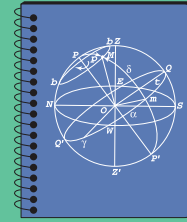


LES QUATRE FORCES FONDAMENTALES DE LA NATURE

Paul COUTEAU

Ce fascicule présente les quatre forces fondamentales de la nature : la gravitation, l'électromagnétisme, l'interaction forte et l'interaction faible. Ces forces dériveraient d'une force unique, aujourd'hui disparue, qui aurait existé juste après le Big Bang. La gravitation est une déformation de l'espace due à la masse ; elle est décrite par les équations différentielles. L'électromagnétisme, véhiculé par les photons, agit sur les particules chargées comme les électrons. L'interaction forte, ou force de couleur, lie les quarks à l'intérieur des noyaux atomiques grâce aux gluons. L'interaction faible, transmise par le boson Z^0 , permet des désintégrations comme celle de l'électron en neutrino. Ces forces sont transmises par des particules appelées médiatrices ou bosons.

La physique quantique révèle la réalité nous échappe : nous ne pouvons que l'approcher sans jamais la saisir complètement. Le texte conclut sur la quête de la force primordiale, véritable « pierre philosophale » des physiciens, qui unifierait l'ensemble des interactions connues.



N° 21

LES QUATRE FORCES FONDAMENTALES DE LA NATURE

Paul COUTEAU



SOCIÉTÉ
d'ASTRONOMIE
de NANTES

Société Scientifique d'Éducation Populaire agricole Jeunesse et Sports
35, boulevard Louis Millet - 44300 NANTES - Tél. 02 40 68 91 20 - Fax 02 40 93 81 23
Internet : www.san.asso.fr - E-mail : san@san-fr.com

Les Cahiers de la SAN

**LES QUATRE FORCES
FONDAMENTALES
DE LA NATURE**

Paul COUTEAU

Qualité auteur

Édition 2011

La Société d'Astronomie de Nantes

Résolument tournée vers le grand public, la SAN vous propose de découvrir l'astronomie ou d'approfondir vos connaissances dans ce domaine de multiples façons :

- Assister aux exposés d'astronomie présentés lors des réunions du vendredi soir, ouvertes à tous les adhérents, au local de la Société à partir de 20h30.
- Consulter ou emprunter l'un des mille ouvrages que possède le fonds bibliothécaire.
- Participer aux observations de découverte ou de perfectionnement. Vous pouvez également emprunter un instrument.
- Assister aux conférences au cours desquelles des astronomes et astrophysiciens de renom viennent présenter les derniers acquis de leurs travaux.
- Solliciter la SAN pour animer des actions pédagogiques préparées à l'attention de public scolaire ou adulte.
- Visiter les expositions auxquelles la SAN participe régulièrement.
- Apporter votre contribution à la réalisation de travaux pratiques d'astronomie tels que la mesure de la masse de Jupiter ou l'évaluation des altitudes des reliefs lunaires.
- Réfléchir et débattre des grands thèmes de la physique, de l'astrophysique et de la science en général au sein d'un groupe de réflexion théorique.
- Enfin, l'astronomie nécessitant des connaissances et des compétences multiples (en optique, mécanique, électronique, etc.), offrir un peu de votre temps pour la conception ou à la réalisation de projets astronomiques.

Pour participer à ces activités, il vous suffit de devenir adhérent.

La Société d'Astronomie de Nantes est une association fondée en 1971 et régie par la loi de 1901.

Les « **Cahiers de la SAN** » sont édités par la Société d'Astronomie de Nantes,
Société Scientifique d'Éducation Populaire agréée Jeunesse et Sports.

35, boulevard Louis-Millet
44300 NANTES

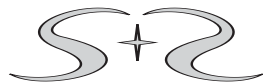
Tél. 02 40 68 91 20 - Fax 02 40 93 81 23 - E-mail : san@san-fr.com

© Toute reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans l'autorisation de la Société d'Astronomie de Nantes, est interdite.

certaines points de l'espace, des particules qui sont des résidus de la force unique primordiale et qui sont restées inchangées. Ces résidus peuvent se trouver au centre de certaines galaxies, peut être dans le noyau très actif des galaxies dites de SEYFERT.

Si nous trouvons cette particule unique, nous aurons découvert un principe unique. C'est l'objet de notre recherche. Nous avons actuellement un principe unique, qui est le Big Bang. Mais ce n'est qu'une hypothèse, car on ne sait rien des débuts de l'Univers avec certitude. Le jour où nous aurons découvert une particule fondamentale d'où dérivent les quatre bosons intermédiaires, nous aurons fait une découverte fondamentale sur la structure de l'Univers. Nous aurons découvert la Pierre Philosophale qui nous permettra d'avancer plus loin dans nos connaissances.

L'Univers est pour nous un partenaire. Tout ce passe comme si l'univers nous avait choisi comme partenaire pour qu'on puisse l'interroger. L'Univers nous répond, et nous adaptons notre logique et notre pensée à ce que l'univers nous apprend. La mécanique quantique nous a permis de modifier notre compréhension de l'Univers. Nous avons appris à être humble, car la réalité restera inaccessible, mais nous pourrons toujours nous en approcher davantage.



LES QUATRE FORCES FONDAMENTALES DE LA NATURE

L'auteur

Paul COUTEAU est né le 31 décembre 1923 à la Roche-sur-Yon. Il est marié et père de 6 enfants. Sous la direction d'Evry SCHATZMANN, il entreprend des recherches sur les naines blanches qui furent l'objet de la thèse de doctorat d'état en sciences physique qu'il soutint en Sorbonne en 1956. Directeur adjoint à *l'Observatoire de Nice* en 1959, il met en service, grâce à Jean-Claude PECKER, deux grandes lunettes dont celle de 76 cm, la quatrième du monde. Il fut invité à *l'Université de Chicago* pendant un an en 1961, puis a été président de la *Commission des Étoiles Doubles* à *l'Union Astronomique Internationale* de 1967 à 1970.

Il a observé plus de 100 000 étoiles, il a découvert plus de 2000 systèmes d'étoiles dont il a calculé de nombreuses orbites et il enseigne ses méthodes à *l'Université de Nice*.

Astronome titulaire depuis 1969, il a créé le *Centre d'Étoiles Doubles* à *l'Université de Nice* en 1973.

Il a publié plusieurs livres dont « l'Observation des Étoiles doubles visuelles » en 1978 et « Ces Astronomes fous du Ciel » en 1988.

Il se passionne pour la physique des particules et a prononcé de nombreuses conférences sur ce sujet.

Le présent fascicule reproduit celle qu'il a prononcé le 25 janvier 1991 au *Muséum d'Histoire Naturelle de Nantes* à l'invitation de la Société d'Astronomie de Nantes.

La force unique promordiale

Les quatre forces fondamentales dérivent d'une force unique, primitive et actuellement disparue. Si on parvient à trouver cette force unique, on pourra trouver le secret de la constitution de la matière.

Nous ignorons si les quarks ne sont pas, à leur tour, formés par d'autres quarks. Il existe six sortes ou saveurs de quarks dont deux suffisent pour composer la matière que nous connaissons. Mais on a découvert, par le calcul, d'autres quarks dits étranges et qui pourraient bien exister dans l'univers. Ces quarks étranges peuvent former des atomes aussi grands que le Système Solaire. Les physiciens et les astronomes recherchent de tels quarks, et pensent en avoir observé dans certaines étoiles à neutrons, mais on ne dispose d'aucune certitude.

Si on trouve la force unique dont dérivent les quatre forces fondamentales, on pourra savoir comment ces quatre forces sont dérivées.

Actuellement, le scénario est le suivant :

Quand l'Univers était âgé de 10^{-29} secondes, les quatre forces étaient unifiées et engendraient la même chose, probablement des quarks. Mais cette force unique était plus puissante. Il se peut que certains résidus de cette force unique aient subsisté en certains points de l'Univers. De tels résidus, comme par exemple les cordes cosmiques et les points singuliers ou monopôles, sont des particules piégées au moment du Big Bang et qui sont demeurées intactes.

À un moment donné, l'Univers a connu une surfusion. Considérez une eau très chaude, sous forme de vapeur. Cette vapeur n'a pas de direction privilégiée, elle est partout pareille et a donc une symétrie parfaite. La vapeur refroidie donne de l'eau, qui n'a pas de direction privilégiée mais qui est un peu cristallisée. Mais si l'eau gèle, elle se transforme en glace qui a une structure cristallisée. Il y a un problème de surfusion quand de l'eau se trouve piégée dans la glace.

Du fait d'un problème de surfusion, il peut y avoir, dans

à des vibrations, cette étoile avait été baptisée « Géminga ». Le Soleil reproduisait fidèlement ces vibrations, avec un certain retard. On pensa donc que le Soleil était un résonateur qui vibrait à cause des gravitons qu'il recevait. Mais on s'aperçut que les vibrations du Soleil avaient une autre origine et que l'hypothèse était fausse.

Le problème des gravitons reste entier. Il n'a pas pu être élucidé lors de la dernière supernova. Mais on finira bien par le résoudre un jour.

Les forces fondamentales de la Nature

Introduction

Les quatre forces fondamentales de la Nature sont en quelque sorte la Pierre Philosophale des physiciens. Les alchimistes du Moyen-Âge cherchaient à produire de l'or au moyen de la transmutation des métaux. Les physiciens modernes savent effectuer de telles transmutations, mais ne peuvent pas produire de l'or en grande quantité.

Pour le physicien moderne, la Pierre Philosophale est la chose suivante : l'Univers est formé de particules élémentaires qui sont soumises à des forces. Toutes ces forces dérivent d'un phénomène unique, qui lui aussi est une force. Cette force unique existait au début du Monde et a engendré l'Univers tout entier.

Les quatre forces fondamentales de la Nature dérivent de cette force unique qui est la Pierre Philosophale recherchée par les physiciens modernes. Les particules qui constituent l'Univers sont regroupées au moyen des quatre forces fondamentales qui sont les suivantes.

Les quatre force fondamentales

La gravitation

C'est la force qui fait que vous êtes assis sur votre chaise sans vous envoler vers le plafond. Depuis EINSTEIN, on pense qu'il s'agit d'une déformation de l'espace, due à la présence d'une masse, et qui fait que tout corps est attiré vers un centre attractif. La Terre nous attire vers son centre ; c'est une force de gravitation, qui dépend de la masse de la planète.

La gravitation fait partie des phénomènes de physique des champs.

Un champ est une portion de l'espace où règne une certaine propriété.

Un champ de pesanteur est donc une région de l'espace où règne une certaine pesanteur. Il existe d'autres champs comme, par exemple, le champ de lumière (pensez à une salle inondée de lumière).

Il est possible d'expliquer l'espace et le temps grâce à la notion de continuité qui nous est familière. On peut diviser l'espace et le temps en autant de parties que l'on veut. En langage mathématique, les champs ont été traduits en équations différentielles.

Une équation différentielle est une relation entre un événement et la variation de cet événement, au moment où on considère cet événement.

Nous pouvons ainsi décrire les trajectoire des planètes, prévoir les éclipses et le vol des engins interplanétaires. La physique est déterminée. Nous pouvons prévoir tous les phénomènes, en les traduisant numériquement en équations. Tout cela dérive de la logique de nos sens ; cette logique est composée d'axiomes ; en voici deux :

Le tout est plus grand que la partie.

Les mêmes causes produisent les mêmes effets.

L'électromagnétisme

Il s'agit de la force électrique, qui intervient dans le feu, dans les orages, et dans les activités biologiques (notre corps est maintenu à une température constante), etc.

Bien que l'on ait domestiqué l'électricité, on ne sait rien de sa structure intime. La force électrique est transportée par des corpuscules, dont certains sont appelés électrons.

L'interaction forte ou force de couleur

Cette force ressemble à l'électricité mais est beaucoup plus puissante qu'elle ; son domaine d'action est la périphérie des noyaux atomiques.

La gravitation

Nous disposons à présent des quatre forces fondamentales et de leurs médiateurs, à l'exception du graviton. Celui-ci sera certainement découvert dans l'avenir, mais cela ne sera pas facile.

Quand un insecte tombe sur une toile d'araignée, celle-ci vibre et informe l'araignée de la capture. De même, la Terre et les astres creusent autour d'eux une cuvette dans l'espace, dans laquelle nous sommes piégés. Si la Terre disparaissait brusquement, la cuvette disparaîtrait aussi, mais pas brusquement. De même, dans une cuvette d'eau où se trouve une éponge, si vous retirez brusquement l'éponge, vous aurez dans la cuvette des phénomènes ondulatoires, dus à la restructuration de l'eau quand l'éponge disparaît. Si vous retirez la Terre brusquement, l'espace retrouverait son anisotropie en produisant des ondulations, lesquelles donneraient des gravitons.

Les gravitons correspondent donc à une énergie dissipée par une certaine viscosité de l'espace. Tout comme l'eau qui se rétablit dans un vase en dissipant un peu son énergie potentielle, cinétique, etc.

Comment faire naître des ondes de gravité ? Il faut faire vibrer l'espace, et cela se traduira par une déformation des objets qui sont dans l'espace. Car nous sommes un peu de l'espace, nous faisons partie de l'espace, nous serons aussi déformés quand l'espace se déformera. Un peu comme lorsque vous voyez un nageur déformé par la réfraction de la lumière dans une piscine.

Certains phénomènes astronomiques sont capables de faire vibrer l'espace. Quand une supernova implose, sa densité varie énormément en quelques millièmes de seconde, ce qui provoque une puissante onde de gravité et donne naissance à des gravitons. Une étoile qui vibre peut aussi produire des ondes de gravité.

À l'observatoire de Nice, on a cru déceler de telles ondes de gravité. On avait découvert une étoile assez proche et sujette

débris forment de nouvelles particules. De même, quand deux gouttes d'eau se rencontrent, elles forment des gouttes plus petites. Pour créer un boson Z_0 , il faut produire une collision dont les débris soient capables de former des particules plus lourdes que le proton. Pour ce faire, les physiciens ont construit des collisionneurs. Celui du *Centre Européen de Recherche Nucléaire* est un anneau de 27 kilomètres de circonférence. Pour détecter le boson Z_0 , les physiciens européens utilisèrent comme projectiles des protons et des antiprotons circulant en sens contraire. Un collisionneur courbe est plus commode pour faire circuler les particules, mais au prix d'une perte d'énergie.

Les Américains ont fabriqué à Standford un collisionneur linéaire de trois kilomètres de long. Ils utilisèrent des électrons comme projectiles. L'expérience consistait à faire se rencontrer deux faisceaux accélérés en sens contraires, l'un d'électrons, l'autre de positons (ou antiélectrons), ceci à une énergie colossale. Le faisceau d'électrons était accéléré à 100 milliards d'électrons-volts ; le faisceau de positons était lui aussi accéléré à 100 milliards d'électrons-volts. Lorsque les électrons et les positons se rencontrent, il y a production d'énergie lumineuse sous forme de photons et de débris qui sont d'autres particules.

Parmi ces débris, se trouvait une particule dotée d'une énergie de 96 milliards d'électrons-volts, c'est à dire une particule 100 fois plus grosse que le proton. C'était le boson Z_0 , le médiateur de l'interaction faible qui fut ainsi mis en évidence pour la première à Standford en avril 1989. Depuis, cette particule a été reproduite à plusieurs reprises.

Le noyau atomique est tout petit. Comparé à la taille de l'atome, le noyau est une mouche dans une cathédrale. Les électrons circulent dans cet espace libre autour du noyau, et leurs mouvements engendrent les forces électriques.

La force de couleur assure la cohésion des noyaux atomiques.

L'interaction faible

Elle concerne les électrons, qui peuvent se désagréger.

Les particules fondamentales et les particules médiatrices

Les particules fondamentales constituent la matière. Elles sont au nombre de deux : les *quarks* et les *leptons*.

Les quarks sont les constituants des particules plus lourdes désignées par le terme de *hadrons* : ce sont les *protons* et les *neutrons*, qui constituent les noyaux atomiques. Ces particules sont régies par l'interaction forte.

Les *leptons* sont des particules plus légères, parmi lesquelles on trouve l'*électron*. Elles sont régies par l'interaction faible.

Toutes ces particules agissent les unes sur les autres par des forces qui sont véhiculées par des particules médiatrices, les *bosons*. Ces particules, qui se déplacent à la vitesse de la lumière (300 000 km/s), transportent la force d'une particule à une autre.

Il y a autant de particules médiatrices qu'il y a de forces fondamentales.

Le *graviton* est la particule médiatrice de la force de gravitation. Elle n'a pas encore été détectée.

Le *photon* est la particule médiatrice de la force électromagnétique. Les photons sont l'énergie produite par les électrons.

Le *gluon* est la particule médiatrice de l'interaction forte. C'est le ciment des noyaux atomiques.

La particule Z_0 , ou boson vecteur intermédiaire, est responsable de la structure de l'électron. Celui-ci peut se désagréger en plusieurs particules parmi lesquelles le *neutrino*, dépourvu de masse et capable de traverser sans dommage tous les blindages, mêmes aussi épais que la Terre.

Découverte théoriquement en 1932, cette particule n'a été détectée avec certitude que très récemment.

La particule Z_0 transporte l'information entre l'électron et le neutrino.

L'interaction faible

Un électron peut se désagréger pour donner un neutrino. Quand un électron se désagrège, une partie de son énergie disparaît. Le principe de conservation de l'énergie exige qu'une particule emporte cette énergie perdue avec elle. Cette particule est le neutrino. Le Soleil doit dégager beaucoup de neutrinos. Mais ils sont capables de traverser toute la Terre sans être arrêtés. Il est extrêmement difficile de piéger un neutrino.

Pour étudier les particules, il faut provoquer des collisions.

L'ampleur des dégâts provoqués lors de l'accident donne l'importance des particules. Pour piéger le neutrino, on a construit des télescopes à neutrinos qui consistent en de grands réservoirs de tétrachlorure de calcium dont la molécule doit être démolie par l'énergie transportée par le neutrino.

Dans le monde, il existe seize postes d'observation des neutrinos.

En moyenne, un neutrino se fait piéger tous les mois. Cette faible quantité donnait à penser qu'intervenient des phénomènes parasites mal maîtrisés.

Or, en février 1987, chacun des seize détecteurs a reçu une quarantaine de neutrinos en quelques dixièmes de secondes. Les physiciens pensèrent à un cataclysme. Trois heures plus tard, une étoile nouvelle était visible dans le Grand Nuage de Magellan.

Quand une étoile devient supernova, elle implose, puis rebondit sur son cœur en dégageant énormément de neutrinos. Ceux-ci quittent l'étoile trois heures avant les photons, qui sont ralentis dans l'enveloppe de la supernova. Les neutrinos ont donc trois heures d'avance sur les photons. La supernova de 1987 fut la découverte effective du neutrino.

Il restait à mettre en évidence le médiateur de la force responsable de la structure de l'électron, c'est à dire le boson Z_0 . On avait une idée de sa structure, cette particule devait être plus lourde que le proton.

Pour étudier des particules, il faut les faire se rencontrer dans des collisionneurs, quand des particules se choquent, les

particules et des antiparticules. Quand le gluon arrive dans le pourtour du noyau de l'atome, il n'y a plus de quark, le gluon est alors insensible aux apparitions des particules virtuelles et il retrouve toute sa force de couleur.

La physique des quanta

L'espace et le temps ne sont pas divisibles indéfiniment. On butte sur des cellules indivisibles, celles de l'action.

L'action est un mélange entre une énergie et un temps.

L'énergie est une force vive.

La force vive est l'énergie d'un mobile animé d'une certaine vitesse.

Quand vous circulez en automobile, vous avez une force vive due à votre vitesse : c'est de l'énergie. Au fur et à mesure que vous avancez, vous débitez de l'action (c'est à dire le produit de l'énergie par le temps), exactement comme votre compteur électrique débite des kilowatts. Mais si on peut fractionner le kilowatt, on ne peut pas fractionner l'unité d'action ou le *quantum* d'action, comme Max PLANCK le découvrit en 1905. Ceci ne s'applique pas quand vous circulez en automobile : vous débitez un si grand nombre de quanta qu'on peut considérer la vitesse et le temps comme continus.

Mais l'électron est une toute petite particule : comparé au gramme, l'électron est le gramme comparé à la Terre toute entière. Et le quantum d'action est énorme pour l'électron.

Imaginez un électron qui se déplace à 10 cm/s. Ses quanta vont défiler : au bout d'une seconde, il aura débité 8 quanta ; au bout d'une autre seconde, il débitera 8 autres quanta. D'un quanta à l'autre, il y a un huitième de seconde. Ce huitième de seconde n'est pas divisible. Le temps n'est plus continu, et nous avons des sauts quantiques de un huitième de seconde.

Pendant ce huitième de seconde, l'électron parcourt 1,25 cm, pendant qu'il décrit cette longueur, l'électron n'est nul part.

La notion de trajectoire disparaît. On ne peut plus assigner une trajectoire définie à l'électron : la localisation de la particule dans l'espace et le temps s'estompe. C'est l'objet de la *Physique Quantique*, ou *Physique des quanta*.

Le huitième de seconde est une période. L'inverse d'une période est une fréquence. Nous avons une onde associée à la

particule ; sa longueur d'onde est la longueur durant laquelle l'électron n'a pas de position définie. On fait intervenir une onde dans la manière dont l'électron se propage. C'est l'objet de la Mécanique ondulatoire.

Ces deux mécaniques sont complémentaires.

Supposons maintenant que le mouvement de l'électron s'estompe. Le débit des quanta ralentit, la période associée à l'électron augmente ; l'espace pendant lequel l'électron n'a plus de position définie augmente. Si l'électron est au repos, il n'y a plus d'espace dans lequel on puisse le localiser. On ne peut pas assigner une position définie à un électron au repos, on ne peut pas lui assigner de temps ou de période déterminé.

Pour pouvoir cerner un électron, il faut que cet électron aille très vite. S'il se déplace à 10 m/s, les quanta vont défiler plus vite ; à chaque quanta, au lieu d'avoir un huitième de seconde, on aura 1/1000^e de seconde, et sa trajectoire se précisera avec l'augmentation de la vitesse de l'électron. Mais on ne pourra plus observer cet électron, car il se déplace trop vite. Seule sa trajectoire pourra être observée. On constatera seulement le passage de l'électron à un moment donné.

Ainsi, on introduit l'indéterminisme dans la physique. On abandonne l'image de l'équation différentielle. À l'échelle des particules, l'espace et le temps s'évanouissent et le déterminisme disparaît.

Mais à l'échelle macroscopique, le déterminisme est toujours valable. Un homme assis sur une chaise a une position bien déterminée : en effet, il est constitué par l'assemblage d'un grand nombre de particules élémentaires dont l'agitation est colossale. Ces particules s'agitent à des kilomètres par seconde. Pour l'homme assis sur sa chaise, un nombre énorme de quanta se dégagent de son corps ; et pour lui, l'espace et le temps peuvent être débités en petites tranches.

desquelles il y a du vide. Mais ce vide contient un rayonnement (sinon il est au zéro absolu) mais ce rayonnement peut être traversé par des neutrinos.

Nous nous plaçons à l'échelle du milliardième de milliardième d'Angström (1 Angström = 1/10 000 000 mm), à côté du millimètre, c'est comme le millimètre à côté de l'Univers tout entier.

À cette échelle, il y a des fluctuations quantiques. Le quantum de PLANCK nous interdit d'assigner un état d'énergie déterminé au vide. Le vide est différent de l'absence d'énergie, le vide est différent du zéro.

Autrement dit, le vide est un état étal, comme le niveau de la mer. Mais le niveau de la mer est fluctuant, (à cause du vent, du mouvement des bateaux, etc.). Les fluctuations du vide trouvent leur origine dans le quantum ou dans l'indéterminisme. Dans le vide et autour des particules élémentaires, il apparaît de la matière et de l'antimatière, ou des particules et des antiparticules. Ces particules virtuelles sont créées par paires ; une particule apparaît avec son antiparticule.

Dans un noyau, du fait du hasard quantique, apparaissent puis disparaissent une particule et une antiparticule, ceci durant une fraction de seconde extrêmement petite. Ces particules virtuelles apparaissent près d'un quark vert, bleu ou rouge ; la particule colorée va tâcher de s'agglutiner au quark le plus proche d'elle et ce quark va s'efforcer de s'éloigner de l'ensemble de trois quarks dont il fait partie. Ainsi, le quark est attiré par la particule virtuelle qui est apparue près de lui, il s'éloigne des deux autres quarks partenaires pour s'approcher de cette particule, la particule disparaît et le quark est pour ainsi dire affaibli.

À cause de la fluctuation quantique, d'autres particules virtuelles apparaissent à l'intérieur du noyau ; les liens entre les quarks sont affaiblis et il en résulte une certaine liberté de manœuvre pour les quarks.

Pendant ce temps là, une grande quantité de gluons circulent dans le noyau ; ils sont affaiblis par les apparitions des

L'interaction forte ou force de couleur

Elle intéresse le noyau atomique, qui est formé de quarks.

Prenons le plus simple des atomes, celui de l'hydrogène : un électron circule autour du noyau, qui est un proton. Ce proton est lui-même constitué par trois quarks, un rouge, un vert, et un bleu. Ces couleurs sont une façon de se représenter les quarks et les lois qui les régissent : on appelle cela la chromodynamique quantique.

Les quarks ne peuvent pas exister à l'état libre, ils doivent se regrouper de façon à « donner du blanc ». De là naît la force de couleur.

À l'intérieur du noyau, les quarks retrouvent un peu de leur liberté, ils ont tendance à se dissocier mais ils ne peuvent pas sortir du noyau, ils en sont empêchés par les gluons, la particule médiatrice de l'interaction forte.

Si les quarks ne retrouvaient pas un peu de leur liberté, les noyaux atomiques seraient plus petits et s'effondreraient sur eux-mêmes (de même, si les électrons n'étaient pas soumis aux forces électriques, la matière serait plus dense).

Pour expliquer ce phénomène, il nous faut évoquer l'antimatière et le vide quantique.

L'antimatière

La matière dont nous sommes faits est composée de protons de charge électrique positive et d'électrons à charge électrique négative. Dans l'antimatière, le proton a une charge négative et l'électron a une charge positive (et s'appelle positon). Mais si matière et antimatière se rencontrent, elles s'annihilent et l'énergie est dissipée sous forme de photons.

Le vide

Le vide est l'absence de tout phénomène ; c'est un endroit où il n'y a rien. Cette idée ne tient pas. Philosophiquement, on ne peut pas imaginer un endroit où il n'y ait rien. On est obligé d'imaginer quelque chose avec des parois, à l'intérieur

La réalité est inaccessible

Nous ne pouvons pas avoir accès à la réalité de la Nature : nous ne pouvons que la surestimer ou la sous-estimer.

Par exemple, vous entendez derrière vous les aboiements d'un chien. Vous dites : « Il y a un chien derrière moi ». En fait, vous surestimez la réalité, ou vous la surdéterminez : car il pourrait s'agir d'un appareil qui reproduise les aboiements d'un chien. Mais si vous ne dites rien, vous sous-estimez la réalité, ou vous la sous-déterminez. Vous encadrez la Réalité, mais sans pouvoir l'attendre.

Nous en avons un exemple célèbre, avec la problème de la lumière.

Au siècle dernier, Augustin FRESNEL mis au point une théorie ondulatoire de la lumière, confirmée par les expériences. Il surestimait la réalité, en affirmant que la lumière se propageait sous forme d'ondes.

En 1905, Max PLANCK découvrit que la lumière se propage sous forme de petits paquets, les photons, liés à des quanta. La lumière se propage non plus sous forme d'ondes, mais sous forme de corpuscules qui sont projetés par les sources lumineuses. Mais lui aussi surestimait la réalité.

Un électron peut être décrit comme une bille qui se déplace, ou comme une onde qui remplit tout l'espace. Mais l'électron n'est ni onde ni corpuscule. La réalité nous est inconnue.

Certes, on fera des approches de plus en plus fines de la réalité, mais nous ne l'atteindront jamais.

Une nouvelle logique est née dans les années 1930, avec la physique des quanta. Les vieux axiomes sont faux. Le tout est plus grand que la partie. Il y a en mathématiques des cas où le tout est aussi grand que la partie. Par exemple, l'ensemble des nombres pairs est aussi important que l'ensemble des nombres entiers. Les mêmes causes produisent les mêmes effets. Quand nous répétons une expérience, dans les mêmes conditions, nous obtenons presque toujours le même résultat.

En physique des particules, quand nous envoyons un

électron, nous ne savons pas ce qui va se passer. À cause des quanta, l'électron va nous échapper dans l'espace et dans le temps pour réapparaître à un moment donné, de façon plus ou moins floue, mais sa trajectoire ne pourra pas être bien déterminée.

Mais l'inconnaissable n'est pas l'inconnu. Nous pouvons être affectés par des maladies inconnues à ce jour, mais les médecins espèrent bien en découvrir les causes, et passer du l'inconnu au connu. Mais en physique, on ne connaîtra jamais la réalité, qui restera toujours inaccessible. C'est un des grands mystères de la matière.

À présent, venons en à l'examen des forces fondamentales.

La force électromagnétique

Reprenons notre électron qui se déplace à 10 cm/s et qui développe huit quanta par seconde. Il s'arrête subitement, en rencontrant un blindage ou en étant freiné par un champ électrique. De l'électron, part un messenger, le photon, qui emporte avec lui le paquet de quanta libéré par l'électron. Il emporte ce paquet de huit quanta et le conserve tant qu'il ne rencontre rien (il peut voyager pendant des milliards d'années).

Mais s'il rencontre un autre électron, il lui transmet sa force de huit quanta : l'électron prend ces huit quanta et bénéficie de cette énergie. Le photon est un boson vecteur qui transporte cette force.

La force électromagnétique, qui régit le voisinage des noyaux atomiques, est considérable.

Supposons un atome d'un mètre de largeur. Le noyau a dans ces conditions une étendue de un dixième de millimètre, son poids est de 1700 kilogrammes.

Autour de ce noyau, circulent des électrons dont le poids total est de 500 grammes. Un électron circule autour du noyau à une vitesse foudroyante : en une seconde, il fait autant de tours qu'une hélice d'avion en quatre millions d'années.

L'électron est lié au noyau par des forces électriques énormes : pour extraire un électron de notre atome d'un mètre, il faudrait l'énergie d'un moteur d'avion de 10 000 CV qui travaillerait pendant 5 heures. Cette énergie est la source des phénomènes électriques.

Rappelons qu'un atome est minuscule : un gramme d'hydrogène contient un nombre d'atomes égal à 1 suivi de 23 zéros.