

HistoireS de Particules

Yves Schutz

HistoireS de Particules

Résumé

1. Du corpuscule et de l'onde ... à la particule quantique
 - Découverte rayons X et électrons : onde et corpuscule
 - Constituant de l'atome !
 - L'électron, particule élémentaire, est une particule quantique

Lors du cours précédent, je vous ai raconté l'histoire qui a inauguré l'ère de l'exploration de l'infiniment petit. Des découvertes scientifiques parfois inattendues sont réalisées, pour l'essentiel, dans les laboratoires européens à la toute fin du 19ème siècle. Ces découvertes étaient parfois le fruit du hasard comme celle des rayons X par Röntgen ou celle de la radioactivité naturelle par Becquerel, parfois résultaient d'un long cheminement expérimental et intellectuel telle la découverte de l'électron par Thomson. Les développements technologiques y ont joué un rôle déterminant, mais ces découvertes n'auraient, sans doute, pas pu se faire sans l'état d'esprit non conformiste et audacieux des scientifiques, disposés à innover voire à provoquer en reformulant la vision des choses de la nature.

La fortune sourit aux audacieux : ainsi, quelques mois avant Thomson, un jeune physicien allemand, Walter Kaufmann, avait réalisé la même mesure et obtenu le même résultat que Thomson avec, cependant, une précision bien supérieure. Kaufmann ne fut pas tenté d'inventer l'électron car, en bon positiviste, il était d'avis que la tâche des physiciens n'est pas de spéculer sur des choses qu'ils ne peuvent observer ! Aussi, au lieu de dire qu'il avait découvert une nouvelle particule, il se contenta de faire savoir que quelque chose, circulant dans un rayon cathodique, était porteur d'une charge électrique elle-même liée à sa masse selon un certain rapport.

Thomson lui prit le contre-pied du positivisme : il postule l'existence d'un objet sans l'avoir observé directement, une première en physique. La découverte de l'électron, la première (dans l'ordre chronologique) des particules élémentaires, ouvre ainsi dans le grand livre d'histoire du 20ème siècle un nouveau chapitre consacré à une toute nouvelle discipline : la physique des particules élémentaires.

Les premières lignes de ce chapitre nous rappelleront qu'en 1896 l'électron s'est fait connaître à nous, ôtant à l'atome son statut d'élément premier, et dissenteront sur sa nature quantique sans crainte de heurter notre perception habituelle du monde macroscopique.

HistoireS de Particules

5 étapes

1. Du corpuscule et de l'onde ... à la particule quantique
2. De l'électron ... au zoo de particules
3. Du chaos ... au cosmos
4. Des particules élémentaires ... aux champs quantiques
5. Des histoireS ... vers l'Histoire

Ce n'était qu'un début et nous allons apprendre aujourd'hui comment des physiciens armés d'outils toujours plus performants et n'hésitant pas à enjamber les idées reçues pour en formuler des plus inattendues ont rempli de particules nouvelles un catalogue devenu bientôt ingérable, particules qui d'élémentaires sont finalement devenues composites pour céder la place à des particules plus élémentaires encore.

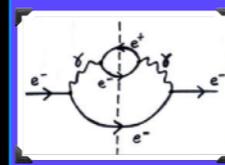
HistoireS de Particules

De l'électron ... au zoo des particules

Yves Schutz

Structure de la matière

1904 l'atome de Thomson



Nom	électron
Symbole	e^-
Classification	particule élémentaire
Groupe	lepton
Famille	fermion
Génération	première
Masse	$9,109 \times 10^{-31}$ kg (511 keV/c ²)
Charge électrique	$-1 e$ ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
Spin	1/2
Durée de vie	$> 2,1 \times 10^{26}$ s
Découverte	1897
Découvreur	Joseph John Thomson

« ... des corpuscules de charges négatives incorporés dans une sphère uniformément chargée positivement ... »

On the structure of the atom: ..., J.J. Thomson, *Phil.Mag.Ser.6* 7 (1904) 39, 237-265

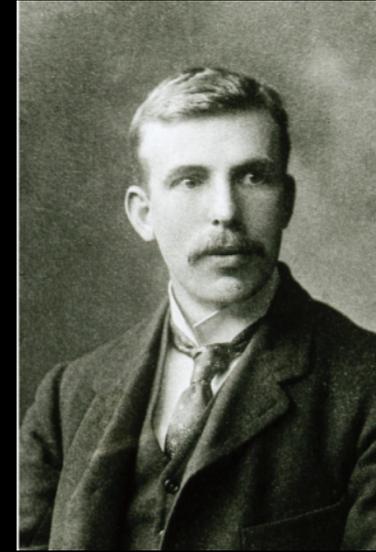
Après avoir découvert l'électron, Thomson se risquera à imaginer la structure de l'atome et ce même avant que la communauté des physiciens acceptent l'existence de l'atome. Nous sommes en 1904, Einstein publiera son interprétation du mouvement Brownien un an plus tard, interprétation que vérifiera Jean Perrin en 1906 (relisez Les Atomes, publiés en 1913 : une belle plume au service de la physique).

Convaincu que l'électron est un constituant de l'atome, il propose ce que j'appelais l'année dernière le modèle Kouglof de l'atome : les raisins secs jouant le rôle d'électrons et la matière pâtissière de matière uniformément chargée positivement. Ce modèle, un tantinet naïf, ne résistera pas longtemps aux tests expérimentaux.

Structure de la matière

Ernest Rutherford (1871-1937)

- Rayons uraniques = α , β , γ (1898)
- Radioactivité = transmutation (1902)
- Demie vie
- $\alpha = {}^4\text{He}$ (1907)
- Découverte du noyau (1909)
- ...



Et c'est Ernest Rutherford qui contestera ce modèle d'atome. Physicien exceptionnel, particulièrement doué pour l'expérience, peu enclin à la physique théorique, talentueux meneur d'hommes et amateur de football, son obsession est: casser l'atome.

En 1895 il a 24 ans, quitte sa Nouvelle Zélande Natale pour rejoindre, grâce à une bourse post doctorale destinée aux sujets de l'Empire britannique, JJ Thomson à Cambridge. Il travaille, bien évidemment, comme tout le monde sur les rayons X dont la nature EM n'est toujours pas formellement établie même si lui est convaincu, comme Jean Perrin en France, qu'il s'agit bien d'une onde EM tout comme la lumière. Il travaillera par la suite d'abord à Montréal, puis à Manchester pour retourner à Cambridge comme patron du Cavendish, succédant à Thomson

Physicien prolifique son nom est associé à de nombreuses découvertes, parmi lesquelles:

1898:

Il identifie les rayons uranifères de Becquerel et y distingue 3 types différents : les rayons alpha, les moins pénétrants, les rayons bêta identifiés comme des électrons, les rayons gamma identifiés comme un rayonnement électromagnétique de grand énergie (petite longueur d'onde, fréquence élevée, au delà des rayons X).

1902 :

Il comprend et prouve (en collaboration avec le chimiste Frederick Soddy) que la radioactivité est la conséquence de la transformation d'un élément en un autre via l'émission d'un rayonnement. Il sonne ainsi le glas de l'immuabilité de la matière ! Il introduit la notion de demi-vie pour les éléments radioactifs (temps nécessaire pour que l'intensité du rayonnement émis par une substance radioactive diminue de moitié) , notion à partir de laquelle il dessinera son blason lorsqu'il sera anobli par Georges V.

Ce travail lui vaudra de se voir décerner en 1908 le prix Nobel de chimie, lui le physicien pour qui la science est soit de la physique, soit de la philatélie!

1907:

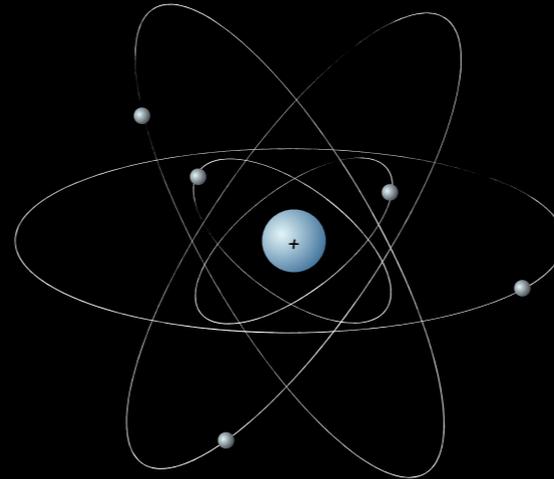
Il identifie les particules alpha à l'atome d'He privé de ses 2 électrons (en collaboration avec Hans Geiger)

1909:

Il découvre le noyau de l'atome (en collaboration avec Hans Geiger et Ernest Marsden), le travail qui le rendit célèbre et l'amènera à proposer son modèle planétaire de l'atome plus convaincant que celui de Thomson mais guère plus réaliste

Structure de la matière

1911 l'atome de Rutherford



The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom
E. Rutherford, Philos. Mag., 6, 21 (1911)

Une remarque sur le modèle planétaire de l'atome : Après la découverte du noyau de l'atome, Rutherford propose un modèle d'atome dont l'iconographie est suffisamment parlante pour rester encore aujourd'hui, cent ans plus tard et malgré ce que nous dit la mécanique quantique, l'image que tout un chacun se fait de l'atome. Et pourtant tout y est faux.

D'abord les rapports d'échelle : la taille du minuscule noyau central est 100.000 fois plus petite que la taille de l'atome (une mouche dans la cathédrale).

Ensuite les électrons ne gravitent pas autour du noyau : nous avons vu la semaine dernière qu'un électron est une particule quantique qu'on ne peut pas associer à une trajectoire classique.

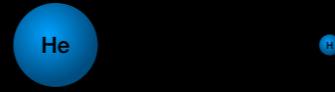
Et quand bien même l'électron aurait une trajectoire classique comme illustrée sur l'image, les lois de la physique nous disent que l'électron devrait irrémédiablement et quasi instantanément s'effondrer sur le noyau.

Et malgré l'improbable bricolage quantique de Niels Bohr ce modèle planétaire de l'atome ne tient pas la route. La mécanique quantique est iconophobe.

Alors si d'aventure le Petit Prince vous demande de dessiner un atome, surtout ne le dessiner pas.

Structure de la matière

1913 L'atome d'H



$$v_H = 1,6 \times v_{He}$$

$$d_H = 4,0 \times d_{He}$$

En 1913, Rutherford démarre une nouvelle série d'expériences ayant toujours en tête son obsession : casser l'atome, ou plutôt le noyau dont il venait de découvrir l'existence.

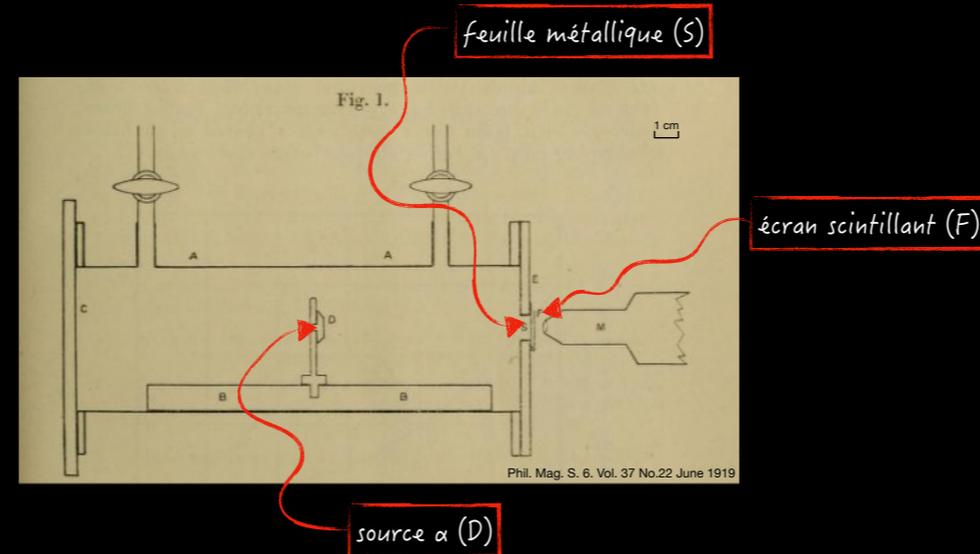
Son idée est de jouer à la pétanque avec les noyaux d'atome. Il écrit : « selon la théorie nucléaire de la structure de l'atome, on s'attend à ce que les noyaux des atomes légers (le cochonnet) peuvent acquérir un mouvement rapide lors de collisions avec des particules alpha (la boule) »

Pour donner un ordre de grandeur : l'énergie des particules alpha de la radioactivité est en moyenne 5 MeV, soit une vitesse de l'ordre de 15000 km/s.

Rutherford demande donc à Marsden (celui même qui regardait rebondir les particules alpha sur une feuille d'or) de jouer à la pétanque en lançant des particules alpha sur des éléments légers, en particulier l'H. Les calculs de cinématique indiquaient que le choc frontal d'une particule alpha sur un noyau d'H ferait reculer l'H avec une vitesse 1.6 fois plus élevée que la vitesse des particules alpha, et que donc le noyau d'H irait 4 fois plus loin que la particule alpha incidente. Dans ces conditions il devenait assez simple d'observer et surtout d'identifier le noyau d'H.

Structure de la matière

1913 - 1919 L'atome d'H

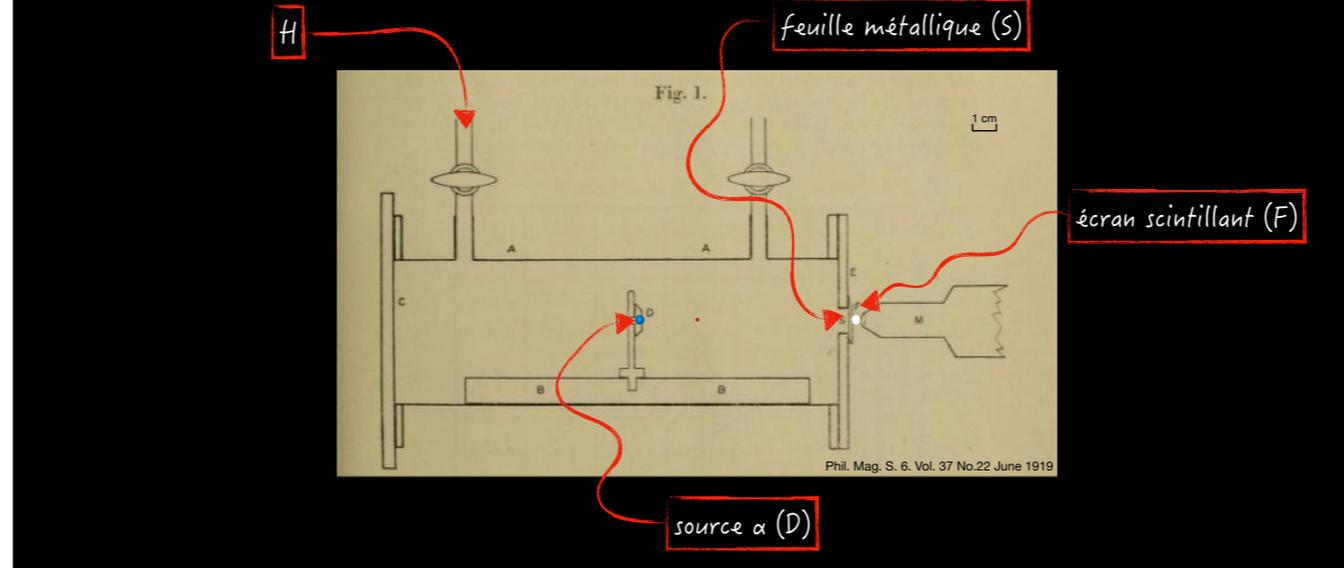


Le dispositif expérimental est plutôt simple :

Une boîte rectangulaire (18 cm long, 2 cm large, 6 cm de haut) remplie d'H, la position de la source alpha (D) peut être déplacée sur un rail (B) de façon à choisir la distance parcourue jusqu'à l'écran scintillant F sur lequel Marsden observe les scintillements dus aux choc des particules sur l'écran. Un scintillement intense est dû aux particules alpha, un scintillement plus faible aux particules H.

Structure de la matière

1913 - 1919 L'atome d'H



Mon animation un peu rudimentaire illustre ce qu'obsède Marsden : des scintillations qu'il attribue à des chocs d'atome H sur l'écran. Mais il constate également que le même phénomène se reproduit même si le tube de la source ne contient pas d'H. Mystère !

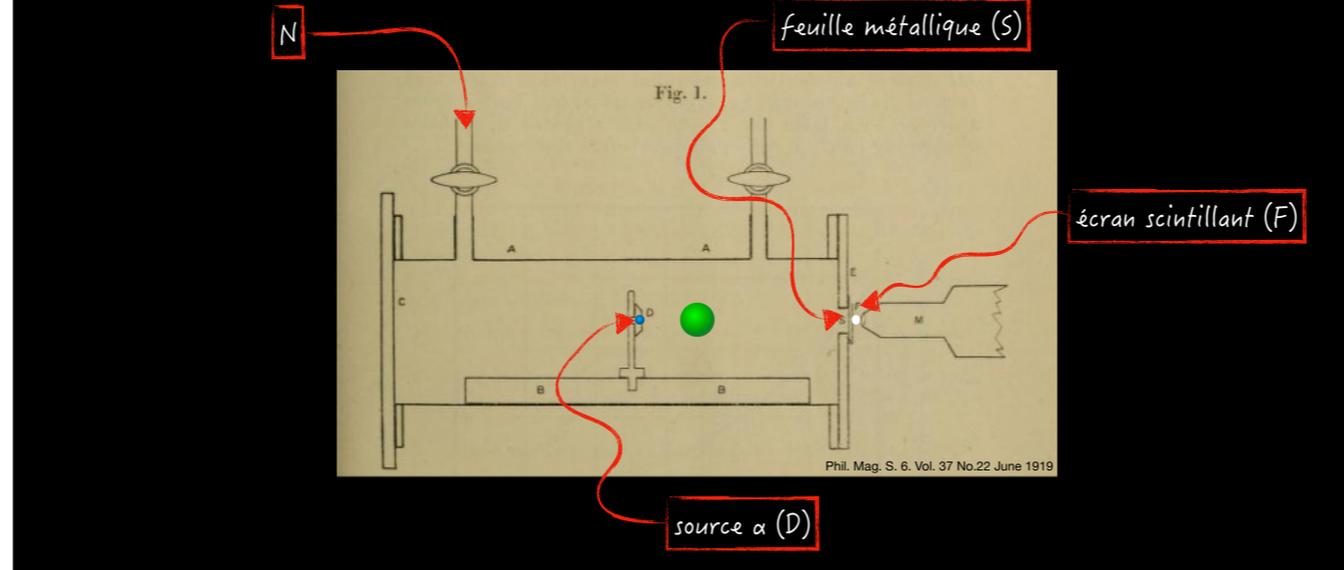
La guerre interrompt brutalement l'expérience et le mystère reste entier : Marsden retourne en Nouvelle Zélande où l'attend un poste de professeur et ne poursuit pas, faute de moyens, l'expérience. Rutherford quant à lui travaille sur des missions liés aux problème de la guerre notamment des moyens sonores pour détecter les sous-marins.

En 1917, Rutherford reprend néanmoins les expériences de Marsden et après plus an, en 1919, il en publie les résultats dans une série de 4 articles du Philosophical Magazine ou il décrit en détail et les mesures et les résultats.

Il confirme les observations de Marsden, l'existence de scintillements qui sont compatibles avec le jeu de boules : des collisions des particules alpha sur des atomes H, qui poussent ces atomes vers l'écran scintillant.

Structure de la matière

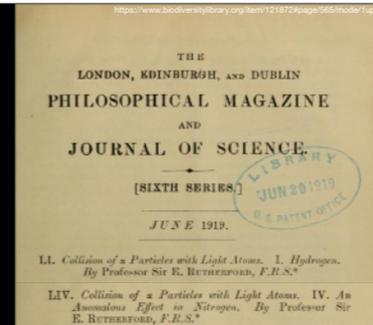
1913 - 1919 L'atome d'H



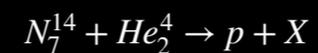
Rutherford est allé plus loin que Marsden : il remplace l'hydrogène par de l'azote en prenant bien soin qu'il n'y ait aucune trace d'H résiduel. Et à sa grande surprise, les scintillements qu'il observe sont ceux typiques qu'il avait auparavant attribués à des atomes d'H, des scintillements dus ni aux alpha, ni aux noyaux d'N. Pour préciser la nature des particules à l'origine des scintillements observés, il positionne l'ensemble expérimental dans un champ magnétique et constate que les causes du scintillement sont des particules électriquement chargées portant une charge élémentaire positive. Il ne fait plus aucun doute, il s'agit d'atomes H sans leur électron.

Structure de la matière

1919 ~~L'atome d'H~~ Le proton (πρῶτον)



A partir des résultats obtenus jusqu'à présent, on ne peut que conclure que les atomes possédant un parcours long et émergeant de collisions de particules α avec de l'azote ne sont pas des atomes d'azote mais vraisemblablement des atomes d'hydrogène [...] Dans ce cas, nous devons conclure que l'atome d'azote est désintégré sous l'effet des forces intenses mises en jeu lors de collisions frontales avec une particule α rapide et que l'atome d'hydrogène ainsi libéré est un constituant de l'atome d'azote.



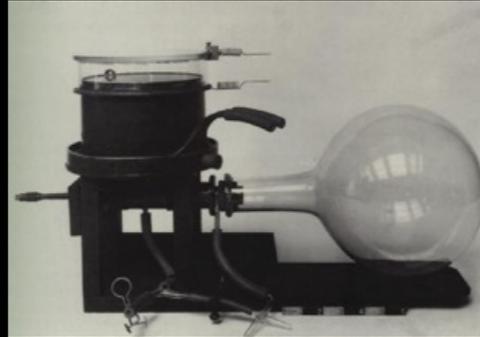
Il conclut dans le dernier de ces 4 articles intitulé : Un effet irrégulier avec l'azote Dans le texte il serait plus juste de parler de noyau que d'atome.

En résumé, il a réalisé la première réaction nucléaire. Il ne le sait pas encore: pensant avoir désintégré le noyau alors qu'il a réalisé la première transmutation (le rêve des alchimistes), transformant de l'azote en oxygène. Mais il a découvert le proton (atome d'hydrogène sans son électron). Il confirme ainsi l'intuition de William Prout. Pas sûr que Rutherford aurait apprécié être qualifié d'alchimiste ou pire encore de chimiste.

Rutherford baptise la particule correspondante du nom de proton, d'après le neutre singulier du mot grec pour « premier », πρῶτον.

La chambre à brouillard

Charles Wilson (1869-1959)



Pour sa méthode qui permet de rendre visible, par condensation de la vapeur, la trajectoire des particules électriquement chargées

Prix Nobel 1927



Nous voilà donc avec une nouvelle entrée dans le catalogue des particules élémentaires qui en contient deux : l'électron et le proton. Déduire l'existence du proton à partir de l'observation de scintillements est presque un acte de foi, voir le proton de ses yeux est mieux encore aurait dit Saint Thomas.

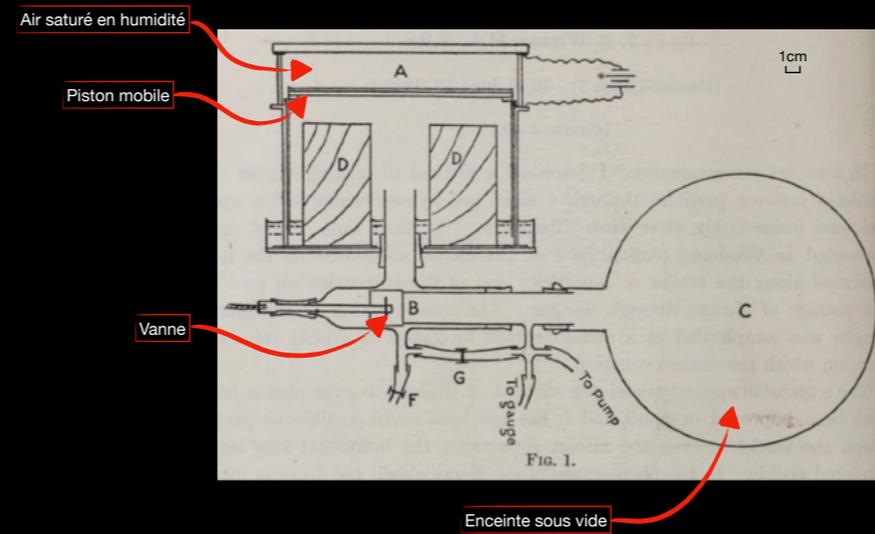
Le salut pour ceux qui doutent va venir d'une nouvelle percée technologique qui permet de « voir » les particules : la chambre à brouillard.

L'inventeur en est Charles Wilson, un physicien écossais qui a étudié la physique et la chimie à Cambridge notamment avec JJ Thomson. Mais sa passion est la météorologie. Il entreprend ainsi d'étudier la formation des nuages et la façon dont l'atmosphère se charge en électricité avant l'orage. Pour cela il cherche à recréer la formation des nuages en laboratoire au Cavendish chez Thomson.

La chambre à brouillard

Comment ça marche

On an Expansion Apparatus for making Visible the Tracks of Ionising Particles in Gases and some Results obtained by its Use.
By C. T. R. WILSON, M.A., F.R.S.
(Received June 7,—Read June 13, 1912.)
Phil. Mag. Ser. 6, vol. 14, p. 263

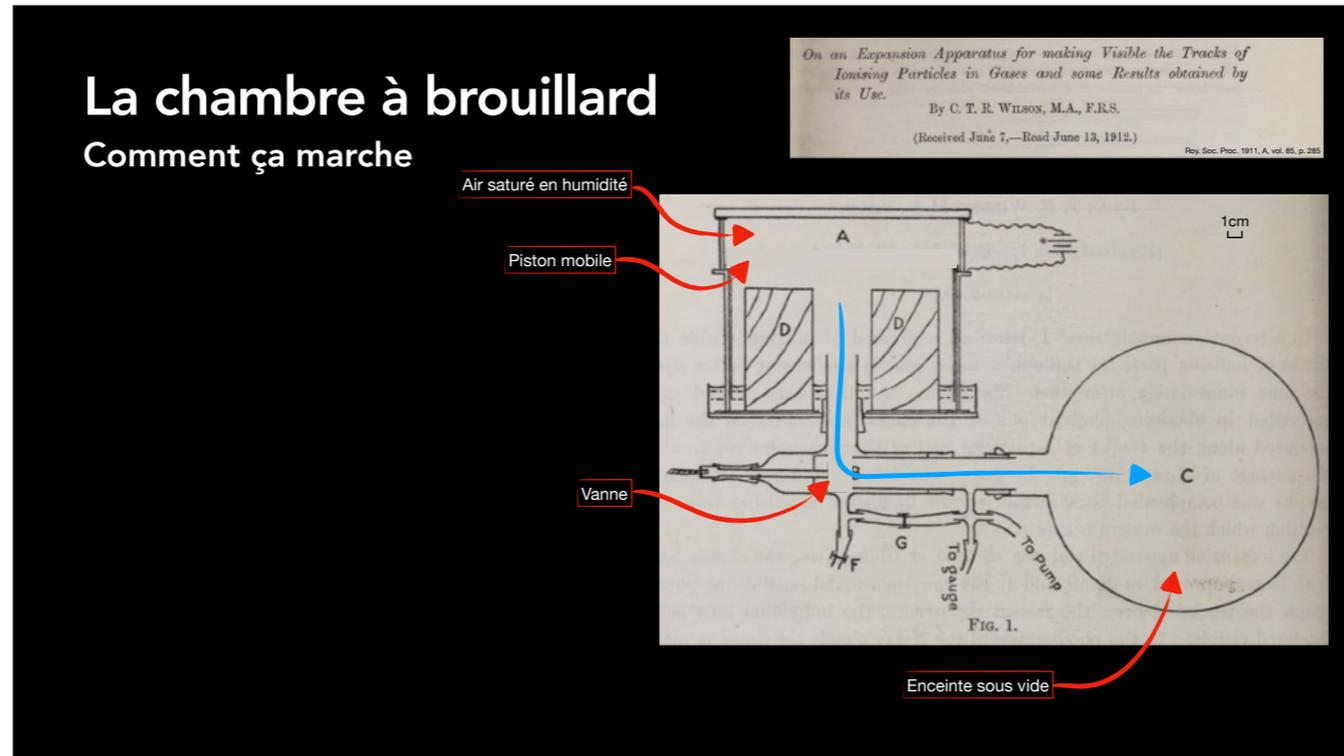


Ce premier détecteur est ainsi schématisé et son mode de fonctionnement est le suivant :

Une enceinte étanche A (16.5cm x 3,4 cm) est remplie d'air humide sursaturée (contient plus d'humidité qu'elle ne peut dissoudre) et maintenue sous pression par un piston mobile.

La chambre à brouillard

Comment ça marche



En ouvrant la vanne B, l'air sous le piston est aspirée dans le ballon sous vide C, le piston descend soudainement ce qui crée une détente soudaine de l'air dans le volume A et une baisse concomitante de la température (baisse de la température de l'air sortant de la chambre air de votre bicyclette lorsque vous la dégonflez) et un nuage ou brouillard (amas de gouttelettes) se forme d'autant plus facilement qu'il y a des particules de poussière dans l'air (brouillard se forme plus facilement au dessus d'une ville industrielle).

Wilson constata qu'il continuait à voir des nuages avec de l'air très propre (pas de poussières) lorsque une source radioactive était à proximité. Il comprit que les particules émises par une source radioactive ionisent l'air (arrachent les électrons des atomes de l'air) et les ions ainsi formés jouaient le même rôle que les poussières autour desquels un brouillard peut se former.

Il adapte alors son dispositif à la détection des particules et réalise le tout premier détecteur de la physique des particules.

Ainsi le passage d'une particule alpha va laisser derrière elle une trace d'atomes ionisés, et autour de chacun de ces ions pourra se former tout juste après l'expansion une minuscule gouttelette d'eau. Une trace de gouttelettes d'eau apparaît tout à fait semblable aux traces de nuages laissées dans le ciel par un avion volant à haute altitude.

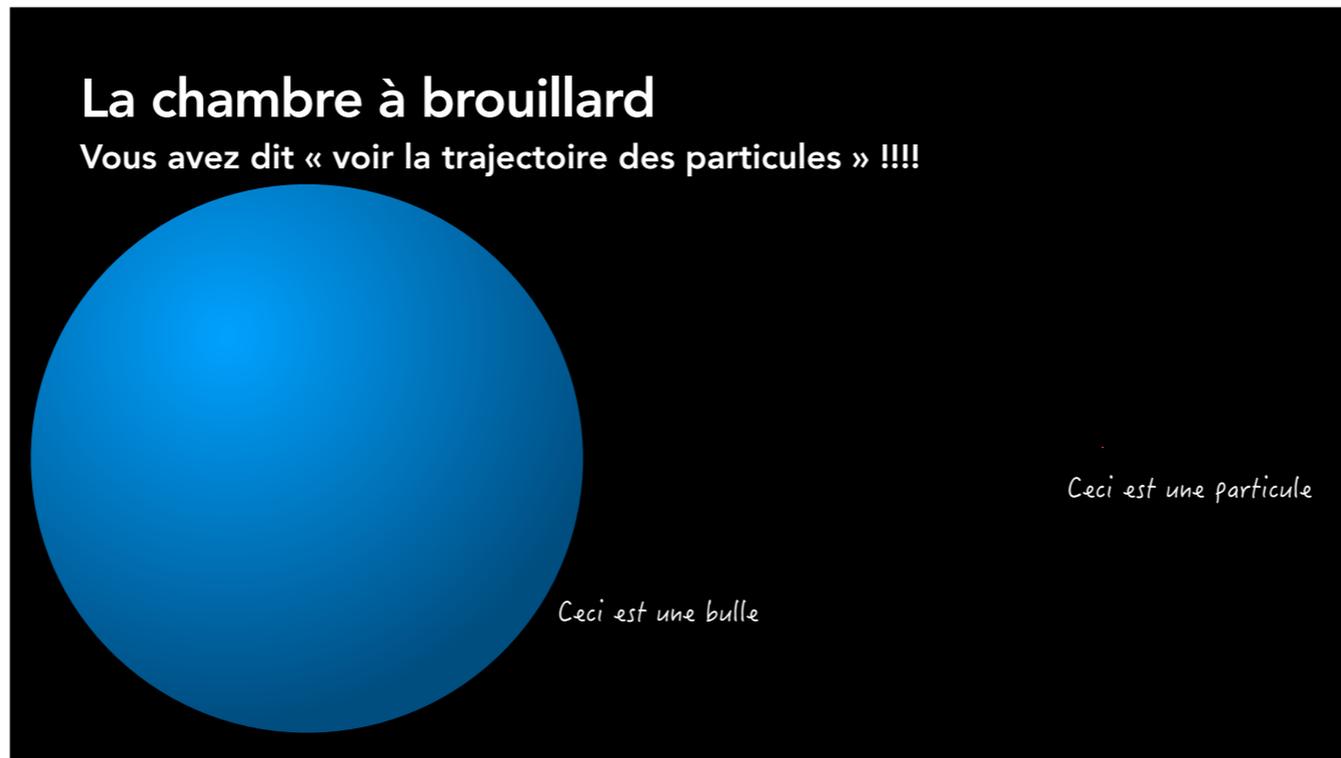
La chambre à brouillard

Comment ça marche

On an Expansion Apparatus for making Visible the Tracks of Ionising Particles in Gases and some Results obtained by its Use.
By C. T. R. WILSON, M.A., F.R.S.
(Received June 7,—Read June 13, 1912.)
Phil. Mag. Ser. 6, vol. 15, p. 266



Et voilà le travail. Il ne reste plus qu'à photographier au moment de la détente par le dessus de la chambre pour voir apparaître des traces dues au passage de particules dans la chambre à brouillard.



Attention à la mauvaise interprétation : les traces que l'on voit ne sont pas dues à des objets concrets, des corpuscules bien localisés dans l'espace et ayant une trajectoire bien définie. Rien à voir avec les traces laissées par un skieur dans la poudreuse : chacune des bulles qui constituent la trace est de l'ordre de cent mille fois plus grosses que les particules et de plus ces bulles ne s'alignent pas parfaitement pour former la trace. Les traces de bulles ne visualisent en aucune façon une trajectoire d'un corpuscule comme on l'entend en physique classique.

D'abord rien ne prouve que les particules avant d'entrer dans la chambre avaient une trajectoire bien définie. Heisenberg a montré que pour comprendre la formation de ces trajectoires il faut représenter les particules non par des corpuscules mais par des ondes qui n'ont pas de trajectoire bien définie. Et c'est la description ondulatoire des particules qui permet de comprendre que la particule entrant dans la chambre va provoquer un alignement des bulles qui vont former la trace observée.

W. Heisenberg, dans « La Partie et le Tout » :

« Ce soir-là, ce fut peut-être aux environs de minuit que je me rappelai brusquement ma discussion avec Einstein, et que je me souvins de sa phrase :

"Seule la théorie décide de ce que l'on peut observer."

Je réalisai immédiatement que c'est dans cette remarque qu'il fallait chercher la clef de l'énigme qui nous avait tant préoccupés. J'entrepris alors une promenade nocturne à travers le Fælledpark (Copenhague) pour réfléchir à la portée de la phrase d'Einstein.

Nous avons toujours dit : on peut observer la trajectoire d'un électron dans la chambre de Wilson. Mais peut-être n'était-ce pas tout à fait cela que l'on observait réellement. Peut-être ne pouvait-on apercevoir qu'une suite discontinue de positions imparfaitement précisées de l'électron. Effectivement, ce que l'on voit dans la

chambre, ce sont simplement des gouttelettes d'eau dont chacune est certainement beaucoup plus étendue qu'un électron.

La question correcte devait donc être posée ainsi : Peut-on représenter, dans le cadre de la mécanique quantique, une situation où un électron se trouve à peu près - c'est-à-dire à une certaine imprécision près - en une position donnée, et possède à peu près - c'est-à-dire à nouveau à une certaine imprécision près - une vitesse donnée ? Et peut-on rendre ces imprécisions suffisamment faibles pour qu'il n'y ait pas de contradiction avec l'expérience ?

Un bref calcul que j'effectuai au retour vers l'Institut confirma qu'une telle situation pouvait être représentée mathématiquement, et que les imprécisions sont liées par les relations qui ont été appelées plus tard "relations d'incertitude de la mécanique quantique". »

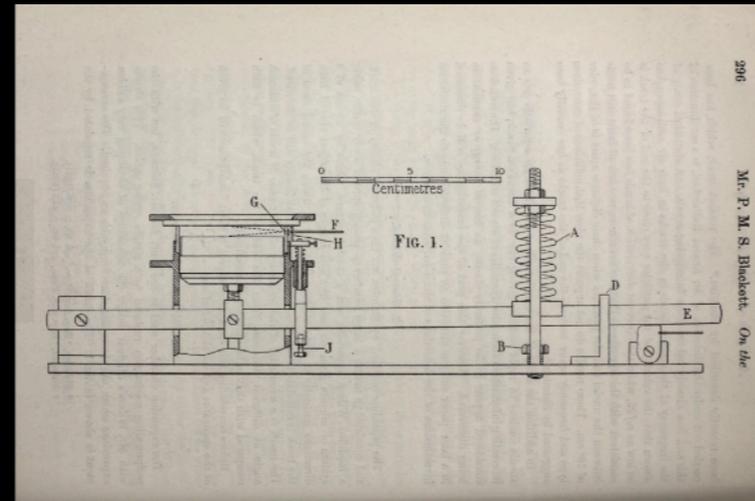
Cohen-Tannoudji rappelle que la chambre à bulles qui donne l'illusion d'une trajectoire des particules est un phénomène d'échelle macroscopique, qui est l'échelle des bulles, et non une image microscopique de trajectoire de particules microscopiques (donc quantiques). Les bulles qui se forment là où des particules rencontrent une molécule d'eau ne sont pas des points de parcours des particules. La succession des bulles, qui n'est d'ailleurs pas continue, n'indique pas une succession de positions précises de ces particules ni ne peut indiquer que la particule est toujours la même.

Bulle = 1 micron (10^{-9} m), particule = 10 fermi (10^{-14} m), facteur = cent mille

Structure de la matière

1924 Patrick Blackett « voit » le proton

Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method.
by P. M. S. BLACKETT, Moseley Research Student of the Royal Society and Fellow of King's College, Cambridge.
Communicated by Prof. Sir E. Rutherford, F.R.S.—Received December 17, 1924.
Roy. Soc. Proc., 1924, A, vol. 107, p. 349

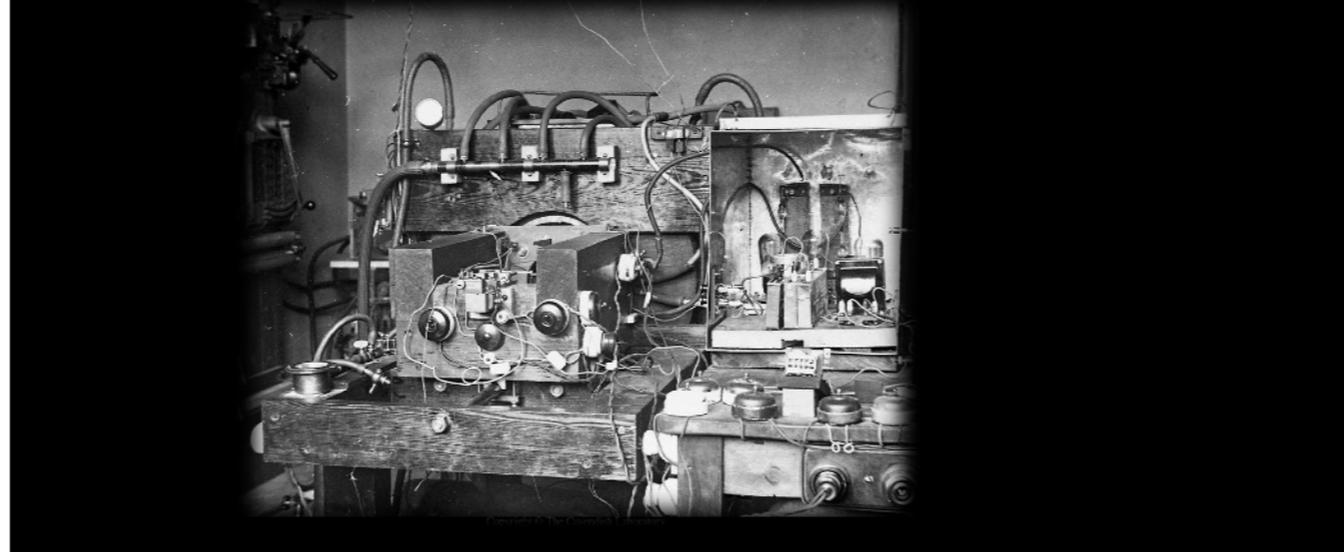


Le principe d'un détecteur de particules existe, encore faut-il le rendre utilisable pour observer des processus nucléaires rares pareils à ceux observés par Rutherford en 1917, en d'autres termes, il faut pouvoir prendre beaucoup de photos dans un temps raisonnable et de préférence de façon entièrement automatique. Ce détecteur performant sera développé au Cavendish, sous la direction de Rutherford, dans un premier temps par un visiteur japonais, Takeo Shimizu, qui arrivera à prendre une photo toutes les 10 secondes. Mais ce sera un étudiant fraîchement diplômé qui poursuivra le travail de Shimizu : Patrick Blackett (prix Nobel en 1948). Rutherford le met alors au défi de photographier la désintégration de l'azote.

Structure de la matière

1924 Patrick Blackett « voit » le proton

*Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by
the Wilson Method.*
by P. M. S. BLACKETT, Moseley Research Student of the Royal Society
and Fellow of King's College, Cambridge.
Communicated by Prof. Sir E. Rutherford, F.R.S.—Received December 17, 1924.
Roy. Soc. Proc., 1924, A, vol. 107, p. 349

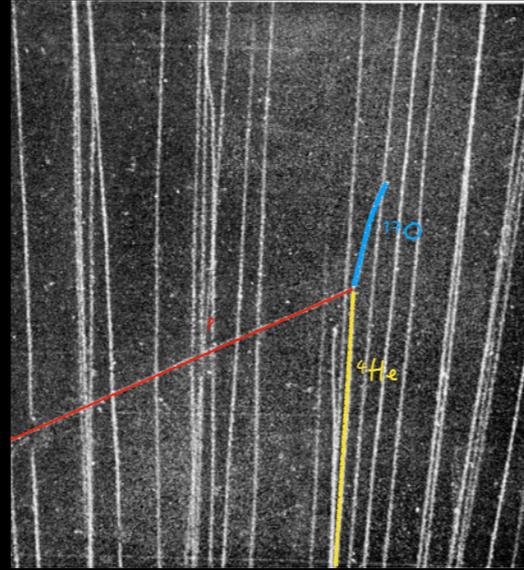


Tout dans le détecteur de Blackett est automatisé : la détente, l'entrée des particules alpha et la prise de photos.

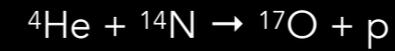
La semaine dernière vous m'avez demandé si les physiciens construisaient leur propre appareillage : vous avez la réponse sur cette photo, jamais un ingénieur n'aurait commis ceci.

Structure de la matière

1924 Patrick Blackett « voit » le proton



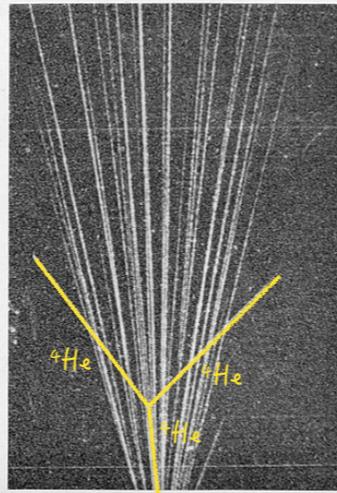
Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method.
by P. M. S. BLACKETT, Moseley Research Student of the Royal Society and Fellow of King's College, Cambridge.
Communicated by Prof. Sir E. Rutherford, F.R.S.—Received December 17, 1924.
Roy. Soc. Proc., 1924, A, vol. 107, p. 349



Avec cet appareillage, Blackett parvient au courant de l'année 1924 à enregistrer 23.000 photos (une photo toutes les 10 secondes) sur lesquelles il a tout loisir de décortiquer les quelques 400,000 traces. Huit d'entre elles indiquaient le phénomène anormal découvert par Rutherford.

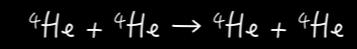
En fait les atomes d'azote ne sont pas désintégrés comme le pensait Rutherford, mais transmutés en un noyau d'oxygène accompagné de l'émission de protons rapides.

Le résultat nouveau déduit de ces photos est que la particule alpha est capturée par le noyau d'azote, capture accompagnée par l'éjection d'un atome d'hydrogène, produisant ainsi un nouvel isotope inconnu de l'oxygène, ${}^{17}\text{O}$



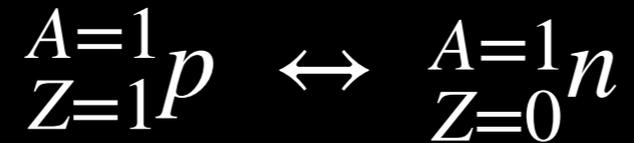
Alpha particle strikes helium nucleus and they part at right angles (Blackett)

P.M.S. Blackett, Phil. Mag. Com. 1924 *See p. 293*



Structure de la matière

1920 une particule neutre ?



Une fois que le proton bien ancré dans la liste des particules élémentaires, Rutherford s'interroge sur la nature des isotopes (des atomes du même élément chimique ayant des poids masses/atomiques différents) dont l'existence avait été découverte en 1913 par son chimiste préféré, Soddy.

En 1920, lors de la prestigieuse conférence Baker (dont la tradition remonte à 1774) Rutherford conjecture l'existence d'une particule neutre de masse semblable à celle du proton. Il considère cette particule hypothétique comme le mariage intime entre un proton et un électron. Il n'invente pas une nouvelle particule mais en bricole une avec celles qui étaient connues

L'histoire de la découverte du neutron mérite d'être racontée car elle permet de voir comment on peut passer à côté d'une découverte si psychologiquement on n'est pas préparé à découvrir une nouvelle particule. En effet en 1930, il n'y avait aucun besoin d'une nouvelle particule en plus de l'électron, du proton et du photon.

Structure de la matière

Walter Bothe (1891-1957)



Ce sera le physicien allemand Walther Bothe qui écrira dès 1928, sans le savoir, la première page de cette histoire. Elève de Max Planck il commence sa carrière de physicien à Berlin sous la direction de Hans Geiger (l'homme du compteur éponyme). Il invente une nouvelle façon d'observer et de compter les particules : au lieu d'observer au travers d'un microscope les scintillations sur un écran, il développe une méthode électrique basée sur un compteur Geiger et un compteur électromécanique d'impulsions (des relais téléphoniques). Plus tard il améliorera cette technique en y ajoutant des circuits de coincidence, ce qui lui valut le prix Nobel en 1954. Il a construit pendant la guerre le premier cyclotron en Allemagne et y contribua au programme nucléaire.

Structure de la matière

Irène Curie (1897-1956) & Frédéric Joliot (1900-1958)



Si peu d'entre vous connaissait Walter Bothe, je suis sûr que les noms d'Irène Curie et Frédéric Joliot vous sont plus familiers. Irène est la fille aînée de Marie et Pierre Curie. Elle a hérité des gènes de la science de ses parents. Pendant la première guerre, à 17 ans assistante de sa mère, elle participe à l'organisation du service de radiologie au front. Après la guerre, elle travaille dans le labo de sa mère (Institut du radium à Paris) et soutient une thèse sous la direction de sa mère.

Elle y rencontre Frédéric Joliot brillant ingénieur (avec du sang alsacien par sa mère Emilie Roederer). Sorti major de sa promotion de Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielle, il se passionne pour la physique sous l'impulsion de son professeur Paul Langevin. Recruté à l'institut du radium, il épouse la fille de la patronne.

Dès la découverte de la fission en 1939, Joliot étudie la possibilité d'une réaction en chaîne et il prend en 1939 une série de brevets couvrant la réalisation d'un réacteur et d'une bombe (classés secret défense par le gouvernement Daladier). Il acquiert alors pour la France la totalité du stock mondial d'eau lourde produit en Norvège et de l'uranium qui fait de la France le premier pays au monde à s'assurer un approvisionnement en uranium, et à comprendre l'importance de l'énergie nucléaire civile et militaire.

Pendant la seconde guerre mondiale, il préfère rester en France, mais exfiltre toute son équipe avec l'eau lourde en Angleterre (film de Jean Dréville « La bataille de l'eau lourde »). Il rejoint la résistance et le parti communiste.

Lors de l'insurrection de Paris en 1944, il est l'inventeur du cocktail « Joliot-Curie », qui fit des ravages contre les chars allemands à la libération de Paris puisque ces « cocktails », composés de trois éléments faciles à trouver à l'époque (une bouteille d'acide sulfurique et d'essence qui explosait au contact de chlorate de potassium), n'avaient pas besoin d'être enflammés pour neutraliser les véhicules visés.

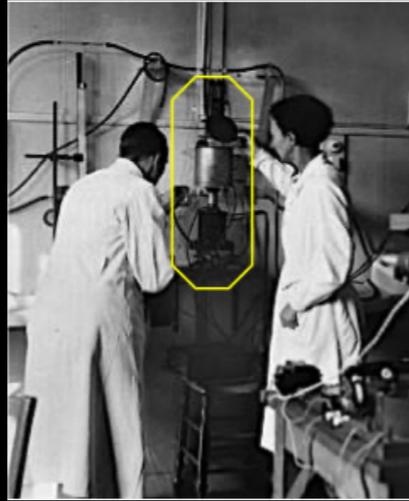
Il a été successivement directeur du CNRS puis haut commissaire au CEA créé par de Gaulle en 1948. Son engagement très à gauche dans l'appel de Stockholm

(pétition contre l'arme nucléaire) lui coutera sa place aux CEA.

A la fois Irène et Frédéric ont été effectivement engagés politiquement, militants du parti communiste surtout dans le cadre du mouvement pour la paix et de l'égalité des droits des femmes. Irène sera brièvement sous-secrétaire d'Etat à la recherche scientifique dans le gouvernement Blum en 1936.

Les deux sont lauréats du Prix Nobel de Chimie en 1935 pour leur découverte de la radioactivité artificielle. Vers la fin de leur vie, les deux meurent assez jeunes victimes, sans doute, du peu de précaution qu'ils avaient prises vis-à-vis du rayonnement et des corps radioactifs, ils créent et dirigent l'institut de physique nucléaire à Orsay.

Structure de la matière 1932 un rayon γ très énergétique



ACADÉMIE DES SCIENCES.

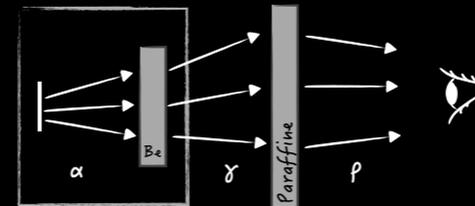
SÉANCE DU LUNDI 18 JANVIER 1932.

PRÉSIDENTE DE M. ROBERT BOURGEOIS.

RADIOACTIVITÉ. — Émission de protons de grande vitesse par les substances hydrogénées sous l'influence des rayons γ très pénétrants. Note (*) de M^{mes} IRÈNE CURIE et M. F. JOLIOU, présentée par M. Jean Perrin.

C. R. Acad. Sci. Paris, vol 194, p 273 (1932)

« Il paraît donc établi par ces expériences qu'un rayonnement électromagnétique de haute fréquence est capable de libérer, dans les corps hydrogénés, des protons animés d'une grande vitesse. »



Mais revenons à 1931. Ayant pris connaissance des résultats de Bothe, Irène et Frédéric Joliot refont l'expérience de Bothe et étudie le rayonnement pénétrant qu'il a découvert. Ils tirent profit du fait qu'ils disposent de la source de Po la plus puissante au monde (20x plus intense que celle de Bothe), ce qui leur permet d'augmenter le taux de production des événements plutôt rares vus par Bothe.

Le déroulé de l'événement est le suivant : les alpha du émis à grande vitesse par la source de Polonium entrent en collision avec les noyaux de béryllium d'une cible mince, éjectant ainsi le « rayonnement pénétrant ». En interposant un écran sur la trajectoire du rayonnement, ils peuvent étudier les effets résultant de l'interaction du rayonnement avec le matériau de l'écran. Ces effets sont observés sous forme de courant électrique généré dans une chambre d'ionisation, sensible aux γ (mais plus encore aux protons). L'avantage par rapport au montage de Bothe est qu'avec leur instrument ils disposent d'une donnée expérimentale supplémentaire : la mesure d'un courant électrique proportionnel à l'ionisation créée. Bothe n'avait accès qu'à une information binaire, un simple clic du compteur Geiger qui signale le passage d'un rayonnement ionisant.

Dans un premier temps, Irène et Frédéric Joliot confirment les résultats de Bothe et font leur son interprétation : un rayon gamma de 5-10 MeV.

Mais en interposant l'écran, ils n'obtiennent aucun signal après l'écran pour la plupart des matériaux. Seuls des matériaux hydrogénés, telle de la paraffine, donne un signal indiquant l'éjection de quelque chose d'ionisant qu'ils parviennent à identifier à un proton.

Dès lors l'interprétation paraît évidente : le mécanisme à l'origine de l'observation est la diffusion Compton du gamma énergétique sur un proton de la paraffine. Mais en faisant le bilan énergétique de la réaction, ils constatent et sont prêts à admettre que la loi de la conservation de l'énergie est violée! Jamais en physique la loi de la conservation d'énergie a été mise en défaut. Cependant le monde microscopique si surprenant ne pouvait-il pas faire une entorse à cette loi taillée pour le monde macroscopique ? Niels Bohr lui-même n'était-il pas prêt à sacrifier la loi pour comprendre la radioactivité beta ?

Les réactions à cette interprétation ne tardent pas. L'italien Ettore Majorana, jeune et brillant théoricien qui venait de rejoindre à Rome l'équipe d'Enrico Fermi, démontre que l'énergie et l'impulsion étaient parfaitement conservées si le projectile n'avait pas une masse nulle comme un gamma mais une masse proche de celle du proton. Malgré la demande pressante de Fermi, Majorana jugea inutile de publier ses calculs. Les mots de Majorana étaient dit-on un peu plus familiers : Quels idiots ! Ils ont découvert le proton neutre et ils ne l'ont pas reconnu !

A Cambridge, Rutherford trouve aussi l'explication des Joliot-Curie invraisemblable et il demanda à Chadwick de revoir la question.

Structure de la matière

James Chadwick (1891-1974)



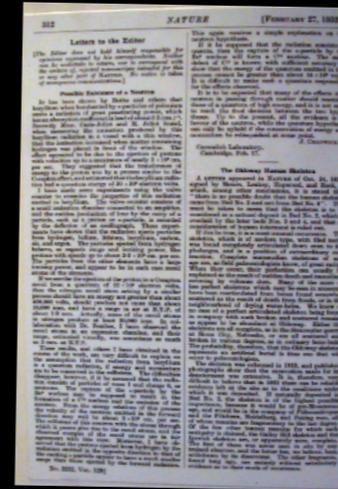
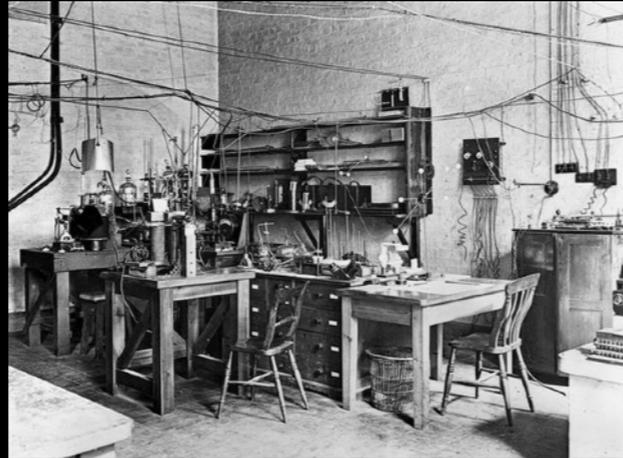
James Chadwick est devenu physicien, un peu, par hasard. Souhaitant s'inscrire pour des études de mathématiques à l'Université de Manchester, il se trompe de guichet. Se trouvant entouré par de futurs étudiants en physique et n'osant reconnaître sa méprise, il s'inscrit en physique!

Il obtient en 1913 son Master avec Rutherford et côtoie Geiger, Marsden et Bohr, entre autres. On ne peut rêver de meilleur environnement à l'époque pour qui s'intéresse à l'atome. Boursier, sélectionné pour un séjour à l'étranger, il choisit de travailler avec Hans Geiger au Reichsanstalt de Berlin. La guerre éclate, il est arrêté et interné dans un camp de prisonniers civils jusqu'à la fin de la guerre.

A son retour de captivité, il est nommé professeur à Cambridge où il collabore étroitement avec Rutherford sur la transmutation nucléaire induite par les rayons alpha (le fameux jeu de boules avec les noyaux atomiques)

Structure de la matière

1932 Possible Existence of a Neutron



« Tout semble converger vers l'hypothèse du neutron alors que l'hypothèse du quantum ne peut être retenue que si l'on consent à renoncer à la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement »

Il est en mesure de refaire l'expérience des Joliot-Curie mais son dispositif est fortement amélioré, le plus déterminant est l'amplification du courant électrique observé dans la chambre d'ionisation. Sa source de Po est bien moins intense (20 fois moins) mais son appareil de mesure est beaucoup plus sensible.

Il répète l'expérience des Joliot-Curie : bombarde des particules alpha sur une feuille de Beryllium, interpose un écran placé devant une chambre d'ionisation.

Les Joliot-Curie avaient publié leurs résultats et l'in vraisemblable interprétation le 18 janvier 1932, un peu plus d'un mois plus tard, le 27 février le prestigieux journal Nature publie une lettre d'à peine une page de Chadwick : « Existence possible du neutron »

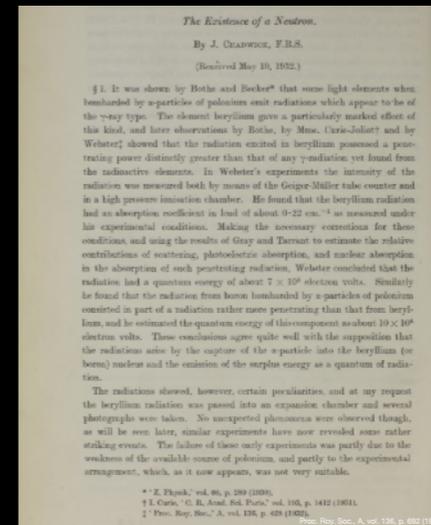
Il y démontre que le recul du proton est incompatible si l'on considère le choc d'un gamma de 50 MeV avec un proton de l'écran. En revanche si le projectile n'est pas un photon gamma, de masse nulle, mais une particule (neutre elle aussi) de masse comparable à celle du proton et d'énergie inférieure à 5 MeV tout se tient et il n'est plus nécessaire d'invoquer une improbable violation de l'énergie. Il mesure la masse du mystérieux rayonnement égale à quelques pour cent près à celle du proton.

Structure de la matière

1932 The Existence of a Neutron



« Nous concluons que la radiation consiste, non en des quanta comme cela a été considéré jusqu'à présent, mais en des neutrons, particules de masse 1 et charge 0. [...] Ceci suggère que le neutron consiste en un proton et un électron fortement liés... »



Il publie un article plus détaillé le 10 mai avec un titre qui ne laisse plus place au doute : « L'existence du neutron » bien que dans sa conclusion le neutron reste la particule imaginée par Rutherford : un mariage entre un proton et un électron.

Pourquoi Chadwick a découvert le neutron et pas Bothe ou les Joliot-Curie ?

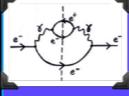
Chadwick était mentalement préparé au concept de neutron. Il avait fait plusieurs tentatives auparavant de rechercher le neutron avec des expériences plus ou moins absurdes. Son grand mérite fut, quand il n'y avait pas de neutrons, de ne pas en détecter, et, quand il y en eut finalement, de le reconnaître immédiatement.

L'instrumentation a également joué un rôle déterminant : la chambre d'ionisation au signal amplifié a fait la différence. Et il y avait surtout des différences d'environnement scientifique: Bothe s'intéressait aux gammas, et il les a trouvés [il y a réellement des gammas de désexcitation], les Joliot-Curie avaient alors peu de contacts avec d'autres physiciens, et la non-conservation de l'énergie dans les réactions nucléaires jouissait d'une vogue certaine parmi des théoriciens prestigieux comme Bohr ou Heisenberg. En revanche, l'idée du neutron de Rutherford ne fut jamais perdue de vue au Cavendish, dont les physiciens discutaient beaucoup entre eux (tea seminars). Et il faut admirer Chadwick d'avoir cherché avec ténacité le neutron pendant 12 ans sans aucune fausse alerte !

Bien que les Joliot Curie fussent proposer pour le Nobel, c'est Chadwick qui l'aura tout seul (il se raconte que Rutherford s'était opposé aux Joliot Curie prétextant qu'ils l'auront bien un jour)... Et ironie de l'histoire Chadwick sera lauréat du prix Nobel de Physique en 1936 et la même année les Joliot Curie prix Nobel de Chimie.

Structure de la matière

1932 électron, proton, neutron(, photon)



Nom	électron
Symbole	e ⁻
Classification	particule élémentaire
Groupe	lepton
Famille	fermion
Génération	première
Masse	$9,109 \times 10^{-31}$ kg (511 keV/c ²)
Charge électrique	-1 e ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
Spin	1/2
Durée de vie	> $2,1 \times 10^{26}$ s
Découverte	1897
Découvreur	Joseph John Thomson



Nom	proton
Symbole	p
Classification	particule composite
Groupe	baryon (nucléon)
Famille	fermion
Génération	-
Masse	$1,672 \times 10^{-27}$ kg (938 MeV/c ²)
Charge électrique	+1 e ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
Spin	1/2
Durée de vie	> $5,9 \times 10^{28}$ s
Découverte	1919
Découvreur	Ernest Rutherford



Nom	neutron
Symbole	n
Classification	particule composite
Groupe	baryon (nucléon)
Famille	fermion
Génération	-
Masse	$1,675 \times 10^{-27}$ kg (939 MeV/c ²)
Charge électrique	0 C
Spin	1/2
Durée de vie	880 s
Découverte	1932
Découvreur	James Chadwick

Les physiciens disposent donc à partir de 1932 des briques élémentaires pour construire les atomes de tous les éléments de la table périodique de Mendéleiev. Avait-on pour autant atteint ce que les philosophes de l'antiquité avaient imaginé pour décrire la structure de la matière : des éléments premiers à partir desquels toute la diversité des choses de la nature seraient créées. Apparemment oui, même si l'atome de Démocrite avait perdu son statut d'élément insécable. C'était cependant sans compter avec les surprises que la nature va révéler aux physiciens curieux s'aidant d'appareillages les uns plus ingénieux que les autres ...

De nouvelles particules

1932 année miraculeuse

- Découverte du neutron

- Découverte de la radioactivité artificielle ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} + n$
↳ ${}_{14}^{30}\text{Si} + e^+ + \nu_e$

- Découverte du positon

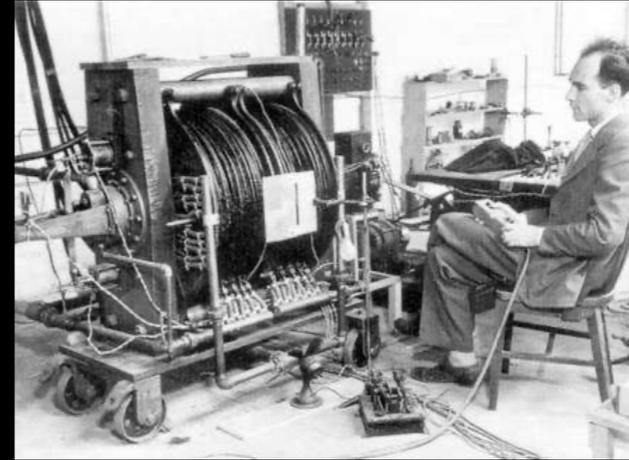
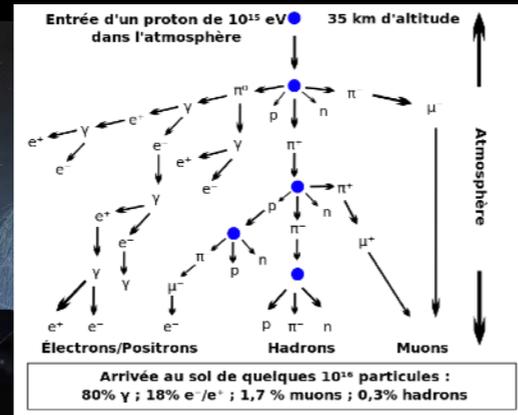
... et ce dès 1932, année miraculeuse qui voit une série de découvertes historiques aux conséquences révolutionnaires qui ne sont pas sans rappeler les découvertes de 1895.

Chadwick découvre le neutron et les Joliot-Curie la radioactivité artificielle. Ils produisent par réaction nucléaire en bombardant une feuille d'Al avec des particules alpha, un isotope du Phosphore, radioactif, émetteur beta... mais également trois nouvelles particules qu'ils ne reconnaissent pas, le neutron et le positon qu'ils identifient comme un rayonnement gamma et un électron! Quant au neutrino, ils ne peuvent pas l'observer avec leur appareillage.

L'été suivant la découverte du neutron, de l'autre côté de l'Atlantique apparaît dans une chambre à brouillard une trace inattendue ...

De nouvelles particules

Carl Anderson (1905-1991)

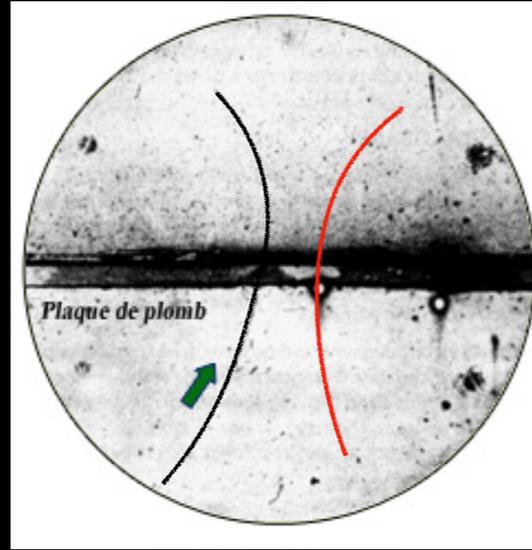


C'est le physicien américain, Carl Anderson, qui fait cette étrange observation. Il est étudiant et prépare au Caltech une thèse de doctorat sous la direction Robert Millikan. Le sujet en est le rayonnement cosmique découvert par Victor Hess en 1912 grâce à des expériences embarquées dans des ballons et dont l'origine est situé à l'extérieur du système solaire. Le nom de rayonnement cosmique a été forgé par Robert Millikan qui parlait aussi du vagissement des atomes (birth cry of atoms).

On connaît aujourd'hui beaucoup mieux qu'à l'époque la nature et l'origine du rayonnement cosmique, notamment grâce au français Pierre Auger qui, lors d'expérience dans les Alpes en 1938, démontre que le rayonnement cosmique primaire développe une gerbe atmosphérique constituée de particules secondaires, résultant de l'interaction de particules primaires avec l'atmosphère.

Le détecteur d'Anderson est une chambre à brouillard placée dans un champ magnétique.

De nouvelles particules 1932 L'électron de charge positive



MARCH 15, 1933 PHYSICAL REVIEW VOLUME 43

The Positive Electron
CARL D. ANDERSON, *California Institute of Technology, Pasadena, California*
(Received February 28, 1933)

« Le 2 août 1932, en photographiant des traces de rayons cosmiques produites dans une chambre de Wilson positionnée verticalement (champ magnétique 15.000 gauss) et conçue durant l'été 1930 par le professeur R.A. Millikan et moi-même, les traces montrées dans la figure 1 ont été obtenues qui ne peut-être interprétées qu'en admettant l'existence d'une particule de charge positive mais ayant une masse du même ordre de grandeur que celle d'un électron libre de charge négative. »

A l'intérieur de la chambre il dispose un obstacle, une plaque de plomb, dans laquelle, en la traversant, les particules à observer perdent de l'énergie. Cette perte d'énergie caractérise et la particule et se traduit par une modification de l'incurvation de la trajectoire (le champ magnétique incurve la trajectoire d'autant plus que la quantité de mouvement de la particule est petite).

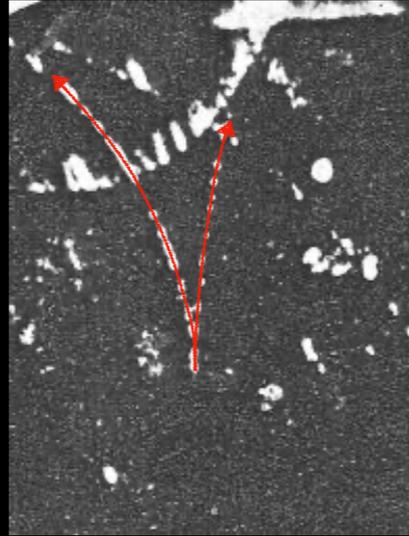
Le sens de la courbure indique la charge de la particule et sa masse peut être déduite de l'épaisseur de la trace. Un électron suit ainsi le trajet en rouge et il observe la trace en noir : mêmes caractéristiques que la trace d'un électron sauf la courbure se trouvant être dans le mauvais sens : qu'à cela ne tienne, il s'agit donc d'un électron de charge positive, une nouvelle particule inconnue jusqu'à présent. (15 traces dans 1300 photos)

Au moment de sa découverte, Anderson n'est pas au courant des hypothèses émises en 1929 de Dirac sur l'existence d'électron de charge positive ... Il vient en fait de prouver l'existence de l'anti-matière et confirmera la première prédiction par la théorie de l'existence d'une nouvelle particule.

L'électron de 63 MeV (99% de la vitesse de la lumière)

De nouvelles particules

1934 Le positron

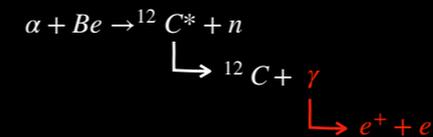


J. Phys. Radium, 1933, 4 (8), pp.494-500

ÉLECTRONS DE MATÉRIALISATION ET DE TRANSMUTATION
Par I. CURIE et F. JOLIOU.

Sommaire. — Les auteurs montrent que le rayonnement pénétrant excité par les rayons α dans le glaucinium fait sortir des électrons positifs de la matière qu'ils traversent, principalement des éléments lourds. Ce sont les rayons γ qui produisent ces électrons.
Les rayons γ du TbC^* ont la même propriété.
On peut interpréter cette émission en supposant qu'un rayon γ au moment d'un choc sur un noyau peut se transformer en deux électrons, un positif et un négatif. Cette « maté-

« ... un rayon γ au moment d'un choc sur un noyau peut se transformer en deux électrons, un positif et un négatif. »



Une petite note de vocabulaire : en français l'"électron de charge positive s'appelle positon, les anglais l'appellent le positron.

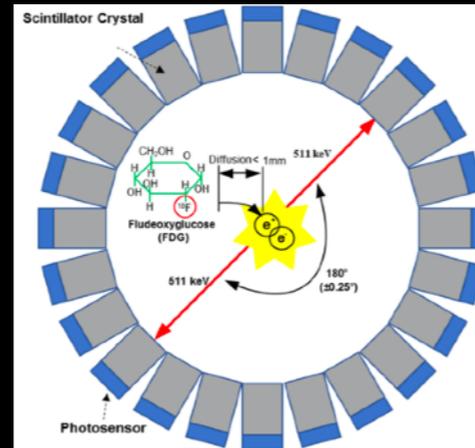
En apprenant la nouvelle de cette découverte, à Cambridge et à Paris se trouvèrent fort marris : à Cambridge, les traces du positon ont été soit mal interprétées, soit peu convaincantes. Mais à Paris, Irène et Frédéric Joliot avaient, avant Wilson, observés très distinctement des traces de positon mais ils les avaient mal interprétées se trompant dans la direction du mouvement des positons qui du coup sont vus comme des électrons. Pas de chance !

Cependant ils se rattrapent quelques mois après la publication du positon en montrant que les rayons X, produits en même que les neutrons se matérialisent en une paire électron-positon.

La célèbre relation proposée par Einstein $E = mc^2$ (dédit de la relativité restreinte) se trouve ainsi vérifiée expérimentalement.

Le positon

Application

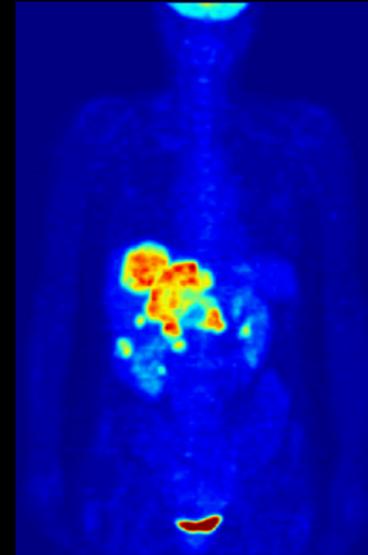
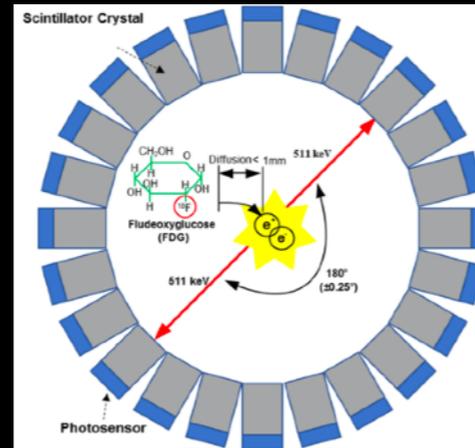


Comme les rayons X, la radioactivité artificielle eut immédiatement des applications médicales. Les traceurs radioactifs, faits à partir d'éléments radioactifs de faible durée de vie (donc préparés à l'hôpital), se fixent sur des organes à étudier et émettent un rayonnement gamma (annihilation d'un électron et d'un positon) capté par le scintigraphe. \rightarrow TEP (Tomographie par Emission de Position).

Tomographie par émission de positons. Un élément radioactif artificiel, le Fluor 18 (un neutron de moins que le Fluor 19 classique) est incorporé à une solution de glucose. Les cellules cancéreuses, à forte activité, ont besoin d'énergie sous forme de glucose et fixent la solution. Les positons émis par radioactivité β par le fluor vont s'annihiler avec des électrons et émettre des photons γ , visibles sur le cliché, et permettant de localiser les cellules cancéreuses.

Le positon

Application

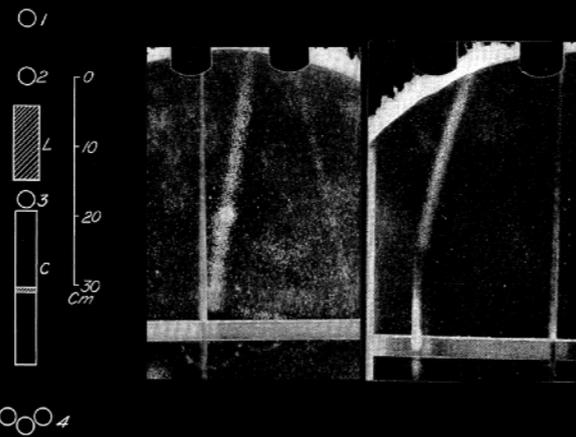


Comme les rayons X, la radioactivité artificielle eut immédiatement des applications médicales. Les traceurs radioactifs, faits à partir d'éléments radioactifs de faible durée de vie (donc préparés à l'hôpital), se fixent sur des organes à étudier et émettent un rayonnement gamma (annihilation d'un électron et d'un positon) capté par le scintigraphe. \rightarrow TEP (Tomographie par Emission de Position).

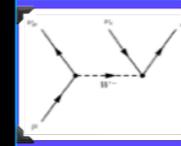
Tomographie par émission de positons. Un élément radioactif artificiel, le Fluor 18 (un neutron de moins que le Fluor 19 classique) est incorporé à une solution de glucose. Les cellules cancéreuses, à forte activité, ont besoin d'énergie sous forme de glucose et fixent la solution. Les positons émis par radioactivité β par le fluor vont s'annihiler avec des électrons et émettre des photons γ , visibles sur le cliché, et permettant de localiser les cellules cancéreuses.

De nouvelles particules

1937 Le muon



New evidence for the existence of a particle of mass intermediate between the proton and electron,
J.C. Street and E.C. Stevenson, Phys. Rev. Lett., (1937), 52, 1003.



Nom	muon
Symbole	μ^-
Classification	particule élémentaire
Groupe	lepton
Famille	fermion
Génération	deuxième
Masse	$1,88 \times 10^{-28}$ kg (105 MeV/c ²)
Charge électrique	-1 e ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
Spin	1/2
Durée de vie	$2,2 \times 10^{-6}$ s
Découverte	1936
Découvreur	Carl Anderson

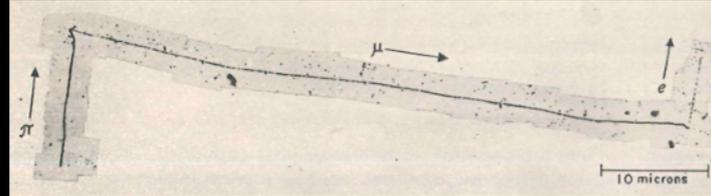
Il faudra attendre près de 5 ans pour qu'une autre nouvelle particule se fasse connaître. Aux commandes, encore Anderson qui, avec un appareillage encore plus sophistiqué reposant toujours sur le trio chambre à brouillard, champ magnétique, et plaque d'absorption, continue à capturer les rayons cosmiques. Les photos sont de bien meilleures qualités grâce aux progrès technologiques de la photographie et du cinéma : les plaques à émulsions photographiques.

A force de ténacité, beaucoup de patience et une bonne compréhension de la physique des interactions rayonnement-matière, il découvre une particule pénétrante, capable de traverser jusqu'à 1 mètre de plomb : elle a une charge négative, est plus massive que l'électron mais moins que le proton (épaisseur des traces). On appela ces particules des « mésotrons » mésos du grec ancien signifiant « milieu », plus connu de nos jours sous le nom de « muon »

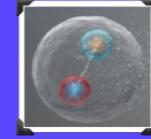
Le dispositif expérimental est le suivant (à gauche sur l'image ci dessus) : un écran de plomb L permet d'absorber les particules issues de cascades et seul des particules pénétrantes peuvent interagir dans la chambre C. La chambre se déclenchait uniquement si les 3 compteurs 1,2,3 se déchargeaient en coïncidence (indiquant le passage d'une particule) sans déchargement du compteur 4, la particule s'étant arrêtée dans la chambre. Parmi 1000 photos, 2 ont montrés à gauche à un proton, et à droite à une particule avec une masse calculé à 175 masse électronique (avec une erreur de +/- 25%). Le tracé de droite, correspondant à un muon (mésoton) négatif venant par le haut, le proton ne subit pas de déviation de trajectoire tandis que celle du muon est légèrement courbée par le champ magnétique du fait de sa masse 10 plus faible par rapport à celle du proton.

De nouvelles particules

1947 Le pion



Processes involving charged mesons, Lattes, Muirhead, Occhialini, Powell, Nature 159, 694 (1947)



Nom	pion
Symbole	π^-
Classification	particule composite
Groupe	méson
Famille	boson
Génération	-
Masse	$2,49 \times 10^{-28}$ kg (140 MeV/c ²)
Charge électrique	-1 e ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
Spin	0
Durée de vie	$2,6 \times 10^{-8}$ s
Découverte	1947
Découvreur	Powell, Lattes, Occhialini

Puis les émulsions photographiques remplacent les chambres à brouillard.

En 1947, Cecil Powell et Occhialini exposent des plaques à émulsion photographique en altitude (Pic du Midi, Jungfraujoeh, Kilidmandjaro, Chacaltaya) et observent plusieurs traces semblables à celle représentée dans la figure.

On y voit une première trace, notée π , entrant dans l'émulsion et s'arrêtant peu après. Une comparaison avec des traces de protons dans la même émulsion montre que cette particule est un méson (particule de masse intermédiaire entre celle d'un électron et d'un proton). Une autre trace, notée μ , apparaît à partir du point d'arrêt de la première trace. Elle aussi s'arrête et peut être identifiée à un méson. En mesurant précisément l'épaisseur de la trace on peut déterminer la masse des particules : la particule μ est plus légère (106 MeV/c²) que la particule π (140 MeV/c²). La particule μ se désintègre ensuite en un électron et un neutrino qui ne laisse aucune trace dans l'émulsion.

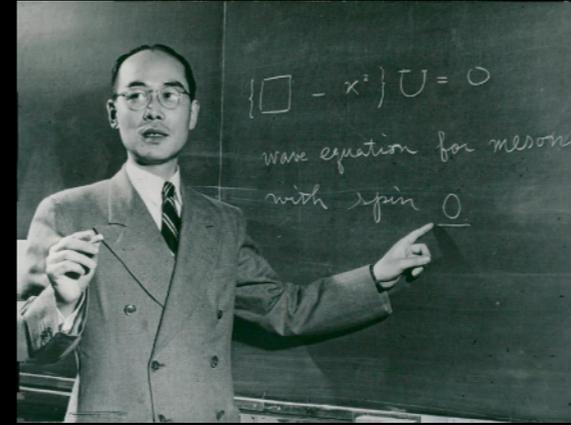
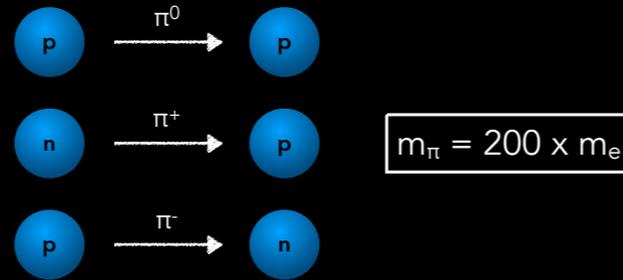
Powell et Occhialini interprètent ces observations comme la preuve de l'existence de deux mésons de masses différentes, où le plus léger provient de la désintégration du plus lourd.

Et une nouvelle particule de plus : le méson pi.

Cette découverte n'est pas entièrement inattendue : le physicien japonais Hideki Yukawa avait prédit son existence dix ans plus tôt comme une conséquence de sa théorie de l'interaction forte entre protons et neutrons interaction s'exprimant par l'échange d'un méson pi ou pion.

De nouvelles particules

1935 Le pion de Hideki Yukawa



Proc. Phys.-Math. Soc. Japan 17, 48-57 (1935)

On the Interaction of Elementary Particles. I.

By Hideki YUKAWA.

(Read Nov. 17, 1934)

§ 1. Introduction

At the present stage of the quantum theory little is known about the nature of interaction of elementary particles. Heisenberg considered the interaction of "Platzwechsel" between the neutron and the proton to be of importance to the nuclear structure.⁽¹⁾

Hideki Yukawa, physicien théoricien japonais, professeur à l'université d'Osaka. Premier japonais lauréat du prix Nobel (1949). Sera celui par lequel le Japon est entré dans la cours des nations de la physique.

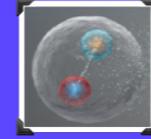
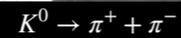
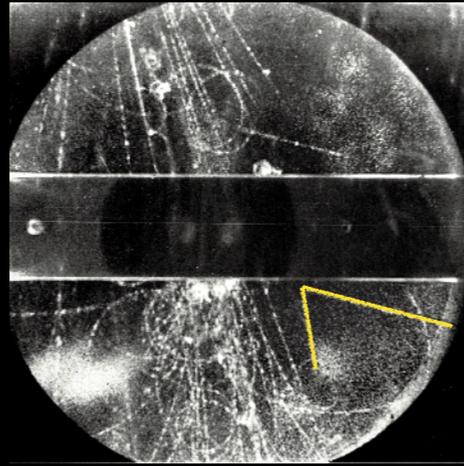
1935 : Le photon étant associé à la force électromagnétique, Yukawa se demande quels sont les quanta associés à la force nucléaire. La portée des forces nucléaires est de l'ordre de $r_0=10^{-15}$ m (taille du noyau). On peut interpréter la force entre deux nucléons comme étant due à l'émission d'un quantum par l'un d'eux et à son absorption par l'autre. Pour aller d'un nucléon à l'autre, le quantum a besoin d'un temps $t>r_0/c$. Pendant le temps de transit la conservation de l'énergie est violée, puisqu'on doit prendre en compte la masse du quantum et l'énergie correspondante (mc^2). Cette énergie, selon le principe d'indétermination de Heisenberg, doit vérifier $\Delta E \Delta t = h/2\pi = h/2\pi r_0/c$ d'où m égal à 200 fois la masse de l'électron ou $mc^2=102$ MeV. En outre cette particule doit apparaître sous 3 formes de charge électrique différente : neutre ($n-n$ et $p-p$) et + ($n-p$) et - ($p-n$), la valeur absolue étant égale à celle de la charge du proton.

Publication dans Journal of the Mathematical and Physical Society of Japan n'eut pas un grand retentissement, l'idée est perçue comme une intéressante spéculation.

Noter que le titre de l'article est Interaction des particules ELEMENTAIRES

De nouvelles particules

1947 Le kaon



Nom	kaon
Symbole	K^0
Classification	particule composite
Groupe	méson
Famille	boson
Génération	-
Masse	$8,86 \times 10^{-28}$ kg (497 MeV/c ²)
Charge électrique	0
Spin	0
Durée de vie	$5,2 \times 10^{-8}$ s
Découverte	1947
Découvreur	Rochester, Butler

Et une petite dernière pour finir.

1946, retour à Manchester et à la bonne vieille chambre à brouillard, les physiciens Rochester et Butler observent des traces ayant la forme de la lettre V. Une seule origine est possible : elles proviennent d'une particule dont la masse est approximativement 494 MeV/c² et qui se désintègre en émettant deux pions. Événement unique pendant un an. Nouvelle particule appelée V, aujourd'hui K⁰.

Cette particule parfaitement inattendue montre un comportement étrange, une durée de vie anormalement longue ... une curiosité donc qui lui valut d'être baptisée particule étrange

De nouvelles particules

Toujours plus avec les accélérateurs

1932 l'année des accélérateurs : cyclotron, van de Graaf, Cockcroft Walton



accélération = charge x E / masse

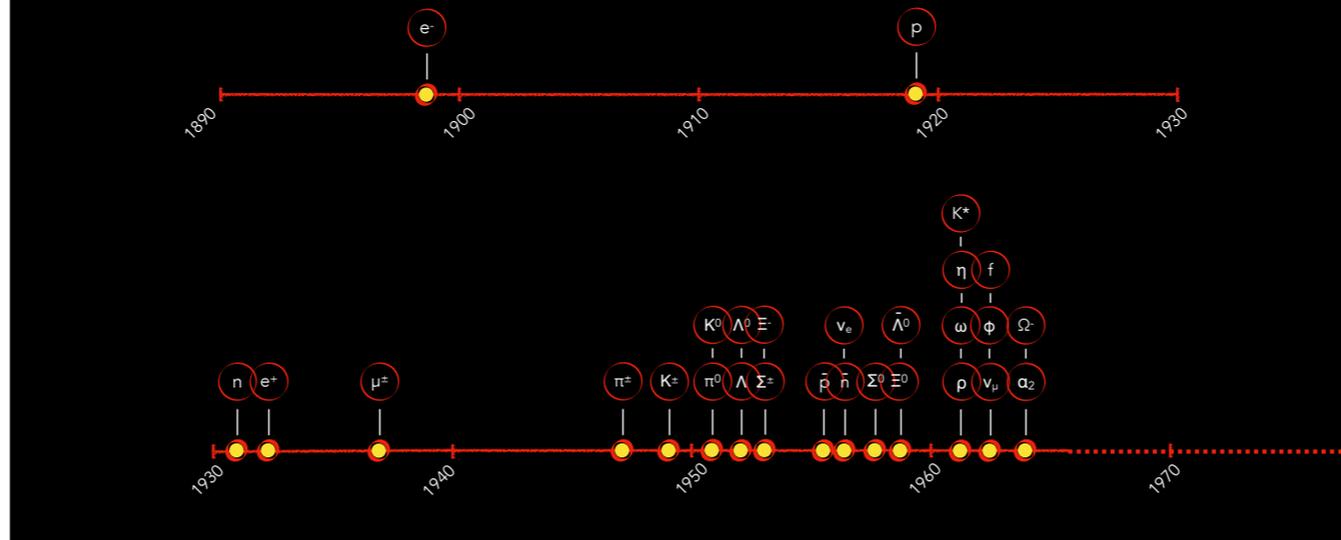
A partir des années 1950, toujours plus de nouvelles particules purent être créées grâce à un outil développé dès 1932 : l'accélérateur

Tous les accélérateurs partent du même principe : faire passer des particules chargées dans un champ électrique qui leur confère une vitesse $F = qE = m \gamma v$: Ce qui change d'un type d'accélérateur à l'autre c'est la façon de créer le champ électrique et la façon de faire passer les particules dans ce champ. A cela s'ajoute une myriade de détails qui font qu'un accélérateur est un instrument complexe. Le tube de Crook est le premier type d'accélérateur ... d'électrons.

De nouvelles particules

Toujours plus avec les accélérateurs

Particules élémentaires 400



Après 1950, les accélérateurs deviennent suffisamment performants pour créer de nouvelles particules beaucoup de nouvelles particules et comme disait alors Enrico Fermi « Si je pouvais retenir le nom de toutes ces particules, je serai botaniste ». Le nombre de particules nouvelles découvertes chaque années devient même embarrassant au point que lors de son discours de réception du prix Nobel en 1955, Willis Lamb dira : « qu'il a entendu dire que le découvreur d'une nouvelle particule recevait d'habitude le prix Nobel, mais une telle découverte devrait dorénavant être punie d'une amende de 10,000\$. »

Découvrir de nouvelles particules c'est bien, expliquer pourquoi elles existent est mieux.

Classer les particules

Les critères : les interactions

- Gravitationnelle

Quand on a beaucoup d'éléments d'une collection, comme pour les timbres ou les canards en plastique, il faut trier et classer.

Et pour cela, il faut trouver des critères qui permettent de définir des catégories où chacune des particules trouve sa place.

Le critère le plus simple consiste à définir la ou les forces auxquelles une particule est soumise.

Passons rapidement en revue les 4 forces fondamentales qui structurent tous les objets de la nature et organisent leur mouvement. L'interaction gravitationnelle est celle qui nous est la plus familière (celle qui fait que nous gardons les pieds sur Terre, fait tomber les pommes des arbres et la Terre de tourner autour du soleil). Toutes les particules sans aucune exception sont sujettes à la gravitation, y compris les particules sans masse comme le photon (car $E=mc^2$). La gravitation ne nous fournit donc pas un critère pour notre classement.

Classer les particules

Les critères : les interactions

- ~~Gravitationnelle~~
- Electromagnétique

L'interaction électromagnétique nous est aussi familière, c'est elle qui intervient lorsque deux objets chargés se rencontrent. Elle assure la cohésion des atomes et des molécules (et donc de cette table), gouverne toutes les réaction chimiques et phénomènes optiques. Elle, non plus, ne va nous aider pour notre classement des particules. Trier en fonction de la charge électrique des particules n'est pas une solution.

Classer les particules

Les critères : les interactions

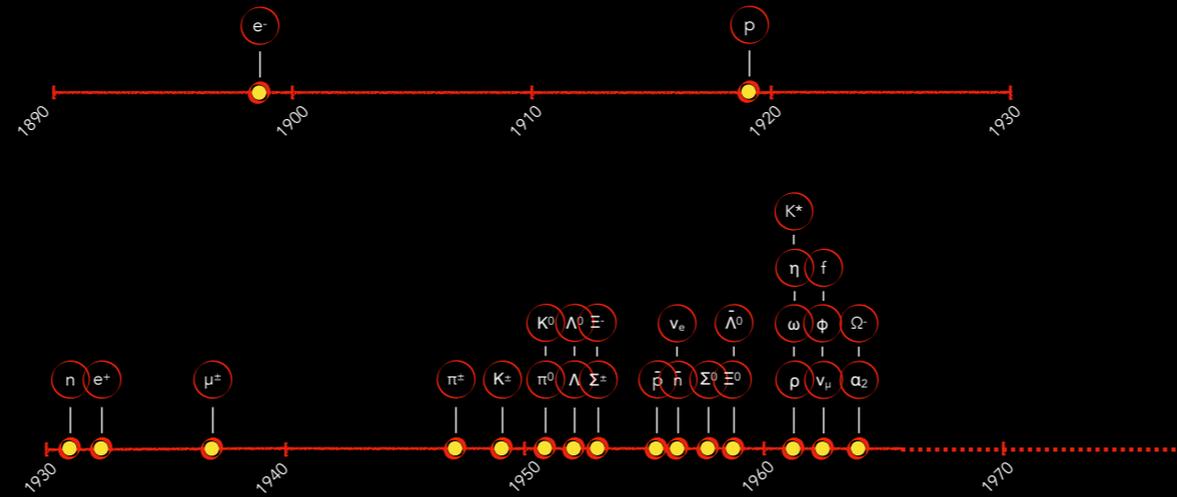
- ~~Gravitationnelle~~
- ~~Electromagnétique~~
- Forte

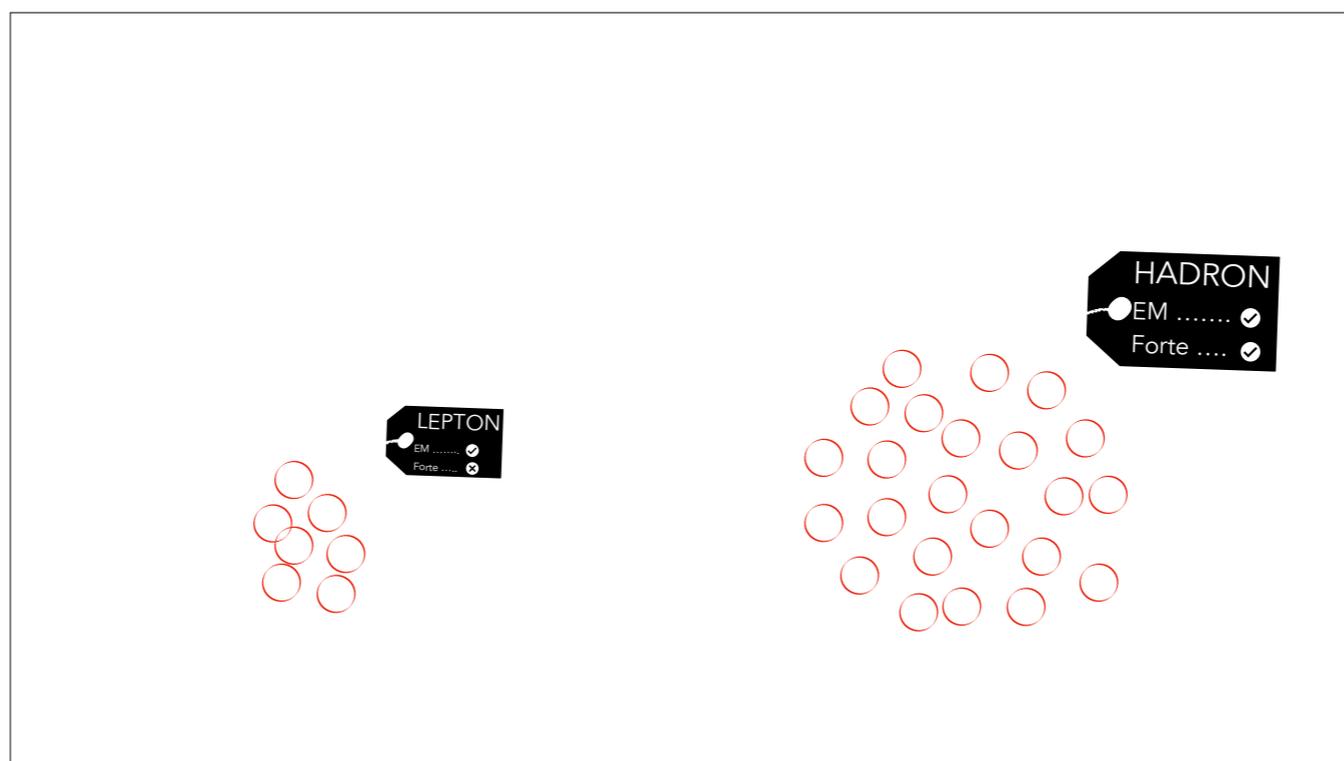
L'interaction forte n'intervient pas dans les processus de la vie courante, nous y sommes insensibles car sa portée est extrêmement courte, de l'ordre du fm, c'est-à-dire un milliardième de milliardième de mm, contrairement aux deux forces précédentes dont la portée est infinie. C'est pourtant la plus musclée de toutes les interactions fondamentales. Elle garantit la stabilité de la matière : sans elle aucune matière structurée ne peut exister, à commencer par le proton ou le neutron. En mesurant les propriétés des nombreuses particules, comment elles sont formées ou comment elles se désintègrent, on a pu classer les particules en deux catégories : celles qui subissent l'interaction forte et celles qui ne la subissent pas. C'est tout bête!

De nouvelles particules

Toujours plus avec les accélérateurs

Particules ~~élémentaires~~ 400



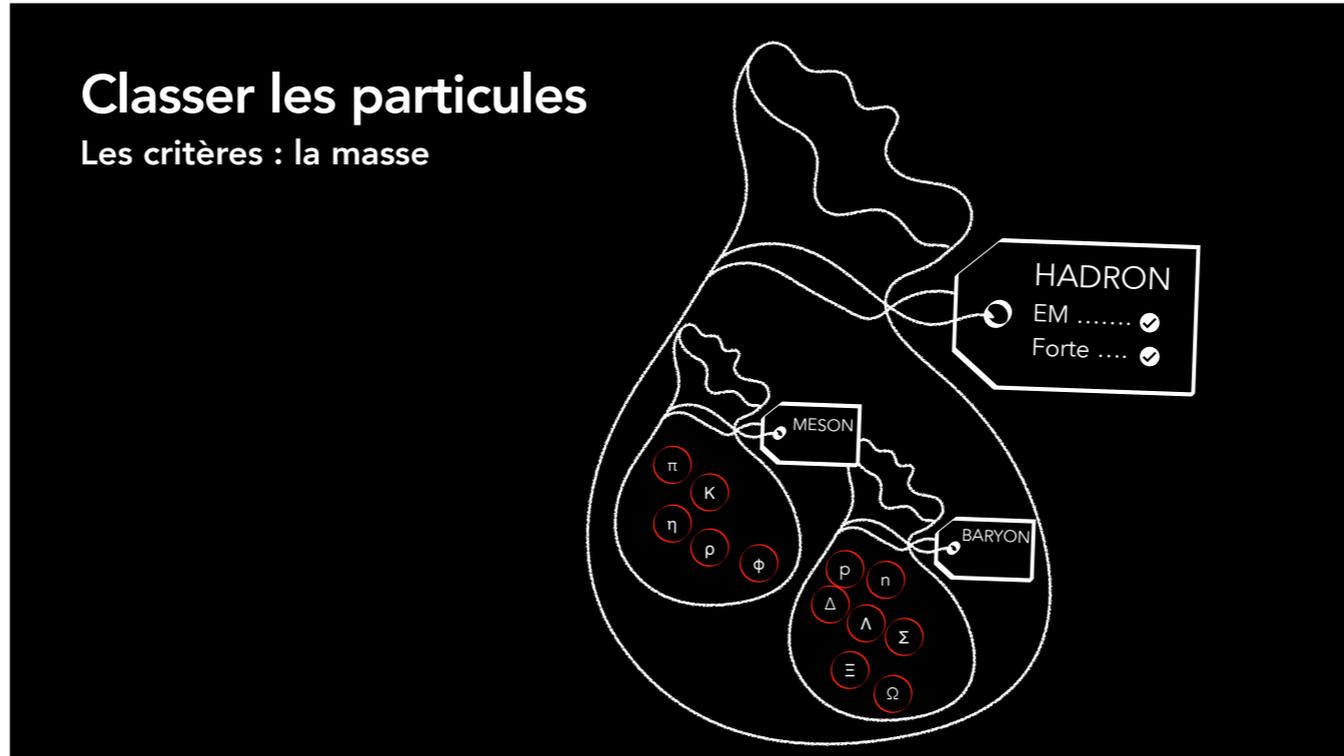


Une particule de matière n'a pas d'autre choix que d'être un hadron ou un lepton. Hadron du grec hadros = fort. Lepton du grec leptos = mince.

Il se trouve que les leptons sont tous des particules élémentaires alors que les hadrons sont tous des particules composites, comme nous allons le voir dans quelques minutes.

Classer les particules

Les critères : la masse

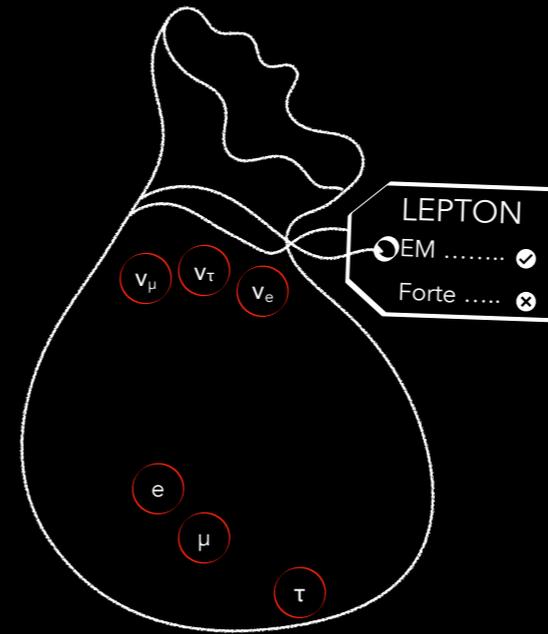


Les hadrons sont ensuite regroupés en deux familles qui se distinguent par leur masse : les gros ou baryons (du grec baryos, les gros) ont une masse supérieure à celle du proton et les mésons (du grec mesos le milieu) ont une masse intermédiaire entre celle de l'électron et celle du proton. Bien que ce critère ne tienne plus aujourd'hui, il existe des mésons plus lourds que le proton, la dénomination est restée et se réfère au nombre de sous structures de chaque particule Ça deviendra plus clair dans quelques instants.

Classer les particules

Les critères : les interactions

- ~~Gravitationnelle~~
- Electromagnétique
- Forte
- Faible



Une dernière interaction la plus faible des interactions nucléaires est justement appelée interaction faible. Elle n'intervient pas dans la classification des particules. Elle est responsable de la radioactivité β (qui joue un rôle déterminant dans la nucléosynthèse, c'est-à-dire la formation des noyaux d'atomes) et plus généralement de tout processus faisant intervenir un neutrino; initie les réactions thermonucléaires qui permettent au soleil de produire l'énergie qui nous fait vivre, et pendant très longtemps justement parce que l'interaction est faible.

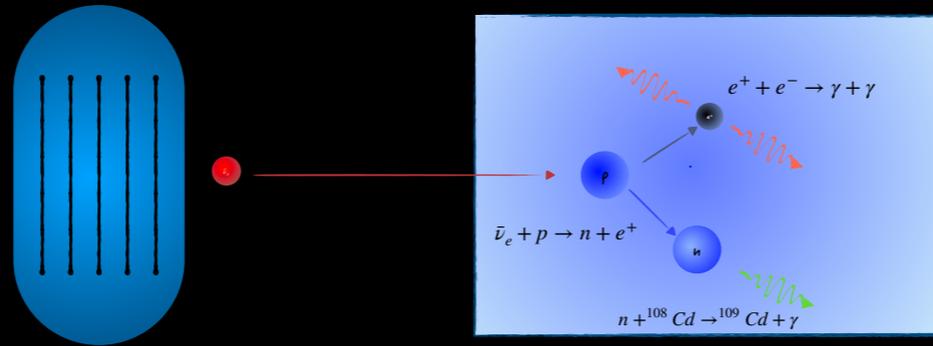
Sa portée n'est que d'un millième de fermi

Et on rencontre une particule d'un type bien particulier : le neutrino, particule de masse quasi nulle, mais pas exactement nulle, sans charge électrique et qui intervient uniquement dans les processus mettant en jeu l'interaction faible.

Le neutrino

Une particule à part ...

- 1930 : Wolfgang Pauli « remède pour sauver la conservation d'énergie »
- 1932 : Enrico Fermi « le petit neutre »
- 1956 : Frederik Reines & Clyde Cowan « le neutrino existe »



Le neutrino a été inventé en 1930 par Wolfgang Pauli pour résoudre un problème de conservation d'énergie observé dans la radioactivité beta (conservation que Niels Bohr était prêt à sacrifier dans les processus sub-nucléaire et qui conduisit les Jolio-Curie dans l'embarras ne sachant pas reconnaître le neutron). Il est léger, neutre et interagit très faiblement avec la matière. Il pensait qu'il faisait partie du noyau (principe dentifrice) et l'a d'abord appelé le neutron.

Après la découverte du neutron en 1932, Enrico Fermi, lors d'une conférence à Paris, propose de le rebaptiser. Neutron en italien neutrone = le gros neutre, comme la particule de Pauli a une masse nulle ou presque, il l'appelle le petit neutre qui en italien donne neutrino

En 1956 deux physiciens américains, Frederik Reines et Clyde Cowan envoient un télégramme à Pauli annonçant que le neutrino existe. Pauli répondra laconiquement « Je sais ».

Ils placèrent un détecteur à 12 m sous terre et à 11 m d'un réacteur nucléaire dans lequel les neutrinos sont créés en très grand nombre par radioactivité beta dans la chaîne de désintégration des produits de fission : 50.000 milliards de neutrinos par seconde et par cm². Le détecteur consiste en deux cuves remplies chacune de 200 l d'eau à laquelle est rajoutée du Cadmium qui a la propriété de capturer les neutrons produits lorsque un neutrino interagit avec un proton du noyau d'hydrogène accompagné d'un positon. Au final on doit observer 2 flashes de lumière caractéristique, l'un dû à l'annihilation du positon et l'autre dû à l'absorption du neutron par le cadmium. Des scintillateurs (non représentés sur la figure) équipés de photomultiplicateurs détectent ces flashes.

Ils ont détectés ainsi 3 neutrinos par heure !

Ces particules sont les plus abondantes de l'univers qu'elles fassent hors du soleil ou qu'elles nous inondent lors d'explosion de supernovae, ou qu'elles ont envahi l'univers depuis toujours ou presque (comme nous le verrons lors du prochain cours). Ainsi à l'instant où je vous parle, 100 milliards de neutrinos traversent chaque seconde l'ongle de mon pouce. Et pourtant je n'ai rien senti : en effet les neutrinos interagissent très peu avec la matière, la Terre est pour eux complètement

transparente. Ces particules restent pourtant encore très mystérieuses et posent de nombreuses questions auxquelles la physique ne sait pas encore répondre.

Classer les particules

Les critères : Q et S



Reste à affiner le classement. Un nouveau critère est fournie par l'étrange particule K qui se signale dans la chambre de brouillard par 2 traces en forme de V. On va donc coller aux particules une étiquette, qu'on va appeler l'étrangeté S qui ne peut prendre que des valeurs entières (0, +1, +2, +3,.. -1, -2, -3...): c'est un nombre quantique. L'étrangeté d'un système est égale à la somme des étrangetés de chaque constituant du système et on va imposer que dans les réactions gouvernées par l'interaction forte et EM, l'étrangeté soit conservée, c'est-à-dire que l'étrangeté a la même valeur avant et après la réaction.

Considérons, par exemple, la production des Kaons dans une réaction où un faisceau de pions bombarde une cible d'H (donc de protons). On observe que les K sont toujours produits accompagnés par une autre particule lambda. Avec cette étiquette d'étrangeté, il suffit d'attribuer +1 à K, -1 à lambda et 0 à pi et p et le critère de conservation est satisfait.

Cette astuce permet aussi d'expliquer la durée de vie observée anormalement longue des particules étranges : ces particules ne peuvent se désintégrer que par des processus rares gouvernés par l'interaction faible, processus dans lesquels l'étrangeté n'est pas conservée.

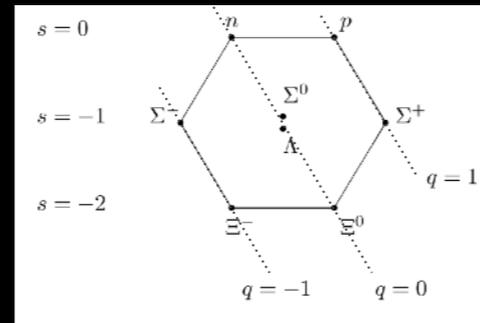
On peut ensuite regrouper les particules de masses similaires et les classer en fonction de leur charge électrique et de leur étrangeté.

A partir de là, il suffit d'être un peu pointu en mathématiques, de maîtriser les concepts de la théorie des groupes, d'être à l'aise avec les symétries pour classer les particules en familles d'une façon qui rappelle la classification périodique de Mendeleev c'est-à-dire ordonner un grand nombre d'éléments en fonction d'un petit nombre de propriétés reconnues comme fondamentales. Il n'y a ici a-priori aucune justification théorique, que des outils mathématiques qui permettent d'atteindre le but cherché : classer les particules.

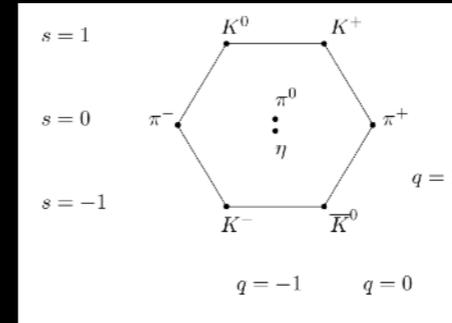
Et la magie opère : tout comme pour le tableau périodique des éléments, les régularités observées sont tellement claires qu'elles permettent de prévoir l'existence de particules manquantes.

Classer les particules

Les critères : Q et S



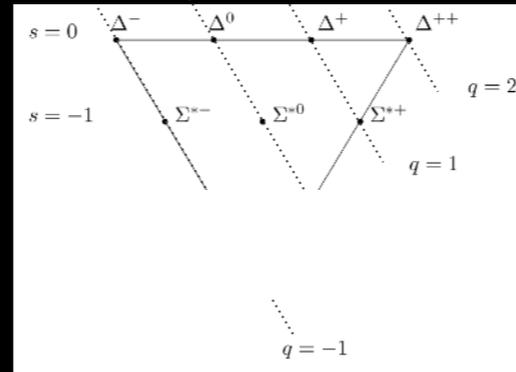
Octet des baryons



Octet des mésons

Classer les particules

Les critères : Q et S



Décuplet des baryons (juin 1962)

A titre d'exemple, prenons le groupe appelé décuplet des baryons. Toutes ces particules ont des masses similaires et on les dispose selon leur charge électrique et selon leur étrangeté.

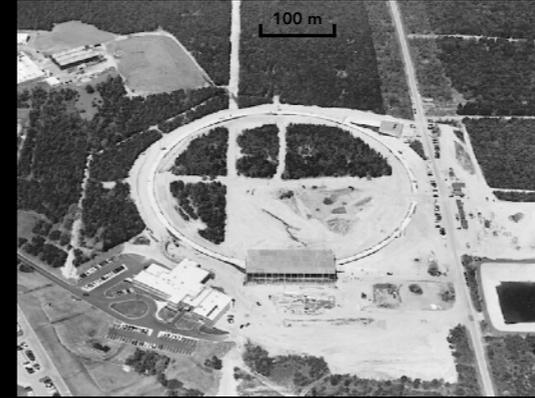
Cette figure a été composée lors d'une conférence à Genève en 1962. Avant la conférence seules étaient connues les particules des deux premiers rangs ($S=0, -1$). La découverte de deux nouvelles particules ($S=-2$) est annoncée lors de la conférence. Murray Gell Mann qui est à l'auteur de cette classification mathématique, commence à construire le décuplet et le jour suivant prédit l'existence d'une nouvelle particule qu'il baptise : Ω^- parce que cette particule est la dernière du décuplet tout comme Ω est la dernière lettre de l'alphabet. Il prédit la valeur de sa masse : $m_{\Omega} = m_{\Xi} + (m_{\Xi} - m_{\Sigma}) = m_{\Xi} + (m_{\Sigma} - m_{\Delta})$. Nikolas Samios, expérimentateur à Brookhaven, discute avec Gell-Mann et au retour de la conférence se lance à la chasse du Ω^- .

La chasse au baryon Ω

1962 AGS et chambre à bulles

Les protons les plus rapides du monde

- 99,96 % vitesse de la lumière
- 50.000 milliards de protons par pulse de 500 μ s



Le laboratoire de Brookhaven situé sur Long Island près de la ville de New York, dispose en effet de deux champions du monde :

L'accélérateur : Alternating Gradient Synchrotron, 810 m de circonférence , un nouveau concept innovant pour accélérer des protons à 33 GeV (299677.8666655149 km/s, 99.96 % de c), champion du monde dès 1960.

La chasse au baryon Ω

1962 AGS et chambre à bulles

Les protons les plus rapides du monde

Le plus grand détecteur du monde

- L = 2 m, D = 0.8m
- 1000 l H₂ liquide
- Aimant 30 t, 20.000 gauss



Le plus grand détecteur du monde :

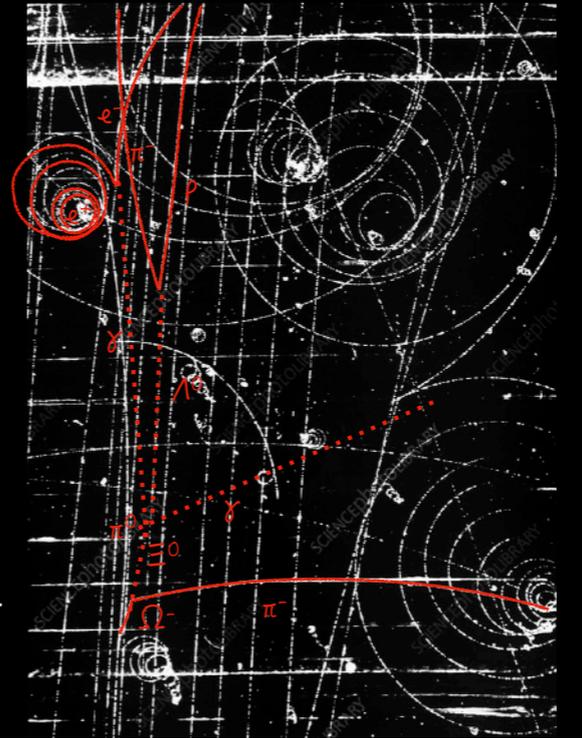
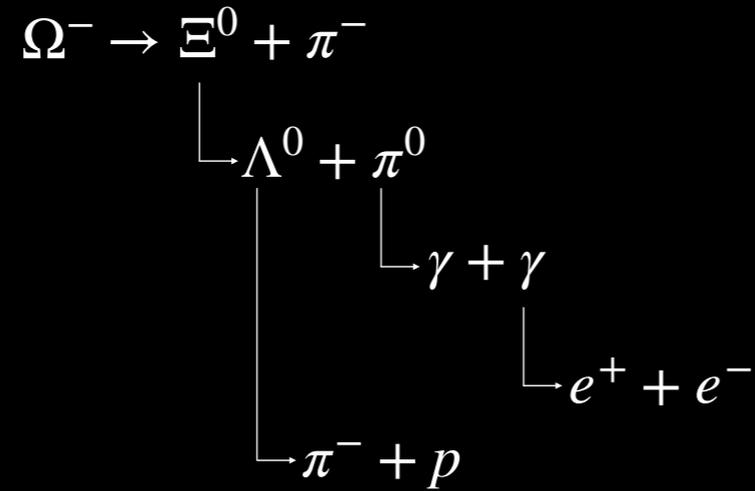
Une chambre à bulles, inventée en 1953 par Donald Glaser, physicien nucléaire à l'Université du Michigan, prix Nobel de physique 1960.

L'idée du principe de la chambre à bulles lui est venue suite à une plaisanterie de ses collègues qui l'avaient mis au défi d'expliquer la profusion des bulles remontant dans leur verre de bière. Il remplace le gaz des chambres à brouillard par un liquide (H, Xe), augmentant ainsi la densité d'un facteur mille. Le liquide est à son point d'ébullition, des bulles sont formées au passage d'un ion lorsque la pression est soudain abaissée et que le liquide est ainsi amené au-dessus de son point d'ébullition.

En maintenant sous pression un liquide que l'on chauffe, on l'empêche de bouillir. Si on relâche brusquement la pression, le liquide ne se met pas aussitôt à bouillir : il reste provisoirement dans un état métastable, dans lequel la moindre perturbation suffit à faire démarrer localement l'ébullition. Lorsqu'une particule chargée traverse un tel liquide, elle agit justement comme une perturbation, de sorte que de petites bulles apparaissent au sein du liquide, formant une trainée que l'on identifie à la trajectoire de la particule.

La chasse au baryon Ω

1963 εὔρηκα



La chambre à bulles fournit des millions de clichés qu'il convient de scruter rapidement par des méthodes semi-automatiques et d'analyser les résultats à l'aide d'ordinateurs.

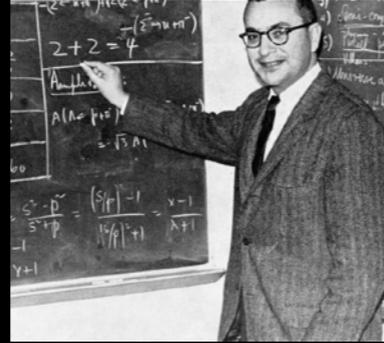
En juin 1963 : après analyse de 80.000 photos de la chambre à bulles de l'AGS, la particule est trouvée telle qu'elle a été prédite.

Omega \rightarrow Xi 0+ pi-; Xi0 \rightarrow lambda pi0; pi0 \rightarrow gamma + gamma; gamma \rightarrow e+ + e-; lambda \rightarrow P + pi-

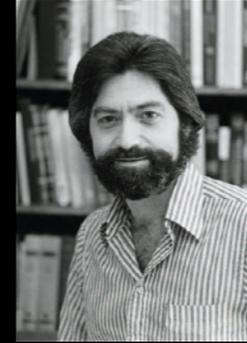
Le classement marche mais on ne sait pas expliquer pourquoi. Quels sont les principes de physique sous-jacents.

La théorie sous jacente

1964 de nouvelles entités élémentaires



Murray Gell Mann : les quarks



George Zweig : les as

Le classement De Gell Mann reposait sur des idées mathématiques abstraites sans fondement physique. Deux théoriciens, les deux de Caltech, l'un étudiant l'autre professeur, découvrent que l'on peut justifier la théorie mathématique en supposant que toutes les particules sont composées de 3 types de particules fondamentales pour les baryons et de deux pour les mésons.

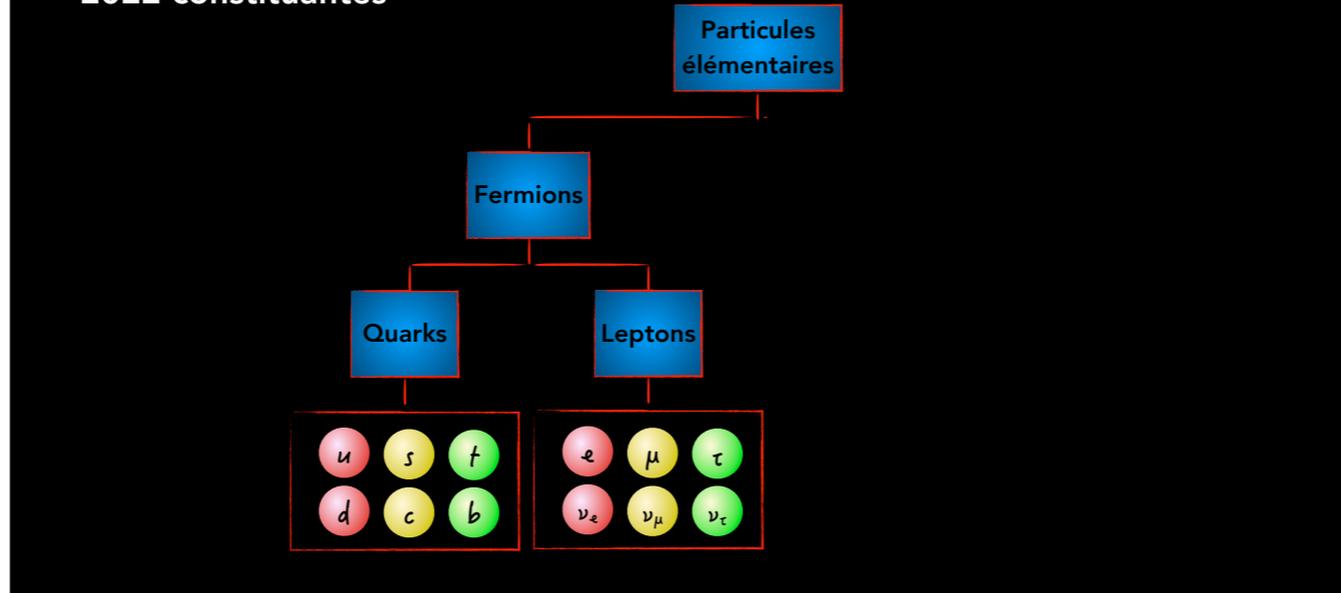
Pour être historiquement correct, le premier qui a suggéré l'existence d'une sous-structure des particules est le théoricien américain d'origine russe George Zweig, l'étudiant. Il avait nommé ces particules élémentaires AS comme les as d'un jeu de cartes parce qu'il supposait qu'il y en avait 4 types différents. Il rédigea l'article lors d'un séjour postdoctoral au CERN qui imposait la publication dans un journal européen Il n'a jamais publié autre chose qu'une publication interne du CERN.

L'autre, le professeur, était Murray Gell Mann. Il appelle ces nouvelles particules constituantes d'abord d'un nom volontairement absurde kwork ... avant de lire Finnegans Wake de James Joyce et de les rebaptiser quark. Gell-Mann publia dans un journal ... Européen, Physics Letters, plutôt que dans le plus prestigieux Physics Review Letters car il trouvait son idée trop audacieuse et craignait un rejet de l'article par l'éditeur. Seuls les quarks sont restés .

Et cette hypothèse stipulant que le proton, par exemple, est composé de 3 quarks a été vérifié expérimentalement en 1967 comme je l'ai raconté l'année dernière ... et il n'est pas nécessaire de raconter à nouveau l'histoire de la découverte des quarks supplémentaires.

Les particules élémentaires

2022 constituantes



J'avais terminé le cours de l'année dernière en montrant nos connaissances actuelles des particules élémentaires, celles qui constituent la matière. Ce tableau reste toujours d'actualité et à mon avis n'est pas prêt d'être remis en question de sitôt.

Pour fabriquer les protons et les neutrons et donc tous les noyaux de tous les éléments connus, il suffit de deux types de quarks. Pour fabriquer les atomes de tous les éléments connus il suffit d'ajouter l'électron. Le neutrino électronique est nécessaire pour expliquer un certains nombres de processus naturels, tels la radioactivité, la fusion de l'hydrogène dans les étoiles. On pourrait se passer de tous les autres quarks ou leptons, on sait simplement qu'ils existent ou plutôt ont existé et qu'on sait les recréer furtivement. On remarquera également la remarquable symétrie entre quarks et leptons, il y a 3 familles de chaque. Pourquoi 3 on n'en sait rien, pourquoi n'y-a-t-il pas plus de quarks ou de leptons on n'en sait rien.

Ceci résume j'espère assez bien ce cours dédié à la traque des particules élémentaires Il en reste encore beaucoup (48 en tout ... faite le compte!)

On y trouve également les bosons Mais ça c'est une autre histoire que je raconterai lors du cours 4.

Three quarks for Muster Mark!
Sure he hasn't got much of a bark
And sure any he has it's all beside the mark.
But O, Wreaneagle Almighty, wouldn't un be a sky of a lark
To see that old buzzard whooping about for uns shirt in the dark
And he hunting round for uns speckled trousers around by Palmer-stown Park? Hohohoho,
moulty Mark!
You're the rummest old rooster ever flopped out of a Noah's ark
And you think you're cock of the wark.
Fowls, up! Tristy's the spry young spark
That'll tread her and wed her and bed her and red her
Without ever winking the tail of a feather
And that's how that chap's going to make his money and mark

James Joyce dans *Finnegans Wake*

Quark le cri d'un canard

Finnegans Wake est une œuvre littéraire de l'Irlandais James Joyce écrit pendant 17 ans après son roman de référence Ulysse. C'est une œuvre inclassable considérée comme un monument littéraire du XX^{ème} siècle par les uns et jugée illisible et intraduisible par les autres. Il faudra 20 ans au traducteur de Gallimard pour le traduire. La phrase Three quarks for Muster Mark de Finnegans Wake (début du chapitre 4 du livre 2) est à l'origine de la dénomination des quarks en physique nucléaire. Cette phrase est chantée par un chœur d'oiseaux de mer au milieu du rêve éthylique d'un personnage du roman, et signifie probablement « trois acclamations (ou « trois railleries » d'après les notes de Joyce) pour Monsieur Mark ».

Histoires de Particules

Du chaos ... au cosmos

Yves Schutz