



Alla scoperta dei bosoni W e Z: dal collider protone-antiprotone al Large Hadron Collider

Domizia Orestano
Universita' Roma Tre

INCONTRI DI FISICA 2013
INFN - LABORATORI NAZIONALI DI FRASCATI
9/10/2013



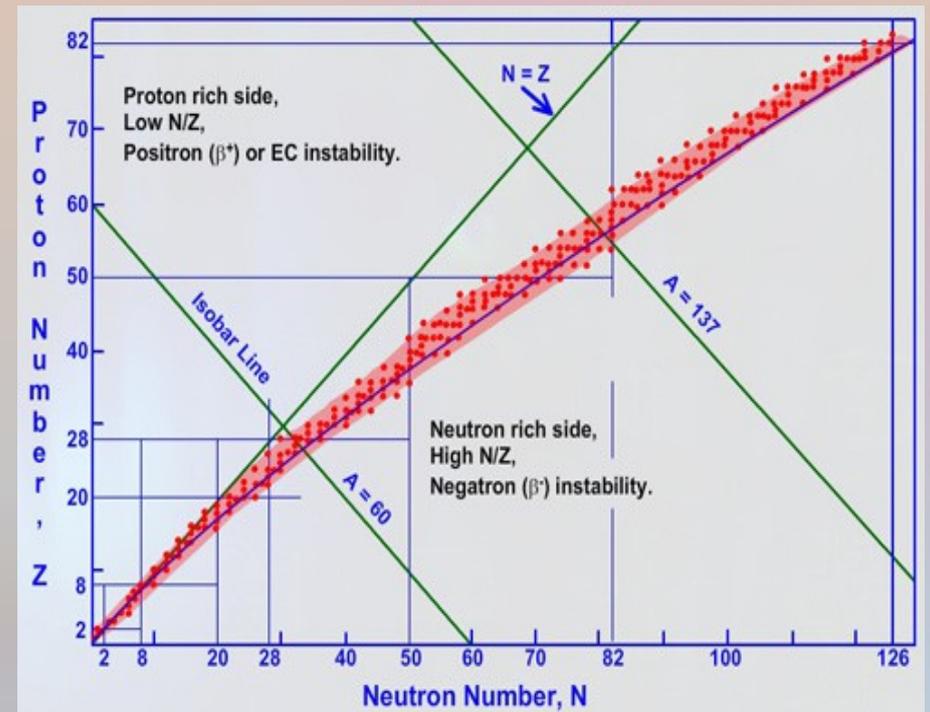
Sommario

- Interazioni deboli cariche
- Interazioni elettrodeboli
- Scoperta delle correnti neutre
- La scoperta dei bosoni W e Z
- Lo studio dei bosoni W e Z
- W e Z come strumento di scoperta



IL corpo umano...

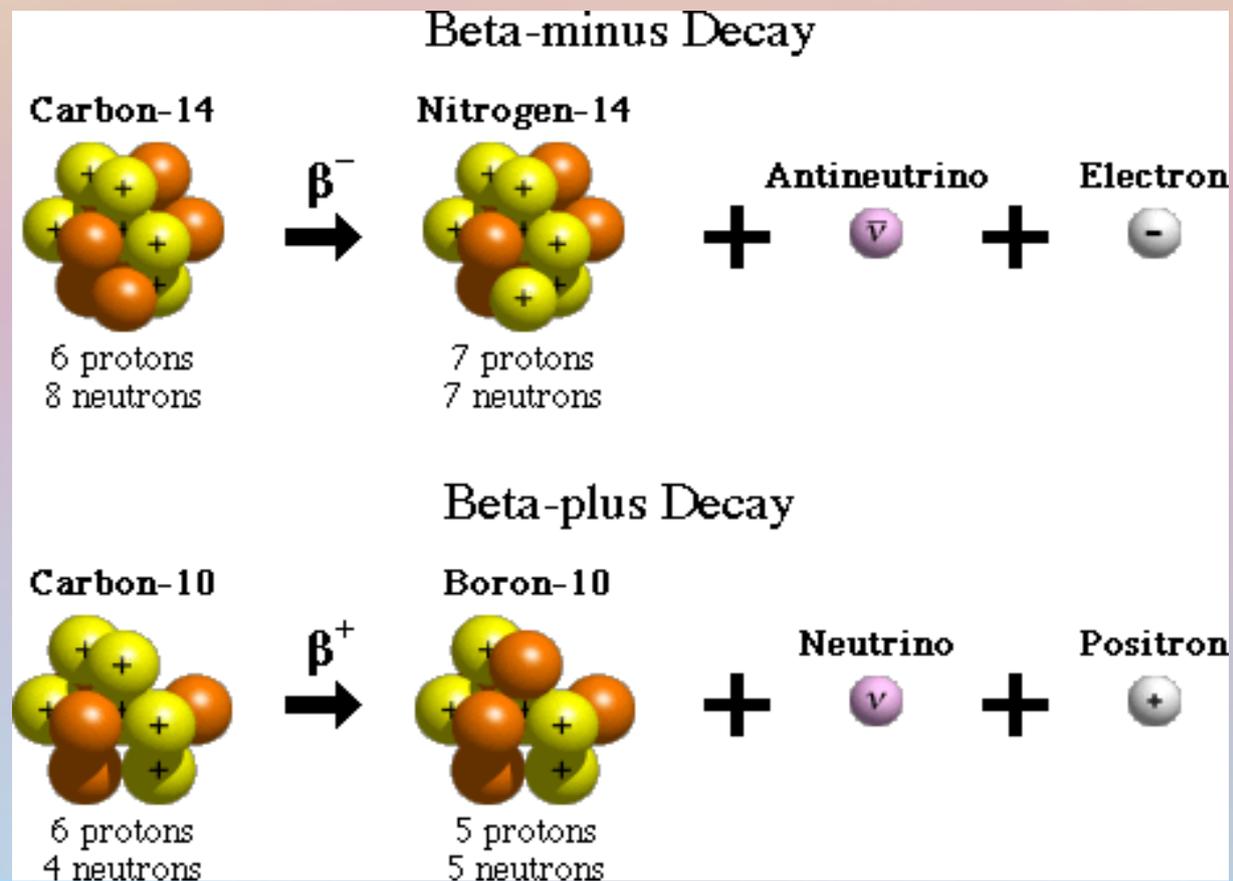
- e' fatto di cellule, fatte a loro volta di diversi elementi
- puo' sembrarci stabile ma alcuni suoi costituenti possono riservarci delle sorprese
- Il carbonio, elemento fondamentale per la vita, ad esempio, ha un isotopo, C^{14} , con 8 neutroni e 6 protoni, che trova conveniente trasformarsi nello stabilissimo N^{14}





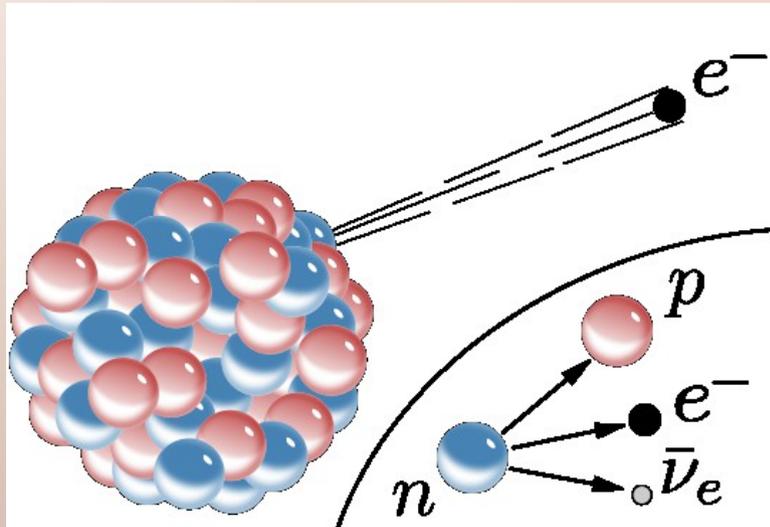
Decadimento beta nucleare

- Questa trasformazione non e' gratis!
- Si deve conservare la carica elettrica





Teoria di Fermi



1933



- Interazione a 4 fermioni
- Probabilità di interazione calcolabili, capacità predittiva
- E' un successo!

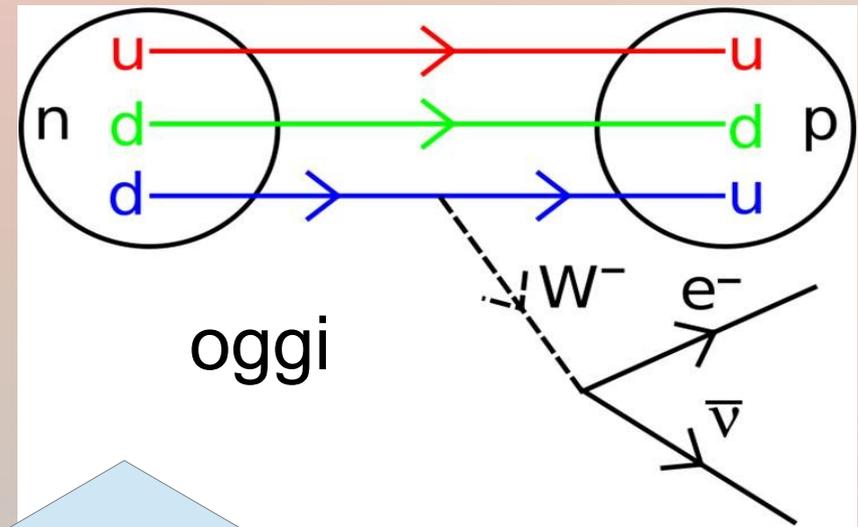
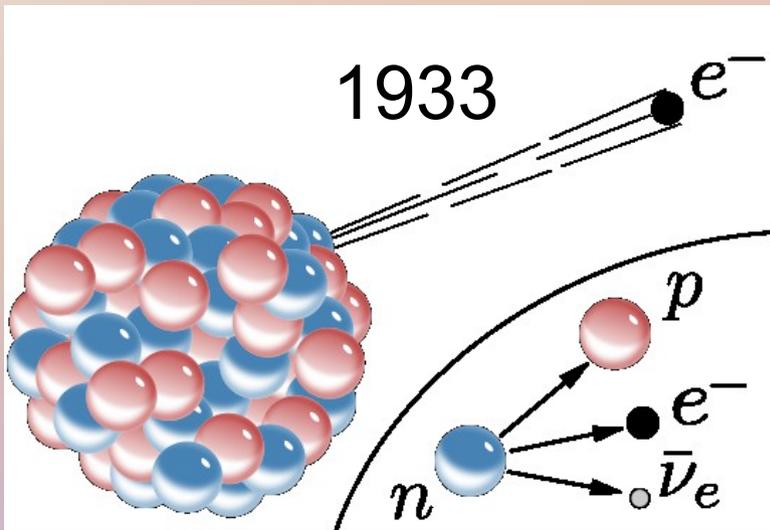


I bosoni W





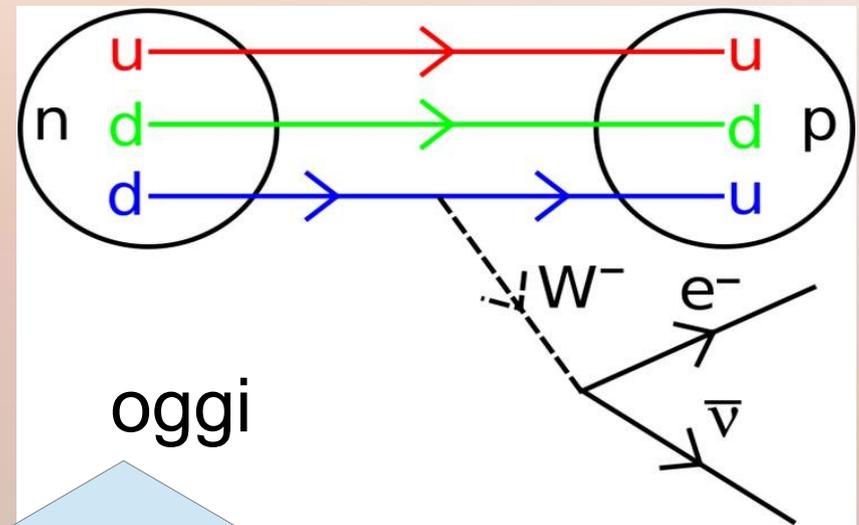
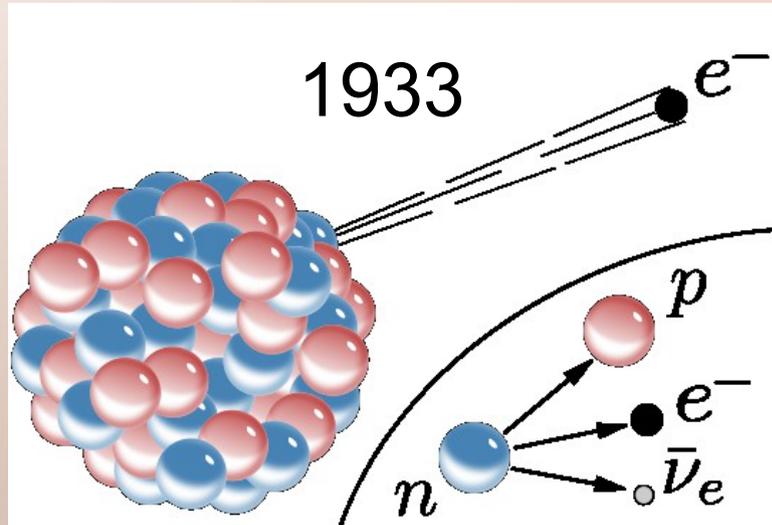
I bosoni W



Cosa e' cambiato?



I bosoni W

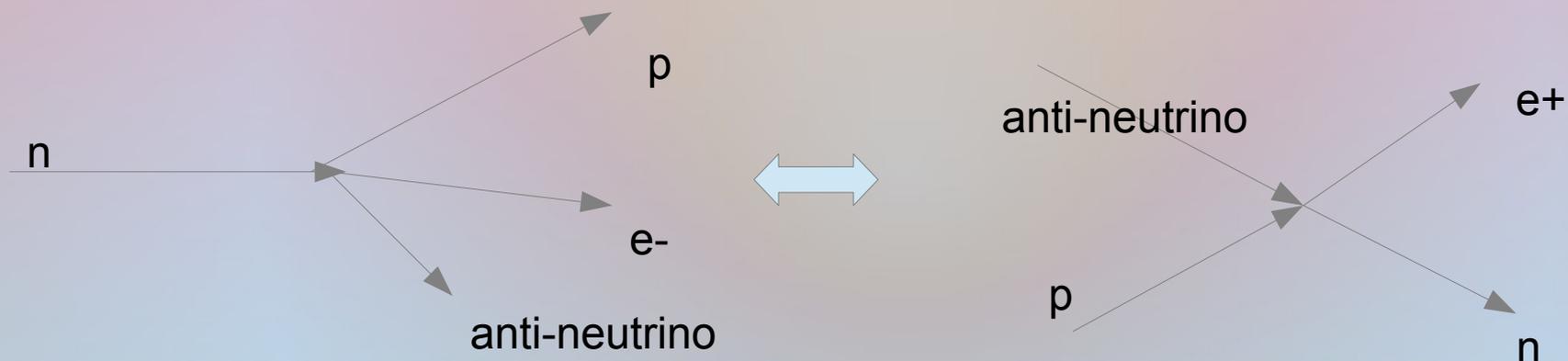


- Neutrone e protone sono composti da quark
- L'interazione non e' piu' di contatto ma come in QED abbiamo un mediatore! (anzi 2...)



I bosoni W

- Bosoni mediatori W^+ e W^-
- Introdotti
 - In analogia con la QED
 - Per impedire la divergenza ad alte energie della probabilita' di interazione dei neutrini





QED:
Elettrodinamica Quantistica

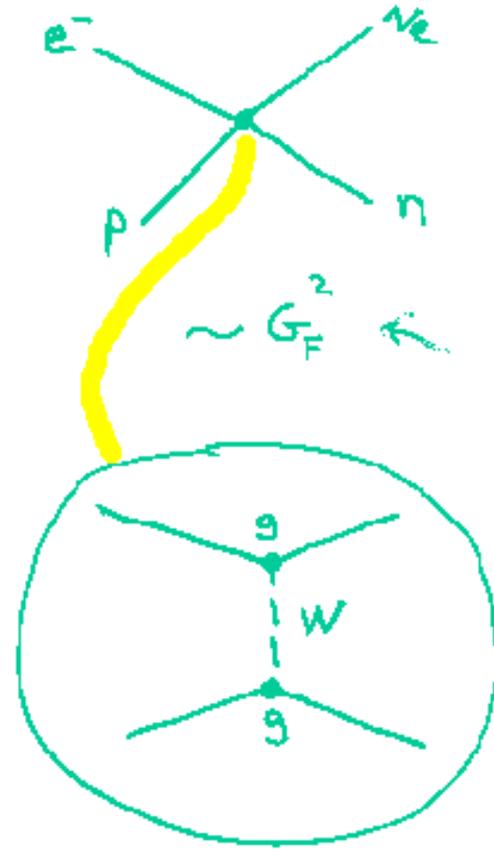
4-Fermion Interactions



$$\sim \frac{e^4}{q^4}$$

Coulomb Potential

$$V(r) \sim \frac{e}{r}$$



$$\sim \frac{g^4}{(g^2 - M_W^2)^2} \xrightarrow{M_W^2 \gg g^2} \frac{g^4}{M_W^4}$$

Yukawa Potential

$$V(r) \sim \frac{g}{r} e^{-r M_W}$$

Interazione Debole Carica



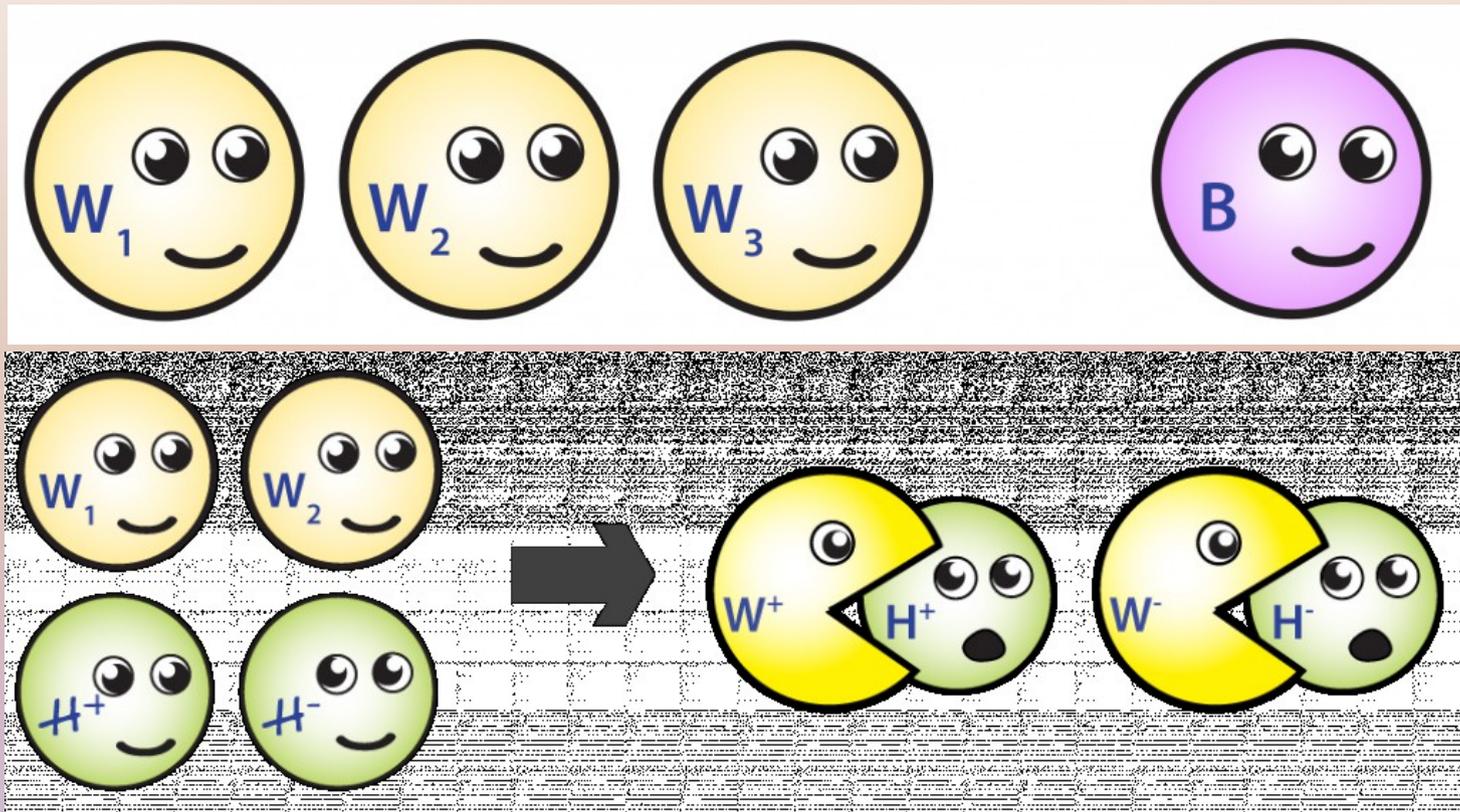
Teoria elettrodebole



<http://www.quantumdiaries.org>



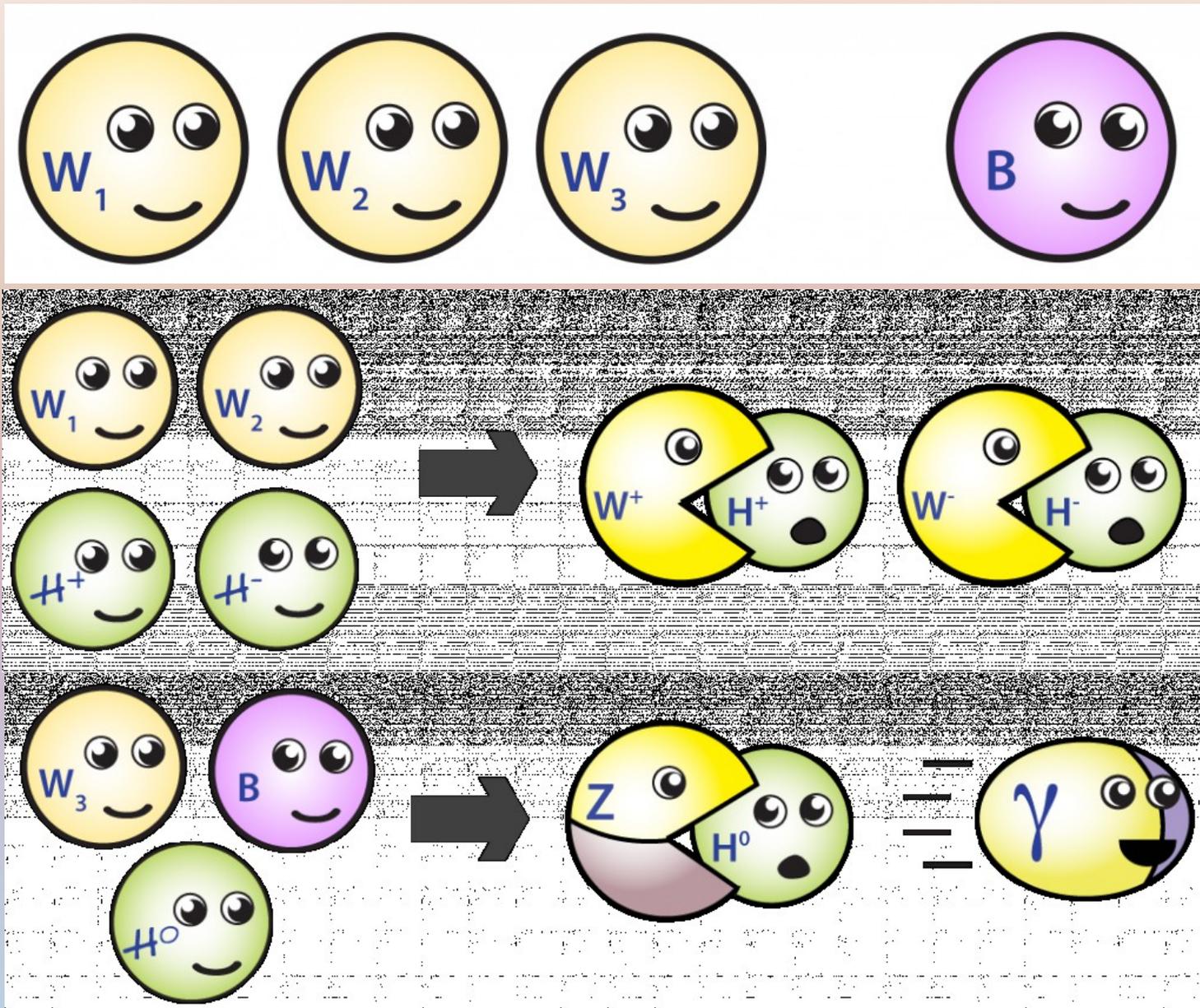
Teoria elettrodebole



<http://www.quantumdiaries.org>



Teoria elettrodebole



<http://www.quantumdiaries.org>



IL bosone Z





IL bosone Z



- Il modello prevede quindi l'esistenza di un bosone mediatore neutro pesante in grado di mediare interazione deboli senza variazione di carica elettrica
- Debolezza dell'interazione \Rightarrow mascherata dall'interazione elettromagnetica
- Se ne cercano gli effetti nei processi che coinvolgono i neutrini!



Promemoria

- Le particelle di materia nel modello standard sono
 - Quark: sensibili a interazioni forti, e.m. e deboli
 - Leptoni: non sensibili alle interazioni forti
 - Carichi: sensibili alle interazioni e.m. e deboli
 - Neutri: sensibili solo alle interazione deboli ←

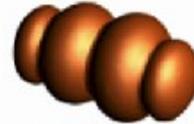


Leptons

Tau		-1	0		Tau Neutrino
Muon		-1	0		Muon Neutrino
Electron		-1	0		Electron Neutrino
Electric Charge					

Strong

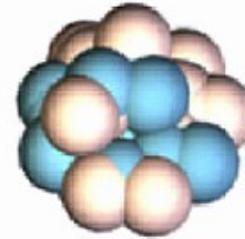
Gluons (8)



Quarks



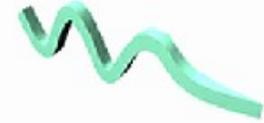
Mesons
Baryons



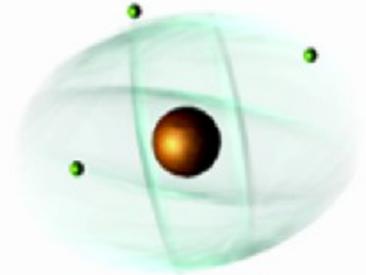
Nuclei

Electromagnetic

Photon



Atoms
Light
Chemistry
Electronics



Quarks

Electric Charge					
Bottom		-1/3	2/3		Top
Strange		-1/3	2/3		Charm
Down		-1/3	2/3		Up
each quark: R, B, G 3 colors					

Gravitational

Graviton ?

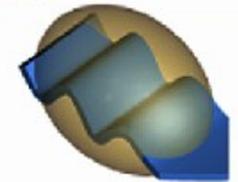


Solar system
Galaxies
Black holes

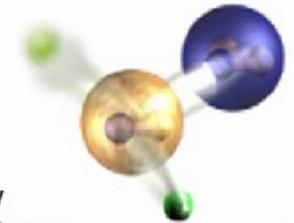


Weak

Bosons
(W,Z)

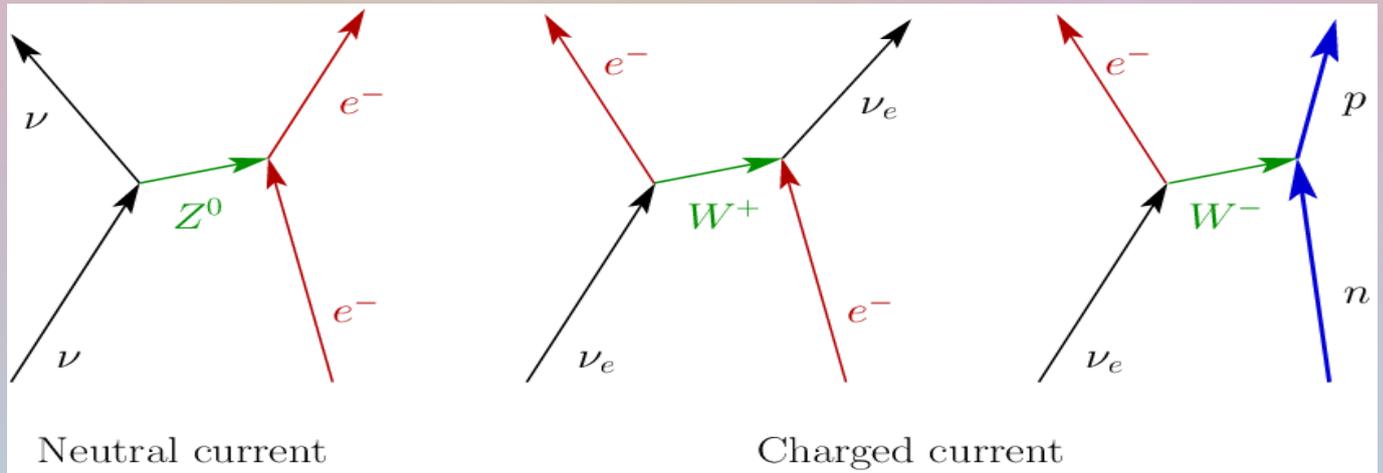
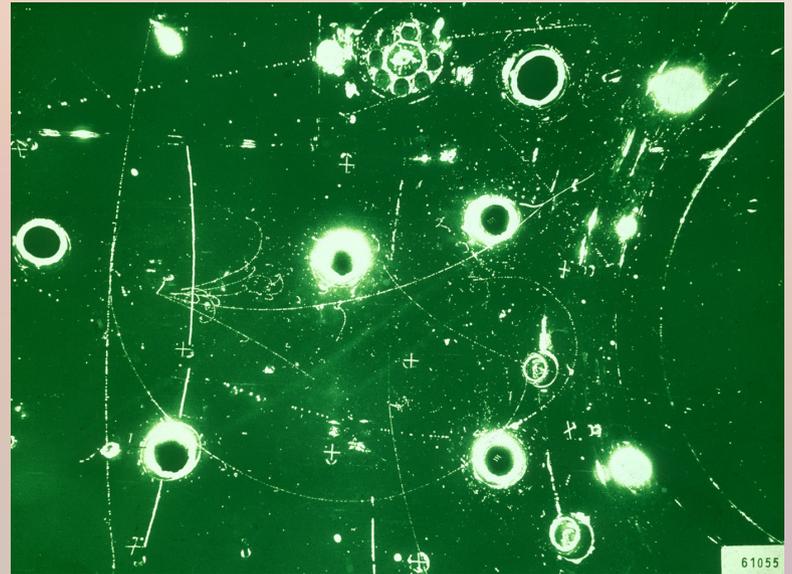
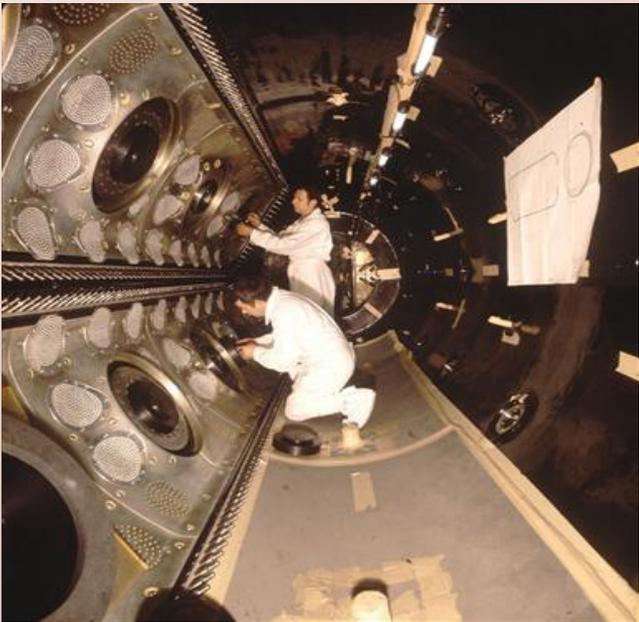


Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino interactions
Burning of the sun





1973: La scoperta delle correnti neutre





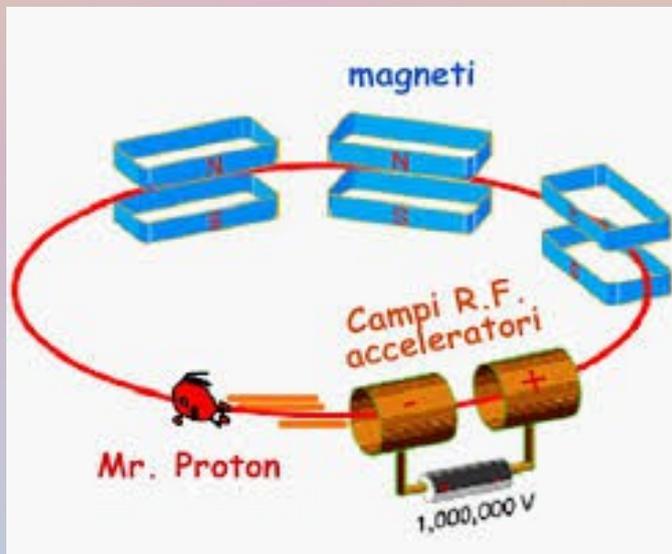
Inizio anni '70

- Evidenze sperimentali:
 - Diffusione profondamente anelastica elettrone-protona \Rightarrow esiste una struttura interna
 - Correnti neutre \Rightarrow esiste una interazione debole neutra
- Quadro teorico:
 - Modello standard delle interazioni elettrodeboli con rottura spontanea di simmetria
- Previsione della massa dei bosoni W dall'intensità delle interazioni deboli rispetto a quelle e.m. $\Rightarrow \sim 80 \text{ GeV}$ e si sa che per produrli servono urti quark-anti-quark



timeline.web.cern.ch

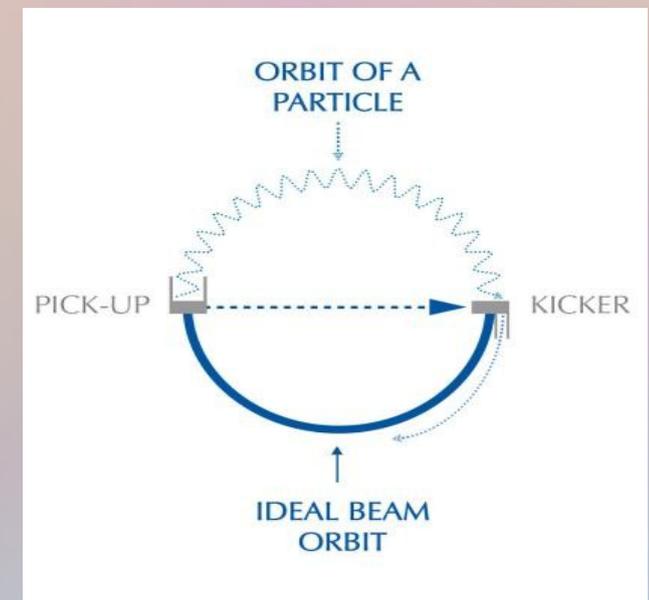
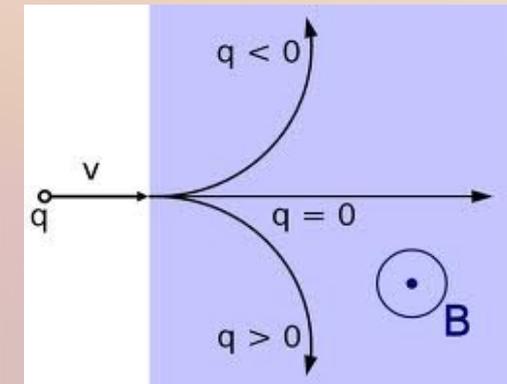
- IL CERN costruistruisce l'SPS (Super Proto Sincrotrone)
- Questo e' progettato per fornire protoni da 400 GeV per applicazioni a bersaglio fisso
- La costruzione ha inizio il 19 Febbraio 1971





timeline.web.cern.ch

- Lo stesso anello a vuoto che ospita i protoni nell'SPS puo' ospitare contemporaneamente un fascio di anti-protoni che viaggia nella direzione opposta (legge di Lorentz!)
- SPS puo' quindi diventare un collisionatore p-anti-p
- Ma affinche' le collisioni possano avvenire con un'intensita' utile e' necessario che il fascio di anti-protoni sia "raffreddato"
- Nel 1972 Simon van der Meer scrive il lavoro sul raffreddamento stocastico





- Il 17 giugno L'SPS raggiunge l'energia di progetto
- 10 gg prima alla conferenza internazionale sui neutrini di Aachen, Carlo Rubbia, Peter McIntyre e David Cline suggeriscono di trasformare L'SPS in un collisore

APPENDIX A

Producing Massive Neutral Intermediate Vector Bosons with Existing Accelerators^(*)

C. Rubbia and P. McIntyre
Department of Physics
Harvard University
Cambridge, Massachusetts 02138

and

D. Cline
Department of Physics
University of Wisconsin
Madison, Wisconsin 53706

Cosa cambia? Il centro di massa e' fermo nel laboratorio. L'energia e' tutta* disponibile per creare nuove particelle, l'energia nel sistema del centro di massa da $\sqrt{2EM}$ diventa $2E$

* conta quella effettiva dei quark e non quella dei protoni/anti-protoni



timeline.web.cern.ch

- Nel periodo 1976-1978 il raffreddamento stocastico viene testato con un esperimento dedicato (Initial Cooling Experiment)
- Nel giugno 1978 il CERN Research Board approva la proposta di Rubbia e Collaboratori (Aachen, Annecy LAPP, Birmingham, CERN, Helsinki, Queen Mary College London, Collège de France Paris, Riverside, Rome, Rutherford, Saclay, Vienna e Wisconsin) per la realizzazione dell'esperimento UA1



Nel frattempo...



timeline.web.cern.ch



The Nobel Prize in Physics 1979

Sheldon Glashow, Abdus Salam, Steven Weinberg

The Nobel Prize in Physics 1979



Sheldon Lee Glashow



Abdus Salam



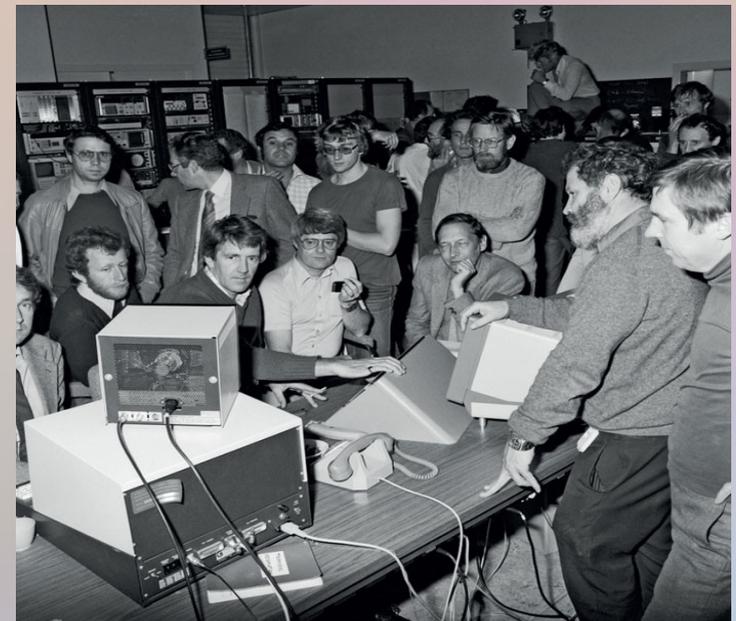
Steven Weinberg

The Nobel Prize in Physics 1979 was awarded jointly to Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam and Steven Weinberg *"for their contributions to the theory of the unified weak and electromagnetic interaction between elementary particles, including, inter alia, the prediction of the weak neutral current"*.



timeline.web.cern.ch

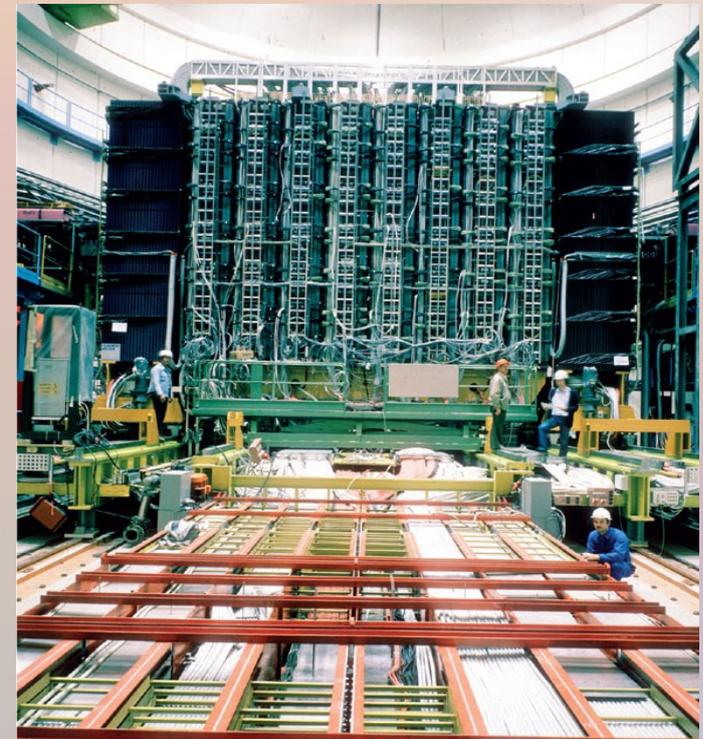
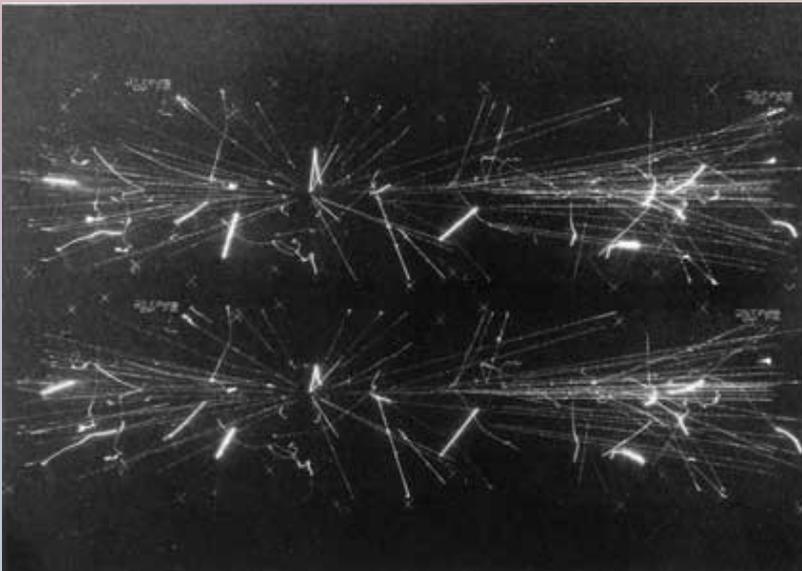
- 3 luglio: Vengono iniettati i primi protoni nell'accumulatore di anti-protoni AA. Successivamente sono state invertite le polarità dei magneti e sono stati accumulati e raffreddati i primi fasci di anti-protoni





timeline.web.cern.ch

- 7 luglio: Vengono accelerati i primi anti-protoni nell'SPS, fino a 270 GeV
- 10 luglio: il rivelatore UA1  osserva le prime collisioni tra protoni e anti-protoni

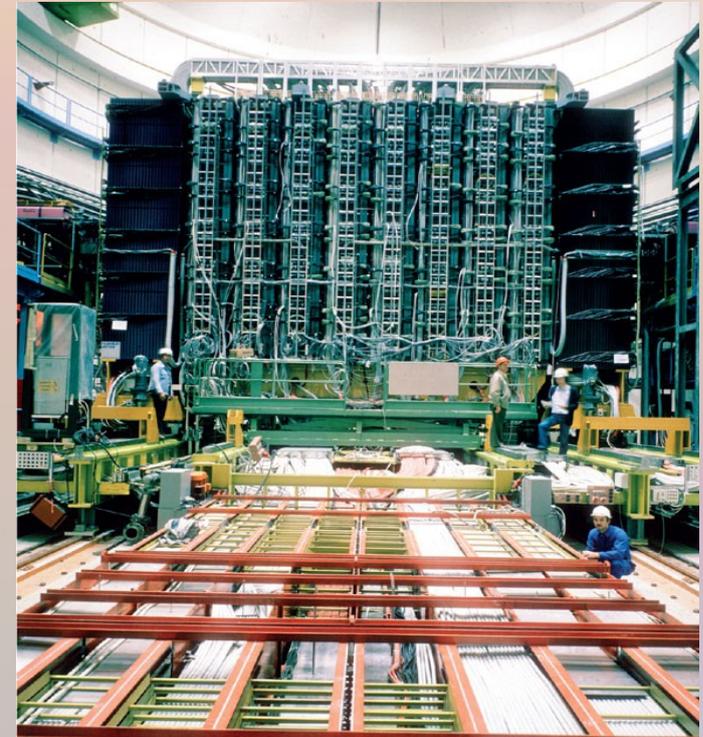
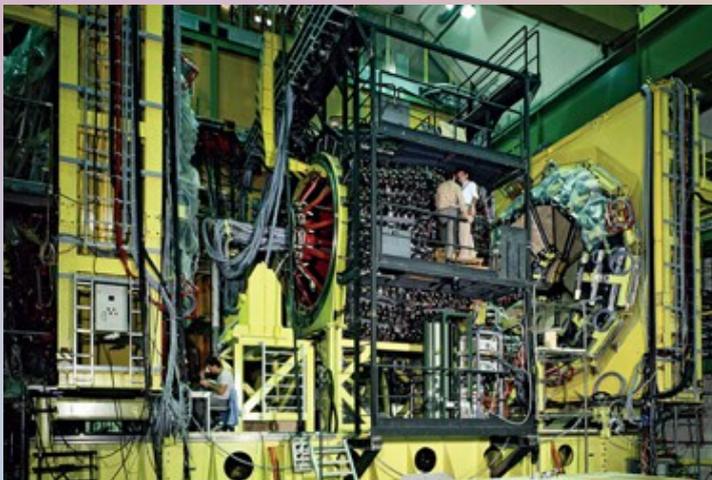


- Qualche collisione e' vista  anche dall'esperimento UAS poi sostituito da UA2



timeline.web.cern.ch

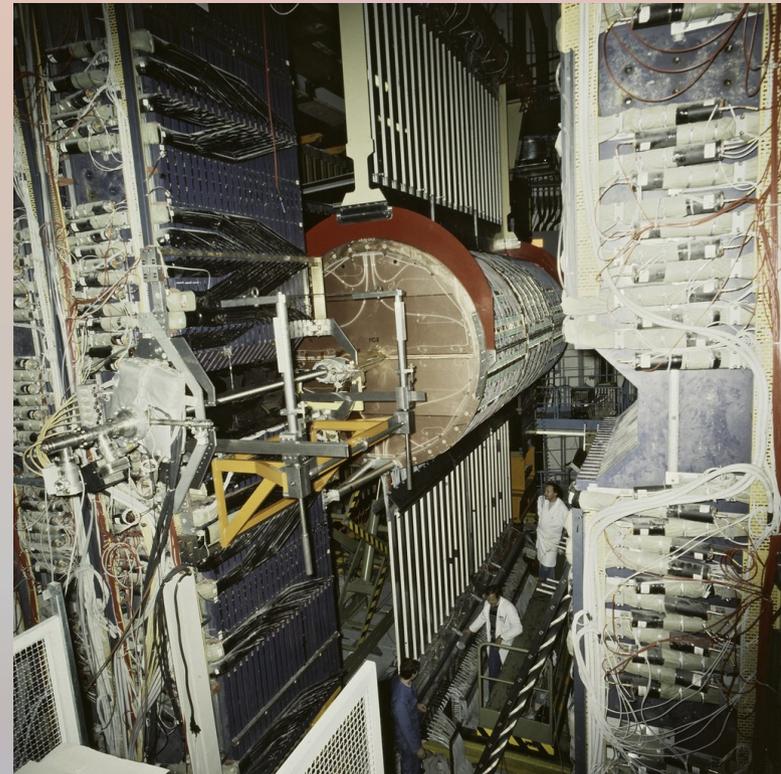
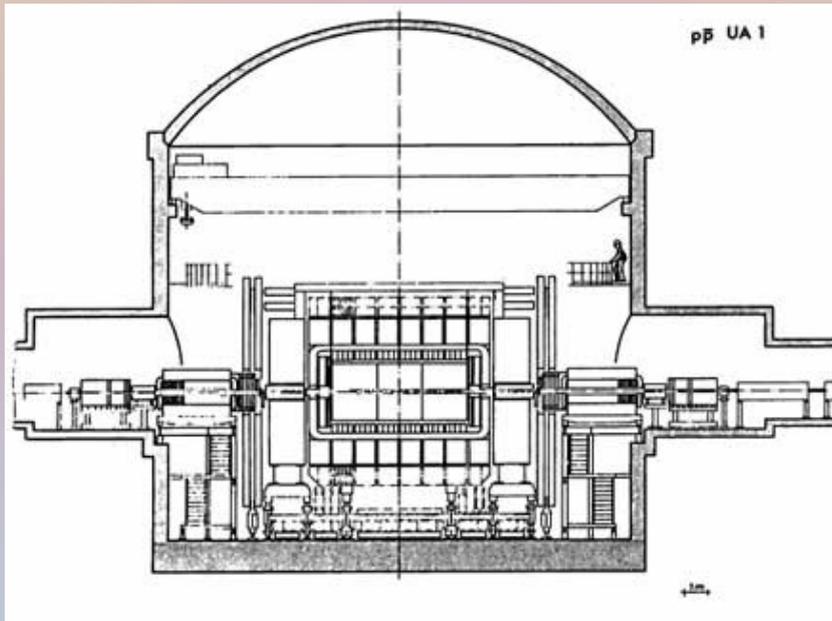
- 7 luglio: Vengono accelerati i primi anti-protoni nell'SPS, fino a 270 GeV
- 10 luglio: il rivelatore UA1 osserva le prime collisioni tra protoni e anti-protoni

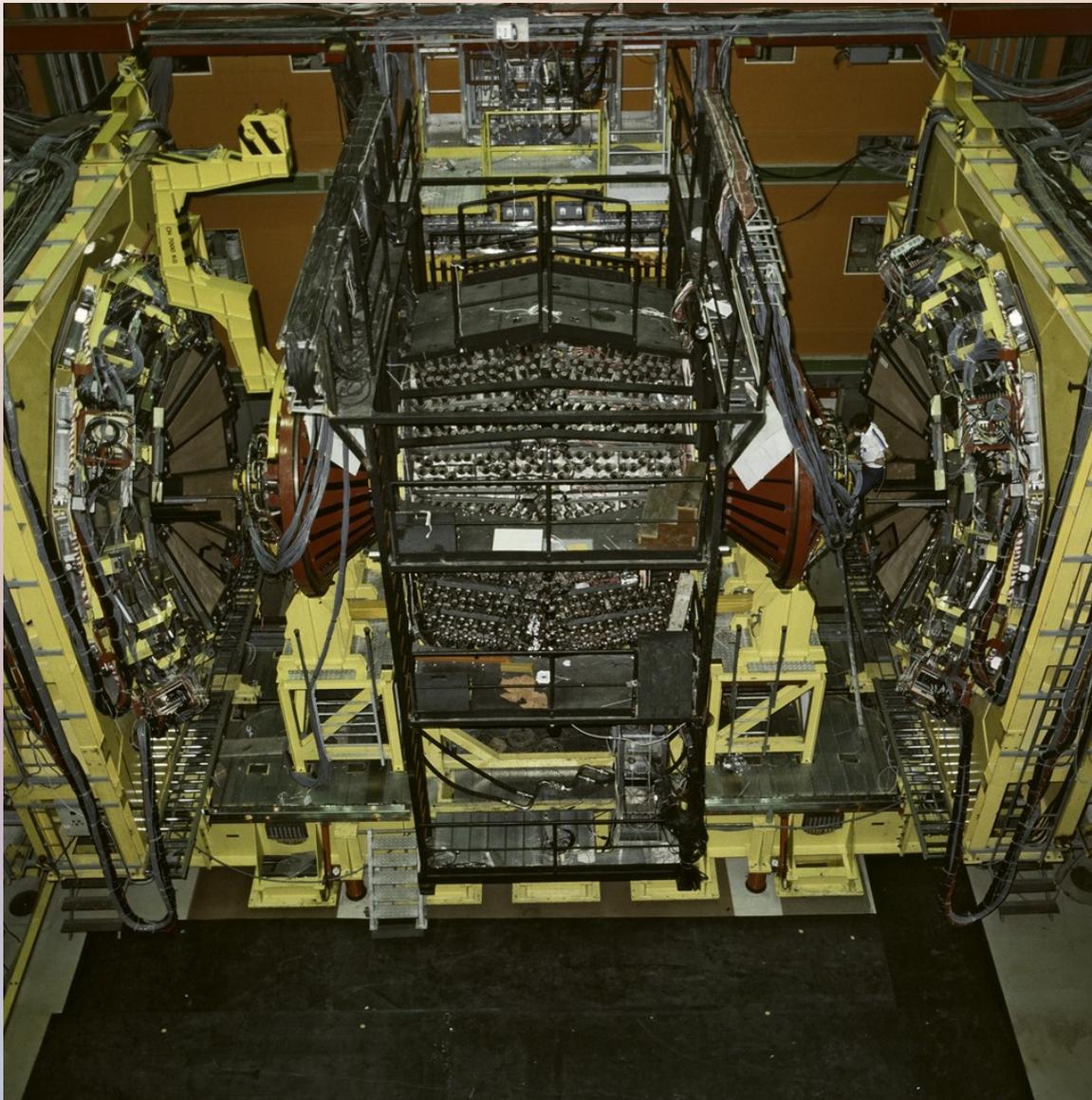


- L'esperimento UA2 entra in funzione a dicembre dello stesso anno

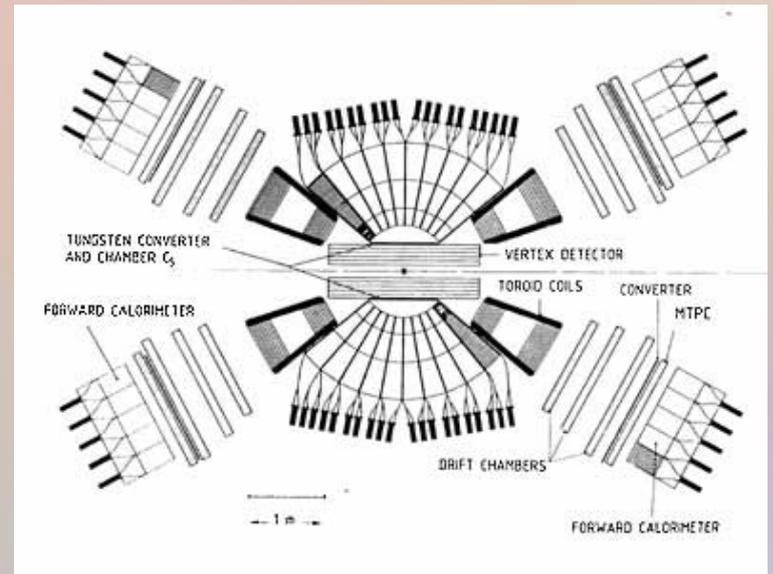


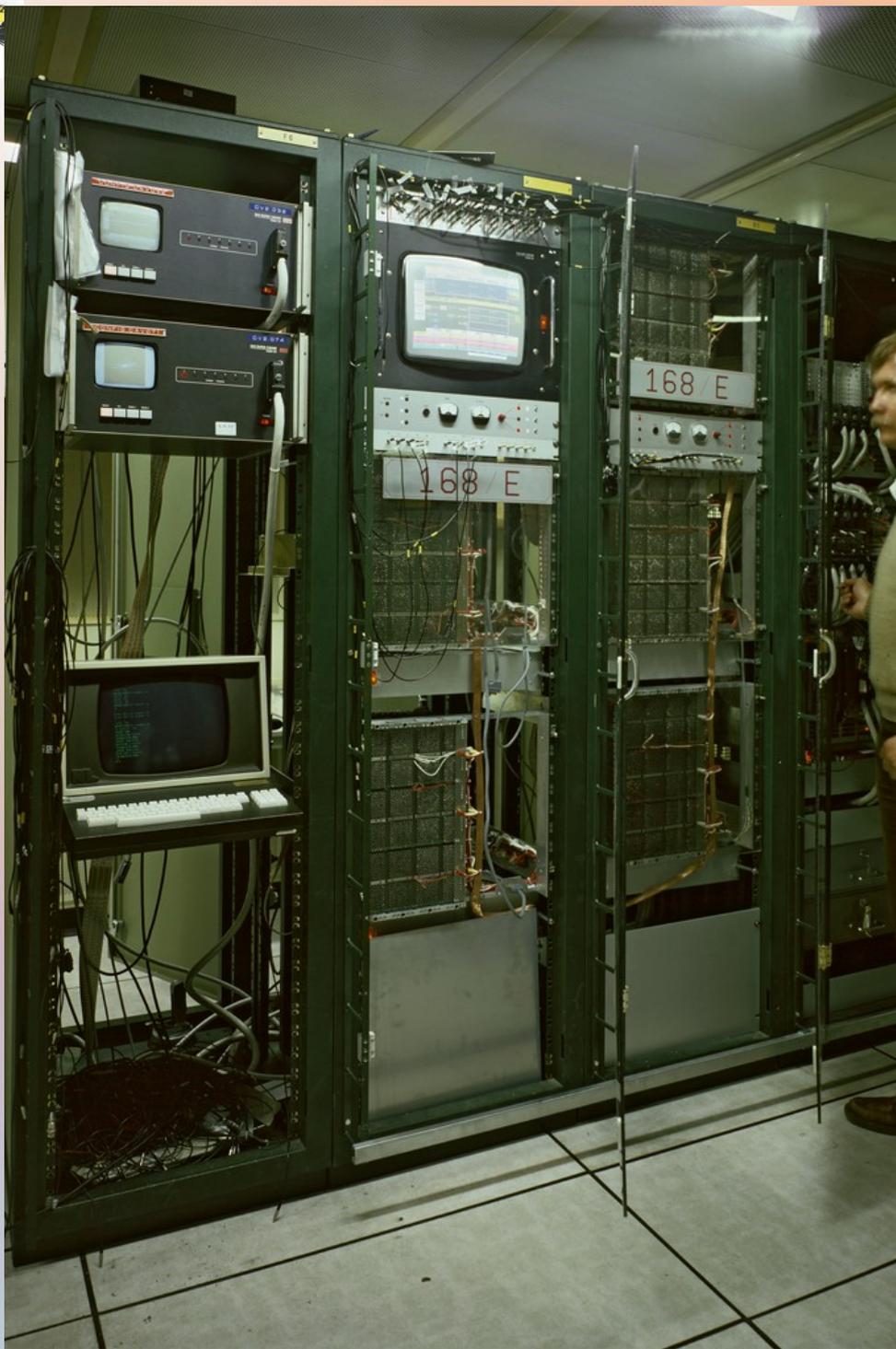
UA1





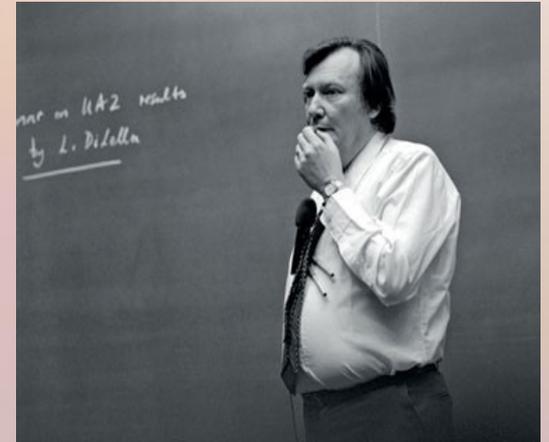
UA2







- Gennaio 1983: vengono presentate da UA1 e UA2 le prime indicazioni della possibile osservazione di eventi W
 - UA1 ha 6 eventi candidati
 - UA2 ne ha 4
- La scoperta del bosone W viene annunciata dal CERN il 25 gennaio



*"They look like Ws,
they feel like Ws,
they smell like Ws,
they must be Ws"*

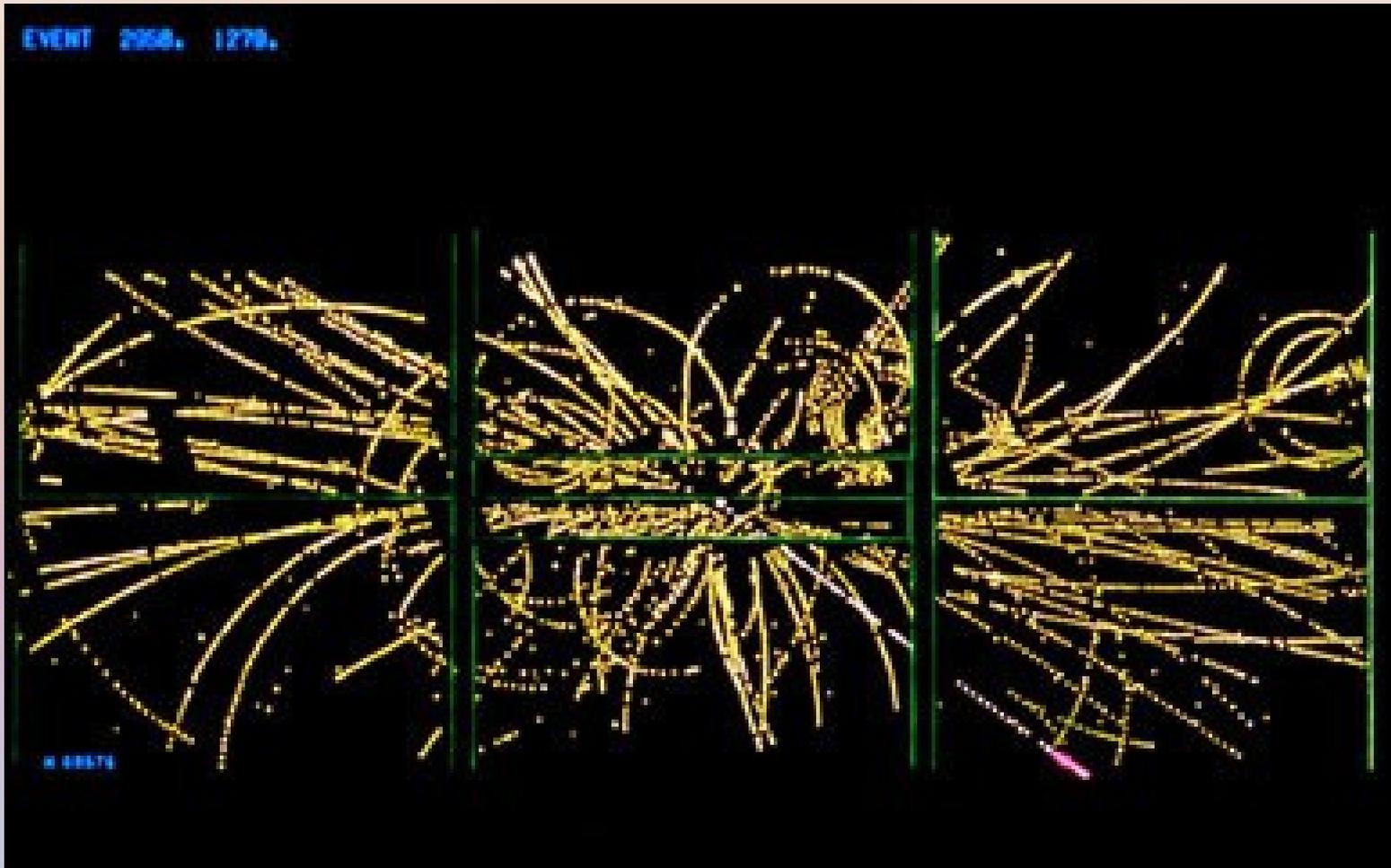


- La massa della nuova particella e' stimata essere ~80 GeV in accordo con le previsioni della teoria elettrodebole



identificazione del W

- Dai suoi prodotti di decadimento
- W^+ e W^- decadono in coppie di leptoni
- Sono energeticamente accessibili i decadimenti nei tre leptoni carichi e rispettivi neutrini e in due delle coppie di quark (il top ha massa molto maggiore!) con le loro 3 possibili combinazioni di colore
- Democraticamente ogni decadimento ha una probabilità di $\sim 1/9$
- Sperimentalmente i canali più accessibili sono elettrone-neutrino e muone-neutrino



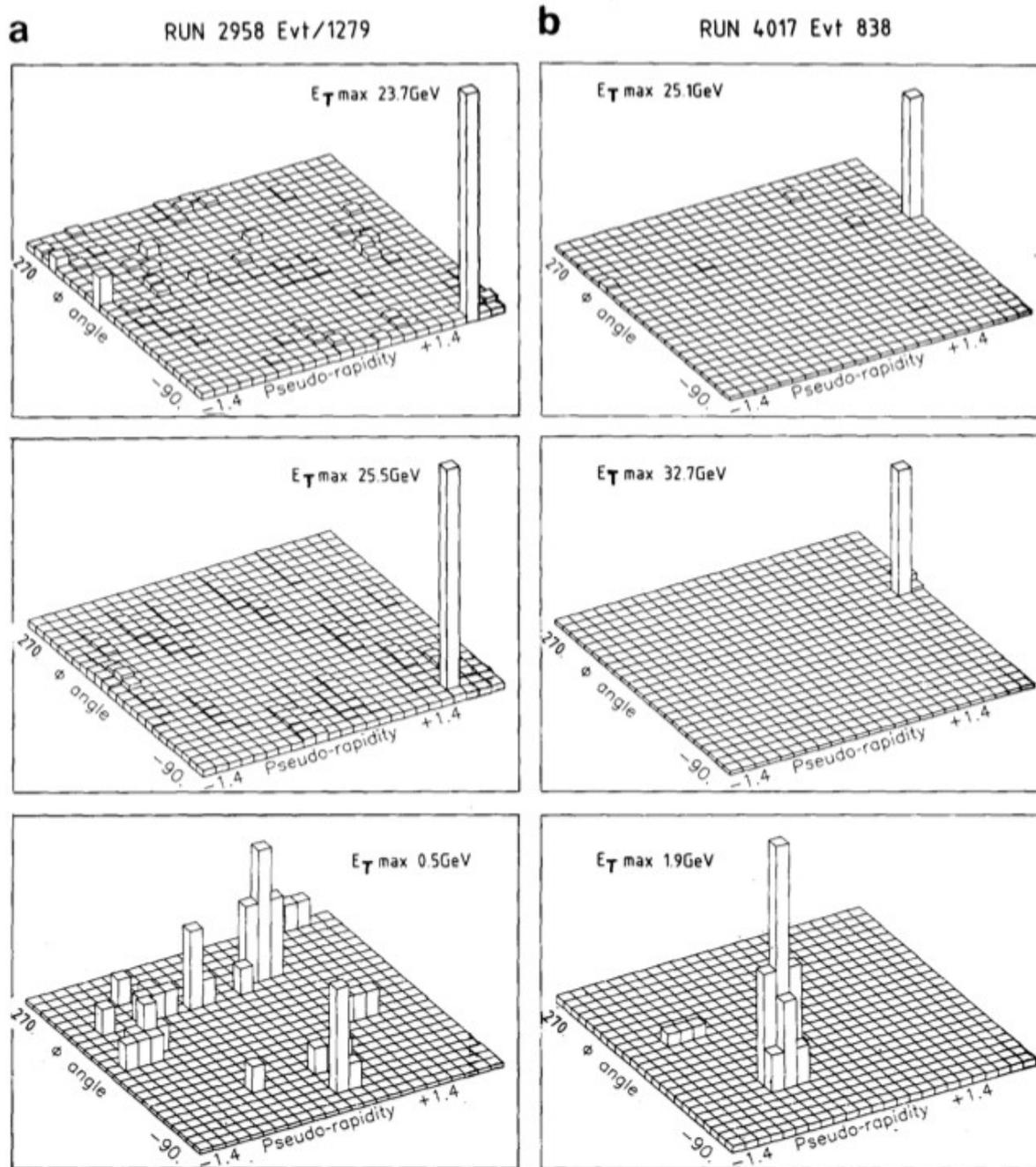
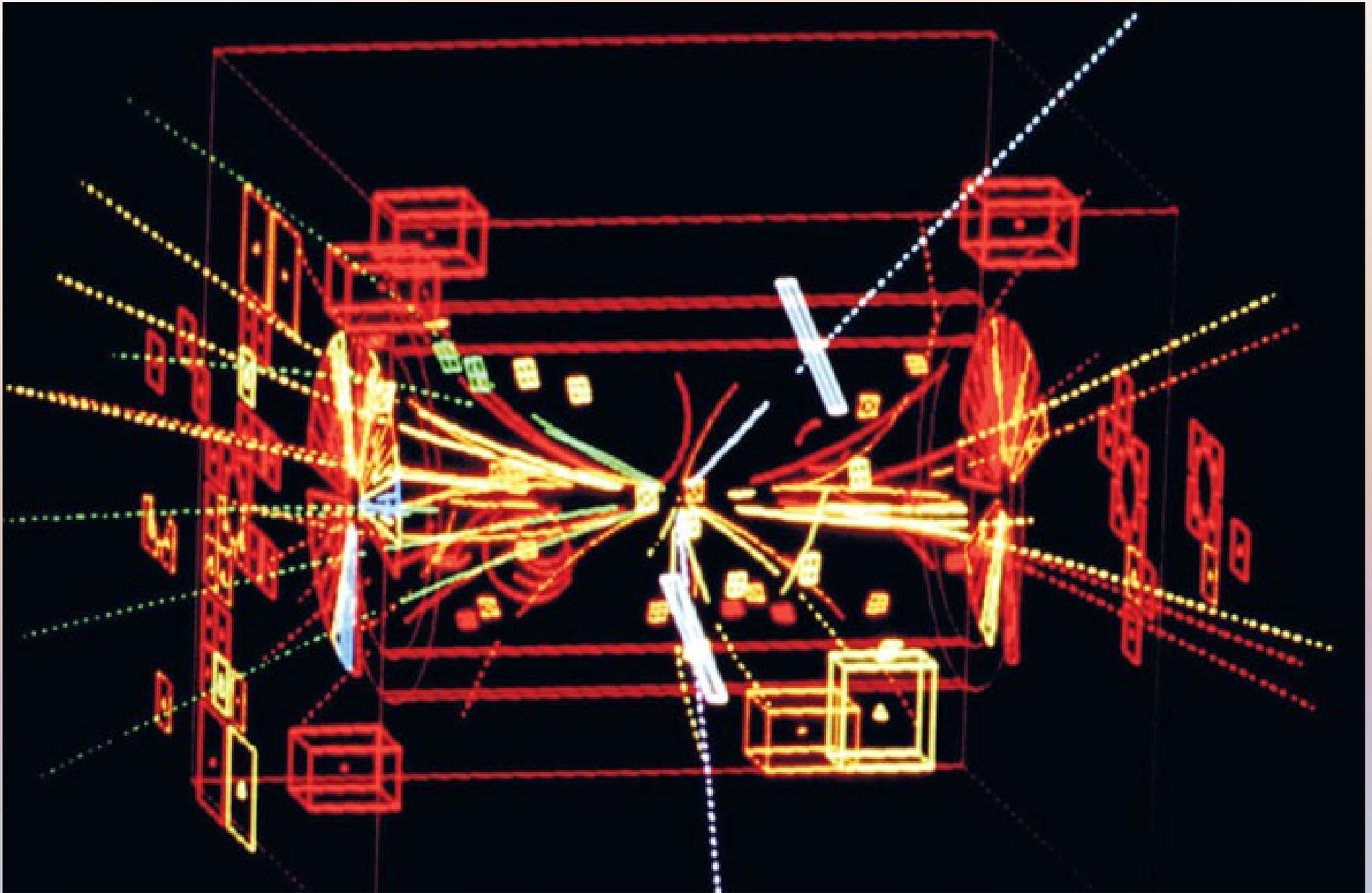


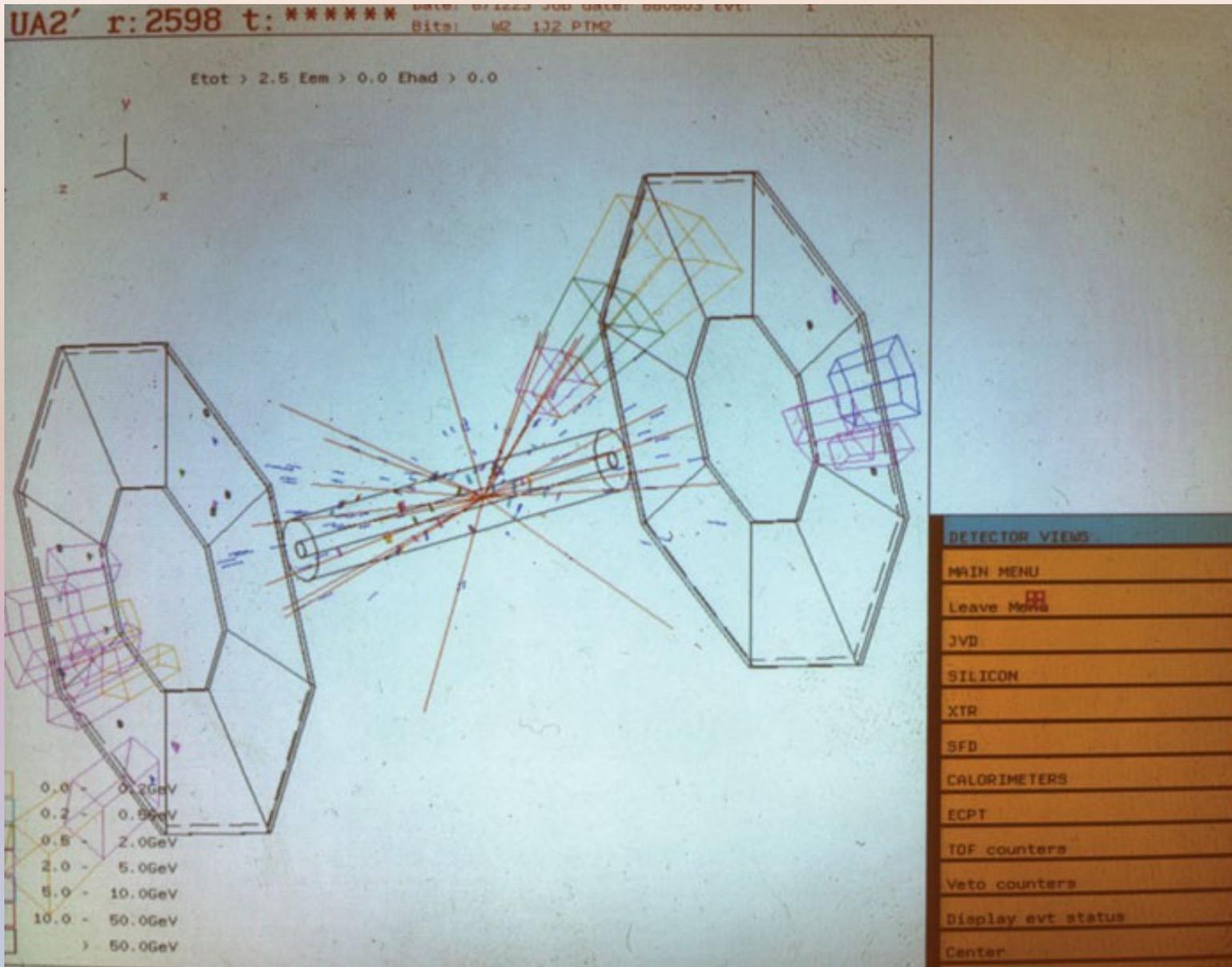
Fig. 7. The energy deposited in the cells of the central calorimetry and the equivalent plot for track momenta in the central detector for the two events of fig. 6. The top diagram shows the electromagnetic cells, the middle shows the central detector tracks, and the bottom plot, with a very much increased sensitivity, shows the energy in the hadron calorimeter. The plots reveal no hadronic energy behind the electron and no jet structure; (a) high-multiplicity; (b) low-multiplicity.



Identificazione dello Z

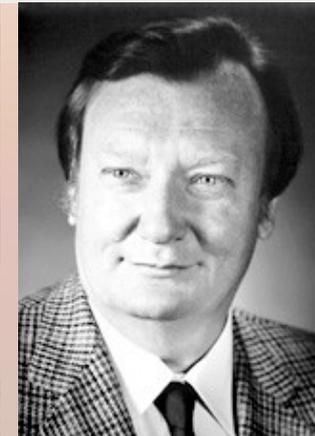
- Neutro, decade in coppie fermione-anti-fermione
- La costante di accoppiamento dipende dal tipo di fermione attraverso l'isospin debole e la carica elettrica
- I decadimenti piu' facili da identificare sono in $e^+ e^-$ e in $\mu^+ \mu^-$, ma hanno probabilita' basse (3,4%) rispetto ai decadimenti in neutrino-anti-neutrino e rispetto a quelli in coppie quark-anti-quark





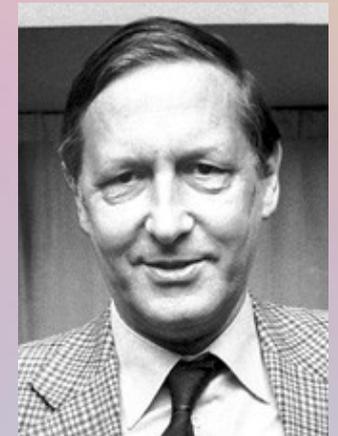


The Nobel Prize in Physics 1984



Carlo Rubbia

timeline.web.cern.ch



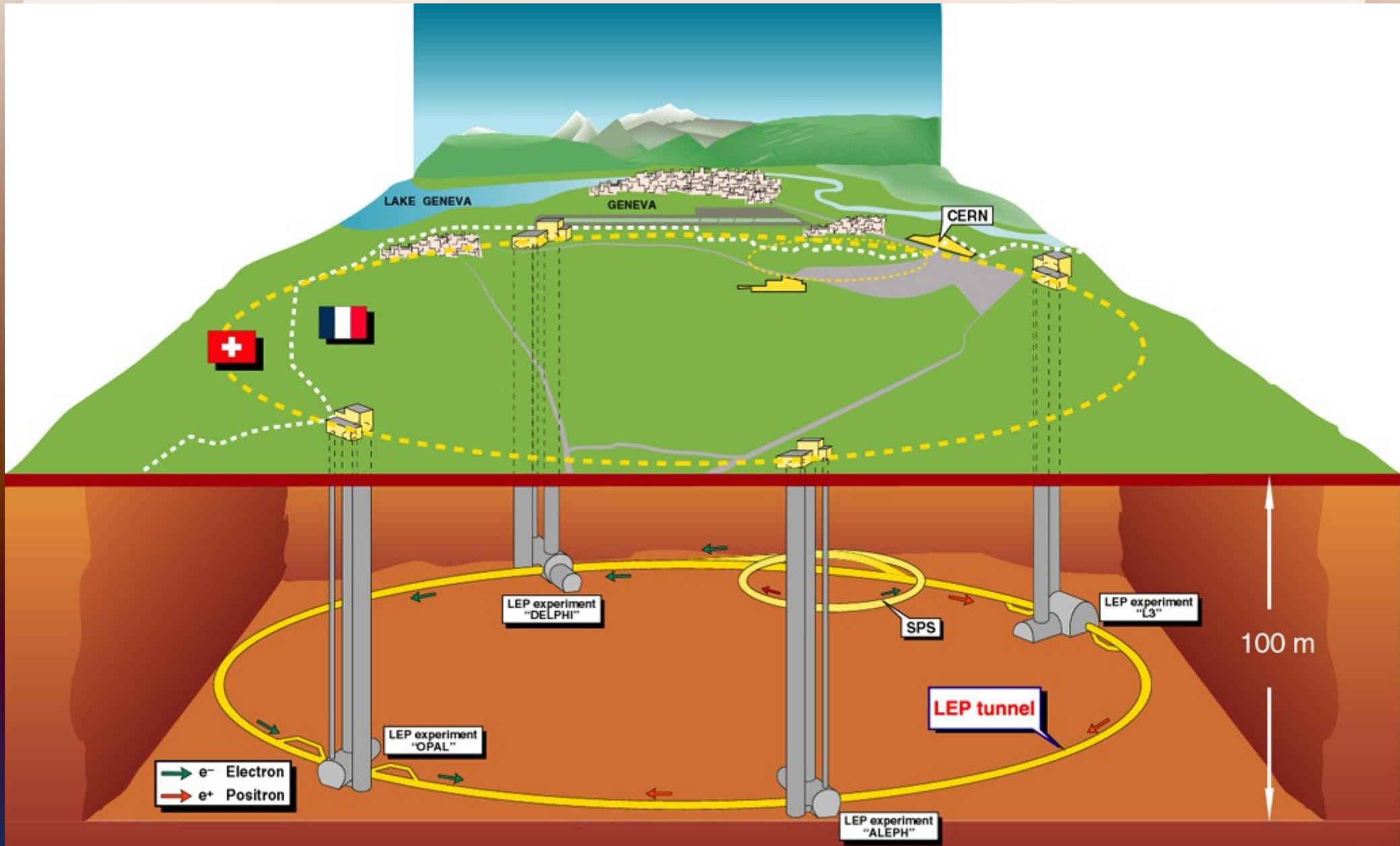
Simon van der Meer

“for their decisive contributions to the large project, which led to the discovery of the field particles W and Z, communicators of weak interaction”



Lo studio dei bosoni W e Z

- Le nuove particelle sono state studiate con statistica crescente al collider del CERN negli anni successivi, quindi al collider del FERMILAB ad energie piu' elevate
- Ma il collider adronico e' un ambiente ostile, e' difficile svolgervi le misure di alta precisione necessarie ad una verifica accurata delle previsioni del modello
- Per questo motivo e' stato realizzato LEP, approvato gia' dal 1981!

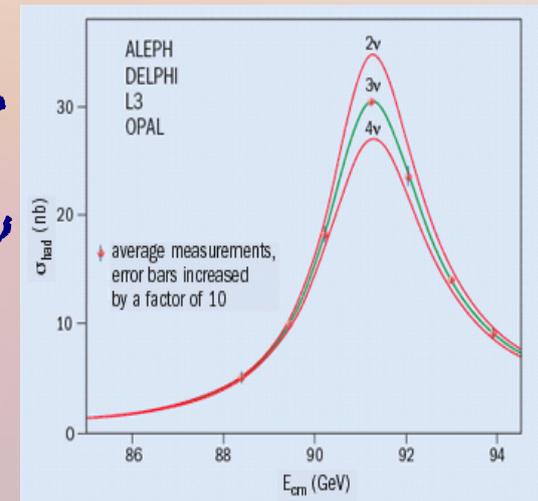






LEP: La fabbrica di Z

- prima fase (1989-1995)
 - energia nel centro di massa pari alla massa del bosone Z
 - Misure di precisione di massa, larghezza, rapporti di decadimento e altre proprietà di questa particella
- Nella seconda fase (->2000) l'acceleratore ha operato ad un'energia pari a 2 volte la massa del bosone W, consentendone una misura precisa della massa





Fit dei parametri elettrodeboli

- Il modello ha un certo numero di parametri liberi che devono essere estratti dai dati (masse, costanti di accoppiamento...)
- I dati molto precisi di LEP hanno permesso di estrarre delle previsioni sui due parametri mancanti:
 - la massa del quark top - in un primo tempo - che si è rivelata in ottimo accordo con quella misurata al collider del FERMILAB
 - la massa del bosone di Higgs



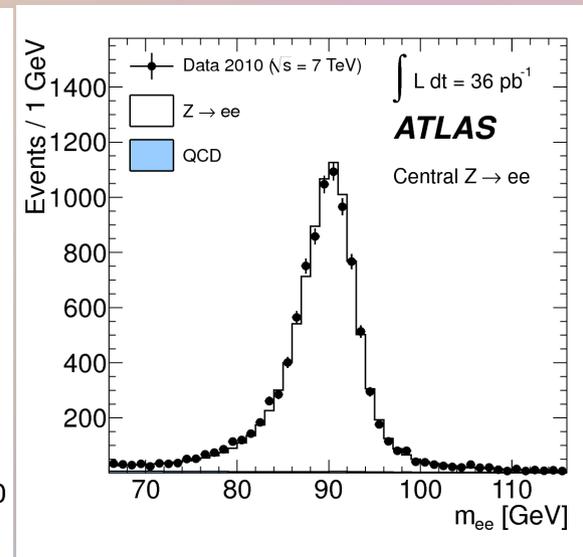
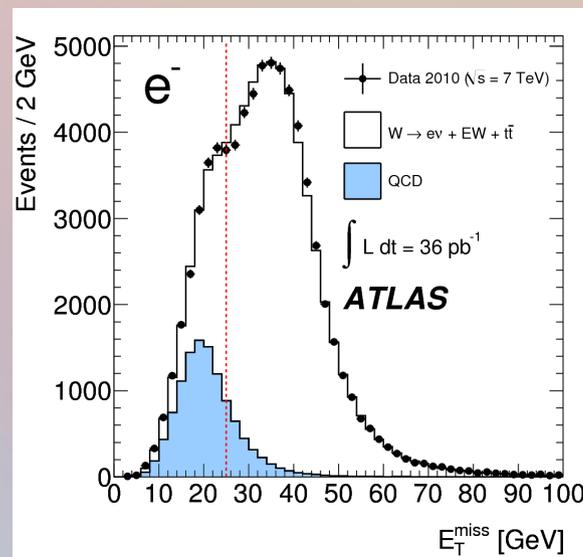
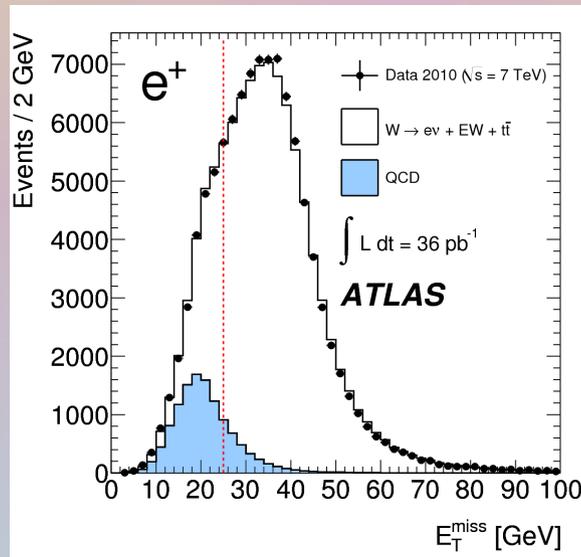
W e Z come strumenti

- La già citata scoperta del quark top avviene nel 1995. Il top decade in W e un quark b, il W serve quindi a riconoscerlo
- L'accoppiamento tra W e Z con il bosone di Higgs ha le sue radici nel meccanismo di Higgs stesso. W e Z sono quindi buoni strumenti per cercare il bosone di Higgs.
- Il bosone di Higgs è previsto decadere in coppie di W o di Z con intensità ben calcolabili una volta determinata la sua massa. La scoperta si basa proprio sulle osservazioni in $\gamma\gamma$, WW e ZZ



W e Z a LHC

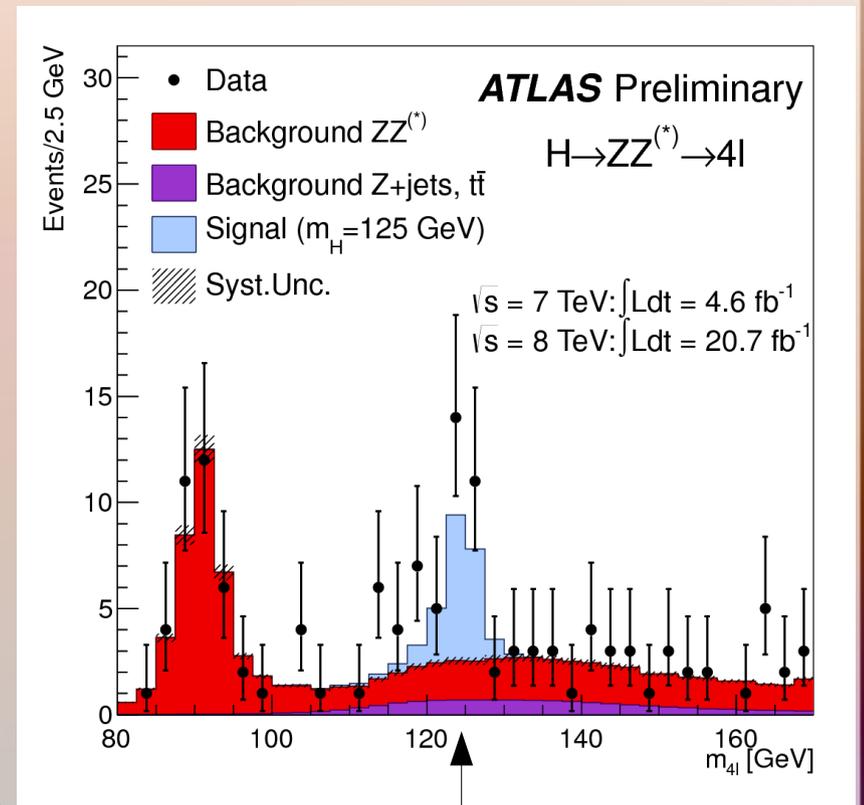
- LHC: Large Hadron Collider, interazioni protone-protone a 7 o 8 TeV nel centro di massa e ad alta intensita'
- W e Z si producono in abbondanza, sia soli che "accompagnati" (WW, ZZ, Zgamma, WZ...)





H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 Leptoni

- E' il canale piu' "pulito" per la ricerca del bosone di Higgs a LHC
- Il segnale e' chiaramente visibile e ben separabile dal fondo, completamente ricostruito
- Gli eventi cosi' ben identificati possono quindi essere usati per misure delle proprieta' della particella H (massa, spin...)





Conclusioni

- W e Z sono una forma di radiazione, di "luce pesante"
- Sono strettamente imparentati con il quanto di luce, il fotone, mediatore delle interazioni elettromagnetiche
- Ma sono pesanti! Questo ha determinato le caratteristiche peculiari dell'interazione debole e il grande sforzo che e' stato necessario per osservarli
- La loro massa nasce dalla rottura spontanea della simmetria elettrodebole e fa di loro delle utili sonde per studiare questo fenomeno



- <http://cerncourier.com/cws/article/cern/53088>
- <http://cern-discoveries.web.cern.ch/cern-discoveries/Welcome.html>
- <http://home.web.cern.ch/about/physics/w-boson-sunshine-and-stardust>
- <http://home.web.cern.ch/about/physics/z-boson>



Grazie per l'attenzione



Extras



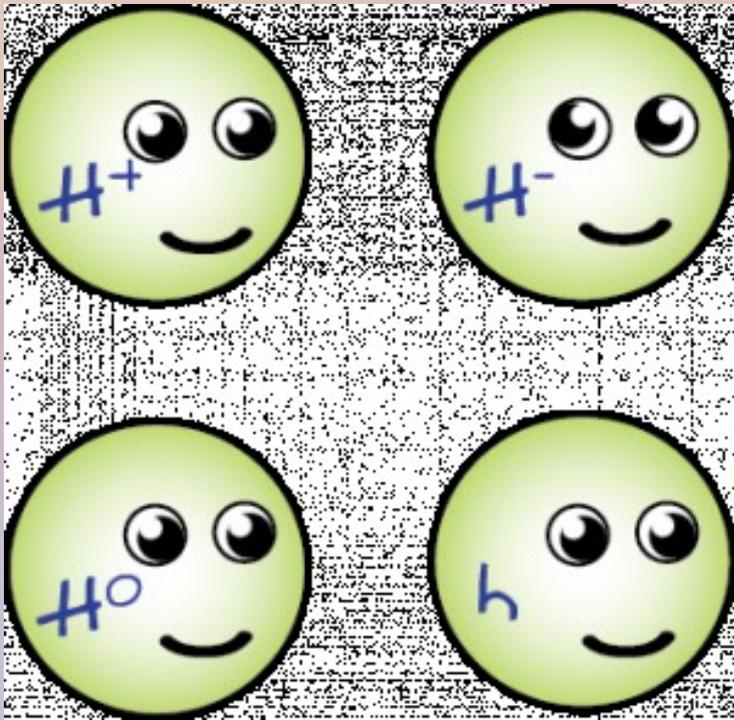
IL meccanismo di Higgs

- *Non si puo' parlare di W e Z senza parlare del meccanismo di Higgs*
- Il modello standard prevede W e Z senza massa
- Senza massa \Rightarrow senza polarizzazione longitudinale \Rightarrow con un grado di liberta' in meno
- Il meccanismo di Higgs viene introdotto proprio per ovviare a questo inconveniente non da poco (e rendere l'interazione debole debole e a breve raggio d'azione!)



I bosoni di Goldstone

- Come fare a dare la massa ai W e Z ovvero a fornire loro il grado di liberta' mancante (3 in tutto)?



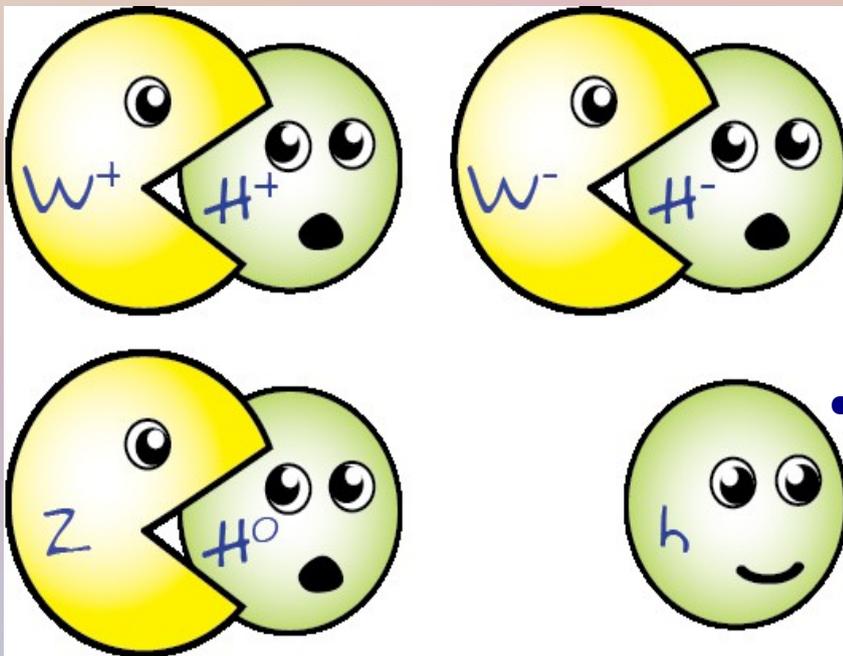
- Teorema di Goldstone: una teoria con una rottura spontanea di simmetria ha nel proprio spettro particelle scalari (spin 0) senza massa

<http://www.quantumdiaries.org>



I bosoni di Goldstone

- Come fare a dare la massa ai W e Z ovvero a fornire loro il grado di liberta' mancante (3 in tutto)?



<http://www.quantumdiaries.org>

- La rottura spontanea della simmetria elettrodebole introduce 4 bosoni di spin 0 senza massa

- 3 di questi vengono "mangiati" dai bosoni W e Z fornendo loro i 3 gradi di liberta' mancanti