

Acceleratori di Particelle



Come



Dove



Quando



Perchè



Fabrizio Fabbri
INFN e Dipartimento di Fisica
Università di Bologna



*Dipartimento
di Fisica*

Principali centri di ricerca di fisica con acceleratori

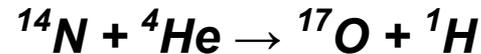


Nome	Tipo	\sqrt{S} (GeV)	Anni di operatività	Laboratorio
ADONE	$e^+ e^-$	3	1967 - 1993	LNf
SPEAR	$e^+ e^-$	8	1972 - 1985	SLAC
DORIS	$e^+ e^-$	10	1974 - 1985	DESY
CESR	$e^+ e^-$	12	1978 - 1993	Cornell
PEP I e II	$e^+ e^-$	15 - 30	1980 -	SLAC
PETRA	$e^+ e^-$	12 - 37	1978 - 1993	DESY
TRISTAN	$e^+ e^-$	55 - 70	1985 -	KEK
SLC	$e^+ e^-$	91	1988 - 200	SLAC
LEP	$e^+ e^-$	86 - 209	1989 - 2000	CERN

DAΦNE	$e^+ e^-$	1.02	1994 -	LNf
BEPC	$e^+ e^-$	2 - 5	1990 -	Pechino

Nome	Tipo	\sqrt{S} (GeV)	Anni di operatività	Laboratorio
PS	p	28 - 30	1959 -	CERN
SPS	p	450	1976 -	CERN
Tevatron	p	350 - 1000	1985 -	FNAL
ISR	pp	28 - 63	1972 - 1984	CERN
SppS	$p\bar{p}$	450 - 900	1983 - 1989	CERN
Tevatron	$p\bar{p}$	1000 - 2000	1985 -	FNAL
HERA	$e^+ - p$	30 + 920 nel laboratorio	1990 -	DESY
RHIC	Ioni pes.		2000 -	BNL

In seguito al successo ottenuto da Rutherford che, utilizzando “proiettili” energetici e penetranti prodotti naturalmente (particelle α) sondò la struttura della materia su piccola scala (1910 – 1912) e ottenne la prima trasmutazione nucleare artificiale (1919),



si affermò l'idea che questo metodo potesse dare ancora molte “soddisfazioni” ai fisici sperimentali.

Le particelle α , tuttavia, non rappresentavano il proiettile più idoneo:

- flusso ed energia cinetica limitati
- carica elettrica pari a $2e$ (repulsione dal nucleo)
- grande massa

Condon e Gamow dimostrarono che i protoni (per esempio) sarebbero stati più efficaci nel bombardamento dei nuclei. I protoni però non vengono prodotti naturalmente dalle sostanze radioattive.

Iniziò così la corsa all'accelerazione artificiale

Acceleratori elettrostatici

Principio di funzionamento:

una d.d.p. applicata fra due elettrodi accelera di moto uniformemente accelerato ioni inizialmente a riposo. L'energia conferita dipende dalla d.d.p. del campo elettrico e dalla quantità di carica elettrica della particella da accelerare.

$$E_{\text{cin}} = \Delta V \cdot Q$$



L'energia cinetica di una particella si può esprimere in elettron-Volt

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

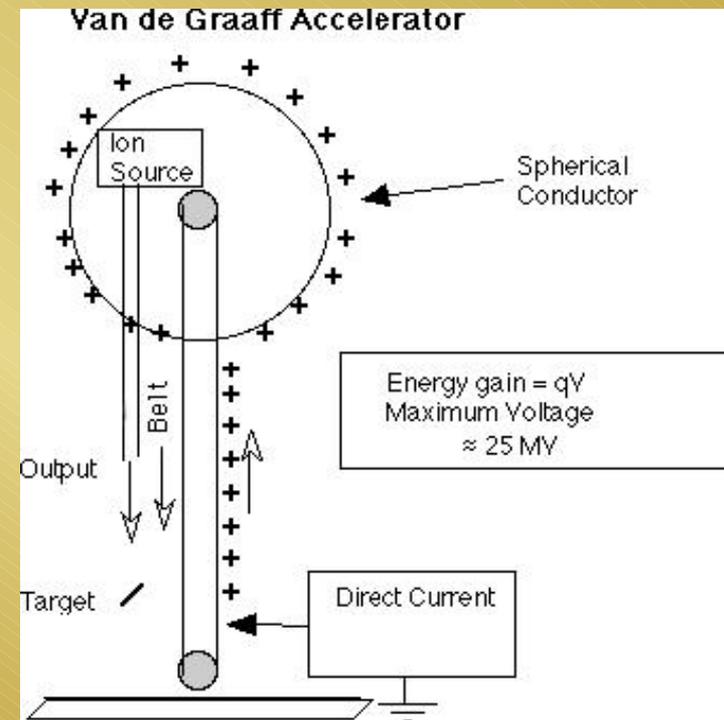
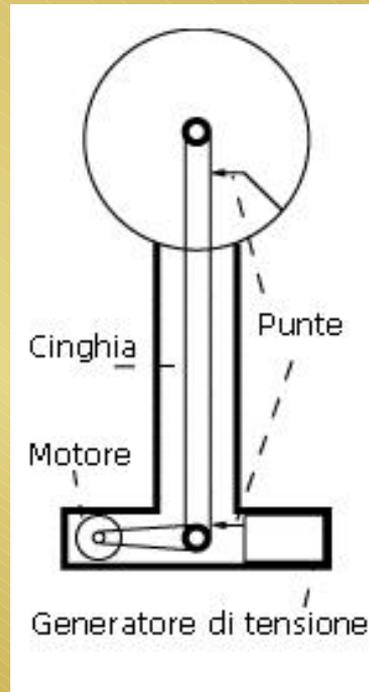
Limitazione principale:

già a pochi MV si verificano scariche premature (anche nel tubo a vuoto in cui viaggiano le particelle) che abbassano la tensione e ne rendono impossibile il funzionamento.

Generatore e acceleratore di Van de Graaff (1929, Princeton, New Jersey)



Robert Van de Graaff

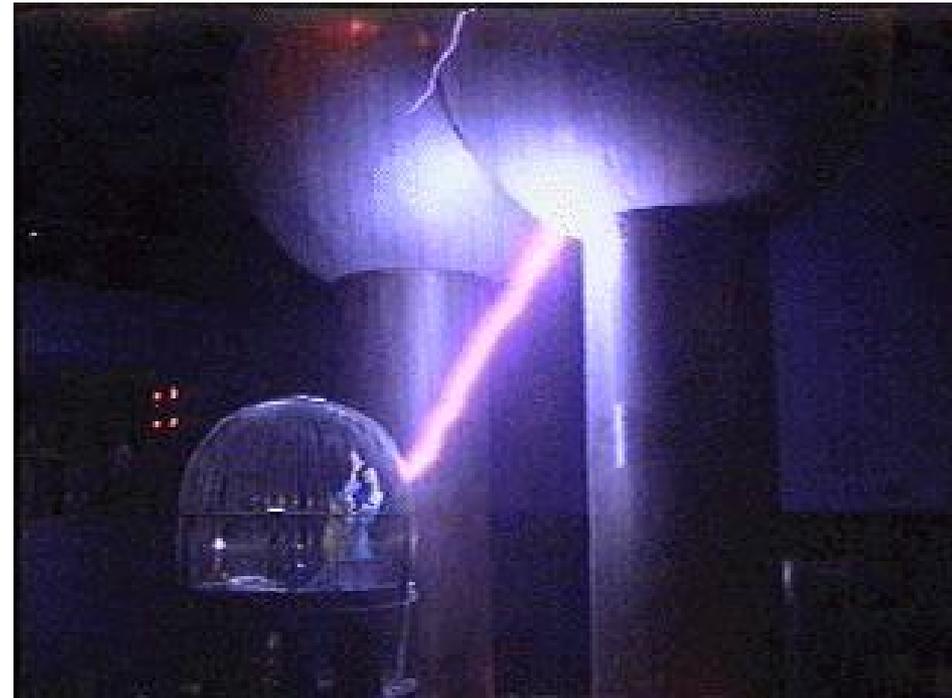


Energie massime 20-25 MeV
nella versione Tandem

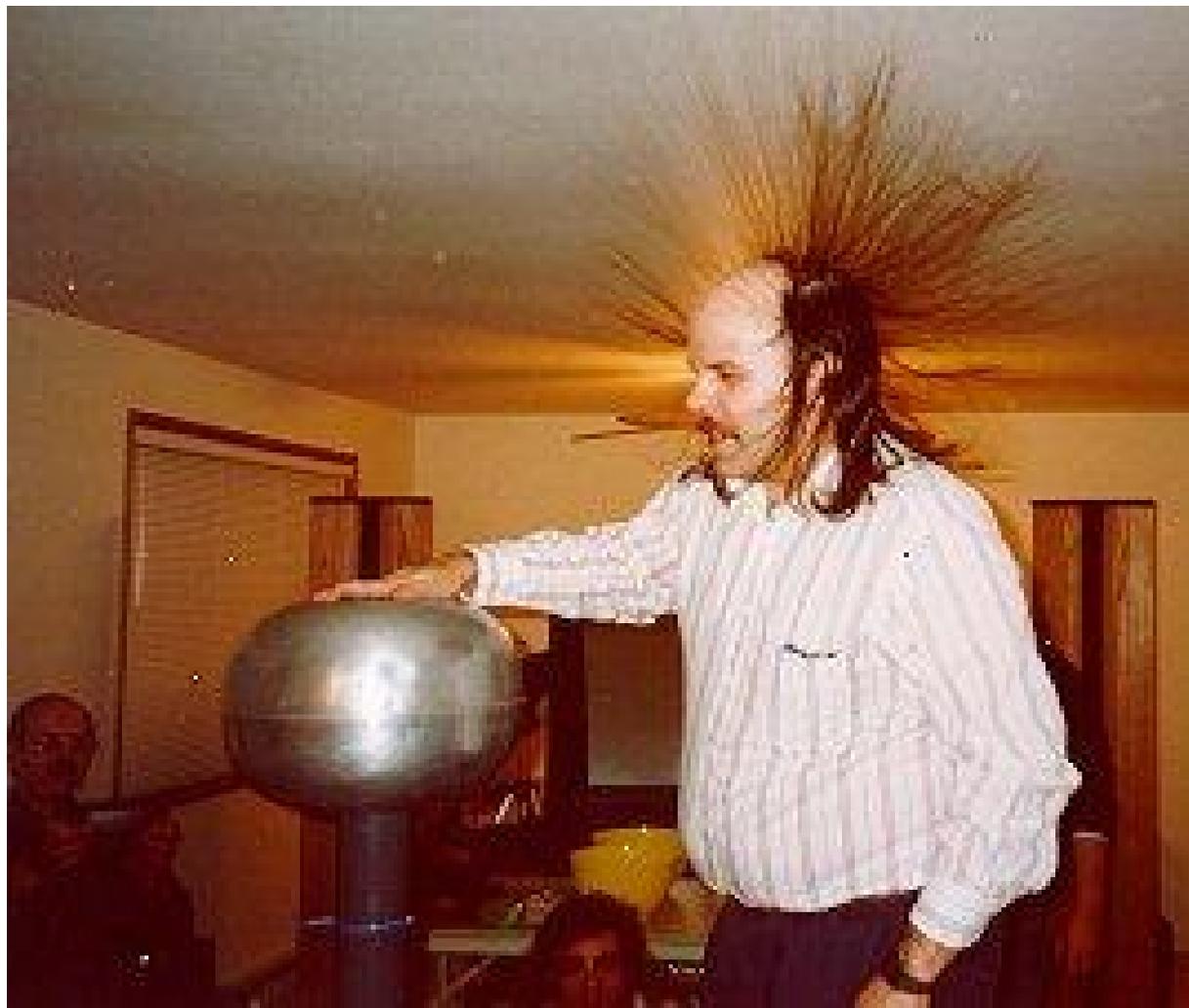
Costruzione del primo grande generatore.



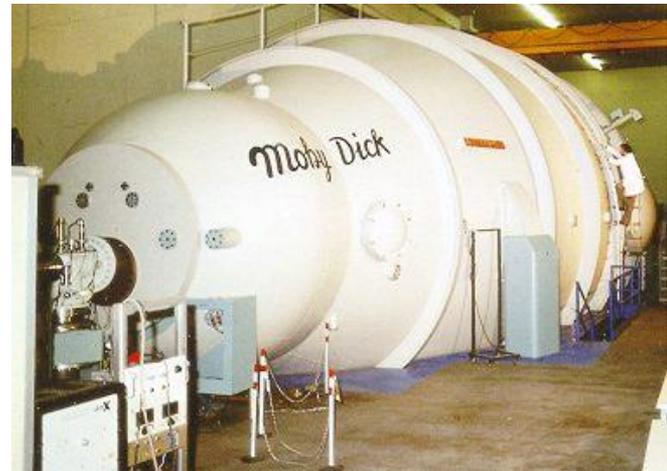
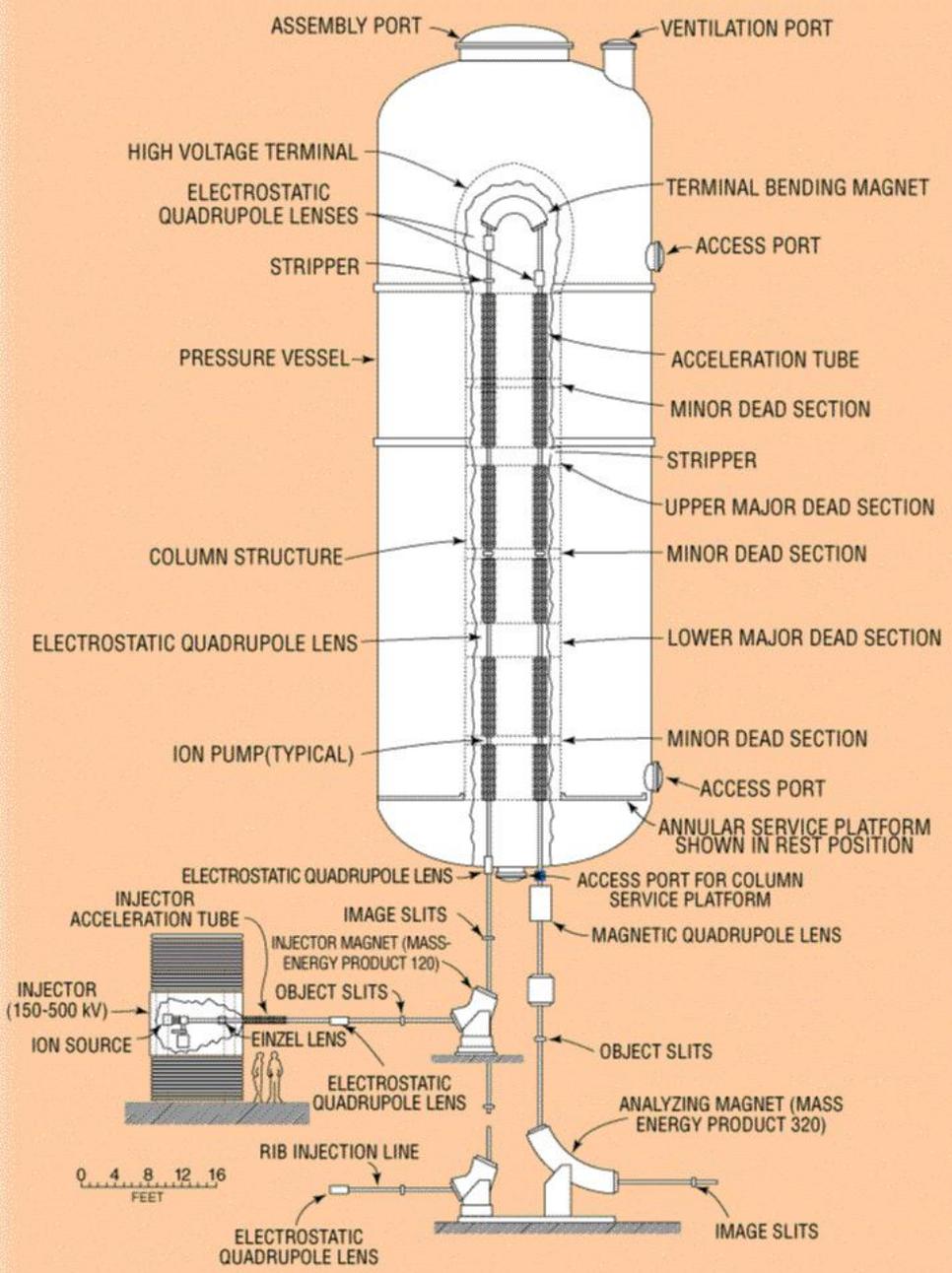
Dimostrazioni “spettacolari”



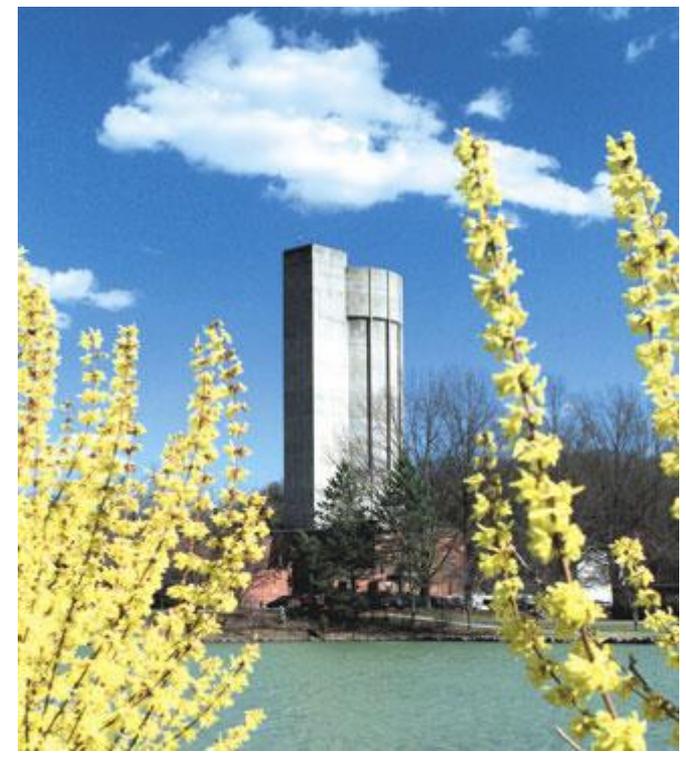
Non è però usato solo per dimostrazioni spettacolari



Gli acceleratori di V. d. G. al mondo sono moltissimi, particolarmente usati nella fisica nucleare.



LNL
INFN

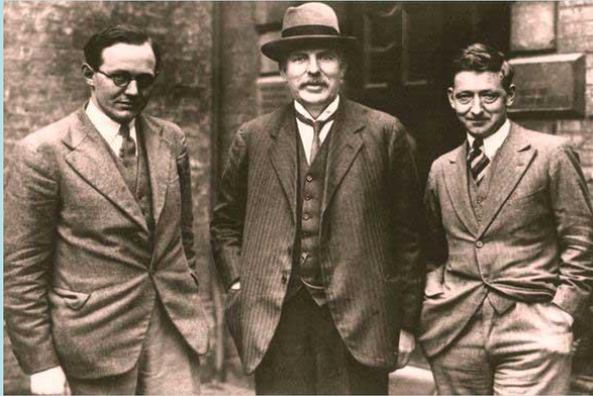


Oak Ridge Nat. Lab.
tandem 25 MeV

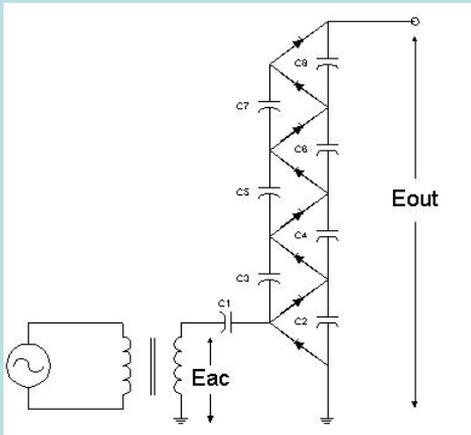
Generatore e acceleratore di Cockroft e Walton

1931, Cavendish Laboratory,
Cambridge, England

Nel 1932 ottengono la prima trasmutazione nucleare artificiale
 $p + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$



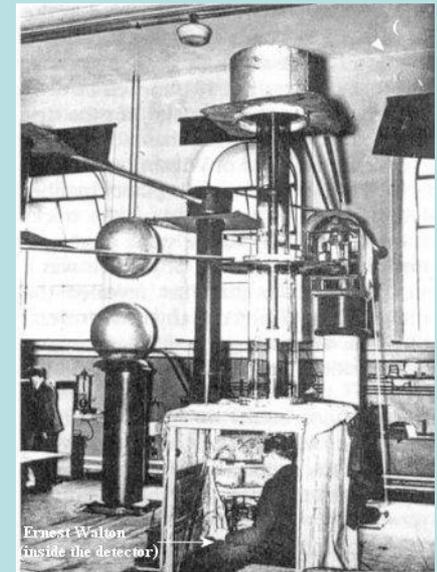
Premio Nobel nel 1951



Schema di funzionamento del
generatore elettrostatico. Idea originale
dello svizzero H. Greinacher 1919

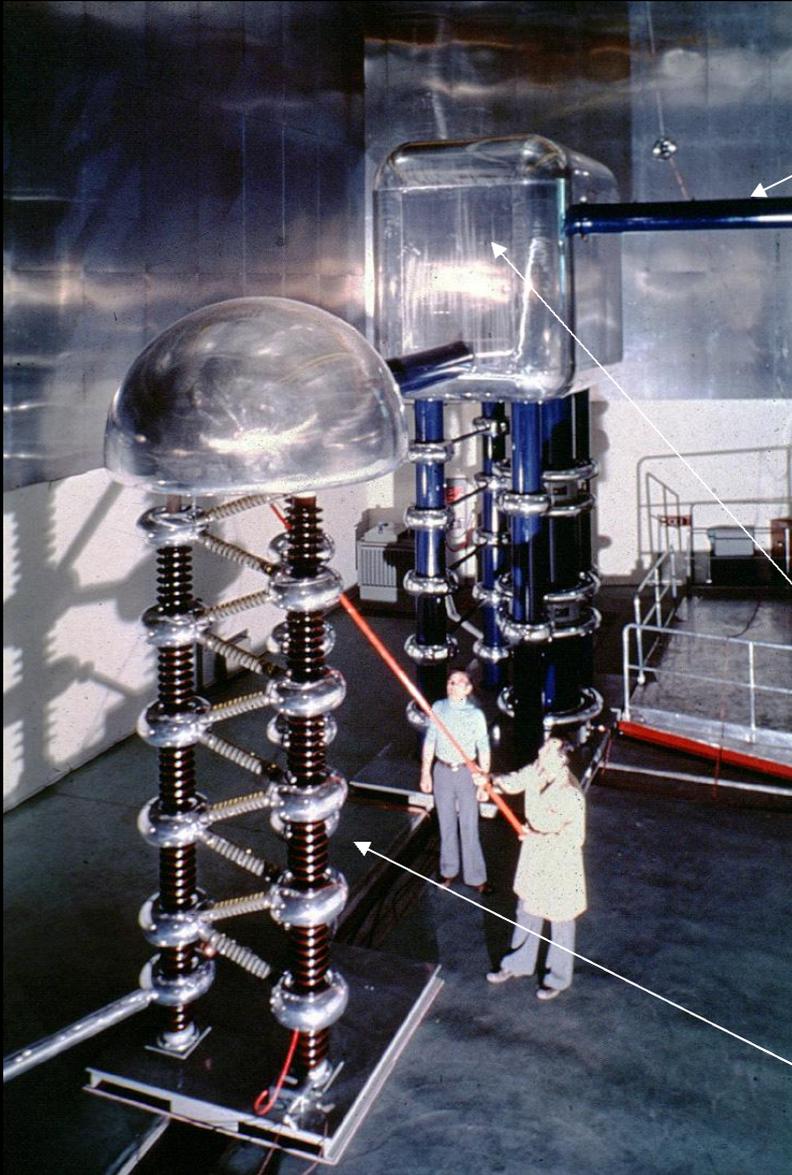


Credit: Science Museum/Science & Society Picture Library



Energie massime 1 - 2 MeV

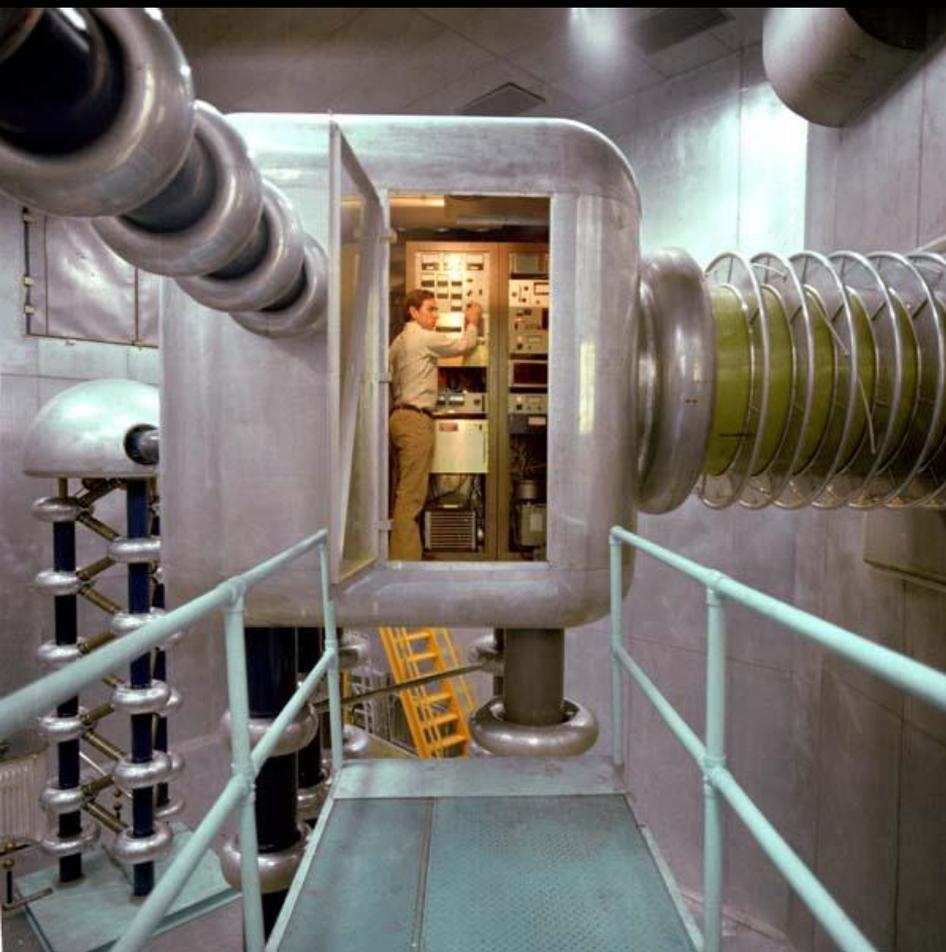
Pre-iniettore al Linac 2 del CERN



In molti moderni laboratori vengono utilizzati generatori di alta tensione Cockroft-Walton come primo stadio di accelerazione in sistemi complessi (pre-acceleratore). Una d.d.p. fra la sorgente dei protoni ed un elettrodo in corrispondenza del punto di inizio di un nuovo acceleratore più potente fornisce l'energia di iniezione richiesta.

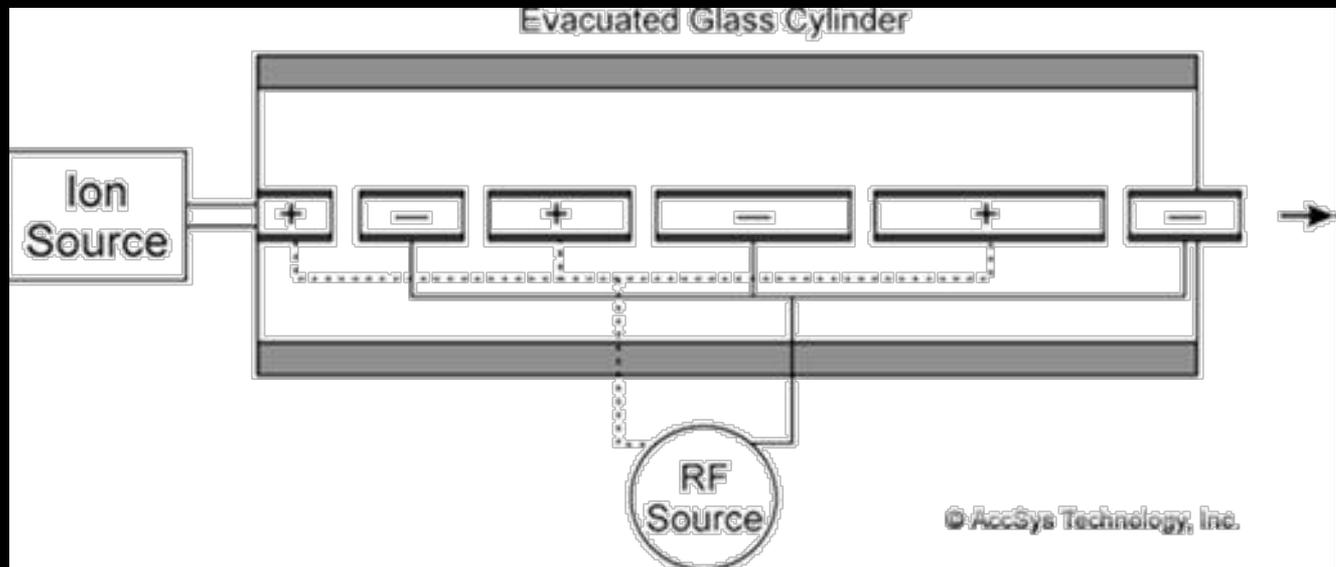
Sorgente di ioni idrogeno

Generatore da 750 KV



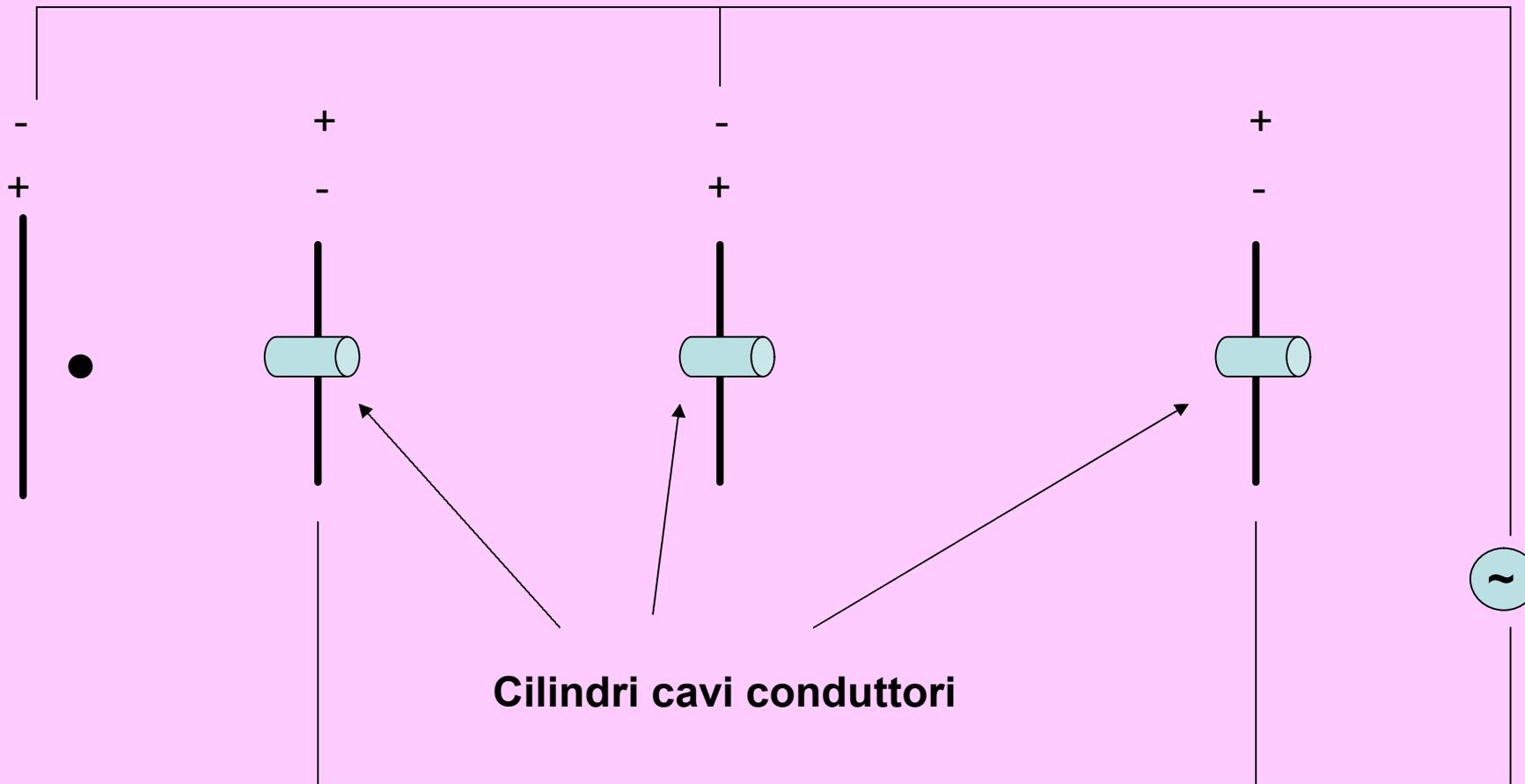
Interno della camera con la sorgente di ioni idrogeno al Laboratorio Fermi di Chicago

Per aggirare la limitazione delle altissime tensioni, tra il 1930 e il 1940, in Germania, Rolf Wideröe progettò un raffinato sistema di accelerazione basato sulla successione di molte piccole “spinte” date al momento giusto, che non richiede l’impiego di tensioni molto elevate, ma beneficia della somma totale delle tensioni.

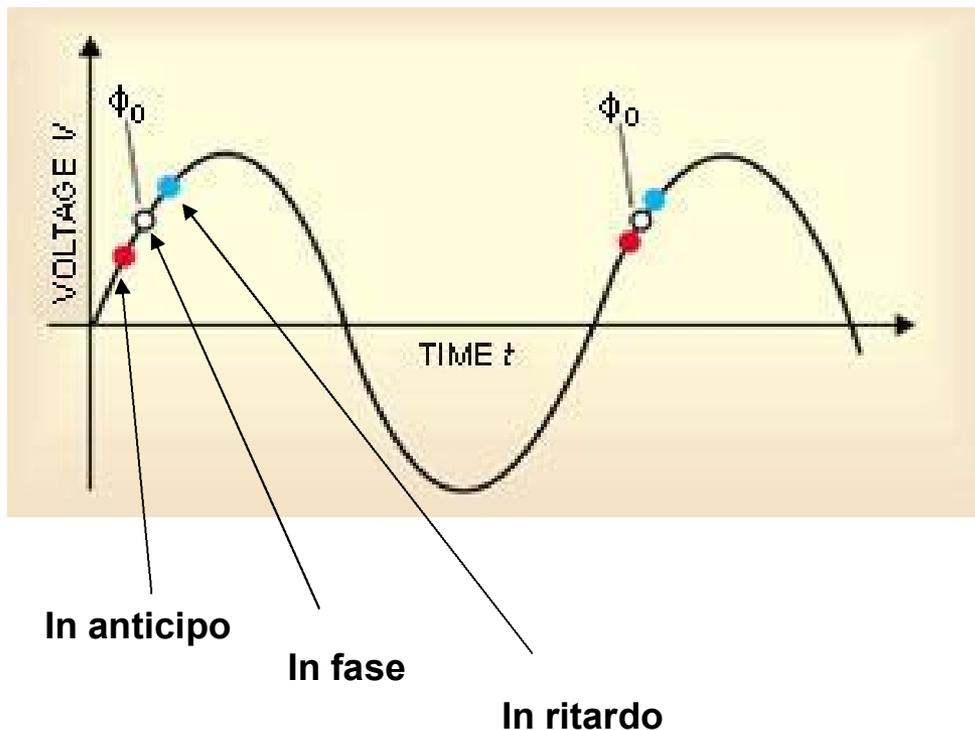
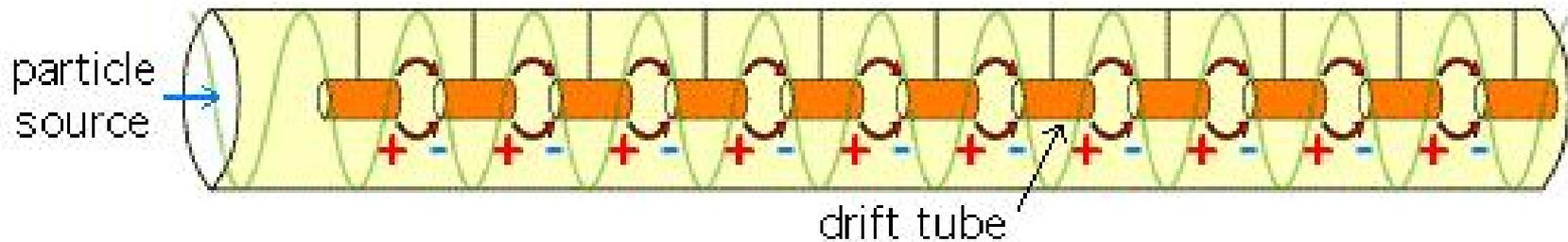


R. Wideröe

Notare che la lunghezza degli elettrodi cavi è di lunghezza variabile, per tener conto dell’aumento di velocità degli ioni accelerati. Se si usa un pre-iniettore le dimensioni diventano simili.



Acceleratore lineare - LINAC



Wideröe si accorge anche di un effetto fondamentale per il funzionamento di un acceleratore:

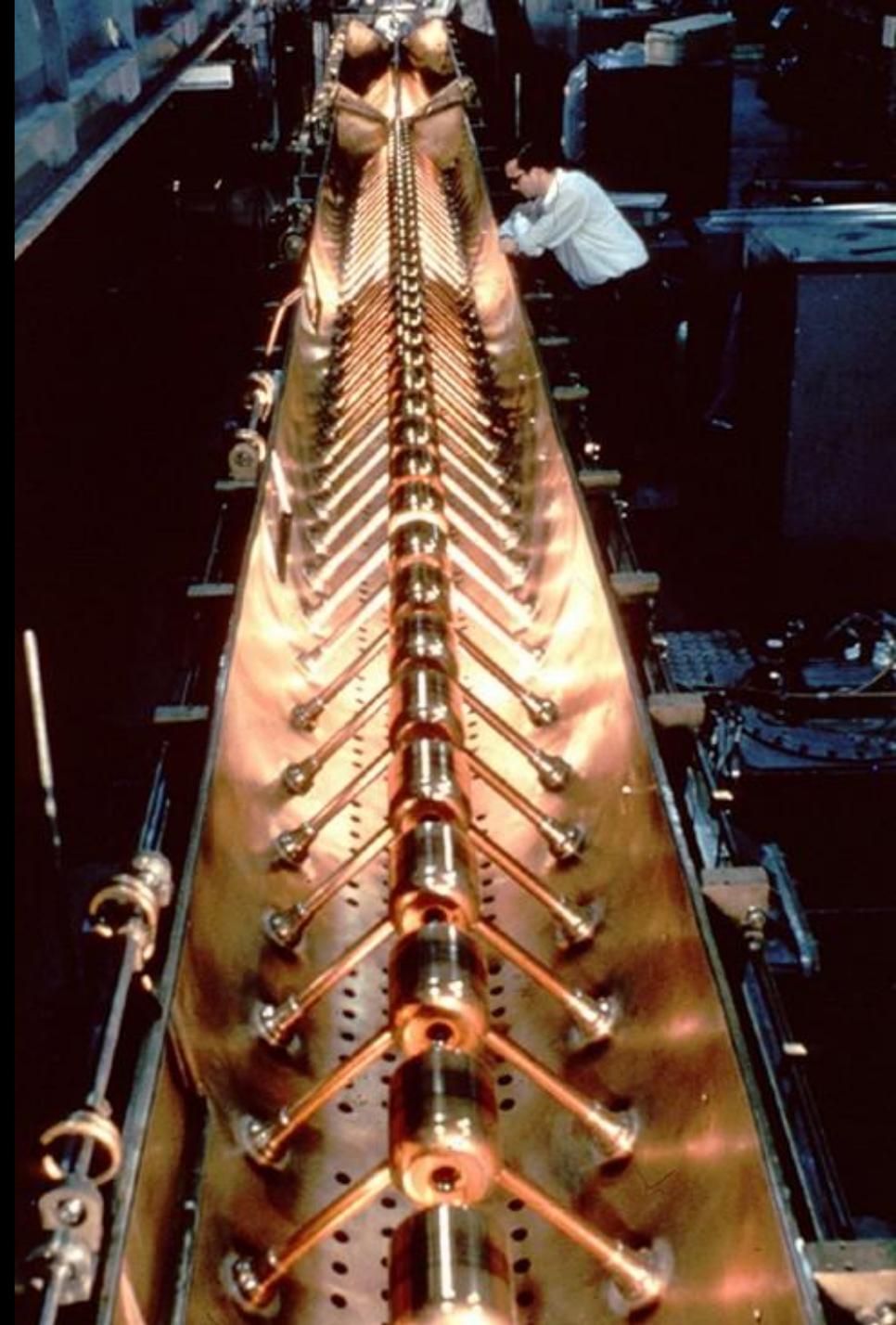
la stabilità di fase

Le particelle fuori fase tendono ad essere raggruppate in pacchetti (**raggruppamento di fase**) dopo aver oscillato, in modo smorzato, attorno alla particella in fase.

LINAC 1 per Protoni del CERN

$E = 50 \text{ MeV}$

Viene utilizzato a sua volta come iniettore in un sistema complesso di acceleratori in successione





Linac 2 del CERN

Courtesy: CERN

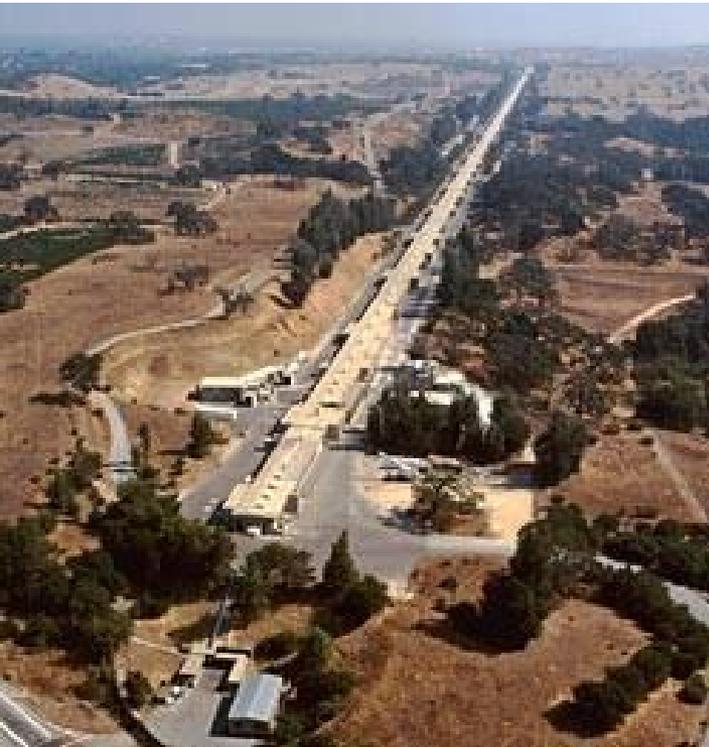
Linac del Laboratorio Fermi Chicago



Courtesy: Fermilab



Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), CA, USA.



Acceleratore lineare di elettroni, costruito fra il 1962 e il 1966. $E_{\max} = 30 \text{ GeV}$

Ben presto arrivò un risultato importantissimo





Taylor, Friedman e Kendall
Premio Nobel 1990

1968

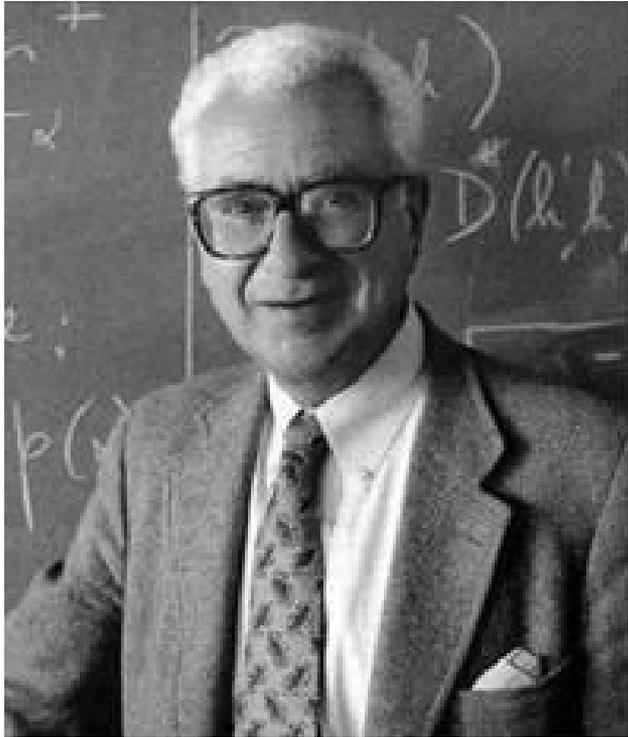
Esperimento di diffusione profonda (deep inelastic scattering) di elettroni su nucleoni (protoni e neutroni). Una sorta di esperimento alla Rutherford per sondare l'interno dei nucleoni. Per la prima volta ne fu messa in evidenza la struttura, con piccolissimi, densi, corpuscoli in moto al loro interno.

Risultati consistenti con l'esistenza di 3 "centri diffusori" con carica elettrica frazionaria.



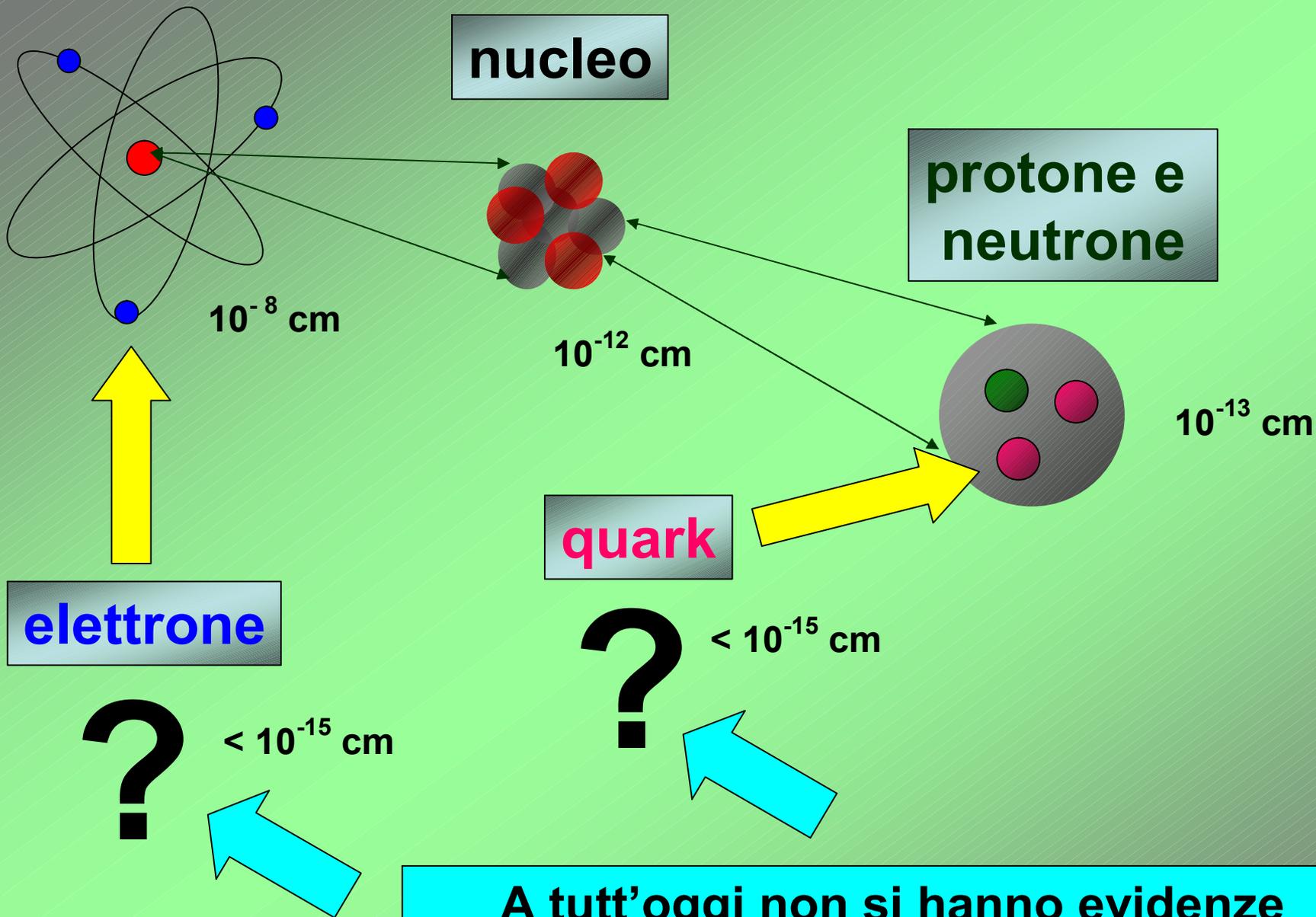
person

Sono i QUARK, le particelle elementari ipotizzate all'inizio degli anni '60 da M. Gell-Mann e G. Zweig per spiegare le "regolarità" osservate nel mondo degli Adroni, che vengono classificati in Mesoni ($q\bar{q}$) e Barioni (qqq).



Murray Gell-Mann
Premio Nobel 1969

**Problema:
gli elettroni "vedono" poco
meno del 50% dell'impulso
trasportato dal nucleone !
Chi porta il resto ?**

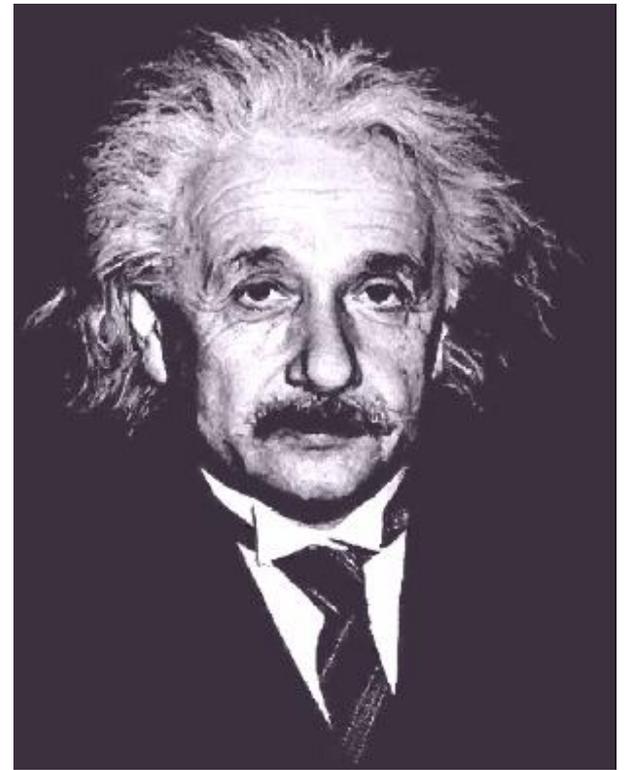


A tutt'oggi non si hanno evidenze sperimentali di ulteriori strutture interne

Parentesi “tecnica” necessaria

Una delle predizioni più importanti della Teoria della Relatività Ristretta (1905) è racchiusa nella famosa relazione fra Energia e Materia

$$E = m c^2$$



Energia e Materia sono due aspetti diversi di una stessa cosa.

La materia si può trasformare in energia (v. reattori nucleari) e viceversa $M = E/c^2$

Se si è in grado di “concentrare” molta energia, come per es. nell’urto violento fra due particelle, possono “apparire” dopo l’urto pezzetti di materia (particelle) che non esistevano prima dell’urto.

La materia NON compare dal nulla, ha origine da una trasformazione dell’energia. L’energia NON sparisce nel nulla, si materializza.

Relazioni complete per una singola particella

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

$$E = mc^2 + T$$

$$E = \gamma mc^2$$

m = massa a riposo, p = impulso,

T = energia cinetica

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2} \quad \beta = v/c$$

In unità naturali ($c = 1$ e $\hbar = 1$)

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

$$E = m + T$$

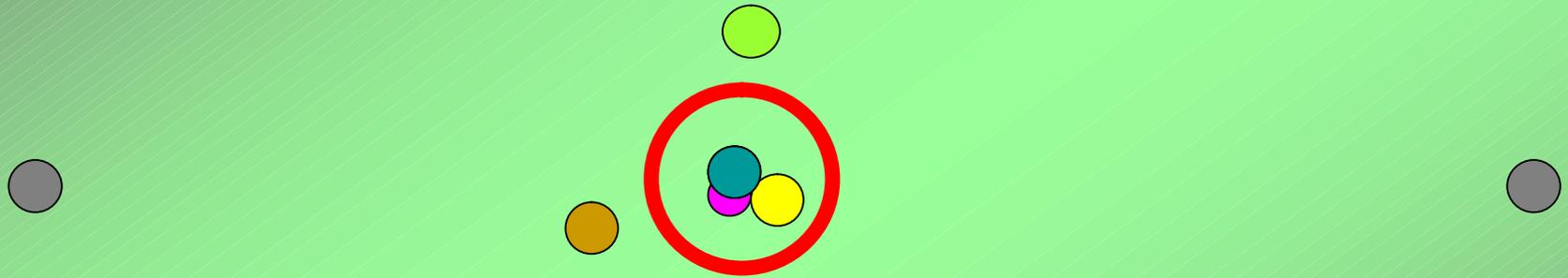
$$E = \gamma m$$

In Natura vale un principio di conservazione più generale:

La somma delle masse e delle energie cinetiche prima dell'interazione (stato iniziale) è uguale alla somma delle masse e delle energie cinetiche dopo l'interazione (stato finale).

Cosa avviene concettualmente in un urto tra particelle ?

Due protoni vengono fatti urtare fra loro ad alta energia (accelerati da un acceleratore)



Nell'urto, una parte dell'energia cinetica dei protoni
si trasforma in materia

Lo studio dei prodotti della collisione ci da informazioni
per capire cosa è avvenuto

Quadrivettori:

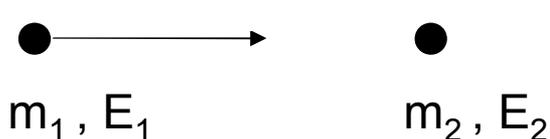
La cinematica relativistica risulta più semplice adottando “oggetti” a 4 componenti (1 di tipo tempo e 3 di tipo spazio) chiamati Quadrivettori.

Il quadrivettore Energia - Impulso (E, \vec{p}) è particolarmente utile nella fisica delle particelle. Come per tutti i quadrivettori, il suo modulo (definito tramite una metrica pseudo-euclidea) è un invariante per trasformazioni di Lorentz:

$E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2$ che è per l'appunto uno scalare, e quindi un invariante.

La somma di 2 quadrivettori è un quadrivettore, e il suo modulo è quindi ancora un invariante.

Calcolo di \sqrt{s} , l'energia disponibile nel c.m. per la creazione di nuova materia



$$\begin{aligned} \sqrt{s} &= \sqrt{(E_1 + m_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{0})^2} \\ &= \sqrt{E_1^2 - \mathbf{p}_1^2 + m_2^2 + 2 E_1 m_2} \\ &= \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2 E_1 m_2} \end{aligned}$$

Per alte energie

$$= \sqrt{\cancel{m_1^2} + \cancel{m_2^2} + 2 T_1 m_2 + 2 \cancel{m_1} \cancel{m_2}} = \sqrt{2 T_1 m_2}$$

Calcolo dell'energia di soglia per la produzione di nuove particelle.

$$1 + 2 \rightarrow 3 + 4 + 5 + 6 + \dots$$

Utilizzando l'invarianza del modulo del quadrivettore E-p

$$(E_1 + m_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{0})^2 = (m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + \dots)^2$$

$$E_1^2 + m_2^2 + 2 E_1 m_2 - p_1^2 = (m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + \dots)^2$$

$$m_1^2 + m_2^2 + 2 (T_1 + m_1) m_2 = (m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + \dots)^2$$

$$T_1 = [(m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + \dots)^2 - (m_1 + m_2)^2] / 2m_2$$

P.A.M. Dirac
Premio Nobel 1934



Nel 1930 il fisico teorico inglese Dirac, cercando di descrivere il comportamento dell'elettrone in accordo con la fisica quantistica e la teoria della relatività, formulò la famosa equazione che prende il suo nome. L'equazione ammetteva però due soluzioni, una che descriveva il comportamento dell'elettrone e una che descriveva il comportamento di una particella con la stessa massa dell'elettrone ma carica elettrica positiva.

Era la previsione dell'esistenza dell'antimateria.

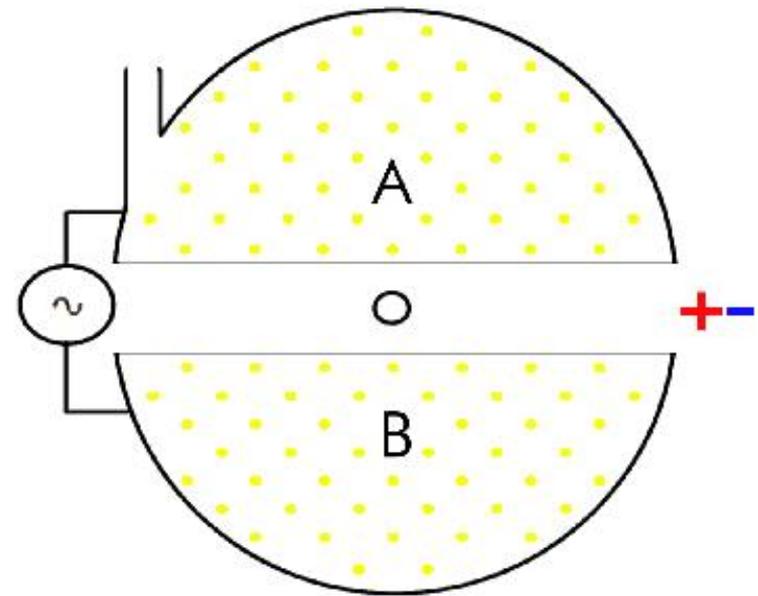
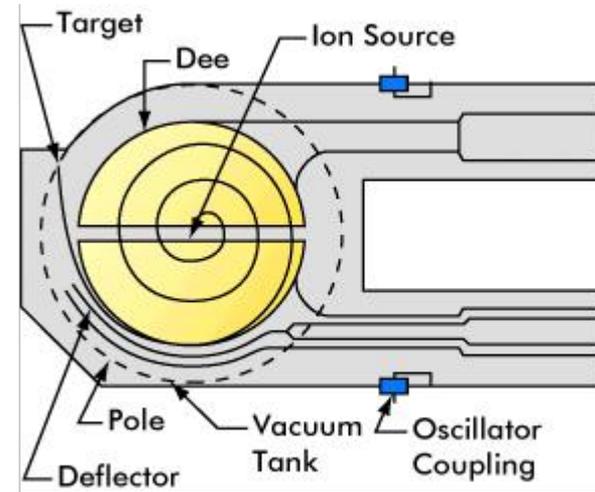
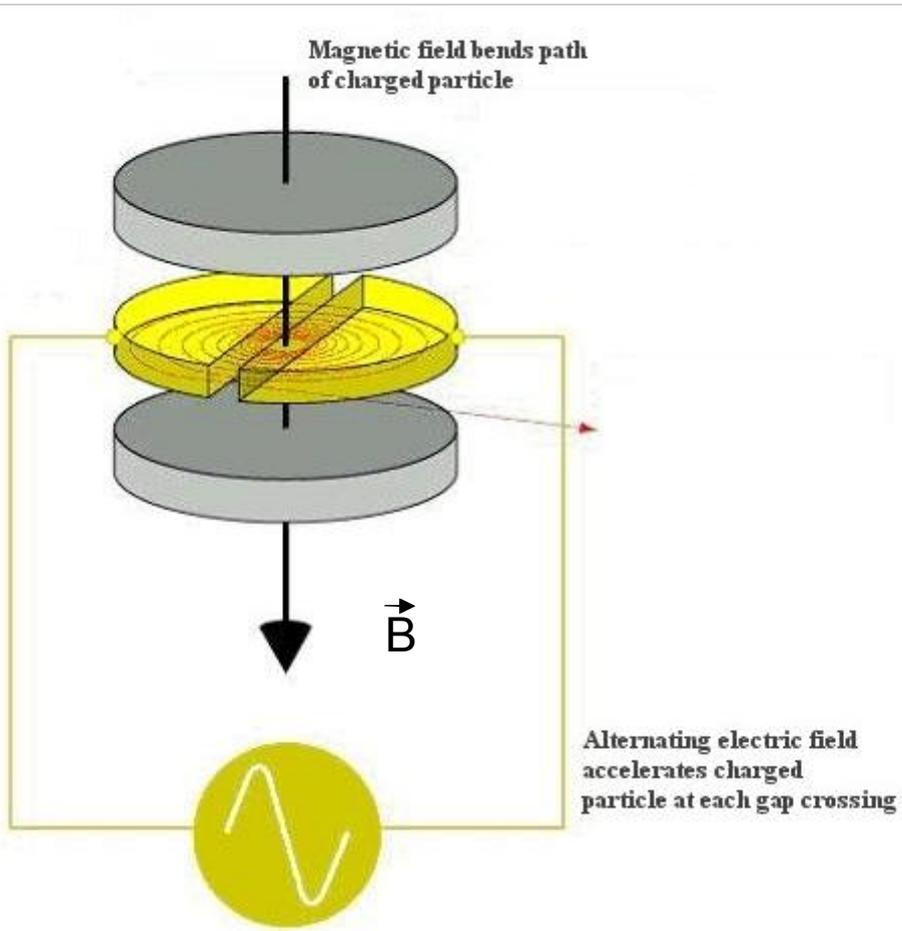
L'antielettrone (o positrone) fu scoperto nel 1932.

L'antiprotone fu scoperto nel 1955.

Le leggi della fisica non permettono la creazione di sola materia. Se energia si trasforma in materia, per esempio in una collisione fra particelle, allora deve essere creata anche antimateria in quantità tale da “compensare” tutta la materia nuova (senza cioè contare la materia presente prima dell'urto)

Es. $p + p \rightarrow p + p + \bar{p} + p$

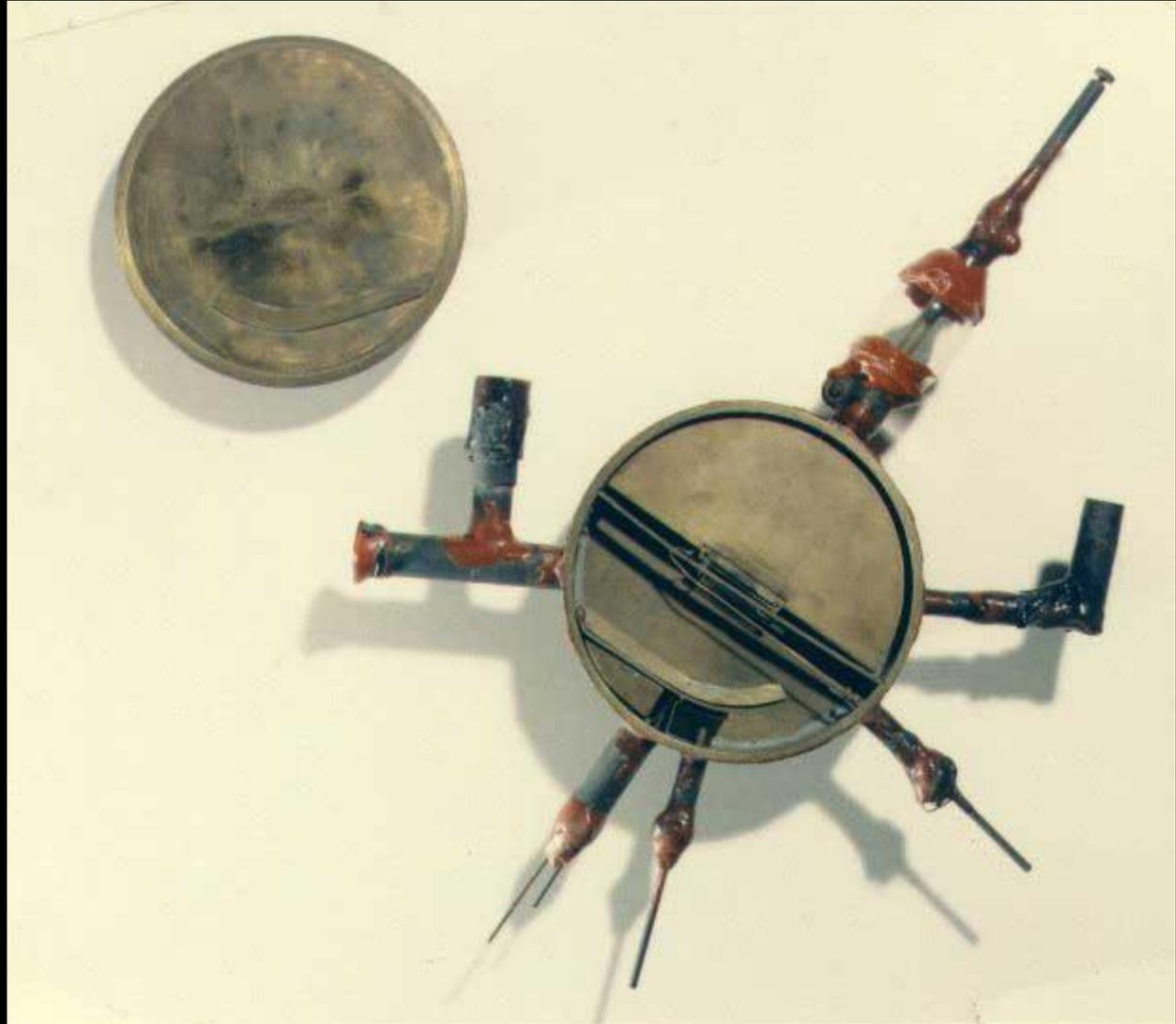
Ciclotrone

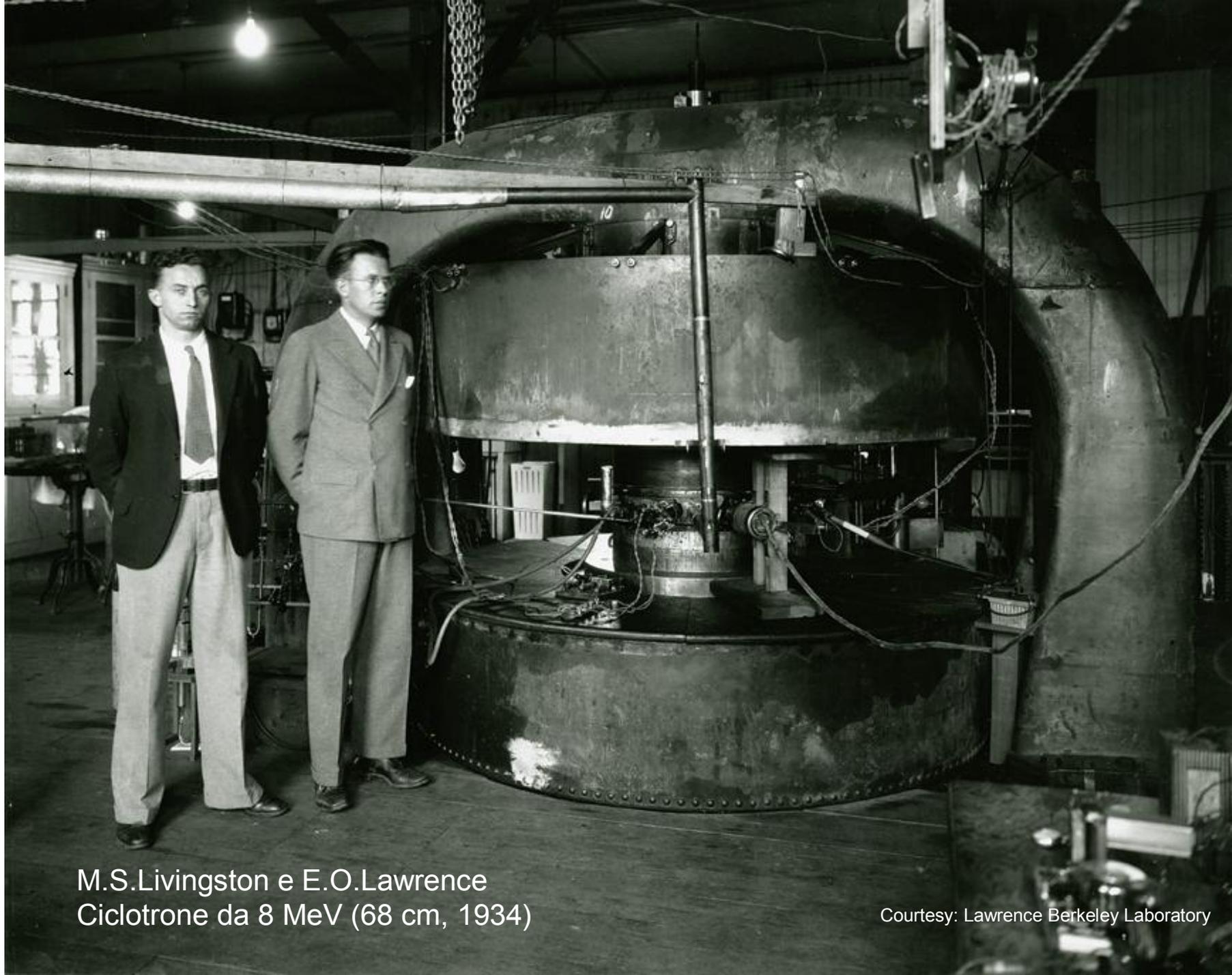


Primo prototipo funzionante di ciclotrone
(E.O.Lawrence e M.S.Livingston, 1931, Berkeley, CA)

Diametro 4.5 pollici (≈ 11.5 cm)
d.d.p. = 1,800 volts

Accelerava Ioni H
a 80 KeV





M.S.Livingston e E.O.Lawrence
Ciclotrone da 8 MeV (68 cm, 1934)

Courtesy: Lawrence Berkeley Laboratory

Fu una invenzione di grande rilievo per la fisica nucleare e per la fisica delle particelle



Un ottimo esempio di tecnologia avanzata, utilizzata ancora oggi nel campo della fisica nucleare e della fisica medica, trattabile classicamente. Il ciclotrone funziona come tale fino a che ci si limita a basse velocità. La relatività non è necessaria. Va in crisi per valori di $\gamma \approx 1.04$, aumento relativistico della massa del 4% circa, cioè $\beta \approx 0.27$ ($v = 0.27 c$).

Equazione (scalare) di stabilità dell'orbita.

Cyclotron Frequency

$$r = \frac{mv}{qB} ; v = \frac{qBr}{m}$$

$$v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{qBr}{m}$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$f = \frac{qB}{2\pi m}$$

$$\frac{M v^2}{r} = q v B$$



Forza centripeta

Forza di Lorentz

L'energia cinetica massima raggiungibile è calcolabile classicamente

$$E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{q^2 B^2 r^2}{2m}$$

La frequenza di ciclotrone non dipende da r e non dipende dalla d.d.p. fra le Dee !

Si presta bene per proporre semplici problemi agli studenti.

Nov. 1947

Boys Build A Cyclotron

This little atom smasher, designed by California high school students, works just like the big ones.

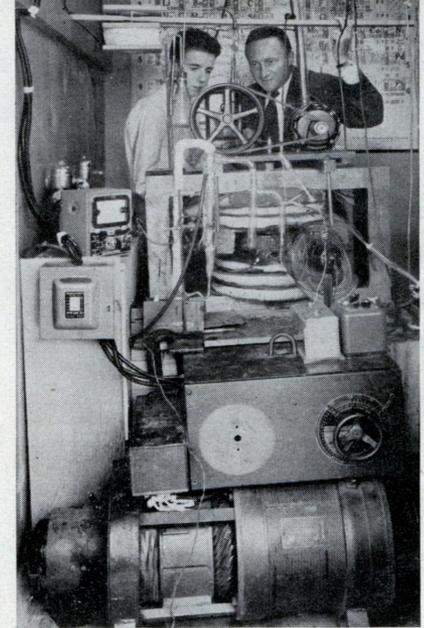
By Andrew R. Boone

THE young nuclear physicist who won the Nobel prize by developing the cyclotron, Ernest O. Lawrence, started out with a little glass device that looked like a frying pan. Since then, cyclotrons have become such mammoth, complex, and expensive machines that the patent holders are rarely bothered by requests for licenses to build them. But ingenious and industrious youngsters can still build cyclotrons.

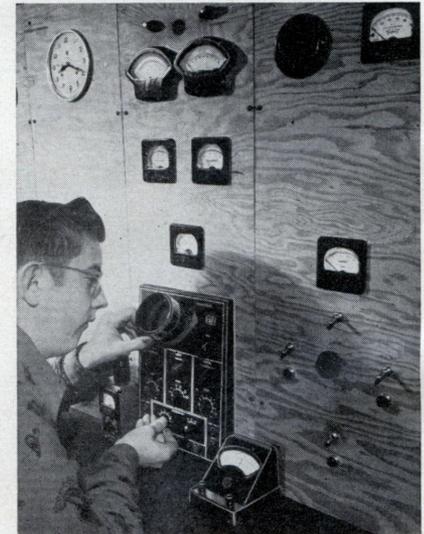
This was proved recently at the El Cerrito, California, High School, where four students of instructor Ben Siegel built their own cyclotron, put it in a room scarcely any larger than a clothes closet, and operated it by remote control from a homemade, plywood instrument panel.

They neither asked nor received any help from the Atomic Energy Commission. They found, when they had completed it, that they probably had infringed on patents granted to Dr. Lawrence and assigned by him to the Research Corporation of New York, but officials of the latter waived royalty claims. So the students now are planning to use their machine to produce their own radioactive isotopes for further experiments. They plan to shield near-by workers with tanks of water three feet thick.

A cyclotron is a machine for speeding up subatomic particles by giving them a series of relatively weak electrical pushes while they whirl around in ever-widening circles. This is done by placing the acceleration chamber between the poles of a magnet and maintaining a high vacuum within the chamber to prevent air from retarding the tiny particles. When finally allowed to fly out of their circular path, the particles have



This one-ton, million-electron-volt cyclotron is five feet high and 2½ feet square. It was built by four boys and their teacher in three months at a cash outlay of only \$500.



The instrument panel, 3½ by 7½ feet, was built in sections to make servicing easier. Most of the instruments used were built by the boys or revamped from Army surplus items.

Se poi si vogliono fare le cose ...
in grande !

Limitazione principale del ciclotrone: aumento relativistico della massa

La frequenza non può rimanere costante:

$$f = q B / 2\pi m\gamma$$

o si aumenta B per raggi grandi
o si modula opportunamente
la frequenza per rimanere in
fase col passaggio delle particelle
con energia (inerzia) maggiore.

Con il sincrociclotrone si fa
per l'appunto questo.

Sincrociclotrone di Berkeley



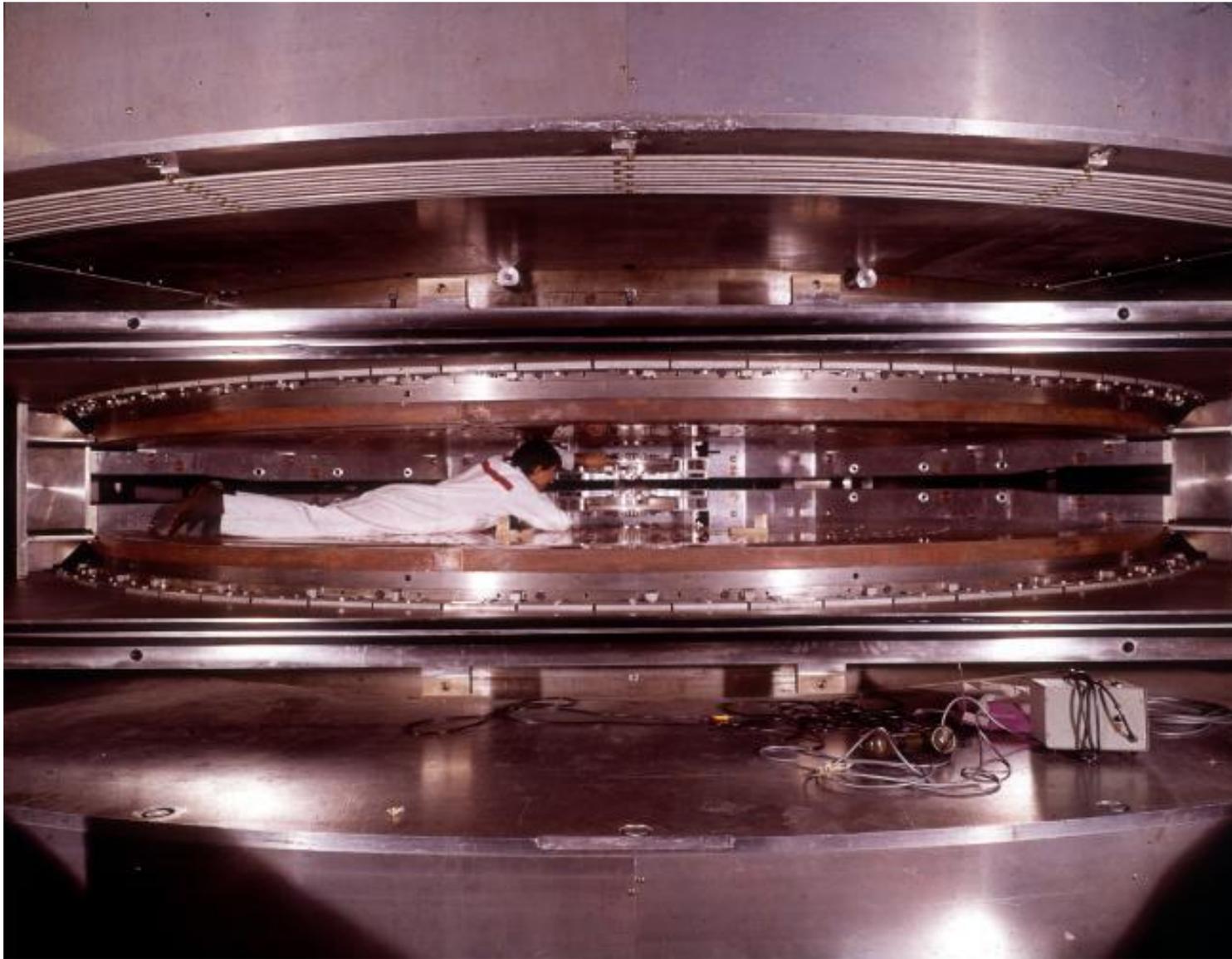


SC del
CERN

600 MeV

Courtesy: CERN

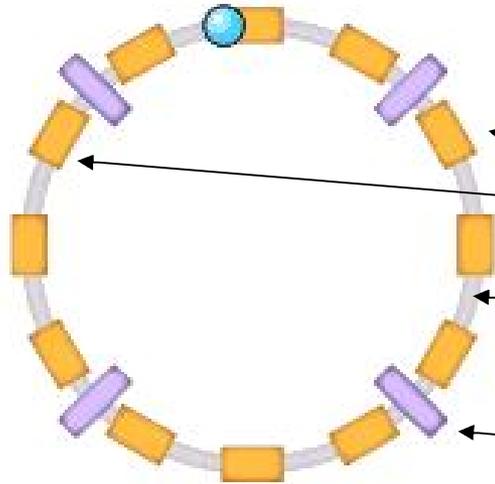
Gli elettromagneti diventano troppo grandi, costosi e problematici, e le energie sono comunque relativamente basse



Nel cuore del Sincrociclotrone (SC) del CERN

Sincrotrone

La soluzione per le alte energie



Raggio dell' orbita costante

Con magneti dipolari disposti solo lungo l'orbita del fascio.

Protoni o elettroni mantenuti all'interno di un tubo a vuoto.

Accelerazione effettuata solo in alcuni punti dell'anello

Valore di B all'i+1-esimo giro

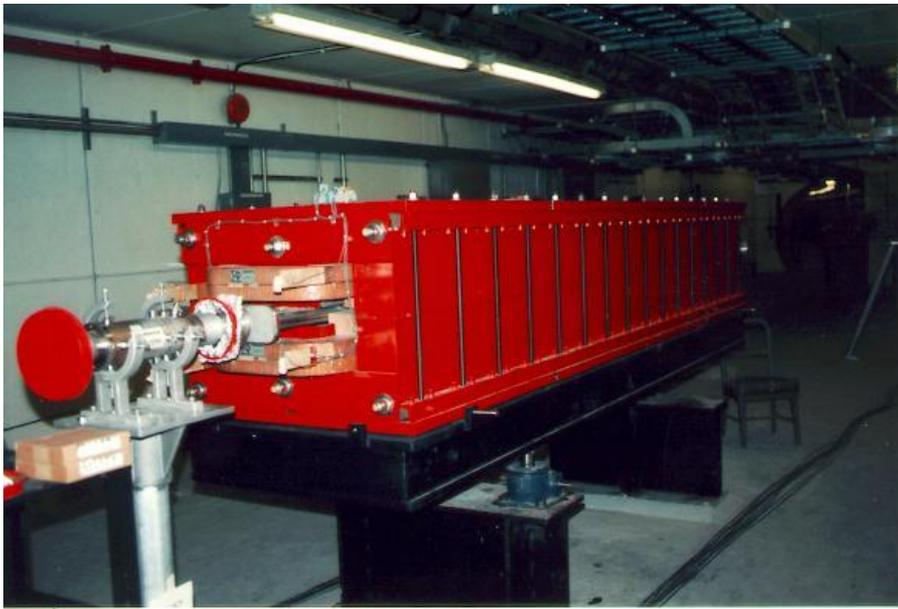
$$B_{i+1} = \frac{\sqrt{(E_i + T)^2 - mc^2}}{c q r}$$

Intensità di B variabile nei magneti bipolari

Frequenza variabile nelle cavità acceleratrici

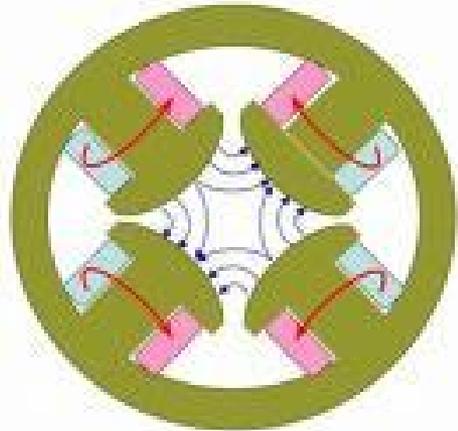
Nome	Tipo	\sqrt{S} (GeV)	Anni di operatività	Laboratorio
PS	p	28 - 30	1959 -	CERN
SPS	p	450	1976 -	CERN
Tevatron	p	350 - 1000	1985 -	FNAL
ISR	pp	28 - 63	1972 - 1984	CERN
SppS	$p\bar{p}$	450 - 900	1983 - 1989	CERN
Tevatron	$p\bar{p}$	1000 - 2000	1985 -	FNAL
HERA	$e^+ - p$	30 + 920 nel laboratorio	1990 -	DESY
RHIC	Ioni pes.		2000 -	BNL



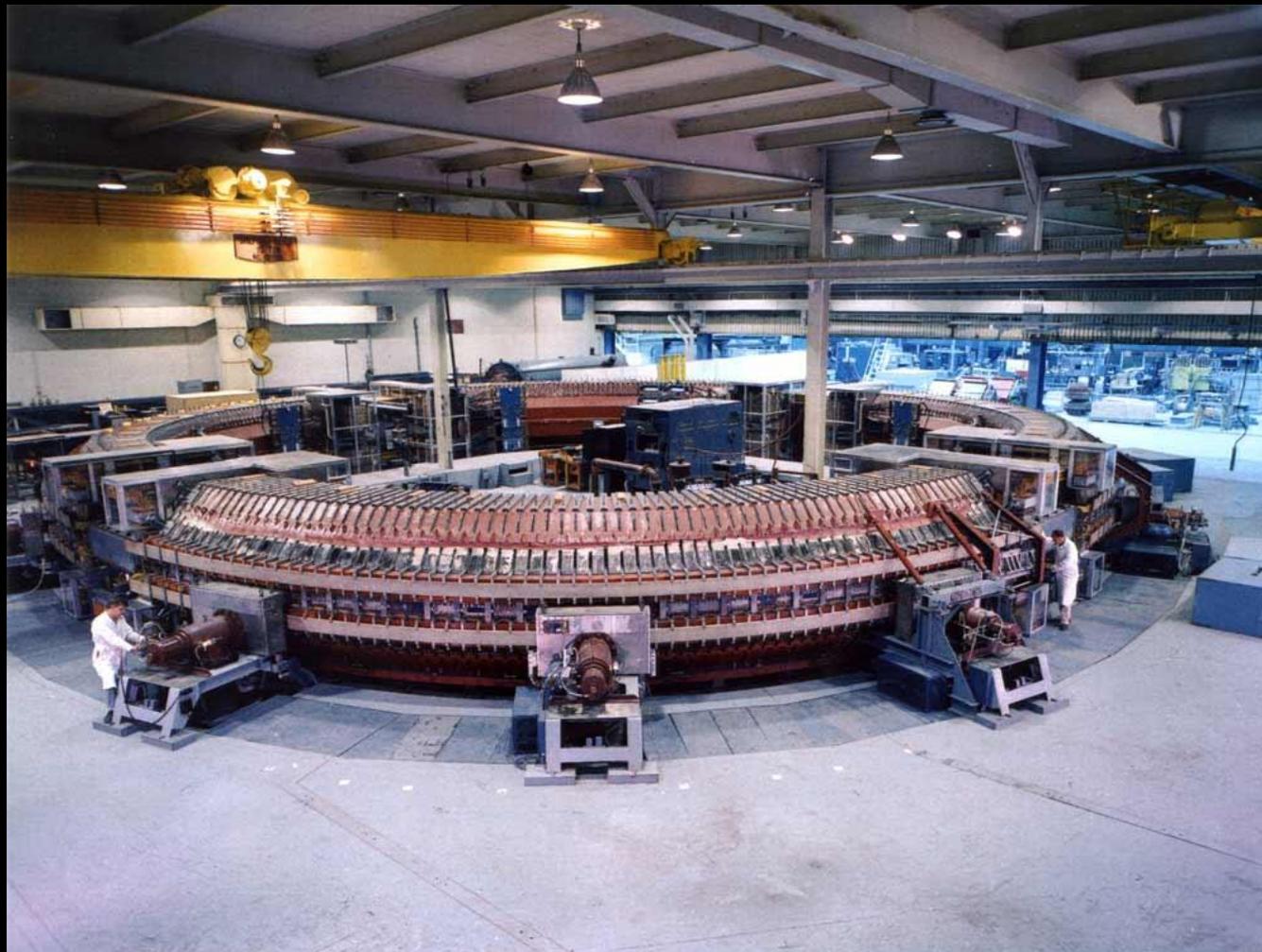


Magnete dipolare (bending magnet)

Magnete quadrupolare per il focheggiamento



Cosmotron – BNL 1953 - 1968



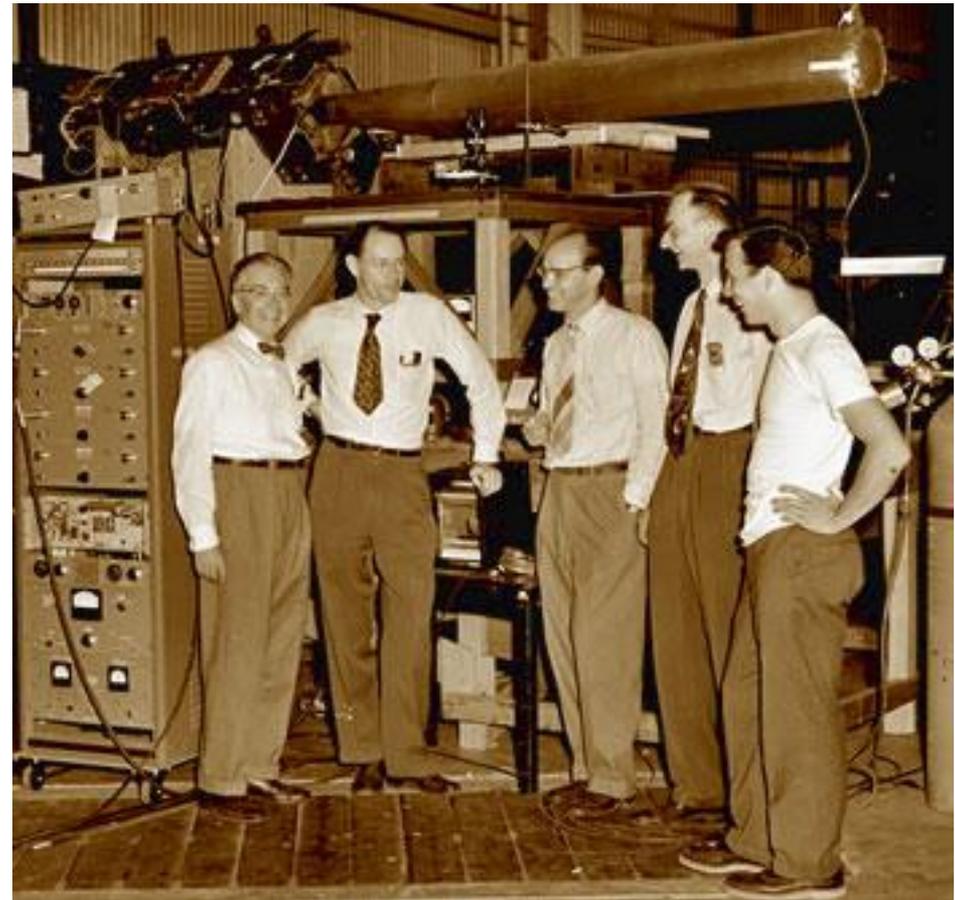
Il primo acceleratore a superare la barriera del GeV e il primo ad avere una estrazione del fascio per esperimenti all'esterno

Bevatron – Berkeley

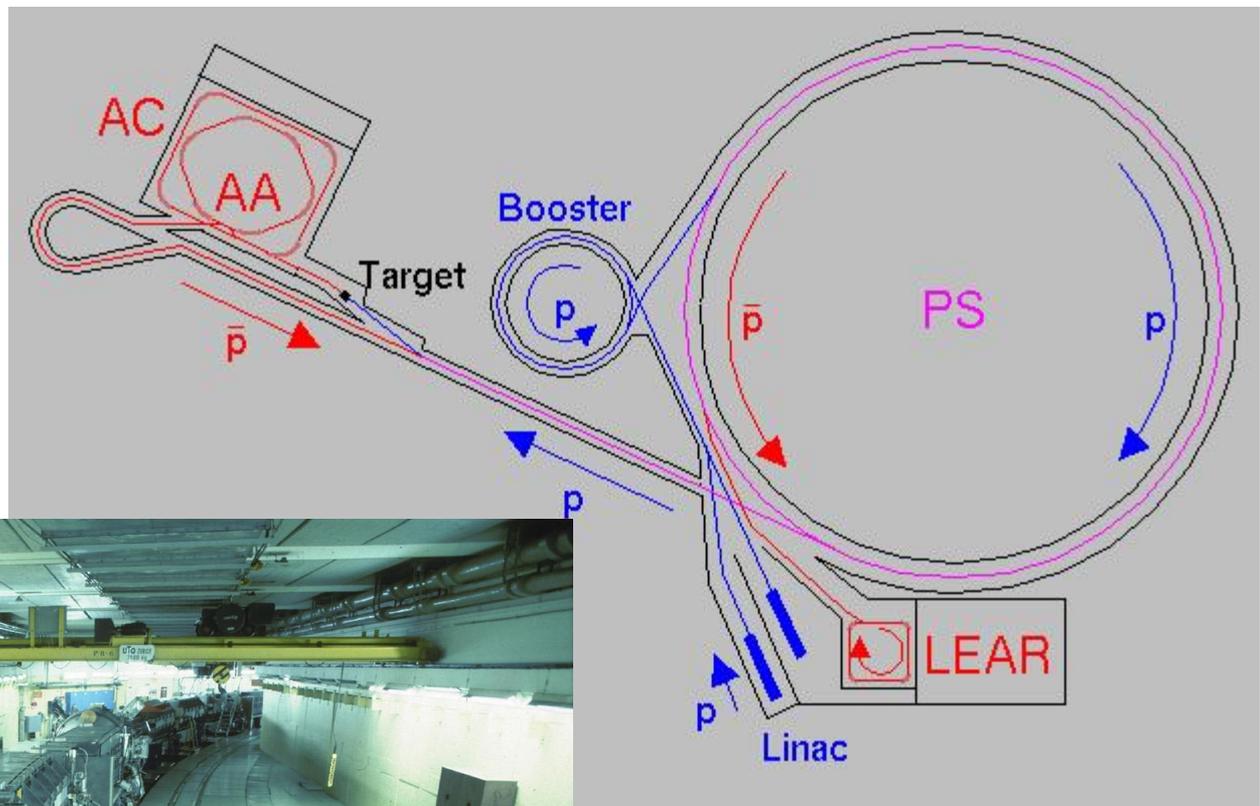


1956 scoperta dell'antiprotone
(necessari almeno 6.5 GeV)

1959 Premio Nobel a
E. Segrè e O. Chamberlain



PS CERN 1959
28 GeV



Scoperta correnti deboli neutre



AGS – Brookhaven 1960

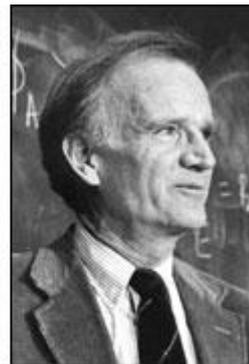
3 Premi Nobel



Samuel Ting 1976



James Cronin

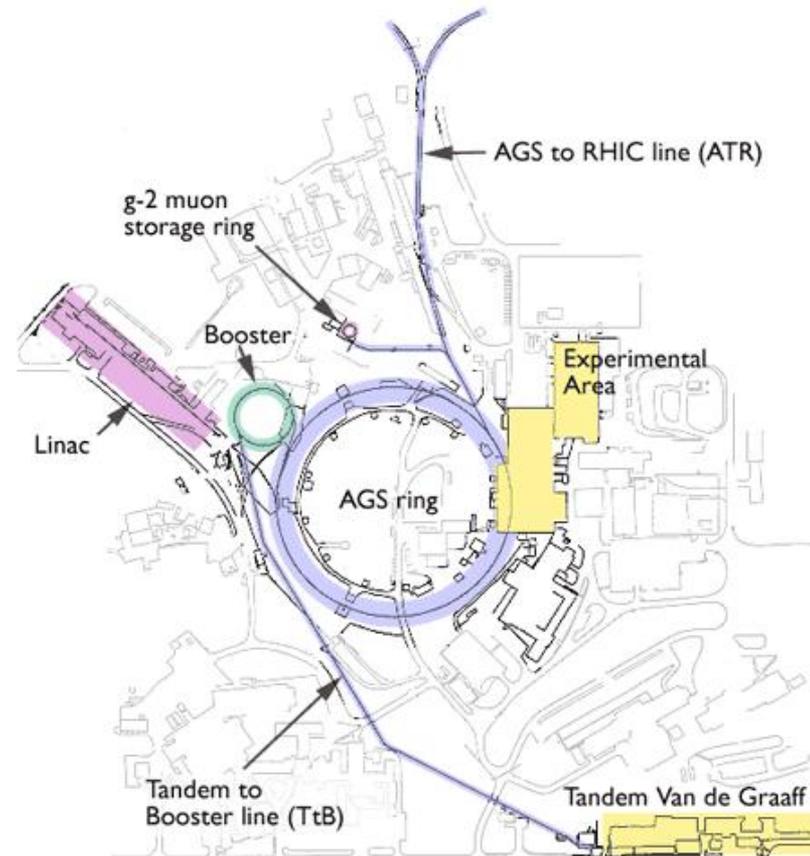


Val Fitch

1980



Lederman, Schwarz, Steinberger 1988

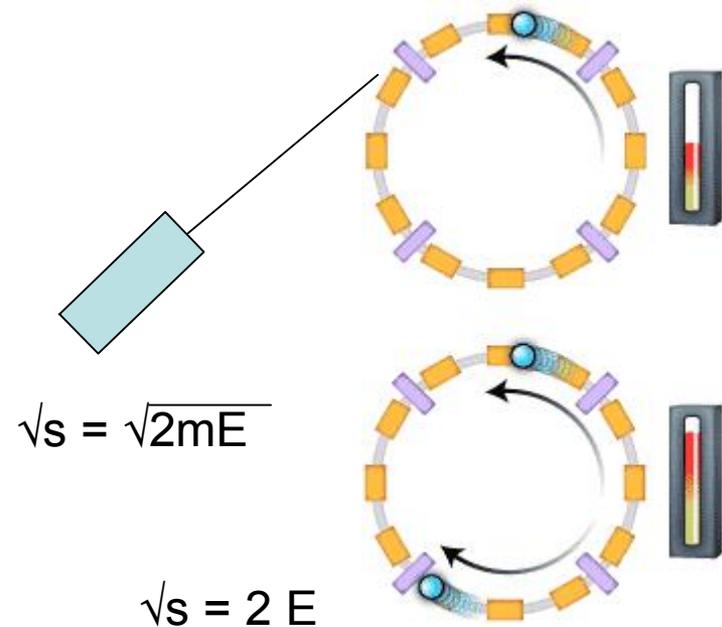


Colliders - La via per le altissime energie



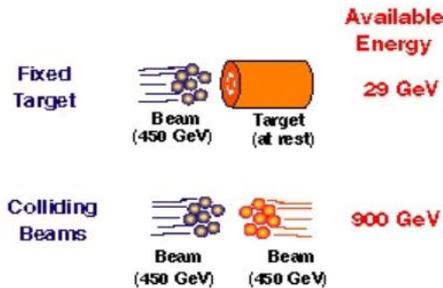
\sqrt{s} è data dalla somma delle due energie dei fasci.
Aumenta linearmente con E , mentre nel bersaglio
fisso era proporzionale a \sqrt{E} .

Esistevano già anelli a fasci incrociati per
protoni (e antiprotoni), ISR, ma l'energia
era bassa, max. $\sqrt{s} = 63$ GeV, peraltro la
più alta mai raggiunta

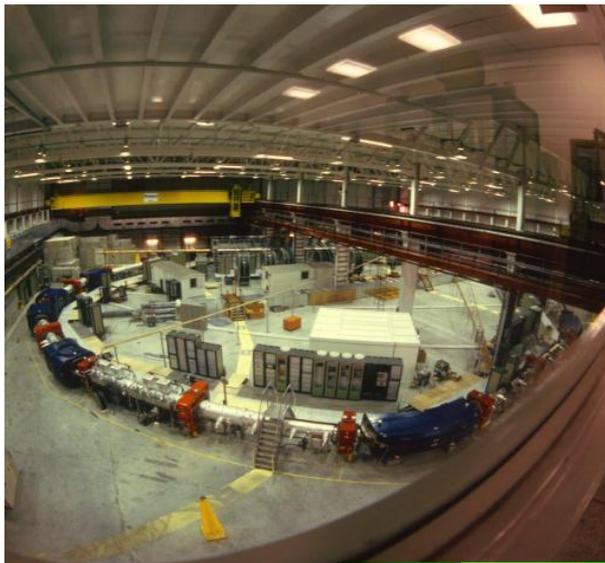


**Super Proto Sincrotrone
del CERN (SPS) E = 450 GeV
Tunnel di 7 Km**

Alla fine degli anni '70 viene convertito
in un collider protone – antiprotone con
 $\sqrt{s} = 540 - 900 \text{ GeV} !!$



Accumulatore di antiprotoni



Carlo Rubbia

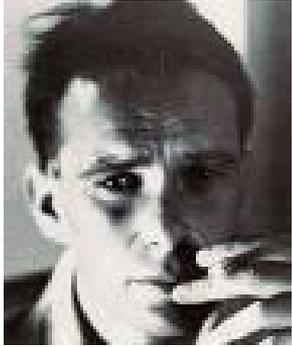
Premio Nobel 1984 per la scoperta
dei mediatori della forza debole



$W^+ W^- Z^0$
Simon Van Der Meer

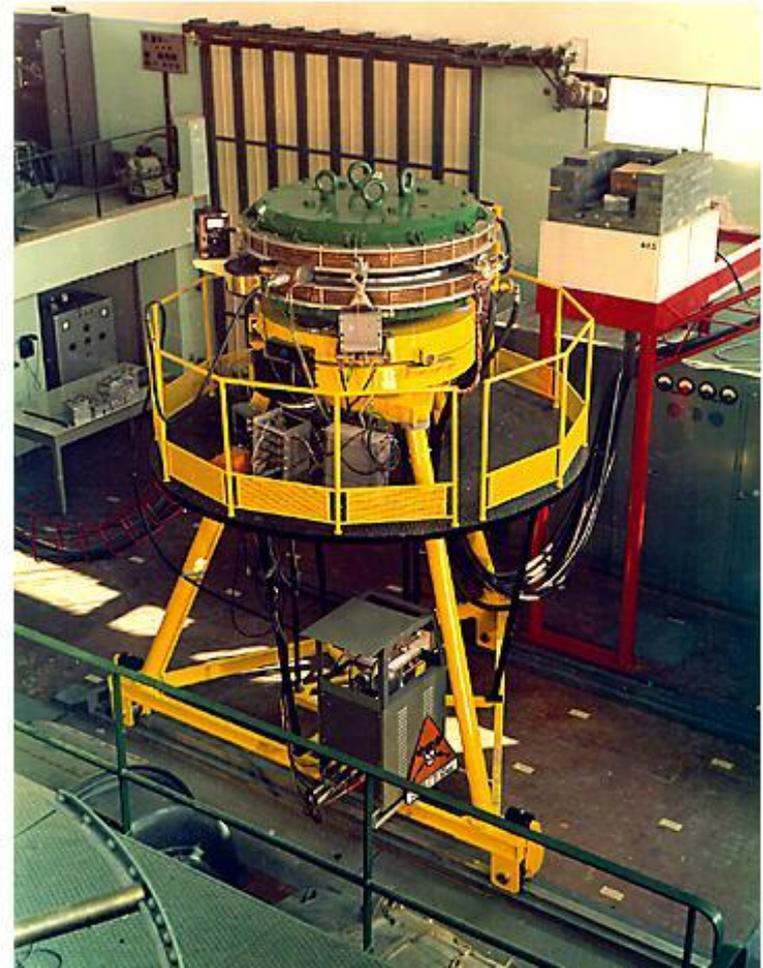
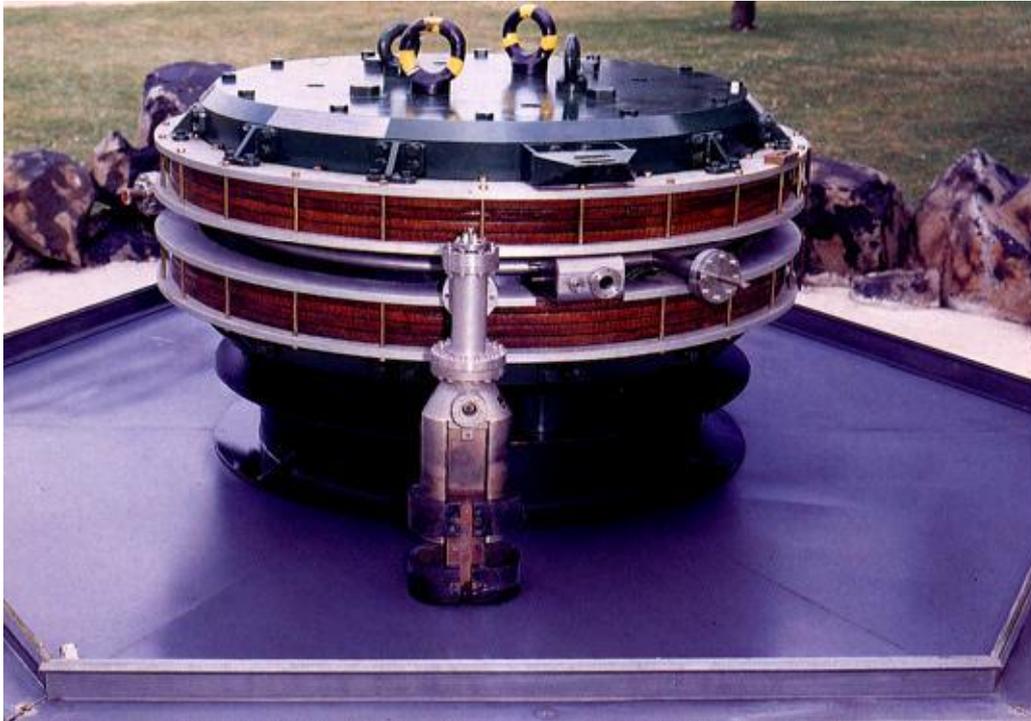
Ma la storia ha inizio qui, a Frascati

Colliders $e^+ e^-$



Bruno Touschek

ADA – LNF 1961



Il primo collider materia-antimateria

$$\sqrt{s} = 400 \text{ MeV}$$



Nome	Tipo	\sqrt{S} (GeV)	Anni di operatività	Laboratorio
ADONE	$e^+ e^-$	3	1967 - 1993	LNf
SPEAR	$e^+ e^-$	8	1972 - 1985	SLAC
DORIS	$e^+ e^-$	10	1974 - 1985	DESY
CESR	$e^+ e^-$	12	1978 - 1993	Cornell
PEP I e II	$e^+ e^-$	15 - 30	1980 -	SLAC
PETRA	$e^+ e^-$	12 - 37	1978 - 1993	DESY
TRISTAN	$e^+ e^-$	55 - 70	1985 -	KEK
SLC	$e^+ e^-$	91	1988 - 200	SLAC
LEP	$e^+ e^-$	86 - 209	1989 - 2000	CERN

DAΦNE	$e^+ e^-$	1.02	1994 -	LNf
BEPC	$e^+ e^-$	2 - 5	1990 -	Pechino

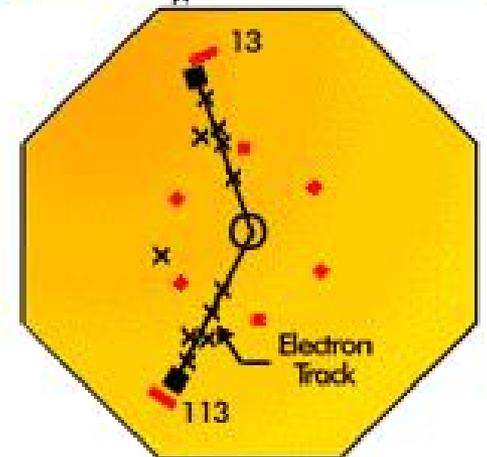
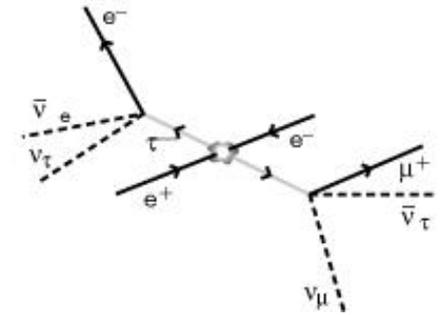
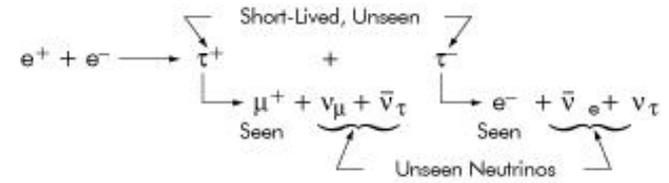
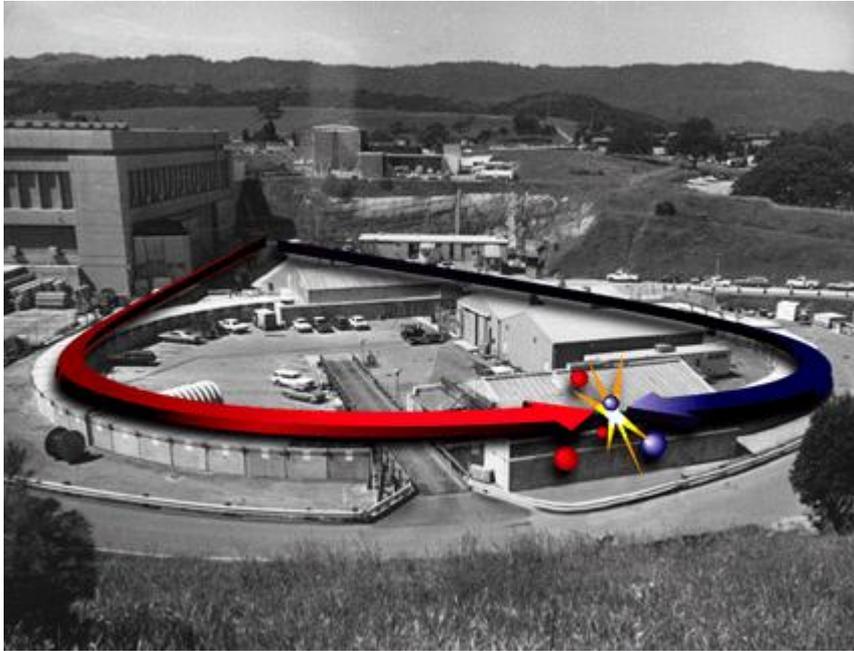


ADONE – LNF 1967

Alcune scoperte notevolissime mancate ... per la mancanza di energia.



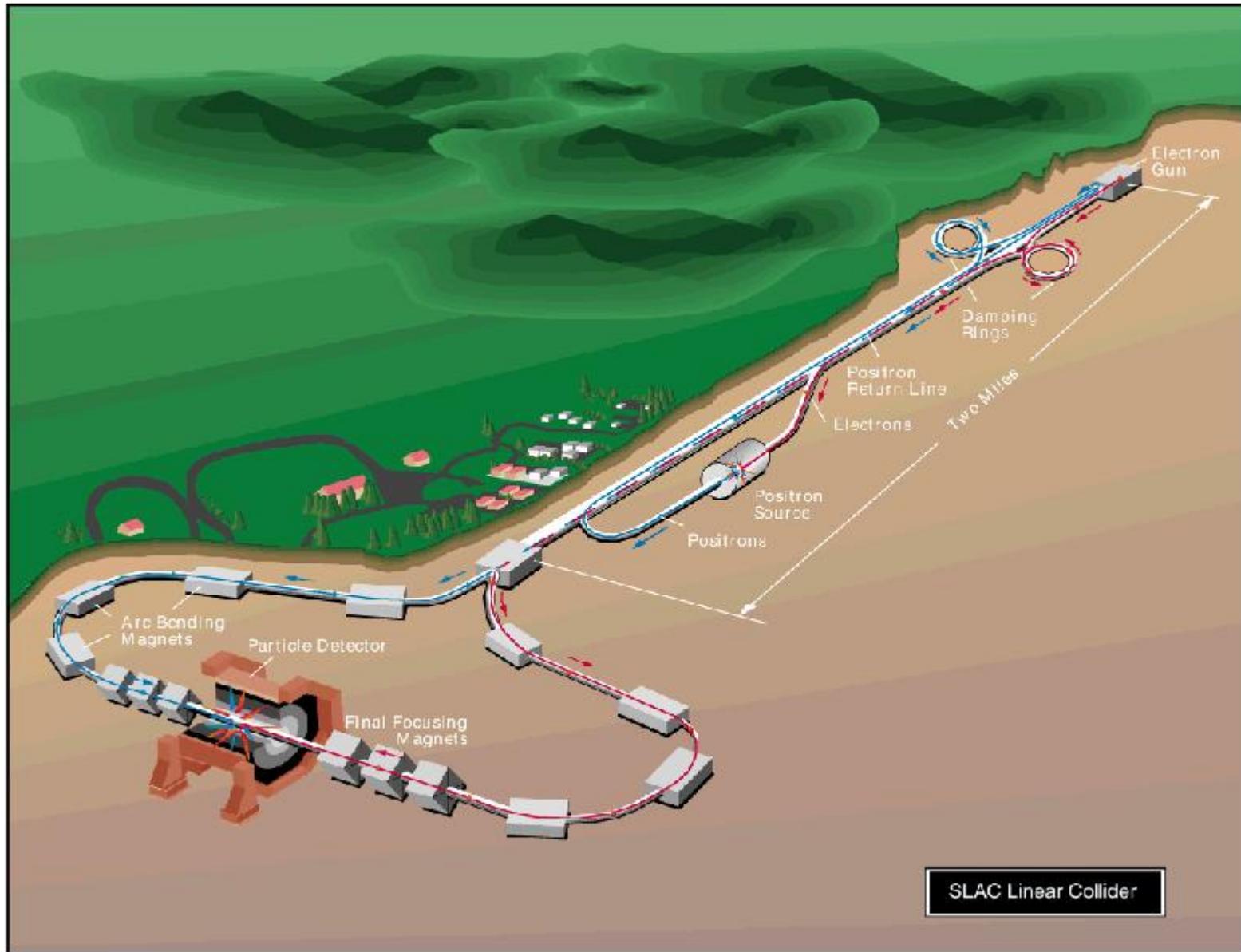
SPEAR – SLAC 1972



Burton Richter (assieme a Ting)
Premio Nobel 1976



Martin Perl – Premio Nobel 1995





Lago Lemano

Aeroporto di Ginevra

LEP (27 Km)

SPS (7 Km)

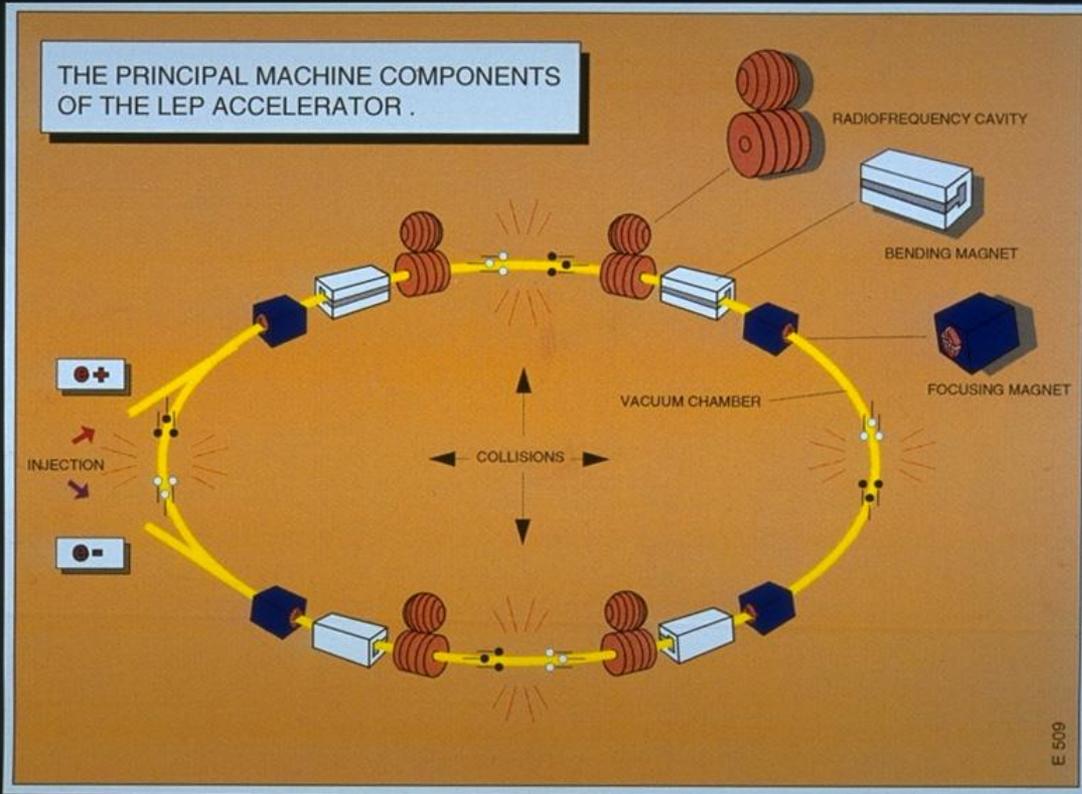
CERN

Al LEP il Modello Standard è stato messo "sotto torchio" in un modo sistematico e vario senza precedenti.
No Higgs, no party !



Scavo del tunnel di LEP





Cavit  acceleratrice



Magneti dipolari

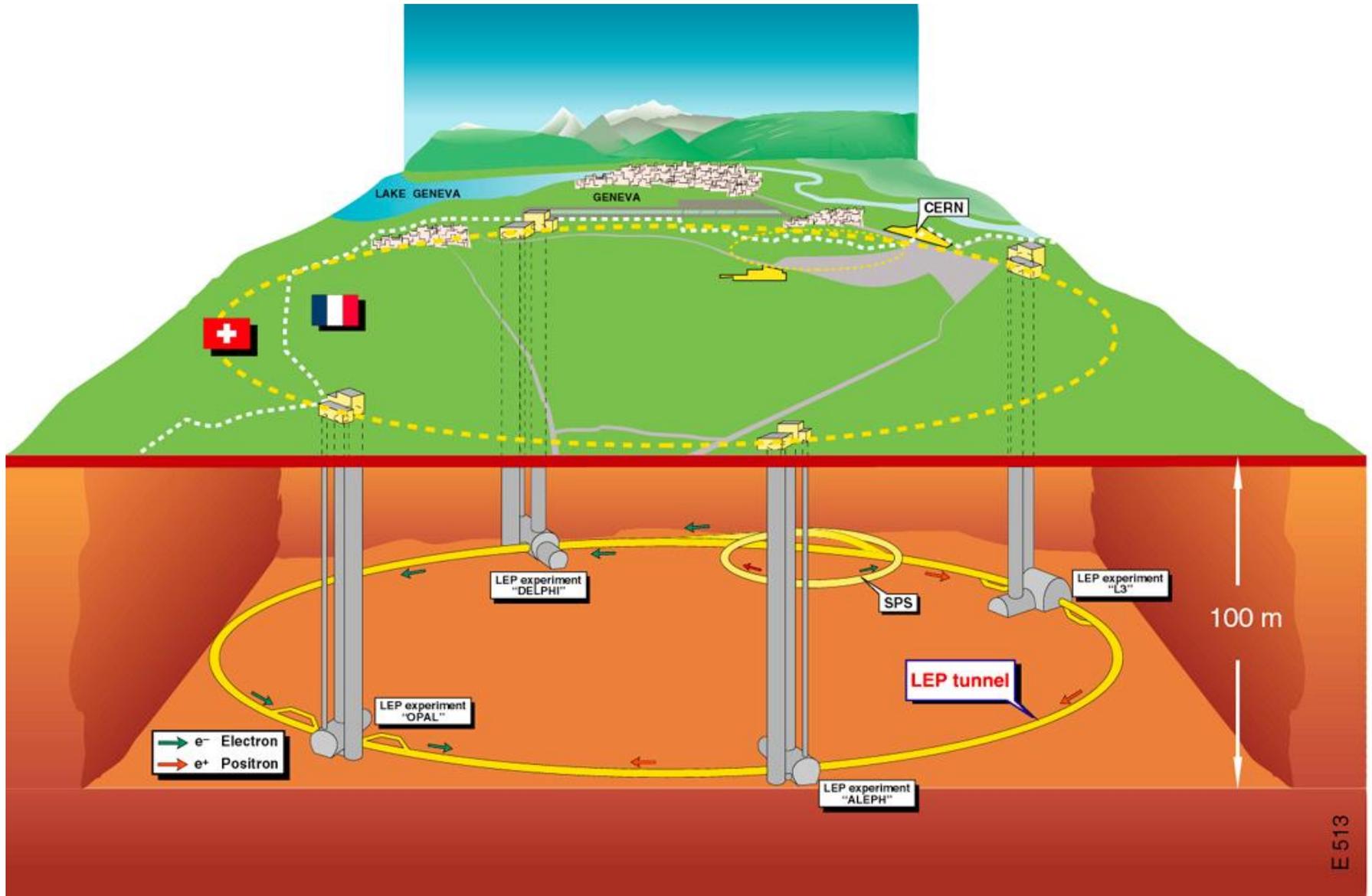


Cavità acceleratrici a RF









IL MODELLO STANDARD

Sigh ! Non ha ceduto.



Sheldon Glashow



Abdus Salam



Steven Weinberg

Costituenti

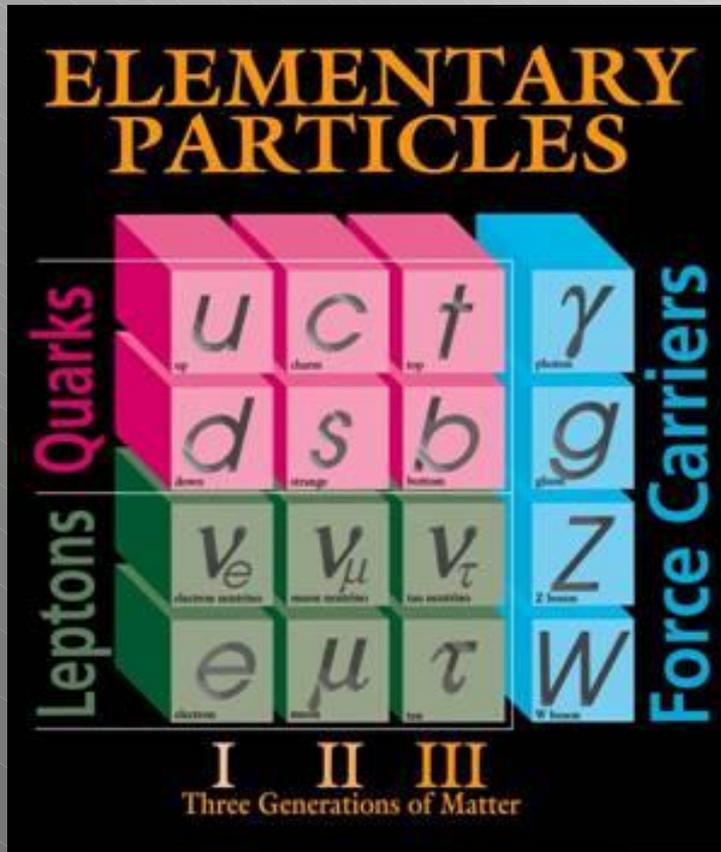
6 QUARKS (up, down)
(charm, strange)
(top, bottom)

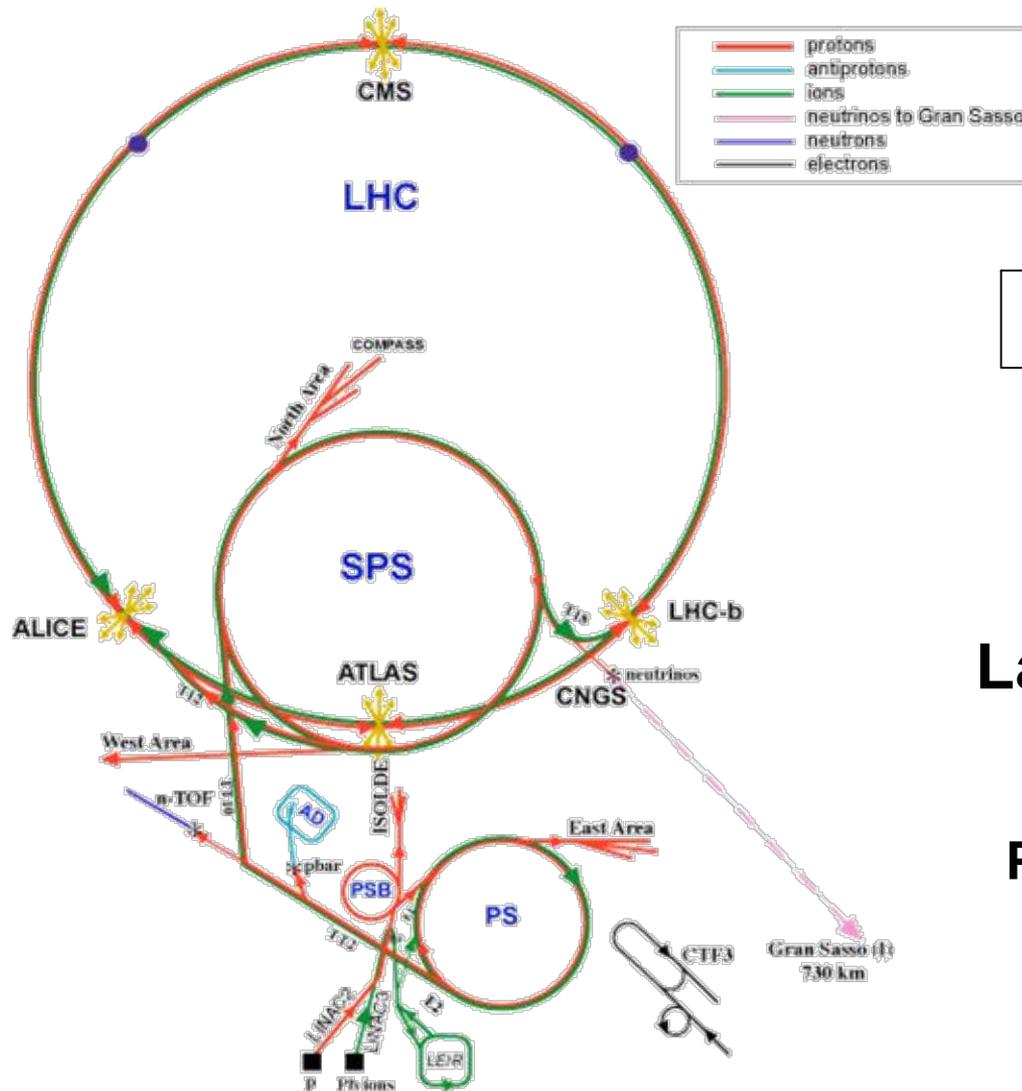
6 LEPTONI (elettrone, neutrino-e)
(muone, neutrino-mu)
(tau, neutrini-tau)

Particelle Forza

Forte 8 gluoni
Debole $W^+ W^- Z^0$
Elettromagnetica fotone

La forza di gravità, al momento, non è inclusa !





Il futuro prossimo

LHC

Large Hadron Collider

Protone-Protone a 14 TeV

Perché LHC ?

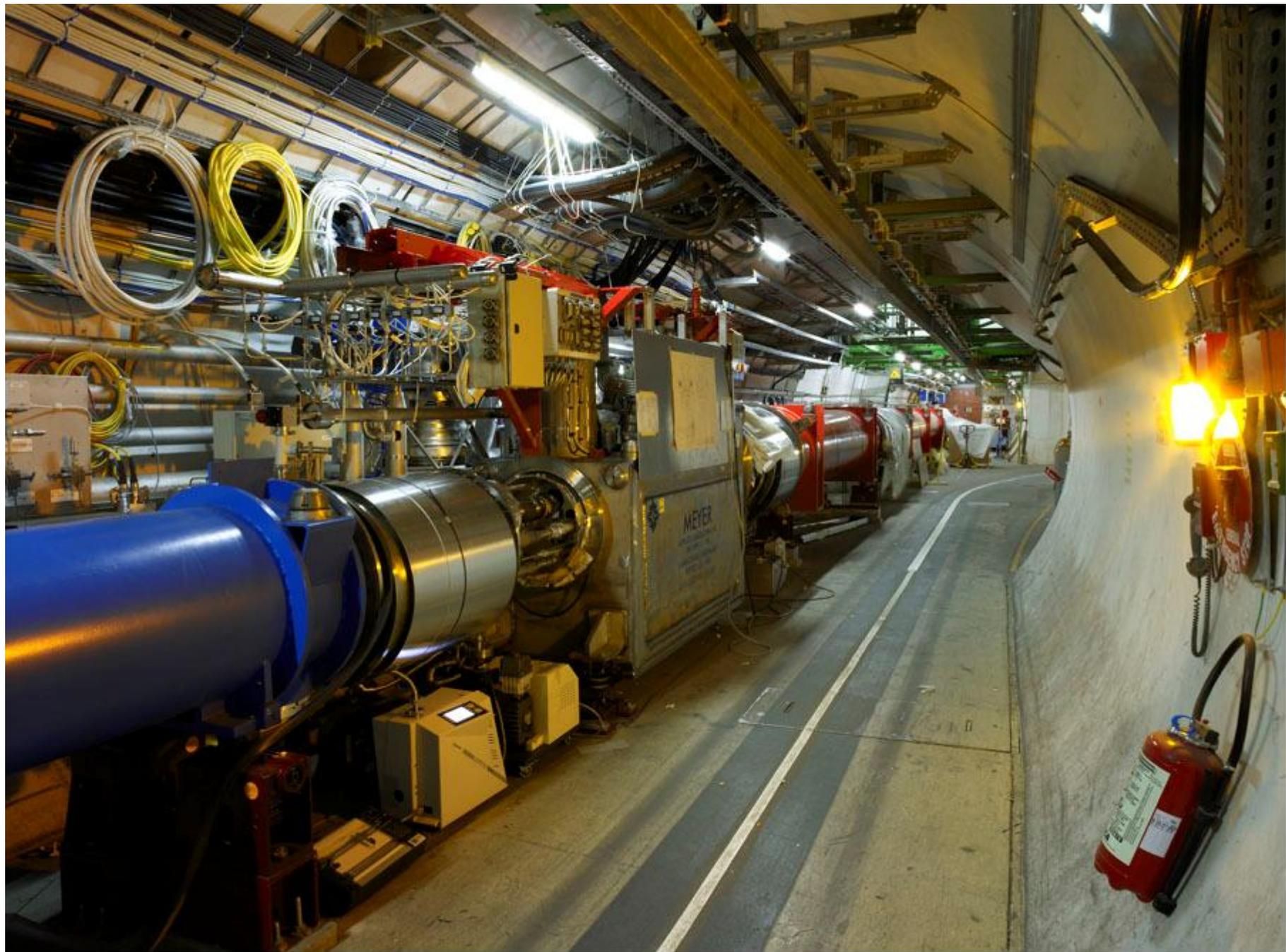
Perché il Modello Standard non risponde a molte domande.

9 domande “scottanti”

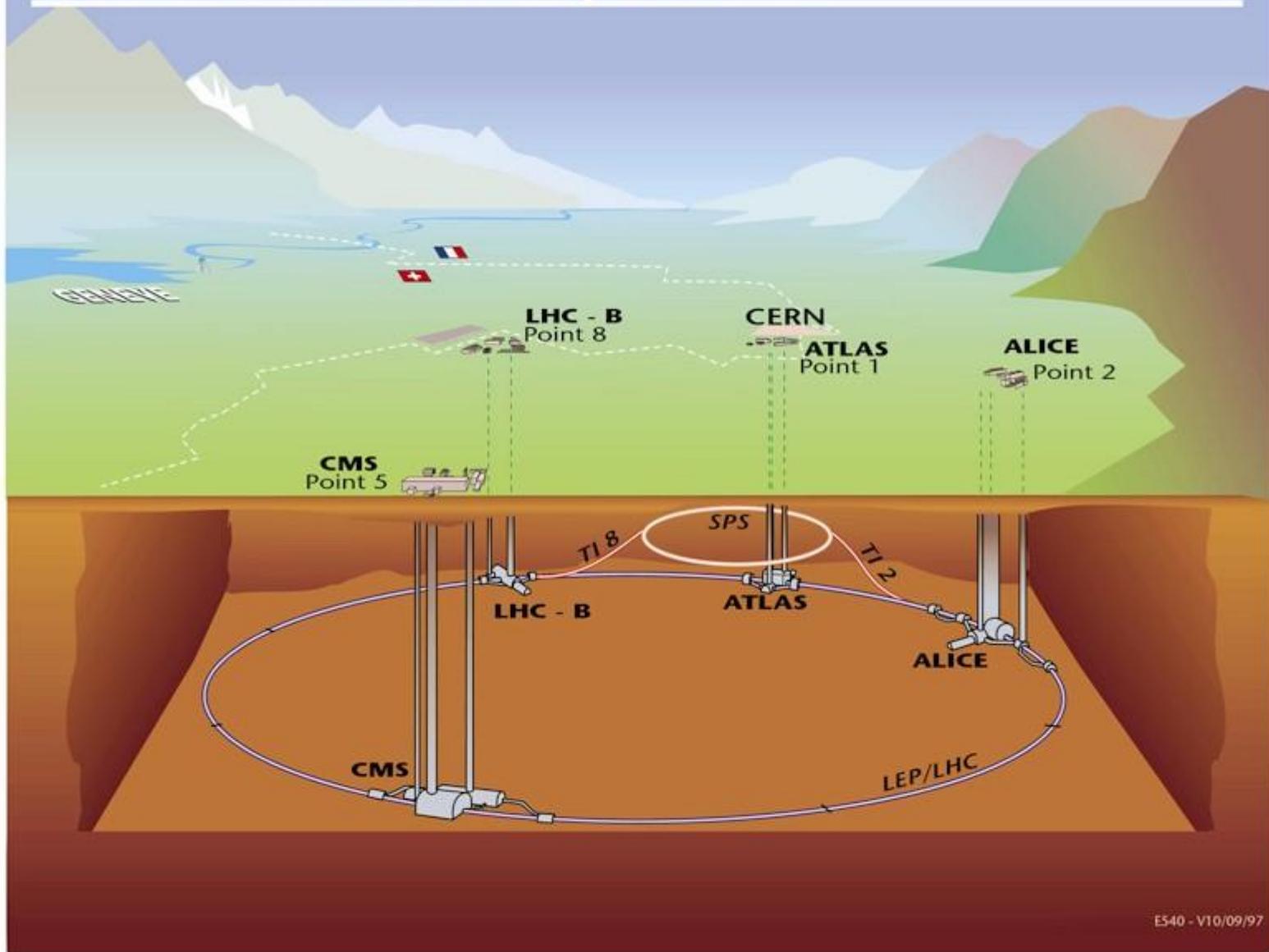
- Nuovi principi, simmetrie, leggi fisiche ?
- Energia oscura ?
- Dimensioni spaziali extra ?
- Unificazione delle forze ?
- Perché così tanti tipi di particelle diverse ?
- Materia oscura ?
- Cosa ci stanno dicendo i neutrini ?
- Come nasce questo universo ?
- Cosa è successo all'antimateria ?





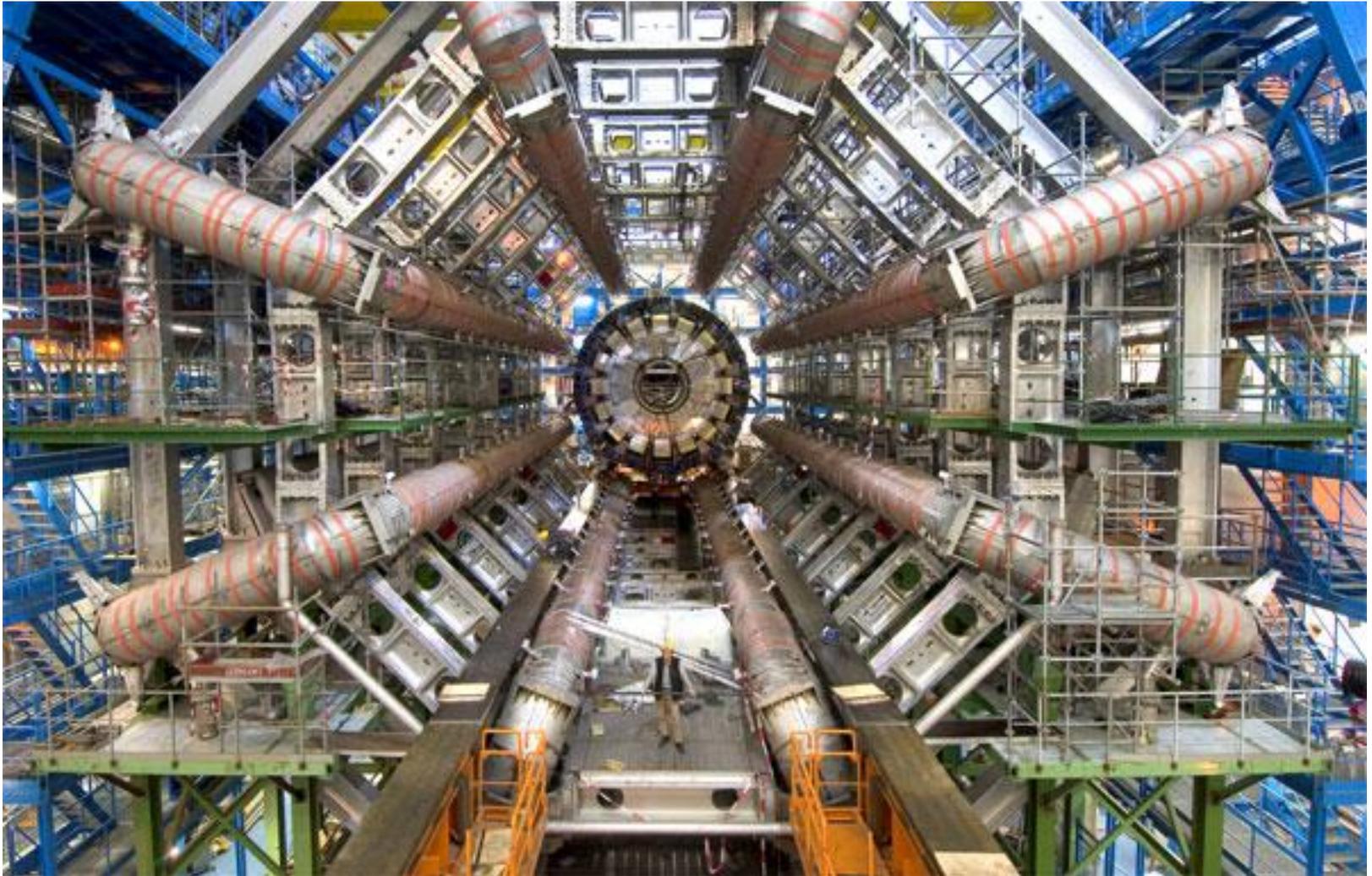


Overall view of the LHC experiments.





CMS

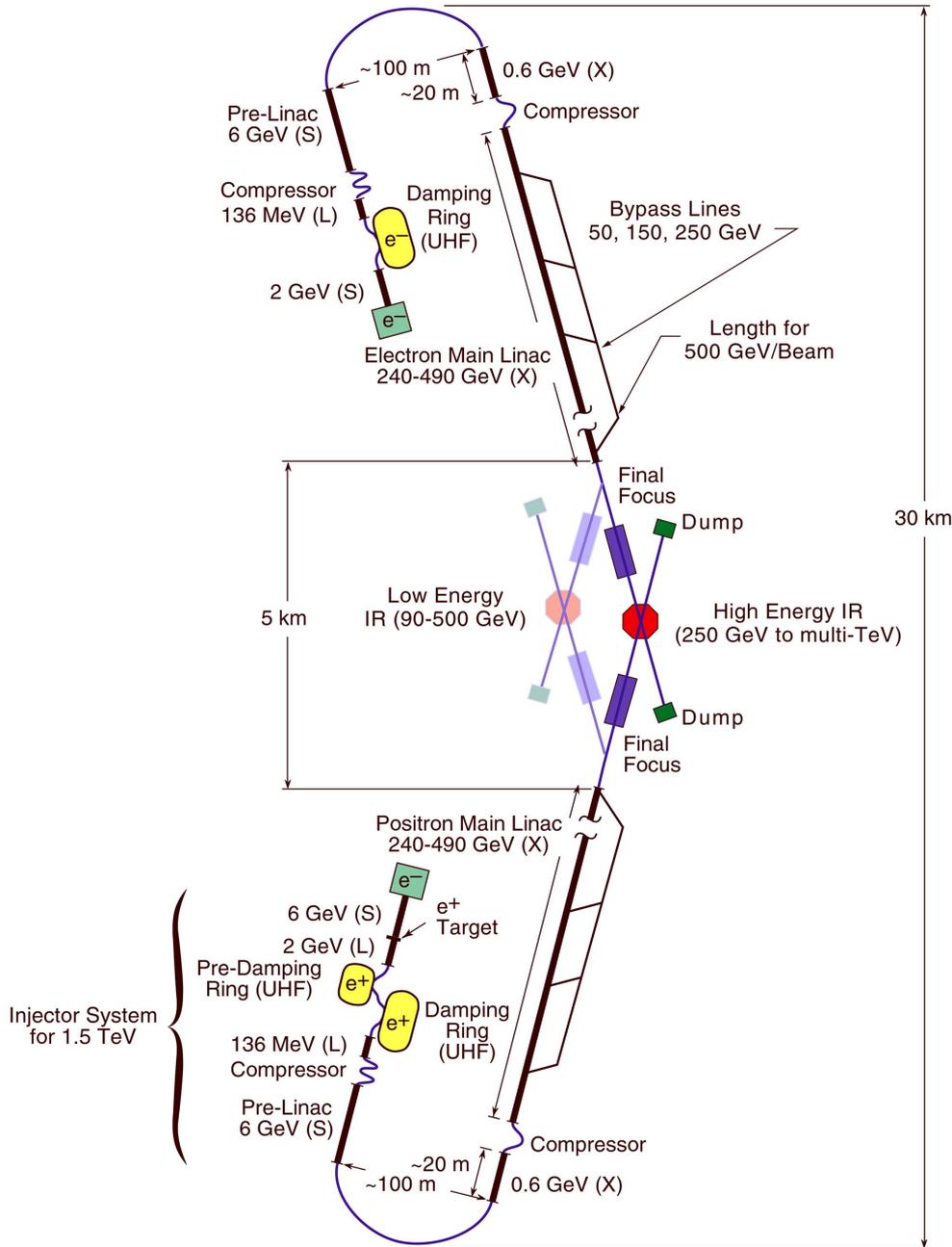


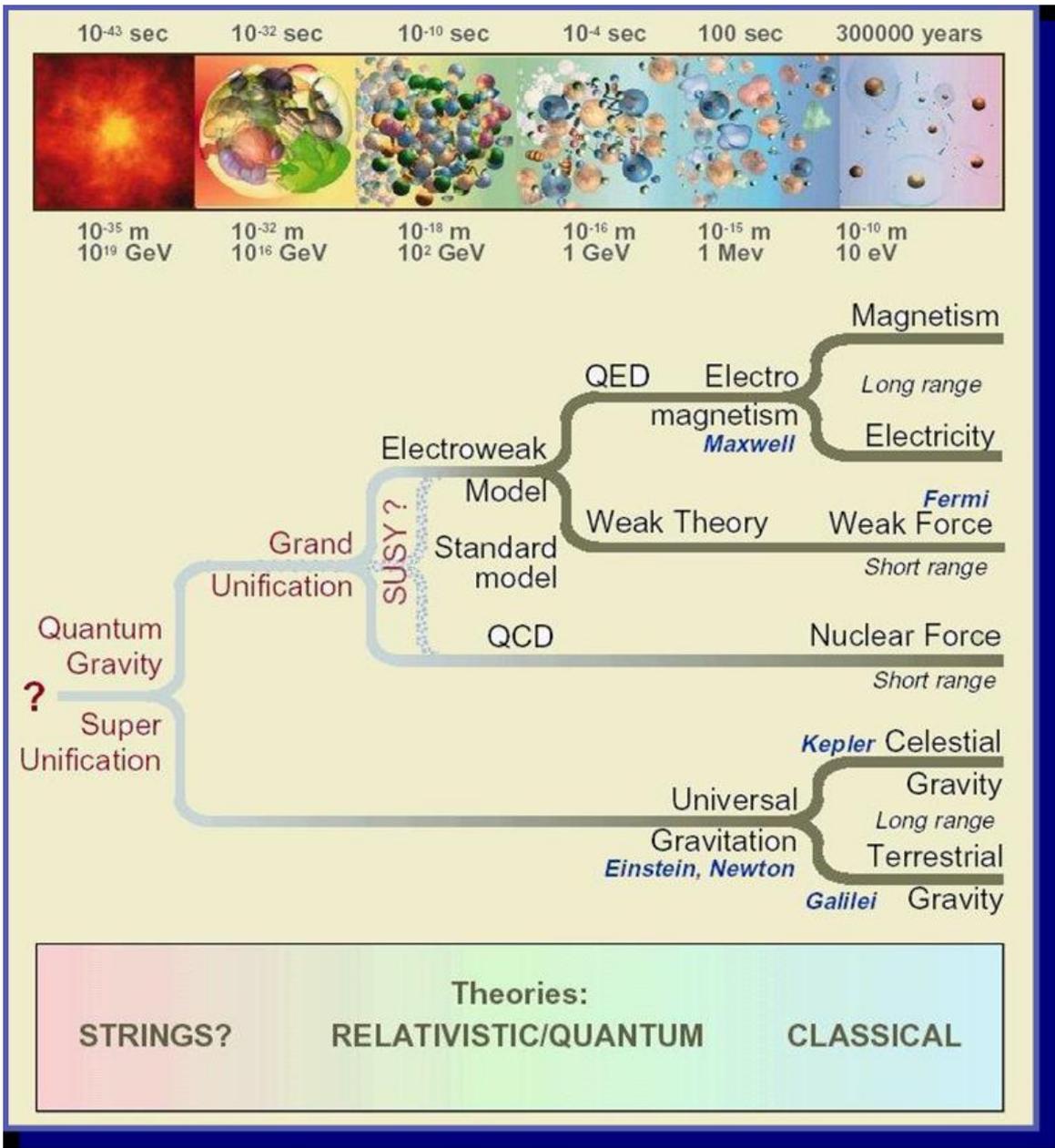
ATLAS

Il futuro remoto

ILC

International Linear Collider

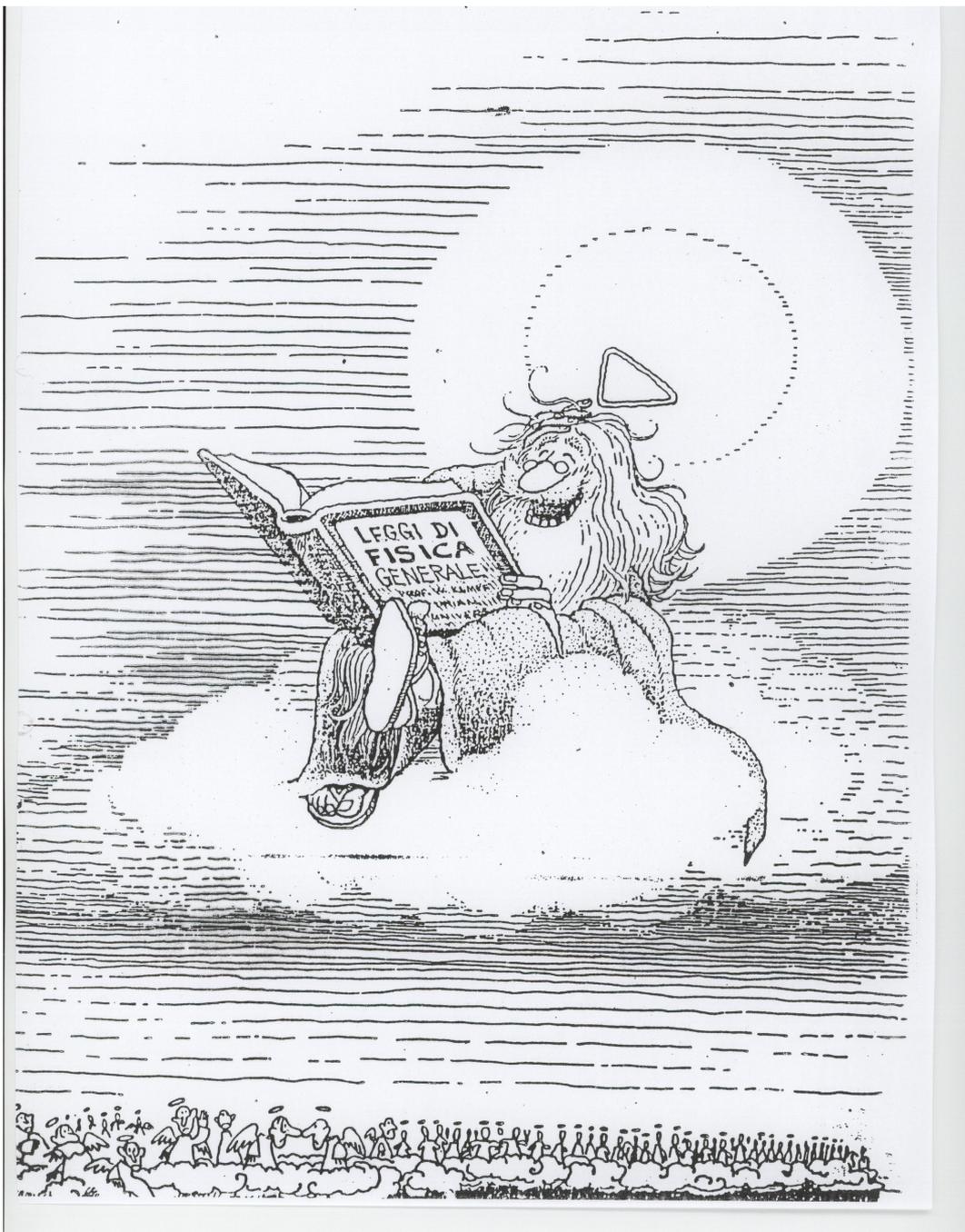




L'entusiasmo non manca !

Stiamo veramente capendo così tanto ?

È così che andrà a finire ?



**Le sorprese, però,
sono sempre
in agguato**

***E la storia potrebbe anche
essere***

molto, molto diversa !

***Vale comunque la pena
provarci.***