

CHAPITRE

Mars 2009, Ch. de la Vaissière, F. Hubaut, O. Leroy, J. Cogan, A. Duperrin

100 ans d'exploration

Arnaud Duperrin (CPPM)

Plan

- 0 - État des lieux à la fin du XIX^e
- 1 - Premiers pas : une révolution culturelle
- 2 - Les bonds en avant des années 1930
- 3 - De la guerre aux années 50
- 4 - Les années 60 et l'arrivée des quarks
- 5 - Les années 70, l'élaboration du Modèle Standard
- 6 – Les années 80-90, le triomphe du Modèle Standard
- 7 – Et après ... ?

§ 4.0 – Etat des lieux à la fin du XIX^e

La matière est comprise ... ?

- L'atome
- Électromagnétisme

4.1 – État des lieux à la fin du XIX^e

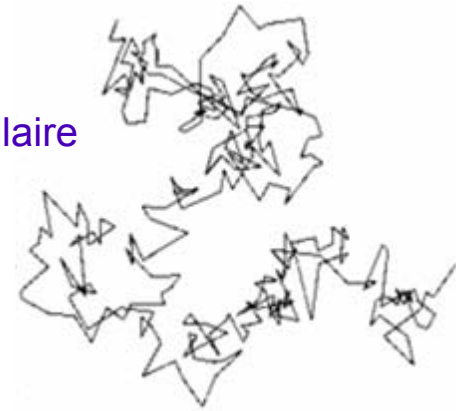
L'atomisme

- L'hypothèse atomique:
 - ▶ fondée sur des observations à l'échelle macroscopique
 - ▶ explique la formation et les propriétés des molécules
 - ▶ Mendeleïv: classification selon leur masse
 - ▶ Avogadro: dénombrement

140. Le tableau périodique des éléments de Mendeleïv, mis à jour avec les Lanthanides, dont l'élément 112, son emplacement étant celui pour lequel la théorie prévoit un « état de stabilité ».

Tableau périodique des éléments (Mendeleïv - 1869)

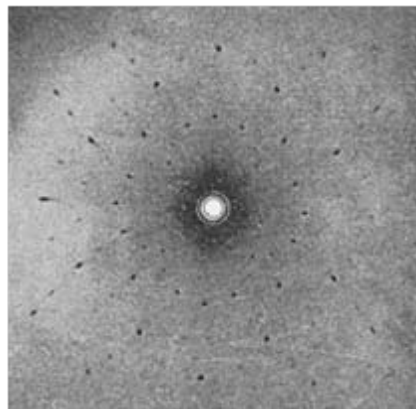
- Une hypothèse confirmée au début du XX^e:
 - ▶ Mouvement brownien
 - Einstein (1905)
 - mouvement d'une particule dans un milieu granulaire
 - calcul du nombre d'Avogadro par Perrin
 - ▶ Observation de la structure atomique
 - diffusion de rayon X sur des cristaux



Mouvement brownien (Jean Perrin -1912)
Nobel 1926



1^{ère} radiographie (Röntgen – 1895)
Nobel 1901



Diffusion sur un cristal (1912)
Nobel von Laue (1914)
Bragg (père et fils) (1915)

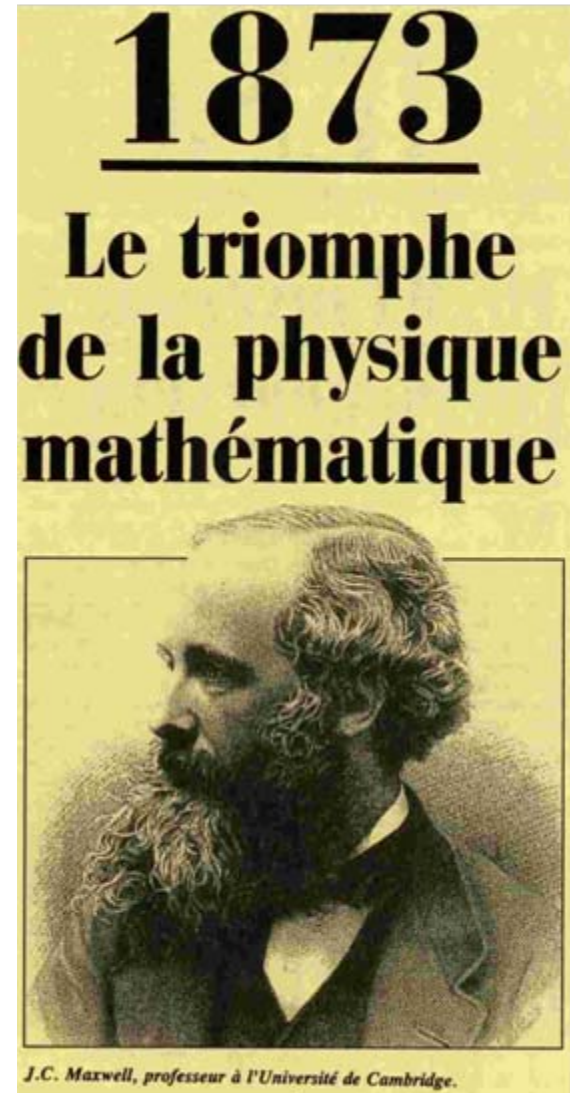
4.1 – État des lieux à la fin du XIXè

Electromagnétisme

- Maxwell (1865)
 - ▶ synthèse de diverses lois expérimentales
 - électrostatique
 - magnétisme
 - induction ...
 - ▶ formulation d'un système de 4 équations couplées

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= \rho \\ \nabla \times \mathbf{B} - \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= \mathbf{j} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0\end{aligned}$$

- ▶ prédiction des ondes électromagnétiques
 - dont la lumière visible
 - ondes hertziennes découvertes par Herz (1888)
 - se propageant dans l' «éther luminifère» ?



§ 4.1 - Premiers pas : une révolution culturelle

Des phénomènes insoupçonnés L'émergence de nouveaux concepts

- La radioactivité
- La découverte de l'électron et du noyau
- La théorie des quanta et l'atome de Bohr
- Einstein et la relativité

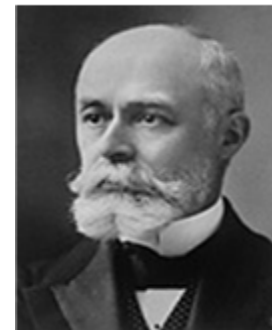
4.1 - Premiers pas : une révolution culturelle

1896 - La radioactivité

- 1896-1905 découverte de phénomènes liés au cœur de l'atome :
 - ▶ Tout commence par des plaques photographiques
- Plaques photographiques de Becquerel
 - ▶ Becquerel étudiait la fluorescence de sels d'Uranium
 - ▶ Il avait enrobé des plaques dans du papier et laissé ces plaques dans un tiroir par hasard au dessus d'un sel d'uranium. Il aurait dû les retrouver non exposées. Il les retrouve impressionnées



Une des plaques photographiques d'Henri Becquerel - développée le 1er mars 1896 - impressionnée par les rayonnements issus des sels d'urane montrant en bas l'image d'une croix de Malte. Une croix de cuivre, qui avait été interposée entre la plaque enveloppée de papier et une mince lame de verre supportant les sels d'urane, avait absorbé les rayonnements.



Henri Becquerel
(1852 - 1908)
Prix Nobel 1903

4.1 - Premiers pas : une révolution culturelle

Nouveaux rayonnements

- Pierre et Marie Curie montrent que la propriété de l'uranium d'émettre un rayonnement lui est propre
 - ▶ Ca n'est pas une réaction chimique ordinaire. Marie Curie baptise ce nouveau phénomène « **radioactivité** »
- 1898 - Pierre et Marie Curie isolent le radium
 - ▶ un million de fois plus radioactif que l'uranium
- Trois types de radioactivité, selon leur degré de pénétration
 - Rayons α ou alpha
 - Identifiés à des noyaux d'hélium
 - Rayons β ou bêta
 - Identifiés à des électrons
 - Rayons γ ou gamma
 - Identifiés à des photons énergiques émis par les noyaux
- Sources radioactives
 - ▶ «Marie Curie les collectionne comme d'autres femmes des bijoux...»



Pierre et Marie Curie
Prix Nobel 1903

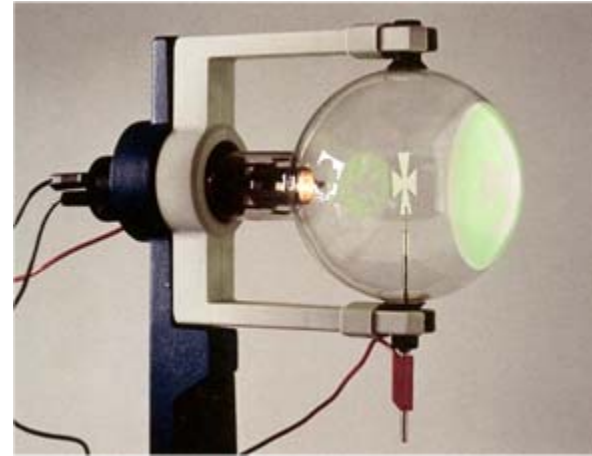


4.1 - Premiers pas : une révolution culturelle

Découverte de l'électron

■ 1897 - Découverte de l'électron

- ▶ J.-J. Thomson identifie le rayonnement « cathodique » à de minuscules particules d'électricité négative
- ▶ Il en mesure la masse avec des champs magnétiques et électriques
- ▶ Ce sera l'**électron**



■ L'atome plum-pudding de Thomson

- ▶ Il y a des électrons dans l'atome, mais on se sait pas comment celui-ci est fait
- ▶ Thomson imagine des électrons négatifs préexistant dans un atome lourd, composé de charges positives de nature inconnue

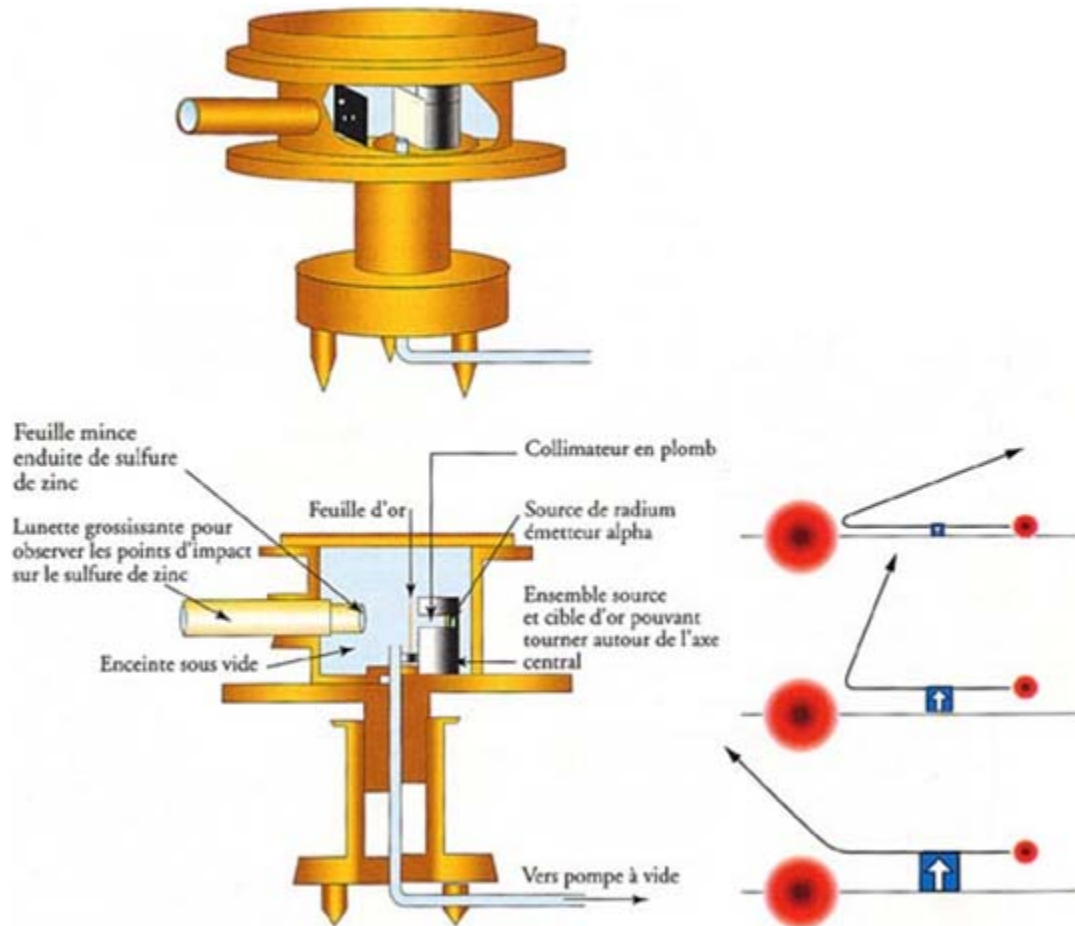


J.-J. Thomson
(1856 - 1940)
Prix Nobel 1906

4.1 - Premiers pas : une révolution culturelle

Découverte du noyau

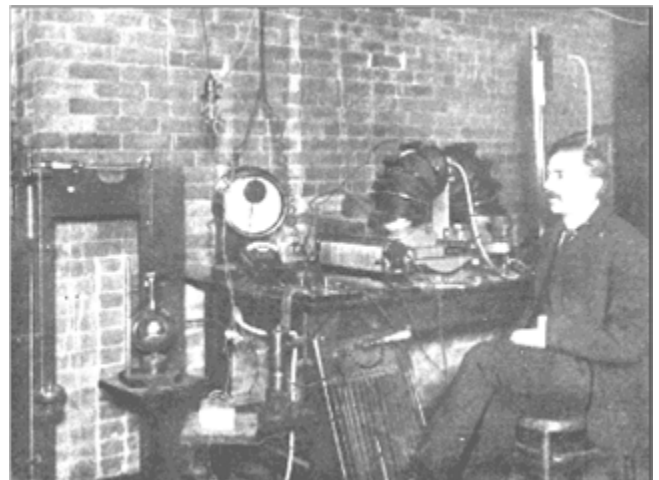
- 1911 - Expérience de Rutherford (Nobel 1908)



- La masse est concentrée au cœur d'un atome composé de vide :

▶ « C'est comme si vous bombardiez un buvard avec un obus de 75 et que vous le voyez rebondir »

- 1919: mise en évidence du proton

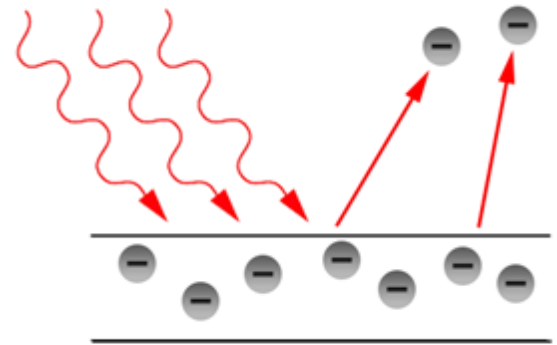


4.1 - Premiers pas : une révolution culturelle

L'atome de Bohr

■ La théorie des quanta

- ▶ le rayonnement du corps noir
 - 1900 : Planck (Nobel 1918)
 - constante de Planck ($h=6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s)
- ▶ l'effet photo-électrique
 - découvert par Herz en 1887
 - expliqué par Einstein en 1905
 - l'arrachement des électrons à la surface d'un métal dépend de la longueur d'onde du rayonnement auquel il est soumis

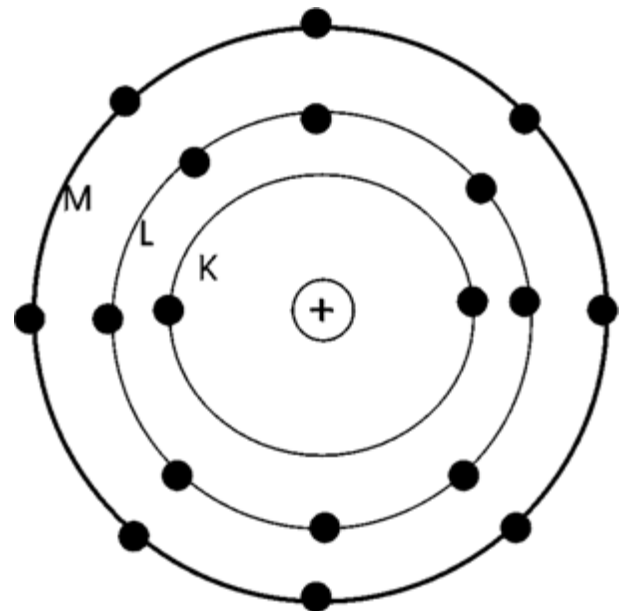


■ Premier modèle de l'atome en couches

- ▶ 1913 : Niels Bohr



Niels Bohr
(1885-1962)
Prix Nobel 1922



4.1 - Premiers pas : une révolution culturelle

Relativité et $E = mc^2$

1905: l'année miraculeuse

- L'effet photo-électrique:
 - ▶ Les photons sont des quanta de lumière

- Le mouvement brownien:
 - ▶ déplacement aléatoire des « grains »

- La **relativité restreinte**
 - ▶ vitesse de la lumière:
 - vitesse limite
 - vitesse absolue
 - ▶ l'espace-temps est relatif
 - il est différent pour 2 observateurs en mouvement
 - ▶ Principe d'équivalence entre l'énergie et la matière
 - $E = mc^2$
 - l'énergie d'un système au repos est reliée à sa masse



Albert Einstein
(1875 - 1955)
Prix Nobel 1921

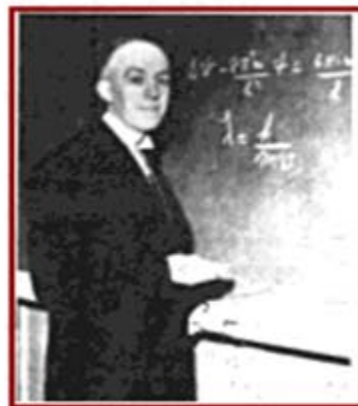
Des concepts révolutionnaires

4.1 - Premiers pas : une révolution culturelle

Des ondes-corpuscules

- 1924 - Louis de Broglie. La lumière: onde ou corpuscule?
 - ▶ Le tableau noir, le chiffon et pas d'ordinateur
 - ▶ Le génie aussi...
- Les particules, comme la lumière, doivent produire des effets d'interférences
 - ▶ les particules se comportent aussi comme des ondes
 - $P=h/\lambda$
 - ▶ Ces effets seront observés 30 ans plus tard
- Application :
 - ▶ le microscope électronique
 - ▶ les futurs accélérateurs

Louis de Broglie
(1892-1987)
Prix Nobel 1929



§ 4.2 - Les bonds en avant des années 30

**L'essor de la physique nucléaire.
De nouveaux moyens permettent
la découverte de particules inattendues ...**

- Avancés théoriques
- Avancés techniques
- Découvertes

4.2 - Les bonds en avant des années 30

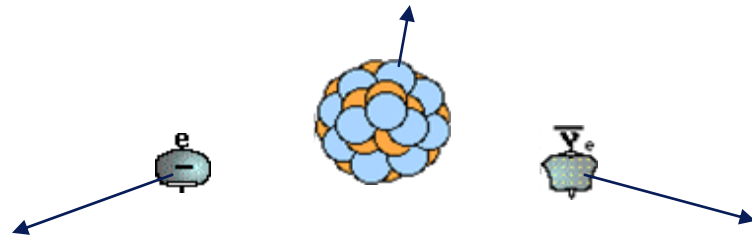
Avancés théoriques

■ Interaction électromagnétique

- ▶ 1928: Dirac développe une théorie relativiste pour décrire l'électron
 - prédit l'existence de l'anti-électron : c'est la naissance de l'**anti-matière**

■ Interaction faible:

- ▶ la radioactivité β pose problème:
 - de l'énergie semble manquer



- ▶ 1930 : Wolfgang Pauli émet l'hypothèse d'une particule le **neutrino**
 - Il faudra 25 ans pour le détecter
 - Pauli émet son principe selon lequel des électrons ne peuvent partager le même « état quantique », ce qui explique que l'atome soit volumineux
- ▶ 1934 : Enrico Fermi (1901-1954) établit la théorie du rayonnement β
 - Ancêtre de la théorie de l'interaction faible
 - Les particules qui vérifient le principe de Pauli sont les **fermions**

■ L'interaction forte:

- ▶ 1934: H. Yukawa prédit l'existence d'un méson qui expliquerait l'interaction forte entre les nucléons



Paul Dirac
(1902-1984)
Prix Nobel 1933



Wolfgang Pauli
(1900-1958)
Prix Nobel 1945



Enrico Fermi
(1901-1954)
Prix Nobel 1938

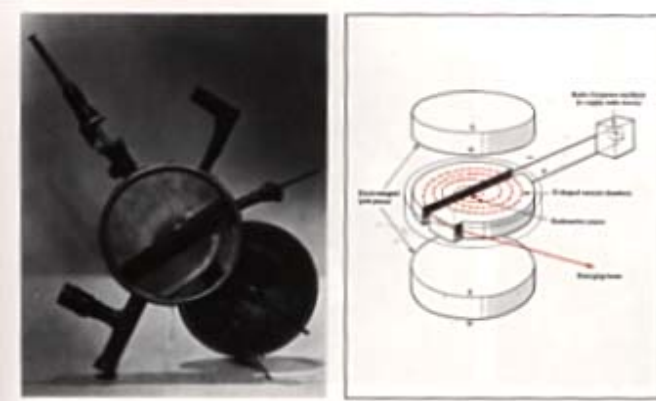


Hideki Yukawa
(1907-1981)
Prix Nobel 1949

4.2 - Les bonds en avant des années 30

Bonds en énergie

- A Berkeley, le cyclotron de Lawrence, premier accélérateur
 - ▶ Le prototype a la taille d'un camembert et atteint 80 keV



Le prototype



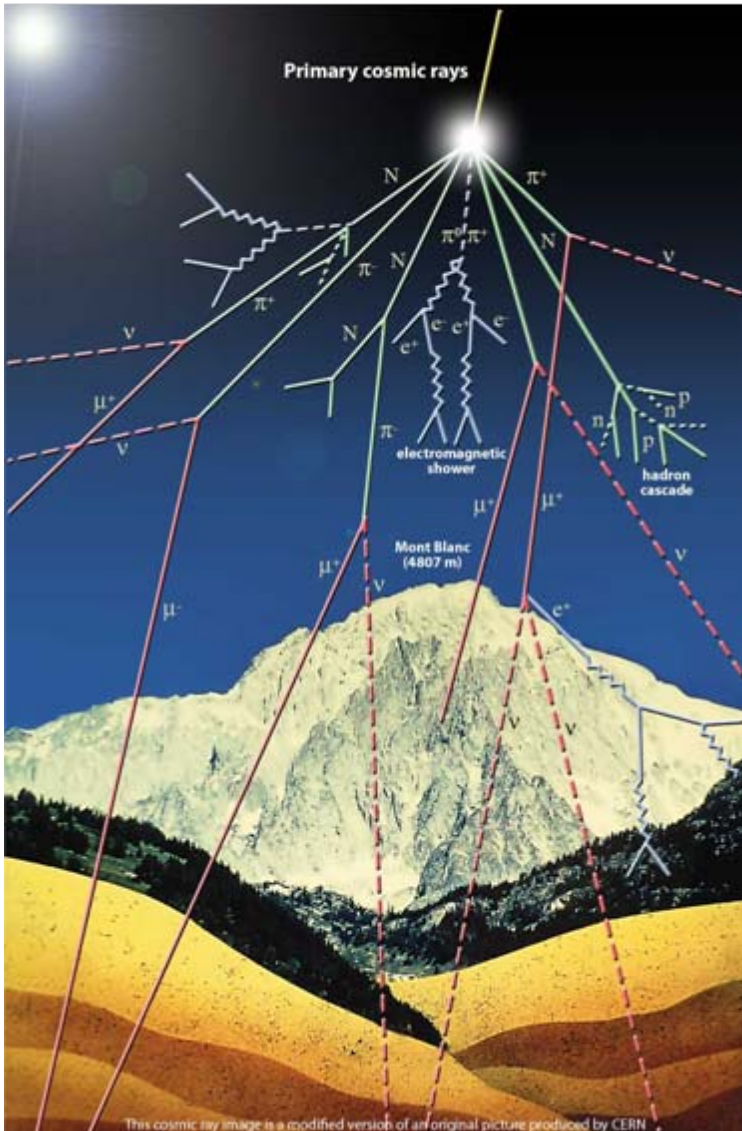
Ernest Lawrence (1901-1958)
auprès du 27 pouces
à Berkeley (Nobel 1939)

- Puis, il grandit en taille et en énergie :
 - ▶ Janvier 1932 : le cyclotron a 11 pouces (28 cm) et le MeV est atteint
 - ▶ Décembre 1932 : 27 pouces (69 cm), les 5 MeV sont atteints
 - ▶ 1939 : 60 pouces (1 m 50), les 20 MeV sont atteints
- Ce premier accélérateur donne accès à un domaine d'énergie supérieur à celui permis par les sources radioactives : ce « **grand bond en avant** » de la technique va être à l'origine de nouvelles **découvertes**
 - ▶ Un lien de cause à effet que l'on retrouve fréquemment dans l'histoire de la physique...

4.2 - Les bonds en avant des années 30

Le rayonnement cosmique

- 1912: Hess, découverte du rayonnement cosmique
 - ▶ Instruments embarqués dans un ballon
 - ▶ L'intensité du rayonnement augmente avec l'altitude



Victor Hess
(1883-1964)
Prix Nobel 1936



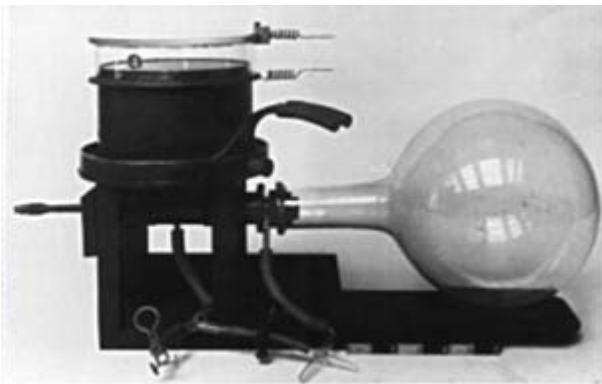
Expériences au pic du midi

- « Accélérateur » naturel
 - ▶ seul moyen disponible pour atteindre les hautes-énergies

4.2 - Les bonds en avant des années 30

Les détecteurs

- 1912: Wilson invente la chambre à brouillard
 - ▶ dans une chambre saturée en vapeur
 - ▶ ionisation du milieu par le passage de particules chargées
 - ▶ formation de gouttelettes (condensation) le long de la trajectoire

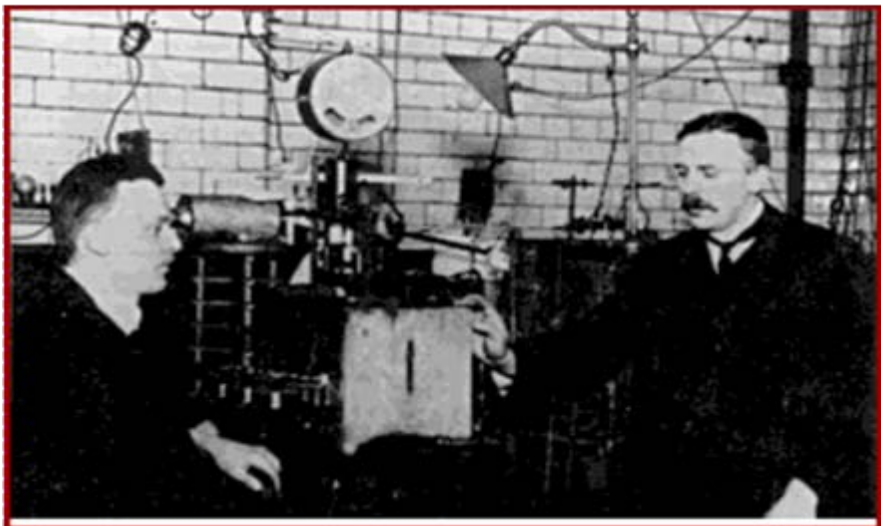


Charles Wilson
(1859-1959)
Prix Nobel 1927

- 1928: premières coïncidences entre compteurs Geiger et chambres à brouillard (Blackett et Occhialini)



Patrick Blackett
(1897-1974)
Prix Nobel 1948



Vers 1928 : Hans Geiger (1900-1958) et Ernest Rutherford (1871-1937) comptant des particules alpha

4.2 - Les bonds en avant des années 30

Découvertes du positron et du muon

- 1932 - Anderson découvre le **positron** dans les rayons cosmiques
 - ▶ Anderson observe dans une chambre de Wilson une particule qui a toutes les caractéristiques d'un électron, ne peut pas être un proton, et possède une charge électrique positive

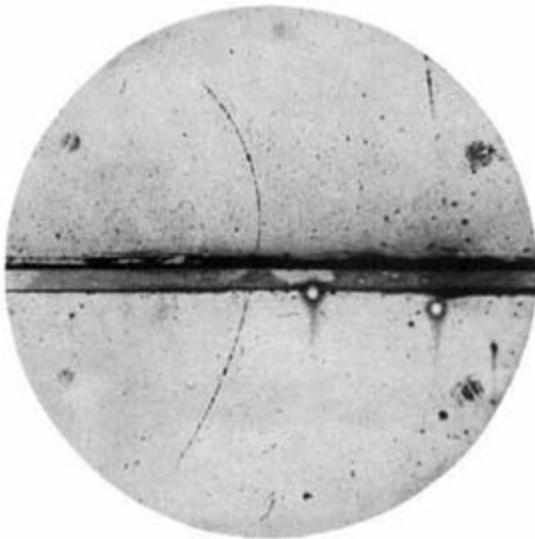


FIG. 1. A 63 million volt positron ($H_0=2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_0=1.3 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.



Carl Anderson
(1905-1975)
Prix Nobel 1936

- 1936 – Anderson découvre le **muon**
 - ▶ méson de Yukawa ??
 - ▶ « Who order the muon ? » (I. Rabi – Nobel 1944)
 - ▶ Est-ce le méson de Yukawa ? NON, il ne réagit pas par interaction forte

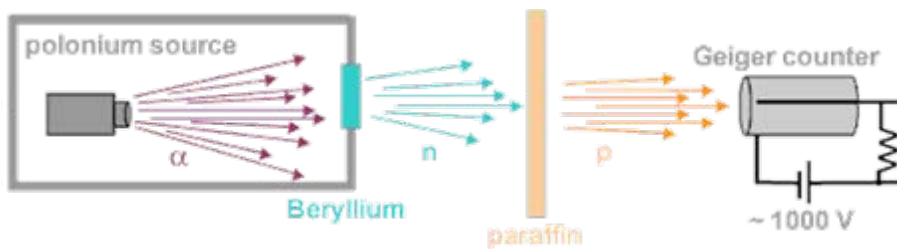
4.2 - Les bonds en avant des années 30

La dernière pièce du noyau

- 1932 - Découverte du **neutron** par James Chadwick
 - Une particule neutre ayant la masse du proton

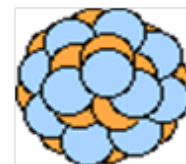
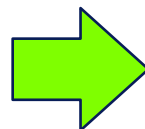


James Chadwick
(1891-1974)
Prix Nobel 1935



Modèle du noyau moderne

- On imaginait alors un noyau de protons cohabitant avec des électrons
- Ce modèle cède la place au noyau moderne composé de protons et neutrons



4.2 - Les bonds en avant des années 30

Alchimistes modernes

- Nouveaux outils ...
 - ▶ Les premiers cyclotrons permettent de bombarder les noyaux avec une énergie bien supérieure à celle des sources naturelles
- L'homme va créer de nouveaux atomes et pourrait transformer le plomb en or
 - ▶ Mais les noyaux sont transformés individuellement. La transformation est coûteuse et les quantités infinitésimales
- 1934 -Irène Curie et Frédéric Joliot découvrent la radioactivité artificielle
 - ▶ Ils avaient raté de quelques jours la découverte du neutron
 - ▶ Ils produisent des noyaux artificiels, souvent excédentaires en protons, qui émettent des positrons pour retrouver l'équilibre
 - ▶ radioactivité β^+ : une découverte source de multiples applications (médicales et autres)

Irène Curie (1897-1956)
et Frédéric Joliot (1900-1958)
Prix Nobel 1935



§ 4.3 - De la guerre aux années 50

Les suites de la bombe, un changement d'échelle

- La course à la bombe
- Début des grands centres de recherche
- Le bévatron de Berkeley dépasse le milliard d'électronvolts (GeV)

4.3 - De la guerre aux années 50

La fission de l'Uranium

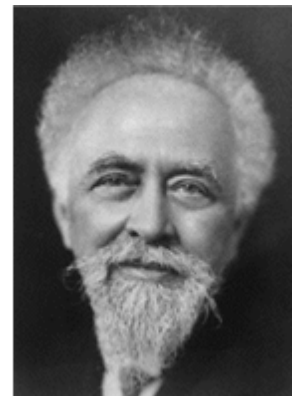
- 1938 - Découverte de la fission (O. Hahn et L. Meitner) et des réactions en chaîne (F. Joliot)
 - ▶ Cinq brevets sont déposés par Joliot, Halban et Kowarski
 - ▶ Jean Perrin introduit et calcule la masse critique
- A la veille de la guerre....
 - ▶ La théoricienne Lise Meitner, qui devra fuir l'Allemagne, explique les résultats obtenus avec Otto Hahn par la fission du noyau d'Uranium

Lise Meitner et Otto Hahn



- 1939 - Création du CNRS par Jean Perrin
 - ▶ Le début des institutions

Jean Perrin
(1870-1942)
Prix Nobel 1926



4.3 - De la guerre aux années 50

La course à la bombe

- Enrico Fermi aux Etats-Unis
 - ▶ Après son prix Nobel en 1938, Enrico Fermi ne retourne pas en Italie
- 1942 - Première pile atomique à Chicago
- Les grands centres de guerre :
 - ▶ Le projet Manhattan
 - ▶ A Los-Alamos, Oppenheimer dirige les recherches pour la réalisation de l'arme atomique
- Hiroshima et Nagasaki



Robert Oppenheimer
(1904-1967)
"le père de la bombe"



Explosion de Nagasaki (1945)

4.3 - De la guerre aux années 50

Nucléaire civil et militaire

- 1945-1955 : Industrialisation et filières nucléaires
 - ▶ Premières piles et réacteurs
- Atomes militaires : les bombes A et H
 - ▶ Développement des bombes atomiques et à hydrogène : le temps de l'espionnage
 - ▶ Après les USA, l'URSS, l'Angleterre, la France (1959) puis la Chine font exploser leurs bombes
 - ▶ Période des essais atmosphériques puis souterrains
- Le début des instituts
 - ▶ Création d'instituts nationaux pour développer le nucléaire civil et militaire :
 - En France, le CEA avec les centres de Saclay, Fontenay-aux-roses, Grenoble, Cadarache
 - Le CEA construira un synchrotron, que l'on fait visiter aux chefs d'état étrangers en visite - ▶ Dubna puis Serpoukhov en Union Soviétique
 - ▶ Laboratoire Rutherford en Grande-Bretagne
 - ▶ Frascati en Italie, près de Rome
 - ▶ DESY en Allemagne, près de Hambourg
- Création du CERN en 1954
 - ▶ L'Europe s'unit



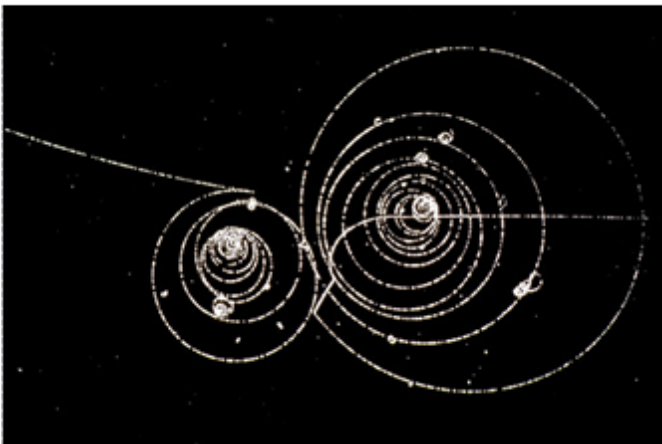
4.3 - De la guerre aux années 50

Le GeV est dépassé en Californie

- Le premier grand accélérateur, le Bévatron du LBL concurrence les rayons cosmiques
- Nouvelles techniques électroniques avec déclenchements:
 - ▶ Les chambres à étincelles
- 1952 - Glaser invente la chambre à bulles
 - ▶ Les physiciens suivent les particules à la trace
 - ▶ Un instrument incomparable pour les découvertes
 - ▶ Principe:
 - un liquide en surpression subit une détente
 - pendant cette détente, le passage d'une particule chargée ionise le gaz
 - l'évaporation du liquide s'amorce sur les ions et forme des petites bulles
 - avec un champ magnétique: courbure des trajectoires



D. Glaser
Prix Nobel 1960



Cliché de chambre à bulle



Opérateur analysant un cliché

4.3 - De la guerre aux années 50

L'anti-proton

- L'énergie au Bévatron dépasse le seuil de production de l'anti-proton
- Découverte de l'anti-proton en 1955
 - ▶ A Berkeley, le Bévatron atteint 6.5 GeV, seuil de la production d'anti-protons
 - ▶ On règle un spectromètre pour détecter des protons, qui sont des particules positives
 - ▶ Inversion des courants : observation de particules, des protons négatifs



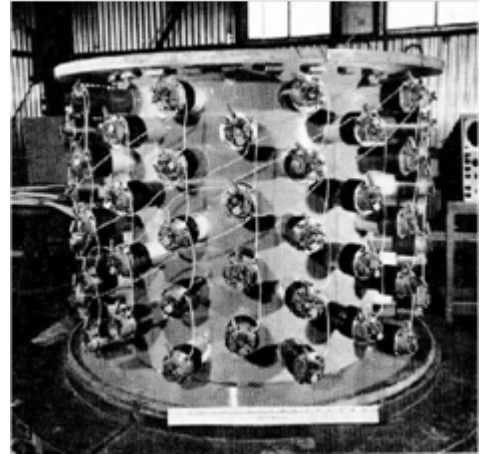
1955 : Segré, Wiegand, Lofgren, Chamberlain et Ypsilantis sablent l'antiproton (Segré et Chamberlain - **Prix Nobel 1959**)

4.3 - De la guerre aux années 50

Enfin le neutrino...

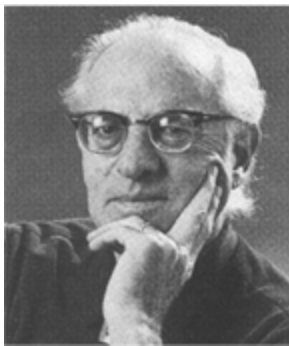
■ 1956 : Première mise en évidence d'un neutrino

- ▶ Des neutrinos au compte-goutte
- ▶ Première expérience auprès d'un réacteur nucléaire, celui de Savannah River aux USA
- ▶ 26 ans après l'hypothèse de l'existence du neutrino par Pauli, Cowan et Reines observent la capture d'un anti-neutrino par un proton



■ Bizarreries de l'interaction faible: violation de la parité

- ▶ Lee et Yang prédisent qu'un noyau de cobalt tournant à «gauche» n'émet pas d'électrons de la même façon qu'un noyau qui tourne à «droite»
- ▶ Mme C.S. Wu et L. Lederman observent l'effet. Dans le jargon des physiciens, « la parité est violée »



Frederick Reines
(1918-)
Prix Nobel 1995



T.D. Lee et C.N. Yang
Prix Nobel 1957

§ 4.4 - Les années 60 et l'arrivée des quarks

L'Europe concurrence les Etats-Unis

- Le PS de 30 GeV du CERN
 - ▶ Dubna perd la bataille de la «focalisation forte»
- Les chambres à bulles dominant, mais pour encore peu de temps
 - ▶ Des détecteurs lents, mais idéaux pour une première exploration



Le hublot d'une chambre à bulles

4.4 - Les années 60 et l'arrivée des quarks

Le PS du CERN

- Focalisation faible ... et forte
 - ▶ Dans un synchrotron, les particules ne doivent pas heurter les parois du tube lors de leurs révolutions
 - ▶ Les procédés de «focalisation» connus alors sont peu efficaces. Les tubes ont de gros diamètres où le vide est difficile à maintenir. Les performances sont médiocres
 - ▶ En 1952 est proposé un nouveau principe de focalisation beaucoup plus efficace (alternance d'aimants quadripolaires focalisants et défocalisants)
- Les soviétiques construisent à Dubna un «synchro-phasotron» de 10 GeV
 - ▶ Le tube fait 1 m de diamètre. La focalisation est faible.
- Le CERN fait le pari sur la focalisation forte
 - ▶ Novembre 1959 : premières bouffées (pulses) de protons de 24 GeV
 - ▶ Débuts du synchrotron à protons, la première machine du CERN

John Adams (1920-1984) enfournant le cliché des premiers pulses dans une bouteille vide de vodka, à destination de Dubna

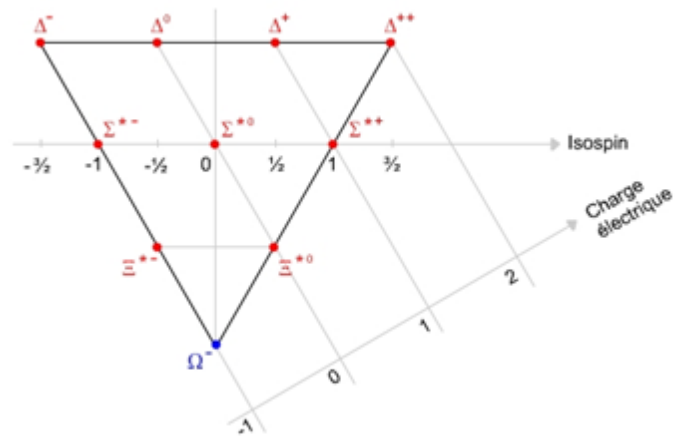


4.4 - Les années 60 et l'arrivée des quarks

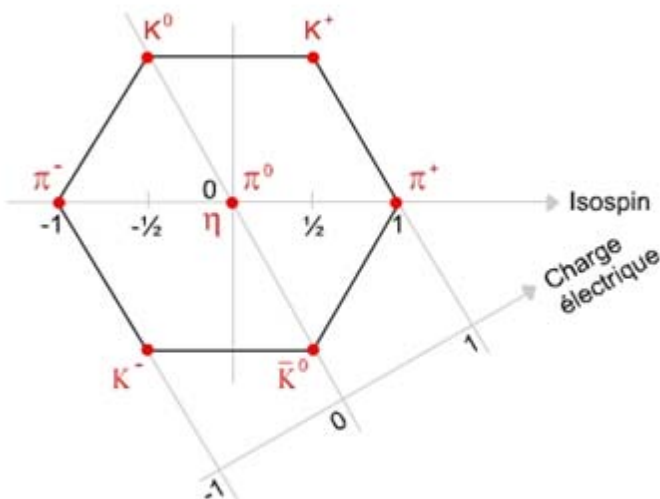
Inflation de particules

- 1957-1965 : Age d'or des chambres à bulles
 - ▶ Pluie de particules ou pseudo particules
 - ▶ Les K^0 et Λ^0 sont produits par paires :
 - Cela semble étrange
 - Bien d'autres choses restent inexpliquées...
 - ▶ Quand on ne comprend pas, on classe :

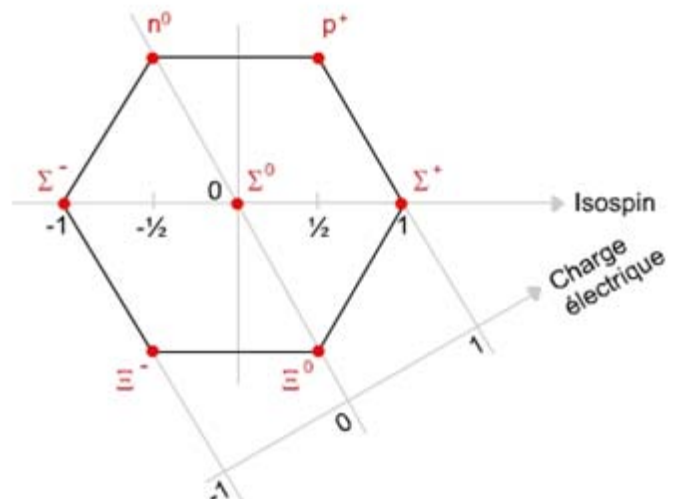
- Regroupement selon
 - le spin
 - la masse
- Diagramme en fonction
 - charge électrique
 - isospin (spin isotopique)



Découplet des baryons de spin 3/2.



Découplet des baryons de spin 1/2.

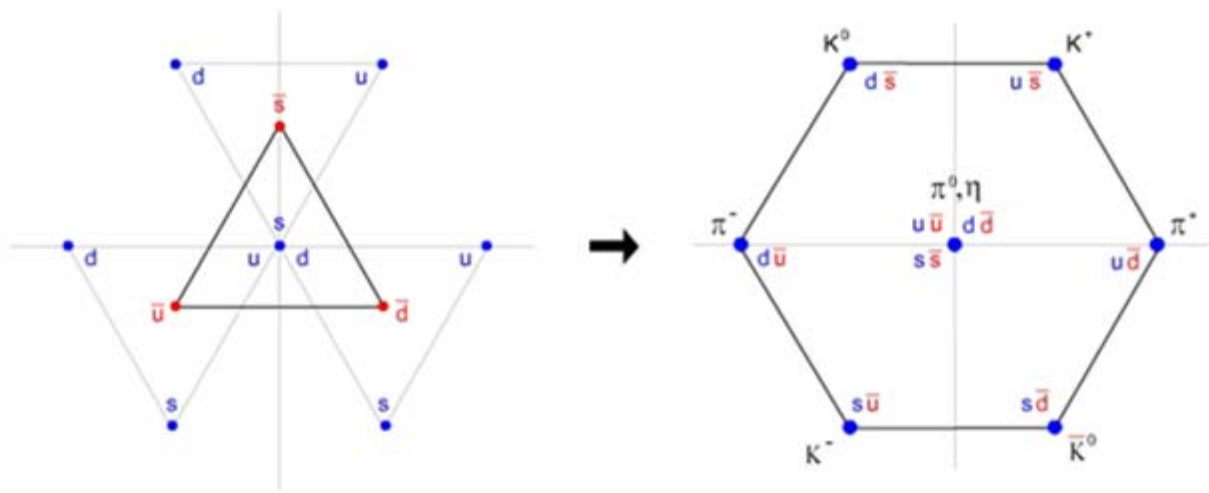


Octet des mésons de spin 0.

4.4 - Les années 60 et l'arrivée des quarks

Le SLAC voit des quarks

- 1964 : Gell-Mann et Nee'man proposent la théorie des quarks
 - « Three quarks for Munster Mark » (Finnegans Wake de James Joyce)
 - Tous les hadrons alors connus peuvent être formés à partir de 3 quarks: u, s, d



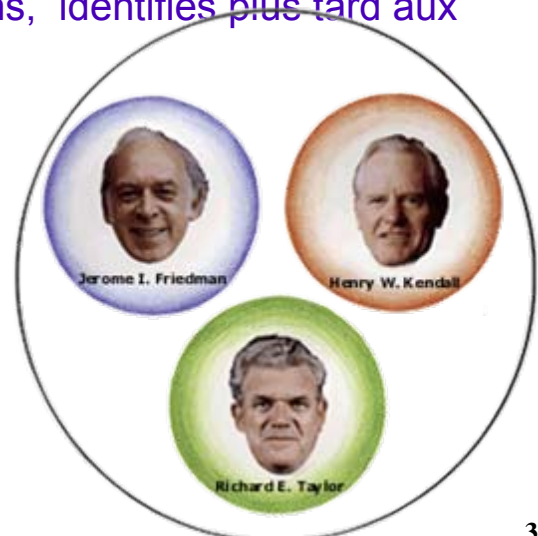
© 3xplus.com

- 1968 - à Stanford, le grand accélérateur d'électrons répète l'expérience de Rutherford 60 ans plus tard
 - Il « sent » des points durs, qu'on appelle partons, identifiés plus tard aux quarks (et gluons)



Murray Gell-Mann
(1929-)
Prix Nobel 1969

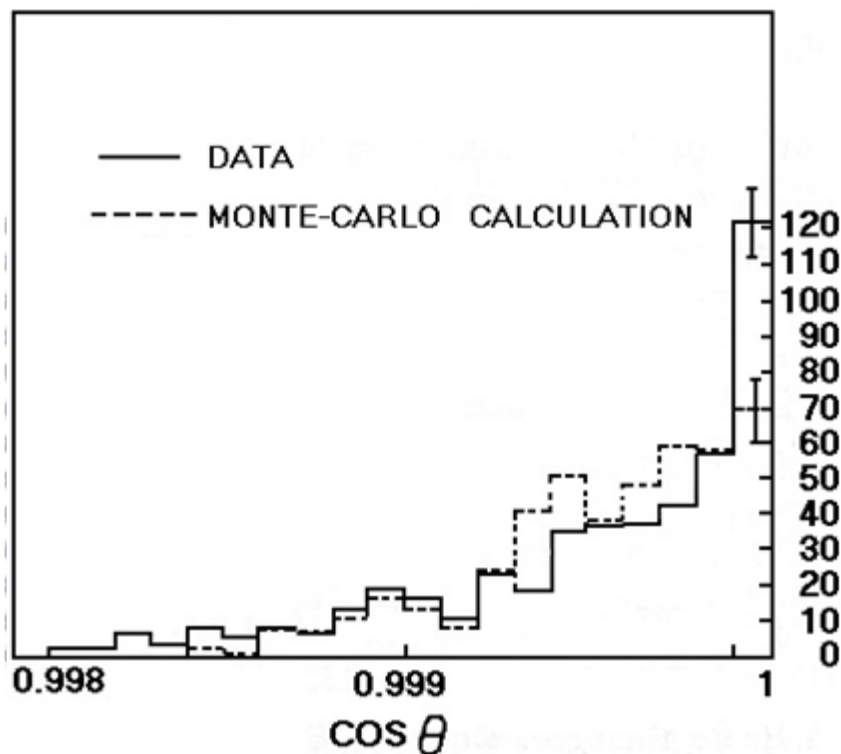
J. Friedman, H. Kendall
et R. Taylor
Prix Nobel 1990



4.4 - Les années 60 et l'arrivée des quarks

La violation de CP

- 1964 : J. Christenson, J. Cronin, V. Fitch et R. Turlay
 - ▶ observation de désintégration de K^0 et \bar{K}^0
 - ▶ découverte de la violation de CP
 - L'interaction faible différencie la matière et l'anti-matière !



- Modèle théorique
 - ▶ En s'appuyant sur un mécanisme proposé par N. Cabibbo
 - ▶ M. Kobayashi et T. Maskawa explique la violation de CP en introduisant une 3ème famille de quarks
 - ▶ Matrice CKM

4.4 - Les années 60 et l'arrivée des quarks

Le neutrino n'est pas unique

- Faisceaux de neutrinos et d'antineutrinos auprès des grands synchrotrons
 - ▶ Les faisceaux de particules instables, comme les mésons π , génèrent des neutrinos et antineutrinos
 - ▶ Les neutrinos de ces faisceaux ont une énergie beaucoup plus élevée que les neutrinos solaires ou que ceux venant de réacteurs
- 1962 - une nouvelle espèce de neutrino est découverte à Brookhaven : **le neutrino-mu**



L. Lederman, M. Schwartz
et J. Steinberger
Prix Nobel 1988

- Les faisceaux de neutrinos sont utilisés avec des «chambres à bulles à liquides lourds» pour étudier l'interaction faible
 - ▶ Le laboratoire de l'accélérateur linéaire construit une chambre à bulles géante : **GARGAMELLE**

§ 4.5 - La moisson des années 70

Nouveaux quarks et nouveaux leptons

- L'arrivée de collisionneurs e^+e^- et leur montée en énergie permirent une série de découvertes
- La plus spectaculaire, celle d'un méson très lourd, le J/Ψ , amena une révolution dans les modes de pensées
- L'existence d'une troisième famille de constituants élémentaires

4.5 - La moisson des années 70

Un accélérateur d'électrons de 3 km

- 1966: Les électrons de Stanford (Californie) pulvérisent le record en énergie des électrons : 20 GeV
- L'accélérateur est linéaire pour éviter les pertes d'énergie dues au rayonnement de freinage
- Les électrons californiens du SLAC ont commencé à voir l'intérieur des protons
 - ▶ Ceux de HERA, à Hambourg, prendront le relais dans les années 1990



Le grand accélérateur du SLAC

4.5 - La moisson des années 70

Naissance des collisionneurs e^+e^-

- Années 70 - Course aux accélérateurs géants
 - ▶ 1971 début de construction du SPS de 300 GeV du CERN (7km)
 - ▶ Les russes construisent un 70 GeV à Serpoukhov
 - ▶ Les américains développent Fermilab près de Chicago
 - ▶ Les dernières chambres à bulles: Saclay construit encore MIRABELLE, et le CERN la BEBC
- 1972 - Naissance des collisionneurs e^+e^-
 - ▶ Frascati
 - ▶ Orsay
 - ▶ Stanford : SPEAR (alimenté par l'accélérateur linéaire)
- Les tailles sont encore modestes :
 - ▶ SPEAR tient encore sur un parking
 - ▶ Il est le premier à atteindre les 3 GeV du J/Ψ



Les anneaux de collisions SPEAR à Stanford

4.5 - La moisson des années 70

Détecteurs 4π

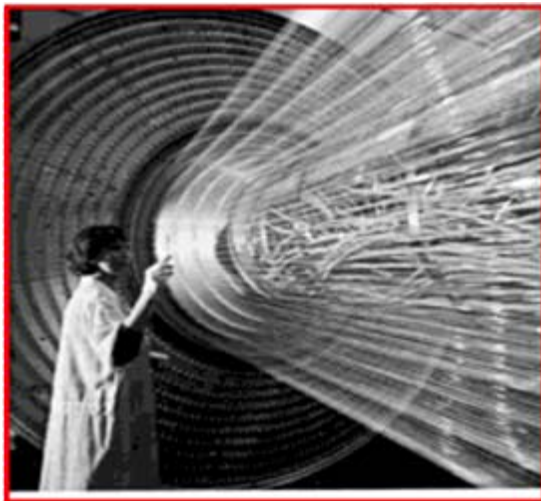
■ Essor de l'électronique

- ▶ Charpak invente les chambres proportionnelles multi-fils
- ▶ Chambre à dérives

Georges Charpak
(1924-)
Prix Nobel 1992



- 1972 - Naissance des gros détecteurs multi-fonctions qui couvrent tout l'espace
 - ▶ MARK.I puis MARK.II au SLAC précurseurs des détecteurs modernes
- Début des détecteurs de traces électroniques à 2 puis à 3 dimensions
 - ▶ La première TPC est construite en 1980 à Berkeley



Tissage de la chambre
à dérive de MARKII

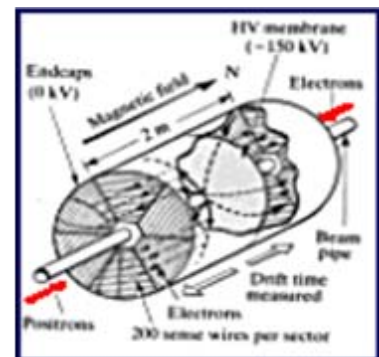


Schéma
de la première TPC
(chambre à projection
temporelle)

4.5 - La moisson des années 70

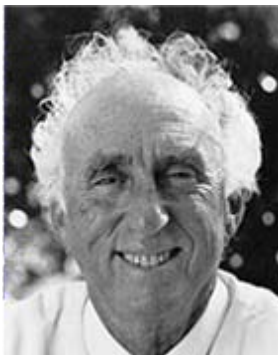
Une moisson de résultats

- Une nouvelle physique est explorée en e^+e^-
- MARKI puis MARKII moissonnent les découvertes à SPEAR
- 1974 - le tremblement de terre du J/ψ
 - ▶ Triomphe des quarks avec la découverte du quark charmé, une quatrième espèce
 - ▶ SPEAR fonctionne comme une « usine à charme »



B. Richter et S. Ting
Prix Nobel 1976

- 1976-1977 - Découvertes d'un électron et d'un quark super-lourds : le lepton tau et le quark b
- Premiers éléments de la troisième famille



M. Perl,
le père du tau
Prix Nobel 1995

L. Lederman,
le père du quark b
Prix Nobel 1988



4.5 - La moisson des années 70

La poursuite du top

- Premiers collisionneurs e^+e^- de haute énergie (20 à 50 GeV)
 - ▶ PETRA (Hambourg) en 1978, suite de DESY
 - ▶ PEP (Stanford) en 1981
 - ▶ L'Allemagne arrive avant les Etats-Unis
- A Hambourg MARKJ, JADE, TASSO, CELLO partent vainement à la poursuite du quark top
 - ▶ ... mais ils observent des jets de gluons
- CLEO - première usine à B à Cornell (USA)
 - ▶ Une riche moisson de résultats sur le quark b



Tunnel de PETRA à Hambourg

4.5 - La moisson des années 70

Un bond dans la théorie

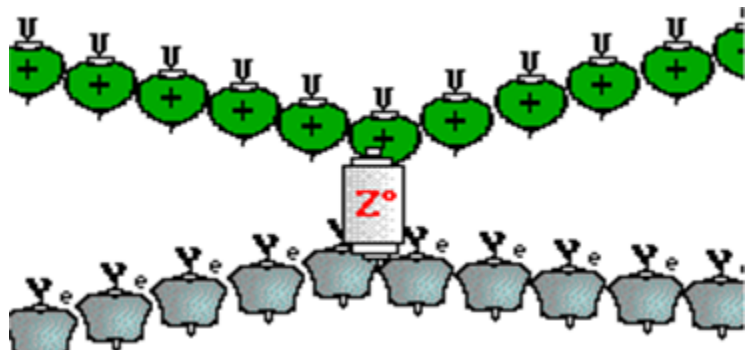
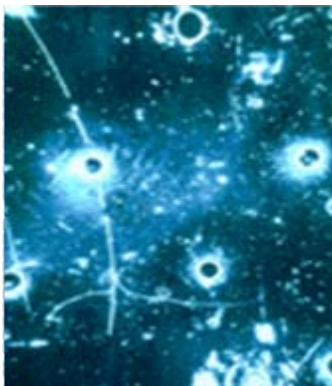
- 1967 - bond dans la théorie des forces faibles. Hypothèse de l'existence de particules très lourdes qui en seraient responsables : **les bosons W et Z⁰**
- Les forces électromagnétiques et faibles seraient deux aspects d'une force unique
 - Glashow, Weinberg et Salam inventent un modèle appelé « standard » qui devient une bible...



S. Glashow, A. Salam
et S. Weinberg
Prix Nobel 1979

- 1973 - Les neutrinos rebondissent

L'équipe de A. Lagarrigue découvre les « **courants neutres** » sur GARGAMELLE au CERN. Dans le jargon des physiciens, un neutrino peut diffuser sur un quark de la matière nucléaire ou sur un électron



§ 4.6 – Le triomphe du Modèle Standard

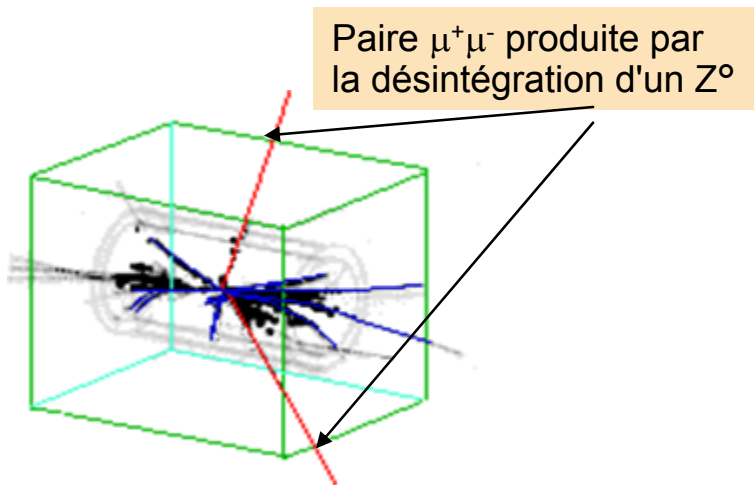
L'ère des collisionneurs géants

- Nouvelles percées en énergie des accélérateurs
- Découvertes de (presque) toutes les particules prédites
- Mesures de précisions

4.6 - Le triomphe du Modèle Standard

L'Europe prend la tête

- 1980-82 - Le CERN transforme le SPS en collisionneur proton-antiproton
 - ▶ Premiers détecteurs et collaborations géantes: UA1 et UA2
- Confirmation en 1983 de l'existence des bosons W et Z⁰, 100 fois plus lourds qu'un proton
 - ▶ Une poignée de Z⁰ et de W au milieu de millions d'événements. Une aiguille dans une botte de foin



Simon Van der Meer et Carlo Rubbia
Prix Nobel 1984

- Développement de complexes d'accélérateurs
 - ▶ Le CERN, DESY, FERMILAB, SLAC
 - ▶ En retard avec son Tevatron pour les W et Z, Fermilab trouvera le quark top

4.6 - Le triomphe du Modèle Standard

Intermède en Asie

- 1986 - Pour 3 ans et en attendant le LEP, le plus puissant collisionneur e^+e^- se trouve au Japon
 - ▶ Les 60 GeV du KEK cherchent en vain le quark top

- 1987 - Une bouffée de neutrinos en provenance de l'explosion d'une supernova traverse la terre
 - ▶ Des détecteurs enfouis dans des mines du Caucase, du Japon et des Etats-Unis disent «top» au même instant, tandis qu'un pasteur australien observe la lumière d'une supernova

- Déficit des neutrinos en provenance du soleil
 - ▶ Les expériences neutrino se cachent dans des mines, des tunnels et sous des montagnes

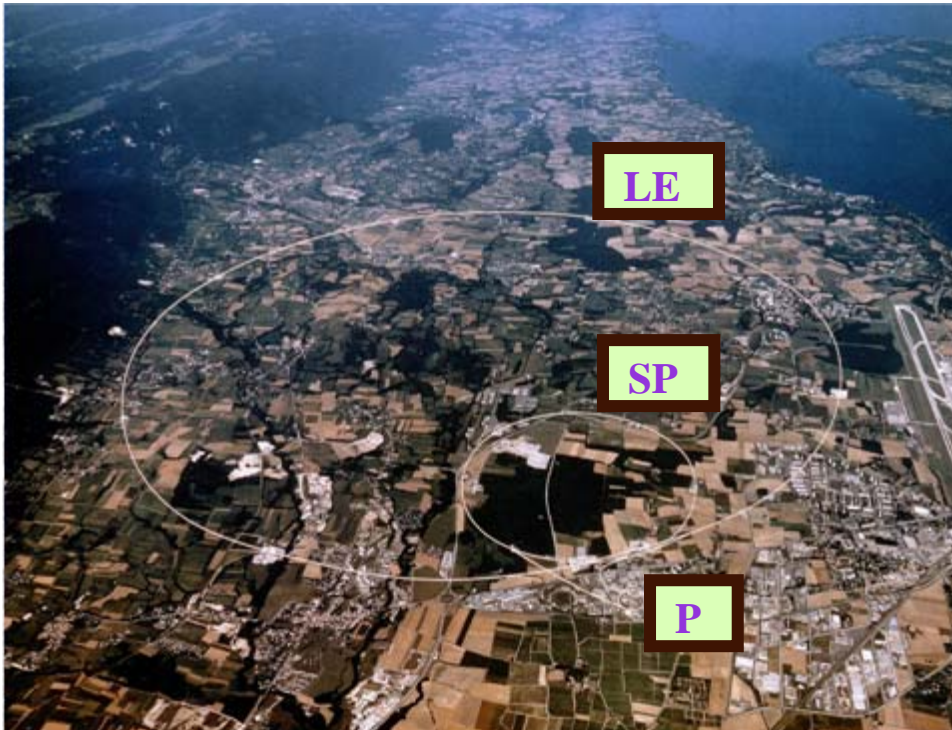
- Le CERN construit le LEP pour étudier le Z^0
 - ▶ électrons et positrons : 45 GeV + 45 GeV

- DESY construit HERA, un collisionneur électron-proton
 - ▶ Les protons atteindront 920 GeV

4.6 - Le triomphe du Modèle Standard

Le LEP

- 1989 - Mise en service au CERN du LEP, un collisionneur e+e- de 27 km de circonférence
- Quatre grands détecteurs :
 - ▶ ALEPH, DELPHI, OPAL et L3



4.6 - Le triomphe du Modèle Standard

Le triomphe du Modèle Standard

- Le LEP produit des millions de Z^0 et confirme trois familles de constituants élémentaires
 - ▶ Le SLC de l'Amérique arrive trop tard

- Confirmation extraordinaire du Modèle Standard
 - ▶ Le modèle standard de Glashow, Weinberg et Salam s'avère (trop ?) parfait
 - ▶ De petits écarts, indices de phénomènes nouveaux, sont vainement recherchés

- En 1996, le LEP abandonne l'étude du Z^0
 - ▶ La machine pousse tous ses feux et atteint les 215 GeV d'énergie en 2000
 - ▶ On observe la production attendue de paires de W
 - ▶ A la veille de la fermeture du LEP, rumeurs d'une découverte du Higgs. Il faudra attendre le LHC...

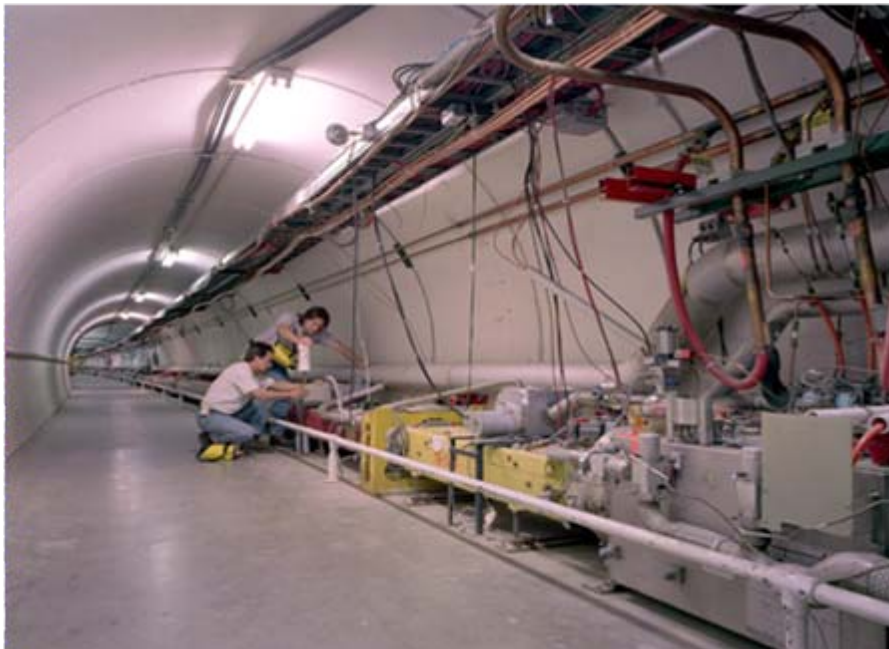
- 1992 - **HERA** à Hambourg : Mise en service d'un premier collisionneur électron-proton
 - ▶ protons de 920 GeV contre électrons de 27 GeV
 - ▶ HERA explore la structure du proton à 10^{-18} m (i.e. on arrive à voir des détails de l'ordre du millième du rayon d'un proton)

4.6 - Le triomphe du Modèle Standard

La quête du quark « top »

- 1995 - Les américains ont construit un collisionneur proton-antiproton à FERMILAB : le Tevatron
 - ▶ Il est le plus puissant (980+980 GeV)
 - ▶ Deux grands détecteurs : CDF, D0
- Le triomphe du Modèle Standard continue...
- Le quark top est enfin découvert
 - ▶ Il est très lourd : 200 fois plus lourd qu'un proton...

$$m(\text{top}) = 178 \text{ GeV}$$

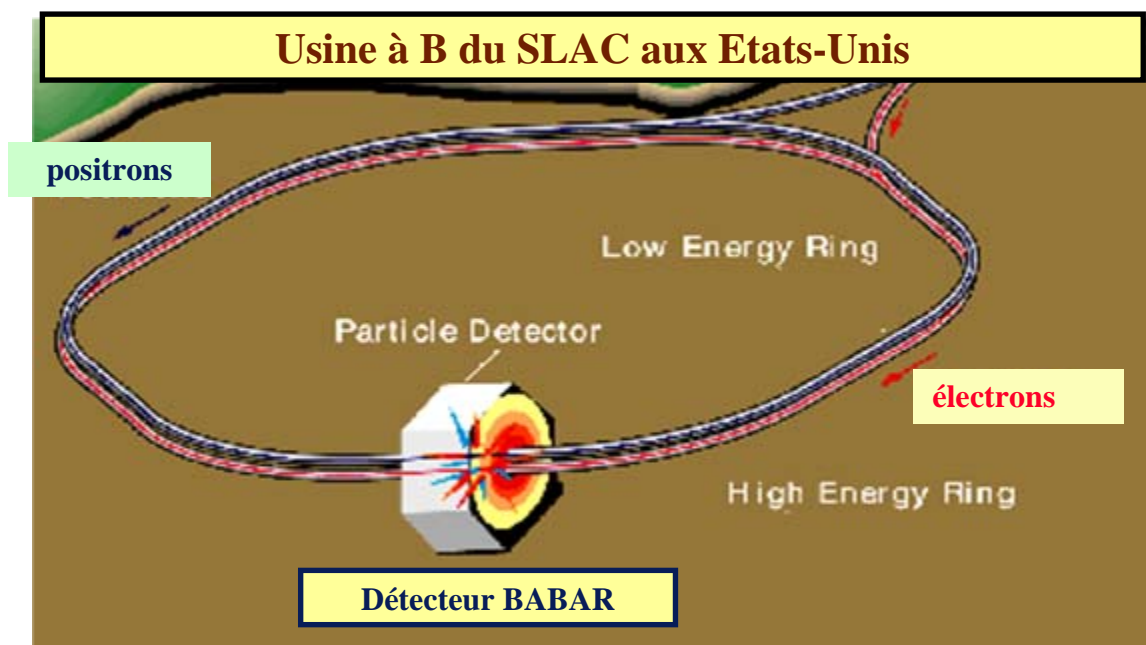


Le Tévatron

4.6 - Le triomphe du Modèle Standard

Usines à B et antimatière

- Où est passée l'antimatière?
 - ▶ Elle a disparu de l'univers proche et lointain
 - ▶ Il n'y a pas d'évidence de rencontre de mondes de matière et d'antimatière
- Un mécanisme subtil, la violation de CP, expliquerait l'excès de matière
 - ▶ Il a été proposé par Sakharov
- Il semble que l'existence de trois familles de quarks joue un rôle déterminant
 - ▶ Stanford et KEK construisent des «usines à B» de très haute luminosité. Découverte en 2000 de la violation de CP dans le secteur des B.

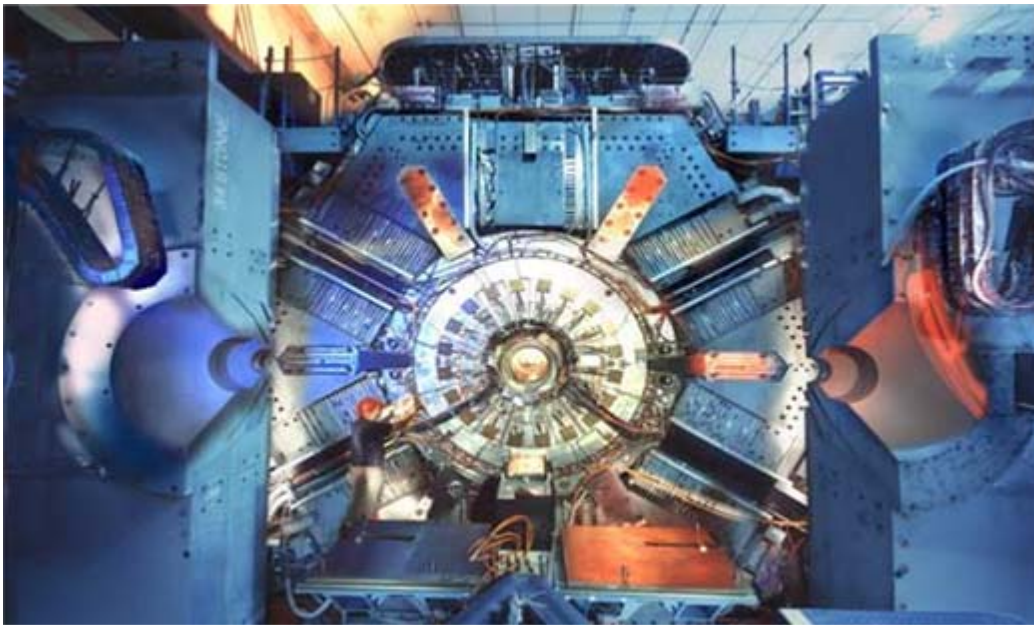


4.6 - Le triomphe du Modèle Standard

Usines à B et antimatière



Le collisionneur PEP II, e^+ au dessus, e^- en dessous



Le détecteur BaBar

§ 4.7 – Et après

L'ère des collisionneurs géants

- La masse des neutrinos
- Le LHC
- L'ILC
- ...

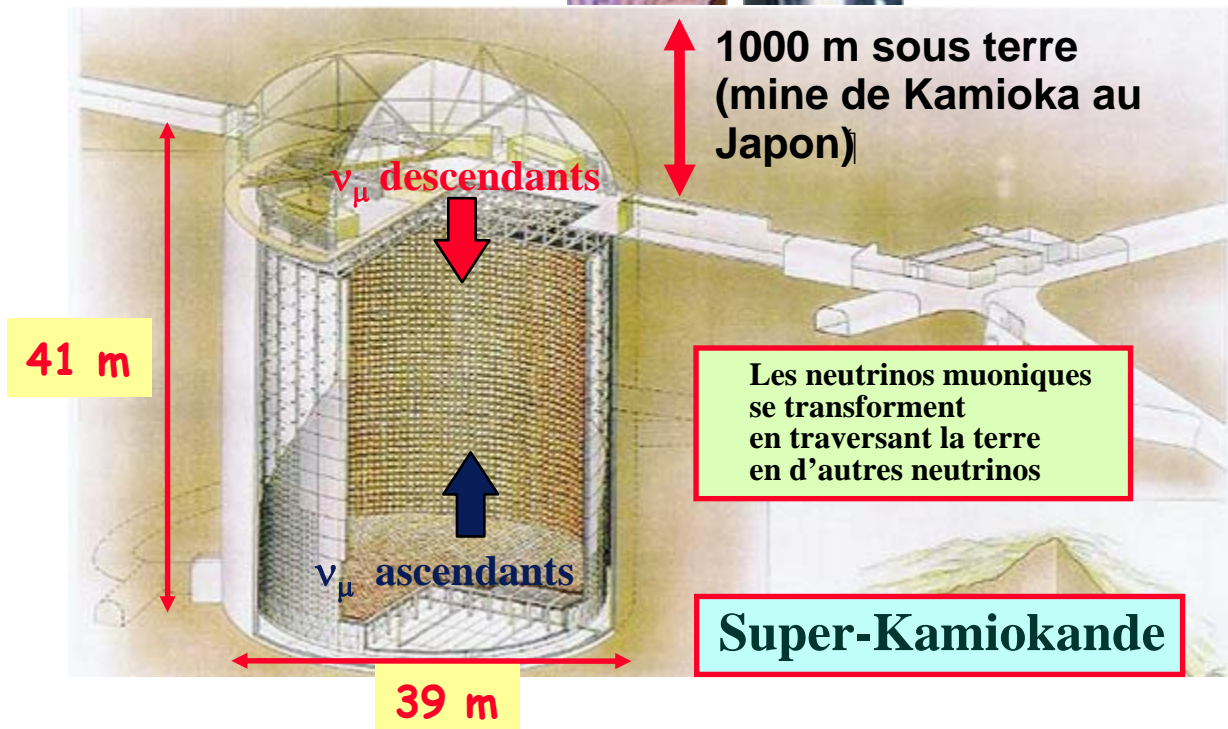
§ 4.7 – Et après

Les neutrinos oscillent

- Les neutrinos-e en provenance du soleil semblent moins nombreux que prévus = déficit des neutrinos solaires
- En 1998, une expérience au Japon montre que les neutrinos se transforment d'une espèce à l'autre :
ils « oscillent »
 - ▶ Les ν_{μ} atmosphériques qui remontent de la terre sont moins nombreux que ceux qui descendent (on attend le même nombre)
 - ▶ Les neutrinos auraient donc une masse très petite
- C'est un des résultats les plus importants de ces dix dernières années

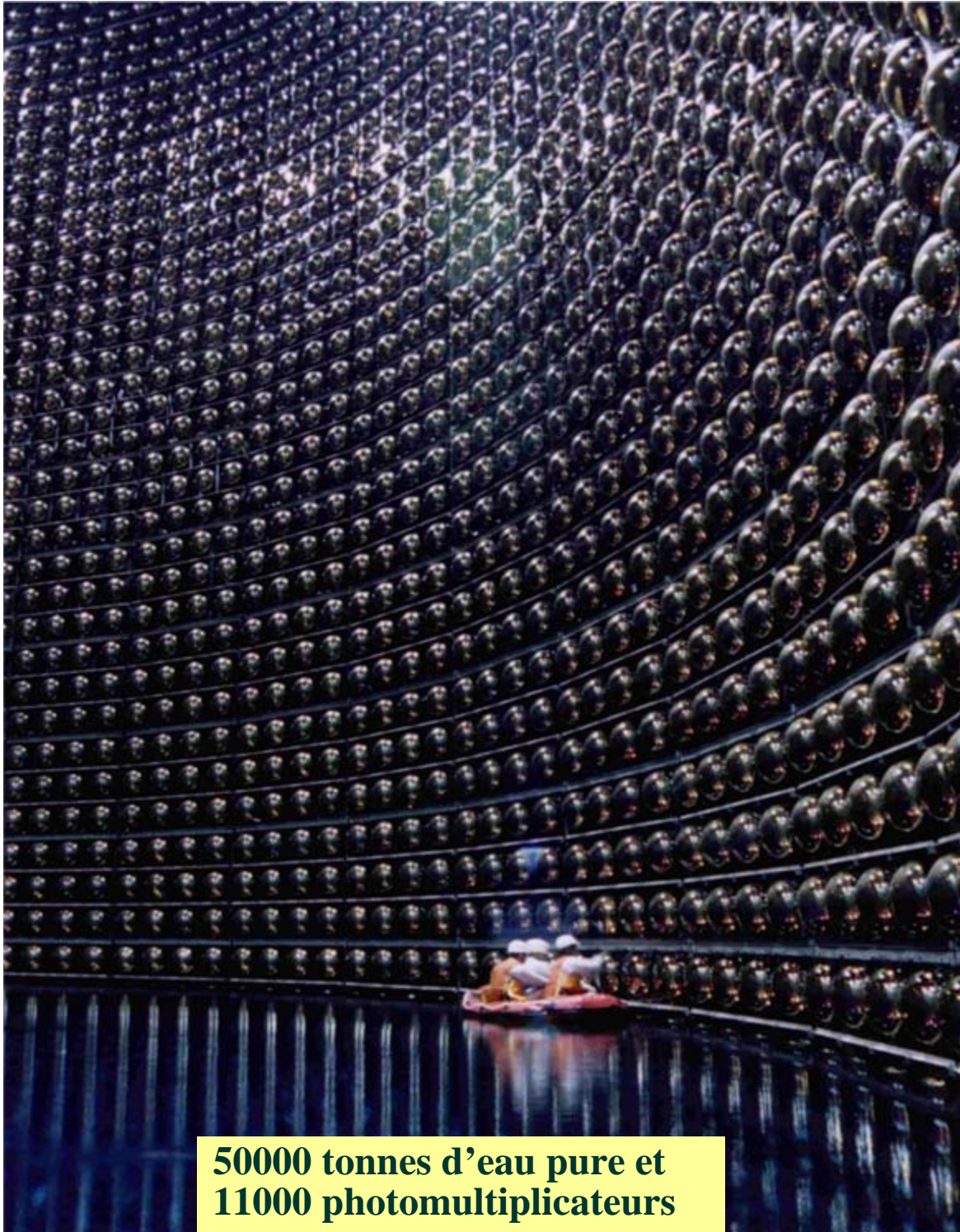


R. Davis et M. Koshiba
Prix Nobel 2002



§ 4.7 – Et après

Super-Kamiokande

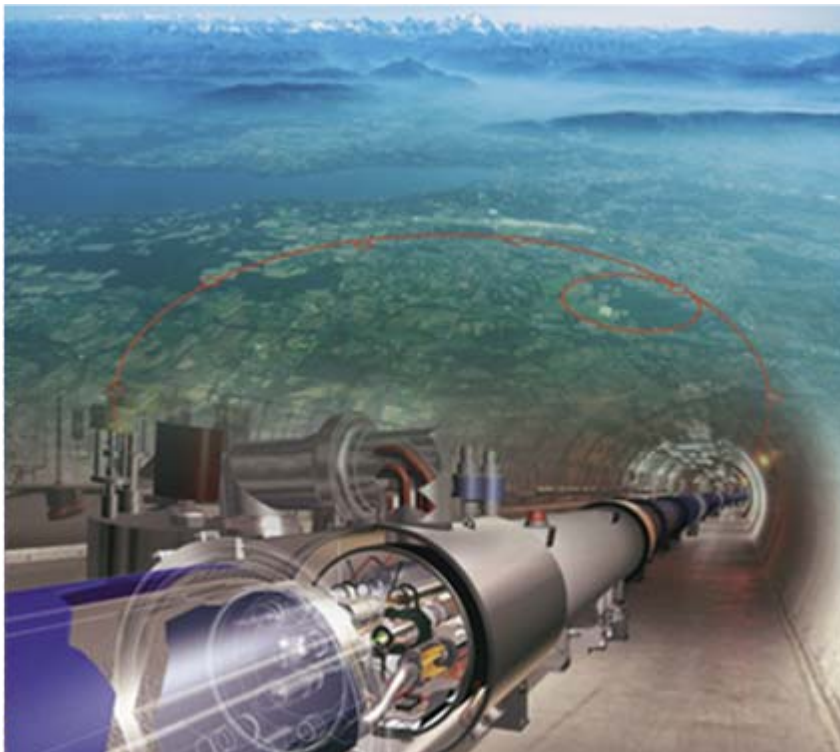


**50000 tonnes d'eau pure et
11000 photomultiplicateurs**

§ 4.7 – Et après

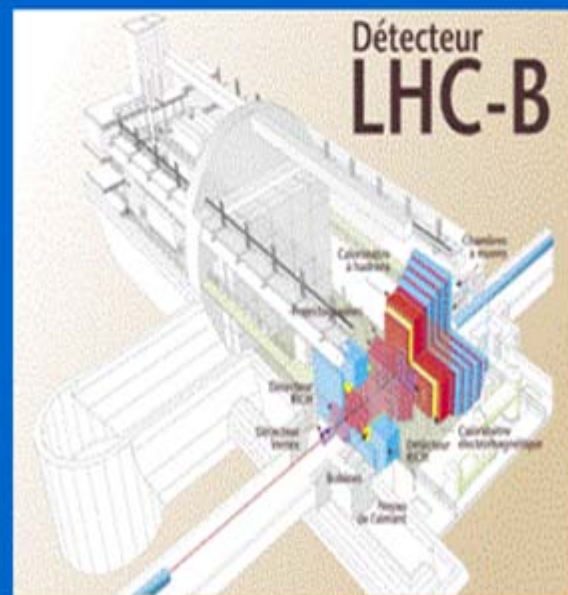
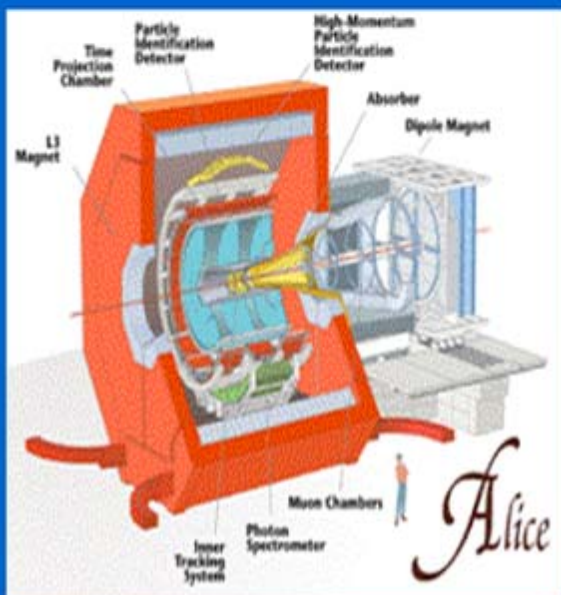
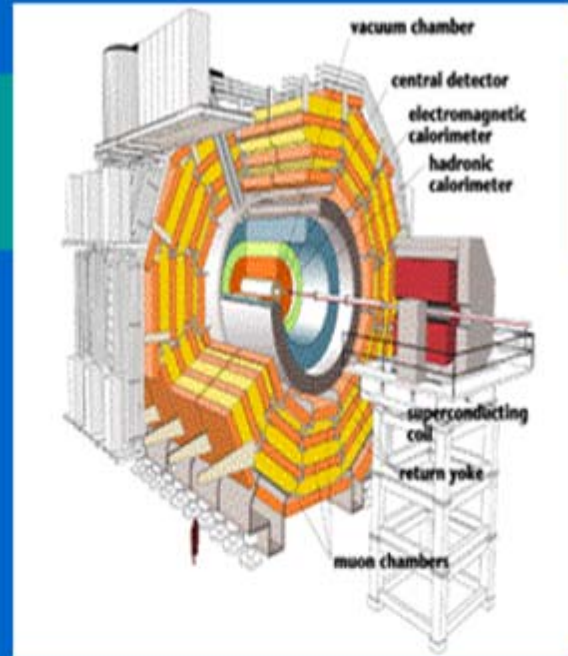
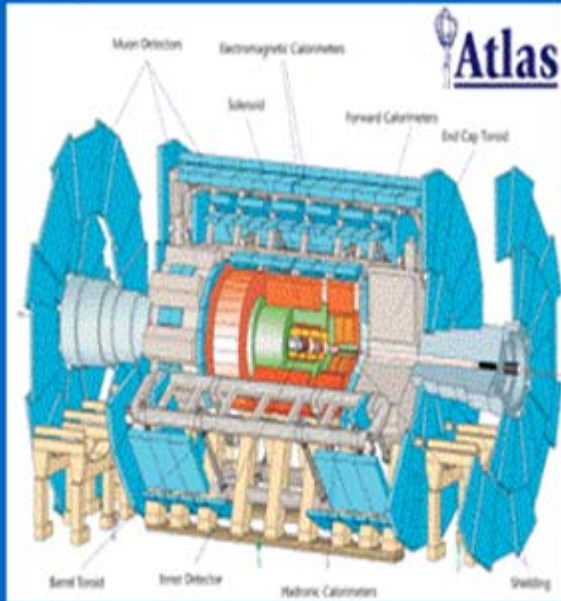
L'ère du LHC

- 2000 - Les physiciens n'ont pas trouvé au LEP le boson de Higgs, une particule cruciale pour expliquer les masses des autres particules
 - ▶ Ce boson serait probablement très lourd et difficile à produire, donc à observer
- Pour partir à sa recherche, le CERN décide de construire un collisionneur proton-proton d'énergie colossale (14 TeV) qui sera installé dans le tunnel du LEP
- C'est le LHC → 2007
 - ▶ L'Amérique jette l'éponge et abandonne le projet SSC. Elle s'associe au CERN pour le LHC



§ 4.7 – Et après

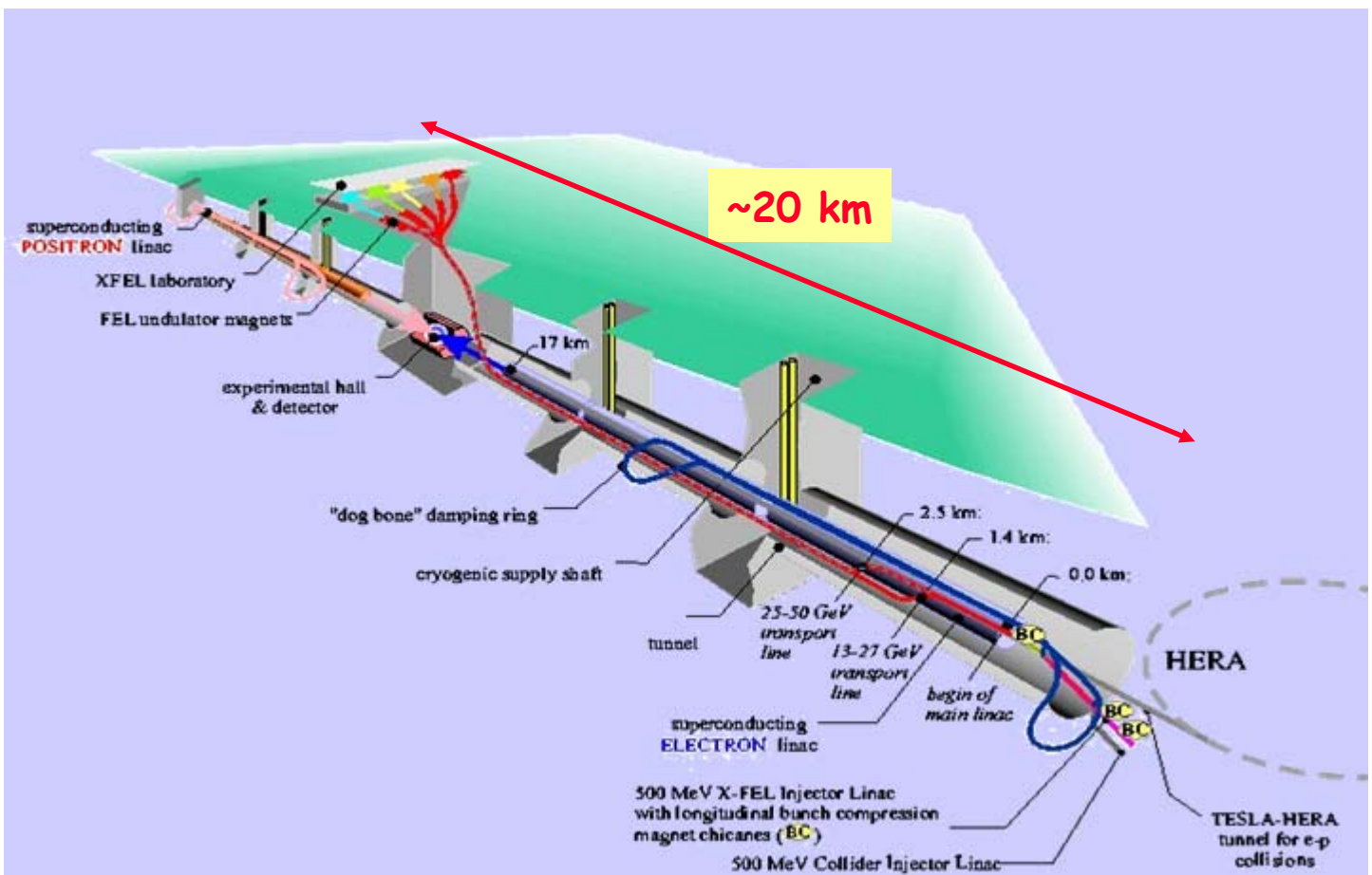
Les détecteurs auprès du LHC



§ 4.7 – Et après

Après LHC, collisionneur linéaire

- Le LHC est une machine de découverte, pas une machine de mesures fines.
- Des études sont en cours pour construire un collisionneur linéaire e^+e^- , à échelle mondiale, avec une énergie de 500 GeV à 1 TeV ~2015? →



§ 4.7 – Et après

Regards vers le ciel

- Beaucoup de découvertes grâce aux rayons cosmiques dans la première moitié du XX siècle
- Puis, règne des accélérateurs. On assiste à un retour aux sources : regarder vers le ciel
- L'infiniment petit et l'infiniment grand se donnent la main
- Multiplication des projets en astro-particules :
 - ▶ Expériences sur l'origine des gerbes cosmiques de haute énergie : « Thémistocle », «CAT », Hess, ...
 - ▶ Recherche de l'origine de gerbes de très haute énergie en provenance des confins de l'Univers : Auger (3000 km²)
 - ▶ Expériences neutrinos sous la terre, en mer, sous le pôle
 - ▶ Des détecteurs s'embarquent en satellite (ex. 1999 AMS embarque dans la navette Columbia).



Miroirs de CAT, dans les Pyrénées



Une station d'Auger en Argentine