
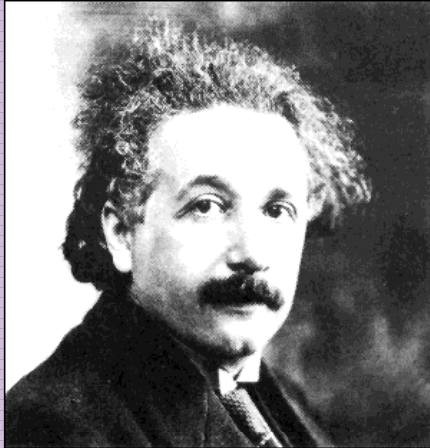


L'ère des nucléons



1928 - 1947

1928 - Bilan



Deux nouvelles théories changent la conception des particules :

- La relativité restreinte (et générale 1916)
- La mécanique quantique

Chapitre 2
Chapitre 3

Les premières particules élémentaires :

- Électron (1896) Thomson
- Photon (γ , X) Compton
- Proton (1919) Rutherford
- Et toujours les noyaux à la Mendelév...

Début du § 1.1.1

Problème de l'isotopie, composition des noyaux

Parenthèse : unités particulières

Unité d'énergie : $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$

On pose $\hbar = k_B = \hbar/2\pi = 1$ et on exprime tout en électron-volt !

Unité de masse : $E = mc^2 \rightarrow m = E/c^2$

■ $1 \text{ eV}/c^2 = 1,782 \times 10^{-36} \text{ kg}$

■ $1 \text{ proton} = 938 \text{ MeV}/c^2$

■ $1 \text{ électron} = 511 \text{ keV}/c^2$

Annexe C

Distance :

■ $(1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m})$

■ $1 \text{ fm}^{-1} = 197 \text{ MeV}$

Température :

■ $E = k_B T$

■ $1 \text{ K} = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV}$

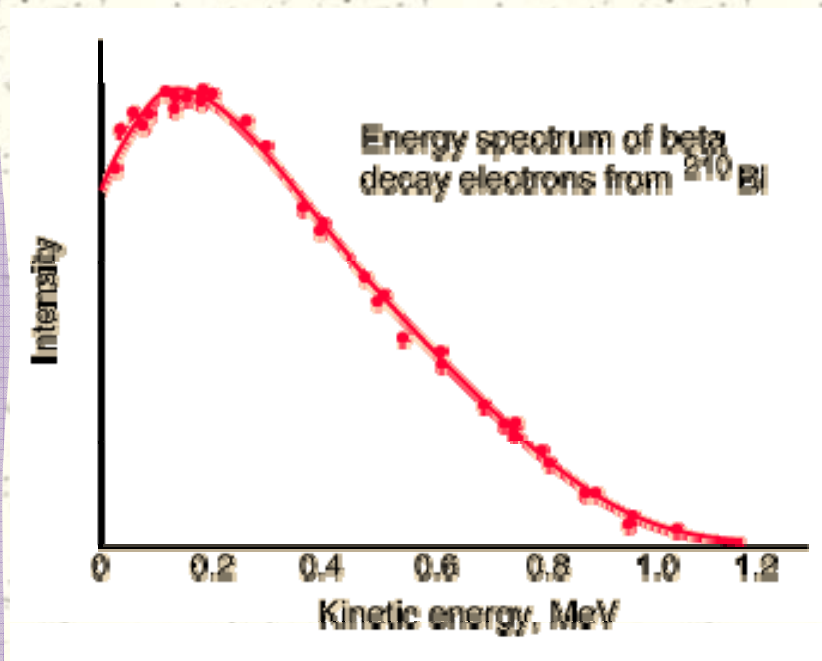
Les années 30...

1. Hypothèse du **neutrino** (1930)
 - # **Pauli** postule l'existence d'une nouvelle particule pour régler quelques problèmes...
2. Découverte du **neutron** (1932)
 - # **Chadwick** identifie une nouvelle radiation = une particule neutre de masse \sim proton...
3. Découverte de l'**antimatière** (1932)
 - # **Anderson** observe des **positrons**



1. Problème de la désintégration β

- # 1896 : **Becquerel** découvre la radioactivité
- # 1899 : **Rutherford** distingue α et β
 - Désintégration β : $N \rightarrow N' + e^-$
- # 1914 : **Chadwick** mesure le spectre de l'électron



- # **Continu** alors qu'il devrait être discret.
 - Calcul cinématique
 - Spectres α et γ le sont
- # **Chadwick à Rutherford** :
« *There is probably a silly mistake somewhere* »

Annexe B, Q1-7

La solution : le neutrino

En 1930, Niels Bohr est prêt à ce que l'énergie ne soit conservée qu'en moyenne

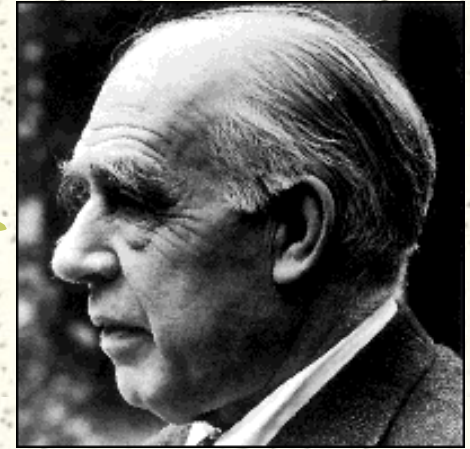
Wolfgang Pauli a une solution plus raisonnable :

$N \rightarrow N' + e^- + \text{nouvelle particule}$

- Le neutrino, de spin 1/2
- De masse nulle (ou très petite)
- Sensible qu'à l'interaction faible.

C'est la bonne solution ! (1934)

Observation directe (1956)



Plusieurs hypothèses...

Plusieurs électrons ?

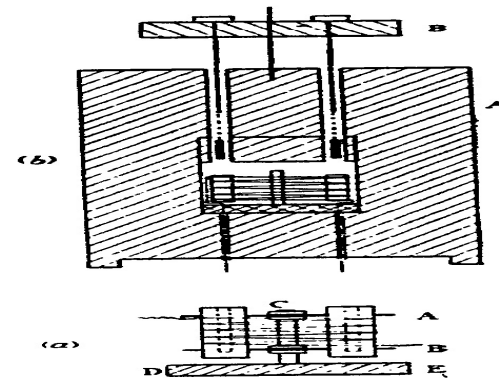
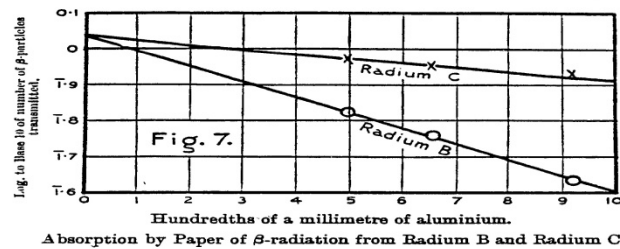
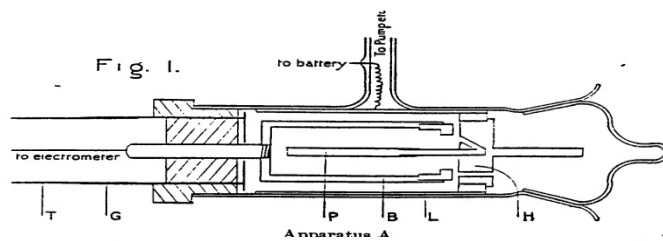
1912-13 Moseley

1924 Emeleus

$1,1 \pm 0,1$ électron/ β

Lise Meitner propose un rayonnement secondaire ?

1927 Ellis : expérience de calorimétrie montre qu'il manque bien de l'énergie !

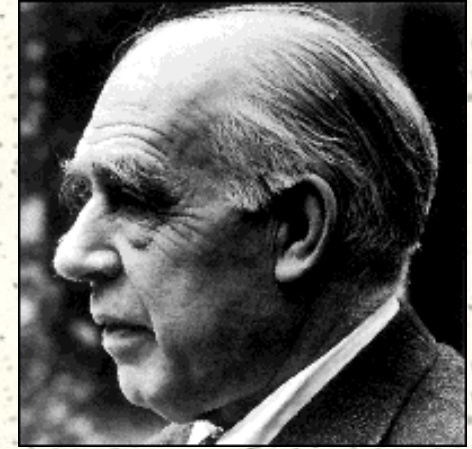


→ NON !

→ NON !

Deux hypothèses audacieuses...

Niels Bohr propose que l'énergie n'est conservée que statistiquement dans le monde microscopique.
(Faraday Lecture, 8 Mai 1930, Londres)



Wolfgang Pauli ne voit pas pourquoi l'énergie serait moins conservée que la charge électrique. Il a une autre idée...

Deux hommes et une toupie...



Pauli

Bohr

Lettre de Pauli du 4 décembre 1930

Chers dames et messieurs radioactifs,

*Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le message de cette lettre. Il vous dira que pour pallier la « mauvaise » statistique des noyaux N et Li 6 et le spectre β continu, j'ai découvert un remède désespéré pour sauver les lois de conservations de l'énergie et les statistiques. Il s'agit de la possibilité d'existence dans les noyaux de particules neutres, de spin 1/2, obéissant au principe d'exclusion, mais différentes des photons par ce qu'elles ne se meuvent pas à la vitesse de la lumière, et que j'appelle **neutrons**. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeur que celles des électrons et ne doit en aucun cas excéder 0,01 fois la masse du proton. Le spectre β serait alors compréhensible si l'on suppose que, pendant la désintégration β , avec chaque électron est émis un neutron, de manière que la somme des énergies du neutron et de l'électron soit constante...*

J'admets que mon remède puisse paraître invraisemblable car on aurait dû voir ces neutrons bien plus tôt si réellement ils existaient. Mais seul celui qui ose gagner, et la gravité de la situation, due à la nature continue du spectre β , est éclairée par une remarque de mon honoré prédécesseur, monsieur Debye, qui me disait récemment à Bruxelles :

« Oh ! Il vaut mieux ne pas y penser du tout, comme pour les nouveaux impôts. »

Dorénavant, on doit discuter sérieusement toute voie d'issue. Ainsi, cher peuple radioactif, examinez et jugez.

Malheureusement, je ne pourrai pas être moi-même à Tübingen, ma présence étant indispensable ici pour un bal qui aura lieu pendant la nuit du 6 au 7 décembre.

Votre serviteur le plus dévoué,

Wolfgang Pauli.

Problème des noyaux N et Li 6

Noyaux possédant :

- Un nombre impair de charges élémentaires...
- Mais un spin entier !
- (alors que d'autres ont un spin demi entier)

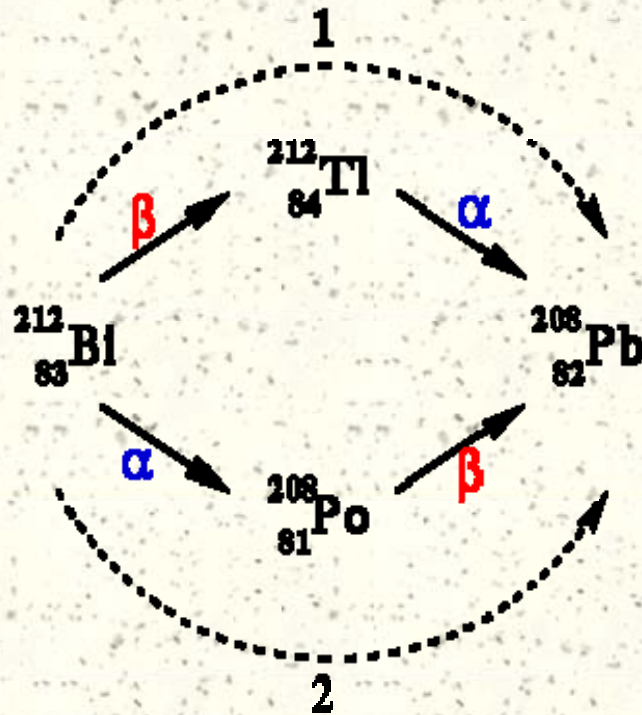
Solution de Pauli :

- Il y a dans ces noyaux, à côté des charges élémentaires, un nombre impair de particules de charge nulle, de spin $1/2$

Deux problèmes = une solution !

Qui a raison ? Bohr ou Pauli ?

1934 : expérience de Henderson



• Si Bohr a raison :
 $E_{1\alpha} + \langle E_{1\beta} \rangle = E_{2\alpha} + \langle E_{2\beta} \rangle$

• Si Pauli a raison :
 $E_{1\alpha} + E_{1\beta}^{\max} = E_{2\alpha} + E_{2\beta}^{\max}$

Résultats :

$$E_{1\alpha} + E_{1\beta}^{\max} = 11,20 \text{ MeV}$$

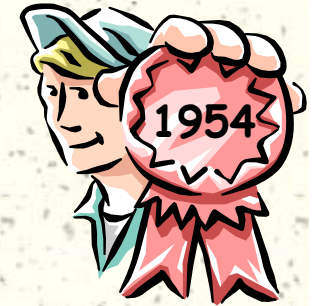
$$E_{2\alpha} + E_{2\beta}^{\max} = 11,19 \text{ MeV}$$

Pauli a raison ! Son « neutron » existe !

2. Une nouvelle radiation...

1928 Walther Bothe

- Source : radioactive α (polonium) sur cible de béryllium
- → Rayonnement de haute énergie

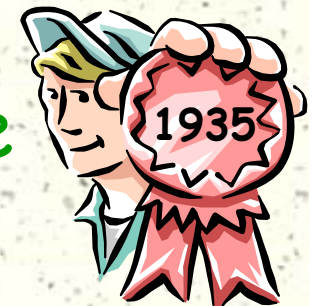


1931 : Irène & Frédéric Joliot-Curie

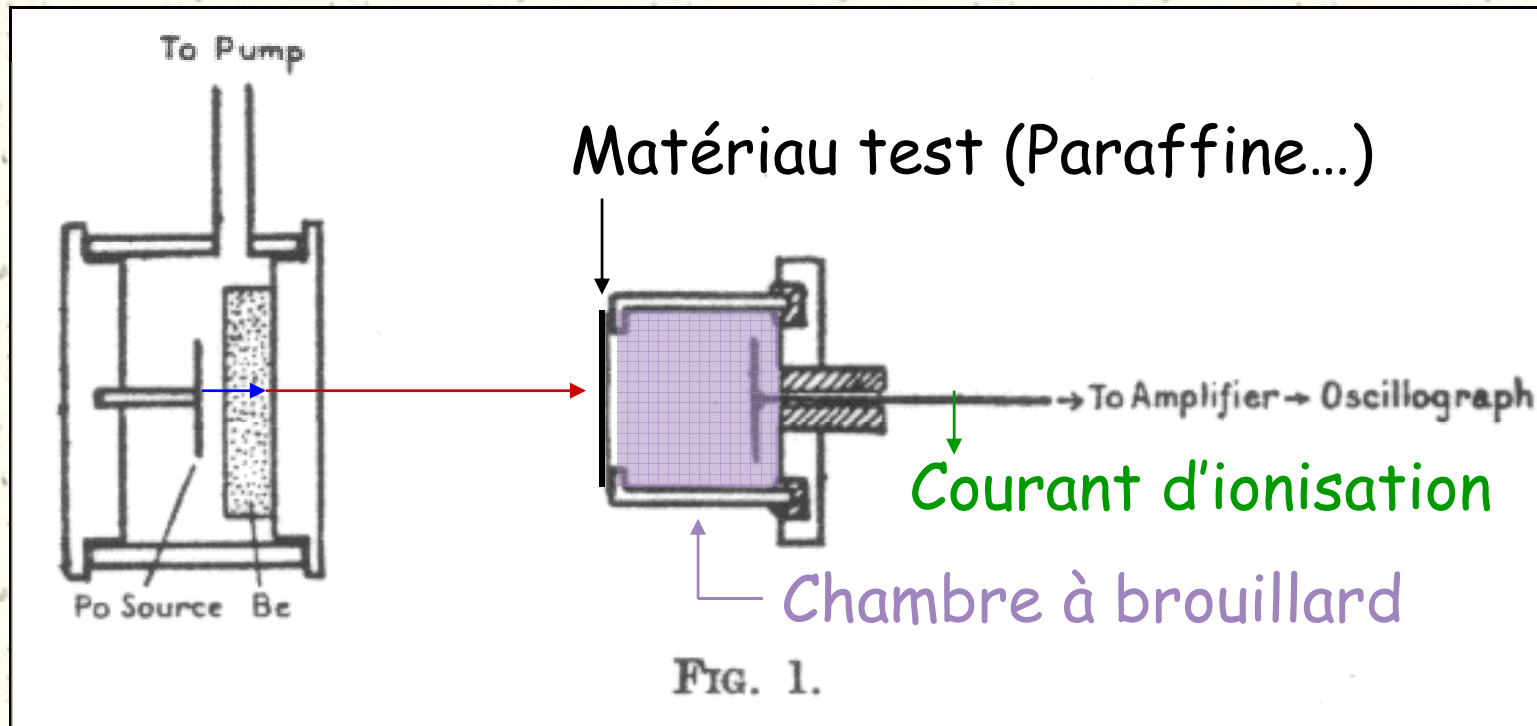
- Arrache des protons de paraffine (H)

Hypothèse } Section efficace trop grande
Compton } Énergie disponible trop faible
(il faudrait des γ de 52 MeV)

- Ils n'osent pas conclure...



Dispositif expérimental (Chadwick)

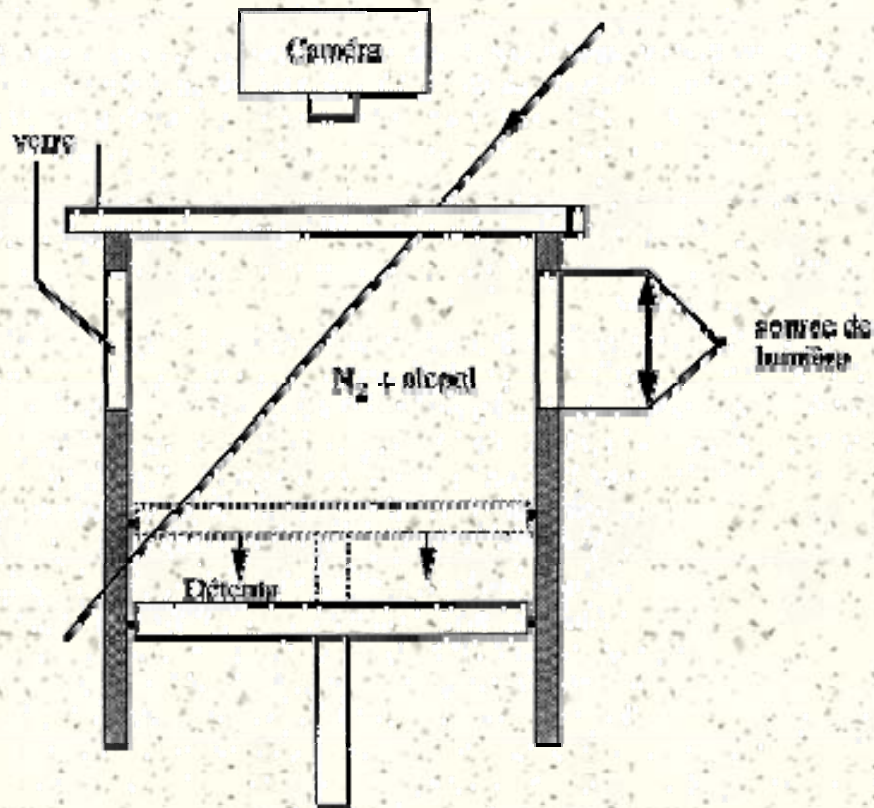
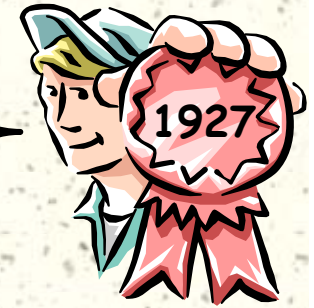


Polonium émetteur α

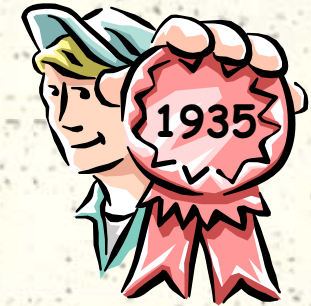
$\alpha + \text{Be} \rightarrow$ **Nouvelle radiation...**

Un nouveau détecteur...

La chambre à brouillard inventée par **Wilson** en **1912**



Découverte du neutron



1932 : James Chadwick

- Détecteur : chambre à brouillard
- La radiation arrache des atomes de toute sorte...
 - (He, Li, Be, C, air, Ar...)
- Reculs, taux incompatibles avec des gammas
- Particule de masse $1,005$ à $1,008 \times m_p$
- Donc pas un état lié $p^+ + e^-$!
- (Chadwick est un élève de Rutherford qui, dès 1920 avait postulé l'existence d'un neutron)

Neutron ou neutrino ?

Le neutron de James Chadwick :

- Règle les problèmes des noyaux impairs
- Est trop lourd pour la désintégration β

Enrico Fermi appelle « neutrino » la particule émise dans la désintégration β

- Attendre 1956 pour l'observation directe

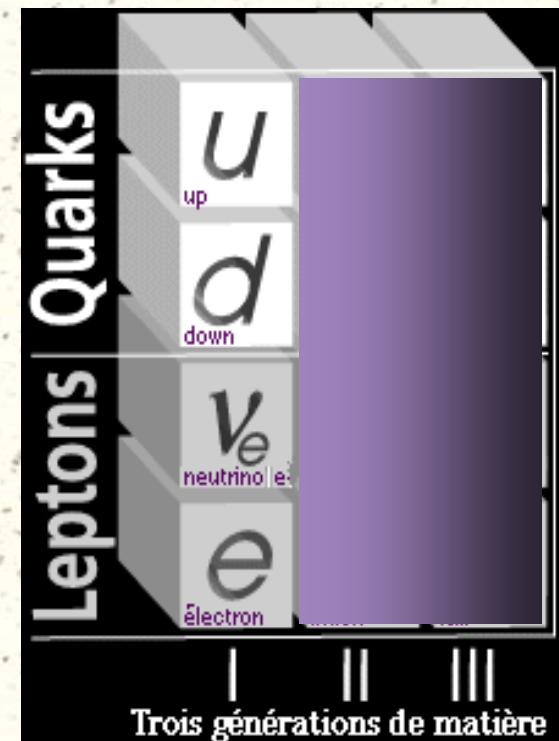
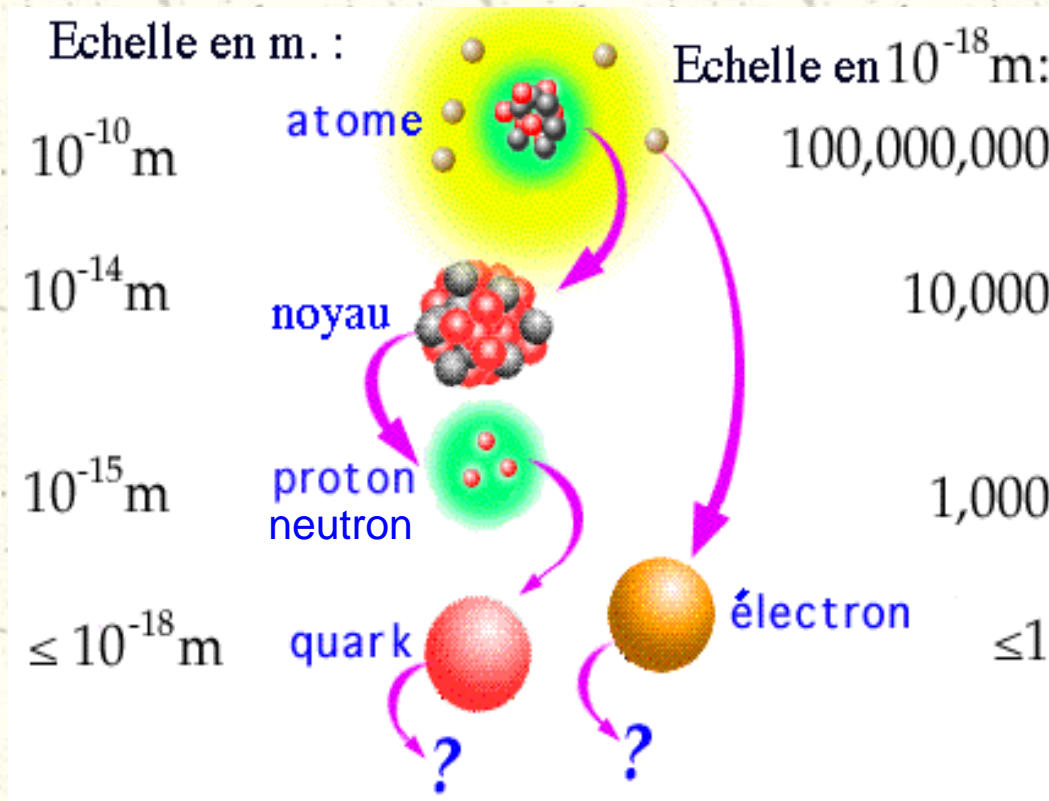
« ... leur masse ne peut pas dépasser de beaucoup celle de l'électron. Pour les distinguer des neutrons lourds, monsieur Fermi a proposé le nom de neutrinos. Il est possible que la masse propre des neutrinos soit égale à zéro... Il me paraît admissible que les neutrinos possèdent un spin 1/2... Nous ne savons rien de l'interaction des neutrinos avec les autres particules matérielles et avec les photons: l'hypothèse qu'ils possèdent un moment magnétique ne me paraît pas du tout fondée. »

Wolfgang Pauli, en octobre 1933, au congrès Solvay de Bruxelles


En avant-première... famille...

§ 1.1.1

- # Proton + neutron + électron + neutrino
- # Proton = quarks uud / Neutron = udd



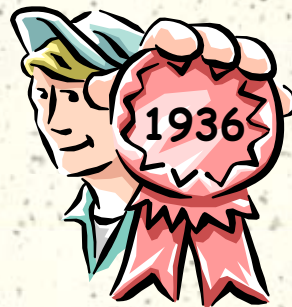
Quoi d'autre ?



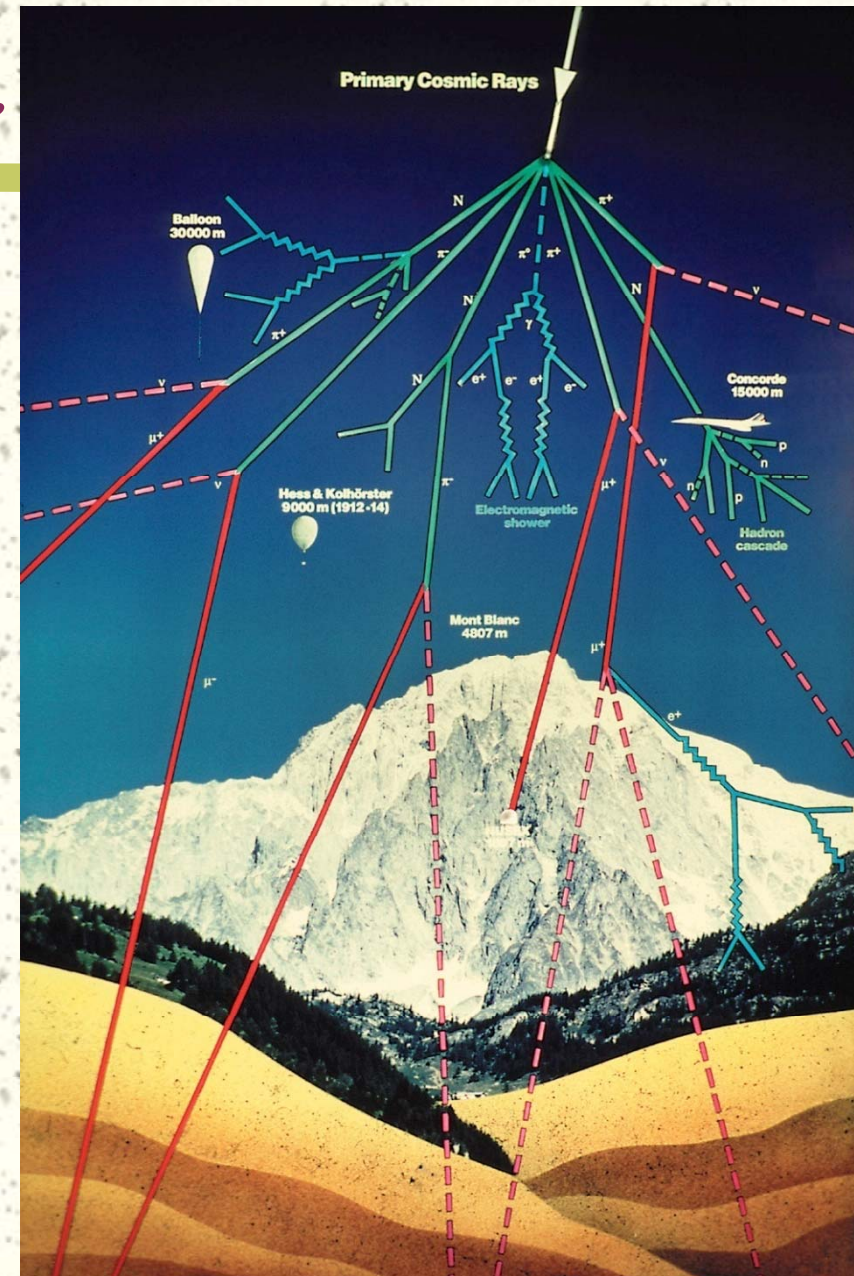
La matière est faite de cette
première famille de particules
proton + neutron + électron
(+ neutrino)

La nouvelle source

Les rayons cosmiques découverts par **Victor Franz Hess** (1912)

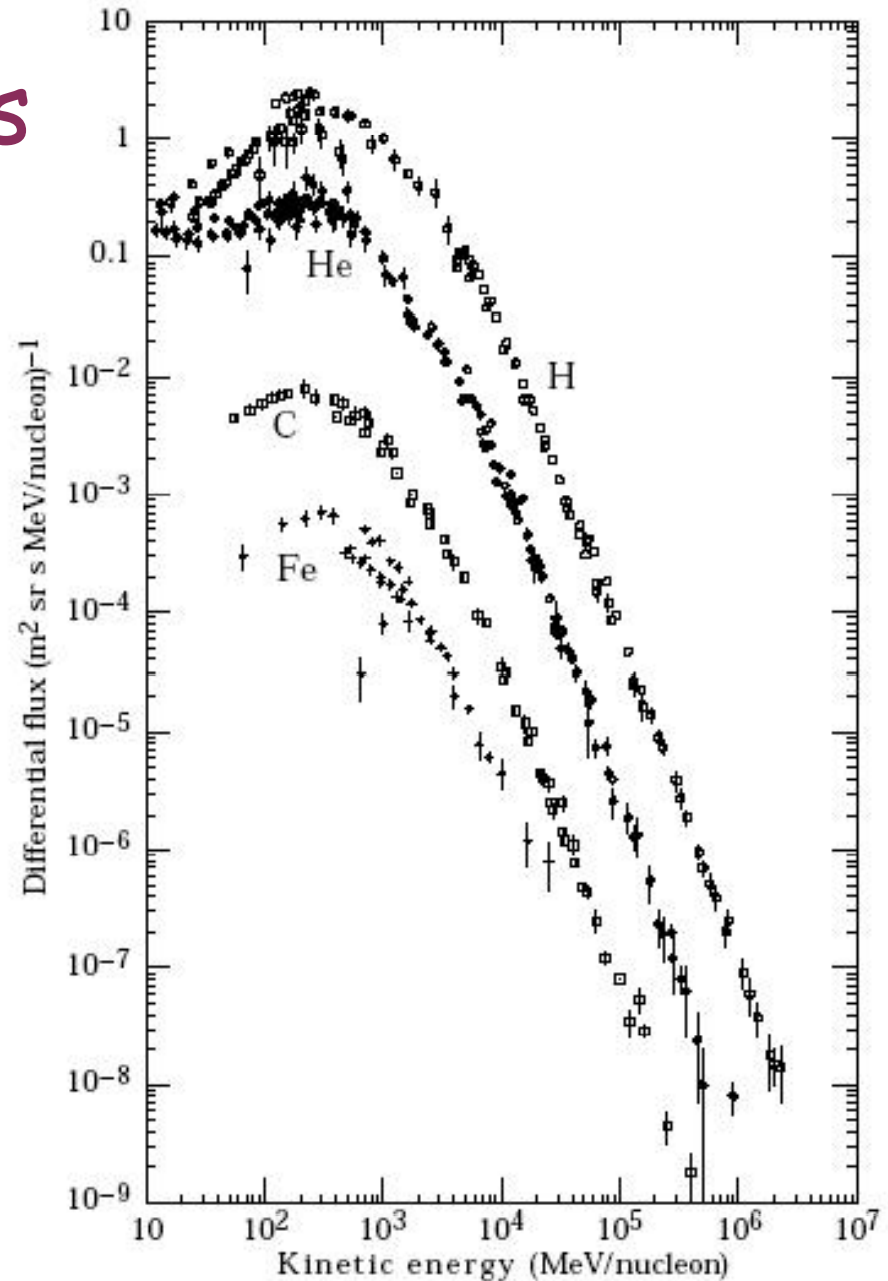


Collisionneur naturel de particules...



Cosmiques primaires

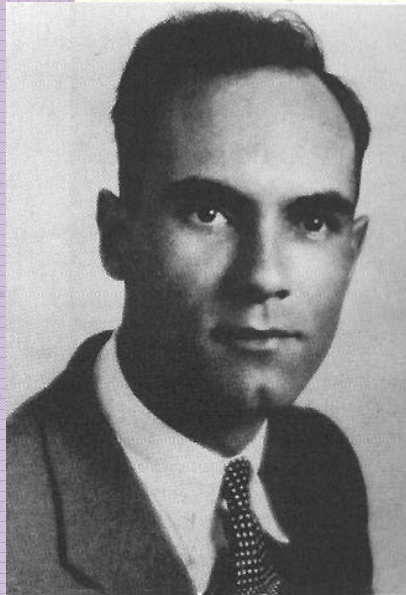
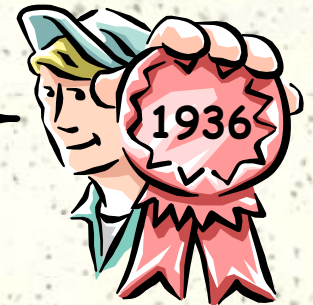
- # Intégrés, des milliers de protons par mètre carré par seconde !
- # Origine galactique & solaire
- # $\rightarrow 10^{20}$ eV !
(1 / km² siècle)



3. Découverte de l'anti-électron !

- # En 1931, Dirac postule l'antimatière
- # En 1932, Carl Anderson la découvre !
- # Source : rayons cosmiques (Hess 1912)
- # Détecteur : une chambre à brouillard

→ § 5.3

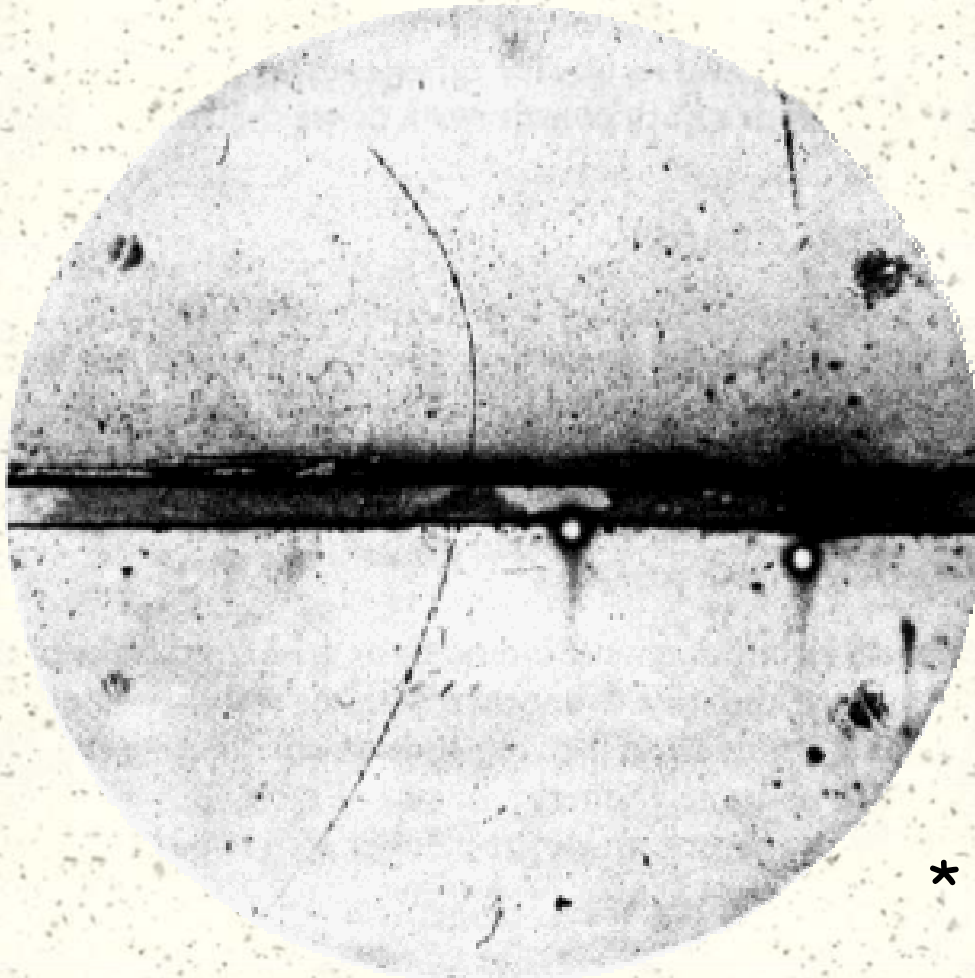


Sur 1300 photographies, quinze comportent des traces positives !

$q < 2 q_e$ et $m < 20 m_e$

« La physique telle que nous la connaissons sera obsolète dans six mois » Max Born

Un anti-électron ou « positron* » !



Champ magnétique
+ perte d'énergie
dans la matière
⇒ charge électrique

* ou encore « positon »

D'après Anderson, Physical Review 43, 491 (1933)

Propriétés de l'antimatière

§ 1.1.2

- # Toute particule q possède son antiparticule \bar{q}
 - Même masse, même durée de vie
 - Même spin
 - Charge électrique opposée
 - Tout autre nombre quantique opposé
- # Parfois $q = \bar{q}$, comme pour le photon
 - (et le pion neutre, le éta, le Z^0 ...)
- # L'antimatière annihile la matière en libérant de l'énergie (et vice-versa)
 - $q + \bar{q} \leftrightarrow \text{photons}$

Histoire de l'antimatière (suite)

1932 : Patrick Blackett voit des paires e^+e^-

- photons $\rightarrow e^+ + e^-$

1934 : Irène & Frédéric Joliot-Curie

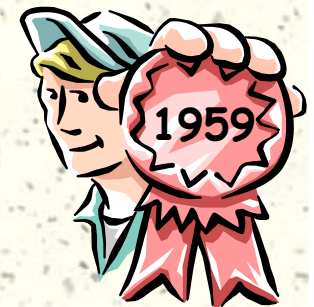
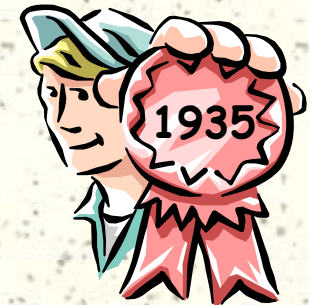
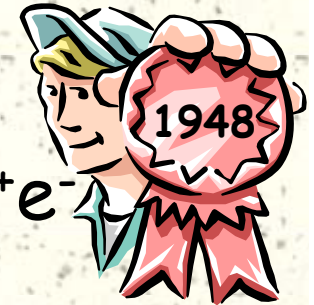
- Désintégration β^+ : $p^+ \rightarrow n + e^+ + \text{neutrino}$
- (possible dans un noyau)
- Nobel de Chimie (synthèse d'éléments)

1955 : production de l'antiproton

- Nouvelle source : les accélérateurs !
- Owen Chamberlain & Emilio Segrè

1956 : Antineutron

1995 : Atomes d'anti-hydrogène @ CERN



Congrès Solvay, Bruxelles 1933...

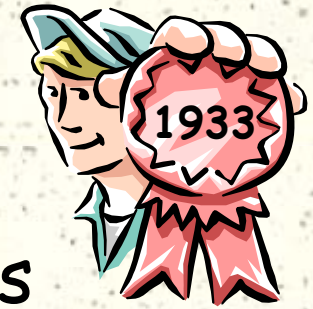
Ces trois découvertes majeures...



H. A. Kramers N. F. Mott G. Gémou P. Bichat M. Coqne A. Moard
E. Scherl P. A. M. Dirac J. Evers C. D. Ellis E. O. Lawrence
C. H. DeVries F. Joliot W. Heisenberg C. Wilson P. Debye D. Cabrera W. Döthe C. Durrer J. Yarnschaffek J. Cockcroft L. Rosenfeld
F. Perrin
E. Schrodinger I. Joliot N. Bohr A. Joffe M. Curie O. Richardson E. Rutherford M. De Broglie L. Meitner J. Chadwick
P. Langevin T. De Donder L. De Broglie
Absent: A. Einstein and E. Goge

... et quelques autres développements...

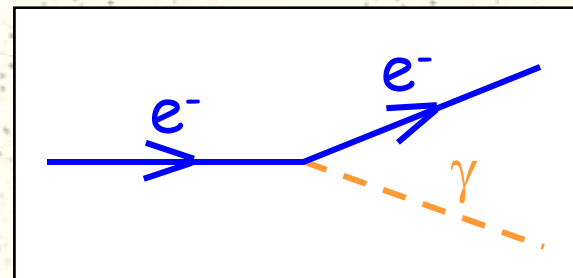
Développement théorique



- # 1927+ Paul Adrien Maurice Dirac pose les bases de l'électrodynamique quantique
- # Interaction électromagnétique véhiculée par un boson de masse nulle et de spin 1 : le photon !

Vertex élémentaire :

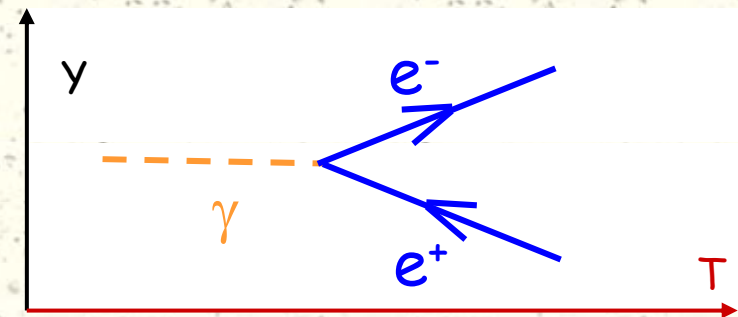
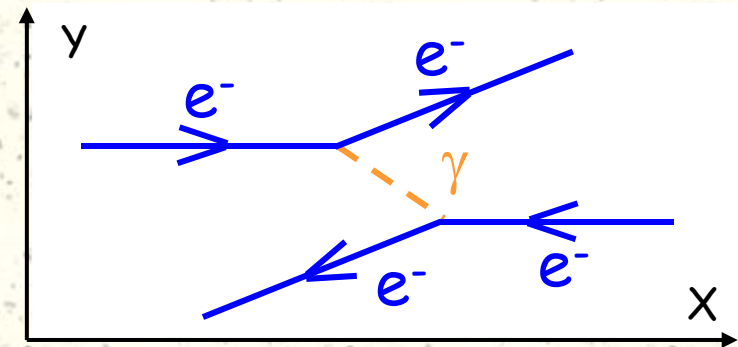
- Branches à orienter dans l'espace-temps.
- Si flèche dans le sens du temps : particule !
- Si flèche dans le sens inverse : antiparticule !
- Le photon étant son antiparticule : pas de flèche



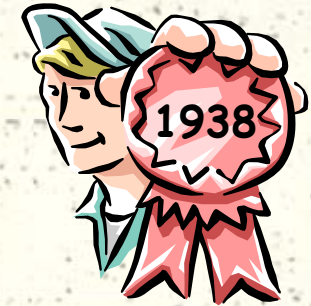
- # (Voir cours ultérieur pour plus de détails)
- # (Voir diapo suivante pour quelques exemples)

Exemples d'électrodynamique...

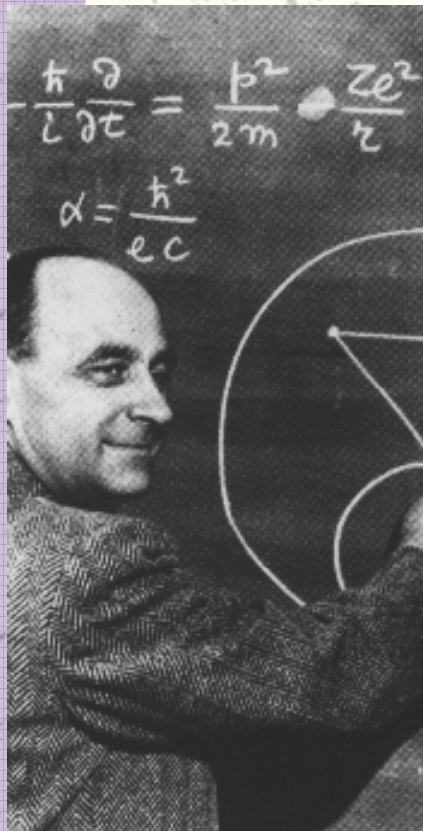
- # Diffusion électron-électron
 - (répulsion électromagnétique)
 - Diagramme d'espace
 - Flèche = mouvement
- # Création de paires $e^+ e^-$
 - Diagramme spatio-temporel
- # Annihilation $e^+ e^-$
 - En orientant T à l'envers
- # Etc.



L'interaction faible



1933 : Enrico Fermi propose immédiatement une théorie...



Une seule constante capable de rendre compte de :

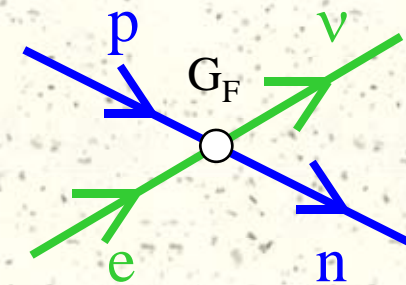
- Désintégration β^- $n \rightarrow p^+ + e^- + \text{anti}(\nu)$
- Désintégration β^+ $p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu$
- Capture électronique $e^- + p^+ \rightarrow n + \nu$

Avec des diagrammes de ce type :

!!! Sens des flèches réversibles

!!! Conservation charge électrique

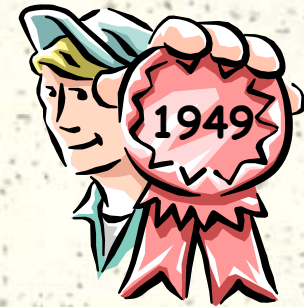
Int. faible peut changer la nature des particules : $p \rightarrow n / e^- \rightarrow \nu$



$$G_F = 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

L'interaction forte

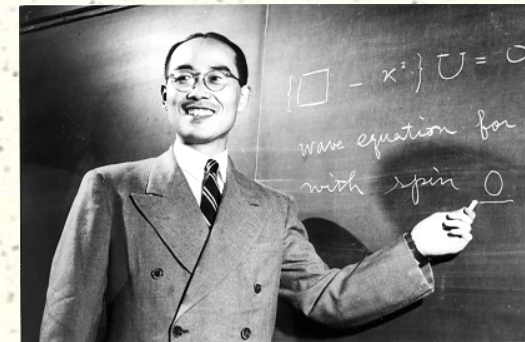
→ § 5.2.4



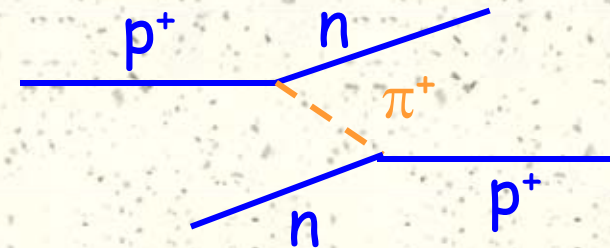
- # 1932 : Chadwick découvre le neutron
- # Noyau = répulsion électrique % interaction forte (Heisenberg, Majorana...)

1935 : Hideki Yukawa

- Modèle de la théorie de Dirac
- → Théorie de l'interaction forte
- Prédit l'existence de médiateurs massifs : les pions
- Portée ~ 1,2 fermi → Masse ~ 164 MeV/c²



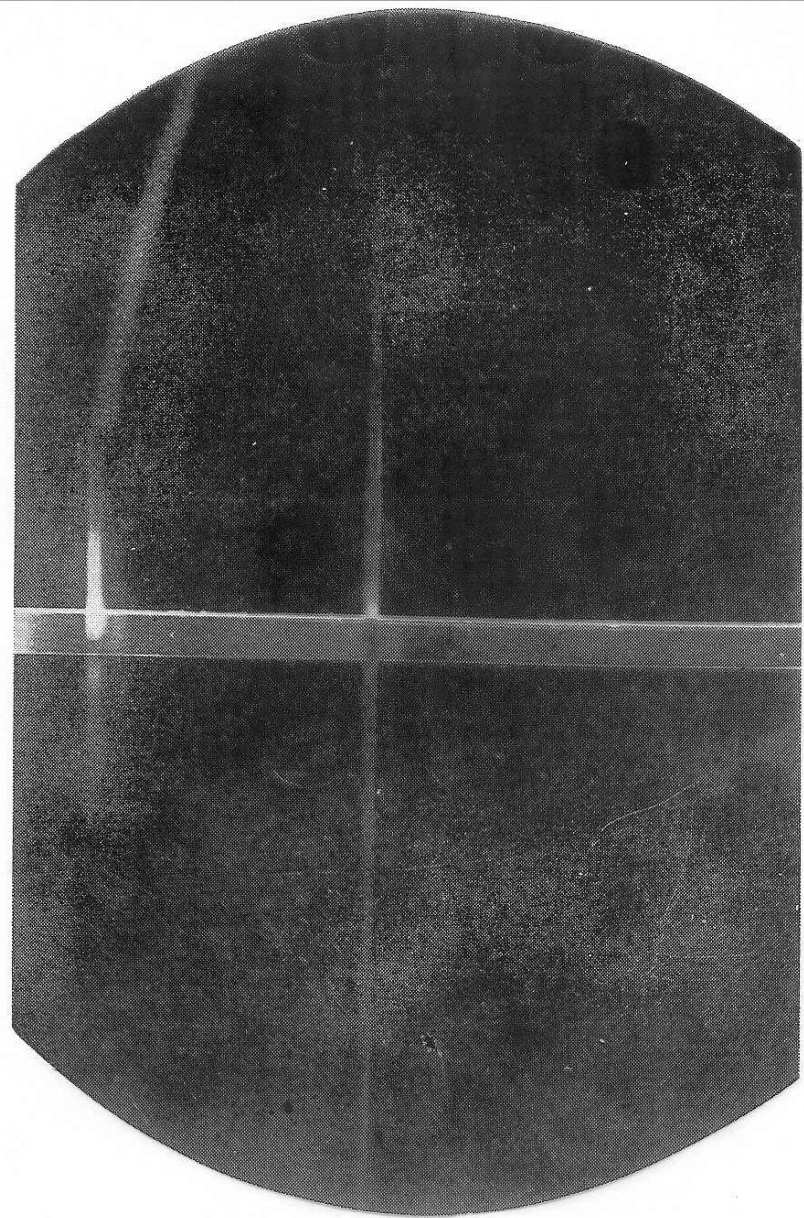
$$V_{\text{Yukawa}} = \frac{-g^2}{r} \exp\left(\frac{-mc}{\hbar} r\right)$$



Les nouveaux cosmiques

- # < 1937 Plusieurs composantes cosmiques de pouvoirs d'absorption différents
- # 1937 : Anderson et Neddermeyer, Street et Stevenson mettent en évidence une particule de masse intermédiaire, le « méson »
Serait-ce le pion de Yukawa ?
 $m_e < m < m_p$
- # 1940 : Rossi et al. observent la désintégration du méson
 - Détecteur : chambre à brouillard
 - Mesure du temps de vie par différence de flux
 $\tau = 2,15 \pm 0,07 \mu\text{s}$

Un méson...



Cloud-chamber picture of a meson. From Street and Stevenson

Désintégration d'un méson...

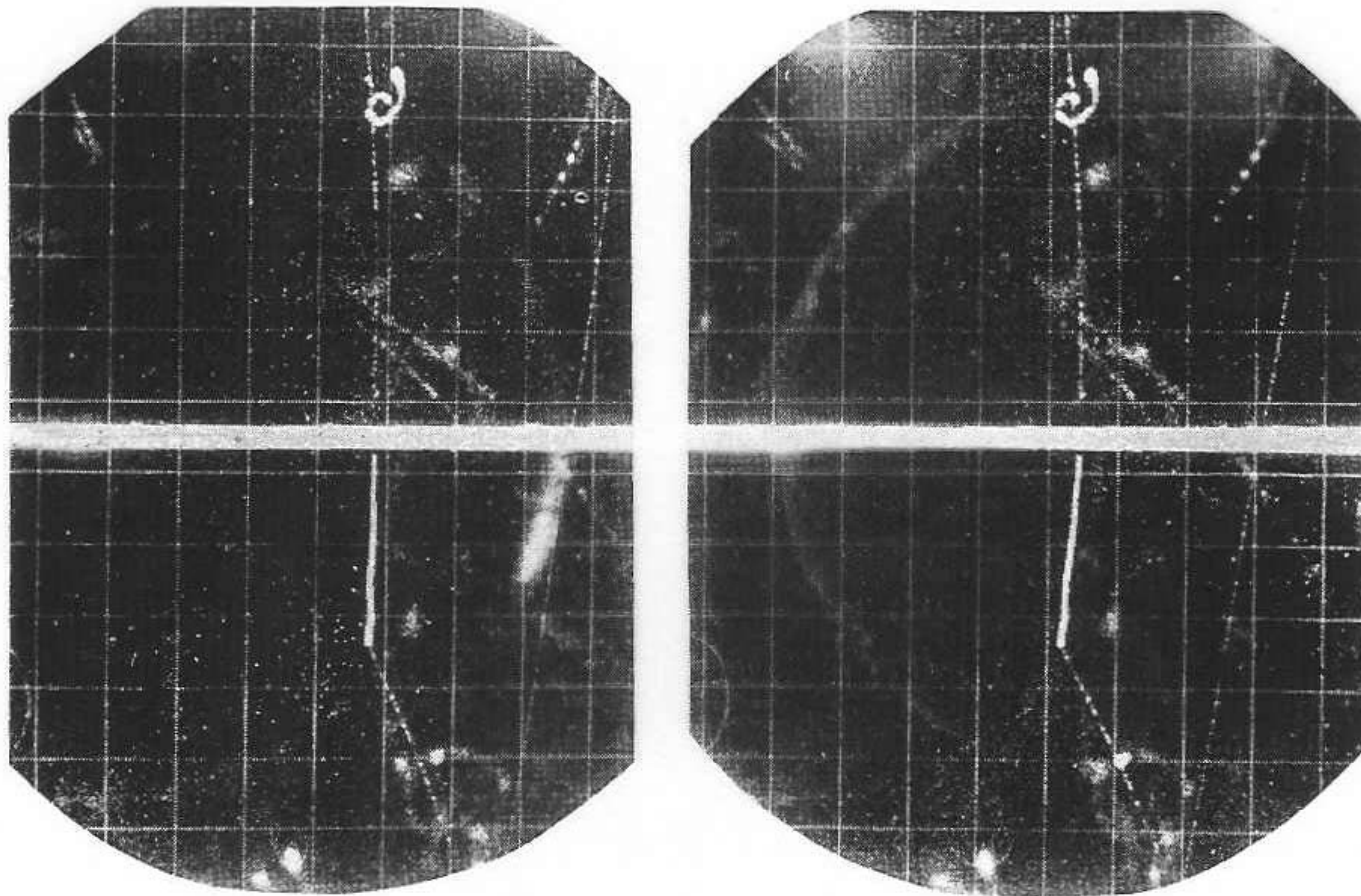


Fig. 4.7.2. Stereoscopic photographs of a meson stopping in the gas of a cloud chamber and disintegrating with the emission of an electron. From R. W. Thompson (un autre Thompson)

Mesure de durée de vie

Temps de vie vu depuis la terre (par ex. $28 \mu\text{s}$) + Estimation de l'énergie ($\gamma \sim 14$)
 \Rightarrow Temps de vie propre $\sim 2 \mu\text{s}$

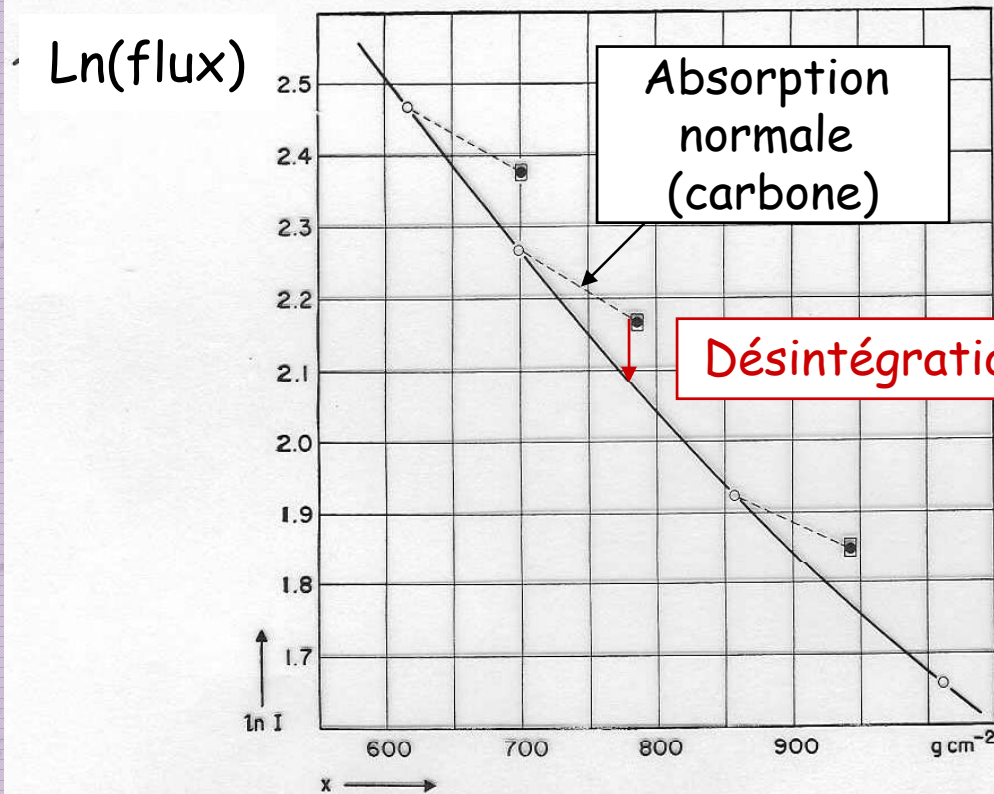


Fig. 4.7.1. Comparison between the absorption of cosmic-ray mesons in air and carbon. The solid line represents the logarithm of the intensity of mesons, $\ln I$ (in arbitrary units), as a function of atmospheric depth, x . The dashed lines represent the result of absorption measurements in carbon. From Rossi *et al.* (RB40.1).

\rightarrow § 2.3.2

Profondeur Atmosphérique (- hauteur)

Preuve de la relativité restreinte !

Mais qui sont ces mésons ?



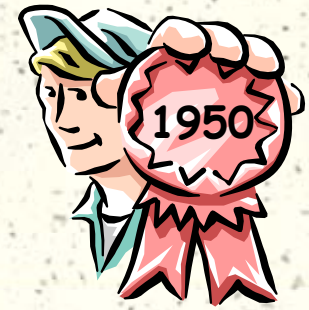
1947 : Cecil Powell et al.

■ Détecteur : émulsions photographiques

→ Il y a deux types de mésons !

■ Le « pion » sensible à
(voire responsable de)
l'interaction forte,

■ Le « muon » insensible à l'I.F.



« Qui a commandé ça ? » s'est exclamé
Rabi lors d'une conférence

« Lepton » = électron, muon (et neutrino)

■ Par opposition aux hadrons



§ 1.1.3

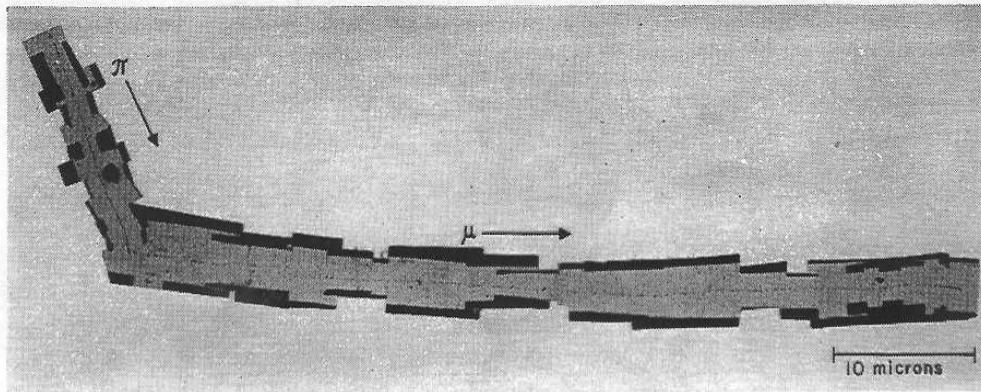


Fig. 4.8.1. Mosaic of microphotographs showing a $\pi \rightarrow \mu$ decay in Ilford C2 emulsion. From Lattes *et al.* (LCM47.1).

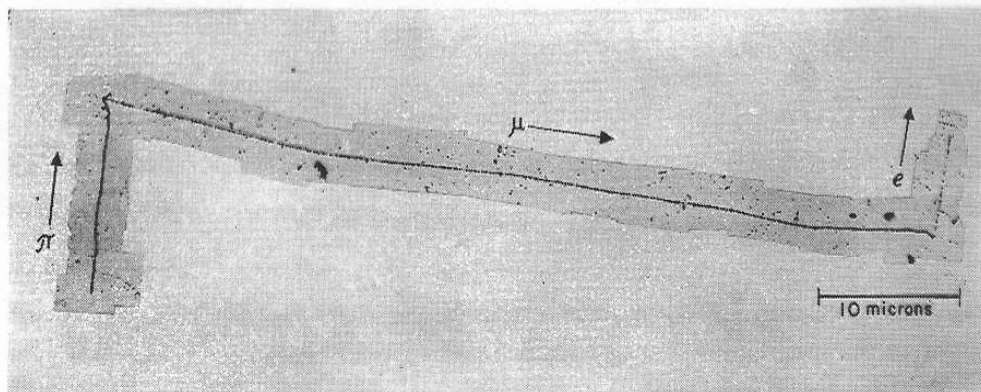


Fig. 4.8.2. Mosaic of microphotographs showing a $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ decay. Kodak NT4 electron-sensitive emulsion. From Brown *et al.* (BRH49.2).

Le pion

- int. forte
- $\pi \rightarrow \mu (+ \nu)$
- $\tau = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$
- $m = 139 \text{ MeV}$

Le muon

- Pas int. forte
- $\mu \rightarrow e (+ 2\nu)$
- $\tau = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
- $m = 106 \text{ MeV}$

Universalité de l'interaction faible

Le nouveau muon se comporte bien !

1937-47 : découverte du muon

1947 : Pontecorvo, puis

1949 : Lee, Yang, Rosenbluth

Idée de l'universalité de l'i.f.

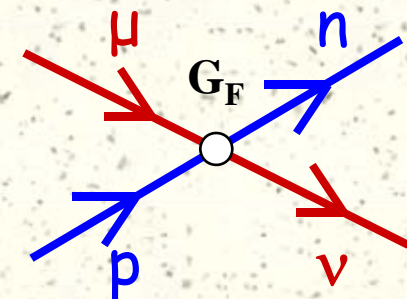
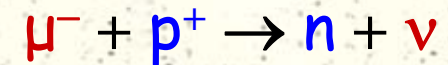
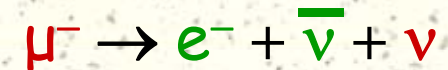
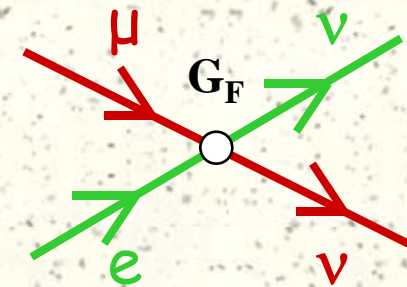
La même constante (de Fermi)

permet de traiter les processus

muoniques ! Un succès !

(NB : on découvrira en 1962 que

les neutrinos sont différents)



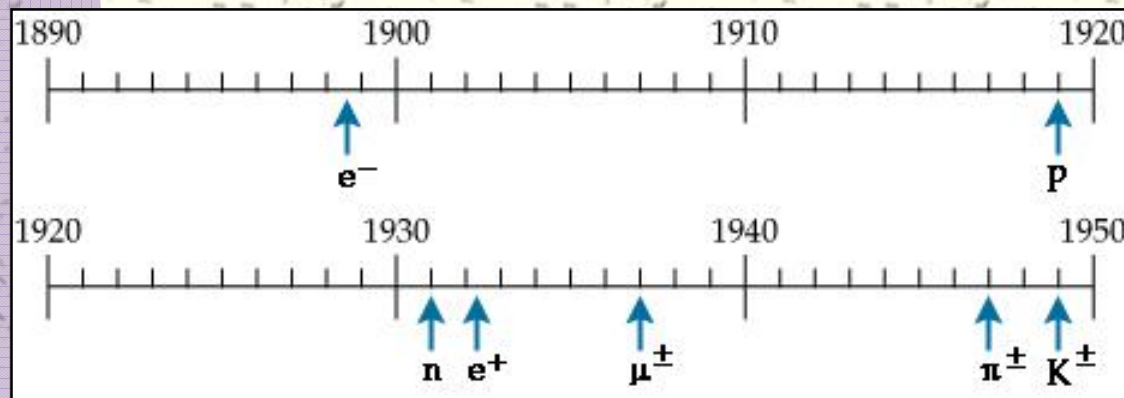
1947 - Bilan



Des théories d'interaction :

- L'électrodynamique quantique (Dirac)
- L'interaction faible (Fermi)
- L'interaction forte (Yukawa)

Les particules élémentaires :



- Électrons / positrons
- Photons (messenger e.m.)
- Protons + neutrons
- Hypothèse du neutrino
- Muons !?
- Pions (messenger fort)

En 1949, arrivent des particules « étranges »