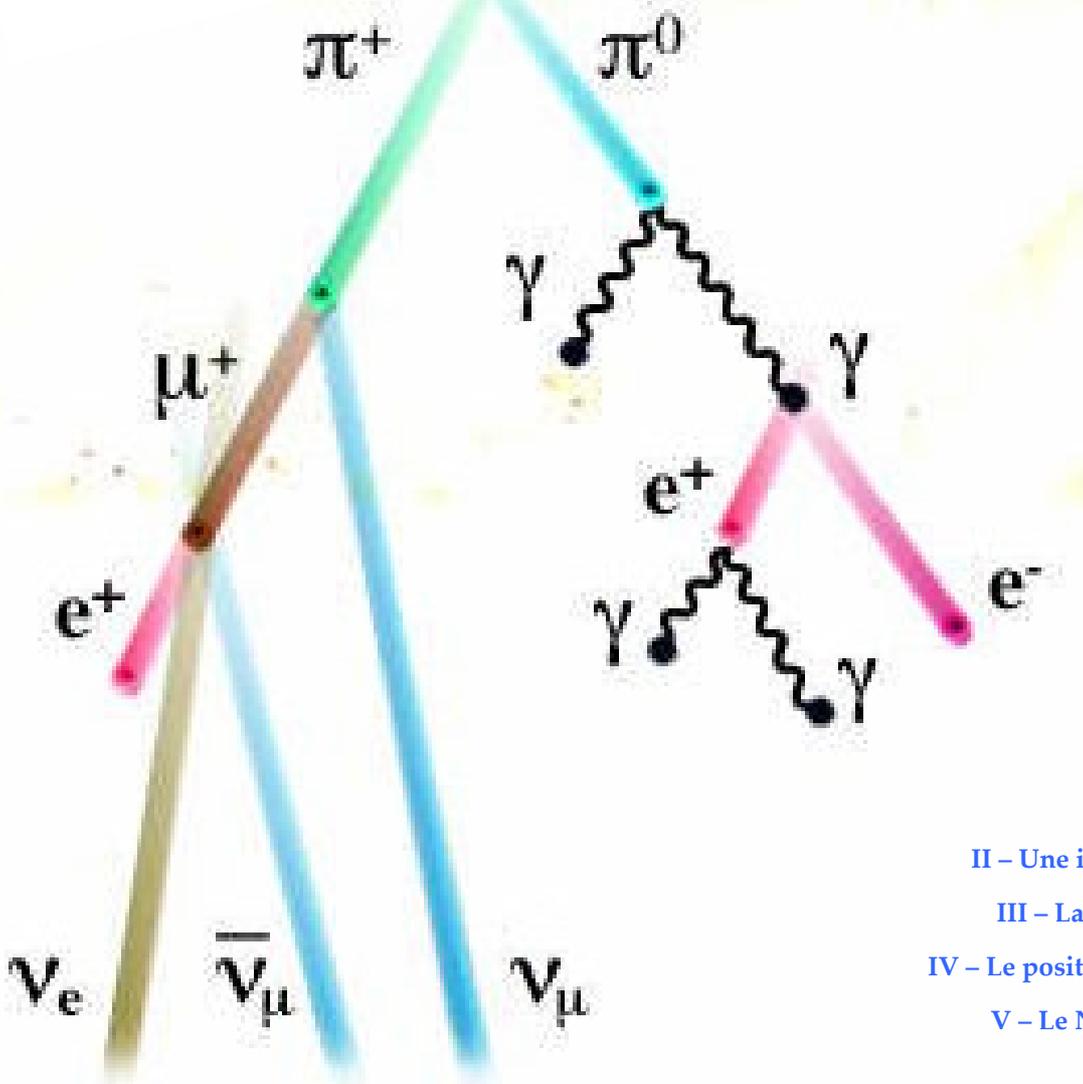


DONAT Mélanie – BRUNEAU Sébastien

DECOUVERTE DES PARTICULES ET LOIS DE CONSERVATION



I – Introduction

II – Une illumination : le photon

III – La découverte du neutron

IV – Le positron, un électron rebelle

V – Le Neutrino : une évidence

VI – Les leptons

VII – Accélérateurs et collisionneurs de particules

VIII – Nouvelles particules

IX – Conclusion

I introduction

1897

Joseph John Thomson montre que l'atome est divisible en découvrant une particule chargée négativement : l'**électron**. Il ouvre ainsi une nouvelle branche de la physique destinée à étudier le monde subatomique : la physique des particules.

2005

A l'heure actuelle, environ 300 particules ont été découvertes grâce notamment aux accélérateurs ou collisionneurs de particules, mais aussi dans les rayons cosmiques et par simple déduction. Beaucoup de celles-ci ont été trouvées grâce à certaines **lois de conservation**.

Classification actuelle des particules :

Matière	Leptons (e^- , ν_e , μ^- , ν_μ , τ^- , ν_τ)	Hadrons (particules formées de quarks)		
	Quarks (u, d, s, c, t, b)	Baryons (formés de 3 quarks pour la plupart, spin entier)		Mésons (n quarks + n antiquarks, spin demi-entier)
Rayonnement (forces)	Bosons (photon, W^\pm , Z, gluons...)	Hypérons	Nucléons	
		Σ Ξ Λ Θ Δ ...	proton neutron	piens kaons D D _S B ...

NB : Aujourd'hui, le terme « particule élémentaire » désigne toutes les particules subatomiques car la majorité d'entre elles étaient supposées indivisibles jusqu'au années 60. C'est le terme « particule fondamentale » qui est plutôt employé pour la petite vingtaine de particules indivisibles.

II une illumination : le photon

1900

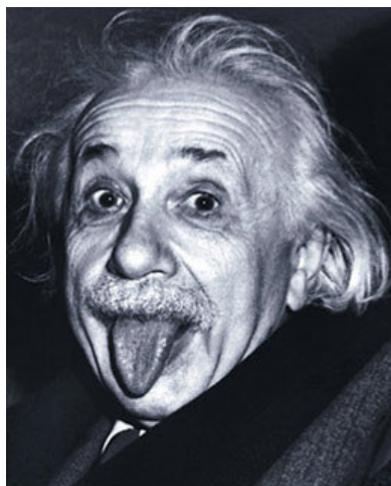
Max Planck tente de montrer que l'énergie est quantifiée. Malgré plusieurs expériences, il n'arrive pas à trouver une formule théorique pour prouver sa conviction.

Il trouva tout de même un lien entre l'énergie et la longueur d'onde à différentes températures. Il dû pour cela faire l'hypothèse que l'énergie était quantifiée en petits grains : les **quanta**.



M. PLANCK

1905



A. EINSTEIN

De son côté, **Albert Einstein** travaille sur l'effet photoélectrique. Il s'agit de l'émission d'un électron (découvert en 1897) par un atome lorsqu'il est irradié par de la lumière. En s'appuyant sur **le principe de la conservation de l'énergie**, il introduit le concept suivant : la lumière est quantifiée en grains d'énergie (les quanta) et l'effet photoélectrique est dû à l'absorption totale d'un quantum d'énergie par l'électron.

Conservation de l'énergie :

$$E_{\text{électron}} = E_{\text{quantum}} - E_{\text{liaison}}$$

E_{liaison} représente ici l'énergie de liaison de l'électron à son atome.

1909

Ce n'est qu'en 1909 que l'idée "lumineuse" du **photon** vient éclairer l'esprit d'Einstein. Du grec "*photos*" qui signifie "lumière", Einstein entend par là que le photon est une "particule de lumière". C'est une particule fondamentale, de masse et de charge nulle, qui possède une énergie bien définie.

En se basant sur ses travaux et ceux de Max Planck, Einstein parvient à obtenir la formule définissant l'énergie d'un photon :

$$E_{\text{photon}} = h \cdot \nu$$

$h = 6,62608 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$: constante de Planck

ν (ν) : fréquence du photon en Hertz (Hz ou s^{-1})

Le photon est une particule animée de vitesse et de direction malgré sa masse nulle.

Il possède une quantité de mouvement \vec{p} :

$$\vec{p} = \frac{h \cdot \vec{\nu}}{c}$$

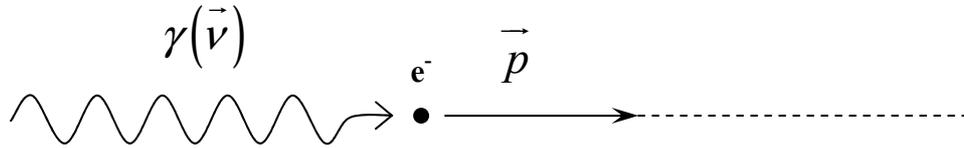
$$p = \frac{h \cdot \nu}{c} = \frac{E}{c}$$

$c = 2,99792 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$: célérité de la lumière

On peut montrer que le rapport $\frac{h\nu}{c}$ a bien la dimension d'une quantité de mouvement :

$$\begin{aligned} \left[\frac{h \cdot \nu}{c} \right] &= \frac{[E] \cdot T \cdot T^{-1}}{L \cdot T^{-1}} = [E] \cdot L^{-1} \cdot T = [m \cdot v^2] \cdot L^{-1} \cdot T \\ &= M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \cdot L^{-1} \cdot T = M \cdot L \cdot T^{-1} \\ &= [m \cdot v] = [p] \end{aligned}$$

Lors de l'effet photoélectrique (grâce auquel Einstein a imaginé le photon), on peut écrire les équations de la **conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement** du système isolé {photon+électron} :



Conservation de l'énergie :

$$E_{av} = E_{ap} \Leftrightarrow h\nu + m_e c^2 = \sqrt{\vec{p}_e^2 c^2 + m_e^2 c^4}$$

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\vec{p}_{av} = \vec{p}_{ap} \Leftrightarrow \frac{h\vec{\nu}}{c} = \vec{p}_e$$

m_e : masse de l'électron

p_e : quantité de mouvement de l'électron après l'absorption

Ces équations de conservation étant vérifiées expérimentalement, l'hypothèse du photon était donc bien fondée.

Nom : **PHOTON** (*grec photo : lumière*)

Symbole	γ (ou X, ou G, ou $h\nu$)
Masse au repos (eV/c ²)	0
Charge (C)	0
Durée de vie	Jusqu'à absorption
Spin	1
Classification	Boson
Découvert par	Albert Einstein (1909)

III découverte du neutron

1921

Un groupe de chercheurs, dirigé par Ernest **Rutherford**, émet l'hypothèse du neutron et rejette l'idée que l'atome est chargé positivement $+Z$ où le nombre Z est le nombre de protons d'un noyau.

On pense alors que l'atome est neutre. Pour pallier à la fois le défaut de masse (non respect de la **conservation de la masse**) de l'atome et la non conservation apparente du **principe de conservation de la charge**, l'existence d'une nouvelle particule neutre et de masse Z est soupçonnée.



E. RUTHERFORD



$$\begin{aligned} m_{atome} &= Z \cdot m_{p^+} + Z \cdot m_{e^-} + Z \cdot m_{?^0} \\ &\approx 2 \cdot Z u_H \end{aligned} \quad \text{(conservation de la masse)}$$

$$\begin{aligned} q_{atome} &= Z \cdot q_{p^+} + Z \cdot q_{e^-} + Z \cdot q_{?^0} \\ &= Z - Z + 0 \\ &= 0 e \end{aligned} \quad \text{(conservation de la charge)}$$

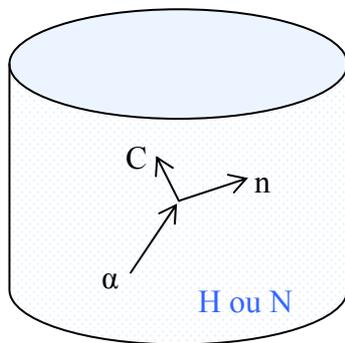
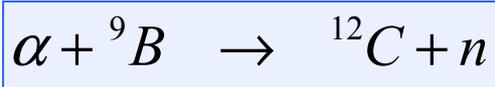
u_H : unité de masse du noyau d'hydrogène (à l'époque)
 e : charge élémentaire, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

1932

James Chadwick, collaborateur de Rutherford, découvre le **neutron** (nom donné en raison de sa neutralité) donnant enfin un nom à toutes ces interrogations. Le neutron est observé pour la première fois dans la réaction suivante :



J. CHADWICK



L'expérience :

En bombardant de atomes de Bore avec des particules α dans un récipient contenant d'abord de l'hydrogène puis de l'azote, il compare les quantités de mouvement des noyaux d'hydrogène et de l'azote. Grâce à la conservation de celle-ci, il déduit l'existence du neutron et ainsi sa masse.

Le neutron répond bien aux attentes de **la loi de conservation de la quantité de mouvement** principalement mais aussi à toutes les autres lois de conservation qui seront découvertes plus tard.

$$\vec{p}(\alpha) + \vec{p}({}^9B) = \vec{p}({}^{12}C) + \vec{p}(n)$$

Nom : **NEUTRON** (*neutre*)

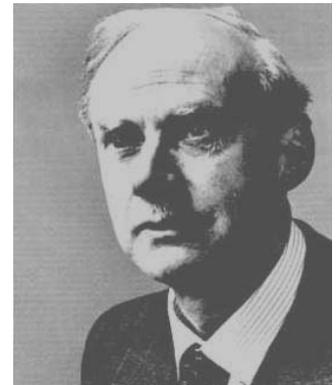
Symbole	n
Composition en quarks	1 up + 2 down (udd)
Masse au repos (MeV/c ²)	939,573
Masse au repos (kg)	1,674 94 × 10⁻²⁷
Charge (C)	0
Durée de vie (s)	886
Spin	1/2
Classification	Hadron/Baryon/Nucléon
Découvert par	James Chadwick (1932)

IV le positron, un électron rebelle

1928

Le physicien **Paul Dirac** prédit l'existence de l'antimatière, plus précisément celle de l'anti-électron, en ce basant sur les travaux de Pauli sur les spins des électrons.

PAUL DIRAC



1932



C. ANDERSON

En étudiant le rayonnement cosmique, **Carl David Anderson** découvre des particules ayant un comportement bizarre, semblables aux électrons mais de charge opposée apparemment. En analysant les quantités de mouvement et les énergies (et leur conservation) de ces particules, il en déduit leur masse. Anderson vient de découvrir un électron positif : le **positron** (ou positon), noté e^+ .

1933

Les physiciens arrivent à créer des positrons grâce à des faisceaux de photons de très haute énergie. En s'apercevant qu'un positron est toujours accompagné d'un électron, on prouve que le positron est bien l'antiparticule de l'électron.

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

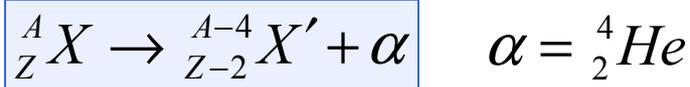
Les lois de conservation de la masse et du moment cinétique (spin) appliquée aux particules élémentaire résultent de la découverte de l'antimatière.

$$\sum m_{\text{matière}} - \sum m_{\text{antimatière}} = \text{constante}$$

$$\sum (\text{spin}) = \text{constante}$$

V le neutrino : une évidence

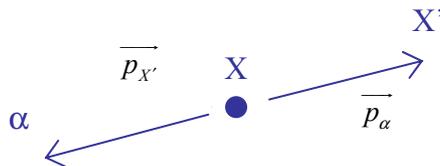
• Désintégration α



Depuis le début du siècle, on sait que lors de la radioactivité α , un noyau X se désintègre et un nouveau noyau X' et une particule α sont émis.

On observe expérimentalement que ces deux derniers sont émis dans des directions opposées, avec deux quantités de mouvement opposées.

Ainsi, la désintégration α respecte les règles de **conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement**, en plus de respecter la loi de conservation de Soddy :



Conservation de la quantité de mouvement :

$$\boxed{\vec{0} = \vec{p}_\alpha + \vec{p}_{X'} \Leftrightarrow \vec{p}_\alpha = -\vec{p}_{X'} \Leftrightarrow p_\alpha = p_{X'} = p}$$

Conservation de l'énergie :

$$E(X) = E(X') + E(\alpha)$$

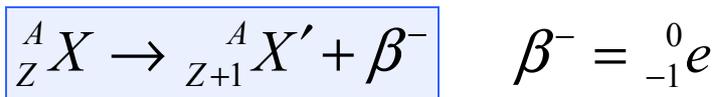
$$\boxed{Mc^2 = \sqrt{M'^2 c^4 + p^2 c^2} + \sqrt{m_\alpha^2 c^4 + p^2 c^2}}$$

M : masse du noyau initial X

M' : masse du noyau fils X'

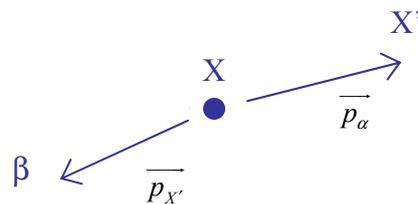
m $_\alpha$: masse de la particule α obtenue

• Désintégration β^-



En ce qui concerne la radioactivité β^- , on pourrait prévoir la même théorie pour l'émission d'un nouveau noyau et d'un électron.

Malheureusement, l'expérience montra que ceux-ci n'étaient pas émis de manière opposée, mais qu'il y avait une légère déviation. Cela va à l'encontre de la conservation de la quantité de mouvement.



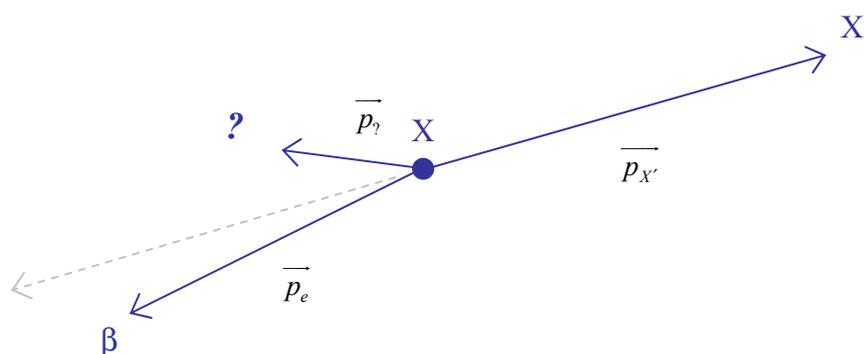
1931

De plus, le spectre d'émission de l'ensemble des électrons émis est continu et non discret. C'est pour ces deux raisons qu'en 1931 **Wolfgang Pauli** émet l'hypothèse de l'existence d'une troisième particule émise en même temps que le nouveau noyau et l'électron.



W. PAULI

Ainsi, l'énergie du noyau initial peut se répartir entre les 3 particules de manière continue.



Enrico Fermi donnera le nom de **neutrino** à cette particule, qui doit être neutre et doit par ailleurs avoir une masse quasi-nulle sinon nulle pour respecter à la fois les **principes de conservation de la masse, de la charge** (loi de conservation de Soddy), **de l'énergie et de la quantité de mouvement**.

Toutefois, ces lois impliquent aussi le fait que la nouvelle particule est nécessairement une anti-particule.

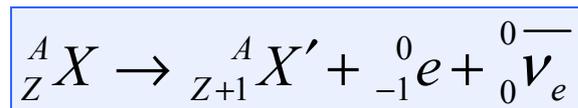
Le neutrino est noté ν (nu).

1955

Ce n'est qu'en 1955 que F. Reines et C. Cowan observent les premiers anti-neutrinos dans un réacteur nucléaire pendant la désintégration β^- de neutrons et de sa réaction « inverse ».



Toutes les lois de conservation sont vérifiées dans la réaction de désintégration β^- :



• Conservation de la charge et du nombre de nucléons (lois de Soddy) :

$$Z = Z' + (-1) + 0 \Leftrightarrow Z' = Z + 1$$

$$A = A' + 0 + 0 \Leftrightarrow Z' = Z$$

• Conservation de la masse :

$$m(X) = m(X') + m(e^-) - m(\bar{\nu}_e)$$

- Conservation du moment cinétique (spin) :

$$m_S (X) = m_S (X') + m_S (e^-) + m_S (\bar{\nu}_e)$$

$$m_S (\nu_e) = m_S (\bar{\nu}_e) = 1/2$$

$$m_S (e^-) = 1/2$$

$$m_S (X) = m_S (X') + 1$$

- Conservation de l'énergie :

$$E(X) = E(X') + E(e^-) + E(\bar{\nu}_e)$$

- Conservation de la quantité de mouvement :

$$\vec{0} = \vec{p}(X') + \vec{p}(e^-) + \vec{p}(\bar{\nu}_e)$$

Le vrai neutrino est mis en valeur quelques années plus tard par le biais de la désintégration β^+ .

Les neutrinos sont associés aux électrons, d'où l'indice « e ». En découvrant de nouvelles particules, les chercheurs ont découvert de nouveaux neutrinos. Celui de la désintégration β s'appelle alors **neutrino électronique**.

Les physiciens se sont aperçus que les électrons et anti-neutrinos étaient toujours en couple et de même pour les positrons et les neutrinos.

- Il a été déduit de la présence de couple une nouvelle loi de conservation : **la conservation du nombre leptonique électronique :**

$$N(e^-) + N(\nu_e) - N(e^+) - N(\bar{\nu}_e) = \text{constante}$$

Nom : **NEUTRINO** (préfixe "neutre" et suffixe "ino", petit)

Symbole	ν_e ou $\bar{\nu}$
Masse au repos (eV/c ²)	< 1
Charge (C)	0
Durée de vie	stable
Spin	1/2
Classification	Fermion / Lepton
Découvert par	Reines / Cowan (1955)

VI les leptons

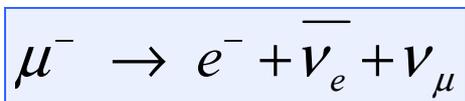
1937

Carl Anderson découvre une nouvelle particule dans les rayons cosmiques. Il s'agit d'une sorte d'électron lourd, une particule se comportant comme l'électron mais ayant une masse plus importante. Cette nouvelle particule est appelée **muon** (μ).

Les muons se désintègrent en un électron et un anti-neutrino électronique suivant ainsi la **conservation du nombre leptonique électronique** mais pas celle du **moment cinétique**. Cela suggère l'existence d'une nouvelle particule.

1960

En 1960, un groupe de chercheurs met en évidence la désintégration du muon dans un accélérateur de particules.



Une nouvelle particule, qui est au muon ce que le neutrino électronique est à l'électron, est découverte. On la baptisa donc **neutrino muonique**. Cette désintégration respecte toutes les **lois de conservation** et en fait apparaître une nouvelle de manière analogue à la conservation du nombre leptonique électronique : la **conservation du nombre leptonique muonique**.

$$N(\mu^-) + N(\nu_\mu) - N(\mu^+) - N(\bar{\nu}_\mu) = \text{constante}$$

1976

De la même manière, un autre « électron lourd » fut découvert, le **tau** (μ), laissant présager l'existence d'un neutrino associé et d'une nouvelle **loi de conservation**. L'ensemble des trois particules (e , μ , τ) et de leurs neutrinos associés est appelé la famille des **leptons** (du grec *leptos*, léger).

VII accélérateurs de particules

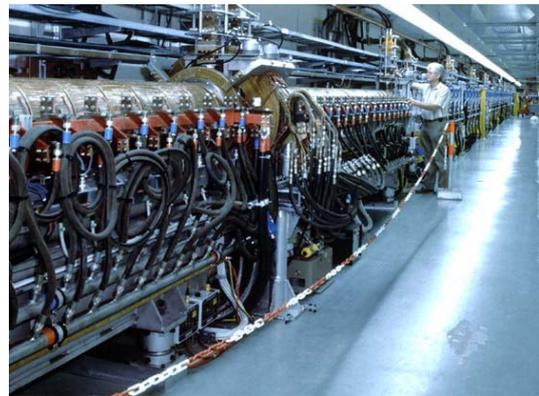
Les accélérateurs de particules sont des instruments destinés à la recherche fondamentale en sciences physiques. Ils servent à accélérer des faisceaux de particules chargées, pour les faire entrer en collision et étudier les particules élémentaires générées au cours de cette collision.

On distingue 2 types d'accélérateurs de particules :

* Les accélérateurs linéaires :

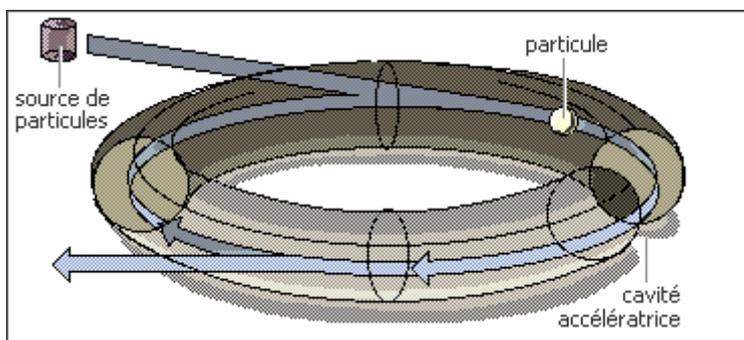
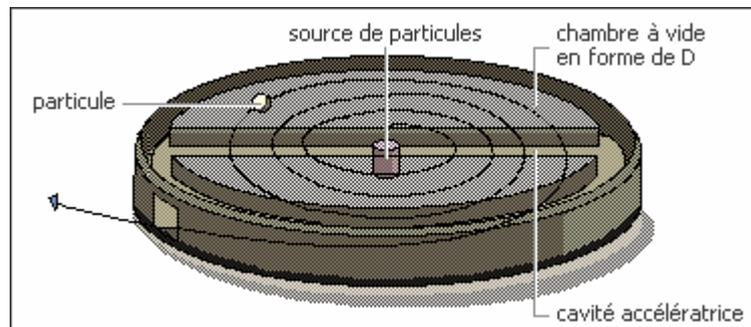
Un champ électrique fournit une énergie qui accélère les particules.

L'injecteur LINAC du LEP, grand collisionneur à électron-positron du CERN, est un accélérateur linéaire permettant de fournir aux particules (électrons et positrons) une énergie de 600 MeV.



* Les accélérateurs circulaires :

• les cyclotrons où les trajectoires des particules sont des spirales, sont constitués d'un seul aimant de courbure dont le diamètre peut atteindre plusieurs mètres.

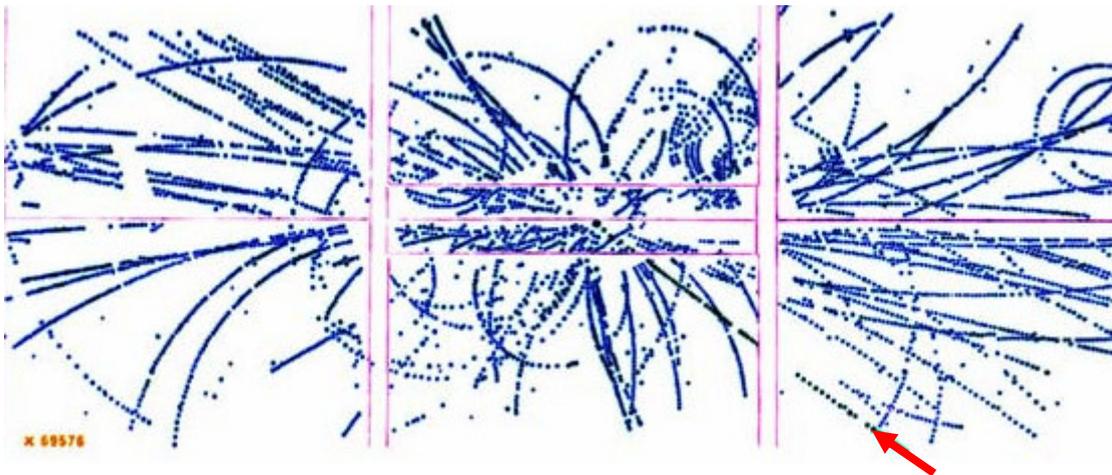


• les synchrotrons : Dans ce type d'accélérateur, les particules circulent sur la même trajectoire presque circulaire à l'intérieur d'une série d'aimants de courbure.

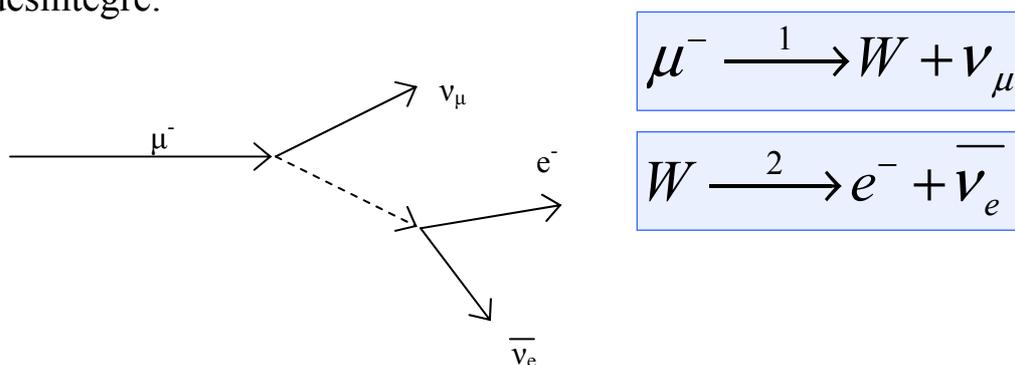
VIII de nouvelles particules...

Deux grandeurs physiques ont permis de découvrir des centaines de particules : il s'agit bien entendu de l'**énergie** et de la **quantité de mouvement**. Les lois de conservation de celles-ci durant une réaction ont été très importantes dans la recherche en physique des particules.

Le principe est simple : on collisionne 2 particules chargées à très haute énergie et l'étude de « l'explosion » de particules qui en résulte (E et p) permet l'hypothèse de l'émission de certaines particules.



Exemple : la découverte du boson W sur l'exploitation d'une collision proton-antiproton. La flèche représente la trace d'un muon s'étant désintégré.



Quelques réactions issues des déductions des lois de conservation après une collision :

$$Z \rightarrow e^+e^- \quad Z \rightarrow u\bar{u} \quad \rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^- \quad \Sigma^0 \rightarrow \Lambda\gamma \quad \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu$$

$$p + p \rightarrow p + n + \pi^+$$

$$p + p + \gamma \rightarrow \bar{p} + p + p + p$$

$$\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$$

Les trois dernières ont fait ressortir une nouvelle **loi de conservation : celle du nombre baryonique**.

$$1/3 \cdot N(q) - N(\bar{q}) = \text{constante}$$

IX conclusion

• Résultats :

- On a donc vu qu'un grand nombre de particules élémentaires avaient été découvertes par les lois de conservation.
- Il s'agit principalement des lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement qui jusqu'à aujourd'hui n'ont jamais trouvé de contre-exemple et ont à la place découvert de nouveaux phénomènes physiques.

• Perspectives :

- Il est clair que dans les années à venir, de nombreuses particules vont encore être découvertes. Il s'agit en majorité de mésons et de baryons (nouvelles combinaisons de quarks) mais aussi de bosons qui expliqueraient l'interaction gravitationnelle et la masse. Le nouveau LHC (Large Hadrons Collider) du CERN à Genève sera sur le devant de la scène pour ces découvertes.
- Il est aussi probable que les lois de conservation existantes donnent naissance à de nouvelles particules et même que de nouvelles lois en découlent.