



# Particelle e Cosmologia

Introduzione alla Fisica Moderna  
cenni di fisica delle particelle elementari, acceleratori, rivelatori e  
cosmologia

A cura dei

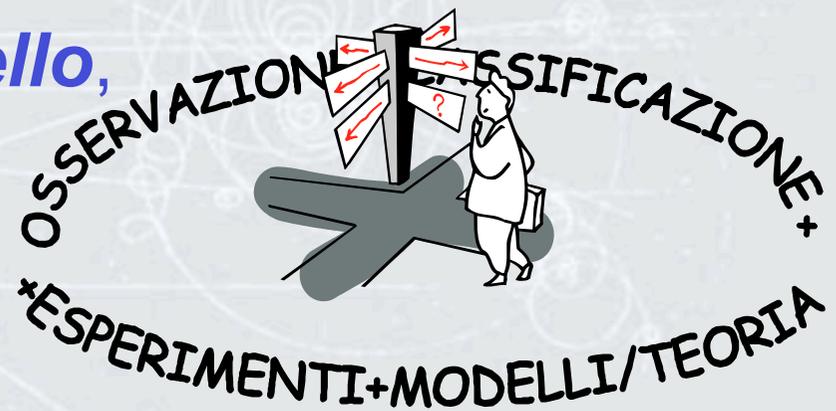
Laboratori Nazionali di Frascati  
dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

G. Mazzitelli



# Introduzione: Il metodo scientifico

- **Osservare:** identificare in cio' che ci circonda i fenomeni fondamentali, trovando delle **regolarita'**
- **Riprodurre:** eseguire un esperimento in grado di riprodurre, schematizzandolo, il problema e capire **come** cio' accade
- **Predire:** costruire un **modello**, basato sulla matematica, che permetta di fare delle previsioni



# Introduzione: di cosa parleremo?

- Fin dalla fine del '800, la Fisica (*scienze naturali*) descriveva un mondo che oggi definiremmo *macroscopico*, cercando le leggi che governano ciò che ci circonda. Tra la fine dell'800 e l'inizio del '900 la fisica entra in crisi nel tentativo di descrivere sia "*l'infinitamente piccolo*", che "*l'infinitamente grande*"
- **Cos'è che lega il mondo macroscopico a quello microscopico?**
- **Quali sono i modelli che permettono di descrivere come si è evoluto quello che ci circonda?**
- **Quali sono gli strumenti per capire tutto ciò ?**

# La Crisi della Fisica Classica

- ***Principi di termodinamica:***  
conservazione dell'energia (meccanica quantistica)
- ***Equazioni di Maxwell:***  
velocità della luce costante (relatività ristretta)
- ***Meccanica Newtoniana:***  
Sistemi di riferimento inerziali, Gravità (relatività generale)



# La biblioteca dell'Universo-1

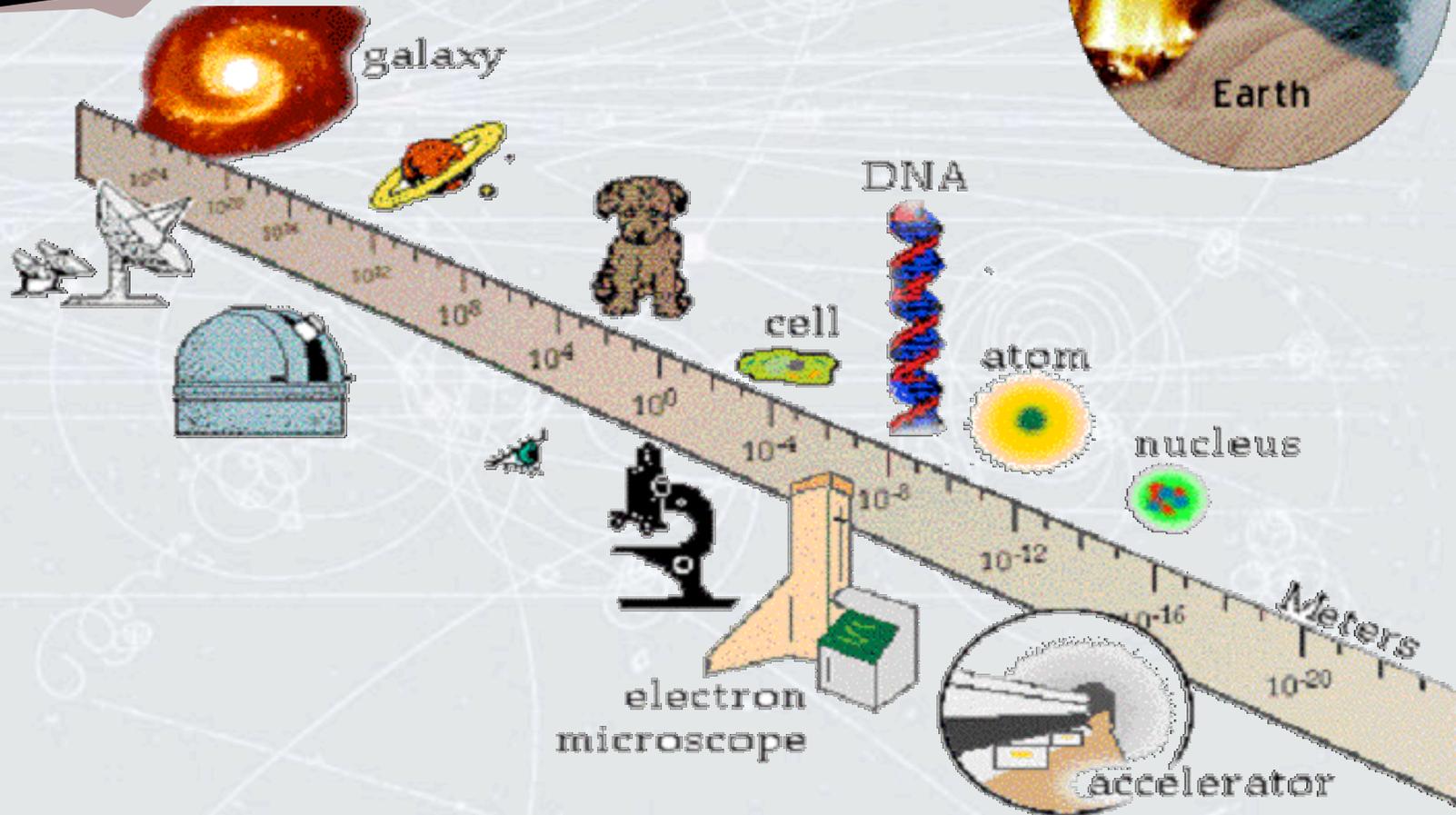
Di che cosa e' fatta una biblioteca?

Di che cosa e' fatto l'Universo?



Non c'e' qualcosa di piu' elementare?

## 1) OSSERVAZIONE



# La biblioteca dell'Universo-2

SCIENZE NATURALI:

## 2) CLASSIFICAZIONE

Per soggetto:

storia,  
chimica,  
favola,...  
fisica



Per dimensione:

spessi, sottili, alti, bassi,....

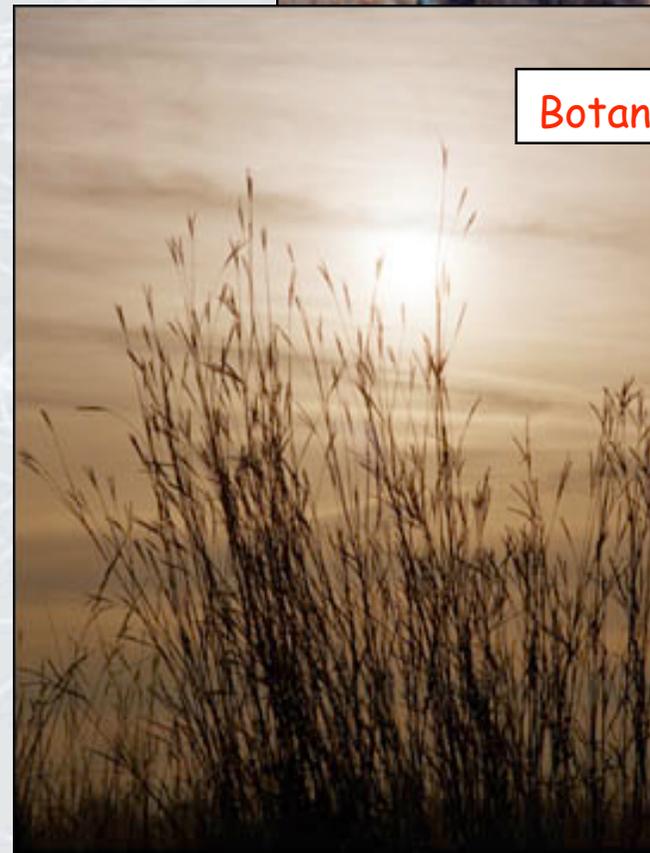


Per colore:

rossi,  
gialli,  
verdi,...



I libri sono oggetti complessi:  
guardiamoci dentro



Botanica



Zoologia



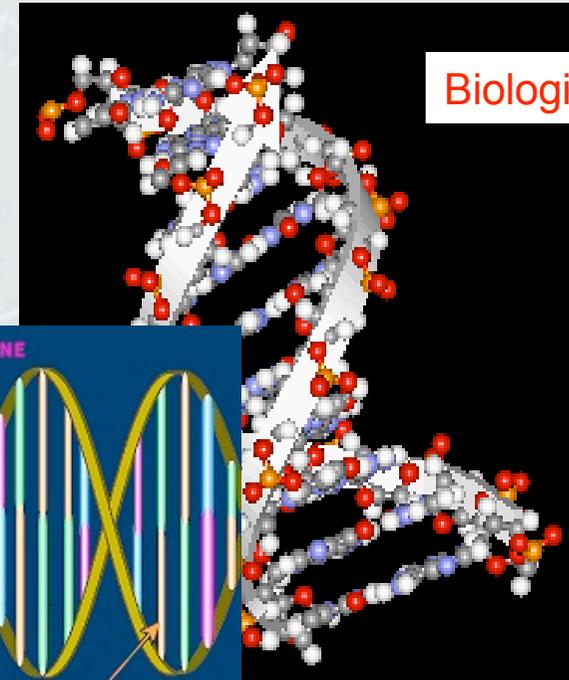
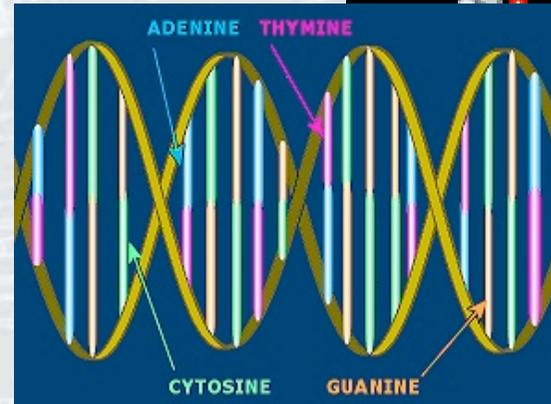
Astronomia

La Natura e' complessa:  
"guardiamoci dentro"

# La biblioteca dell'Universo-3

...CLASSIFICAZIONE...

Capitoli...



Biologia

Paragrafi...

**Periodic Table of the Elements**

1	2																	10
H	He																	Ne
3	4																	10
Li	Be																	Ne
11	12	13	14	15	16	17	18											18
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar											Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
K	Ca	Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112							
Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110	111	112							

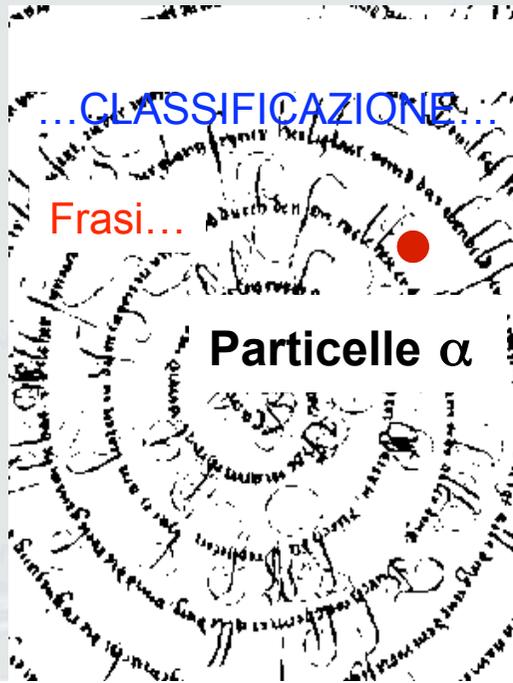
Chimica

\* Lanthanide Series  
+ Actinide Series

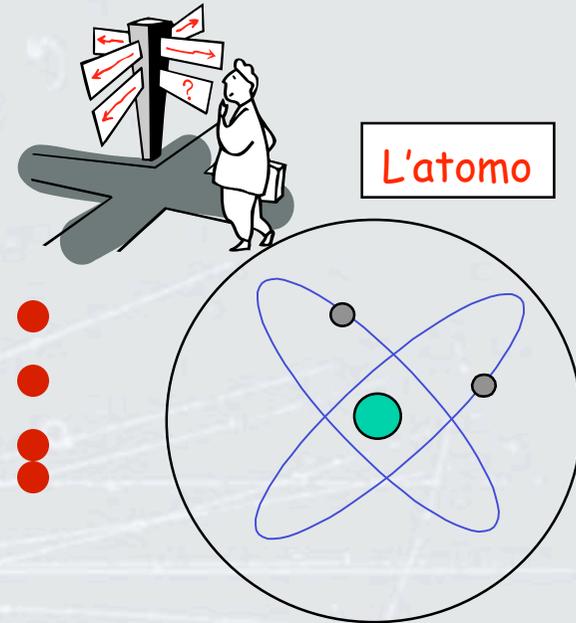
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Naming conventions of new elements

# La biblioteca dell'Universo-4



Foglio d'oro



La materia e' composta di:  
Protoni (p), Neutroni(n) ed Elettroni (e)

Solo 3 particelle elementari?



DOVE E' FINITO L'ORDINE ?!?!?

D	I	S	E	G	N	A	T	O	R	E
Q	R	O	R	A	E	Z				
N	S	C	A	L	I	G	S	I		
S	P	A	V	E	N	T	A	T	O	
P	I	E	M	O	N	T	E	S	I	
I	N	S	I	S	T	E	N	T	E	
A	T	E	N	T	E	S	E			
C	E			A	R	A	B	A		
E	S	A	T	T	I	I	R	I	S	
R	I	S	T	O	R	O		A	L	T
S		S	O	M	A	R	E	L	L	I
I	V	I		I	N	E	S		Y	A

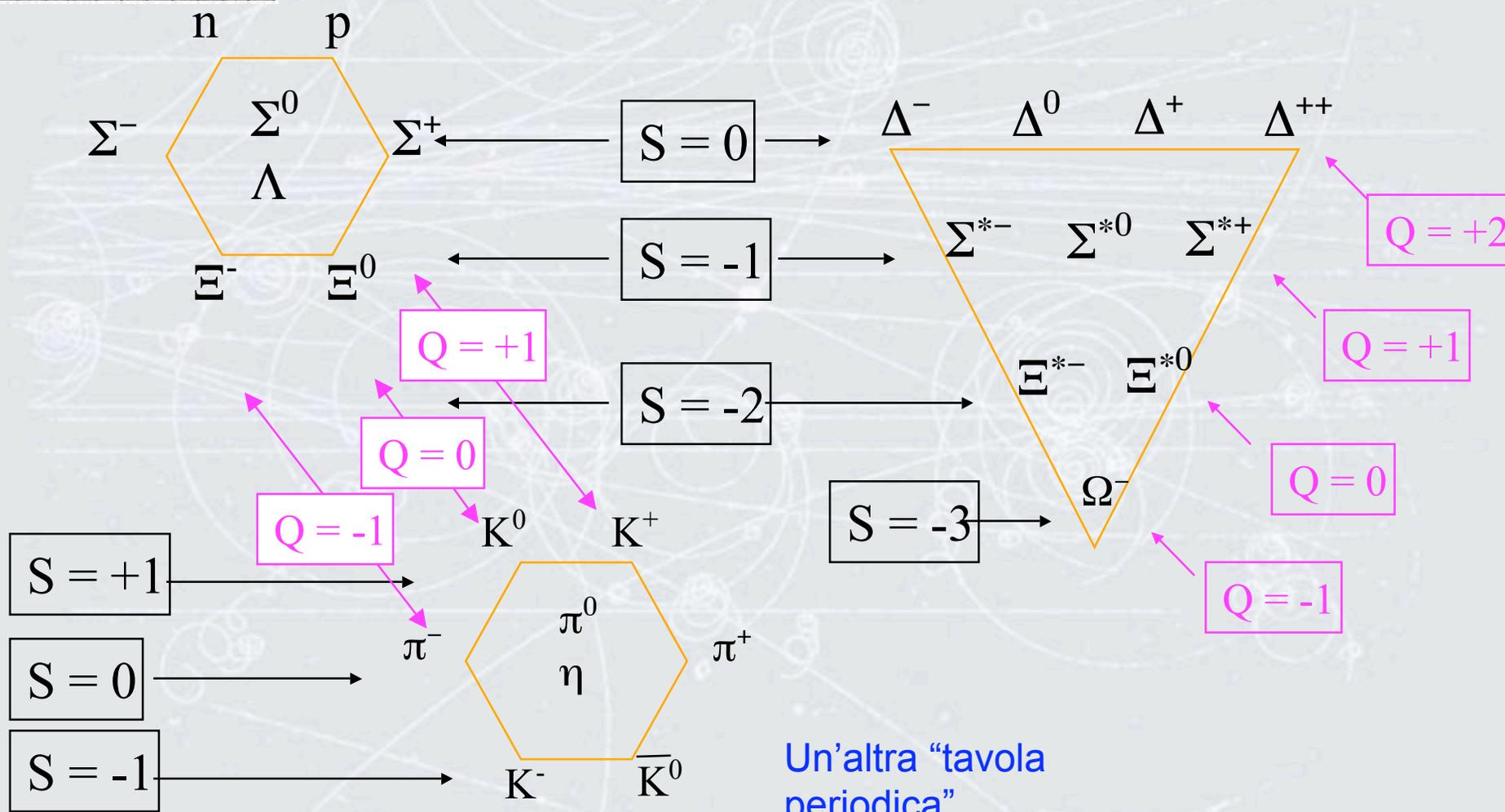
# La biblioteca dell'Universo-5

...CLASSIFICAZIONE...

Parole



Elementari?



Un'altra "tavola periodica" ....

# La biblioteca dell'Universo-6

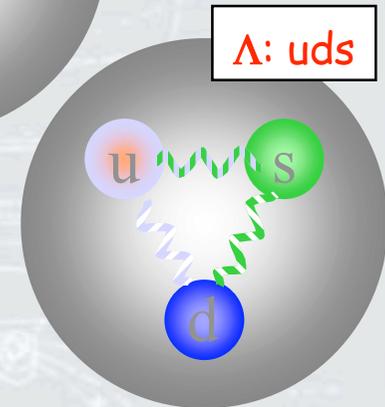
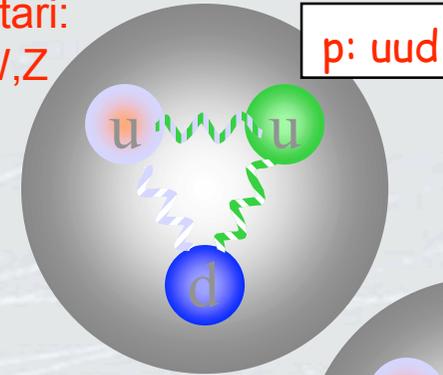
Lettere:  
a,A,b,B,c,C,d,D,...,w,W,z,Z

Particelle elementari:  
c,d,e,g,...,s,t,u,W,Z



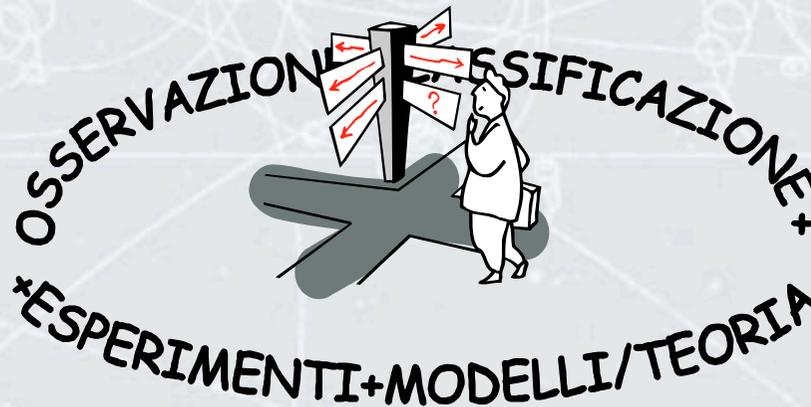
3) ESPERIMENTI  
+  
4) MODELLI/TEORIE

Ancora piu' elementare,  
Ancora piu' piccolo...



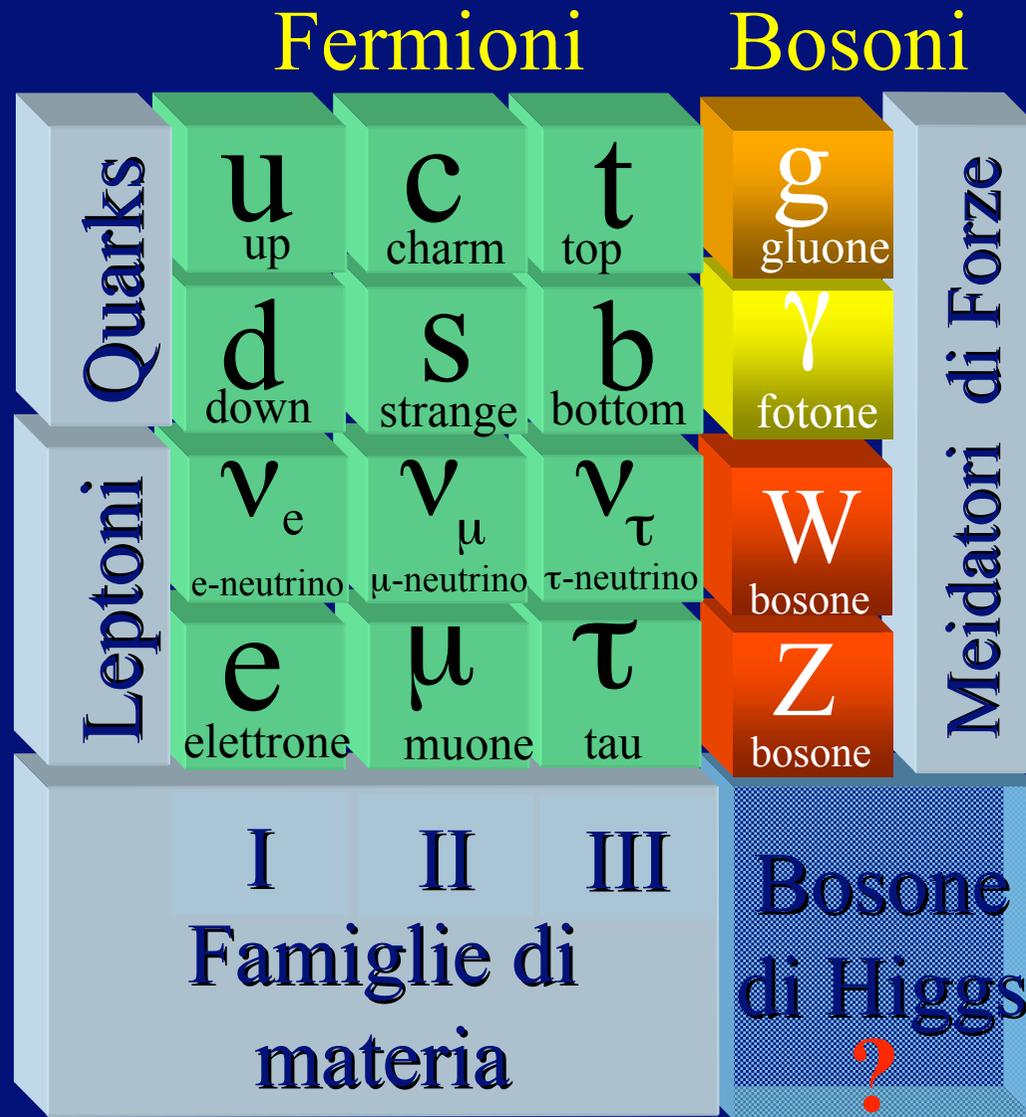
Bit ↔ la super particella!

La fine della storia!



La fine della storia?

# Il Modello Standard

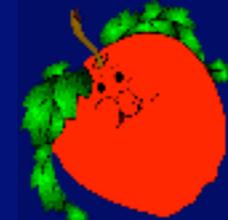


Gravit 



il fantasma

dell'opera



# Le forze fondamentali

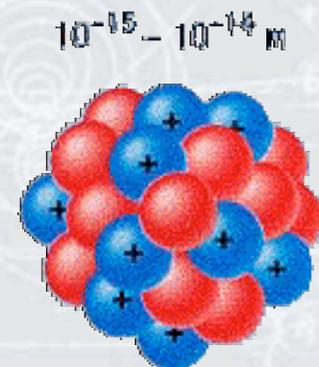


Forza	Intensità relativa	
Gravitazionale	1	<i>Vi tiene seduti sulle sedie</i>

Debole

$10^{29}$

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



Elettromagnetica

$10^{40}$

*Tiene insieme gli atomi*

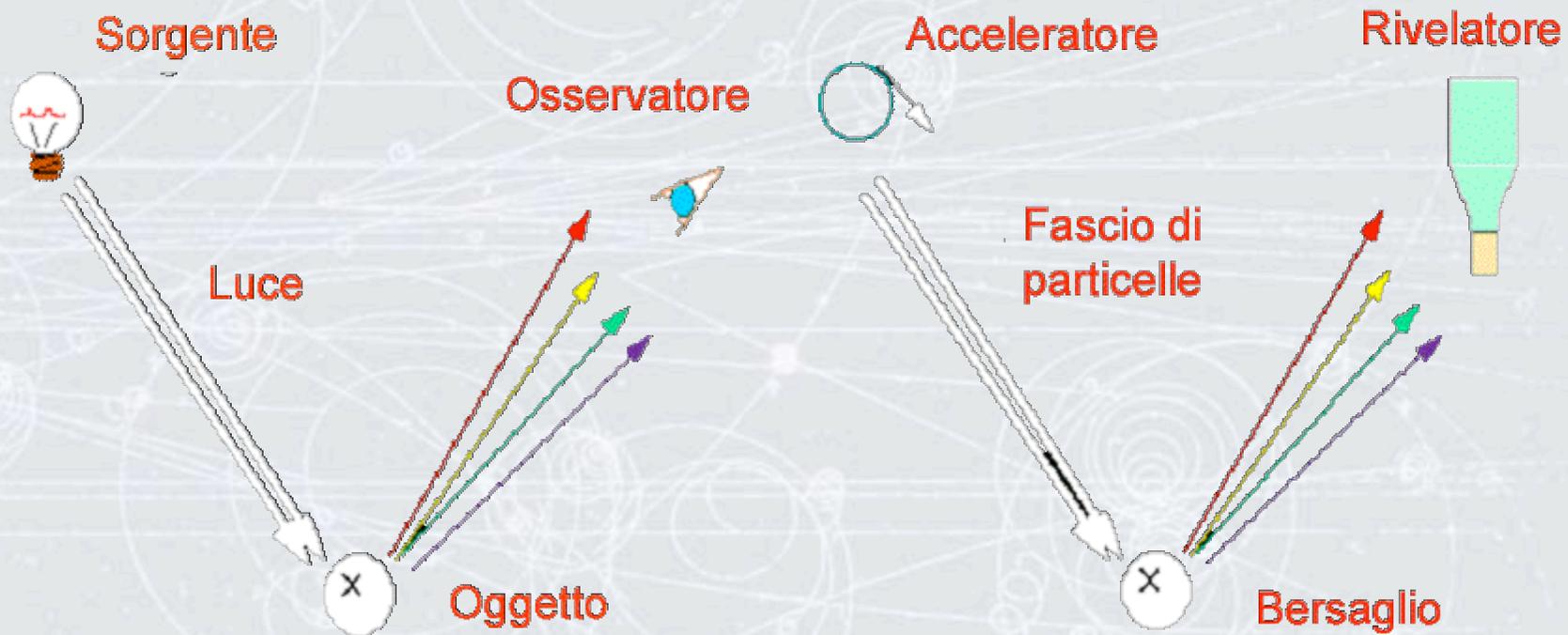
Forte

$10^{43}$

*Tiene insieme i nuclei*

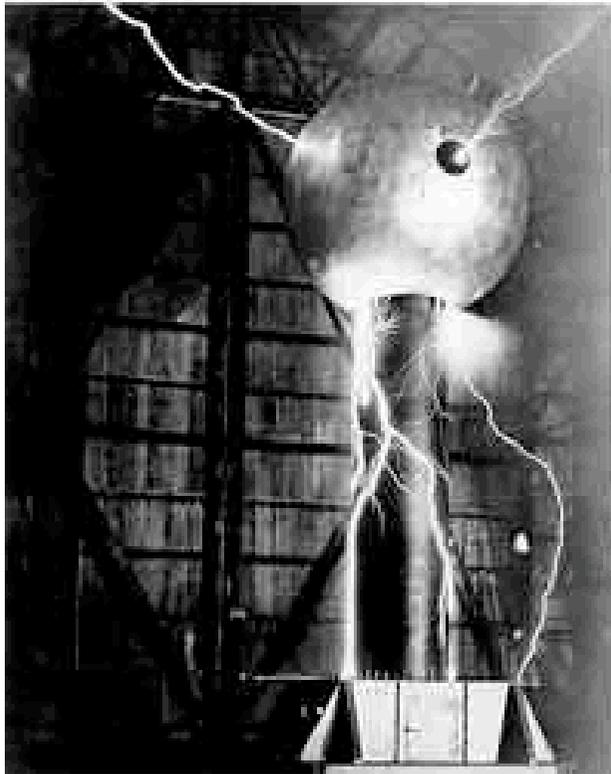
# Osservare...

- Osservare gli oggetti che ci circondano e' come fare un esperimento alla Rutherford



- Nel mondo “microscopico” bersaglio e sonda hanno dimensioni confrontabili: la misura perturba il campione

# Generatore di Van de Graaff (primi acceleratori elettrostatici)





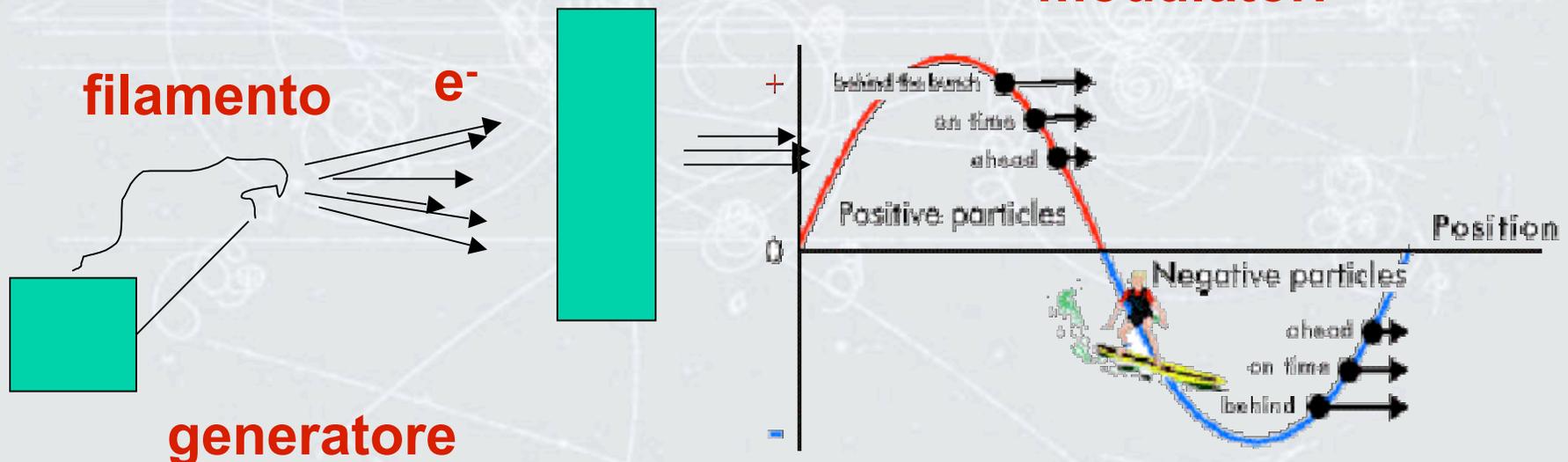
# Acceleratori lineari

Le particelle emesse dal filamento vengono accelerate dal campo elettrico longitudinale generato da elettrodi susseguenti. Questa idea di Ising (1924) fu applicata da Videroe e nel 1927 venne realizzato il primo "drift tube Linac".



**magneti focalizzanti**

**modulatori**



# Equazione del moto di una particella carica in campo elettrico [E] e magnetico [B]

$$F = e \cdot \left[ \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right]$$

v = velocità

e = carica

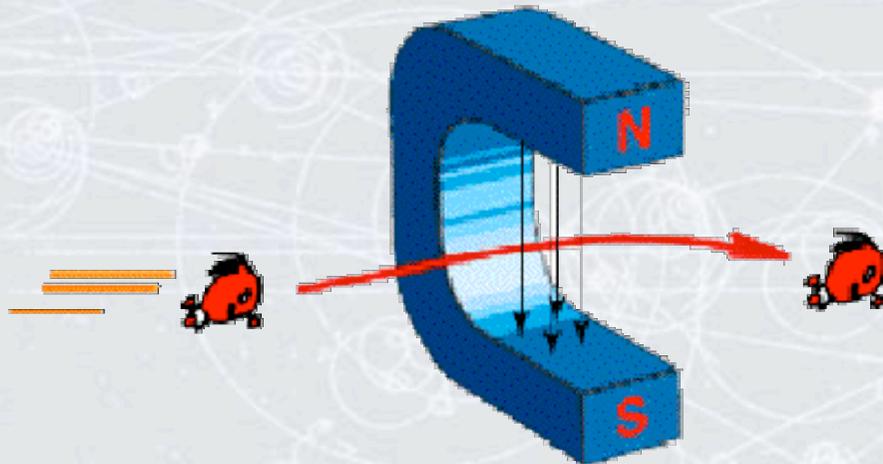
$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joules}$$

## Deflessione (campi magnetici)

ma quanta energia e' 1 eV?

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ Kg}$$



$$m_{\text{ape}} = 1 \text{ g} = 5.8 \cdot 10^{32} \text{ eV}/c^2$$

$$v_{\text{ape}} = 1 \text{ m/s} \rightarrow E_{\text{ape}} = 10^{-3} \text{ J} = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

$$E_{\text{LHC}} = 14 \cdot 10^{12} \text{ eV}$$

tuttavia volendo riabilitare LHC...

L'energia totale di LHC:

$$10^{14} \text{ protoni} * 14 \cdot 10^{12} \text{ eV} \approx 10^8 \text{ J}$$

questo corrisponde a



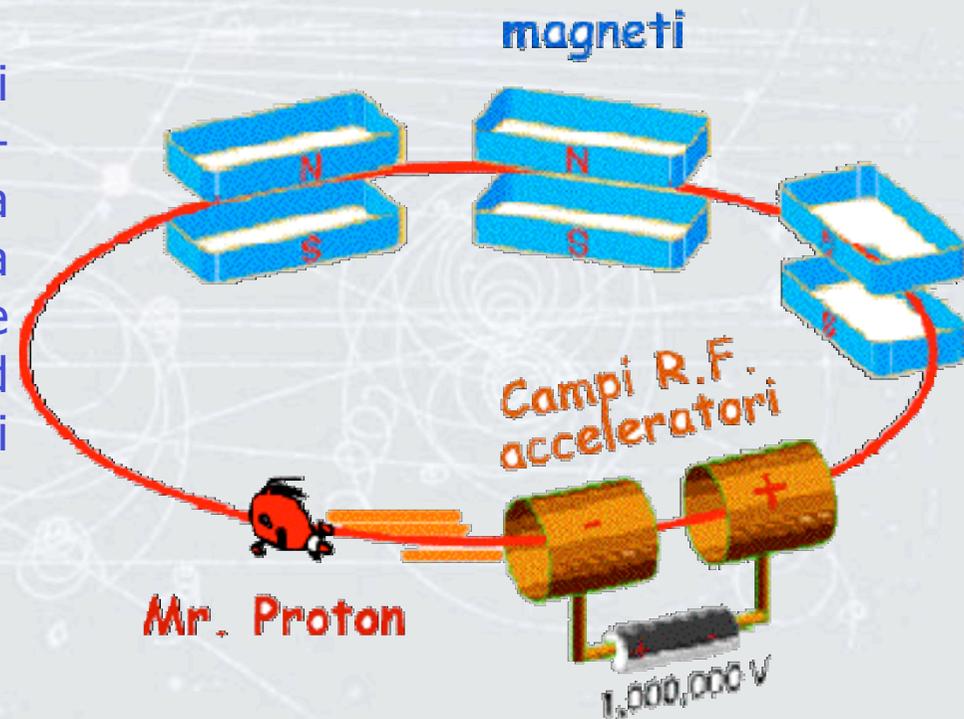
$$m_{\text{camion}} = 100 \text{ T}$$

$$v_{\text{camion}} = 120 \text{ Km/h}$$

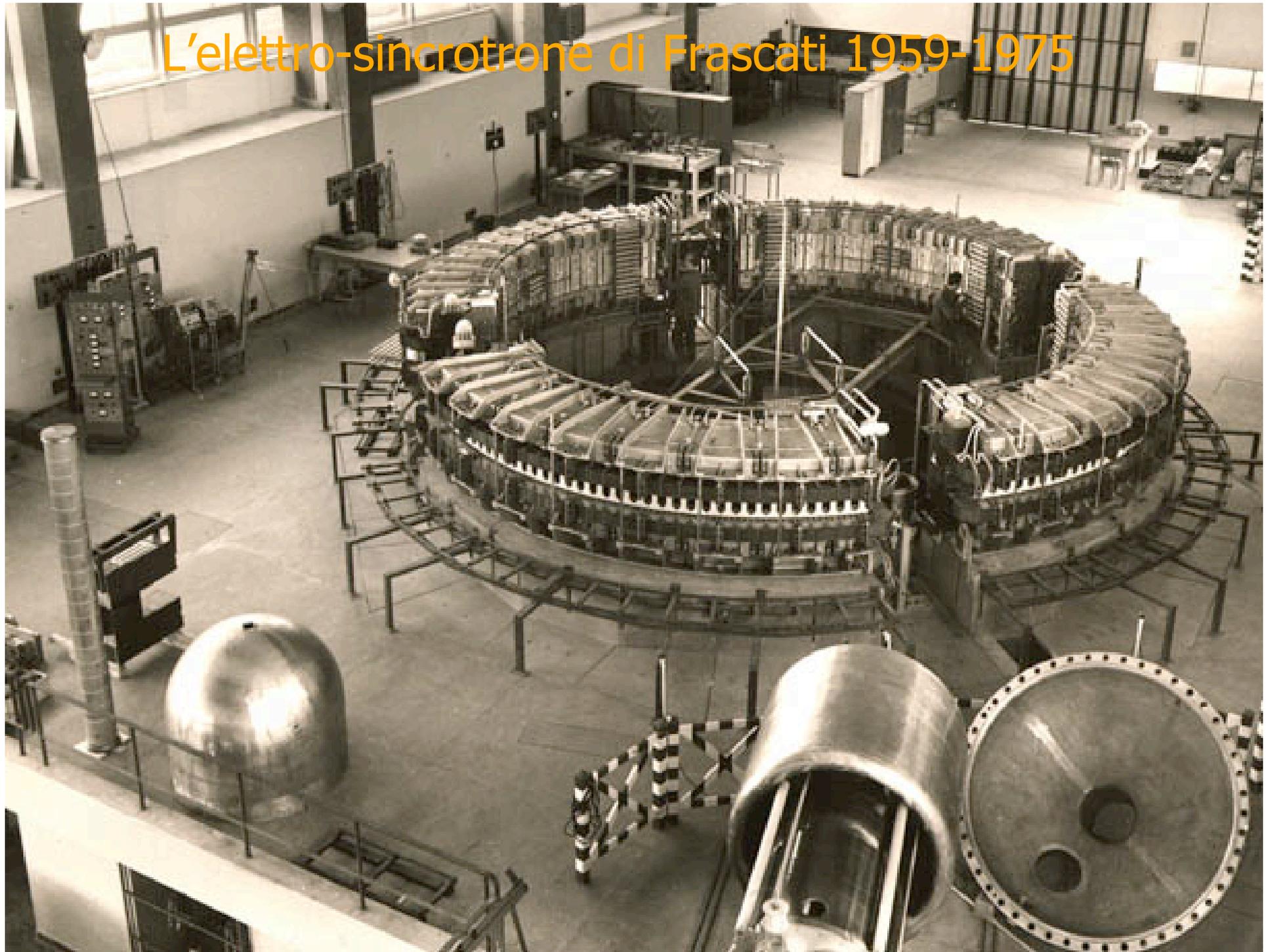
# Il Sincrotrone

Dopo la guerra M.Oliphant sintetizzò tre vecchie idee in un nuovo concetto: il sincrotrone. Le idee sono: accelerare con risonatori, variare la frequenza, pulsare il magnete. Nonostante la maggior complessità del sistema si ebbe la possibilità di raggiungere energie più elevate con orbite costanti, tornando a sfruttare il principio di stabilità di fase.

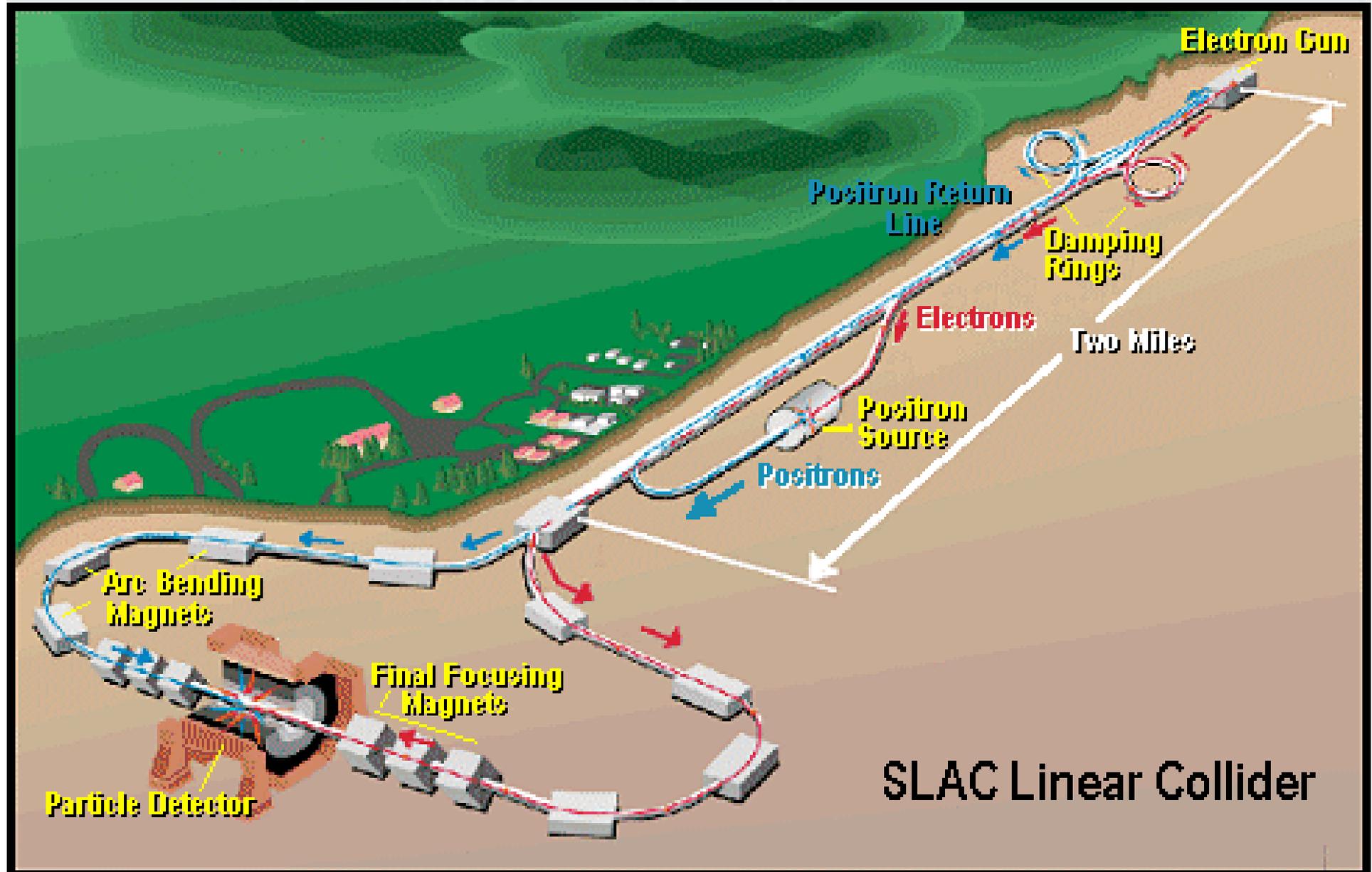
Lo sviluppo per i trasmettitori di generatori di campi elettromagnetici a radiofrequenza e la realizzazione di campi guida realizzati con lenti magnetiche portarono rapidamente ad acceleratori di energie di diversi GeV.



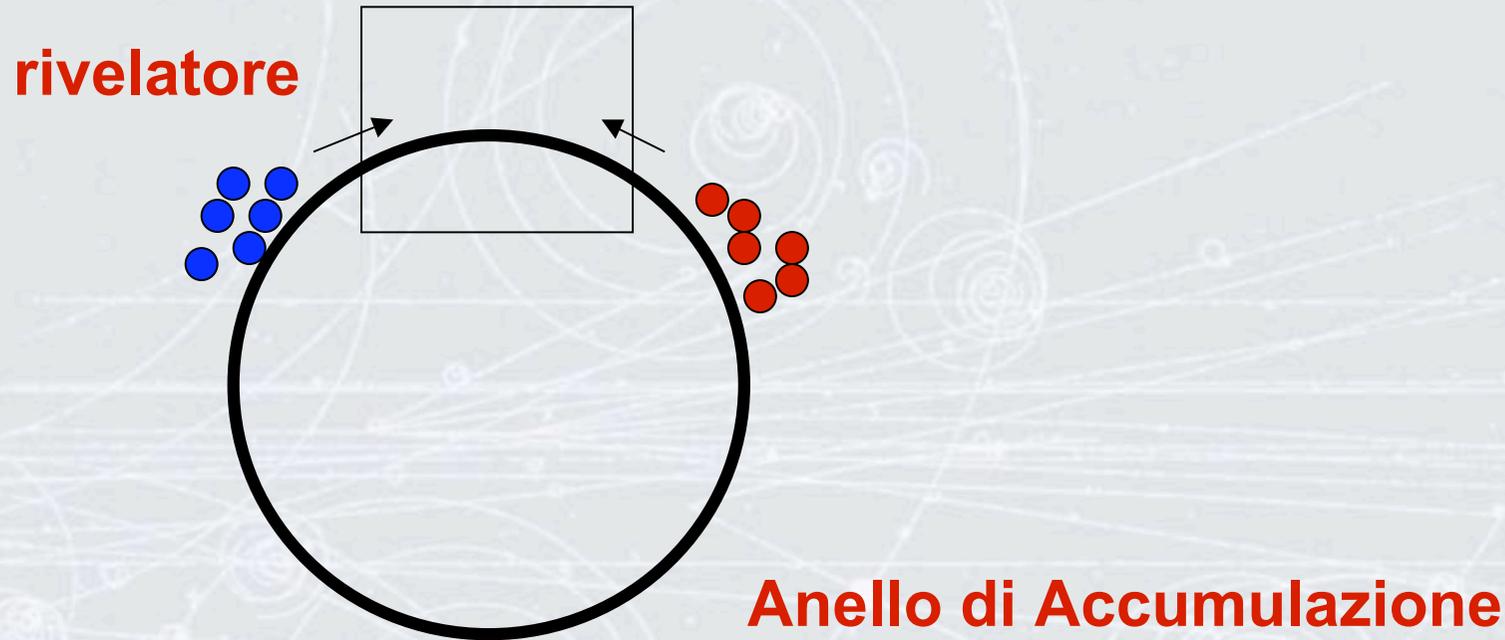
# L'elettro-sincrotrone di Frascati 1959-1975



# L'osservazione su bersaglio

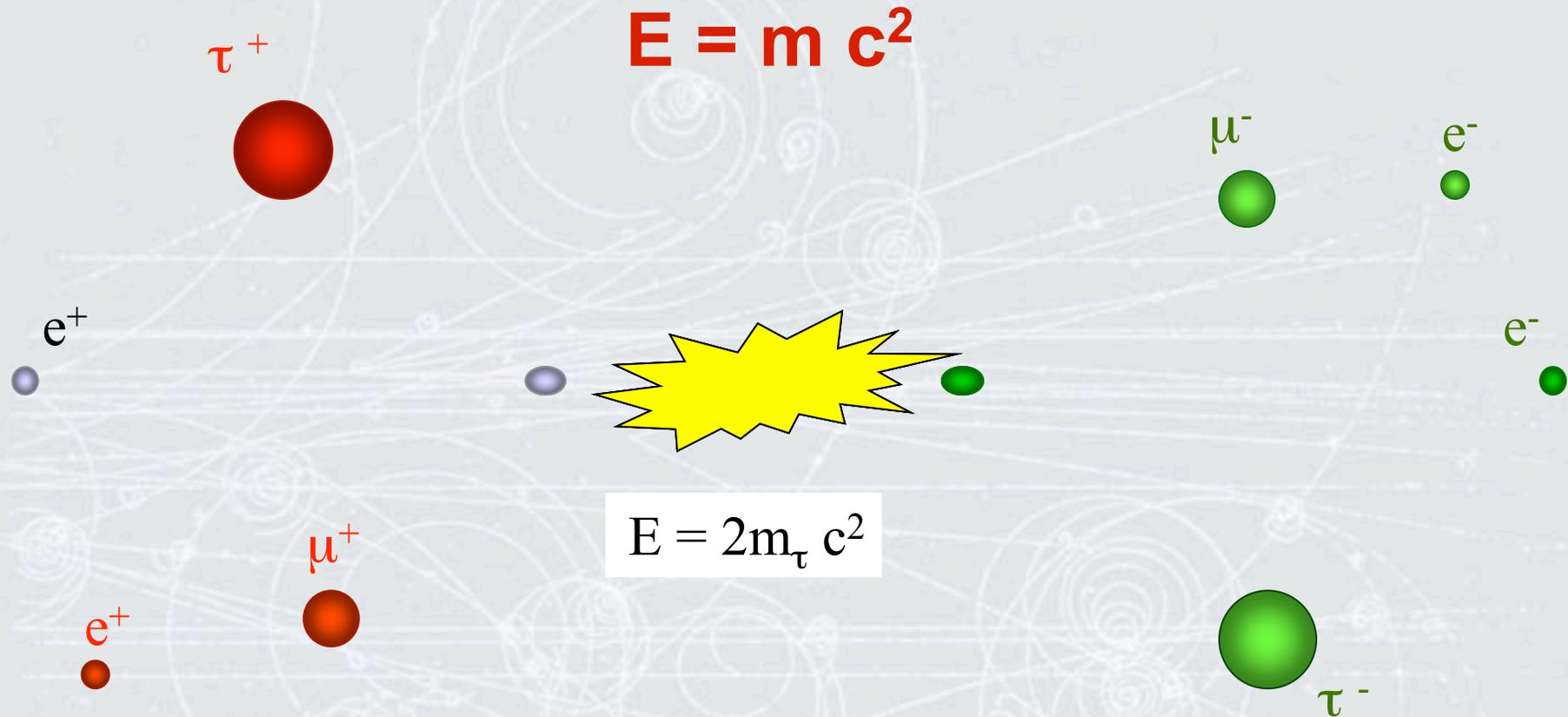


# La prima idea di Frascati



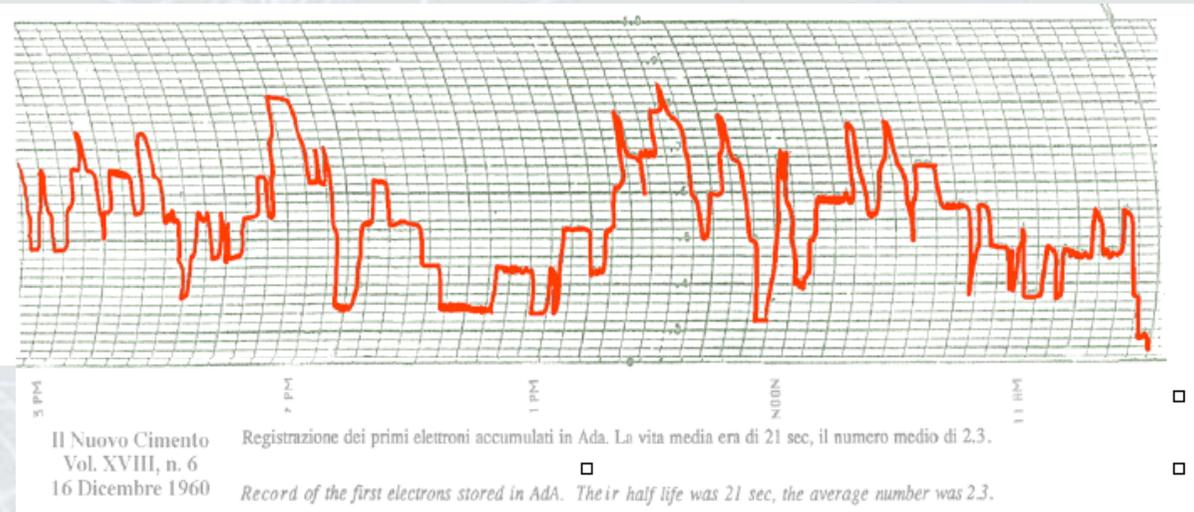
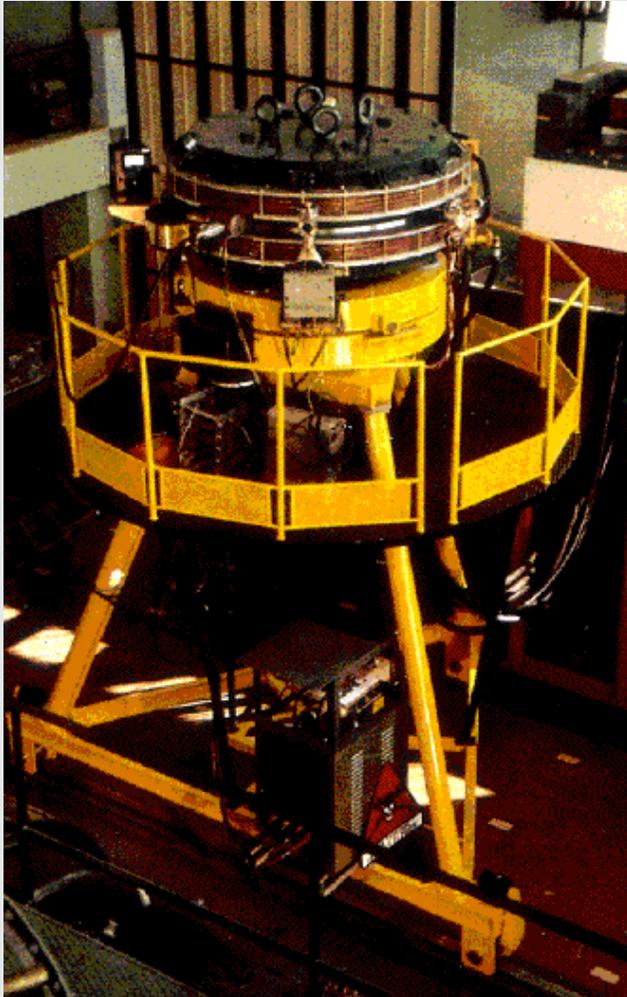
- Le particelle che non interagiscono, possono essere riutilizzate al successivo giro
- Collisione nel centro di massa
- Le particelle circolanti non sono complesse come i nuclei in una targhetta (cosa accade negli acceleratori a protoni, e ioni?)

# Collisioni materia e antimateria



Con questo tipo di tecnologia **sviluppata a Frascati nel 1961 da B.Tousheck** si raggiungono energie di collisione elevate e si ha la possibilità di studiare le proprietà di materia e antimateria.

# AdA (Anello di Accumulazione) 1961-1965



Registrazione dei primi elettroni  
accumulati in AdA. La vita media  
era 21 sec, il numero medio 2.3.

# I collisori materia-antimateria

LEP al CERN di Ginevra 1988



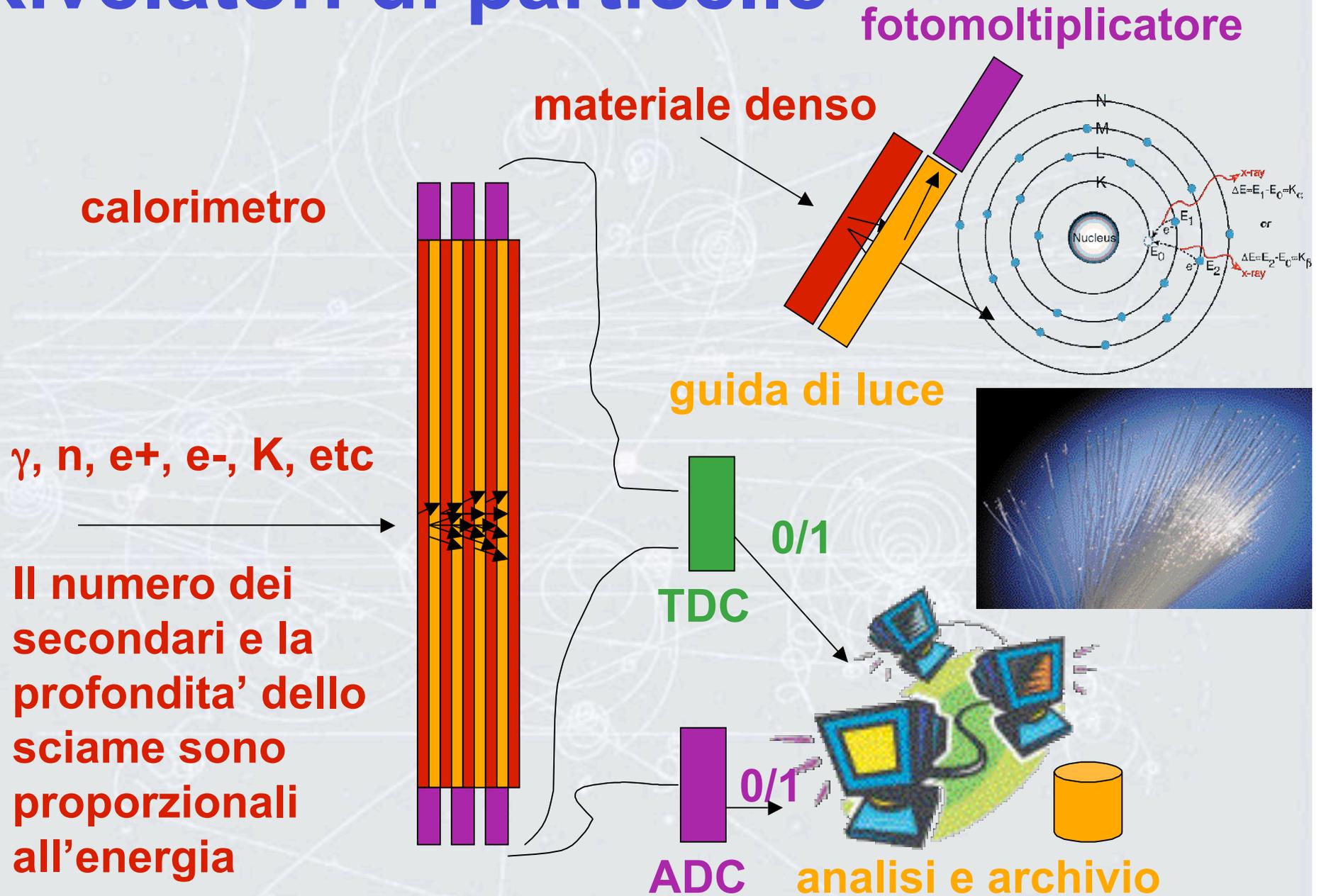
LHC al Cern di Ginevra > 2006

# Collisioni...

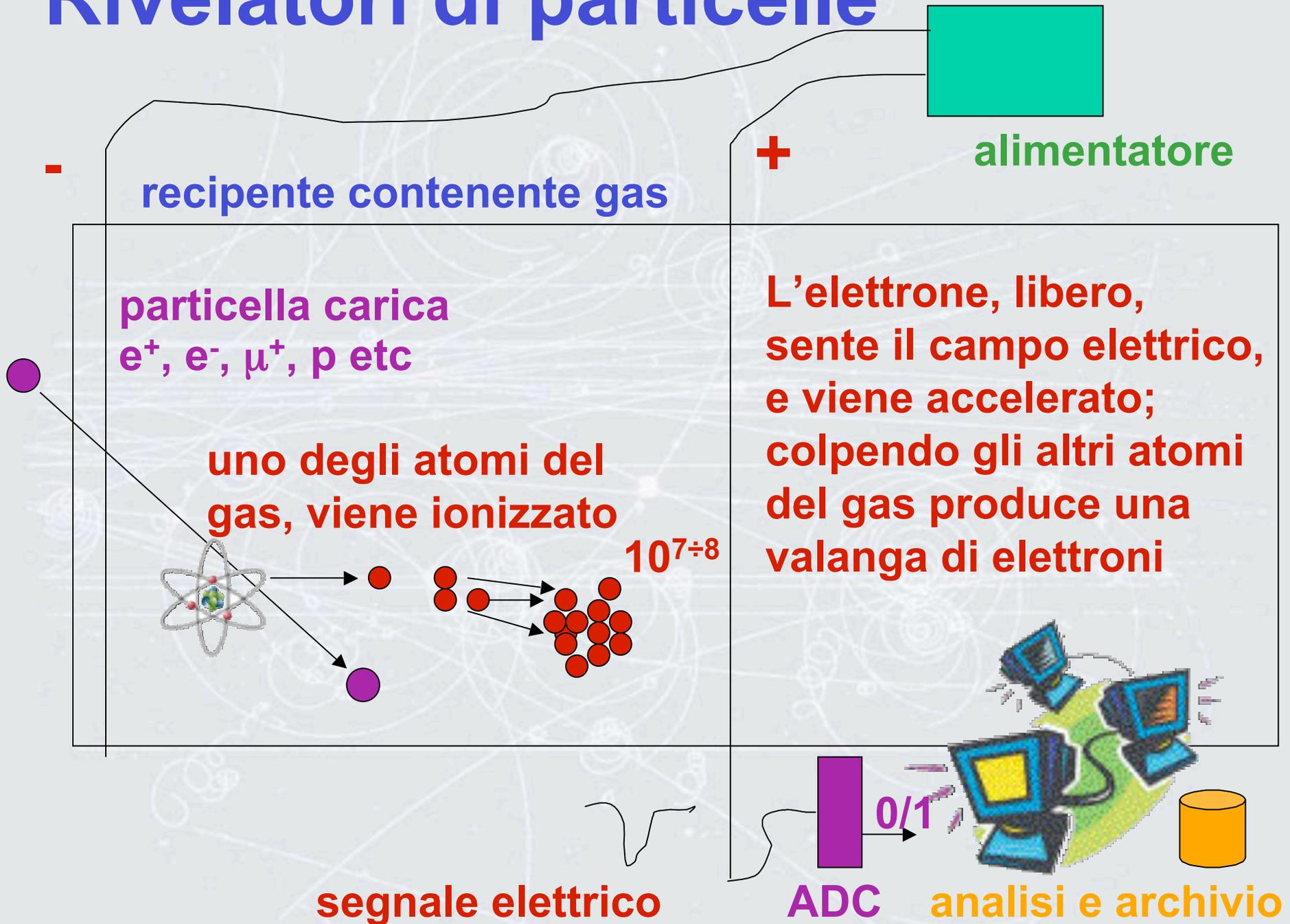


il modello Standard...!?

# Rivelatori di particelle



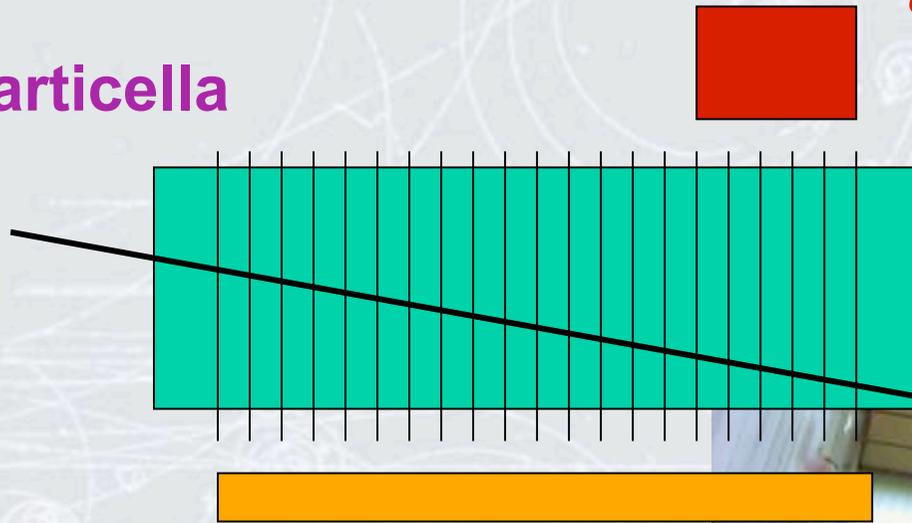
# Rivelatori di particelle



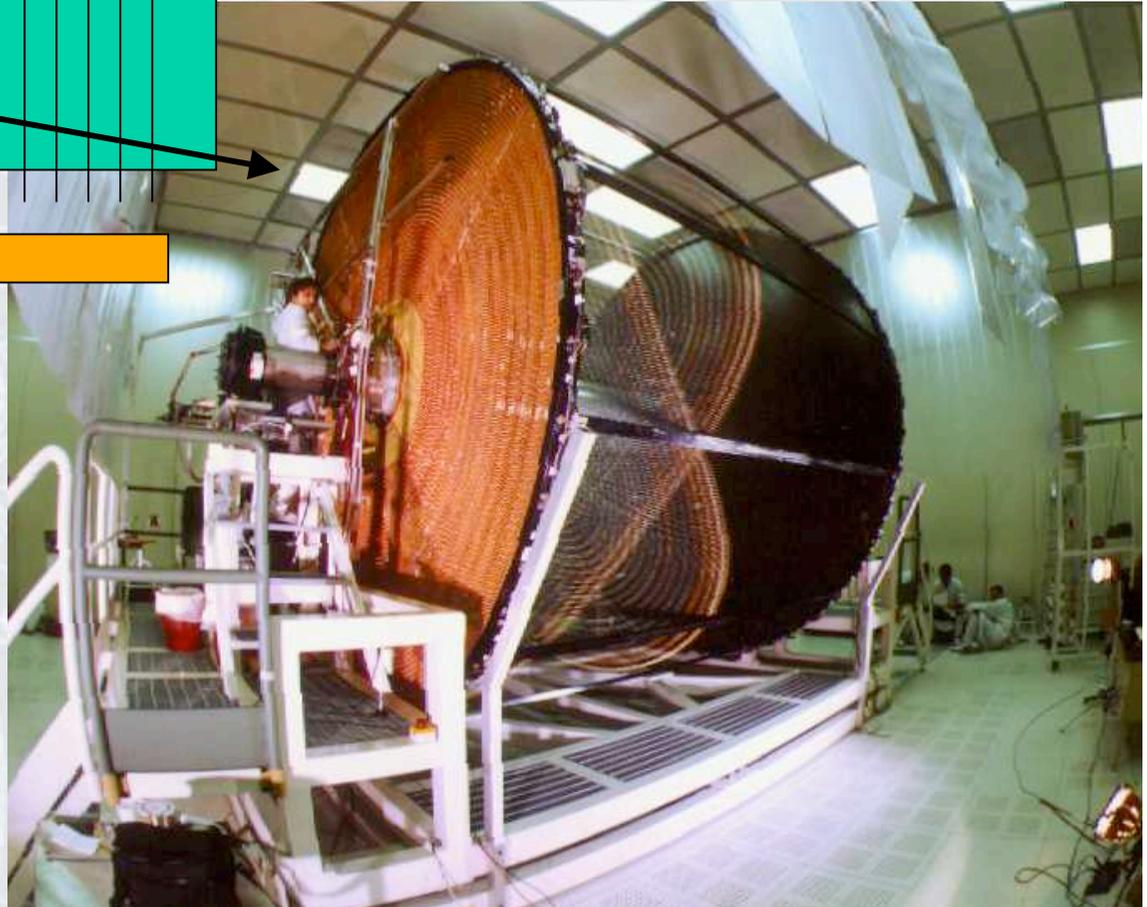
# I grandi rivelatori

particella

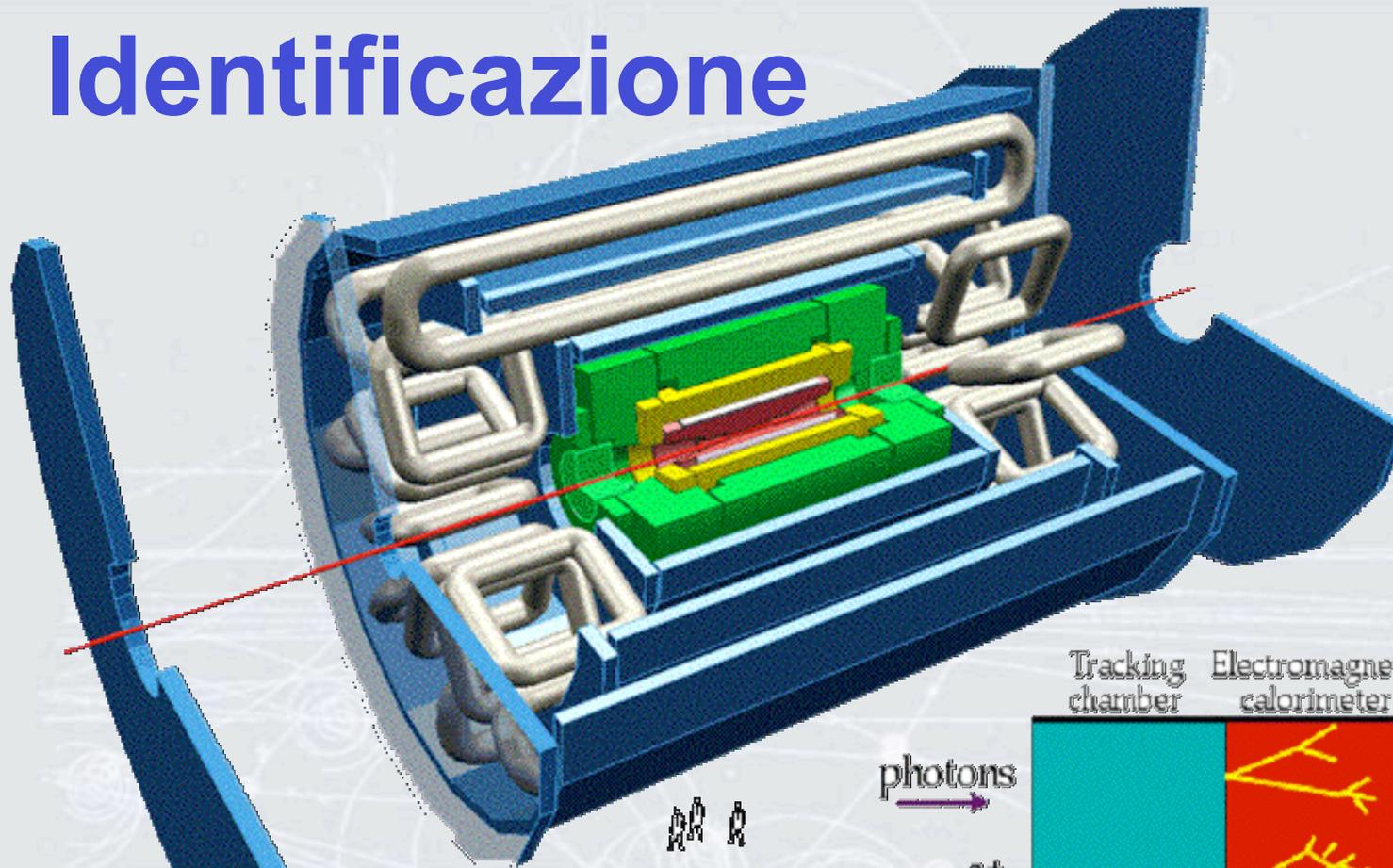
alimentatore



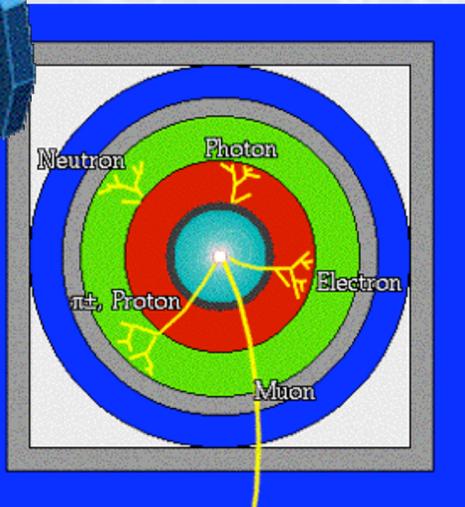
ADC-TDC



# Identificazione

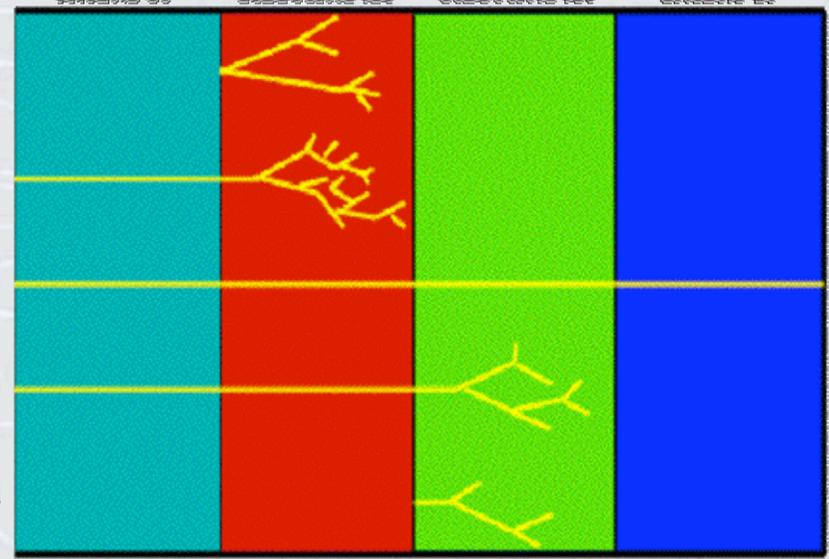


- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



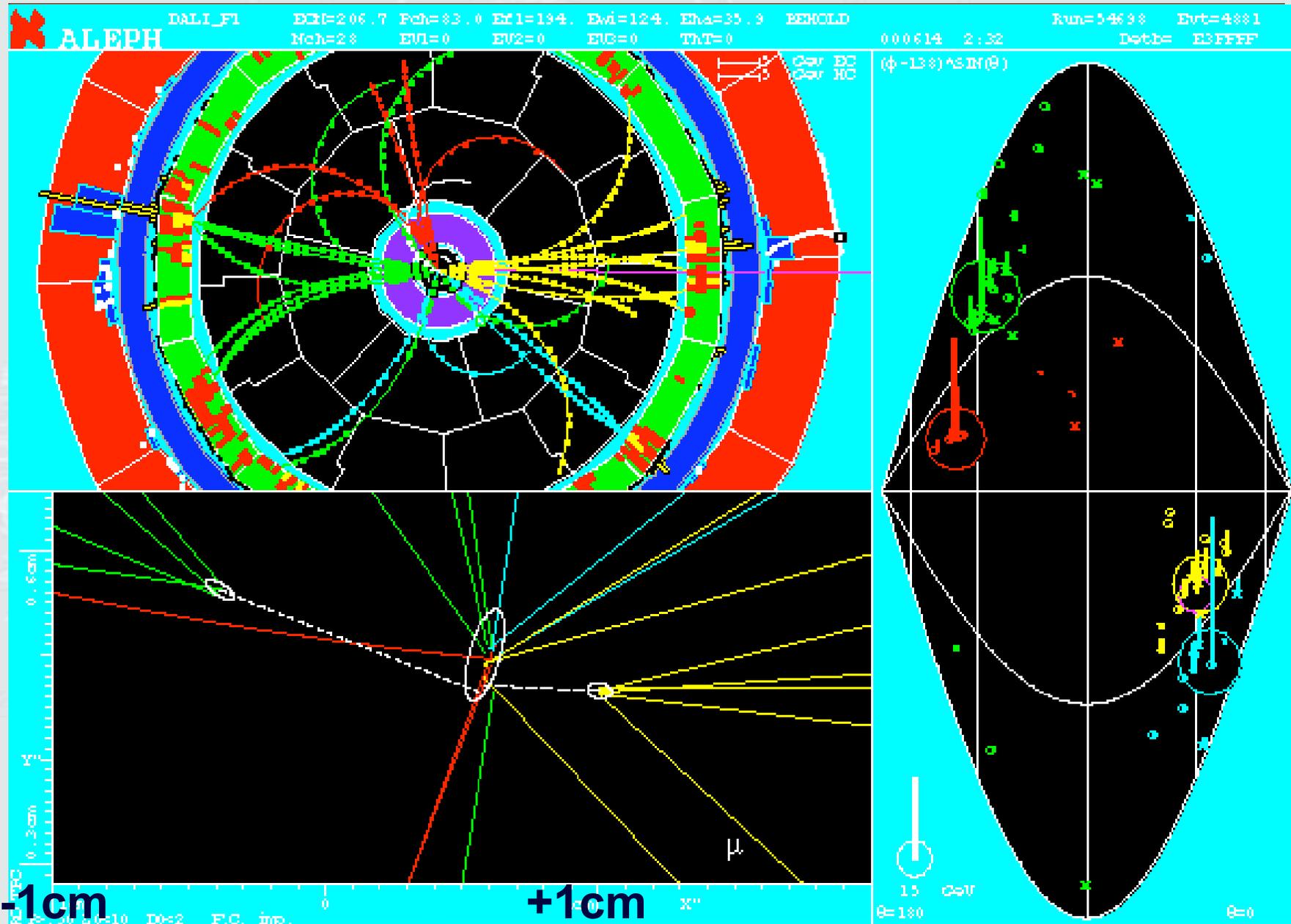
Tracking chamber    Electromagnetic calorimeter    Hadron calorimeter    Muon chamber

photons  
 $e^{\pm}$   
 muons  
 $\pi^{\pm}, p$   
 n



Innermost Layer... → ...Outermost Layer

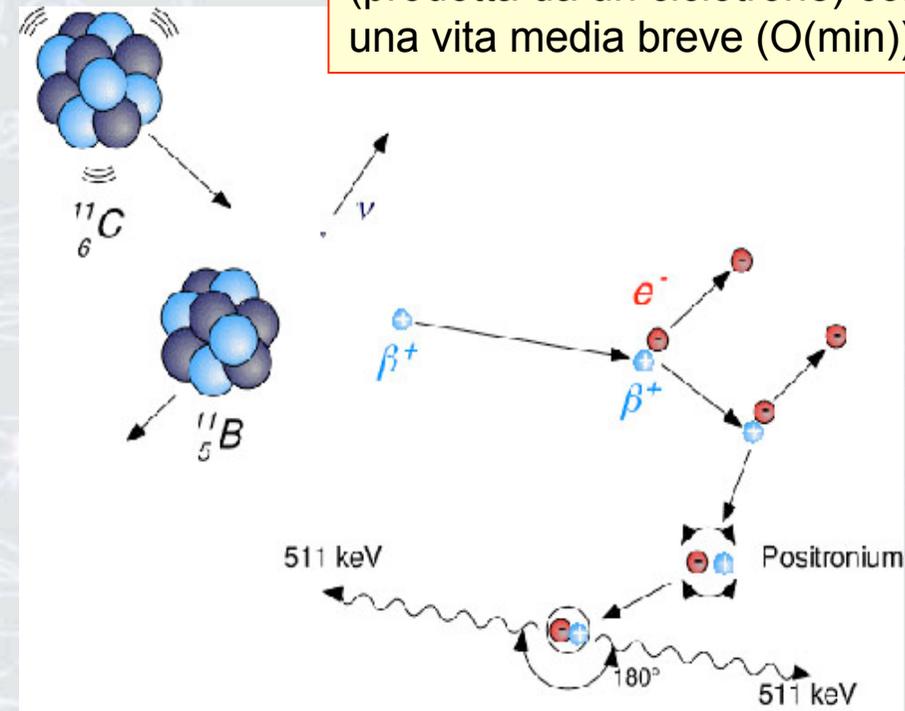
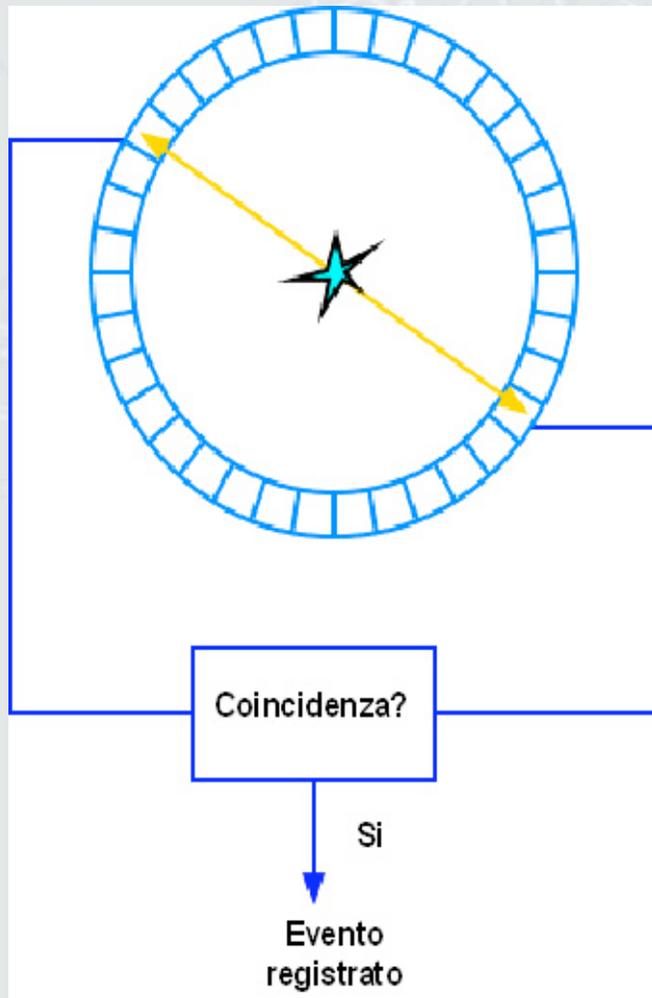
# Ricostruzione dell'evento



# Positron Electron Tomography

Moderna tecnica medica per visualizzare organi interni.

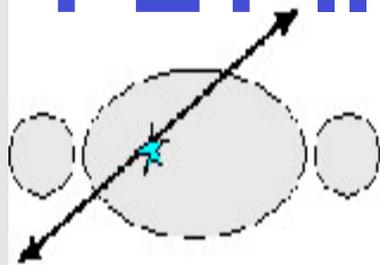
Un apparecchiatura PET ha ~ 10.000 rivelatori di  $\gamma$   
(cristalli BGO di spessore 3 cm)



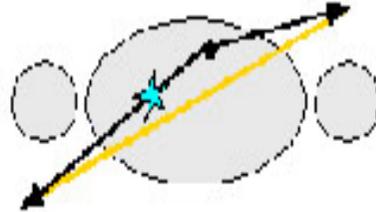
Al paziente viene iniettata una sostanza radio-farmacologica (prodotta da un ciclotrone) con una vita media breve (O(min)).

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  $\gamma$  emessi in direzione opposta

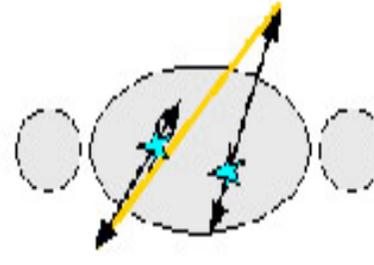
# PET II



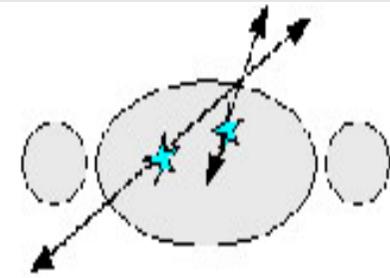
Evento "pulito"



Evento con scattering



Evento casuale



Evento multiplo

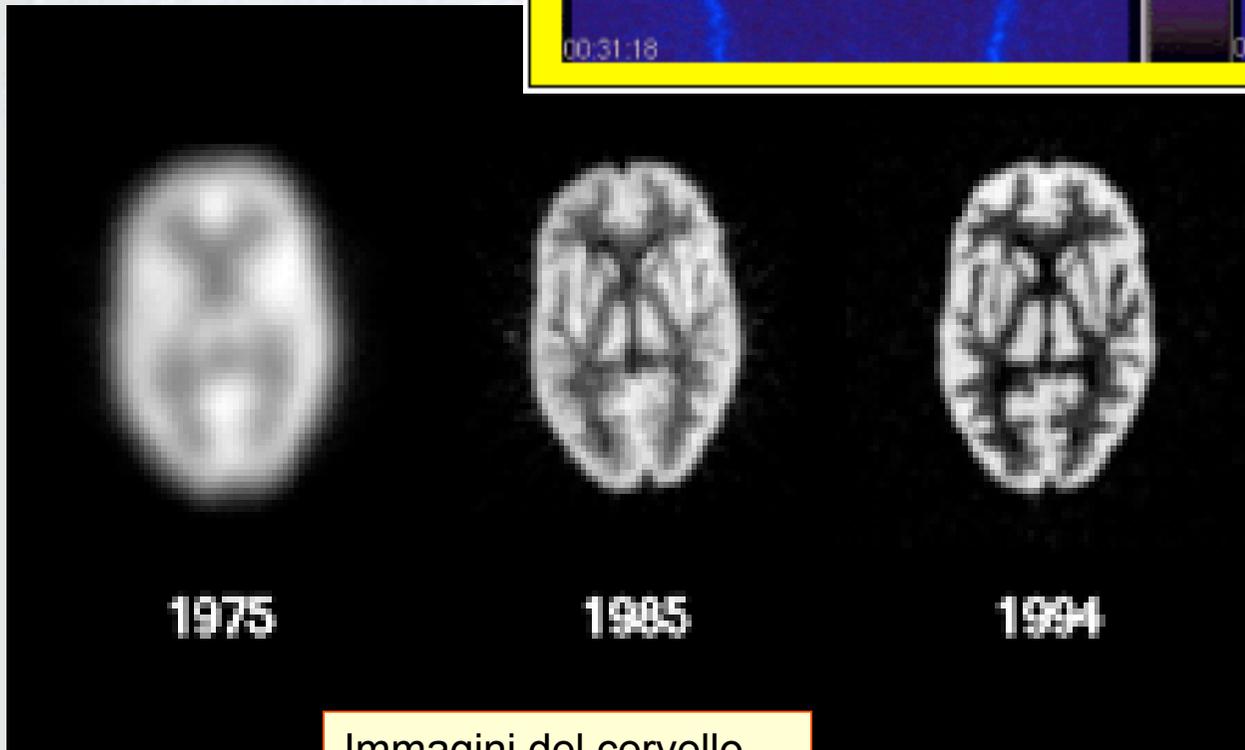
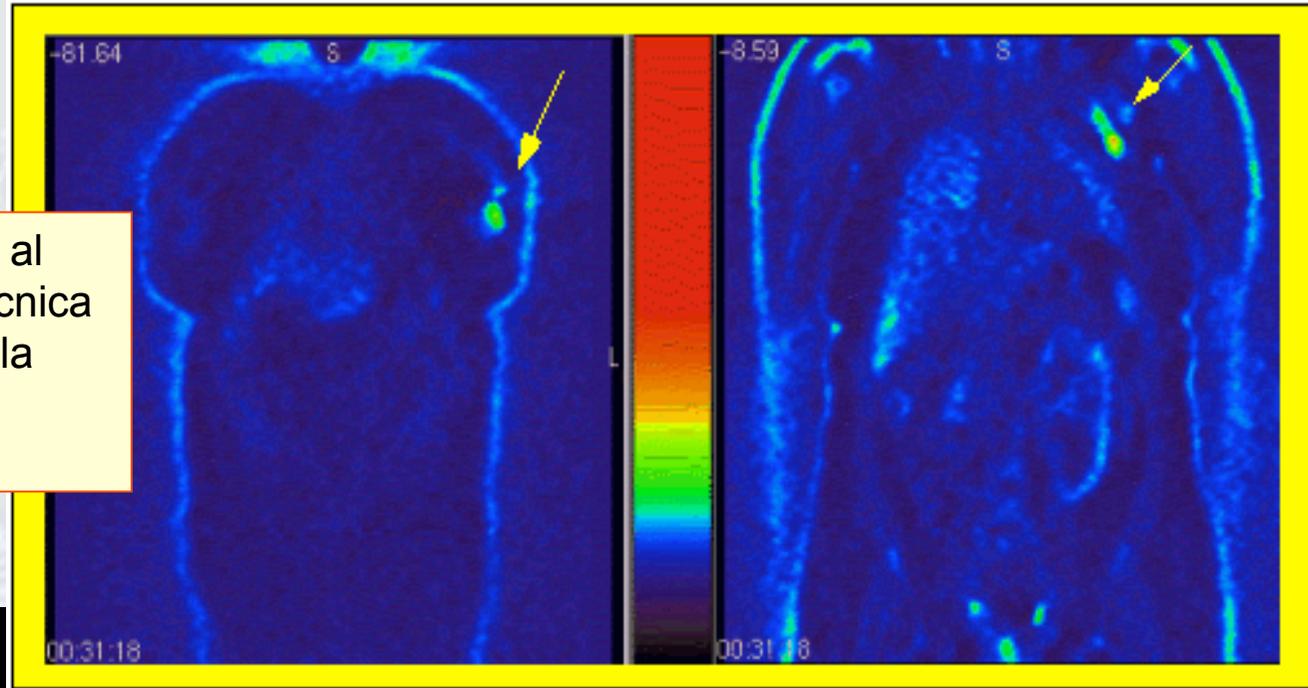
Per ricostruire immagini tridimensionali sono necessari software di ricostruzione sofisticati che tengano conto di: fenomeni di diffusione, di attenuazione, falsi eventi,...



Le risoluzioni spaziali ottenibili con la PET dipendono dal radioisotopo usato:  $\sim 2 \text{ mm } \Phi \text{ } \sim 4 \text{ mm } z$

# PET III

Immagine di un tumore al seno ottenuta con la tecnica PET, la dimensione della massa tumorale e` di qualche mm



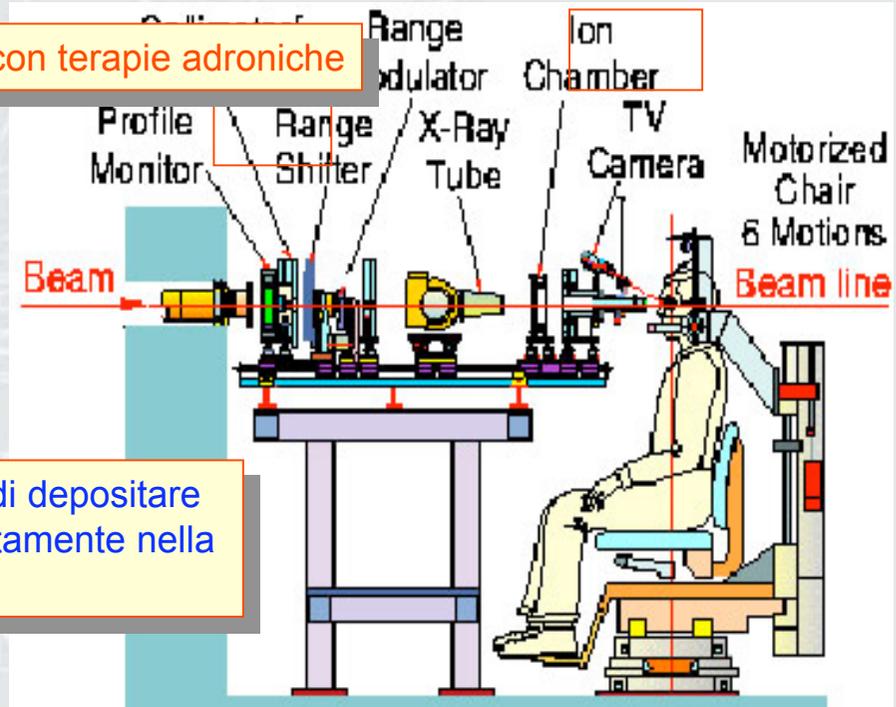
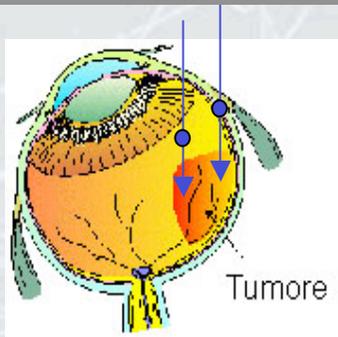
Immagini del cervello

La PET oggi e` molto diffusa e praticata grazie anche agli enormi progressi fatti nella produzione di cristalli di BGO a basso costo da parte degli esperimenti di fisica delle particelle.

# Adroterapia

Gli "Adroni" possono essere usati nella terapia di forme tumorali particolari. Infatti portati all'energia giusta da una macchina acceleratrice, sono in grado di danneggiare i tessuti malati soltanto alla fine del loro percorso nel corpo del paziente, in corrispondenza del tumore stesso

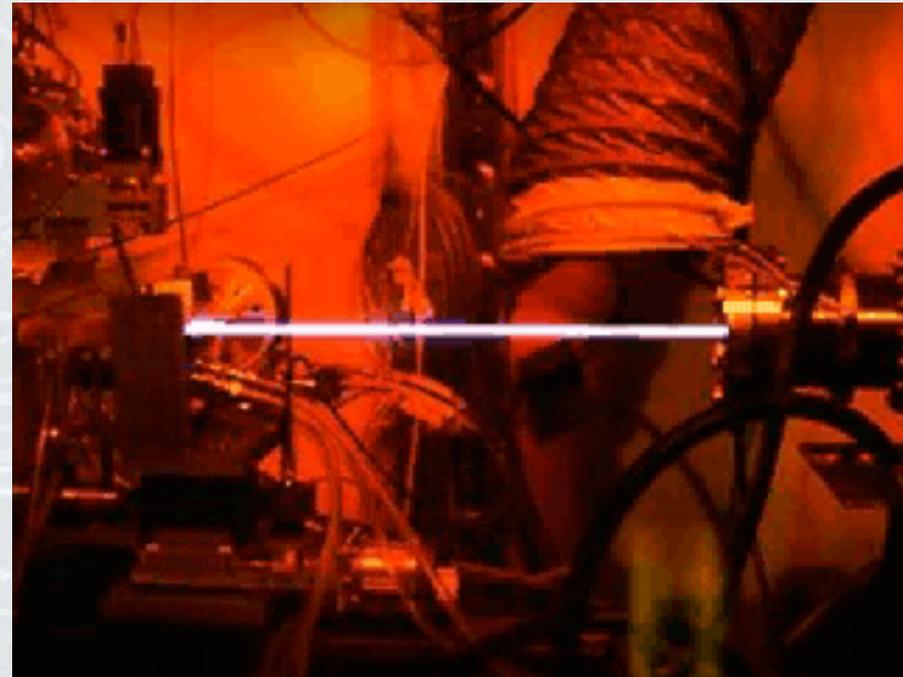
I melanomi oculari sono curabili quasi esclusivamente con terapie adroniche



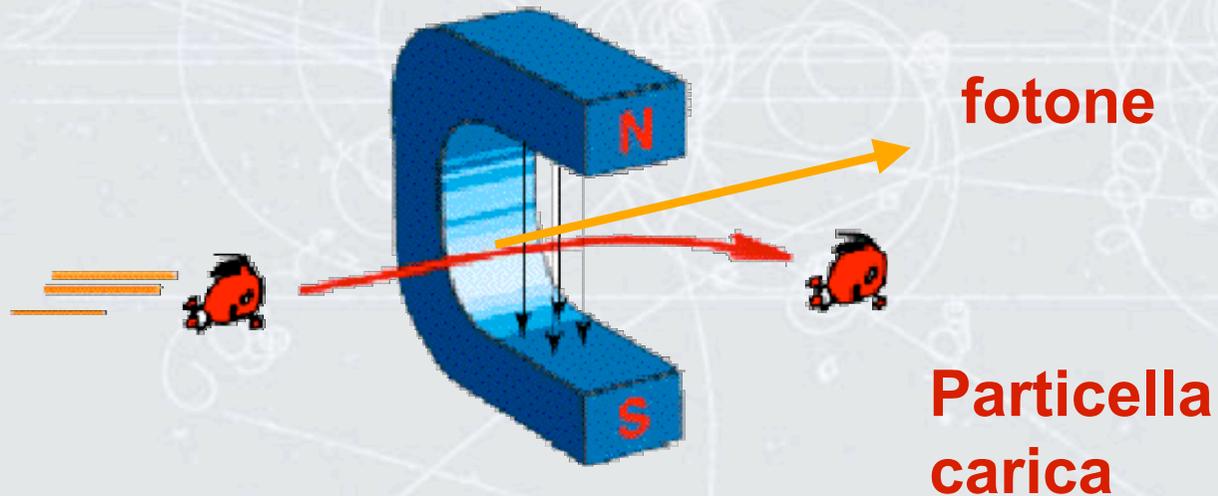
Il trattamento con protoni permette di depositare quantità di energia controllate direttamente nella regione tumorale



# Luce di sincrotrone

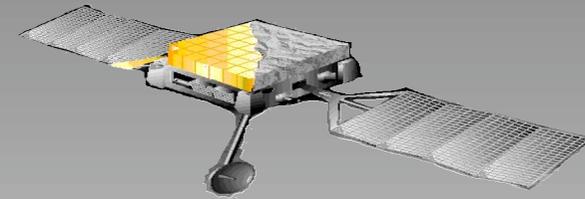


Deflessione  
(campi magnetici)



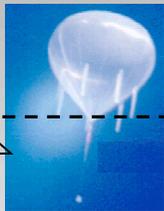
European Synchrotron  
Radiation Facility

# I limiti degli acceleratori e i raggi cosmici



Studio Diretto

40 Km



Atmosfera



Studio Indiretto



Rivelatori Sotterranei

EAS



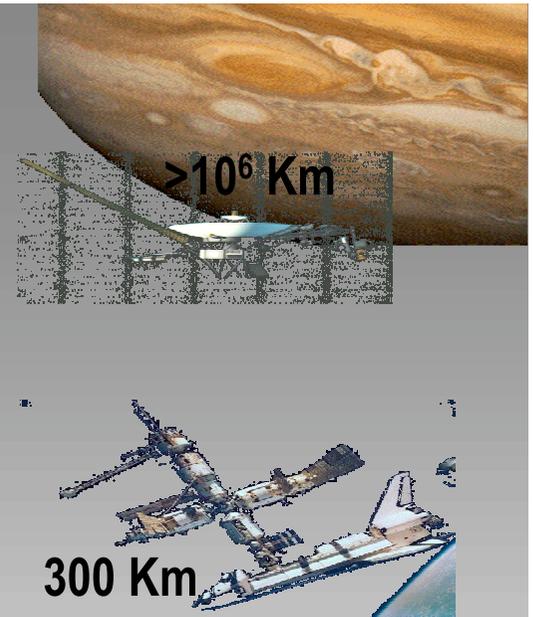
Particelle Secondarie

muoni

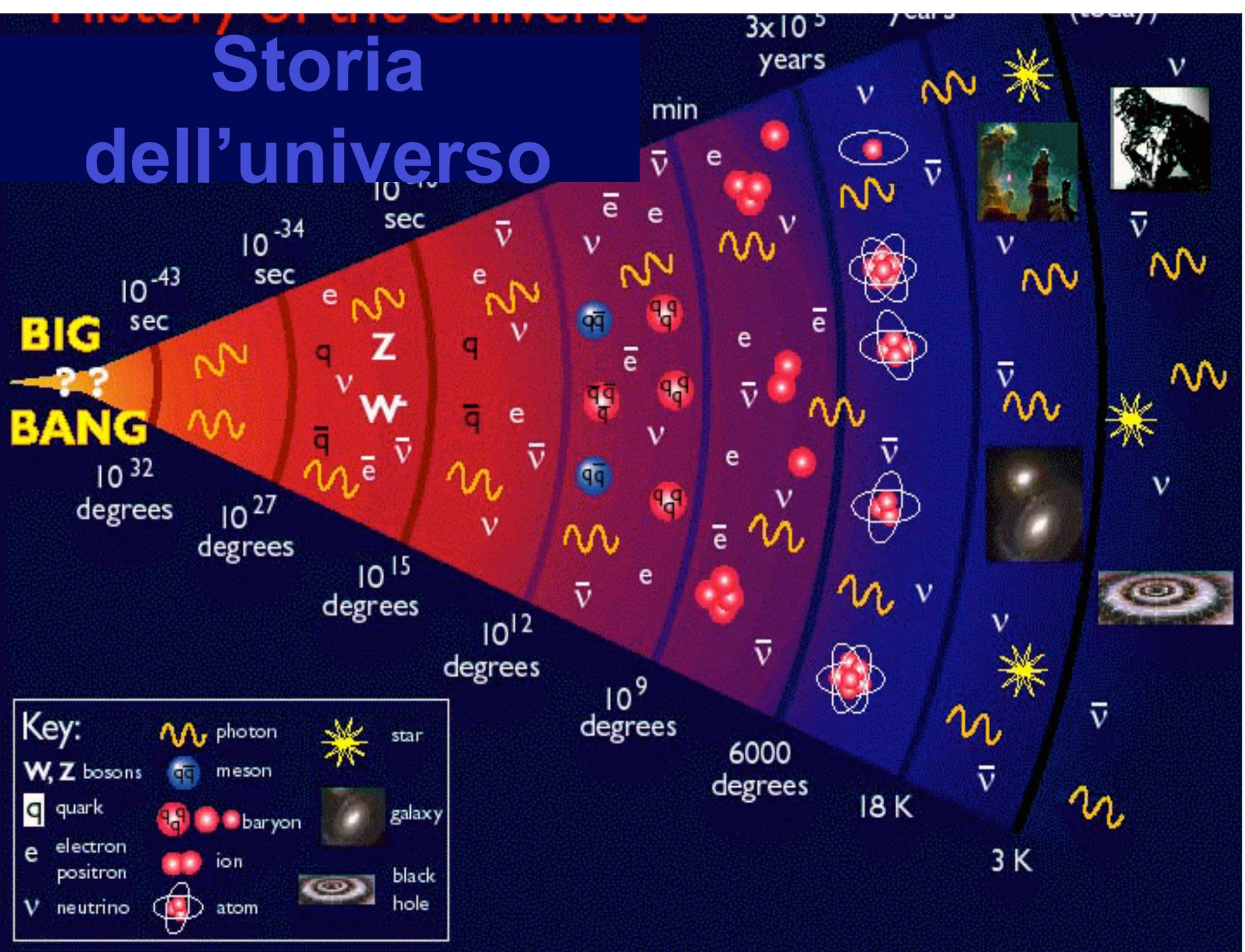
Rivelatori Sottomarini

Neutrini

Cosmici Primari

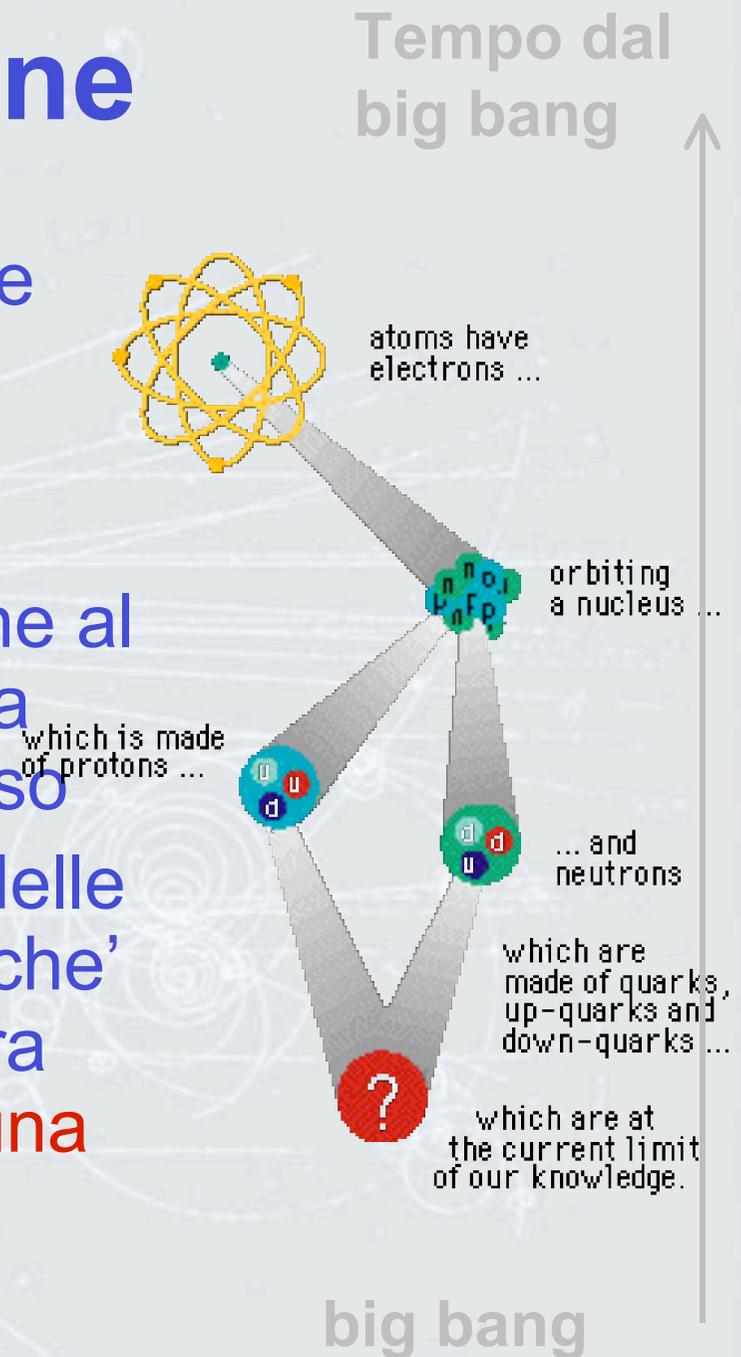


# Storia dell'universo

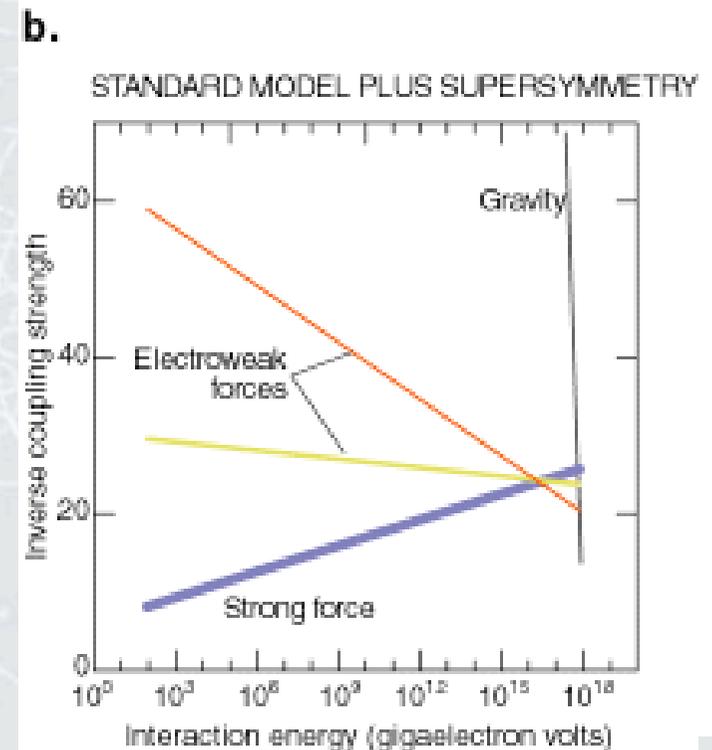
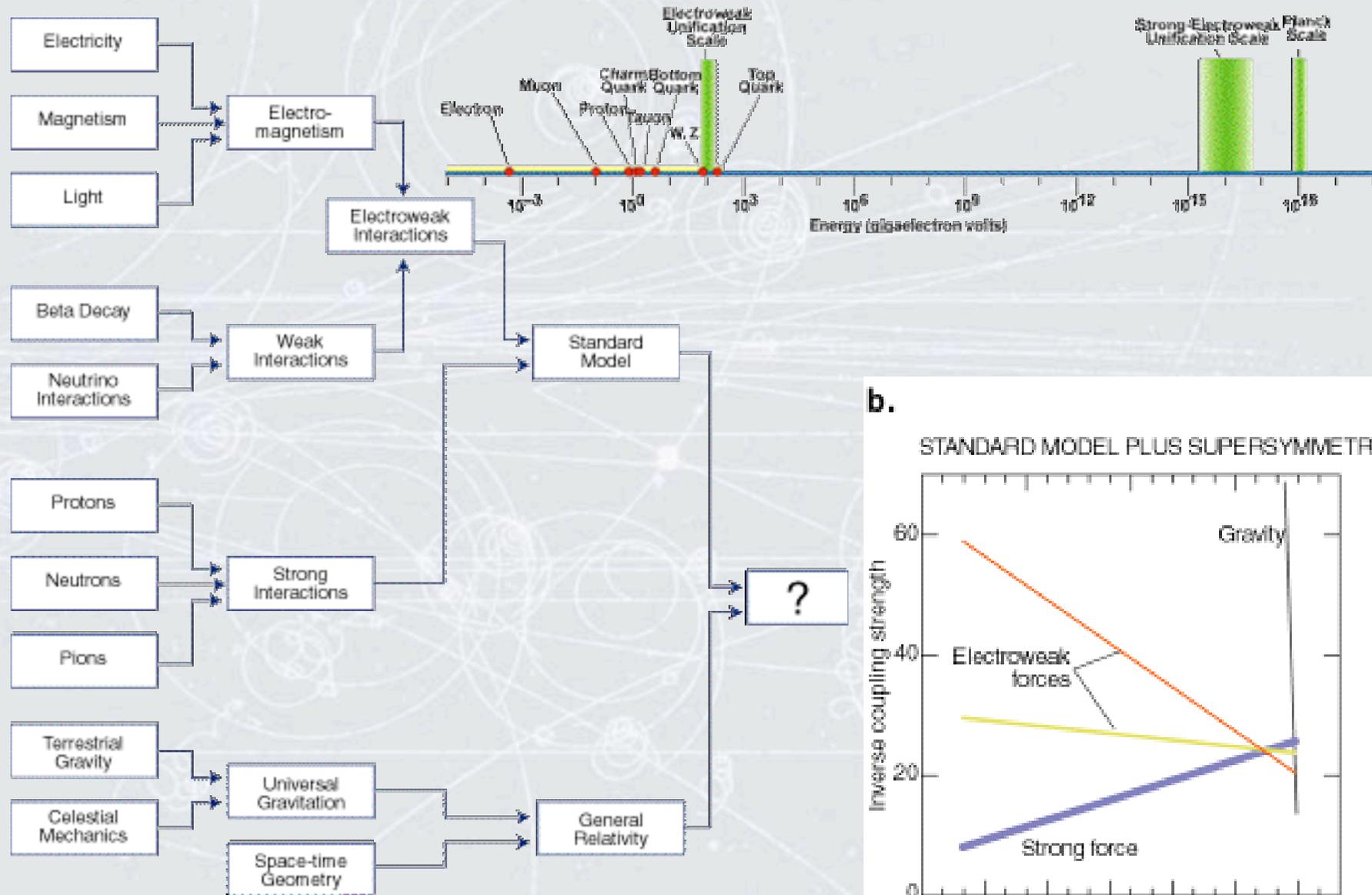


# Unificazione

- Abbiamo dimostrato come ogni qualvolta vi sia un'organizzazione della natura, questa implichi una struttura sottostante
- Siamo arrivati a identificare degli oggetti (**quark, leptoni e forze**) che al momento sembrano descrivere la struttura ultima del nostro universo
- Ma questi ancora rispondono a delle leggi ed una struttura. Allora perché non pensare a qualcosa di ancora più semplice? **una** particella, e **una** forza: l'unificazione



# Indizi dell'unificazione



# Il Big Bang

Formazione delle  
Galassie

**1**

**Miliardo di anni**



# Bibliografia

- Acceleratori:
- R.Feynman, R.Leighton, M.Sands: La Fisica di Feynman (Vol. 2), Addison Wesley
- R.Wilson, R.Littauer: "Acceleratori di particelle", Zanichelli
- B.Toushek: "Gli anelli di accumulazione", Letture da *Le Scienze* Le particelle fondamentali a cura di L.Maiani
- E. Wilson: "An introduction to particle accelerators", Oxford

# Bibliografia

## Modello Standard

QED

Richard Feynmann Ed. ADELPHI

La Fisica delle Particelle

Luciano Maiani Le Scienze Quaderni n° 103 Settembre 1998

Quarks & Leptons: an introductory Course in Modern Particle Physics

F. Halzen A.D. Martin Ed Wiley

## Cultura Scientifica

Il senso delle cose

Richard Feynmann Ed. ADELPHI

Le Scienze Edizione italiana dello Scientific American

<http://www.lescienze.it>

# Bibliografia

## υ Libri di Testo

- K. Kleinknecht, *Detectors for particle radiation*, 2nd edition, Cambridge University press 1998
- W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, 2nd edition, Springer 1994

## υ Articoli di rassegna

- *Experimental techniques in high energy physics*, T. Ferbel (editor), World Scientific 1991
- *Instrumentation in High Energy Physics*, F. Sauli (editor), World Scientific 1992

## υ Altre fonti

- *Review of Particle Physics*, (Eur. Phys. Jou. C, Vol. 15 N.1- 4, 2000)
- <http://training.web.cern.ch/Training/ACAD/Transparencies/Joram300398/pd1/index.html>
- *The Particle Detector Briefbook*, <http://rkb.home.cern.ch/rkb/titleD.html>
- TERA foundation home page [http://www.tera.it/index\\_it.html](http://www.tera.it/index_it.html)