

Cargèse - 25 au 31 mars 2007

**Ecole des techniques de base
des détecteurs**

**Pascal Vincent
Université Pierre et Marie Curie
LPNHE, Paris**



Introduction

Les particules et leurs interactions

Détection des particules chargées

Détection des particules neutres

Les systèmes de détection

Visite d'une expérience



Préface

« de quoi parlons nous ? »

Infiniment grand

Univers

Cosmologie

Super-amas

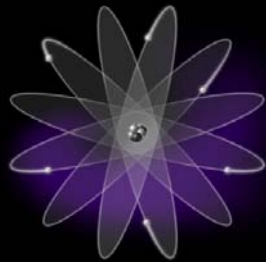


Planétologie

Système Solaire

Terre

*Astrophysique
& Astroparticule*



Infiniment petit

Infiniment complexe

Psychiatrie

La femme

L'homme



Végétaux

Animaux

Biologie

Cellules

Molécules

Physique Chimie

*Physique atomique
& nucléaire*

Atomes

noyaux

nucléons

quarks & leptons

Physique des particules

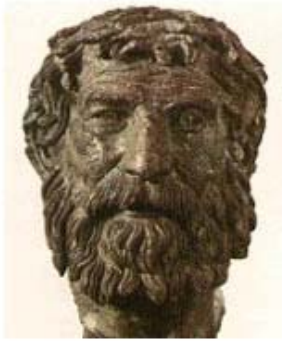
Leçon I

Introduction :

La découverte de la matière,
des interactions fondamentales
et du contenu de l'univers.

Le début de la méthode :

La contemplation



le monde des particules (désire de simplicité)

Au IV^e avant Jésus-Christ : Les grecques suggèrent que l'Univers est formé de quatre éléments (Empédocle) :



Aristote se range à ce modèle continu de la matière.

Démocrite et Epicure sont partisans de l'hypothèse atomiste.

Le début de la méthode :

L'expérimentation



Le monde des particules (désire de simplicité)

XVII^e : Lavoisier compile une liste de **33 éléments** (1789)

«toutes les substances que nous n'aurons pu décomposer par aucun moyen sont pour nous des éléments : non que nous puissions assurer que ces corps, que nous regardons comme simples ne soient pas eux-mêmes composés de deux ou même d'un plus grand nombre de principes, mais puisque ces principes ne se séparent jamais, ou plutôt, puisque nous n'avons aucun moyen de les séparer, ils agissent à notre égard à la manière des corps simples, et nous ne devons les supposer composés qu'au moment où l'expérience et l'observation nous en auront fourni la preuve.»



1793 DES SUBSTANCES SIMPLES. TABLEAU DES SUBSTANCES SIMPLES.	
Noms nouveaux.	Noms anciens correspondans.
Lumière.....	Lumière
Chaleur.....	Chaleur
Calorique.....	Principe de la chaleur.
	Fluide igné.
	Feu
	Matière du feu & de la chaleur.
	Air déphlogistique.
	Air empyreux.
	Oxygène.....
	Air vital.
	Fluide de l'air vital.
	Gas phlogistique.
	Matière.
	Gas inflammable.
	Basé du gas inflammable.
	Soufre.....
	Phosphore.....
	Charbon pur.
	Incense.
	Incensum.
	Radical boracique.
	Radical mercuriel.
	Radical boracique.
	Radical mercuriel.
	Argent.....
	Antimoine.....
	Argent.....
	Arsenic.....
	Bismuth.....
	Cobalt.....
	Cobalt.....
	Cuivre.....
	Cuivre.....
	Encre.....
	Encre.....
	Fer.....
	Manganèse.....
	Mercure.....
	Mercure.....
	Molybdène.....
	Nickel.....
	Or.....
	Or.....
	Platine.....
	Platine.....
	Plomb.....
	Tungstène.....
	Zinc.....
	Zinc.....
	Chaux.....
	Terre calcaire, chaux.
	Magnésie, base du sel d'Épistém.
	Barite, terre pesante.
	Argile, terre de l'Alun, base de l'Alun.
	Alumine.....
	Alumine.....
	Silice.....
	Terre siliceuse, terre vitreuse.

Cette nomenclature servira par la suite de base au système moderne de classification périodique des éléments il introduit les **trois états de la matière (liquides, solides, gaz).**

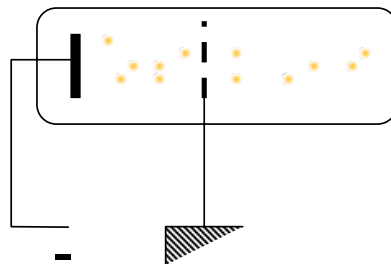
les éléments étranges



Le monde des particules (désire de simplicité)

1878 : William Crookes

Lors de ses investigations sur la conduction de l'électricité dans des gaz à faible pression, il découvrit que lorsque la pression était abaissée, la cathode semblait émettre des rayons lumineux. Ces rayons ont été appelés **rayons cathodiques** ou **matière rayonnante** alors considéré comme le quatrième état de la matière.

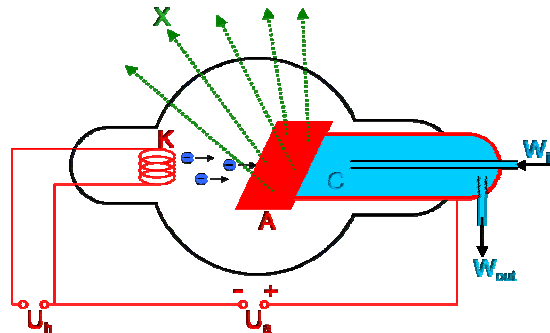
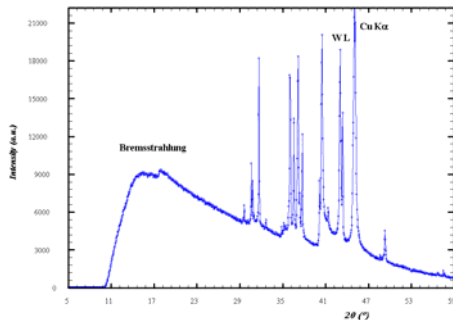




Le monde des particules (désire de simplicité)

1895 : découverte des rayons X par Wilhelm Conrad Röntgen.

A la décharge d'un tube, dans une chambre noire, un carton couvert d'un côté de baryum platino-cyanide devient fluorescent lorsqu'il est frappé par les rayons émis du tube, et ce jusqu'à une distance de deux mètres.



Interlude

Résumons les états connus de la matière :

- ✓ Solides
- ✓ Liquides
- ✓ Gaz

- ✓ Rayons cathodiques
- ✓ Rayons X

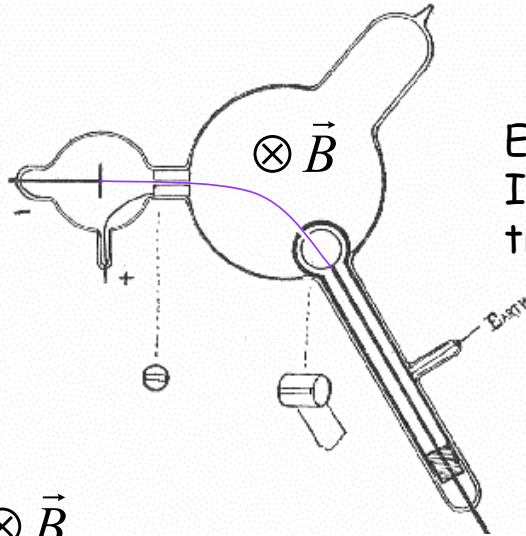
1895



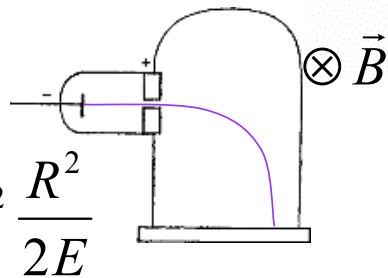
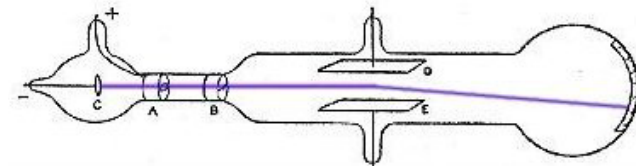
Le monde des particules (désire de simplicité)

1897 : découverte de l'électron par J.J. Thomson.

Expérience 1 :
La mesure de la charge montre que la matière rayonnante est indissociable de **particules chargées négativement**

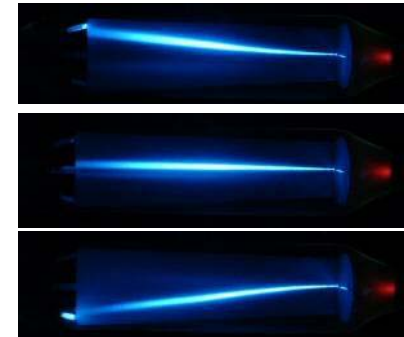


Expérience 2 :
Influence d'un champ électrique sur la trajectoire des particules chargées

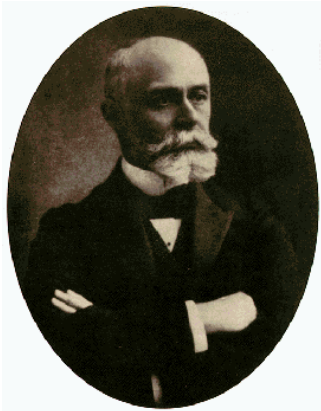


Expérience 3 :
Mesure du rapport m/e

$$\frac{m}{e} \propto B^2 \frac{R^2}{2E}$$



L'accident



Le monde des particules (désire de simplicité)

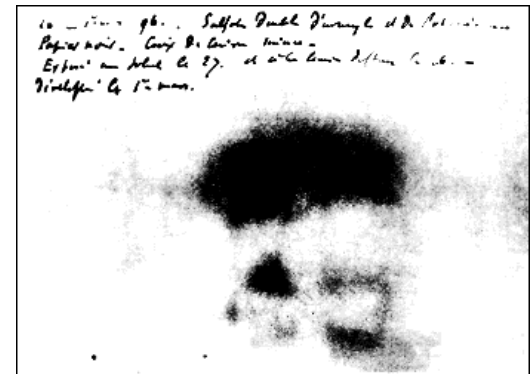
1897 : La radioactivité Henri Becquerel



Becquerel supposait que **la lueur qui se produit dans les tubes cathodiques exposés aux rayons X** pouvait être liée au **phénomène de phosphorescence**.

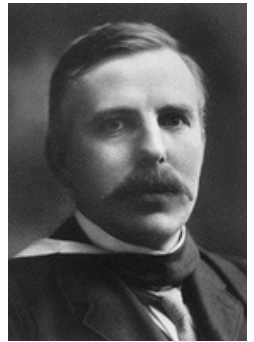
Son expérience consistait à sceller une plaque photographique dans du papier noir et mettre ce paquet en contact avec différents matériaux phosphorescents.

Tous ses résultats d'expérience furent négatifs, à l'exception de ceux mettant en cause des **sels d'uranium**, lesquels impressionnaient la plaque photographique à travers la couche de papier. L'impression se faisait même lorsque l'uranium n'avait pas été exposé à la lumière au préalable.



Le monde des particules (désire de simplicité)

1899 : Ernest Rutherford montre qu'il existe deux sortes de rayonnement qu'il appelle α (alpha) et β (beta).



1900 : Paul Villard met en évidence un troisième rayonnement provenant du radium et qui sera appelé rayonnement γ (gamma).



1902 : Pierre et Marie Curie montrent que le rayonnement β n'est autre que des électrons tandis que Frederick Soddy et Ernest Rutherford estiment que les rayonnements α , β et γ sont différentes sortes de radioactivités.

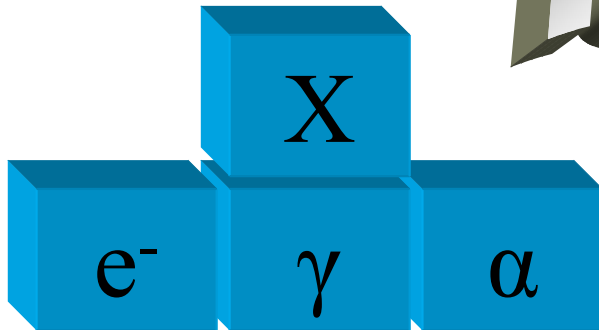


Interlude

Les états de la matière :

- ✓ Solides
- ✓ Liquides
- ✓ Gaz

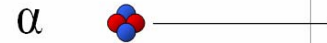
Les éléments :



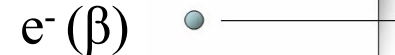
1902

La radioactivité

Le rayonnement α est arrêté par une feuille de papier.



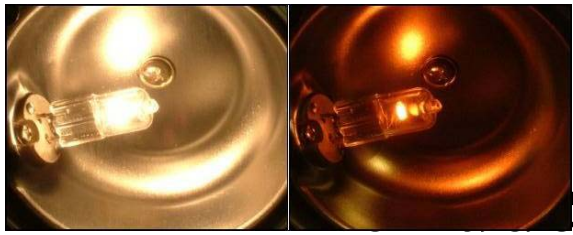
Le rayonnement β est arrêté par une feuille d'aluminium



Le rayonnement γ est arrêté par de grandes épaisseurs de matériaux denses, comme le plomb.

Interlude

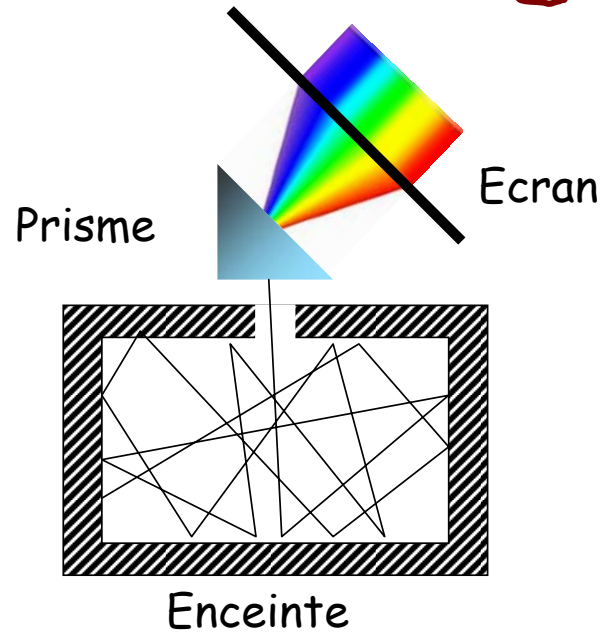
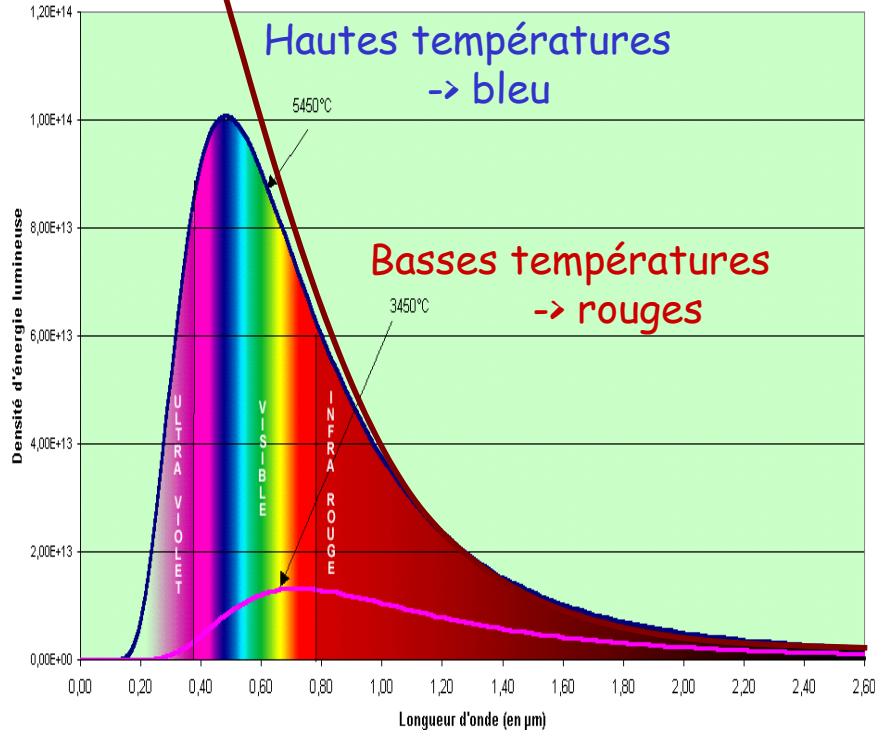
Les autres énigmes du moment



Problème du rayonnement du « corps noir »

Rayleigh Jeans => Catastrophe Ultra Violette

$$\rho(\lambda) = \frac{8\pi kT}{c} \lambda^2$$





Le monde des particules (désire de simplicité)

1900 : Max Planck propose une solution d'un type nouveau au problème du rayonnement (lumière émise traitée classiquement)

Hypothèse non classique : Discontinuité des échanges d'énergie entre matière et rayonnement. « La matière ne peut absorber ou émettre d'énergie lumineuse que par paquets finis »

$$\hbar = 1.054\ 571\ 596(52) \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$



Interlude

1801 : L'expérience des fentes de Young

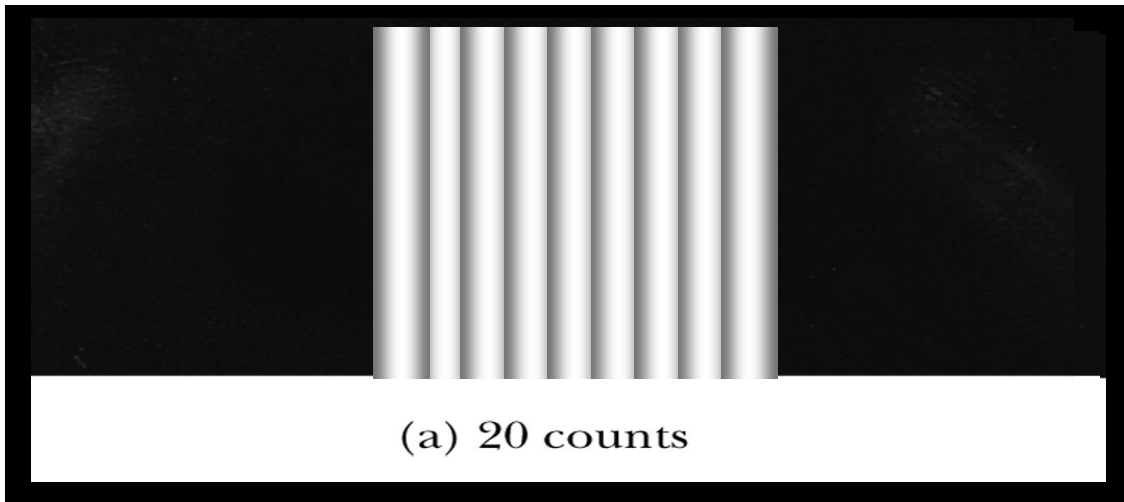
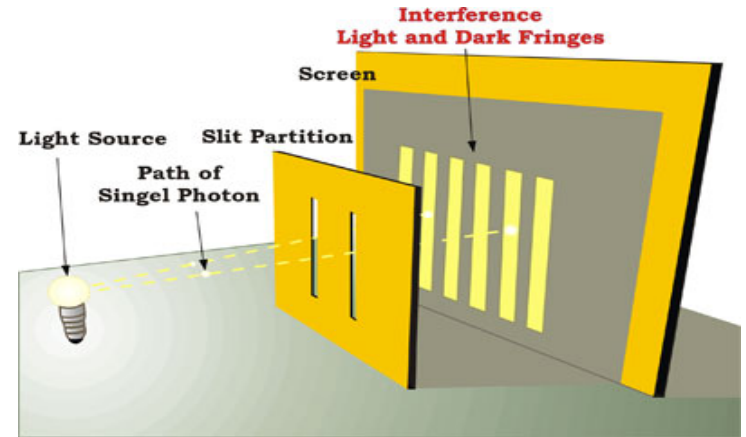
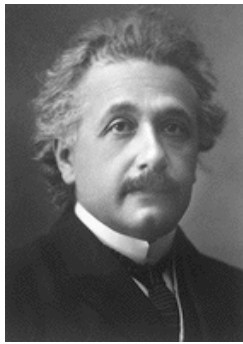


Figure de diffraction : c'est une onde !

qui produit des impacts ?!? Ce sont des particules !

elles empreintent les deux fentes simultanément !?!



Le monde des particules (désire de simplicité)



1905 : Réinterprétation du problème de l'émission du corps noir par A. Einstein.

Le rayonnement a une structure corpusculaire: Il est composé de **photons** « La discontinuité de Planck provient de la structure granulaire de la lumière ».

Dualité onde/particule.

L'école de Copenhague (Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger ...)

Ondes et particules sont deux facettes d'un même phénomène, décrit de manière mathématique par une fonction d'onde donnant lieu à des « états superposés ». Lors d'une « mesure » l'objet quantique sera trouvé dans un état déterminé ; la fonction d'onde donne les probabilités de trouver l'objet dans tel ou tel état.



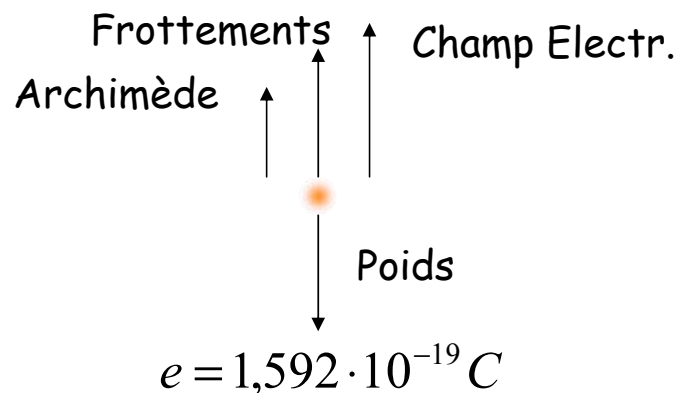
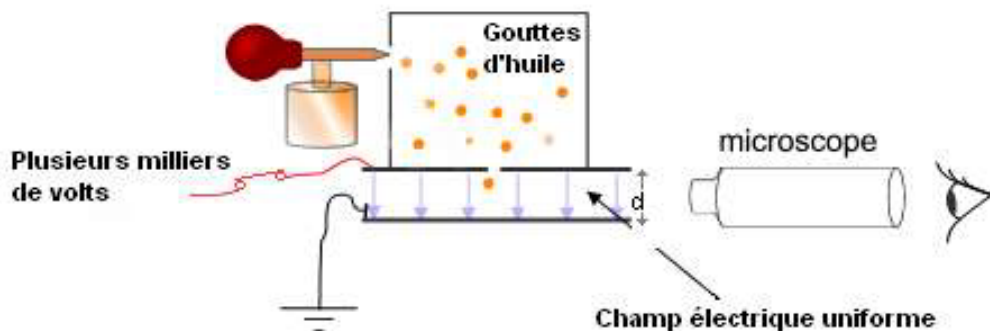
Revenons à notre
matières

L'époque des premiers
détecteurs



Le monde des particules (désire de simplicité)

1910 : mesure de la charge électrique (Robert Millikan)

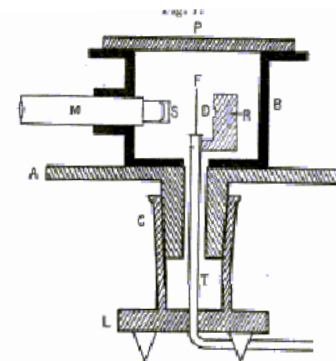


$$V_{\text{limite}} = \frac{1}{6\pi\eta r} \left[\frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho_{\text{huile}} - \rho_{\text{air}}) - qE \right]$$

Les deux plaques avec une différence de potentiel élevée produisent un champ électrique uniforme. Une goutte d'huile chargée négativement tombe par un trou, entre les deux plaques. Par la régulation du champ électrique la goutte monte ou descend. Grâce à un microscope un observateur peut calculer la vitesse de la goutte.



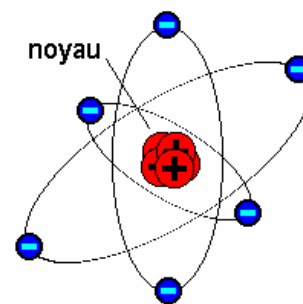
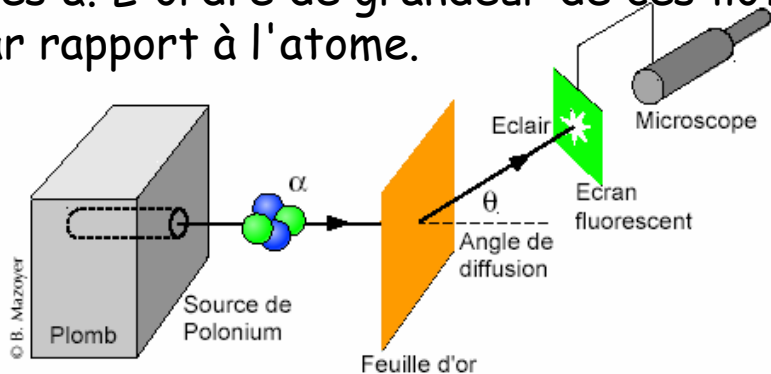
Le monde des particules (désire de simplicité)



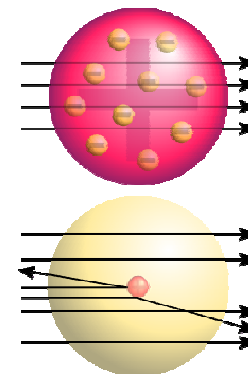
1909-11 : Découverte du noyau atomique par Ernest Rutherford.

Modèle de Thomson

0,1 ‰ des α ont été déviées. La matière est une structure lacunaire. Elle est constituée essentiellement de vide. Il existe des îlots de charge positive qui repoussent les particules α . L'ordre de grandeur de ces îlots est infiniment petit par rapport à l'atome.



● électrons
●+ protons



Modèle de Rutherford

Le monde des particules (désire de simplicité)

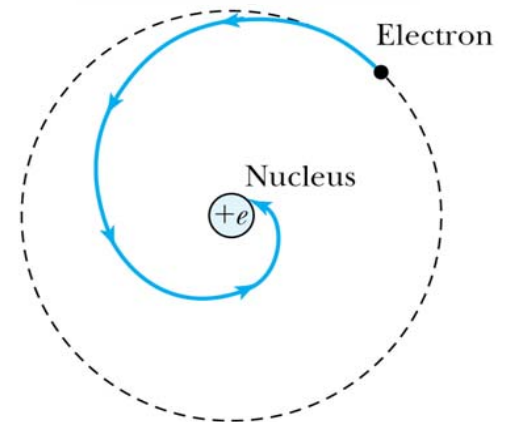
1911 : Le modèle atomique planétaire de Rutherford a des problèmes.

Il ne prédit pas les dimensions de l'atome.

La théorie classique de l'électromagnétisme prévoit qu'une particule accélérée rayonne de l'énergie (électromagnétique). Son énergie totale doit décroître.

Le rayon de l'orbite de l'électron doit décroître.

L'électron doit s'écraser sur le noyau !



$$\tau \sim \frac{1}{1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000} \text{ seconde}$$

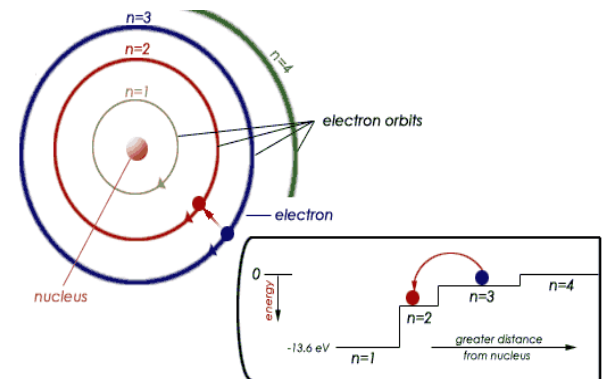


Le monde des particules (désire de simplicité)

1913 : Modèle de l'Atome (Niels Bohr)

Il réunit les concepts de Planck et de Rutherford, et propose un modèle atomique quantique:

les orbites des électrons ont des rayons définis, il n'existe que quelques **orbites « autorisées »** ; ainsi, les échanges d'énergie quantifiés correspondent à des sauts entre les orbites définies, et lorsque l'électron est sur l'orbite la plus basse, il ne peut pas descendre en dessous et s'écraser (mais ce modèle n'explique pas pourquoi) ...



Encore un accident

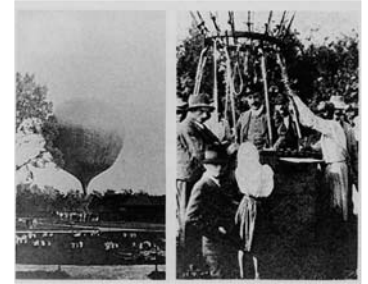


Le monde des particules (désire de simplicité)

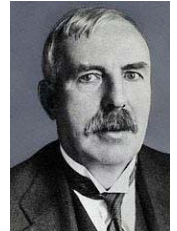
1912 : rayonnement cosmique (Victor Hess)

Voulant s'éloigner des sources terrestres radioactives V. HESS découvre l'existence de radiations dont l'intensité augmente avec l'altitude. Il en conclut à l'**origine cosmique** de ce rayonnement.

En reprenant cette expérience le 12 avril 1912 pendant une **éclipse solaire**, la **persistance du signal détecté** permet de conclure que le soleil n'est pas le seul responsable.



Le monde des particules (désire de simplicité)

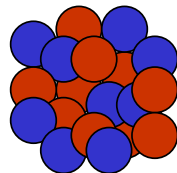


1919 : découverte du proton (Ernest Rutherford)

Rutherford montre qu'une particule alpha interagissant avec de l'azote gazeux laisse dans un détecteur la signature d'hydrogène ionisé.

L'hydrogène ne pouvant être produit que par l'azote, celui-ci doit être constitué de noyaux d'hydrogène.

Il suggère que le noyau d'hydrogène, de numéro atomique unité, est une particule élémentaire : **le proton**.



Le monde des particules (désire de simplicité)

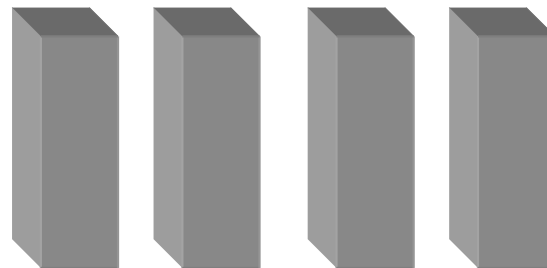
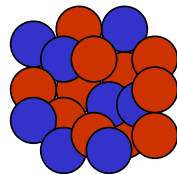


1932 : découverte du neutron (James Chadwick).

En mesurant avec précision l'énergie des noyaux projetés en utilisant la réaction :

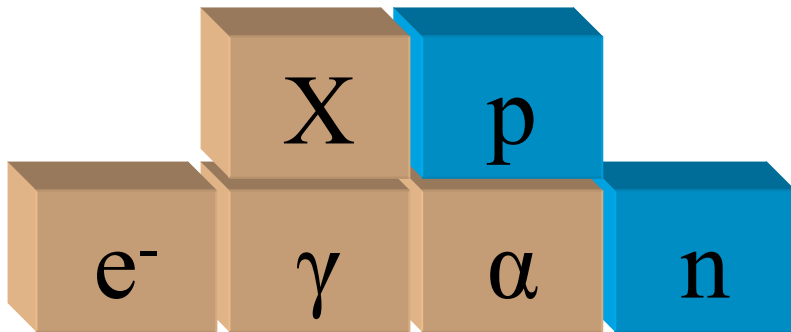


Chadwick peut affirmer que le rayonnement « ultra pénétrant » ne peut être un rayonnement gamma, d'énergie très élevée, mais doit être composé de particules de masse 1 et de charge électrique 0 : c'est le neutron.



Interlude

1932



p, α
Très faible pouvoir de pénétration dans l'air. Une simple feuille de papier est suffisante pour arrêter les noyaux d'hélium.

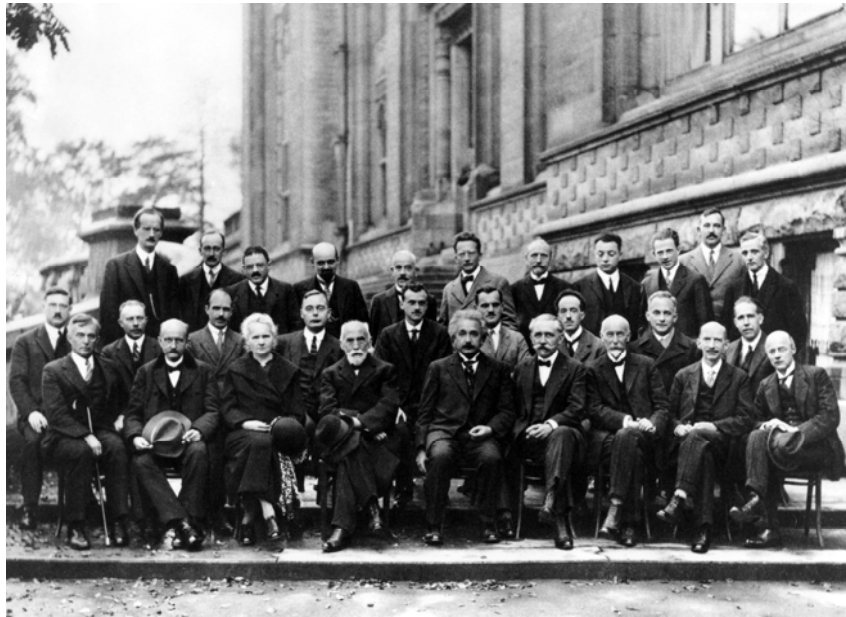
e, β
Faible pouvoir de pénétration. Parcourt quelques mètres dans l'air. Une feuille d'aluminium de quelques millimètres peut arrêter les électrons.

X, γ
Grand pouvoir de pénétration, fonction de l'énergie du rayonnement: plusieurs centaines de mètres dans l'air. Une forte épaisseur de béton ou de plomb permet de s'en protéger.

neutron
Pénétration dépendante de leur énergie. Une forte épaisseur de béton, d'eau ou de paraffine arrête les neutrons.

Le monde des particules (désire de simplicité)

1924-27 : élaboration de la mécanique quantique



Conférence de Solvay 1927.



Le monde des particules (désire de simplicité)

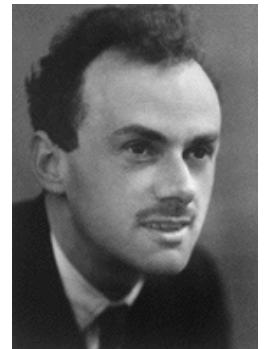
1924 : La notion de spin (Wolfgang Pauli).

Elle a été introduite par Pauli pour l'électron afin d'expliquer un résultat expérimental qui restait incompréhensible dans le cadre naissant de la mécanique quantique non relativiste : l'effet Zeeman anormal.

1924 : Le principe d'exclusion (W. Pauli).

« les fermions (particules de spin demi-entier telles que les électrons, protons ou neutrons), ne peuvent pas se trouver au même endroit dans le même état quantique ».

1928 : Mécanique quantique relativiste (Paul Dirac).
idée des antiparticules.



1930 : hypothèse du neutrino (W. Pauli).

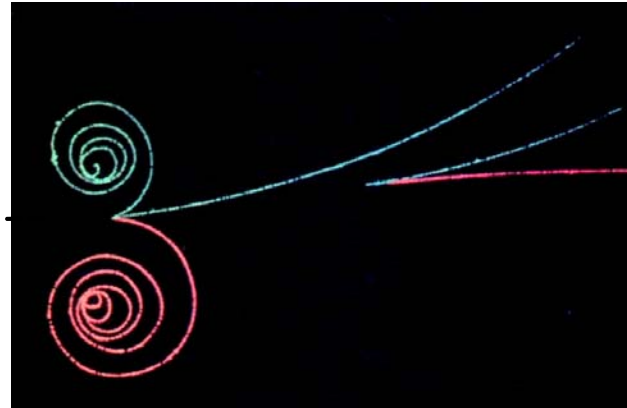
Interlude

La masse est une forme particulière de l'énergie

$$E = mc^2$$

En conséquence, plus les faisceaux ont d'énergie, plus on crée de particules en nombre et en diversité.

Particule ----

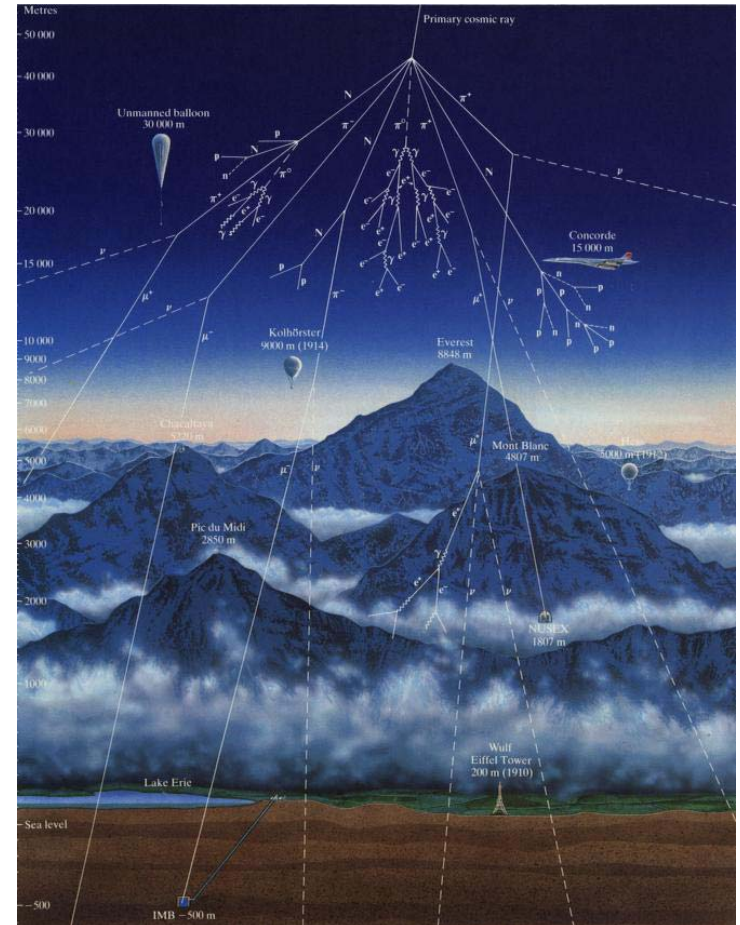


Création de nouvelles particules

Interlude

Les années 30 :

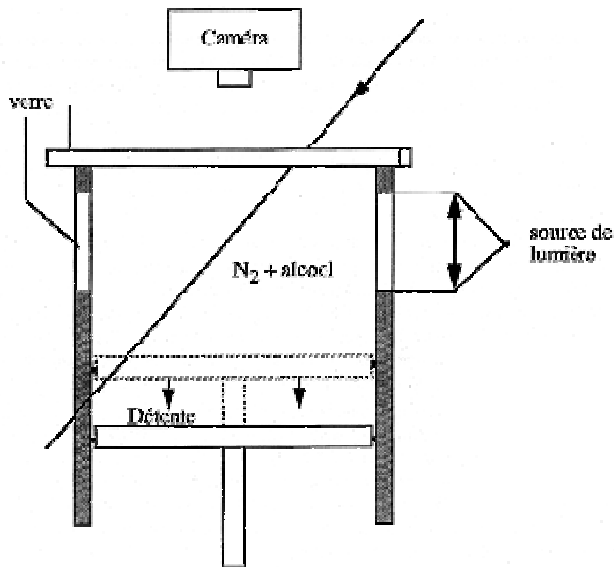
Les triomphes de l'astroparticule
de nouveaux faisceaux de
particules.



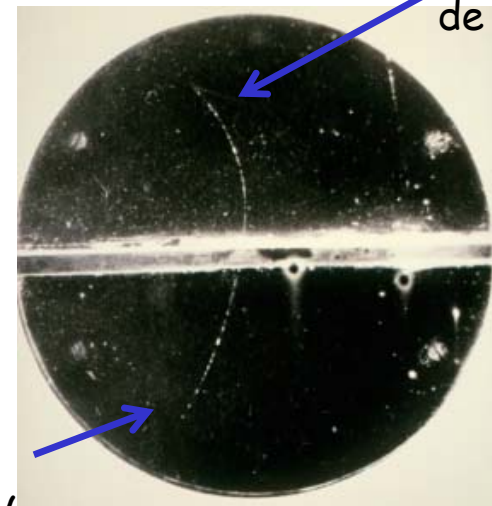


Le monde des particules (désire de simplicité)

1933 : découverte de l'antimatière (e^+) dans l'interaction entre rayonnement cosmique avec l'atmosphère (Carl David Anderson).



plaque de 6 mm
de plomb



positron
de 23 MeV

positron
entrant
de 63 MeV

Le monde des particules (désire de simplicité)



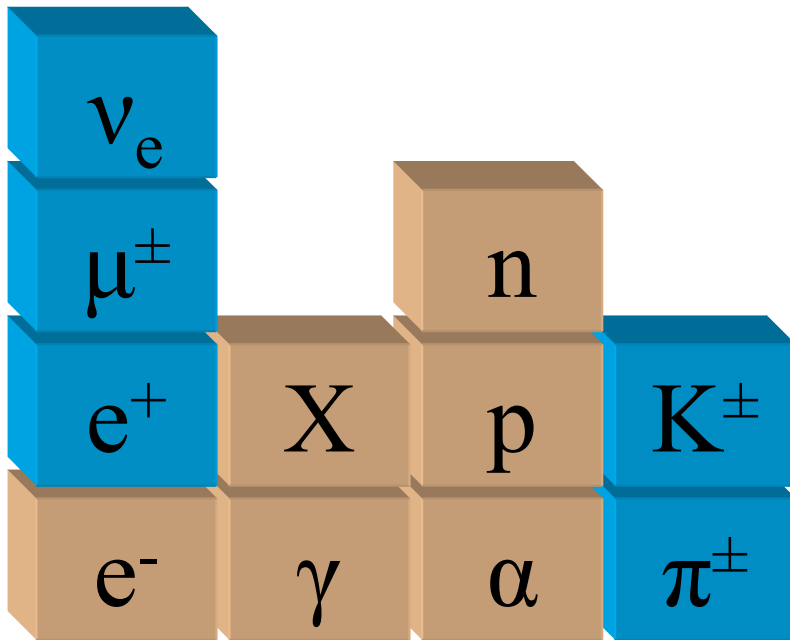
1937 : découverte du **muon** dans les particules issues du rayonnement cosmique (C. D. Anderson).

1947 : détection d'un **pion** dans des émulsions exposées à des rayons cosmiques (C. Powell, C. Lattes et G. Occhialini).

1949 : découverte des premières **particules étranges** (K^\pm) dans une chambre à brouillard (G. D. Rochester & C. C. Butler).

1951 : découverte du K^0 , baptisée « V-particule » à cause de sa désintégration en deux pions chargés qui permirent de reconstruire une particule d'une masse égale à la moitié de la masse du proton.

Interlude



1954

Retour sur terre



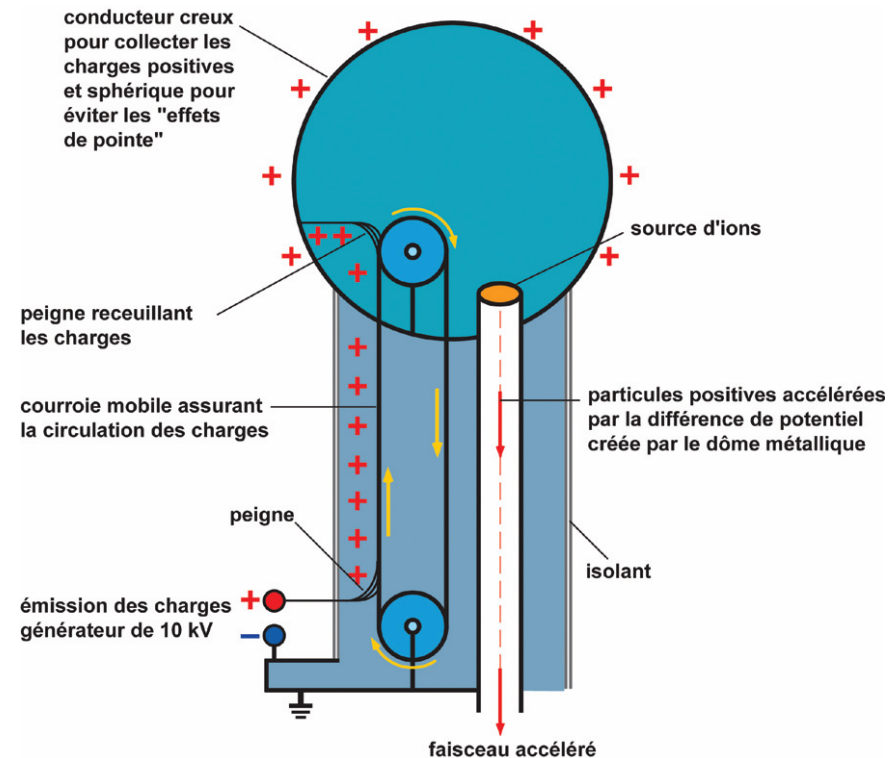
Le monde des particules (désire de simplicité)

1929 : Robert Van de Graaff

les charges sont émises par un générateur de courant continu sous une tension de quelques dizaines de kilovolts.

Elles sont ensuite capturées par une courroie (~2000 t/mn) isolée et emportées jusqu'à l'une des électrodes de l'accélérateur.

L'électrode se charge produisant une d.d.p. de qqz dizaines de MVolts.





Le monde des particules (désire de simplicité)

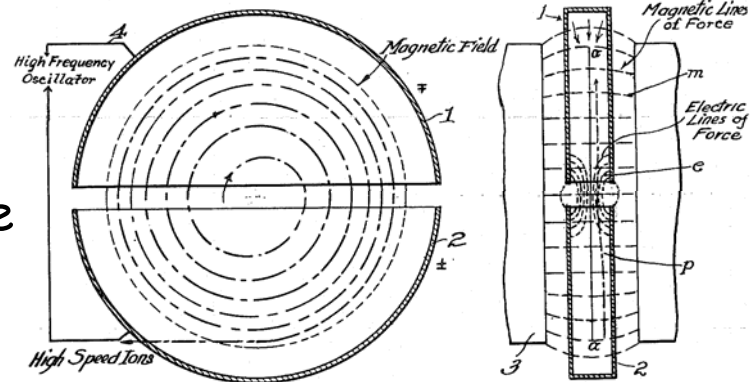
1929 : Ernest Orlando Lawrence

Dans un **cyclotron** le champ magnétique est appliqué perpendiculairement dans une chambre vide en forme de disque, laquelle contient deux électrodes semi-circulaires en forme de D dans lesquelles les particules chargées suivent un parcours circulaire. Une tension alternative de haute fréquence est appliquée aux électrodes en D, ce qui accélère les particules à chacun de leurs passages de l'une à l'autre.



$$f = \frac{qB}{2\pi m}$$

= constante

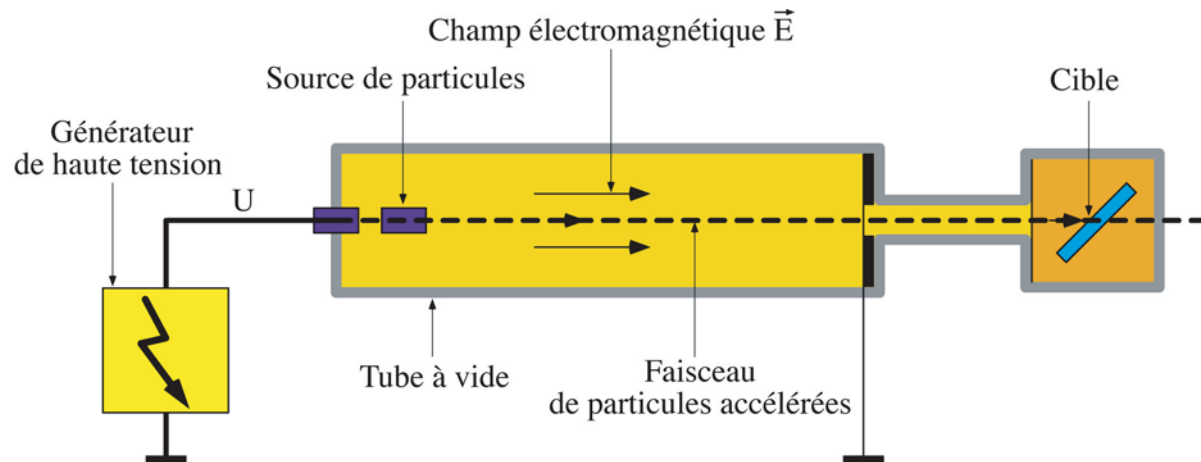




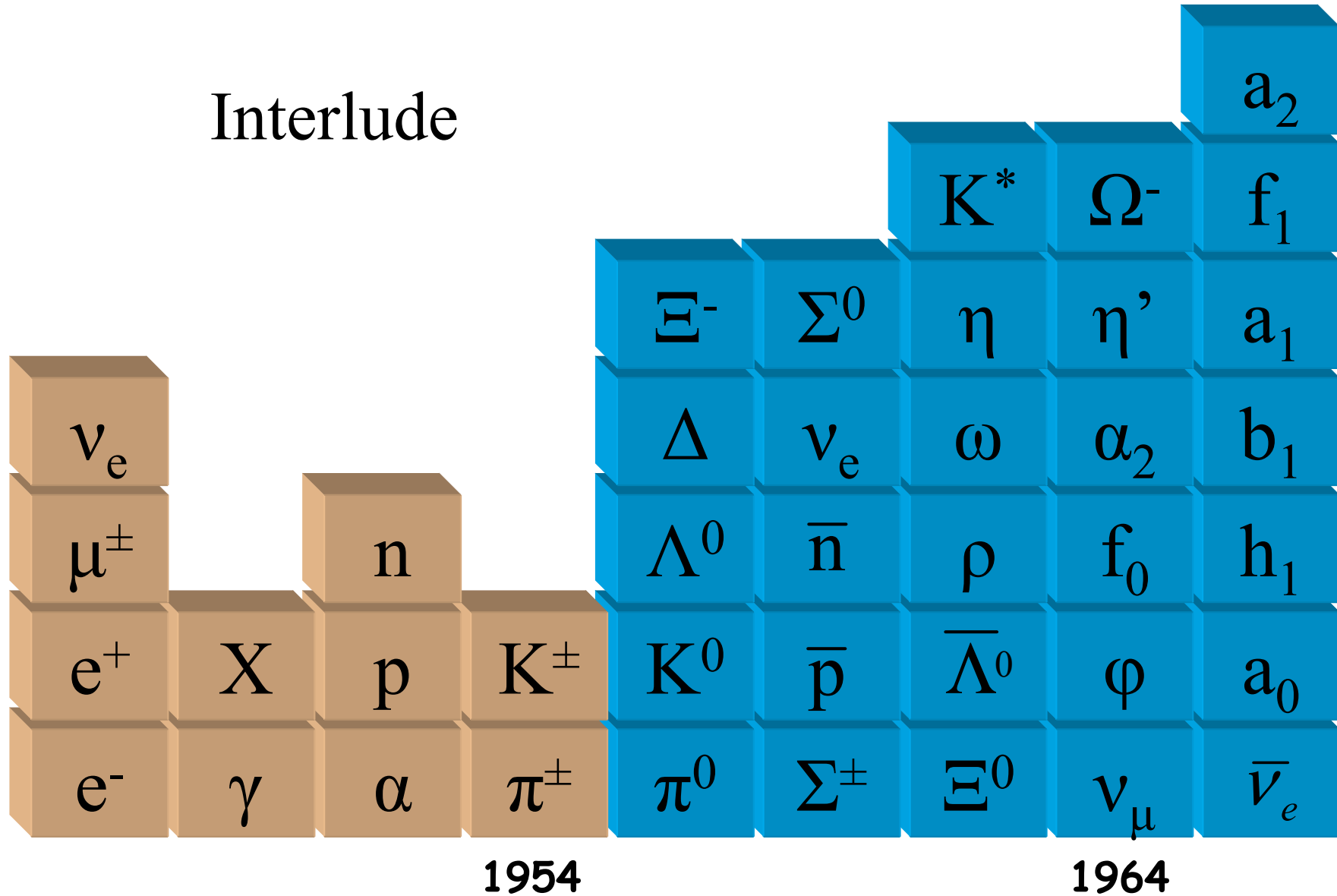
Le monde des particules (désire de simplicité)

1930 : John D. Cockcroft & Ernest T. S. Walton.

L'énergie acquise par une particule chargée est proportionnelle à la différence de potentiel établie entre une anode et une cathode (accélérateurs, dits électrostatiques). En 1931, des particules alpha (noyaux d'hélium) de **17 MeV** furent produites à partir d'un faisceau de protons de 0,125 MeV envoyés sur une plaque de lithium.



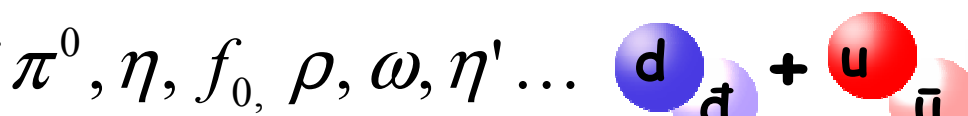
Interlude



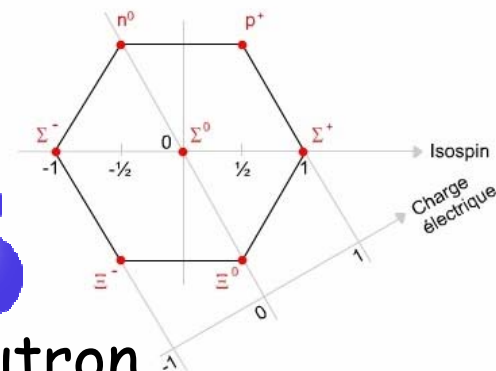
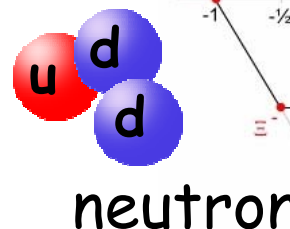
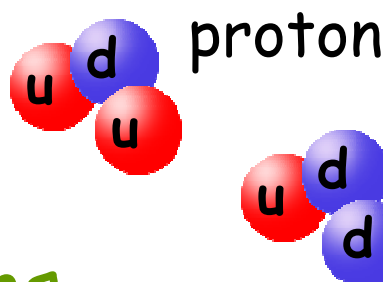
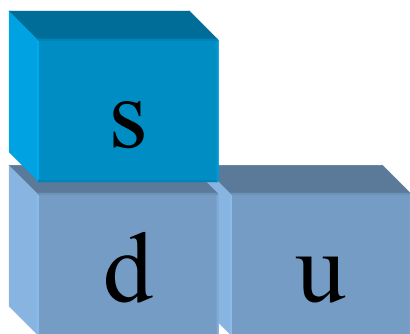
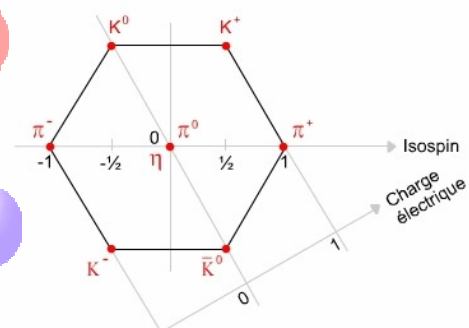
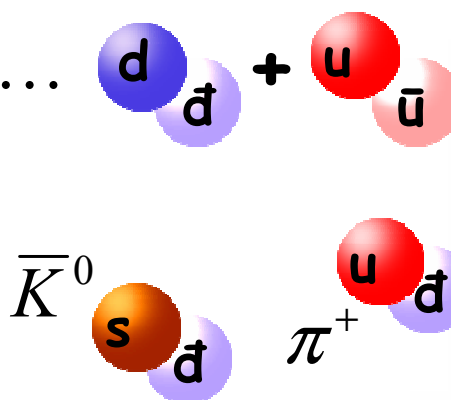


Le monde des particules (désire de simplicité)

1964 : Théorie des quarks (Murray Gell-Mann & Kazuhiko Nishijima).



Les mésons

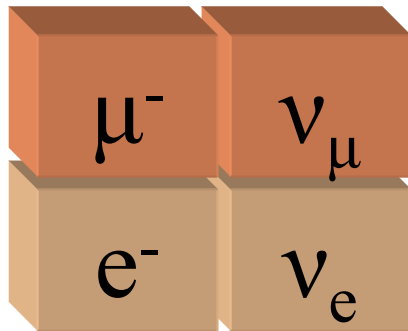


Les baryons

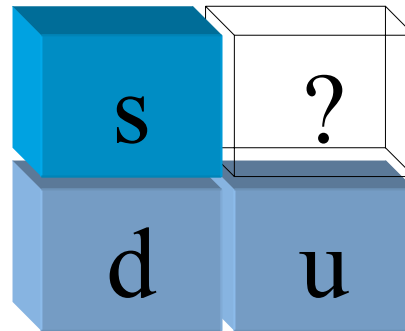
Le monde des particules (désire de simplicité)

Les particules « élémentaires ».

Les leptons



Les quarks



1970 : S. Glashow, J. Iliopoulos et L. Maiani prédisent l'existence d'un quatrième quark qu'ils baptisent le « charme ».

Le monde des particules (désire de simplicité)

1974 : découverte du J/ψ et hypothèse du **quark charmé** et confirmation de la théorie des quarks (Burton Richter et Samuel C. C. Ting).

1975 : lepton **tau** (M.L. Perl F. Reines).

1977 : découverte du **quark bottom** rebaptisé quark beau depuis (E-288/FERMILAB).

1992 : trois familles de leptons (LEP).

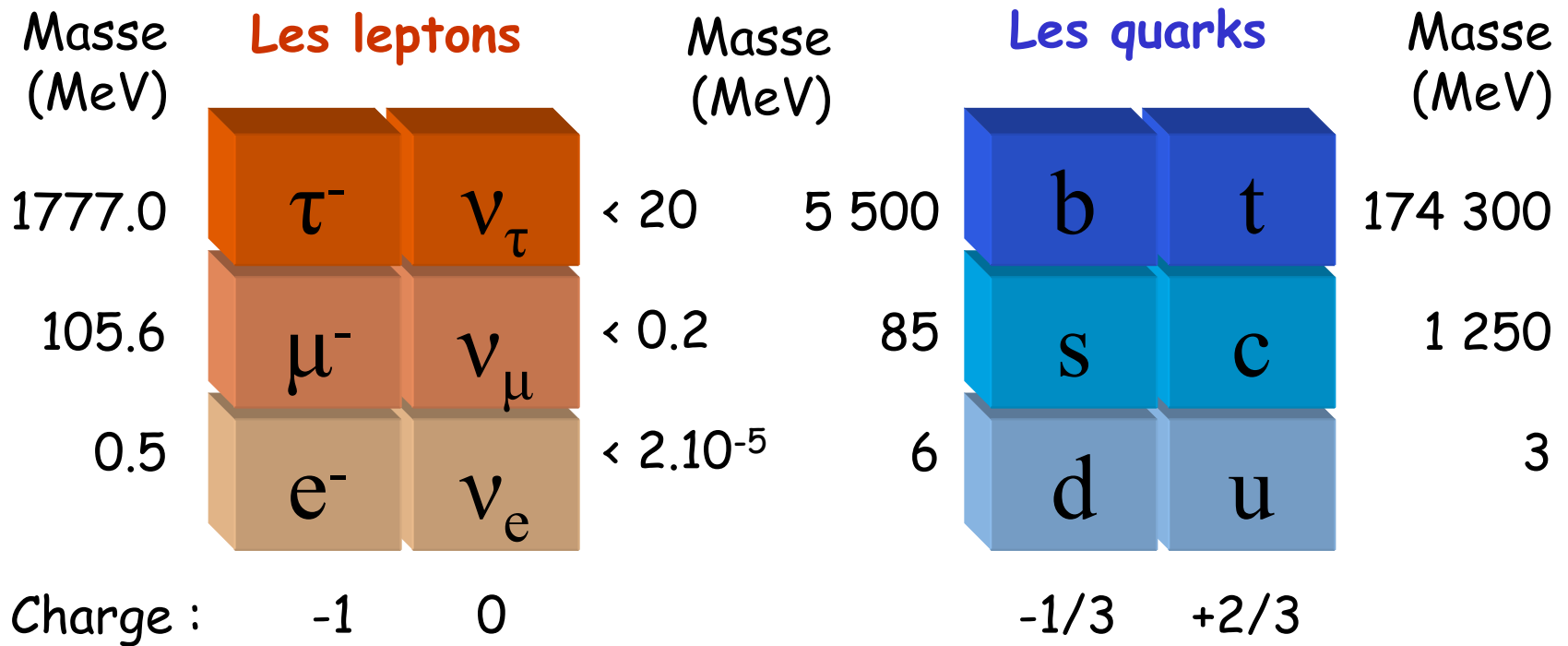
1994 : découverte du **quark top** rebaptisé quark « vérité » (CDF/FERMILAB).

1998 : découverte d'une masse non-nulle de neutrino (Super Kamiokande).

2001 : observation directe du **neutrino tau** (DONUT/FERMILAB).

Le monde des particules (désire de simplicité)

Les particules « élémentaires » : **Les fermions (spin = $\frac{1}{2}$)**.



(6 leptons + 6 quarks × 3 couleurs) × 2 spins + Anti-matiere = **96 etats**

Le monde des interactions (désire d'unicité)

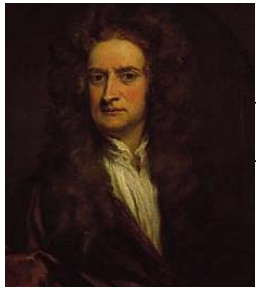
Le monde des interactions (désire d'unicité)

492-432 Av. J.C. :

Les éléments sont mus par les forces de l'amour et de la haine (Empédocle). Dans l'amour absolu, ils forment une unité homogène, alors que la haine les sépare.

Lorsque ces deux forces entrent en conflit, le mélange des éléments fait surgir les choses matérielles.

$$E = mc^2 ?$$

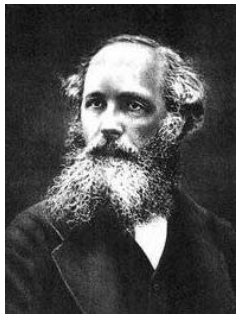


Le monde des interactions (désire d'unicité)

1687 : Newton unifie la gravité terrestre et céleste



$$\vec{F} = -G \frac{M_1 M_2}{r^2} \hat{r}$$

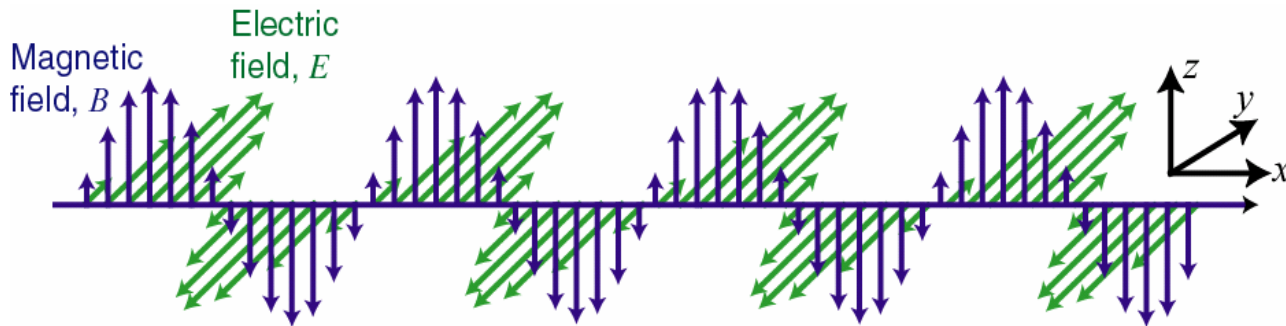


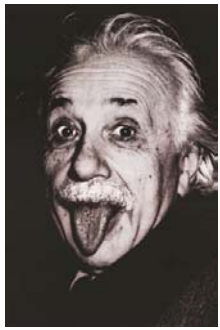
Le monde des interactions (désire d'unicité)

1873 : J.C. Maxwell unification du magnétisme,
l'électrostatique et de l'optique.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$





Le monde des interactions (désire d'unicité)

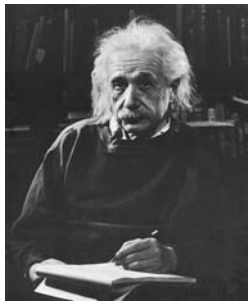
1905 : relativité restreinte (unification de l'espace-temps)
postulat de l'universalité des lois de la physique

Les lois physiques sont les mêmes dans tous les référentiels en mouvement rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$$

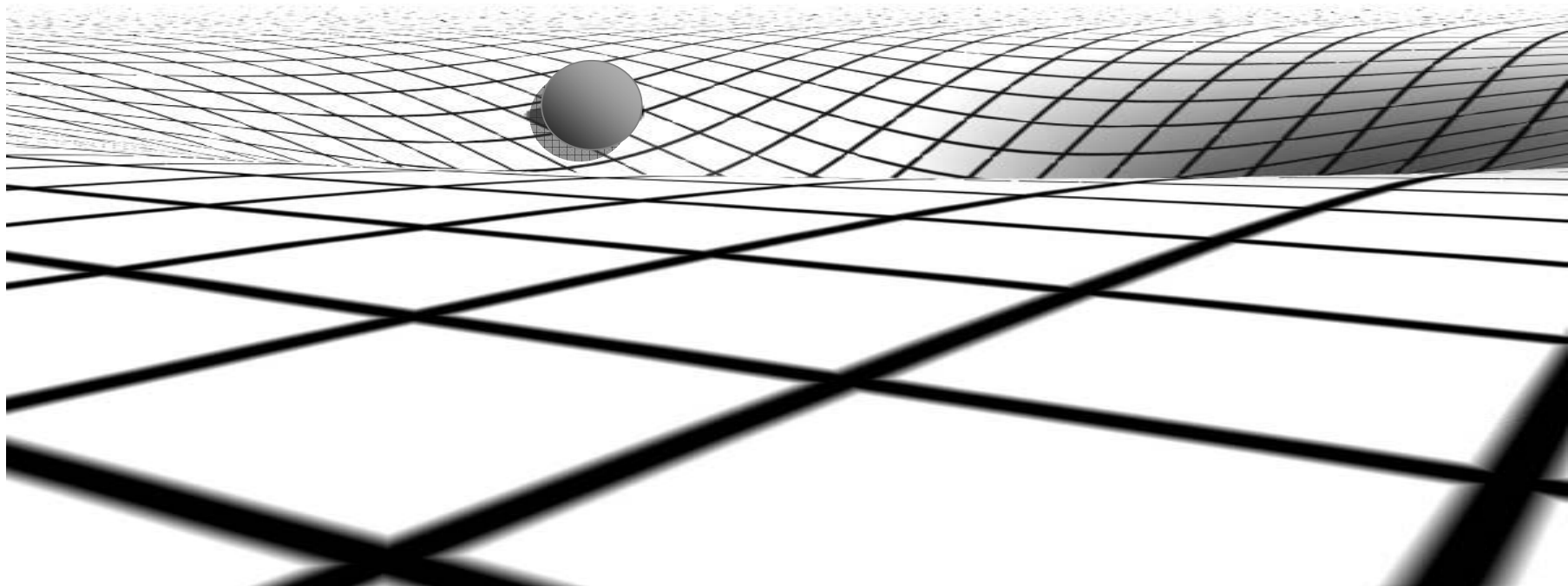
La vitesse de la lumière a toujours la même valeur dans le vide, quel que soit le référentiel.

Equivalence des observateurs inertiels (points de vue) et extension de la relativité galiléenne à toute la physique



Le monde des **interactions** (désire d'unicité)

1915 : Relativité générale (**unification de la masse et de l'espace-temps**)





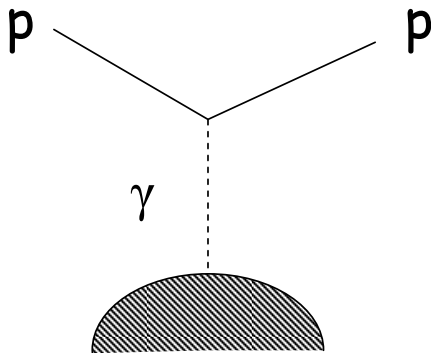
Le monde des interactions (désire d'unicité)

1934 : interprétation de l'interaction faible par Enrico Fermi

Analogie entre les interactions électromagnétiques et faibles

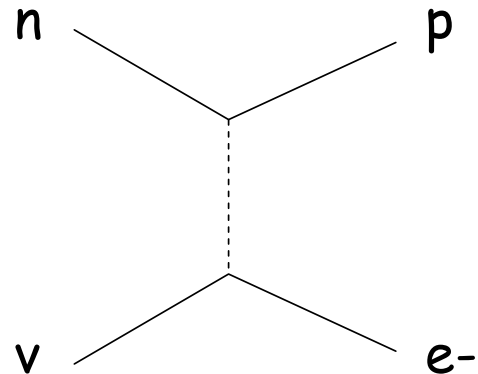
$$H_{EM} = e J^\mu A_\mu$$

$$= e (\bar{\psi} \gamma^\mu \psi) A_\mu$$



$$H_{Faible} = G (\bar{\psi}_p \gamma^\mu \psi_n) (\bar{\psi}_e \gamma_\mu \psi_\nu)$$

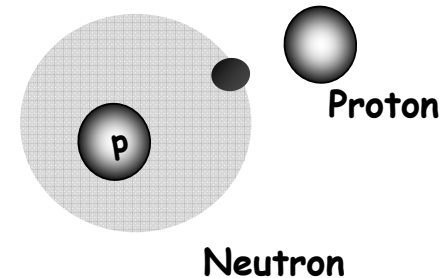
Constante De couplage courant potentiel



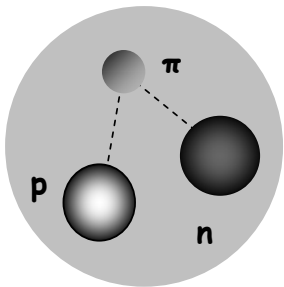


Le monde des interactions (désire d'unicité)

Pour tenter d'expliquer la stabilité de l'état lié p-n et l'absence de systèmes p-p et n-n Werner Heisenberg fait l'hypothèse selon laquelle le neutron est constitué d'un proton lié à un électron. Le système ainsi formé est électriquement neutre.



1935 : Interaction forte selon H.Yukawa (pion)



Hideki Yukawa (1935) postule l'existence d'un quantum de champ nucléaire échangé par les deux nucléons pour assurer leur liaison. Pour interpréter la portée finie de l'interaction, il postule l'existence d'une particule de masse inférieure à 200 MeV. Une particule massive véhicule l'interaction.



Le monde des **interactions** (désire d'unicité)

1967-70: Chromodynamique Quantique (QCD).

les quarks sont confinés dans les particules qu'ils constituent et possèdent une propriété nommée « **couleur** » bleue, verte ou rouge, analogue à la charge électrique de la force électrostatique. Ils interagissent entre eux en échangeant des gluons.

$$\Delta^{++} = u \uparrow u \downarrow u ?$$

Une particule constituée de quarks doit toujours avoir une couleur résultante blanche.

Le confinement des quarks provient du fait que la force qui les lie croît avec la distance (**liberté asymptotique**) (H. D. Politzer, F. Wilczek et D. Gross).

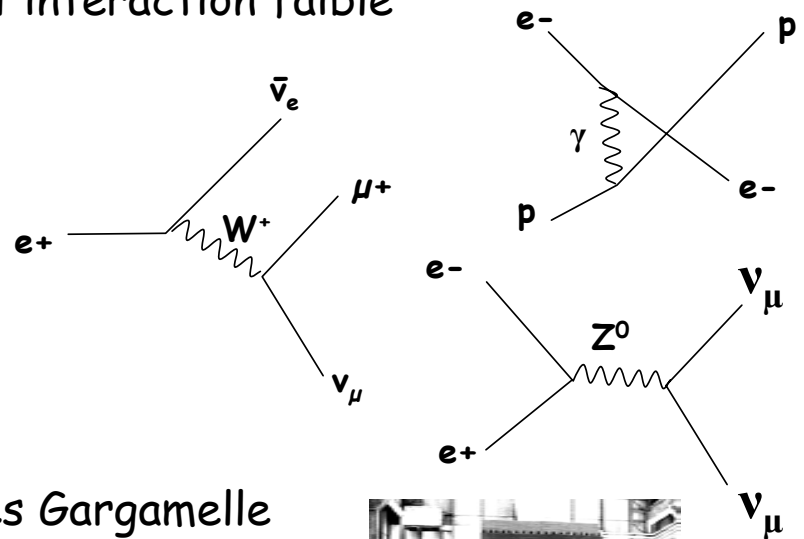
1970 : découverte du **gluon** (PETRA/DESY).



Le monde des interactions (désire d'unicité)

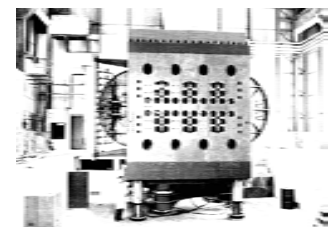
1970 : Interaction Electrofaible (Glashow, Salam, Weinberg)

unification de l'électromagnétisme et de l'interaction faible

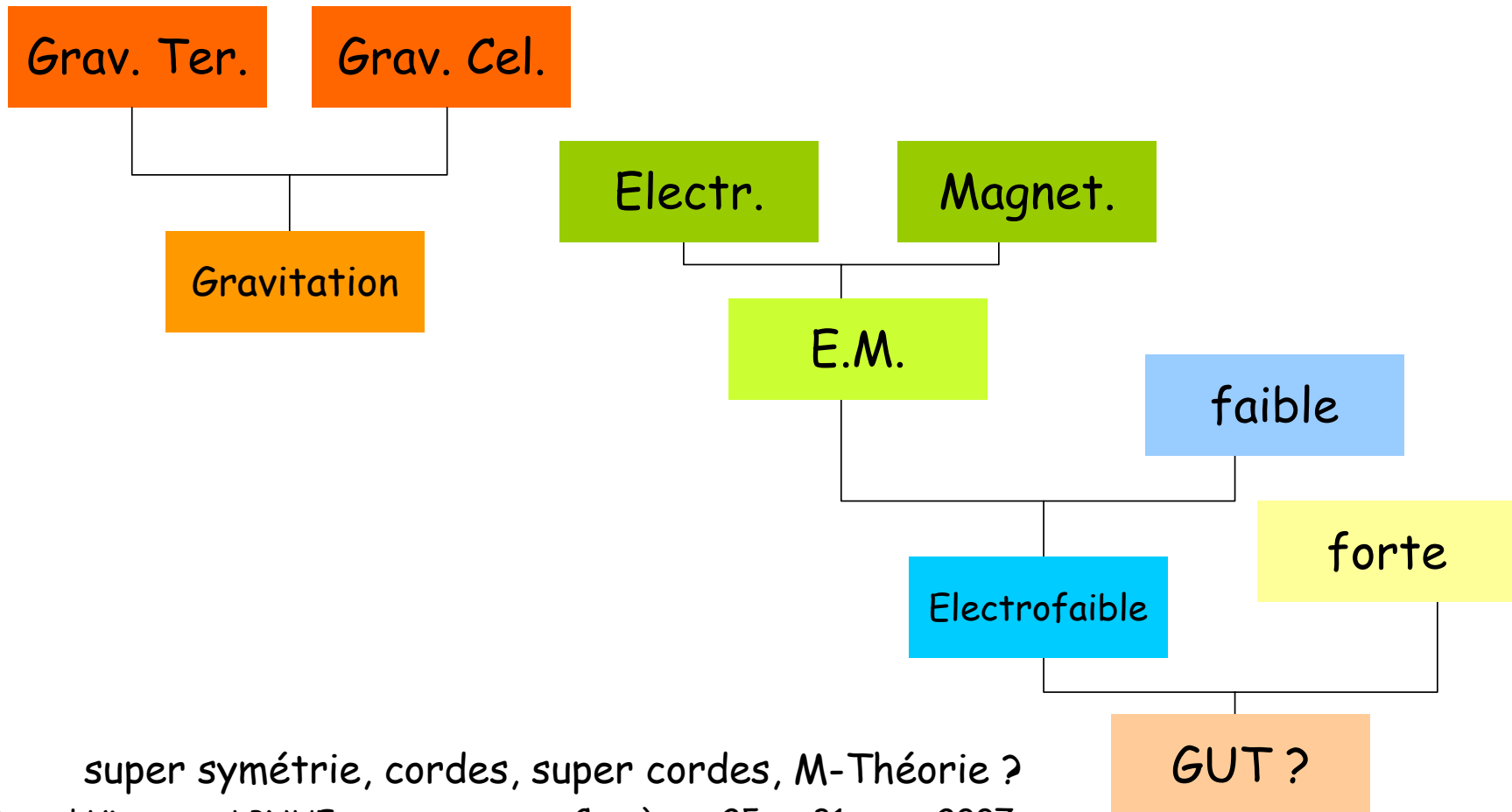


1973: découverte dans la chambre a bulles Gargamelle

1983 : découverte des W^+ , W^- et Z^0 (UA1/CERN).



Le monde des interactions (désire d'unicité)



super symétrie, cordes, super cordes, M-Théorie ?

Le monde des interactions (désire d'unicité)

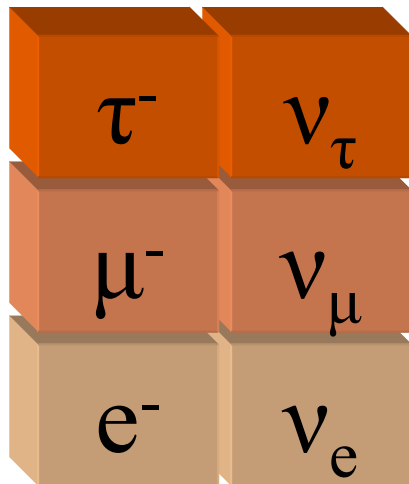
Type	Portée	Intensité	Quanta	Charge	domaine
Forte	fm	1	8 gluons	Couleur	Nucléaire
E.M.	Très grande	1/1000	photon	électrique	Nucléaire, atomique et moléculaire
Faible	1/100 fm	$\sim 10^{-5}$	Z^0, W^\pm	saveur	Nucléaire
Gravitation	∞	$\sim 10^{-38}$	graviton	Masse ou énergie	Matière

Les particules élémentaires

Les fermions

Les bosons

Les leptons



Les quarks

