

Appunti di Fisica Moderna

(la fisica delle particelle elementari)



Febbraio 2010

- La crisi della Fisica Classica: Meccanica Quantistica
- Alla ricerca delle Particelle Elementari
- Il Modello Standard: il progetto LHC al CERN
- Fisica e società

Pasquale Di Nezza

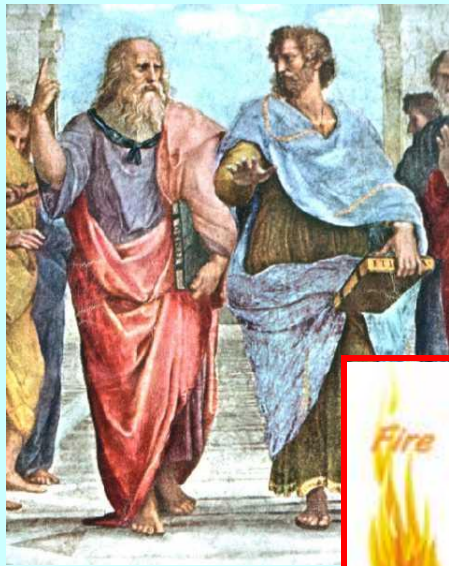
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



Di cosa è fatta la "materia"

l'Universo, noi stessi, tutto ciò che ci circonda ... e perché!

La conoscenza attuale è frutto di secoli di studi ...



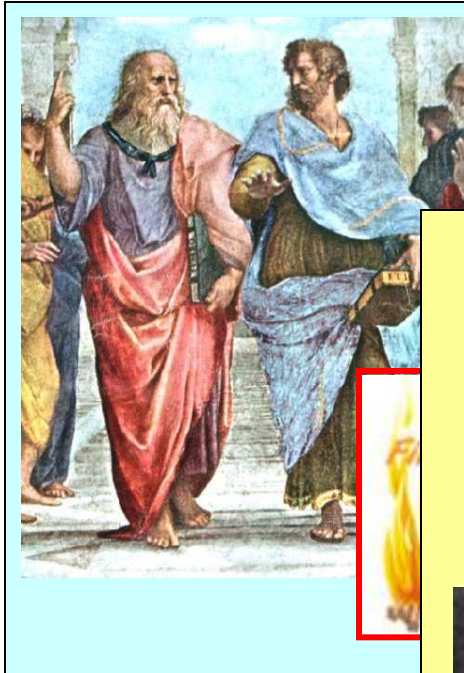
I filosofi greci pensavano che esistessero 4 elementi fondamentali



Di cosa è fatta la "materia"

l'Universo, noi stessi, tutto ciò che ci circonda ... e perché!

La conoscenza attuale è frutto di secoli di studi ...



I filosofi greci pensavano che esistessero 4 elementi fondamentali

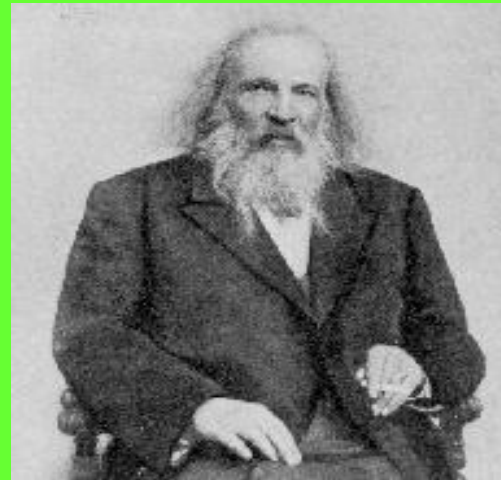


1808 Dalton, classifico' gli elementi in funzione del loro peso

ELEMENTS				
	Hydrogen	1		Strontian 46
	Azote	5		Baytes 68
	Carbon	5		Iron 50
	Oxygen	7		Zinc 56
	Phosphorus	9		Copper 58
	Sulphur	13		Lead 90
	Magnesia	20		Silver 190
	Lime	24		Gold 190
	Soda	28		Platina 190
	Potash	42		Mercury 167

l'Universo, noi stessi, tutto ciò che ci circonda ... e perché!

I filos
esiste
fonda



+ Actinide Series

Periodic Table of the Elements

																IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	2 He												
																5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne												
																13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar												
IIIB	IVB	VB	VIB			VIIB			VII			IB			IIB	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr												
1 Sc	2 Ti	3 V	4 Cr	5 Mn	6 Fe	7 Co	8 Ni	9 Cu	10 Zn	11 Ga	12 Ge	13 As	14 Se	15 Br	16 Kr	17 Rb	18 Sr	19 Y	20 Zr	21 Nb	22 Mo	23 Tc	24 Ru	25 Rh	26 Pd	27 Ag	28 Cd	29 In	30 Sn	31 Sb	32 Te	33 I	34 Xe
37 La	38 Hf	39 Ta	40 W	41 Re	42 Os	43 Ir	44 Pt	45 Au	46 Hg	47 Tl	48 Pb	49 Bi	50 Po	51 At	52 Rn	53 Fr	54 Ra	55 Ac	56 Th	57 Pa	58 U	59 Np	60 Pu	61 Am	62 Cm	63 Bk	64 Cf	65 Es	66 Fm	67 Md	68 No	69 Lr	70 Lu

Mendeleev 1869 introdusse la Tavola periodica degli elementi

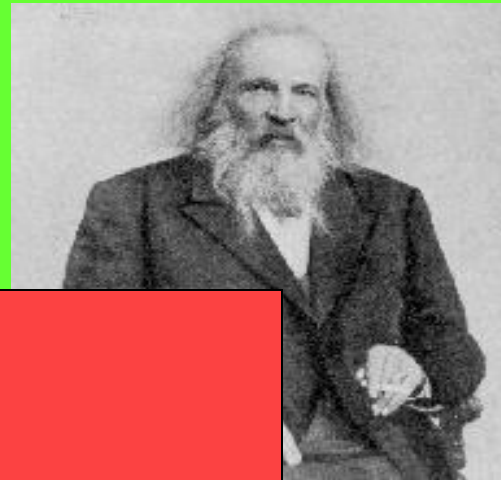


1808 Dalton, classifico' gli elementi in funzione del loro peso

	Majorsa 20		Silver 190
	Lime 24		Gold 190
	Soda 28		Platina 190
	Potash 42		Mercury 167

l'Universo, noi stessi, tutto ciò che ci circonda ... e perché!

I filos
esiste

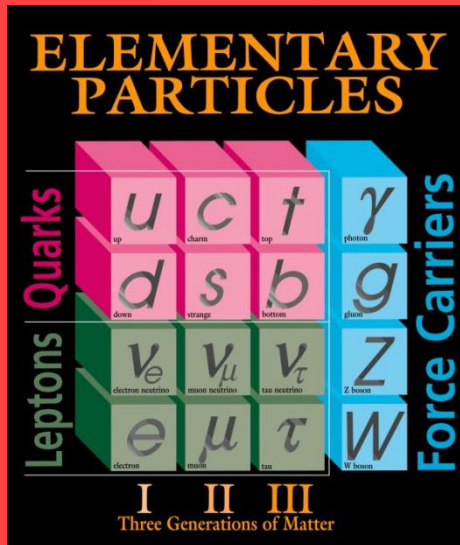


+ Actinide Series

Periodic Table of the Elements

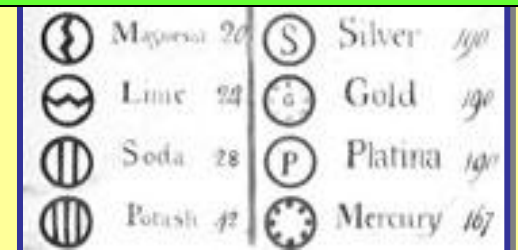
																IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	2
																5	6	7	8	9	10
																B	C	N	O	F	He
																13	14	15	16	17	18
																Al	Si	P	S	Cl	Ar
1	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36						
Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
3	4	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54						
Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
5	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86						
La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
9	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113											
Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113											
3	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71								
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu								
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103								
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr								

Mendeleev 1869 introdusse la Tavola periodica degli elementi



**1963 Murray, Gell-Mann, e Zweig
arrivarono alla formulazione del Modello
Standard**

on, classifico' gli
n funzione del loro



Livello 0: Cosa, Come

- Ci sono mattoni fondamentali della materia?
- Se esistono, di cosa sono fatti?
- Come interagiscono?
- Come determinano le proprietà dell'Universo

I maggiori progressi nella comprensione della natura sono stati resi possibile dalla formulazione (1900 - 1930) di 2 teorie generali:

Teoria della Relatività

&

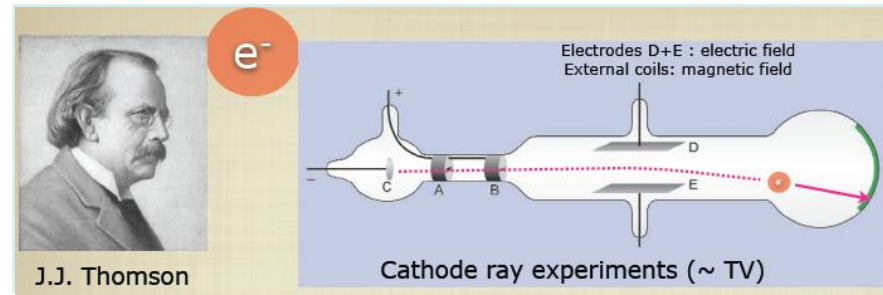
Meccanica Quantistica

Fisica delle
Particelle
Elementari

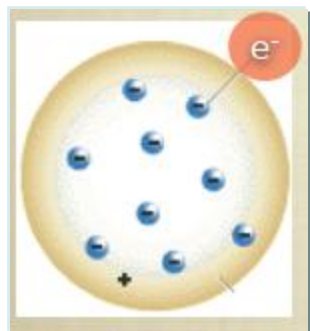
Rappresentazione del mondo **antitetica** a quella fornita dalla **fisica classica** (pre-XX secolo) : il "buon senso" affinato tramite le esperienze sensoriali ha poco a che fare con la struttura profonda della materia

I problemi della "visione classica" della fisica

Spettro di particelle sub-atomiche 1897



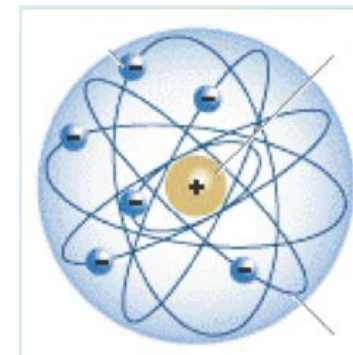
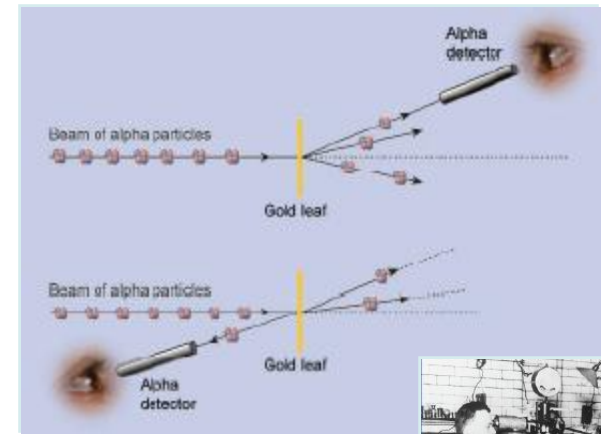
- I "raggi" sono particelle cariche
- Gli elettroni sono particelle sub-atomiche



1904

Atomo a
"panettone" !

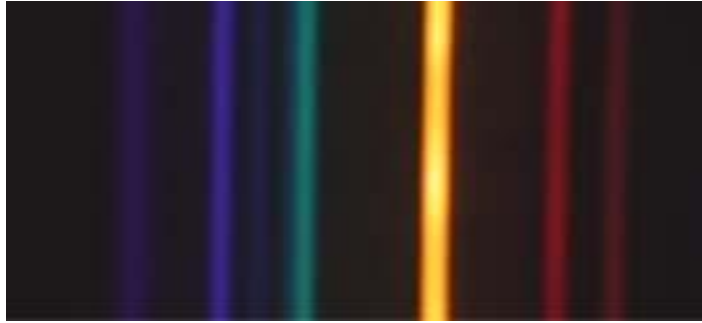
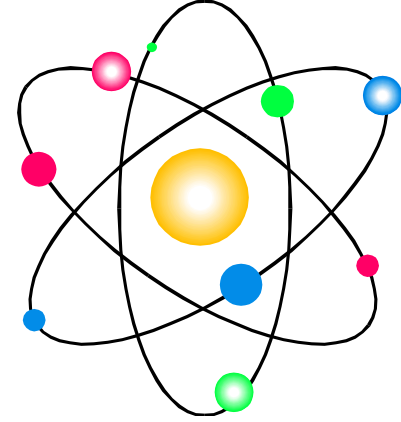
Il nucleo e la stabilità del nuovo atomo, 1911



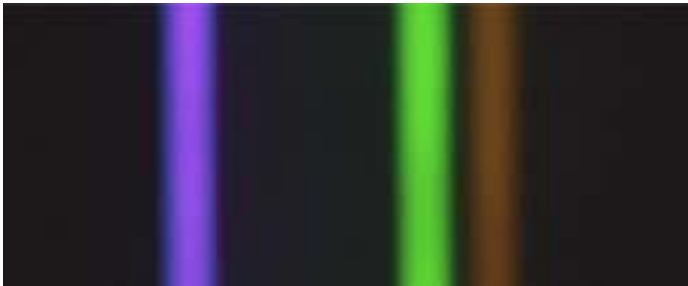
Non è stabile?

Gli elettroni ruotando, emettono
radiazione elettromagnetica
L'atomo collassa!

- Le orbite degli elettroni possono stare ovunque ... analogia con il sistema planetario.
- Ci si aspetta uno spettro continuo di radiazione emessa



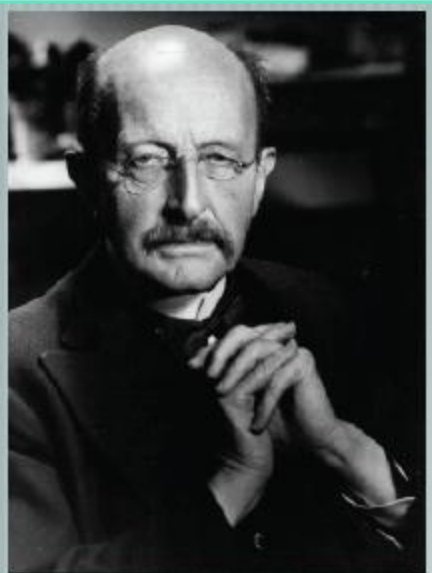
Linee spettrali nel visibile dell'Elio



Linee spettrali nel visibile del mercurio
 $\lambda = 435.835 \text{ nm}$ (blu), 546.074 nm (verde), 576.959 nm e 579.065 nm (giallo-arancio).



Linee spettrali nel visibile del Neon



Max Planck

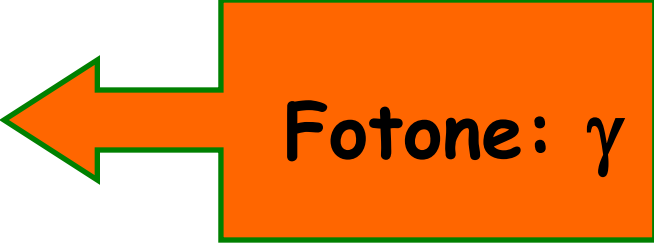
EUREKA!

I problemi si risolvono introducendo un'ipotesi rivoluzionaria:
l'energia elettromagnetica è emessa e assorbita in “**pacchetti di energia**”, cioè in quantità discrete, detti **quanti**.

Per la prima volta vi è l'idea che le grandezze fisiche siano quantizzate, cioè possano assumere valori discreti e non più continui, come avveniva nella meccanica classica

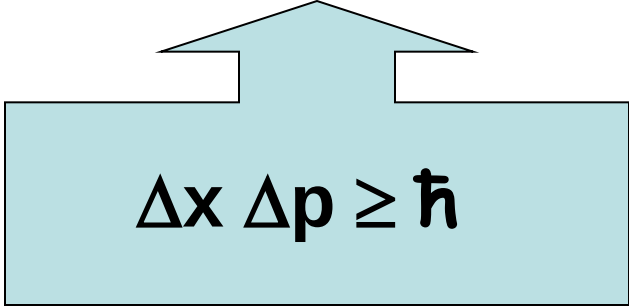
Meccanica Quantistica

- Quantizzazione dell'energia



Fotone: γ

- Principio di indeterminazione


$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

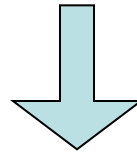
- Dualismo onda-particella

Principio d'Indeterminazione (Heisenberg)

Impossibile conoscere contemporaneamente e con precisione arbitraria posizione & velocità di una particella:

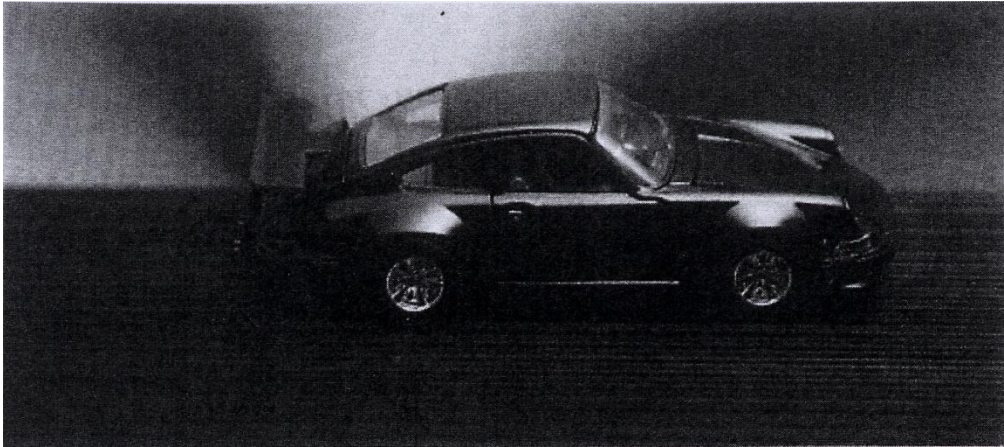
$$\Delta x \rightarrow 0 \quad \longrightarrow \quad \Delta p \rightarrow \infty$$

L'atto di misura perturba sempre ed in modo definitivo lo stato di un sistema: l'osservatore è parte del sistema complesso



Allo stato di un sistema non corrispondono posizione e velocità definite: questi concetti classici non possono coesistere nel mondo microscopico

Principio d'Indeterminazione



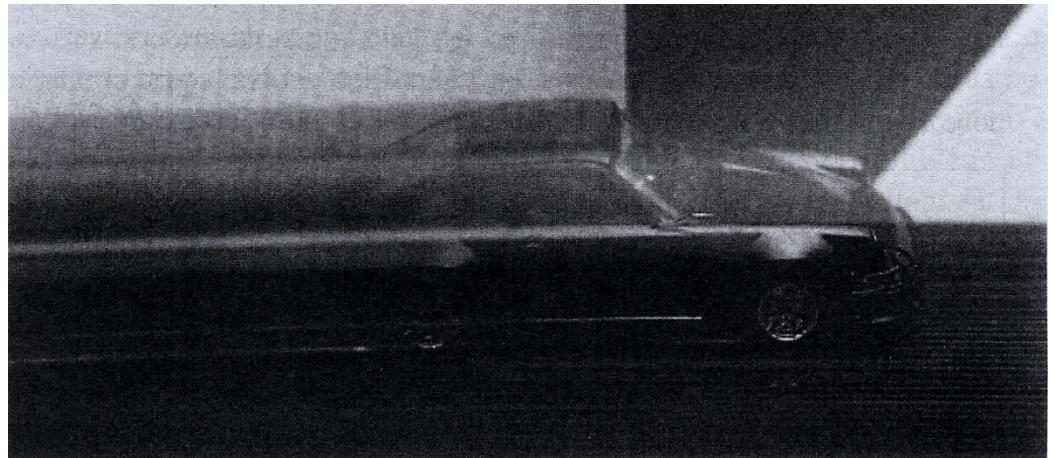
Piccolo tempo
d'esposizione



forma SI - velocità NO

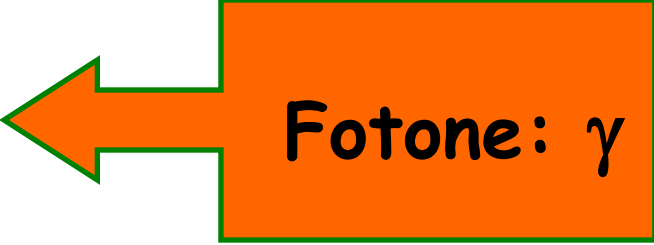
Grande tempo
d'esposizione

forma NO - velocità SI



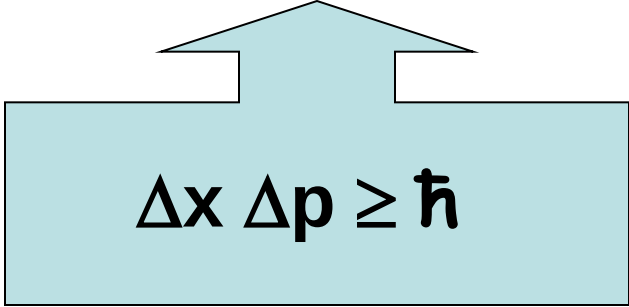
Meccanica Quantistica

- Quantizzazione dell'energia



Fotone: γ

- Principio di indeterminazione


$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

- Dualismo onda-particella

Meccanica classica:

Le eq.ni (**deterministiche**) che descrivono la traiettoria di un oggetto vengono dedotte dal “principio di minima azione”

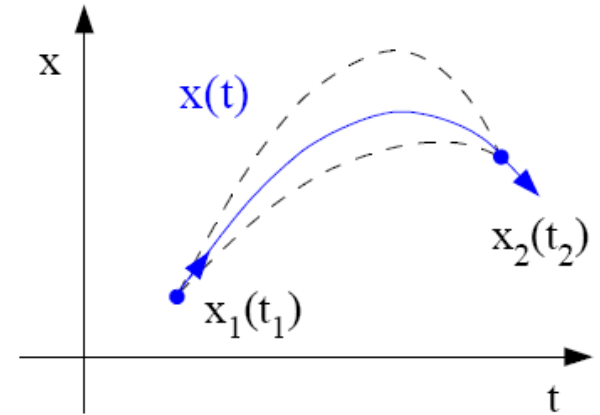
Esempio: $S[x(t)] = \int dt [\frac{1}{2} m v^2 - V(x)]$

E_{cinetica}

$E_{\text{potenziale}}$

*particella non
relativistica ($v \ll c$)
in un potenziale V*

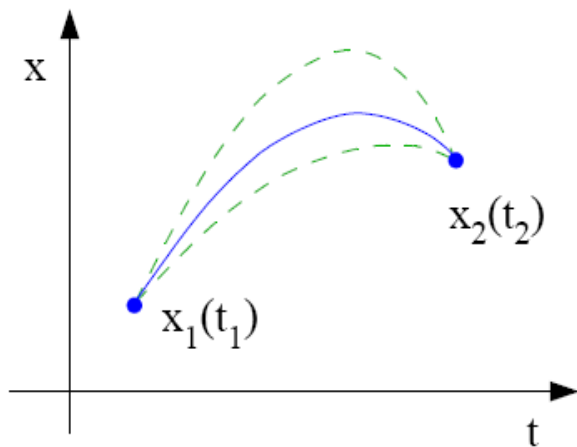
Fra tutte le traiettorie possibili, la particella
“sceglie” quella che minimizza l'azione S



Meccanica quantistica:

E' impossibile determinare l'evoluzione di un sistema in modo deterministico. Tuttavia, ad ogni processo possiamo associare una probabilita':

$$P[x_1 \rightarrow x_2] = |A_{12}|^2 \quad A_{12} = N \int D[x] \exp\left\{ \frac{i}{\hbar} S[x(t)] \right\}$$



I processi “classici”
sono quelli per
cui $S[x(t)] \gg \hbar$

*limite
classico*

Appena ci “spostiamo” dalla
traiettoria classica il fattore di
fase varia molto rapidamente
 $\Rightarrow$ contributo nullo in media.
L'unico termine che conta e'
quello della traiettoria che
minimizza l'azione (la fase
non cambia per piccole
perturbazioni della traiettoria)

$$A_{12} \approx 1 \quad \text{traiettoria classica } x(t)$$

$$A_{12} \approx 0 \quad \text{altre traiettorie}$$

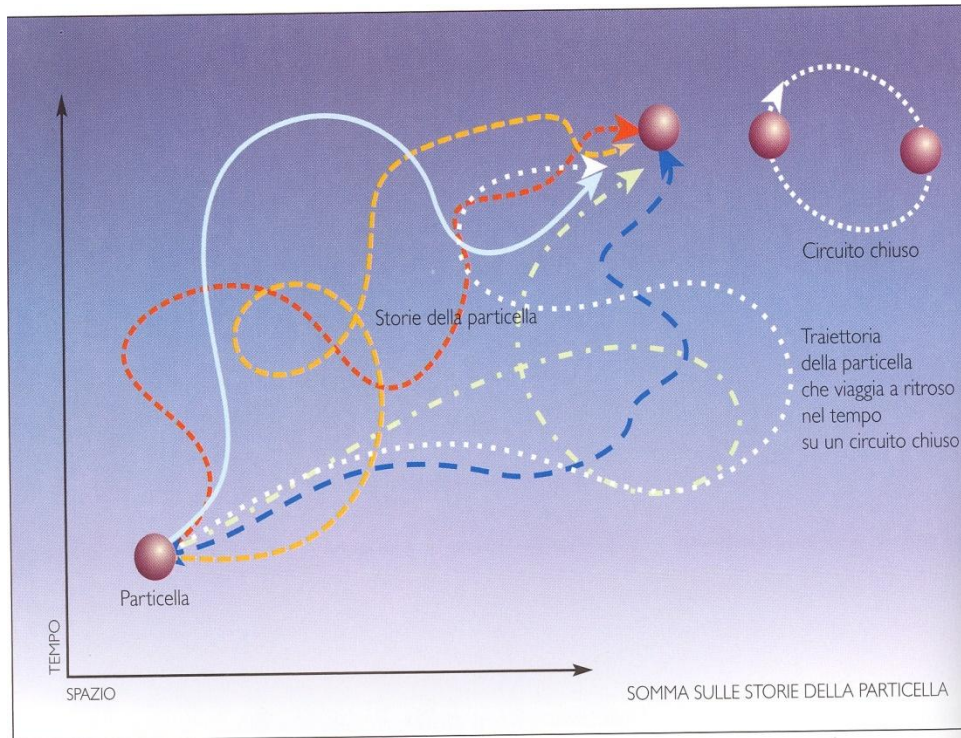
Una particella è la sovrapposizione di tutti gli stati possibili

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \Psi}{dx^2} + V\Psi = E\Psi$$

**Equazione di
Schrodinger**

$$P[x_1 \rightarrow x_2] = |A_{12}|^2$$

$$A_{12} = N \int \mathcal{D}[\mathbf{x}] \exp\left\{ \frac{i}{\hbar} S[\mathbf{x}(t)] \right\}$$



ssici”
li per
 $\gg \hbar$

limite
classico

Appena ci “spostiamo” dalla
traiettoria classica il fattore di
fase varia molto rapidamente
 $\Rightarrow$ contributo nullo in media.
L'unico termine che conta e'
quello della traiettoria che
minimizza l'azione (la fase
non cambia per piccole
perturbazioni della traiettoria)

$A_{12} \approx 1$ traiettoria classica $x(t)$

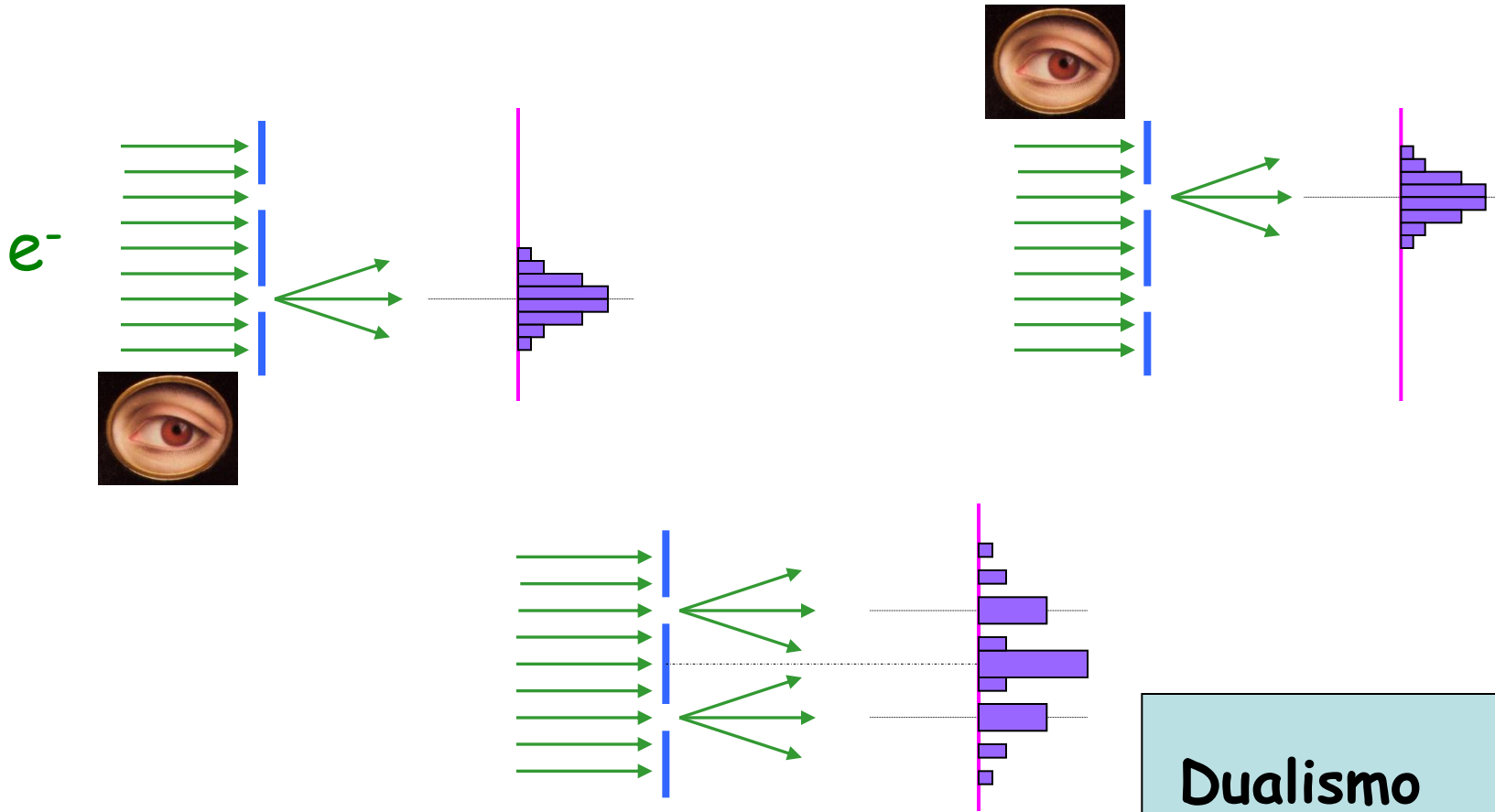
$A_{12} \approx 0$ altre traiettorie

Una particella è la sovrapposizione di tutti gli stati possibili

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \Psi}{dx^2} + V\Psi = E\Psi$$

Equazione di
Schrodinger

Onde & Particelle



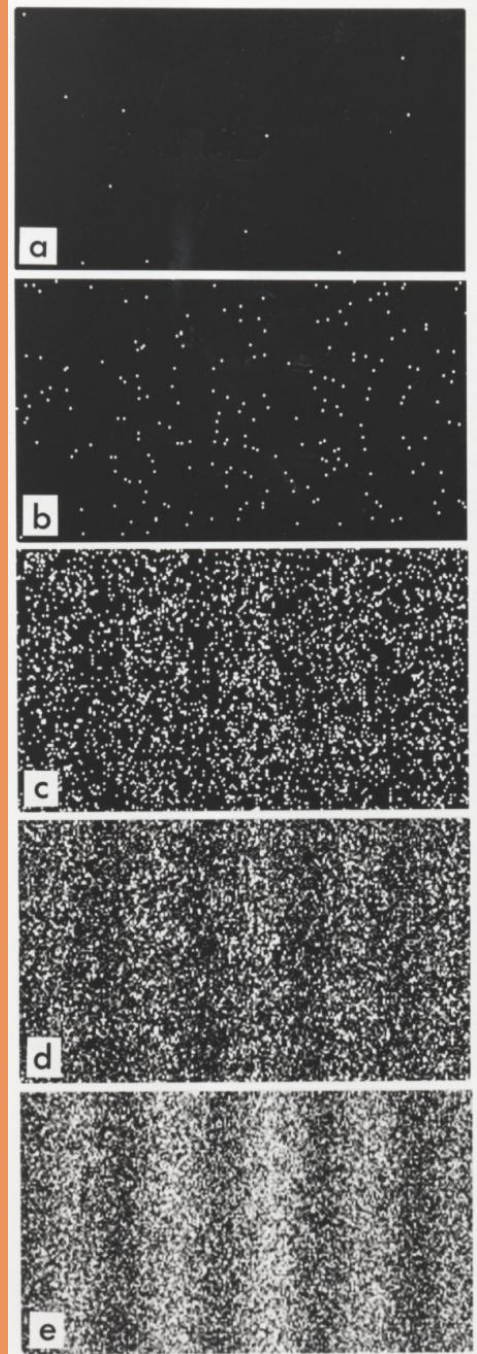
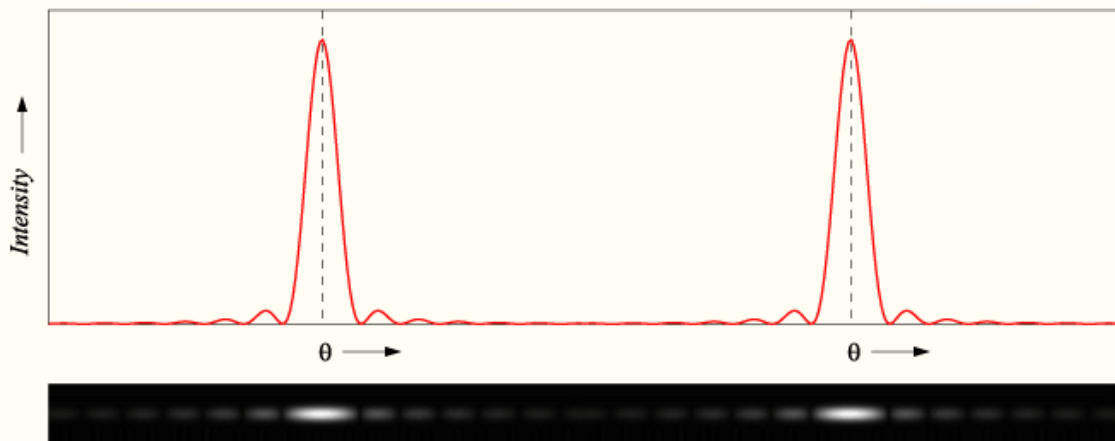
L'osservatore causa il collasso della
"funzione d'onda" in uno stato
specifico!

Dualismo
onda-particella
Interpretazione
probabilistica

Esperimento reale

Interferenza di Singoli Fotoni

Diffusione con oggetti
"macroscopici"



Altro esempio:

Decadimento del mesone K^+

$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	(63.43 %)
$\rightarrow \pi^+ \pi^0$	(21.13 %)
$\rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	(5.58 %)
$\rightarrow e^+ \nu_e \pi^0$	(4.87 %)
$\rightarrow \mu^+ \nu_\mu \pi^0$	(3.27 %)
$\rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$	(1.73 %)

Gatto di
Schroedinger



Lunghezza d'onda associata ad un oggetto



- ..nel 1924, il fisico francese Luis de Broglie avanzava l'ipotesi che oggetti classificati come particelle dovessero essere descritti con un'onda, di lunghezza d'onda:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

- La duplice natura, onda-corpuscolo, e' una caratteristica universale: materia e radiazione !

i. $m = 80 \text{ kg}$ con velocità $v = 5 \text{ km/h}$ ($\sim 1.4 \text{ m/s}$)

$$\lambda \cong 6 \times 10^{-36} \text{ m}$$

ii. elettrone nell'atomo di H: $v \sim 3 \times 10^6 \text{ m/s}$

$$\lambda \cong 2.4 \times 10^{-10} \text{ m}$$

dimensioni onda-
ptc: confrontabili

La Funzione d'Onda

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi}{dx^2} + V\Psi = E\Psi$$

Equazione di
Schrodinger


$$|\Psi(x)|^2 dx$$

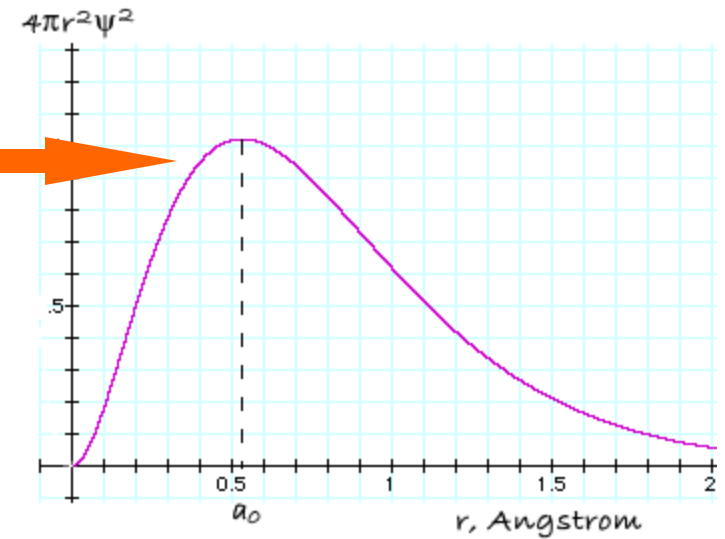
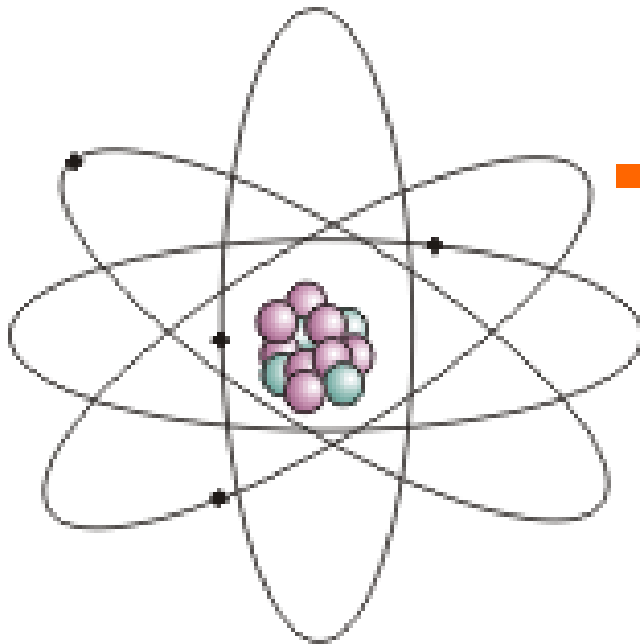
Probabilita' che la ptc si
trovi nell'intervallo $x+dx$



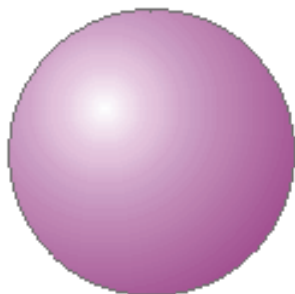
Principio di indeterminazione

- Teoria quantistica: **predizioni sulla probabilità dei possibili risultati** di una misura.
- Una particella classica è sempre “**localizzata**”: sta in un punto ben definito.
- In meccanica quantistica una particella può essere “**delocalizzata**” come un’onda: “**onda di probabilità**”

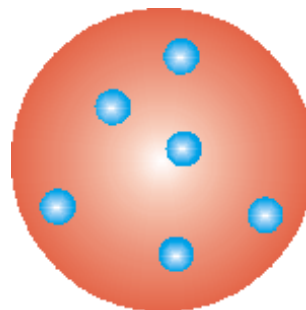
L'atomo non ha orbitali ben definiti, ma distribuzioni di probabilita'



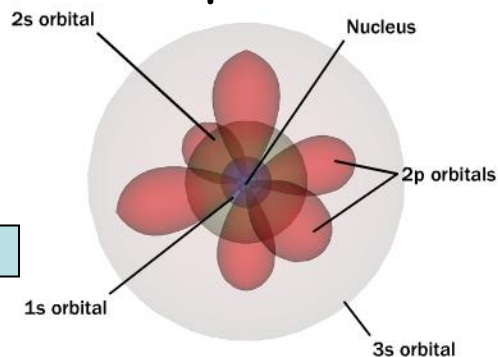
L'atomo all'inizio del '900



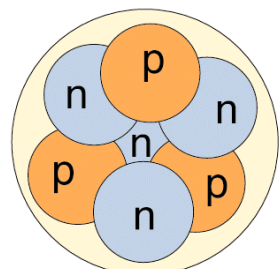
L'atomo di Thompson



L'atomo quantistico

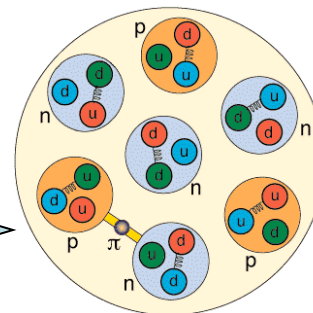


L'atomo di Rutherford e Bohr



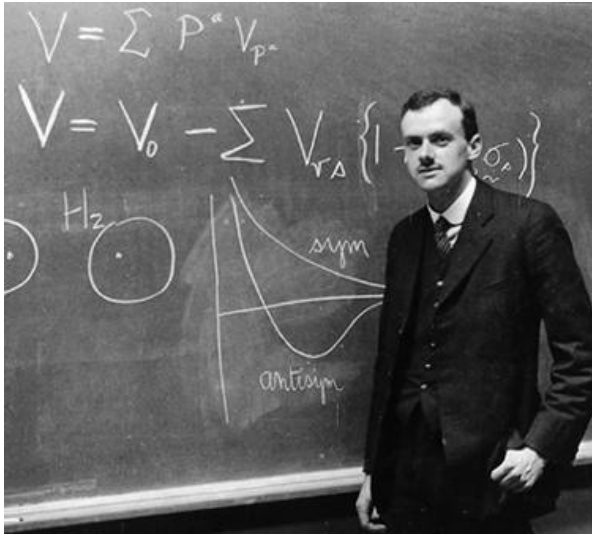
1.6 fm
4.8 fm

La struttura del nucleo



Il nucleo oggi

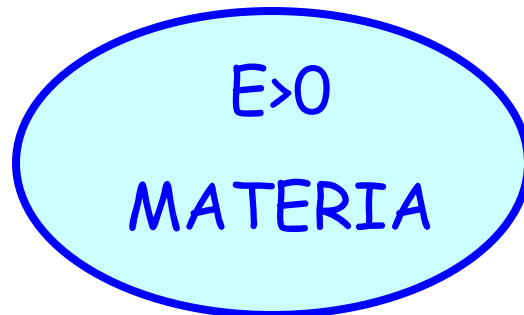
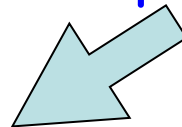
L'equazione di Dirac e l'antimateria



Dirac formula il moto di una particella (elettrone) introducendo tutti i numeri quantici ed in ambito relativistico:

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

L'equazione ha sia soluzioni positive che negative



V Congresso Solvay - 1927



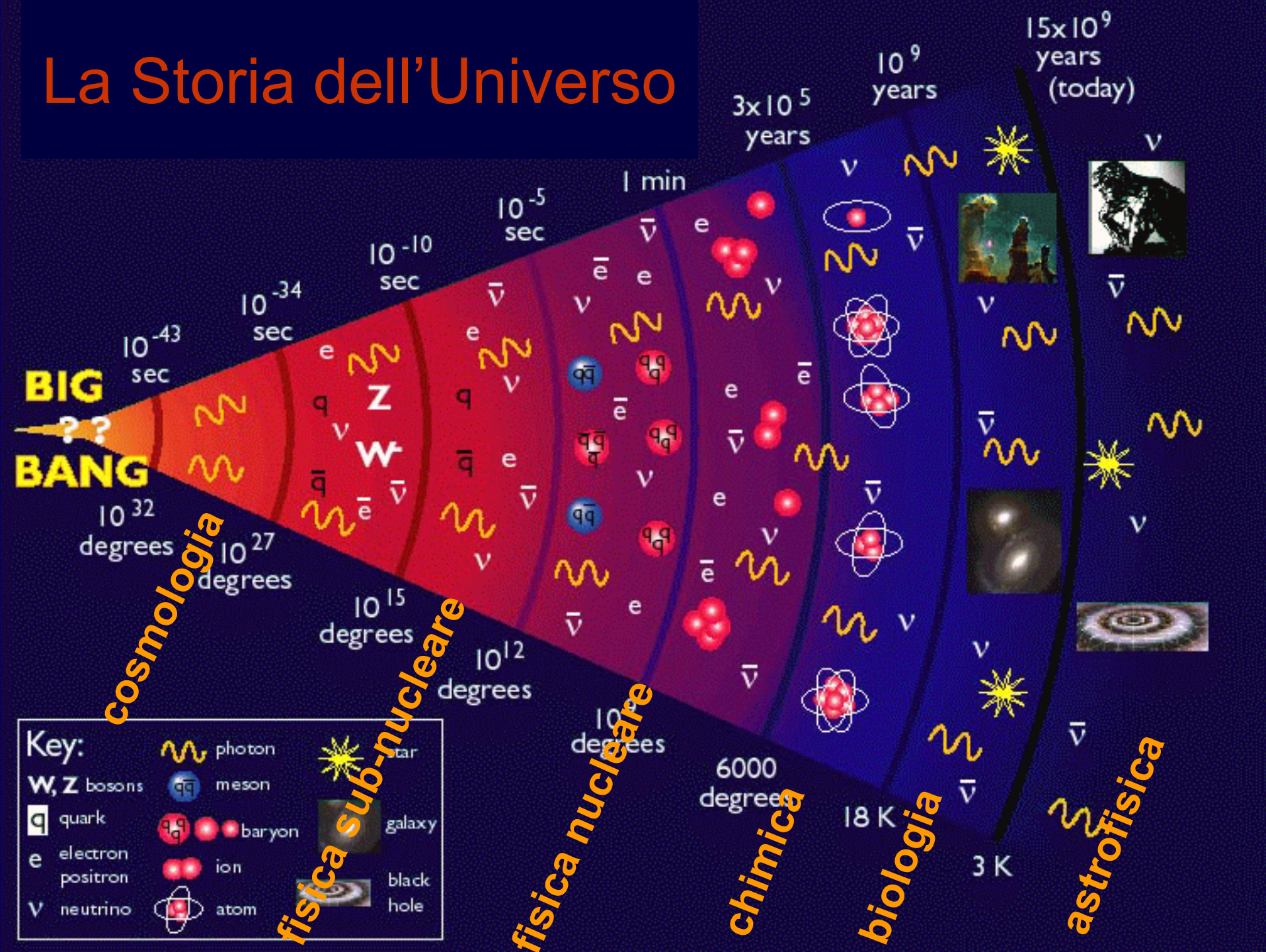
The background of the slide is a deep space image featuring a dense field of stars and several prominent spiral galaxies. The galaxies are rendered in shades of blue, purple, and white, set against a dark, star-filled void. The overall effect is one of vastness and cosmic scale.

Per capire la natura intima della materia
bisogna essere in grado di:

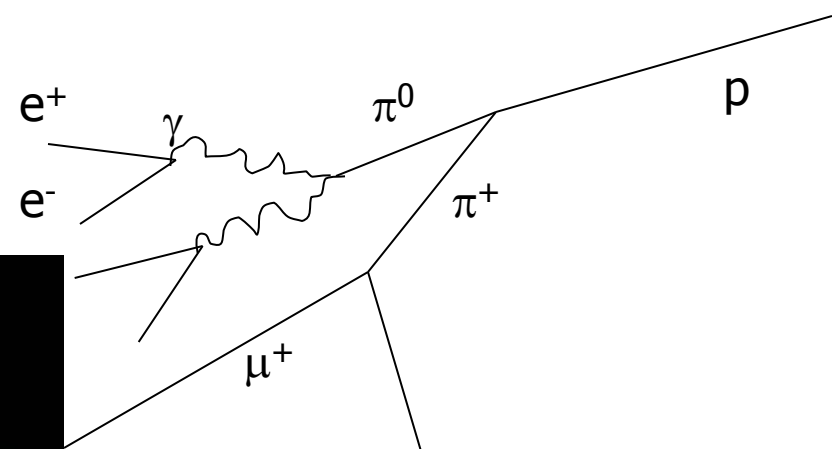
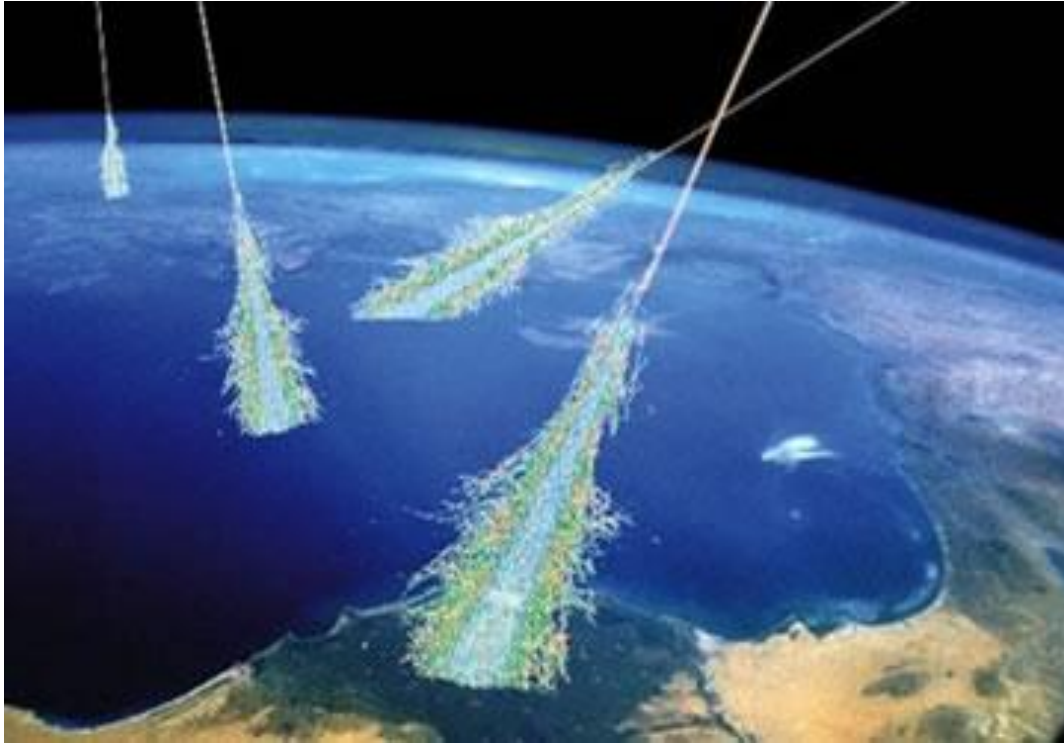
- creare e studiare tutte le particelle
possibili

- ricreare le condizioni dei primi istanti
dell'Universo

La Storia dell'Universo

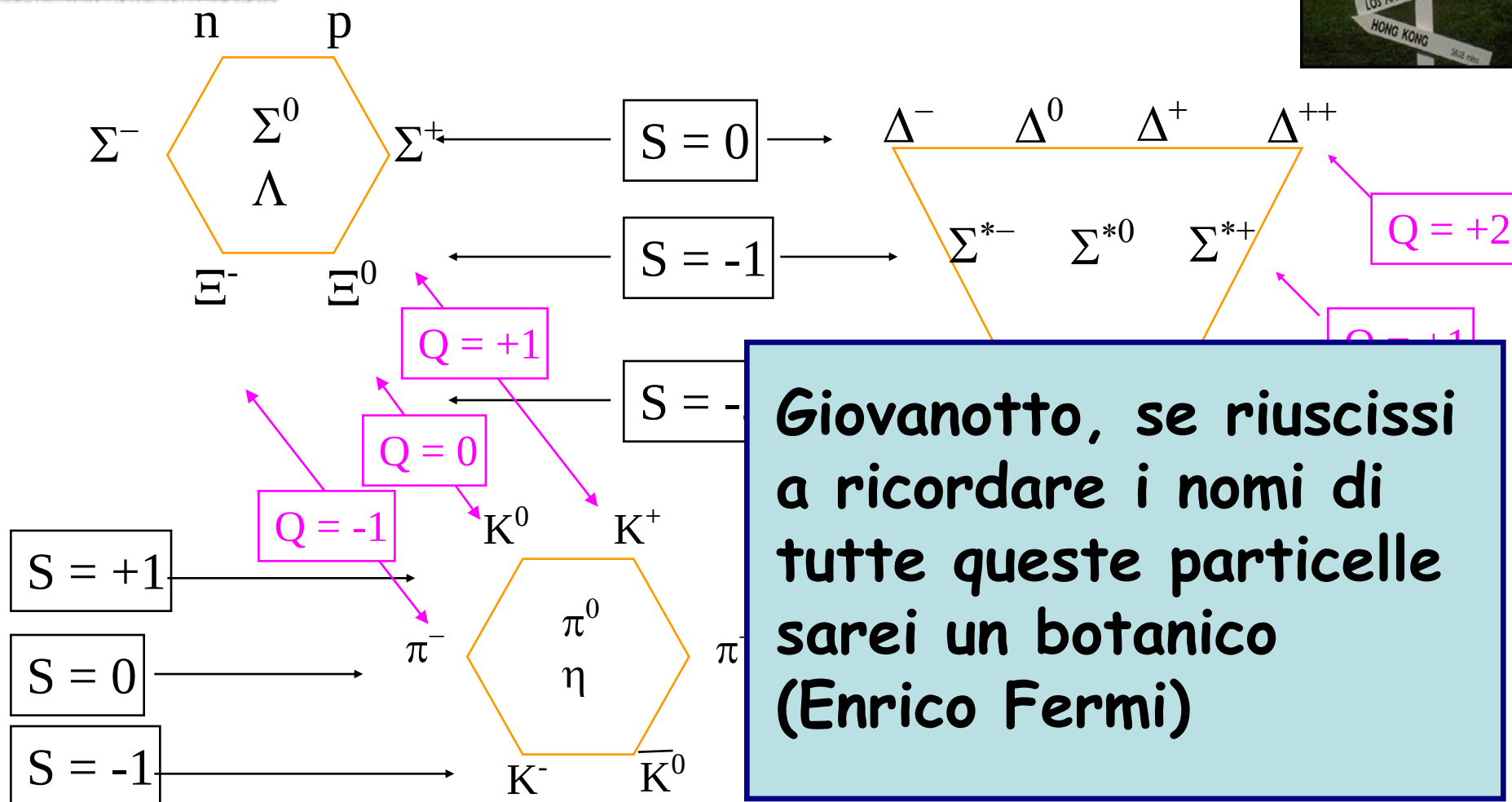
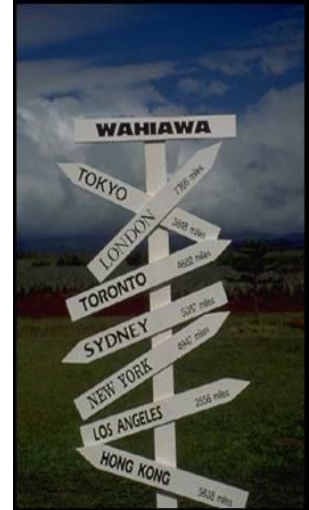


Prima possibilità: aspettare le
particelle dal cielo 😊



Raggi Cosmici

CLASSIFICAZIONE ???



Fabbriche di particelle: gli acceleratori



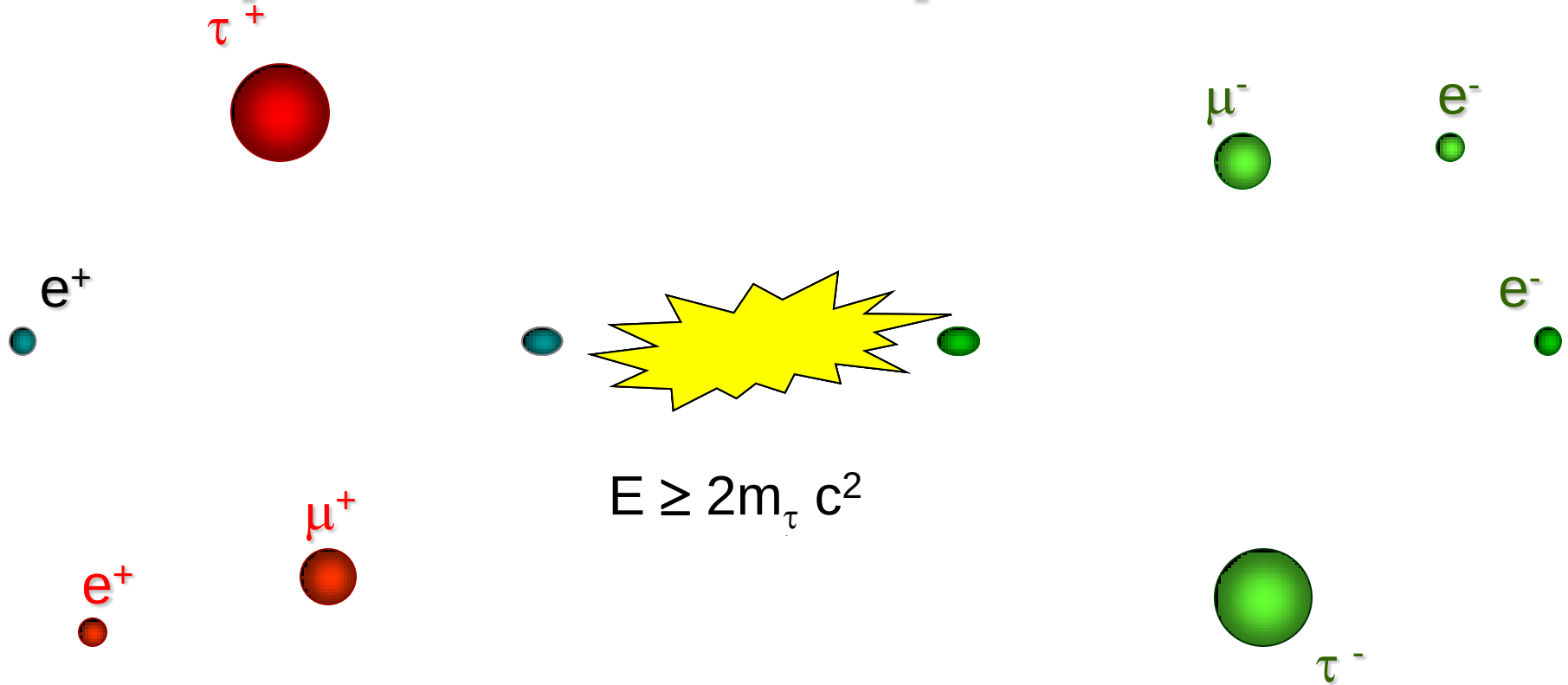
Un passo in piu': collisione di particelle e antiparticelle



$$E = m c^2$$

**Maggiore e' l'energia,
piu' e piu' particelle si possono studiare...**

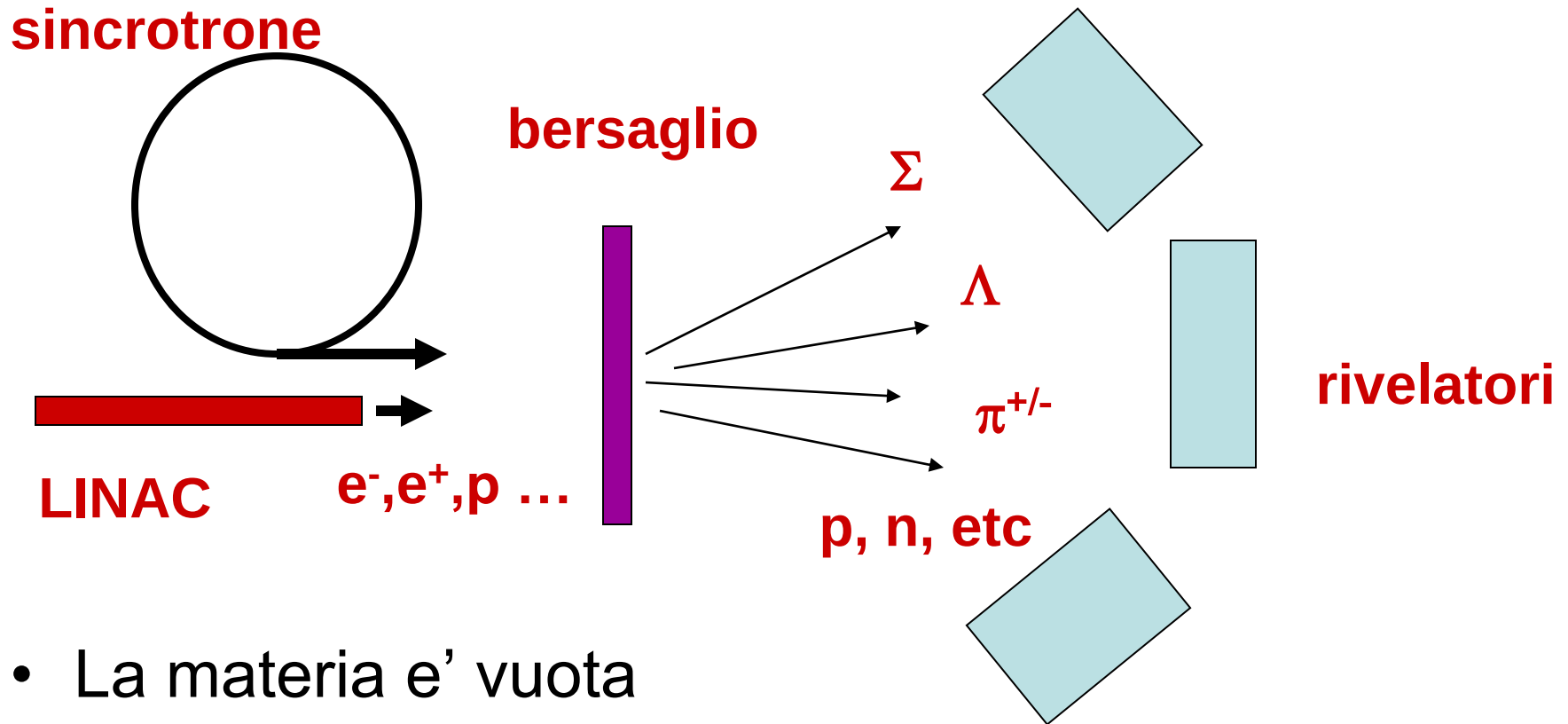
Un passo in piu': Collisione di particelle e antiparticelle



$$E = m c^2$$

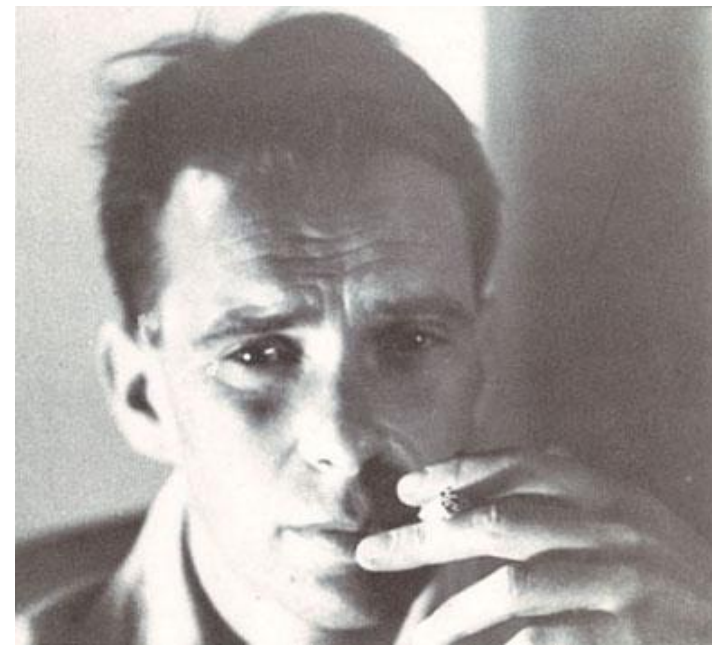
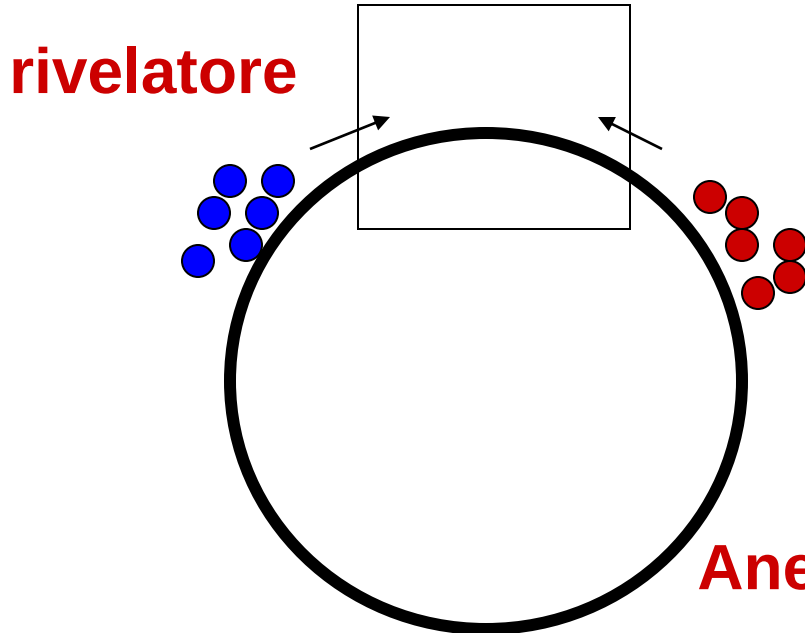
**Maggiore e' l'energia,
piu' e piu' particelle si possono studiare...**

L'osservazione su bersaglio



- La materia e' vuota
- Cio' che non ha interagito viene perduto
- Dispendio di energia nel muovere il centro di massa
- Il bersaglio e' complesso.

Un nuovo approccio: usare fasci collidenti



*Bruno Touschek,
Frascati, 1959*

Anello di Accumulazione

- Le particelle che non interagiscono, possono essere riutilizzate al giro successivo
- Collisione nel centro di massa
- Le particelle circolanti possono essere sia elementari che complesse (come nuclei o atomi).

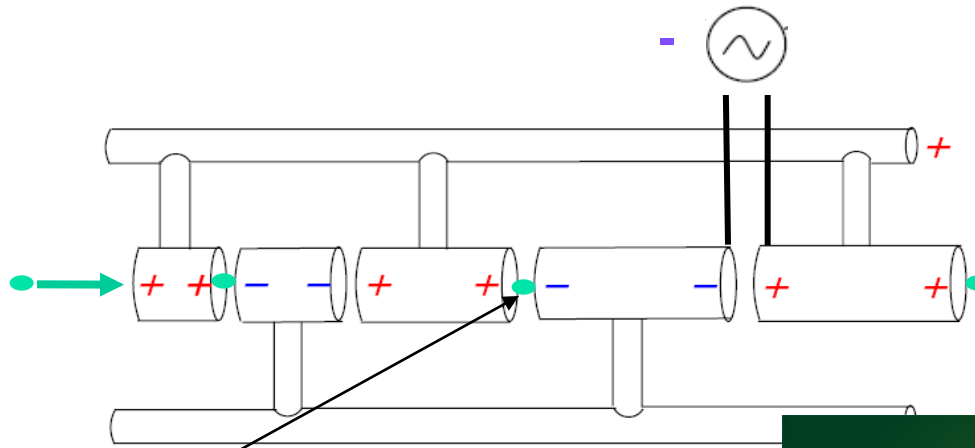
I collisori materia-antimateria

LEP al CERN di Ginevra 1988



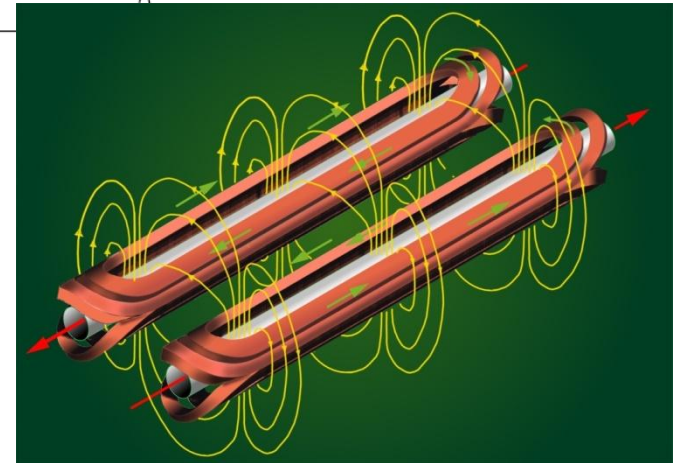
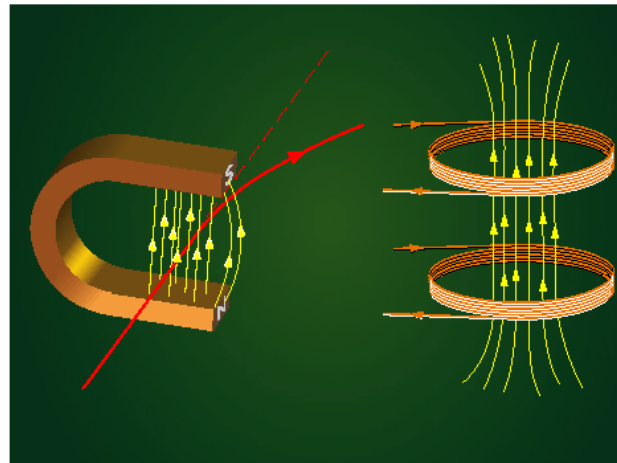
LHC al Cern di Ginevra nel 2009

Un acceleratore semplificato



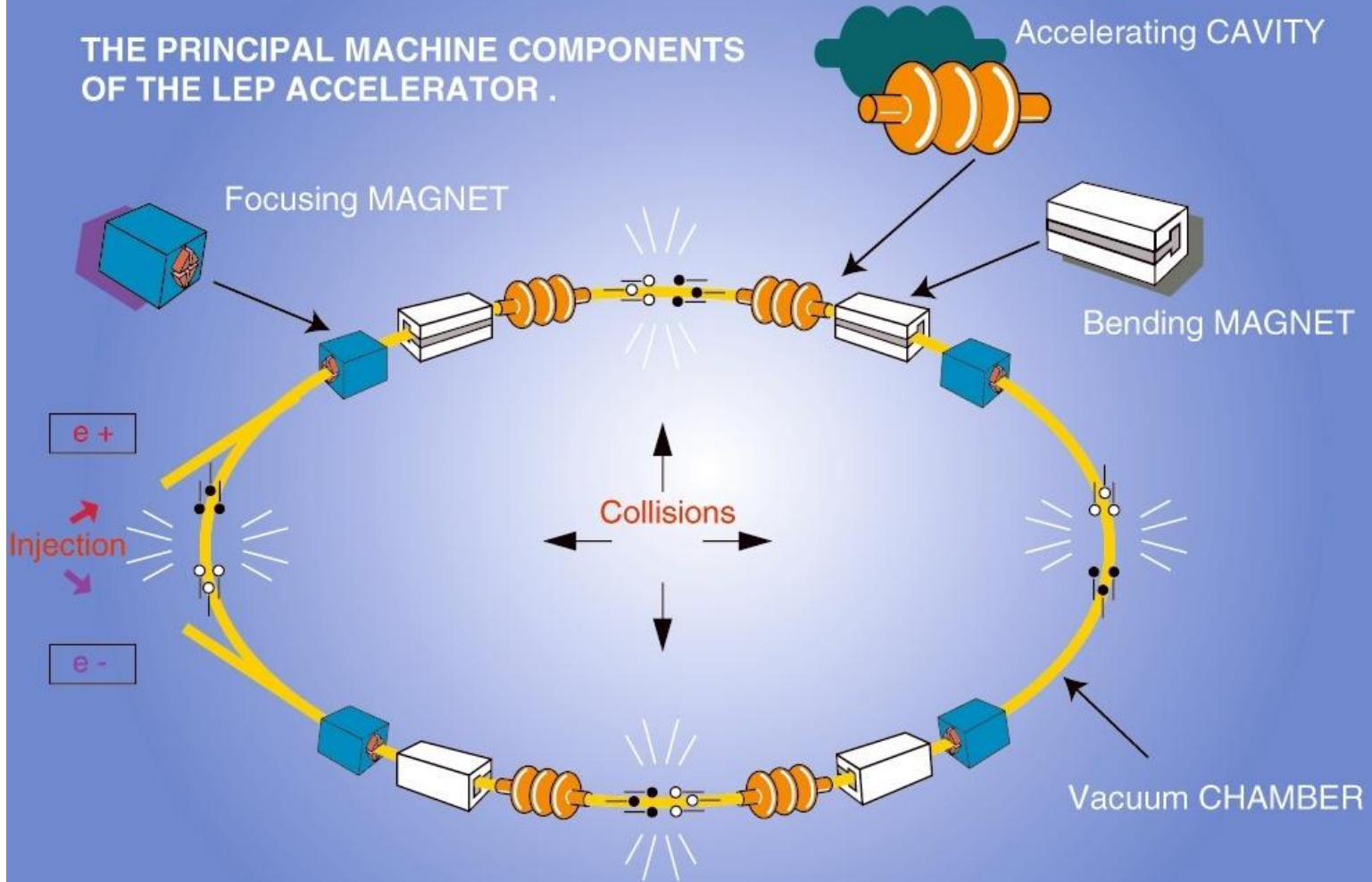
Pacchetti di particelle cariche

All'LHC (27Km) $\rightarrow$ >10000 giri al secondo!

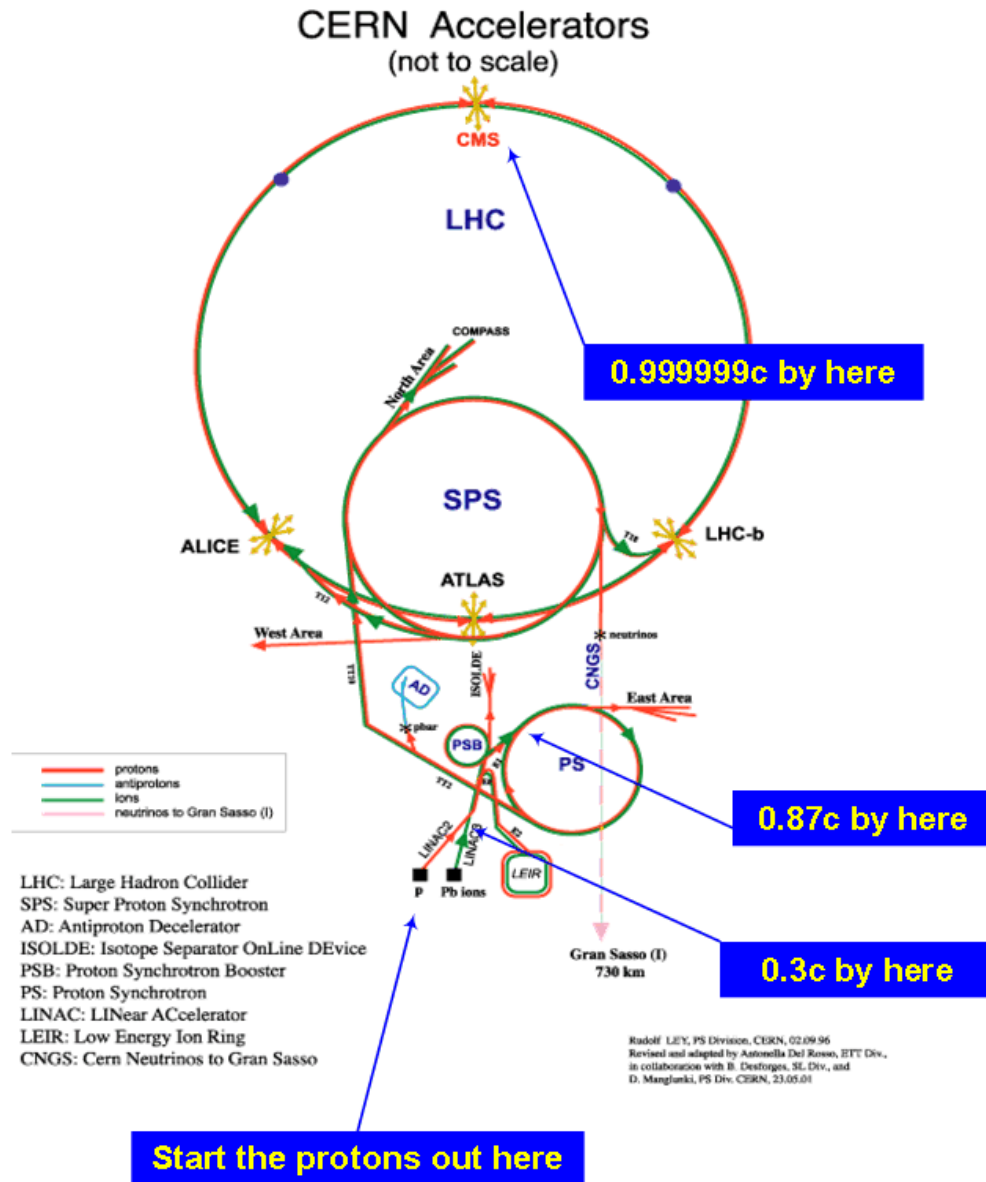


Acceleratori: le componenti principali

THE PRINCIPAL MACHINE COMPONENTS OF THE LEP ACCELERATOR.



Gli acceleratori in cascata per l'LHC



Energie:

Linac 50 MeV

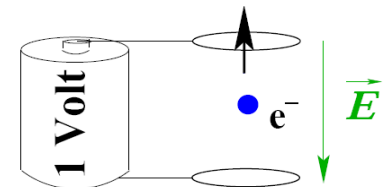
PSB 1.4 GeV

PS 28 GeV

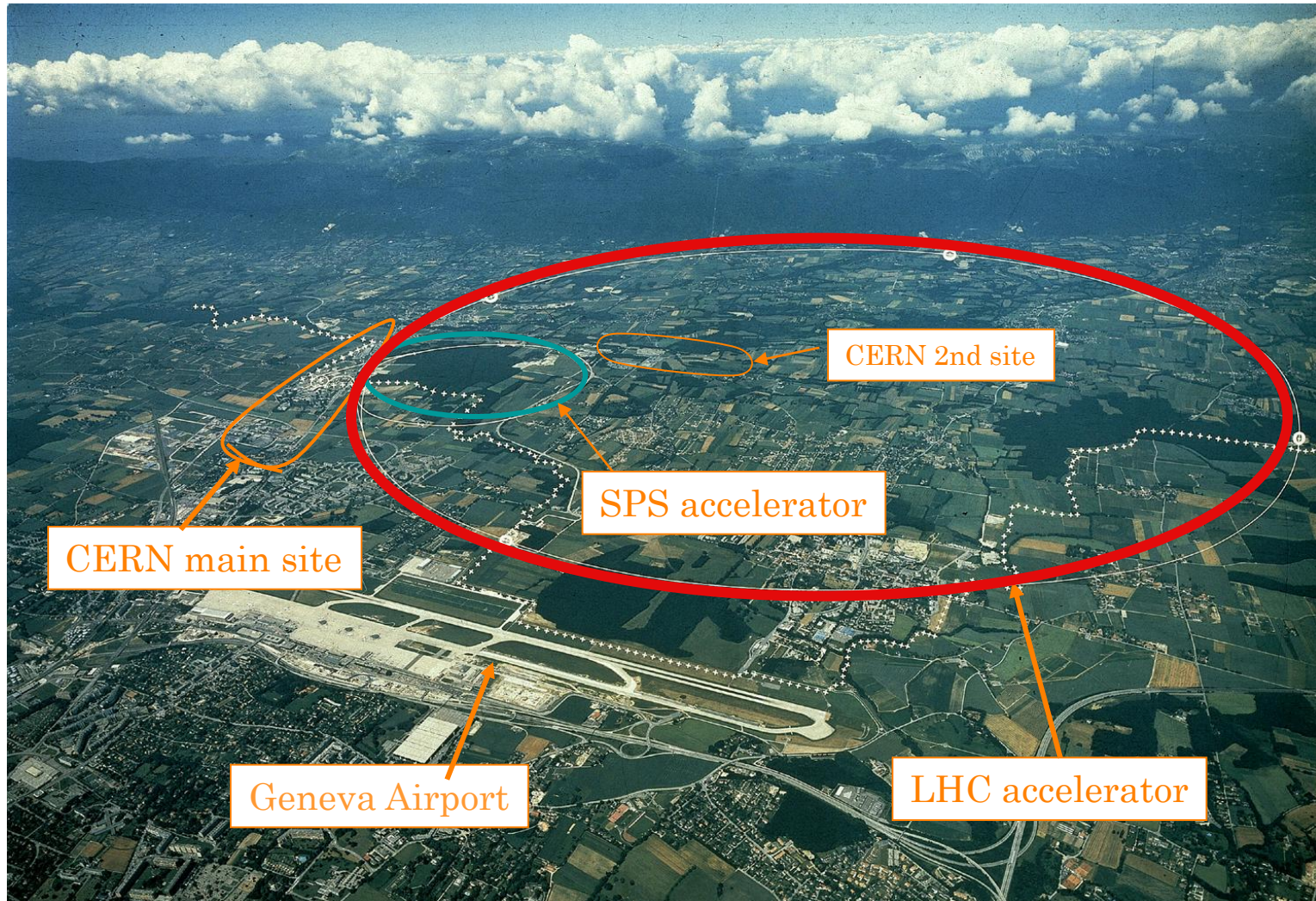
SPS 450 GeV

LHC 7 TeV

eV = electronvolt



Su una struttura esistente



LHC



1232 dipoli
superconduttori
di 9 Tesla

500 quadrupoli
superconduttori
in grado di
operare a 250
Tesla/m

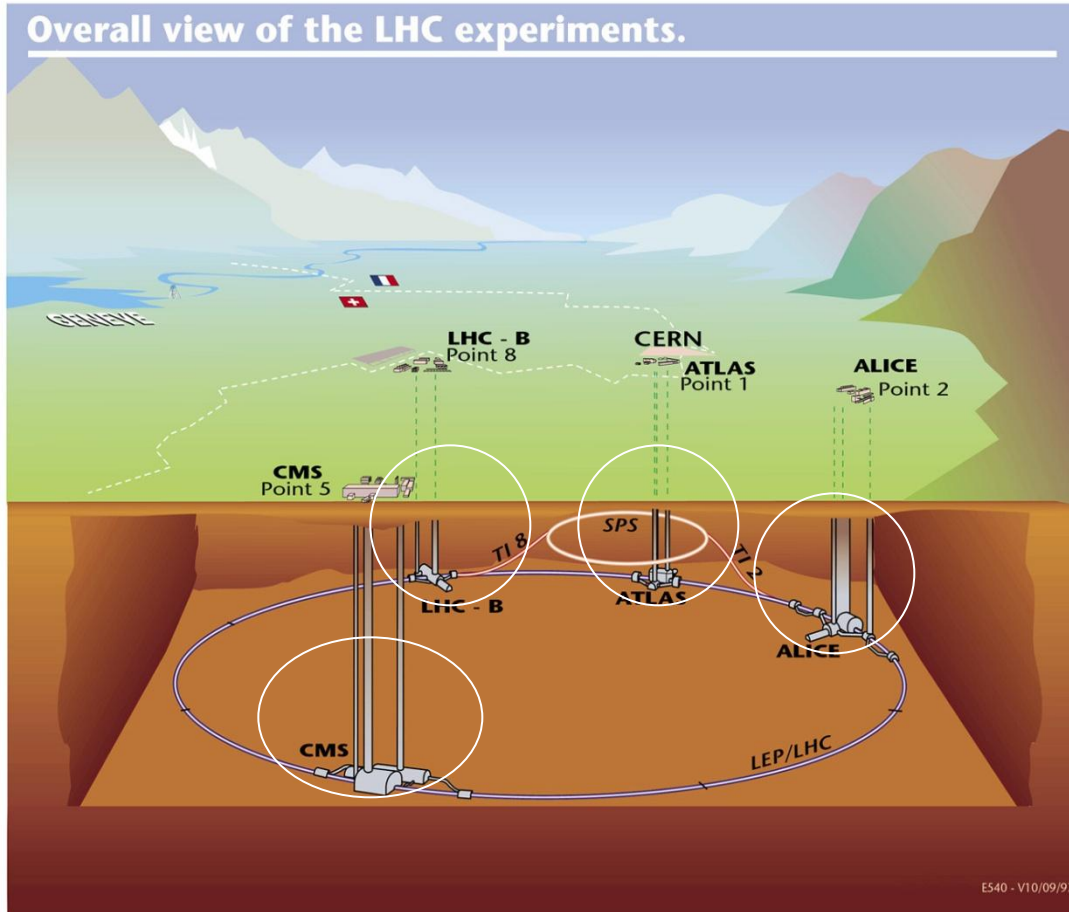
circa 4100
magneti
correttori
superconduttori

4×10^5 tonnellate
di materiale a
1.9 K
(temperatura
dell'elio
superfluido)

Costo: 8 G€

Il tunnel LHC sarà a 100 m sottoterra

Overall view of the LHC experiments.



ES40 - V10/09/97

- quattro gigantesche caverne sotterranee ospitano rivelatori enormi
- fascio di energia mai raggiunta: **14 TeV c.o.m**
- intensità dei fasci di ordini di grandezza più elevati
- Circa 40.000 ton saranno a 1.9 K, a temperatura inferiore al freddo cosmico

La Macchina LHC

Un'impresa al limite delle tecnologie attuali (→ ricadute)

- 1200 dipoli magnetici superconduttori (tenuti a $T=1.5$ K)
- 2800 pacchetti circolanti, ciascuno con $\sim 10^{11}$ protoni ~ 370 MJ

→ l'energia di un treno lanciato a 150 km/h

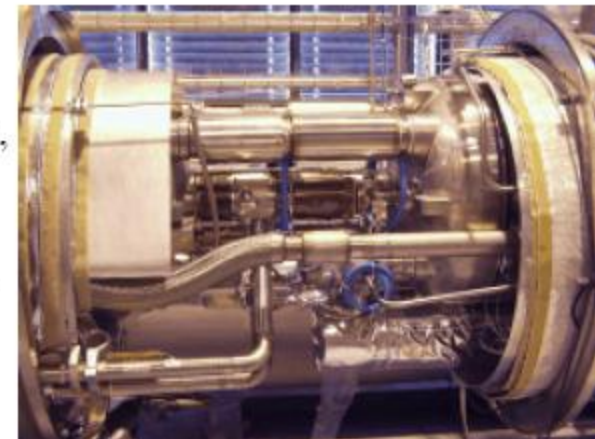
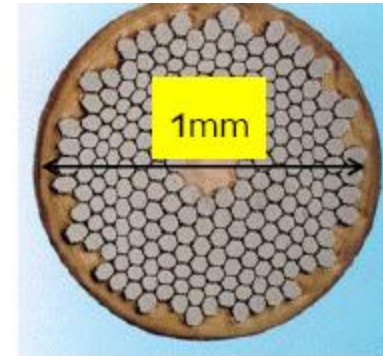
→ l'energia necessaria a fondere 1 T di rame

- Il sistema criogenico è ad Elio Superfluido (scelto per le sue caratteristiche di trasportabilità su grandi distanze) - Consumo di elettricità ~ 120 MW

- Il fascio circola in una ciambella dove è stato fatto un vuoto ultraspinoso per evitare le collisioni con il gas residuo: 10^{-10} Torr (760 Torr=1 atm) ($< 3 \cdot 10^6$ molecole/cm³): la stessa pressione che incontriamo a 1000 km di altezza

- I protoni si urtano ad una frequenza di 40 MHz
Sulle fibre ottiche che portano gli eventi ai calcolatori, c'è un evento "in fila" ogni 4-5 m !

- I 4 esperimenti producono una quantità di dati pari ad 1 DVD ogni 10 sec. ($> 100,000$ l'anno)

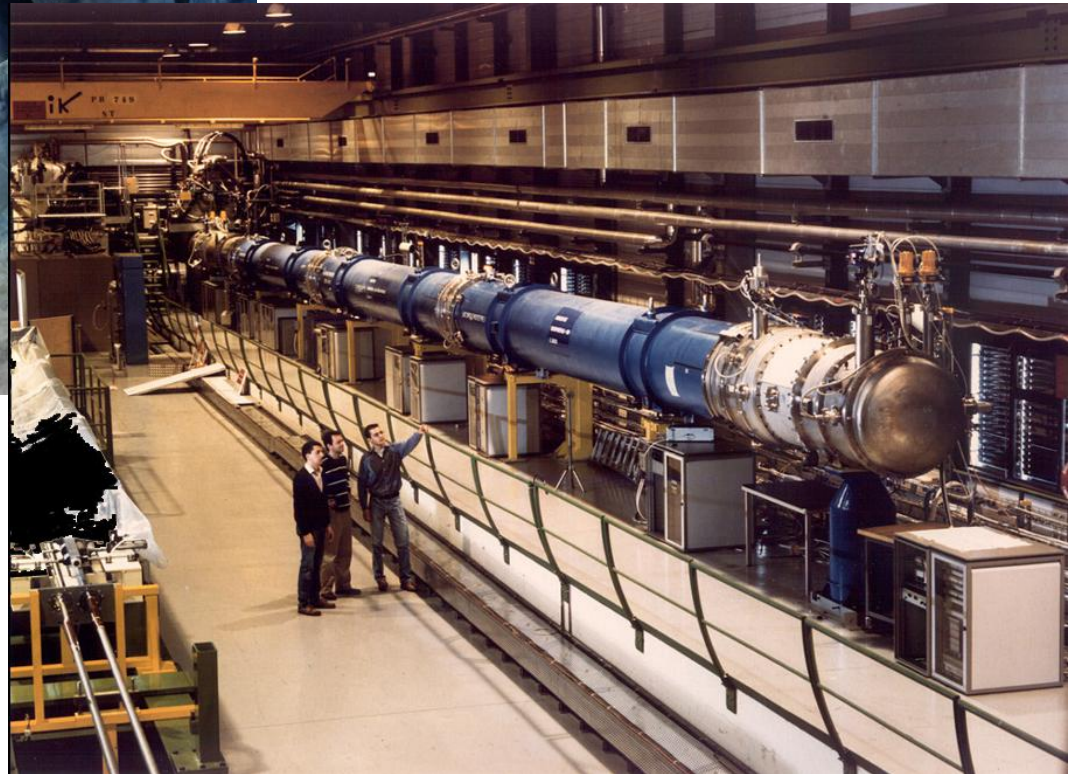


LHC è stato preparato con anni di R&D



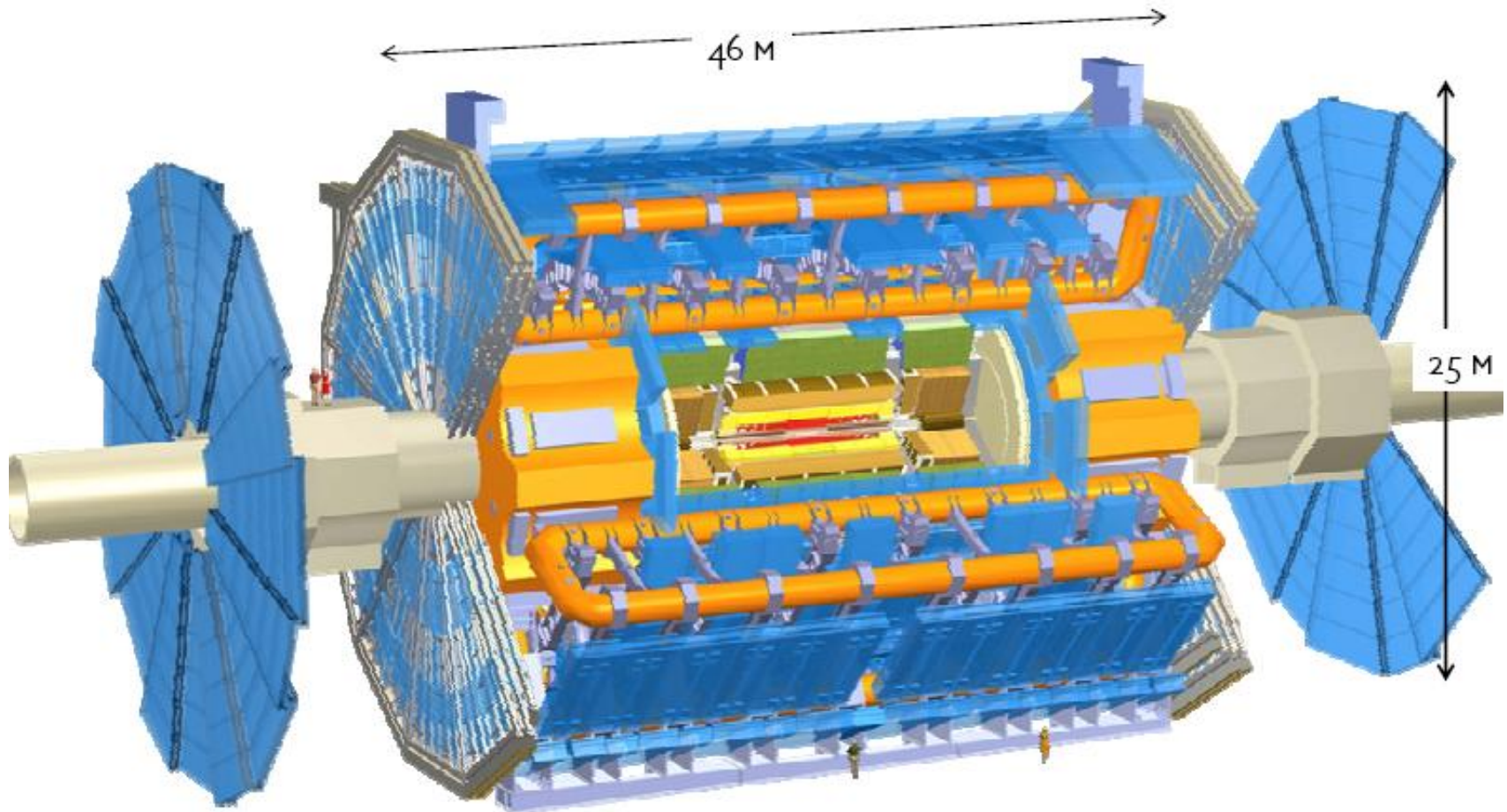
Costruzione di una
delle gallerie per gli
esperimenti

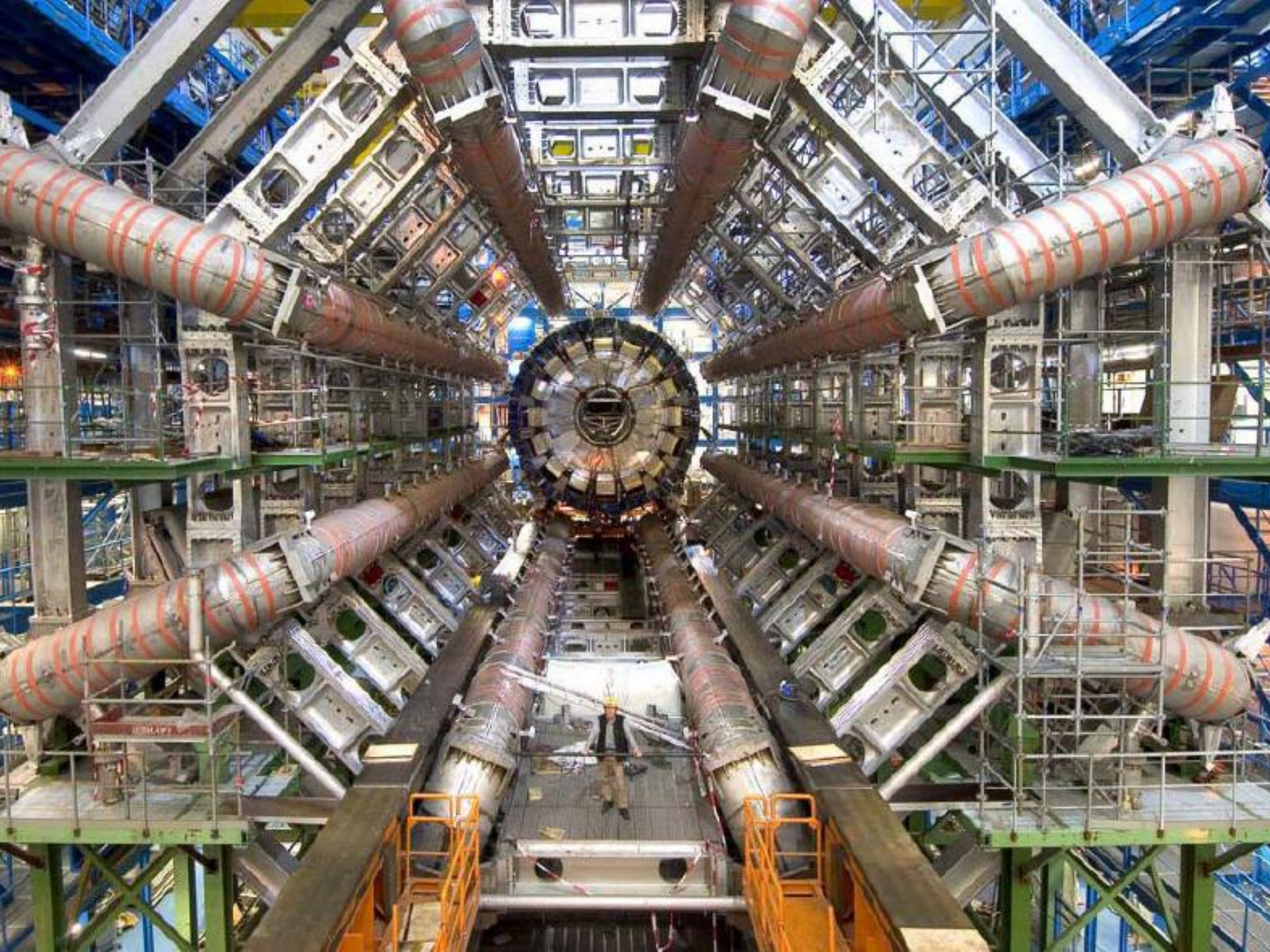
Stringa di test per magneti
dipoli della macchina



ATLAS → atlas.ch

7000 t – 100,000,000 canali di elettronica - 2100 scienziati, 37 nazioni, 167 istituti
Costo 400 M€

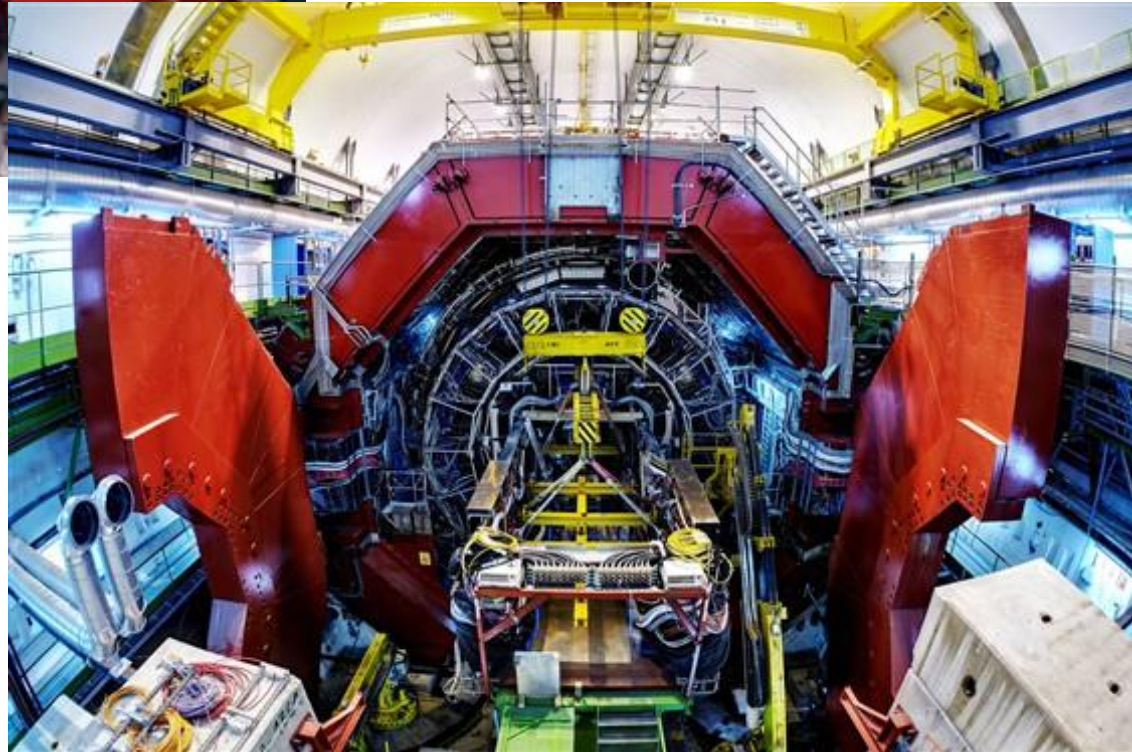
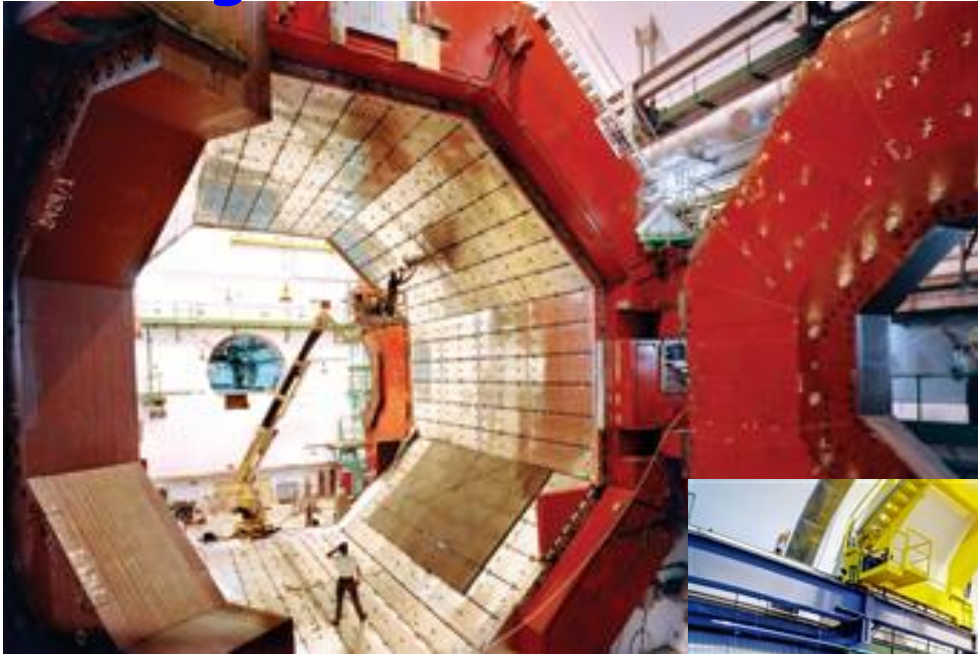




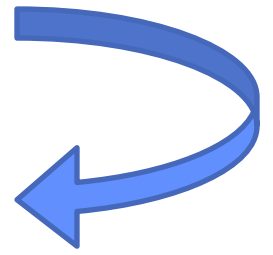
rivelatore per gli esperimenti LHC : CMS



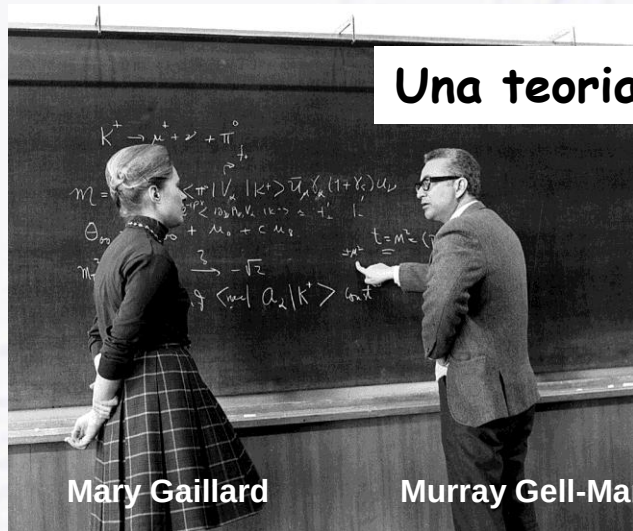
Magnete di ALICE



Estrarre le informazioni:
misurare le proprietà fisiche delle
particelle



Per una “scoperta” si ha bisogno di ...



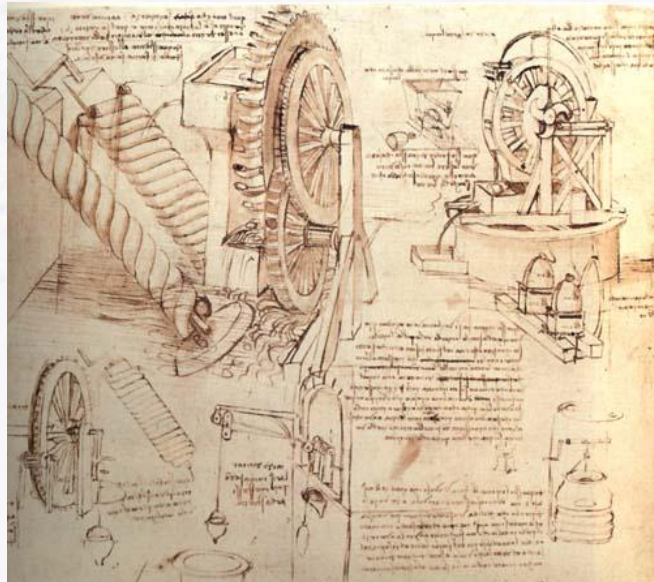
Una teoria

Mary Gaillard

Murray Gell-Mann



una caffetteria



Progetti
chiari



Un tunnel per un
acceleratore

... ma anche ...

Un esperimento



Analisi dati



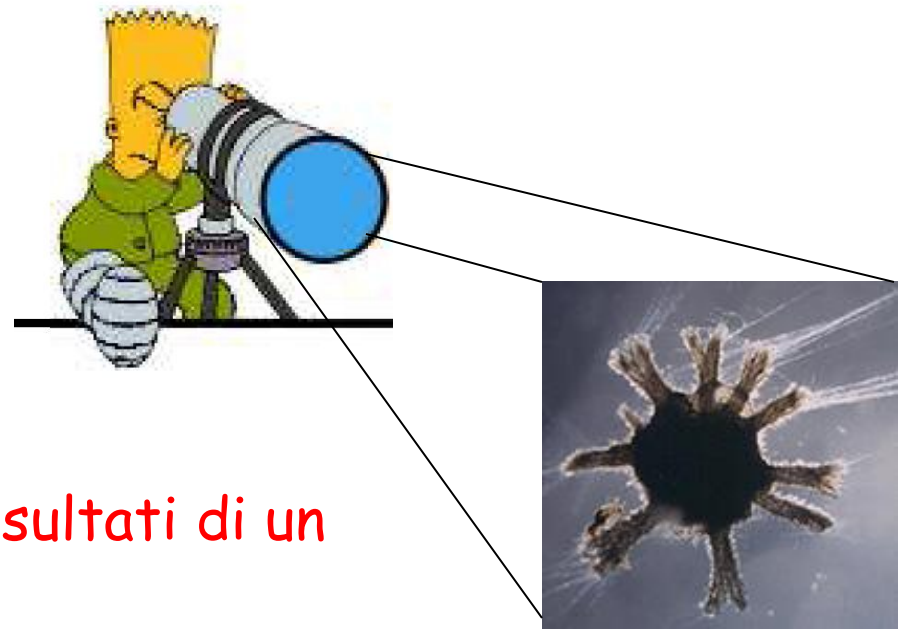
Ma ora:



Ci concentriamo sui "rivelatori"

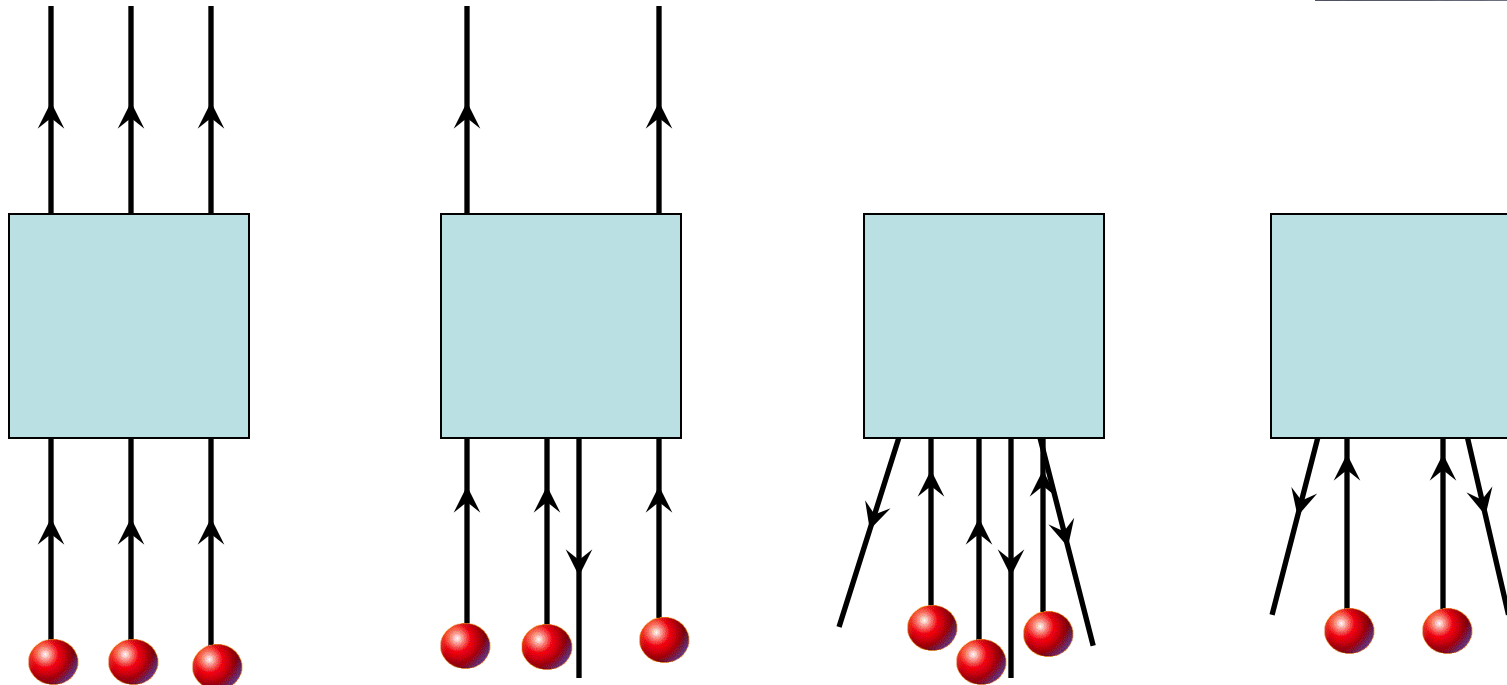
Vedere direttamente:

osservazione diretta
dell'oggetto da studiare



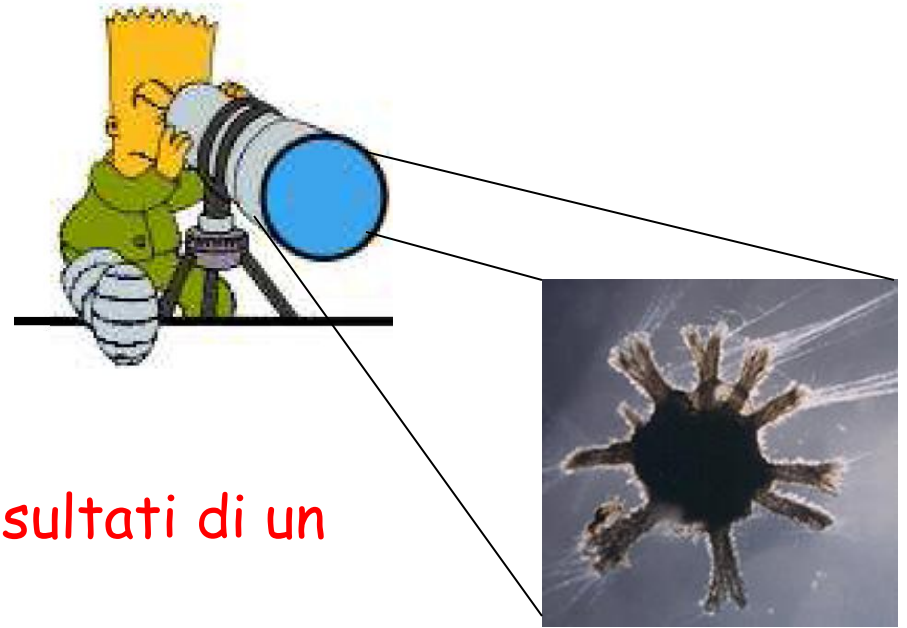
Vedere indirettamente

studio dell'oggetto attraverso i risultati di un
esperimento



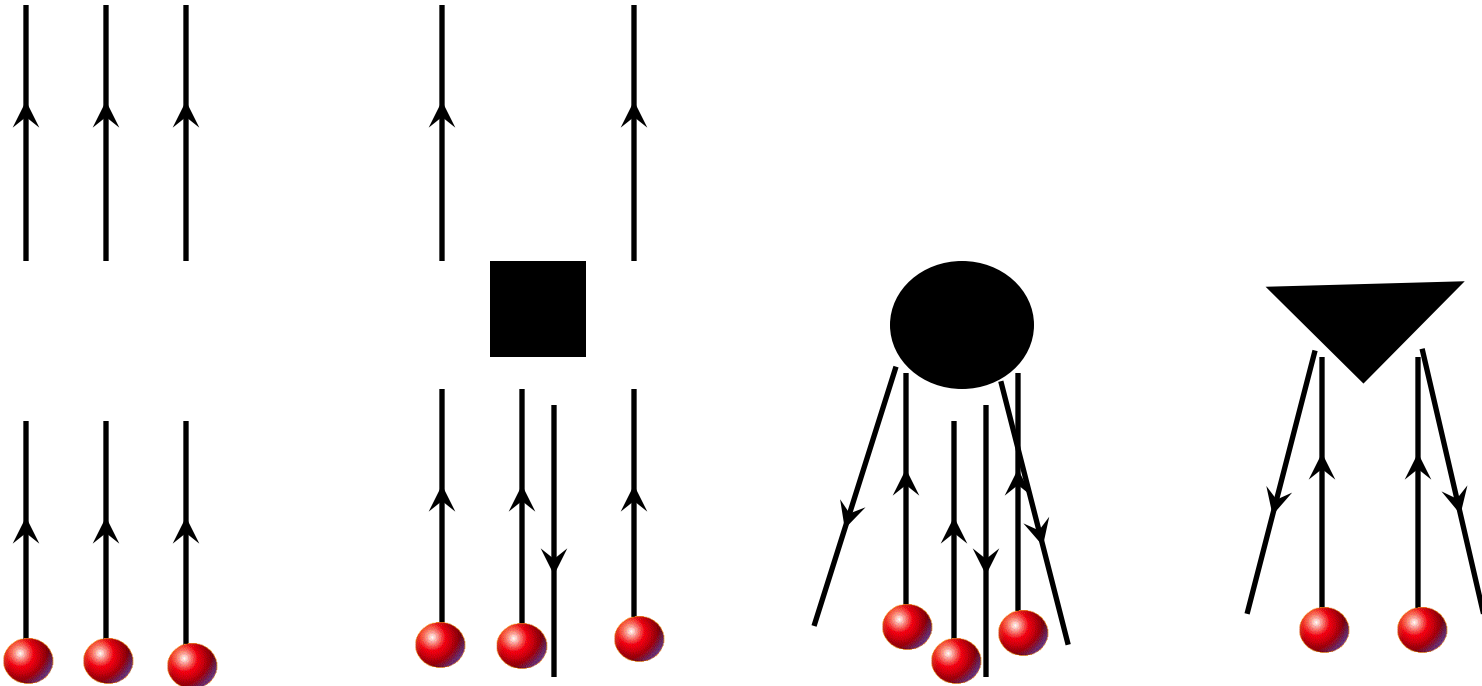
Vedere direttamente:

osservazione diretta
dell'oggetto da studiare

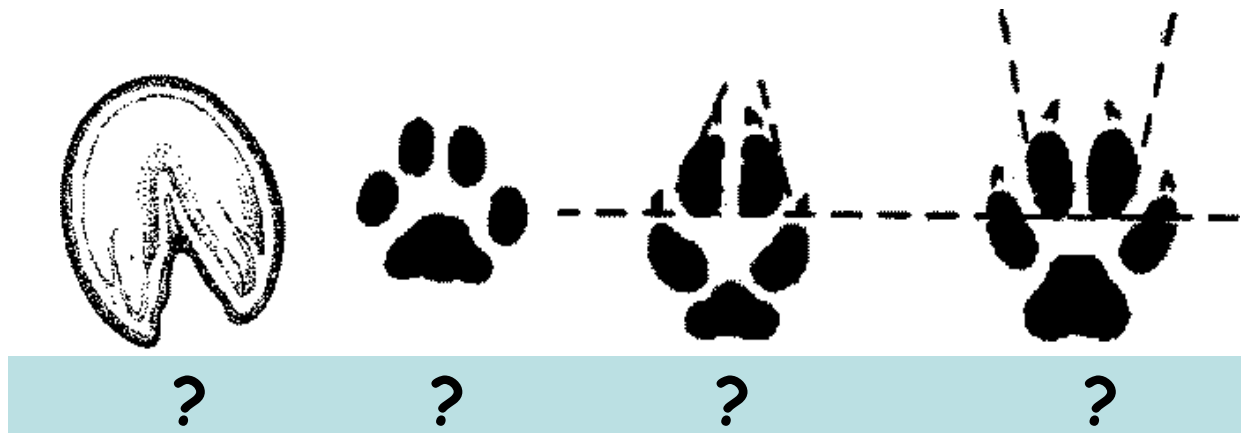


Vedere indirettamente

studio dell'oggetto attraverso i risultati di un
esperimento



La firma...



La firma...



cavallo



gatto



volpe (5 cm)



cane



rana



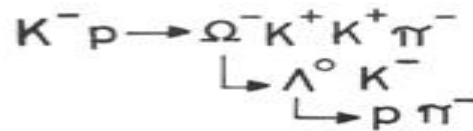
uccelli



serpenti

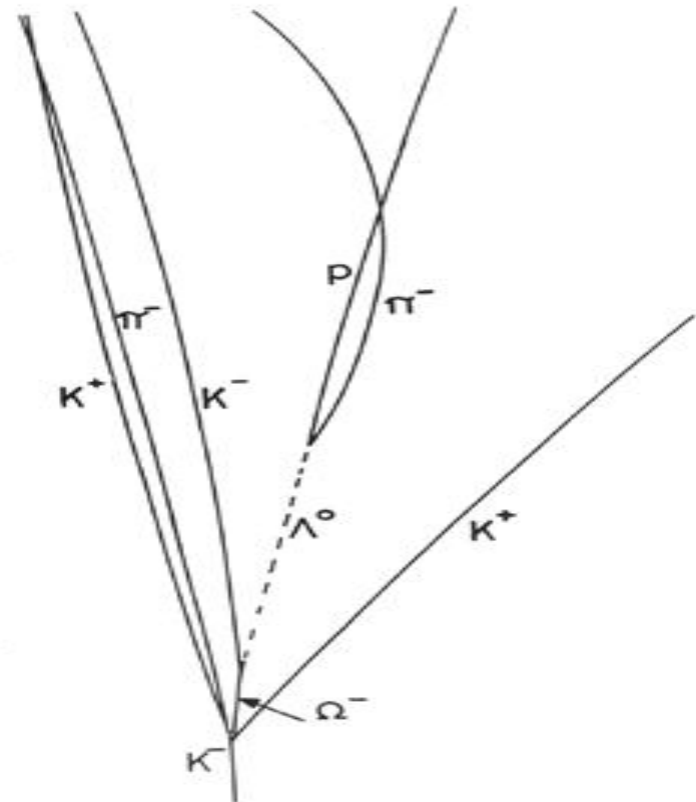
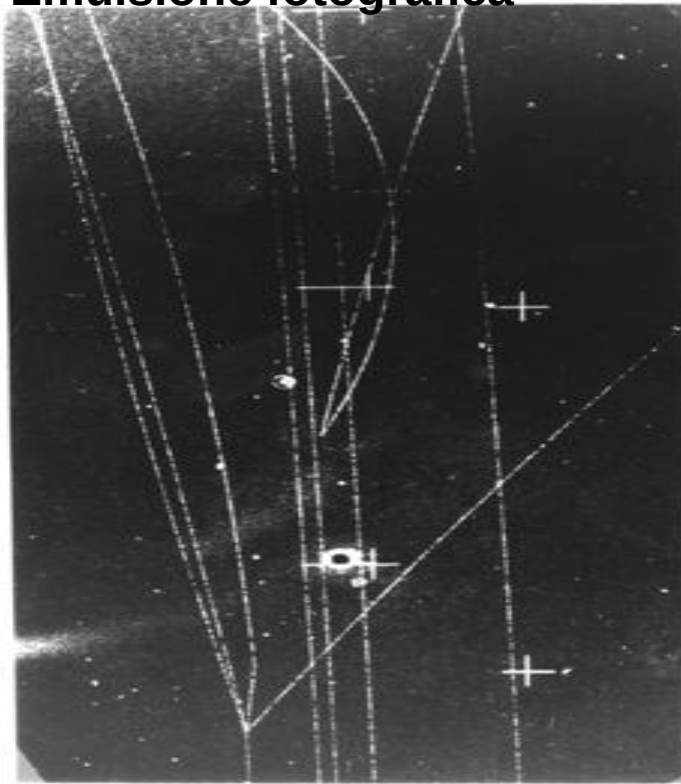
Vedere le particelle subatomiche

Ricostruzione delle particelle attraverso rivelatori, cioè strumenti specializzati che permettono di misurare i segnali rilasciati al passaggio della particella in un mezzo

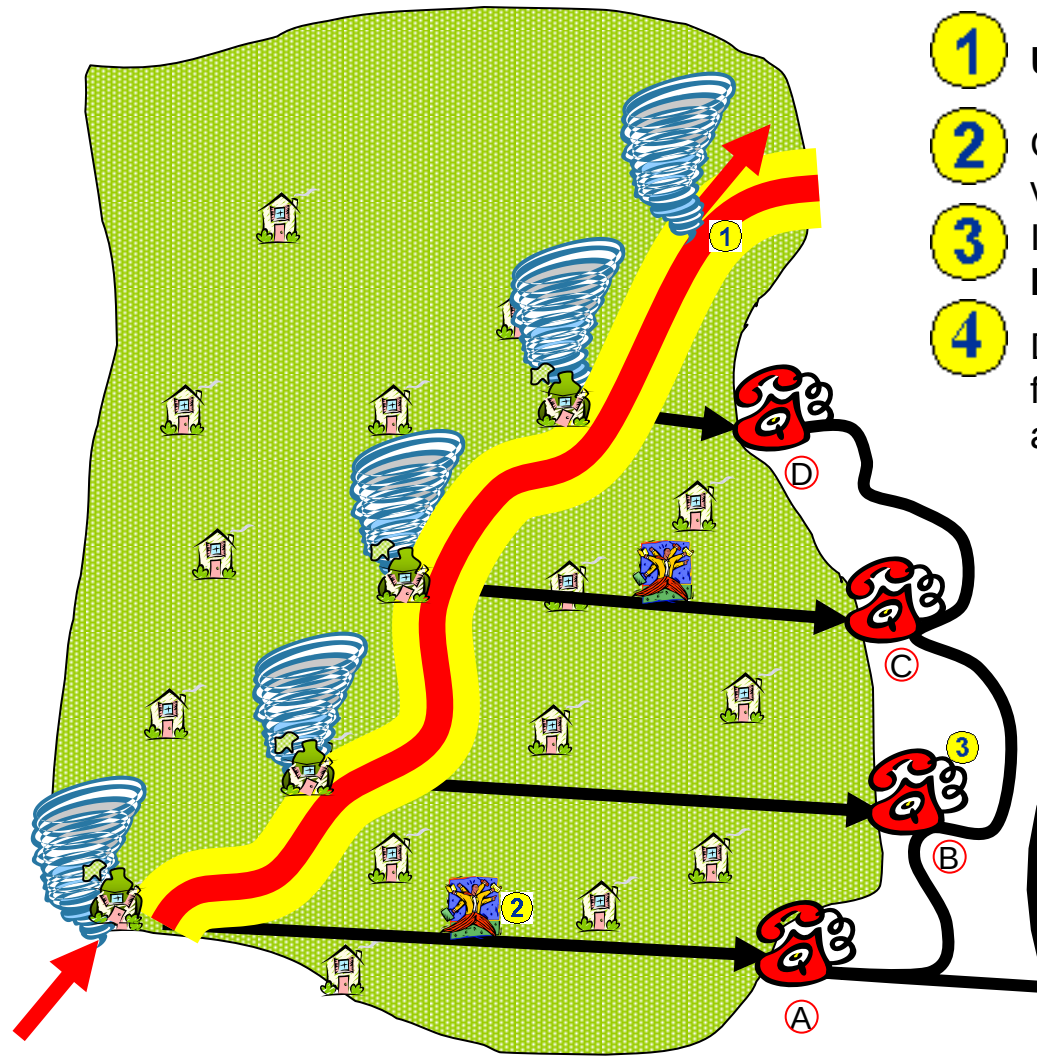


AT 10 GeV/c

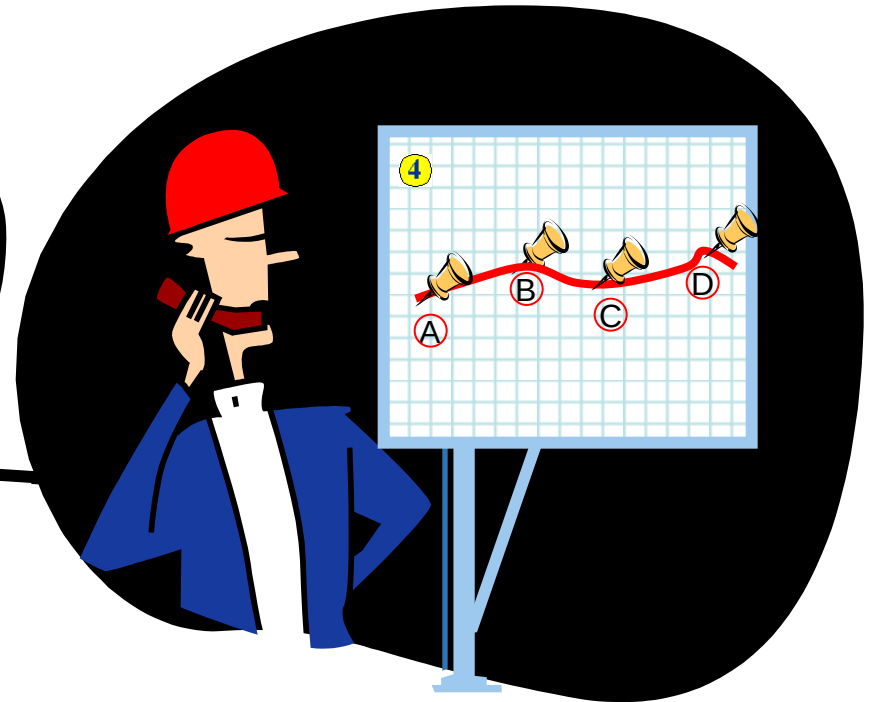
Emulsione fotografica



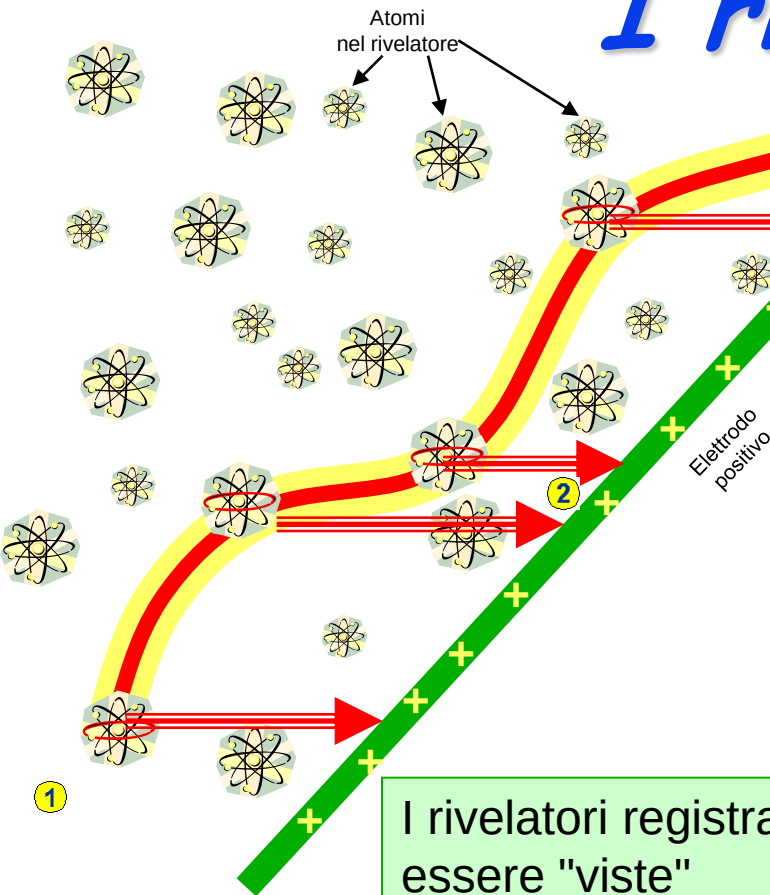
Vedere le particelle subatomiche



- 1 Una tromba d'aria distrugge le case di un villaggio.
- 2 Gli abitanti delle case distrutte corrono al telefono più vicino per chiamare i pompieri.
- 3 I pompieri registrano la **posizione** dei telefoni e l'**istante** delle chiamate.
- 4 Dalla **posizione** dei telefoni e dal **tempo intercorso** fra le chiamate, si ricostruisce il punto in cui è avvenuto l'incidente e la velocità della tromba d'aria

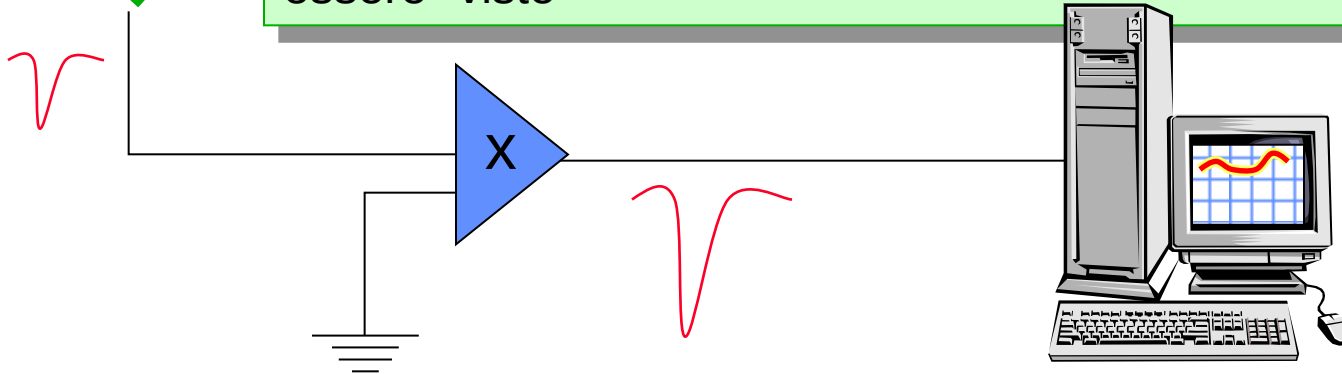


I rivelatori di particelle



- 1** una **particella invisibile** passando attraverso il rivelatore ne colpisce gli atomi e **libera elettroni**.
- 2** Gli **elettroni negativi** sono attratti dall'elettrodo **positivo** piu' vicino.
- 3** Il segnale prodotto e' **amplificato** e inviato ad un **computer**.
- 4** Dalla **posizione** dell'elettrodo e dal tempo di arrivo del segnale, il computer **ricostruisce il punto** di passaggio della particella.

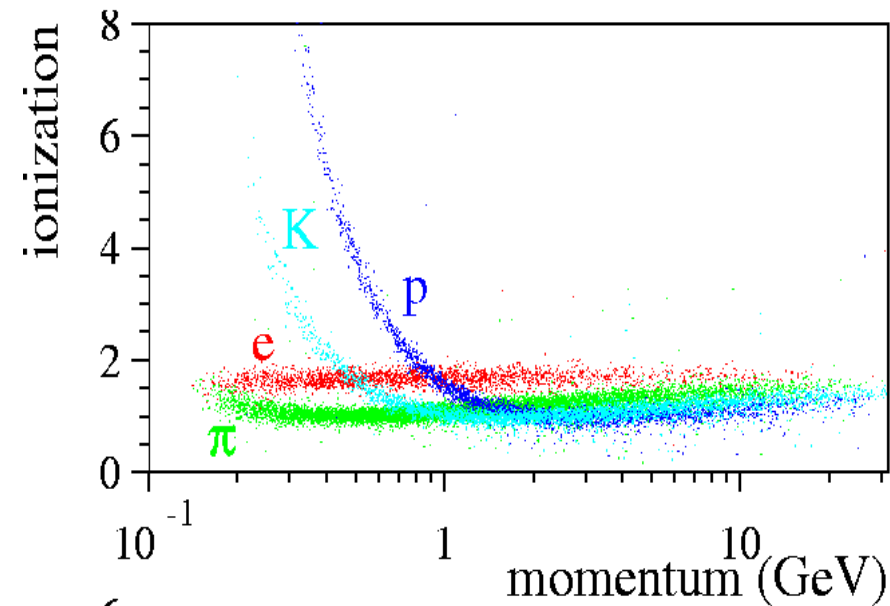
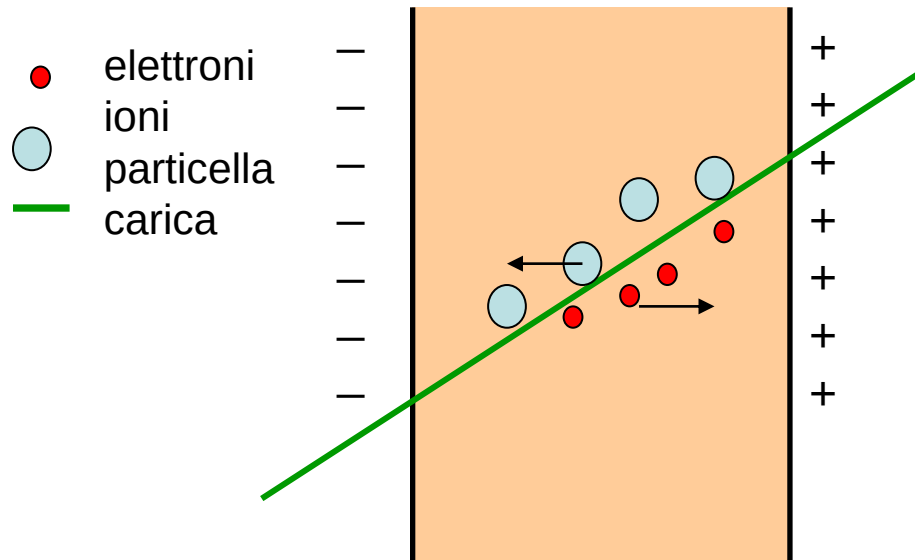
I rivelatori registrano le tracce delle particelle troppo piccole per essere "viste"



I tracciatori (camere)

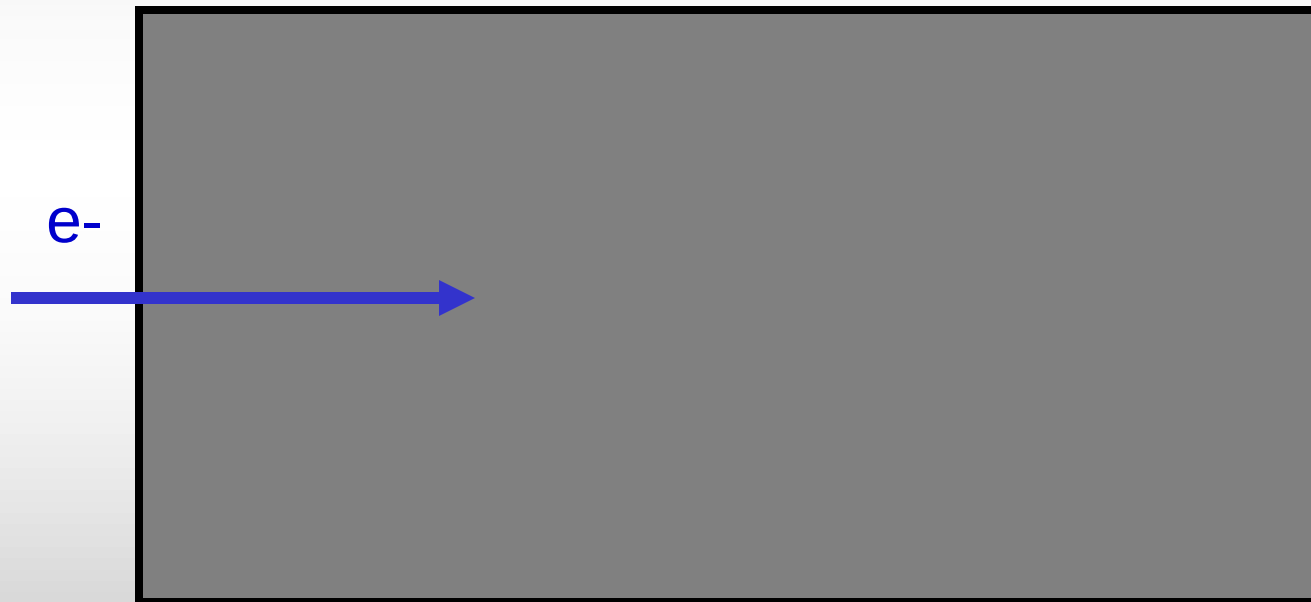
Un tracciatore e' generalmente un rivelatore a gas, cioe' una regione di spazio riempita da un gas compressa tra due elettrodi cui e' applicata una differenza di potenziale.

IONIZZAZIONE: gli urti con gli atomi del gas fanno si che si crei una **coppia ione-elettrone** "ionizzazione primaria", un elettrone primario a sua volta, se sufficientemente energetico puo' urtare altri atomi e liberare elettroni secondari "ionizzazione secondaria".



Calorimetri

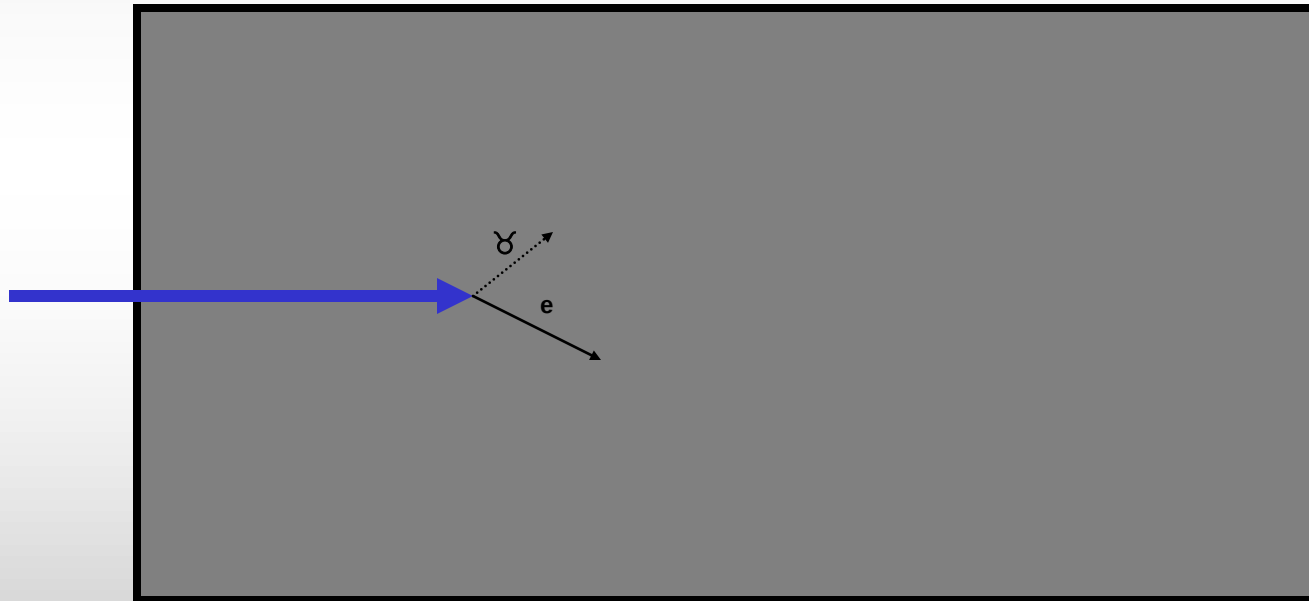
Sciame elettromagnetico



**L'elettrone di
alta energia
penetra nel
bersaglio**

Calorimetri

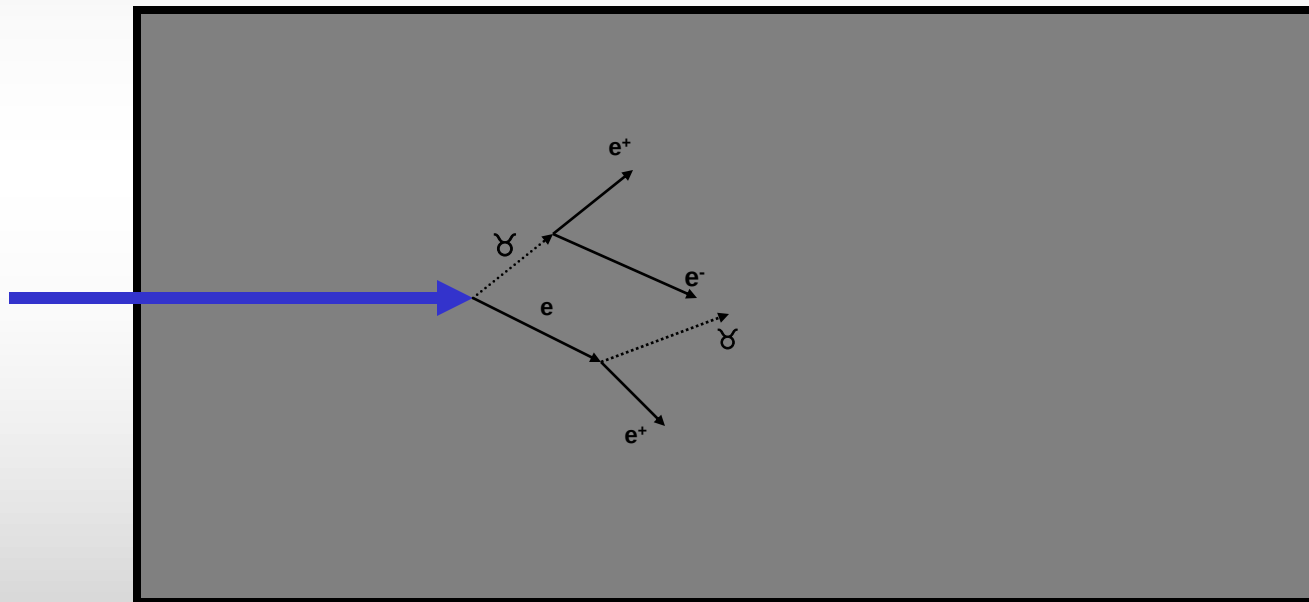
Sciame elettromagnetico



**L'elettrone
interagisce con la
materia ed emette
radiazione (fotoni)**

Calorimetri

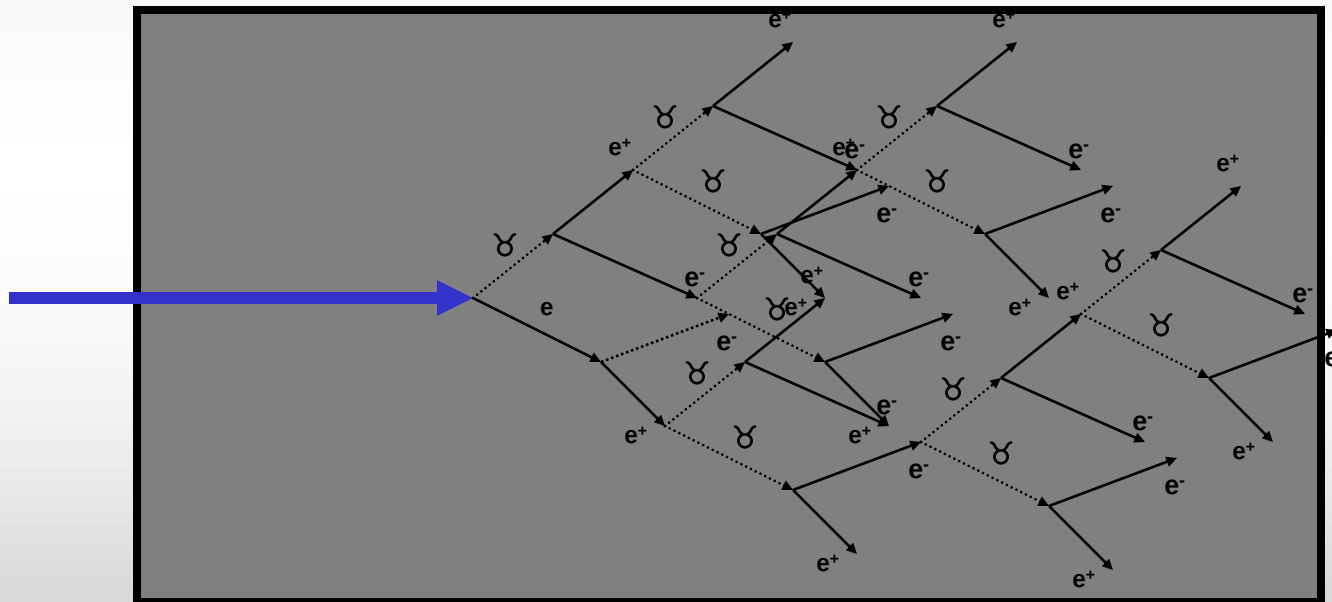
Sciame elettromagnetico



**il fotone si converte
in un elettrone (e^-)
e un positrone (e^+)**

Calorimetri

Sciame elettromagnetico

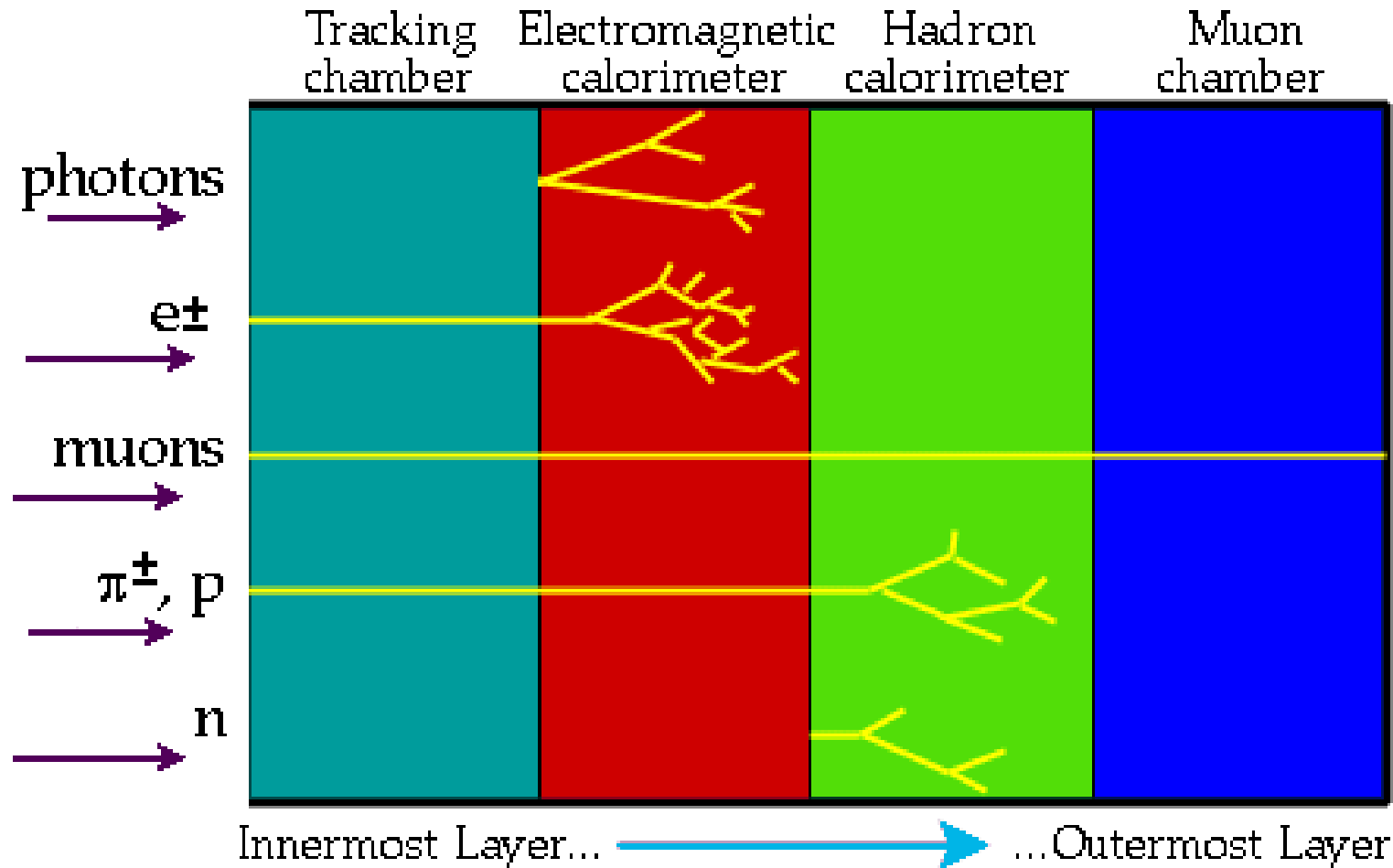


questo
processo si
ripete e forma
uno sciame

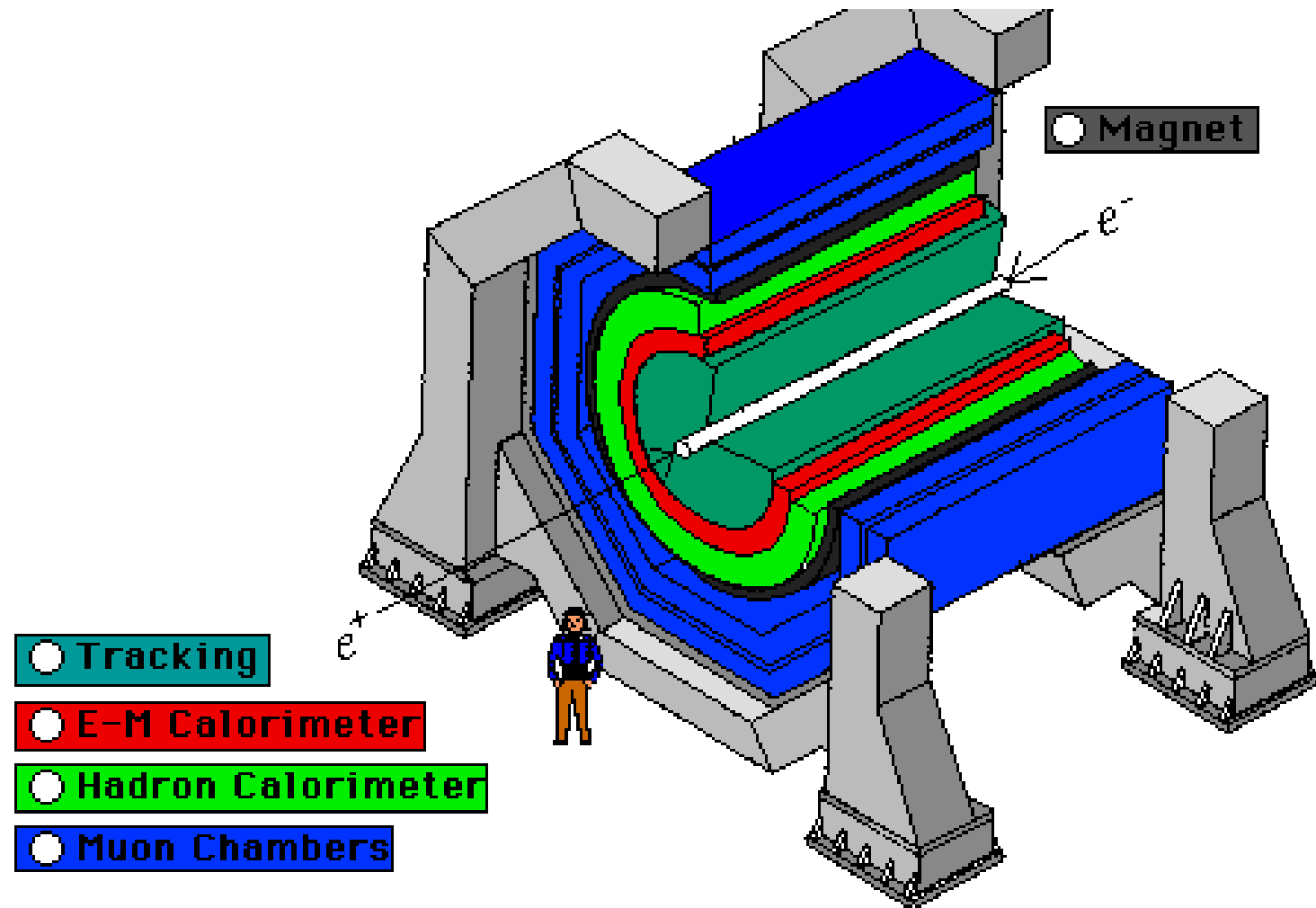
Contenimento della particella
per misurare l'energia

I rivelatori specializzati

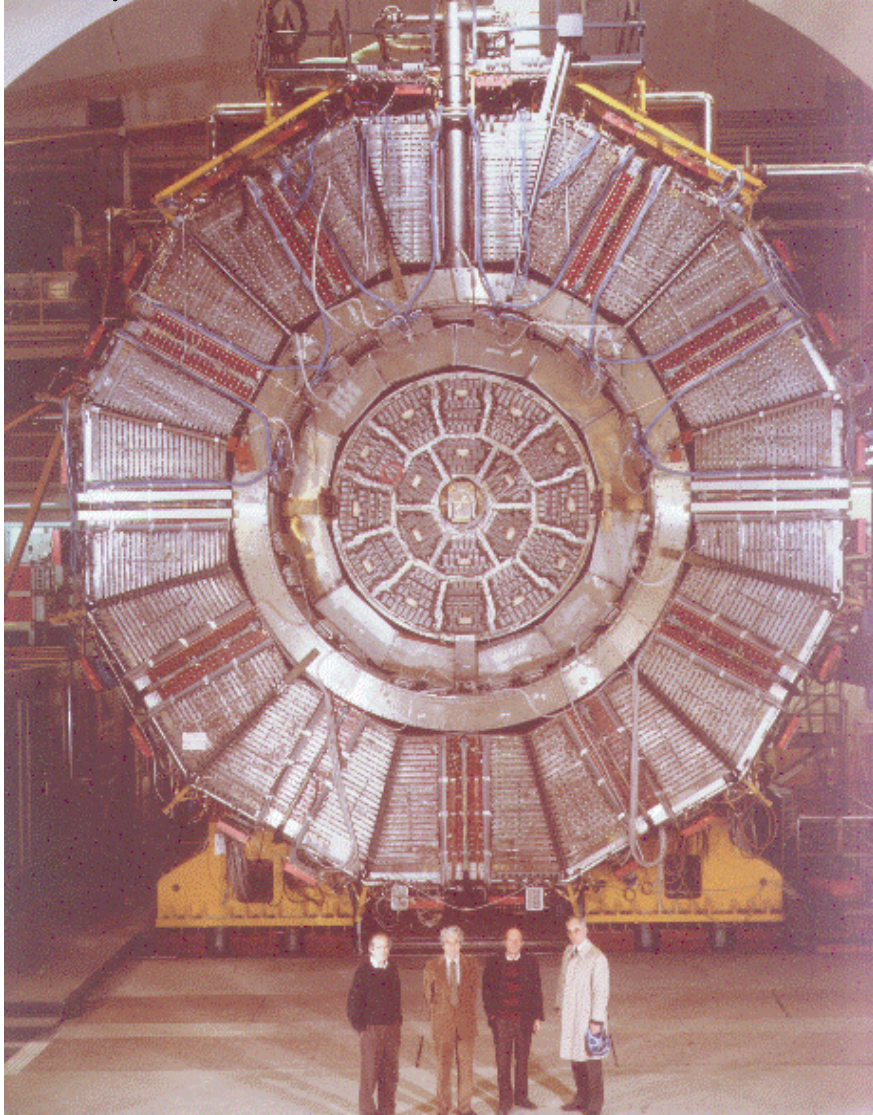
Le particelle, interagendo con opportuni materiali, rilasciano "signature" diverse.



Struttura generale di uno "spettrometro"



Esperimento ALEPH 1988-2001

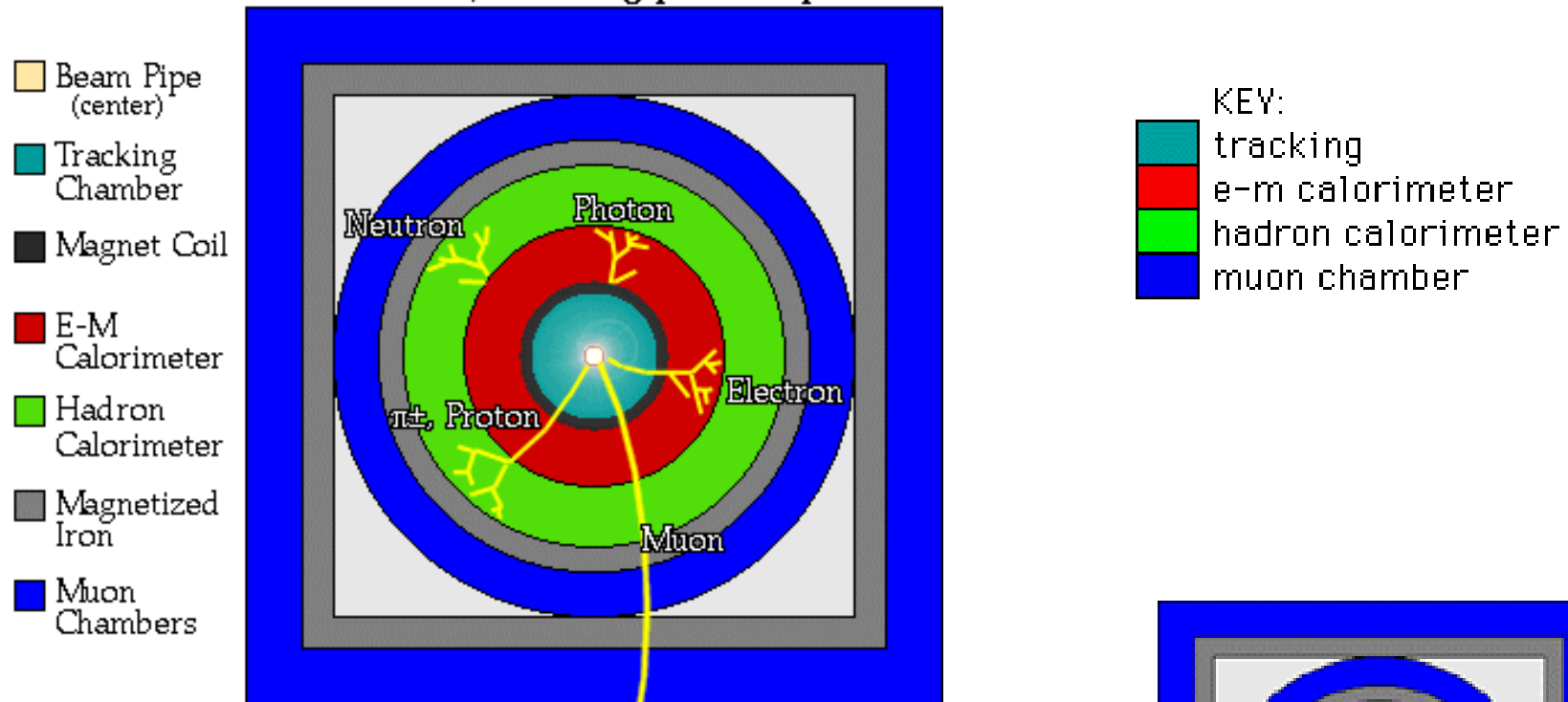


Central barrel di CMS a LHC



Diventa fisico in 60 secondi!

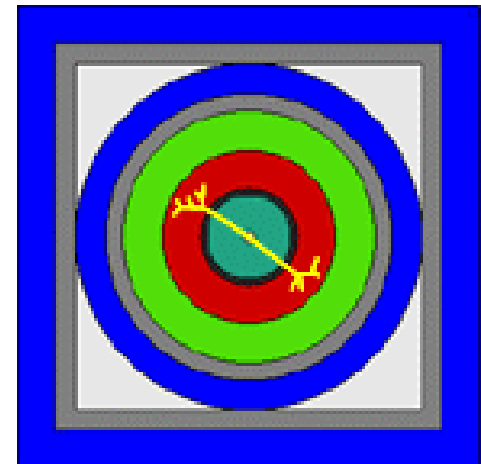
A detector cross-section, showing particle paths



Presenza di 2 tracce

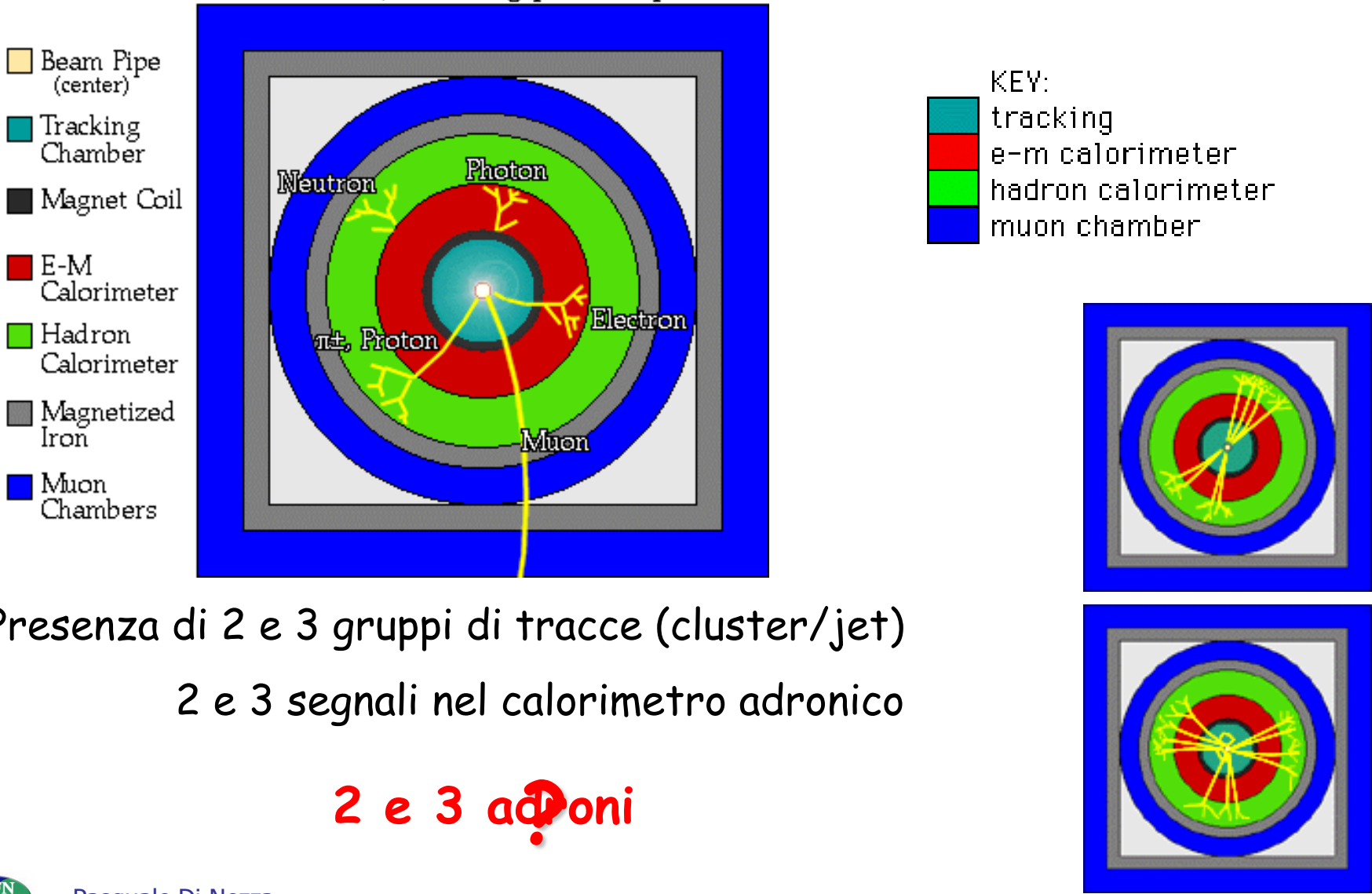
2 segnali solo nel calorimetro elettromagnetico

? 2 elettroni !



Diventa fisico in 60 secondi!

A detector cross-section, showing particle paths



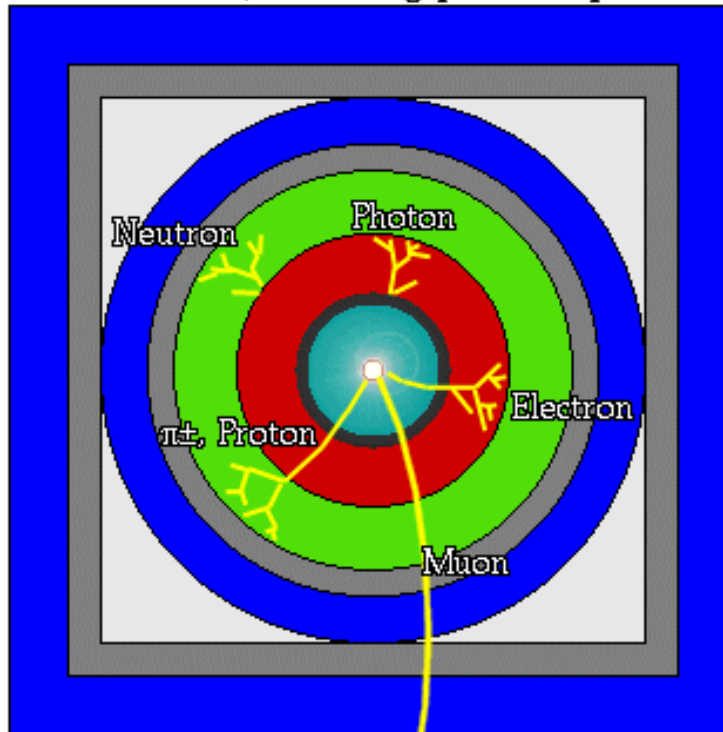
Presenza di 2 e 3 gruppi di tracce (cluster/jet)
2 e 3 segnali nel calorimetro adronico

2 e 3 adroni

Diventa fisico in 60 secondi!

A detector cross-section, showing particle paths

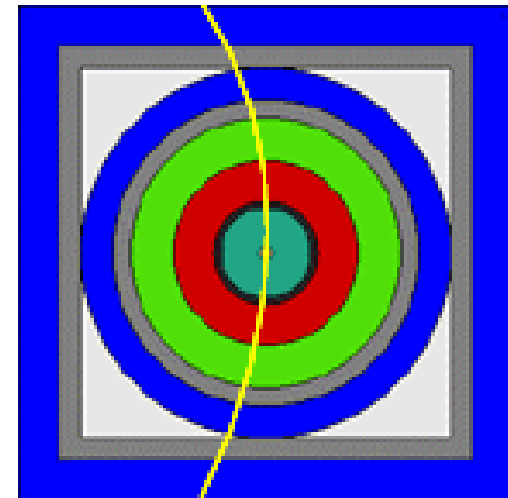
- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



- KEY:
- tracking
 - e-m calorimeter
 - hadron calorimeter
 - muon chamber

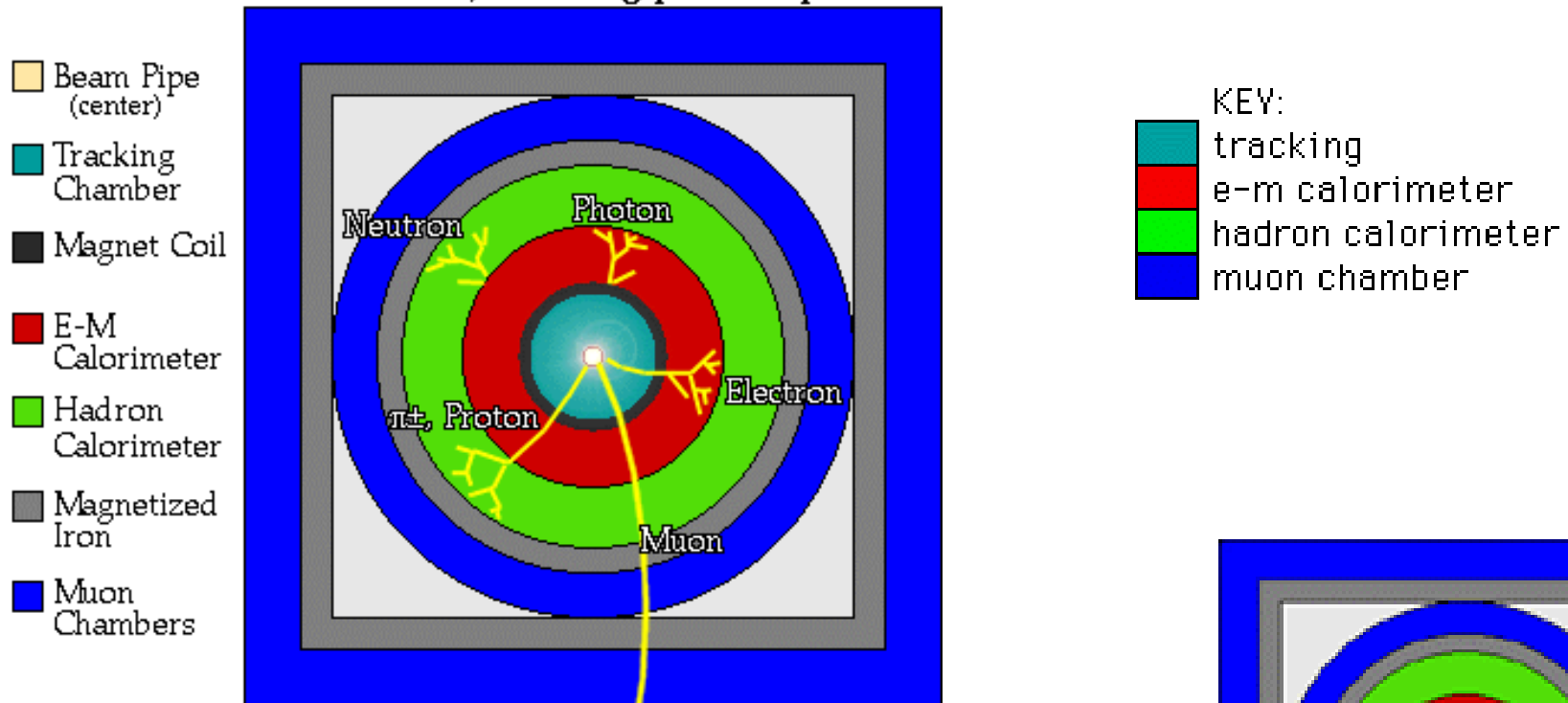
Presenza di 2 singole tracce
Nessun segnale nei calorimetri

? 2 muoni !



Diventa fisico in 60 secondi!

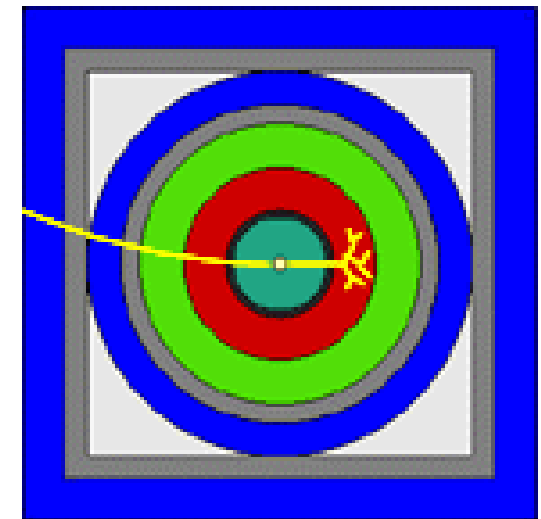
A detector cross-section, showing particle paths



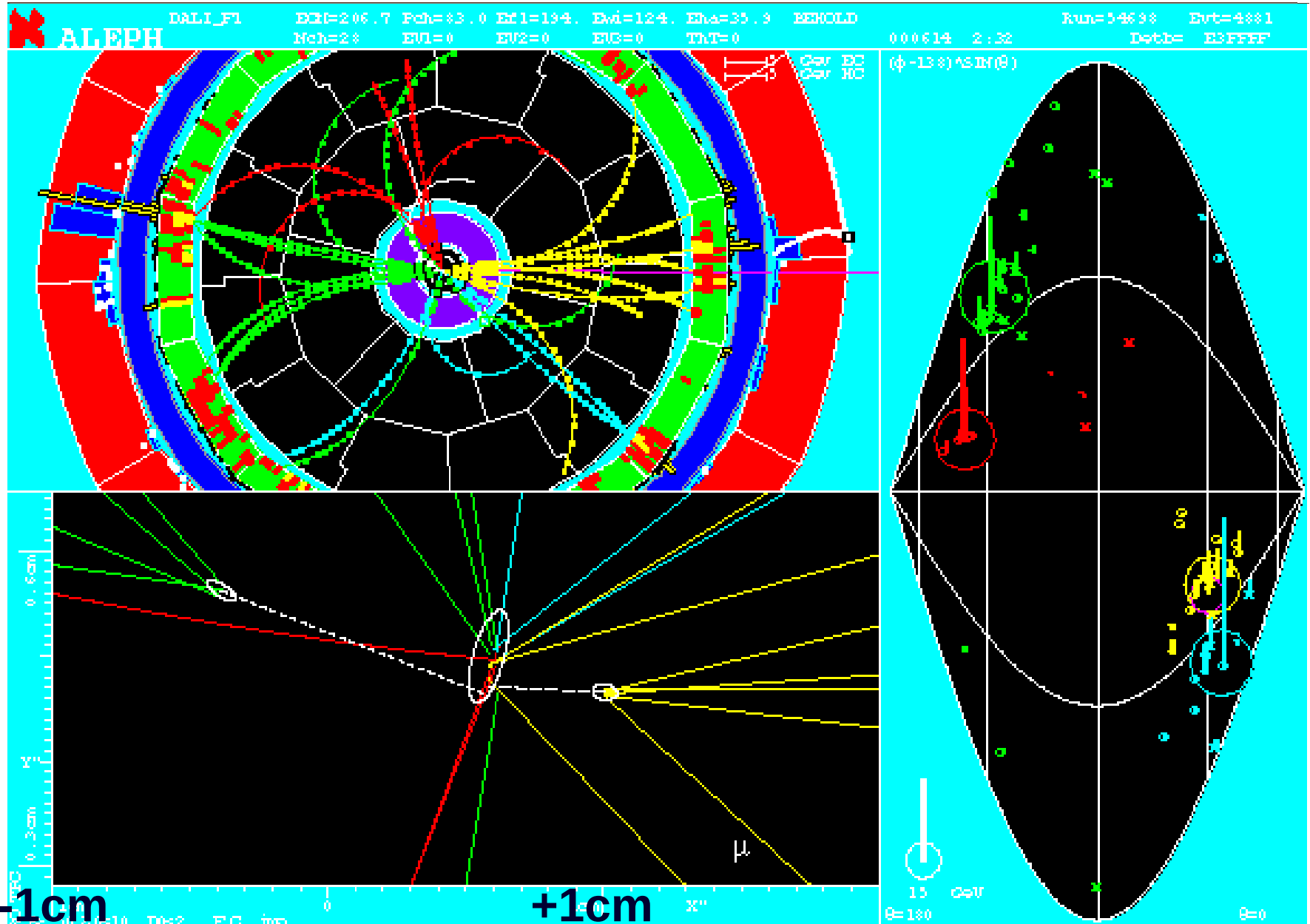
Presenza di 2 tracce

1 segnale nel calorimetro elettromagnetico

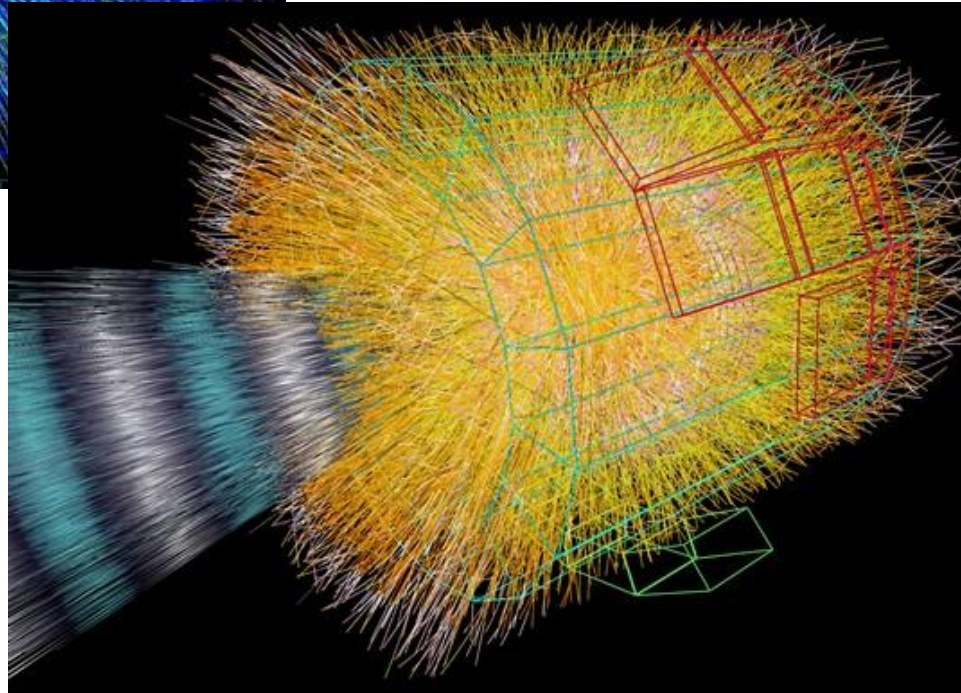
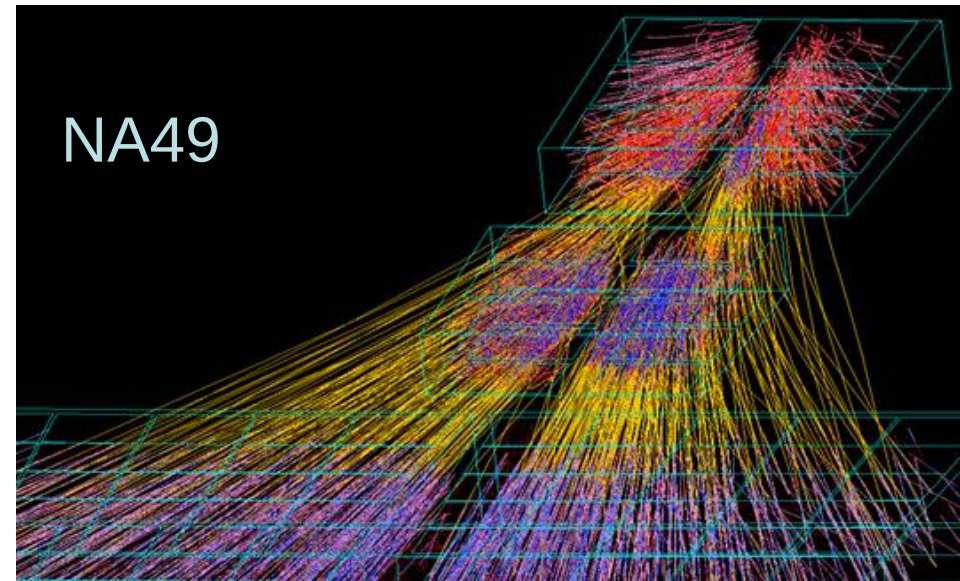
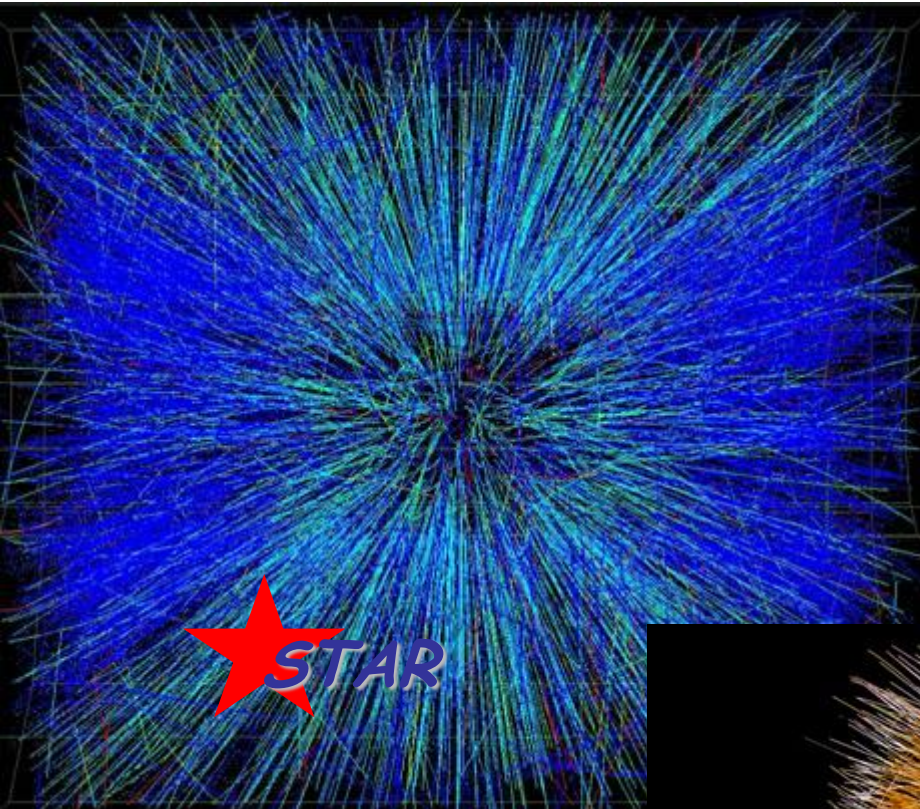
1 muone + 1 elettrone = tauone



Ricostruzione dell'evento



Le nuove frontiere



Alice

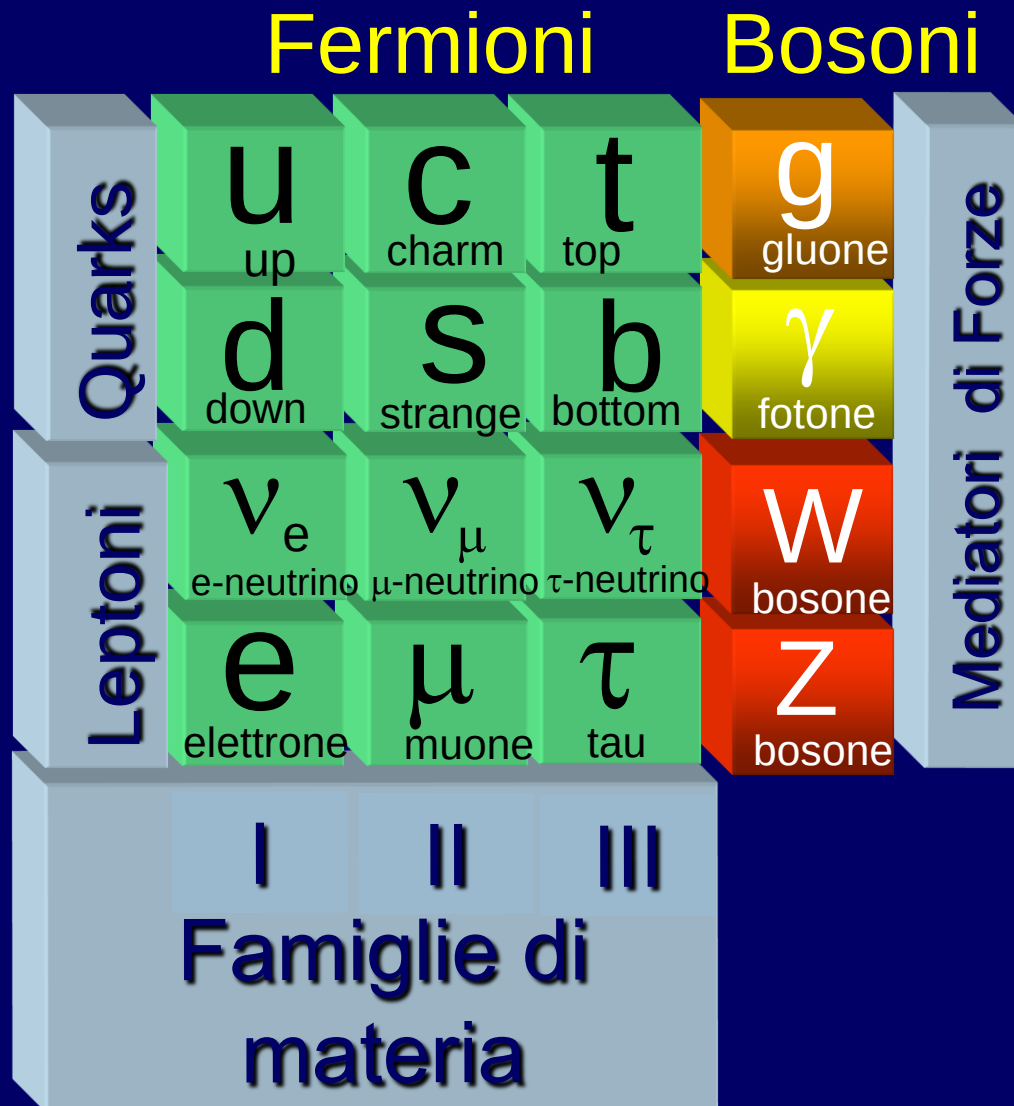


... ma in definitiva ... di
cosa e' fatto l'Universo?

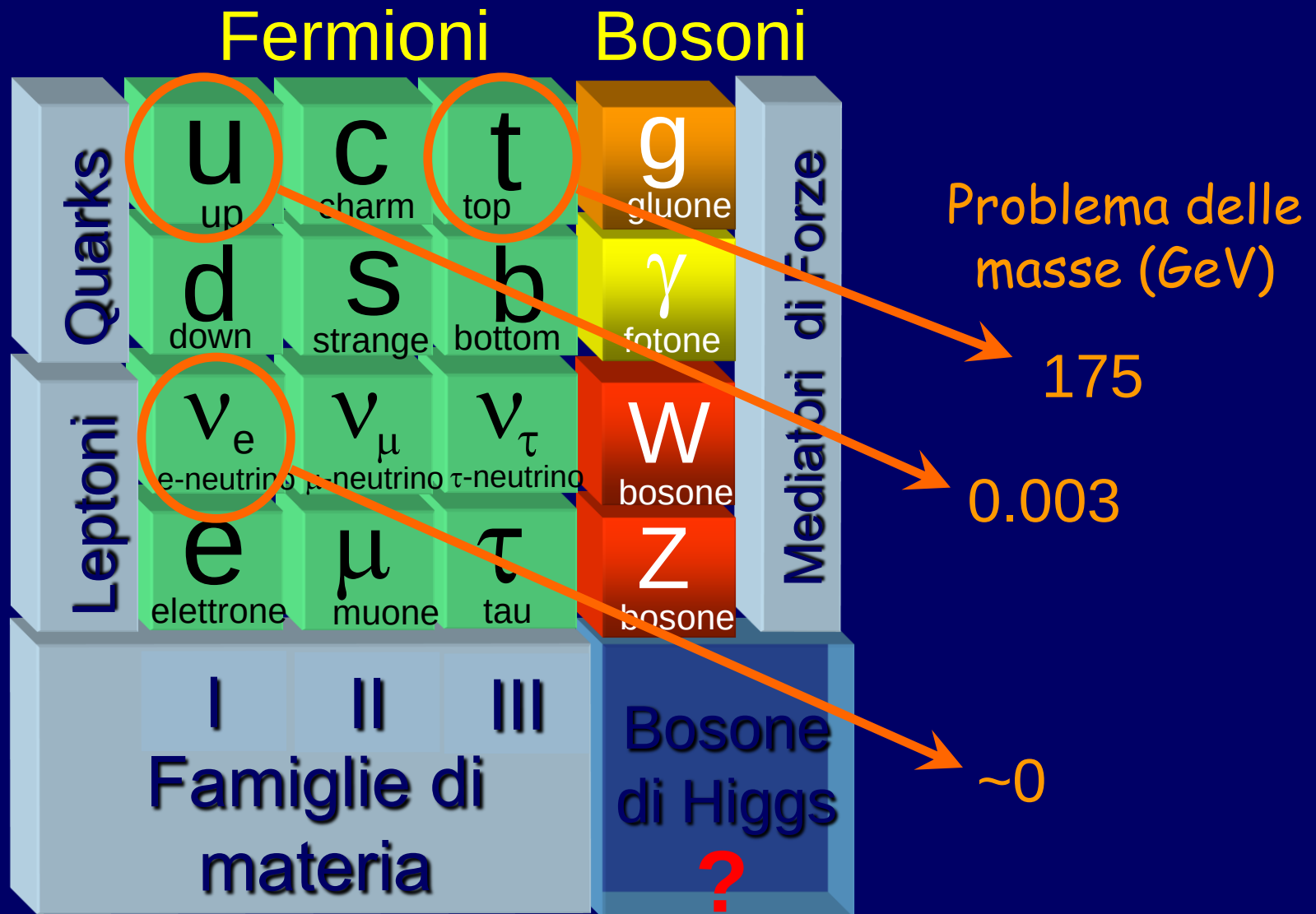
Il Modello Standard

... ed i suoi interrogativi

Il Modello Standard



Il Modello Standard

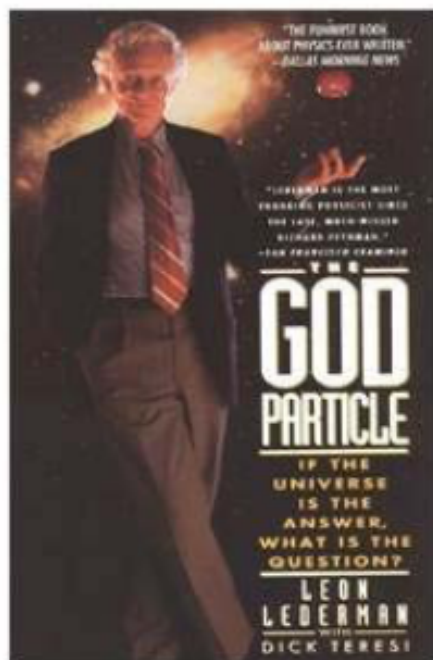


Il Meccanismo di Higgs

Esiste però ancora un elemento da verificare nel Modello Standard: la scoperta della *particella di Higgs*

Il meccanismo di Higgs è un elemento cruciale della teoria. Ha la funzione di:

- rompere la simmetria (quella che unifica le interazioni fondamentali);
- dare massa alle particelle.

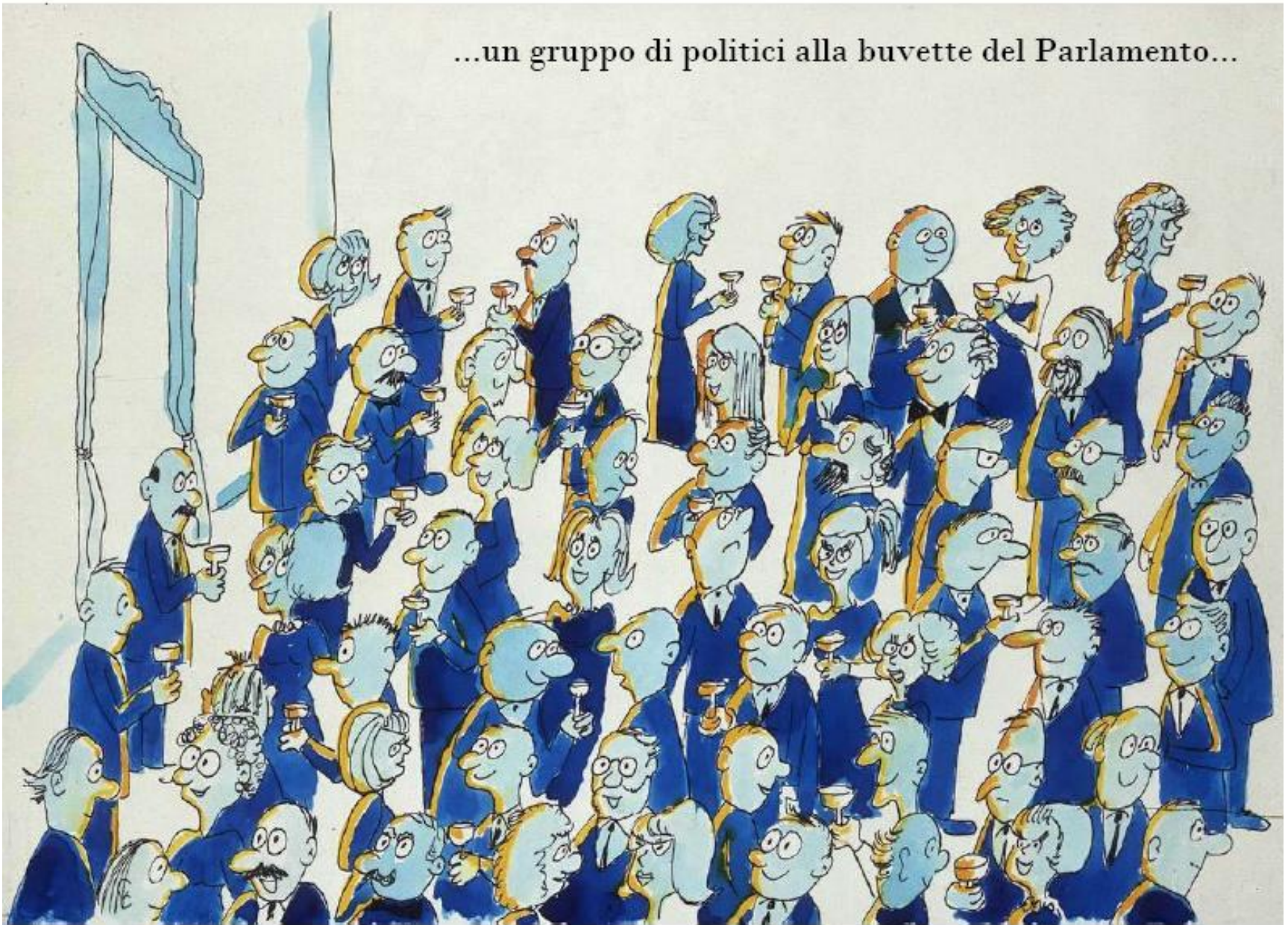


Si è osservato sperimentalmente che il meccanismo funziona, ma il *bosone di Higgs* non è stato ancora trovato, ed uno degli scopi per cui è stato costruito LHC è scoprire questa particella.

Nel 1993 il Ministro inglese della Scienza, Weldgrave, mise in palio una bottiglia di champagne per il fisico che fosse stato capace di spiegargli su un solo foglio di carta, come funzionasse il meccanismo di Higgs (e a cosa servisse scoprirla...)

Il prof. David Miller vinse con il seguente esempio...

...un gruppo di politici alla buvette del Parlamento...



...improvvisamente arriva il Primo Ministro...



...tutti si affollano intorno a lui...
(questo spiega come le particelle acquistano la massa)



L'origine delle masse: il bosone di Higgs

Nel Modello Standard l'origine delle masse viene spiegata tramite la **rottura spontanea della simmetria elettrodebole** a opera di un campo scalare: **il campo di Higgs**.

Le masse dei quark, dei leptoni e dei bosoni vettori deboli sono tutte interpretate come il risultato dell'interazione con il campo di Higgs.

Da **misure sperimentali indirette**

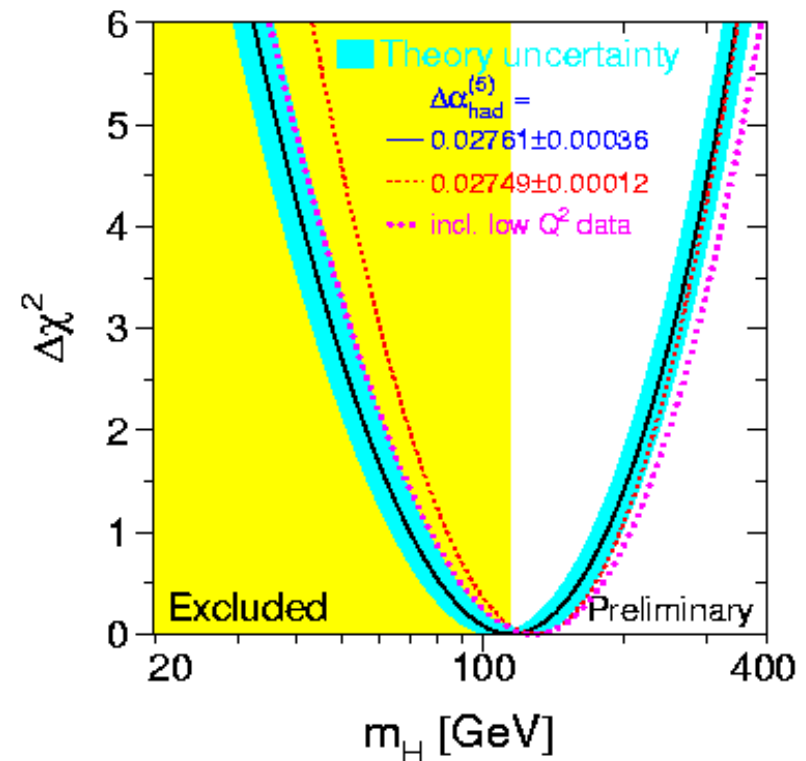
(misure sui parametri elettrodeboli a LEP2, Tevatron, SLAC) si ha :

$$M_H < 251 \text{ GeV}/c^2 \text{ (95\% C.L.)}$$

Da **ricerche sperimentali dirette**

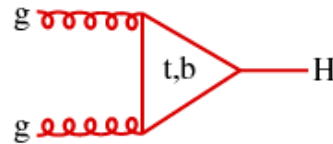
(misura combinata degli esperimenti di LEP2) si ha:

$$M_H > 114.4 \text{ GeV}/c^2 \text{ (95\% C.L.)}$$

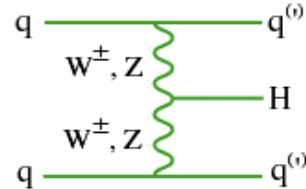


Produzione dell' Higgs a LHC

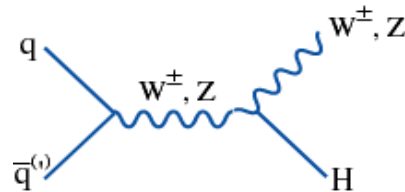
Fusione gluone-gluone



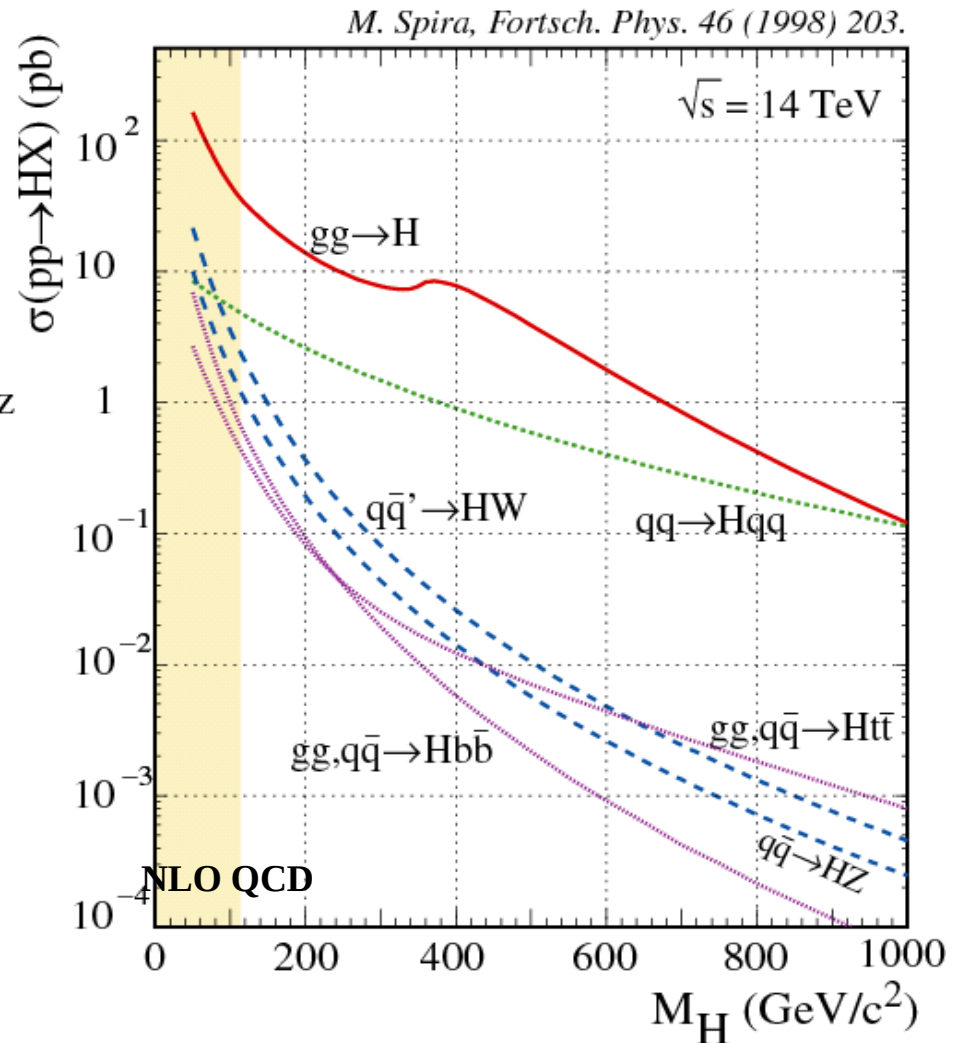
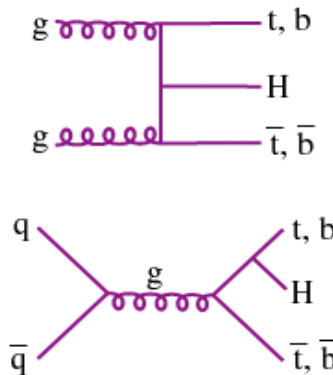
Fusione dei Bosoni Vettoriali (VBF)



Bremsstrahlung di W / Z



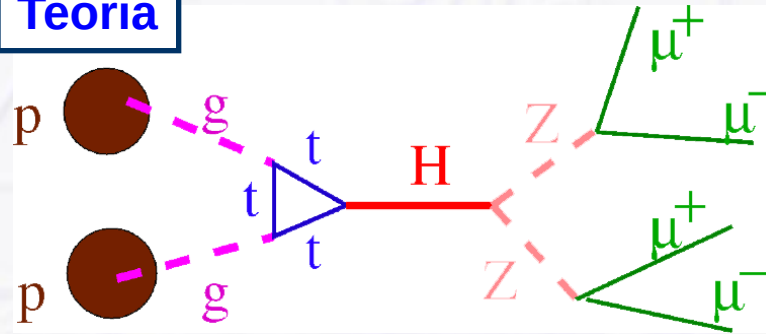
Produzione associata a quark pesanti (t/b)



Il processo dominante e' la **fusione g-g**, per $M_H < 2M_Z$ il **processo VBF** costituisce il 20% della sezione d'urto totale

In realtà l'Higgs si presenta come ...

Teoria



Evento, CMS

CMS

H $\rightarrow$ $\mu\mu\mu\mu$
 $m(H)=150\text{GeV}$
+ 20 Min bias

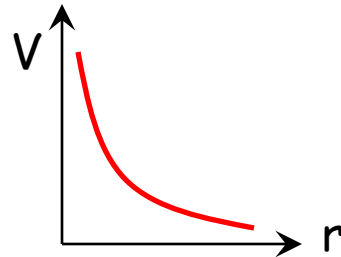
Electrons
Muons
Hadrons $pt < 2\text{GeV}$
Hadrons $pt > 2\text{GeV}$

Evento, ATLAS

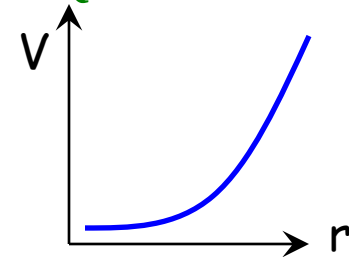
Liberta' Asintotica $\rightarrow$ Confinamento



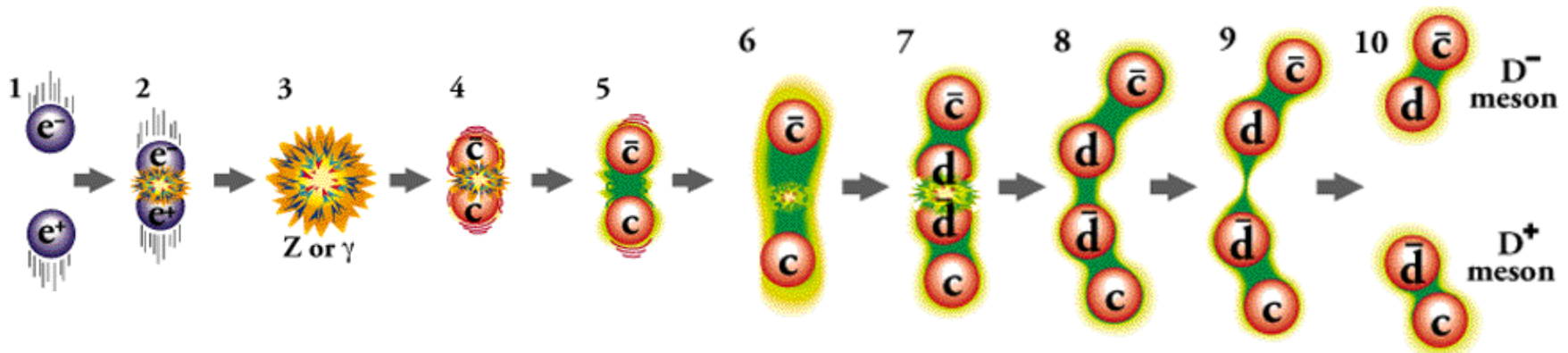
$$V_{\text{Coulomb}} \propto \frac{q_1 q_2}{r}$$



$$V_{\text{QCD}} \propto e^{k \cdot r}$$



Adronizzazione



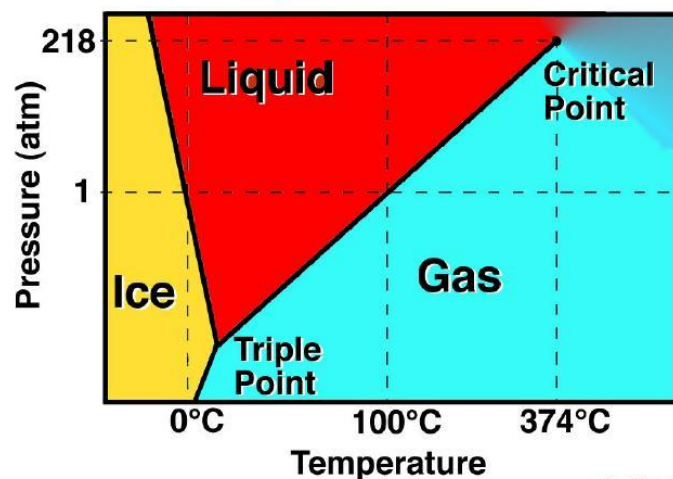
Allontanando i quark, si crea una tensione
con energia sufficiente a creare altre
particelle (1000 MeV / fm)



Quark Gluon Plasma

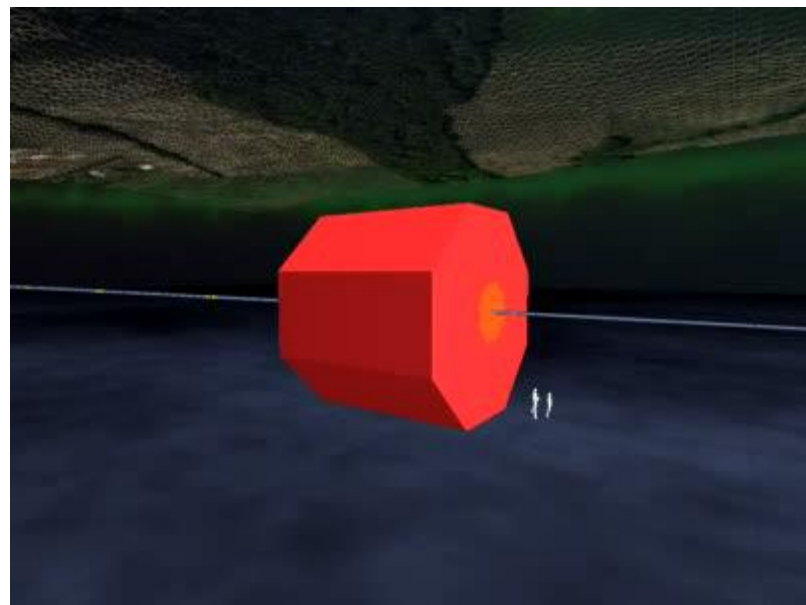
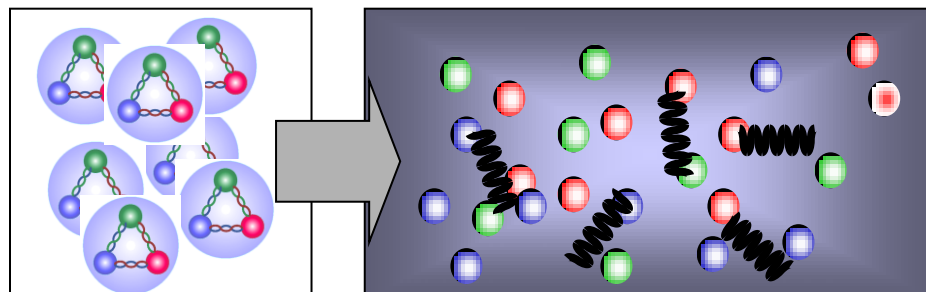
Plasma: 4° stato materia

Phase Diagram - Water



Page 3

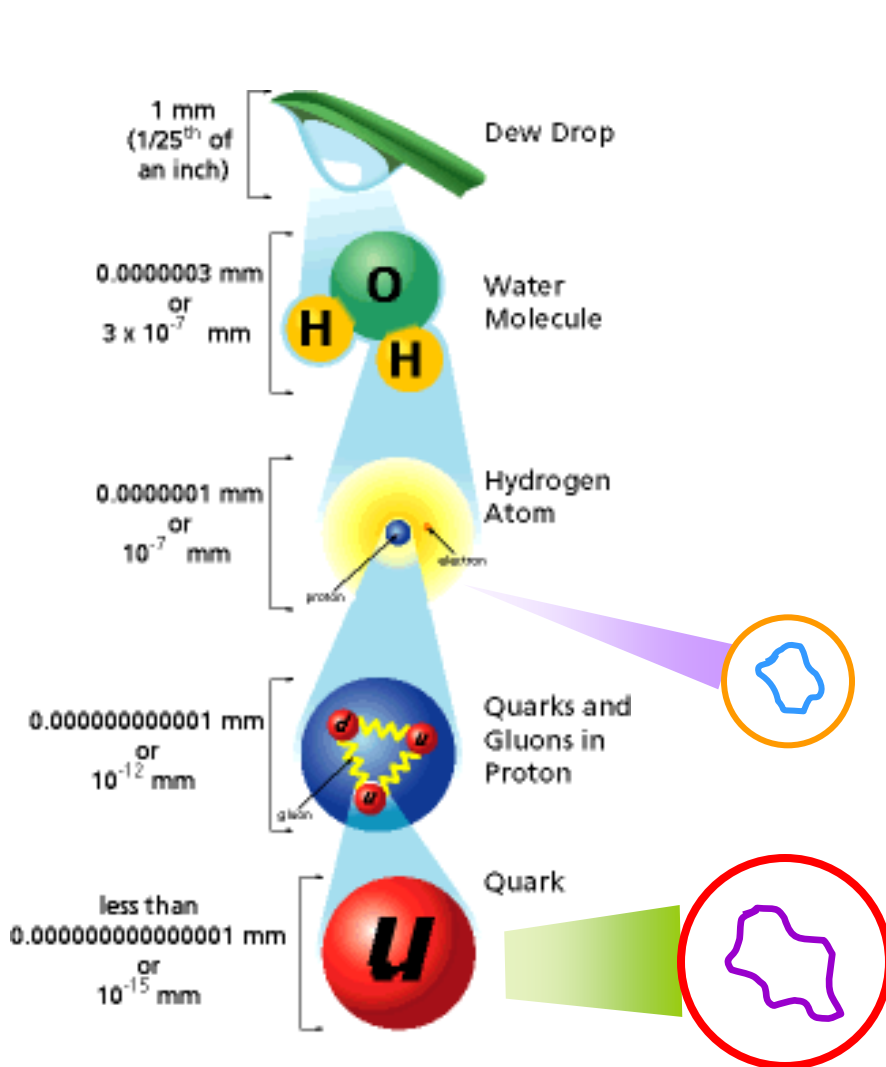
Oltre il confinamento



- Nuovo stato della materia
- Nuova sonda per la Cromo-Dinamica Quantistica (QCD)
- Creazione della materia primordiale:

$$t=10^{-34} \text{ s} \quad T=10^{27} \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Le particelle sono veramente puntiformi ?



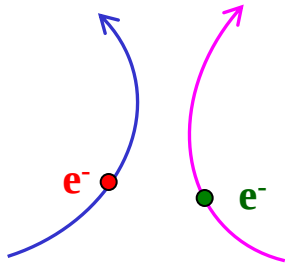
Teoria delle Stringhe

ulteriore livello
microscopico: particelle
non sono puntiformi, ma
piccoli (10^{-33} cm) anelli
oscillanti

diversi stati di oscillazione
della stringa → particelle
diverse

Le forze fondamentali

Fisica Classica

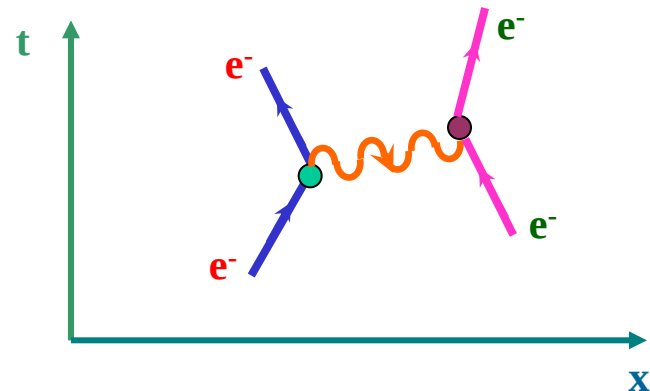


elettroni si avvicinano →
mutua repulsione →
rallentati e deviati



Azione a distanza

Fisica Quantistica



- e^- emette γ → cambia velocità
- e^- assorbe γ → cambia velocità



Interazione = scambio del γ

Le forze fondamentali

forza	intensità	effetto
Gravitazionale	1	Vi tiene seduti



Debole

10^{29}

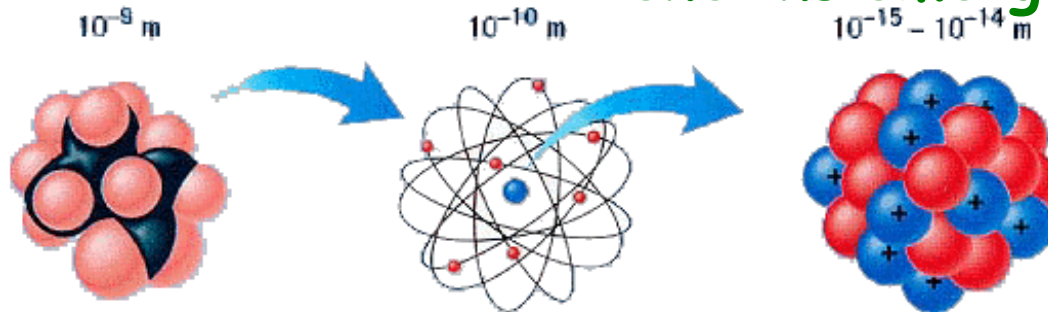
Decadimenti:
 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



Elettromagnetica

10^{40}

Tiene insieme gli atomi



Forte

10^{43}

Tiene insieme i nuclei

Fields

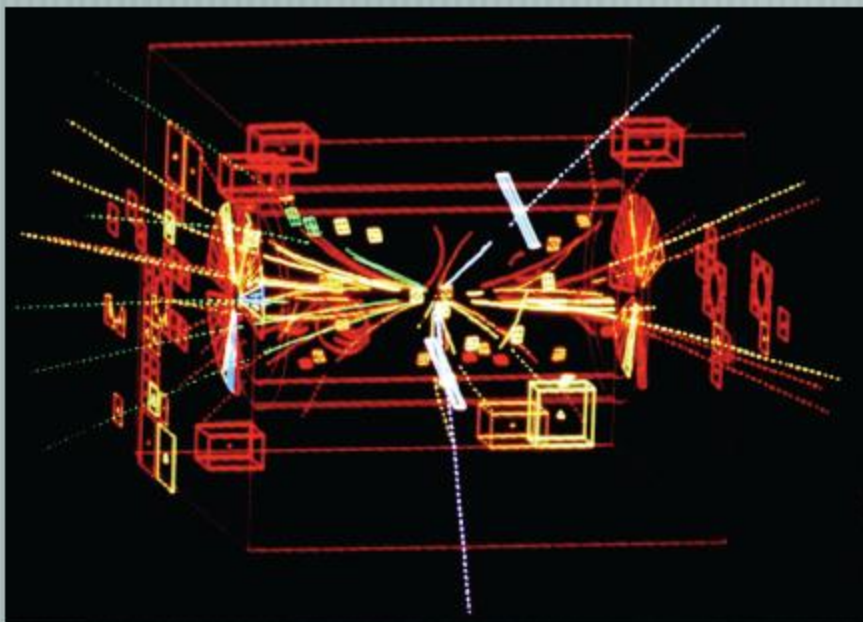
Electroweak Interaction

1983

Discovery of the W, Z bosons at CERN (1983)

(Carlo Rubbia - leader of UA1 collaboration, and proponent of proton-antiproton collider in SpS)

(Simon van der Meer - inventor of stochastic beam cooling)



Particelle Virtuali (II)

Cos'è una **particella virtuale** ??

$\Delta E \Delta t \geq \hbar \rightarrow$ indulgenza nella legge di conservazione di E

è **consentita** una violazione di entità ΔE della legge di conservazione dell'energia, **purché duri per un tempo**

$$\Delta t \leq \frac{\hbar}{\Delta E}$$

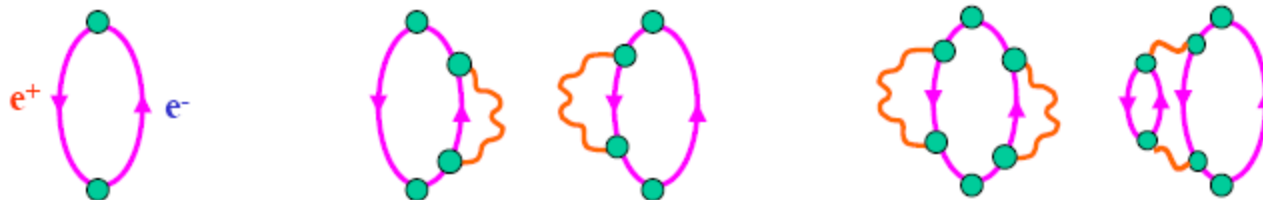
Esempio : $\Delta E = 1 \text{ MeV}$
 $\hbar = 7 \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}$ $\rightarrow \Delta t = 7 \times 10^{-22} \text{ s}$

$\rightarrow$ **spazio percorso dal fotone durante una violazione di energia di 1 MeV** $= c \Delta t \cong 2 \times 10^{-13} \text{ m}$

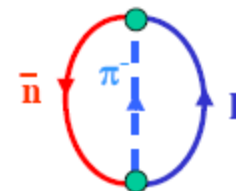
Vuoto Quantistico (I)

P.d'I. → "danza" delle particelle virtuali anche nello spazio vuoto

Esempio : diagrammi di vuoto della QED



... e se "accendiamo"
interazione nucleare



Vuoto Quantistico (II)

Una scatola vuota non è mai vuota: lo impedisce il P.d'I.

tutte le particelle note (con tutte le energie possibili)
nello stato virtuale sono presenti nel vuoto fisico !!



Lo stato di vuoto è quello a cui compete la
minima energia possibile

Annichilazione di particelle fornisce energia E al vuoto
fisico $\rightarrow$ particelle virtuali promosse nello stato reale

tipo di particelle create dipende da E e dal tipo di
particelle annichilate, i.e. da leggi di conservazione

Le forze fondamentali

forza	intensità	effetto
Gravitazionale	1	Vi tiene seduti



Debole

10^{29}

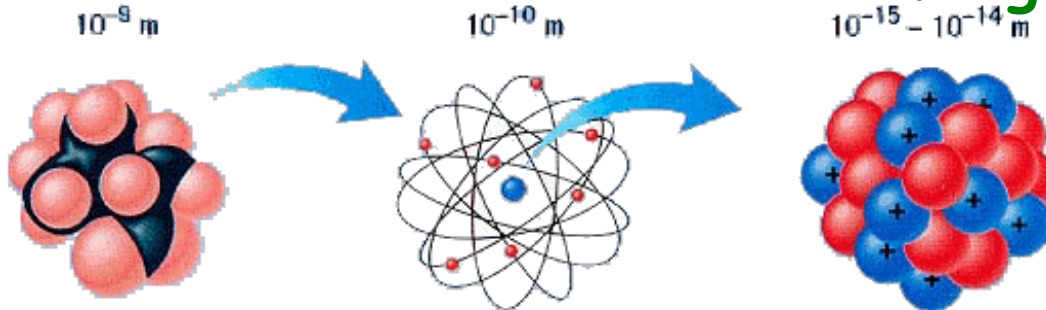
Decadimenti:
 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



Elettromagnetica

10^{40}

Tiene insieme gli atomi



Forte

10^{43}

Tiene insieme i nuclei



Unificazione delle Forze

Date queste differenze, è ragionevole pensare che queste 4 interazioni siano riconducibili ad una sola ?

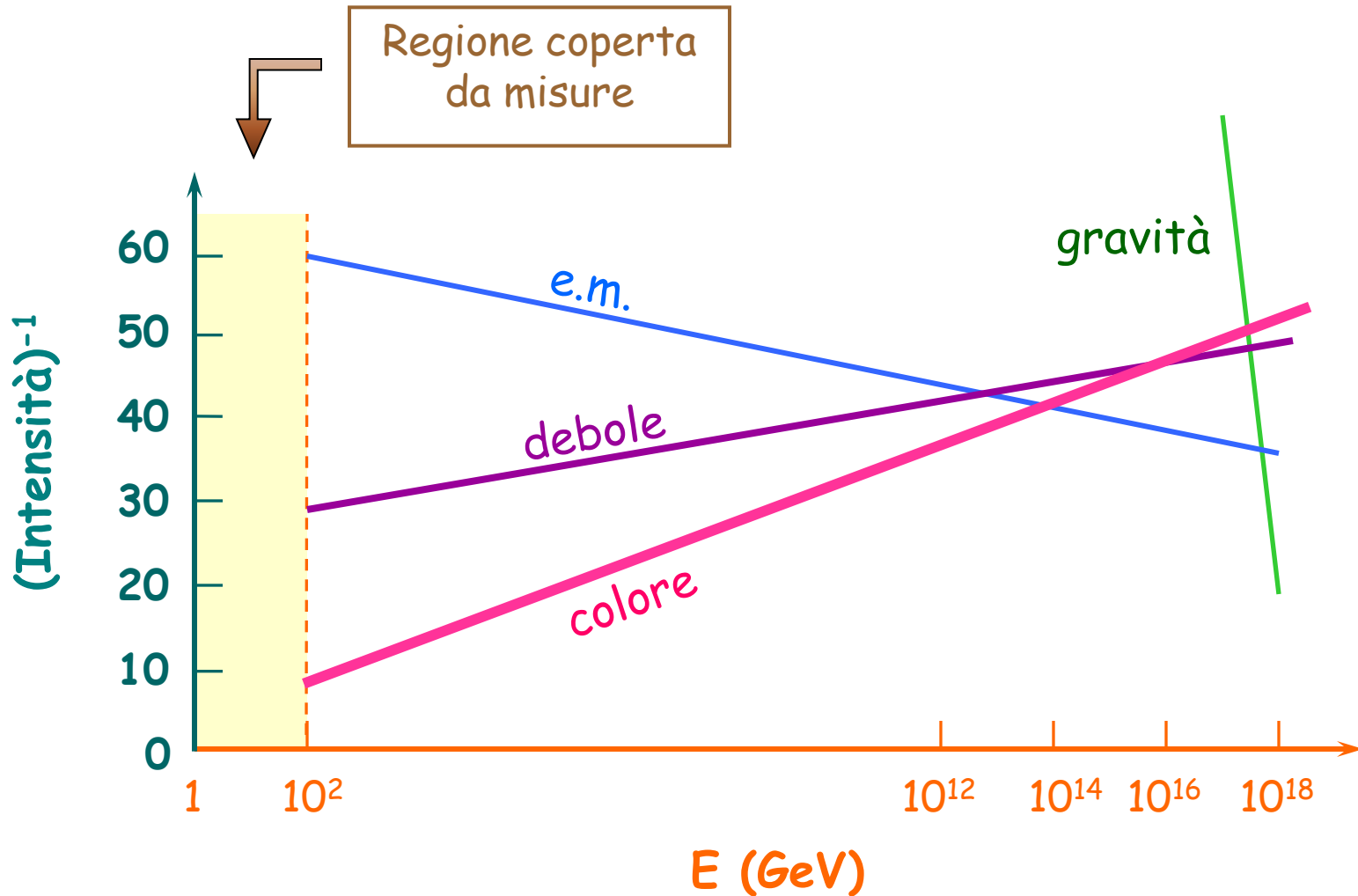
Superforza

Dalle misure sperimentali delle intensità alle energie attualmente raggiungibili la **M.Q.** consente di determinare la loro evoluzione teorica per valori crescenti dell'energia



Esiste valore dell'energia $E_{G.U.}$ per il quale tutte le interazioni hanno la stessa intensità ? $E_{G.U.} = ?$

Unificazione



Unificazione

Le curve non si incrociano nello stesso punto

Le interazioni E.M., Debole & Colore sono vicine per

$$E \approx (10^{13} \div 10^{15}) \text{ GeV} \rightarrow T \approx (10^{26} \div 10^{28}) \text{ K}$$

i.e. Universo $\approx (10^{-35} \div 10^{-32})$ s dopo Big Bang

Gravità: nulla a che vedere con le altre

- (a bassa energia) 43 ordini di grandezza meno intensa di quella di colore

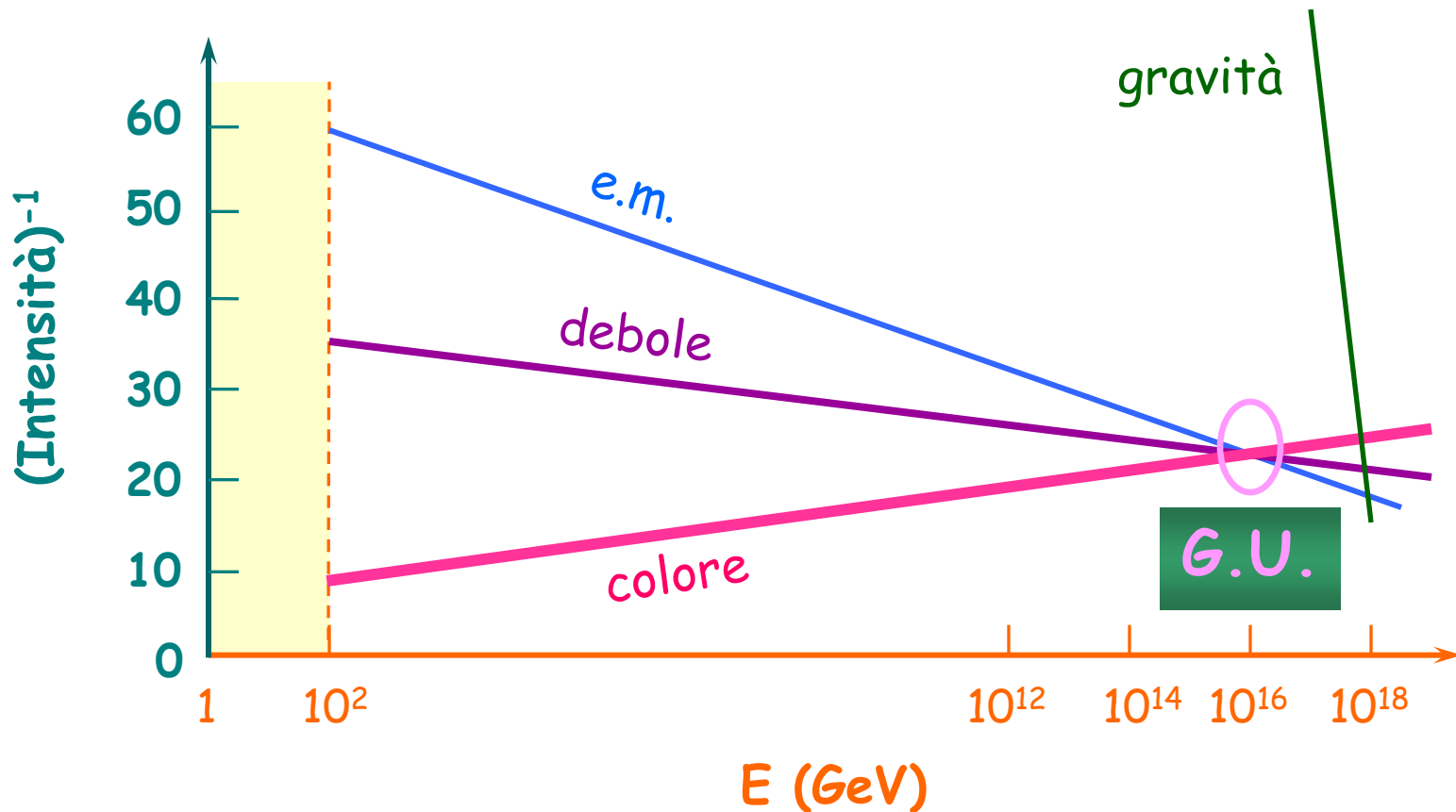
Supersimmetria

correla bosoni & fermioni → per ogni
bosone (fermione) esiste partner
supersimmetrico fermionico (bosonico)

esistenza di nuova forma di materia: particelle
supersimmetriche → soluzione problema
della materia oscura ??

M.S. Supersimmetrico

Modello Standard+ Supersimmetria



SIAMO ALLA TEORIA ULTIMA?

Da molti anni pero' si intuisce che il Modello Standard non puo' essere la *Teoria Finale* (cosi' come il sistema concepito da Maxwell non lo fu per l'elettromagnetismo).

La teoria non spiega (osservazioni sperimentali):

- La Materia Oscura che c'e' nell'Universo (per non dire dell'Energia Oscura)
- Il perche' non esiste Antimateria nell'Universo (ma c'era al Big Bang)
- Il perche' i neutrini abbiano massa

Ci sono anche alcune questioni teoriche piu' profonde non risolte:

- La scala di massa delle particelle
- La diversita' di comportamento delle famiglie
- L'enorme diversita' di intensita' tra le forze
- L'incapacita' di unificare la *Relativita' Generale* con la *Meccanica Quantistica*

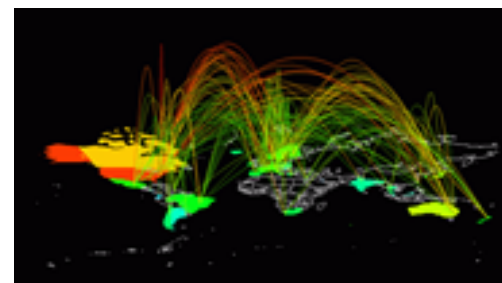
Va sottolineato che non c'e', sino ad oggi, *nessuna misura sperimentale* che ci faccia pensare che il Modello Standard non funzioni

Tuttavia dagli anni '70, numerosi teorici hanno iniziato a prefigurare diversi scenari per il superamento dello SM: *le teorie supersimmetriche, di stringa, le extra-dimensioni.*

Fisica e Societa'



- *WEB (fisica e comunicazioni)*
- *fisica e medicina: diagnosi e terapia*
- *fisica e arte*
- *fisica e investigazioni scientifiche*
- *fisica e problemi del mondo - es. Sminamento*
- *fisica e comunicazioni*



Data Acquisition (DAQ) e Analisi Dati

WEB: un'invenzione di un fisico!



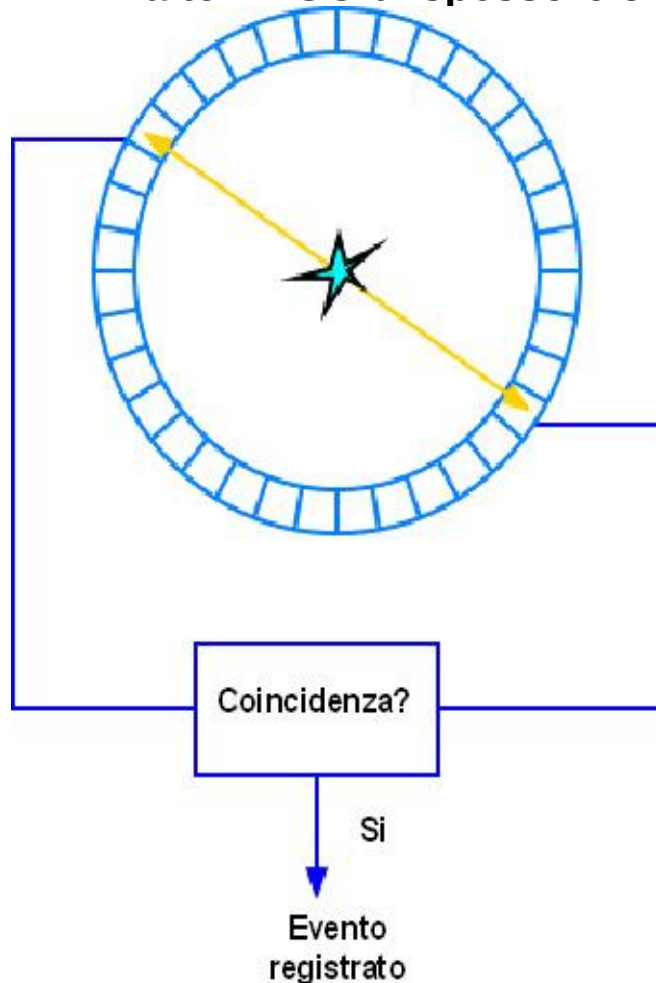
GRID

I nuovi esperimenti hanno bisogno di una potenzialità di calcolo talmente elevata da dover ricorrere ad un "computer mondiale virtuale": milioni di computer in rete

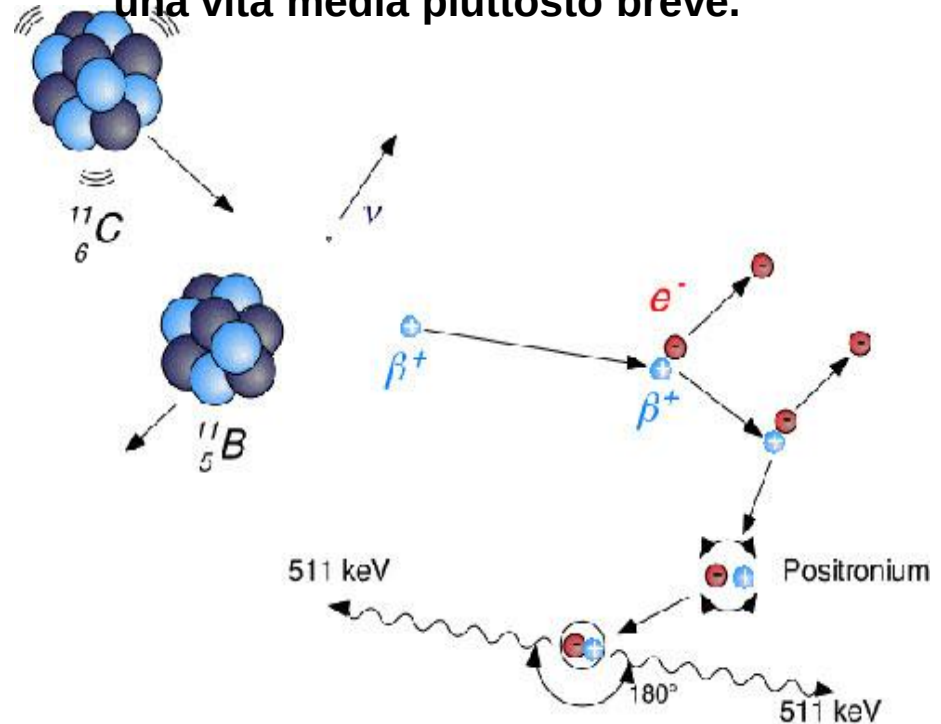
Positron Electron Tomography

Si tratta di una moderna tecnica medica per visualizzare organi interni.

Un apparecchiatura PET ha ~ 10.000 rivelatori di g rivalentori BGO di spessore 3 cm



Al paziente viene iniettata una sostanza radiofarmacologica (prodotta da un ciclotrone) con una vita media piuttosto breve.



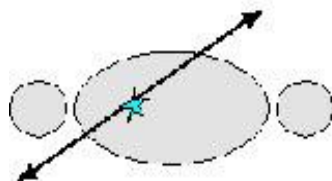
La sostanza iniettata raggiunge l'organo che si vuole visualizzare (cuore, cervello etc...) dove emette positroni → l'annichilazione dei positroni con gli elettroni presenti del corpo produce 2 g emessi in direzione opposta

Positron Electron Tomography



Le risoluzioni spaziali ottenibili con la PET dipendono dal radioisotopo usato ~ 2 mm F e 4 mm z

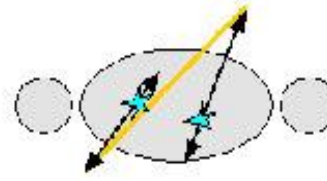
Per ricostruire immagini tridimensionali sono necessari software di ricostruzione molto sofisticati che tengano conto dei fenomeni di diffusione attenuazione falsi eventi.



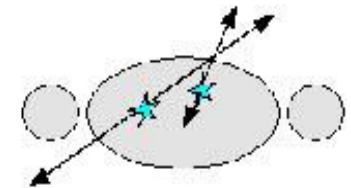
Evento "pulito"



Evento con scattering



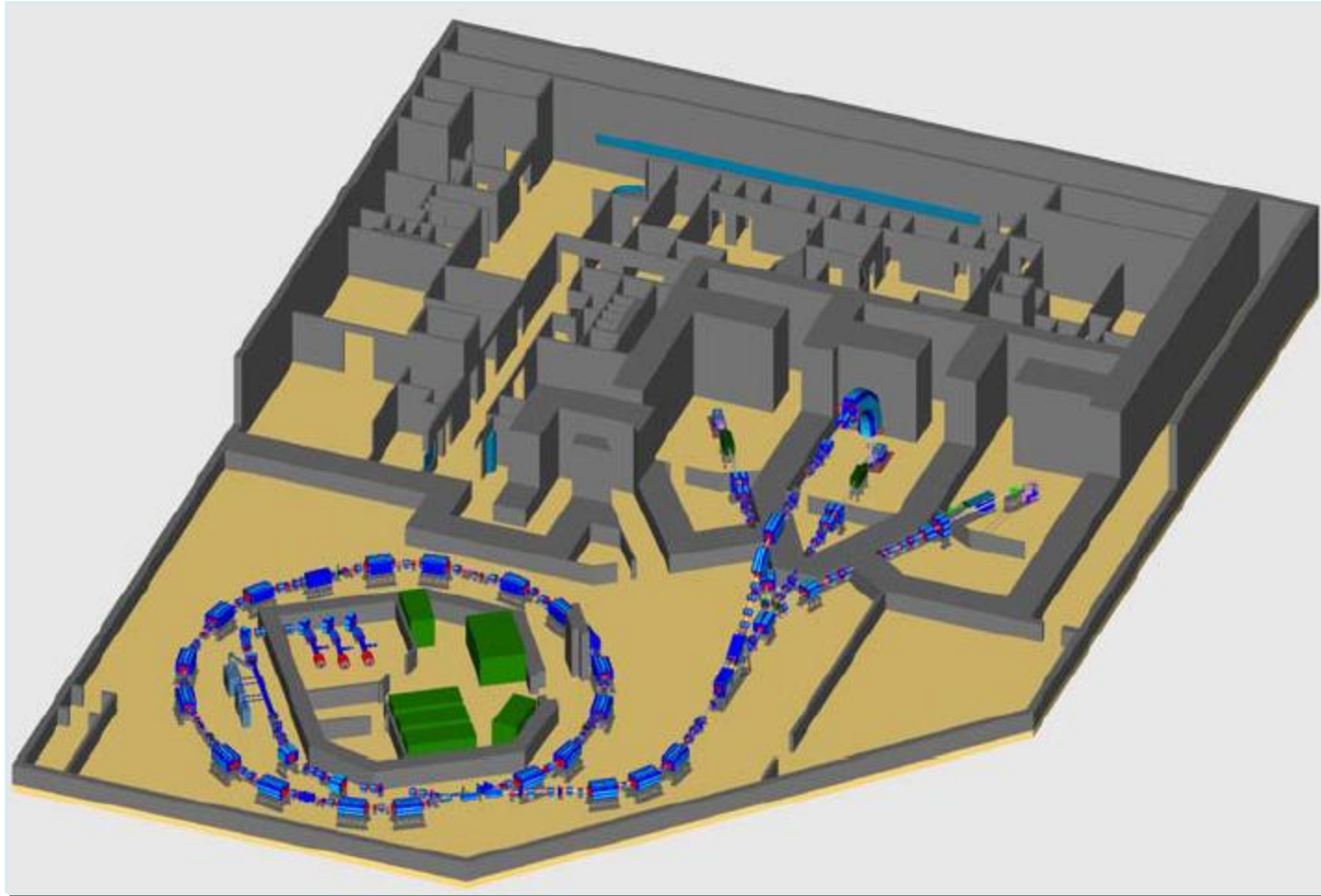
Evento casuale



Evento multiplo

Adroterapia

CNAO-INFN:
•Pavia
•Catania (test)



Costo 90 MEuro
Gia' curati 200 pazienti a CT

Utilizzo di macchine acceleratrici basate su protoni (o ioni) per cura del tumore

The Aim is „Tumor Control“

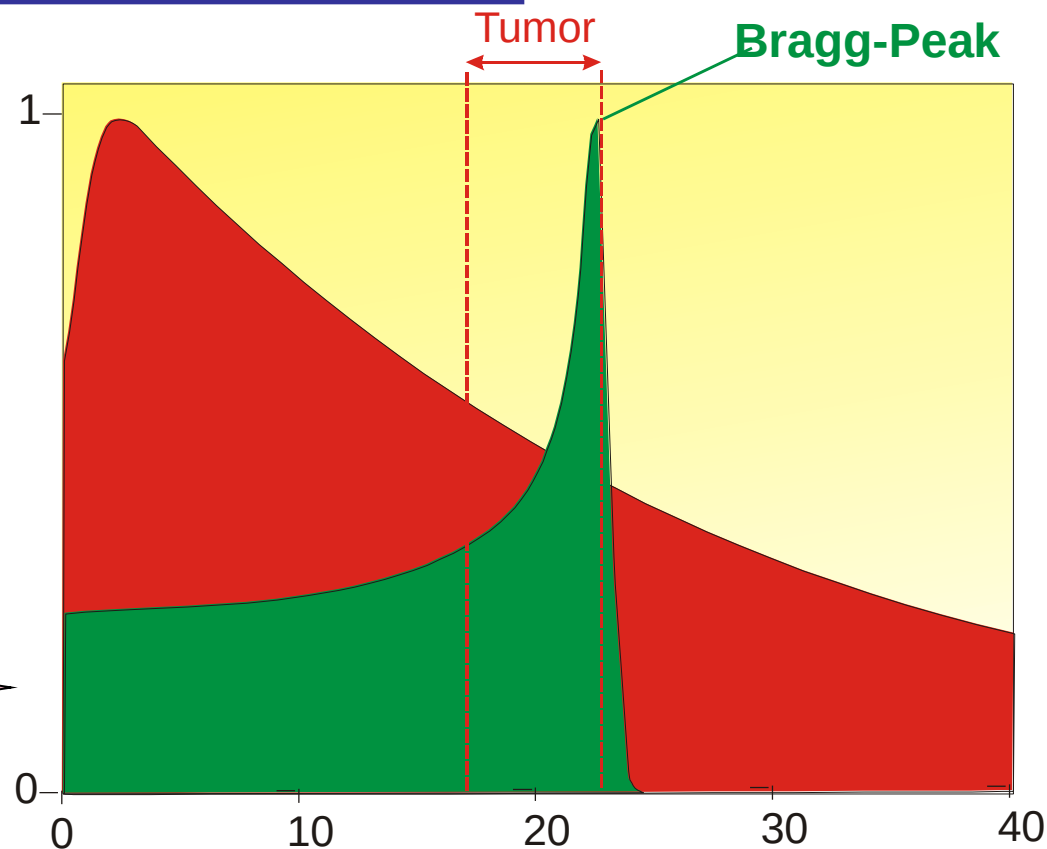
- **High, lethal dose into the tumor**
- **As low as possible dose into the surrounding, healthy tissue in order to avoid irreversible damage and other complications**

Fotoni

Acceleratore Lineare 15 MeV

Protoni (Ioni)

190 MeV = 25 cm penetrazione



Utilizzo di macchine acceleratrici basate su protoni (o ioni) per cura del tumore

The Aim is „Tumor Control“

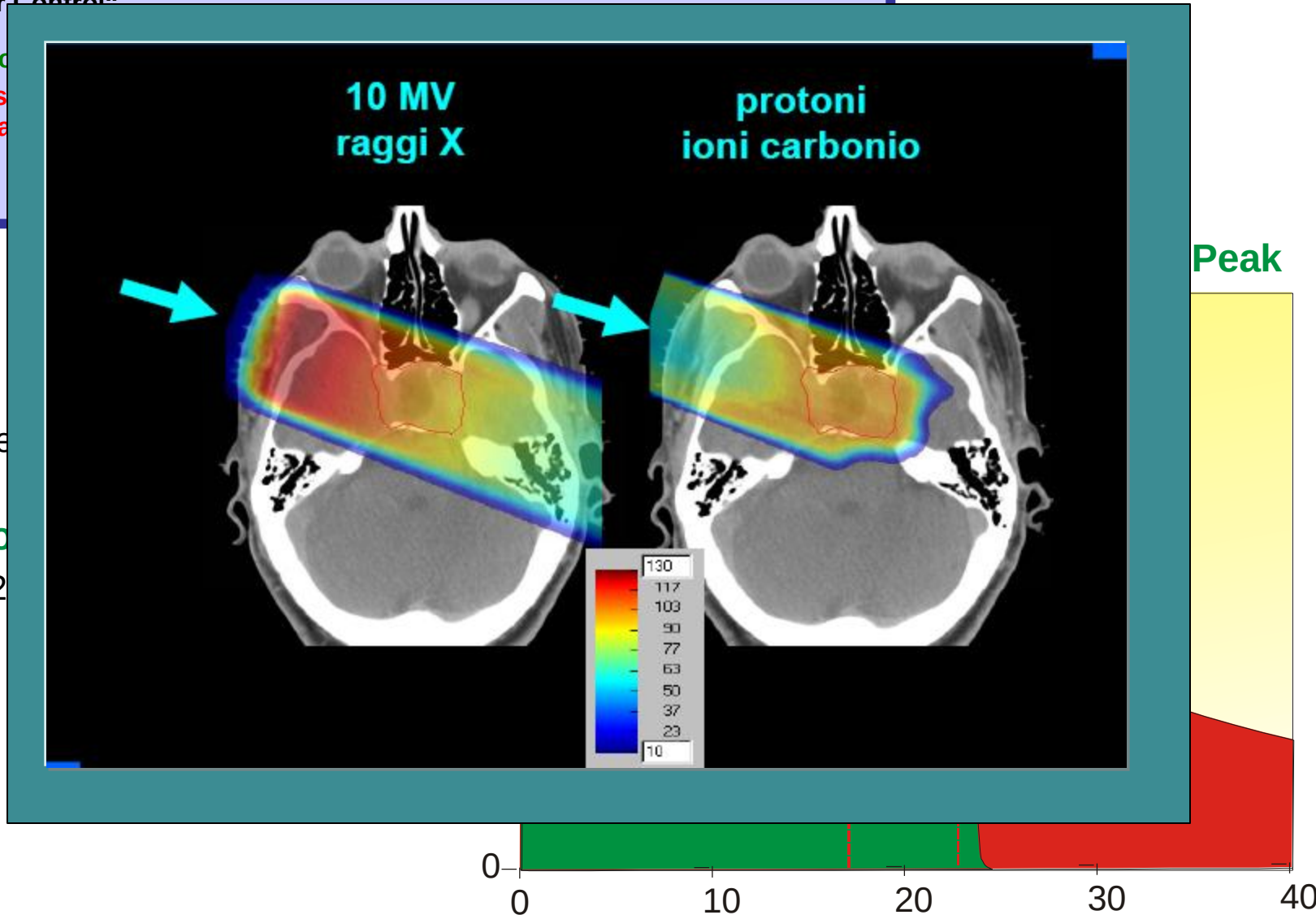
- High, lethal dose
- As low as possible dose to healthy tissue

Fotoni

Acceleratore

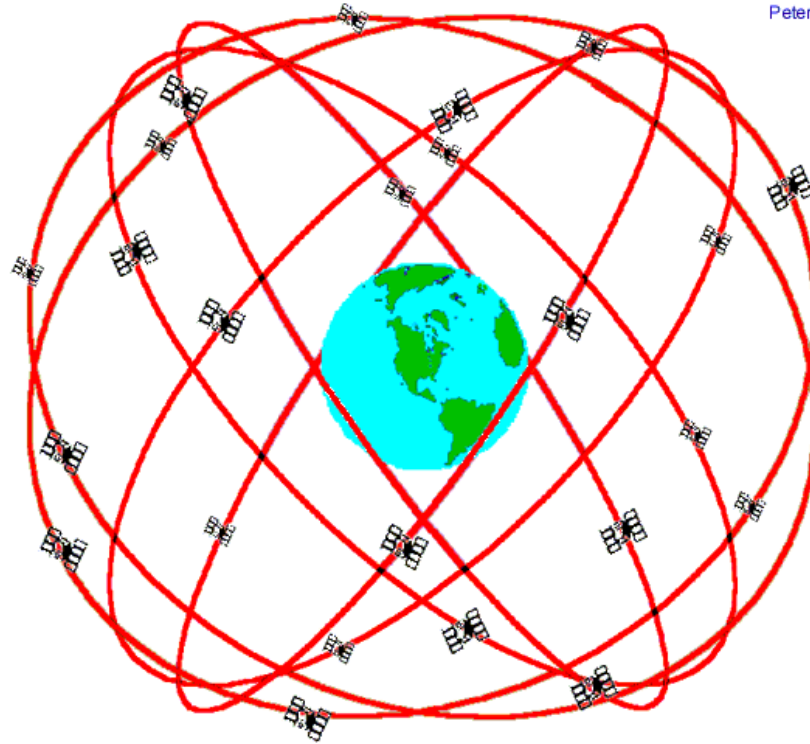
Protoni (Ioni)

190 MeV = 2



The Global Position System (GPS)

Peter H. Dana 9/22/98



GPS Nominal Constellation
24 Satellites in 6 Orbital Planes
4 Satellites in each Plane
20,200 km Altitudes, 55 Degree Inclination



Con le tecniche della Fisica Nucleare si possono studiare le opere d'arte per fare datazioni, verificare l'autenticità, determinare lo stato di salute.

Con le stesse metodologie si può monitorare l'ambiente (ad es. la qualità dell'aria).

Un centro dell'INFN specializzato in queste tecniche è a Firenze

*Analisi PIXE differenziale e PIGE
della
Madonna dei Fusi di Leonardo*

Le mine anti-uomo

Ogni anno: 20000 vittime per "vecchie" mine antiuomo (20% bambini).

Sminamento "classico" troppo costoso:

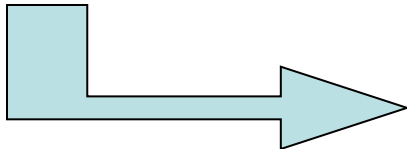
ispezione del terreno con sensori
di anomalia → allarme → estrazione
e neutralizzazione esplosivo

tempo: > 30 minuti

costo: 300-1000 \$

falsi allarmi: 99 %

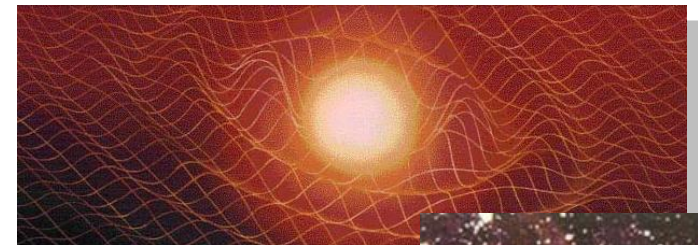
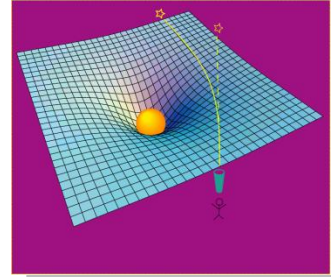
Tutti gli esplosivi contengono ^{14}N
(20-30%, contro il <2 % normale)
I terreni minati sono ricchissimi di
azoto

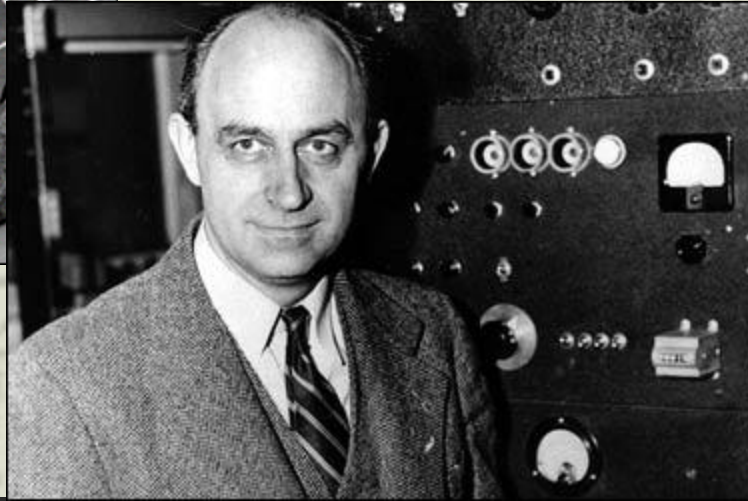


Reazione di cattura neutronica:
 $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{15}\text{N} + \gamma$ ($E_\gamma = 10.8 \text{ MeV}$)

Ma c'e' ancora ...

- La Relativita' ristretta
- La Relativita' generale
- Il Big Bang
- La fisica dei neutrini
- I laboratori sotterranei: il laboratorio dell'INFN al Gran Sasso
- Etc... etc... etc...





I'm still confused ...
... but at high level

E.Fermi, Chicago 1951

Come si vive nei grandi progetti di ricerca ?

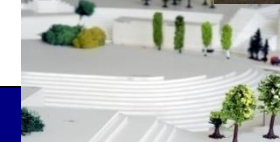
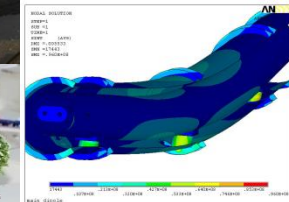
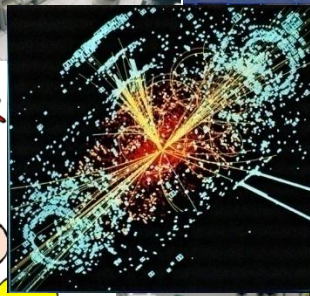
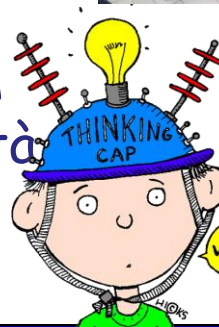
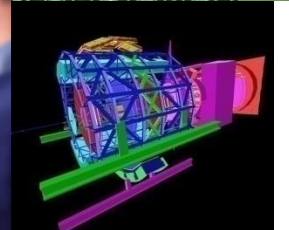
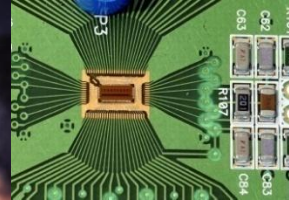
Attenzione ai costi fino allo spasimo:

- Non basta diminuire il costo iniziale
- Controlli lungo tutto il progetto

La responsabilità è condivisa:
Meetings! Comunicare !

Occorre integrare diverse discipline

Occorre anche sapersi integrare in un team ... senza sacrificare la creatività personale e la capacità di prendere decisioni.



Quanto costa questo tipo di Ricerca Fondamentale ?

La Fisica delle Particelle e' a partire da **Enrico Fermi**, il fiore all'occhiello della Ricerca Italiana, in particolare per il livello di considerazione che ha all'estero.

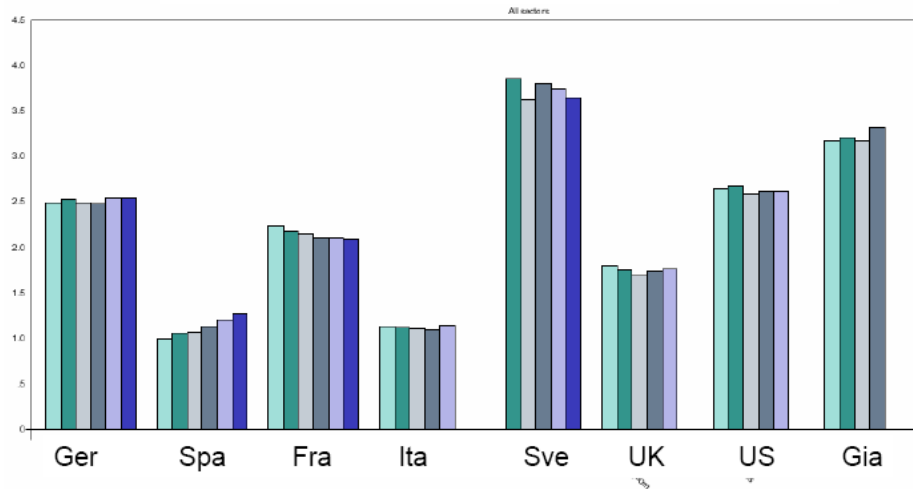
Alcune cifre dei costi della ricerca:

- Il CERN ha un bilancio annuo di 500 M€ (l'Italia paga per il 12% : 60 M€)
- LHC e i suoi esperimenti sono costati circa 5 G€ → funzioneranno per 20 anni
- L'Hubble Space Telescope e' costato **6 G\$** (e ha funzionato per 20 anni)
- La Stazione Spaziale Internazionale **150 G\$**
- ITER (progetto globale per la fusione) **10 G€** (e durera' 30 anni)
- Il costo di una Centrale Nucleare **4 G€**
- L'Alta Velocita' in Italia **66 G€** (e' in costruzione da 15 anni !)
- La Guerra in Iraq (ad oggi) **500 G\$**
- L'attuale crisi del sistema bancario e assicurativo **1500 G\$**

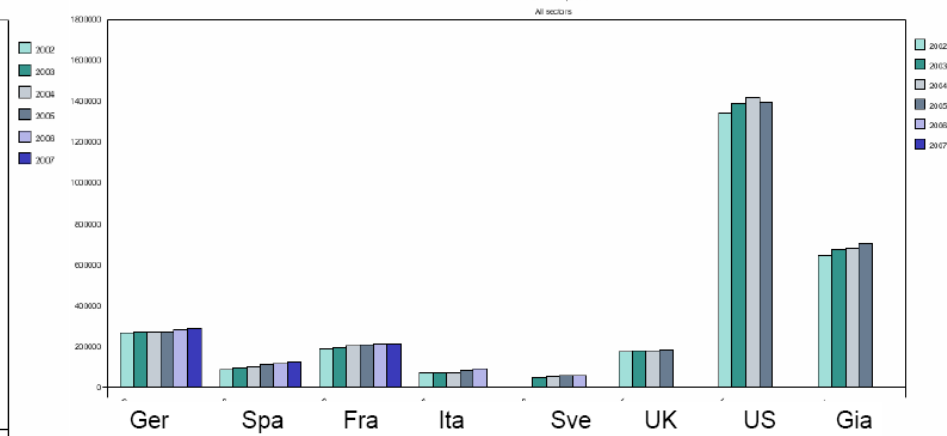
...a voi il giudizio su quale sia il modo piu' proficuo per spendere il denaro pubblico...



% del Prodotto Interno Lordo speso in R&D

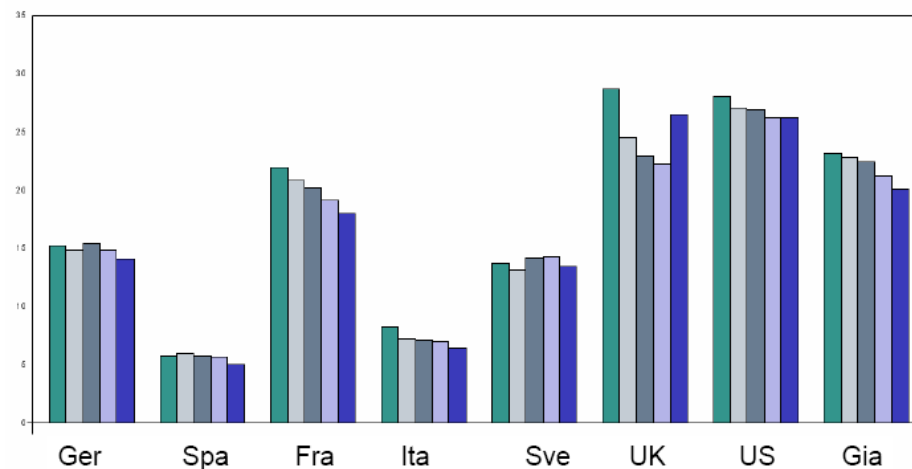


Numero totale di ricercatori

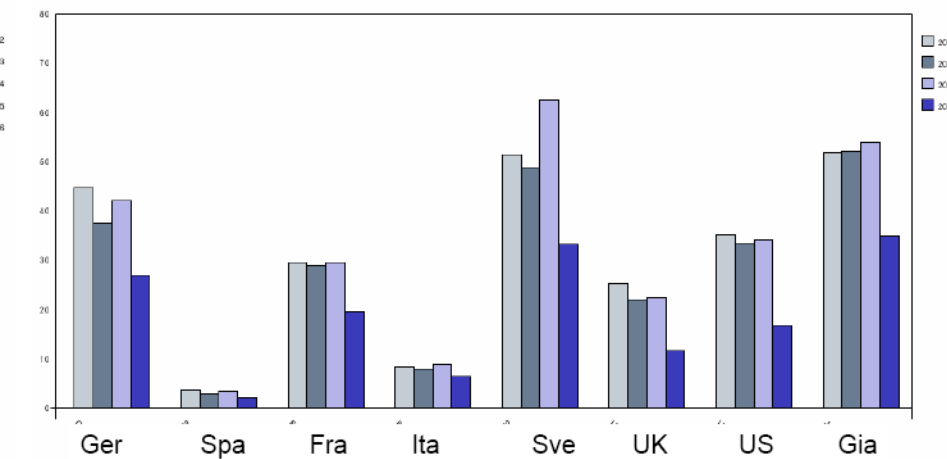


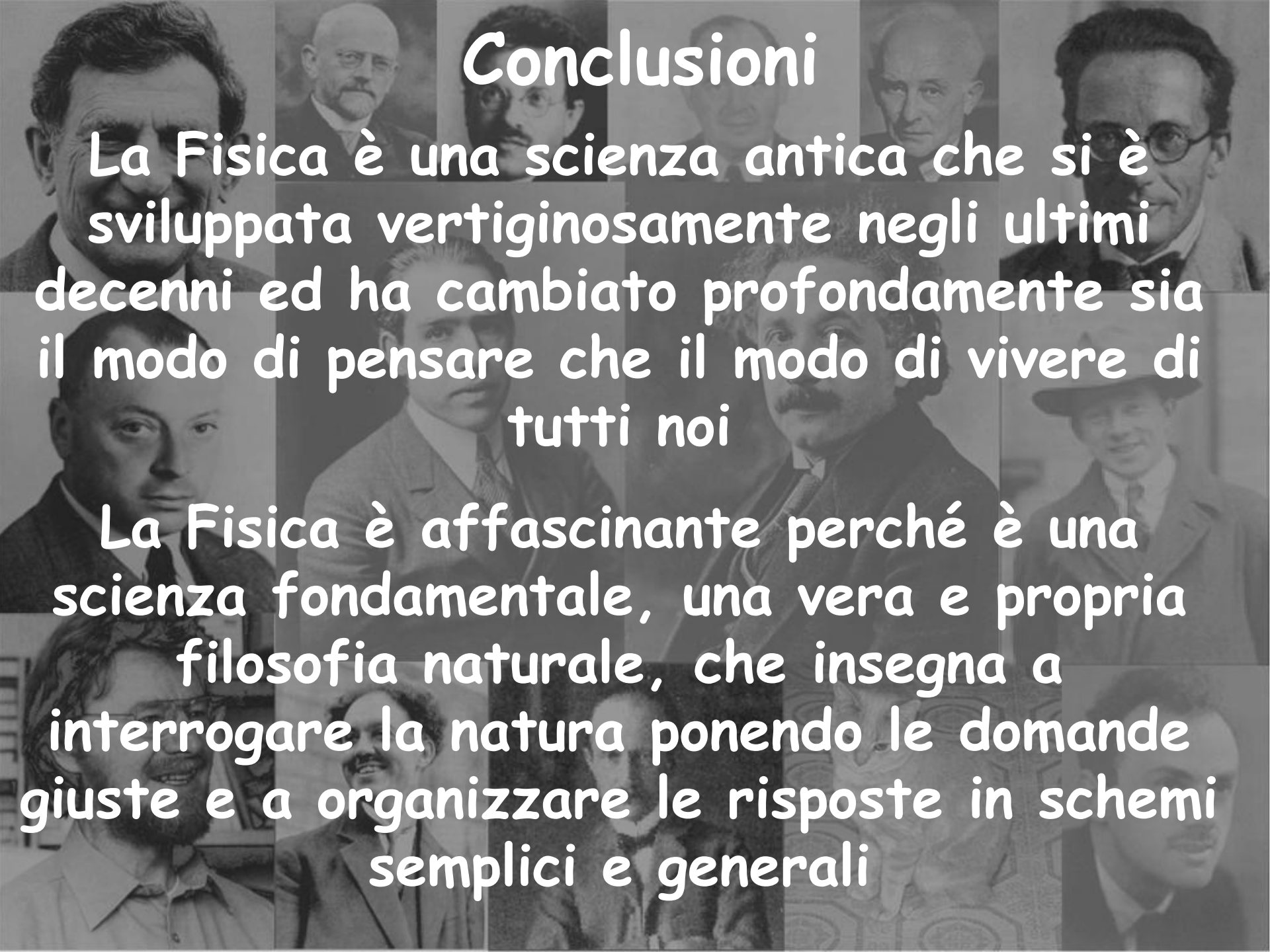
% di esportazioni High Tech

esportazioni di high technology products ad alto contenuto tecnologico



% di brevetti High Tech





Conclusioni

La Fisica è una scienza antica che si è sviluppata vertiginosamente negli ultimi decenni ed ha cambiato profondamente sia il modo di pensare che il modo di vivere di tutti noi

La Fisica è affascinante perché è una scienza fondamentale, una vera e propria filosofia naturale, che insegna a interrogare la natura ponendo le domande giuste e a organizzare le risposte in schemi semplici e generali

Laboratori Nazionali di Frascati



ATLAS NAUTILUS

ADA e ADONE

Centro di
Calcolo

DAΦNE KLOE

DAΦNE-L

BTF

FISA

FINUDA
DEAR

Auditorium

<http://www.lnf.infn.it>