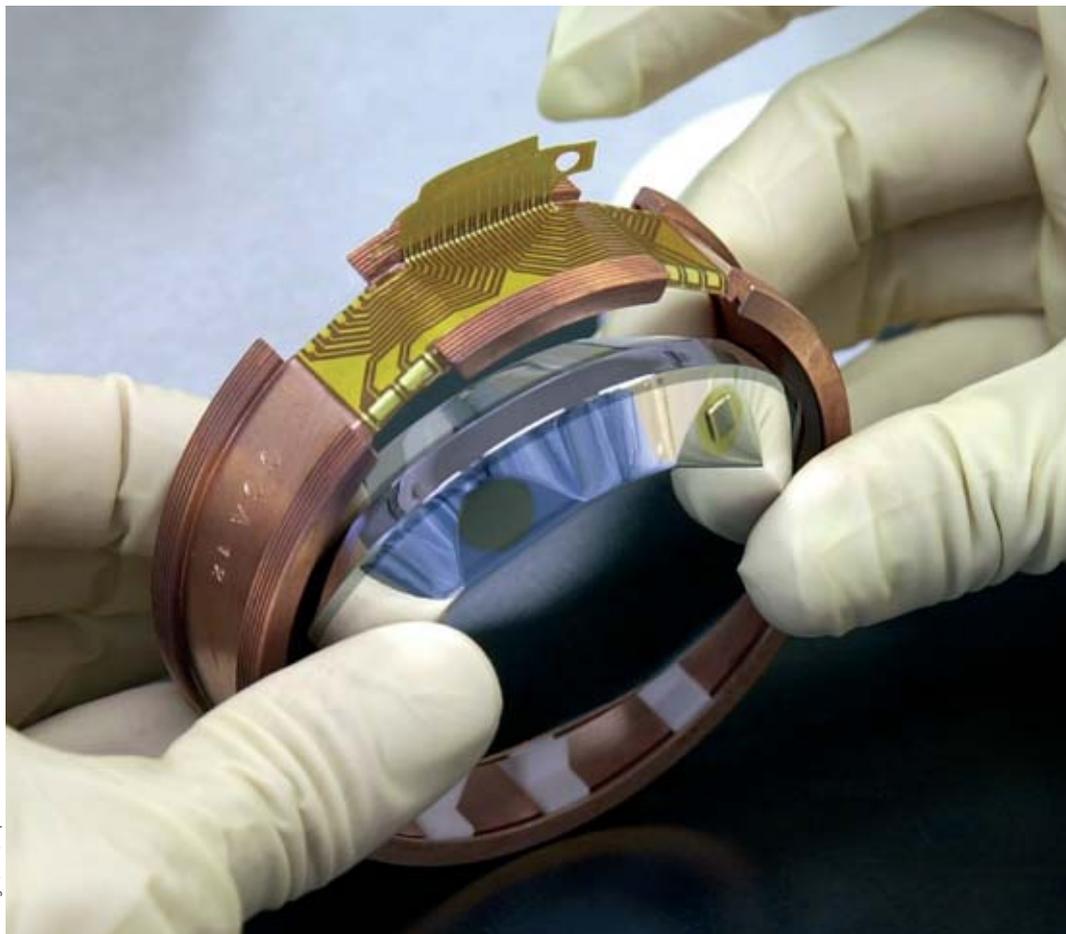


Edelweiss II, à la recherche des **particules de matière noire**



J.-J. Bigot/CEA/Dapnia

Bolomètre en germanium de 320 g et senseur thermique NTD (*Neutron Transmutation Doped*) du projet Edelweiss II.

Pour détecter les insaisissables particules qui constituent peut-être une part importante de la masse cachée de l'Univers, il faut installer des détecteurs ultrasensibles à l'abri des autres sources de rayonnements.

Mais il ne suffit pas de détecter une seule composante, comme l'ionisation, issue des rares interactions attendues. Il s'agit également de mesurer une deuxième quantité, comme la chaleur ou la lumière produite. La sensibilité que l'expérience Edelweiss II se propose d'atteindre correspond ainsi à environ une interaction par an et par kilogramme de détecteur.

Découverte dès les années 1930 par le génial astrophysicien américain Fritz Zwicky, l'énigme de la **matière noire** de l'Univers a pris ces dernières années une acuité de plus en plus forte, au fur et à mesure que se précisaient les mesures cosmologiques. En effet, l'observation du **bruit de fond cosmologique** à 2,7 **kelvins**, des grandes structures de **galaxies**, ainsi que l'étude des explosions de **supernovae** – celles de type appelé SN1a sont de bonnes “chandelles standard” qui brillent de l'éclat d'une galaxie entière lors

de leur mort – révèlent un Univers très surprenant (encadré A, **Le modèle standard cosmologique**). En effet, la matière ordinaire qui nous compose, appelée **matière baryonique**, ne représente que 4,5 % du contenu énergétique de l'Univers. Le reste apparaît constitué de deux composantes, l'une de matière interagissant très faiblement, la “matière noire”, l'autre d'une mystérieuse “**énergie noire**”, qui accélère, au lieu de la ralentir comme on l'attendait, l'expansion de notre Univers (figure).

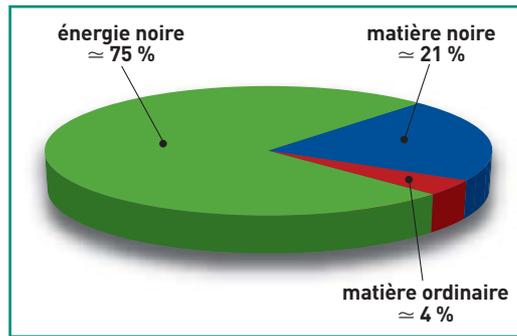


Figure. Répartition du contenu énergétique de l'Univers.

L'énigme de la "matière noire"

L'ennui est que ni l'une ni l'autre de ces deux composantes majoritaires n'ont encore été directement mises en évidence. Les physiciens se trouvent donc dans la situation surprenante, et fort peu agréable, d'un intendant qui ne pourrait justifier que de moins de 5 % des possessions de son maître. Les physiciens disposent bien d'un candidat pour la "matière noire" de l'Univers sous la forme du monde miroir de la matière **supersymétrique**, prédit par un grand nombre de théories permettant d'unifier la **gravitation** avec les autres interactions (encadré B, **Interactions fondamentales et particules élémentaires**) mais celui-ci n'a pas encore été mis directement en évidence.

À la frontière entre la France et la Suisse, le *Large Hadron Collider* (LHC) du **Cern** devrait permettre de commencer à explorer ce monde miroir de la supersymétrie dès la fin de l'année 2007. Mais pour pouvoir remplir leur rôle de composante majeure de l'Univers, les particules supersymétriques doivent posséder un représentant stable, ayant survécu jusqu'à notre époque, près de 14 milliards d'années après le **Big Bang**. On donne le nom de WIMPs, l'acronyme anglais de *Weakly Interacting Massive Particles*, à ces particules d'interaction extrêmement faible, qu'il reste maintenant à observer.

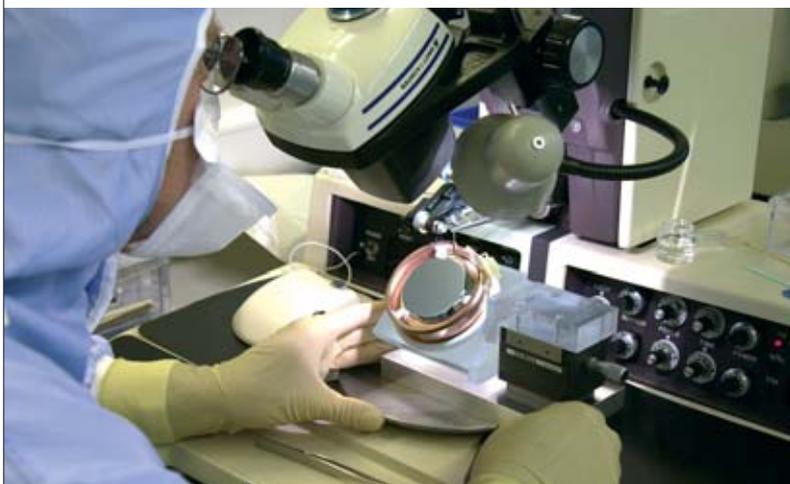
Pour tenter de mettre en évidence les WIMPs, un grand nombre d'équipes dans le monde se sont attaqués au problème de la détection directe, dans l'environnement contrôlé du laboratoire, du très faible nombre d'interactions des WIMPs avec la matière ordinaire. Menée par l'une des toutes premières équipes mon-

diales engagées dans cette traque, l'expérience Edelweiss, a inauguré le 31 mars 2006, sa deuxième phase, Edelweiss II, qui enregistre aujourd'hui ses premières données.

Défis multiples

Les défis auxquels s'affronte l'expérience Edelweiss sont multiples. Nous savons en effet que, pour permettre de résoudre l'énigme de la "matière noire", les interactions des WIMPs avec la matière ordinaire doivent être extrêmement rares, plus rares encore que celles de l'éluif **neutrino**, qui peut traverser des milliards de fois la Terre de part en part sans interagir. Les premières expériences, comme par exemple l'expérience Heidelberg-Moscou, au cours des années 1980 et 1990, avaient utilisé des matériaux d'une très grande pureté **radioactive** comme le germanium, et développé, au cours de vingt années, des techniques de plus en plus sévères de sélection de matériaux, les protégeant ensuite du **rayonnement cosmique** dans des laboratoires souterrains. Mais cette stratégie de purification radioactive succomba finalement devant deux problèmes majeurs : d'une part, il devenait de plus en plus difficile de purifier l'ensemble des matériaux constituant l'expérience, certaines sources de bruit radioactif, comme les produits de **désintégration** du radon, ou la **cosmogénèse** d'éléments radioactifs comme le **tritium** par le rayonnement cosmique, résistant de façon très tenace aux efforts de purification. Mais la stratégie développée par cette première génération d'expériences présentait d'autre part une limitation majeure. À supposer en effet que l'on parvienne à purifier suffisamment les matériaux pour parvenir au très faible taux d'interaction – sans doute moins d'un centième d'interaction par kilogramme et par jour – prédit par les théories de supersymétrie, comment s'assurer ensuite que ces interactions résiduelles étaient bien dues aux interactions de WIMPs, et pas à un bruit de fond radioactif mal maîtrisé ou inattendu ? Comment, dans ces conditions, ces expériences pourraient-elles démontrer l'existence des WIMPs ?

Aux côtés de deux autres expériences **cryogéniques**, CDMS (*Cryogenic Dark Matter Search*) aux États-Unis et CRESST (*Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers*) en Italie, rassemblant des équipes allemandes et anglaises, dans le **laboratoire du Gran Sasso**, l'équipe Edelweiss se lança donc au début des années 1990 dans le développement de détecteurs qui permettent de distinguer les rares interactions de WIMPs du bruit de fond radioactif. Pour cela, il fallait détecter non pas une seule composante issue de l'interaction, comme l'**ionisation**, mais lui adjoindre la mesure d'une deuxième quantité, comme la chaleur ou la lumière produite lors de l'interaction, en vérifiant que la connaissance de ces deux quantités permettait bien de distinguer le signal tant recherché de la radioactivité ambiante. La répartition de l'énergie entre chaleur, très facile à produire, lumière et ionisation, qui mettent en jeu des processus plus coûteux en énergie, permet en effet de distinguer les interactions de WIMPs. À la différence des **photons gamma** et des **électrons** de la radioactivité ordinaire, les WIMPs doivent se déplacer à des vitesses très faibles par rapport à celle de la lumière, environ le millième de celle-ci. Ceci a pour conséquence que lumière et chaleur sont produites en nettement moins



Opération de soudage des fils d'or et d'aluminium sur un bolomètre du détecteur cryogénique de l'expérience Edelweiss II.

J.-J. Bigot/CEA/Daphnia

grande quantité lors d'une interaction de WIMP, pour une énergie d'interaction donnée, que par la radioactivité gamma et électronique.

Un centième de degré au-dessus du zéro absolu

Le problème est que la mesure de la chaleur libérée lors de l'interaction requiert des températures extrêmement basses, afin de réduire les fluctuations du bruit thermique à un niveau qui permette de mesurer l'énergie de l'interaction. Il est ainsi nécessaire de refroidir les détecteurs à un centième de degré au-dessus du zéro absolu (soit 0,01 kelvin) seulement, une température 30 000 fois plus faible que la température ordinaire. Dans la première phase de l'expérience Edelweiss I, qui fut en 2002 la première expérience à commencer à explorer le domaine des théories de supersymétrie, c'est le Département de recherche sur l'état condensé, les atomes et les molécules (Drecam) du CEA qui réalisa à Saclay le **cryostat**, d'un volume utile d'un litre, qui permit d'atteindre



Implantation d'un des dix étages de douze bolomètres de l'expérience Edelweiss II.



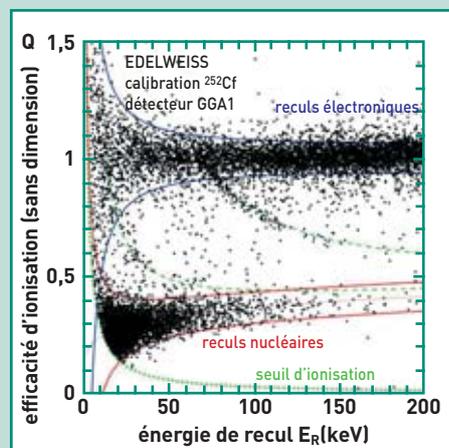
Détail du montage des étages de détecteurs de l'expérience Edelweiss dans le Laboratoire souterrain de Modane.

ces températures. Pour la deuxième phase de l'expérience, qui devrait améliorer de près d'un facteur 100 la sensibilité, le volume utile est d'environ 100 litres. Cet ensemble cryogénique ambitieux, qui fait appel à des tubes pulsés conçus par le Service des basses températures du CEA/Grenoble pour réduire autant que possible l'utilisation de fluides cryogéniques externes, a été construit par le Centre de recherche sur les très basses températures du CNRS à Grenoble, en collaboration avec le Drecam et le Département d'étude des lois fondamentales de l'Univers (Dapnia) à Saclay. Ce cryostat est entièrement contrôlable à distance, un aspect essentiel pour une expérience située dans un site souterrain d'accès relativement difficile et destinée à recueillir des données de façon pratiquement continue pendant plusieurs années.

À ces températures très basses, il est possible de détecter avec une excellente précision les caractéristiques d'une interaction de WIMPs, qui ne met pourtant en jeu qu'une élévation de température d'un à quelques millièmes de degré et quelques centaines d'électrons environ. Le rapport de ces deux grandeurs, ionisation et chaleur libérées au cours de l'interaction, permet de distinguer et de rejeter de façon très précise les interactions du bruit de fond radioactif de celles, très rares, des **reculs de noyaux** induits par les WIMPs (figure de l'encadré).

Une mesure très discriminante

Comme le montre la figure, la distinction qu'Edelweiss II fait entre reculs nucléaires, induits par **WIMPs** (Weakly Interacting Massive Particles) et **neutrons**, et reculs **électroniques** imputables au bruit de fond **radioactif**, est excellente. Pour une énergie donnée, indiquée en abscisse, l'efficacité d'**ionisation** (représentée en ordonnée) d'un recul



nucléaire diffère en effet d'un facteur qui dépend de l'énergie et qui varie entre 3 et 4 aux énergies typiques des interactions de WIMPs (quelques dizaines de **keV**). Si l'on observe bien entre les deux populations de reculs nucléaires et électroniques une faible population d'événements intermédiaires, l'essentiel de ceux-ci sont attendus et correspondent à des **interactions inélastiques** nucléaires, où le recul nucléaire est

accompagné d'un **gamma** de faible énergie. Il est possible de juger de la qualité de rejet du bruit de fond radioactif de ces détecteurs en notant que lorsqu'ils sont soumis à 100 000 interactions gamma, aucune de celles-ci n'est attribuée à un recul nucléaire.

Ces mesures mettent en jeu des amplificateurs à très faible bruit, dont la partie préamplification est placée sur un étage à basse température (étage refroidi par un tube pulsé à une température de 30 **kelvins** environ) afin de réduire le bruit de la mesure d'ionisation. La mesure de charge présente un bruit inférieur au keV par canal (largeur totale), alors que la mesure de l'énergie déposée sous forme de chaleur permet une mesure de l'énergie plus précise encore, les meilleurs détecteurs réalisés dans Edelweiss présentant une résolution de 250 eV (largeur totale), plus précise de plus d'un ordre de grandeur que les détecteurs germanium conventionnels. Ces mesures calorimétriques très précises sont rendues possibles par des senseurs thermiques en germanium dopé de manière très homogène par des neutrons (NTD, pour *Neutron Transmutation Doped*), ou encore des senseurs en couche mince à base de mélange amorphe de niobium et de silicium, ces deux types de senseurs étant utilisés dans la transition métal-isolant.

B Interactions fondamentales et particules élémentaires

Le **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 (**gravitationnelle**, **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 demi-entière (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 particu-

les. 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 qu'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. Dépourvu 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 **Z^0** . Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (environ 80 GeV/c² pour **W^{\pm}** et 91 GeV/c² pour **Z^0**), la portée de l'interaction faible est donc infime, de l'ordre de 10⁻¹⁸ m. Les bosons **W^{\pm}** possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent changent de charge électrique et également de nature (saveur). En revanche, le boson **Z^0** 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 **Z^0** . De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un **Z^0** 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).

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-

The diagram illustrates the structure of matter. It starts with an atom, which consists of a nucleus and electrons. The nucleus is made of protons and neutrons. A proton has a charge of +1 and a mass of 938,272 MeV/c². A neutron has a charge of 0 and a mass of 939,565 MeV/c². Protons and neutrons are made of quarks. A nucleon is a group of quarks.

	leptons peuvent se déplacer librement		quarks s'assemblent en triplets ou en paires quark-antiquark pour former les nombreuses particules subatomiques	
Fermions La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe. Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	première famille électron (e) responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1 masse : 0,511 MeV/c ²	neutrino électronique (ν_e) sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	bas (d) sa charge électrique est -1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 4 - 8 MeV/c ²	haut (u) sa charge électrique est +2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 - 4 MeV/c ²
	deuxième famille muon (μ) un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c ²	neutrino muonique (ν_μ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique	étrange (s) un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 - 130 MeV/c ²	charmé (c) un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1,15 - 1,35 GeV/c ²
	troisième famille tau (τ) encore plus lourd masse : 1776,99 ± 0,29 MeV/c ²	neutrino tauique (ν_τ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique	beauté (b) encore plus lourd masse : 4,1 - 4,4 GeV/c ²	top (t) le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 171,4 ± 2,1 GeV/c ²
Bosons vecteurs Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.	photon grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique	gluon porteur de la force forte entre quarks	W[±], Z⁰ porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive	
Boson de Higgs ?	responsable de la "brisure de symétrie électrofaible"			

Tableau 1. Table des douze constituants élémentaires de matière dont le modèle standard décrit les interactions. Les trois leptons chargés (électron, e⁻, muon, μ⁻, tau, τ⁻) sont sensibles aux interactions électromagnétique et faible, les neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) ne sont sensibles qu'à l'interaction faible et les six quarks (up, charm et top - ou u, c, t - de charge 2/3 et down, strange, bottom - ou d, s, b - de charge -1/3) sont sensibles aux trois interactions. Chaque constituant élémentaire possède son antiparticule, de même masse et de nombres quantiques algébriques (comme la charge électrique) de signe inversé.



B Interactions fondamentales et particules élémentaires (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.

À l'heure actuelle, les trois expériences cryogéniques CDMS, Edelweiss et CRESST sont en tête de la compétition internationale. Mais elles se heurtent toutes trois au défi de la radioactivité qui se dépose sur la surface des détecteurs. D'importants efforts de recherche et développement ont été conduits afin de pouvoir identifier et rejeter ces événements.

Combattre et identifier la radioactivité de surface

Cette radioactivité de surface est potentiellement dangereuse pour la recherche de WIMPs pour deux raisons très différentes. D'une part, la réponse des détecteurs d'ionisation est souvent affaiblie pour des interactions qui se produisent en surface du détecteur. Ces interactions peuvent alors, dans une faible fraction des cas, apparaître comme des interactions de WIMPs, elles aussi moins ionisantes que la radioactivité naturelle. D'autre part, les produits de désintégration du radon, comme par exemple le polonium, **adsorbés** sur les matériaux environnant les détecteurs, peuvent eux aussi apparaître comme des WIMPs du fait qu'ils sont d'énergie et de masse similaires. Les trois expériences majeures actuelles développent donc chacune une méthode originale d'identification des interactions proches de la surface du détecteur. Alors que l'expérience CDMS-II, depuis deux ans déjà dans sa deuxième phase avec une dizaine de kilogrammes de détecteurs en germanium et en silicium, a mis en œuvre des détecteurs dont les senseurs **supraconducteurs** présentent une réponse très rapide, CRESST a utilisé un réflecteur de lumière en plastique **scintillant** autour de ses détecteurs qui lui permet de rejeter une large fraction de ce bruit de fond. Edelweiss II, de son côté, poursuit la mise en œuvre de senseurs en couche mince,

développés au Centre de **spectrométrie** nucléaire et de **spectrométrie de masse** (CSNSM) du CNRS à Orsay, dont la forme de réponse est très différente selon que l'interaction se situe au voisinage immédiat du senseur, ou au contraire, dans le volume du détecteur.

Vers l'expérience Eureka

La sensibilité que des expériences comme Edelweiss II se proposent d'atteindre correspond à environ une interaction de WIMP par an et par kilogramme de détecteur. Mais les physiciens réfléchissent déjà à l'étape suivante, qui permettrait de progresser encore de près d'un facteur 100 en sensibilité, afin de tester une large part des modèles de supersymétrie et d'avoir une bonne chance d'identifier et de caractériser de manière précise les WIMPs. Cette expérience future, Eureka, rassemble les compétences européennes des groupes engagés dans les expériences CRESST et Edelweiss, mais aussi le laboratoire de cryogénie du Cern, ainsi qu'une dizaine de laboratoires de pointe en cryogénie et en cryo-électronique, rassemblés dans un réseau européen, Velotic. Le but d'Eureka est, en effet, très ambitieux, puisque cette expérience vise à mettre en œuvre environ un millier de détecteurs, toujours à la température d'un centième de degré absolu, et dont les performances d'identification du bruit de fond radioactif lui permettent d'atteindre la sensibilité, fantastique pour un signal de WIMP, de seulement une dizaine d'interactions par an et par tonne de détecteurs.

Le bruit de fond neutronique

Pour parvenir à atteindre une telle sensibilité, il faut compléter la qualité des détecteurs cryogéniques par un contrôle pratiquement absolu du bruit de fond



Le réfrigérateur et le cryostat de l'expérience CDMS installés dans la mine de Soudan (Minnesota).



dû aux **neutrons** et, autant que possible, à la radioactivité naturelle des matériaux. Pour cela, l'ensemble des meilleures expériences mondiales utilise désormais des sites souterrains, qui suppriment par un facteur compris entre 100 000 et quelques millions le rayonnement cosmique. Ainsi, au niveau du sol, environ cent particules par seconde traversent notre corps, et ce bruit de fond est beaucoup trop important pour permettre de mettre en évidence un signal de WIMP aussi faible que celui qui est prédit par les théories de supersymétrie. L'expérience Edelweiss bénéficie ainsi de l'atout du **Laboratoire souterrain de Modane**, sous plus de 1 650 mètres de roche, qui réduit le rayonnement cosmique d'un facteur environ 2 millions, et qui est, avec le laboratoire **SNO** (pour *Sudbury Neutrino Observatory*) au Canada, l'un des meilleurs sites souterrains actuels. Mais, même dans de tels laboratoires, la lutte contre la radioactivité reste fondamentale. La roche environnante contient en effet, comme tous les matériaux terrestres, des traces d'uranium et de divers éléments radioactifs. Ces éléments, soit par fission de l'uranium, soit par les réactions **alpha-n**, produisent des neutrons rapides qui, même s'ils sont en nombre extrêmement faible, constituent un danger important pour les expériences de détection de WIMPs. En effet, ces neutrons, bien qu'*a priori* beaucoup plus légers que les WIMPs, induisent des reculs nucléaires qui sont très difficiles, voire impossibles à distinguer des interactions de WIMPs. Pour faire face à ce bruit de fond neutronique, une expérience comme Edelweiss II a mis en place une protection passive de polyéthylène d'une épaisseur de 60 centimètres environ qui réduit de plus d'un facteur 10 000 le flux de neutrons rapides issu de la roche environnante. Des protections similaires sont utilisées par les expériences CDMS et CRESST, et il deviendra nécessaire d'utiliser pour Eureka des protections d'un à quelques mètres de matériaux contenant de l'**hydrogène**, très efficace pour modérer l'énergie des neutrons rapides en les ralentissant. Mais deux autres sources de neutrons rapides menacent également les expériences de détection de WIMPs si l'on n'y prend garde. Il s'agit d'une part des neutrons induits par les

muons cosmiques résiduels qui sont parvenus à traverser la montagne. D'une énergie moyenne environ 300 fois supérieure à celle de leurs congénères que l'on trouve au niveau du sol, ces muons produits par le rayonnement cosmique engendrent assez souvent des interactions nucléaires qui produisent elles-mêmes un nombre important de neutrons très rapides, d'une énergie de quelques **MeV** à quelques dizaines de MeV. Pour des expériences comme Edelweiss II et plus encore Eureka, il devient nécessaire de détecter ces muons, même si leur nombre est extrêmement faible, afin d'identifier et de rejeter les interactions qui coïncident avec leur passage. Edelweiss II est donc presque entièrement recouverte de panneaux de plastique scintillant réalisés par deux laboratoires de Karlsruhe (Allemagne) qui permettent d'identifier avec un haut degré de confiance un muon traversant la protection de scintillateur entourant l'expérience. Mieux, dans 75 % des cas environ, le muon traverse sur une épaisseur suffisante deux couches de plastique scintillant, ce qui permet d'identifier dans ce cas, avec une quasi-certitude, la particule incidente. Une deuxième source de neutrons peut également limiter la sensibilité de l'expérience. Il s'agit des neutrons produits, même si ce n'est que dans une faible proportion des cas, par les gammes de haute énergie des chaînes de l'**uranium** et du **thorium**, présents à l'état de traces dans les matériaux du blindage. Ce bruit de fond neutronique est particulièrement redoutable dans la mesure où il est pratiquement impossible de s'en protéger, sauf à supprimer toute trace d'éléments radioactifs au voisinage des détecteurs, ce qui ne semble guère réaliste pour une expérience de ce type. La stratégie pour combattre ce bruit de fond consiste alors à réaliser une structure de détecteurs aussi compacte que possible. Dans ce cas en effet, une large fraction des événements présentera deux ou plusieurs interactions, la longueur d'interaction d'un neutron dans un matériau comme le germanium étant de quelques centimètres. L'expérience cryogénique italienne Cuoricino qui étudie la désintégration double bêta dans le laboratoire du Gran Sasso a ainsi réalisé une structure de détecteurs extrêmement compacte, où la masse des détecteurs représente environ 80 % de la masse refroidie. Dans ces conditions de compacité, les neutrons peuvent, pour une très large fraction d'entre eux, être identifiés par leurs interactions multiples, les WIMPs n'ayant pour leur part aucune chance d'interagir deux fois en raison de leur très faible taux d'interaction.

Il apparaît ainsi que les défis que pose la détection des WIMPs sont multiples et nécessitent une adaptation constante de la part des physiciens, au fur et à mesure qu'ils parviennent à des sensibilités plus grandes qui leur révèlent des bruits de fond inattendus. Les détecteurs mis en œuvre dans une expérience comme Edelweiss ont permis en quelques années de faire progresser de plus d'un facteur mille la sensibilité des expériences. Au-delà d'Edelweiss II, une expérience comme Eureka, nécessairement européenne ou mondiale, permettra sans doute de préciser enfin la nature de la "matière noire" de l'Univers.



CRESST Collaboration

Module prototype de détecteur de l'expérience CRESST II.

➤ **Gabriel Chardin**

Direction des sciences de la matière
CEA Dapnia centre de Saclay

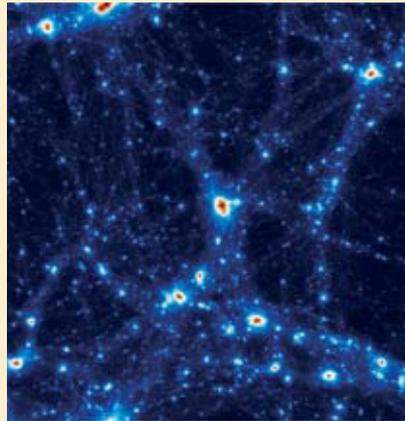
A Le modèle standard cosmologique

Le **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



D. Aubert/CEA-C. Pichon (IAP)

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.

D Spectroscopie et spectrométrie

Les 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 :

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

où A est l'**absorbance** du milieu traversé par le rayonnement, I₀ l'intensité lumineuse incidente, I 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.

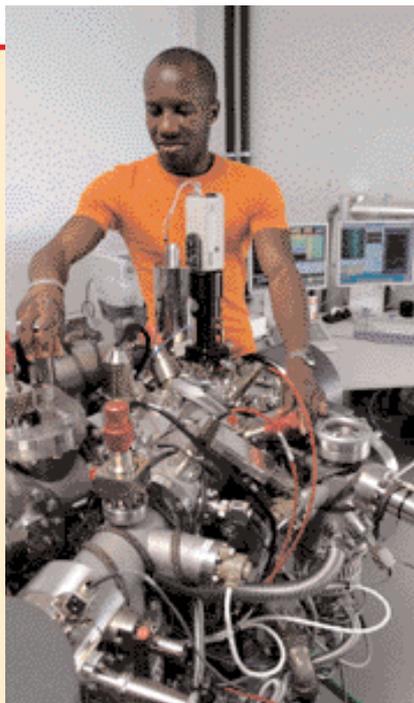
D (suite)

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 ceux-ci 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. Ceux-ci 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 quadripôles (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 qui 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.

B Interactions fondamentales et particules élémentaires

Le **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 (**gravitationnelle**, **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 demi-entière (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 particu-

les. 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 qu'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 **Z^0** . Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (environ 80 GeV/c² pour **W^\pm** et 91 GeV/c² pour **Z^0**), la portée de l'interaction faible est donc infime, de l'ordre de 10⁻¹⁸ m. Les bosons **W^\pm** possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent changent de charge électrique et également de nature (saveur). En revanche, le boson **Z^0** 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 **Z^0** . De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un **Z^0** 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).

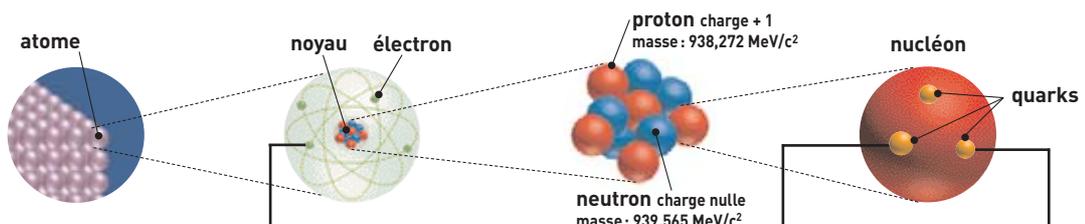
B (suite)

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-



	leptons peuvent se déplacer librement		quarks s'assemblent en triplets ou en paires quark-antiquark pour former les nombreuses particules subatomiques	
Fermions La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe. Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	première famille électron (e) responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1 masse : 0,511 MeV/c ²	neutrino électronique (ν_e) sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	bas (d) sa charge électrique est -1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 4 - 8 MeV/c ²	haut (u) sa charge électrique est +2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 - 4 MeV/c ²
	deuxième famille muon (μ) un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c ²	neutrino muonique (ν_μ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique	étrange (s) un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 - 130 MeV/c ²	charmé (c) un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1,15 - 1,35 GeV/c ²
	troisième famille tau (τ) encore plus lourd masse : 1776,99 ± 0,29 MeV/c ²	neutrino tauique (ν_τ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique	beauté (b) encore plus lourd masse : 4,1 - 4,4 GeV/c ²	top (t) le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 171,4 ± 2,1 GeV/c ²
Bosons vecteurs Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.	photon grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique	gluon porteur de la force forte entre quarks	W[±], Z⁰ porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive	
Boson de Higgs?  responsable de la "brisure de symétrie électrofaible"				

Tableau 1.

Table des douze constituants élémentaires de matière dont le modèle standard décrit les interactions. Les trois leptons chargés (électron, e⁻, muon, μ⁻, tau, τ⁻) sont sensibles aux interactions électromagnétique et faible, les neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) ne sont sensibles qu'à l'interaction faible et les six quarks (up, charm et top - ou u, c, t - de charge 2/3 et down, strange, bottom - ou d, s, b - de charge -1/3) sont sensibles aux trois interactions. Chaque constituant élémentaire possède son antiparticule, de même masse et de nombres quantiques algébriques (comme la charge électrique) de signe inversé.

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.

E Qu'est-ce que la chromatographie ?

La 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 *chrôma*, couleur et *graphein*, écrire) permet la *séparation* des constituants d'un mélange en phase homogène liquide ou gazeuse, comme un buvard réparti 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 volatil possédant des propriétés de solvant des composés à séparer, il s'agit de **chromatographie gaz-liquide** ou *chromatographie de partage*.

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'éluion). 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>.

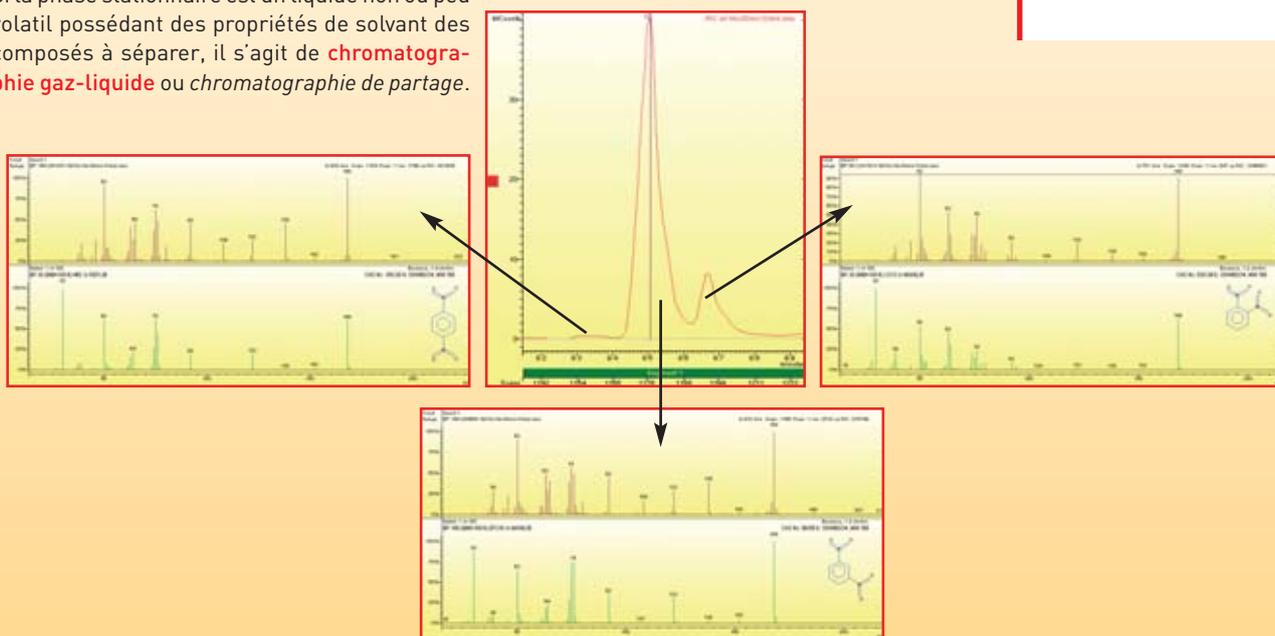


Figure.

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).