



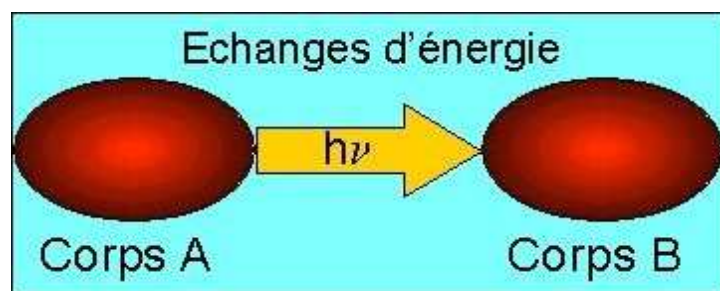
La physique quantique

La théorie des quanta

La physique quantique est née avec le XX^{ème} siècle, en 1900, à la suite des travaux de Max Planck.

Max Planck étudiait le phénomène de "rayonnement des corps noirs". Selon la théorie classique, les échanges d'énergie à l'intérieur du corps noir s'effectuaient de manière continue. Cette théorie prédisait que l'intensité du rayonnement d'un corps noir pour une longueur d'onde donnée était proportionnelle à la quatrième puissance de la valeur de cette longueur d'onde. Ce résultat n'était pas en accord avec les observations expérimentales d'une part, et impliquait que l'énergie totale rayonnée par un corps noir était infinie d'autre part. Il fallait donc réviser en profondeur la théorie.

Max Planck prit le problème à l'envers et tenta de trouver une formulation analytique de la courbe expérimentale observée. Cette formulation obtenue, il lui fallut l'interpréter physiquement. La seule interprétation acceptable qu'il trouva consistait à remplacer les échanges continus d'énergie par des quantités finies qu'il baptisa **quanta**. La quantité d'énergie transportée par un quantum d'énergie est alors proportionnelle à la fréquence du rayonnement associé. Le rapport de proportionnalité est égal à une constante nommée **constante de Planck** et représentée par **la lettre h**.



Ainsi, selon la **théorie des quanta** de Planck, tout échange d'énergie entre quelques corps que ce soit, s'opère par des transferts de quantités d'énergie finies. On dit que les échanges d'énergie sont **quantifiés**.

La mécanique ondulatoire, l'équation de Schrödinger et le principe de complémentarité

Dès 1905, Albert Einstein interpréta avec succès l'effet photo-électrique à l'aide de la toute jeune théorie des quanta de Planck (ce qui lui valut le prix Nobel de physique). L'idée force de cette interprétation réside dans le fait que le quantum d'énergie associé à une fréquence de lumière se comporte comme une particule de matière. Einstein baptisa ce corpuscule de lumière le **photon**.

Ce qui est véritablement révolutionnaire dans l'idée d'Einstein tient dans le fait que la lumière avait acquis, avec la théorie de l'électromagnétisme achevée par Maxwell, une nature résolument ondulatoire. La lumière était alors perçue comme une onde électromagnétique. Avec l'hypothèse du photon, la lumière apparut tout à coup comme une entité hybride, se comportant tantôt comme une onde, tantôt comme une particule. L'invention par Einstein du concept de photon fut le premier pas vers une révolution en profondeur des fondements mêmes de la physique classique.

Alors que le photon conférait à la lumière - l'onde lumineuse - un caractère corpusculaire, Louis de Broglie appliqua l'idée inverse aux particules matérielles. Il émit l'hypothèse que le comportement des particules (les particules connues à l'époque étaient l'électron, le proton et le neutron) pouvait à son tour être décrit à la fois comme la manifestation d'un corpuscule et la manifestation d'une onde. Il associa donc



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

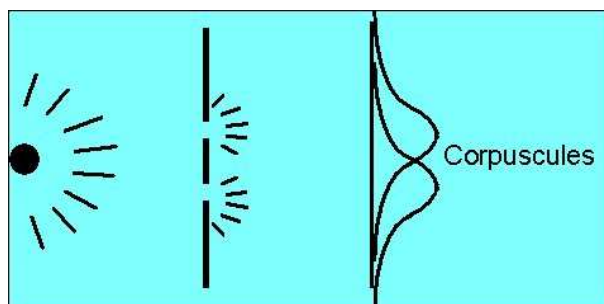
une onde à chaque particule matérielle et développa une mécanique pour manipuler ces nouveaux êtres : **la mécanique ondulatoire.**

Selon la mécanique ondulatoire, à toute particule est associée une onde dont la longueur d'onde est inversement proportionnelle à l'énergie de la particule. Il s'ensuit que plus une particule est énergétique (plus sa vitesse est grande), plus la longueur d'onde qui lui est associée est courte.

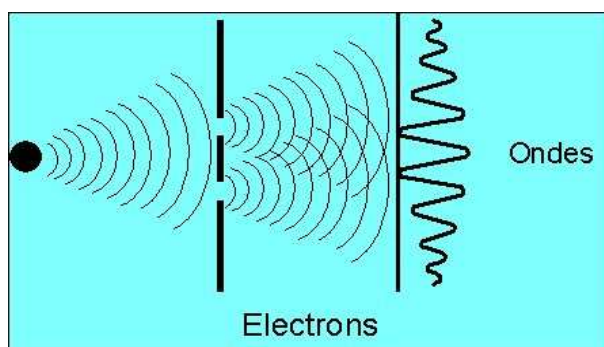
L'équation des ondes associées à ces particules fut finalement énoncée par Erwin Schrödinger en 1926 comme suit :

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

Les ondes associées aux électrons furent mises en évidence par Clinton Davisson en 1925 par une expérience d'interférence (dite expérience des trous d'Young en référence au physicien britannique Thomas Young qui en 1801 mis en évidence des interférences lumineuses en faisant passer un faisceau lumineux entre deux fentes). Les électrons sont émis par une source, sont accélérés puis sont envoyés sur un cristal dont l'alignement atomique joue le rôle des fentes dans l'expérience de Young. Selon une interprétation purement corpusculaire de la nature des électrons, la répartition des électrons après le passage de la plaque devrait être celle-ci :



Or, l'expérience a montré que les électrons se répartissaient en franges similaires à des franges d'interférence. L'observation de franges d'interférence implique nécessairement que les objets observés sont des ondes et non des corpuscules !



Pour résumer, les électrons se comportent comme des corpuscules dans le phénomène photo-électrique et comme des ondes dans l'expérience des trous d'Young.



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

Ainsi les physiciens durent conclure que, d'une part les ondes électromagnétiques possédaient également une nature corpusculaire, et que d'autre part les particules de matière possédaient aussi une nature ondulatoire. Il y avait là un paradoxe insurmontable. Niels Bohr trancha le débat en énonçant le **principe de complémentarité** qui fit la synthèse de ces résultats apparemment inconciliables.

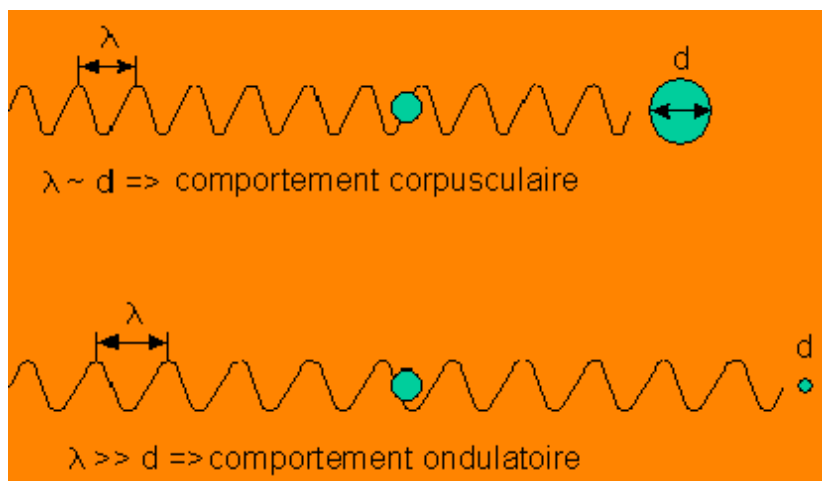
Principe de complémentarité : les particules et la lumière sont des quanta d'énergie dont le comportement est à la fois corpusculaire et ondulatoire (dualité onde-corpuscule).

"Effondrement" de l'onde et relations d'incertitude d'Heisenberg

Qu'est-ce qui détermine le comportement ondulatoire ou corpusculaire d'une particule ? Ou en d'autres termes, qu'est-ce qui explique que dans certains phénomènes, les particules se comportent comme des ondes et dans d'autres comme des corpuscules ?

Avant tout, il faut dire que les particules sont toujours décrites comme des entités duales onde-corpuscule. En fait, selon les phénomènes, la nature ondulatoire l'emporte sur la nature corpusculaire ou inversement, mais ces deux natures sont toujours présentes simultanément.

Comme nous l'avons dit précédemment, la longueur d'onde de l'onde associée à une particule est inversement proportionnelle à l'énergie de la particule. Lorsque cette longueur d'onde est inférieure ou est de l'ordre des dimensions des "objets" qui interviennent dans le phénomène, alors la nature corpusculaire de la particule est prépondérante. Inversement, si cette longueur d'onde est supérieure aux dimensions des "objets" impliqués, la nature ondulatoire de la particule va être observée. Or, la longueur d'onde est courte pour des particules très énergétiques. On en conclut que les phénomènes se produisant à hautes énergies mettront plutôt en évidence un comportement corpusculaire des particules alors que, inversement, les phénomènes à basses énergies seront plutôt de nature ondulatoire.



De façon imagée, on peut dire qu'une particule ayant une onde avec une grande longueur d'onde n'est pas bien localisée et donc son comportement est plutôt celui d'une onde (une onde est un phénomène non localisé). Lorsque la longueur d'onde se raccourcit, la particule apparaît de plus en plus localisée et se comporte de plus en plus comme un corpuscule (un corpuscule est une entité ayant une dimension et une position bien déterminées). En fait, Werner Heisenberg a étudié de près cette question et en a déduit des relations liant la précision que l'on peut obtenir de la vitesse et de la position d'une particule d'une part, et la précision de la mesure de son énergie en fonction de la durée de la mesure d'autre part. Ces relations sont connues sous le nom de **relations d'incertitude d'Heisenberg**.



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

$$\Delta x \cdot \Delta v > h$$

$$\Delta E \cdot \Delta t > h$$

Δx = incertitude sur la mesure de la position

Δv = incertitude sur la mesure de la vitesse

ΔE = incertitude sur la mesure de l'énergie

Δt = durée de la mesure de l'énergie

h = constante de Planck

Ce que disent ces relations c'est que :

1. Si l'on connaît parfaitement la position d'une particule, on ne peut en connaître la vitesse et inversement,
2. Sur de très courtes durées l'incertitude sur la mesure de l'énergie est très grande, c'est-à-dire que l'énergie peut fluctuer considérablement sur de très courtes durées !

Les bases mêmes de la mécanique sont sérieusement ébranlées par ces relations d'incertitude !!!

Interprétation de la fonction d'onde

L'équation de l'onde associée aux photons est l'équation des ondes électromagnétiques alors que celle de l'onde associée aux particules matérielles est l'équation de Schrödinger. C'est là que réside la principale différence entre les particules de matière et les photons. C'est une différence de taille car l'onde des photons est bien réelle (les ondes électromagnétiques sont bien réelles) alors que l'onde associée aux particules de matière est purement abstraite (les solutions de l'équation de Schrödinger ne sont pas des fonctions réelles mais complexes). Dans ce cas, comment interpréter cette onde associée aux particules de matière ?

Pour interpréter la fonction d'onde, revenons aux photons. Dans une expérience d'interférence comme celle qui est représentée ci-dessous, on obtient sur l'écran un ensemble de franges qui déterminent l'intensité lumineuse en chaque point de l'écran. Si l'on se souvient de ses cours de physique, l'on sait que l'intensité lumineuse en un point n'est pas la somme de l'amplitude des ondes qui passent par chacun des deux trous mais le carré de la somme des amplitudes de ces ondes.

La théorie des champs

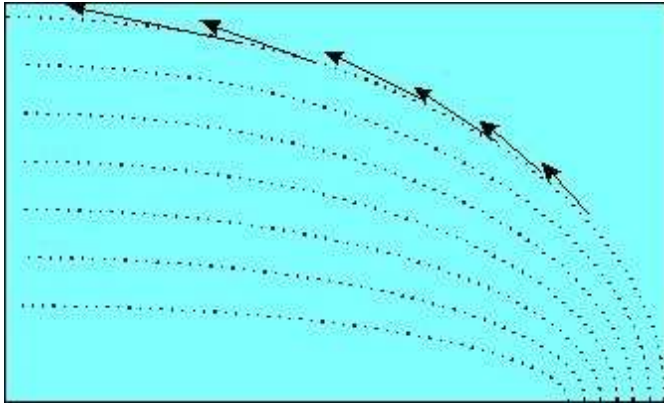
Qu'est-ce qu'un champ en physique classique ?

Dans la nature, de nombreux phénomènes font intervenir une action à distance comme, précisément, la gravitation, l'attraction et la répulsion électrostatiques ou magnétiques, etc. Prenons un exemple accessible à l'expérience quotidienne : l'attraction de deux aimants. Si l'on approche les pôles opposés de deux aimants, ils s'attirent. Cette attraction est d'autant plus forte que la distance qui les sépare est petite. Tout se passe comme si la "force" attractrice des aimants les entoure, cette "force" étant plus intense lorsque l'on se rapproche des aimants. On peut montrer que, pour un aimant donné, la "force" attractrice en un point donné conserve toujours la même valeur (à condition, bien sûr, de ne pas déplacer l'aimant !). Ainsi, il est possible d'associer à ce point de l'espace une valeur unique qui indique la valeur de l'intensité de la force d'attraction de l'aimant. L'ensemble des valeurs de l'intensité de la force d'attraction en chaque point de l'espace est appelé un **champ**. Cette définition a un caractère purement mathématique mais, comme nous l'avons vu, elle repose sur l'observation de phénomènes physiques. Les valeurs associées à

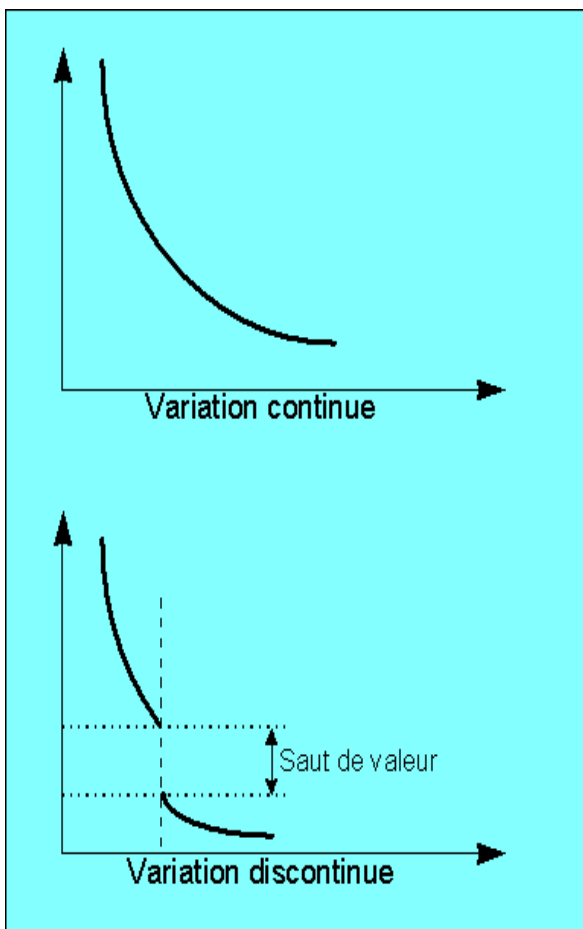


Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

chaque point de l'espace peuvent être des nombres réels (ou scalaires), des vecteurs (valeur + orientation), des tenseurs (êtres mathématiques plus complexes), etc. La figure ci-dessous représente un champ de vecteurs.



Au delà de cette définition mathématique, un champ est avant tout la manifestation d'un phénomène d'action à distance. La description que donnent les physiciens d'une action à distance consiste à dire que tous les ingrédients de cette action à distance sont déjà présents sous forme de champ. Il ne reste plus qu'à introduire le second aimant pour que l'action ait effectivement lieu. Le nom scientifique d'une telle action à distance est **interaction** (mot à mot : "action entre").



La description classique des champs amène la remarque suivante. Un champ est continu dans l'espace, c'est-à-dire que les variations des valeurs d'un point à un autre point infiniment voisin s'effectuent sans sauts brutaux. Au contraire, ces variations sont "douces", continues.

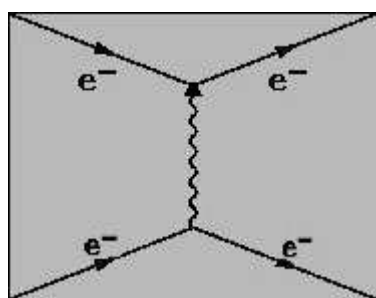
Les champs en physique classique possèdent également la particularité d'être définis immédiatement dans tout l'espace. Si, par exemple, la puissance de l'aimant croît brusquement, l'intensité du champ magnétique augmente alors brusquement dans tout l'espace. En d'autres mots, les variations de l'origine du champ sont répercutées immédiatement dans tout l'espace. La vitesse à laquelle les variations sont répercutées dans l'espace est donc infinie. Ce point est en totale contradiction avec le principe relativiste selon lequel aucune information ne peut se déplacer à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Cependant, la description relativiste des champs, tout en intégrant la notion de déplacement des variations du champ à une vitesse finie (celle de la lumière) est, dans le fond, très semblable à la description classique. Ce ne sera pas le cas avec la physique quantique !



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

Qu'est-ce qu'un champ en physique quantique ?

Pour décrire le concept de champ en physique quantique, prenons l'exemple d'un électron fixe. D'après la théorie de l'électromagnétisme, l'électron crée un champ électrique autour de lui. Supposons maintenant qu'un second électron s'approche du premier. Il va être soumis au champ électrique de ce dernier. Les effets du champ électrique vont se manifester par une modification de la trajectoire et une accélération du second électron. D'un point de vue mécanique, on peut décrire l'interaction des deux électrons par un transfert d'énergie et de variables dynamiques de l'un à l'autre. Or, en physique quantique tout transfert d'énergie est réalisé par un - ou plusieurs - quantum ! En d'autres mots, l'interaction des deux électrons consiste en l'échange d'un quantum, c'est-à-dire finalement, en l'échange d'une particule !!!!



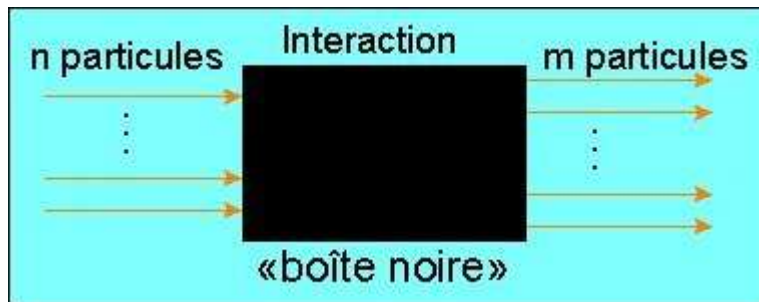
La particule échangée est baptisée **le quantum de l'interaction**. Comme les électrons ne peuvent être distingués les uns des autres, il s'ensuit que l'interaction de n'importe quel électron avec un autre électron impliquera le même quantum d'interaction. De plus, l'interaction électrique des électrons est déterminée par leur charge électrique exclusivement. On en conclut que toute interaction causée par la charge électrique de particules implique le même quantum d'interaction que celui qui a été mis en évidence dans le cas de deux électrons. Nous verrons plus loin que ce quantum n'est rien d'autre qu'un photon !!!

La physique quantique met en jeu des énergies qui peuvent être très élevées, donc les vitesses des particules impliquées appartiennent au domaine relativiste (c'est-à-dire proches de la vitesse de la lumière). De ce fait, la physique quantique doit nécessairement intégrer la théorie de la relativité, au moins restreinte. L'un des résultats fondamentaux de la relativité restreinte est la célèbre équation $E = mc^2$ qui traduit le fait que la masse est de l'énergie et réciproquement, toute énergie peut potentiellement prendre la forme d'une masse (de particules). En physique quantique cette équation a des conséquences majeures car les quantités d'énergie déployées lors des interactions ne sont plus négligeables en comparaison de la masse des particules. Il en résulte que l'énergie impliquée dans une interaction peut se matérialiser sous forme de particules. Il s'ensuit que le nombre de particules après l'interaction peut être supérieur (parfois même très supérieur) au nombre de particules avant l'interaction. Ce phénomène est observé couramment dans les accélérateurs de particules.

L'interaction de n particules produisant m particules met en jeu des mécanismes sans doute complexes que l'on n'appréhende pas tous dans leur totalité. Aussi, les interactions sont souvent traitées comme une "boîte noire" avec des particules en entrée et d'autres en sortie. Cette "boîte noire" possède une représentation mathématique nommée la **matrice de diffusion** ou **matrice S** (S pour "scattering" qui signifie "diffusion").



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.



Pour passer de n particules en entrée à m particules en sortie (n et m étant différents) il faut que certaines particules disparaissent et d'autres soient créées.

Comme nous l'avons dit plus haut, la mécanique quantique ne permet pas de prédire les phénomènes avec certitude mais fournit seulement les probabilités pour que ces phénomènes se produisent.

Les mêmes n particules en entrée, se trouvant dans les mêmes états physiques (les physiciens disent "les mêmes conditions initiales") vont pouvoir produire une multitude de résultats différents en sortie.

La mécanique quantique permet de calculer la probabilité pour que chacun de ces résultats se réalise. La situation se complique encore davantage quand on a à l'esprit qu'un même résultat en sortie peut mettre en oeuvre des mécanismes intermédiaires différents.

Finalement, la probabilité d'obtenir un résultat donné en sortie est donc la somme des probabilités de l'occurrence de chaque mécanisme intermédiaire aboutissant à ce résultat.

Il suffit donc de recenser l'ensemble des mécanismes intermédiaires possibles, d'en calculer la probabilité puis d'en faire la somme, pour connaître la probabilité pour qu'une interaction donnée ait lieu.

Cette procédure paraît simple sur le papier mais dans la réalité le recensement des mécanismes intermédiaires aboutit à un nombre **infini** !

Pour comprendre cet état de fait, reprenons le cas de notre électron et du champ électrique qu'il crée autour de lui.

Comme nous l'avons déjà expliqué, plus on se rapproche de l'électron et plus l'énergie de l'interaction croît au point que cette énergie est susceptible de se matérialiser sous forme de paires particule-antiparticule.

A partir d'une certaine distance - notée d_e dans le schéma ci-dessous - l'énergie est suffisante pour provoquer la création spontanée de paires électron-antiélectron.

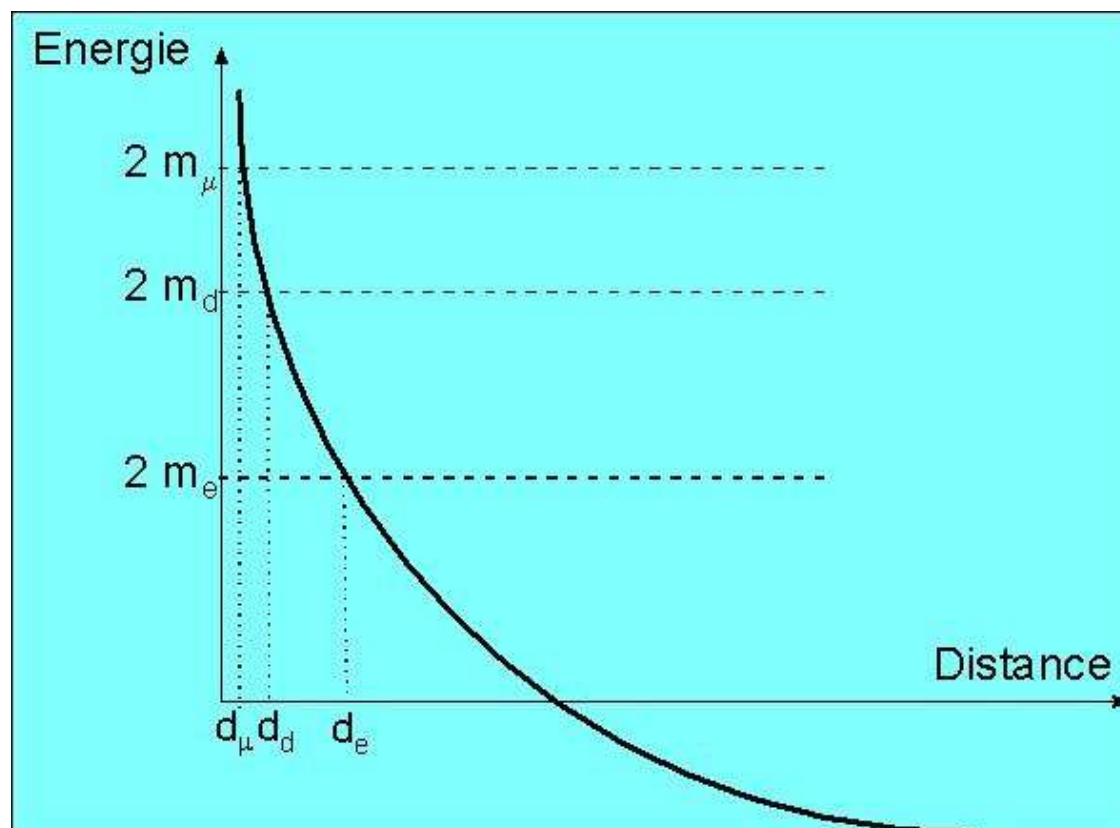
Puis avec l'accroissement de l'énergie, la formation de particules plus lourdes est possible. Toutes ces particules et anti-particules créées spontanément participent à l'interaction et doivent être prises en compte dans le calcul de la matrice de diffusion.

Or, plus l'on se rapproche de l'électron, plus le nombre de paires particules-antiparticules augmente. Comme la physique moderne modélise les particules élémentaires par des objets ponctuels sans dimension, l'énergie peut donc croître jusqu'à l'infini ($1/r = \text{infini}$ pour $r = 0$); le nombre de particules créées spontanément peut donc devenir infini.

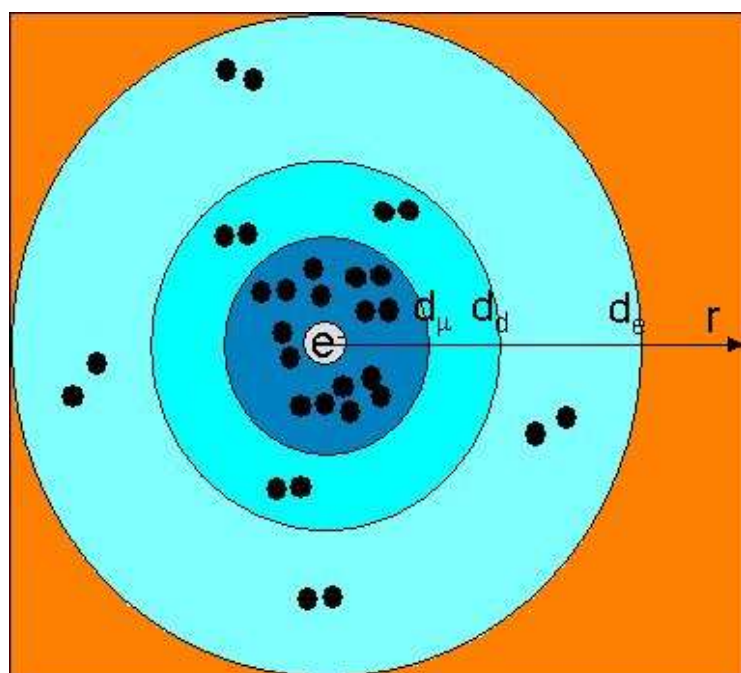


Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

Ce phénomène de création spontanée de particules est à l'origine des difficultés rencontrées pour le calcul de la matrice de diffusion S (les physiciens identifient ces difficultés en parlant des "divergences de la matrice de diffusion").



Energie disponible à la périphérie d'un électron



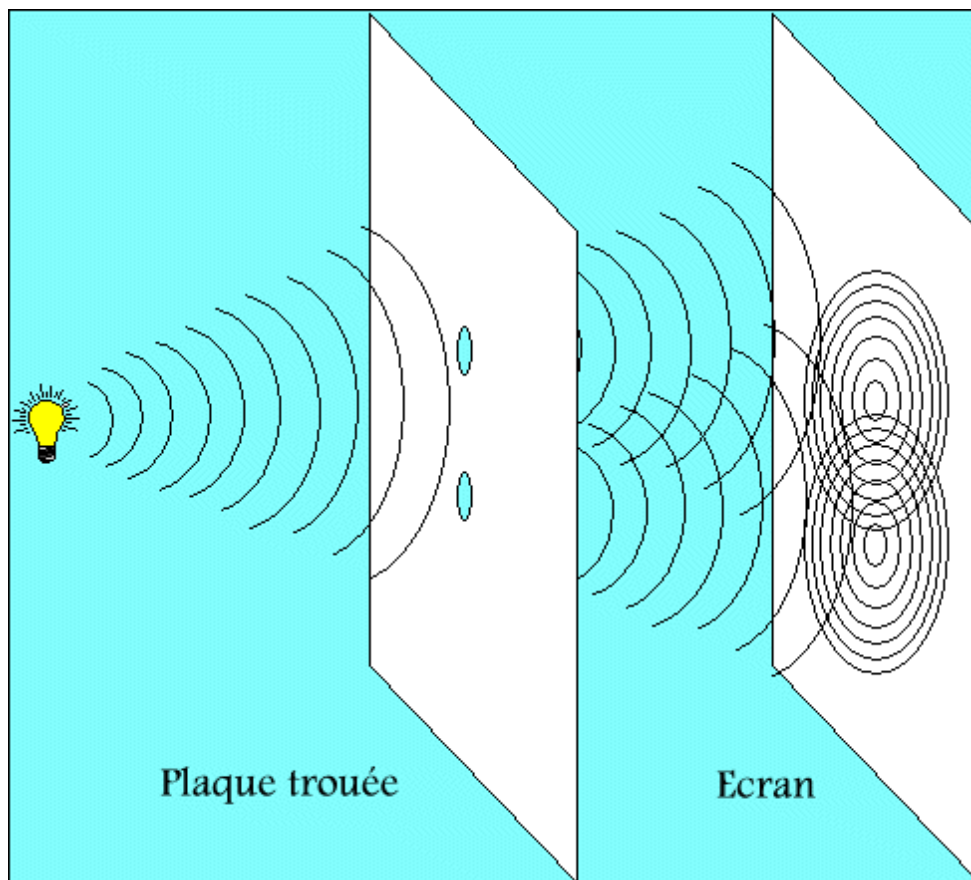
Création spontanée de paires de particule-antiparticule à la périphérie d'un électron.



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

Les physiciens sont cependant parvenus à mettre au point une technique mathématique permettant de supprimer les termes infinis dans le calcul de la matrice de diffusion (qui donne, rappelons-le, la probabilité pour qu'une interaction ait lieu).

Cette technique s'appelle la **renormalisation**. La renormalisation a été appliquée avec succès à l'interaction électromagnétique mais cette technique ne fonctionne pas avec toutes les interactions.



Raisonnons maintenant en termes de photons, c'est-à-dire de quanta.

Les franges sombres de la figure d'interférence sont sombres parce qu'aucun photon n'est parvenu à cet endroit.

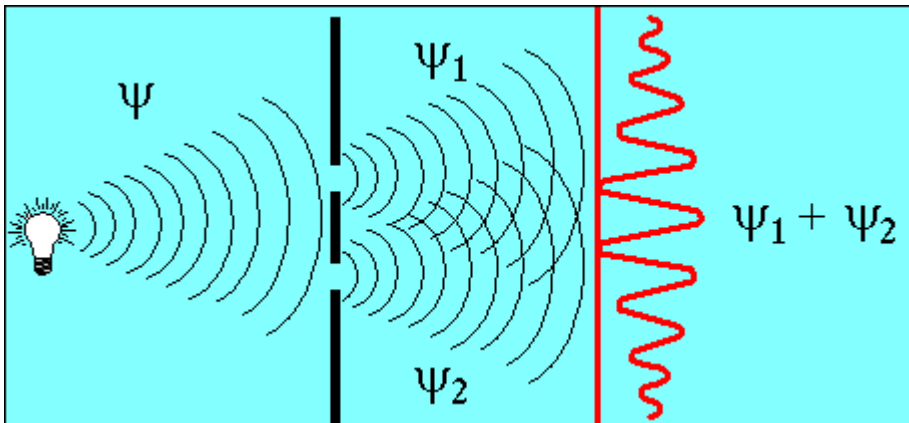
Ceci peut paraître une "la palissade" cependant si l'on considère les photons émis par la source lumineuse comme une population de particules (ou de quanta) que l'on ne peut distinguer les unes des autres, l'étude de la répartition de ces dernières sur l'écran peut être traitée d'un point de vue statistique.

Il est alors possible d'affirmer que les franges sombres sont des endroits où les photons ont une **probabilité nulle** d'arriver, ou de se trouver.

A l'inverse, à l'endroit des franges brillantes, la probabilité de trouver un photon est maximale.



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.



Par ce raisonnement très simple, nous avons associé la luminosité observée à un endroit de l'écran à la probabilité de trouver un photon à cet endroit.

Or la luminosité n'est rien d'autre que l'intensité de l'onde lumineuse, c'est-à-dire le carré de l'amplitude de l'onde.

Ainsi, la probabilité de trouver un photon à un endroit donné est-elle proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde électromagnétique à cet endroit !

Ce résultat peut être transposé aux particules de matière telles que les électrons, les protons, etc. On obtient ainsi une interprétation de la fonction d'onde associée à un quantum : la probabilité de trouver un quantum (ou une particule) à un endroit de l'espace est proportionnelle au carré de l'amplitude de la fonction d'onde à cet endroit.

Comme on le voit, en physique quantique, il n'est possible de calculer que des probabilités de réalisation de prédictions.

La description quantique des phénomènes n'est donc plus **déterministe** (c'est-à-dire permettant de prévoir avec exactitude les valeurs des grandeurs physiques mises en jeu) mais **indéterministe**.

En cela la physique quantique se distingue radicalement de la physique classique qui est fondamentalement déterministe.

Les physiciens mirent au point un formalisme et un cadre généraux permettant de décrire et de calculer les prédictions des phénomènes quantiques.

Ce formalisme a été baptisé la **mécanique quantique**.

Les interactions fondamentales

Les expériences en physique des particules ont mis en évidence quatre interactions différentes :

- l'interaction gravitationnelle,
- l'interaction électromagnétique,
- l'interaction faible,
- l'interaction forte.



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

Nous possédons une connaissance empirique des interactions gravitationnelle et électromagnétique car leur portée est infinie ce qui leur permet de se manifester à l'échelle macroscopique.

En revanche, les interactions faible et forte ont une portée très faible (de l'ordre de la taille des noyaux atomiques soit 10^{-15} m) ce qui confine leurs effets au monde des particules exclusivement.

Nous n'avons donc aucune expérience de ces interactions autres que celles que nous renvoient les expérimentations réalisées par les physiciens dans les accélérateurs de particules.

L'interaction faible est responsable de la **désintégration ou radioactivité bêta**.

Spontanément, un neutron se trouvant dans un noyau atomique peut se désintégrer en donnant un proton, un électron et un anti-neutrino.

Le proton reste dans le noyau atomique alors que l'électron et l'anti-neutrino sont éjectés avec une grande énergie.

Le neutrino est une particule qui interagit très peu avec ses "congénères".

En revanche, l'électron interagit très facilement avec les autres particules, pouvant briser des noyaux atomiques sur son passage, ce qui rend le rayonnement bêta très dangereux.

L'interaction forte est responsable de la cohésion des noyaux atomiques.

Les noyaux atomiques (à l'exception du noyau d'hydrogène) sont constitués de plusieurs protons (le proton possède une charge électrique $+e$) et de neutrons (électriquement neutres).

Or la taille d'un noyau est de l'ordre de 10^{-15} m.

A cette distance les forces électrostatiques qui repoussent deux protons sont énormes.

Si on les ramenait à une masse d'un kilogramme, elles s'élèveraient à 100.000.000.000 de Newton ou 10.000.000.000 de kg-poids.

Les noyaux atomiques devraient donc voler en éclat, or ces noyaux existent dans la nature et la plupart sont stables.

Il existe donc une autre force qui compense la répulsion électrostatique des protons.

Cette force a été baptisée la force forte, ou interaction forte.

A chacune de ces interactions correspond un quantum d'interaction que l'on appelle aussi un **boson**.

Le tableau ci-dessous fournit les principales caractéristiques des quatre interactions fondamentales.

L'unité **GeV** signifie Giga-électron-volt. $1\text{GeV} = 1.000.000\text{ eV}$.

L'électron-volt (noté eV) est une unité d'énergie (ou de masse puisque la masse est équivalente à de l'énergie selon la célèbre formule $E = mc^2$) qui représente la quantité d'énergie acquise par un électron lorsqu'il est accéléré par une différence de potentiel de 1 Volt, soit :



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

Interactions	Bosons	Masse des bosons	Portée	Spin des bosons	Constante de couplage	Durée de l'interaction
Gravitation	Graviton ???	0	infinie	2	10^{-40}	?
Electromagnétique	Photon	0	infinie	1	1/137	10^{-8} s
Faible	W^+ , W^- Z^0	80 GeV 91 GeV	10^{-18} m	1	10^{-6}	10^{-10} s
Forte	Gluons	?	$< 10^{-15}$ m	1	proche de 1	10^{-23} s

Dans la nature, les physiciens ont recensé deux grandes familles de particules :

- les fermions : particules ayant un spin demi-entier (1/2, 3/2, 5/2, etc.),
- les bosons : particules ayant un spin entier (0, 1, 2, etc.).

Le spin d'une particule peut être interprété, en première approximation, comme la rotation de la particule sur elle-même.

Comme toute grandeur physique en mécanique quantique, le spin est quantifié, c'est-à-dire qu'il ne peut prendre que certaines valeurs particulières.

De plus, on peut établir des relations d'incertitude pour le spin assez semblables à celle d'Heisenberg pour la vitesse et la position.

Ce que disent ces relations d'incertitude pour le spin c'est qu'il n'est pas possible de connaître à la fois la valeur du spin et son orientation.

Le spin est en fait une grandeur physique directement liée aux propriétés géométriques des particules.

Le spin apparaît naturellement lorsque l'on tente de donner une description relativiste des ondes associées aux particules.

Une telle description implique une réécriture de l'équation de ces ondes qui aboutit aux équations de Klein-Gordon pour les bosons et l'équation de Dirac pour les fermions.

Il est intéressant de noter également que le spin a une incidence directe sur le comportement statistique des particules.

Ainsi, les bosons obéissent à la statistique de Bose-Einstein c'est-à-dire que les bosons ont tendance à se concentrer dans le même état.

A l'inverse, les fermions, répondent à la statistique de Fermi-Dirac qui prédit que deux fermions ne peuvent se trouver dans le même état (principe d'exclusion de Pauli).



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

Extension du concept de champ en physique quantique

Jusqu'à présent nous n'avons fait que traduire dans le cadre de la physique quantique les champs définis en physique classique, à savoir, le concept de force à distance a été remplacé par l'échange d'un quantum ou particule.

En effet, la notion de champ en physique classique est étroitement liée aux forces agissant à distance (gravitation et électromagnétisme).

Dans un contexte quantique, les quanta associés aux forces, donc aux champs classiques, ne diffèrent en rien des autres types de quanta, c'est-à-dire les particules de matière (électrons, protons, neutrons, neutrinos, muons, etc.).

Il est donc tout à fait légitime de considérer les particules de matière comme les quanta de champs que les physiciens ont baptisé **champs de matière**.

Nous nous trouvons donc en présence de deux types de champs :

- Les champs de force, qui sont la transposition dans le domaine quantique des interactions classiques (plus d'autres interactions n'existant qu'à l'échelle quantique comme les interactions forte et faible),
- Les champs de matière qui sont des "êtres" totalement nouveaux propres à une description quantique de la nature.

Cette généralisation du concept de champ qui englobe, dans cette nouvelle acception, l'ensemble des particules, a des conséquences profondes sur notre vision du monde telle que la bâtissent les physiciens. L'entité physique la plus fondamentale ne serait plus la particule mais le champ.

Les particules ne sont alors que les états du champ : le champ peut se trouver dans son état **fondamental** c'est-à-dire l'état d'énergie la plus basse qui correspond à un état sans particule, dans un état *excité* à 1 particule, 2 particules, n particules.

Le champ, qu'il soit un champ de force ou de matière, peut être représenté symboliquement (et mathématiquement aussi) comme un ensemble d'ondes qui s'ajoutent les unes aux autres.

L'énergie du champ est alors la somme de l'énergie transportée par chaque particule, ou quantum du champ, énergie qui a la valeur $h\nu$ (constante de Planck x fréquence du quantum).

L'image que nous pourrions donner du champ est celle d'une corde vibrante (à 3 dimensions et occupant tout l'espace) pouvant vibrer selon une infinité de modes mais dont seuls un nombre fini d'entre eux seraient effectivement actifs à un moment donné.

Chacun des modes de vibration observés ne serait rien d'autre qu'un quantum du champ !

Ces quanta peuvent être de **la matière ou de l'antimatière**, c'est là un apport très important de la physique quantique.

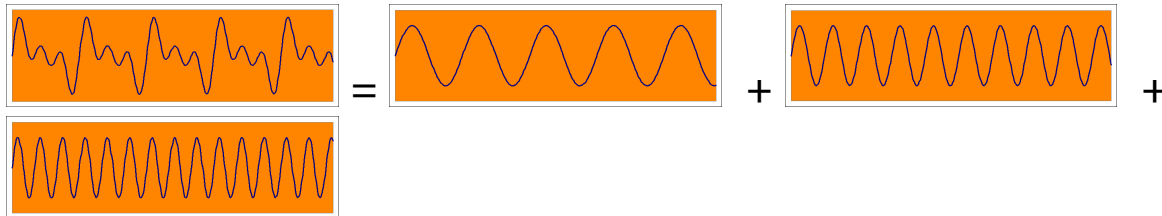
Enfin, le nombre de quanta dans un mode donné va déterminer l'amplitude de l'onde dans le mode correspondant.



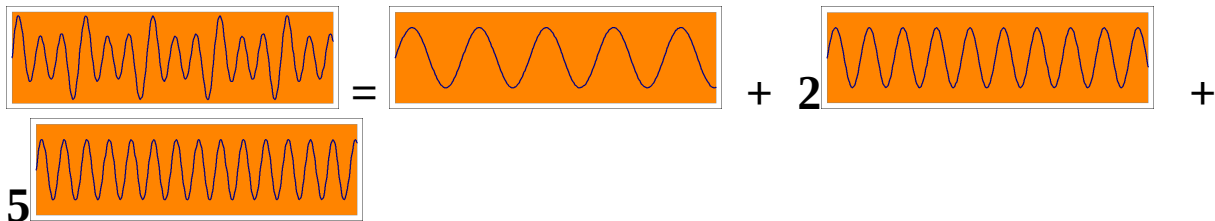
Unification des forces électromagnétique, nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

D'un point de vue physique, cela va déterminer la probabilité de mesurer le champ dans ce mode ou état, ou, en d'autres mots, de trouver une particule ayant la fréquence associée à ce mode.

Cette image est quelque peu abstraite, mais il est difficile de fournir une représentation concrète d'une entité physique aussi abstraite qu'un champ quantique !



Champ total
quantum fréquence 3f = quantum fréquence f + quantum fréquence 2f +



Champ total
5 quanta fréquence 3f = quantum fréquence f + 2 quanta fréquence 2f +

Interactions et symétries

Action, principe de moindre action et Lagrangien

Il existe en physique un principe fondamental appelé le **principe de moindre action**.

L'action est une grandeur physique qui est définie, sur une trajectoire donnée, comme le produit de l'énergie (en fait il ne s'agit pas tout à fait de l'énergie totale. Voir plus loin la formulation exacte) par le temps mis pour parcourir cette trajectoire.

L'énoncé du principe de moindre action est le suivant : parmi toutes les trajectoires possibles sur une durée donnée, la seule à être choisie par la nature est celle pour laquelle l'action est minimale (d'où le nom de principe de **moindre** action !).

Ce que nous dit en gros ce principe c'est que la nature opte toujours pour la consommation minimale d'énergie dans le temps.

A ce jour, le principe de moindre action ne connaît pas d'exception.

Il a toujours été vérifié.

Il constitue l'un des piliers de la physique prise dans son ensemble.

Toute la mécanique (domaine de la physique qui s'intéresse aux lois du mouvement) peut être dérivée de ce principe.



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

En physique quantique, il joue un rôle tout aussi majeur qu'en physique classique.

D'un point de vue mathématique, l'action se définit comme la somme de la valeur à tout instant et le long d'une trajectoire donnée d'une grandeur physique nommée le **Lagrangien** (ou **fonction de Lagrange**).

La seule trajectoire physiquement possible est celle pour laquelle l'action est minimale, c'est-à-dire celle pour laquelle la somme des valeurs du Lagrangien en tout point de la trajectoire est minimale.

Le Lagrangien se définit lui même comme la différence entre l'énergie cinétique (énergie associée au mouvement d'un corps) et l'énergie potentielle (énergie rayonnée au travers d'un champ par exemple).

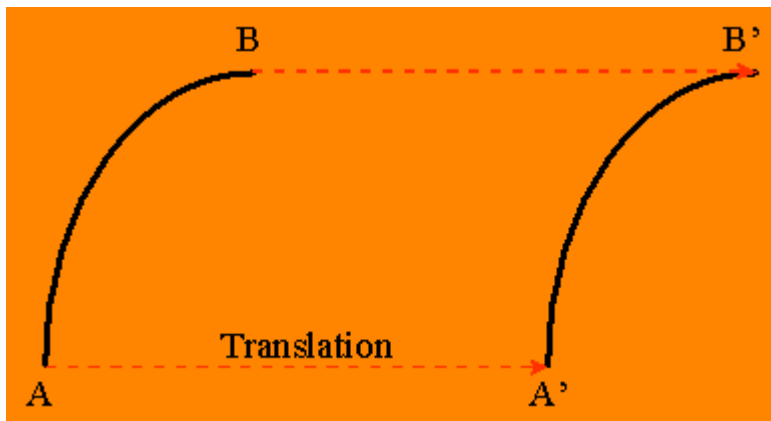
$$L = T - U \quad (L = \text{Lagrangien}, T = \text{énergie cinétique}, U = \text{énergie potentielle})$$

Le Lagrangien dépend, on le voit, à la fois du mouvement et des champs environnants par le biais de l'énergie potentielle.

Il acquiert au travers du principe de moindre action un rôle fondamental en physique.

Contenant la description complète du mouvement, ses propriétés mathématiques vont donc avoir des conséquences directes sur les caractéristiques physiques du mouvement.

Par exemple, si l'on considère un mouvement donné, ce dernier n'est pas modifié si l'on procède à une translation dans l'espace de chaque point de la trajectoire.



Le Lagrangien pour aller de A à B est identique à celui du mouvement allant de A' à B'

Les symétries et les invariants

La section précédente a montré qu'une interaction mettait en oeuvre des mécanismes sous-jacents très complexes.

Les physiciens ont donc recherché les moyens de simplifier la description de ces phénomènes de façon à pouvoir en calculer plus aisément la probabilité de réalisation.

Lorsque l'esprit humain se heurte à un problème complexe, il essaye en général de le simplifier en tentant d'en extraire les caractéristiques fondamentales, c'est-à-dire ce qui est propre au problème étudié.



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

L'une des façons de procéder consiste à faire varier les différents paramètres du problème et faire ainsi apparaître l'incidence de ces variations sur le comportement du système étudié.

Deux classes de variations, ou transformations, se dessinent alors :

1. celles qui ont pour effet de modifier le comportement du système,
2. celles qui ont pour effet de ne pas modifier le comportement du système.

Pendant longtemps les physiciens se sont surtout penchés sur la première catégorie de transformations mais ils se sont aperçus, au fil du temps, que la seconde classe de transformations contenait des indications encore plus fondamentales que la première dans la mesure où elles mettent en évidence des propriétés plus profondes du système.

En effet, les transformations qui laissent le système inchangé font apparaître des propriétés plus générales, qui peuvent être appliquées à d'autres systèmes du même type et qui ne sont plus liées au seul contexte expérimental étudié.

Prenons un l'exemple d'un système composé de deux boules de billard qui s'entrechoquent.

En reproduisant l'expérience tout en faisant varier les masses et les vitesses des boules de billard, on finit par déduire que la somme des quantités de mouvement est une grandeur toujours conservée.

Ce résultat ne peut être facilement généralisé à un nombre quelconque de boules de billard sans nécessiter d'autres expériences toujours plus compliquées.

Il est possible de parvenir au même résultat, de façon purement théorique, en constatant le fait évident que toute expérience est inchangée si l'on déplace le lieu d'expérimentation (à condition de conserver les mêmes conditions initiales).

En d'autres mots, la translation de l'expérience dans l'espace ne modifie pas l'expérience.

Lorsque cette invariance est injectée dans les équations du mouvement, on obtient immédiatement que la quantité de mouvement soit une grandeur toujours conservée, quelque soit le système.

Qu'est-ce qu'une symétrie en physique ?

Dans le langage courant, le mot symétrie signifie une *correspondance exacte en forme, taille et position de parties opposées* (définition du Petit Robert).

On parlera ainsi de la symétrie entre un objet et son image dans un miroir.

En géométrie, le terme symétrie prend un sens plus général qui peut se définir comme suit : *transformation qui ne change ni la forme, ni les dimensions d'une figure.*

On peut remarquer que le sens courant du mot symétrie correspond à un cas particulier de symétrie au sens géométrique du terme, qui consiste à inverser les objets par rapport à un plan.

En physique, la définition d'une symétrie est semblable à sa consoeur géométrique mais s'applique aux lois de la nature et non plus aux figures géométriques.

Ainsi une symétrie en physique est *une transformation des variables du système - qui peuvent être des variables géométrique ou plus abstraites - qui ne change pas la formulation des lois physiques.*



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

Une fois de plus, la symétrie selon le sens commun est encore une fois le cas particulier d'une transformation qui consisterait à remplacer les positions des différentes composantes d'un système physique par leur opposé (transformation de x en $-x$). A noter que ce type très particulier de symétrie porte un nom spécifique en physique : il s'agit d'une transformation de **parité**.

Les physiciens ont très vite remarqué que les lois de la nature n'étaient pas modifiées par les transformations suivantes :

- La transformation de parité (notée transformation P) qui revient à réaliser des phénomènes qui sont l'image dans un miroir des phénomènes observés. Il est évident que si l'on considère le reflet dans un miroir de n'importe quel phénomène physique, on obtient un nouveau phénomène qui est bien sûr physiquement possible.
- La transformation par inversion de toutes les charges électriques impliquées dans un phénomène (notée transformation C) ne change en rien les lois qui régissent ce phénomène.
- La transformation par inversion du sens du temps (notée transformation T) ne modifie en rien les lois de la physique.

Ainsi, pour résumer, les lois de la nature sont **invariantes** c'est-à-dire non modifiées par les transformations C, P et T. En fait, nous verrons plus loin que ceci n'est plus vrai en physique quantique.

Symétries globales et locales

Il est possible de distinguer deux grandes familles de symétries en physique (et en géométrie aussi d'ailleurs) :

- Les symétries globales : la même transformation s'applique partout,
- Les symétries locales : la transformation dépend de la valeur de la variable à transformer, notamment, s'il s'agit d'une transformation géométrique, cette transformation va dépendre de la position.

Exemples de symétries globales :

- Symétrie vis-à-vis des transformations CPT,
- Symétrie par rapport aux translations dans l'espace : la formulation des lois physiques est indépendante de la position de l'observateur,
- Symétrie par rapport aux translations dans le temps : la formulation des lois physiques est indépendante du moment choisi comme instant initial t_0 ,
- Symétrie par rapport aux changements de repères animés d'une vitesse uniforme (repères dits galiléens) : cette symétrie est la formulation géométrique du principe de relativité. Les lois de la nature s'expriment de la même manière, que l'observateur soit fixe ou en mouvement uniforme.

Si la nature est intrinsèquement invariante ou symétrique pour certaines transformations globales ce n'est en général pas le cas vis-à-vis des symétries locales. Citons quand même un exemple remarquable de symétrie locale : la translation locale du temps et de la position. Cette transformation consiste à modifier, en chaque point de l'espace-temps, le point et l'instant de référence. Il peut paraître étonnant que les lois de la physique restent invariante après ce genre de transformation car elle met violemment à mal la notion même d'espace et de temps. Pourtant, nous allons le voir dans la section suivante, cette symétrie est possible et conduit à une autre formulation de la relativité générale.



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

Symétries locales

Imaginons un avion qui survole la surface parfaitement plane d'un désert. Supposons que sa trajectoire est rectiligne et parallèle à la surface du désert. Cette trajectoire peut être calculée à partir des équations du mouvement qui ont le statut de lois de la nature. Si, à la suite d'un fantastique tremblement de terre, il advenait tout à coup que le désert soit soulevé, ou s'effondre, sur toute sa surface, sans en changer le caractère parfaitement plan, il est clair que ce cataclysme n'affecterait en rien les équations du mouvement de l'avion. Ce tremblement de terre revient à appliquer à notre système une transformation globale, plus précisément une translation dans l'espace. Or nous savons que la nature est symétrique pour ce genre de transformation.

Maintenant supposons qu'une partie seulement (1 km^2 par exemple) du désert s'effondre. Cette transformation est alors, comparativement au tremblement de terre précédent, une transformation locale. Les lois de la physique sont normalement affectées par une transformation locale. La trajectoire de l'avion devrait donc être affectée par cet affaissement local et reproduire, en quelque sorte, la même forme dans les airs. Or, l'expérience nous montre clairement qu'en réalité la trajectoire de l'avion n'est en rien modifiée par ce genre de transformation. Quelle en est la raison ? La réponse est simple : la trajectoire de l'avion n'est pas affectée grâce à l'intervention de la gravitation. La gravitation permet de compenser les irrégularités du sol. En termes plus abstraits, la gravitation compense les translations locales opérées dans l'espace (et le temps, faut-il rajouter pour être rigoureux).

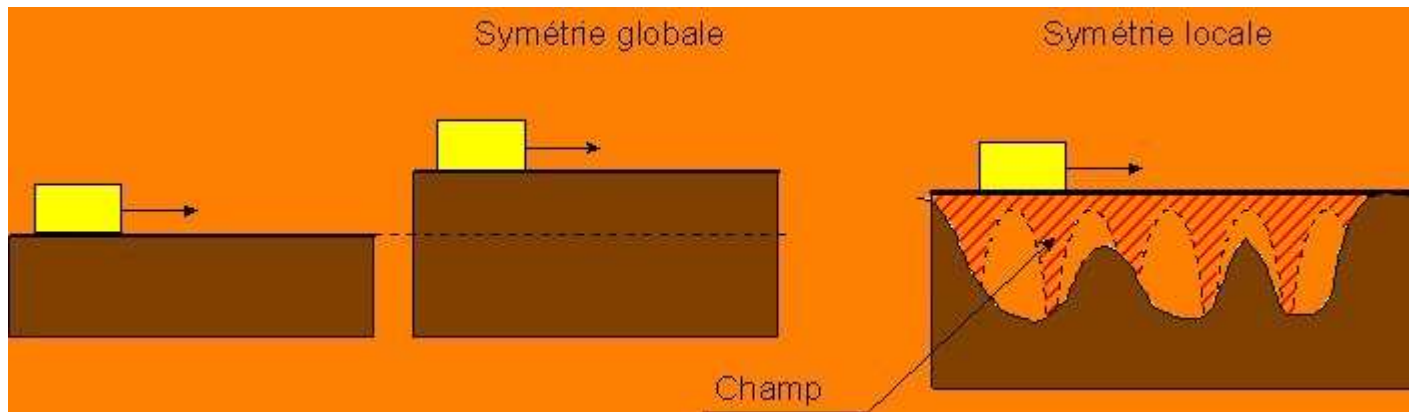
Maintenant prenons le problème à l'envers. Supposons que nos physiciens ignorent l'existence de la gravitation. Ils savent que les lois de la nature sont symétriques pour les translations globales dans l'espace et le temps. Forts de la connaissance de cette propriété remarquable, ils s'interrogent sur la possibilité de l'étendre à une symétrie locale. Pour ce faire, ils imposent aux lois de la nature d'être invariantes pour des translations locales dans l'espace et le temps et injectent cette contrainte dans les équations du mouvement. Le résultat qu'ils obtiennent est alors extraordinaire : un nouveau terme apparaît dans les équations, terme qui décrit une entité qui n'est rien d'autre qu'un champ. En étudiant de plus près ce champ, ils s'apercevront que ce champ n'est autre que la gravitation !!!

En 1923 Hermann Weyl a retrouvé les résultats de la relativité générale en procédant de la sorte. La gravitation apparaît dans cette nouvelle approche comme une condition à ajouter dans les équations du mouvement pour qu'une symétrie globale (les translations dans l'espace-temps) puissent devenir une symétrie locale. Une symétrie locale est également nommée une **symétrie de jauge** et les théories bâties sur de telles symétries sont appelées des **théories de jauge**. Les travaux de H. Weyl ont donc montré que la théorie de la relativité générale était une théorie de jauge.

On a représenté ci-dessous de façon imagée le concept central des théories de jauge. Sur ce schéma, la transformation globale consiste à relever le terrain sur lequel se déplace un objet. Pour illustrer la symétrie locale, on impose que l'objet ait la même trajectoire alors que le terrain est totalement chaotique. Pour parvenir à cela, il est nécessaire de bâtir un pont sur lequel va glisser l'objet conformément aux trajectoires précédentes. Ce pont symbolise le champ qui apparaît dans les théories de jauge.



Unification des forces électromagnétique, nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.



Masse des quanta d'un champ de jauge

On appelle **champ de jauge** un champ qui prend son origine dans les propriétés de symétrie de jauge ou locale.

Pour qu'une symétrie locale soit parfaite ou "exacte" il est nécessaire qu'elle puisse être appliquée partout. Ceci implique que si l'on considère deux points arbitraires dans l'espace, le respect de la symétrie locale va résulter en la création d'un champ entre ces deux points. Comme ces deux points peuvent être *a priori* n'importe quel point de l'espace, ils peuvent notamment être choisis aussi éloignés que l'on souhaite l'un de l'autre. On en conclut que le (ou les) champs de jauge créés par une symétrie locale exacte doit nécessairement avoir une portée infinie; les quanta associés à ces champs ont donc une masse nulle. C'est là une propriété essentielle de tous les champs de jauge que d'avoir des quanta de masse nulle.

Nous verrons par la suite que cette propriété a posé des difficultés aux théoriciens car manifestement, la plupart des champs de jauge observés dans la nature ont des quanta massifs. Les physiciens ont donc cherché pendant de nombreuses années les mécanismes permettant d'attribuer une masse aux quanta des champs de jauge. Une solution communément admise, bien que présentant des aspects encore sujets à discussion, a été proposée par Higgs.

Interaction électromagnétique et symétries

L'électro-dynamique quantique ou QED

La description quantique de l'interaction électromagnétique a été réalisée dans les années 40 et s'est achevée par une théorie nommée **électro-dynamique quantique** (ou **QED** pour Quantum Electro-Dynamics). La QED repose sur la **théorie invariante des perturbations**, formalisme théorique parachevé par Richard Feynman. La théorie invariante des perturbations est issue de la méthode classique des perturbations élaborée au XIX^{ème} siècle pour résoudre le *problème à trois corps* en mécanique céleste essentiellement.

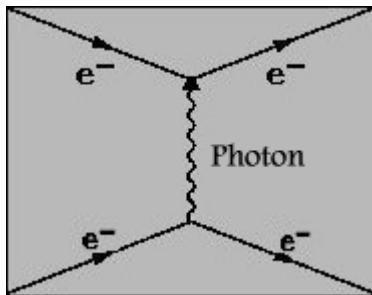
La loi universelle de la gravitation de Newton donne des résultats très précis lorsque le nombre d'objets impliqués se limite à deux. Pour un nombre d'objet supérieur à deux, la loi de Newton aboutit à des équations qui ne sont pas solubles de façon analytique dans la plupart des cas. C'est ce que l'on appelle de manière générique le *problème à trois corps*. Les astronomes ont donc mis au point une méthode reposant sur l'idée qu'il est possible de traiter le problème comme un système à deux corps auquel on ajoute de petites perturbations engendrées par le troisième astre. Les équations du mouvement sont alors solubles et des solutions analytiques existent, cependant, cette méthode n'est applicable qu'à la seule condition que le



Unification des forces électromagnétique, nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

champ du troisième astre soit effectivement beaucoup plus faible que celui des deux autres afin de pouvoir le traiter comme une petite perturbation. Cette méthode a permis à John Couch et Urbain Le Verrier de supposer l'existence de la planète Neptune en étudiant les irrégularités de la trajectoire d'Uranus. Neptune fut effectivement découverte en 1846 par Johann Galle.

Richard Feynman a étendu cette méthode à l'électrodynamique dans un contexte quantique. Les interactions quantiques sont alors décrites comme des petites perturbations locales du champ électromagnétique. Les résultats ainsi obtenus sont en accord jusqu'à la huitième décimale avec l'expérience, faisant de la QED la théorie la plus exacte que l'Humanité ait jamais conçue. Selon la QED, les interactions électromagnétiques se ramènent à l'échange de photons entre particules chargées. **Le photon est donc le quantum de l'interaction électromagnétique.** La constante de couplage a la valeur de $1/137$. Enfin, la QED est renormalisable, c'est-à-dire qu'il est possible, après des manipulations mathématiques spéciales, d'obtenir une valeur finie pour le calcul des probabilités de diffusion électromagnétique.



Cependant, malgré ses succès retentissants, la QED ne répond pas à une question fondamentale : quelle est la nature profonde de l'interaction électromagnétique ? Un début de réponse à cette question a été donné en abordant la QED sous l'angle des symétries.

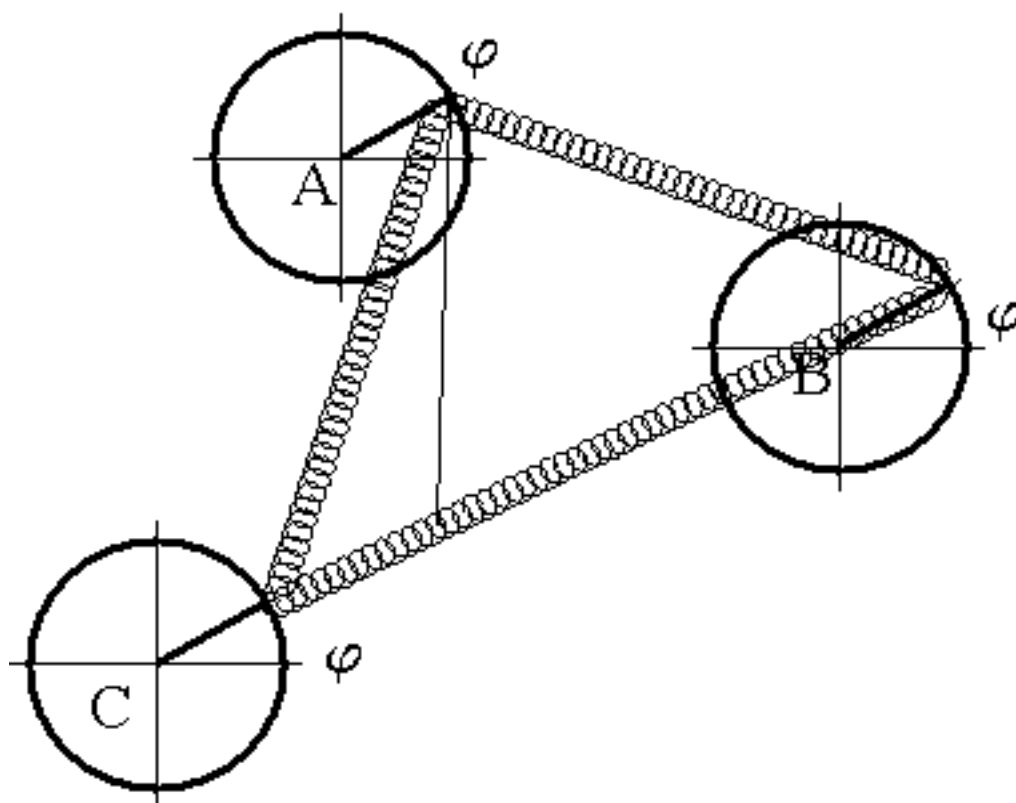
Les symétries de la QED

L'interaction électromagnétique possède une caractéristique qui lui est propre : si l'on modifie globalement, partout à la fois, le potentiel électrique, les phénomènes électromagnétiques ne sont en rien affectés. Ceci montre clairement, que l'interaction électromagnétique est **invariante** pour des modifications globales du potentiel électrique. En fait, modifier globalement le potentiel électrique revient à changer la phase des ondes associées aux particules. Ce phénomène était déjà bien connu en électrodynamique classique. La phase d'une onde peut être assimilée à un angle dans un cercle. L'invariance des lois de l'électrodynamique par changement global de la phase signifie donc que l'on peut prendre n'importe quel angle comme phase sans affecter pour autant les phénomènes de l'électrodynamique.

Adoptons la démarche de la construction des théories de jauge à savoir, imposons maintenant que la modification locale du potentiel électrique n'affecte pas non plus les lois de l'électrodynamique. En pratique, cette symétrie locale n'est pas observée dans la nature mais nous souhaitons étudier comment l'électrodynamique réagit lorsque celle-ci lui est imposée. Pour illustrer de façon imagée le phénomène, représentons le potentiel électrique en chaque point de l'espace par la phase de l'onde associée, c'est-à-dire par l'angle de cette phase. Dans une région vide de l'espace, cette phase est partout identique. On peut imaginer que les extrémités de chaque segment représentant la phase dans chaque cercle sont reliées les unes aux autres par des ressorts. Dans le cas d'un espace vide, ces ressorts sont au repos et n'exercent donc aucune tension.



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

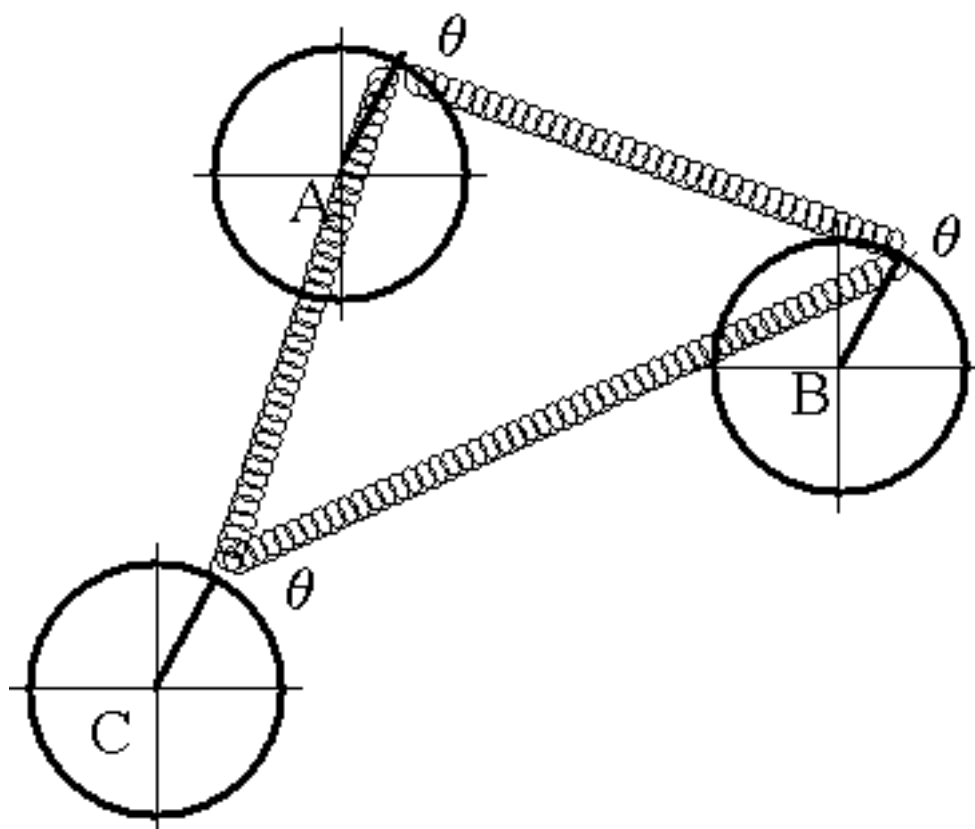


Phase en 3 points A, B et C de l'espace

Si l'on procède à un changement global du potentiel, cela revient à modifier partout la valeur de la phase de la même quantité, donc à faire tourner tous les segments d'un même angle. Du coup, après cette opération, les ressorts ne seront toujours pas ni tendus, ni comprimés et n'exerceront donc toujours aucune tension.



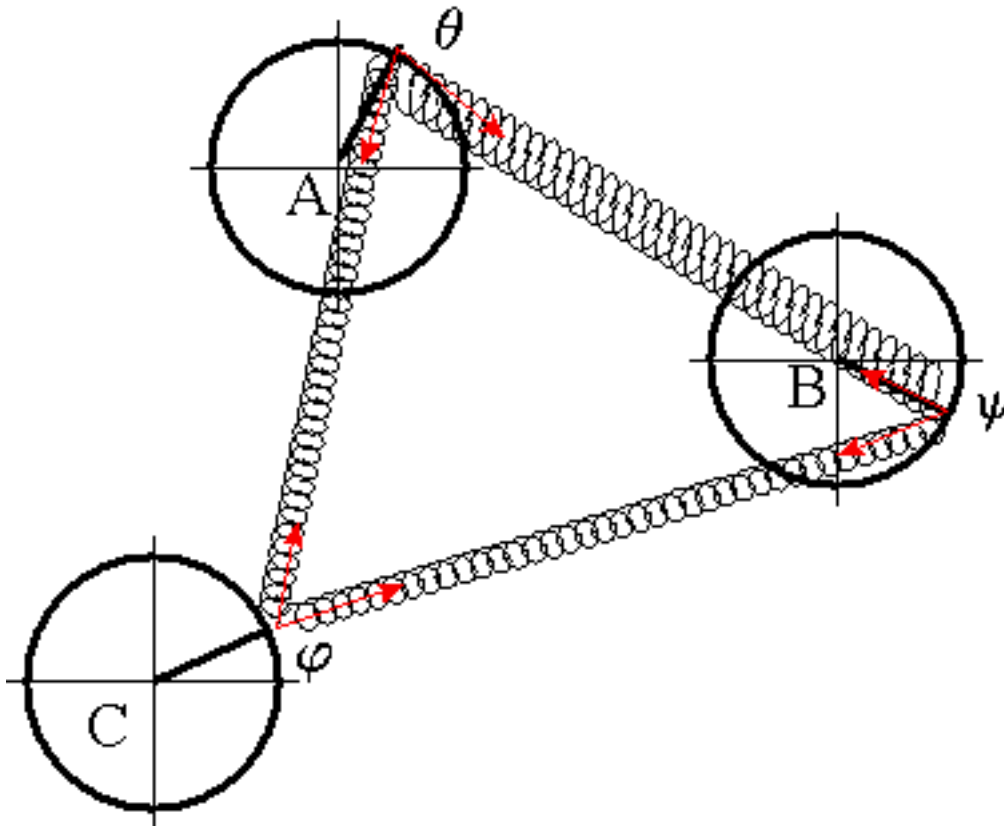
Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.



Maintenant, modifions localement la phase. Cela revient à tourner le segment d'un angle différent en chaque point de l'espace. A ce moment, les ressorts vont être tendus par endroits, comprimés à d'autres. Ils vont donc exercer une tension en chaque point de l'espace. Cette tension, qui est une force, n'est rien d'autre que la manifestation d'un champ. Ce champ n'existait pas initialement mais il est apparu à partir du moment où l'on a fait varier localement le potentiel électrique, c'est-à-dire la phase.



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.



La description qui vient d'être faite n'est bien sûr qu'une image qui illustre, tant bien que mal, des opérations mathématiques très abstraites. Lorsque l'on étudie de plus près les propriétés du champ qui est apparu après avoir imposé une symétrie locale, on s'aperçoit que ce champ n'est rien d'autre que le champ électromagnétique !!! L'électrodynamique quantique peut donc être interprétée comme une **théorie de jauge**.

Le champ électromagnétique prend donc son origine dans la symétrie de la nature vis-à-vis du potentiel électrique. L'électrodynamique quantique est symétrique pour toute rotation de l'angle de la phase de l'onde associée à une particule. Les rotations dans un cercle constituent un **groupe** noté **U(1)** (Unitaire 1). On se réfère souvent à la théorie de l'électrodynamique quantique par le groupe qui représente l'interaction électromagnétique, c'est-à-dire par le nom cabalistique U(1).

Théorie des quarks

La théorie des quarks est intéressante à plusieurs titres. D'abord elle fournit un modèle cohérent et fiable de l'interaction forte en bon accord avec l'expérience. Ensuite, elle constitue une illustration simple de l'application des théories de jauge.

Dans les années soixante, les physiciens avaient accumulé beaucoup de données expérimentales sur le comportement des particules élémentaires. Les progrès réalisés dans la technologie des accélérateurs de particules permirent d'atteindre des énergies élevées. Ceci eut pour conséquence immédiate l'observation d'une multitude de nouvelles particules (des centaines) dont certaines avaient une durée de vie très brève (10^{-24} s). Cette profusion de particules incita les physiciens de l'époque à abandonner le qualificatif *élémentaire* pour décrire le monde des particules. Dans un souci de simplification, ils entreprirent la synthèse des résultats expérimentaux obtenus. Les observations tendaient à montrer l'existence d'une



Unification des forces électromagnétique, nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

structure plus fine des particules sensibles à l'interaction forte (famille de particules baptisée **hadrons**). Trois propriétés se détachèrent des informations recueillies :

1. un nombre purement abstrait, **le nombre baryonique** qui dénombre les baryons impliqués dans une interaction, est une quantité conservée durant l'interaction,
2. les particules ayant une durée de vie très courte ressemblent à des états liés instables de particules sous-jacentes. Un peu à la manière des noyaux atomiques instables, elles se désintègrent après une durée de vie très courte,
3. les expériences à haute énergie ont mis en évidence des comportements qui ne peuvent être pleinement expliqués qu'en émettant l'hypothèse de sous constituants (observation de **jets** de particules).

L'ensemble de ces faits donnèrent naissance à la théorie des quarks, selon laquelle, les hadrons (particules sensibles à l'interaction forte) seraient composées d'autres particules plus fondamentales : les quarks.

D'après cette théorie, les quarks possèdent une propriété unique dans la nature : leur charge électrique est fractionnaire ($1/3 e$ ou $2/3 e$ où e est la charge de l'électron). Or, aucune expérience n'a pu mettre en évidence, pour l'instant, l'existence de charges fractionnaires. Cela signifie, qu'un quark ne peut exister à l'état isolé. Il est forcément lié à d'autres quarks dans un hadron de façon à ce que la charge électrique totale soit nulle ou égale à un multiple entier de e . Aux niveaux d'énergie auxquels les accélérateurs de particules travaillent aujourd'hui, il semble impossible de pouvoir isoler un quark. Cette propriété est connue sous le nom de **confinement des quarks** dans les hadrons.

Le tableau suivant donne un aperçu des principales caractéristiques des quarks.

	u (up)	d (down)	s (strange)	c (charm)	b (bottom)	t (top)
Charge électrique	2/3	-1/3	-1/3	2/3	-1/3	2/3
Masse	2 à 8 MeV	5 à 15 MeV	100 à 300 MeV	1 à 1,6 GeV	4,1 à 4,5 GeV	170 GeV
Spin	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2

Les principales hadrons connus sont composés des combinaisons de quarks suivantes :

Hadrons	Composition en quarks
proton	u, u, d
neutron	u, d, d
pi +	u, anti-d
pi -	d, anti-u
pi 0	u, anti-u ou d, anti-d
K+	u, anti-s
K-	anti-u, s
K0	d, anti-s



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

phi	s, anti-s
-----	-----------

A partir de ces données, les physiciens ont développé un modèle pour les quarks et l'interaction forte. L'équivalent de la charge électrique pour l'interaction forte a été baptisée la "**couleur**". Il va de soi que cette couleur dont il est question ici n'a rien à voir avec la couleur des objets. En fait, il s'agit d'une grandeur abstraite qui peut prendre 3 valeurs distinctes : les trois couleurs fondamentales (rouge, bleu, jaune) et les anti-quarks pouvant avoir les trois couleurs complémentaires à ces couleurs fondamentales. Le principe étant qu'un hadron est toujours neutre du point de vue de l'interaction forte c'est-à-dire que la somme des "couleurs" de tous les quarks contenus dans le hadron est blanche.

Il existe deux façons d'obtenir du blanc :

1. en ajoutant les 3 couleurs fondamentales ou leurs couleurs complémentaires,
2. en ajoutant une couleur et sa couleur complémentaire.

Ainsi, il existe deux sortes de hadrons : des hadrons à trois quarks de couleur différente (couleurs fondamentales ou couleurs complémentaires aux couleurs fondamentales), des hadrons à deux quarks ayant chacun la couleur complémentaire à l'autre. C'est en effet ce qui est observé dans la nature. Le premier type de hadrons forme la famille des **baryons** (qui veut dire lourd en grec) et le second type constitue la famille des **mésons** (milieu en grec).

Le champ de force liant les quarks entre eux est la force forte. Les quanta de cette interaction s'appellent les **gluons** (de "glue" qui signifie "colle" en anglais). A la différence du quantum de l'interaction électromagnétique - le photon - qui n'est pas chargé, les gluons ont deux charges fortes, c'est-à-dire deux couleurs. Si l'on combine par paires l'ensemble des couleurs et des couleurs complémentaires (que l'on nomme aussi **anti-couleurs**) l'on obtient 8 combinaisons possibles ce qui nous donne donc 8 gluons.

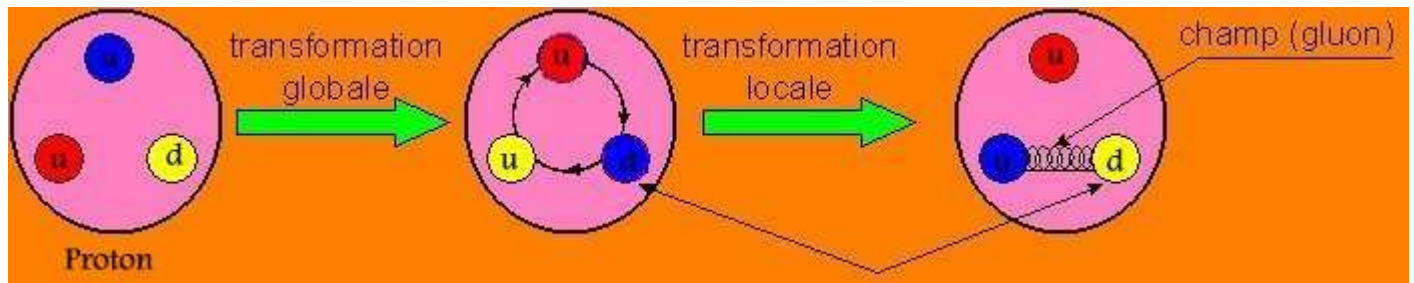
La formulation théorique de la théorie des quarks a très vite adopté celle d'une théorie de jauge. La théorie porte le nom de **chromodynamique quantique** (Quantum chromodynamics en anglais ou **QCD**). Comme nous l'avons dit, les hadrons doivent toujours être "blancs". Si l'on permute les couleurs des quarks contenus dans un hadron, le résultat final n'a pas changé : le hadron est toujours de même nature et reste "blanc". Cette opération de permutation met donc en évidence l'invariance de l'interaction forte par permutation des couleurs des quarks. Si l'on permute partout dans l'univers les couleurs des quarks, alors les phénomènes impliquant l'interaction forte restent inchangés. La permutation de tous les quarks dans l'univers est une transformation globale.

Forts de cette symétrie globale, les physiciens ont imposé à l'interaction forte d'être de plus symétrique (ou invariante) pour des transformations "locales" - c'est-à-dire ponctuelles - de couleur des quarks. En d'autres mots, les lois de l'interaction forte doivent rester identiques si l'on change la couleur de quelques quarks pris isolément. Prenons le cas d'un proton (composition en quarks = uud). Initialement il contient un quark u rouge, un quark u bleu et un quark d jaune; il est donc "blanc". Si l'on permute la couleur de tous les quarks du proton, il conserve sa couleur "blanche" et reste un proton (les quarks n'ont pas changé et sont toujours uud) . En revanche, si l'on modifie de façon arbitraire la couleur d'un seul quark, la couleur totale du hadron ne sera plus "blanche". L'une des principales règles qui régit les interactions fortes est donc violée, ce qui revient à dire que, naturellement, l'interaction forte n'est pas symétrique pour des transformations ponctuelles et arbitraires de couleur des quarks (pas de symétrie locale). En imposant l'invariance locale, il apparaît alors dans les équations un terme qui vient compenser la modification de la couleur du quark en provoquant le changement de couleur d'un autre quark du proton de manière à ce que



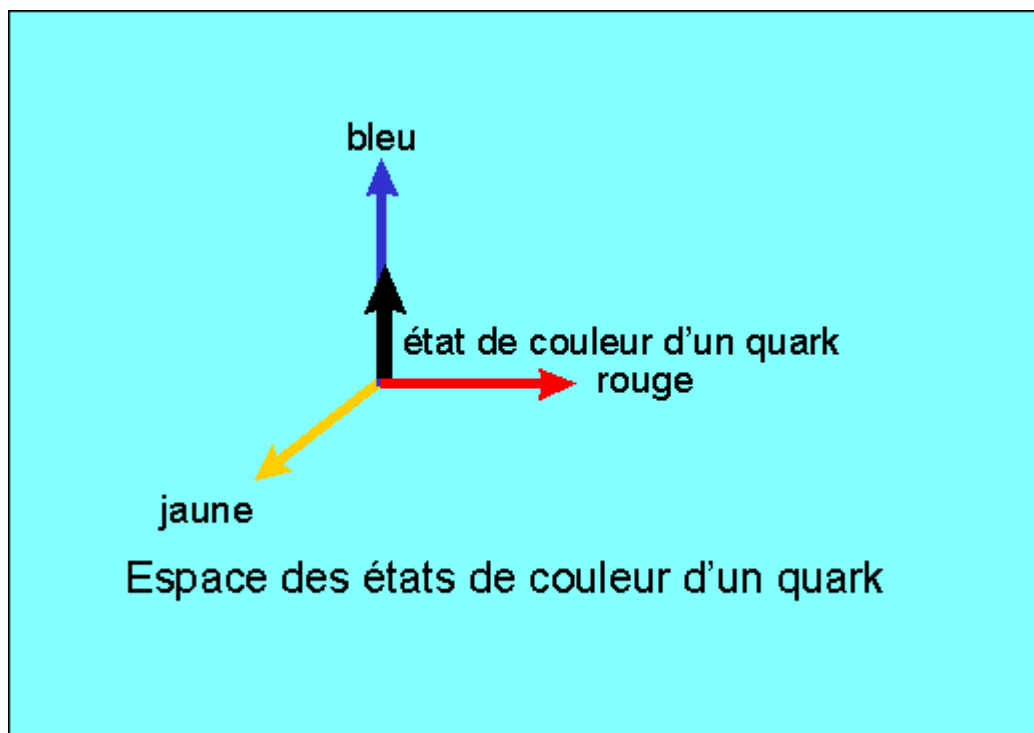
Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

ce dernier reste "blanc". Ce terme compensateur n'est rien d'autre qu'un champ dont les quanta sont, comme vous l'aurez deviné, des gluons !!!



Ainsi le champ de gluons prend-il sa source dans la symétrie de l'interaction forte vis-à-vis du changement de couleur des quarks.

D'un point de vue mathématique, on peut représenter la couleur d'un quark par une flèche qui s'oriente selon un axe dans un espace qui en compte trois : un axe bleu, un axe rouge et un axe jaune (les trois couleurs possibles d'un quark). La modification de la couleur d'un quark consiste à faire tourner la flèche dans cet espace à trois dimensions de manière à l'aligner avec l'axe de la nouvelle couleur. Cette opération revient donc à faire une rotation dans un espace à trois dimensions.



Les rotations que nous avons décrites ne s'appliquent pas sur des vecteurs mais sur des êtres mathématiques plus complexes : les spineurs. L'ensemble de ces rotations forme un **groupe** nommé **SU(3)** (Symétrique Unitaire 3). Tout comme dans le cas de la QED, on se réfère souvent à la théorie des quarks ou QCD par le groupe qui représente l'interaction électromagnétique, c'est-à-dire par le nom de SU(3).



Unification des interactions

Les physiciens ont recensé quatre interactions fondamentales dans la nature. Il n'est pas impossible que d'autres interactions existent sans que les moyens expérimentaux dont nous disposons aujourd'hui ne nous permettent de les mettre en évidence. En tout état de cause, qu'il y ait 4, 10 ou 20 interactions fondamentales, aucune indication dans la nature ne nous renseigne sur les raisons pour lesquelles il y en aurait 4, 10 ou 20 !

Quelque soit le véritable nombre d'interactions, leur multiplicité est inexplicable et la contingence de ce nombre soulève de graves difficultés d'ordre épistémologique et philosophique. Finalement, il est tout à fait légitime de se demander pourquoi la nature compte quatre interactions fondamentales et non 3 ou 5. Pourquoi n'en existe-t-il pas une seule ?

Les physiciens aiment la simplicité qu'ils ont presque élevé en principe universel. Or quatre interactions, cela fait désordre et compliqué, alors que le principe de simplicité nous ferait plutôt pencher vers une interaction unique, synthèse parfaite de toutes celles observées à ce jour. Cette recherche de la simplicité a permis de débroussailler, avec un grand succès, la multitude des particules (les hadrons). Alors pourquoi ne pas tenter la même aventure avec les interactions ?

Pour unifier les interactions, deux approches sont possibles :

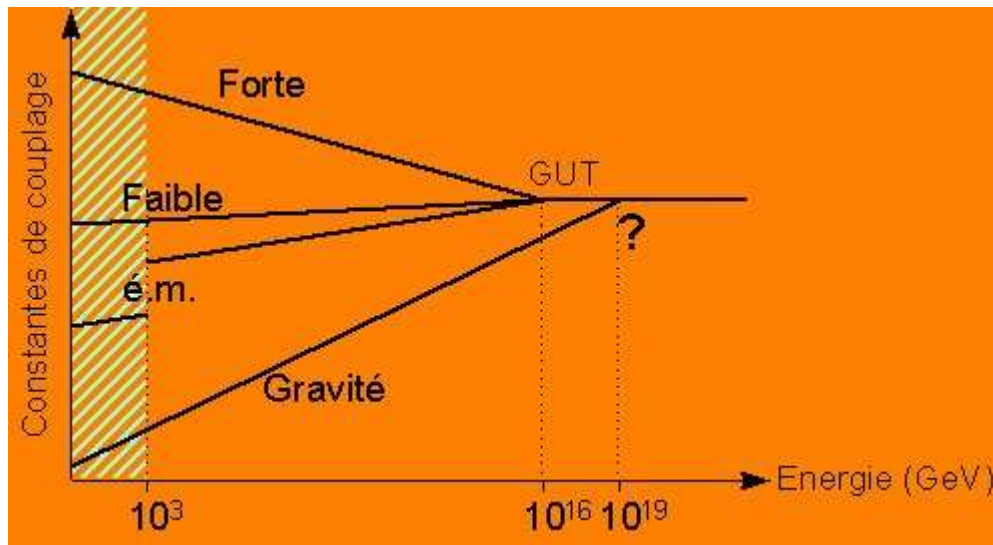
1. Une approche synthétique : les interactions seraient des manifestations différentes d'un même phénomène plus global qui pourrait être décrit par un seul cadre théorique à très haute énergie,
2. Une approche "historique" : les interactions étaient unifiées au moment du "big bang" et elles se seraient différenciées au fil du temps, un peu à la manière des cellules d'un embryon.

La beauté de la chose réside dans le fait, qu'au fond, ces deux approches sont équivalentes. En effet, augmenter l'énergie mise en jeu dans les interactions revient à se rapprocher des conditions qui prévalaient lors du big bang. Augmenter l'énergie est donc équivalent à remonter le cours de l'histoire de l'univers. S'il existe effectivement une interaction unique à très haute énergie, synthèse des interactions observées à notre niveau d'énergie, alors cela signifie que cette interaction était celle qui existait au moment du big bang.

Certains faits expérimentaux tendent à laisser soupçonner l'existence d'une telle synthèse à très haute énergie. Notamment, les expériences ont montré que les valeurs des constantes de couplage des diverses interactions se modifient avec l'augmentation de l'énergie et semblent, en première approximation, converger vers une valeur unique (à l'exception de la gravitation, toutefois).



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.



Ainsi, l'on prédit qu'à des énergies de l'ordre de 10^{16} GeV (1 GeV = 1 milliard d'électron-Volt), les interactions électromagnétiques, faible et forte ne formeraient qu'une seule et unique interaction. Le modèle théorique permettant de décrire cette interaction s'appelle **GUT pour Grand Unified Theory**.

Cette interaction unifiée se combinerait ensuite avec la gravitation à des niveaux d'énergie encore plus élevés de l'ordre de 10^{19} GeV pour ne constituer qu'une seule interaction universelle. Les physiciens disposent de plusieurs théories décrivant cette "super-interaction". L'une d'entre-elle retient aujourd'hui toute l'attention du monde de la physique des particules : **la théorie des super-cordes** à laquelle nous reviendrons plus loin.

Unification des interactions électromagnétique et faible : l'interaction électrofaible

L'interaction faible se manifeste naturellement dans la nature dans deux phénomènes :

- La désintégration bêta,
- La capture électronique.

Dans le cas de la désintégration bêta, un neutron se transforme spontanément en un proton en émettant un électron et une particule non chargée nommée **anti-neutrino électronique**.



La capture électronique est un phénomène curieux qui consiste en l'absorption par un proton contenu dans un noyau atomique d'un électron de cet atome. Le proton se transforme alors en neutron en émettant un anti-neutrino électronique.



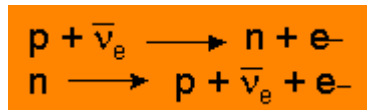
Dans le détail, on remarque que deux types de particules interviennent : des hadrons (le proton et le neutron) et une famille de particules dénommée **leptons** à laquelle appartiennent l'électron et le neutrino. Nous avons vu, les hadrons sont constitués de particules plus élémentaires : les quarks. Il n'en est rien des leptons, du moins selon l'état actuel de nos connaissances. Les leptons sont des particules véritablement



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

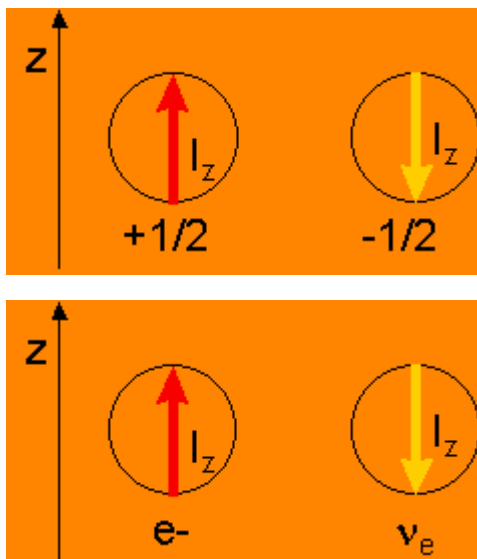
élémentaires. En fait, ce n'est pas le hadron qui interagit mais l'un des quarks contenus dans le hadron. Ainsi, l'interaction faible est ressentie par les quarks d'une part, et les leptons d'autre part.

Les observations expérimentales ont montré que l'électron et l'anti-neutrino ainsi que le neutron et le proton jouent des rôles symétriques dans ces réactions. Il est possible de les permuter sans modifier le phénomène.



Dit autrement, cette observation peut s'énoncer comme suit : l'interaction faible est symétrique (ou invariante) vis-à-vis des permutations entre anti-neutrinos et électrons. Donc si l'on transforme globalement tous les électrons en anti-neutrinos et inversement, l'interaction faible se comportera de la même manière. Nous tenons là l'amorce d'une théorie de jauge. Cette remarque s'applique également au proton et au neutron. Ces deux particules jouent en effet un rôle symétrique dans les réactions faisant intervenir l'interaction faible.

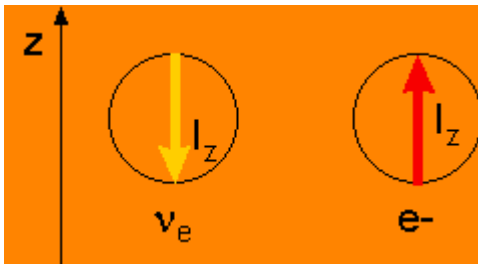
Pour pouvoir introduire l'invariance de l'interaction faible dans les équations, les physiciens ont dû inventer une grandeur physique abstraite qui se prêtait mieux à des manipulations mathématiques que les noms des particules. Cette grandeur abstraite est le spin isotopique ou encore l'isospin faible noté I . Pour l'électron et le neutrino, les valeurs de l'isospin sont respectivement $+1/2$ et $-1/2$. Ainsi, l'électron et le neutrino électronique ne diffèrent que par la valeur de leur isospin pour l'interaction faible. La symétrie globale évoquée plus haut peut alors s'énoncer comme une invariance vis-à-vis de la valeur de l'isospin. Tout comme dans le cas des quarks, il est possible de construire un espace abstrait pour représenter l'état d'isospin faible d'une particule.



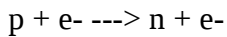
Ce que nous dit la symétrie globale d'isospin c'est que l'on peut procéder à une rotation de 90° dans l'espace d'isospin - ce qui a pour effet de permuter les électrons et les neutrinos - sans pour autant affecter les phénomènes liés à l'interaction faible.



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

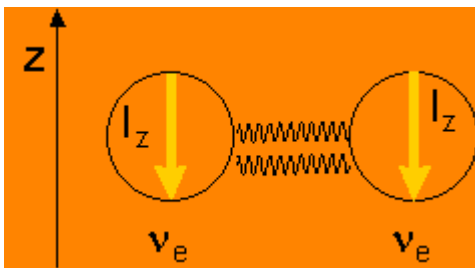


Pour construire une théorie de jauge à partir de cette symétrie globale, imposons à présent une symétrie locale d'isospin, c'est-à-dire l'invariance de l'interaction faible pour des changements d'isospin pour une seule ou un nombre limité de particules. Si cette symétrie locale existait effectivement dans la nature, l'on pourrait observer des réactions comme :



où l'on a transformé l'anti-neutrino en un électron dans la seconde partie de la réaction. Or une telle réaction ne peut être observée car elle viole la loi de conservation de la charge électrique (la charge totale est nulle dans le membre gauche de la réaction et négative dans le membre droit). Notons au passage que cette remarque est importante car elle montre que la symétrie locale d'isospin n'est pas rigoureusement exacte. En effet l'interaction faible est invariante par symétrie d'isospin à la charge électrique près ! Dit autrement, imposer une symétrie locale de l'isospin pour l'interaction faible peut affecter les charges électriques, qui elles, relèvent de l'interaction électromagnétique. Il apparaît donc une connexion entre l'interaction faible et l'interaction électromagnétique.

Imposons la symétrie locale d'isospin, même si celle-ci donne des résultats physiques en apparence aberrants. Que se passe-t-il ? On constate l'apparition de quatre champs dans les équations : deux champs neutres, un champ chargé positivement et un dernier chargé négativement.



L'un de ces champs est constitué de quanta neutres, de masse nulle et de spin égal à 1. Ces propriétés sont celles du photon et le champ correspondant n'est donc rien d'autre que le **champ électromagnétique**. Les trois autres champs sont spécifiques à l'interaction faible proprement dite. La symétrie locale d'isospin a donc entraîné *de facto* l'unification des interactions électromagnétique et faible. Selon ce modèle, ces deux interactions seraient donc la manifestation d'une seule et unique interaction : **l'interaction électrofaible**.

Dans la première formulation de cette théorie, les trois champs spécifiques à l'interaction faible ont des quanta de masse également nulle ce qui n'était pas en accord avec les observations expérimentales. En effet, des quanta de masse nulle impliquent une interaction de portée infinie. Or, comme nous l'avons mentionné plus haut, l'interaction faible est confinée à des distances très courtes ce qui nécessite l'intervention de quanta de masse non nulle. En fait, en retravaillant la théorie, les physiciens ont démontré que les quanta associés à ces trois champs possédaient une masse. Nous verrons plus loin par quel mécanisme ces quanta acquièrent cette masse.



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

Finalement la description complète de l'interaction unifiée électrofaible fait intervenir quatre champs dont les quanta sont :

- Le photon de charge nulle, de spin 1 et de masse nulle
- Le Z^0 de charge nulle, de spin 1 et d'une masse approximative de 90 GeV
- Le W^+ de charge positive, de spin 1 et de masse avoisinant les 80 GeV
- Le W^- de charge négative, de spin 1 et dont la masse est identique à celle du W^+

Ce résultat peut être obtenu de manière intuitive à partir des constats établis précédemment :

1. L'invariance d'isospin peut affecter la charge électrique ce qui implique l'existence de quanta chargés (positifs et négatifs) c'est-à-dire les W^+ et W^-
2. La symétrie locale d'isospin, pour être exacte, doit être compensée par l'interaction électromagnétique (c'est en cela que les interactions faible et électromagnétique sont unifiées) et donc impliquer l'intervention du champ électromagnétique

L'existence du Z^0 est moins « triviale ». En fait, les observations tirées de la multitude d'expériences réalisées ces dernières décennies ont indiqué l'existence d'un médiateur neutre dans certaines interactions faibles que l'on appelle communément un **courant neutre**. Ce médiateur est le Z^0 .

L'interaction électrofaible, ne l'oublions pas, est le résultat de l'imposition de la symétrie locale d'isospin. Comme nous l'avons indiqué, le changement d'isospin revient à inverser (faire tourner de 180°) l'isospin dans l'espace abstrait de l'isospin. L'ensemble des rotations des spineurs $1/2$ est un **groupe noté $SU(2)$** . Si la symétrie d'isospin était rigoureusement exacte, l'interaction faible pourrait être décrite intégralement par ce groupe. Cependant, pour que la symétrie soit parfaite, il faut introduire l'interaction électromagnétique qui est elle même décrite par le groupe **$U(1)$** . Le groupe des symétries de l'interaction électrofaible est donc la combinaison de ces deux groupes et est notée **$SU(2) \times U(1)$** . Dans le détail, le groupe de symétrie est $SU(2)_L \times U(1)$, le L en indice signifie que les seules rotations permises sont celles orientées vers la gauche (L pour Left en anglais). Ceci vient d'une propriété très étrange des neutrinos nommée l'hélicité.

Il reste cependant deux questions essentielles auxquelles il faut répondre :

1. Pourquoi à notre échelle d'énergie les interactions faible et électromagnétiques paraissent distinctes ?
2. Pourquoi les Z^0 , W^+ et W^- ont-ils une masse non nulle ?

La réponse à ces deux questions nous oblige à faire un détour par ce que l'on appelle en physique le mécanisme de **brisure spontanée de symétrie**.

Brisure spontanée de symétrie - Mécanisme de Higgs

Une brisure spontanée de symétrie est un phénomène par lequel un système physique perd en degrés de symétrie. La rupture spontanée de la symétrie joue un rôle très important dans beaucoup de domaines différents de la physique. Comme nous l'avons vu, les équations de la physique possèdent en général des solutions qui présentent une ou plusieurs symétries internes. L'idée fondamentale réside dans le fait que

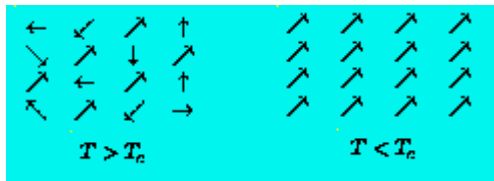


Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

certaines solutions de ces équations peuvent casser ou briser cette symétrie. L'un des exemples les plus connus d'un tel phénomène est la transition de phase du **paramagnétisme** au **ferromagnétisme** du fer.

Lorsque l'on chauffe un aimant, ses pouvoirs magnétiques décroissent pour disparaître subitement lorsque la température dépasse un seuil nommé **température de Curie**. Inversement, si l'on refroidit ce même aimant, ses propriétés magnétiques vont tout aussi subitement réapparaître lorsque la température passe au dessous de la température de Curie.

Chaque atome individuel de fer possède un moment magnétique propre c'est-à-dire qu'il se comporte un peu comme un aimant ou un dipôle magnétique en langage physique. Pour des températures situées au-dessus de la température de Curie tous ces dipôles se dirigent dans des directions aléatoires. Dans ce cas-ci le système et les équations qui le décrivent ont une symétrie par rotation dans l'espace. En effet, en faisant tourner de façon aléatoire le morceau de fer dans l'espace, les propriétés magnétiques de ce dernier ne sont globalement pas altérées. Quand la température tombe au-dessous de la température de Curie, les interactions entre les dipôles magnétiques ont pour effet de les aligner selon une direction unique (le morceau de fer devient ce que l'on appelle dans le langage courant un aimant). Avant la transition de phase le système était inchangé par n'importe quelle rotation dans trois dimensions, tandis qu'après la transition de phase le système est inchangé seulement par des rotations dans le plan perpendiculaire à la direction des dipôles. La symétrie tridimensionnelle initiale a été spontanément brisée en une symétrie bidimensionnelle.



Il est important de noter que la direction dans laquelle s'alignent les atomes de fer après la transition de phase est totalement **aléatoire**. Il n'est pas possible de connaître *a priori* cette direction. C'est là une caractéristique majeure des phénomènes de brisure spontanée de symétrie.

Les physiciens ont imaginé qu'un processus similaire de brisure de symétrie pouvait expliquer la décomposition de l'interaction électrofaible en deux interactions - l'interaction faible et l'interaction électromagnétique - présentant un niveau de symétrie moins élevé.

Transition de phase

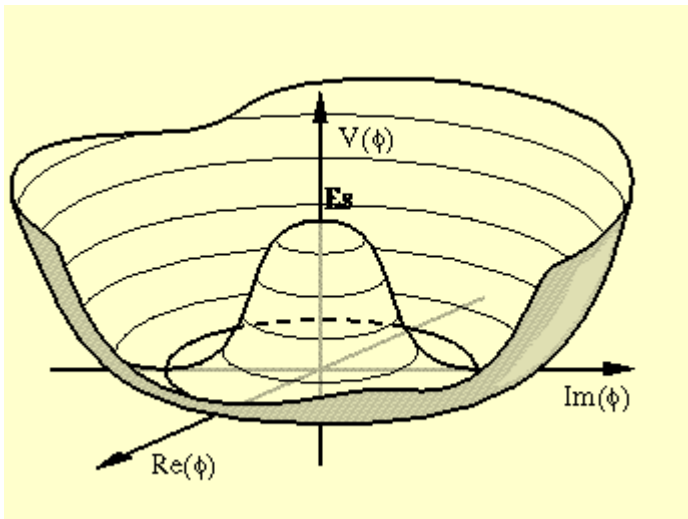
$SU(2) \times U(1)$ [interaction électrofaible] $\rightarrow$ $SU(2)$ [interaction faible classique] + $U(1)$ [interaction électromagnétique]

La transition de phase du paramagnétisme au ferromagnétisme du fer s'explique relativement simplement à l'aide de l'agitation thermodynamique des atomes de fer qui, baissant avec la température, permet aux atomes de s'aligner spontanément au dessus d'une certaine température. Dans le cas de l'interaction électrofaible, qu'est-ce qui est à l'origine de la brisure de la symétrie ?

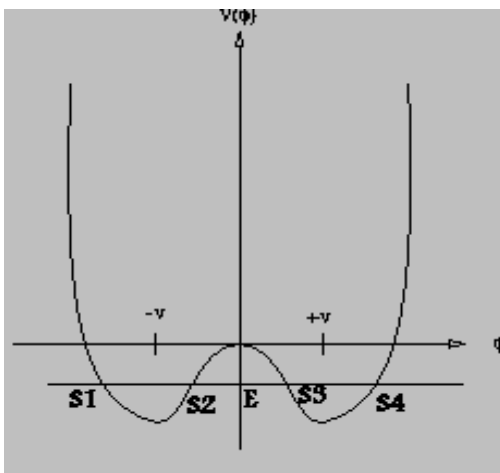
Supposons que le potentiel de l'interaction électrofaible ait la forme suivante :



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.



Pourquoi cette forme et pas une autre ? Parce que ce potentiel présente une propriété très intéressante. A haute énergie (énergie supérieure ou égale à E_s sur la figure), le potentiel possède une symétrie cylindrique, c'est-à-dire qu'il reste inchangé après des rotations selon l'axe V . En revanche, au dessous de l'énergie E_s , la symétrie cylindrique n'existe plus : plusieurs valeurs sont possibles pour le même niveau d'énergie (on dit que le niveau d'énergie est **dégénéré**). Le système peut alors tomber dans un ou l'autre des deux états avec la même probabilité. Au moment où la symétrie est brisée, il n'est pas possible de prédire lequel des deux états d'énergie le système va adopter. Nous nous trouvons dans une situation très similaire à celle que nous avons décrite dans le cas de la transition de phase paramagnétique à ferromagnétique du fer.



Pour le niveau d'énergie E il existe 4 états possibles du champ $S1$, $S2$, $S3$ et $S4$

Il se trouve que le potentiel de l'interaction électrofaible se comporte de façon semblable à celui illustré par cet exemple. Au delà d'une certaine énergie (~ 100 GeV) le potentiel électrofaible possède la symétrie $SU(2)_L \times U(1)$. En deçà, les états d'énergie sont dégénérés et ce qui conduit briser spontanément la symétrie.

Pourquoi le potentiel électrofaible a-t-il cette forme ? Ceci est dû au fait que d'autres champs se superposent à ceux de l'interaction électrofaible : **les champs de Higgs** dont les quanta sont appelés **bosons de Higgs**. Ces champs ne possèdent pas les mêmes symétries que ceux de l'interaction électrofaible. A haute énergie, leur effet n'est pas décelable et donc la symétrie de l'interaction faible est apparente. En revanche, à partir d'un certain seuil, la forme du potentiel est affectée par les champs de



Unification des forces électromagnétique, nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

Higgs au point de provoquer la dégénérescence des états d'énergie, et du coup, ils provoquent la brisure spontanée de la symétrie électrofaible.

La présence des bosons de Higgs induit un autre phénomène d'une importance majeure : ils font anormalement baisser l'état d'énergie du vide. Par conséquent, les bosons de l'interaction électrofaible (W^+ , W^- et Z^0) ne se trouvent pas dans leur état fondamental (on dit qu'ils ne sont pas sur leur « **couche de masse** ») et acquièrent une masse ! En acquérant une masse, leur portée devient finie et comme cette masse est très élevée (entre 80 et 90 GeV) cette portée est très courte.

Voilà, tout s'explique. Malheureusement, malgré tous les efforts déployés jusqu'à ce jour, les physiciens n'ont toujours pas mis en évidence les bosons de Higgs. Certains physiciens croient que ces particules ne sont que des artifices mathématiques qui n'ont aucune réalité physique. La prochaine grande étape de la physique des particules expérimentale est donc la découverte des bosons de Higgs. Si cette quête reste infructueuse, le modèle actuel de l'interaction électrofaible pourrait être remis en question.

Le modèle standard

Le **modèle standard** est un cadre théorique qui décrit les interactions électromagnétique, faible et forte. Selon ce modèle, ces trois interactions seraient intimement liées les unes aux autres de la même manière que le sont les interactions électromagnétique et faible dans l'interaction électrofaible. Dit autrement, les interactions électromagnétique, faible et forte seraient des manifestations différentes d'une même interaction qui, à la suite de brisures spontanées de symétries, se serait différenciée. Cette différenciation se serait opérée en deux étapes :

1. Première brisure spontanée de symétrie à une énergie de 10^{16} GeV résultant en la différenciation des interactions forte et électrofaible,
2. Seconde brisure spontanée de symétrie à une énergie de l'ordre de 10^3 GeV résultant en la différenciation des interactions électromagnétique et faible (modèle de Glashow-Salam-Weinberg).

Cependant, le modèle standard ne décrit la super interaction qui fédérerait les interactions électromagnétique, faible et forte. Il se contente de fournir une explication possible de la différenciation de cette interaction plus fondamentale. Dans le modèle standard, chaque interaction sous-jacente (fédérerait les interactions électromagnétique, faible et forte) conservent leurs propriétés intrinsèques.

Nous avons vu que l'interaction forte pouvait être modélisée comme un champ de jauge dont le groupe de représentation est $SU(3)$ (rotations dans l'espace). De la même façon, l'interaction électrofaible peut être représentée par le groupe $U(1) \times SU(2)$ (rotations dans le cercle et dans le plan). Le modèle standard fait la synthèse de l'ensemble en proposant des symétries locales (ou de jauge) dans le cercle, le plan et l'espace. Le groupe de représentation est alors **$U(1) \times SU(2) \times SU(3)$** . On le voit, les symétries de chaque interaction sous-jacente sont conservées dans la nouvelle interaction unifiée.

Le modèle standard permet de rendre compte de la plupart des phénomènes observés à ce jour, c'est-à-dire à des niveaux d'énergie de l'ordre de 10^3 GeV. De plus, comme toute théorie de jauge, il est renormalisable, c'est-à-dire que les quantités infinies qui apparaissent dans les équations s'annulent mutuellement pour donner des résultats finis, donc calculables et physiquement observables.

Le modèle standard constitue à ce titre une grande avancée de la physique théorique mais reste un ensemble incomplet qui ne permet pas de donner véritablement un cadre unifié pour les interactions



Unification des forces électromagnétique, nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

électromagnétique, faible et forte. Cette étape suivante sera franchie par les théories dites de grande unification ou **Grand Unified Theories** (GUT).

Les GUT (Grand Unified Theories)

Avant d'entrer dans le vif du sujet, je souhaiterais d'abord faire observer que l'utilisation du pluriel (*Les* GUT) n'est pas accidentelle mais totalement volontaire. Il existe, en effet, plusieurs théories ayant pour objectif d'unifier les interactions électromagnétique, faible et forte. Cependant, nous n'allons pas toutes les passer en revue. Nous nous limiterons à la plus « populaire » d'entre elles : **la théorie SU(5)**.

L'idée directrice des GUT est de réduire encore le nombre de particules vraiment fondamentales. Avec le modèle standard, le zoo des particules fondamentales se limitait

- aux leptons (électron, neutrino électronique, muon, neutrino muonique, tau, neutrino tau) et leurs anti-particules,
- aux quarks (quarks u, d, s, c, b, t) et leurs anti-quarks,
- aux bosons des interactions (photon, Z^0 , W^+ , W^- , gluons).

Toutes les particules observées sont alors soit des leptons, soit composées de quarks. A noter que les leptons et les quarks appartiennent à la famille des fermions (particules de spin demi-entier).

Bien que le nombre de particules est très réduit par rapport à la situation qui prévalait dans les années 60, les physiciens ne pouvaient se satisfaire pour autant de l'existence de deux familles de fermions distinctes : les leptons et les quarks. Cette distinction ne peut s'expliquer par les théories existantes elles-mêmes mais nécessite d'être posée de façon ad hoc.

Les GUT recherchent de nouvelles symétries, englobant celles du modèle standard et les étendant bien au delà de ce qui est du domaine observable par l'expérience (les niveaux d'énergie auxquels apparaissent ces nouvelles symétries se situent aux alentours de 10^{16} GeV ce qui est très loin des possibilités expérimentales d'aujourd'hui). La symétrie de base des GUT repose sur l'invariance des propriétés de la nature par permutation d'un lepton et d'un quark. Aux niveaux d'énergies auxquels intervient cette nouvelle symétrie (10^{16} GeV et au delà) les quarks et les leptons deviennent identiques. Au dessous du seuil des 10^{16} GeV, les quarks et les leptons deviennent "différents" c'est-à-dire que leur comportement physique est distinct. La symétrie qui permet de confondre quark et lepton est donc spontanément brisée au dessous du seuil d'énergie de 10^{16} GeV.

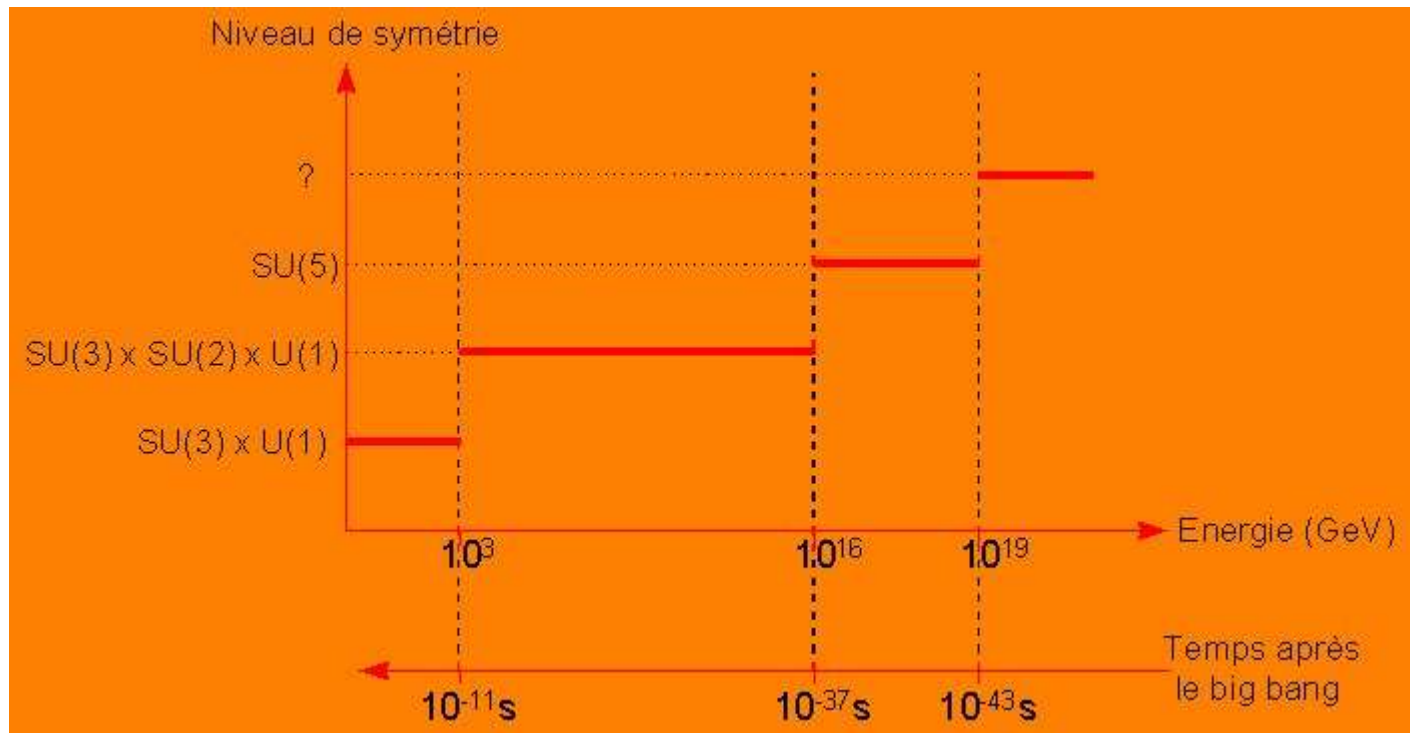
Vers un univers supersymétrique

Finalement, les théories de jauge et la tentative d'unification des interactions nous enseignent un fait majeur : la symétrie de l'univers croît avec les énergies mises en jeu dans les interactions entre les particules. Mais rappelons nous que l'augmentation de l'énergie nous rapproche des conditions physiques du « big bang ». Donc, on en conclut que plus l'on se rapproche des conditions physiques du « big bang », plus l'univers est riche en symétries.

Dit autrement, si l'on part de l'instant du « big bang », on constate qu'au contraire les symétries vont se briser successivement au fur et à mesure que l'univers s'étend et se refroidit. En d'autres mots, il perd en symétries au fil du temps.



Unification des forces électromagnétique, nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.



Les GUT ont pour objectif d'unifier les interactions faibles, forte et électromagnétiques. Il manque dans cette énumération une interaction d'importance majeure : **la gravitation** !

Guidés par la démarche testée dans l'édification de la théorie de l'interaction électrofaible, de celle du modèle standard et des GUT, les physiciens ont déduit que l'incorporation de la gravitation au corpus des interactions ou en d'autres termes, l'unification de l'ensemble des interactions, nécessitait un plus grand niveau de symétrie encore. Ce niveau de symétrie ultime devrait non seulement permettre de permuter n'importe quel particule avec n'importe quelle autre, mais en plus, il devrait indifférencier les champs de matière et celui créé par la gravitation, c'est-à-dire l'espace-temps lui même !!!

La recherche de cette ultime symétrie est l'objet de **la théorie supersymétrique** (notée **SUSY**).

Gravitation et mécanique quantique

Pour unifier la gravitation aux autres interactions fondamentales il est nécessaire de parvenir à décrire la gravitation dans le formalisme de la physique quantique. La seule description théorique de la gravitation dont nous disposons aujourd'hui est celle fournie par la relativité générale. Or la relativité générale et la mécanique quantique ne font pas bon ménage. Sur de nombreux points fondamentaux, le monde de la relativité générale et celui de la physique quantique ont une vision totalement divergente. Notamment :

Relativité générale	Mécanique quantique
les lois physiques sont indépendantes de l'observateur	les résultats des mesures dépendent de l'observateur



Unification des forces électromagnétique, nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

théorie déterministe	théorie non déterministe
les interactions sont continues	les interactions sont quantifiées (discontinues)
gravité est décrite comme un champ classique => un champ n'interagit pas avec lui même	gravité est décrite par des quanta nommés gravitons. Les gravitons interagissent entre eux

Cela tient peut être du fait que la relativité générale tente d'expliquer l'infiniment grand alors que la physique quantique s'intéresse à l'infiniment petit. Les moyens mathématiques employés par les physiciens pour atteindre ces objectifs sont radicalement différents.

Pour unifier la gravitation aux autres interactions fondamentales il est nécessaire de parvenir à décrire la gravitation dans le formalisme de la physique quantique. La seule description théorique de la gravitation dont nous disposons aujourd'hui est celle fournie par la relativité générale. Or la relativité générale et la mécanique quantique ne font pas bon ménage. Sur de nombreux points fondamentaux, le monde de la relativité générale et celui de la physique quantique ont une vision totalement divergente.

Cela tient peut être du fait que la relativité générale tente d'expliquer l'infiniment grand alors que la physique quantique s'intéresse à l'infiniment petit. Les moyens mathématiques employés par les physiciens pour atteindre ces objectifs sont radicalement différents. Cependant, il est évident que, quelque soit l'échelle des phénomènes décrits, il ne devrait exister qu'un modèle unique pour aborder aussi bien l'infiniment petit que l'infiniment grand.

Dans un cadre quantique, la gravitation doit être transportée par des quanta associés au champ gravitationnel. Ces quanta ont été baptisés **gravitons**. Il est possible de définir de façon purement théorique les principales caractéristiques du graviton :

1. **Il a une masse nulle** car la portée de la gravitation est infinie
2. **Il a un spin égal à 2** car la gravitation est représentée par un tenseur (le tenseur métrique) qui possède 5 degrés de liberté (un spin j peut prendre $2j+1$ valeurs ce qui fait 5 dans le cas d'un spin 2)
3. L'interaction gravitationnelle étant très faible (il faut des quantités immenses de matière pour commencer à pouvoir la déceler) les interactions impliquant des gravitons deviennent prépondérantes à des niveaux d'énergie très élevés (de l'ordre de 10^{19} GeV)
4. Les gravitons étant des quanta d'énergie, ils transportent *de facto* de l'énergie. Or la gravitation est sensible à la masse et à l'énergie. Par conséquent, **les gravitons interagissent entre eux**

Quand on essaye de représenter la gravitation - telle que proposée par la relativité générale - avec le formalisme de la théorie quantique des champs, on se heurte immédiatement à une difficulté majeure. La seconde relation d'incertitude d'Heisenberg nous enseigne que l'incertitude sur la mesure de l'énergie est d'autant plus grande que la durée de la mesure est courte. Ce qui peut être interprété différemment en disant que l'énergie peut fluctuer avec une amplitude d'autant plus grande que la durée d'observation est courte. Ces fluctuations se rencontrent partout, même dans le vide absolu. Cela implique que dans le vide total, sur des très courtes durées, la quantité d'énergie présente n'est pas nulle et peut même être gigantesque. Ce phénomène porte le nom de **fluctuations du vide**. Il peut paraître paradoxal, voire aberrant et pourtant récemment il a clairement été mis en évidence dans une expérience reproduisant [l'effet Casimir](#).



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

Les fluctuations de l'énergie dans le vide se matérialisent sous forme de champ de matière ou de force. Ainsi, le vide n'est pas vide du tout, mais rempli de particules et d'anti-particules qui se créent spontanément et s'annihilent presque aussitôt. Quand l'amplitude des fluctuations d'énergie atteint des valeurs pour lesquelles la gravitation devient prépondérante (c'est-à-dire aux alentours de 10^{19} GeV), l'énergie va pouvoir se « matérialiser » sous forme de gravitons. Or selon la théorie de la relativité générale, l'interaction gravitationnelle crée l'espace-temps. Il s'ensuit que la production spontanée de gravitons dans le vide va modifier profondément la topologie de l'espace-temps localement au point d'affecter la notion même de position et d'instant. Ainsi, à des échelles de distance et de temps très courtes - typiquement **l'échelle de Planck** à savoir 10^{-43} s et 10^{-33} cm - l'espace-temps est tellement « secoué » par les fluctuations d'énergie qu'il n'est plus vraiment possible de parler d'espace et de temps ! ! Les fluctuations de l'énergie dans le vide ont donc pour effet de « faire fluctuer » l'espace-temps.

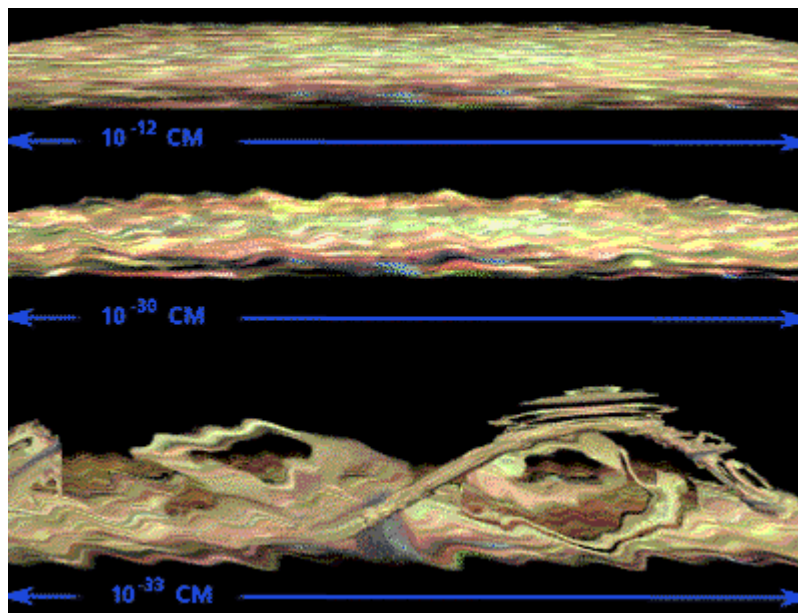


Illustration des fluctuations de l'espace-temps provoquées par les fluctuations d'énergie du vide.

Sans espace et sans temps « solide » sur lequel la physique peut s'appuyer, toutes les théories physiques se dissolvent dans le « néant ».

Comme on peut l'imaginer cette situation ne satisfait pas les physiciens. Pour y remédier, la physique théorique s'est lancée dans plusieurs directions de recherche passionnantes mais également incroyablement abstraites. Il faut dire qu'aux niveaux d'énergie auxquels ces nouvelles théories s'attaquent, l'expérience ne peut être d'une grande aide.

Trois grands axes de recherche canalisent aujourd'hui les efforts des physiciens :

1. Les **théories de la supergravité** reposant elles-mêmes sur des théories supersymétriques (SUSY)
2. La **théorie des supercordes**
3. La remise en question de la **topologie** classique de l'espace-temps.



Théorie de la supersymétrie et supergravité

La "matière-espace-temps"

La supersymétrie a pour objectif d'unifier toutes les interactions. Unifier toutes les interactions signifie en fait que toutes les entités susceptibles d'interagir jouent exactement les mêmes rôles vis-à-vis de l'interaction unifiée. Or, quelles sont les entités dont il s'agit ? On a :

- Les quanta de « matière » qui sont des fermions (particules de spin demi-entier),
- Les quanta de « force » qui sont des bosons (particules de spin entier),
- L'espace-temps au travers de la gravitation.

Dans le contexte de la théorie supersymétrique, la matière, les « forces » et l'espace-temps jouent donc des rôles symétriques et peuvent être intervertis dans les équations de la nature. C'est pour cela que certains physiciens utilisent le néologisme « **matière-espace-temps** » pour parler des entités physiques manipulées par la théorie supersymétrique.

Concrètement, en quoi cela consiste ?

Les symétries des théories supersymétriques

Les symétries auxquelles satisfont les théories supersymétriques sont les suivantes :

- Invariance par permutation d'un fermion par un boson et vice-versa
- Invariance relativiste c'est-à-dire symétrie vis-à-vis des transformations de Poincaré (transformation de Lorentz + translations)
- Invariance par transformations CPT (C = inversion de Charge, P = Parité, T = inversion du Temps)
- Symétries associées à la conservation des nombres quantiques comme les charges, l'isospin, etc.

Les théories supersymétriques permettent effectivement d'unifier les quatre interactions fondamentales mais elles butent sur la valeur infinie de certains résultats. Aujourd'hui, ces théories servent de socle à la théorie des supercordes.

Théorie des supercordes

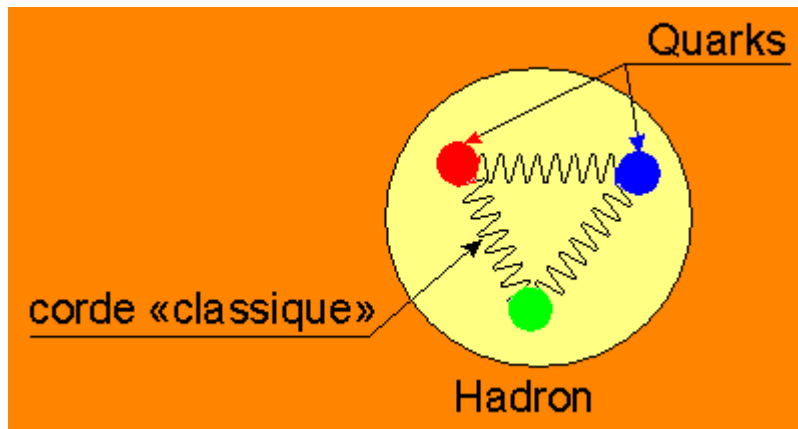
La théorie des cordes "classiques"

Historiquement, la théorie des supercordes est née d'une théorie plus ancienne - la théorie des cordes - qui avait été élaborée par Veneziano en 1968 pour tenter d'expliquer le confinement des quarks dans les hadrons. Veneziano avait introduit les cordes pour tenter d'expliquer pourquoi les quarks restaient confinés dans les baryons et les mésons. Les cordes jouaient le rôle de « ressorts » tendus entre les quarks, les maintenant ainsi dans un espace confiné. Avec la construction de la chromodynamique quantique, la théorie des cordes fut abandonnée, cependant certains résultats théoriques éveillèrent l'intérêt des physiciens. En effet, en 1969 Schwarz et Scherk montrèrent que les cordes fermées, c'est-à-dire en forme de boucles se comportaient comme des particules de masse nulle et de spin 2. Par conséquent, les cordes



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

fermées n'étaient rien d'autre que des gravitons !!! La théorie des cordes enfermait donc en elle-même la gravitation, sans devoir l'introduire de façon ad hoc.

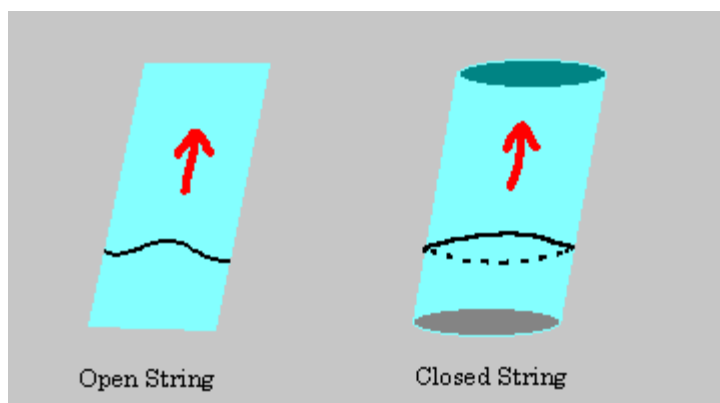


La théorie des supercordes

La théorie des cordes n'était pas relativiste, c'est-à-dire que la description des cordes ne répondait pas aux exigences d'invariance par **transformation de Lorentz** (schématiquement, une transformation de Lorentz consiste en la contraction des distances et la dilatation des temps, conformément à des formules de transformation qu'il n'est pas nécessaire de détailler ici). Le monde de la physique entreprit de faire de la théorie des cordes une théorie relativiste donnant ainsi naissance à la **théorie des supercordes**.

La théorie des supercordes devait également incorporer les dernières avancées théoriques sur le front des symétries. Ainsi, on imposa aux supercordes d'obéir à la supersymétrie, d'où le nom de **supercordes**.

Selon le modèle de la nouvelle théorie, les supercordes sont des cordes vibrantes de taille minuscule ($\sim 10^{-33}$ cm). Il existe deux types de cordes : les cordes ouvertes et les cordes fermées.

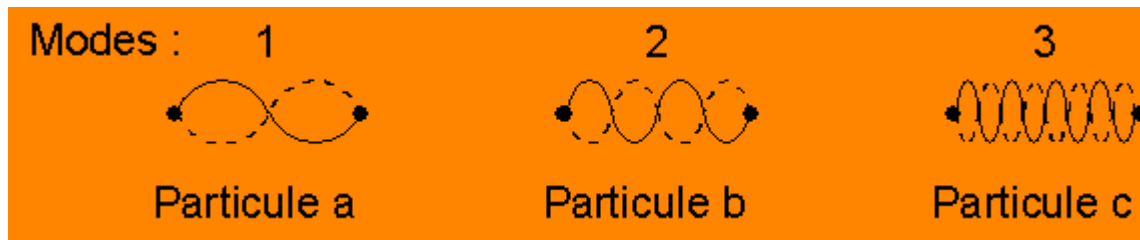


Comme les cordes d'un instrument de musique, les supercordes peuvent vibrer selon plusieurs **modes**. Le premier mode comprend un ventre et deux noeuds (les ventres sont les points où l'amplitude de l'oscillation est la plus forte, les noeuds sont les points où cette amplitude est nulle, comme c'est le cas aux extrémités de la corde vibrante). Le second mode comprend deux ventres et trois noeuds. Le troisième mode trois ventres et quatre noeuds et ainsi de suite.

Chaque mode de vibration correspond à un type de particule.



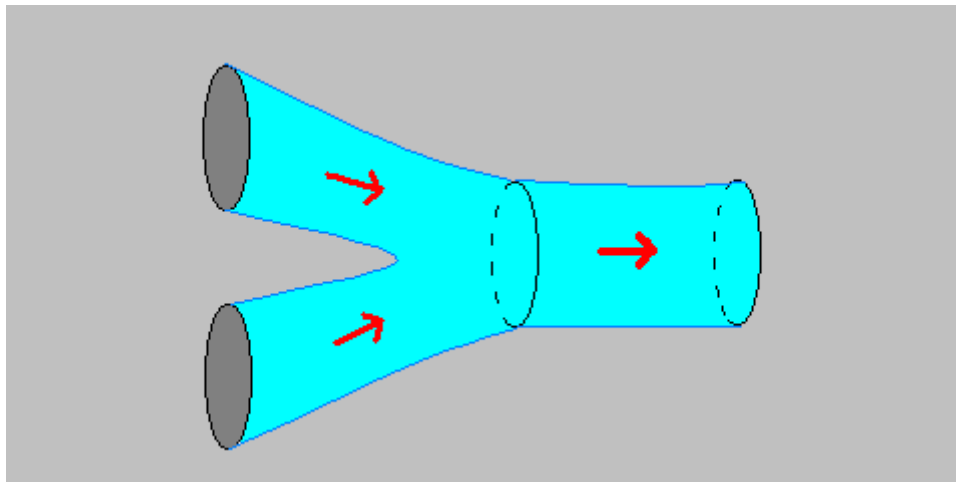
Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.



La modélisation théorique des supercordes laisse la liberté de choix de certains paramètres initiaux, que l'on appelle traditionnellement des conditions aux limites. Notamment, le mouvement des extrémités des supercordes n'est pas soumis à des contraintes rigides posées *a priori* mais peut être considéré comme un paramètre libre de la théorie. On distingue ainsi deux types d'extrémités pour les supercordes ouvertes :

1. Celles qui peuvent se déplacer mais en étant entraînées uniquement par le mouvement de la supercorde. Elles obéissent à la condition aux limites de **Neuman**.
2. Celles qui restent fixes dans un hyperplan. Elles répondent à la condition aux limites de **Dirichlet**.

L'interaction entre deux supercordes prend une signification physique très simple. Lorsque deux supercordes interagissent, elles se fondent l'une à l'autre. Elles peuvent par la suite se scinder de nouveau en une ou plusieurs supercordes. Dans tous les cas, les processus mis en jeu sont intuitivement simples.



Très schématiquement, les supercordes présentent deux intérêts majeurs :

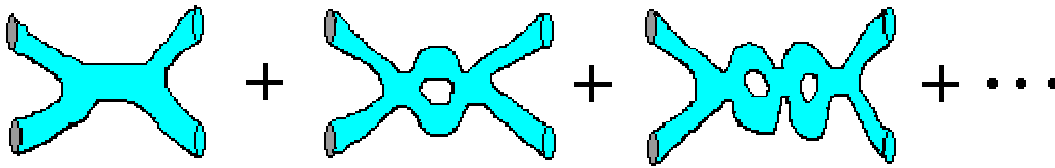
1. Les cordes fermées possèdent les mêmes propriétés que les gravitons et peuvent donc être assimilées comme tels
2. Les cordes sont des entités physiques ayant une dimension non nulle, alors que les particules, selon l'acceptation courante, sont ponctuelles et sans dimension.

La première propriété permet à la théorie des supercordes d'inclure naturellement la gravitation.

La seconde propriété permet de s'affranchir de toutes les difficultés inhérentes à la nature ponctuelle des particules, notamment les divergences dans le calcul des probabilités de diffusion (divergences de la matrice S). Le développement perturbatif d'une interaction selon la théorie des supercordes donne un résultat fini qui est illustré dans la figure suivante.



Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

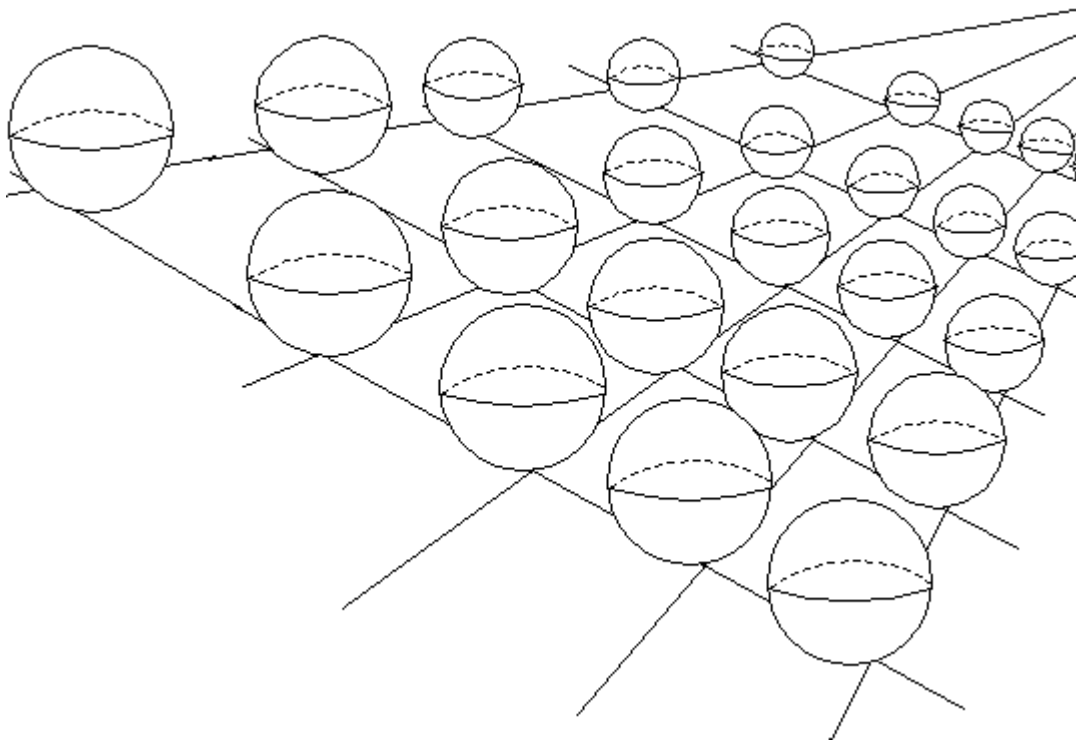


La théorie de Kaluza-Klein

Dans les années 1920, **Thomas Kaluza** et **Oskar Klein** ont tenté d'unifier les interactions électromagnétique et gravitationnelles à partir du formalisme de la relativité générale. On le sait, la théorie de la relativité générale permet d'interpréter la gravitation comme une déformation de l'espace-temps causée par la présence de matière et/ou d'énergie. La gravitation se ramène alors à un phénomène purement géométrique. Kaluza et Klein s'étaient fixés comme objectif d'attribuer à l'interaction électromagnétique une nature également géométrique.

Les équations de la relativité générale telle que formulée par A. Einstein ne parviennent pas à fournir une telle description géométrique pour l'électromagnétisme. Kaluza et Klein ont alors eu l'idée de rajouter une cinquième dimension à l'espace-temps et de façon très surprenante, ils parvinrent à un résultat satisfaisant.

Bien évidemment, cette cinquième dimension n'a jamais été observée mais Kaluza et Klein proposèrent que cette dimension additionnelle pouvait être enroulée sur elle-même en tout point de l'espace dans un cylindre dont le diamètre serait inférieur à 10^{-33} cm !!! A notre échelle, cette cinquième dimension ne peut être visible compte tenu de sa "taille". Cependant, si l'on disposait d'un "microscope" hyper puissant, la cinquième dimension deviendrait petit à petit perceptible au fur et à mesure que le grossissement augmenterait.





Unification des forces électromagnétique,
nucléaire faible, nucléaire forte et gravitationnelle.

Selon la **théorie de Kaluza-Klein** - comme on l'appelle - la symétrie propre à l'électromagnétisme - rotations dans un cercle ou groupe $U(1)$ - serait réalisée dans la cinquième dimension qu'ils ont ajoutée. Dans notre espace-temps à 4 dimensions, cette symétrie n'apparaît pas de façon explicite dans les équations de la relativité générale. La cinquième dimension imaginée par Kaluza et Klein joue donc le rôle de l'espace des phases de l'électromagnétisme. En quelques sortes, au travers de cette théorie, l'espace des phases de nature purement abstraite prendrait une forme réelle (bien que situé dans une cinquième dimension enroulée sur elle-même !). Jusqu'à présent, aucune expérience n'a permis de mettre en évidence la cinquième dimension de la théorie de Kaluza-Klein car ses dimensions sont beaucoup trop petites pour être accessibles par nos moyens technologiques.

Théorie des supercordes et espace-temps

Les physiciens ont appliqué les principes de la théorie de Kaluza-Klein à la théorie des supercordes. Ainsi, pour chaque symétrie respectée par les supercordes, ils ont ajouté une dimension dans l'espace-temps dans laquelle se réalise cette symétrie. Lorsque l'on fait la somme des dimensions additionnelles nécessaires, on obtient le chiffre extraordinaire de 7 !!! Ce qui est extraordinaire ce n'est pas la valeur particulière de ce chiffre, mais le fait que l'univers ainsi obtenu possède alors **11 dimensions** !!!

Si l'on reprend la représentation de l'univers que propose la théorie de Kaluza-Klein, en chaque point de l'espace-temps de la théorie des supercordes 7 dimensions s'enroulent sur elles-mêmes sur une distance de 10^{-33} cm. Cette longueur est précisément celle des supercordes. Pour les supercordes donc, l'univers tel qu'elles le « perçoivent » est « complet » puisqu'à leur échelle les 7 dimensions enroulées sur elles-mêmes sont bien réelles et « palpables ».

FIN PROVISOIRE

au 19 Mars 2008 en attendant la confirmation de l'existence du Boson de Higgs par le CERN avec leur grand collisionneur de hadrons (LHC).

L'idée du grand collisionneur de hadrons (LHC), remonte au début des années 80. Alors que le LEP, le Grand collisionneur électron-positon du CERN qui a fonctionné de 1989 à 2000, n'était pas encore construit, des physiciens regardaient déjà au-delà. Ils songeaient à réutiliser le futur anneau de 27 kilomètres pour une machine plus puissante encore.

Pour atteindre les énergies et les intensités de collision les plus élevées possibles, il fut proposé d'utiliser deux faisceaux de protons.

Cette machine fut baptisée le grand collisionneur de hadrons (LHC), les « hadrons » étant des particules de matière, telles que les protons.