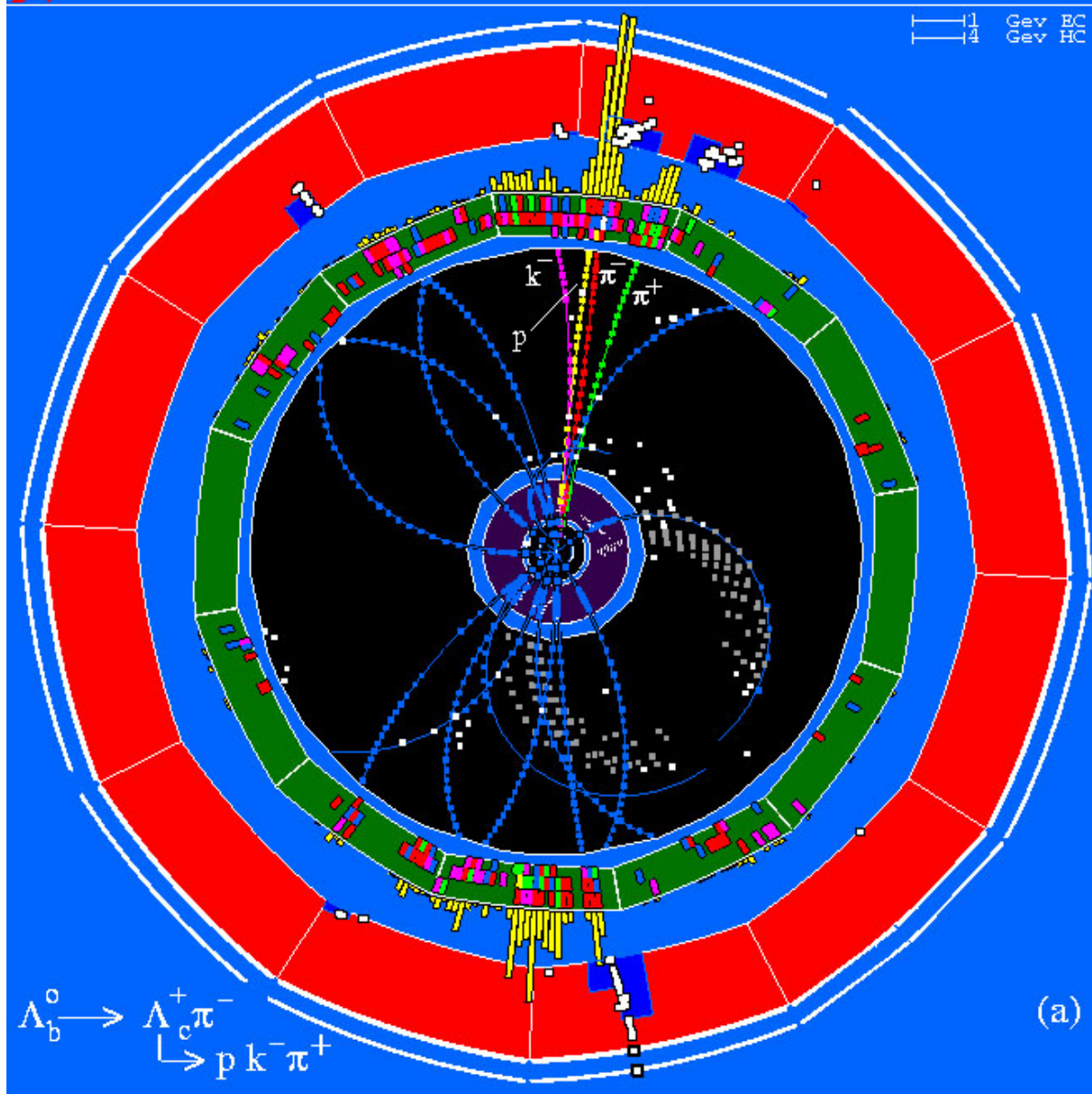




da AdA a LHC: la Fisica delle Particelle

**Bruno Touschek: il contributo delle sue idee allo
sviluppo della Fisica delle Alte Energie**

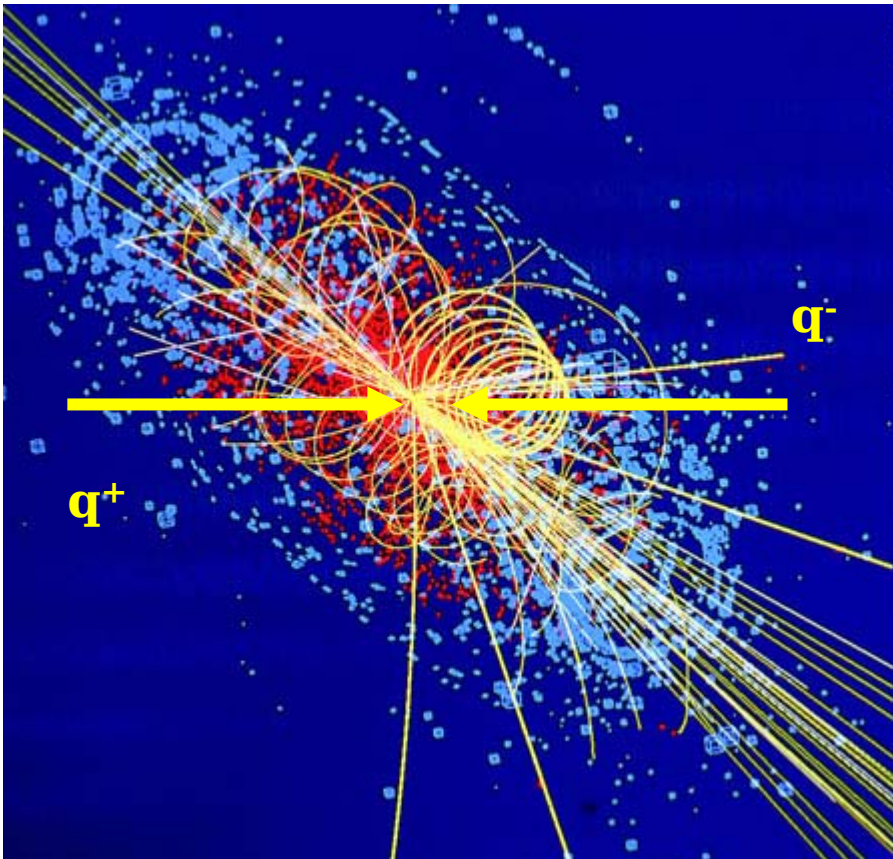




La percezione odierna dei processi che derivano dalle collisioni alle grandi macchine acceleratrici della Fisica delle Particelle e' quella che si origina dalle idee di *Bruno Touschek* e dagli sviluppi tecnologici che esse hanno avuto

La collisione di particelle mette a disposizione nel centro di massa energia che fluisce in nuove particelle

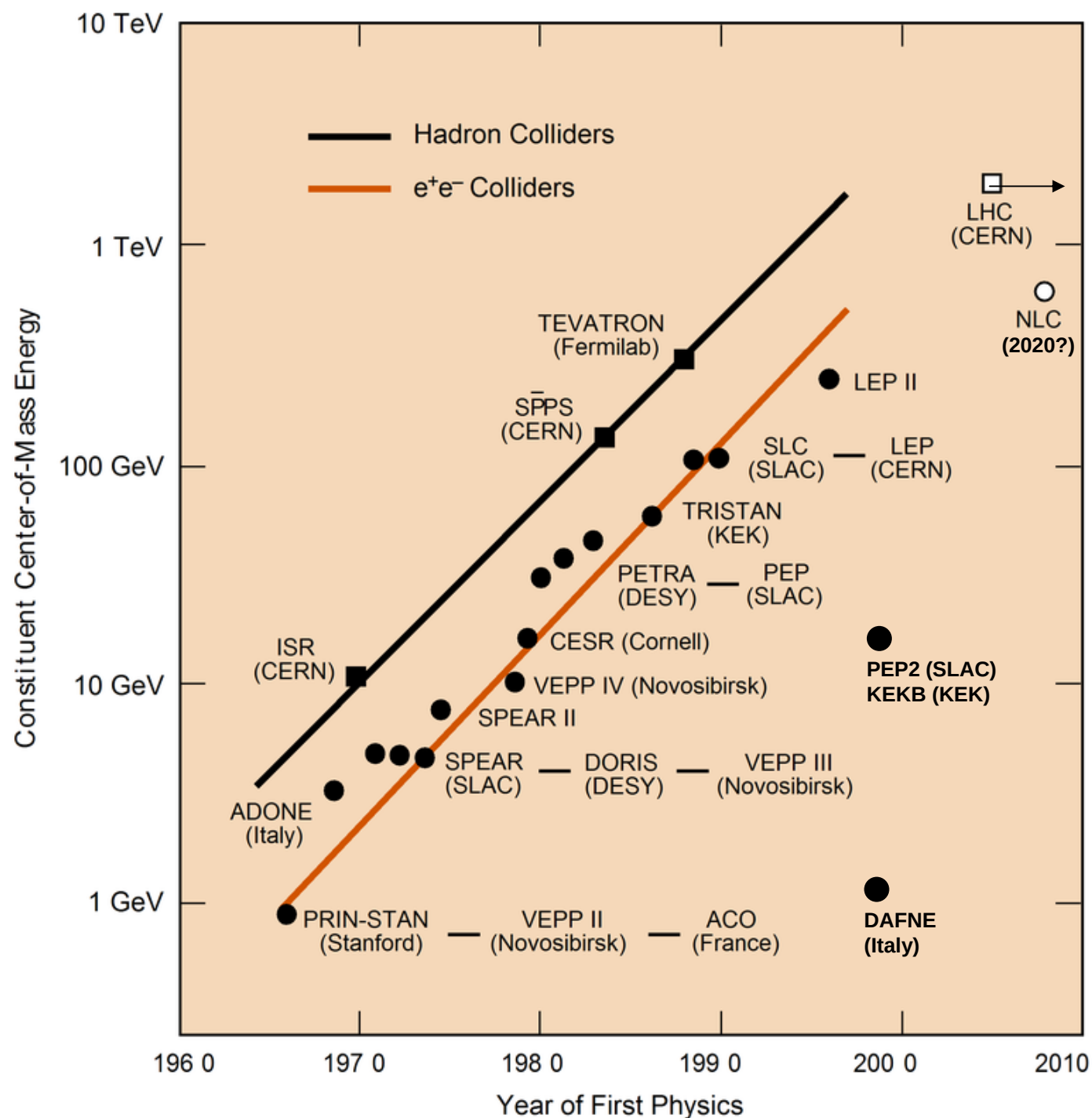
$$q^+ (E) q^- (E) \rightarrow (2E, E=mc^2) \rightarrow \text{nuove particelle}$$



Tale meccanismo di collisione e' molto piu' efficiente di quello nel quale uno dei due proiettili e' fermo. In tal caso la E_{cm} e' proporzionale solo a $\sqrt{E_{inc}}$

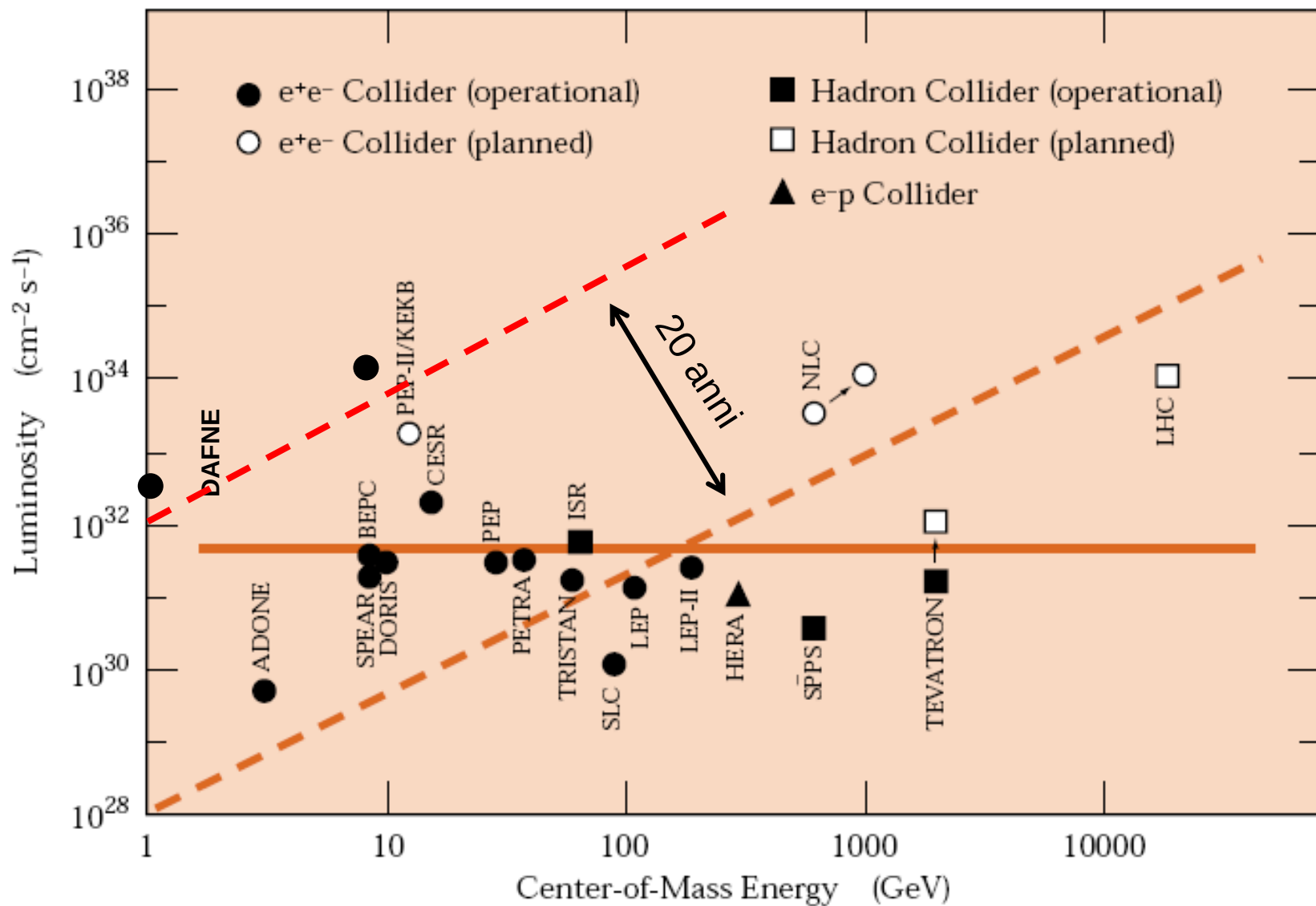
L'intuizione di Touschek e' quella che rende possibile la costruzione e il funzionamento di tali macchine

Frascati, grazie a lui, diventa negli anni '60 il centro dello sviluppo degli $e^+ e^-$



Lo sviluppo delle macchine acceleratrici (*grafico di Livigstone*)

Siamo arrivati al limite tecnologico (la curva satura): servono nuove idee...



La scelta dei proiettili che si scontreranno, della loro energia, della intensita' dei fasci ("luminosita' ") determinano la tipologia dei processi fisici che verranno studiati

Colliders "convenzionali"

→ p anti-p / p p

**ISR (Cern) 1971-1974, 62 GeV
SPS (Cern) 1976-1984, 900 GeV
LHC (Cern) 2009- , 14 TeV**

→ Tevatron (Batavia, US), 1983-2010, 2 TeV

→ e - p

HERA (Amburgo) 1990-2007, 28x920 GeV



→ $e^+ e^-$

SPEAR (Stanford, US) 1972-1990, 7.4 GeV

PEP (Stanford, US) 1980-1994, 29 GeV

SLC (Stanford, US), 1989-1998, 100 GeV

PEP-2 (Stanford, US) 1999-2008, 10 GeV

CESR (Syracuse, US) 1979-2007, 10 GeV

→ **BEPC (Pechino) 1988- , 4 GeV**

Adone (Frascati) 1972-1977 3 GeV

→ **Dafne (Frascati) 1999- , 1 GeV**

Doris (Amburgo) 1978-1990, 10 GeV

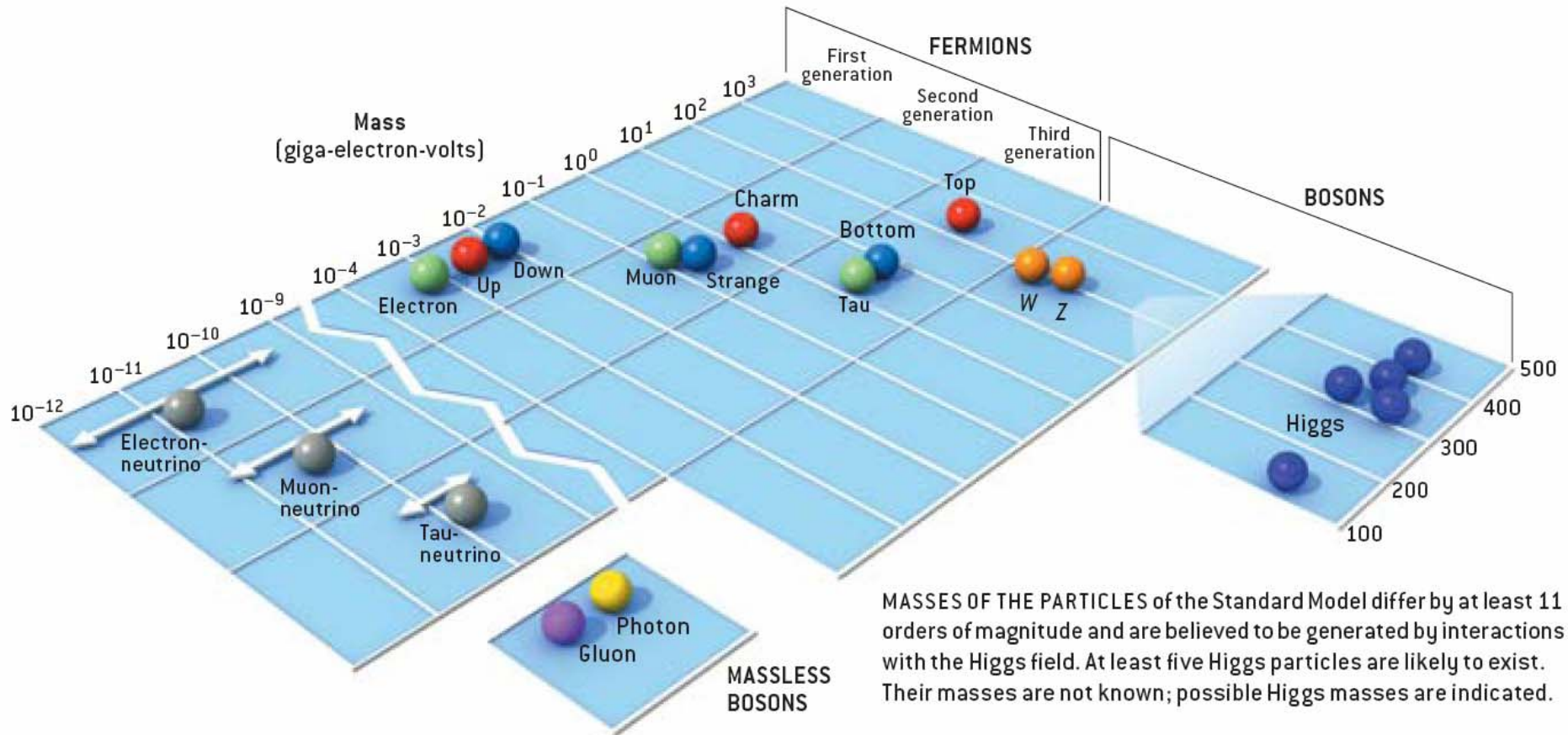
Petra (Amburgo) 1978-1990, 38 GeV

LEP (Cern) 1989-2000, 200 GeV

Tristan (Tsukuba, JP) 1984-1990, 60 GeV

→ **KEKB (Tsukuba, JP) 1999- , 10 GeV**

La tavola delle Particelle Elementari



Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.
There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 types of mesons.

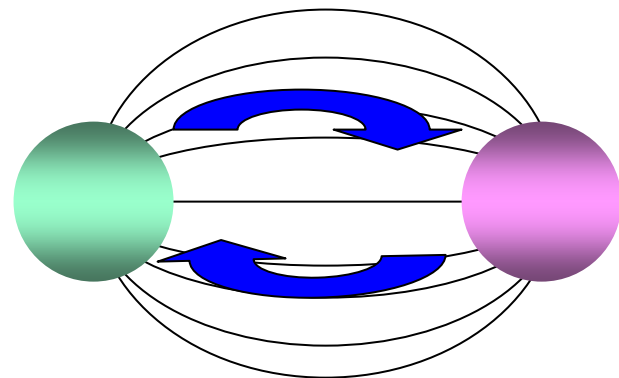
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

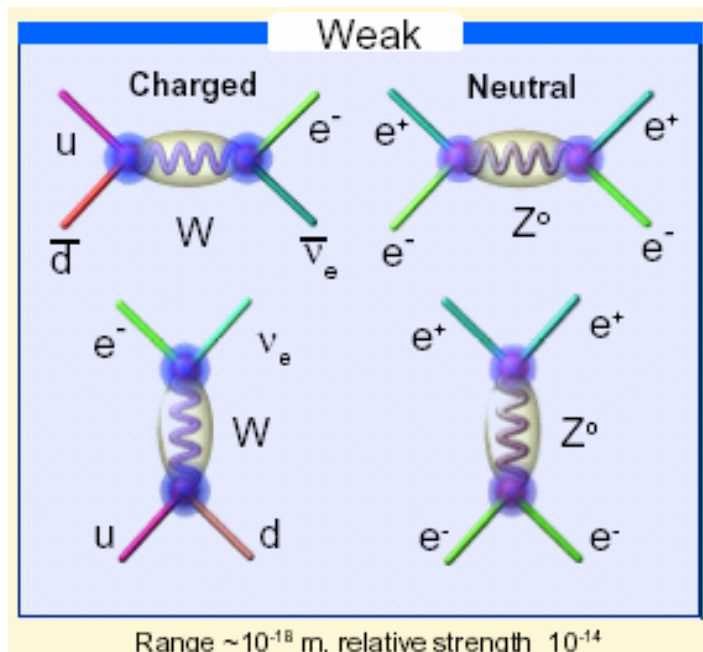
Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
g gluon	0	0



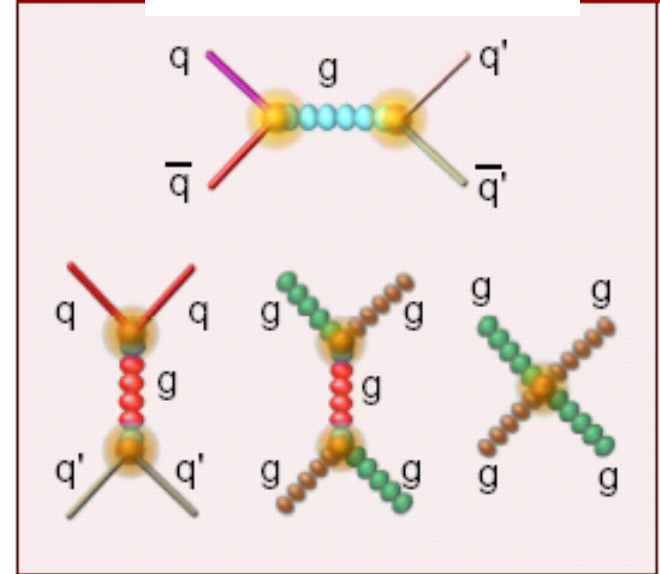
La rappresentazione (grafici di Feynman) delle interazioni elettromagnetiche, deboli e forti dei leptoni e dei quark al livello piu' semplice (2 vertici)

Interazioni Deboli



Mediatori : i bosoni W e Z

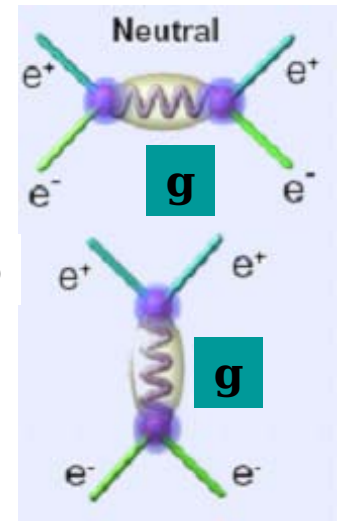
Interazioni Forti



Range $\sim 10^{-15}$ m, relative strength = 1

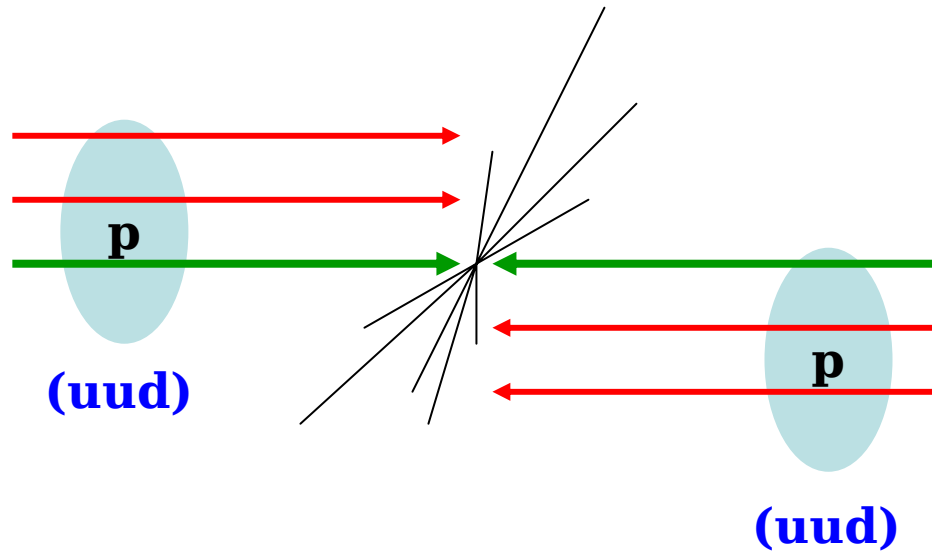
Mediatori : i gluoni

Elettromagnetismo



Mediatore : il fotone

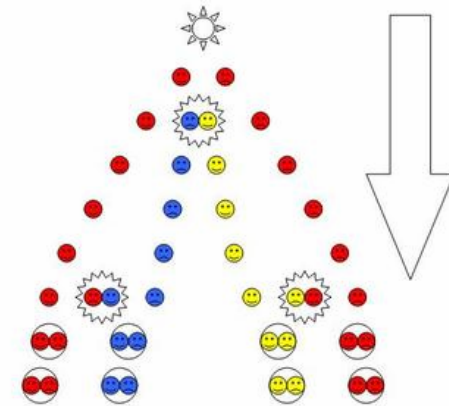
Cosa si studia nelle collisioni protone-protone



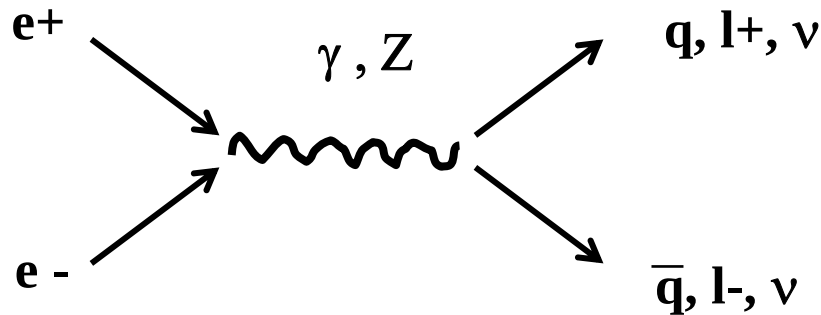
Se l'energia è alta lo scontro direttamente avviene tra 2 quarks

Solo una frazione dell'energia totale ($2E$) è disponibile per creare nuove particelle

In generale, dato che i quark non possono vivere da soli, ma a coppie (mesoni) o a terzetti (barioni), nelle collisioni p-p si innesca il processo di adronizzazione, ossia il “rivestimento” dei quark “nudi” prodotti nell'interazione



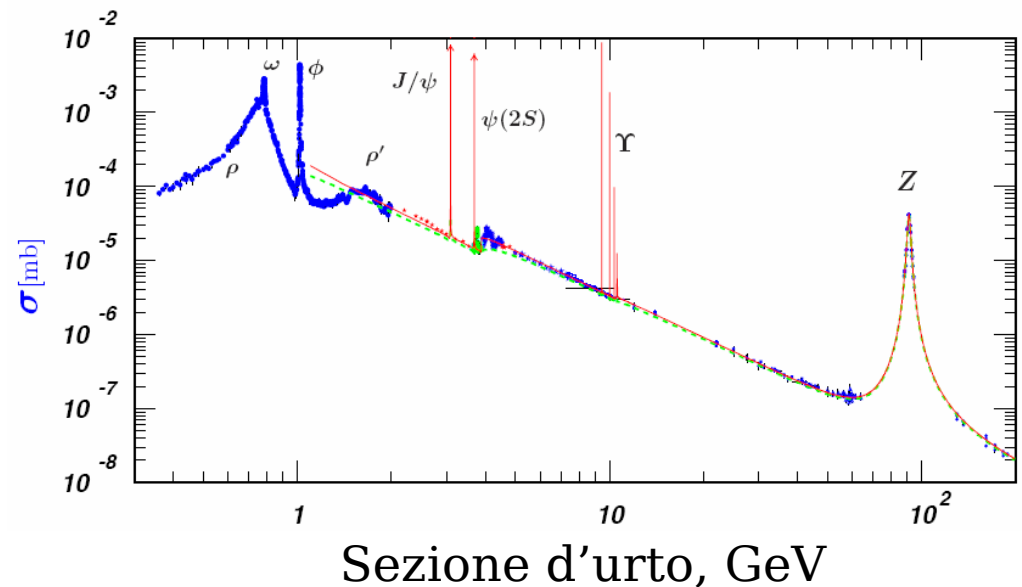
Cosa si studia nelle collisioni elettrone-positrone



Gli elettroni e i positroni sono oggetti puntiformi: quasi sempre lo scontro provoca un'annichilazione materia-antimateria e un rilascio di tutta l'energia ($2E$) disponibile per creare nuove particelle

Se nello stato finale:

- si creano due quark, scatterà il processo di adronizzazione;
- si creano due leptoni carichi, la configurazione finale sarà molto semplice;
- si creano 2 neutrini, non si osserverà nulla.

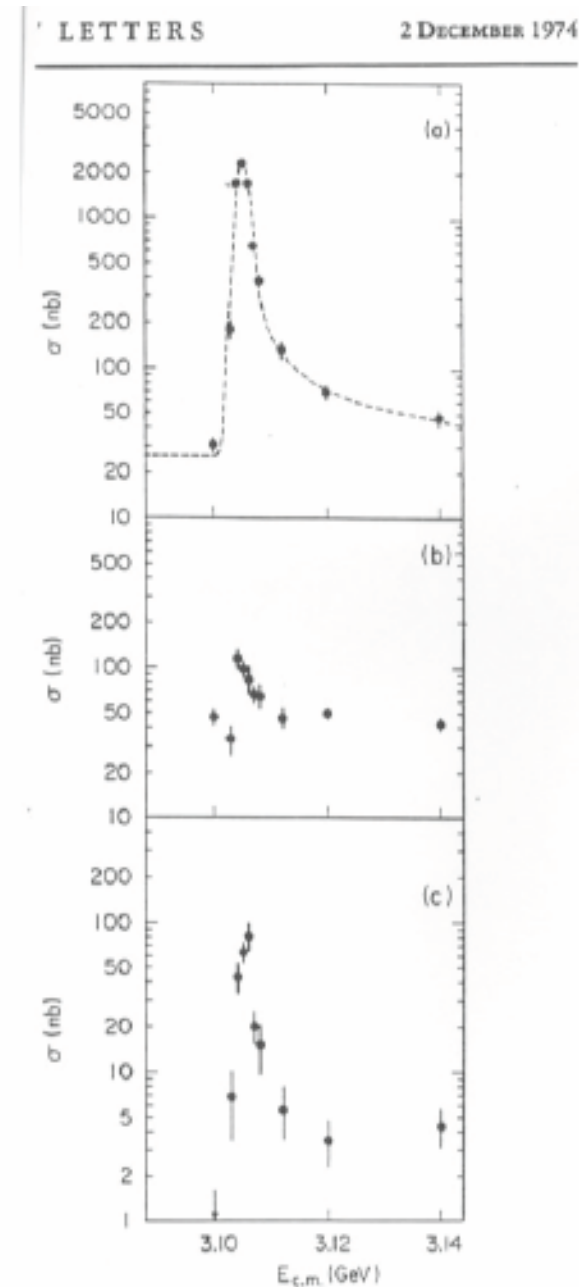


1974 - La rivoluzione di novembre

In tre laboratori (prima **Stanford**, Brookhaven e poi **Frascati**) viene scoperta una particella neutra di massa 3.1 GeV, chiamata **J/Ψ** compatibile con l'esistenza di un 4° quark: **il charm**

La **J/Ψ** e' un esempio di stato legato quark anti-quark che si comporta esattamente come un sistema atomico, presentando tutta una serie di stati eccitati (charmonio)

L'esistenza del quark charm era stata predetta nel 1970 da **Glashow, Iliopoulos e Maiani**, per risolvere alcune inconsistenze nella teoria

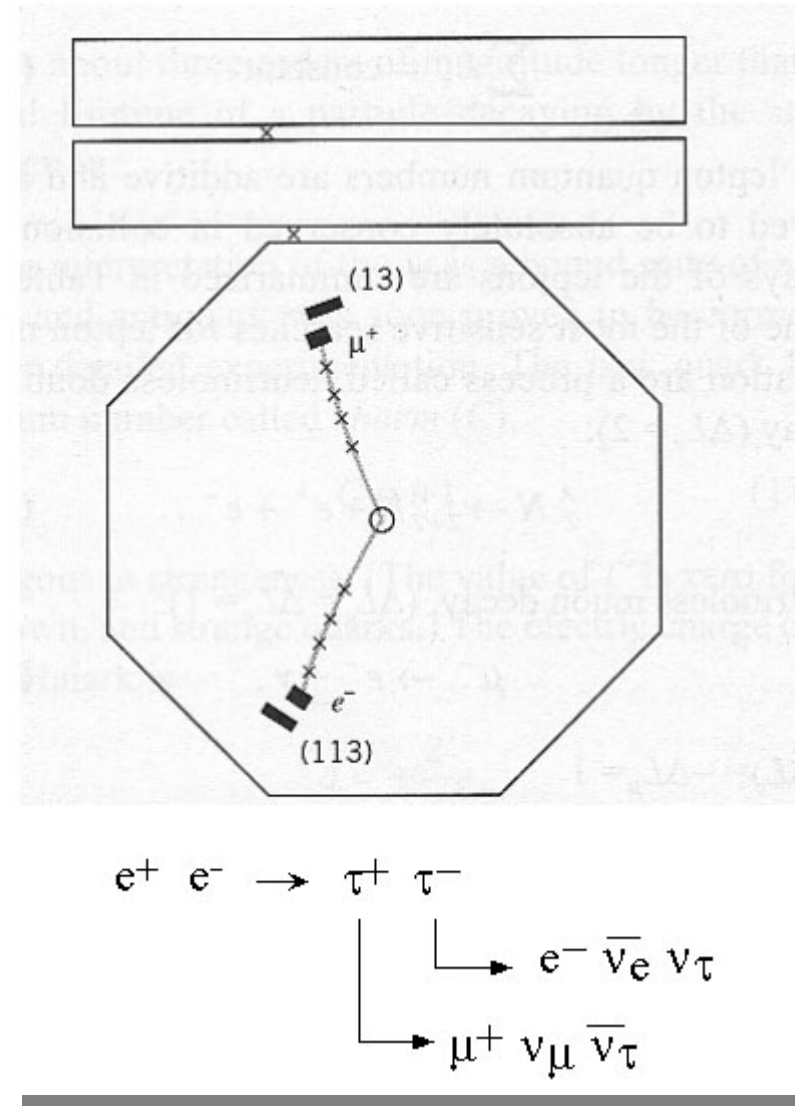


1975 - Elettroni e muoni non sono soli

A **Stanford** viene scoperta una particella carica di massa 1.8 GeV che ha la caratteristica di essere un leptone pesante (il τ)

Si determina che decade negli altri leptoni e anche in mesoni π e K (data la sua grande massa), sempre accompagnato dalla creazione di un ν_τ nello stato finale (per la conservazione del numero leptonico)

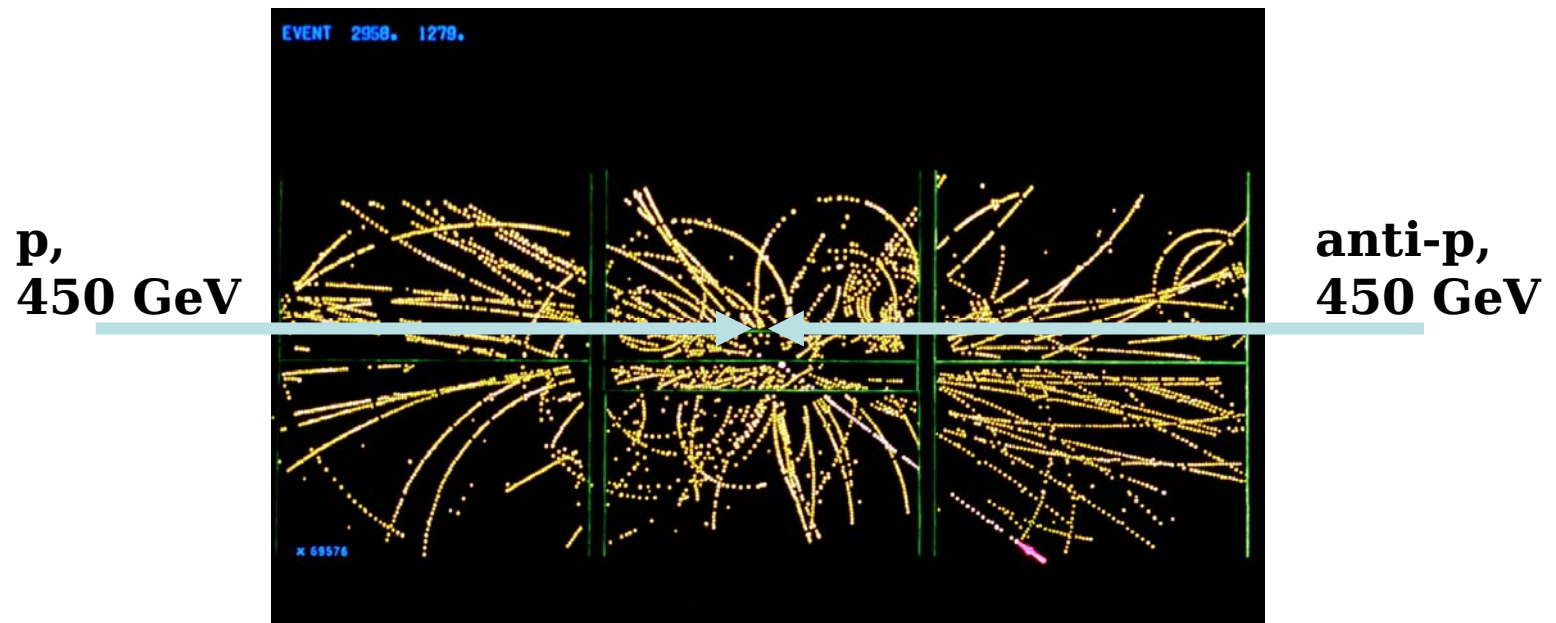
La 3° generazione di leptoni era stata finalmente determinata, anche se il ν_τ ad oggi non è stato ancora scoperto



1984 – Il Grande Impero (CERN) colpisce

Nel 1973 in esperimenti con fasci di ν si era ottenuta l'evidenza che le interazioni deboli fossero trasmesse dai bosoni vettoriali W e Z, come previsto dalla teoria di **Glashow, Weinberg, Salam (1968)**

Nel 1984 all'SPS, l'esperimento UA1 (C. Rubbia) e poi UA2 ottengono la prova che tali bosoni vettoriali esistono, vengono prodotti nelle collisioni p-anti p e ne osservano i decadimenti



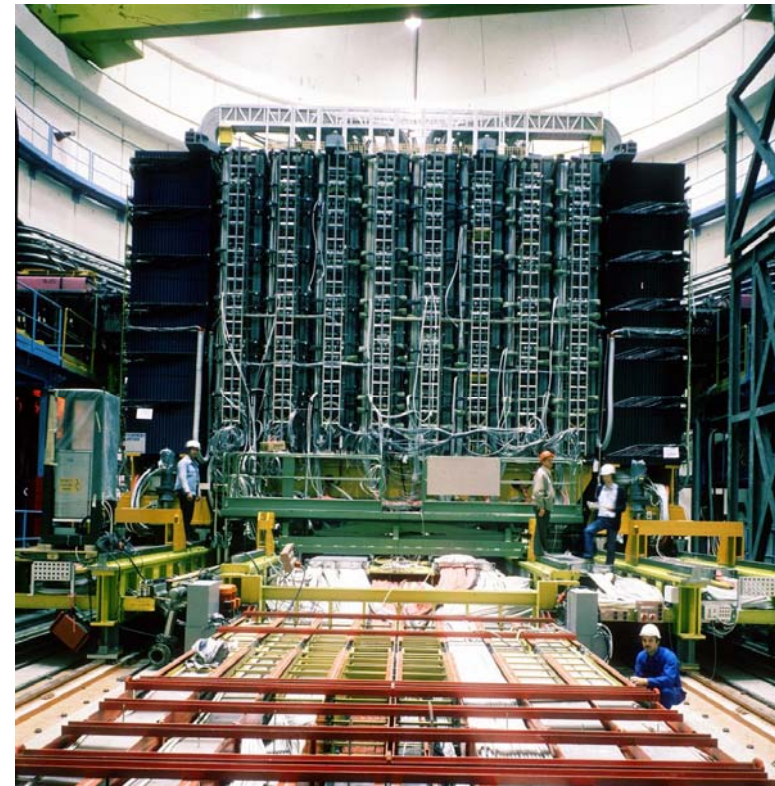
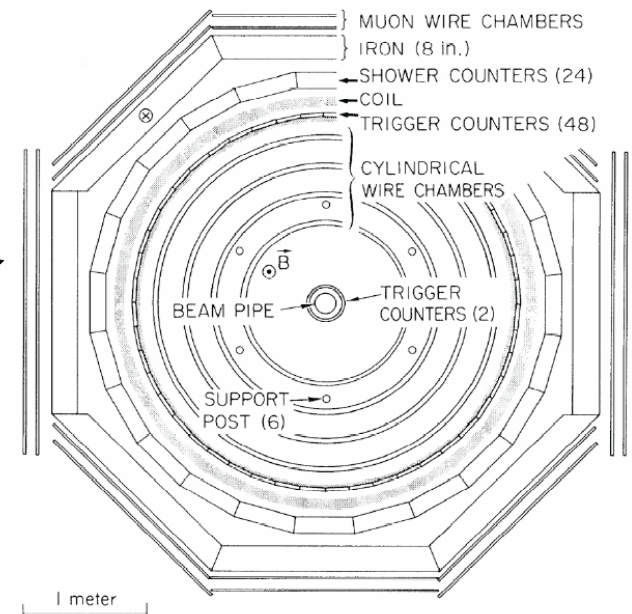
L'evoluzione delle tecniche

Confrontando l'esperimento della **J/ψ** con **UA1** e **UA2** (ca. 10 anni dopo), gli apparati diventano complessi, specializzati, con decine di migliaia di canali, e dimensioni ragguardevoli (decine di m²)

Le collaborazioni sono molto numerose, con dozzine di Istituti e qualche centinaio di fisici, ingegneri, tecnici.

Nascono i primi “potenti” calcolatori... si stanno preparando le basi per il Web (che nascerà al Cern di lì a breve)

I progetti sono di diverse decine di M\$... nasce la Big Science



1989 - Il Grande Impero (CERN) colpisce (ancora)

Nel 1989 parte il grande acceleratore LEP - un collider $e^+ e^-$ da 27 km di circonferenza, con una energia fino a 200 GeV - per studiare a fondo il Modello Standard e scoprire Nuova Fisica

Quattro esperimenti (Aleph, Delphi, L3, Opal) di grandi dimensioni e grande livello tecnologico, che prenderanno dati sino al 2000

Viene esplorata in grande dettaglio - a livello di 1 parte su 10,000 - la validita' del Modello Standard, che supera brillantemente la prova

Tra i tanti risultati importanti del LEP:

1 - La determinazione del numero di “generazioni” (o numero di famiglie neutriniche) $N_\nu = 2,9835 \pm 0,0083$ studiando l'intensita' del decadimento del bosone Z

Fino ad allora c'erano solo limiti indiretti basati su considerazioni cosmologiche

Con questa misura si determina che i tipi di neutrini “leggeri” sono solo tre: elettronico, muonico, tau (ce ne potrebbero essere altri tipi, ma con massa > 45 GeV)

Questo risultato ha un importante effetto sullo studio della materia oscura (*vd dopo*)

2 - La predizione, con una buona precisione della massa del 6° quark (il top)

3 - La determinazione diretta del limite inferiore della massa del bosone di Higgs (sappiamo che $M > 113$ GeV)

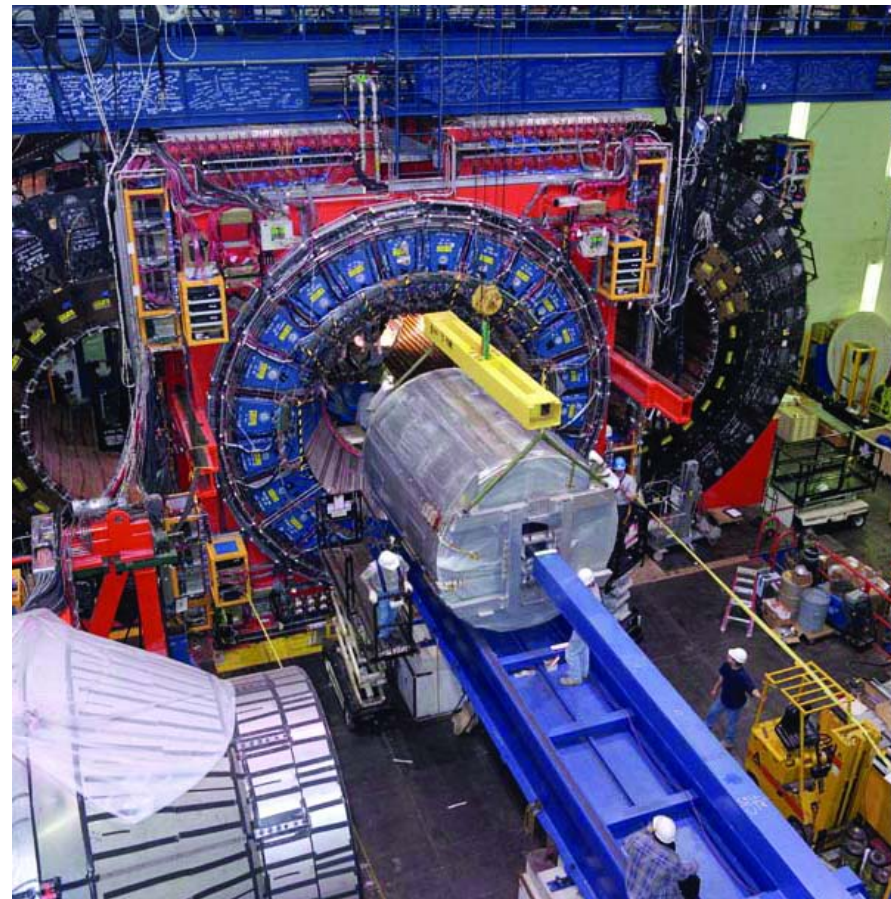
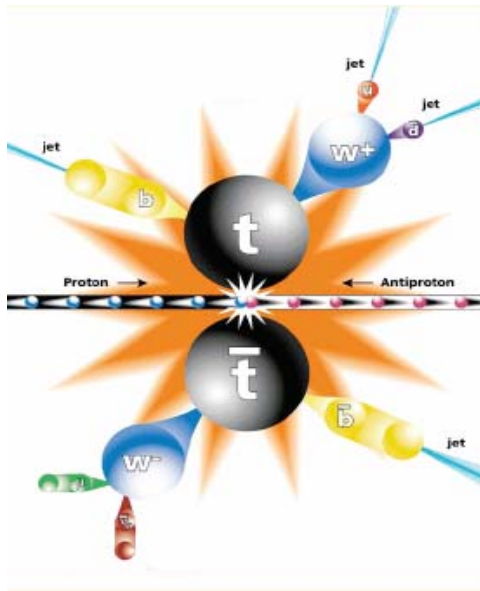
1995 - Il Tevatron (Fermilab, US) scopre il quark top

Gli esperimenti CDF e D0, “guidati” dalle misure di LEP determinano direttamente l’esistenza e la massa del **quark top** (ca. 180 GeV, la massa di un atomo di Au)

Il quark top, essendo molto pesante, decade (forza debole) prima di adronizzare (forza forte)

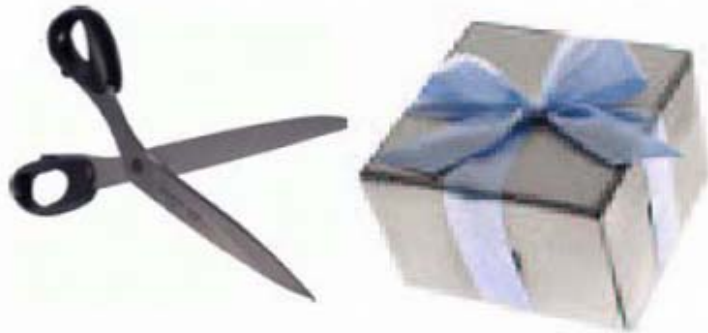
$t \rightarrow b W$

E’ il quark b che poi adronizza, creando jet di particelle



Luminosita' o Energia ?

→ Se abbiamo collisioni ad alta energia, possiamo creare direttamente nuove particelle di grande massa



“aprire la scatola”
Osservare direttamente nuove
particelle

→ Se abbiamo un'elevata frequenza di collisioni (= alta luminosita'), possiamo studiare con grande precisione eventi rari, ove si puo' manifestare, indirettamente, la Nuova Fisica



“scuotere la scatola”
Dedurre indirettamente l'esistenza
di Nuova Fisica

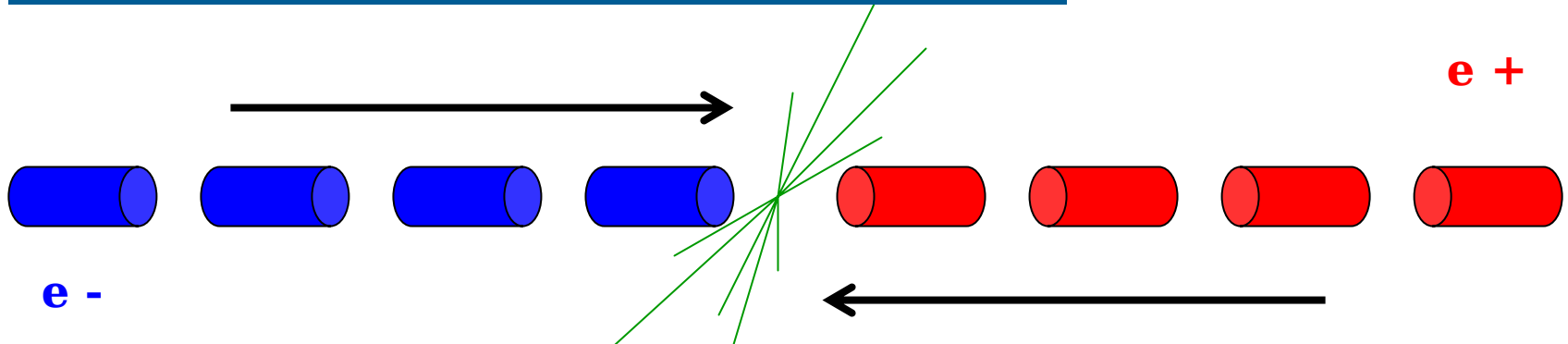
Come si realizza l'alta intensita' ?

$$\text{Event rate} = \underbrace{\frac{N_{e^-} N_{e^+}}{A_{\text{beam}}}}_{\text{Luminosity } L} f_{\text{coll}} \cdot \sigma_{e^+ e^- \rightarrow X}$$

Diagram illustrating the factors affecting event rate:

- Number e+e-**: Points to N_{e^-} and N_{e^+} in the formula.
- Collision rate**: Points to f_{coll} in the formula.
- Cross section physics process**: Points to $\sigma_{e^+ e^- \rightarrow X}$ in the formula.
- Transverse beam area**: Points to A_{beam} in the formula.
- Luminosity L**: Points to the fraction $\frac{N_{e^-} N_{e^+}}{A_{\text{beam}}}$ in the formula.



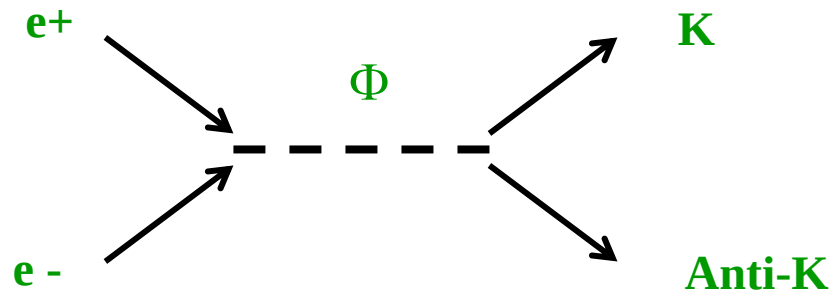


Dimensioni micrometriche dei fasci, grande numero di pacchetti con $>10^{10}$ elettroni ciascuno, ottimizzazione degli incroci, ecc...

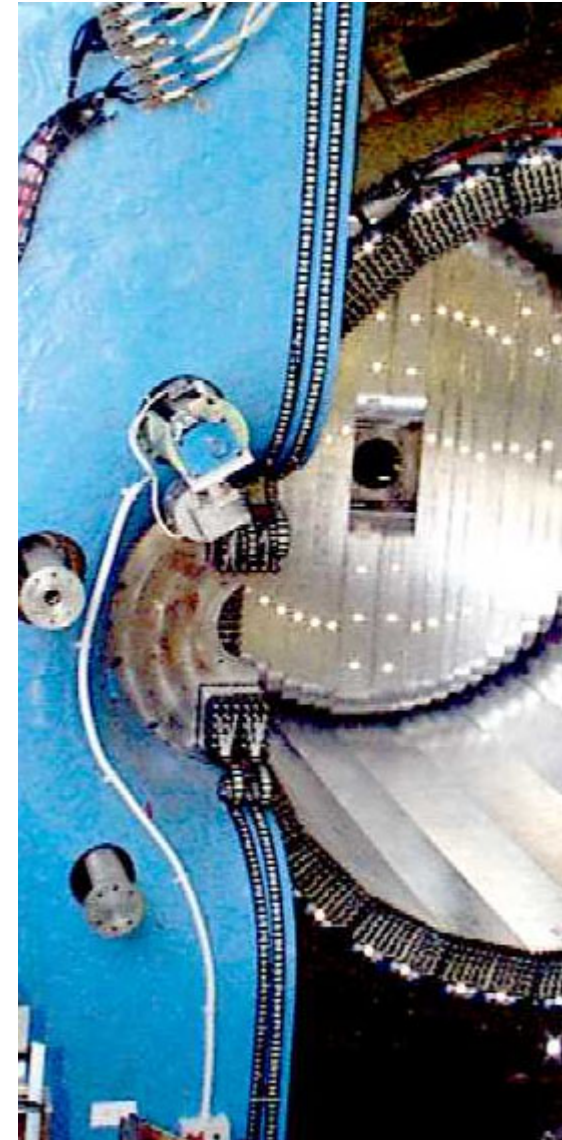
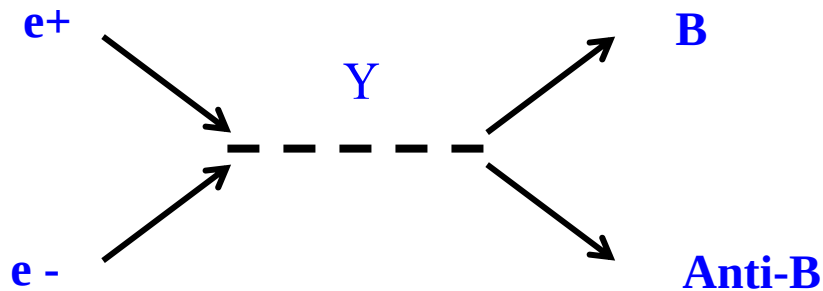
Piu' e' bassa l'energia, piu' e' difficile aumentare la luminosita' ($\propto E^2$)
DAFNE ha le migliori prestazioni mondiali nel campo degli e+e-

I colliders per lo studio della violazione di CP (e non solo)

DAFNE ($E = 1 \text{ GeV}$) $L = 3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



KEKB, PEP2 ($E = 10 \text{ GeV}$) $L = 1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



Un esempio di richiesta di alta L: la violazione di CP

Per anni si e' pensato che CP fosse una simmetria della natura. Nel 1964 si e' scoperto che il sistema dei mesoni K (us) violava la simmetria CP

C : coniugazione di carica ($q \leftrightarrow -q$)

P : trasformazione di parita' ($x \leftrightarrow -x$)

$$K \rightarrow \pi\pi \neq \text{anti-}K \rightarrow \pi\pi$$

Nel 2004, anche nel sistema dei mesoni B (ub) si scopre la violazione di CP

$$B \rightarrow \pi\pi \neq \text{anti-}B \rightarrow \pi\pi$$

Tuttavia, malgrado le molte misure di precisione, ad oggi non si sono rivelate deviazioni dal Modello Standard



Perche' studiare la Violazione di CP ?

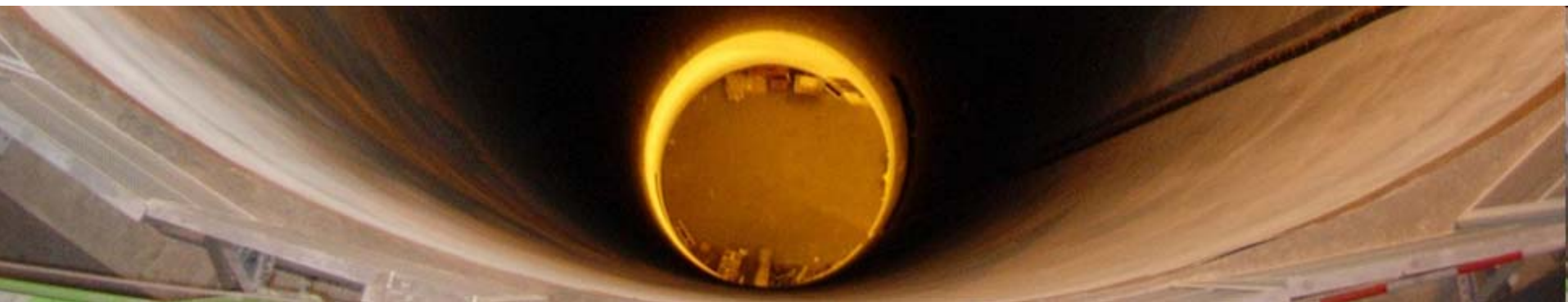
La materia domina l'Universo sull'antimateria, ma all'inizio del Big Bang non era cosi'...

Quali i motivi di tale asimmetria ?

Ci deve essere stato, all'inizio dell'Universo, un meccanismo che ha fatto scomparire la Antimateria rispetto alla Materia

La violazione di CP e' un candidato, anche se, nei termini in cui la osserviamo oggi, ha un valore troppo piccolo per giustificare questa asimmetria

Ci si aspetta di scoprire nuovi effetti alla nuova macchina LHC



Perche' l' LHC (Large Hadron Collider)

- **Il non-plus-ultra della tecnologia**
- **Per sapere se esiste il bosone di Higgs**
- **Per ricreare l'Universo quando aveva 1 miliardesimo di sec.**
- **Per scoprire il mistero della Materia Oscura**
- **Per scoprire quello che oggi non conosciamo**

Alloggiato nei 27 km del tunnel che ospitava il LEP

Costruito con 1500 magneti superconduttori a 1.5 °K

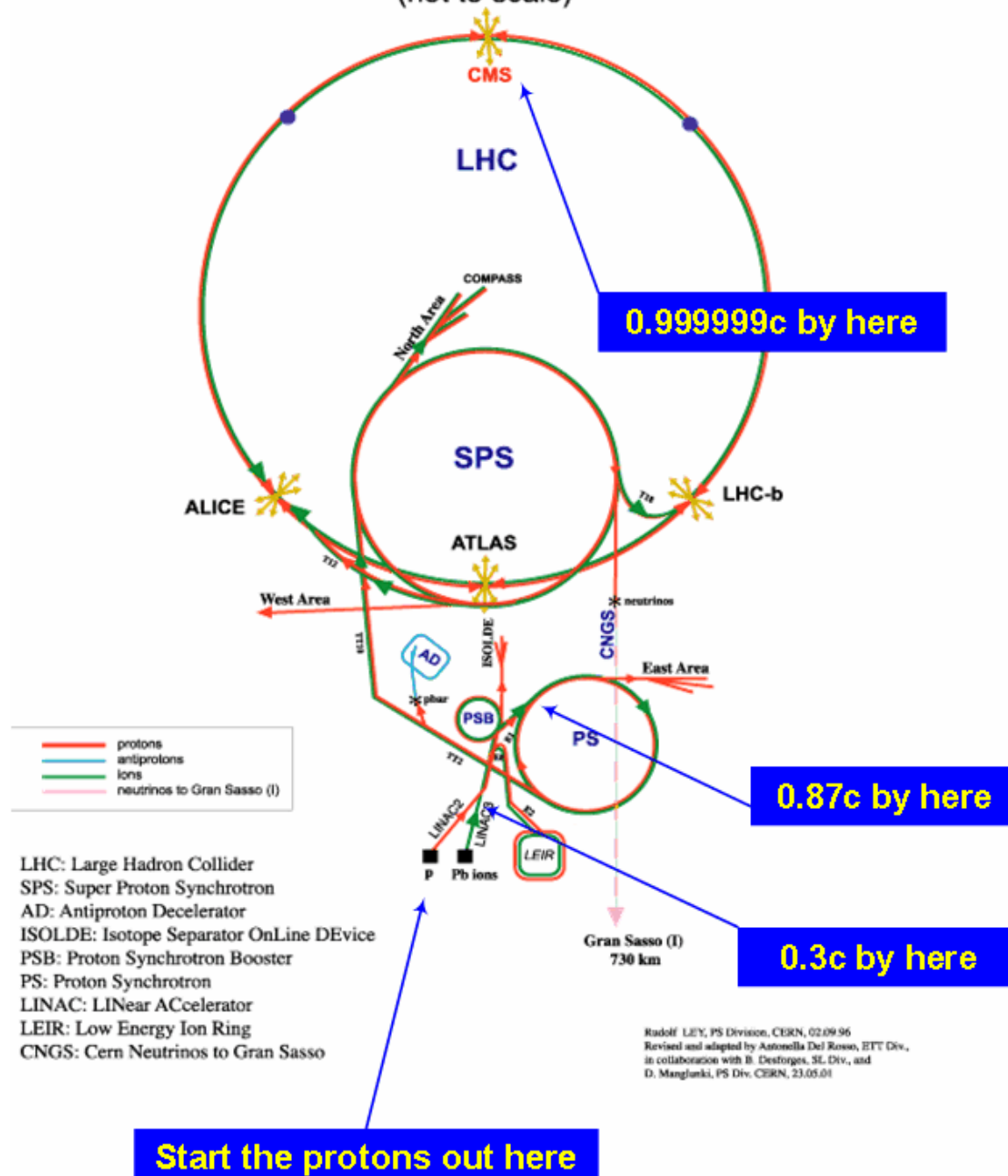
Un vuoto nella camera del fascio come a 1000 km di altezza

2 Fasci di protoni (7+7 TeV), con l'energia di un treno a 200 km/h

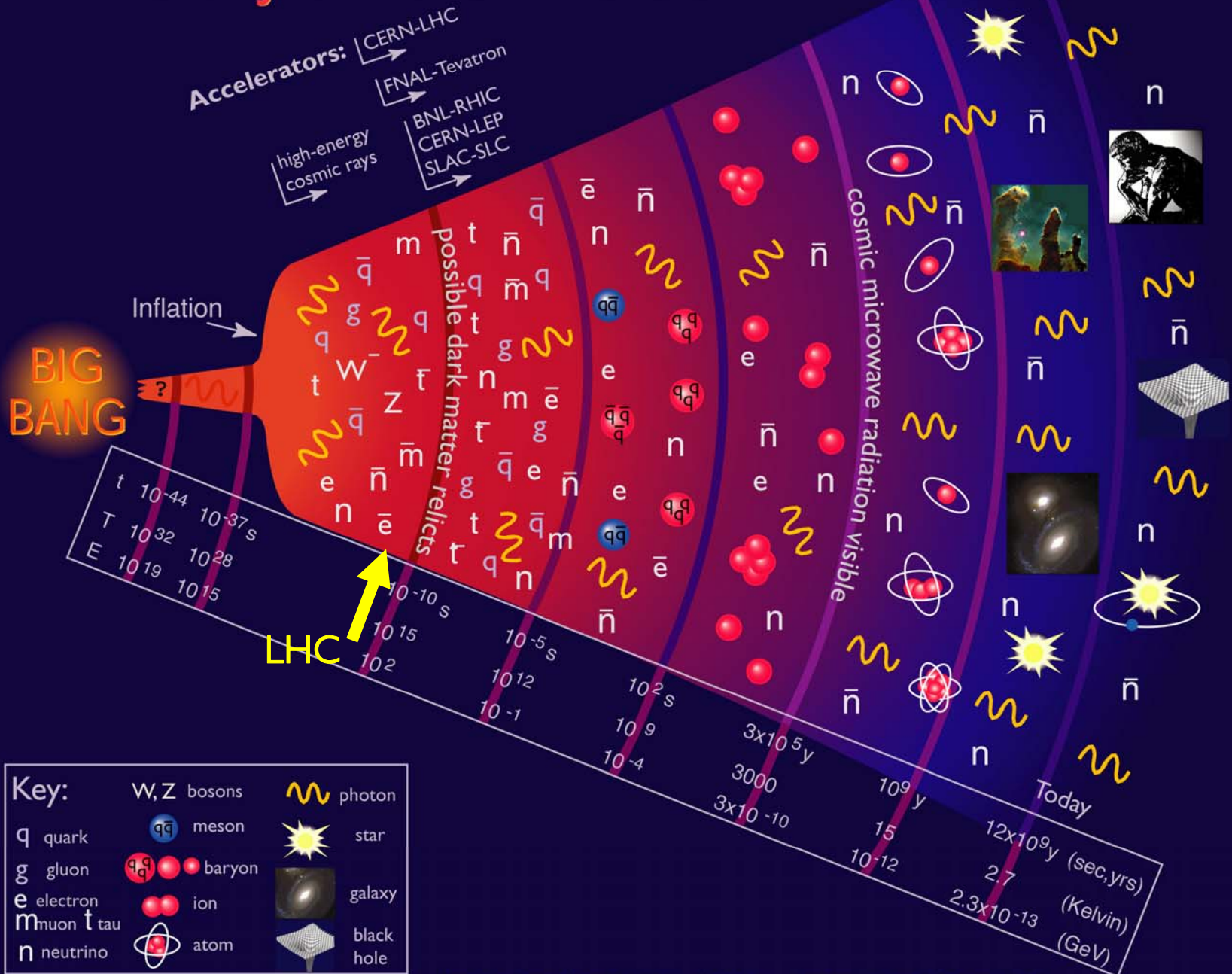
1 DVD di dati prodotto ogni 10 sec.

4 grandi esperimenti (Atlas, Cms, Alice, Lhcb)

CERN Accelerators (not to scale)



History of the Universe



Il Problema della Materia Oscura

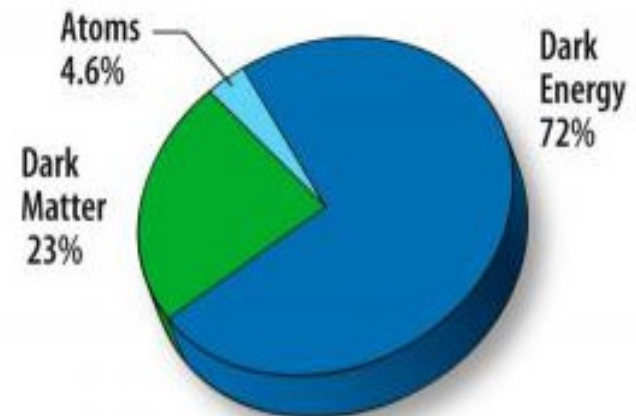
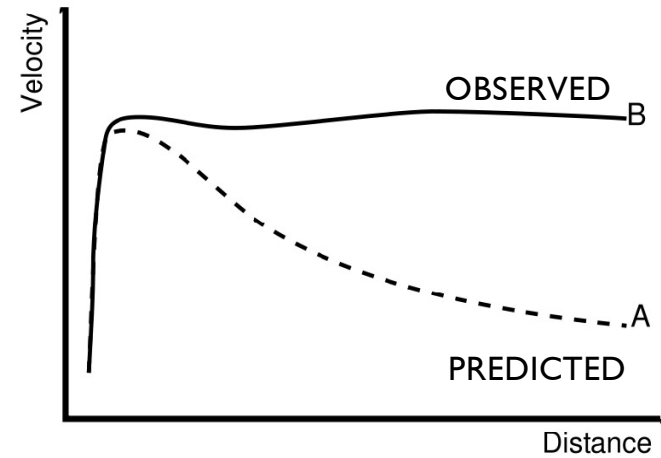
I cosmologi, che hanno tentato di calcolare il contenuto di massa dell'Universo, si sono trovati davanti il seguente problema:

dalle misure della velocità delle stelle periferiche delle Galassie a Spirale, si può determinare – attraverso la meccanica classica – la massa.

Dalle misure si deduce che c'è molta più materia nell'Universo di quanta se ne osservi (Galassie, gas intergalattico, raggi cosmici). La Materia Oscura è almeno 5 volte quella visibile.

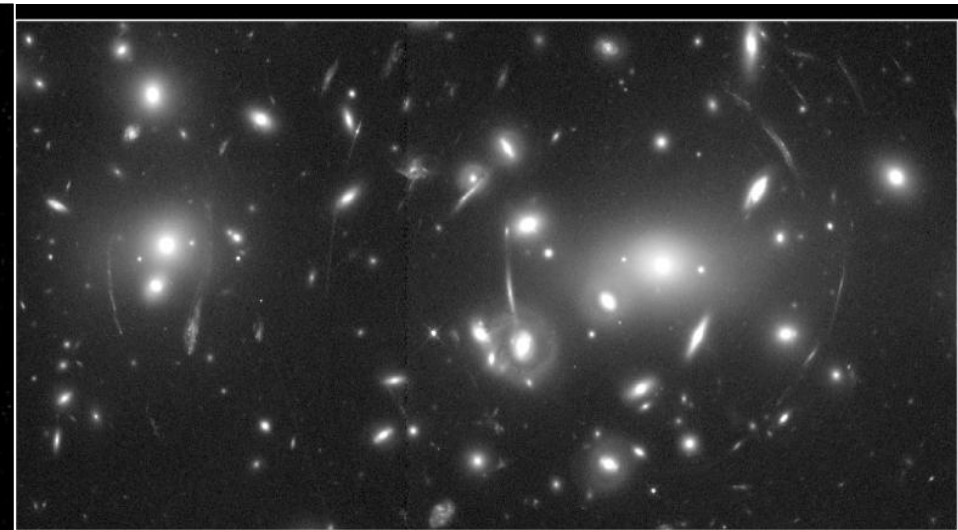
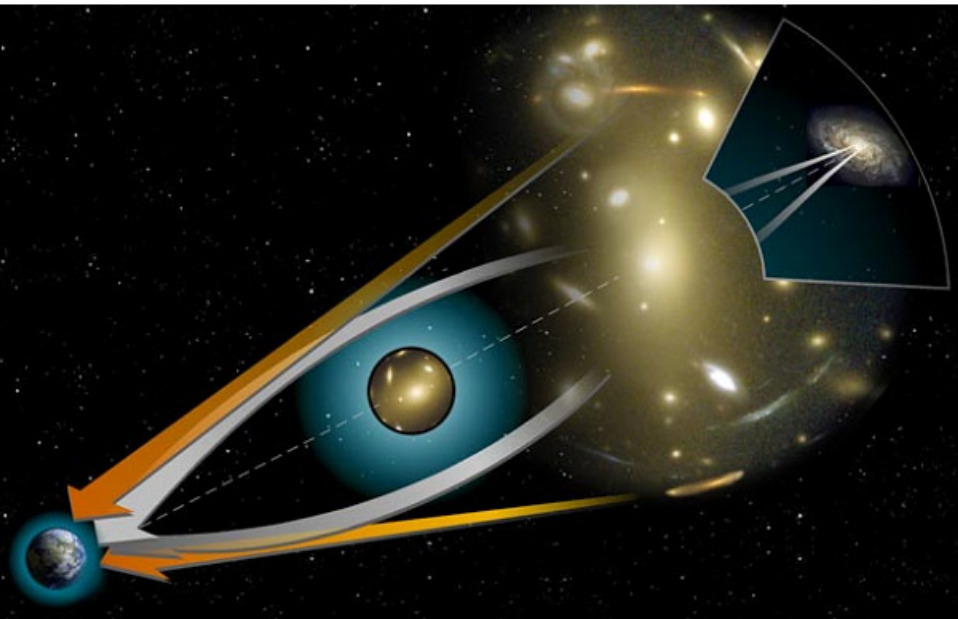
Da cosa è fatta questa materia oscura ?

Per molti anni si è pensato che fosse dovuta ad una massa – piccola – dei neutrini. Le misure sperimentali però escludono questa ipotesi.



Una spettacolare indicazione della Materia Oscura

La teoria della Gravitazione di Einstein prevede che il campo di un oggetto molto massivo possa deviare significativamente la luce (Lenti Gravitazionali).



Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

Ci sono ormai molte osservazioni di oggetti celesti dei quali si osservano immagini speculari ed anelli di luce dovuti a questi effetti e causati da materia oscura che si frappone tra noi e l'oggetto osservato.

Il merito di molti dei progressi in Cosmologia va all'Hubble Space Telescope

Un candidato per la Materia Oscura

LHC potrebbe scoprire una nuova simmetria della materia (“Supersimmetria”) che potrebbe spiegare l’enigma della Materia Oscura

Per ogni particella fondamentale (fermione $\text{spin}=1/2$ o bosone $\text{spin}=0,1$) esisterebbe un partner di statistica opposta (s-fermioni o s-bosoni) con masse dell’ordine di varie centinaia di GeV che però sarebbero instabili.

Nella catena di decadimenti delle s-particelle, deve sempre essere conservata almeno una particella di tipo-s (conservazione del numero s). Ne rimarrebbe quindi sempre una, la più leggera (LSP), che non può decadere e quindi rimane stabile (**neutralino**).

Si pensa che tale particella sia stata prodotta durante il Big Bang (quando c’era energia per creare particelle Supersimmetriche) e che da allora riempia lo spazio (“reliquia cosmica”).

La LSP è una particella neutra, ha interazioni molto deboli con la materia e, anche a LHC, è possibile osservarla solo indirettamente.

Il Meccanismo di Higgs

Esiste pero' ancora un elemento da verificare nello SM, prima di poterlo "buttare via" e sostituirlo con qualcosa di nuovo: la scoperta della *particella di Higgs*

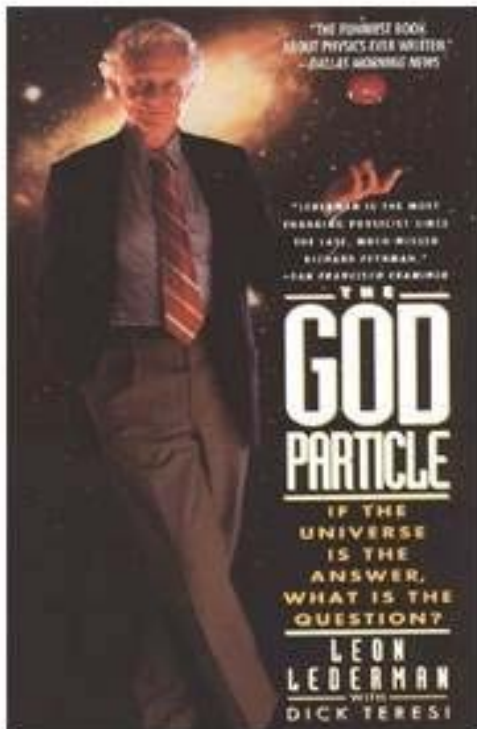
Il meccanismo di Higgs e' un elemento cruciale dello SM. Ha la funzione di:

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

La teoria prevede l'esistenza di una particella molto pesante, di spin 0 ("scalare")

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

Le attuali misure prevedono che abbia una massa compresa tra 120 e 200 GeV, comunque inferiore, per motivi teorici, ad 1 TeV



Come il campo di Higgs genera le masse



"Empty" space, which is filled with the Higgs field, is like a beach full of children.



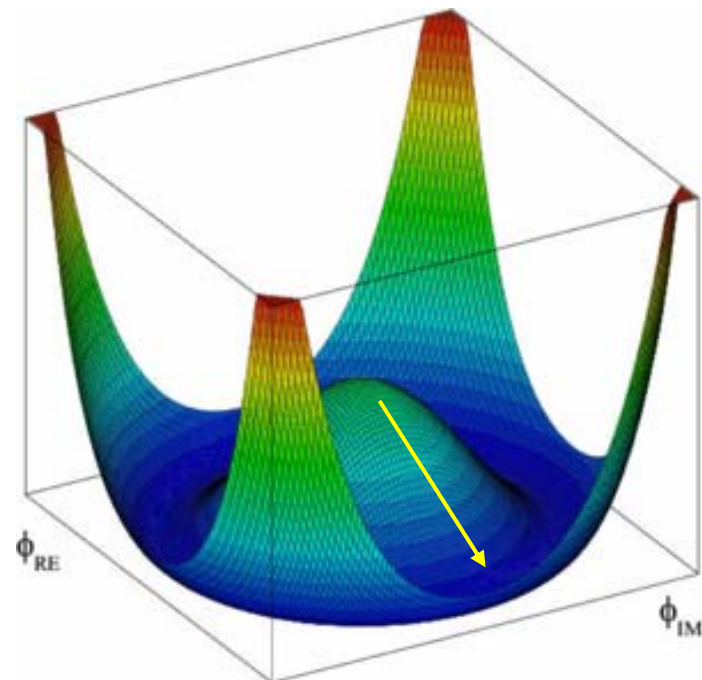
A particle crossing that region of space is like an ice cream vendor arriving ...



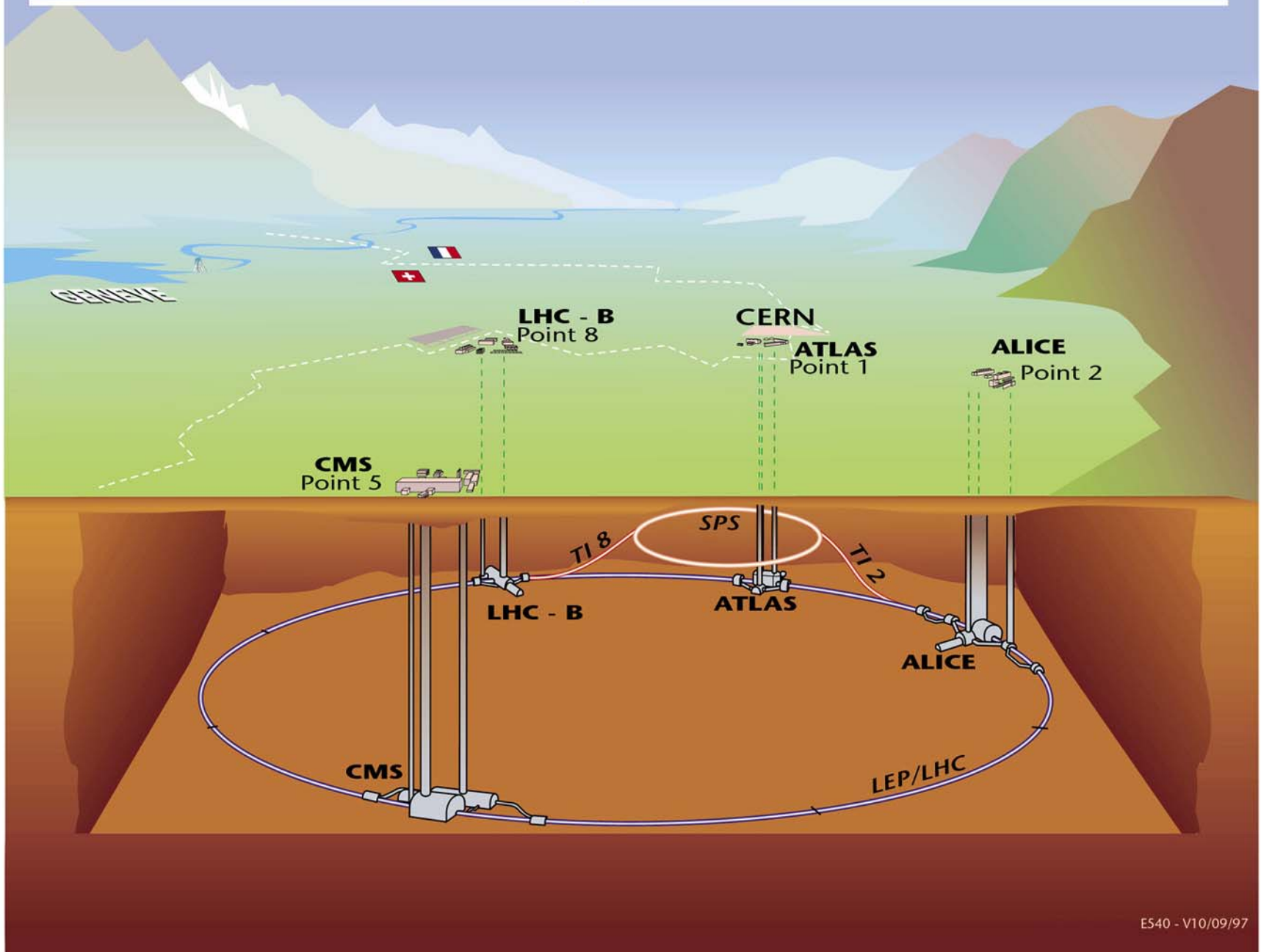
... and interacting with kids who slow him down—as if he acquires "mass."

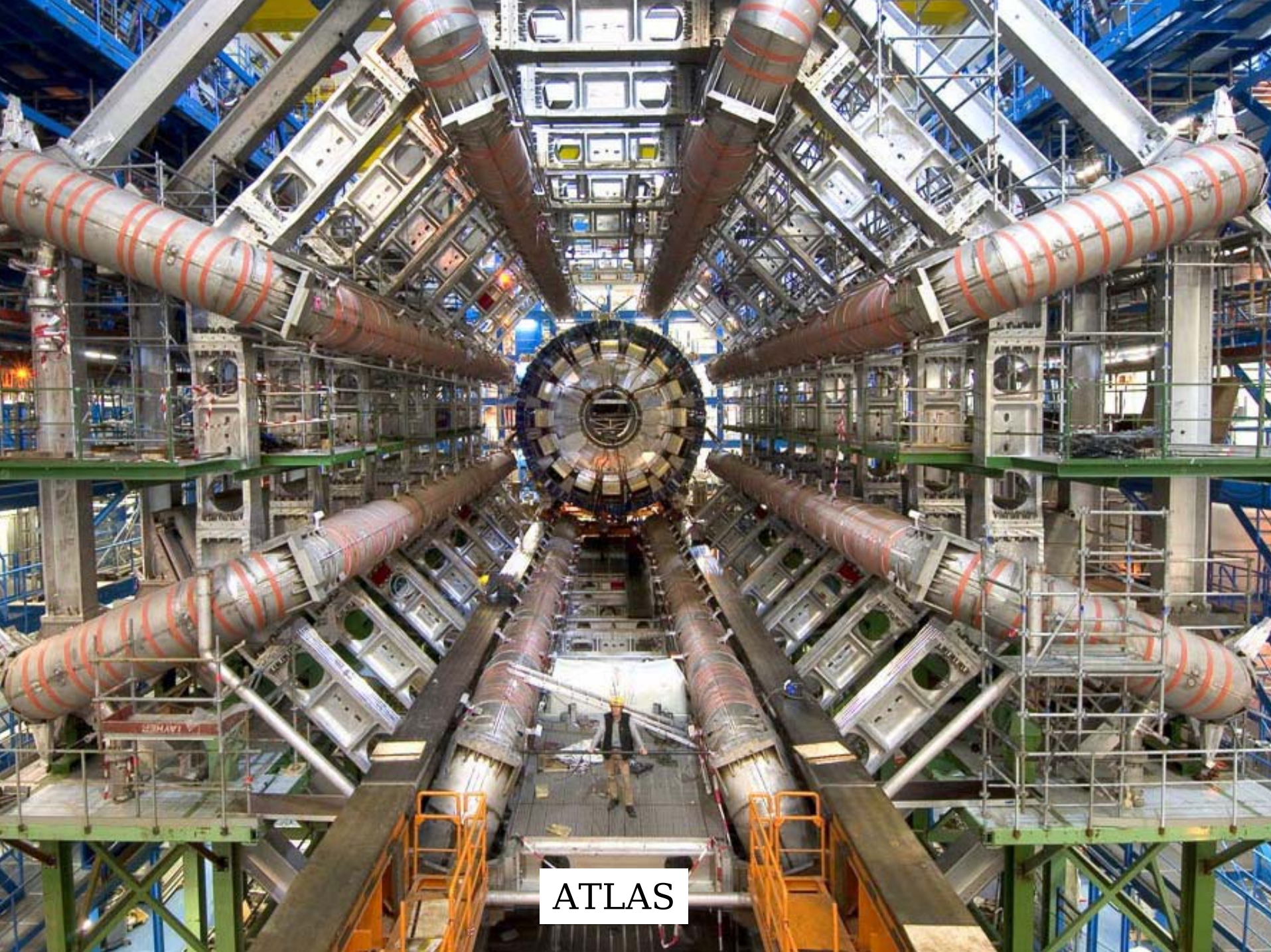
Il Meccanismo di Higgs ha una profonda analogia anche in Meccanica Classica: quella della **rottura spontanea della simmetria**, che accade tutte le volte nelle quali i sistemi hanno una condizione di equilibrio instabile

E' analogo a quello che accade nel fenomeno della Superconduttività'



Overall view of the LHC experiments.





ATLAS

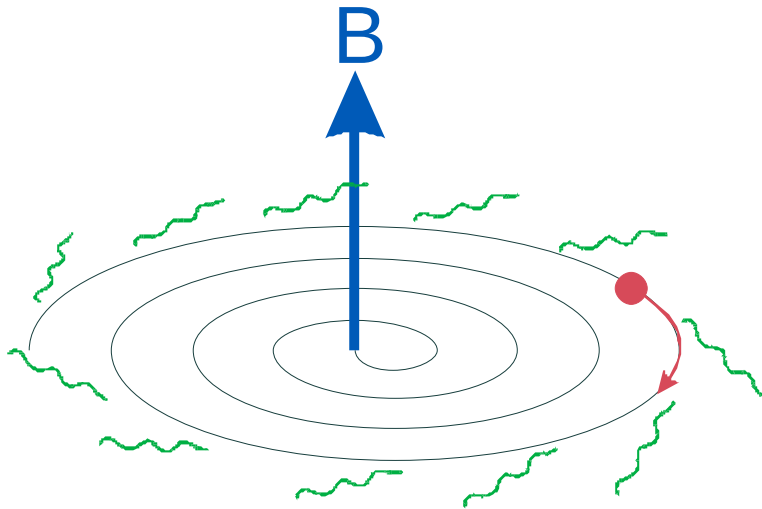


CMS

Il futuro (degli acceleratori) che verra'

Il grafico di Livingstone ci dice che siamo arrivati al termine del cammino, a meno di non cambiare tecnologia accelerante

Per i **collider ad elettroni** c'e' un limite dovuto all'emissione di Luce di Sincrotrone da un **e-** in campo magnetico

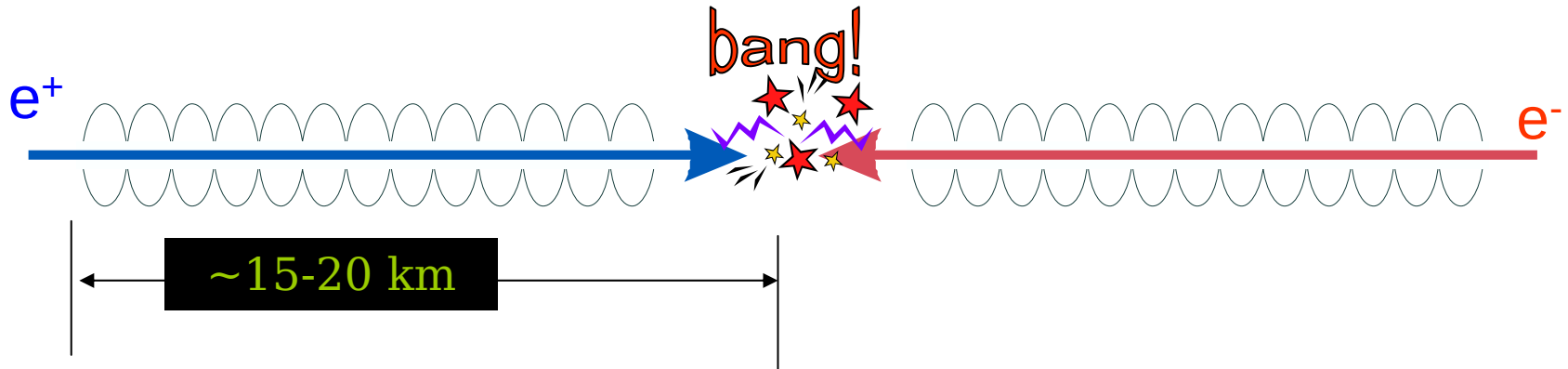


$$\Delta E / rev = \frac{C_{\gamma} E^4}{\rho}$$

L'energia deve essere fornita dal sistema RF: $\propto E_{cm}^2$

Per i **collider a protoni**, c'e' un limite al campo magnetico massimo ottenibile, anche con magneti superconduttori

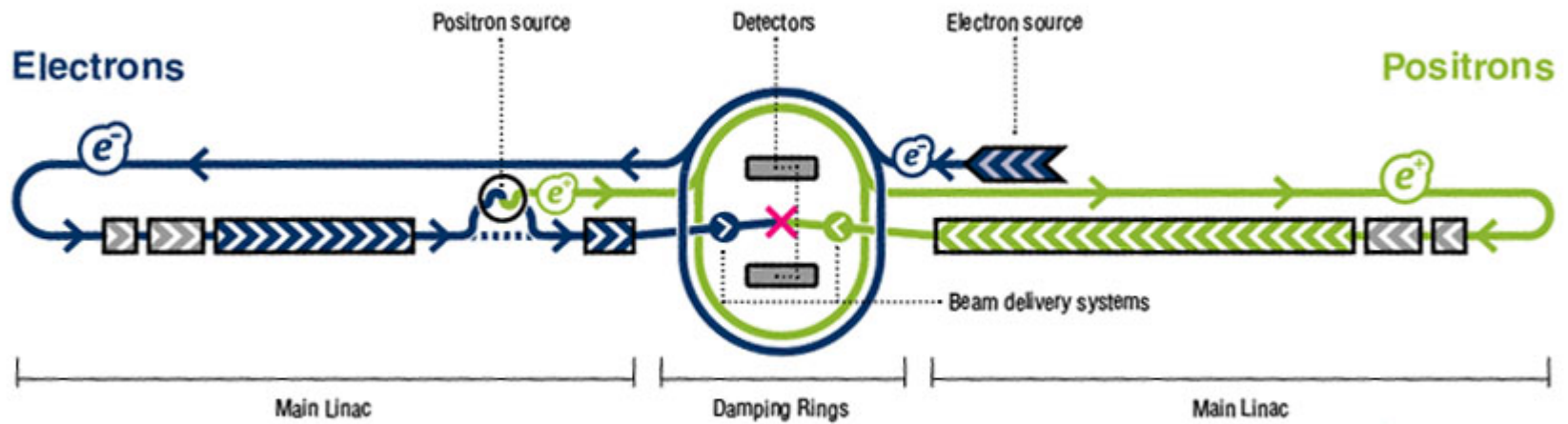
Per i collider ad elettroni, e' escluso che ce ne possano essere altri circolari. Si sta pensando ad un collider lineare (LC)



Per una macchina con $E_{cm} = 1 \text{ TeV}$, servirebbe un gradiente di accelerazione pari a $G = 500 \text{ GV} / 15 \text{ km} = 35 \text{ MV/m}$ (possibile !)

Per il Linear Collider, $\$ \propto E_{cm}$





Il **Linear Collider** partirà (2020?) quando saranno più chiare, dai primi risultati di LHC, le future linee di Ricerca di Nuova Fisica

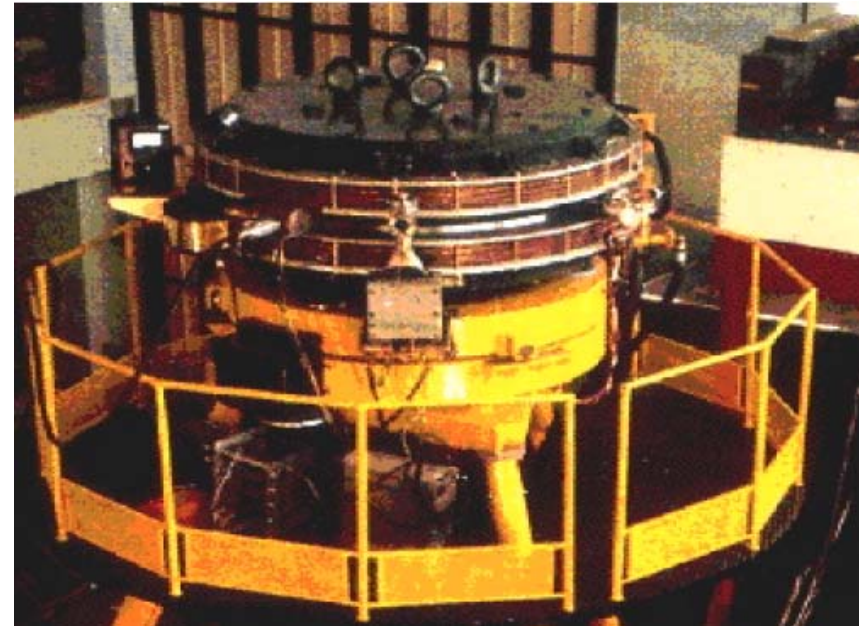
Nel frattempo, la Comunità Internazionale si sta preparando da vari anni, studiando gli apparati e l'acceleratore



L'eredita' di Bruno Touschek

Certamente, quando nel marzo del 1960, propose di far collidere fasci di elettroni con positroni con il prototipo AdA (Anello di Accumulazione) di 2 m di diametro, nessuno avrebbe potuto immaginare che decine di collider, fino all'LHC (con un'energia 30,000 volte superiore) sarebbero stati

costruiti in tutto il mondo, sfruttando le intuizioni di questo bizzarro e geniale fisico austriaco, trapiantato in Italia.



L'eredita' di B. Touschek e' scientifica, ma anche morale.

Uno scienziato che ha conosciuto la discriminazione razziale, ma che ha saputo sempre essere anticonformista ed originale nelle sue intuizioni.

Non si sarebbe riconosciuto in questa societa' cosi' "omologata"



B. Toushek 1921-1978

