

LA PHYSIQUE CLASSIQUE

Comment s'imaginer l'atome classique?

Imaginez que le noyau de l'hydrogène (un seul proton) mesure 1 millimètre :

- Il serait ainsi grossi mille milliards de fois (grossissement de 1.000.000.000.000 x) !
- Il pèserait 1,7 millions de tonnes !

Son unique électron aurait: * un diamètre inférieur à 1 millième de millimètre (= 1 micron) !
* une masse de 900 tonnes !

Cet électron graviterait à 50 mètres du noyau, d'où un diamètre de l'atome de 100 mètres.

Conclusion : Le volume du noyau étant un million de milliards de fois plus petit que celui de l'atome, le volume de l'atome est donc constitué d'au moins 99,999999999999 % de vide!

L'ancienne physique, dite classique, distingue deux sortes d'entités fondamentales :

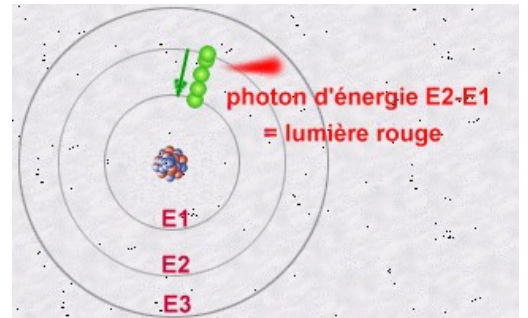
- Les corpuscules, qui sont des sortes de billes microscopiques.
- Les ondes, qui se propagent dans l'espace un peu comme le mouvement d'une vague sur la mer.

La physique quantique nous dit que ces objets classiques n'existent pas.

le modèle de Bohr : L'émission de lumière s'explique par le **saut d'un électron** d'une orbite à une autre. Pendant ce saut vers l'orbite moins énergétique (une orbite plus intérieure), l'électron va céder une partie de son énergie sous forme d'un photon émis vers l'extérieur.

Inversement, l'électron d'un atome pourra absorber un photon d'énergie donnée en ainsi sauter d'une orbite peu énergétique à une orbite plus énergétique: Il sera dit excité, car propulsé sur une orbite plus énergétique que la normale.

Chaque **couleur de la lumière** est en fait une fréquence particulière (et donc un niveau d'énergie) de photon. Tous les sauts d'électrons entre toutes les orbites possibles au sein d'un même atome se traduisent donc par l'émission (ou l'absorption) d'un **spectre de lumière caractéristique** : Il s'agit là d'une véritable carte d'identité d'un type d'atome donné. C'est grâce à ce spectre facilement identifiable que l'on peut savoir quels atomes existent dans les étoiles du firmament. Leur lumière est captée par les télescopes, analysée et comparée avec les spectres de l'hydrogène, de l'hélium etc...



LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Elle va rendre le modèle de Bohr caduque et le remplacer par un modèle plus flou, plus difficile à se représenter. La particule n'est plus un point matériel classique mais **un paquet d'ondes probabilistes**, une superposition de mouvements potentiels. Les orbites électroniques doivent faire place à la notion d'orbitales, sorte de **sphères floues et probabilistes**, dans lesquelles l'électron serait en quelque sorte dilué tout autour du noyau.

Principe d'incertitude : La notion de trajectoire exacte n'a pas de sens pour les particules. Il est impossible de déterminer avec précision et simultanément la position et la vitesse d'une particule comme l'électron.

Ce n'est que lorsque les physiciens interagissent avec l'atome pour observer l'électron, que ce dernier leur apparaît comme une particule : C'est comme si le nuage électronique ondulatoire se **réduisait soudain en une particule bien matérielle**.

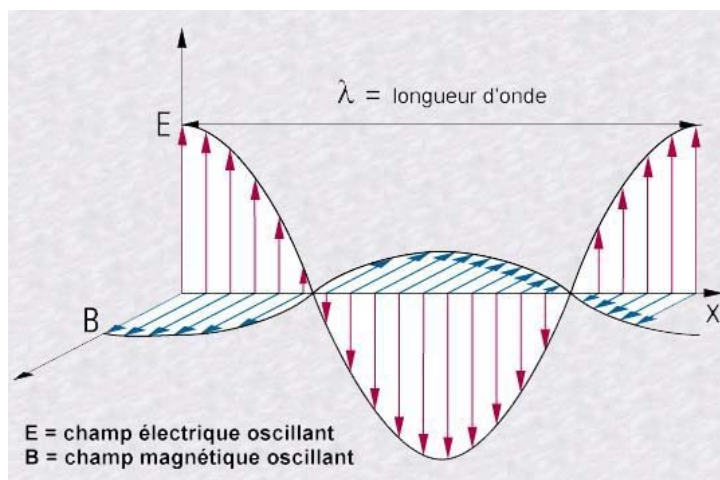
Toute la difficulté est qu'il s'agit de particules qui réagissent lorsqu'on les regarde, or on ne peut observer quelque chose qu'en l'éclairant avec de la lumière. Mais le moindre photon qui percute ou interagit avec un électron va modifier la trajectoire initiale de ce dernier ou le faire changer d'orbitale.

La connaissance avance donc avec des outils mathématiques ou avec des observations indirectes.

La lumière : il faut se la représenter comme étant **un faisceau d'ondes électromagnétiques** se déplaçant à vitesse **c**, l'onde **électrique perpendiculairement** à l'onde **magnétique**.

Autant il est aisé de s'imaginer une onde parcourant la surface de l'eau et le son comme étant une vibration de l'air, autant le concept d'onde électromagnétique (comme étant une oscillation de champs électrique et magnétique associés) a de quoi laisser perplexe. Comment imaginer ces champs intimement liés? Quel est le support de cette oscillation dans le vide?

La particule de lumière est le photon, ce grain d'énergie dont la masse est nulle.



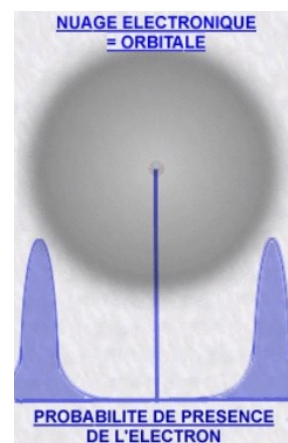
La limite du temps de Planck : Disons le tout net, tout ce qui se passe avant cette date chronologique incroyablement courte est un mystère total. Pourquoi ?

Car 10^{-43} seconde correspond à ce que l'on dénomme le temps de Planck, sorte de quantum temporel incompressible. Cet intervalle de temps semble être le plus petit possible, selon la physique quantique, de la même manière que la distance de Planck (10^{-35} m) semble être la plus petite distance accessible à notre physique.

L'atome quantique : La physique quantique va rendre le modèle de l'atome de Bohr caduque. Depuis le milieu des années 1930, l'**atome est devenu une description mathématique** très difficile à transcrire en images. Ce formalisme quantique conduit à représenter tous les systèmes physiques, quelle que soit leur nature (ondulatoire ou corpusculaire), par des entités mathématiques, les vecteurs d'état, qui ont la propriété de pouvoir s'ajouter entre eux: la somme de deux états possibles d'un système physique est encore un état possible du système.

A chacun des états, la théorie associe un nombre complexe appelé « **amplitude** » qui, comme l'amplitude d'une onde classique, possède un module et une phase.

La "**fonction d'onde**" permet de connaître la concentration de l'onde électronique dans l'atome à tel ou tel endroit. L'électron n'est plus un corpuscule localisé précisément, mais une portion de paquet d'onde (l'orbitale électronique) où l'énergie est très concentrée.



La superposition d'états : Un atome radioactif d'uranium peut **exister dans deux états superposés** : intact et désintégré.

Décohérence quantique : L'état de superposition cesse immédiatement dès qu'il y a observation, et donc interaction, de la particule; on dit alors qu'il y a **décohérence quantique** lorsqu'un système A et B devient un système A ou B.

La superposition d'état concerne en fait des particules totalement isolées. A l'échelle quantique, les particules évoluent dans un grand vide et les rencontres sont assez rares. A notre échelle, c'est très différent: **La décohérence des objets macroscopiques est quasi-immédiate**. Un véritable chat, ou même une simple aiguille de mesure, systèmes constitués d'un nombre gigantesque de molécules, perdent leur cohérence quantique en un temps infiniment court.

Si l'on savait repousser à volonté la frontière quantique-classique, on ouvrirait un champ de possibilités vertigineux. On pourrait, pourquoi pas, mettre en superposition des calculateurs faits de milliers d'atomes constituant des bits d'information. Mais la difficulté d'isoler un système quantique des particules du monde, afin d'éviter une décohérence quasi immédiate, est un obstacle qui "condamne à l'échec l'ordinateur quantique à grande échelle, tout comme la réalisation de vrais chats de Schrödinger suspendus de façon cohérente entre la vie et la mort. L'extrapolation des expériences actuelles permet cependant de prévoir la réalisation de « mini-calculateurs », véritables « chatons » de Schrödinger faits de quelques atomes ou de quelques photons intriqués, qui démontreront le fonctionnement de principe des logiques quantiques. En tirera-t-on quelque chose d'utile ? Cela reste à voir, mais par ces recherches c'est l'étrange frontière classique-quantique qui nous livrera une partie de ses secrets." Par Serge Haroche, Jean-Michel Raimond, Michel Brune

<http://www.larecherche.fr/savoirs/autre/chat-schrodinger-se-prete-a-experience-01-09-1997-89307>

La non-séparabilité : encore appelé effet EPR (pour Einstein Podolski Rosen) est un phénomène quantique qui heurte le sens commun. Deux particules jumelles sont dites corrélées, comme par exemple deux photons émis par un même atome excité.

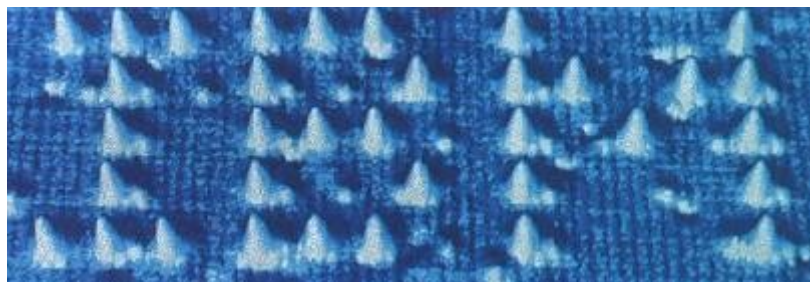
Ces deux photons, comme tous les photons, sont dotés d'une propriété particulière, la polarisation, qui est définie comme la direction du champ électrique qui leur est associé. Deux photons corrélés auront une mesure de polarisation de +1 pour l'un et obligatoirement de -1 pour l'autre.

Selon l'interprétation classique, chaque photon a conservé sa polarisation après leur séparation : l'un est polarisé +1 et l'autre -1, bien avant que l'observateur n'effectue de mesure. Les deux photons constituent deux systèmes séparés et sont totalement indépendants l'un de l'autre.

Selon l'interprétation quantique, **tant que personne n'a effectué de mesure**, la polarisation de chaque photon reste indéterminée. Le même principe s'applique à la position indéterminée de l'électron autour du noyau atomique avant mesure. Ce n'est donc qu'au moment où la mesure est faite sur un photon que l'autre acquiert ses caractéristiques: si la polarisation d'un photon est +1, l'autre devient -1 et vice-versa. **Les deux particules forment un ensemble inséparable, même si elles sont infiniment éloignées.**

Les expériences d'Alain Aspect en 1983 (Voir Annexes) tranchent nettement en faveur de l'interprétation quantique. Cela a des conséquences révolutionnaires sur notre vision du monde : Deux particules corrélées forment un tout quelque soit leur distance de séparation. La connaissance de l'une influe sur l'autre instantanément, sans transmission d'information résultant d'une action physique. Ce résultat a profondément choqué Albert Einstein, qui n'acceptait pas qu'il existe une influence se propageant d'un système à l'autre, à une vitesse supérieure celle de la lumière. *En 1998, l'expérience de Genève* a testé les corrélations entre deux détecteurs distants de 30 kilomètres, en utilisant le réseau suisse de télécommunication par fibre optique, en datant chaque mesure à l'aide d'une horloge atomique. Elle impliquerait un hypothétique signal de coordination se déplaçant à 10 millions de fois c la vitesse de la lumière.

La physique quantique a permis d'aboutir à des réalisations très concrètes, comme le microscope électronique ou le laser. Le microscope à effet tunnel permet de "palper" les aspérités d'une surface, atome par atome. Une de ses variantes, le microscope à force atomique, permet même de déposer des atomes un par un sur une surface. C'est ainsi que le logo IBM a été écrit avec des atomes de Xénon :



LE MODÈLE STANDARD

Il a été élaboré selon l'idée que toutes les particules d'un même type ont une nature identique mais peuvent avoir des propriétés différentes. Par exemple, les électrons d'un même atome ont des **énergies** (liées à leurs orbites) différentes, mais chaque particule possède ses propriétés naturelles parmi lesquelles :

- La **masse** au repos (identique pour chaque type de particules)
- La **charge** électrique Q qui vaut +1 pour le proton, -1 pour l'électron, 0 pour le neutron.
- Le **spin** (de l'anglais "to spin" = faire tourner) qui correspond au moment cinétique interne, c'est-à-dire en gros à la rotation de la particule sur elle-même.

Le principe d'exclusion :

D'un côté, les particules qui s'excluent mutuellement: elles ne peuvent pas être au même endroit en ayant exactement les mêmes propriétés. Ce sont les **FERMIONS**.

De l'autre côté, les particules qui sont capables de se rassembler à plusieurs dans le même état physique.

Ce sont les **BOSONS**.

Par exemple, un ensemble de photons (bosons) dans le même état constitue ce qu'on appelle un rayon laser.

Ce principe d'exclusion est fondamental : Il fait des **fermions, les "vraies" particules de matière**. Si on les force à se rapprocher très très près les uns des autres et en vertu de ce principe d'exclusion, les fermions vont se repousser violemment (pression quantique) puisqu'ils ne peuvent pas exister au même endroit. La matière est ainsi répartie dans l'espace.


Quant aux **bosons**, nous verrons qu'ils s'agit de **particules-médiateurs des forces fondamentales** de la nature.

Jusqu'en 1964, on croyait qu'il n'existait que trois particules élémentaires constitutives de l'atome: l'électron, le proton et le neutron. En réalité, en plus de l'**électron**, 2 sortes de **quark** forment les protons et neutrons.

Quark UP (u) et quark DOWN (d) forment le proton = u + u + d et le neutron = u + d + d

Les quarks sont des **fermions** et sont liés entre eux par une force appelée interaction forte (la même qui lie les protons et neutrons entre eux).

NUCLEON:	QUARKS:	CHARGE Q:
proton	u + u + d	+2/3+2/3 -1/3 = +1
neutron	u + d + d	+2/3 -1/3 -1/3 = 0



Le **neutrino** est une particule fondamentale pour expliquer le mécanisme de la **radioactivité Bêta** : un neutron se transforme en un proton en émettant un électron (rayon bêta) et un neutrino.

Le neutrino et l'électron, particules légères, sont groupés dans la famille des **leptons** (du grec "leptos" = léger).

L'**antimatière** est constituée d'antiparticules: antiquarks, anti-électrons, antineutrinos. Ainsi à chaque particule correspond une anti-particule symétrique. Si une particule rencontre son antiparticule, **leurs deux masses se convertissent intégralement en énergie** (de type rayons gamma): c'est le phénomène de l'annihilation que les physiciens peuvent reproduire dans les collisionneurs.

Il s'agit d'ailleurs du seul phénomène où toute une masse est transformée totalement en énergie selon la célèbre formule d'Einstein $E=mc^2$. Cette énergie colossale dégagée par une telle rencontre particule-antiparticule peut rapidement se retransformer en d'autres particules massives : c'est le phénomène inverse de **matérialisation de l'énergie**. Cela explique pourquoi il n'y a pas d'antimatière dans notre environnement de matière: toute trace d'antimatière serait annihilée au moindre contact avec la matière de notre monde.

Description du noyau atomique par Etienne KLEIN : Au centre de l'atome, au sein du noyau, on devine une sarabande de protons et neutrons. Collés ensemble par des forces puissantes, ils s'agitent violemment en tous sens. Dans chaque proton, dans chaque neutron, une autre danse : trois quarks, toujours trois, agités d'un mouvement formidablement rapide. Au cours de chocs d'une violence terrible, il arrive que l'énergie de ces quarks se transforme en matière; une paire de particules nouvelles jaillit alors : un quark et un antiquark. A l'inverse, quand un quark et un antiquark se rencontrent, ils se détruisent mutuellement et se transforment en énergie. Et ainsi de suite: quarks et antiquarks apparaissent, se rencontrent, disparaissent au cours de fugitives catastrophes qui se répètent incessamment. Curieusement, un certain ordre règne dans ce chaos frémissant : en effet, il y a toujours, en chaque proton, trois quarks de plus que d'antiquarks.

Les familles de particules :

La **première famille** que nous avons décrite suffit à décrire **le monde dans lequel nous vivons**.

Il existe cependant **deux autres familles** de fermions, découvertes à partir des années 1940.

Les familles 2 et 3 contiennent des particules de plus en plus massives qui n'existaient dans l'univers qu'au tout début de celui-ci, lorsque la densité et la température étaient telles, que ces particules pouvaient se matérialiser à partir de densité d'énergie suffisante.

Ces familles "lourdes" de particules forment donc une sorte de **matière-fossile** qui existait au tout début de notre Univers. Actuellement, les physiciens sont capables de les recréer à l'aide des densités d'énergies colossales générées par les collisionneurs.

	QUARKS		LEPTONS	
charge Q	Q = -1/3	Q = +2/3	Q = -1	Q = 0
famille 1	down = d	up = u	électron	neutrino électronique
famille 2	strange = s	charm = c	muon	neutrino muonique
famille 3	bottom = b	top = t	tau	neutrino du tau

Il nous manque encore une famille fondamentale de particules: les **bosons** dont fait partie le photon, grain quantique de lumière. Ces bosons sont les particules médiatrices des 4 forces fondamentales de l'univers: les interactions sans lesquelles nos particules de matière ne pourraient pas se lier entre elles.

Les bosons sont des particules très spéciales qui ne respectent pas le principe d'exclusion de Pauli. Les bosons peuvent se superposer dans le même état quantique contrairement aux fermions qui sont individualisés dans l'espace.

Boson	interaction	portée	intensité	acteurs	charge sensible
graviton ?	gravitationnelle	infinie	10^{-38}	toutes les particules	masse, énergie
photon	électro-magnétique	infinie	10^{-2}	tous les fermions sauf neutrinos	charge Q électrique
8 gluons	forte	10^{-15} m.	1	tous les quarks	charge de couleur
3 bosons: $W^+ W^- Z^0$	faible	10^{-18} m.	10^{-7}	tous les fermions	charge faible

Le cas du Boson de Higgs : Il est une manifestation du **champ de Higgs**, qui donne directement **une masse aux particules**. Le champ de Higgs (du nom de l'un de ses inventeurs, Peter Higgs), en nom complet champ de Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble (champ BEHHGK), est un champ **scalaire**. La masse inertielle d'une particule résulte de son degré d'interaction avec le champ de Higgs. Ainsi, une particule sans interaction avec le champ de Higgs, comme le photon, a automatiquement une masse nulle. Inversement, plus cette interaction est importante, plus la particule est « lourde ».

La masse du corps humain (Étienne KLEIN) : Si les particules élémentaires (quarks, électrons...) n'avaient pas de masse, cela ne représenterait qu'une perte de 4% de notre masse. L'essentiel de notre masse viens des interactions entre nos particules. Par exemple, dans les protons, les quarks interagissent par l'interaction nucléaire forte, cette énergie d'interaction produit de la masse effective par $E=mc^2$, qui constitue en grande partie notre masse.

LES 4 INTERACTIONS FONDAMENTALES

Les 4 forces ne s'exercent entre deux fermions que s'il y a échange d'une particule médiatrice, appelée boson. Or plus le boson sera lourd, plus l'interaction sera de courte portée.

L'analogie des pêcheurs en barque : Remplaçons deux fermions par deux pêcheurs en barques qui se rapprochent inexorablement l'un de l'autre. Le pêcheur amateur de bowling lance avec force sa lourde boule vers son collègue. Lui-même et sa barque vont être déviés par réaction, comme si le pêcheur s'était appuyé sur sa boule pendant le lancer. La boule part dans un sens et l'ensemble pêcheur-barque part proportionnellement dans le sens opposé.

Scénario inverse pour le pêcheur qui réceptionne la boule: L'énergie cinétique de la boule va faire dévier la barque. Au final, les deux barques vont être déviées et s'éloigner l'une de l'autre.

On comprend que plus la boule sera lourde (boson), plus la force de répulsion sera importante, mais aussi plus la portée de cette force sera courte car lancer loin une boule de bowling demande beaucoup d'énergie!

Cette analogie ne fonctionne que pour des forces répulsives, à moins de remplacer la boule de bowling par un lourd boomerang qui pourrait imager des forces attractives.

LA GRAVITATION :

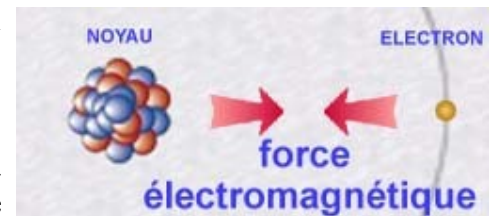
- *L'univers astronomique* est dominé par la gravitation. Dans l'espace deux objets s'attirent d'autant plus fortement qu'ils sont massifs et qu'ils sont proches l'un de l'autre. Tout se passe comme si la masse des objets était concentrée en leur point central, appelé le centre de gravité. L'interaction gravitationnelle, toujours attractive, est de portée infinie mais décroît selon l'inverse du carré de la distance. Elle s'applique à toutes les particules, y compris au photon qui n'a pourtant pas de masse.
- *A l'échelle atomique*, l'influence de la gravitation est négligeable car les particules sont très peu massives. En fait, cette force est cumulative, c'est-à-dire que c'est la somme gigantesque de la gravitation de toutes les particules qui va engendrer la force gravitationnelle sensible à notre échelle.
- Paradoxalement, elle redevient importante, voire dominante, *aux échelles ultra-microscopiques* de l'ordre de 10^{-35} m. Cette longueur est très particulière et s'appelle la longueur de Planck. Au-delà de ces bornes mystérieuses, les physiciens imaginent un univers très déroutant où l'espace-temps pourrait être discontinu ou fluctuant. Cet univers était celui des tout premiers instants du Big Bang. La théorie quantique imagine que toute interaction doit se faire par l'intermédiaire d'un boson, ou particule médiatrice associée à une onde gravitationnelle de très faible fréquence, si faible qu'on ne l'a encore jamais détecté. Mais cet hypothétique boson a déjà été baptisé **graviton**. On suppose sa masse nulle et son énergie infime. Les physiciens prient pour qu'il existe: dans le cas contraire, cela signifierait que la physique quantique et la relativité générale sont des théories insuffisantes!



L'ÉLECTROMAGNÉTISME :

Un objet de masse faible est dominé par la force électromagnétique qui assure sa cohésion interne. C'est pourquoi il peut avoir n'importe quelle forme : table, corps humain ou immeuble.

C'est la mieux comprise des quatre interactions et elle présente certaines analogies avec la gravitation qui a, comme elle, une portée infinie: cela s'explique par le fait que le boson médiateur, le **photon**, a une masse nulle et peut donc agir à très longue portée.



L'interaction électromagnétique attire deux particules de charge Q opposée (comme par exemple l'électron et le noyau atomique) et repousse deux particules de même charge. Contrairement à la gravitation, ses effets cumulatifs sont annulés, car les attractions et les répulsions localisées se compensent à grande échelle.

Cette force régit le déplacement des ions dans un matériau conducteur mis sous tension, créant simultanément un courant électrique et un champ magnétique. En effet, une particule chargée, au repos dans le vide, engendre un champ électrique identique dans toutes les directions de l'espace. En revanche, son déplacement brise cette symétrie, à cause d'effets relativistes (dilatation du temps) à l'origine du champ magnétique. Inversement, le mouvement alternatif d'un aimant dans une boucle de fil conducteur crée un courant électrique: c'est le principe bien connu de la dynamo.

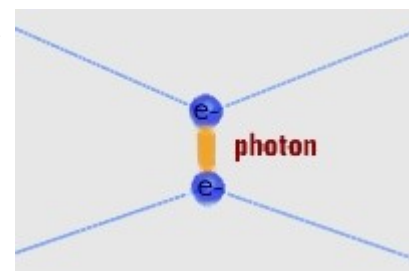
Chaque atome est théoriquement neutre, mais en réalité, les électrons peuvent s'exciter facilement et sauter d'un atome à l'autre. Cela crée donc des ions (des atomes incomplets chargés électriquement) qui cherchent à compléter leurs orbitales externes et qui s'accrochent entre eux. Ces ensembles d'atomes forment des **molécules** qui peuvent être très complexes et très lourdes dans le cas des constituants de la vie. En assurant la cohésion des objets grâce aux liaisons des orbitales électroniques entre atomes et entre molécules, l'interaction électromagnétique est donc à **la base de la chimie**.

La théorie actuelle expliquant l'électromagnétisme s'appelle **l'électrodynamique quantique** ou QED en sigle anglo-saxon. Vérifiée avec une extraordinaire précision, elle a toute la confiance des physiciens.

Elle nous dit que l'interaction électromagnétique résulte de l'échange de **photons virtuels**, impossibles à détecter en tant que tels. Toutes les particules chargées (électron, proton...) ou pourvues, comme le neutron, d'un moment magnétique (comme un petit aimant) subissent sa loi.

Seuls les neutrinos sont gouvernés par une autre loi, l'intégration faible.

Comment se passe l'échange des bosons? Le *diagramme de Feynman* décrit que l'électron N°1, qui se rapproche du N°2, pénètre à un moment donné dans le champ électrique du N°2 (et vis versa). C'est à cet instant qu'ils émettent tous deux un photon et qu'ils changent de direction: ce phénomène s'appelle **la diffusion des électrons**. Les deux fermions ne se sont pas heurtés, chacun est simplement entré dans le champ électromagnétique de l'autre et en a subi l'action. La notion de champ est une notion mathématique qui est très difficile à imaginer. Disons que l'espace entourant chaque électron semble avoir ses propriétés modifiées en tout point et selon la proximité de la particule. Nous ne nous avancerons pas plus loin! Il est important de retenir que la force électromagnétique n'agit qu'après l'émission du boson-photon.



On pourra mieux imaginer, à l'aide de la QED, le lien qui unit les électrons (ou leur version quantique diluée sous forme d'orbitale) au noyau de l'atome. Il faut se représenter ce lien invisible comme **un incessant échange interne de photons virtuels**, cela simultanément entre tous les électrons et les nucléons de leur noyau. Nous voyons là la complexité croissante de la représentation de l'atome depuis le modèle de Bohr.

Selon la QED, la force électromagnétique découle du rôle capital d'une particule virtuelle sans masse: le photon. **Ce sont in fine les propriétés et les échanges de photons entre fermions qui produisent les lois de l'électricité, du magnétisme et de l'optique et par extension de toute la chimie et de toute la vie en général.**

L'INTERACTION FORTE : La colle super-gluon.

L'interaction forte est responsable du **confinement des protons et des neutrons dans les noyaux atomiques**. Son intensité est considérable et elle dominerait toutes les autres forces de la nature si son rayon d'action n'était pas aussi minuscule.

En fait, l'interaction forte s'exerce plus fondamentalement entre les constituants des nucléons: les **quarks** (et les antiquarks). De la même manière que l'interaction électromagnétique n'agit que sur les particules possédant une charge Q non nulle, l'interaction forte n'agit que sur les particules portant une caractéristique baptisée "**couleur**". La théorie expliquant ce mécanisme s'appelle la **chromodynamique quantique** (car chromo = couleur) ou QCD.



La chromodynamique quantique :

Les **quarks** et les *antiquarks* sont donc symboliquement caractérisés par une couleur: **rouge, vert ou bleu** (les 3 couleurs primaires) pour les antiquarks par *cyan, magenta ou jaune* (les 3 couleurs complémentaires correspondantes ou anti-couleurs).

A noter, que la famille des leptons (électron, muon, tau et leur neutrino) est insensible à l'interaction forte et donc ces particules sont non colorées.

Les particules composites que forment les quarks par regroupement s'appellent les **hadrons**. Tous ces hadrons sont donc sensibles à l'interaction forte et ils ont tous une charge de couleur nulle: ils sont donc blancs.

Les hadrons peuvent être de deux types différents:

- Les **baryons** : ils contiennent 3 quarks de 3 couleurs différentes, et obéissent à la règle suivante (les nucléons, c'est à dire les protons et neutrons, sont des baryons particuliers contenant des quarks u et d) :

quark rouge + quark vert + quark bleu = baryon neutre

Les *antibaryons* contiennent 3 antiquarks de 3 anticouleurs et obéissent à la règle :

antiquark cyan + antiquark magenta + antiquark jaune = antibaryon neutre

- Les **mésons** (particules instables et très éphémères) contiennent un quark d'une couleur primaire et un antiquark de la couleur complémentaire (l'anti-couleur) correspondante:

quark rouge + antiquark cyan = méson neutre

quark vert + antiquark magenta = méson neutre

quark bleu + antiquark jaune = méson neutre

Les gluons : L'interaction forte s'exerce par l'intermédiaire d'un boson (particule médiatrice) baptisé **gluon** et il en existe **huit différents**; chacun porteur d'une couleur et d'une anti-couleur. Comme les photons, ils sont de masse nulle et comme le graviton, ils *n'ont encore jamais été détectés*.

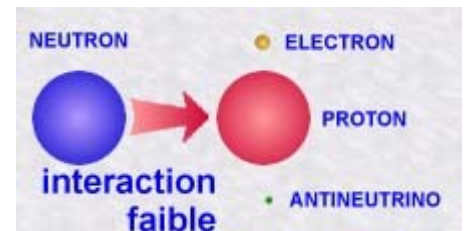
Un gluon est donc toujours associé à une couleur et à une anti-couleur; lorsqu'il est échangé entre deux quarks, il va donc échanger les couleurs de ces derniers. Contrairement au photon médiateur qui ne change pas les charges Q des particules interagissantes, **les gluons changent la couleur des quarks**.

Il faut donc se représenter un nucléon comme une incessante transformation de 3 quarks s'échangeant en permanence des gluons. A un instant donné, les 3 quarks ont bien 3 couleurs différentes, mais ces couleurs vont constamment changer de propriétaires à tour de rôle.

Plus étonnant encore, vus de très près, **les quarks d'un nucléon semblent libres. En revanche, s'ils s'éloignent les uns des autres, la force qui les lie augmente et ils ne peuvent sortir du nucléon**. Quarks et gluons sont confinés à l'intérieur des baryons et des mésons. Donc deux quarks de couleurs différentes sont d'autant plus attirés l'un par l'autre qu'ils sont éloignés l'un de l'autre! C'est comme s'ils étaient reliés par un élastique. On ne pourra donc jamais observer un quark isolé.

L'INTERACTION FAIBLE :

Elle est responsable de la **radioactivité Bêta** où un nucléon se transforme en un autre nucléon, en émettant une paire électron-antineutrino (ou leurs antiparticules). C'est la force faible qui maintient liées entre elles ces trois particules et elle peut donc être attractive dans ce cas ou répulsive en provoquant la transmutation d'un neutron en proton.



Cette interaction est plus discrète que les autres: elle a une intensité **dix millions de fois plus petite que l'interaction forte** (d'où son nom de faible) et **sa portée est la plus courte de toutes**: elle agit à 10^{-18} mètres c'est-à-dire pratiquement au contact de deux particules.

Pourtant l'interaction faible est fondamentale pour nous, puisqu'elle régit les réactions thermonucléaires de notre Soleil et de toutes les étoiles: Sans elle, pas de chaleur et pas de vie!

Il est important de retenir que la force faible **s'applique à tous les fermions**, y compris les insaisissables neutrinos qui ne réagissent à aucune des autres interactions.

L'interaction faible est très excentrique car elle se singularise de ses trois sœurs par deux points:

- **Elle se transmet par des particules très massives:** les bosons intermédiaires. Contrairement aux autres bosons de masse nulle, les particules virtuelles médiatrices de l'interaction faible sont environ 100 fois plus massives que le proton! De plus, elles sont au nombre de trois:
 - le **boson Z⁰** (le plus massif des 3) responsable de l'**interaction faible par courant neutre**.
 - Les **bosons W⁻ et W⁺** ont une charge électrique et sont responsables de l'**interaction faible par courant chargé**.
- **Elle n'est pas symétrique**, contrairement à l'interaction électromagnétique :

L'interaction faible peut produire des désintégrations avec émission de neutrinos. S'ils tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, on dit qu'ils sont "gauches". Il devrait donc aussi exister une réaction "miroir" qui produit des neutrinos "droits". Eh bien non! Ces neutrinos droits n'existent pas et le mécanisme à l'**origine de cette asymétrie demeure inconnu!**

LE MODÈLE STANDARD selon Ethienne KLEIN **(Agora du Savoir, Montpellier 2015)**

https://www.youtube.com/watch?v=pPgMDJq_-aY

A chacune des 4 interactions fondamentales, on peut associer un groupe de symétrie mathématique.

Pour l'électromagnétisme, le groupe des nombres complexes de module 1 correspond parfaitement au formalisme de la physique quantique et donne la structure de l'interaction.

On a trouvé d'autres groupes pour les autres interactions, et le modèle standard ainsi obtenu a permis de comprendre les résultats obtenus avec les accélérateurs de particules.

Sauf que ce modèle impliquait :

- *Que toutes les masses de toutes les particules élémentaires devaient être nulles.*
- *Que lorsque les particules interagissent, elles échangent d'autres particules qui sont caractéristiques de l'interaction.*

Exemples :

- *Quand 2 électrons s'opposent par la force électrique, ils s'échangent des photons.*
- *Quand 2 quarks interagissent par l'interaction forte, ils échangent des gluons, et par l'interaction faible des bosons intermédiaires.*

Mais nous observons que les quarks et les électrons, entre autres, n'ont pas de masse nulle.

Depuis Newton on s'est trompé sur le concept de masse, au lieu de dire que les particules de matière ont une masse qui vient d'elles mêmes, il faut imaginer que leur masse viens d'une interaction avec le vide qui n'est pas vide.

Les chercheurs imaginent que dans le vide, il y a quelque chose, un champ quantique, une grandeur qui est partout présente, un peu comme un champ de température, qui a la même valeur en tout point, qui est donc homogène et uniforme, partout présent dans l'espace.

Les particules qui n'ont pas de masse, interagissent plus ou moins fortement avec ce champ.

Cette interaction va plus ou moins les ralentir, donc leur donner une inertie plus ou moins grande.

Ce que l'on appelle la masse, ce n'est pas une propriété des particules élémentaires, c'est une mesure de l'interaction qu'elles ont avec le champ de Higgs qui est dans le vide.

L'objectif était de détecter le boson de Higgs, mais sans savoir quelle était sa masse. Il fallait faire rentrer en collision des particules, sans savoir quelle énergie E mise dans la collision, générerait la particule de masse m avec $E=mc^2$, ce qui matérialiserait la particule depuis le vide quantique grâce à l'énergie de la collision.

On a fait une machine de 27km en 1989, le LEP, un collisionneur d'électron et de positron, sans voir le boson de Higgs. On a construit 10 ans plus tard le LHC, un collisionneur de protons (les protons sont des hadrons, plus lourds que les électrons, donc plus d'énergie dans les collisions) et on a trouvé.

Cette découverte viens changer le statuts même du vide. Le vide n'est pas vide. Le vide n'est pas tout à fait le contraire de la matière, c'est le prologue de la matière. C'est une sorte de réservoir qui contient la possibilité d'existence de toutes les particules de matière.

Dans le langage courant, le vide c'est ce qui reste quand on a tout enlevé. En physique quantique, vous retirez toutes les particules de matière, il reste les champs quantiques associés à ces particules, dans l'état de plus

basse énergie, mais non nuls. Les champs sont là, mais les particules associées sont pas là. Le vide contient des particules virtuelles, qui n'ont pas assez d'énergies pour exister vraiment. Elles ont une énergie qui est inférieure à mc^2 . Dans le vide quantique, les particules n'ont pas beaucoup d'énergie, mais elles peuvent en emprunter au vide pendant un temps très court, devenir réelles, mais elles devront rembourser cette énergie d'autant plus rapidement que l'emprunt aura été plus important. Les particules ne peuvent sortir que par paires, une particule et son anti-particule.

Le collisionneur "réchauffe le vide". On dépose l'énergie des particules incidentes dans un petit volume d'espace temps, l'énergie est conféré au vide qui est là, les particules "endormies" absorbent cette énergie, elles deviennent réelles, elles absorbent en plus de l'énergie cinétique, elles sortent du vide, et on les capture. On a pas détecté le boson de Higgs, car il n'y a plus de bosons de Higgs à proprement dit, ils sont endormis dans le vide quantique. On a montré que dans l'univers primordial, quand il y avait beaucoup d'énergie, les bosons de Higgs existaient. Mais le champ qui leur est associé existe toujours, et c'est lui qui donne leur masse aux particules.

Ethienne Klein "De quoi l'énergie est-elle le nom?"
Les conférences Cyclope du CEA Saclay, mardi 18 décembre 2012
<https://www.youtube.com/watch?v=Nb2S7oge8TQ>

$E=mc^2$ signifie que l'on peut transformer de la masse en énergie et inversement. Par exemple, un noyau très lourd d'uranium percuté par un neutron se coupe en deux noyaux plus petits avec émission d'autres neutrons (réaction en chaîne). La somme des masses sera inférieure à la masse initiale car une partie de la masse sera transformée en énergie, l'énergie nucléaire.

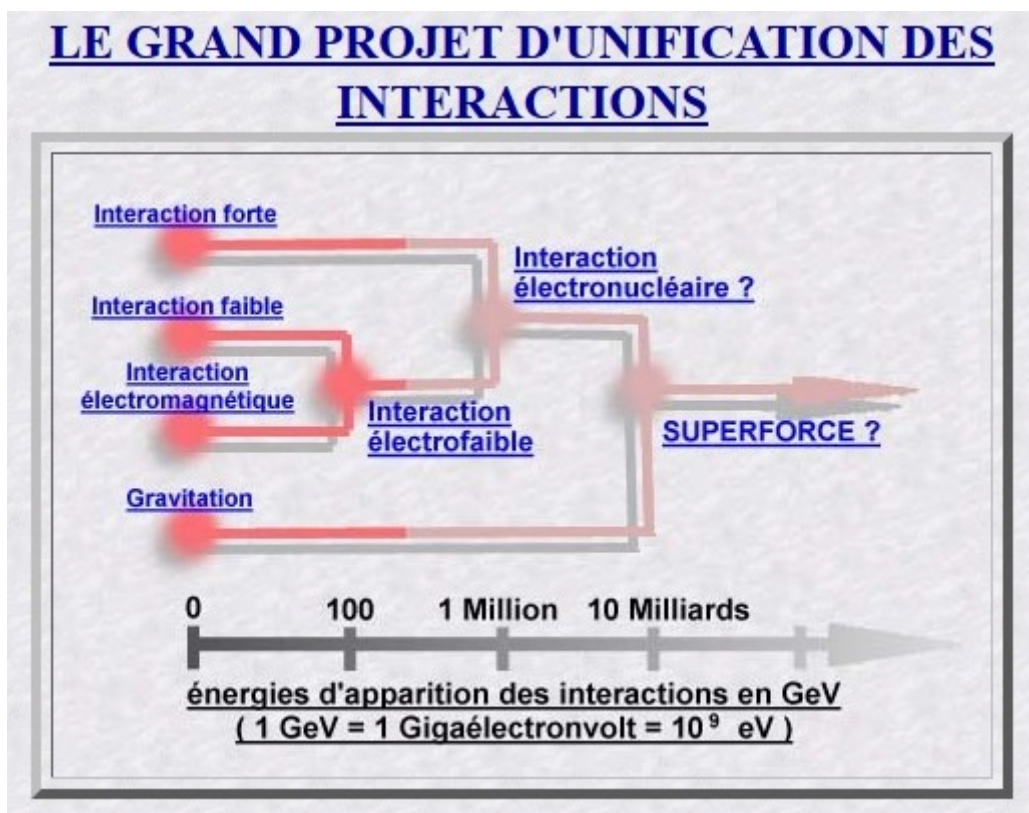
Autre exemple, lors d'une collision, une partie de l'énergie cinétique des particules qui se choquent peut se transformer en d'autres particules, créant de la masse. **La propriété d'un objet (la vitesse d'une particule) peut devenir un autre objet.**

La formule complète d'Einstein est $E^2=m^2c^4 + p^2c^2$ avec p étant l'impulsion de la particule. L'équation est habituellement simplifiée en $E=mc^2$ valable pour les particules au repos. La seconde partie rend possible l'existence de particules de masse nulle, par exemple un photon, qui peut avoir plus ou moins d'énergie en fonction de son impulsion. Ces particules sont obligées d'aller à la vitesse de la lumière.

VERS LA GRANDE UNIFICATION

Les physiciens rêvent d'expliquer l'ensemble des phénomènes de l'Univers avec un minimum d'élément. La multiplicité des matériaux naturels (métaux, pierres, liquide...) a été expliquée par la théorie atomique et toute la matière a trouvé ses briques de bases dans le tableau périodique des éléments. Les atomes et les nombreuses particules découvertes avec l'aide des collisionneurs ont été disséquées, classifiées et réduites à un petit nombre dans le Modèle Standard. Newton a expliqué en 1687 que la force d'attraction astronomique et la gravité terrestre ne sont qu'une seule et même interaction dite gravitationnelle. Après **Oersted**, **Maxwell** a expliqué en 1873 que le magnétisme, l'électricité et la lumière ne sont que les manifestations différentes d'une seule et même interaction dite électromagnétique.

Le graphique ci-dessous montre que les interactions observables par les physiciens ne seraient que les aspects différents d'une seule et même force originelle (la Superforce!) accessible à de très hautes énergies. L'hypothèse faite étant qu'à l'origine du monde, la densité d'énergie était telle que toutes les interactions étaient unifiées, et qu'elles se seraient différenciées depuis.



L'interaction électrofaible :

En fait, une autre unification a été démontrée en 1967, unifiant l'interaction faible et l'interaction électromagnétique par la théorie **mathématique** de l'interaction électrofaible. Les interactions sont modélisées sous forme de **champ de forces** ayant une "symétrie de jauge".



Il reste les interactions gravitationnelle, forte et électrofaible.

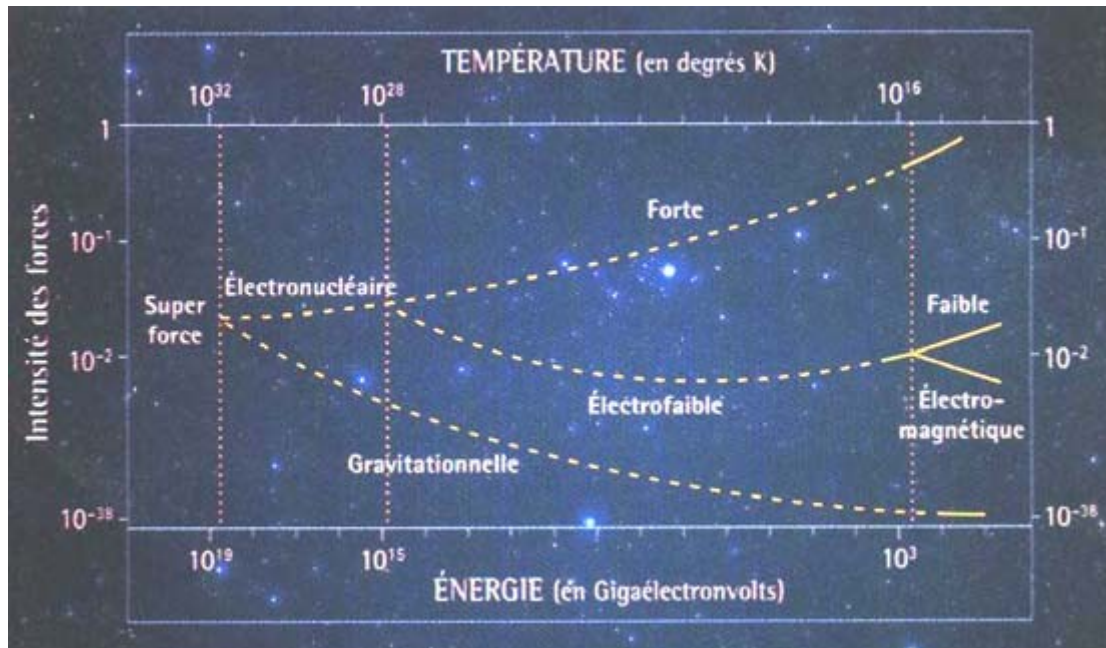
La théorie de l'**interaction électronucléaire** est aussi nommée *Théorie de la Grande Unification* ou *TGU* (ou *GUT* en anglais). Elle unifie l'interaction forte et électrofaible.

Cette interaction n'est possible qu'à des niveaux énormes d'énergie, plus de 10^{16} GeV pour les connaisseurs, conditions qui n'existaient qu'au tout début du big bang.

Encore plus fort! La "**théorie de Tout**" unifie la gravitation et l'interaction électronucléaire de la théorie GUT. Les 4 interactions du début ne seraient donc que les 4 facettes d'une même interaction, surnommée la **Superforce**, qui régnait à l'origine ultime des temps, à une énergie titanesque de 10^{19} GeV. Cette énergie n'était possible qu'avec un Univers hyper-dense d'un diamètre équivalent à 10^{-33} m (Par comparaison, un proton mesure 10^{-15} m)!

Cette très hypothétique Superforce unifierait toutes les particules connues (plus d'autres inconnues) en faisant appel à deux autres super-théories : la **supersymétrie** et les **supercordes**.

Toutes les particules existantes ne seraient en fait que différents modes de vibration (ou harmoniques) d'une seule et unique supercorde! Une corde peut vibrer selon des harmoniques de plus en plus complexes qui correspondraient à des particules de plus en plus massives...



LE BIG BANG

Dans l'ordre, c'est à dire dans le sens de l'histoire, et non pas dans le sens des découvertes scientifiques qui ont tendance à remonter l'histoire de l'univers, la théorie du Big Bang nous raconte les événements ultra-rapides de la naissance de l'Univers, qui se sont déroulés il y a environ 15 milliards d'années.

10⁻⁴³ seconde après le big bang : Le temps de Plank

Il existait peut-être de nombreuses autres dimensions (théorie des supercordes), ces dimensions se seraient ensuite "enroulées" sur elles-mêmes pour laisser l'Univers évoluer selon les 4 dimensions de l'espace-temps que nous connaissons actuellement.

De 10⁻⁴³ à 10⁻³⁵ seconde : Période de la grande unification des forces

Ce qui deviendra notre Univers n'a que environ 10⁻³³ cm de diamètre, c'est-à-dire 10 millions de milliards de fois plus petit qu'un atome d'hydrogène! Sa température est de 10³² degrés Kelvin (0°K = -273°C).

Dans cet Univers, toujours le vide quantique où bouillonne une énergie inimaginable.

La superforce se scinde en deux forces: la **gravitation**, et la **force électronucléaire**.

La gravitation fait donc sécession et quitte le monde quantique. Désormais, son action à l'échelle des particules sera négligeable sauf dans des cas extrêmes (explosion d'étoile par exemple).

De 10⁻³⁵ à 10⁻³² seconde : Inflation de l'Univers

Le thermomètre cosmique "descend" à environ 10²⁸ degrés Kelvin.

il y a sécession de la force électronucléaire en **interaction forte** et en **interaction électrofaible**. Avec la gravitation, Il existe donc désormais trois forces distinctes dans l'Univers.

L'énorme énergie du vide est libérée, et imprime à l'Univers une expansion fulgurante que le physicien **Alan Guth** a appelé **inflation**. Son volume augmente d'un facteur 10²⁷ (ou 10⁵⁰ selon d'autres sources) alors que dans les 15 milliards d'années suivantes, son volume n'augmentera que d'un facteur 10⁹.

De 10⁻³² à 10⁻¹² seconde : Formation des quarks

A la fin de la période d'inflation, vers 10⁻³² seconde après le big bang, l'Univers a la taille d'une orange et sa température est de 10²⁵ °K.

Les premières particules de **quarks** et d'**antiquarks** surgissent du vide quantique dans un bain de photons. Cette matérialisation de matière et d'antimatière va entraîner aussitôt une lutte à mort entre ces deux composantes antagonistes.

Cependant, la création des couples particules-antiparticules ne va pas se faire de façon parfaitement symétrique: Un petit excédent de matière va apparaître. Pour 1 000 000 000 d'antiquarks créés, il y a 1 000 000 001 de quarks créés, et donc 1 seul quark survivra à la future grande annihilation (un rapport de 1 pour 1 milliard!).

Cette **brisure de symétrie** est responsable de l'existence de la matière dont nous sommes constitués !

De 10⁻¹² à 10⁻⁶ seconde : Formation des leptons

Température = 10¹⁵ °K.

L'Univers se refroidit toujours et grossit pour devenir une sphère de 300 millions de kilomètres.

L'interaction électrofaible se dissocie à son tour en **interactions faibles** et **électromagnétiques**. Les 4 interactions fondamentales de l'univers sont donc différenciées comme elles le sont actuellement.

Par ailleurs, la soupe de quarks et d'antiquarks s'est enrichie de particules légères, sensibles à l'interaction faible : les **leptons**. Ces leptons regroupent les **électrons**, **muons**, **tau** et leurs **neutrinos correspondants**, ainsi que leurs **antiparticules**.

De 10⁻⁶ à 10⁻⁴ seconde : La phase des hadrons

Température = 10¹³ °K.

Le volume de l'univers est équivalent au système solaire actuel, soit 10¹³ m.

La baisse de température fait que les quarks n'ont plus assez d'énergie pour exister seuls : L'interaction forte peut alors **grouper les quarks en hadrons** :

Ainsi tous les **protons** et **neutrons**, nouvellement formés, vont finir de s'annihiler avec leurs antiparticules: Il ne restera donc au final qu'un léger excédent de matière. La température est devenu trop faible pour que les photons puissent se ré-matérialiser en couple particule-antiparticule. Les rares protons et neutrons survivants sont donc "gelés" et contribuent à former la matière de l'Univers.

De 0,0001 à 1 seconde : La phase des leptons

Température = 10^{10} °K (=10 milliards de degrés).

A cette température, il se produit une deuxième grande annihilation de matière et d'antimatière: elle concerne cette fois les **leptons** et leurs **antiparticules**.

Les paires leptons-antileptons subissent ainsi le sort des hadrons : ils s'annihilent dans un océan de photons et seule une fraction d'un milliardième de leptons survit à l'hécatombe. Exit l'antimatière de l'Univers!

La matière est désormais au grand complet, mais la température est toujours trop élevée pour que les atomes puissent se former. L'Univers est une grosse masse lumineuse de plasma brûlant formé de hadrons et de leptons célibataires.

Les neutrinos cessent d'interagir avec la matière et s'en séparent.

De 1 à 3 secondes : Formation des premiers noyaux d'atomes

La température chute à 10^6 °K : elle est suffisamment basse pour que les protons et neutrons puissent s'assembler durablement. Les **protons** seuls forment des noyaux d'**hydrogène**.

Les **protons** et **neutrons** qui se rencontrent, peuvent aussi s'assembler pour former des noyaux d'**hélium** (2 protons + 2 neutrons):

Cette phase se nomme la **nucléosynthèse primordiale**. La matière de l'Univers se compose alors des noyaux d'atomes suivants:

75% d'hydrogène

25% d'hélium He

des traces de Li-7 (lithium à 3 protons et 4 neutrons)

d'isotopes tels que Deutérium (H-2), He-3, He-4...

99% de la matière actuelle de l'Univers se forme à cette lointaine époque. Le 1% restant, non encore apparu, est constitué de tous les atomes ayant plus de 2 protons dans leur noyau, parmi lesquels les atomes de carbone, d'azote et d'oxygène dont nous sommes constitués. Tous ces atomes complexes seront formés dans les réactions thermonucléaires du cœur des futures étoiles à naître...

A cette époque, les électrons sont toujours libres car très énergétiques. Ils ne se lient donc pas encore aux noyaux pour former les atomes H (hydrogène) et He (hélium).

De 3 minutes à 300 000 ans : l'Univers devient transparent

Température = 10 000 °K

Jusqu'à là, les photons étaient continuellement émis et absorbés par les particules environnantes. Puis, avec la chute de température et de densité de l'Univers, les photons vont cesser d'interagir avec la matière : ils vont pouvoir enfin traverser l'Univers sans obstacle. Il y a **découplage entre les photons et la matière**, l'Univers devient transparent. Cette lumière libérée et provenant de tout point de l'espace peut être actuellement captée par nos astrophysiciens: c'est ce qui est appelé le fameux "**rayonnement fossile**" à 3°K de l'Univers, vestige du big bang.

300 000 ans et après : La formation des premiers atomes

Les **électrons** vont enfin pouvoir être **captés autour des noyaux** d'hydrogène et d'hélium présents. Les premiers atomes naissent enfin et l'interaction électromagnétique peut enfin jouer pleinement son rôle.

Si l'évolution de la matière s'était arrêtée ici, l'Univers ne serait rempli que de tristes nuages de gaz d'hydrogène et d'hélium. L'hélium (un gaz rare inerte) étant réfractaire à toute liaison chimique, le pauvre hydrogène n'aurait trouvé aucun partenaire pour former des molécules plus complexes et vous ne seriez pas ici à lire courageusement ce site Web!

Tous les autres atomes du tableau périodique ne seront créés que grâce à la vie et à la mort des étoiles à venir. N'oubliez pas que nous-même (de gros amas d'atomes pensants) sommes nés de "poussière d'étoiles", comme le dit si poétiquement notre astronome vedette, Hubert Reeves.

ANNEXES

Expériences d'Alain Aspect en 1983 :

Cette expérience valide la démonstration des **inégalités de John Bell**, qui avait initialement utilisé un schéma de principe composé d'une source de photons intriqués S qui émet simultanément deux photons ν_1 et ν_2 dont la polarisation est telle qu'ils sont tous deux en polarité verticale, ou tous deux en polarité horizontale, perpendiculaire, avec une probabilité égale. La source utilisée est une cascade atomique d'atomes de calcium, excitée à l'aide d'un laser à krypton.

Ces deux photons sont ensuite mesurés par deux polariseurs P_1 et P_2 , chacun ayant un angle de mesure paramétrable a et b . Le résultat de la mesure de chaque polariseur est (+) ou (-) selon que la polarisation mesurée est respectivement parallèle ou perpendiculaire à l'angle de mesure du polariseur.

Afin d'éviter les corrélations parasites lors de la mesure, les polariseurs P_1 et P_2 étaient séparés de **6 mètres** de part et d'autre de la source, et de 12 mètres l'un de l'autre. Cela donnait un temps de 20ns entre l'émission des photons et la détection : c'est le laps de temps extrêmement court pendant lequel il fallait décider de l'orientation et orienter les polariseurs.

Comme il est physiquement impossible de changer matériellement l'orientation d'un polariseur dans ce laps de temps, deux polariseurs par côté ont été utilisés, pré-orientés différemment. Un « aiguillage » à très haute fréquence de basculement orientait aléatoirement le photon vers l'un ou l'autre de ces polariseurs. L'ensemble de ce dispositif était équivalent à un seul polariseur dont l'angle de polarisation bascule aléatoirement.

Les polariseurs à deux canaux (+) et (-) utilisés étaient des cubes polarisants, transmettant une polarité et réfléchissant l'autre, émulant un dispositif de Stern-Gerlach.

La mécanique quantique permet de prédire les probabilités de mesurer (+,+), (-,-), (+,-) et (-,+)

Les expériences d'Aspect ont confirmé sans ambiguïté la violation des inégalités de Bell exactement de la manière prédite par la mécanique quantique, avec un accord statistique jusqu'à 40 puis 100 écarts types !

En **1998**, l'**expérience de Genève** a testé les corrélations entre deux détecteurs distants de **30 kilomètres**, en utilisant le réseau suisse de télécommunication par fibre optique. Cette distance laisse beaucoup plus de temps pour commuter les angles des polariseurs et il a donc été possible de mettre en place un aiguillage purement aléatoire. D'autre part, les deux polariseurs éloignés étaient complètement indépendants et les mesures ont été enregistrées de chaque côté, puis comparées après l'expérience, en datant chaque mesure à l'aide d'une horloge atomique. Si l'expérience d'Aspect impliquait qu'un hypothétique signal de coordination se déplace deux fois plus vite que c , celle de Genève arrivait à 10 millions de fois c .

Aucun physicien ne pense que ces résultats remettent en cause le principe de relativité selon lequel nulle forme d'énergie (matière ou force), nulle information utilisable, ne peut se déplacer à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

Il est en effet facile de montrer que l'intrication quantique ne peut être utilisée pour transmettre de façon instantanée quelque information que ce soit d'un point de l'espace-temps à un autre ! Aucune information utilisable ne peut être séparément tirée de ces mesures sur le moment, et les corrélations resteront indétectables tant que les résultats de ces deux séries de mesures ne seront pas comparés d'une façon classique.

Avec sa démonstration de téléportation quantique en 2006, Nicolas Gisin bouleverse le domaine de la cryptologie. La méthode consiste en protocole complexe de communication utilisant un canal de communication classique sécurisé (internet par exemple) et un canal quantique en parallèle (photons via fibre optique par exemple).

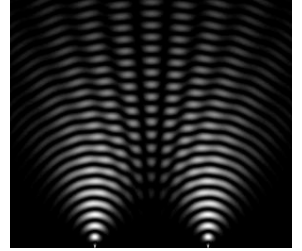
La sécurité est certifiée grâce aux propriétés quantiques suivantes :

- Le théorème de non-clonage, selon lequel il est impossible de dupliquer un objet quantique inconnu.
- Le postulat de réduction du paquet d'onde qui entraîne que réaliser une mesure sur un objet quantique perturbe les propriétés quantiques de l'objet en question.

Mais il n'y a pas de réelle téléportation, car ce qui a été téléporté, c'est l'état quantique de l'atome.

L'expérience des interférences de Young :

Les fentes de Young désignent en physique une expérience qui consiste à faire interférer deux faisceaux de lumière issus d'une même source, en les faisant passer par deux petits trous percés dans un plan opaque. Cette expérience fut réalisée pour la première fois par **Thomas Young** en **1801** et permit de comprendre le comportement et la nature de la lumière. Sur un écran disposé en face des fentes de Young, on observe un motif de diffraction qui est une zone où s'alternent des franges sombres et illuminées.



Une source unique émet vers les 2 fentes. Les 2 fentes sont telles 2 sources secondaires qui interfèrent entre elles : les rayons lumineux sont capables de s'additionner (frange brillante) ou de s'annuler (frange sombre) lorsqu'ils sont mis en relation, prouvant ainsi la nature ondulatoire de la lumière.

Elle a été également réalisée avec des particules comme les électrons, neutrons, atomes, molécules, avec lesquels on observe aussi des interférences. Cela illustre la dualité onde-particule : les interférences montrent que la matière présente un *comportement ondulatoire*, mais la façon dont ils sont détectés (impact sur un écran) montre leur *comportement particulaire*.

L'expérience de Young a par la suite été affinée, notamment en faisant en sorte que la source S **émette un quantum (photons ou des électrons) à la fois**. Ceux-ci sont détectés un par un sur l'écran placé après les fentes de Young : on observe alors que ces impacts forment petit à petit la figure d'interférences. Selon des lois classiques concernant les trajectoires de ces corpuscules, il est impossible d'interpréter ce phénomène.

L'interprétation quantique du phénomène est la suivante : **le quantum émis prend un état superposé lors du franchissement de la plaque** : $|\text{quantum passe par S1}\rangle + |\text{quantum passe par S2}\rangle$. De la fonction d'onde résultante, on peut déterminer pour chaque point de la plaque la probabilité que le quantum y soit détecté. On peut démontrer que la distribution des probabilités suit la figure d'interférence. Autrement dit, le quantum passerait par les deux fentes à la fois, et interférerait avec lui-même.

Mais que se passe-t-il si, insatisfait par cette interprétation des choses, on cherche à détecter par quelle fente le photon "est réellement passé" ? Le résultat net de l'expérience est que l'on détecte bien que le photon passer soit dans la fente de droite, soit dans la fente de gauche, mais alors la figure d'interférence disparaît.

La détection du photon dans l'une des fentes provoque un "effondrement de la fonction d'onde" et de l'état superposé, autrement appelé une réduction. L'expérience de Young permet donc également de mettre en évidence le problème de la mesure quantique.

À l'heure actuelle, des développements sur le sujet permettent de réaliser des expériences très similaires sur des objets de plus en plus volumineux, comme les atomes, les molécules, les condensats de Bose-Einstein, en particulier des fullerène (molécules en forme de ballon de football).

Dernièrement, l'expérience aurait été développée en observant un électron après les fentes, mais avant l'écran. A ce moment là, l'électron se comporte comme une particule, et semble s'être comporté comme tel depuis le début. C'est comme si elle "remontait le temps" pour passer à travers l'une ou l'autre fente, et pas à travers les 2 comme elle l'aurait fait telle une onde.