

La violation de parité dans les interactions faibles Un **miroir brisé** qui fait le **bonheur** des physiciens

La mesure de la violation de parité dans les interactions faibles, phénomène découvert il y a tout juste cinquante ans, a atteint un très haut degré de précision dans deux expériences auxquelles ont participé des chercheurs du CEA. Cette bizarrerie de la nature est aujourd'hui utilisée comme une nouvelle sonde du monde subatomique, en mettant en jeu l'infime contribution de la force faible dans l'interaction des électrons avec la matière.



Le Hall A auprès de l'accélérateur Cebaf abrite l'expérience HAPPEx.

De l'expérience de Mme Wu au Nobel de Yang et Lee

Le 9 janvier 1957, un toast au Château Lafite-Rothschild 1949 est porté par l'équipe de Mme Chien-Shiung Wu à la fin du règne de la **symétrie de parité**. Cette symétrie est en effet violée dans la **désintégration** β d'**atomes** de cobalt 60! Le résultat est publié la semaine suivante, en même temps que celui du groupe de Léon Lederman, qui vient lui aussi de mettre en défaut la symétrie de parité dans une mesure indépendante de la décroissance des **mésons** $\pi^{(1)}$. Ces résultats qui révolutionnent la physique des particules sont issus d'expériences que la technologie de l'époque a permis de monter rapidement. L'expérience de Mme Wu était la plus difficile à cause du nécessaire refroidissement du

(1) Un méson est une particule formée d'un quark et d'un antiquark. cobalt à très basse température; celle de Lederman a été réalisée en 36 heures! Ce qu'il manquait, c'était l'audace d'aller vérifier ce qui apparaissait jusque-là comme une "évidence". Depuis les travaux de Wigner, en 1927, la parité est en effet une symétrie fondamentale de l'électromagnétisme. Elle est souvent désignée comme la symétrie gauche-droite ou la symétrie-miroir car elle implique que tout processus physique est équivalent à son image dans un miroir. La parité prédit, par exemple, qu'une molécule et son image dans un miroir ont la même probabilité d'être synthétisées lors d'une réaction chimique, phénomène observé dès 1848 par Pasteur. Elle est également à l'origine des règles de sélection des transitions atomiques. Au-delà des phénomènes électromagnétiques, la parité est aussi une symétrie exacte des forces nucléaire forte et gravitationnelle, ce qui étend son domaine du **noyau** atomique aux galaxies! (encadré B, Particules élémentaires et interactions fondamentales).

Le caractère intuitif et empirique de la symétrie de parité l'avait donc rendue chère au cœur des physiciens. Lorsque deux jeunes théoriciens, Chen Ning Yang, de l'université de Princeton, et Tsung-Dao Lee, de l'université de Colombia, remettent en cause dans leur article d'octobre 1956 la conservation de la parité dans les interactions régies par la force faible, peu de leurs collègues sont prêts à accepter l'idée... Lee et Yang auront le mérite de mener une analyse détaillée et critique d'un résultat expérimental troublant, le puzzle θ - τ (encadré 1), qui résiste à toute interprétation théorique à moins d'invoquer une violation de la parité par l'interaction faible. À l'époque, la seule description de cette interaction est la théorie proposée par Enrico Fermi en 1934 pour expliquer la désintégration β , du neutron en proton, électron et antineutrino. Inspirée du modèle électromagnétique, cette théorie inclut "naturellement" la symétrie parité. Les soupçons de Lee et Yang sur cette hypothèse naturelle se renforcent cependant lorsqu'ils réalisent que, contrairement au cas des autres interactions, aucune mesure ne permet d'affirmer ou de réfuter la conservation de la parité dans les processus faibles. Leur article de 1956 propose alors une série d'expériences où un tel processus est comparé à son image dans un miroir afin de tester sans ambiguïté la conservation de la parité. C'est ainsi que, contactée par T.-D. Lee, Mme Wu est la première à réaliser une des mesures proposées et démontre la violation de la parité quelques mois plus tard. Lee et Yang reçoivent le prix Nobel l'année même de la publication des mesures, en 1957.

Le modèle standard électrofaible

Cinquante ans après, les physiciens ne savent toujours pas l'origine de la violation de parité, mais ses manifestations sont décrites et mesurées précisément. Entre 1961 et 1967 Sheldon Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg élaborent une théorie unifiée des forces électromagnétique et faible aujourd'hui désignée comme le modèle standard électrofaible. Une prédiction importante du modèle est l'existence de trois particules messagères de l'interaction faible : deux chargées, les W-et **W**⁺ responsables des désintégrations β⁻ et β⁺, et une neutre, le Z⁰ qui ne change pas la nature des particules impliquées dans la réaction. L'unification électrofaible réside dans le fait que le Z⁰, messager neutre de la force faible, et le photon, messager neutre de l'électromagnétisme, sont "semblables" dans le sens où, dès que l'un d'eux intervient dans un processus physique,

Le puzzle θ - τ

Avant la construction des premiers grands accélérateurs, la découverte de nouvelles particules instables reposait sur l'observation des rayons cosmiques dans les *chambres à brouillard*, réservoirs de gaz en surfusion dans lesquels les particules chargées matérialisent leur trajectoire par un chapelet de microgouttes. Grâce à leur grande énergie, les rayons cosmiques qui atteignent la Terre peuvent produire toutes sortes de particules secondaires lors de leur interaction avec le détecteur. Pour augmenter le nombre d'événements, des laboratoires seront installés en altitude, là où ces rayons sont moins atténués. Ce fut le cas par exemple sur l'arête qui descend de l'Aiguille du Midi au-dessus de Chamonix, arrête appelée depuis lors "Arête des cosmiques".

1

Dans un laboratoire similaire des Andes, C.F. Powell identifie en 1949 une nouvelle particule qu'il nomme méson τ (tau). Cette particule signe sa présence dans les détecteurs en se désintégrant en 3 mésons π (pi), particule plus légère qu'il a découvert deux ans plus tôt. Un autre méson, nommé θ (théta), se signale par une désintégration en 2 mésons π . L'analyse des événements observés montre que les masses et les durées de vie du τ et du θ sont identiques, aux incertitudes expérimentales près. Ces ressemblances très fortes poussent logiquement les physiciens à interpréter ces deux objets comme une même particule.

Le "puzzle théta-tau (θ - τ)" apparaît suite à un article de R.H. Dalitz en 1953 qui démontre que les états à 2 et 3 π ont des parités opposées. Ceci implique que si les mésons θ et τ sont un même objet, alors le mécanisme de leur désintégration, attribué à l'interaction faible, viole la parité. Ce fait expérimental troublant est à l'origine du questionnement de la symétrie parité dans l'interaction faible. Par leur examen des mesures disponibles à l'époque, Lee et Yang ont montré que cette question "déraisonnable" restait cependant ouverte et ont proposé une série de nouvelles expériences qui se sont montrées décisives. Aujourd'hui, le τ et le θ sont reconnus comme une seule et même particule nommée kaon.

l'autre le fait aussi: il y a interférence entre le processus faible et le processus électromagnétique. Ceci est illustré par l'exemple de la **diffusion élastique** d'un électron sur un proton cible (figure 1). L'état final de cette réaction, un électron *diffusé* et un proton qui *recule*, ne permet pas de savoir quelle particule a été échangée; la mesure est nécessairement la somme des deux contributions.

Cela implique-t-il que tous les processus dits électromagnétiques contiennent obligatoirement une composante faible qui viole la parité? En principe oui. Dans la pratique, une différence primordiale distingue le photon du Z^0 : la masse. Le photon possède une masse nulle qui confère à l'électromagnétisme une portée infinie alors que le Z^0 est extrêmement lourd, l'équivalent de cinq molécules d'eau, ce qui a pour conséquence de réduire la portée de l'interaction faible à quelques 10⁻¹⁸ m! Cette distance étant dix millions de



Figure 1. Interférence photon-Z⁰ dans la diffusion élastique d'un électron sur une cible de proton. Les deux diagrammes de réaction produisent exactement le même état final et contribuent tous les deux au nombre d'événements mesurés. L'interprétation artistique, où l'échange d'un photon apparaît en jaune et celui d'un Z⁰ en vert (et en rose dans le miroir), montre clairement que le phénomène et son "reflet" ne sont pas symétriques.



fois plus petite que la dimension typique d'un atome, il est compréhensible que la parité soit une bonne règle de sélection des transitions atomiques...

Un nouvel outil de recherche sur la matière

C'est pourtant cette infime contribution de la force faible dans l'interaction des électrons avec la matière que des expériences récentes utilisent comme nouvel outil de recherche. Cette approche est analogue au développement de l'astronomie **infrarouge**, X ou **gamma** (voir *Infrarouge*, X *et gamma: des lumières invisibles pour sonder l'Univers*). De même que regarder un objet dans des longueurs d'ondes non visibles enrichit sa description et sa compréhension, le Z⁰ fournit une nouvelle sonde de la matière et de ses interactions, complémentaire du photon utilisé par la plupart des expériences actuelles.

L'expérience HAPPEx (Hall A Proton Parity Experiment), réalisée en 2004-2005 auprès de l'accélérateur Cebaf du Jefferson Laboratory (Virginie), aux États-Unis, s'inscrit dans cette thématique. Son objet d'étude est le proton, constituant du noyau atomique. Le processus utilisé est la diffusion élastique d'électrons illustrée plus haut. La dimension typique du problème devient donc la taille d'un nucléon, soit environ 1 fermi (10⁻¹⁵ m). Un infiniment petit encore 1000 fois supérieur à la portée de l'interaction faible. L'interaction électromagnétique reste pour cette raison ultradominante: typiquement un million de photons échangés pour un seul Z⁰... Étudier la contribution du Z⁰ paraît aussi prometteur que de chercher une tête d'épingle dans une botte de foin. Quoiqu'un bon aimant soit très efficace pour séparer du foin un matériau magnétique! De même, si la diffusion élastique est passée au "filtre" de la symétrie de parité, la contribution "faible" sera parfaitement isolée du reste puisque seule à violer la parité. La technique expérimentale revient donc, par son principe, à celle proposée par Lee et Yang: mesurer la différence de taux de comptage entre un processus et son image dans un miroir. HAPPEx utilise le faisceau d'électrons de 3 GeV $(3 \cdot 10^9 \text{ électronvolts})$ de l'accélérateur Cebaf. Une telle énergie est nécessaire pour atteindre une résolution spatiale comparable à la taille d'un proton. Le faisceau est envoyé sur une cible d'hydrogène liquide (le noyau atomique de l'hydrogène est un proton) et une cible d'hélium 4 (complémentaire par son noyau consti-



Les principaux éléments du hall expérimental de l'expérience HAPPEx.

tué de 2 protons et 2 neutrons). Une partie des électrons diffusés est captée par un **spectromètre** de haute résolution ⁽²⁾ placé à 6 degrés de l'axe du faisceau (figure 2). Cet instrument sélectionne uniquement les événements "élastiques" en les déviant vers les détecteurs. Mais comment mesurer précisément la différence entre les taux de comptage vus par ce dispositif et un dispositif miroir sans avoir à "retourner" l'accélérateur et le hall expérimental? L'astuce consiste à utiliser un faisceau d'électrons **polarisés**. Dans un tel faisceau, le **spin** des électrons est aligné dans la direction de propagation (polarisation droite) ou dans la direction opposée (polarisation gauche). Inverser la polarisation du faisceau est physiquement équivalent à retourner l'accélérateur. On passe ainsi "à travers le miroir"...

Le principe de la mesure

Si N_D est le nombre d'électrons "droits" et N_G le nombre d'électrons "gauches" détectés sur une durée égale, N_D - N_G caractérise la différence entre le processus et son "reflet miroir". Cette différence est proportionnelle au nombre de Z⁰ échangés puisque seule une violation de parité peut l'engendrer. Voilà la tête d'épingle sortie du foin !... Expérimentalement, la quantité utilisée est en fait la différence divisée par la somme, définie comme l'asymétrie de violation de parité (A_{VP}). Elle présente l'avantage de rendre la mesure indépendante de nombreux paramètres expérimentaux. Elle est extrêmement petite $(1,6 \cdot 10^{-6} \text{ pour l'hydrogène et } 6,4 \cdot 10^{-6}$ pour l'hélium), comme le rapport du nombre de Z⁰ échangés sur le nombre de photons échangés. Cette quantité a pourtant été mesurée à quelques % près par HAPPEx. Pour cela, il a fallu accumuler un grand nombre d'électrons diffusés, environ cent mille milliards d'électrons.

Ces mesures ont été rendues possibles par le développement récent de faisceaux intenses presque totalement polarisés. Les électrons sont extraits de la surface d'un cristal d'arséniure de gallium à l'aide d'un faisceau laser. La polarisation gauche ou droite des électrons est déterminée par la polarisation circulaire gauche ou droite de la lumière laser. Ce dispositif permet d'accumuler la quantité suffisante d'électrons diffusés en quelques mois, une durée courante pour la plupart des expériences auprès d'accélérateurs. Cela correspond encore à plusieurs millions d'électrons détectés par seconde. Les détecteurs, conçus par les services techniques du Dapnia au CEA Saclay, sont optimisés pour intégrer de très forts taux de comptage et résister aux fortes radiations produites par le flux d'électrons qui déposent une dose équivalente de plusieurs Mrad.

Maîtrise de tous les éléments de la mesure

Un défi technique de taille est de maintenir la stabilité du faisceau lors du renversement de la polarisation des électrons. Jusqu'à présent, nous avons considéré le renversement comme une parfaite symétrie de parité. En pratique, la transition entre une lumière circulaire gauche et droite du laser de la source nécessite d'agir sur un élément optique dans le trajet du laser. Chaque renversement peut alors changer légèrement les paramè-

(2) Ensemble d'éléments magnétiques (dipôle, quadrupôles) permettant une sélection très fine des particules chargées en fonction de leur impulsion.



Chen Ning Yang et Tsung-Dao Lee, prix Nobel de physique 1957 pour la mise en évidence de l'invalidité du principe de parité dans les interactions régies par la force faible.

tres du faisceau d'électrons qui arrive dans le hall d'expérience (intensité, position, énergie...). On comprend aisément que si, par exemple, la position du faisceau change entre deux états de polarisation, les taux de comptages N_D et N_G vus par les détecteurs seront différents mais que cela n'aura rien à voir avec l'échange de Z⁰. Il s'agira de fausses asymétries engendrées par les défauts de l'appareillage. Pour les minimiser, les renversements gauche-droite sont effectués très souvent, en l'occurrence 30 fois par seconde, afin de supprimer l'effet des dérives lentes de celui-ci. Les fausses asymétries résiduelles, mesurées en permanence par des moniteurs de positions et de courant du faisceau, sont annulées par des systèmes de contre-réaction agissant au niveau du laser de la source d'électrons. HAPPEx a établi un record en la matière en maintenant identiques à 1 nanomètre près les positions moyennes du faisceau "gauche" et du faisceau "droit" ! Une telle précision est atteinte en accumulant les mesures de position du faisceau pendant toute la durée de l'expérience. Au final, la fausse asymétrie totale engendrée par les "défauts" du faisceau est réduite à $1 \cdot 10^{-8}$, soit moins de 1 % de A_{VP}.

De cette extrême précision dépend, bien sûr, la pertinence du nouvel éclairage que le Z⁰ apporte sur le nucléon. Tous les éléments de la mesure doivent donc être maîtrisés au même niveau. En parallèle du contrôle de la stabilité du faisceau, la connaissance de sa polarisation (P_e) est un autre défi technologique majeur, relevé par le service de physique nucléaire et les services techniques du Dapnia au CEA en collaboration avec le Laboratoire de physique corpusculaire de Clermont-Ferrand (CNRS). En effet, le spin des électrons extraits du cristal de la source est majoritairement aligné (ou anti-aligné) avec la direction du faisceau, mais pas totalement. Or, par définition, seuls les électrons alignés participent à la symétrie miroir utilisée par l'expérience. Les autres ne font que diluer le signal de A_{VP} et le facteur de dilution est P_e . Ainsi, un faisceau polarisé à 50% divisera le signal recherché par deux par rapport à un faisceau totalement polarisé. Aucune prédiction théorique ne permet d'atteindre la précision requise sur Pe; il faut donc la mesu-



Détecteur de l'expérience HAPPEx installé en sortie du spectromètre magnétique. La partie active du détecteur, en doré sur la photo, est constituée d'une alternance de plaques de laiton et de plaques de silice polies. Le flux des électrons est intercepté par ces plaques dans lesquelles il produit un signal lumineux, capté par la silice et propagé vers les photomultiplicateurs visibles à chaque extrémité.

rer. Dans ce but, le Dapnia a conçu un polarimètre Compton, appareillage complexe installé sur la ligne faisceau dont le principe est fondé sur l'interaction du faisceau d'électrons avec un faisceau laser en résonance dans une cavité optique (3) (encadré 2). Une des caractéristiques importantes du polarimètre Compton est que le faisceau d'électrons est très peu perturbé par le laser, ce qui permet une mesure en continu de la polarisation dans les conditions réelles de l'expérience. Grâce au développement d'une nouvelle méthode d'analyse, la précision atteinte sur Pe est de 1 % pour

(3) Cavité optique : dispositif formé de deux miroirs espacés d'un nombre entier de la longueur d'onde de la lumière incidente dont les allers et retours successifs permettent d'amplifier la puissance lumineuse accumulée.

Le polarimètre Compton

Les mesures de violation de parité s'appuient toujours sur la présence d'une polarisation dans l'expérience (et une seule). Dans le cas de la diffusion d'électrons, cette nolarisation est celle des électrons du faisceau. La connaissance de ce paramètre est déterminante pour la précision finale de la mesure. Le polarimètre Compton du hall A du Jefferson Lab (JLab) est ainsi un appareillage qui mesure en permanence la polarisation du faisceau pendant le déroulement de l'expérience. Il est basé sur l'interaction du faisceau polarisé d'électrons avec les photons d'un faisceau laser, polarisé lui aussi (figure). Ce processus est nommé diffusion Compton doublement polarisée. À cause de la présence d'une deuxième polarisation, le processus avec des électrons "droits" n'est plus l'image par parité du processus avec des électrons

"gauches". Une variation de la probabilité d'interaction lorsque la polarisation des électrons est retournée devient donc tout à fait autorisée par les lois de l'électromagnétisme. La mesure repose à nouveau sur la mesure d'une asymétrie, mais qui vaut maintenant plusieurs %. La théorie



de l'électrodynamique quantique prédit très précisément cette asymétrie. La polarisation du faisceau d'électrons s'obtient simplement par le rapport de l'asymétrie expérimentale sur l'asymétrie théorique (la polarisation du laser est proche de 100 %, bien maîtrisée).

Figure.

Au cœur du polarimètre Compton, le faisceau laser (rayon violet) est injecté dans le tube de l'accélérateur quasi parallèlement au faisceau d'électrons (rayon vert). Le miroir d'entrée de la cavité optique est maintenu à l'extrémité de la partie conique, à quelques millimètres du faisceau. Les deux faisceaux se croisent à l'intérieur de la cavité où la puissance laser est amplifiée d'un facteur 6000. L'ensemble de la cavité est placé sous vide dans le tube faisceau de l'accélérateur (non représenté ici pour plus de clarté).

2





Vue aérienne du Cebaf, l'élément central du Thomas Jefferson National Accelerator Facility.

une énergie de faisceau de 3 GeV. Un nouveau record à accrocher au tableau d'HAPPEx qui fait du polarimètre Compton un élément clé de cette mesure et des futures expériences de très haute précision qui se dérouleront auprès de l'accélérateur Cebaf.

Explorer la "mer de particules" du proton

Quelle image du proton la sonde faible nous renvoiet-elle à travers l'expérience HAPPEx? La compréhension actuelle que nous avons du proton est celle d'un système de trois quarks de base, dits quarks de valence, liés par la force nucléaire forte (encadré B, Interactions fondamentales et particules élémentaires). Le comportement de cette force est analogue à celui d'une corde reliant les quarks. Lorsque les quarks s'approchent à très petite distance, la corde est détendue et les quarks sont quasi libres. Lorsque les quarks s'éloignent à des distances comparables au rayon du proton, la corde se tend et l'interaction devient très importante. Il devient alors très probable que cette énergie d'interaction se matérialise en une paire de quark-antiquark qui existe pour un instant dans le proton avant d'être réabsorbée. Les quarks de valence apparaissent ainsi baignés dans une effervescence de paires de quarkantiquark (figure 3) qui apparaissent et s'annihilent en

Figure 3. Représentation schématique des trois quarks de valence du proton : 2 quarks up (u) et un quark down (d). L'interaction entre quarks est représentée par l'échange de gluons, messagers de l'interaction forte. L'un d'entre eux oscile en une paire de quarks étrange-antiétrange.



permanence. L'interaction des quarks entre eux joue un rôle crucial dans les propriétés du proton. Par exemple, la masse des seuls trois quarks de valence n'explique que 1 % de la masse totale du proton. Tout le reste réside dans la dynamique de l'interaction forte. Cette complexité de la structure du proton est vue par les expériences et prédite qualitativement par la théorie de l'interaction forte. Mais un calcul quantitatif à partir des principes fondamentaux de la théorie est encore hors de portée. La compréhension du proton passe donc par des modèles, de plus en plus sophistiqués, de sa structure interne dont l'élaboration est guidée par les résultats expérimentaux. Une autre approche, très prometteuse, est la résolution numérique de la théorie de l'interaction forte par ce que l'on appelle les calculs sur réseau.

L'originalité d'HAPPEx est de pouvoir révéler sélectivement la contribution des quarks "étranges" dans le proton. Un type de quark qui n'est pas présent parmi les quarks de valence mais qui apparaît naturellement dans les fluctuations quark-antiquark. Par son éclairage complémentaire, le Z⁰ se comporte donc comme une sonde sélective des quarks de la "mer" de particules du proton. L'expérience HAPPEx accède en particulier à la contribution des quarks étranges à la distribution des charges électriques à l'intérieur du proton et à son moment magnétique. Le résultat est compatible avec une valeur zéro et la précision de la mesure permet de poser une limite supérieure de 1 % pour la contribution à la distribution de charges et moins de 4 % pour le moment magnétique. L'expérience vient ainsi de montrer, par une mesure de très haute précision, que cette "mer" de quarks étranges contribue étonnamment peu aux propriétés électriques et magnétiques du proton.

Ceci ne remet pas en cause la présence des quarks et des antiquarks étranges dans le proton mais implique que leurs distributions dans le volume du nucléon sont presque parfaitement identiques! Une donnée importante qui met en défaut les prédictions de plusieurs modèles théoriques et constitue un point de référence pour les calculs sur réseau.

Grâce aux importants progrès technologiques associés aux faisceaux polarisés d'électrons, la sonde faible devient ainsi un nouvel outil au service de l'étude du noyau atomique. Par ses records de précision, l'expérience HAPPEx pose un nouveau jalon dans la compréhension de la structure interne du proton et ouvre beaucoup d'autres perspectives. Un vaste programme expérimental propose d'utiliser le Z⁰ sur le proton avec des processus de diffusion inélastique pour tester d'autres aspects de sa structure en quarks. Sur des noyaux plus lourds, le Z⁰ possède des avantages uniques pour mieux comprendre la distribution des neutrons, une donnée qui intéresse physiciens nucléaires, atomistes et astrophysiciens. Enfin, une approche complémentaire, menée en parallèle, consiste à tester l'interaction faible ellemême en utilisant une cible de structure bien connue. Une certitude: après cinquante ans d'expérimentation, la violation de la parité est encore à la croisée de nombreux chemins et se révèle comme un guide de choix dans la surprenante physique de l'infiniment petit.

> David Lhuillier Direction des sciences de la matière CEA Dapnia centre de Saclay

32

A Le modèle standard cosmologique

L e modèle standard cosmologique, représentation actuellement admise de l'Univers, est fondé sur une théorie de la gravitation, la relativité générale d'Einstein. Ce modèle prend en compte une expansion de l'Univers mise en évidence par les observations de l'astronome Hubble selon lesquelles les galaxies s'éloignent les unes des autres d'autant plus rapidement que la distance s'accroît.

Les hypothèses de base du modèle sont que l'Univers est *homogène*, c'est-à-dire qu'il présente partout les mêmes propriétés (à l'échelle cosmologique, s'entend) et qu'il est *isotrope*, c'est-à-dire qu'il se présente de la même façon quelle que soit la direction dans laquelle on l'observe.

Trois paramètres caractérisent l'évolution de l'univers dans ce modèle : la **constante de Hubble** d'abord, qui caractérise son taux d'expansion, la **densité de masse** (rapport entre sa densité et une *densité critique*) et la **constante cosmologique**. Introduite par Einstein sous la forme d'une force s'opposant à la gravitation afin de tenter de rendre compte d'un univers stable, cette constante correspondrait plutôt à la manifestation de l'*énergie sombre* dans un univers en expansion ⁽¹⁾. Si la densité de masse est inférieure ou égale à 1, cette expansion se poursuit indéfiniment. Les dernières observations plaident pour une densité de matière égale à 1, ce qui implique un univers "plat" (où la



Simulation numérique d'un univers en formation réalisée dans le cadre du projet Horizon, qui fédère les activités en simulation numérique autour d'un projet ciblé sur l'étude de la formation des galaxies des équipes françaises, dont celle du Dapnia (CEA). Son but est de comprendre les mécanismes physiques à l'origine de la structure et de la distribution des galaxies qui nous entourent, et notamment la nôtre, la Voie Lactée. somme des angles d'un triangle est exactement égale à 180°).

Le modèle théorique standard de la cosmologie en vigueur table sur un univers observable dont le rayon serait de quelque 45 milliards d'années de lumière et âgé d'environ 13,7 milliards d'années à compter d'une "singularité" (explosion originelle) initiale dénommée **Big Bang**, suivie environ 300 000 ans après par un découplage de la matière et du rayonnement puis par une phase d'inflation.

Le modèle permet d'autre part de rendre compte du **bruit de fond cosmologique** (rayonnement diffus) d'une température de 2,7 K et des fluctuations de rayonnement/densité ayant conduit très tôt à la formation des premières structures "germes" des galaxies.

(1) L'interprétation des mesures de la sonde spatiale WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) et de SDSS (Sloan Digital Sky Survey) conduit à une valeur proche de 71 (km/sec)/Mpc +/- 0,03 pour la constante de Hubble, mais des surprises sur la valeur de ce paramètre restent possibles si la surprenante composition de l'Univers, où 95 % de l'Univers est constitué de matière et d'énergie noires, n'est en fait pas correcte.

Spectroscopie et spectrométrie

es méthodes spectrométriques se décomposent globalement en deux grandes catégories, la spectrométrie des rayonnements – qui elle-même regroupe la spectrométrie d'absorption, la spectrométrie d'émission, la spectrométrie de diffusion Raman et la spectrométrie de résonance magnétique nucléaire – et la spectrométrie de masse.

La spectroscopie et la spectrométrie⁽¹⁾ des rayonnements regroupent un ensemble de méthodes d'analyse permettant d'accéder à la composition et à la structure de la matière fondées sur l'étude des spectres fournis par l'interaction des atomes et des molécules avec divers rayonnements électromagnétiques qu'ils émettent, absorbent ou diffusent.

Selon leur énergie, les photons interagissent sélectivement avec les différents niveaux électroniques qui composent la structure électronique atomique ou moléculaire. Ce sont les *électrons* de cœur (proches du noyau atomique) pour les rayons X^[2], les électrons périphériques (éloignés des noyaux et impliqués dans les liaisons chimiques) pour la lumière absorbée ou émise dans le proche ultraviolet et dans le visible. Dans le domaine des rayonnements infrarouge, c'est le saut entre niveaux de vibration moléculaire qui intervient, le saut entre niveau de rotation des molécules pour les micro-ondes et le spin du noyau atomique pour la RMN.

Spectrométrie d'absorption

Celles des méthodes de spectroscopie qui sont fondées sur l'**absorption** utilisent la loi de Beer-Lambert, indiquant la proportionnalité entre l'intensité lumineuse absorbée et la quantité de matière absorbante :

 $A = \log (I_0 / I) = \varepsilon l C$

où A est l'absorbance du milieu traversé par le rayonnement, l₀ l'intensité lumineuse incidente, l l'intensité lumineuse transmise, ϵ le coefficient d'extinction molaire caractéristique de la substance étudiée à une longueur d'onde donnée en L mol⁻¹ cm⁻¹, *l* l'épaisseur traversée en cm et C la concentration en mole par litre.

(1) Le terme de spectrométrie, initialement réservé à l'enregistrement et à la mesure, tend à devenir synonyme de spectroscopie, l'œil étant remplacé dans l'observation par d'autres récepteurs et instruments, et le domaine visible ne constituant qu'un domaine particulier d'analyse.

(2) À noter par ailleurs que la cristallographie à rayons X n'est pas considérée comme une méthode spectroscopique à proprement parler. En mesurant l'absorbance du milieu à une longueur d'onde donnée, il est donc possible de déterminer la concentration d'une substance dans un échantillon.

Dans un **spectre d'absorption** enregistré au moyen d'un **spectromètre**, les *pics d'absorption* correspondent aux longueurs d'onde que le milieu peut absorber. De même que le spectre de la lumière solaire est obtenu en la faisant passer par un prisme qui la décompose, les spectromètres analysent la répartition spectrale de l'ensemble des rayonnements électromagnétiques en les séparant par longueur d'onde au moyen d'un réseau de diffraction par réflexion. Les spectres font apparaître des pics correspondant chacun à une longueur d'onde particulière.

Selon le type d'échantillon à analyser et le niveau de performances recherché, on utilise en laboratoire la spectrométrie d'absorption soit sur molécules en phase liquide ou gazeuse, soit sur vapeur atomique obtenue en décomposant thermiquement les échantillons liquides ou solides.

La spectroscopie d'absorption moléculaire dans le domaine UV-visible est simple d'emploi mais ne s'applique qu'à des échantillons peu complexes car, du fait de la largeur des *bandes d'absorption moléculaires*, les spectres d'absorption ne permettent généralement pas de distinguer spécifiquement tous les composants d'un mélange complexe.

En spectrométrie infrarouge (IR), l'absorption résulte des phénomènes de vibration et rotation des molécules. Les spectres d'absorption infrarouge permettent donc de déterminer la nature des liaisons chimiques composant une molécule en accédant à la constante de rappel (comme un ressort remonte un poids) de la liaison et donc de confirmer des hypothèses structurales.

Lorsque le nombre d'atomes croît, le spectre devient rapidement complexe et l'interprétation devient très délicate, en particulier, pour les composés organiques.

La spectrométrie d'absorption atomique est de ce point de vue plus performante car les atomes absorbent avec des raies d'absorption très fines. Des mesures précises sont donc réalisables même lorsque l'échantillon est constitué d'un assemblage complexe d'éléments chimiques. L'absorption atomique est une technique de référence pour l'analyse des éléments à l'état de traces dans une très grande variété d'échantillons, notamment biologiques.

Spectrométrie d'émission

Les atomes ou molécules portés dans un état excité peuvent se désexciter en émettant un rayonnement appelé *rayonnement d'émission*. Lorsque l'excitation résulte de l'absorption sélective, par les atomes ou les molécules à analyser, d'un rayonnement électromagnétique, il s'agit d'émission de **fluorescence** (ou de phosphorescence selon l'état d'excitation électronique mis en jeu).

Comme pour l'absorption, la fluorescence peut être appliquée dans le domaine des rayonnements UV-visible aux molécules ou aux atomes. La spectrométrie de fluorescence X désigne quant à elle le rayonnement X émis par les atomes, excités par absorption d'un rayonnement X. Les techniques de fluorescence sont plus complexes à mettre en œuvre que les techniques d'absorption car elles nécessitent que la particule à analyser soit excitée sélectivement par un rayonnement monochromatique. En revanche, comme le rayonnement émis est également spécifique de la particule, la spectrométrie de fluorescence présente une double sélectivité qui lui confère un très faible bruit de fond et la rend ainsi particulièrement bien adaptée à la mesure des très faibles concentrations.

L'émission de rayonnement peut également apparaître lorsque des atomes sont excités thermiquement dans un milieu porté à haute température. La spectroscopie d'émission est fondée sur le fait que les atomes ou les molécules excités à de hauts niveaux d'énergie se désexcitent vers des niveaux plus bas en émettant des radiations (émission ou luminescence). Elle se distingue de la spectrométrie de fluorescence par le fait que l'excitation n'est pas apportée de manière sélective, mais au contraire concerne indistinctement toutes les particules qui composent le milieu. Les raies d'émission correspondent donc à des rayonnements émis directement par un corps porté à haute température et le spectre d'émission permet de déceler et de quantifier tous les atomes ou les molécules présents dans la source d'émission.

Spectrométrie de diffusion Raman

Les interactions entre la matière et les radiations électromagnétiques conduisent également à des phénomènes de diffusion comme la diffusion élastique et la diffusion inélastique. La diffusion peut avoir lieu à la rencontre d'une interface entre deux milieux ou à la traversée d'un milieu.

(suite)

Ce processus est le plus souvent "élastique", c'est-à-dire qu'il a lieu sans changement de fréquence des rayonnements composant le faisceau. La diffusion élastique du rayonnement solaire par l'atmosphère est, par exemple, responsable de la couleur bleue du ciel qui apparaît lorsque le regard n'est pas dirigé vers le soleil (*effet Tyndall*). L'intensité diffusée est, en effet, d'autant plus forte que la longueur d'onde du rayonnement est courte ce qui, dans le spectre solaire, correspond au bleu.

En spectrométrie, la principale utilisation de la diffusion concerne la *spectrométrie Raman*. Il s'agit de la diffusion inélastique d'un rayonnement incident par les molécules qui composent l'échantillon. L'écart entre la fréquence du rayonnement diffusé et la fréquence du rayonnement incident permet d'identifier les liaisons chimiques mises en jeu. La spectrométrie Raman est une technique très utilisée pour l'analyse structurale en complément de la spectrométrie infrarouge et de la spectrométrie de masse.

Spectrométrie de résonance magnétique nucléaire

Le principe de la résonance magnétique nucléaire (RMN) est basé sur le fait qu'un atome possède un moment magnétique, comme une charge qui tourne et agit comme un petit aimant, gouverné par la mécanique quantique, qui s'aligne dans un champ magnétique comme une boussole dans le champ terrestre. Le principe de la RMN consiste à induire et détecter la transition entre le moment magnétique nucléaire du niveau de plus basse énergie à celui de plus grande énergie par absorption d'un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde se situe dans le domaine des radiofréquences : lorsque l'énergie du photon correspond exactement à la différence d'énergie entre les deux niveaux, il y a absorption. Les noyaux dont le nombre de neutrons et de protons sont tous les deux pairs possèdent un spin nul. Les atomes de carbone 12 et d'oxygène 16 qui sont très répandus dans la nature ont ainsi un spin nucléaire nul. Par contre, l'hydrogène ne possède qu'un seul proton et son moment magnétique nucléaire est égal à 1/2 : il a donc deux états énergétiques possibles correspondant aux deux orientations possibles du spin par rapport au champ magnétique. La mesure de la fréquence de résonance du champ électromagnétique qui permet le passage de l'un à l'autre des états d'énergie permet de faire l'analyse des molécules.



Spectromètre de masse d'ions secondaires utilisé au CEA pour réaliser des mesures isotopiques rapides sur un échantillon par exemple prélevé sur une installation aux activités nucléaires suspectes.

Cette fréquence est fixe mais les différents noyaux d'une molécule ne résonnent pas tous à la même fréquence car leur environnement magnétique est modifié par leur environnement chimique (électronique). De nombreux spectres contiennent plus de pics que la molécule ne contient de protons en raison des interactions de ceuxci avec leurs voisins. Deux noyaux peuvent interagir au travers de la molécule, éloignés de plusieurs liaisons chimiques, c'est ce qu'on appelle le couplage entre atomes. Cette interaction donne une structure fine au spectre RMN.

Spectrométrie de masse

La spectrométrie de masse est une technique de détection et d'identification extrêmement sensible qui permet de déterminer les structures moléculaires et donc la composition de l'échantillon. Il ne s'agit pas d'une spectroscopie stricto sensu, car elle ne fait pas appel à des niveaux d'énergie discrets. Son principe ? Un composé introduit dans l'appareil est vaporisé puis ionisé par une source de bombardement électronique (à 70 eV). L'ion ainsi obtenu, appelé ion moléculaire, permet la détermination de la masse molaire du composé. Des ruptures des liaisons chimiques peuvent y former des ions fragments caractéristiques. Ceuxci sont ensuite triés en fonction de leur rapport masse/charge dans un analyseur par

l'application d'un champ magnétique et/ou électrique, puis collectés par un *détecteur* qui amplifie le signal associé aux ions qui arrivent en des temps différents. Un système de traitement des données transforme les informations du détecteur en un spectre de masse dont la lecture, par comparaison avec des spectres références, permet d'établir la carte d'identité de la molécule. En utilisant un spectromètre de masse haute résolution, il est possible de déterminer la masse exacte du composé et les pourcentages isotopiques de chaque atome.

Le choix de la méthode d'ionisation est directement lié à la nature de l'échantillon et au type d'analyse. Si la spectrométrie de masse s'est progressivement adaptée aux exigences croissantes des chimistes et des biologistes (séparation de mélanges de plus en plus complexes et de forte polarité et détermination de masses moléculaires de plus en plus élevées sur des échantillons de plus en plus limités), c'est essentiellement grâce aux progrès des techniques d'ionisation dont l'émission ionique secondaire sur surface (SIMS), l'ionisation chimique, le thermospray et la source à bombardement d'atomes rapides (FAB), jusqu'à, dans les années 80, la désorption laser assistée par matrice (MALDI, pour Matrix Assisted Laser Desorption Ionisation) et l'électrospray (ESI, pour *ElectroSpray Ionisation*), ainsi qu'à ceux des techniques de détection, de la mesure du temps de vol (TOF) à la "trappe ionique" (IT) en passant par les quadrupôles (MS ou Q). En protéomique, par exemple, seules la MALDI, l'ESI et la SELDI (Surface Enhanced Laser Desorption/Ionisation) sont utilisées. La spectrométrie de mobilité ionique IMS (ion mobility spectrometry) est une technique d'analyse chimique en phase gazeuse gui consiste à soumettre un gaz à un champ électrique. Les molécules ionisées acquièrent une vitesse caractéristique de l'ion car dépendant de la masse et de la charge. L'arrivée des ions sur une des plaques produisant le champ provoque un courant qui est enregistré. Il est possible de relier le temps au bout duquel un pic se produit avec la nature de l'ion l'ayant provoqué.

Les scientifiques font souvent appel au couplage d'appareils appartenant aux deux grandes familles de techniques d'analyse (encadré E, *Qu'est-ce que la chromatographie ?*), par exemple, d'un chromatographe et d'un spectromètre de masse (ou d'un détecteur à capture d'électrons ECD), notamment pour étudier des mélanges complexes à l'état de traces.

Interactions fondamentales et particules élémentaires

e modèle standard de la physique des particules est le cadre théorique de référence qui décrit toutes les particules élémentaires connues (tableau 1) et les interactions fondamentales auxquelles ces particules participent (tableau 2). Les constituants élémentaires de la matière, appelés fermions, se partagent en deux grandes catégories déterminées par leur participation aux interactions ou forces fondamentales Igravitationnelle, électromagnétique, faible et forte) par l'intermédiaire de bosons vecteurs, particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature^[1] (tableau 2). L'appartenance d'une particule à la catégorie des fermions ou à celle des bosons est liée à son spin (moment angulaire ou moment de rotation interne intrinsèque), suivant qu'il est de valeur demientière (fermion) ou entière (boson).

À chaque constituant de la matière est par ailleurs associée son **antiparticule**, une particule de même masse mais de charge opposée. Le **positon** est ainsi l'antiparticule de charge positive de l'électron, dont la charge est négative.

Leptons et quarks

Les fermions comportent, d'une part les leptons, qui peuvent se déplacer librement et ne participent pas à l'interaction forte qui assure la cohésion des noyaux atomiques (elle est pour cette raison qualifiée de *nucléaire*), et d'autre part les **quarks**, qui participent à toutes les interactions mais ne sont pas observés individuellement, imbriqués qu'ils sont au sein des hadrons, les particules sensibles à l'interaction forte dont ils sont les constituants^[2].

Dans la catégorie des leptons, les **leptons** chargés participent à l'*interaction électromagnétique* (qui assure la cohésion des **atomes** et des **molécules**) et à l'*interaction faible* (à la base de phénomènes de désintégration et en particulier de la **radioactivité** β). Les **leptons neutres** ou **neutrinos**, pour leur part, ne participent qu'à l'interaction faible. De masse très réduite, il en existe un type pour chaque type de lepton chargé.

Indépendamment de leur participation aux interactions, les constituants élémentaires de la matière sont classés en trois *générations* ou *familles* de particules. D'une famille à l'autre, les quarks et les leptons de mêmes charges ne diffèrent que par leurs masses, chaque famille étant plus lourde que la précédente.

L'électron, le quark haut (u pour *up*) et le quark bas (d pour *down*), qui appartiennent à la première génération, sont les particules massives les plus légères et sont stables. Ce sont les constituants exclusifs de la matière ordinaire, dite baryonique (un baryon est un assemblage de quarks) faite de protons et de neutrons qui ne représente pourtant qu'environ 4 %

du contenu énergétique de l'Univers ! Les particules des deux autres familles sont plus lourdes et instables, à l'exception des neutrinos, qui ont cependant une masse non nulle mais qui sont stables. Elles ne peuvent être observées ou détectées que dans les états finals des collisions produites dans les accélérateurs ou dans le rayonnement cosmique et se désintègrent rapidement en particules stables de première génération. C'est la raison pour laquelle toute la matière stable de l'Univers est faite des constituants de la première famille.

D'après la mécanique quantique, pour gu'il y ait une interaction entre particules de matière ordinaire, il faut qu'au moins une particule élémentaire (un boson) soit émise, absorbée ou échangée. Le photon est le boson intermédiaire (ou vecteur) de l'interaction électromagnétique, les W⁺, W⁻ et Z sont les bosons intermédiaires de l'interaction faible, et les **gluons** sont ceux de l'interaction forte au niveau des quarks. Quant au graviton, vecteur supposé de l'interaction gravitationnelle, il n'a pas été découvert expérimentalement. La force gravitationnelle, qui s'exerce sur tous les fermions proportionnellement à leur masse, n'est pas incluse dans le modèle standard, d'autant que la théorie des champs quantiques appliquée à la gravitation n'est pas viable en l'état. Si les effets gravitationnels sont négligeables dans les mesures de physique des particules, ils deviennent dominants aux échelles astronomiques.

La portée des interactions

Les quarks et les leptons chargés échangent des photons. Le photon ayant une charge électrique nulle, ces particules conservent leur charge électrique après l'échange. Comme la masse du photon est nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est infinie. Dépourvus de charge électrique, les neutrinos sont les seuls fermions élémentaires à ne pas être sensibles à l'interaction électromagnétique.

Dans la théorie électrofaible (unification des interactions faible et électromagnétique), l'interaction faible présente deux aspects: l'interaction faible par courants chargés, où les vecteurs de l'interaction sont W⁺ et W⁻, et l'interaction faible par courant neutre où le médiateur de l'interaction est Z⁰. Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (guarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (environ 80 GeV/ c^2 pour W[±] et 91 GeV/ c^2 pour Z⁰], la portée de l'interaction faible est donc infime, de l'ordre de 10⁻¹⁸ m. Les bosons W[±] possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent changent de charge électrique et également de nature (saveur). En revanche, le boson Z⁰ étant dépourvu de charge électrique, les fermions ne changeront pas de nature. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils sont capables aussi d'échanger un Z⁰. De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un Z⁰ avec une autre particule, mais pas un photon. Seuls les quarks qui possèdent une

charge de couleur⁽¹⁾ échangent des gluons, lesquels portent eux-mêmes

(1) La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs charges d'interaction (charge électrique, charge de couleur) ou "nombres quantiques conservés". La charge de couleur, nombre quantique qui détermine la participation aux interactions fortes, peut prendre trois valeurs: "rouge", "verte" ou "bleue" (ces couleurs n'ayant rien à voir avec les couleurs visibles). Chaque quark porte l'une des trois charges de couleur et chaque antiquark l'une des trois charges d'anticouleur. Les gluons sont dotés de charges doubles couleur-anticouleur (huit combinaisons possibles).

(2) Exemple des nucléons: le proton contient deux quarks haut et un quark bas, le neutron deux quarks bas et un quark haut. Un méson n'est composé que de deux quarks (un quark et un antiquark).

B (suite)

une charge de couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluons entre quarks, ces derniers échangent leurs couleurs respectives. La masse des gluons est nulle, mais puisqu'ils sont dotés d'une charge de couleur, ils peuvent interagir entre eux, ce qui complique grandement le traitement théorique de cette interaction. La portée de l'interaction forte est donc très courte, de l'ordre de 10⁻¹⁵ m.

La quête de l'unification

Le cadre théorique du modèle standard est la théorie quantique des champs qui permet de décrire quantitativement les interactions fondamentales des parti-



B (suite)

cules élémentaires en respectant les principes de la *relativité restreinte* et ceux de la mécanique quantique. D'après cette dernière, pour observer une structure microscopique à haute résolution temporelle et spatiale, il est nécessaire de lui transférer une énergie-impulsion d'autant plus élevée que la résolution souhaitée est fine. Mais d'après la théorie de la relativité, ce transfert d'énergie-impulsion peut se transformer en apparition de particules qui n'étaient pas présentes dans l'état initial : les fermions peuvent être produits ou annihilés par paires particule/antiparticule, les bosons peuvent l'être en nombre arbitraire.

Tous les processus relevant d'une même interaction fondamentale sont reliés les uns aux autres. La démarche de la théorie quantique des champs, dans laquelle les propriétés de **symétrie** jouent un rôle fondamental, vise à décrire l'ensemble des processus relatifs à chaque interaction fondamentale au sein de grandes synthèses théoriques.

L'interaction forte et l'interaction électromagnétique sont respectivement formalisées dans les théories de la **chromodynamique quantique** et de l'**électrodynamique quantique**. L'interaction faible, quant à elle, n'est pas décrite isolément, mais en conjonction avec l'interaction électromagnétique dans le formalisme unifié de la **théorie électrofaible**. Des théories de grande *unification* de toutes les interactions fondamentales existent, mais n'ont pas encore reçu de validation expérimentale.

Toutes les prédictions du modèle standard ont été confirmées par l'expérience, à l'exception jusqu'à présent d'une seule, l'existence du (des ?) boson(s) de Higgs, particule(s) que l'on espère bien découvrir au LHC. Le mécanisme de Higgs serait responsable de la masse des particules élémentaires, le boson éponyme permettant de donner une masse aux fermions de masse nulle interagissant avec lui. Il permettrait l'unification, à haute énergie, des interactions électromagnétique et faible au sein de la théorie électrofaible et expliquerait efficacement la brisure de cette symétrie électrofaible à basse énergie, qui se traduit par deux interactions qu'on peut distinguer à ce niveau d'énergie (voir L'interaction électrofaible d'un accélérateur à l'autre : la feuille de route du LHC à l'aune des mesures du LEP, p.23).

Dépasser ou compléter le modèle standard?

Le modèle standard comporte une série de paramètres (tels que les masses des particules ou les intensités des forces fondamentales) qui sont "calés" sur les résultats expérimentaux. C'est, en tout état de cause, une théorie susceptible d'être améliorée ou approfondie, voire dépassée. Il ne fournit pas d'explication à la classification des constituants de la matière en trois générations de particules, alors que c'est précisément l'existence de ces trois générations qui permet de rendre compte de la violation de l'invariance CP charge/parité (qui fait qu'un processus physique impliquant l'interaction faible n'est pas équivalent à son image dans un miroir), violation qui est vraisemblablement à l'origine du déséquilibre matière/antimatière au profit de la première dans l'univers primordial. Il ne permet ni le traitement quantique de la gravitation ni ne fournit d'explication complète à la propriété fondamentale du confinement qui interdit aux quarks de se propager à l'état libre hors des hadrons.

Pour dépasser ou compléter le modèle standard, les chercheurs explorent principalement deux voies :

- la supersymétrie (communément

appelée SUSY) associerait à chaque particule (boson ou fermion) du modèle standard un partenaire, respectivement fermion ou boson. Ces partenaires seraient a priori très massifs, le plus léger d'entre eux serait une particule n'interagissant que très faiblement. Elle serait un candidat idéal pour expliquer la masse cachée (ou matière noire) de l'Univers qui représente quelque 21 % du contenu énergétique de l'univers, le reste (près de 75 %) étant constitué d'une énergie noire dont la nature reste également à déterminer. Ces WIMPs (acronyme anglais de Weakly Interacting Massive Particles) sont activement recherchés (voir Edelweiss II, à la recherche des particules de matière noire).

– la voie de la sous-structure présume qu'il existerait un nouveau niveau d'élémentarité sous-jacent aux particules du modèle standard (ou à certaines d'entre elles). Elle déboucherait sur toute une floraison de nouvelles particules composites, analogues aux hadrons, mais de masses deux à trois mille fois plus élevées.

À noter que si les théories supersymétriques donnent des prédictions en accord avec les mesures de précision faites au LEP, les théories qui proposent des sous-structures (du moins leurs versions les plus simples) n'y parviennent pas. Quant aux versions les plus complexes, elles rencontrent des problèmes au niveau théorique.

interaction fondamentale	particules associées (messagers)	actions
gravitation	graviton ?	de portée infinie, elle est responsable de la force d'attraction de deux masses entre elles et de la chute des corps
interaction électromagnétique	photon	de portée infinie, elle est responsable de l'attraction entre électrons et noyaux atomiques, et donc de la cohésion des atomes et des molécules
interaction faible	W ⁺ , W ⁻ , Z ⁰	elle est responsable des radioactivités β ⁻ et β ⁺ et de réactions impliquant des particules comme le neutrino
interaction forte	gluons (il en existe 8)	elle assure la cohésion du noyau atomique

Tableau 2.

Les interactions fondamentales, leurs vecteurs et leurs effets.

Qu'est-ce que la chromatographie ?

a chromatographie et les différentes formes de spectroscopie et de spectrométrie (encadré D, Spectroscopie et spectrométrie) constituent les deux grandes techniques de base d'analyse, l'une séparative, l'autre identificatrice des composants d'un corps.

La chromatographie (du grec khrôma, couleur et graphein, écrire) permet la séparation des constituants d'un mélange en phase homogène liquide ou gazeuse, comme un buvard répartit en auréoles concentriques un liquide répandu à sa surface. Un chromatographe est constitué d'un dispositif d'injection de l'échantillon, d'une colonne, d'un détecteur et d'un système d'enregistrement et d'analyse. Son principe repose sur l'équilibre de concentrations des composés entre deux phases en contact : la phase stationnaire, dans la colonne, et la phase mobile, qui se déplace. La séparation est basée sur l'entraînement différentiel des constituants dans la colonne, qu'ils parcourent en des temps proportionnels à leur taille ou leur structure, ou selon leur affinité avec la phase stationnaire (polarité...). À leur arrivée en bout de colonne, un détecteur mesure en continu la quantité de chacun.

La chromatographie la plus courante se fait en phase gazeuse sur des échantillons gazeux ou susceptibles d'être vaporisés sans décomposition. La phase mobile est un gaz (hélium, azote, argon ou hydrogène) qui balaie en permanence la colonne placée dans un four à thermostat. Les détecteurs permettent l'analyse sélective et l'identification de mélanges très complexes.

Si la phase stationnaire est un liquide non ou peu

Si la phase stationnaire est un solide adsorbant (silice, alumine, zéolites ou polymères), c'est de la chromatographie gaz-solide. Dans cette même famille des chromatographies d'adsorption, la chromatographie liquide-solide se caractérise par sa phase stationnaire qui est un adsorbant solide polaire.

Dans la chromatographie liquide haute performance (CLHP), l'échantillon doit être totalement soluble dans la phase mobile (solvant d'élution). Celui-ci doit être poussé à haute pression (d'où la dénomination alternative de chromatographie liquide haute pression) afin d'assurer un débit constant dans la colonne et éviter toute perte de charge. La CLHP fait intervenir des mécanismes d'échange soluté/phase mobile/ phase stationnaire, basés sur les coefficients de partage ou d'adsorption selon la nature des phases en présence^[1].

Une analyse chromatographique donne un chromatogramme, représentation graphique de l'évolution d'un paramètre (intensité du signal du détecteur) lié à la concentration instantanée du soluté en fonction du temps. Il fait apparaître des pics émergeant de la ligne de base, obtenue en l'absence de composés (figure).

(1) Il existe deux autres types de chromatographie liquide, ionique et d'exclusion.

N.B. Cet encadré reprend certains passages d'un texte de Pascale Richardin, responsable du groupe Datation au Centre de recherche et de restauration des Musées de France, extrait des pages sur les méthodes d'analyse du site http://www.culture.gouv.fr/culture/conservation/fr/biblioth/ biblioth.htm.



Figure.

Exemple d'utilisation combinée de la spectrométrie de masse et de la chromatographie : séparation des isomères ("molécules sœurs") d'une molécule explosive (le dinitrobenzène DNB) après prélèvements par micro-extraction en phase solide par chromatographie en phase gazeuse et détection par spectrométrie de masse (SPME-GC-MS).