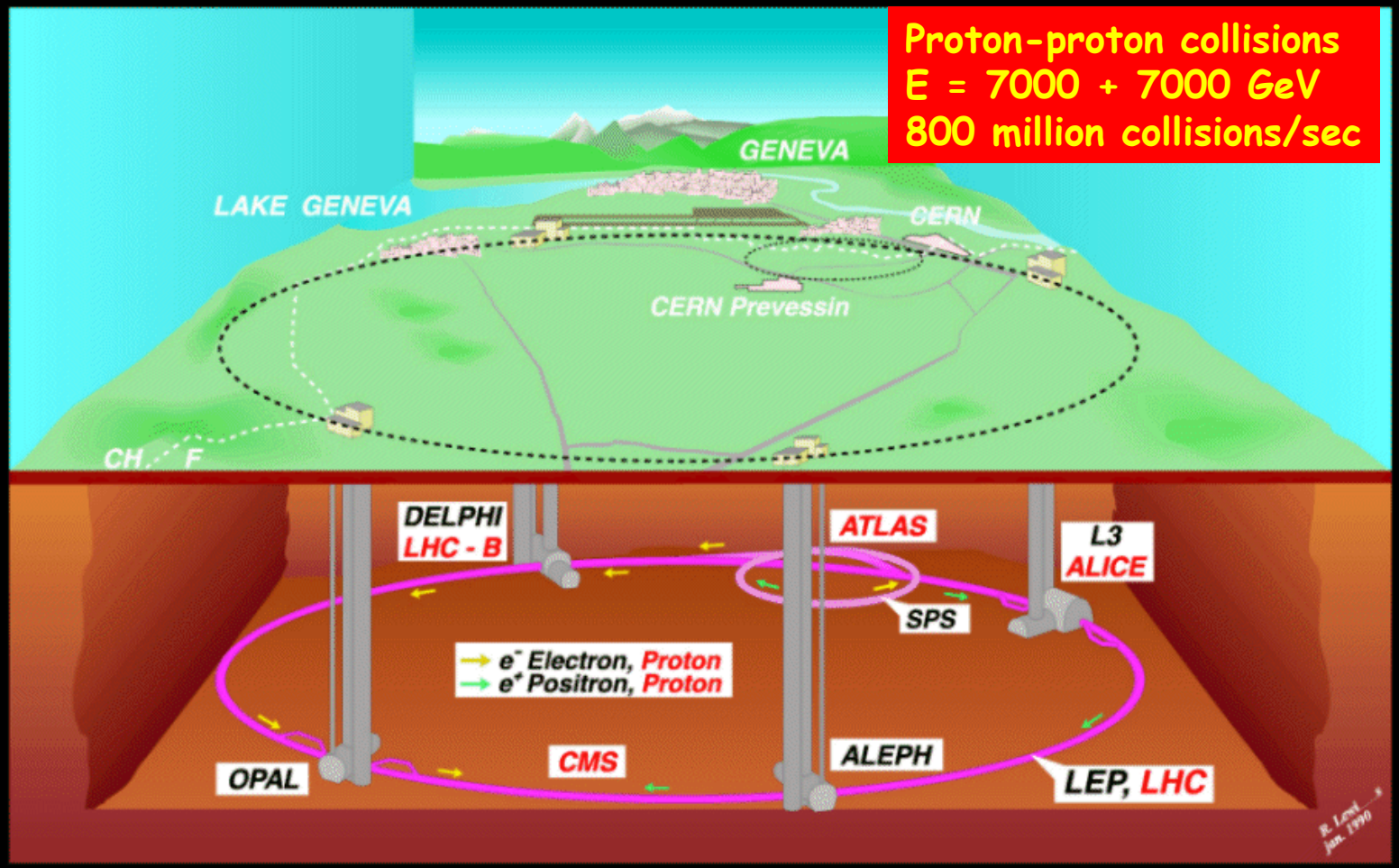
Parametri rilevanti di un acceleratore

- tipologia
- energia del fascio
- numero di bunch
- corrente integrata (legato al numero di particelle circolanti)
- corrente di picco (legato al numero di particelle in un bunch)
- dimensioni
- costi……

Potere risolutivo della sonda

statistica

Il piu' grande: LHC



$E \cong 0.3\ B\ R$

(Tev, T, km)

LHC:

18 km MB

2.5 km MQ

2 km di altri Quads

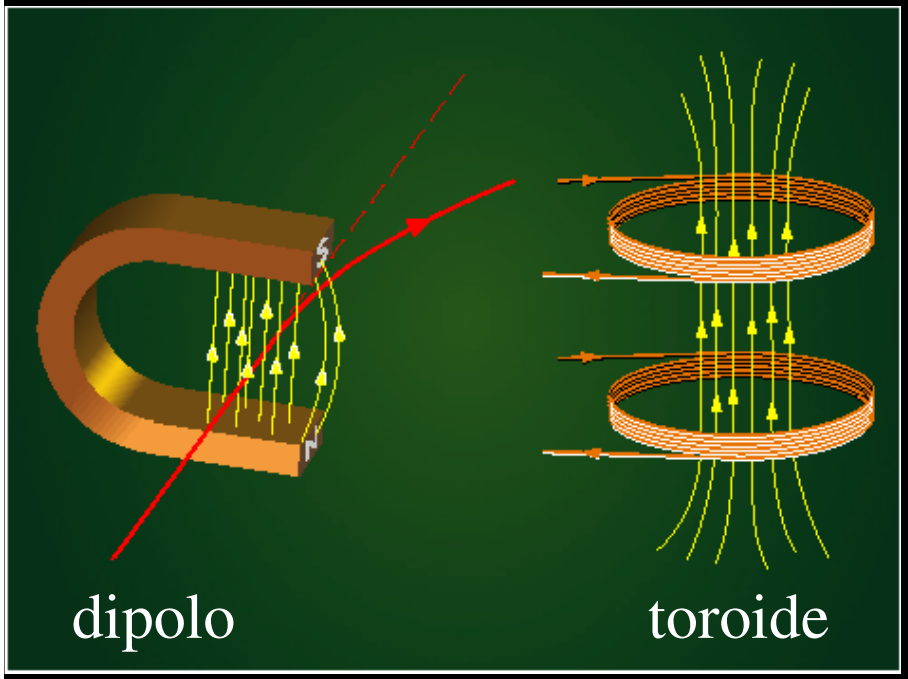
➢8000 magneti Sc!

$T=1.9^{o}K$

Cost = 3.000 MCHF

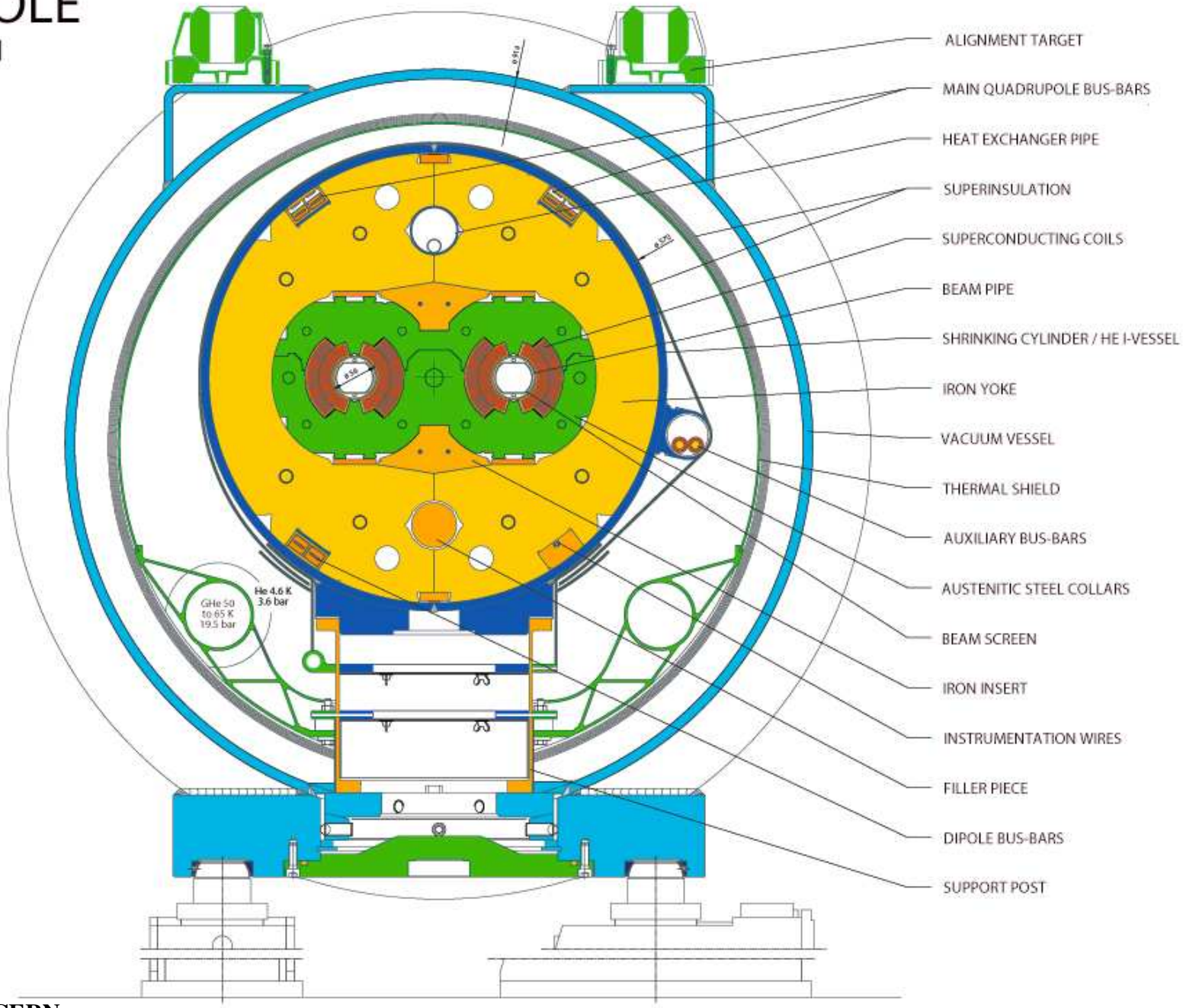
I dipoli di LHC

Esempi di campi magnetici



I dipoli di LHC
B perfetto a 10 ppm!
B=8 Tesla

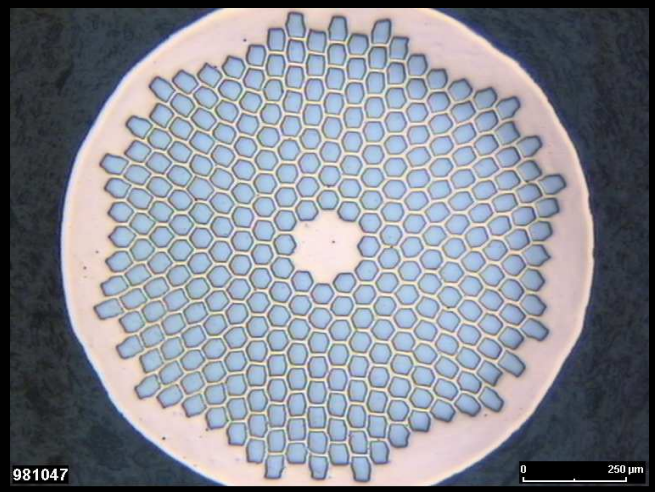
LHC DIPOLE
CROSS SECTION



Lucio Rossi - CERN

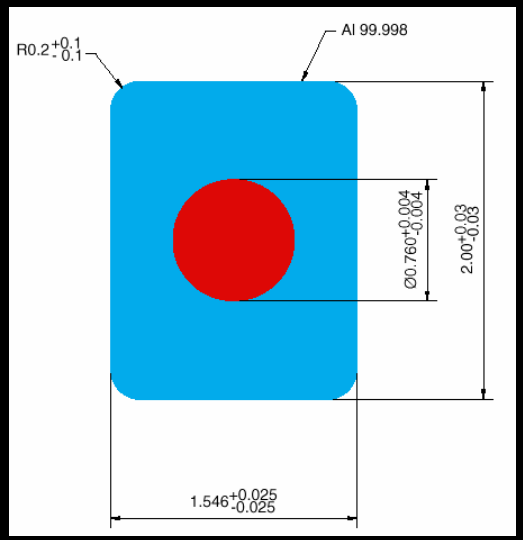
CERN AC/DI/MM — 06-2001

Fili e cavi superconduttori



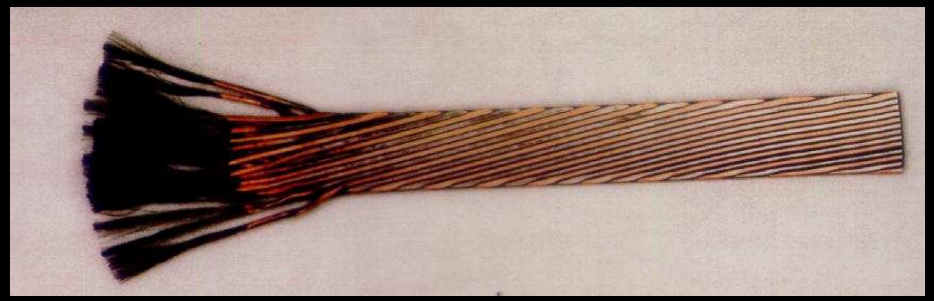
← Atlas Cu/NbTi wire

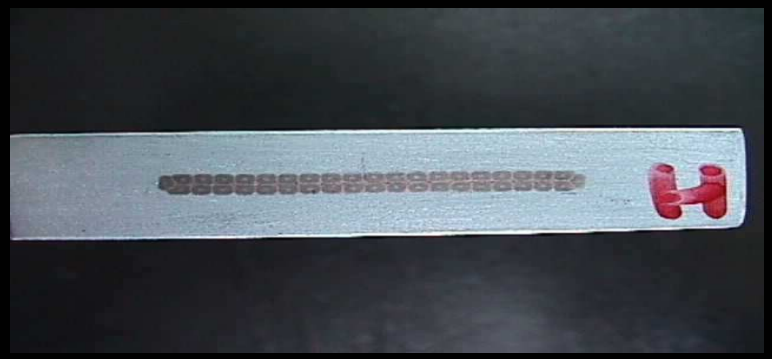
AMS-02 Cu/NbTi/Al →



Rutherford cable for
↓ LHC dipole

Atlas conductor (Rutherford coextr. with pure Al) ↓

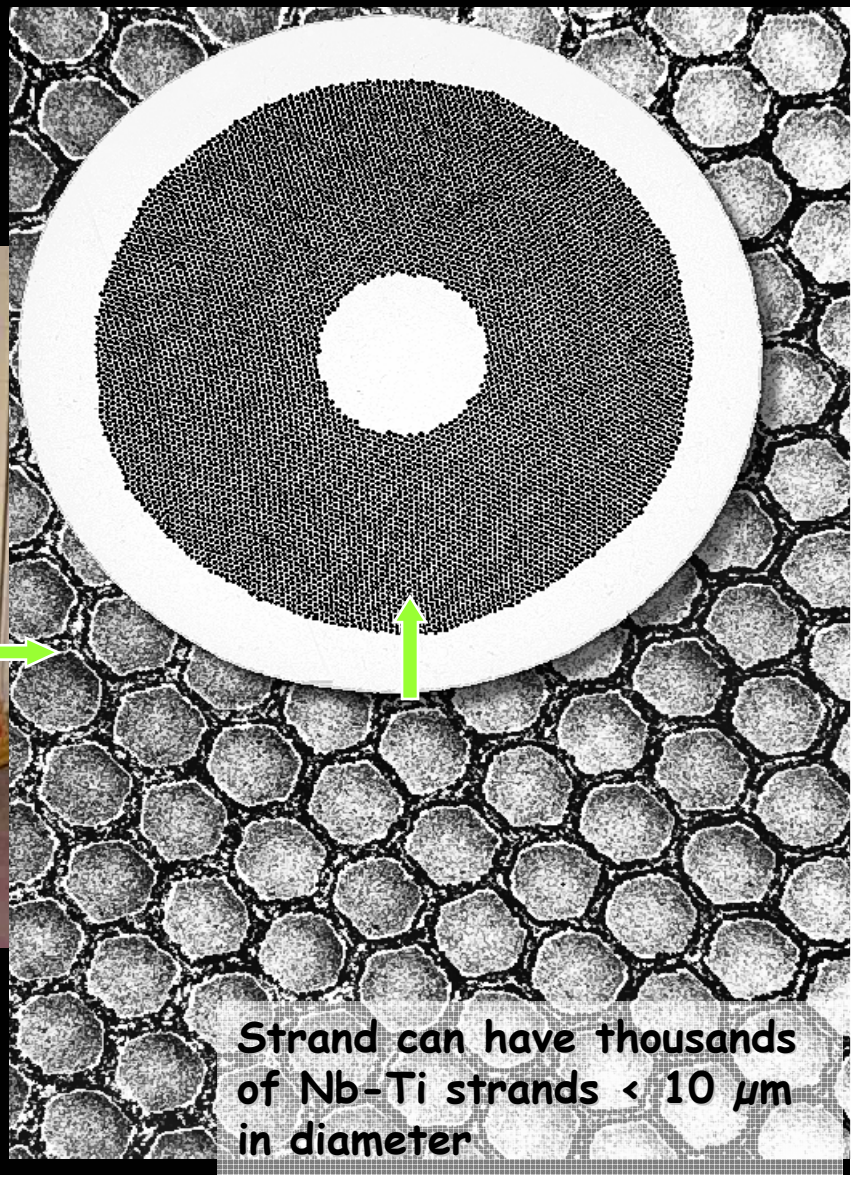


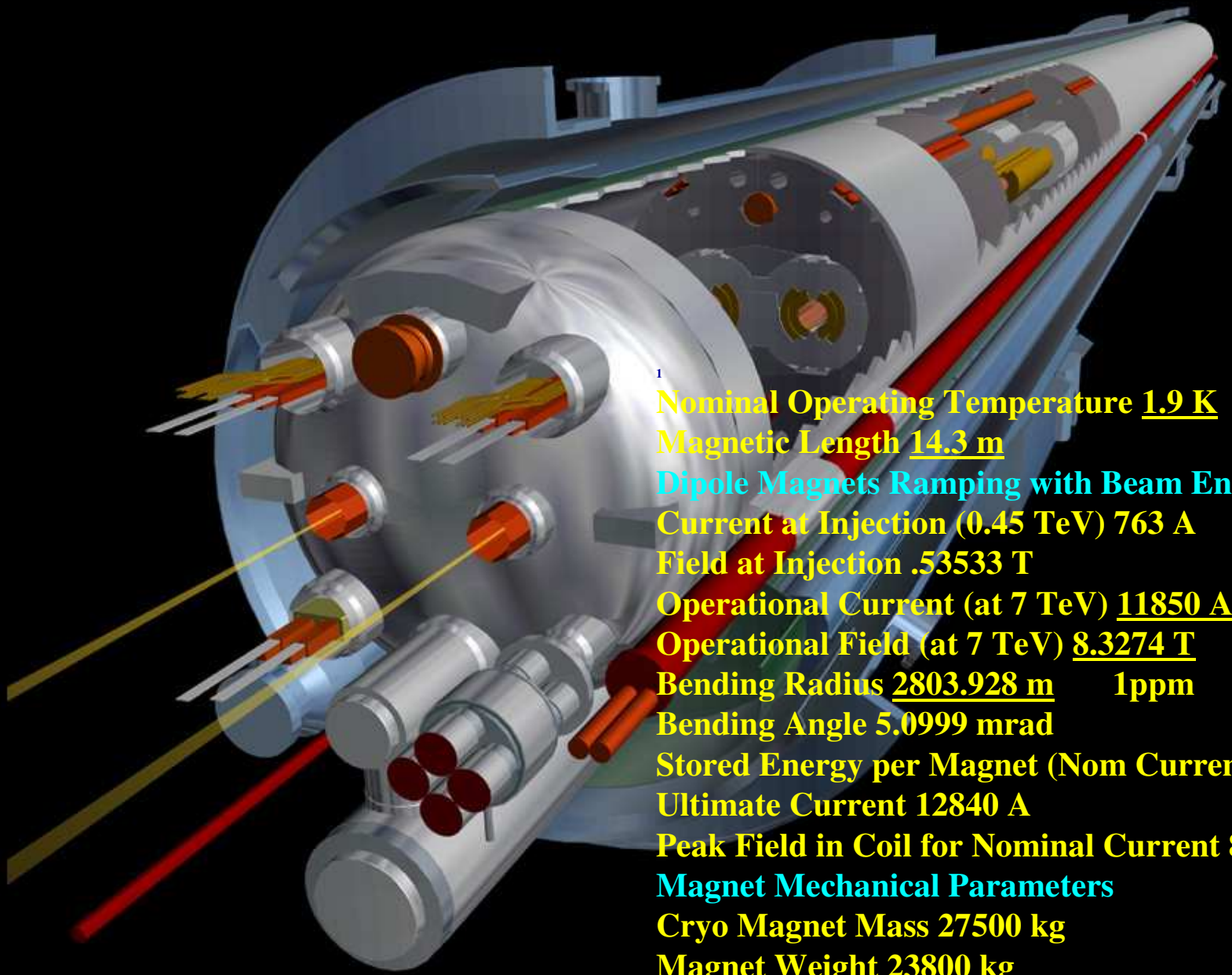


Fili e cavi superconduttori

Fabbricazione Sc:
9 mesi dal materiale al filo

Diventa un filo di 6 μm lungo 10km

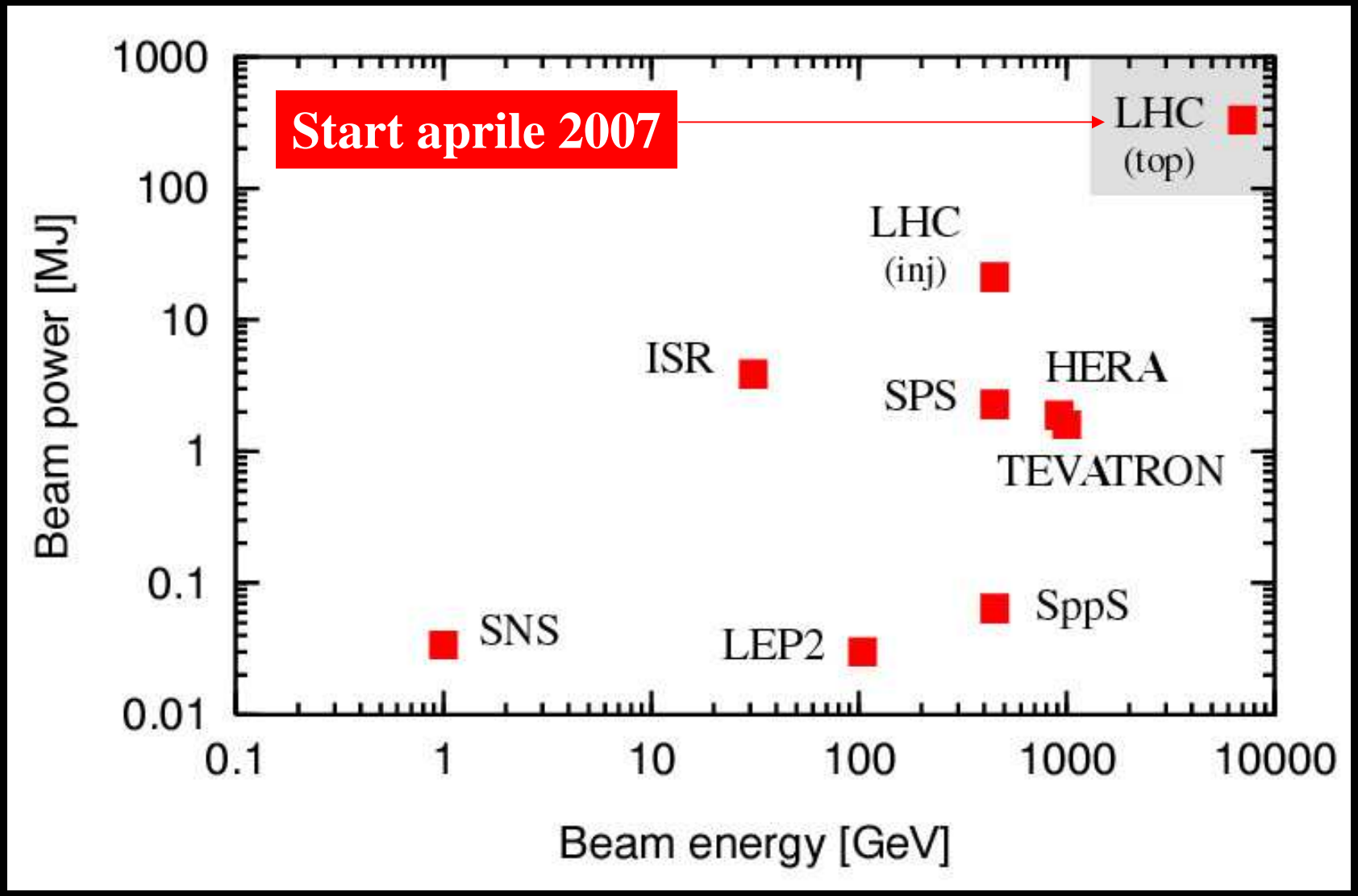




1

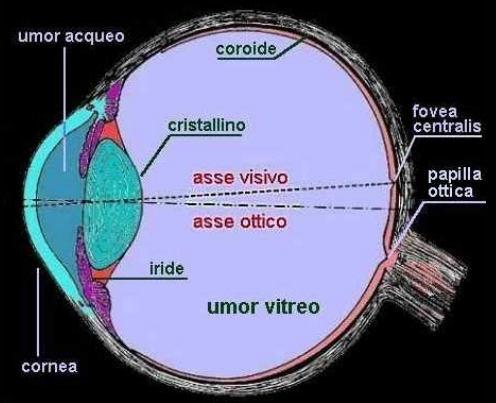
Nominal Operating Temperature 1.9 K
Magnetic Length 14.3 m
Dipole Magnets Ramping with Beam Energy at 1.9K
Current at Injection (0.45 TeV) 763 A
Field at Injection .53533 T
Operational Current (at 7 TeV) 11850 A
Operational Field (at 7 TeV) 8.3274 T
Bending Radius 2803.928 m 1ppm
Bending Angle 5.0999 mrad
Stored Energy per Magnet (Nom Current) 7161.54 kJ
Ultimate Current 12840 A
Peak Field in Coil for Nominal Current 8.76 T
Magnet Mechanical Parameters
Cryo Magnet Mass 27500 kg
Magnet Weight 23800 kg
Magnet Mechanical Length (overall) 14.497 m

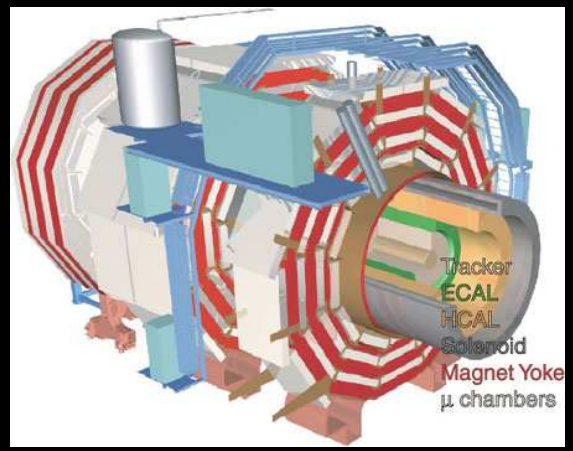
LHC startup


Start aprile 2007
LHC
(top)
LHC
(inj)
ISR
SPS
HERA
TEVATRON
SppS
SNS
LEP2
1000
100
10
1
0.1
0.01
0.1
1
10
100
1000
10000
Beam power [MJ]
Beam energy [GeV]

L'esperimento

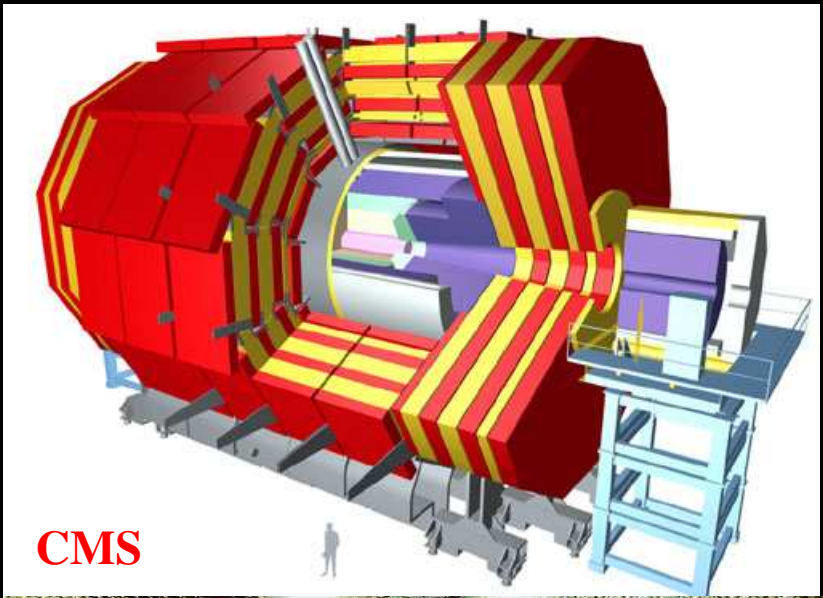
Riprendendo l'analogia con l'occhio umano, cosi' come il *meccanismo della visione* puo' essere considerato come composto di una parte *hardware* ed una *software*

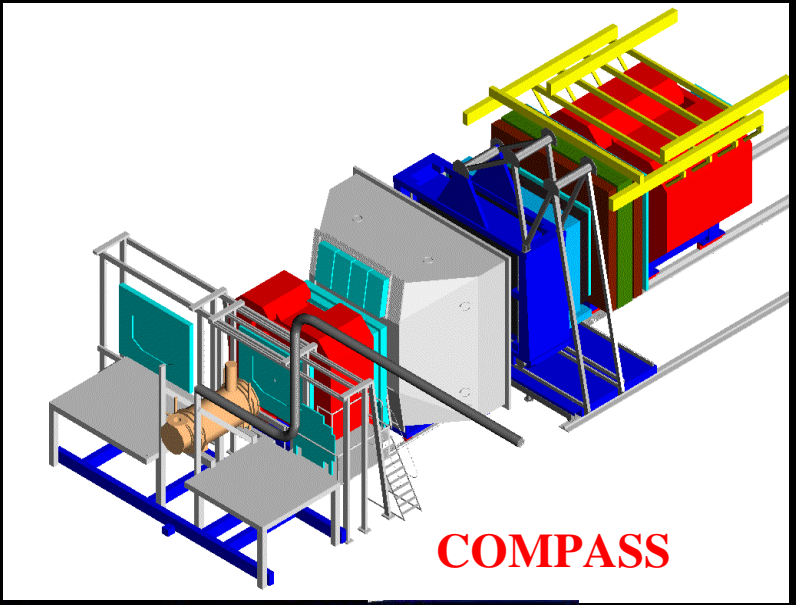




PS: il cervello comunque alla fine ci vuole lo stesso……

Tipologie di esperimenti





Esperimenti diversi

Tecniche di rivelazione spesso condivise

Cosa dobbiamo misurare?

Gli esperimenti devono determinare oggetti che entrano nelle equazioni teoriche proposte per spiegare i fenomeni, per esempio

Sezione d'urto	$N^{obs} = \sigma L \varepsilon$
Costante di decadimento	$\Gamma = 1 / \tau$
Massa Invariante	$M^2c^4=(\Sigma E)^2-(\Sigma pc)^2$

importante, ne riparleremo

$$\Gamma_{h^0} = \frac{\Gamma_{h^0 \to W^+W^-}}{\mathrm{Br}}(h^0 \to W^+W^-) = \Gamma^{SM}_{h^0} \times \frac{\mathrm{Br}^{SM}(h^0 \to W^+W^-)}{\mathrm{Br}(h^0 \to W^+W^-)} \times \frac{\sigma_{h^0 Z^0}}{\sigma^{SM}_{h^0 Z^0}}$$

Queste complesse quantita' sono sempre funzioni di poche e semplici osservabili fisiche come energia, impulso, massa delle particelle, numero di eventi per tipo, carica e spin.

Sono queste quantita' che l'esperimento deve saper misurare in ogni evento di interesse.

$E^2=p^2c^2 + m^2c^4$

Potenzialita' dell'esperimento

In ogni circostanza l'esperimento deve avere la capacita' di:

1. Contare o ricostruire momento, massa o energia delle particelle — RIVELATORI
2. Selezionare gli eventi di interesse — TRIGGER
3. Simulare il funzionamento dell'apparato — MONTECARLO
4. Avere la capacita' di calcolo adeguata — CALCOLO

Rivelatori

Rivelare particelle e' possibile costruendo oggetti che sfruttino i meccanismi di interazione tra particelle e materia.

In generale un rivelatore di particelle e' costituito da due elementi fondamentali:

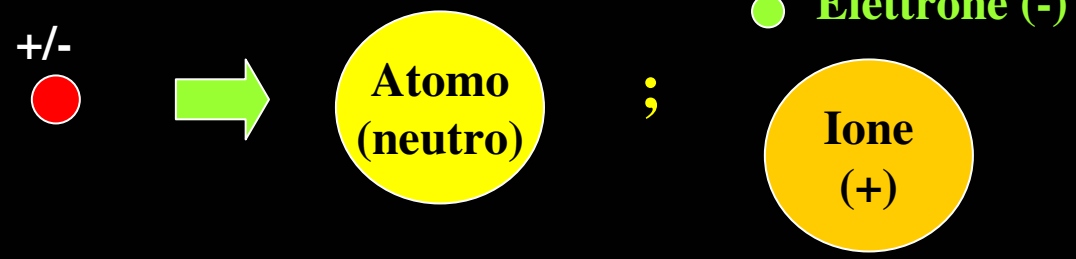
Meccanica	la parte massiva del rivelatore ove il passaggio della particella da' origine ad un segnale
Elettronica	il segnale viene opportunamente amplificato, memorizzato e sincronizzato

Questa dualita', caratteristica del rivelatore, si riflette in modo evidente nella organizzazione del nostro istituto.

Meccanismi di interazione: interazioni coulombiane

Sono tantissimi i meccanismi che governano le interazioni tra particelle e materia, e dipendono fortemente dal tipo di particella e dalla materia con cui interagiscono.

Le particelle cariche prevalentemente perdono energia *ionizzando* il materiale che attraversano



$$\frac{dE}{dx} = -K\frac{Z}{A}\frac{\rho}{\beta^2}\left(\ln\frac{2mc^2\beta^2 E_M}{I^2(1-\beta^2)} - 2\beta^2\right)$$

Formula di Bethe-Block
(dipende essenzialmente da β=v/c)

o *eccitando* atomi e molecole complesse che successivamente ritornano al loro stato fondamentale emettendo un fotone

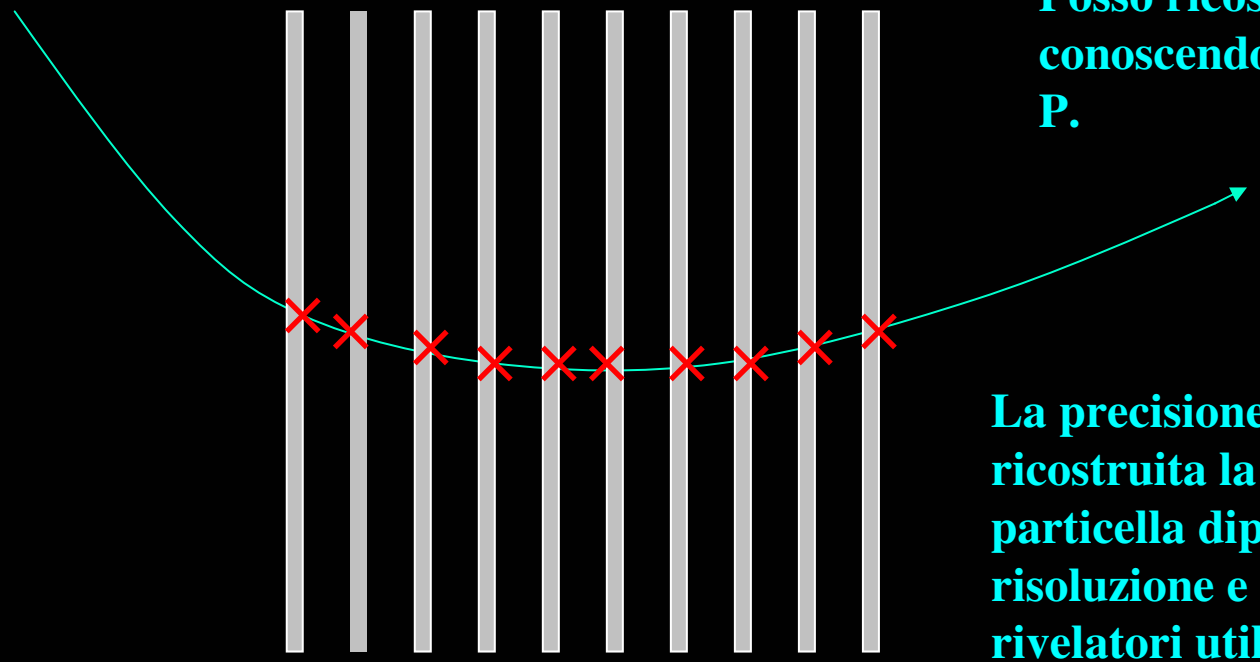
Questi sono i meccanismi utilizzati nella quasi totalita' dei rivelatori di tracciamento o di conteggio (rivelatori a gas, a semiconduttore, scintillatori e fibre scintillanti, camere a streamer etc. etc.). La particella (ad alto momento) prosegue il suo percorso quasi indisturbata dopo questi processi (*osservazione non distruttiva*).

Rivelatori di tracciamento

Cosa significa tracciare una particella

$P \cong 0.3\ B\ R$

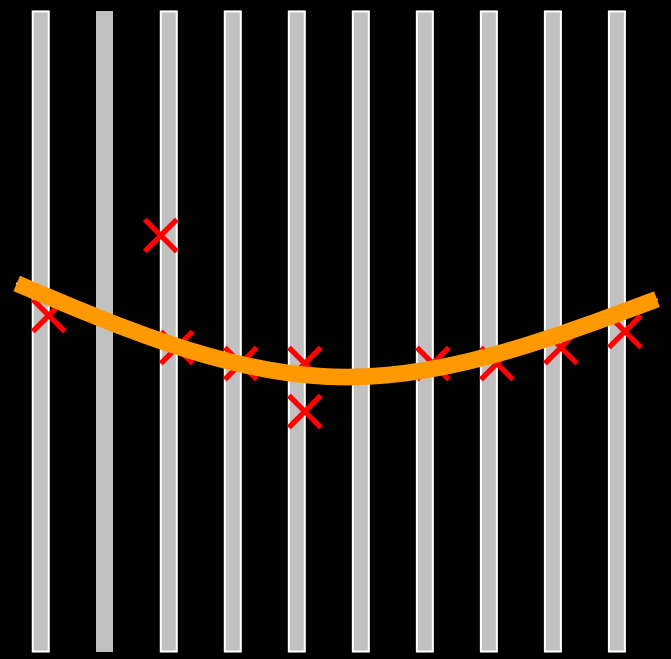
Posso ricostruire R, e, conoscendo B, determinare P.



La precisione con cui viene ricostruita la traccia della particella dipende dalla risoluzione e dal numero dei rivelatori utilizzati

Rivelatori di tracciamento

Nella realta', cio' che lo sperimentatore trova e'



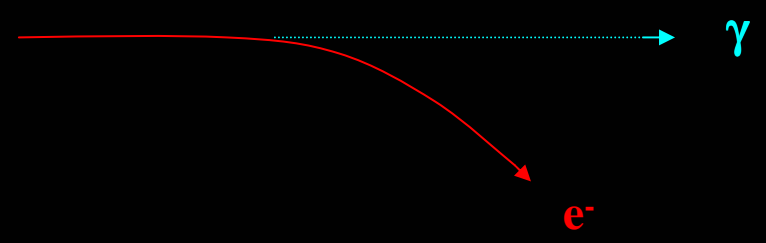
i rivelatori hanno una *risoluzione* (data dalla segmentazione), una *efficenza* $\varepsilon = N^{obs}/N^{vero}$ ed un *rumore*. Tutte queste quantita' devono essere valutate al fine di poter assegnare la corretta stima dell'errore.

$P \cong 0.3\ B\ R$

P avra' quindi un errore Δp, che bisogna saper valutare. Qualunque quantita' misurata sperimentalmente ha un errore, e l'esperimento deve essere disegnato sapendo qual'e' l'errore massimo che si vuole ottenere sulla misura finale.

Meccanismi di interazione: elettroni e fotoni

Gli elettroni, poiche' hanno piccola massa, oltre a perdere energia per interazioni coulombiane, perdono energia per irraggiamento $dE/dX=-E/X_0$.



Attraversando un materiale, i fotoni (γ), neutri:

E<1MeV interagiscono per effetto fotoelettrico $\gamma + A \rightarrow A^+ + e^-$

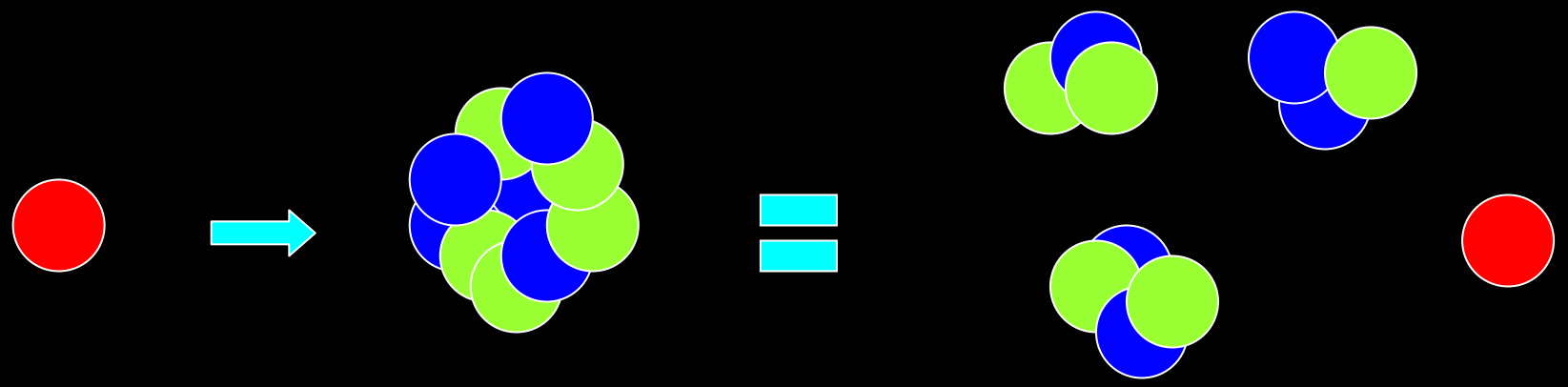
E~1MeV per effetto Compton $\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$

E>20MeV per creazione di coppie $\gamma \rightarrow e^- + e^+$

Questi elettroni a loro volta possa ionizzare il materiale ed essere a loro volta rivelati. Questi processi sono basilari nel funzionamento dei calorimetri elettromagnetici.

Meccanismi di interazione: adroni

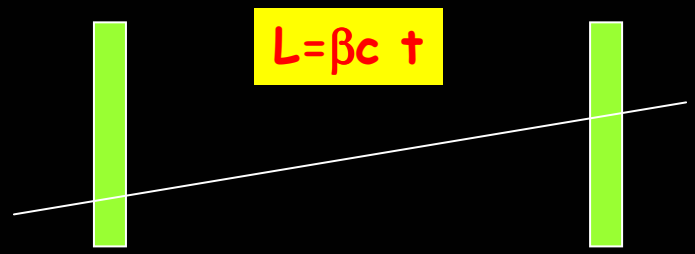
Oltre alle interazioni coulombiane (quando carichi) gli adroni (particelle che interagiscono per mezzo di interazioni forti (barioni e mesoni, p, n, Λ, π, K etc. etc.) con i nuclei degli atomi che costituiscono il mezzo attraversato.
L'interazione puo' portare alla frantumazione del nucleo dell'atomo bersaglio.



La possibilita' di misurare l'energia dei frammenti secondari limitando al massimo le perdite di energia dovute alla fuoriuscita di secondari neutri e di muoni, rende possibile la realizzazione di calorimetri adronici.

Identificazione di particelle

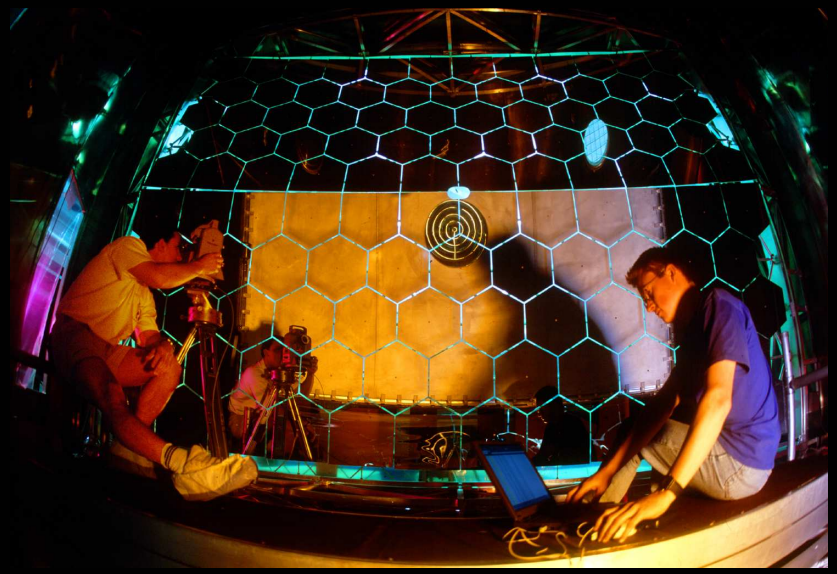
Tecnica del tempo di volo:
ho bisogno di buona risoluzione temporale del segnale (L=1m, E=1GeV, Δt=300ps)



Rivelatori Cerenkov: basati sull'omonimo effetto: quando una particella attraversa un mezzo ad una velocita' superiore a quella della luce nel mezzo, emette un cono di luce nel visibile e

$\cos\theta = 1/\beta n$

COMPASS



I rivelatori nell'esperimento

Rivelatore di muoni

Calorimetria elettromagnetica

Tracciamento Interno

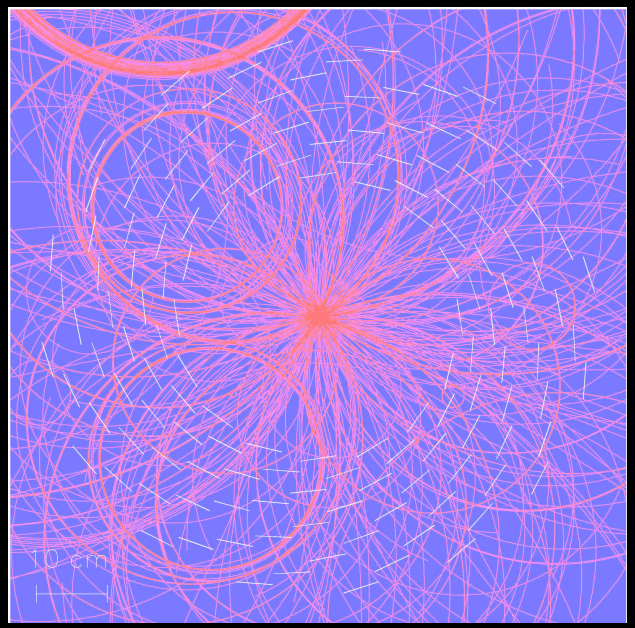
Calorimetria adronica

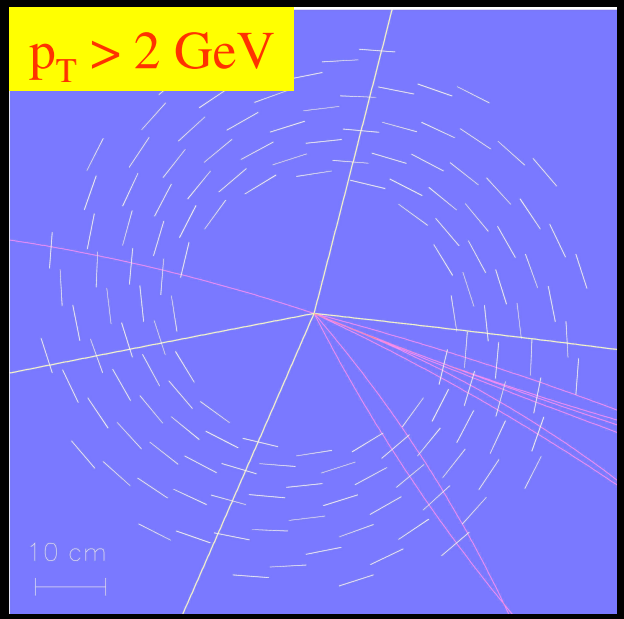
La densita' decresce allontanadosi dal centro della collisione

Trigger

Partiamo subito dalla complessita' piu' elevata: LHC e diamo un po' i numeri….

ATLAS / CMS		**Level-1 Output**	**100 kHz**
Event Rates: ~10^9 Hz		**Mass storage**	**10^2 Hz**
Event size: ~1 MB		**Event Selection:**	**~$1/10^{13}$**





Ecco perche' e' importante selezionare. Ma attenzione: non si deve rischiare di buttare via eventi che potrebbero rivelare nuove tipologie di eventi.

Simulated H→4m event + 17 minimum-bias events

FIRST-LEVEL TRIGGER OVERVIEW

Muon detector signals

Calorimeter signals

New data every 25 ns

BUSY signals

Search for **high-p_T:**

1. **muons**
2. **electrons/photons**
3. **taus/hadrons**
4. **jets**

Calculate:

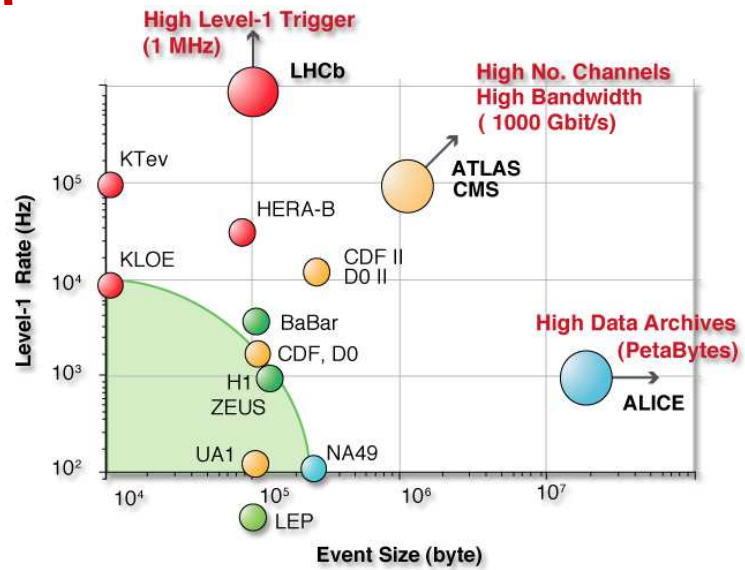
- ΣE_T
- **missing E_T**

Form trigger decision for each BC based on combinations of above

First-level Trigger

Decision every 25 ns
Latency ~few μs

Yes/No



Montecarlo

E' un metodo di indagine statistica volto a determinare le probabilita' di vari esiti possibili di uno stesso evento, in base a conteggi dell'evento stesso.
Programmi di montecarlo vengono scritti al fine di

- valutare l'efficenza dell'apparato rispetto ad una determinata classe di eventi

- confrontare modelli teorici con l'osservazione sperimentale

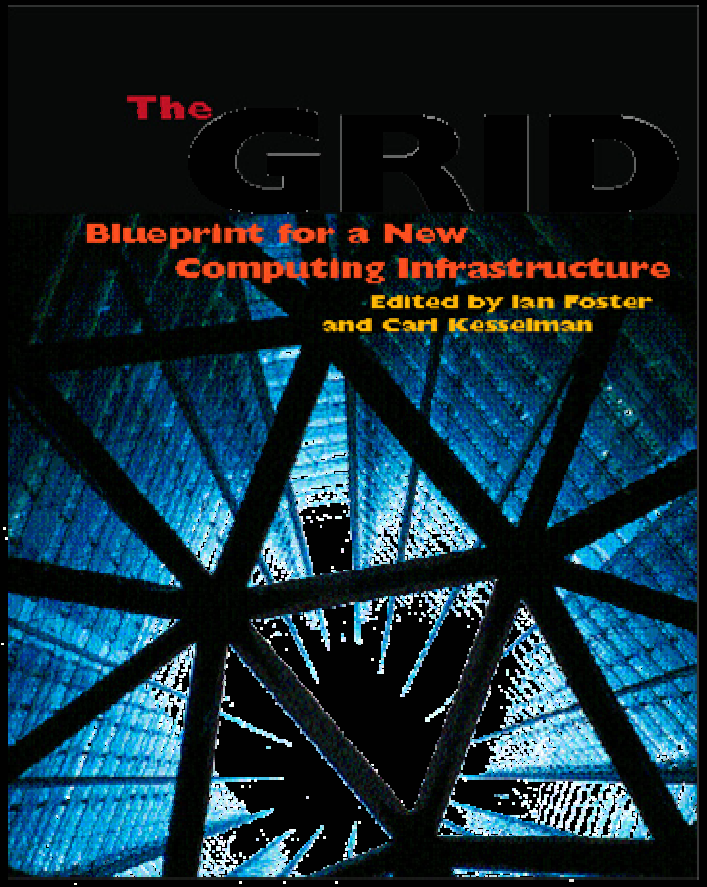
La complessita' hardware degli esperimenti e' cresciuta di pari passo con la complessita' delle analisi dei dati che fanno uso di questi programmi di simulazione.

Lo sviluppo di programmi di montecarlo sempre piu' complessi e' stato uno degli elementi chiave del progresso nelle analisi dei dati negli ultimi 20 anni (e incidentalmente il mondo della finanza ha utilizzato molto di recente le metodologie sviluppate in questo campo dai fisici delle particelle -> *econofisica)*.
Ricadute importanti sono anche avvenute nel settore medico (*radioterapia*).

Calcolo

Gli esperimenti moderni, grazie alla complessita' e alla mole di dati prodotti, che devono essere analizzati da utenze distribuite in tutto il mondo (la High Energy Physics e' globalizzata da tempo….) pone nuovi orizzonti alle richieste di calcolo.

Un esperimento come CMS crea 0.1GB/sec di dati che devono immediatamente essere accessibili agli utenti



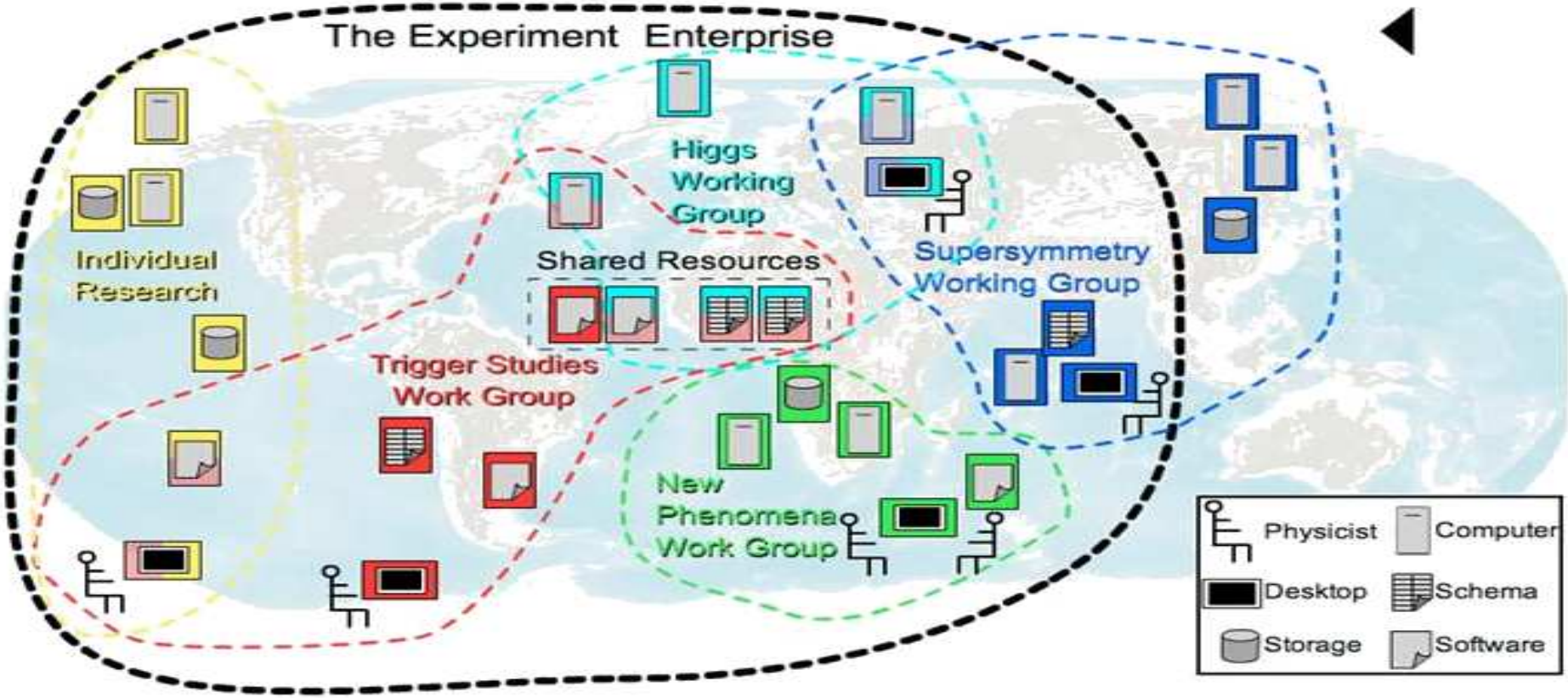
Nasce la GRID, un concetto introdotto da Ian Foster e Karl Kesselman

È un "paradigma" di utilizzo delle risorse distribuite

Una definizione di Grid

Grid è l'insieme delle tecnologie software che consentono *la condivisione di risorse e la risoluzione coordinata di problemi nell'ambito di organizzazioni virtuali multi istituzionali, dinamiche e scalabili*

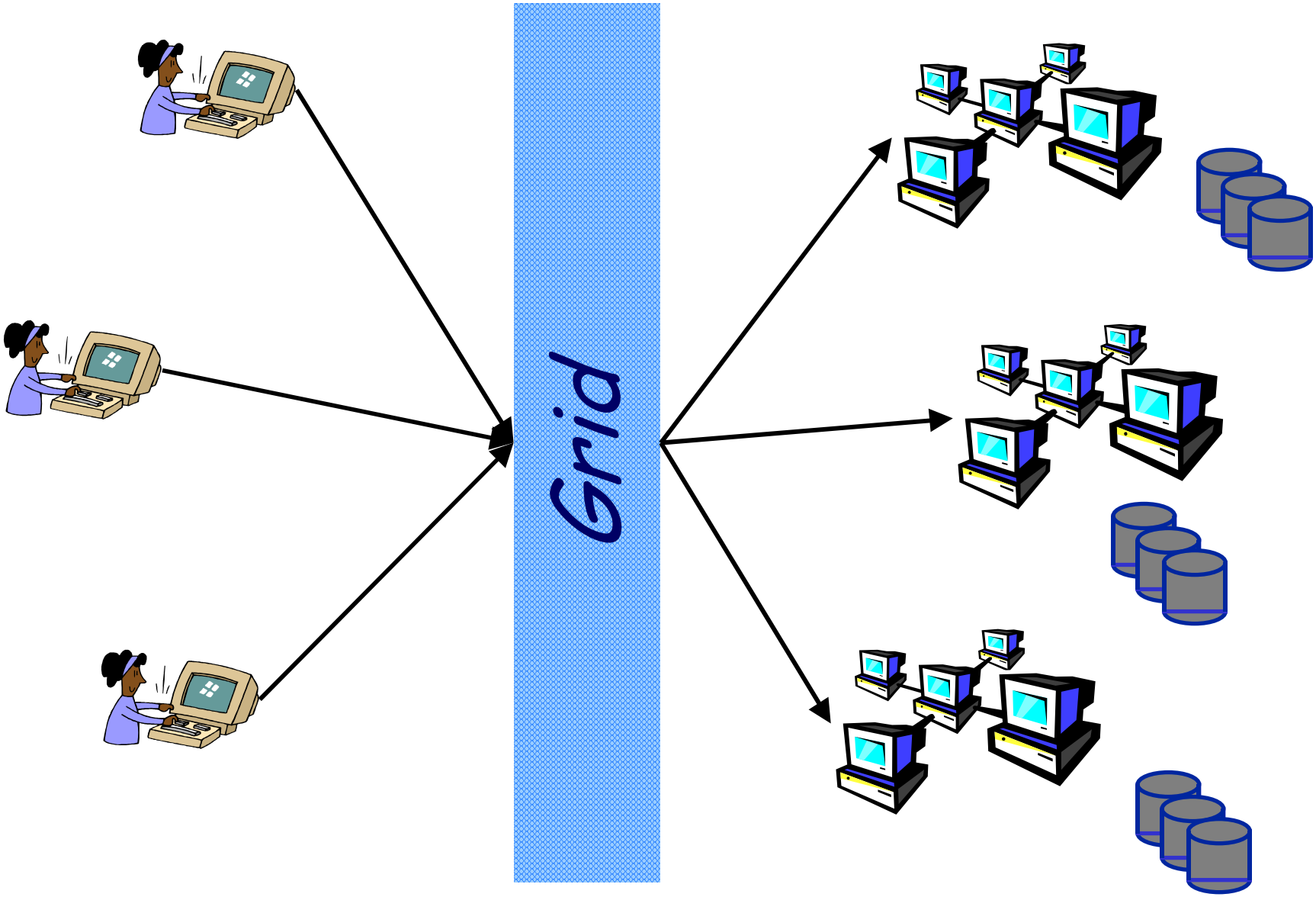
[I Foster]



Un parallelo: la rete elettrica

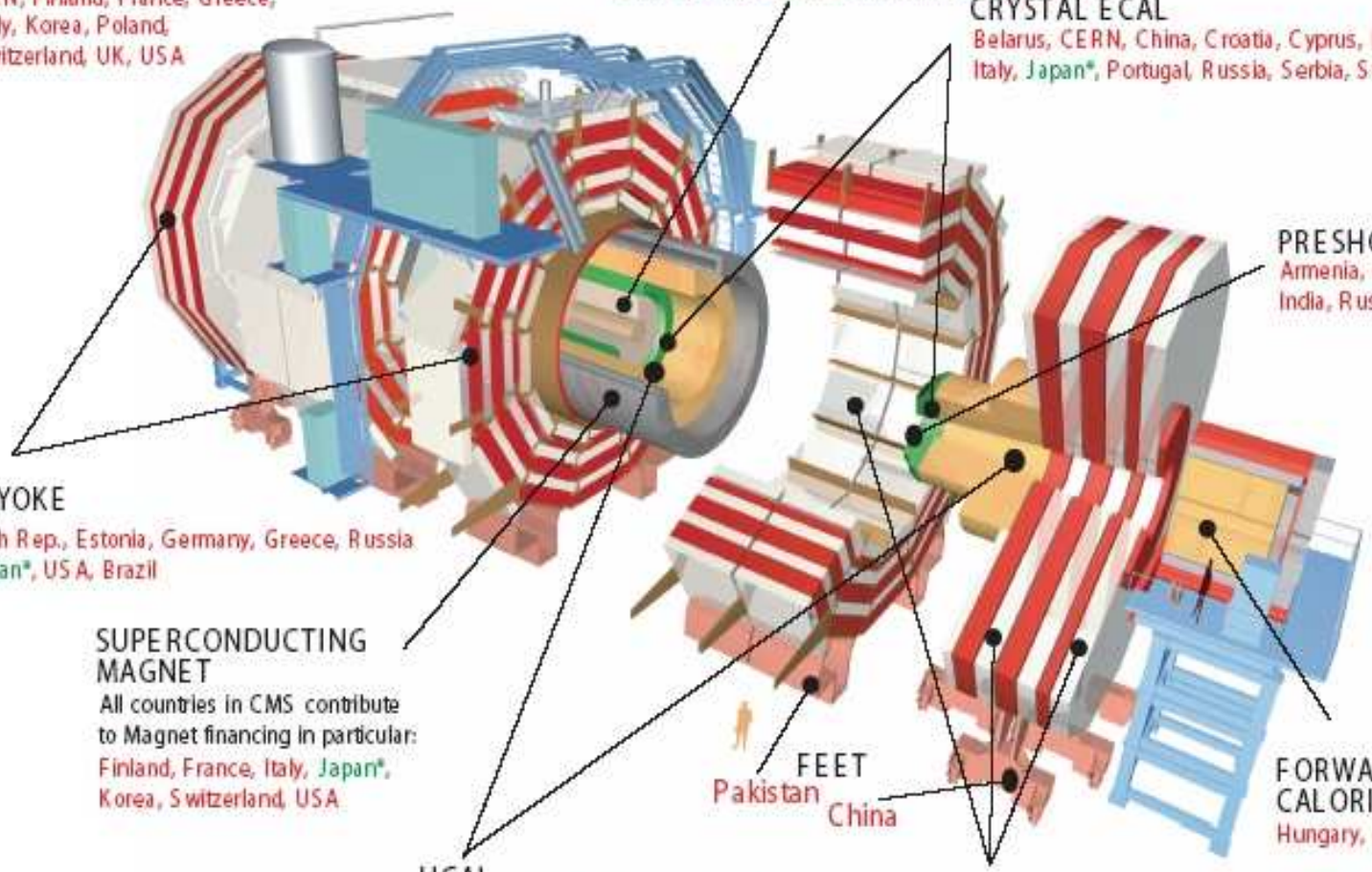
La rete elettrica	La Grid Computazionale
Richiesta di risorse (potenza: KWatt installati)	Richiesta di risorse (CPU, disco, ecc…)
Si inserisce la spina di un apparecchio elettrico	Si collega alla rete un computer
Si usa l'apparecchio: non è necessario sapere da dove arriva l'energia elettrica!!!	Si usa il computer: non è necessario sapere da dove arrivano le risorse!!!
La manutenzione è a carico del fornitore	La manutenzione e' a carico del fornitore

Accesso alle risorse con Grid



CMS Collaboration

36 Nations, 160 Institutions, 2008 Scientists and Engineers (November 2003)



TRIGGER & DATA ACQUISITION
Austria, CERN, Finland, France, Greece, Hungary, Italy, Korea, Poland, Portugal, Switzerland, UK, USA

TRACKER
Austria, Belgium, CERN, Finland, France, New Zealand Germany, Italy, Japan*, Switzerland, UK, USA

CRYSTAL ECAL
Belarus, CERN, China, Croatia, Cyprus, France, Ireland Italy, Japan*, Portugal, Russia, Serbia, Switzerland, UK, USA

PRESHOWER
Armenia, Belarus, CERN, Greece, India, Russia, Taipei, Uzbekistan

RETURN YOKE
Barrel: Czech Rep., Estonia, Germany, Greece, Russia
Endcap: Japan*, USA, Brazil

SUPERCONDUCTING MAGNET
All countries in CMS contribute to Magnet financing in particular: Finland, France, Italy, Japan*, Korea, Switzerland, USA

FEET

FORWARD CALORIMETER
Hungary, Iran, Russia, Turkey, USA

HCAL
Barrel: Bulgaria, India, Spain*, USA
Endcap: Belarus, Bulgaria, Russia, Ukraine
HO: India

MUON CHAMBERS
Barrel: Austria, Bulgaria, CERN, China, Germany, Hungary, Italy, Spain,
Endcap: Belarus, Bulgaria, China, Korea, Pakistan, Russia, USA

Total weight	:	12500 T
Overall diameter	:	15.0 m
Overall length	:	21.5 m
Magnetic field	:	4 Tesla

* Only through industrial contracts