



# Casseurs d'atomes...

Helenka Przysiezniak  
LAPP-CNRS Annecy-le-Vieux

# ...plus communément appelés accélérateurs de particules

o infiniment petit  $\leftrightarrow$  extrêmement énergétique

$$E = h/\lambda$$

Plus  $E \gg$  plus  $\lambda \ll$

o recréer conditions et particules  
des débuts de l'Univers

Aujourd'hui

~ 10000 accélérateurs ~ industrie et médecine

~ 100 physique nucléaire et des particules

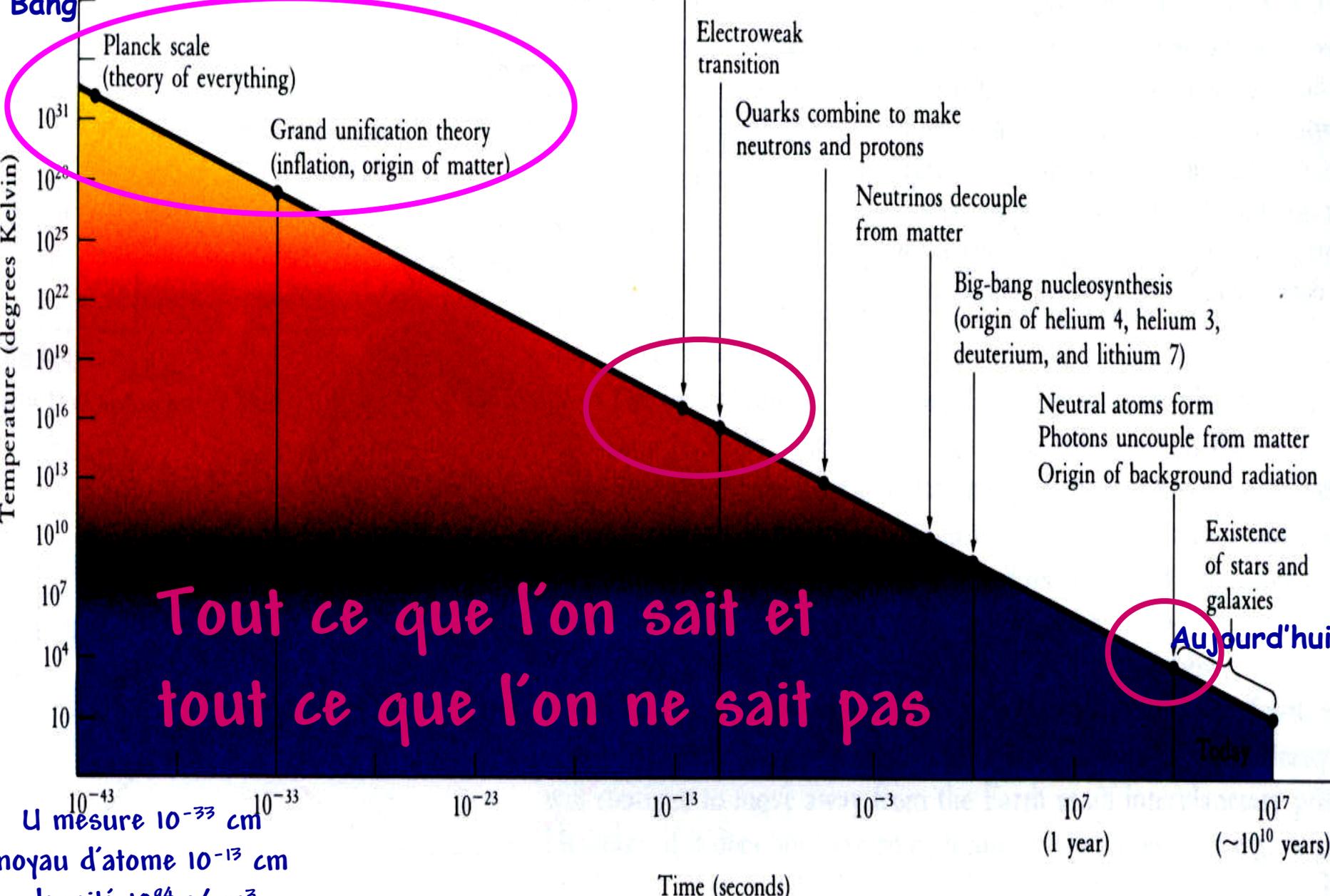
Centre Européen pour la Recherche Nucléaire

(CERN) ~ 50% des physiciens des particules

son budget ~ hôpital de Genève



# Big Bang



Tout ce que l'on sait et tout ce que l'on ne sait pas

U mesure  $10^{-33}$  cm  
noyau d'atome  $10^{-13}$  cm  
densité  $10^{94}$  g/cm<sup>3</sup>

(1 year) (~10<sup>10</sup> years)

# L'escalier dimensionnel

Marches vers le haut...

26ème Univers

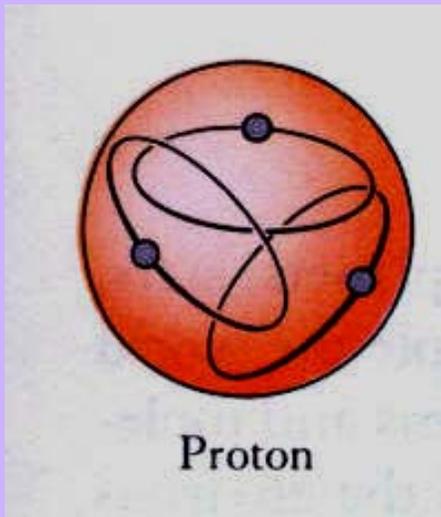
20ème Voie Lactée

11ème (10<sup>11</sup>m) Système solaire



Une marche = Une unité de grandeur

Au milieu de l'escalier → l'être humain 1m



...vers le bas...

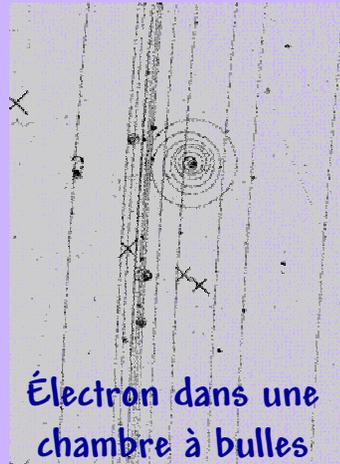
6ème (10<sup>-6</sup>m) Virus

10ème Atome

15ème Proton

18ème Quark

# Au menu



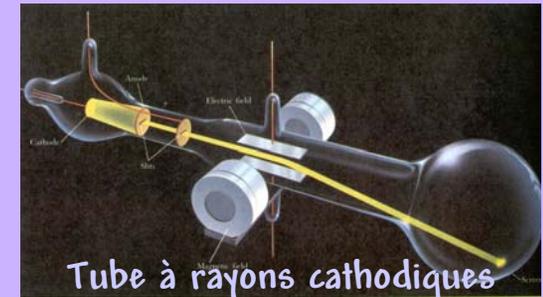
Électron dans une chambre à bulles



o Contexte historique

o Particules élémentaires

o Accélérateurs:  
premiers balbutiements



o Construction du Modèle Standard

o Ère des GRANDS  
accélérateurs

$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L$ <hr/> $e^-_R$	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$ <hr/> $u_R, d_R$
$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L$ <hr/> $\mu^-_R$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L$ <hr/> $c_R, s_R$
$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$ <hr/> $\tau^-_R$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$ <hr/> $t_R, b_R$





**Le contexte historique**

# Le contexte historique

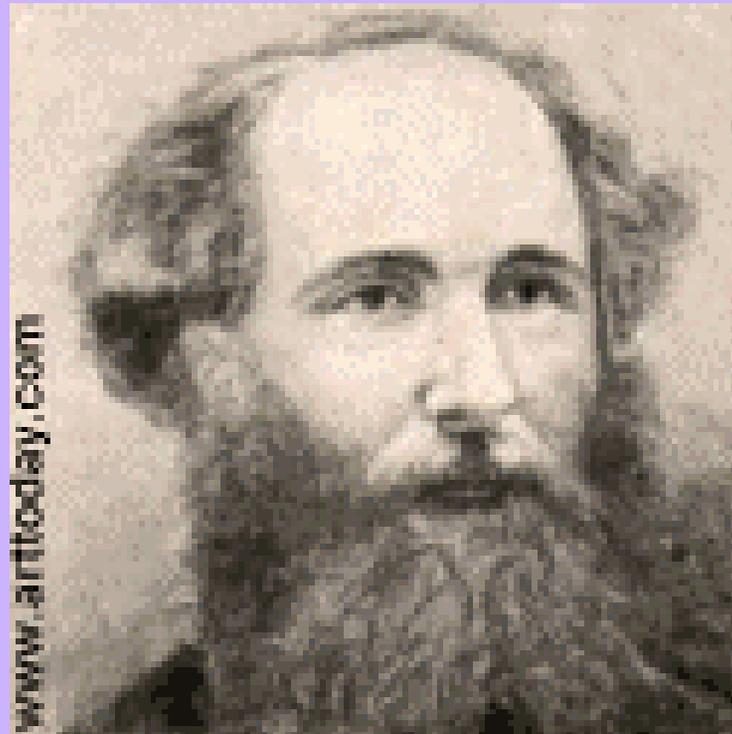
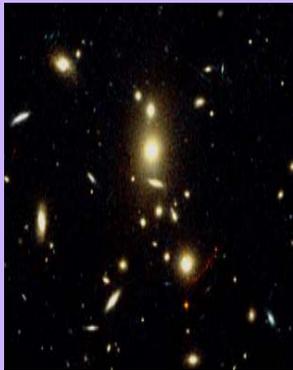
Maxwell (1831-1879)

Unification des deux interactions fondamentales

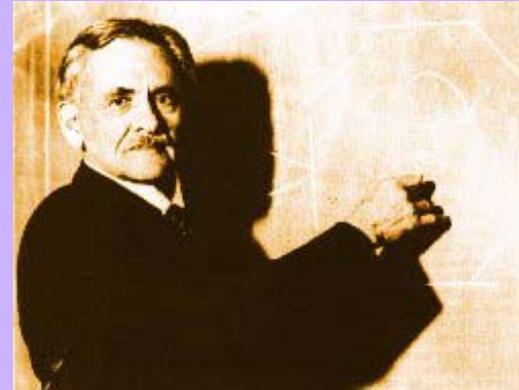
l'électricité et le magnétisme:

## électromagnétisme

un prélude à la théorie de la relativité et aux symétries de « jauge »



# Le contexte historique



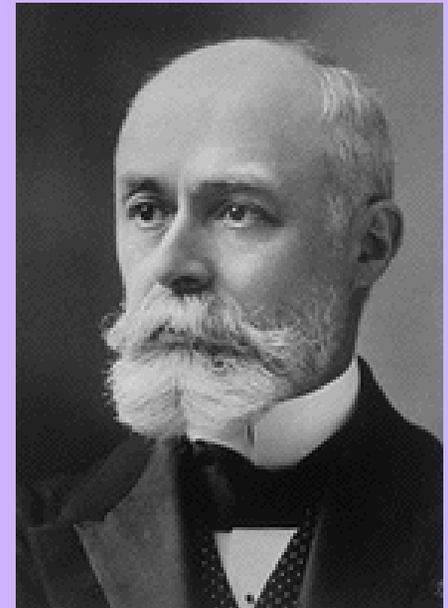
1894 Albert Michelson Nobel 1907

« Tout ce qu'il reste à faire  
en physique aujourd'hui:  
mesurer ce que l'on connaît déjà  
jusqu'à la sixième décimale »

1896 Henri Becquerel Nobel 1903

Découverte de la

**radioactivité**



comment expliquer ces nouvelles radiations?

**Bouleversement déterminant du siècle dernier**

# Le contexte historique

Radiations détectées:

$\gamma$  - photons

$\alpha$  - noyau d'atome d'hélium

$\beta$  - électrons « accompagnés »

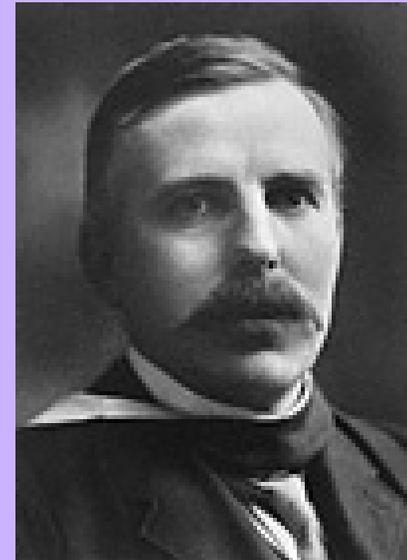
Ernest Rutherford (1871-1937) Nobel 1908

Naissance en NZ



1910

sonde les atomes  
avec des particules  $\alpha$

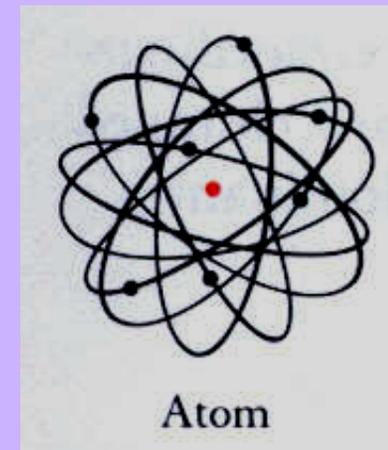
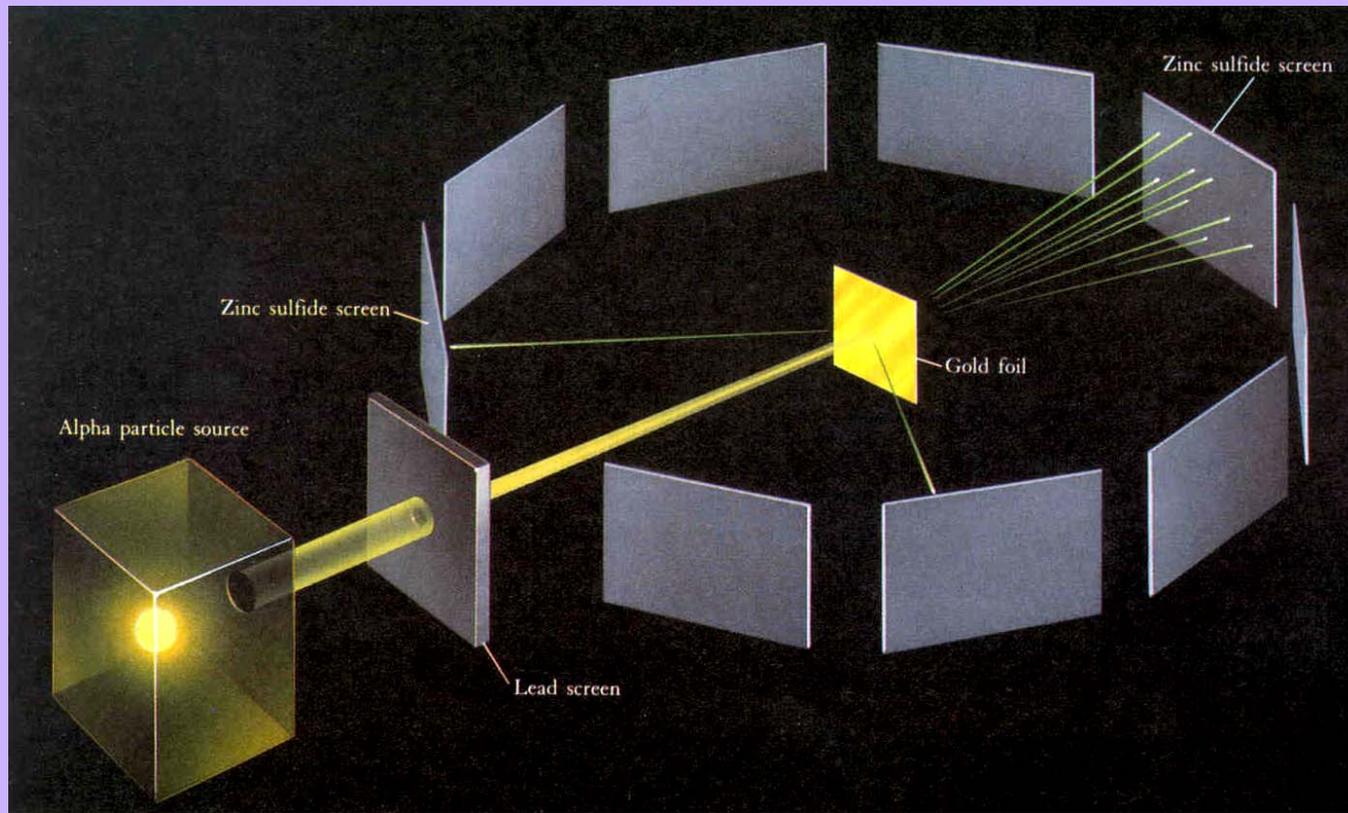


Une première :  
sonder la matière  
avec des particules énergétiques!

# Le contexte historique

## Expérience de Rutherford

Particules  $\alpha$  bombardent une fine plaque d'or entourée d'écrans recouverts de sulfate de zinc qui émet de la lumière.



# Découverte du noyau atomique !

# Le contexte historique

Logiquement, l'atome devait s'écrouler.

Niels Bohr (1885-1962) Nobel 1922

seules certaines orbites permises aux  $e^-$  d'un atome,  
leur énergie est quantifiée.

## Théorie Quantique

Schrodinger



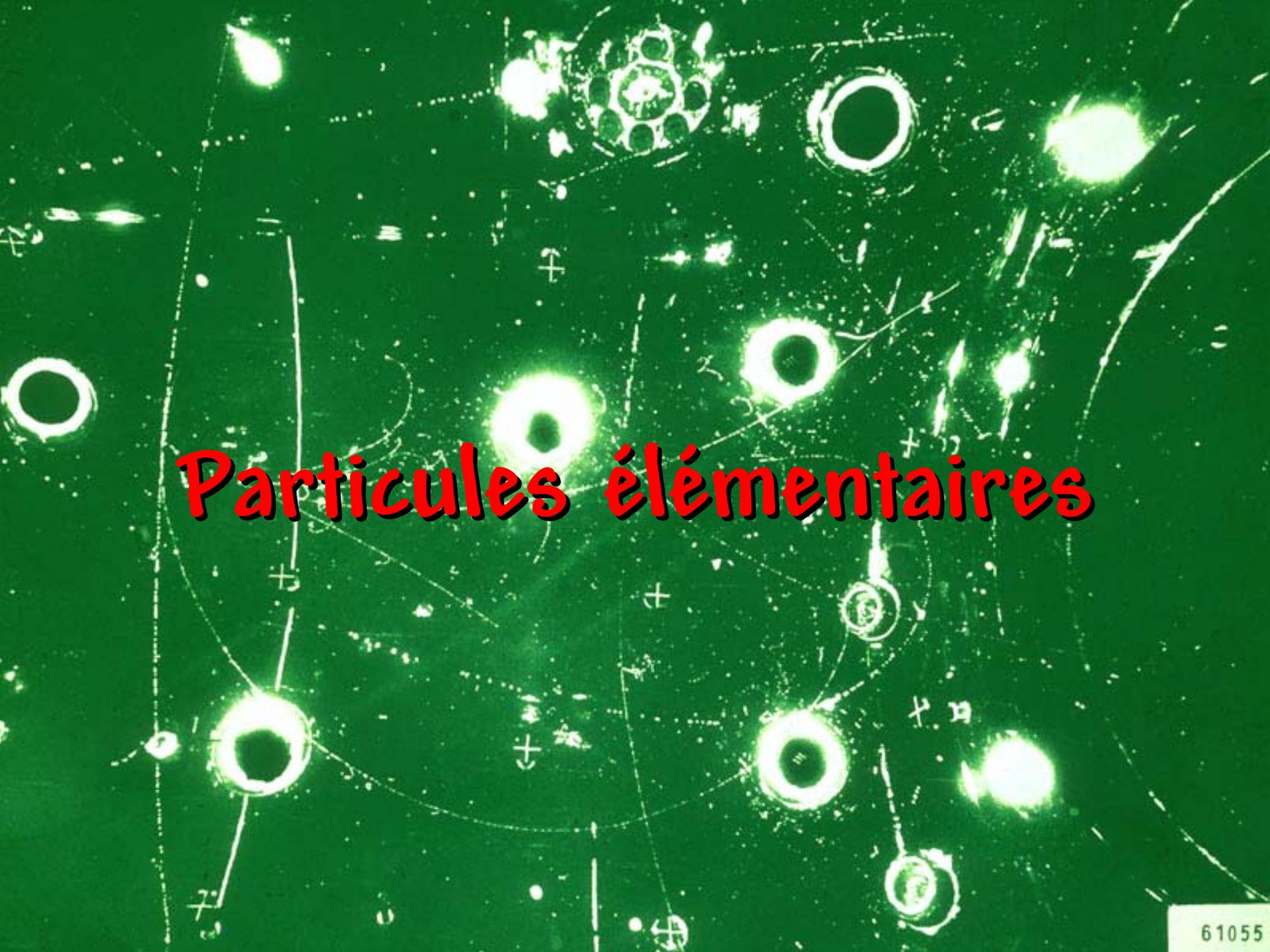
Heisenberg

Einstein (1879-1955) Nobel 1921, toute observation est relative...

...sauf pour la vitesse de la lumière  $c=3 \times 10^8$  m/s  
Einstein étendit ses idées à la force gravitationnelle

## Relativité Générale

Deux grandes révolutions théoriques !



# Particules élémentaires

# Particules élémentaires

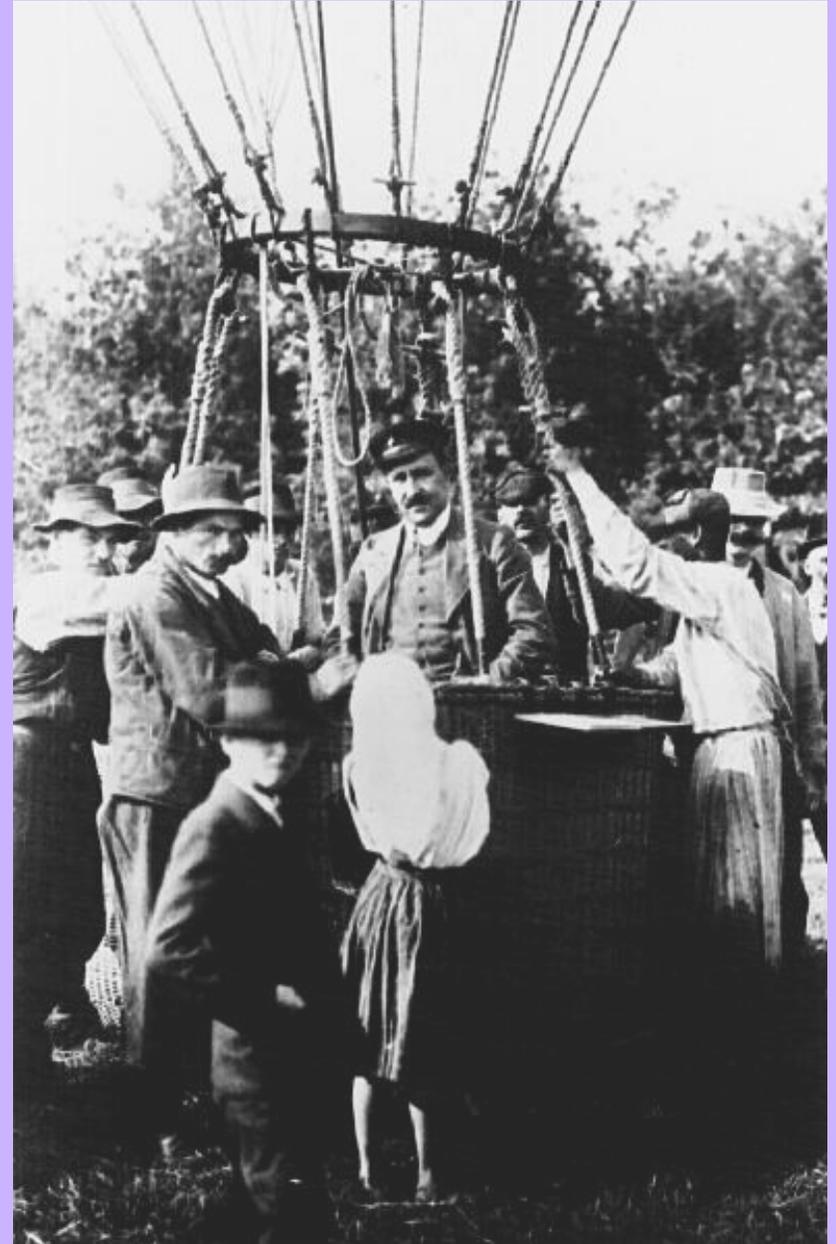
1912 Victor Hess Nobel 1936  
ballon et compteur à ionisation.

Plus il s'élevait dans l'atmosphère,  
plus le taux d'ionisation était élevé.

Aucune différence observée  
entre le jour et la nuit!

Le rayonnement ne pouvait provenir  
ni de la terre ni du soleil

**rayons cosmiques**



# Particules élémentaires

Constituantes ponctuelles, indivisibles de la matière: le sont-elles vraiment?

L'énergie et la masse sont reliées  $E=mc^2$   
où  $m = m_0/\sqrt{1-(v^2/c^2)}$ . Si  $v \sim c \rightarrow E \gg E_0$

Unité pour mesurer l'énergie-masse

électron-Volt  $\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$   $\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$   $\text{TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

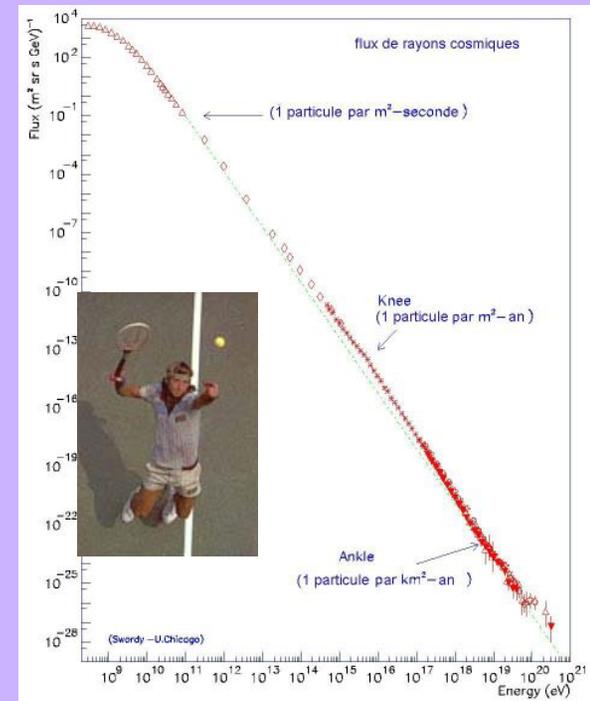
$6 \times 10^{18} \text{ eV} = 1 \text{ joule} !$

Les plus énergétiques que l'on connaisse:

rayons cosmiques de  $10^{20} \text{ eV} =$

énergie d'une balle de tennis au service =

10 millions X énergie du plus grand accélérateur



# Particules élémentaires - détection

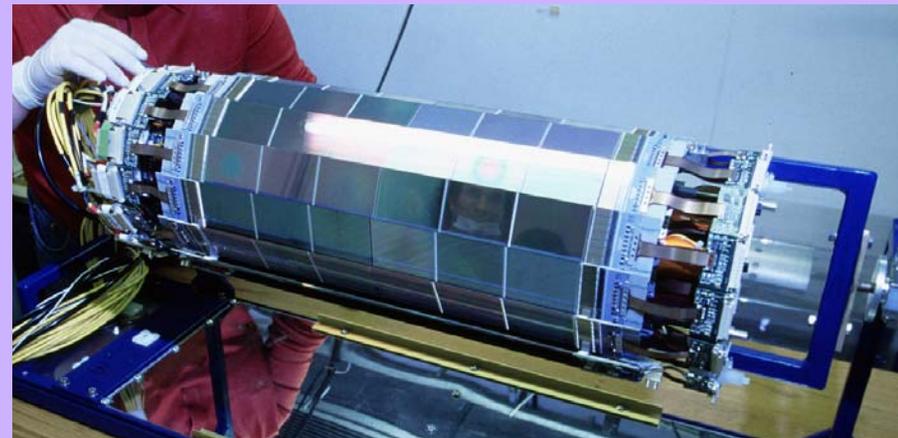
compteurs à ionisation et Geiger,  
chambre à brouillard

Donald Glaser Nobel 1960  
1956 **Chambre à bulles**

Georges Charpak Nobel 1992  
1969 **Proportionnelle à multifils**



1990 précision ultime de la position  
**Détecteur au silicium**



1970 Charpak, Sauli, Santiard

# Particules élémentaires

**neutrino  $\nu$**  1930 Chadwick exp. Pauli th.  
particule neutre, interagissant faiblement,  $m=0$

**neutron  $n$**  Chadwick exp.

particule neutre, cohabite avec les  $p^+$  dans le noyau ~ la même masse  
**force nucléaire forte**

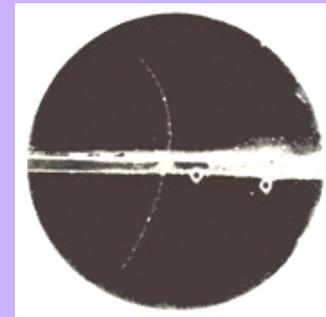
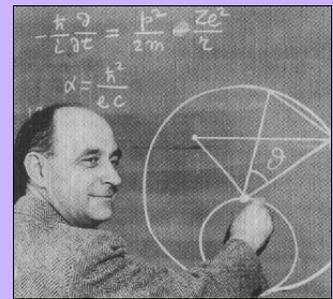
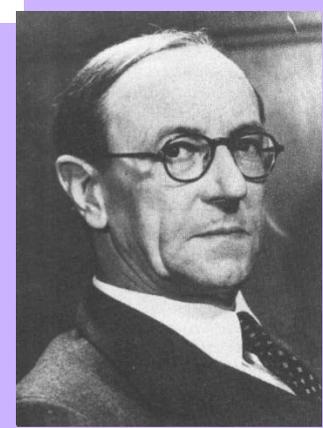
**positron  $e^+$**  1927 Dirac th. 1933 Anderson exp.

Prédictions de l'équation de Dirac:

- o spin - nombre quantique du moment angulaire - de l'électron =  $\frac{1}{2}$
- o positron  $e^+$  et donc de l'antimatière

Dirac, Pauli et Heisenberg th. postulent des

**particules qui transmettent** les interactions



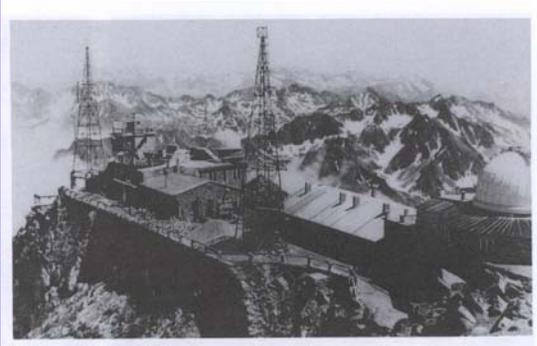
# Particules élémentaires

1933 Fermi th. adopte cette idée «transmetteuse»  
pour expliquer désintégration  $\beta$  et postule  
**force nucléaire faible**



**muon  $\mu^-$**  1937 Anderson exp.

- o particule interagissant faiblement
  - o temps de vie mesuré par Bruno Rossi, long, de type « faible »
- 1940 :  $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + 2\nu$

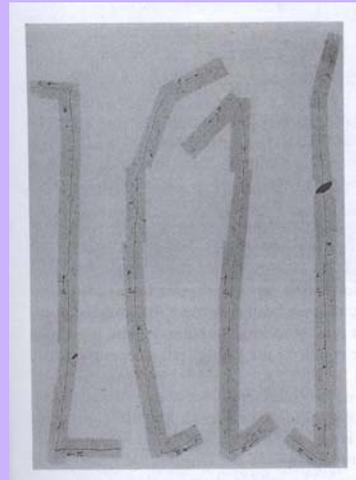


**pion  $\pi^-$**

$$\pi \rightarrow \mu + \nu$$

1935 Yukawa th. Ochialini exp.

particule forte transmettant l'interaction forte  
qui lie les n aux p dans l'atome



# Particules élémentaires

## Interactions et transmetteurs

- o électromagnétique  $\gamma$
- o nucléaire faible ??
- o nucléaire forte  $\pi^-$  ?

## o Leptons

particules qui ne subissent pas la force forte:  $e^\pm$   $\mu^-$  et  $\nu$

## o Spin

demi-entier «fermion» i.e.  $e^\pm$   $s = 1/2$ , entier «boson»

## o Particule $\rightarrow$ Anti-particule

A photograph of a small cyclotron, showing two semi-circular dees and a central particle path with a coin for scale.

# Accélérateurs: les premiers balbutiements

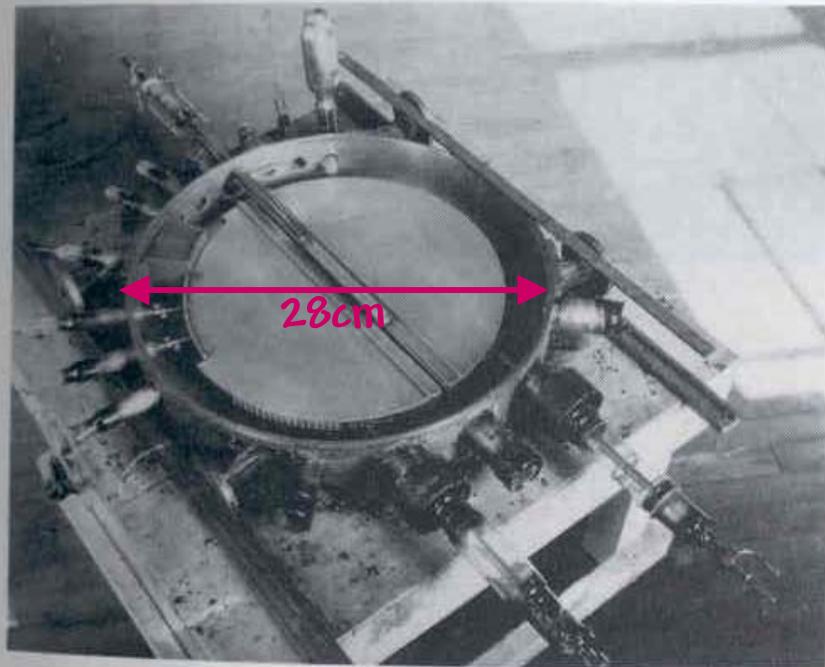
Cyclotron d'E.O. Lawrence d'un diamètre de 10cm et  $E=1\text{MeV}$

# Premiers balbutiements

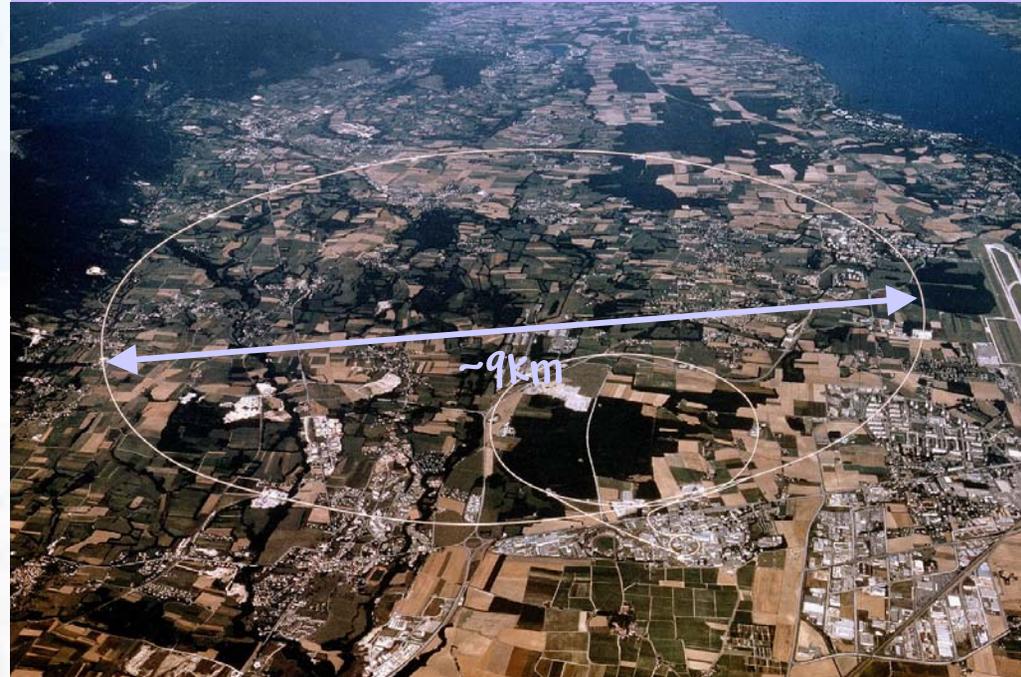
Rutherford bombarda l'atome de particules  $\alpha$ .  
L'idée: produire des particules plus énergétiques  
que celles émergeant naturellement des substances radioactives.

## Les accélérateurs de particules

Chambre accélératrice du cyclotron de 94cm  
construit en 1937 au Laboratoire Lawrence Berkeley



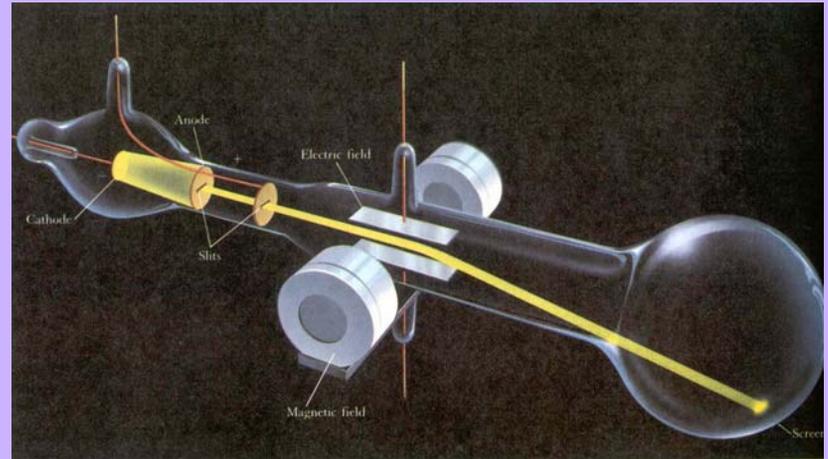
Large Electron Positron Collider (LEP)  
27km de circonférence au CERN (France-Suisse)



# Premiers balbutiements

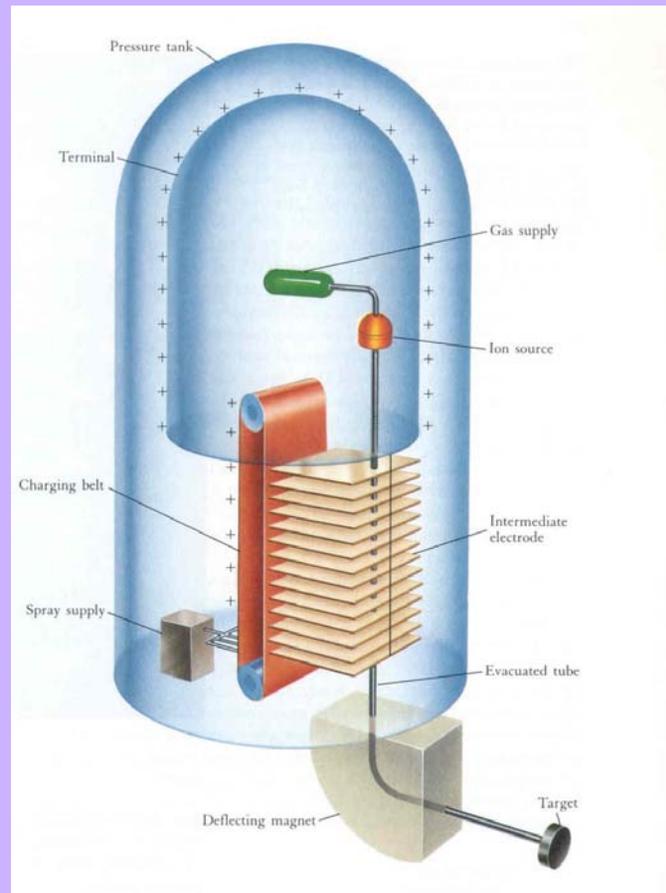
E énergie, I intensité et L luminosité

Puissance accélératrice:  
champ électrique



o fin 19e tube cathodiques  
1896 Thomson découverte de l'électron

o 1931 Van de Graaf 0.1-10 MeV  
accélérateur linéaire



# Premiers balbutiements

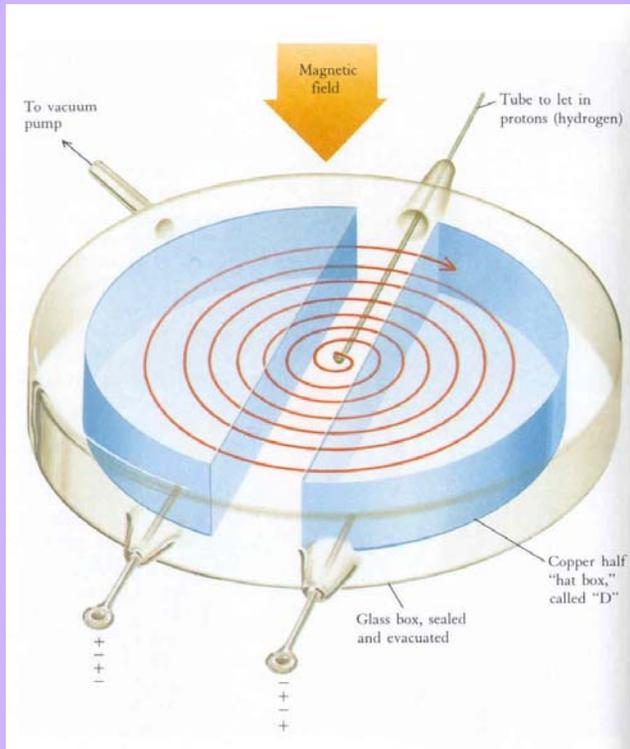
1928 Wideroe

Particules traversent plusieurs fois de suite une différence de potentiel:

1931 **cyclotrons**

champ magnétique vertical +  
champ électrique alternatif

1.25 MeV → 20 MeV synchrocyclotron 400 MeV



1945

**accélérateurs linéaires**

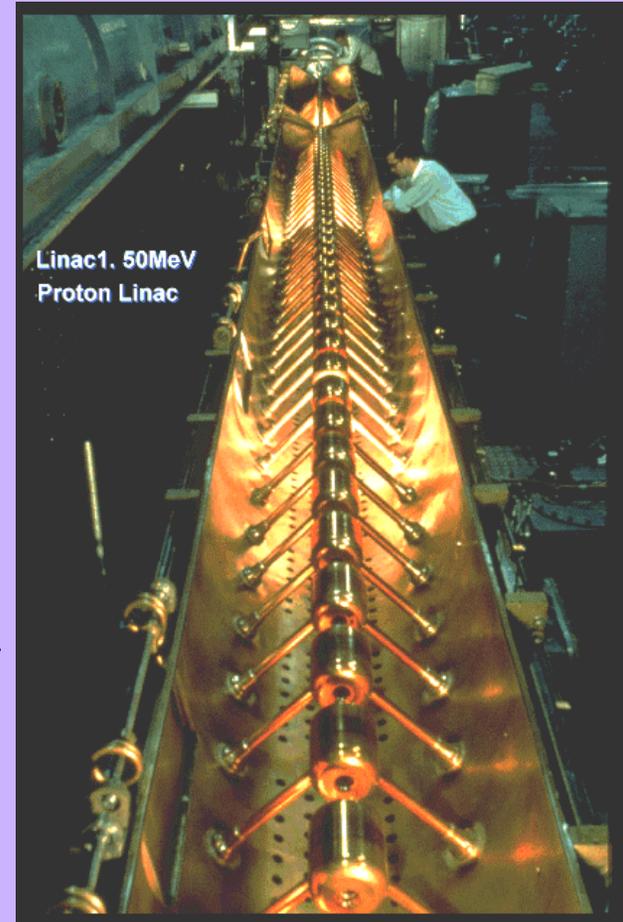
champ électrique  
alternatif

cavités radio-fréquence

32 MeV → 30 GeV

aujourd'hui

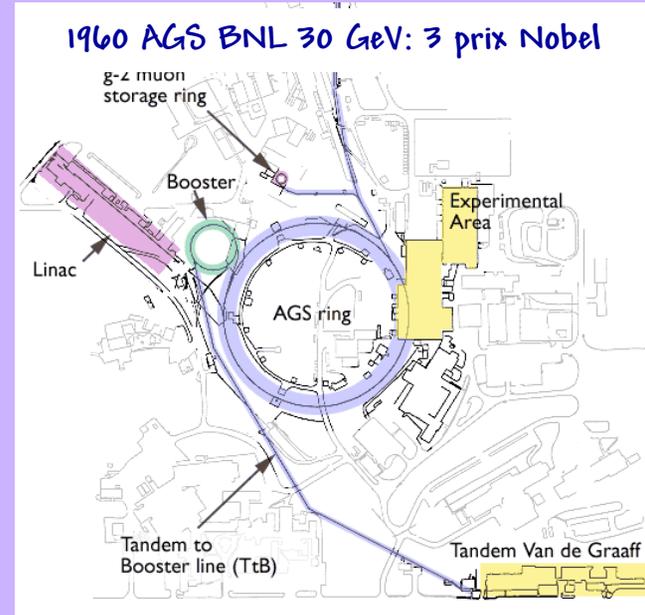
pré-accélérateurs



# Premiers balbutiements

l'ère moderne des accélérateurs 1946 **synchrotron**

$E \rightarrow$  rayons cosmiques  $\sim$  GeV.  
Orbite circulaire constante,  
aimants tout le long  
dont le champ varie avec l'énergie.



Puissance accélératrice:  
champ électrique oscillant  
dont la fréquence varie avec l'énergie.

Stabilité des orbites facteur crucial:  
focalisation forte  $\rightarrow$   
série de divergences et convergences



# Premiers balbutiements

~1970 anneaux de collision

collision frontale de 2 paquets de particules  
par opposition aux expériences à « cible fixe ».

Le « centre de masse » :

le référentiel dans lequel l'impulsion totale  $p_{\text{Totale}} = \sum_{i=1,N} m_i v_i$  est nulle

$p^+$  de 1000 GeV,  
énergie dans le cm:  
42 GeV cible fixe

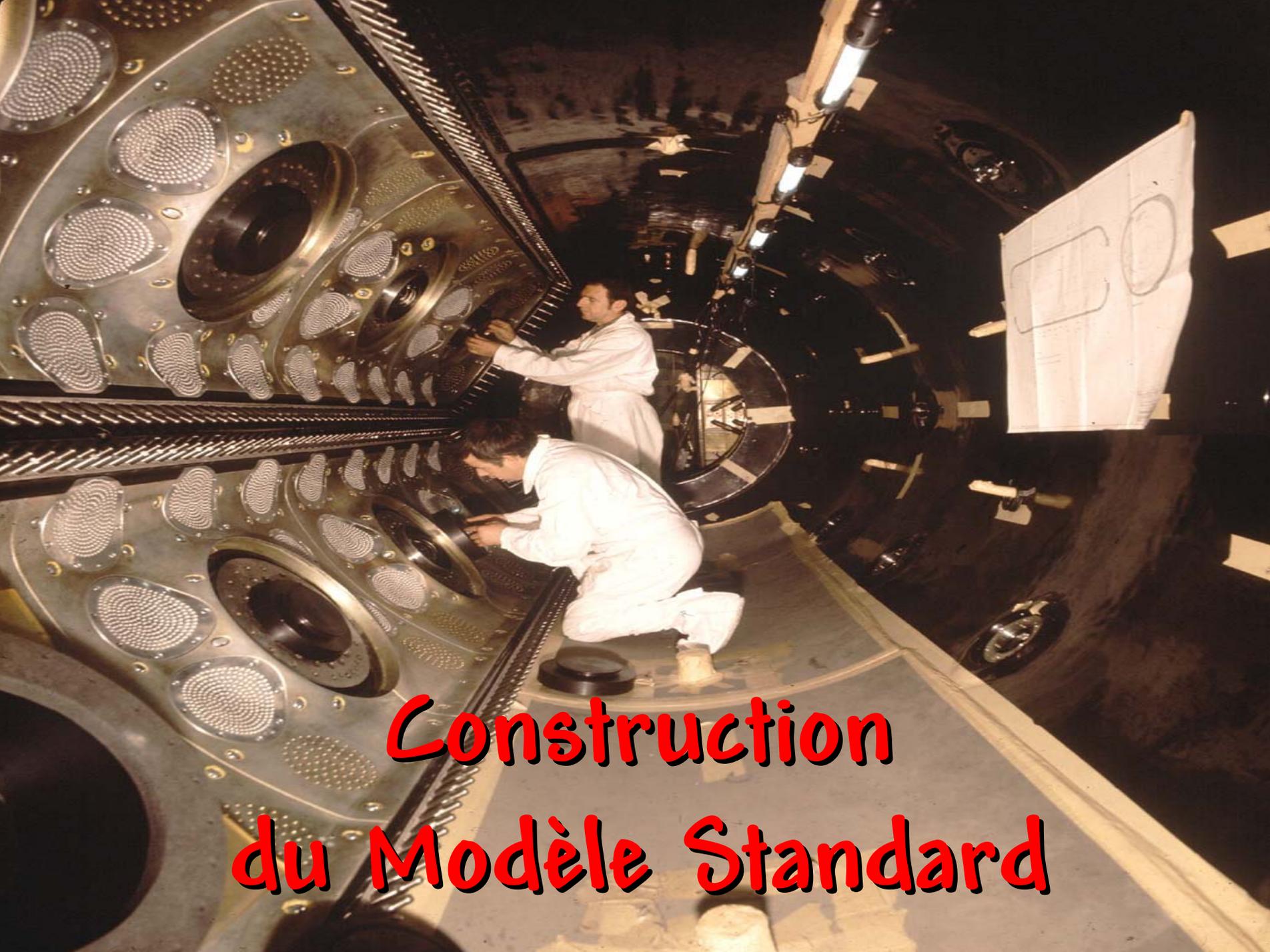
versus

2000 GeV collisionneur

Luminosité cruciale pour  
obtenir le plus de collisions frontales  
lors du croisement des paquets.



1971 Intersecting Storage Ring (ISR) Anneau de collision  
p-p au CERN 31 GeV par faisceau.



# Construction du Modèle Standard

# Le tableau périodique

Periodic Table of the Elements

1	IA																0							
2	H	IIA																He						
3	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne						
4	Na	Mg	IIIB		IVB		VB		VIB		VIIB		— VII —		IB		IIB		Al	Si	P	S	Cl	Ar
5	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
6	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
7	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
8	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110	111	112												

Naming conventions of new elements

* Lanthanide 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
+ Actinide Series	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

compris que lorsque l'électron fut découvert (JJ Thomson) et que la théorie quantique fut construite.

Années 1980, l'organisation des particules de base, découvertes au fil des décennies, fut appelée

**Modèle Standard (MS)**  
**des particules élémentaires**

place aux neutrinos d'abord!

# Construction du Modèle Standard

L'expérience aux deux neutrinos: synchrotron à protons de BNL, AGS  
1961 3 physiciens *Meurtre Incorporé*, Nobel 1988



Premier faisceau de neutrinos énergétiques.

$\nu$  traversant 100 millions de km d'acier a 50% de chance d'interagir  
8 mois, 56 interactions.

Seuls des muons furent observés : nouveau type de neutrino

neutrino muonique  $\nu_{\mu}$

2 « générations » de leptons 1.  $(e, \nu_e)$  2.  $(\mu, \nu_{\mu})$

# Construction du Modèle Standard

1960 ~100 nouvelles particules découvertes aux accélérateurs!

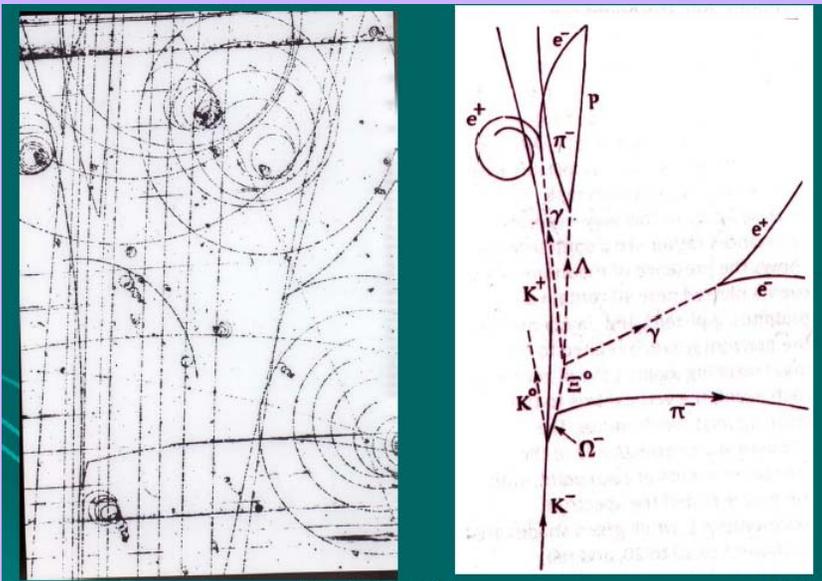
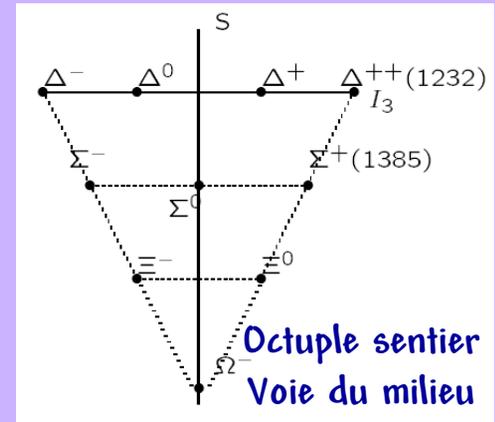
Murray Gell-Mann (1929-)

Particules organisées en familles de 8 ou 10

Prédiction très forte de l'oméga

$\Omega^-$

1962 découverte à l'AGS



Gell-Mann et George Zweig

«quarks» en 3 «saveurs»

up, down, strange

$q = +2/3, -1/3, -1/3 !$

i.e.  $\Omega^- = sss$   $n = udd$   $p = uud$

l'évidence expérimentale des quarks ?

# Construction du Modèle Standard

$e^-$  sur  $p^+$  au repos

1961 Hofstadter Nobel  
charge du  $p^+$   
distribuée  
uniformément

1968

Kendall, Friedman, Taylor  
Nobel 1990

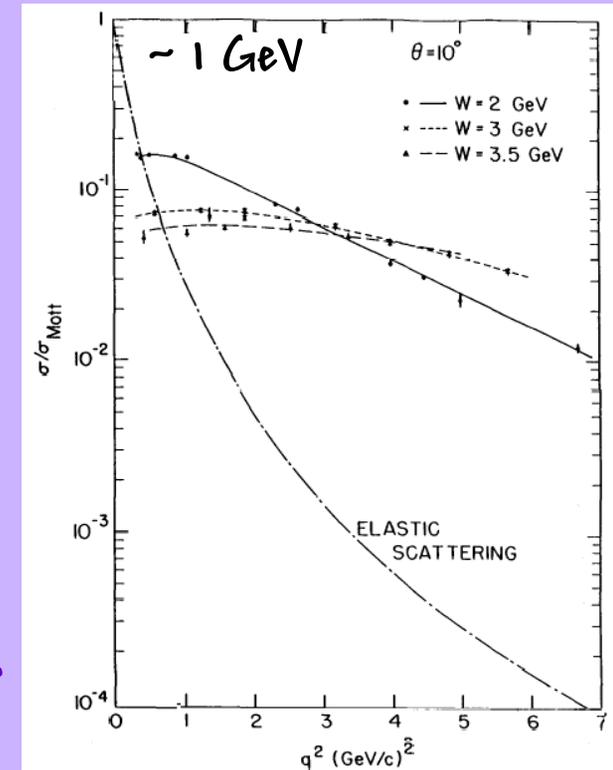
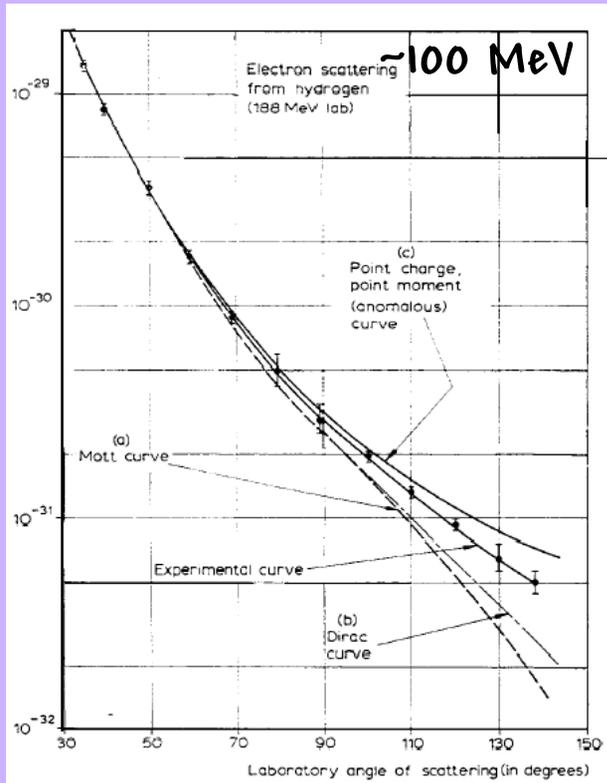
Bjorken, et Feynman Nobel 1965

interprètent les résultats:  $p^+$  composé d'objets ponctuels

## partons

Pourquoi pas des quarks?

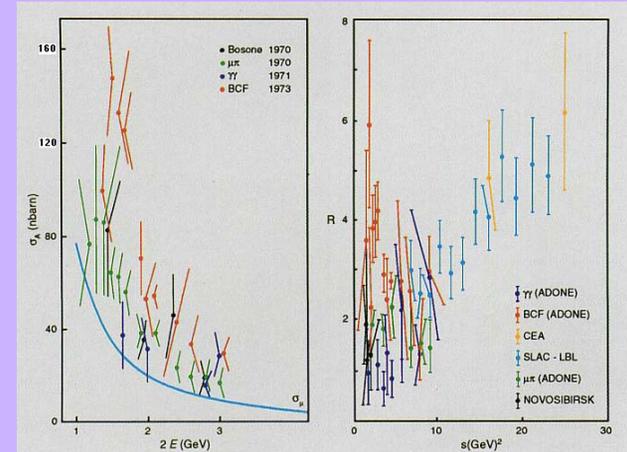
Feynman était convaincu qu'autre chose accompagnait les quarks dans le  $p^+$



# Construction du Modèle Standard



Collisionneur  $e^+ e^-$   
ADONE 1971  
3 X plus de pions  
que la théorie prédit.



1964 Greenberg nombre quantique relié à la force forte

charge de « couleur »

rouge, bleu, vert

1965 Nambu et Han quarks se combinent en objets incolores

$n, p = 3 \text{ quarks}$

$\pi, K = \text{quark-anti-quark}$

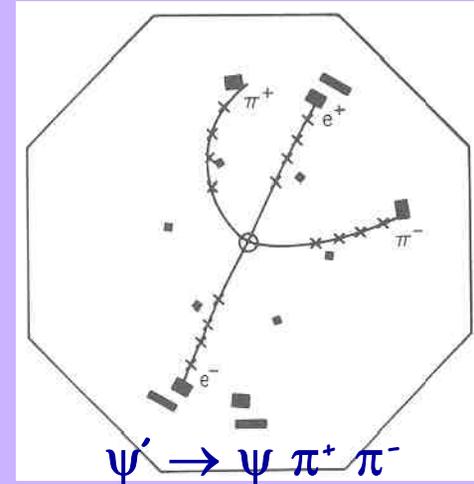
Interaction forte entre les quarks due à la propriété de couleur  
Chromo Dynamique Quantique

# Construction du Modèle Standard

1974 Richter SPEAR et Ting AGS  
Nobel 1976 découvrent le

$J/\psi$

Particule lourde, pic étroit, mais:  
particule lourde = temps de vie court  
pic étroit = temps de vie long

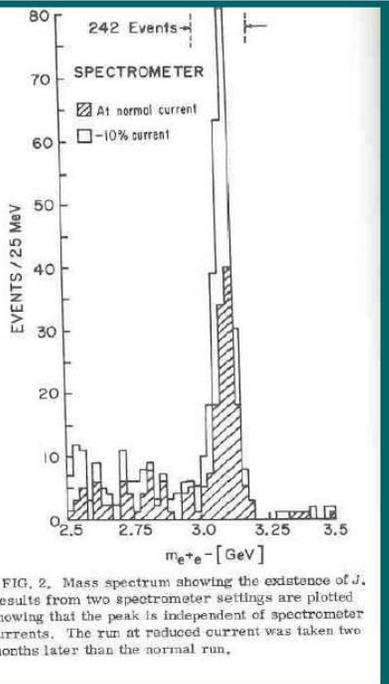


Nouveau type de matière  $\rightarrow$  4ème quark:

1964 Bjorken et Glashow 1970 Glashow, Iliopoulos et Maiani

~1977 preuve que le  $J/\psi$  = quark «charmé» + anti-quark «charmé»

2 « générations » de quarks 1. (u,d) 2. (c,s)

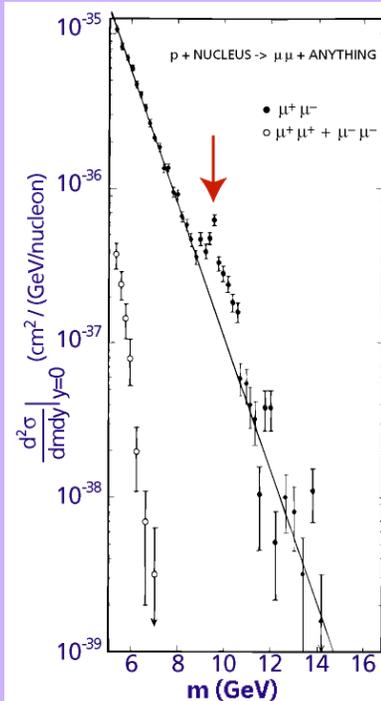
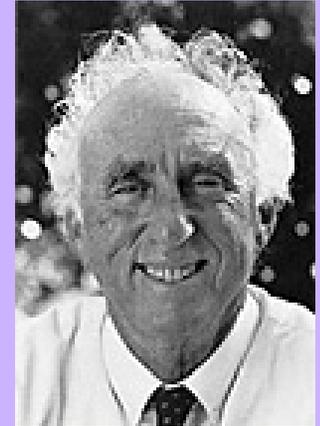


# Construction du Modèle Standard

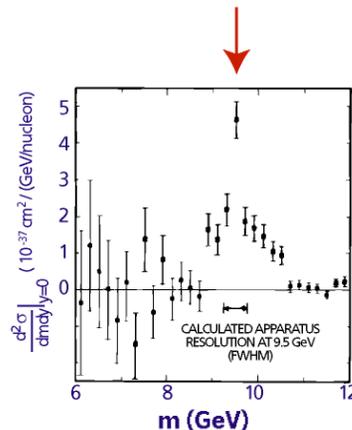
Découverte complètement inattendue à SPEAR

1976 Martin Perl (1927-) Nobel 1995

lepton  $\tau$



Results published in  
Physical Review Letters  
August 1, 1977



1978 Fermilab, Illinois

$\Upsilon$  à 10 GeV

état lié quark + anti-quark

quark « beauté »

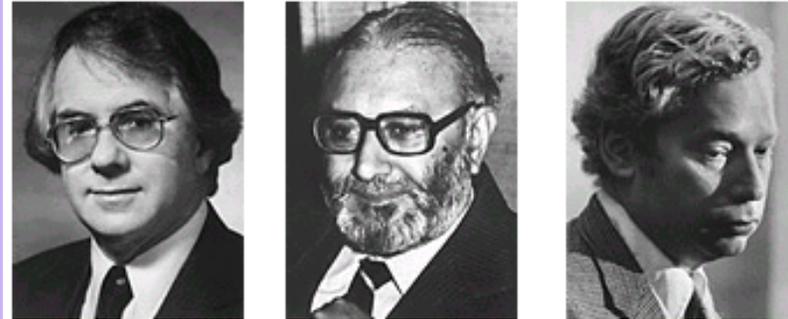
Une troisième génération donc

6e quark (1994) et 3e  $\nu$  (2000) à découvrir !



# Construction du Modèle Standard

Glashow (1961), Salam (1968) et Weinberg (1967) Nobel 1979



## « Unification électrofaible »

Échanges de transmetteurs produisent des courants:

-électromagnétiques neutres i.e. photon

-faibles chargés i.e.  $n \rightarrow p + e^- + \nu$

**Prédictions puissantes:**

o courants faibles neutres

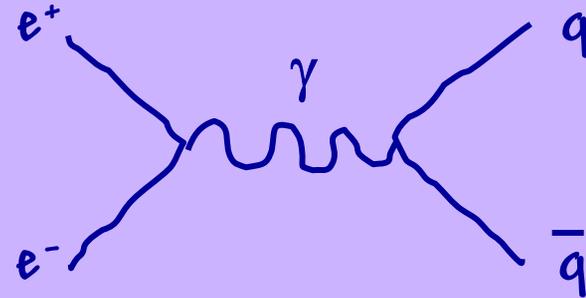
o transmetteurs « électrofaibles » massifs et leur masse  $\sim 100 \times m_p$

courant chargé  $W^+$  et  $W^-$  courant neutre  $Z^0$

# Construction du MS i.e. courants

Courants électromagnétique neutre

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma \rightarrow q + \bar{q}$$



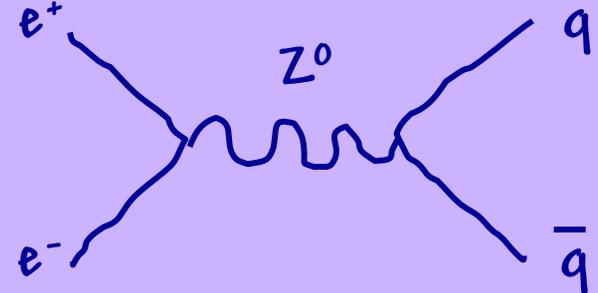
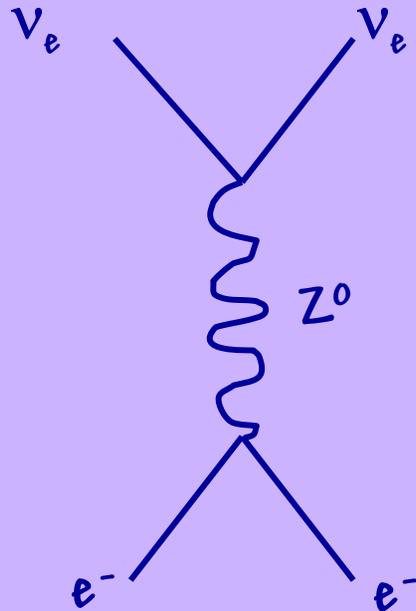
Courant faible chargé

$$W^- \rightarrow u + \bar{d}$$



Courants faibles neutres

$$\begin{aligned} \nu_e e^- &\rightarrow \nu_e e^- \\ e^+ + e^- &\rightarrow Z^0 \rightarrow q + \bar{q} \end{aligned}$$

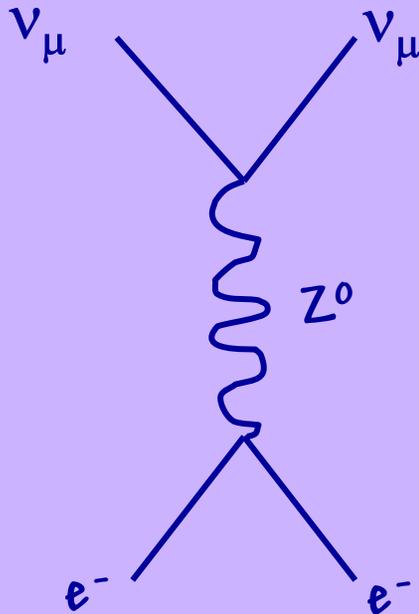


# Construction du Modèle Standard

1972

## Première observation du courant neutre

Fin des années 1960 au CERN grande  
chambre à bulles remplie de fréon.



# Construction du Modèle Standard

## 1983 Observation des $W^\pm$ et $Z^0$

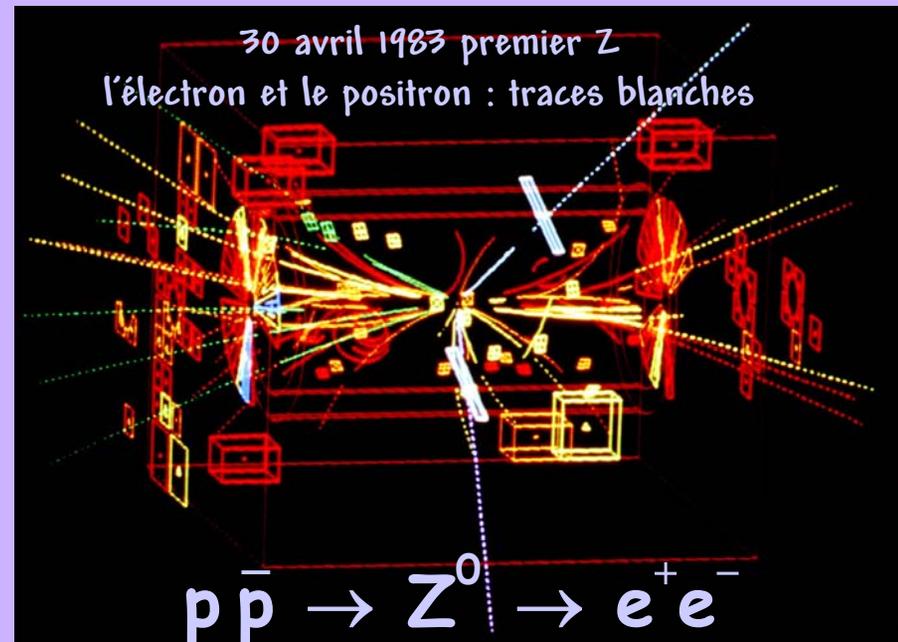
CERN anneau de stockage protons - anti-protons de 520 GeV

Van der Meer et Rubbia Nobel 1984

masses mesurées telles que prédites  $\sim 100 \times$  la masse du proton.

Avec le résultat de Gargamelle

## confirmation de la théorie électrofaible



# Construction du Modèle Standard

## symétries

Unification des interactions  $\leftrightarrow$  symétries

Mais la symétrie « de jauge » électrofaible  
n'explique pas comment les  $W^\pm$  et  $Z^0$  acquièrent une masse:  
symétries requièrent des transmetteurs de masse nulle:

Glashow, Salam et Weinberg  
mécanisme pour « briser » la symétrie  
champ de Higgs

avant la brisure:  $W^\pm W^0 B^0 m=0 \rightarrow$  après la brisure:  $W^\pm Z^0 - \gamma$   
donne aussi une masse aux fermions.

**Higgs : particule la plus recherchée**

# Construction du Modèle Standard

## Récapitulatif

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
SAVEUR	masse GeV/c <sup>2</sup>	Charge électriq.	SAVEUR	masse GeV/c <sup>2</sup>	Charge électriq.
$\nu_e$ neutrino électron.	$<1 \times 10^{-8}$	0	U up	0.003	2/3
e électron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
$\nu_\mu$ neutrino muon	$<0.0002$	0	C charm	1.3	2/3
$\mu$ muon	0.106	-1	S strange	0.1	-1/3
$\nu_\tau$ neutrino tau	$<0.02$	0	t top	175	2/3
$\tau$ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

Tout baigne...

...dans le champ de Higgs (spin 0)

force électrofaible spin = 1			interaction forte spin = 1		
Nom	Masse GeV/c <sup>2</sup>	charge électriq.	Nom	Masse GeV/c <sup>2</sup>	charge électriq.
$\gamma$ photon	0	0	g gluon	0	0
$W^-$	80.4	-1			
$W^+$	80.4	+1			
$Z^0$	91.187	0			

# L'ère des GRANDS accélérateurs



Large Electron  
Positron Collider (LEP)  
au Centre Européen  
Recherche Nucléaire  
(CERN), France et Suisse

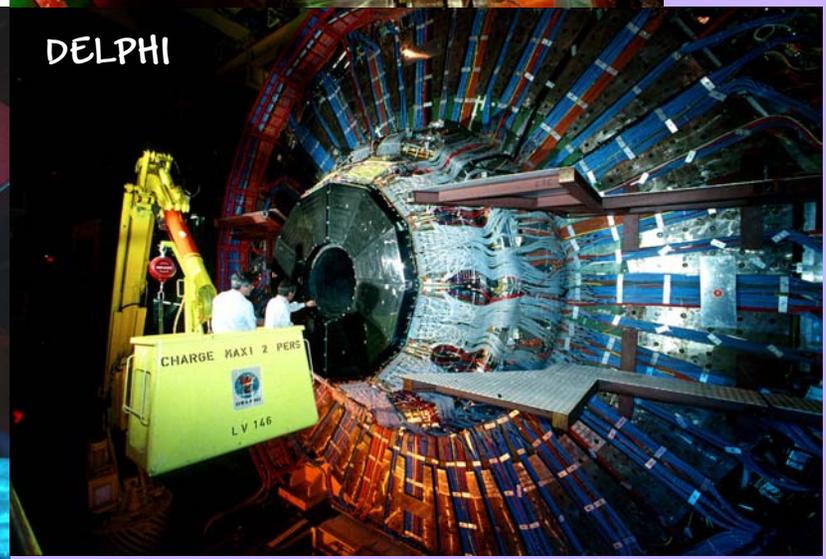
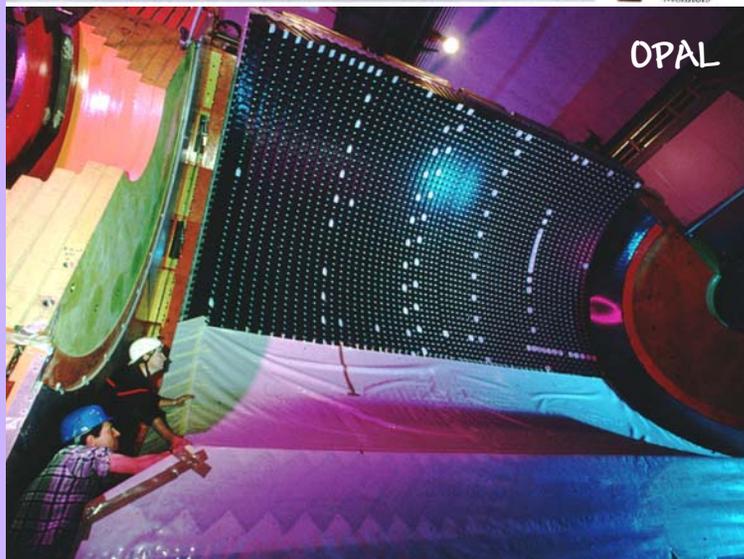
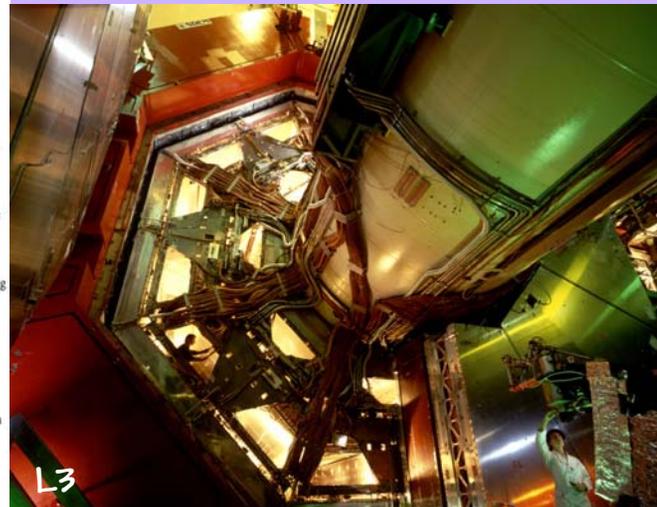
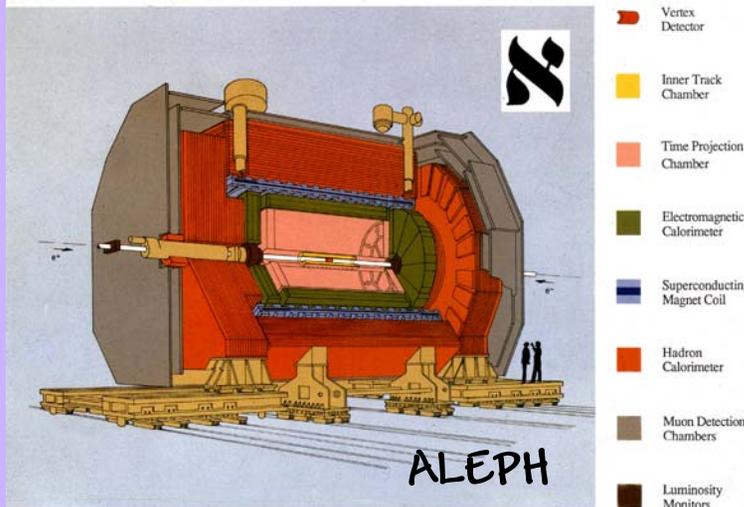
**LEP**

Large Electron Positron Collider

**CERN - Genève**

# 1989-2001 LEP au CERN

- o collisionneur e+e- de 27km de circonférence
- o  $E = 91.2 \rightarrow 209.2 \text{ GeV}$
- o 4 expériences: ALEPH, DELPHI, L3, OPAL



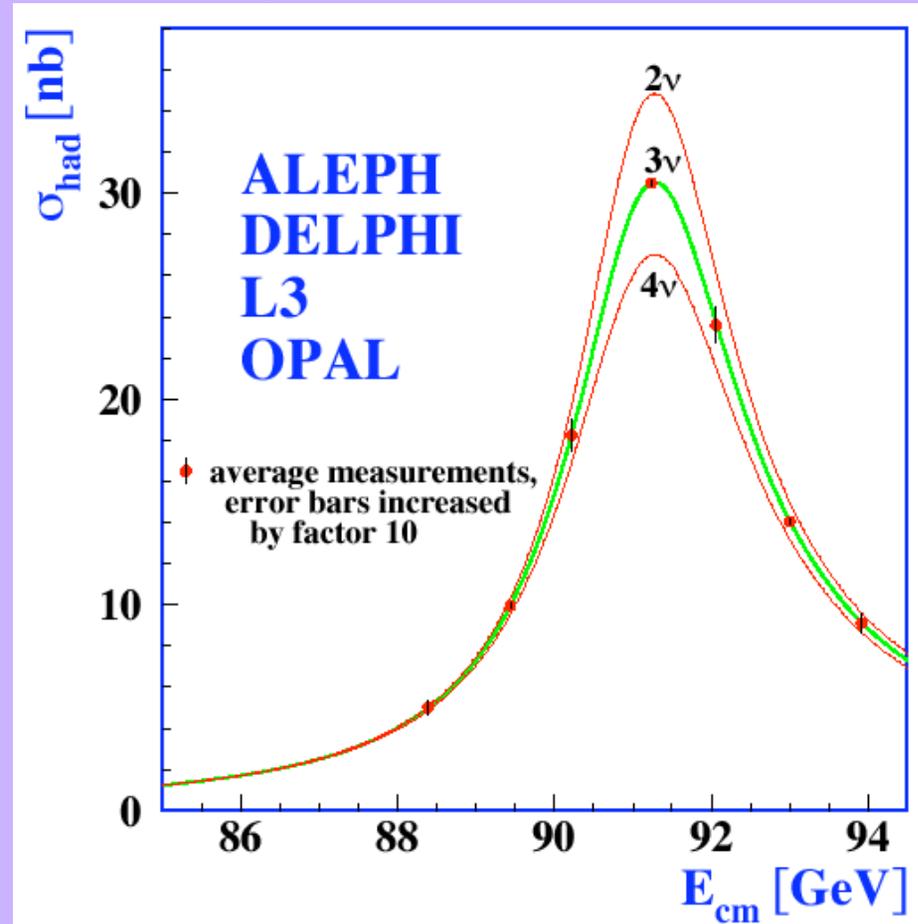
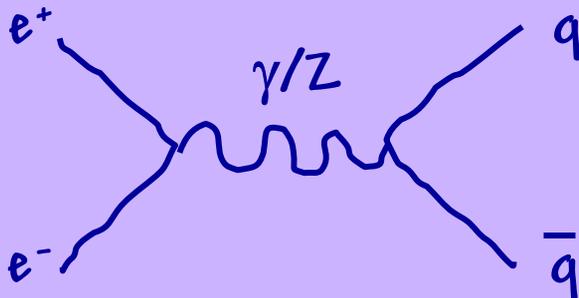
# LEP

## Premier résultat

Preuve expérimentale  
de l'existence  
de 3 et seulement 3 familles  
de neutrinos:

$$N_\nu = 2.9841 \pm .0083$$

$$e^+ e^- \rightarrow \gamma/Z \rightarrow q \bar{q}$$



Nombre de Z produits dans les collisions  $e^+e^-$   
(section efficace) en fonction de l'énergie,  
avec la prédiction du MS pour 2, 3 et 4 familles de neutrinos.

# LEP - Résultats

$m_Z - \Gamma_Z - m_W$

mesurés à

2.1 - 2.4 - 40 MeV

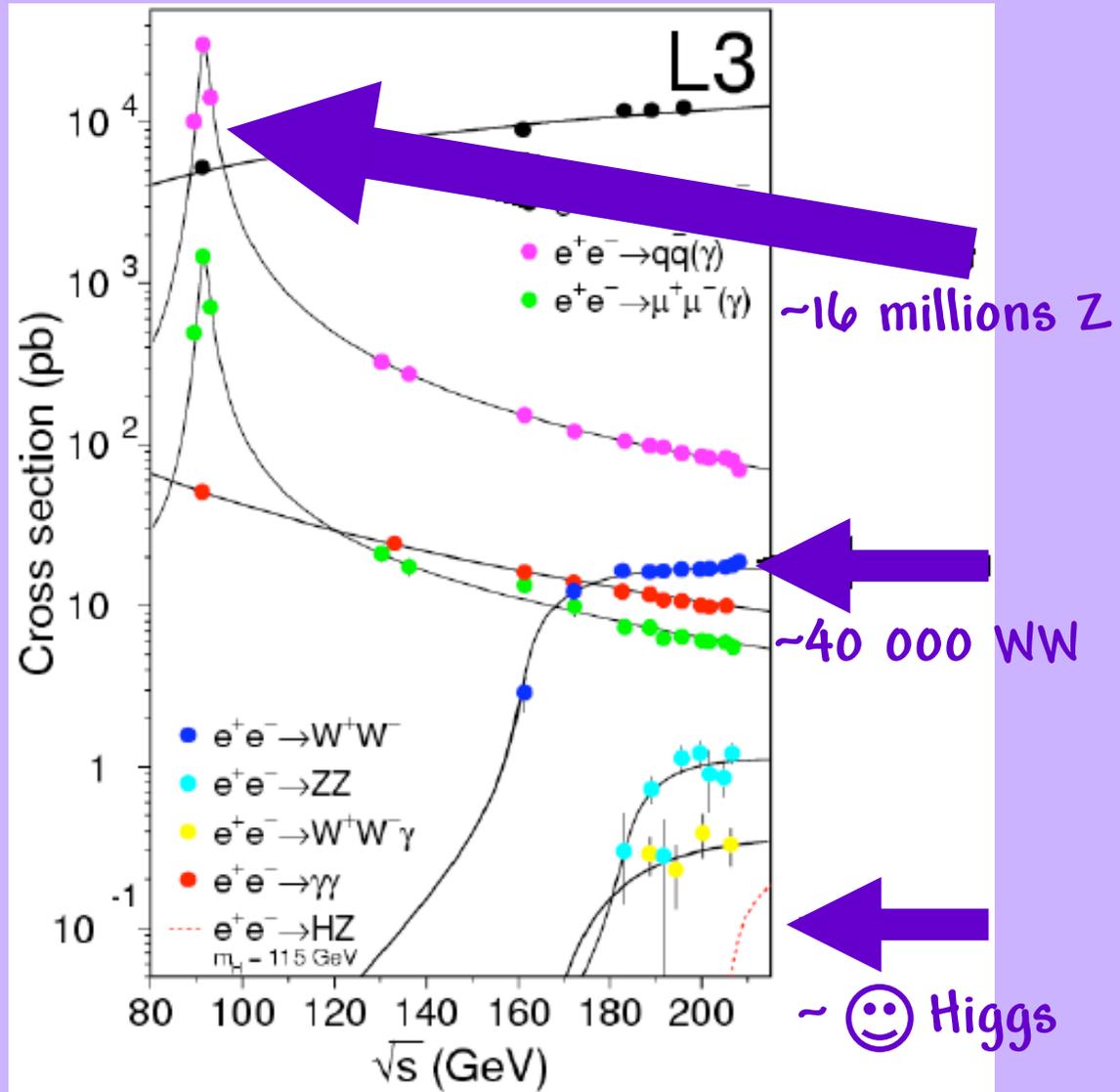
on s'attendait à

20 - 50 - 60 MeV

$$M_Z(\text{GeV}) = 91.1871 \pm .0021$$

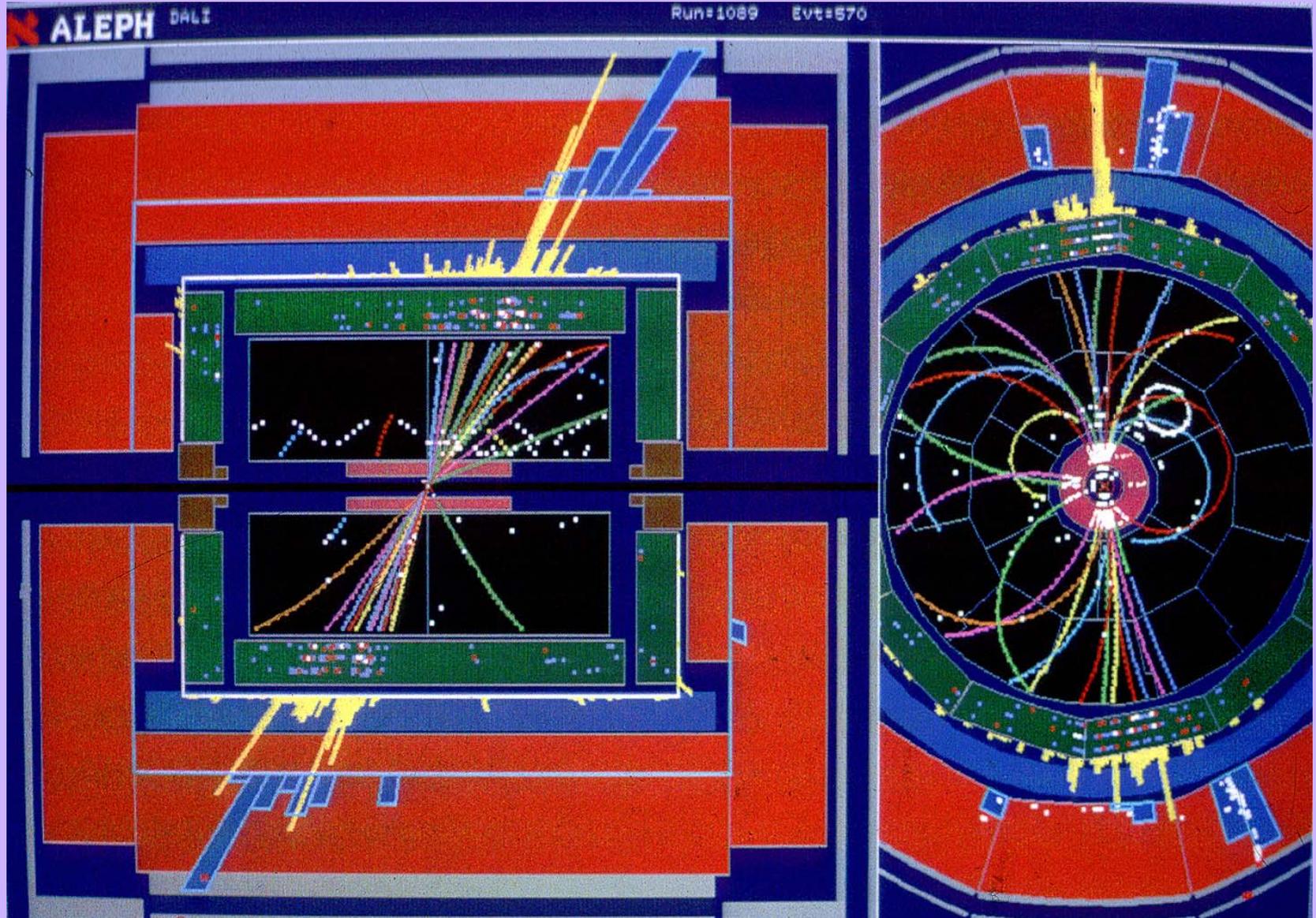
$$\Gamma_Z(\text{GeV}) = 2.4944 \pm .0024$$

$$M_W(\text{GeV}) = 80.412 \pm .042$$



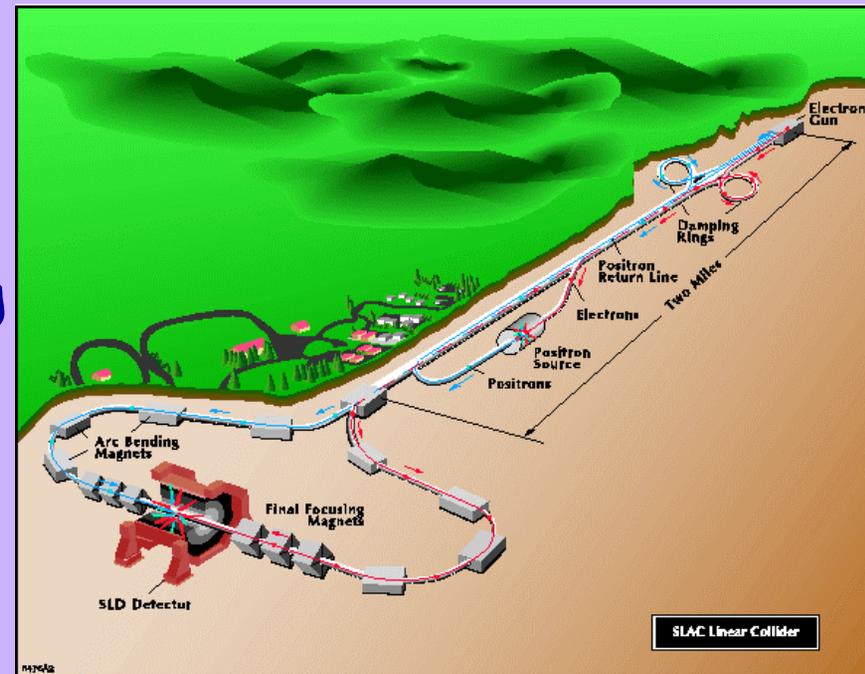
# LEP événement 2 « jets »

$$e^+ e^- \rightarrow \gamma/Z \rightarrow q \bar{q}$$



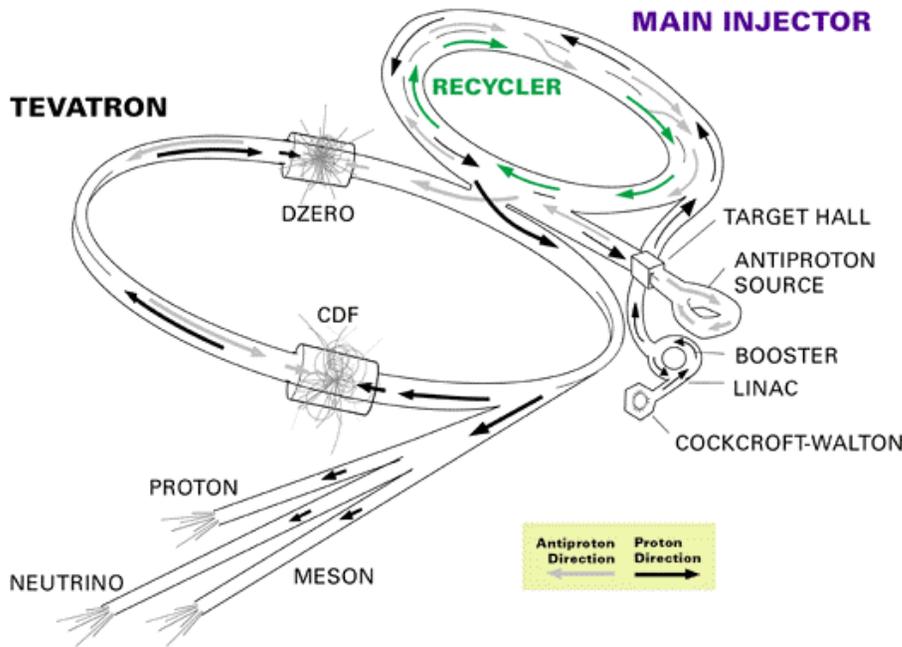
# Stanford Linear Collider

- o collisionneur linéaire e+e- 3km de long  
50 GeV/faisceau
- o mesure unique la plus précise de  $\sin^2\theta_W \sim 1 - (m_W^2 / m_Z^2)$



SLAC Linear Collider

## FERMILAB'S ACCELERATOR CHAIN



# Tevatron

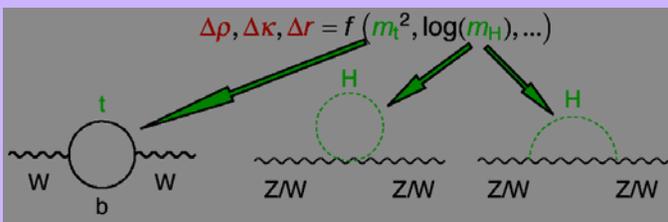
à Fermilab

- o Collisionneur p- $\bar{p}$  de 2 TeV !
- 1994 ière observation du  $b_c$  quark,  
le quark top.

# Mesures de précision testant MS

Compilation des mesures de précision testant le MS, pas seulement aux grands accélérateurs...

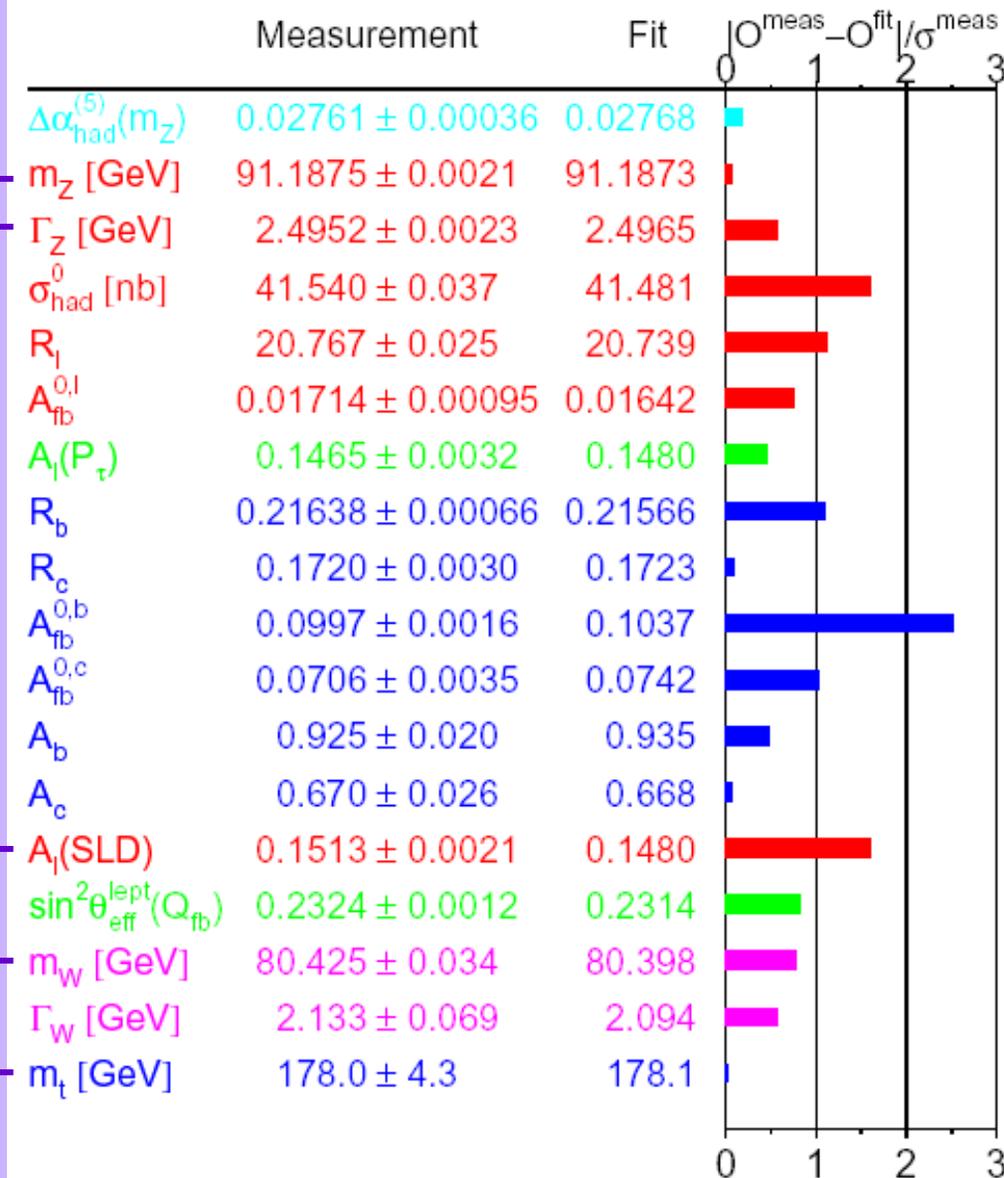
't Hooft et Veltman  
Nobel 1999  
corrections radiatives:



mesures sensibles à

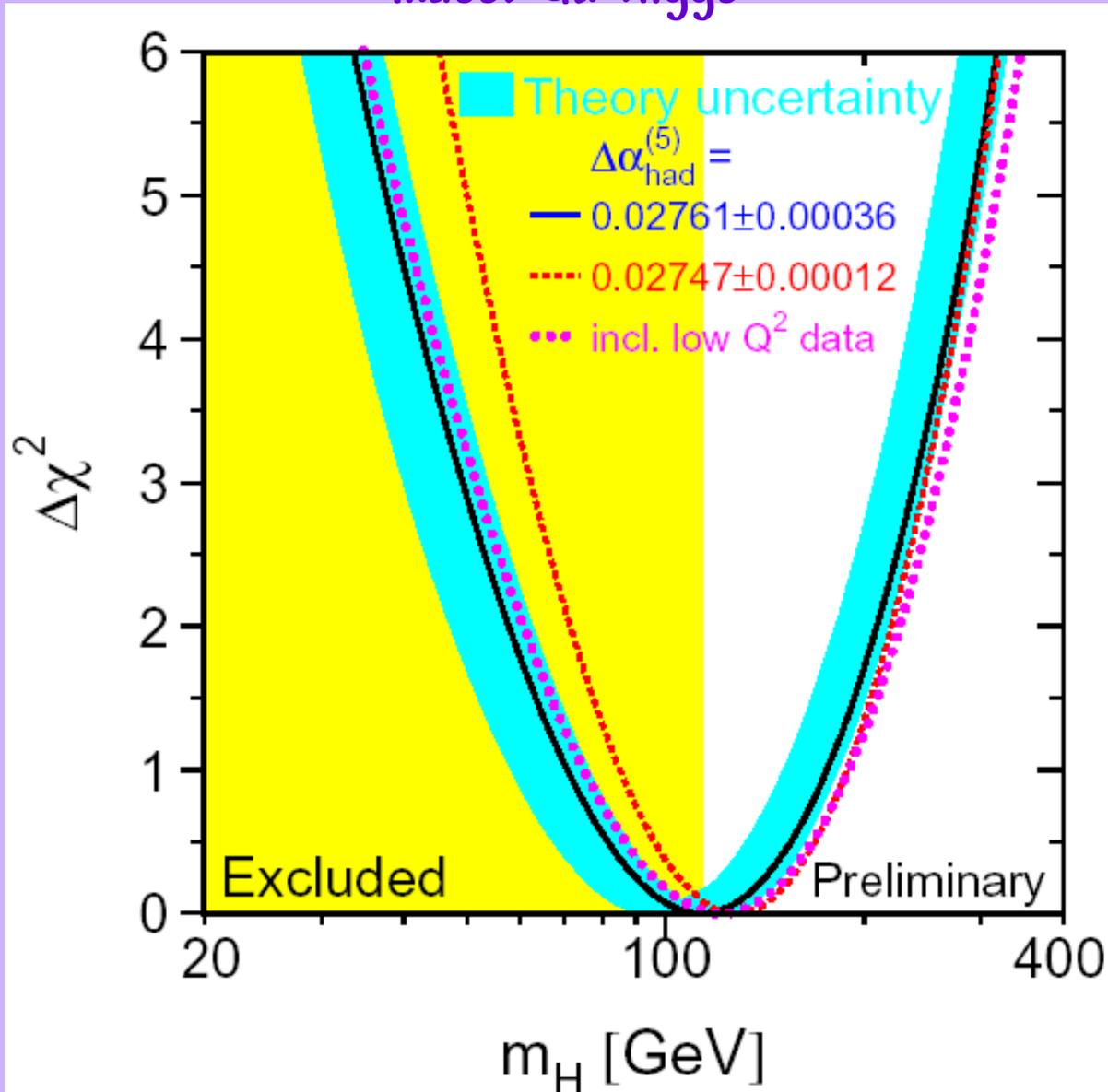
$m_{\text{Higgs}}, m_{\text{top}}$

Winter 2004



# Mesures de précision testant MS

masse du Higgs





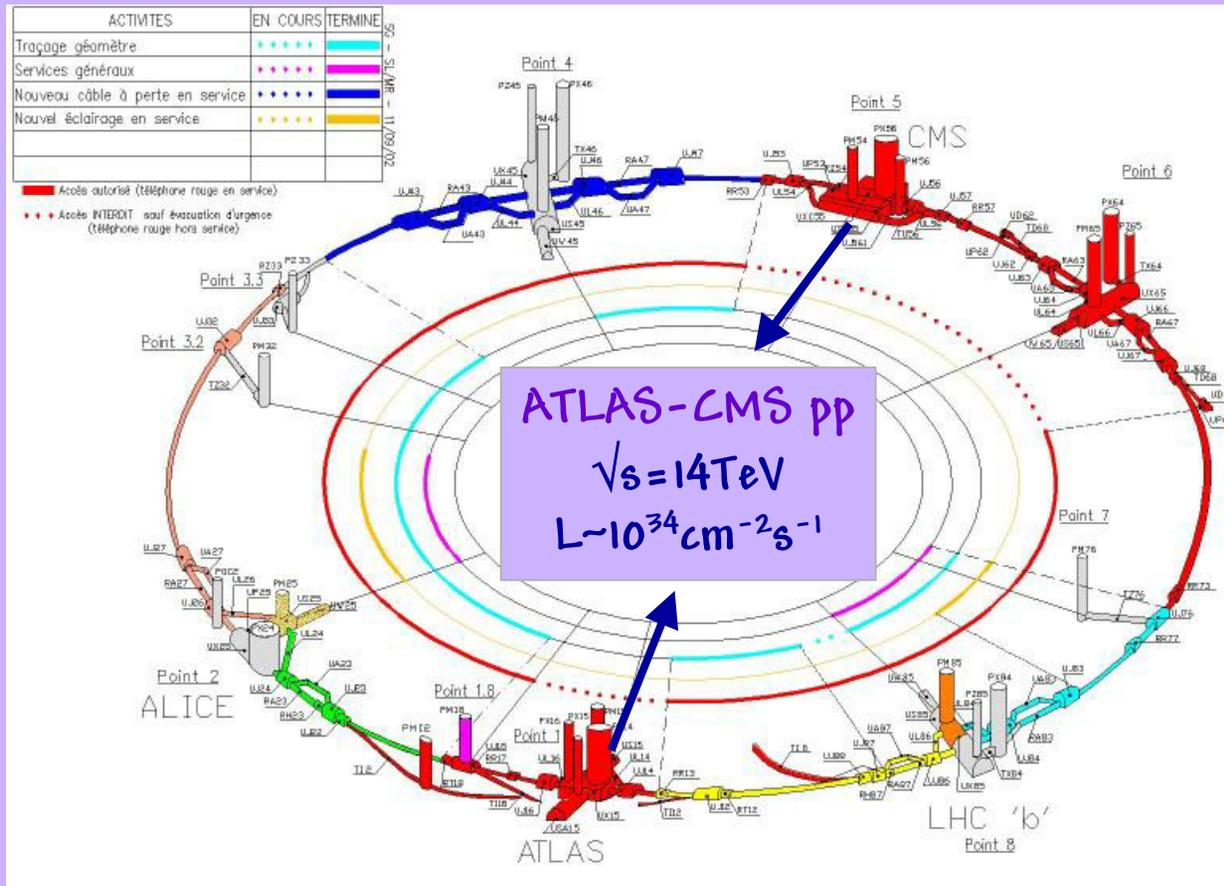
**Un futur proche grandiose:  
le LHC**

**Large Hadron Collider**

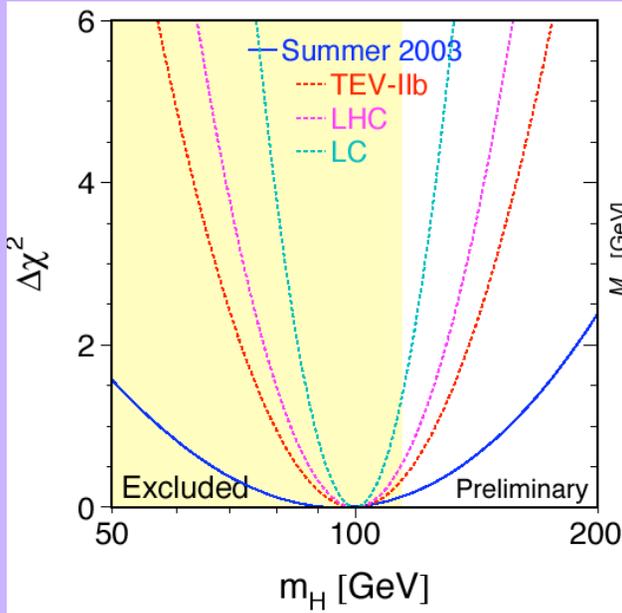
# LHC - GRAND PAS

physiquement, électroniquement, informatiquement, sociologiquement... parlant

- o collisionneur proton-proton
  - o 14 TeV  $\sim 10 \times (E_{LEP}, E_{TeV})!$
  - o luminosité  $\sim 100 \times (L_{LEP}, L_{TeV})!$
- Prise de données en 2007.

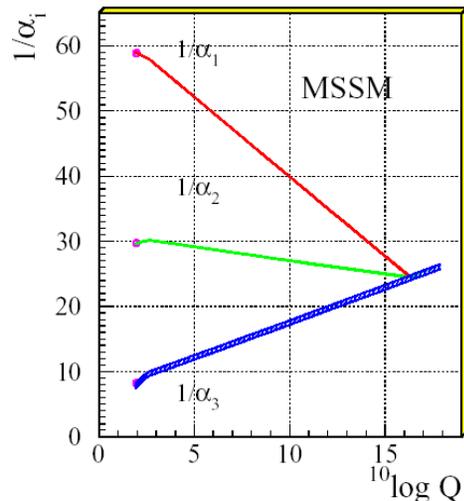
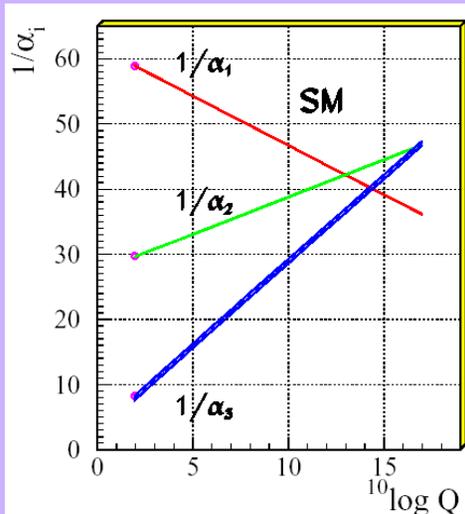
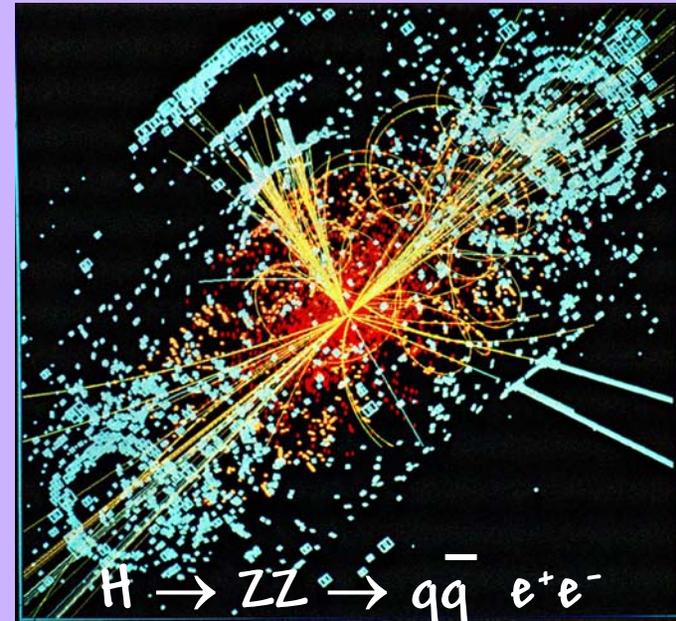


# LHC potentiel de physique



- o Mesures de précision dans le cadre du MS  
 $m_W$  2 X meilleure -  $m_{Top}$  3 X meilleure  
 $\rightarrow m_{Higgs}$  2-3 X plus contrainte

- o Higgs:  
 il sera vu s'il existe

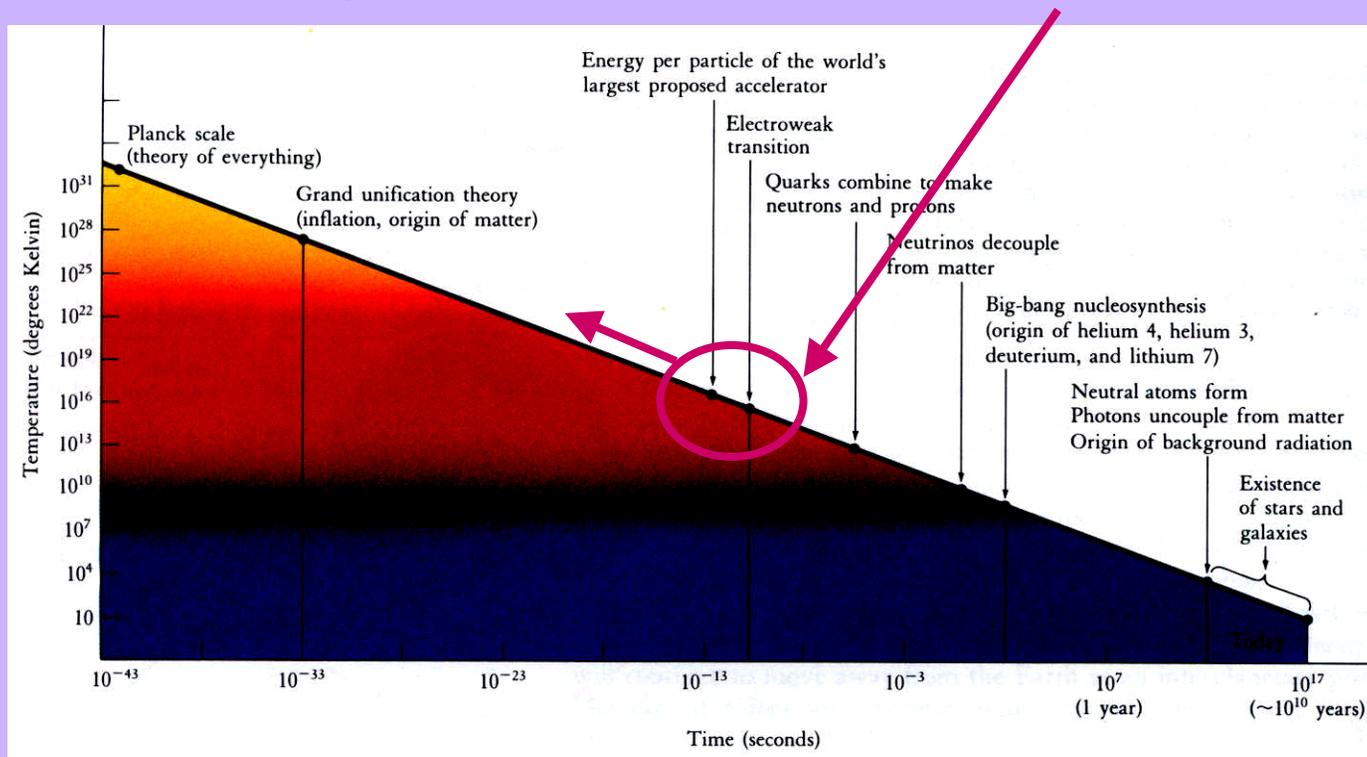


- o Brisure de symétrie électrofaible, au delà du MS i.e. SuperSymétrie: elle sera découverte si elle existe

# Conclusion

La physique des particules a subi une évolution fabuleuse depuis le début du siècle dernier.

Le prochain grand accélérateur de particules, le LHC, promet de révéler ce qu'il y a au delà de l'unification électrofaible.



# Envol

passé présent et futur optimistes  
pour la physique aux accélérateurs



# Bibliographie

- o From quarks to the cosmos, Leon M.Lederman and David N.Schramm
- o Gargamelle et les courants neutres, André Rousset
- o The Rise of the Standard Model, Particle Physics in the 1960s and 1970s  
Édité par Lillian Hoddeson et al.
- o Particle Physics: One Hundred Years of Discoveries, B.Armstrong et al.

# Annexe

## Retombées

WWW, médecine, électronique,  
informatique i.e. calcul en parallèle GRID  
technologie détecteurs au silicium → cécité,...

# Annexe:

Univers aujourd'hui =

70% énergie noire, 25% matière noire, 5% matière, 0.05% radiation

En expansion infinie.

$10^{-43}$  s après Big Bang

l'U mesure  $10^{-33}$  cm

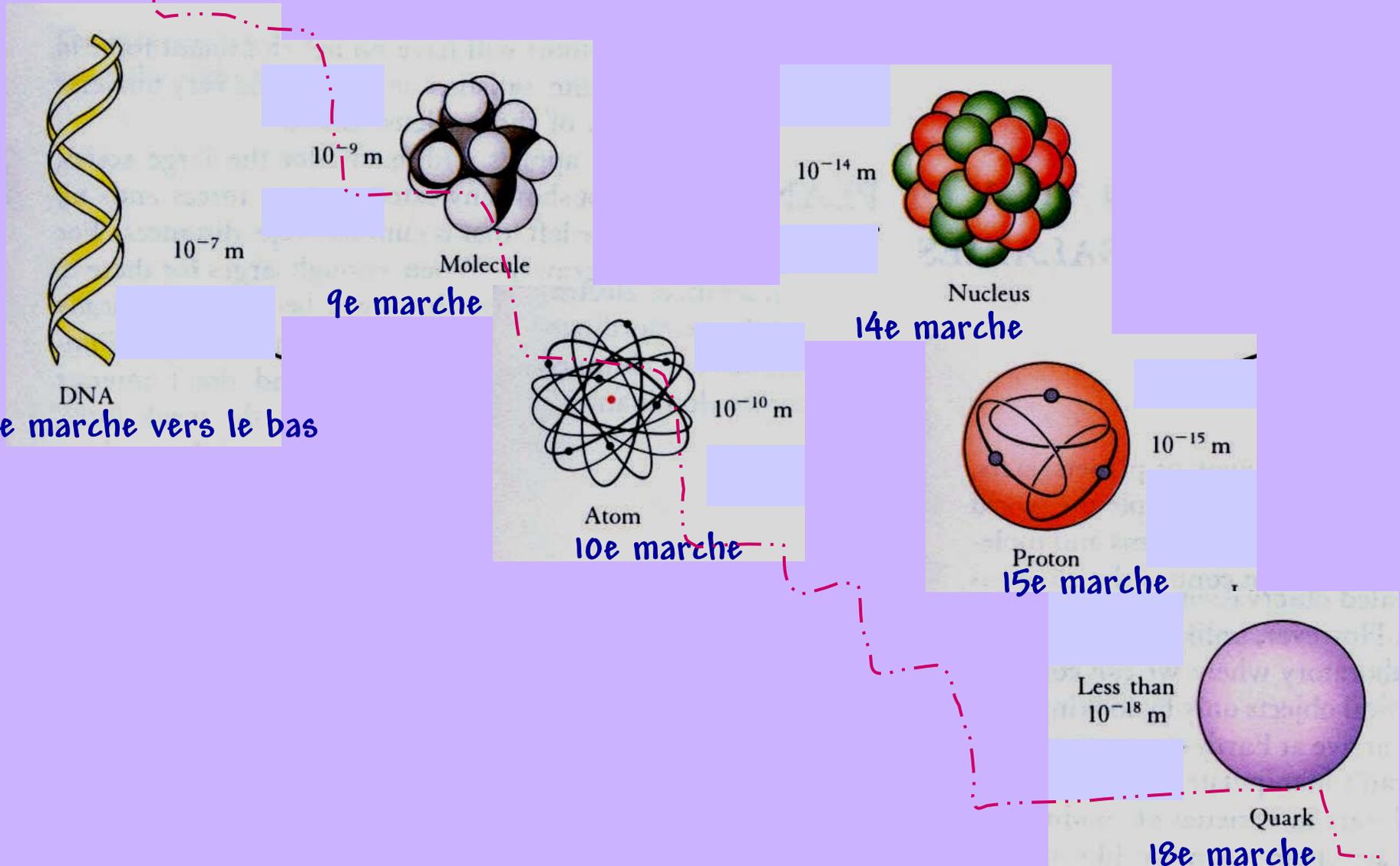
soit BEAUCOUP BEAUCOUP plus petit qu'un noyau d'atome  $10^{-13}$  cm

Le température  $10^{32}$  K

La densité  $10^{94}$  g/cm<sup>3</sup>

Instant (s)	Taille(m)
$10^{-44}$	$10^{-35}$
$10^{-35}$	$10^{-14}$ (Noyau atomique)
$10^{-32}$	$10^{-1}$ (Pomme)
$10^{17}$	$10^{25}$

# Annexe: Vision moderne de la matière



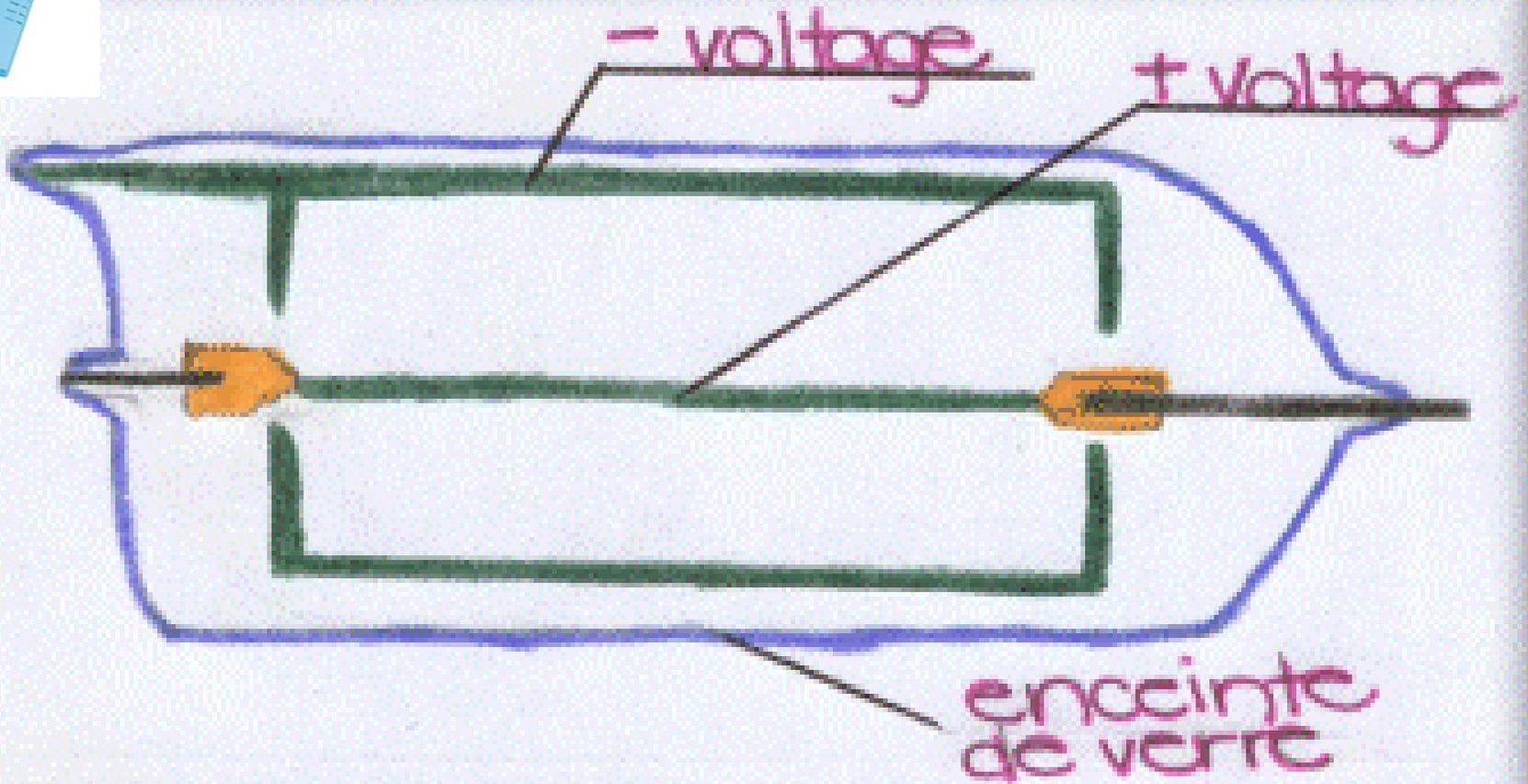
# Annexe: Vision du noyau dans l'atome



Grain de riz

# Annexe: Particules élémentaires

Hans Geiger mis au point le premier compteur en 1908  
en travaillant avec Rutherford



COMPTEUR GEIGER

# Annexe: Particules élémentaires

$$m_e = 0.5110041(8) \text{ MeV} = 9 \times 10^{-31} \text{ Kg}$$

$$m_n = 939.5731(27) \text{ MeV}$$

$$m_p = 938.2592(52) \text{ MeV}$$

# Annexe: Particules élémentaires

## La relation énergie-température

Température d'un système mesure l'énergie moyenne des particules

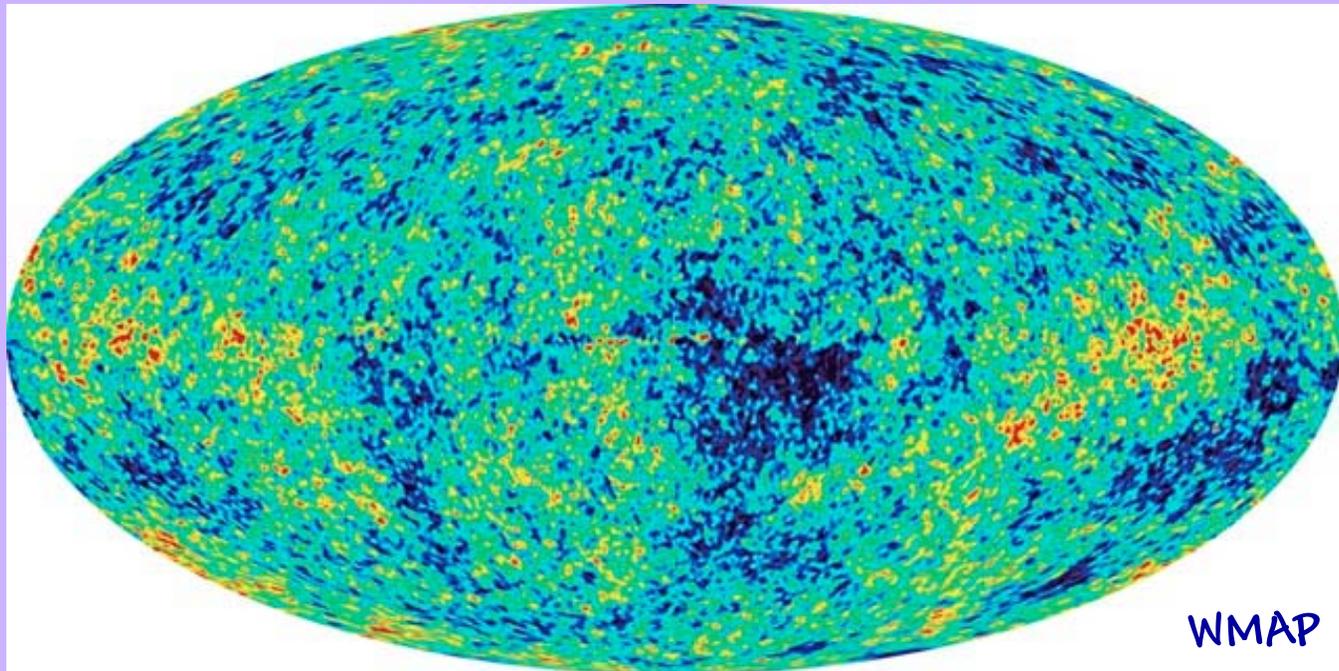
$$E = kT$$

où  $k$  = constante de Boltzmann =  $8.6174 \times 10^{-5} \text{ eV Kelvin}^{-1}$

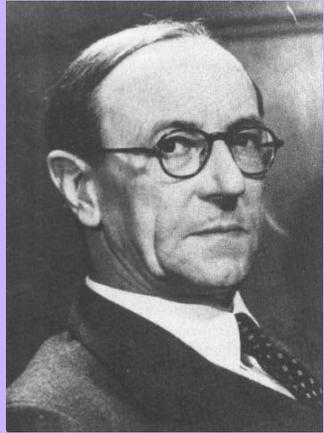
$T = 10\,000 \text{ degrés K}$  = énergie cinétique moléculaire moyenne de  $1 \text{ eV}$

$T = 300 \text{ K}$  température de la pièce = énergie moyenne de  $1/30 \text{ eV}$

L'Univers très froid de  $3 \text{ K}$  =  $1/3000 \text{ eV}$



# Annexe: Particules élémentaires???



James Chadwick (1891-1974) Nobel 1935

Violation de la loi de la conservation de l'énergie  
dans les désintégrations  $\beta$ .  
Particule invisible émise?

Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958) Nobel 1945

1930 proposa l'existence du **neutrino  $\nu$**



Paul Dirac (1902-1984) Nobel 1933

1927 Équation de Dirac: comportement de l' $e^-$  en présence de champs.

Prédictions saisissantes:

- o spin de l'électron  $\rightarrow$  nombre quantique du moment angulaire =  $\frac{1}{2}$
- o existence de l'anti-particule de l' $e^-$

**positron  $e^+$**

symétrie parfaite entre la matière et l'antimatière.

# Annexe

## Particules élémentaires

### Chambres proportionnelles à multi-fils

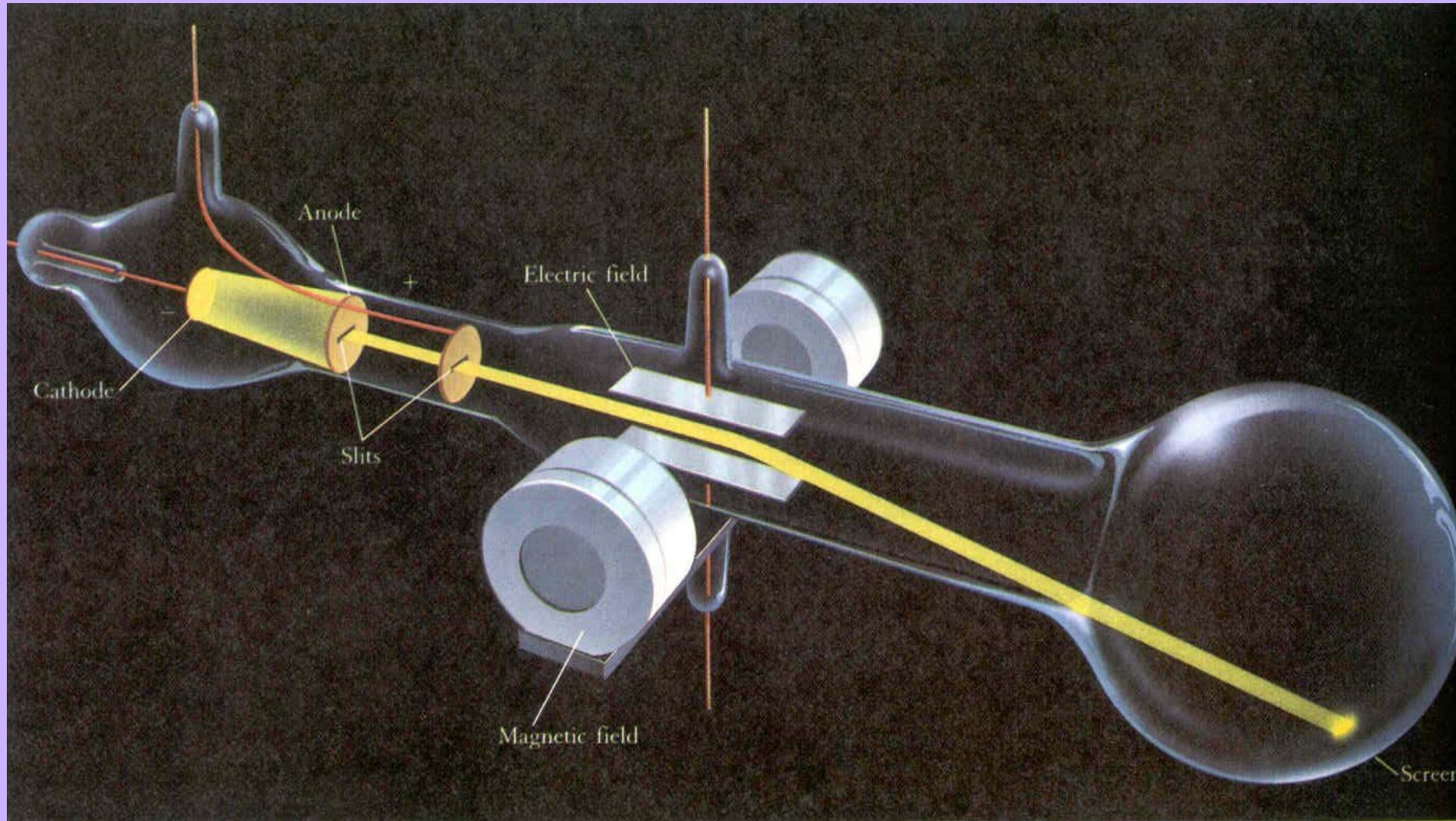
Une véritable percée pour la précision de la mesure du temps et de l'espace,  
inventée par **Georges Charpak** (1924-) en 1969, Nobel 1992  
???scan p78???

Fils parallèles tendus sur  
un support isolant. Une tension  
de plusieurs milliers de volts  
appliquée sur chaque 2<sup>e</sup> fil,  
les autres fils étant à la masse.  
Espace entre les fils:  $\geq 2\text{mm}$ .  
Le plan de fils placé entre  
deux plans conducteurs  
i.e. moustiquaires en métal,  
et le tout est plongé dans un gaz.  
Le passage d'une particule génère  
un courant sur les fils.



Georges Charpak, Fabio Sauli et  
Jean Claude Santiard, 1970.

# Annexe: Premiers balbutiements Tubes cathodique



# Annexe: Premiers balbutiements Tubes cathodiques

Si une tension est appliquée à un gaz raréfié, en soudant des fils aux deux bouts d'un tube en verre, des luminescences spectaculaires sont observées.

On appelle ces fils des *électrodes*.

L'électrode connectée à la source négative d'électricité est la *cathode* et le terminal positif est *l'anode*.

Les décharges électriques luminescentes émanent de la cathode et foudroient le verre autour de l'anode, illuminant le verre.

Les rayons des cathodes sont en fait des faisceaux d'électrons (découverts par Thomson avec un tube cathodique).

Un fil chauffé émet des électrons négatifs libres, qui sont ensuite accélérés vers des fentes chargées positivement.

Un faisceau étroit sort des fentes en direction de plaques.

Les champs entre les plaques peut défléchir le faisceau.

# Annexe: Premiers balbutiements accélérateurs électrostatiques

inventé par

John D. Cockroft et Ernest T.S. Watson

Le plus réussie développée par

Robert Van de Graaff en 1931.

ions positifs jusqu'à 1.5 MeV

**Générateur Van de Graaff:**

réservoir sous pression,

électrons de l'atome d'hydrogène arrachés.

Ceinture isolante transporte la charge,

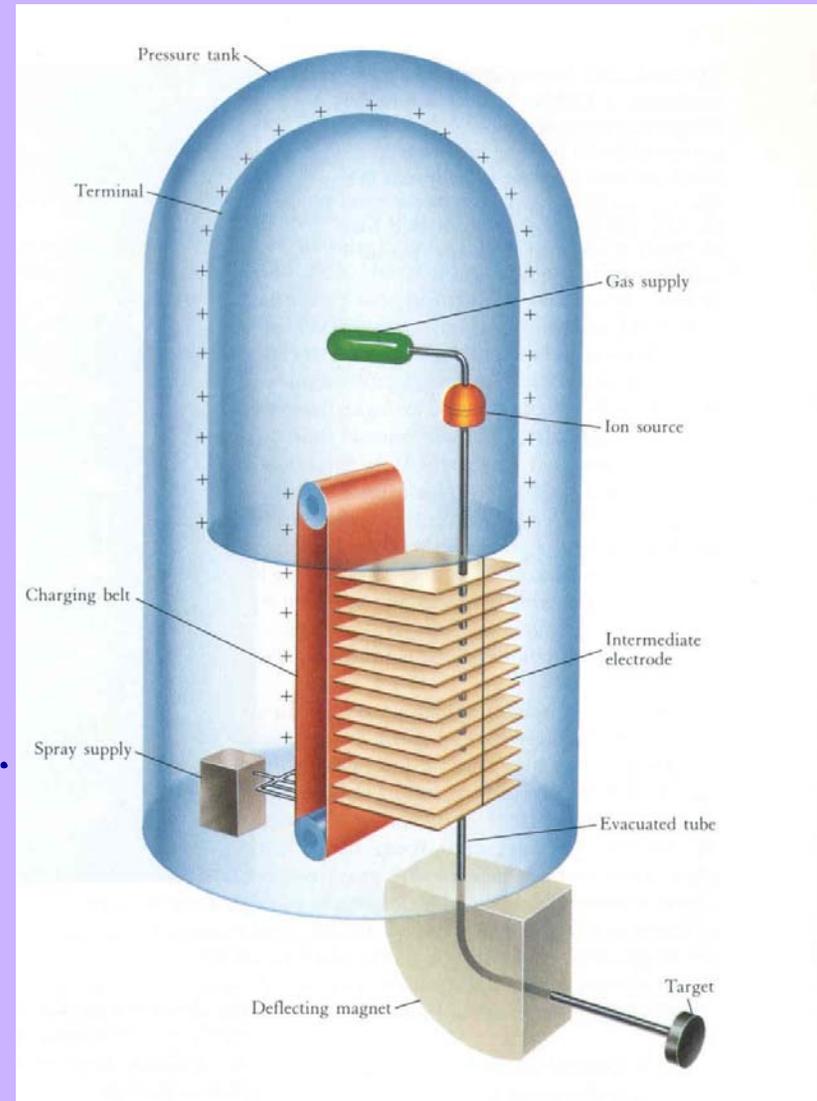
donne au réservoir une tension 0.1-10 MeV.

Les ions sont accélérés vers le bas

dans le tube d'évacuation,

gagnant en énergie

et un aimant oriente les ions vers la cible.



# Annexe: Premiers balbutiements E.O. Lawrence et le cyclotron

Dans un champ vertical,  
une particule en mouvement horizontal trace un cercle  
et le temps pour un circuit est indépendant de la vitesse de la particule.

Plus la vitesse augmente,

plus le rayon de sa trajectoire circulaire augmente,  
et le parcours plus long compense exactement pour la vitesse plus élevée.  
Ainsi, on peut accélérer la particule grâce à une tension radio-fréquence,  
de fréquence exactement égale à la fréquence de rotation.

La radio fréquence est simplement une tension dans une brèche,  
qui alterne entre tension positive et négative  
synchrone avec le parcours circulaire de la particule.

La particule est accélérée à chaque passage dans la brèche.

Au fur et à mesure que l'énergie augmente,  
le rayon augmente, mais la période de l'orbite est constante.

## Annexe:

Le premier cyclotron Lawrence.

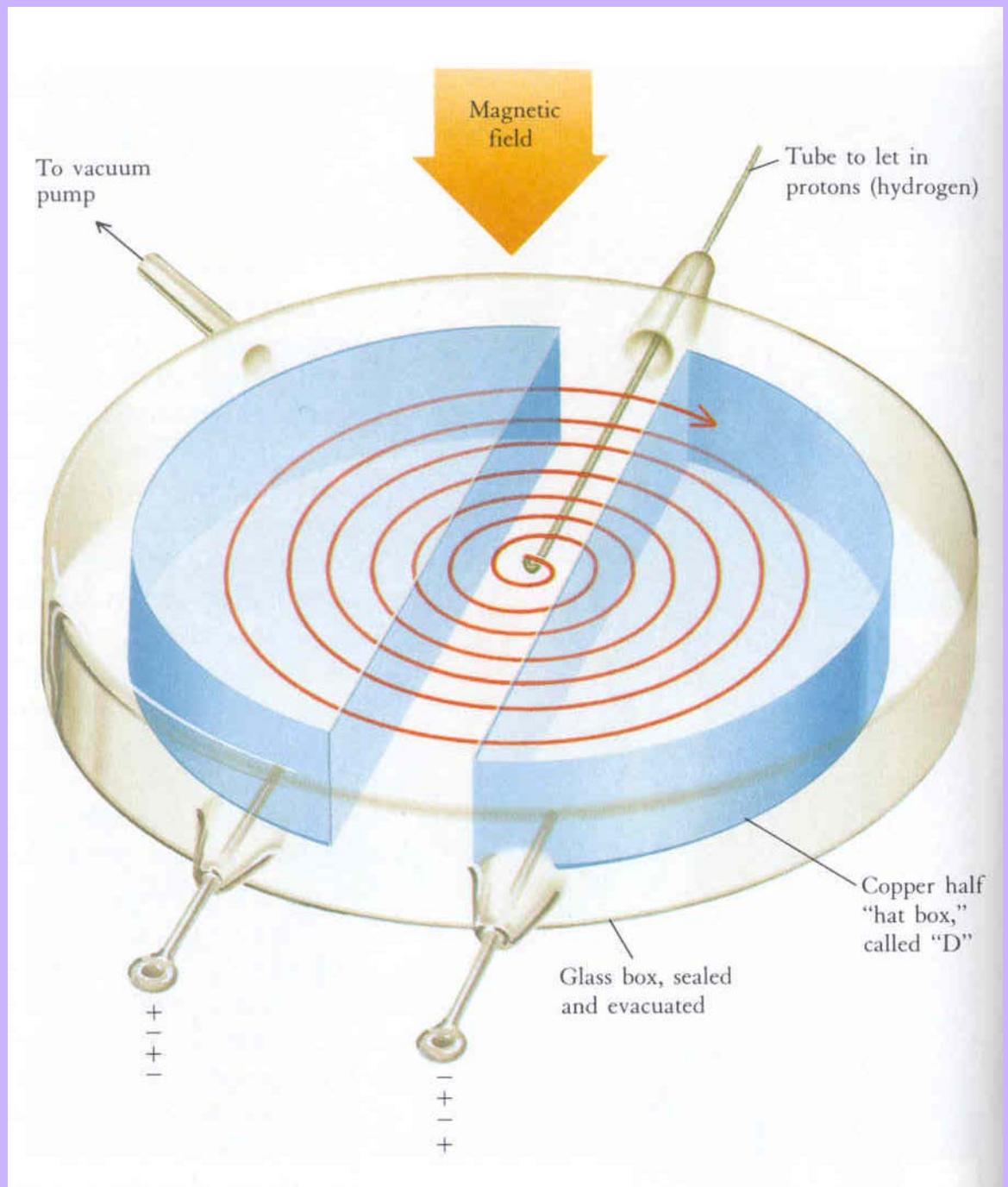
Le boîtier en cuivre est installé

entre les pièces pôles d'un électroaimant. Un petit tube mène un filet de gaz d'hydrogène jusqu'au centre du boîtier, où une étincelle arrache l'électron de chaque atome.

Les protons dérivent et sont accélérés dans la brèche.

Au fur et à mesure que les protons gagnent en énergie, le rayon de leur orbite augmente et ils tournent en spirale graduellement hors de la limite du champ magnétique.

L'air est pompé pour que les collisions avec les molécules d'air n'interfèrent pas avec l'accélérateur.



# Annexe: Premiers balbutiements

La percée technologique  
Ernest O Lawrence (1901-1958)  
Nobel 1938

1930 Inspiré par un article de  
Rolf Wideroe

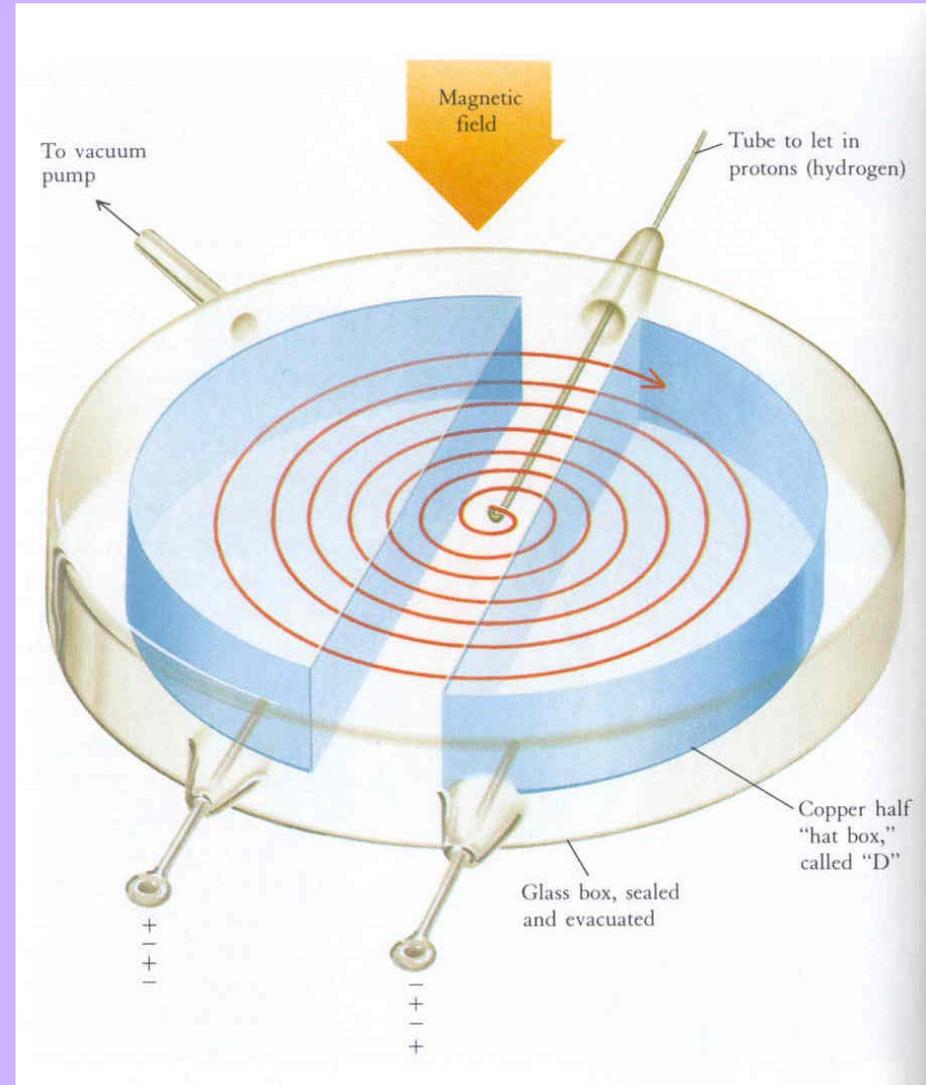
accélérateur à induction magnétique:

champ magnétique  
variant dans le temps  
accélère les particules.

Lawrence

confina le mouvement des particules  
dans un champ magnétique.

## Le cyclotron



# Annexe: Premiers balbutiements

La masse des particules accélérées augmente lorsque leur vitesse est à quelques % de la vitesse de la lumière.

La période de l'orbite change et la particule n'est plus synchronisée avec la radio-fréquence de l'appareil. Nouvelle invention

## synchrocyclotron

la fréquence varie pour tenir compte de l'augmentation de la masse. Mais il fallait construire d'énormes aimants, de 60 à 500 cm de diamètre.

Pour atteindre des énergies plus élevées, une approche différente

## synchrotron

Le rayon de l'orbite est maintenue constante. Le champ magnétique est augmenté en synchronisant avec le gain en impulsion. La fréquence radio est aussi augmentée jusqu'à ce que les particules se rapprochent de la vitesse de la lumière. A ce moment, la fréquence peut être constante.

Un champ magnétique est requis seulement autour de l'orbite.

La stabilité des orbites est un facteur crucial.

## focalisation forte

# Annexe: Premiers balbutiements

Dans les accélérateurs circulaires, les particules tournent des dizaines de millier de fois durant le cycle d'accélération.

Ainsi la stabilité des orbites est un facteur crucial.

Toute petite déviation du cercle parfait

i.e. déviation de trajectoire due à une collision avec un atome de gaz résiduel  
augmenterait en taille avec chaque tour effectué  
et mènerait éventuellement à la perte de la particule,  
à moins que des forces convergentes soient utilisées.

En 1952, une découverte sur la convergence magnétique fut faite  
au laboratoire de Brookhaven

## la focalisation forte

Les machines pouvaient dorénavant être aussi grandes que rêvées!

Les deux plus grands PS:

450 GeV SuperPS du CERN (France-Suisse) mi 1970 6.9 km de circonférence

1000 GeV PS de Fermilab (Illinois) mi 1970 6.3 km

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## Découverte du neutrino muonique

Cette découverte allait avoir des conséquences de très longue portée!

On suggéra que les 2 types de neutrinos différaient de *saveur* :

l'un était de saveur électronique, l'autre de saveur muonique.

Cette suggestion ne fut pas complètement sérieuse...

mais le concept de saveur devint crucial pour l'élaboration du MS.

Dans cette généralisation,

nous avons 6 saveurs de quarks,

et de manière équivalente, 6 saveurs de leptons.

L'idée simple de saveur fut reconnue de manière explosive

dans le cas dramatique des deux saveurs de neutrinos,

où la distinction était subtile.

# Annexe: Construction du Modèle Standard

La Voie du Milieu organisait les nouvelles particules en groupes de familles qui nous rappelait le tableau périodique des atomes.

Ce tableau ne fut compris que lorsqu'on comprit que l'atome était un noyau composé de protons et de neutrons entouré d'électrons.

Pouvait il donc y avoir une physique sous-jacente à cette nouvelle classification?

GM et George Zweig (CalTech) ont proposé de manière indépendante une structure sous jacente et fondamentale des particules.

Les deux hommes ont proposé un triplet fondamental de particules qui composeraient tous les hadrons.

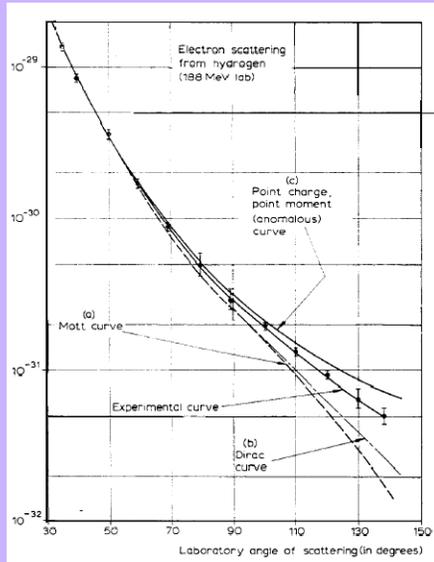
Il faudrait d'abord qu'elles aient des charges fractionnelles (de l'électron)! Elles transporteraient aussi  $1/3$  des propriétés du neutron ou du proton.

GM tenait quand même à son idée.

Il appela les particules de son triplet, fameux pour ses jeux littéraires et linguistiques, les *quarks*.

## L'hypothèse des quarks

# Annexe??? Construction du Modèle Standard???



1961 Hofstadter Nobel

charge du  $p^+$  distribuée uniformément???

1960-1970 SLAC 3km de long,  $e^-$  de 20 GeV

$e^-$  sur  $p^+$  au repos pour dévoiler structure du  $p^+$

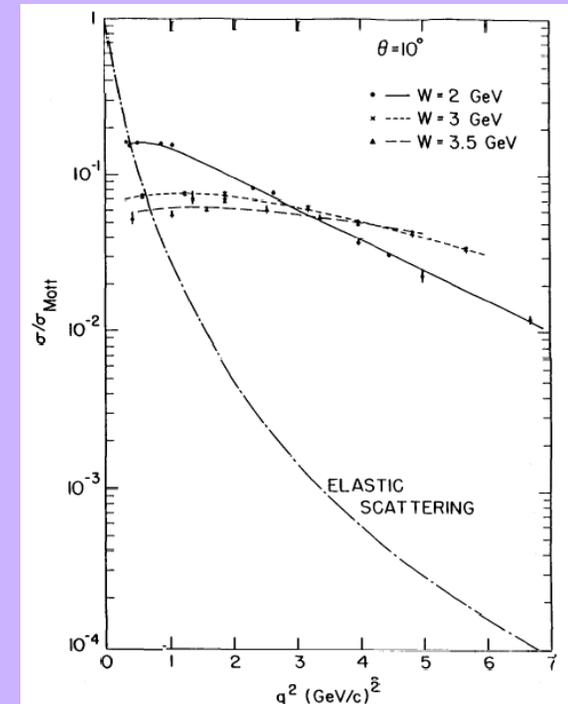
Kendall et Friedman Nobel 1990 avec Taylor

J.D. Bjorken, et R. Feynman Nobel 1965  
sous composantes ponctuelles du proton  
qui diffusaient les électrons:

**partons**

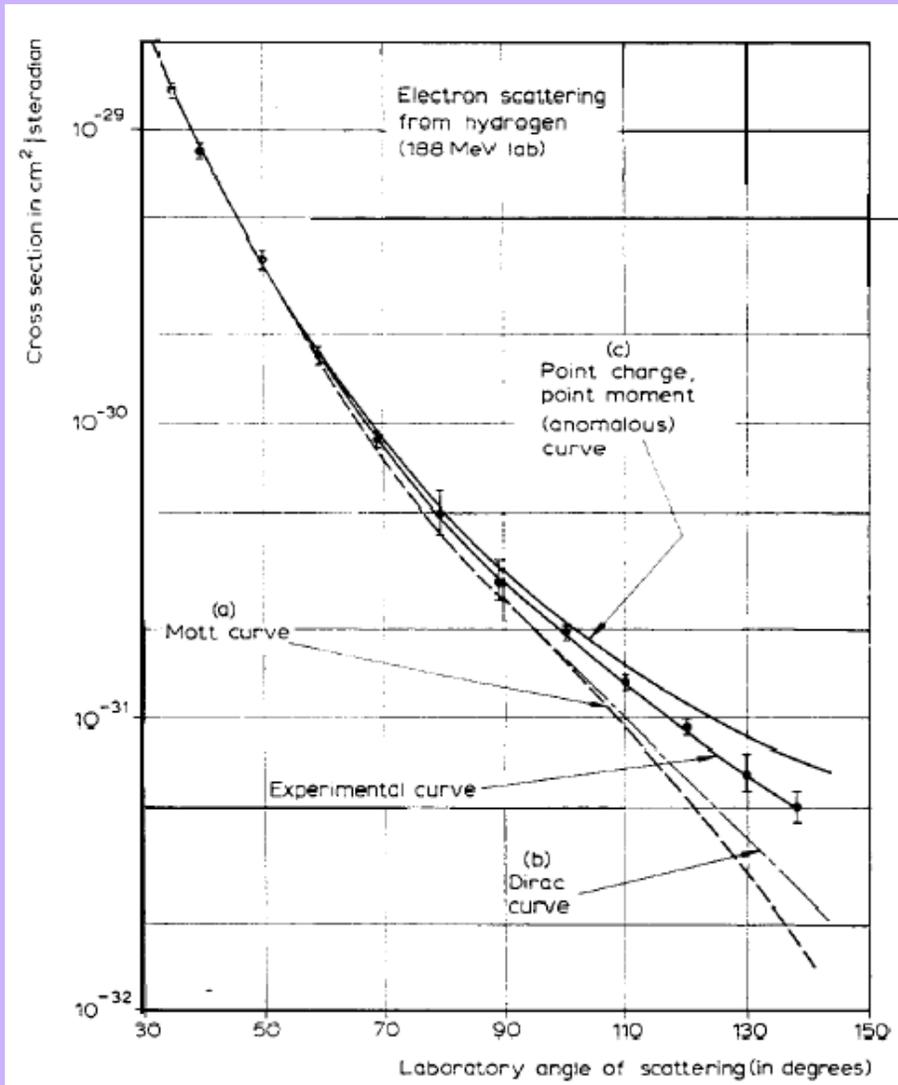
Pourquoi pas des quarks?

Feynman était convaincu qu'autre chose  
accompagnait les quarks dans le proton.

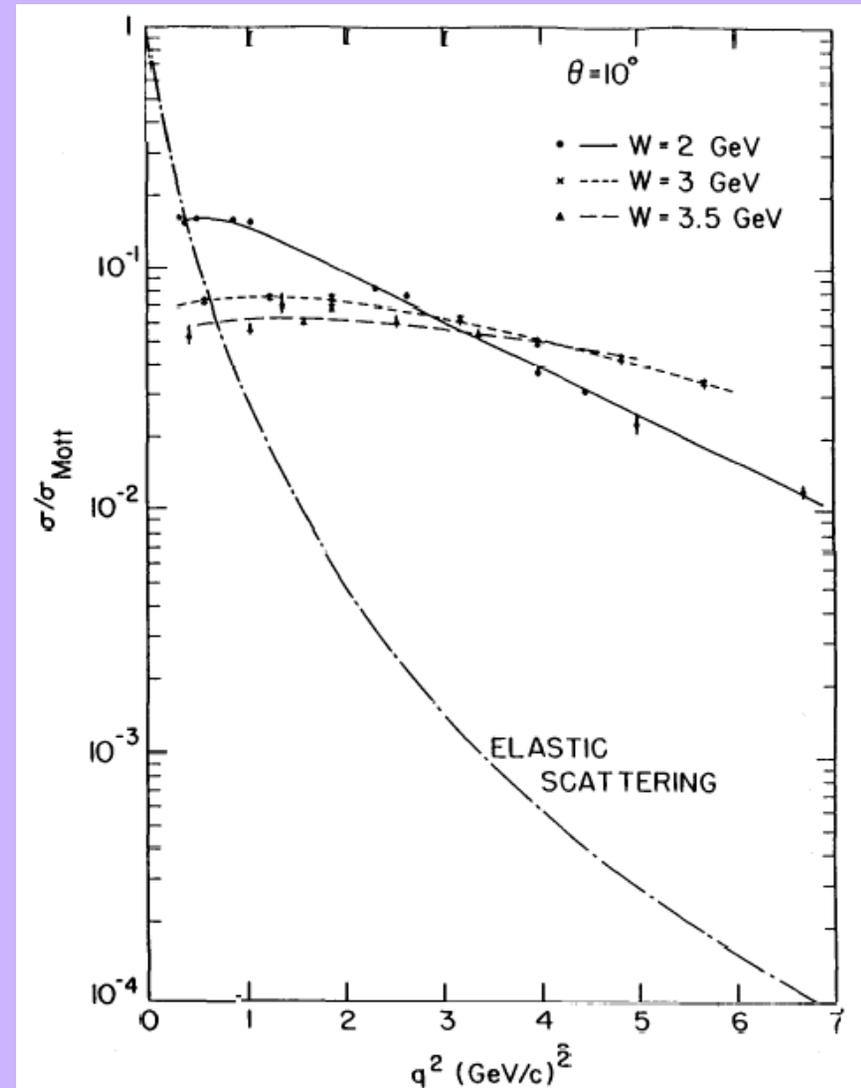


# Annexe: Construction du Modèle Standard

Hofstadter Nobel 1961 diffusion e- sur proton



SLAC diffusion e- sur proton



# Annexe: Construction du Modèle Standard

Dépendance en  $q^2$  est reliée principalement aux propriétés de la cible-proton.

La différence flagrante entre le comportement des sections efficaces DIS et élastique est illustrée dans cette figure.

Quand l'expérience fut conçue, il n'y avait pas de prédiction théorique.

Les observations de Hofstadter dans ses expériences de diffusion élastique d'électron sur le proton ont montré que le proton a une taille de  $10^{-13}$  cm et une distribution de charge uniforme.

Ce résultat, plus le cadre théorique qui était en vogue dans ce temps, suggérait au groupe de Friedman que la section efficace DIS e-p tomberait rapidement en fonction de  $q^2$  vu qu'on pensait que le proton était composé de quelque chose d'homogène, mais au contraire, on trouva une section efficace plutôt plate, consistante avec le fait que le proton était composé d'objets ponctuels: les quarks. Par la suite, en augmentant le  $q^2$ , on observa des violations d'échelle, qui correspondait au fait qu'on commençait à voir les gluons.

???inelastic vs elastic???how do they distinguish???

# Annexe: Construction du Modèle Standard

Au bout de quelques années, il devint clair que les partons étaient bel et bien les quarks et gluons, ces derniers étant les transmetteurs de la force forte.

Quarks: indivisibles, petits, comprimables.

Le Big Bang exigeant des densités de matière bien au delà de ce qu'aurait permis le proton ou le neutron,

les quarks convenaient très bien. Les quarks étaient de véritables particules capable de défléchir des électrons, même si ces quarks étaient apparemment confinés dans les protons et neutrons. Ce confinement était une autre propriété bizarre des quarks.

Le confinement fut inventé par des théoriciens après avoir échoué de nombreuses fois d'observer des quarks de charge  $1/3$ . Les quarks étaient donc confinés en permanence dans les hadrons et il n'était pas plus possible d'isoler un quark que de séparer les pôles nord et sud d'un aimant.

Le confinement nous apprend quelque chose de fondamental sur la force entre les quarks.

# Annexe: Construction du Modèle Standard

Feynman se doutait qu'il y avait autre chose que des quarks dans le proton.

L'évidence pour cet autre chose vint en 1978 à PETRA accélérateur  $e^+e^-$  30 GeV à Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY) Hambourg

## gluons

Transmetteurs de l'interaction forte

comme les photons pour l'interaction électromagnétique.

Gluon et photon sont des bosons de spin 1, de masse nulle.

Mais les gluons transportent la charge forte de couleur, alors que le photon n'a pas de charge électromagnétique.

La force entre les quarks augmente quand on tente de les séparer, alors que la force entre les électrons diminue.

Dire que la force augmente signifie qu'il y a plus de gluons.

Plus les quarks sont rapprochés, moins il y a de gluons.

C'est ce que l'on appela la

**liberté asymptotique**

à petites distances, les quarks se comportent comme des particules libres.

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## Vérification expérimentale des quarks

### Collisionneurs $e^+e^-$

Collider	Lab	Physics Dates	Beam Energy GeV	circumference km
SPEAR	SLAC	1972 – 1990	4	0.23
DORIS	DESY	1973 –	5.6	0.29
PETRA	DESY	1978 – 1986	23.4	2.3
CESR	Cornell	1979 – 1994	6	0.77
PEP	SLAC	1980 – 1990	15	2.2
TRISTAN	KEK	1987 –	32	3.02
BEPC	China	1989 –	2.2	0.24
SLC	SLAC	1989 –	50	1.46
LEP-1	CERN	1989 – 1995	55	26.66
VEPP-4M	Novosibirsk	1994	6	0.37
LEP-1.5	CERN	1995	130	26.66
CESR-2	Cornell	1995 –	6	0.77
LEP-2	CERN	1996 –	180	26.66

# Annexe: Construction du Modèle Standard

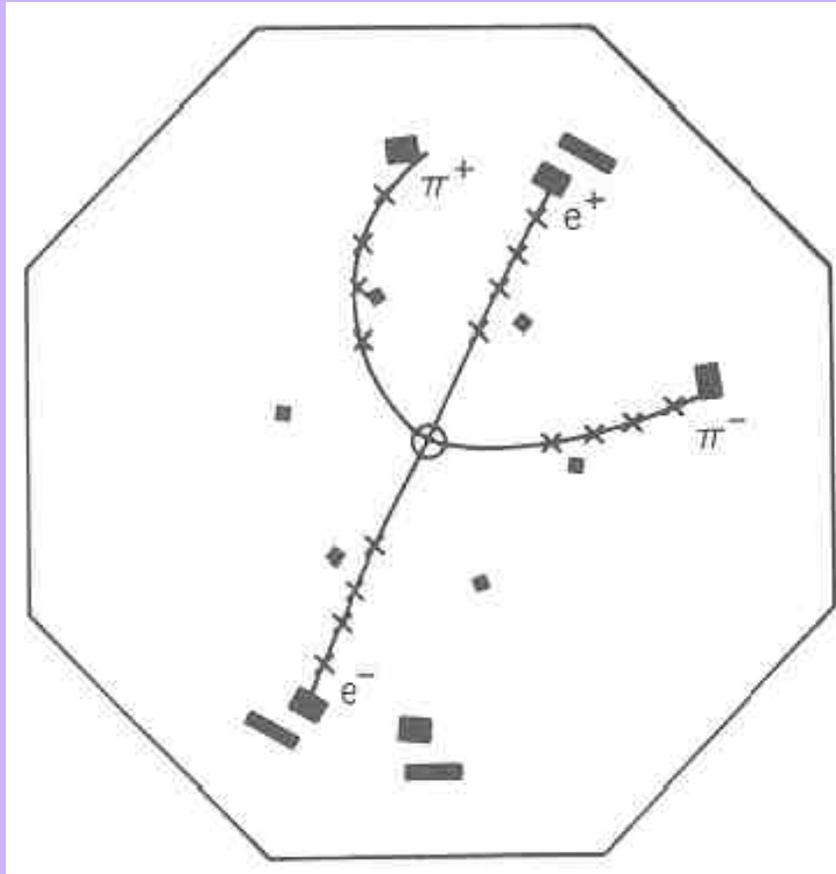


Figure 9.1: An example of the decay  $\psi' \rightarrow \psi \pi^+ \pi^-$  observed by the SLAC-LBL Mark I Collaboration. The crosses indicate spark chamber hits. The outer dark rectangles show hits in the time-of-flight counters. Ref. 9.5.

# Annexe: Construction du Modèle Standard Gargamelle

## Première observation d'un courant neutre

L'effet psychologique de cette trouvaille est considérable.

Ensuite, dans la communauté scientifique,  
et tout particulièrement chez les théoriciens,  
cet événement est souvent considéré comme une preuve décisive  
en faveur de l'existence des courants neutres,

Les résultat final sera publié en 1976.

Avec 9 fois plus de clichés qu'en 1973,  
deux nouveaux événements seulement sont trouvés.  
Ils sont cependant suffisants pour confirmer définitivement  
l'existence du courant neutre leptonique.

# Annexe: Construction du Modèle Standard

simultanément à

## Fermilab

augmenter l'énergie de la machine de 400 GeV à 1000 GeV.

Un anneau d'aimants supra conducteurs de 6km de circonférence

Possibilité d'expériences à cible fixe

ou anneau de stockage à collisions protons sur anti-protons

Aimants supra ne deviennent jamais chauds.

Ce programme débuta en 1979.

# Annexe: Construction du Modèle Standard

CERN défricha le terrain pour la source d'anti-protons:

L'espace étant limité dans le tube à vide

les anti-protons doivent d'abord être comprimés.

Le refroidissement stochastique

inventé par Simon Van der Meer

schéma complexe pour que les anti-protons circulent

de manière beaucoup plus cohérente et ordonnée.

Beaucoup plus d'anti-protons pouvaient être rajoutés au faisceau.

Fermilab défricha la technologie des aimants supras:

développées dans les années 1960-70, aimants supras en alliage de Niobium

refroidis jusqu'à environ 4 degrés Kelvin.

Énergie de l'accélérateur plus que doublée,

et réduction importante de consommation de puissance électrique.

Tevatron un prototype pour une nouvelle génération d'accélérateurs.

# Annexe: Construction du Modèle Standard

Fin des années 1970, CERN et Fermilab ont deux projets divergents

## CERN

convertir Super Proton Synchrotron (SPS) de 400 GeV  
en un anneau de stockage pour  $\gamma$  collisionner protons et anti-protons

Van der Meer, Carlo Rubbia Nobel 1984

ce dernier voulait découvrir le boson W de masse  $\sim 100$  GeV

1976 inspirés par les ISR proton sur proton.

400 GeV cible fixe  $\rightarrow$  27 GeV dans le centre de masse  
collisionneur  $2 \times 400$  GeV = 800 GeV. Suffisant !

Les problèmes techniques étaient formidables! i.e.

créer des anti-protons en nombre sans précédent

les injecter dans le complexe accélérateur

les accélérer soigneusement, en même temps que les protons,  
à la plus haute énergie que les aimants pouvaient supporter:

400 GeV  $\rightarrow$  260 GeV = 520 GeV. Suffisant quand même!

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## Interactions fondamentales et la symétrie

unification des interactions relié de très près au concept de symétrie.

Au début de l'U, ce qu'un observateur aurait pu observer était très chaotique

Un physicien entraîné, optimiste et biaisé par la recherche de la simplicité, se serait forcé à y voir un ordre quelconque, une régularité dans les processus

Ces régularités sont appelées **symétries**

étroitement reliées aux lois de conservation et ainsi au concept de l'invariance

si un changement effectué dans un système physique ne produit aucun effet observable,

le système est dit invariant au changement, impliquant une symétrie.

L'idée peut être principalement visualisée dans des systèmes géométriques.

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## La symétrie

Si on étendait un temple aux colonnes Corinthiennes jusqu'à l'infini,  
et qu'on déplaçait toutes les colonnes vers la droite,  
on ne verrait aucun changement.

On appelle ce déplacement géométrique **la translation** et on dit que  
**la physique est invariante-symétrique sous translation.**



# Annexe: Construction du Modèle Standard

## La symétrie

Lien entre les lois de conservation et le principe d'invariance fut fait dans les années 1920 par une mathématicienne éminente

**Emmy Noether** (1882-1935)

loi de conservation de l'impulsion

implique

l'invariance de toutes les lois de la physique lors d'un déplacement spatial.

**Théorème de Noether**

si toutes les valeurs de la coordonnée spatiale  $x$  sont déplacées par  $x+A$  (translation),

la composante en  $x$  de l'impulsion totale est conservée dans toutes les réaction

Extension à tout l'Univers,

la conservation de l'impulsion implique une profonde symétrie  
il n'y a pas de lieu préféré, l'espace est uniforme, lisse, homogène.

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## La symétrie

Noether montra que la conservation du moment angulaire, une mesure de l'activité de rotation d'un objet, est reliée à la symétrie de direction dans l'espace, **l'isotropie**.

Toutes les directions sont les mêmes aux yeux des interactions fondamentales.

La conservation de l'énergie implique une symétrie dans l'écoulement du temps

Le lieu absolu, la position absolue, et le temps absolu ne sont donc pas pertinents si les lois de conservation observées expérimentalement sont en effet valides universellement.

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## La symétrie

La symétrie associée à la loi de la conservation de la charge électrique, appliquée aux équations de l'électromagnétisme, est appelé une symétrie de jauge.

Lorsqu'on impose cette symétrie, les équations électromagnétiques de Maxwell prédisent correctement la conservation de la charge.

Mais il apparaît quelque chose de plus profond encore: toutes les équations de Maxwell peuvent être dérivées de la symétrie de jauge.

L'idée de la symétrie est si profonde que nous croyons aujourd'hui que toutes les forces dans la nature obéissent à une forme de symétrie de jauge.

???C,P,T???

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## La symétrie électrofaible et sa brisure

L'interaction électrofaible a effectivement sa symétrie de jauge associée décrite par Glashow, Salam et Weinberg.

Mais la symétrie n'explique pas comment les bosons  $W^\pm$  et  $Z^0$  ont acquis une masse...

La symétrie de jauge requiert des transmetteurs sans masse.

Glashow, Salam et Weinberg ont du inventer un mécanisme pour « briser » la symétrie et qui permettrait aux W et Z d'acquérir une masse.

Postuler l'existence d'un nouveau champ, qui devint connu comme le champ de Higgs (théoricien écossais).



La symétrie de jauge électrofaible fut finalement plus profonde que la théorie qui la fit naître, véritable clef pour comprendre toutes les interactions dans l'Univers.

# Construction du Modèle Standard

## La brisure de symétrie électrofaible

Le champ de Higgs donne aussi une masse aux fermions.  
Une des questions les plus profondes en physique des particules:  
**l'origine de la masse.**

Les particules acquièrent une masse à cause du champs de Higgs,  
mais pourquoi chaque particule acquiert une masse différente  
ou pas de masse du tout comme dans le cas du photon?

Expérience critique:

chercher la particule de Higgs dans nos expériences.

la découverte vérifierait nos concepts d'unification  
et leur permettraient de les étendre à un domaine d'énergie plus élevé  
où les interactions forte et gravitationnelle entreraient dans le jeu.

La non-découverte serait aussi une véritable révolution.

**Le Higgs est la particule la plus recherchée aujourd'hui.**

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## La brisure de symétrie: le boson de Higgs

Nous vivons aujourd'hui dans une mer de Higgs.  
Les W et Z (mais pas le photon) interagissent avec le Higgs, ils avancent à travers l'espace rempli de Higgs, comme s'il se mouvaient dans de la mélasse...  
Quand ils avancent dans la mélasse de Higgs, ils n'avancent plus à la vitesse de la lumière, et on peut les décrire comme ayant une **masse effective**.

A hautes températures et énergies, les interactions Higgsiennes sont telles que l'espace n'est plus rempli de cette mélasse et les W et Z ne s'embourbent plus dedans.

Donc à **hautes énergies et températures** les W et Z perdent leur masse et la **symétrie** entre les W, Z et photon devient **manifeste**.  
À comparer avec un aimant basse versus haute température.

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## La brisure de symétrie: le boson de Higgs

Basse et haute énergie sont relatives à environ 100 GeV, l'échelle de la force électrofaible. Ce qui est bizarre, c'est que ce champ de Higgs donne aussi une masse aux fermions. Une des questions les plus profondes en physique des particules: **l'origine de la masse.**

Les particules acquièrent une masse à cause du champ de Higgs, mais pourquoi chaque particule acquiert une masse différente ou pas de masse du tout comme dans le cas du photon?

Expérience critique: chercher la particule de Higgs dans nos expériences. la découverte vérifierait nos concepts d'unification et leur permettraient de les étendre à un domaine d'énergie plus élevé où les interactions forte et gravitationnelle entreraient dans le jeu. La non-découverte serait aussi une véritable révolution. **Le spotlight sera sur le Higgs en ce 20e siècle...**

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## L'angle de mélange faible

Une conséquence de la brisure de symétrie électrofaible:  
les deux bosons neutres massifs, le Z et le photon « physiques »  
sont le résultat du mélange des deux bosons de masse nulle de la théorie.  
On passe d'une paire à l'autre par une transformation simple,  
qui est en fait une rotation d'un angle  $\theta$ ,  
dit angle de mélange faible.  
L'angle de mélange faible est noté

$$\sin^2 \theta_W \cong 1 - (m_W^2 / m_Z^2)$$

C'est une mesure qui permet de contraindre fortement  $m_{\text{Higgs}}$   
par le biais des corrections radiatives

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## L'angle de Weinberg

Alors que les  $W^+$  et  $W^-$  sont bien les particules que nous produisons et détectons, les deux bosons neutres « physiques » sont des mélanges, au sens quantique du terme, du  $W_0$  et du  $B_0$ : ce sont le  $Z_0$  et le photon. On passe d'une paire à l'autre par une transformation simple, qui est en fait une rotation d'un angle  $\theta$ , dit angle de mélange faible. Le fait expérimental que le photon et le  $Z_0$ , qui sont ainsi de si proches parents, soient si différents, l'un de masse nulle, l'autre presque aussi lourd que cent protons, est la conséquence de la brisure de symétrie.

L'angle de mélange faible est noté  $\sin^2 \theta_W$   
et est approximativement égal à  $1 - (m_W^2 / m_Z^2)$

C'est un paramètre extrêmement important dans le MS

et sa mesure représente aujourd'hui la plus forte contrainte sur  $m_{\text{Higgs}}$

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## L'angle de Weinberg bis $\sin^2 \theta_W$

il fut mesuré à Gargamelle, CCFR, CDHS, LEP, SLC, NuTeV

Dans le Modèle Standard, les bosons  $W^+$  et  $W^-$  qui sont introduits dans la théorie sont bien les particules que nous produisons et détectons. Par contre, le monde des bosons neutres est légèrement plus complexe: les deux bosons physiques existant réellement sont des mélanges du  $W_0$  et  $B_0$ , ce sont le  $Z_0$  et le photon. On passe d'une paire à l'autre par une transformation simple, qui est en fait une rotation d'un angle  $\theta_W$  dit angle de mélange faible, ou de Weinberg.

Le fait expérimental que le photon et le  $Z_0$ , qui sont ainsi de si proches parents, soient si différents, l'un de masse nulle, l'autre presque aussi lourd que cent protons, vient de la brisure de symétrie par le mécanisme de Higgs.

# Annexe: forces

FORCE	EXEMPLE	VECTEUR	PORTEE	INTENSITE*
électromagnétique	atome, chimie	photon	infinie	$10^{-2}$
faible	radioactivité, soleil	W and Z	très courte ( $\sim 10^{-2}$ fermi)	$10^{-14}$
forte	nucléaire	gluon	très courte ( $\sim 1$ fermi)	1
gravitationnelle	univers	graviton	infinie	$10^{-38}$

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## Résumé des découvertes - Leptons

- o 1897 découverte de l'électron, Thomson à Cavendish (Nobel 1906)
- o 1956 Cowan et Reines à la centrale de Savannah découverte du neutrino électronique (Reines partage le Nobel 1995)
- o 1937 Neddermeyer et Anderson découverte du muon avec rayons cosmiques
  - o 1962 BNL neutrinos muonique, Lederman, Schwartz, Steinberger (Nobel 1988)
  - o 1976 SLAC découverte du lepton tau (Perl partage le Nobel 1995)
  - o 2000 Fermilab DONUT neutrino tau observé directement

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## Résumé des découvertes - Quarks

- o 1968 SLAC première évidence de la présence de quarks dans le proton  
Friedman, Kendall, Taylor (Nobel 1990)
- o 1951 observation de kaons dans les expériences de rayons cosmiques
- o 1956 Gell-Mann explique la relative longévité des kaons avec le concept d'étrangeté (Nobel 1969)
- o 1964 BNL Cronin et Fitch découvrent que les kaons violent CP (Nobel 1980)
- o 1974 SLAC+BNL découverte d'une nouvelle particule qui contient un nouveau quark, le charme, Richter et Ting (Nobel 1976)
- o 1977 Fermilab, mené par Lederman, l'upsilon est découvert composé de beauté et d'anti-beauté
- o 1995 Fermilab CDF et DO découverte du top

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## Résumé des découvertes - Transmetteurs des forces

o 1905 Se basant sur l'introduction de quantas d'énergie par Planck, Einstein décrit l'effet photoélectrique en utilisant des particules de lumière appelées photons. Ils sont les transmetteurs de la force électromagnétique.

Planck reçoit le Nobel en 1918, Einstein est honoré en 1921.

o 1979 DESY PETRA découverte du gluon avec événements 3 jets

o 1983 CERN première observation des W et Z

Rubbia Van der Meer Nobel 1984

## Anti-matière

o 1931 observant les rayons cosmiques, Anderson découvre un électron positivement chargé (positron) Nobel 1936.

o 1955 LBNL anti-proton Segre et Chamberlain Nobel 1959

# Annexe: Construction du Modèle Standard

## Résumé des découvertes - Théorie

- o 1965 Tomonaga, Schwinger, Feynman théorie de l'électrodynamique quantique Nobel
- o 1969 Gell-Mann Nobel pour la classification des particules élémentaires et leurs interactions
- o 1979 Glashow Salam et Weinberg Nobel pour l'unification des forces électromagnétique et faible dans la théorie électrofaible
- o 1999 't Hooft et Veltman Nobel pour leur formulation quantique de la théorie électrofaible.

L'ère des GRANDS  
accélérateurs  
stopped here



# Annexe: LEP

- o usine à Z et paires de W
- o collisionneur circulaire  $e^+e^-$  de 27km de circonférence
  - o accomplissement technologique fabuleux!
- o le plus grande collaboration internationale jusqu'à ce jour
  - o MS couvert à fond durant 12 années
  - o mesures d'une précision absolument inattendue
- o dernier collisionneur circulaire  $e^+e^-$  dû aux pertes par radiation synchrotron

Allocution de François Mitterrand en 1983



1976 Burton Richter ( $J/\psi$ ) 1976  
visiteur au CERN  
idée de collisionneur  $e^+e^-$   
de haute énergie

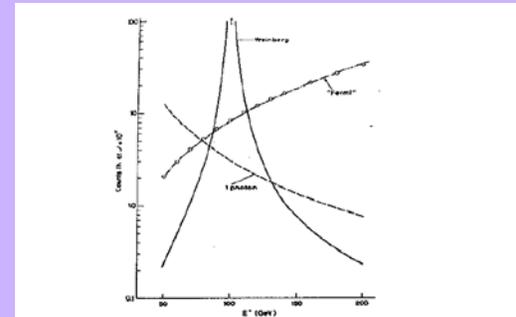


Figure 13: The possible LEP scenarii as presented by B.Richter in 1976.

1982 autorisation de construire le LEP,  
soutien inconditionnel de tous les pays membres.

1988 l'excavation du tunnel LEP ~100m sous terre fut terminée.

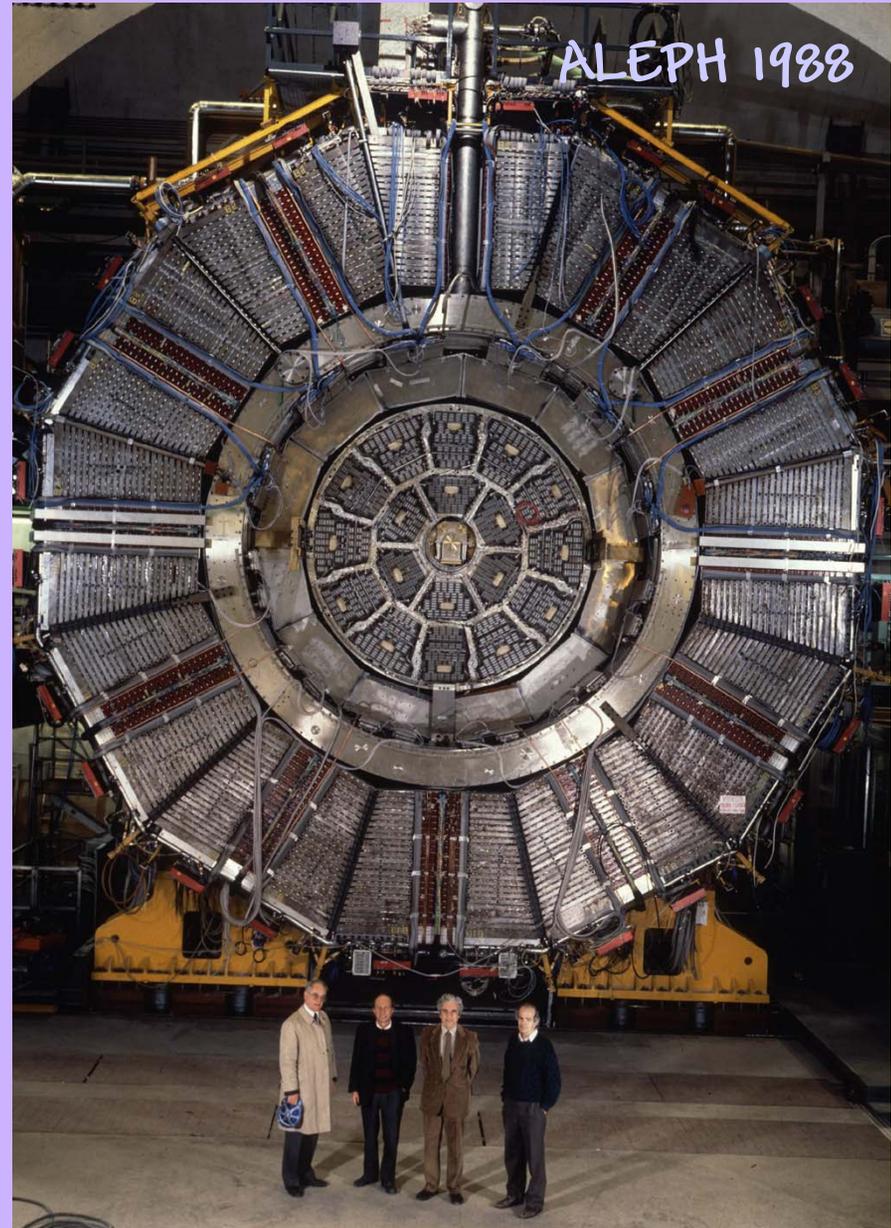
Août 1989, premiers bosons Z furent enregistrés par les quatre expériences.

# Annexe LEP expériences

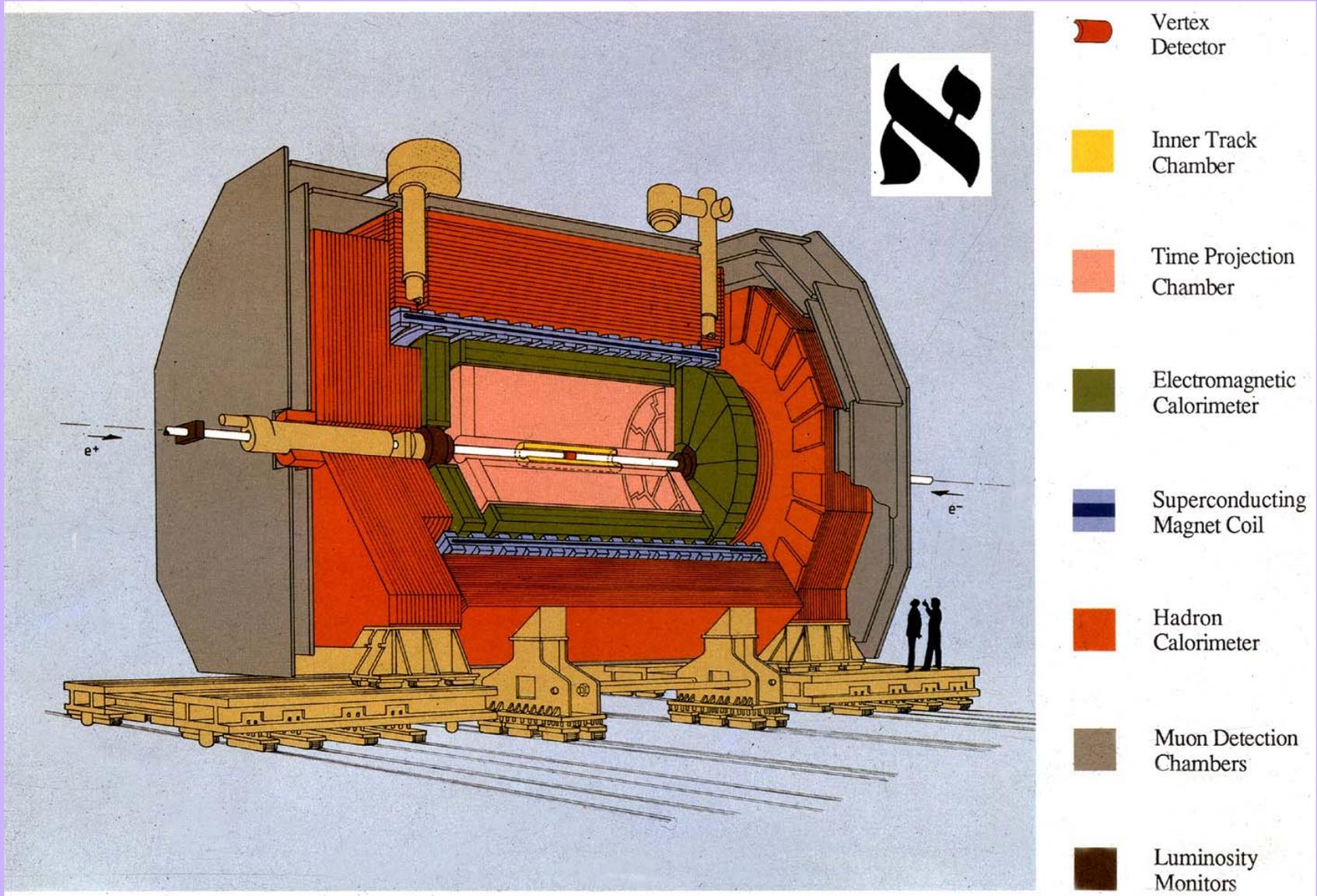
Détecteurs cylindriques modernes:  
détecteur au silicium,  
chambres à dérive,  
calorimètres,  
chambres à muons

Collisions au centre des détecteurs,  
dans le tuyau sous vide  
qui passe au centre.

Plus de 16 millions de Z détectés  
40000 WW  
0 Higgs :  
mesures précision du MS.



# Annexe LEP expériences



# Annexe: LEP accélération

LEPI 1989-95 128 cavités radio-fréquence en cuivre 50GeV/faisceau

LEPII 1995-2001 288 cavités supra-conductrices 104.6GeV/faisceau max

durée de vie  
des faisceaux.

~12 heures:

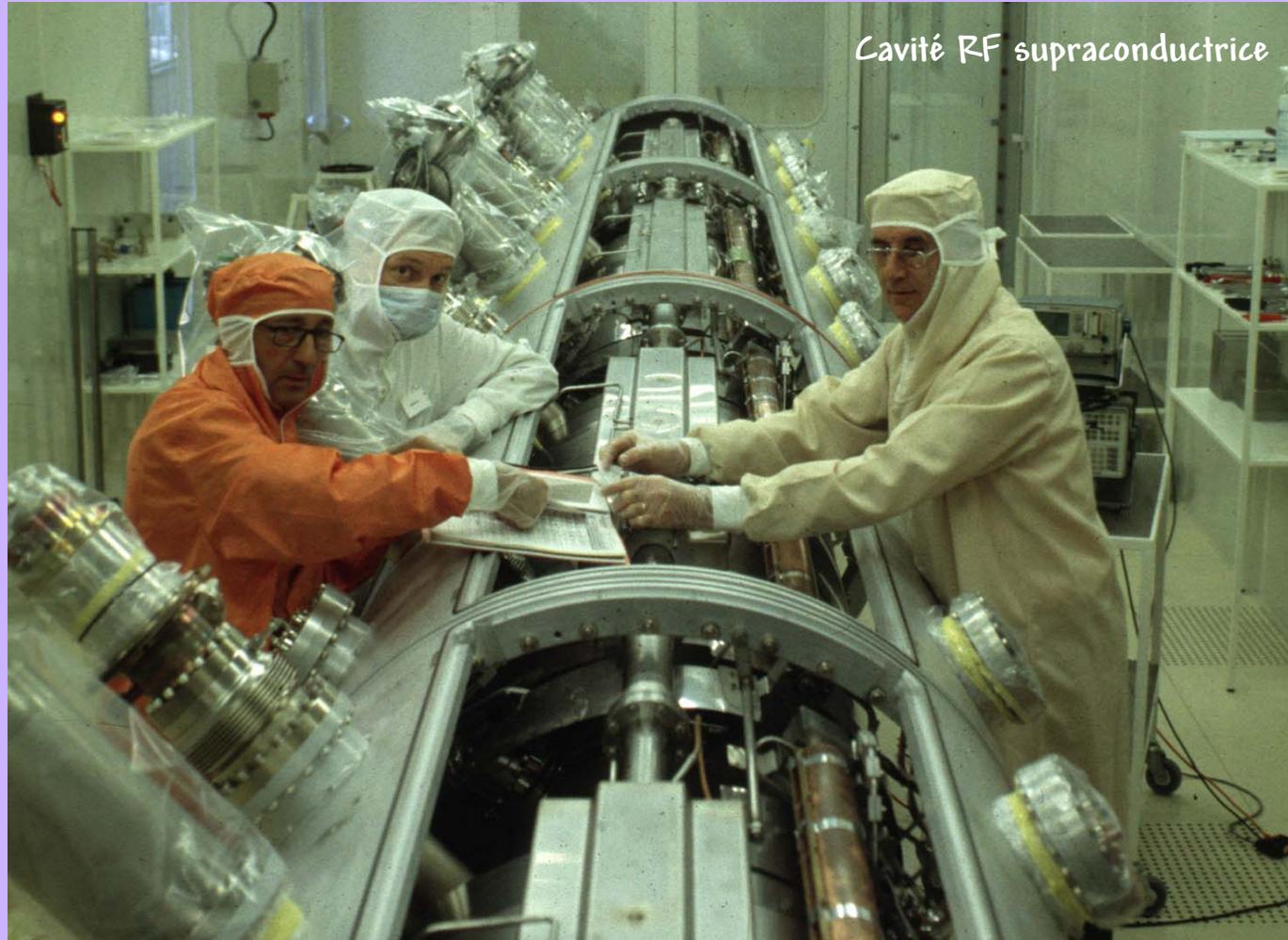
500 million  
de million de  
révolutions !

Tube à vide:

$1/10^9$

de la pression  
atmosphérique  
pour limiter  
collisions

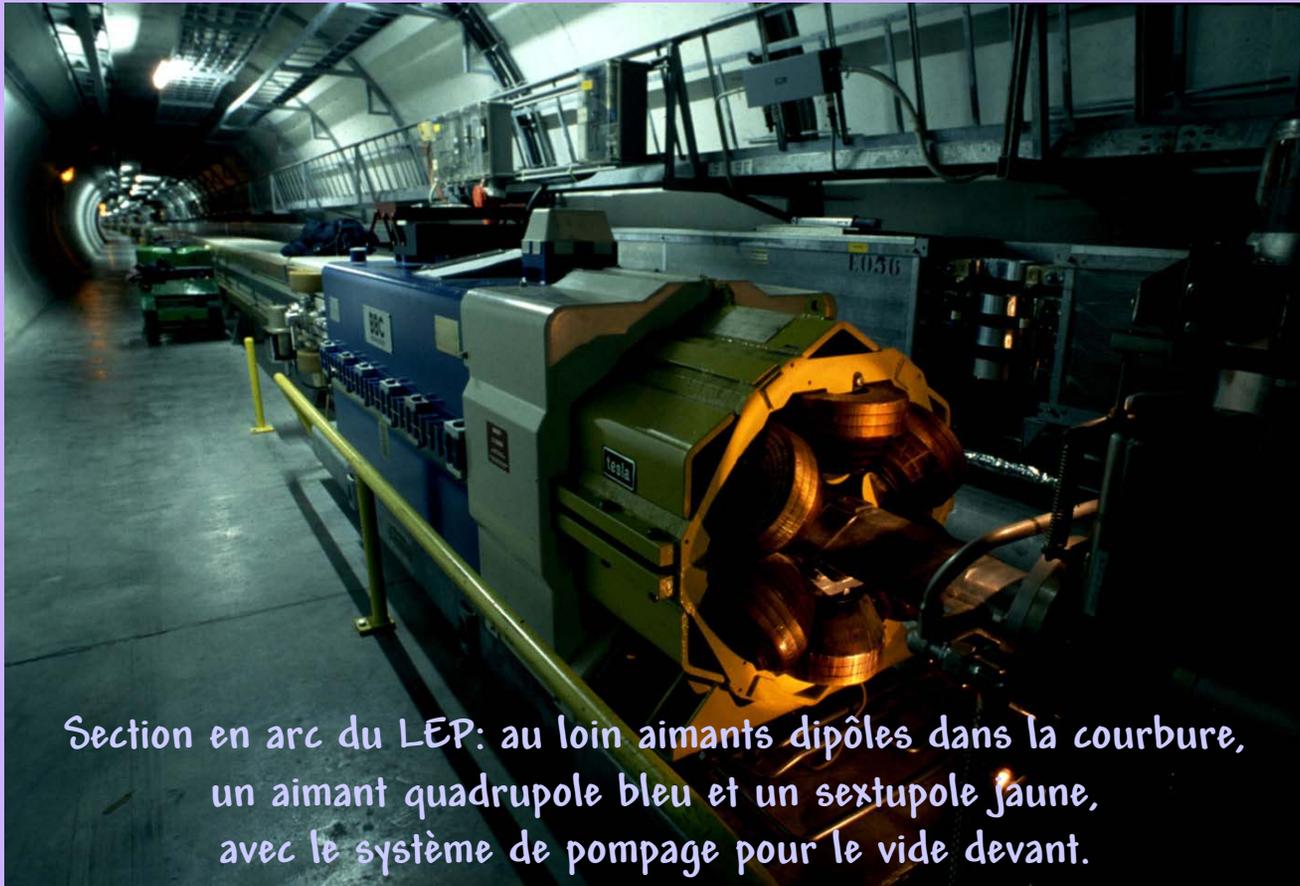
avec gaz résiduel.



Cavité RF supraconductrice

# Annexe: LEP aimants

3368 dipôles orientent le faisceau, 816 quadrupoles le focalisent, et 504 sextupoles corrigent la dispersion en impulsion des particules. 700 autres aimants pour de petites corrections aux orbites des particules. Quadrupoles supraconducteurs de part et d'autre de chaque expérience, pour focaliser les faisceaux juste avant la collision.

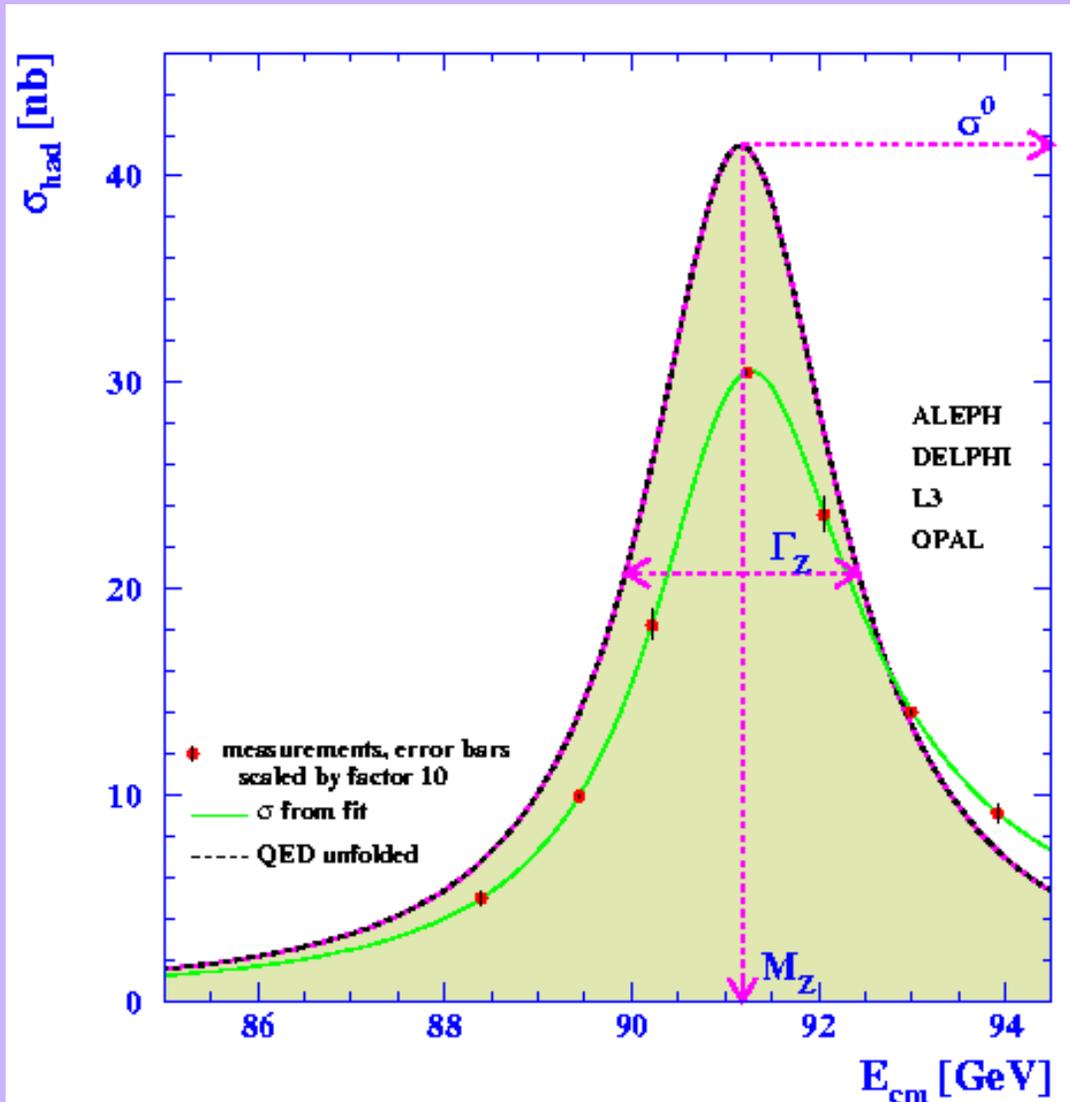


Section en arc du LEP: au loin aimants dipôles dans la courbure, un aimant quadrupole bleu et un sextupole jaune, avec le système de pompage pour le vide devant.

# Annexe: LEP - L'œuvre

- o combinaison des résultats ALEPH-DELPHI-L3-OPAL
  - o performances de la machine LEP
- o facilité relative de la physique: peu de bruits de fond
  - o redondance des procédures expérimentales:  
d'importantes erreurs systématiques ont pu être mesurées
  - o nouvelles techniques de détection i.e.  
luminomètres à très petit angle,  
détecteurs au silicium
- o qualité supérieure des prédictions théoriques

# Annexe: LEP - résultats



# Annexe Stanford Linear Collider SLAC - Californie



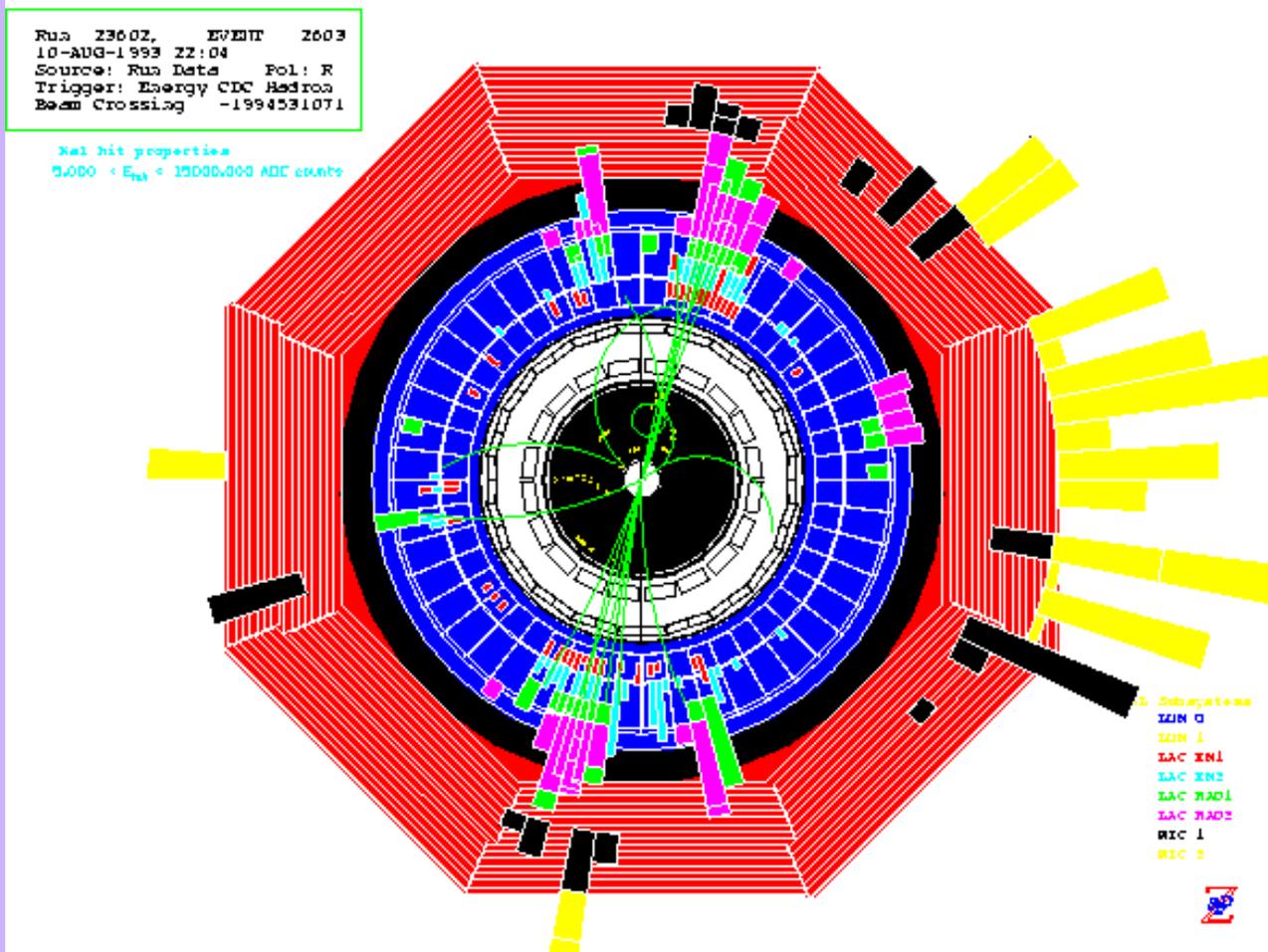
# Annexe Stanford Linear Collider

Énormes défis technologiques:

o accélérer en une seule fois le long des 3 km

o une seule collision par accélération

grande intensité de faisceau, bonne focalisation avant la collision.



# Annexe Stanford Linear Collider

- o le plus grand collisionneur linéaire
  - o seulement 500 000 Z récoltés
- MAIS ATTENTION !
- o faisceau d'électrons polarisés

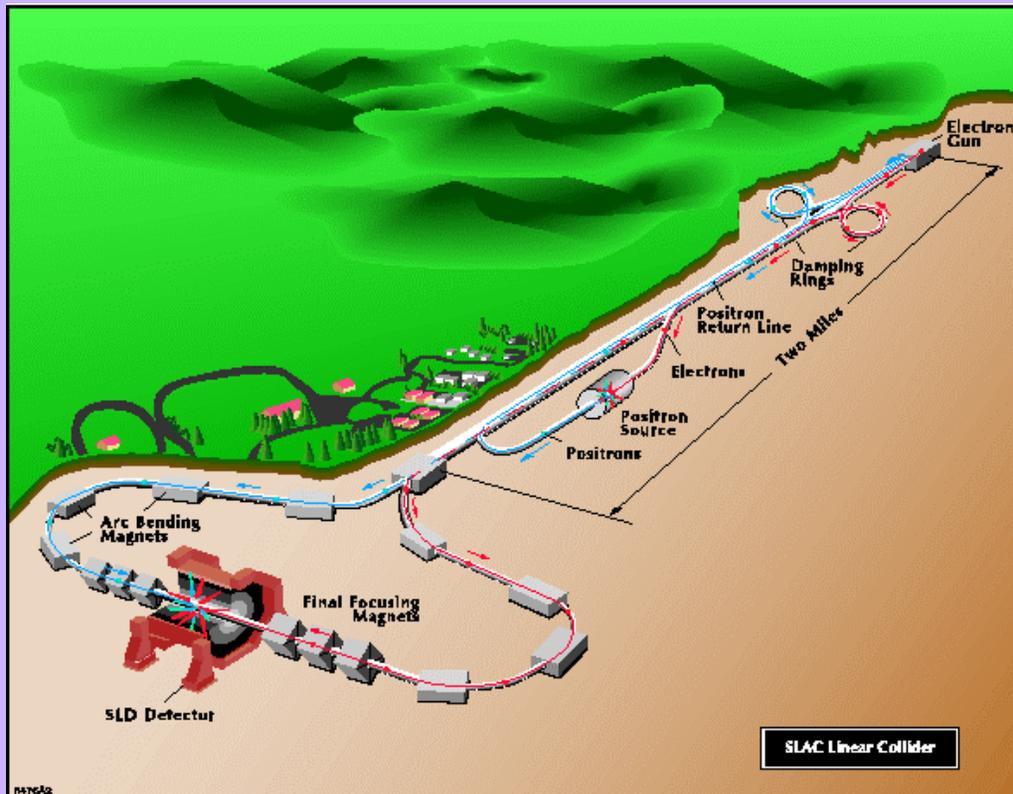
mesure unique la plus précise sur l'angle de mélange  $\sin^2\theta_W$

- o le premier accélérateur linéaire, et le seul...

Construction débuta en 1983  
complétée en 1989.

Détecteur MarkII en 1989:  
preuve expérimentale  
des 3 familles de neutrinos  
peu après le LEP.

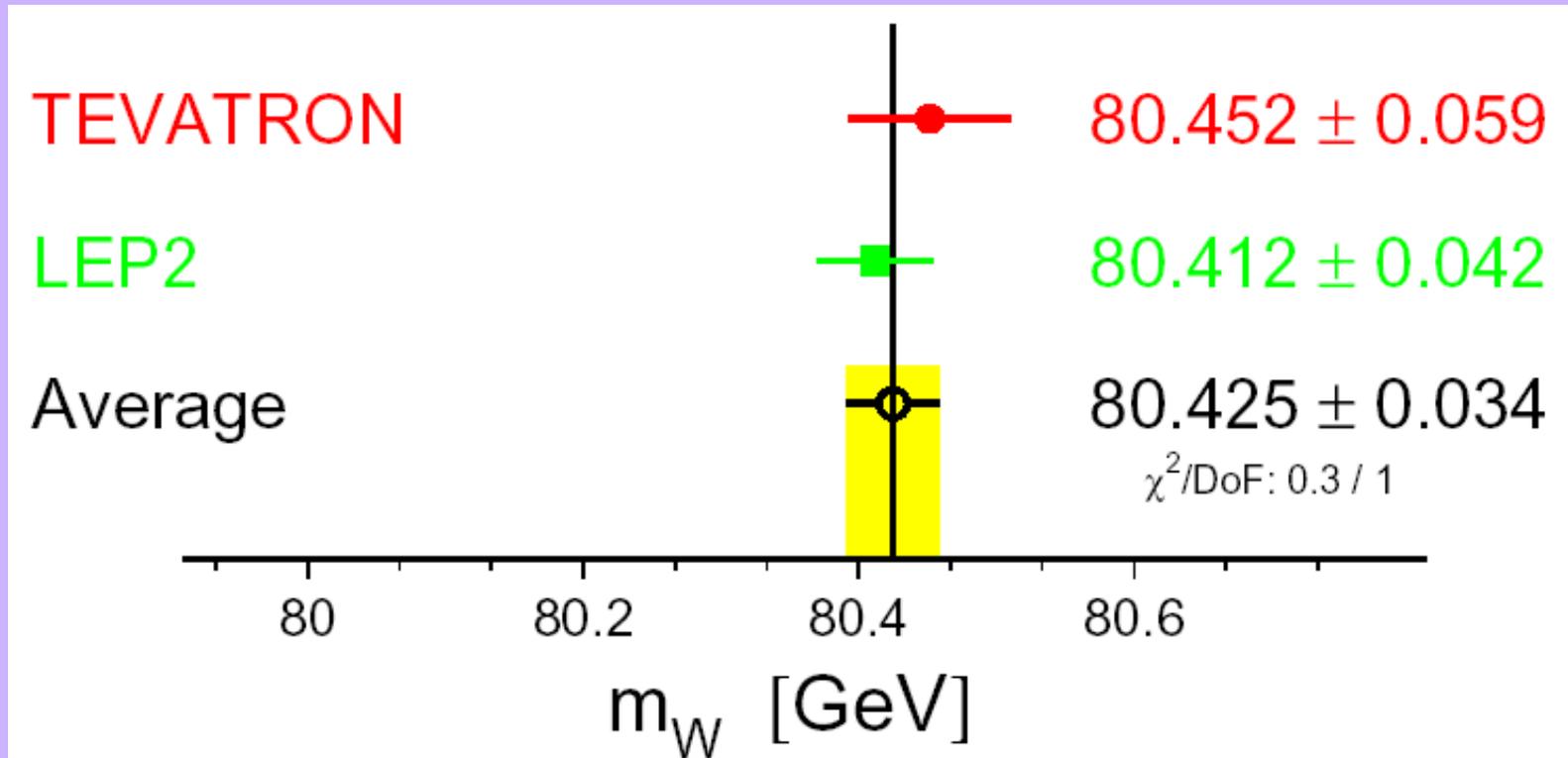
Détecteur SLD 1992-1998:  
la plus belle mesure de  $\sin^2\theta_W$



# Annexe: L'oeuvre de l'ère LEP

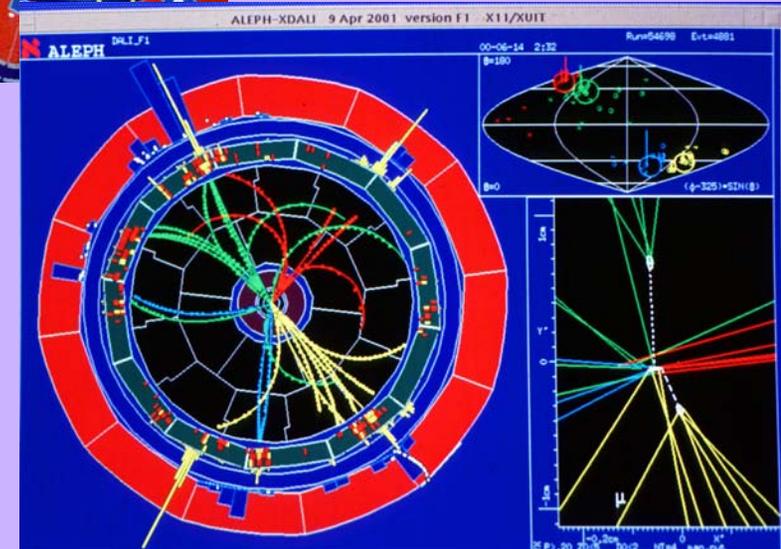
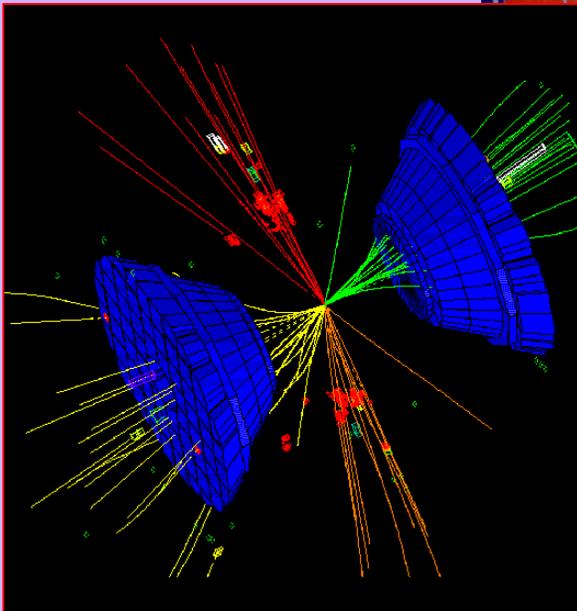
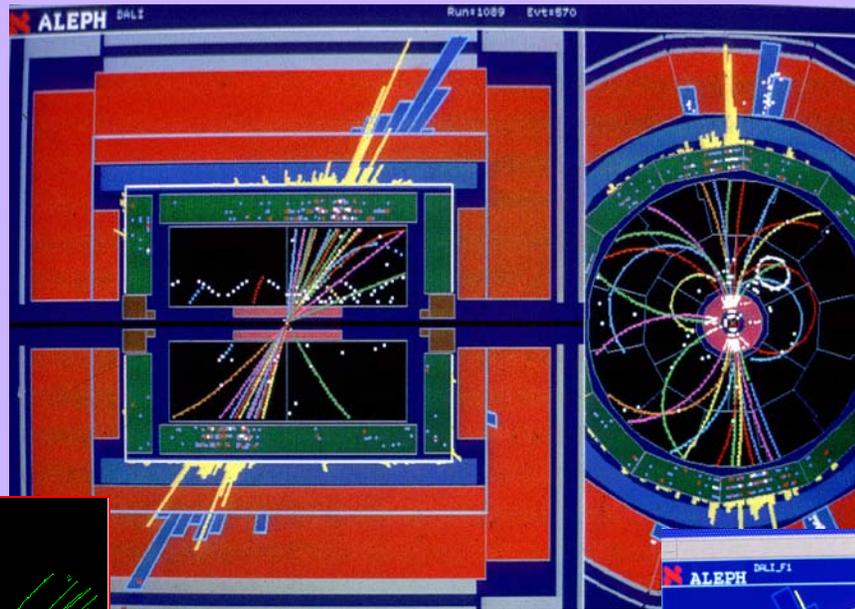
La mesure de la masse du boson W au LEP entre autre.

$m_W$  connu à 70 MeV par expérience: on s'attendait à ~100 MeV



# Annexe: LEP événement 2 « jets »

$$e^+ e^- \rightarrow \gamma/Z \rightarrow q \bar{q}$$

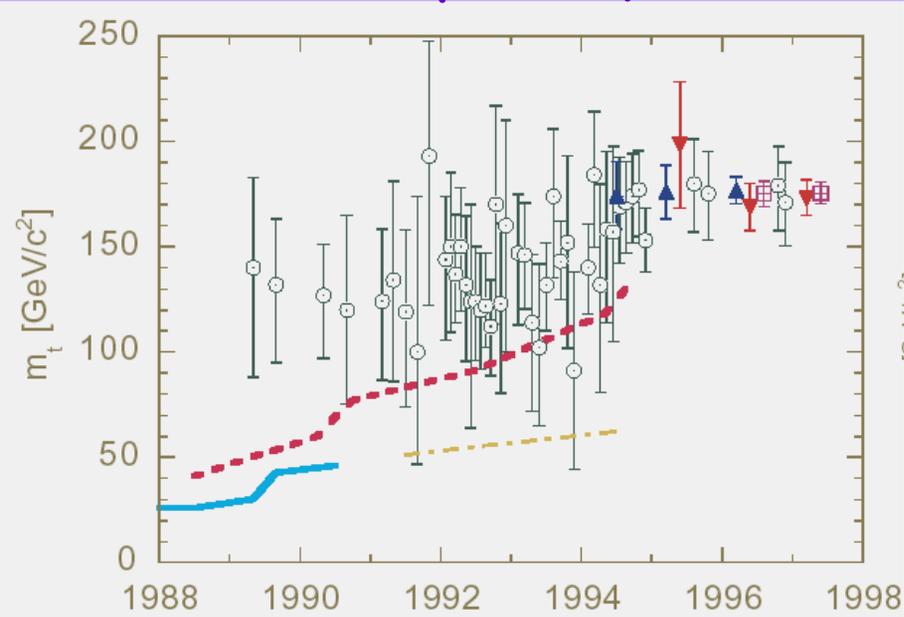


4 « jets »

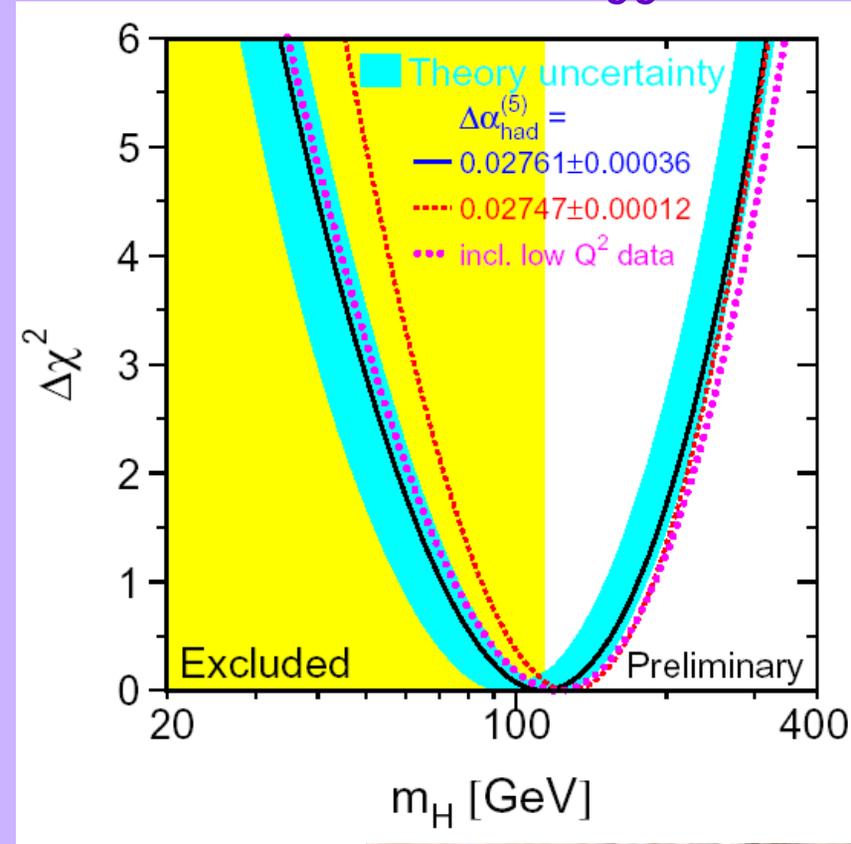
$$e^+ e^- \rightarrow HZ \rightarrow q \bar{q} q' \bar{q}' ?$$

# Annexe: Mesures de précision testant MS

## masse du quark top



## masse du Higgs



« L'éléphant doit être maîtrisé si l'on veut entendre les pas du tigre. » Altarelli



# Annexe Tevatron

situé à Fermilab

le plus grand laboratoire américain pour la physique des particules  
Collisionneur proton-anti-proton d'énergie de centre de masse de 2 TeV !

Le plus puissant du monde.

Voyageant 320km/h plus lentement  
que la vitesse de la lumière -  $10^9$  km/h -  
protons et anti-protons circulent  
en directions opposées.

Les faisceaux se croisent au centre  
de deux détecteurs de 5000 tonnes

CDF et D0

1994 ière observation du quark top.

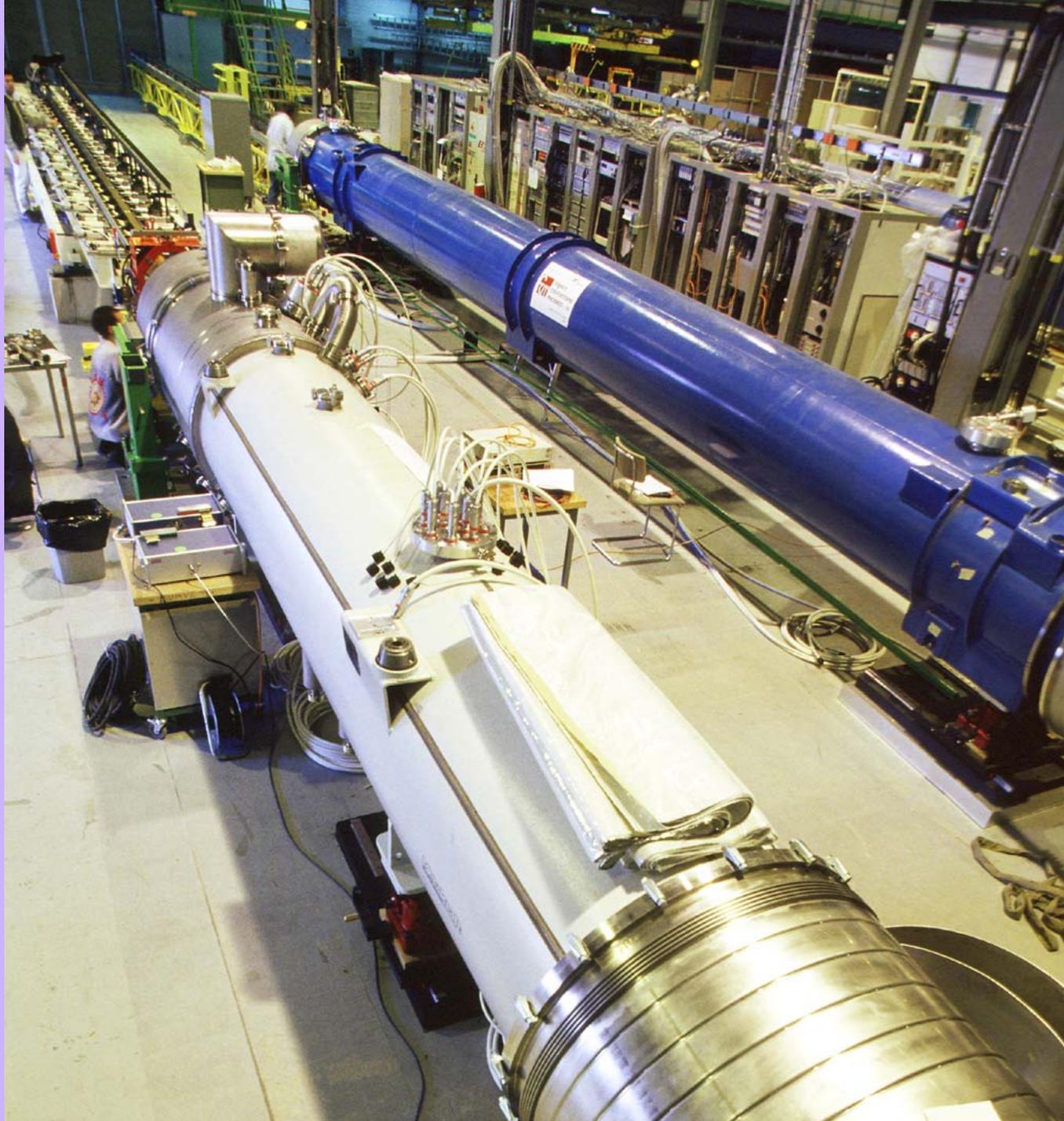
particule élémentaire la plus lourde

autant qu'un atome d'or,

dans un volume beaucoup plus petit

qu'un proton





# Annexe: LHC

## GRAND PAS

physiquement, électroniquement, informatiquement, sociologiquement parlant

- o collisionneur proton-proton
  - o 14 TeV  $\sim 10 \times E_{LEP}$  !
  - o luminosité  $\sim 100 \times L_{LEP}$  !
- o 4 grandes expériences ATLAS, CMS, LHCb, ALICE

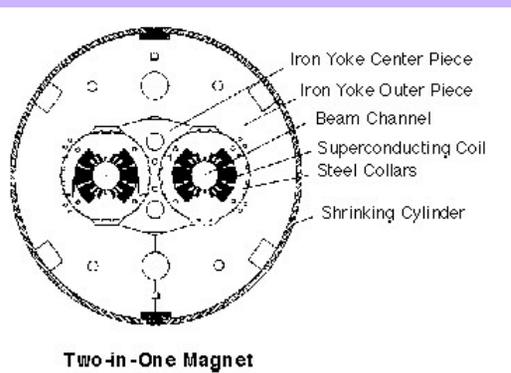
1994 LHC a été approuvé.

Prise de données en 2007.

- supraconducteurs 1.9K

1232 dipôles 8.4 Tesla, 15m de long

trupoles 6.9 Tesla (champ maximal) 6m de long



# Annexe: LHC détecteur ATLAS

$L \times D = 46\text{m} \times 22\text{m} !$

Spectromètre à muons  
 $L \times D = 25(46)\text{m} \times 22\text{m}$

Calorimètre électromagnétique  
argon liquide

Calorimètre vers l'avant

Solénoïde supraconducteur  
( $B=2\text{T}$ )

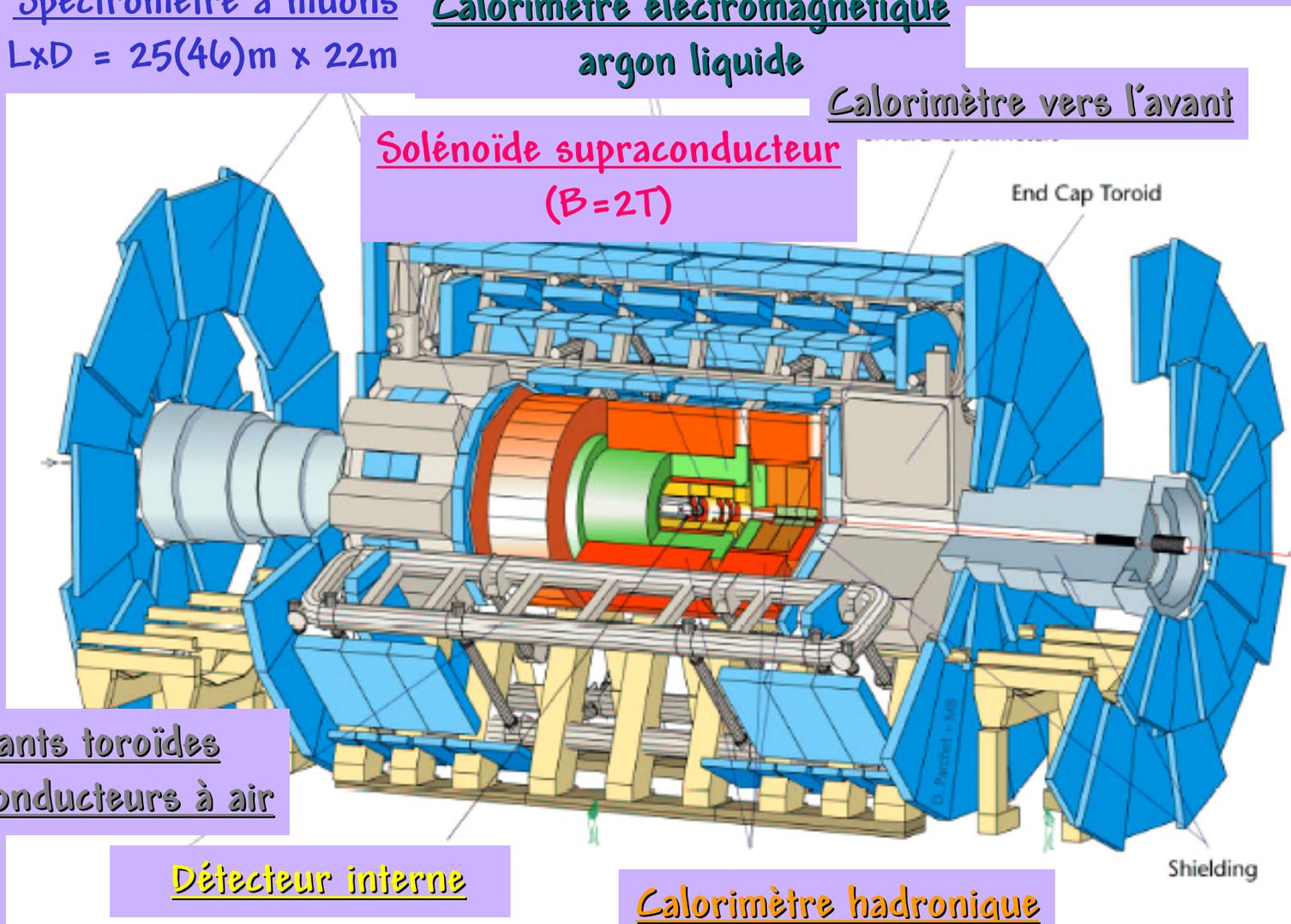
End Cap Toroid

Aimants toroïdes  
supraconducteurs à air

Détecteur interne

Calorimètre hadronique

Shielding



# Annexe Petites merveilles

violation de parité dans l'atome et  
violation de la parité dans la diffusion Möller  
et mesure de  $\sin^2 \theta_W$

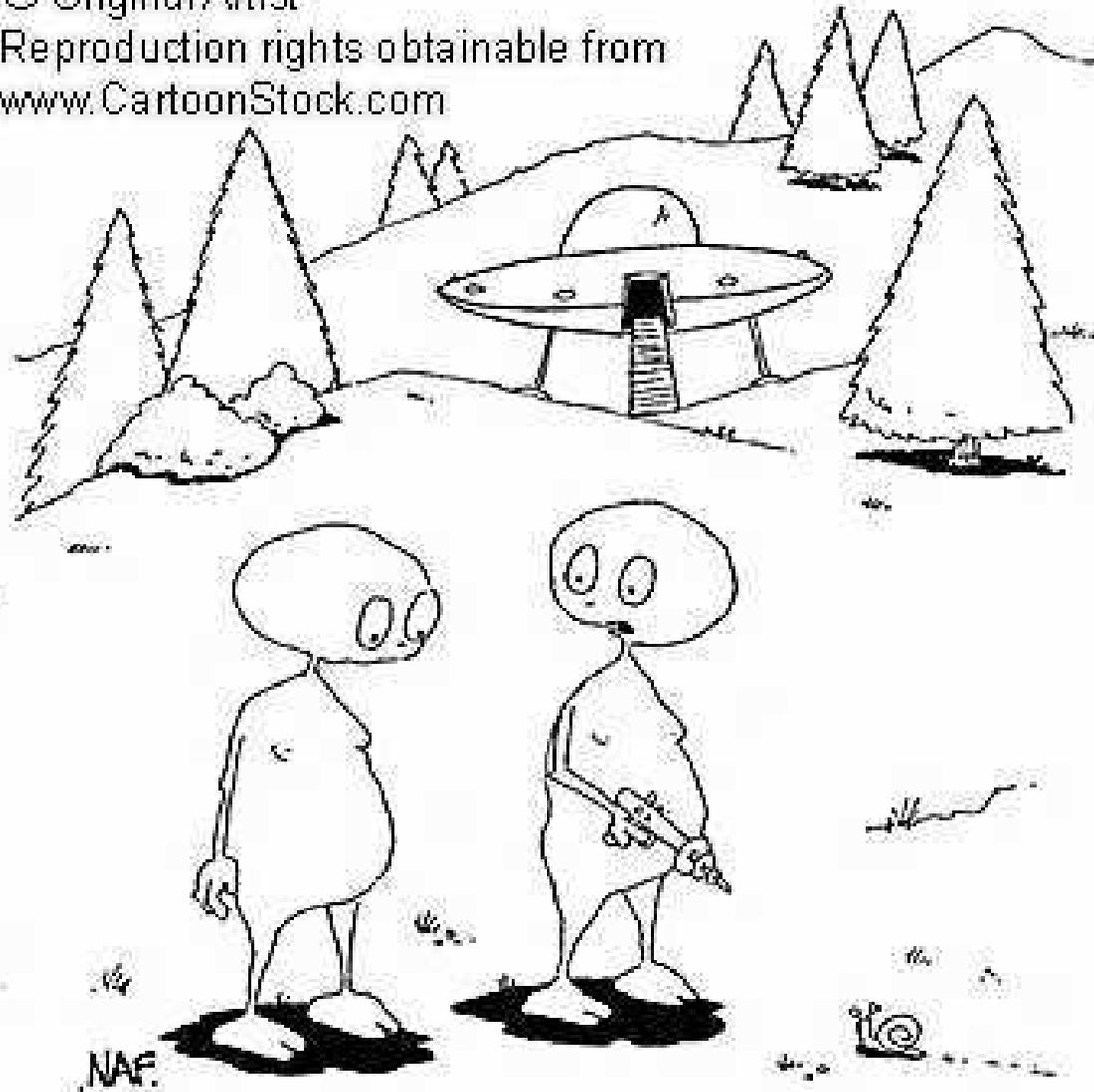
BES  $\alpha(m_Z^2)$

g-2

rare Kaon decays à l'AGS-BNL

...

© Original Artist  
Reproduction rights obtainable from  
[www.CartoonStock.com](http://www.CartoonStock.com)



"He's agreed to take us to his leader but he said  
it may take a while."