Détecteurs : nouvelles technologies et nouveaux marchés

Dans le domaine infrarouge et sub-millimétrique comme dans celui des rayonnements X et gamma, les progrès dans la conception des détecteurs sont constants. Plusieurs équipes du CEA y contribuent, pour des applications qui ne cessent de s'élargir.

P.Stroppa/CEA

Machine d'épitaxie par jets moléculaires utilisée au centre CEA de Grenoble pour réaliser la couche active (en HgCdTe) utilisée dans les nouvelles générations de détecteurs infrarouge.

Infrarouge : des cristaux HgCdTe aux microbolomètres

Les technologies de détecteurs **infrarouge** n'ont cessé de progresser depuis une quinzaine d'années et atteignent aujourd'hui une maturité industrielle qui permet la production de senseurs utilisables en imagerie thermique (320 × 240, 640 × 480, 1 024 × 1 024 **pixels**) à des coûts de plus en plus bas.

Les recherches conduites dans ce domaine au Laboratoire Infrarouge du CEA/Leti (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information) depuis 1978, à l'initiative de la **DGA**, ont permis le développement en France d'une industrie à travers Sofradir (filiale de Thalès, Safran et Areva), aujourd'hui un des leaders incontestés au niveau mondial. Ces technologies, jusqu'à présent dédiées au domaine militaire, scientifique ou spatial, voient s'ouvrir un marché civil considérable avec l'apparition des filières de détecteurs bas coût à base de microbolomètres.

Pourquoi voir en infrarouge ?

Tous les corps émettent du fait de leur température propre une lumière dont la longueur d'onde se situe au-delà du **domaine visible** (0,4 – 0,8 **micromètre** [**µm**]) et principalement entre 5 et 10 µm. Ce rayonnement infrarouge est lié à leur émission thermique dont le comportement est décrit par la **loi de Planck**. Pour ces longueurs d'onde, l'**atmosphère** terrestre présente des propriétés exceptionnelles avec des fenêtres de transparence très importantes (3-5 µm,

8-12 µm). Si on peut détecter ces **photons** de faible énergie au moyen d'un capteur adapté, on est capable de voir très loin les objets sans devoir les éclairer. Ce type d'imagerie infrarouge est appelé *passive* à la différence de l'imagerie *active* qui nécessite une source lumineuse pour éclairer les objets et voir la lumière qu'ils réfléchissent, comme c'est le cas pour l'observation par l'œil humain dans le visible.

La filière de détecteurs infrarouge hautes performances

Le concept de détection infrarouge hautes performances est fondé sur la conversion directe **photovoltaïque** des photons en **paires électron-trou** dans un **semi-conducteur**, principe de base des cellules solaires. Le **cristal** le plus utilisé est le tellurure de mercure et cadmium (HgCdTe), aux propriétés exceptionnelles. Ce semi-conducteur qui peut être élaboré en couches minces monocristallines de très bonne qualité présente un *gap* direct ajustable par sa composition pour toutes les bandes de détection infrarouge avec un paramètre de maille cristalline constant. La maîtrise par le Leti de la technologie de croissance du HgCdTe, de la fabrication de jonctions ***np*** *planar* (1), de l'interconnexion de ces matrices de détection à des circuits de lecture en **silicium** (CMOS, *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) a été la clé de la réussite de Sofradir.

L'architecture hybride des matrices est aujourd'hui la plus utilisée. Le circuit CMOS sert à traiter l'information provenant des détecteurs et à la transformer en signal vidéo. Ces matrices, que l'on sait réaliser selon des complexités allant jusqu'au-delà du mégapixel avec des pas aussi petits que 15 µm, atteignent les **résolutions** thermiques théoriques ultimes de quelques millièmes de **degré Kelvin**, à condition d'être refroidies à quelque -196 °C. Ces contraintes **cryogéniques**, un des éléments du coût élevé de ces composants, limitent aujourd'hui cette filière (quelques dizaines de milliers de produits par an dans le monde) à des applications militaires (guidage de missiles, caméras de surveillance), scientifique (le plus souvent analyse **spectroscopique** par l'observation de **raies d'absorption** en infrarouge ; voir encadrés D, ***Spectroscopie et spectrométrie***, et E, ***Qu'est-ce que la chromatographie ?***) et spatiale (observation satellitaire de la Terre, autres missions).

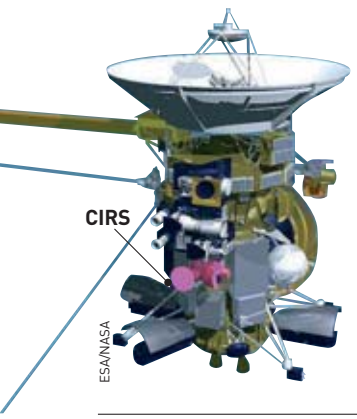
Des détecteurs infrarouge pour l'astrophysique

Dans ce dernier domaine, le télescope ISO de l'**Esa**, lancé par une Ariane 4 en 1995, comportait une caméra infrarouge (Isocam) dont le détecteur avait été fabriqué par le CEA/Leti (éléments de silicium **dopé** gallium refroidis à 4 K pour la détection jusqu'à 17 µm) (voir *Infrarouge, X et gamma : des lumières invisibles pour sonder l'Univers*). Ce type de composant a également équipé des télescopes terrestres. La sonde américaine Cassini, en orbite autour de Saturne depuis 2005, comporte également un **spectromètre** (CIRS) équipé d'une matrice de détection infrarouge en HgCdTe réalisée par le CEA/Leti. Un des objectifs de cette mission est de détecter la présence de molécules organiques dans l'atmosphère de Titan, satellite de Saturne (longueurs d'ondes jusqu'à 10 µm). Actuellement, le CEA/Leti fabrique une matrice de détection à très grandes longueurs d'ondes (200-600 µm) destinée au spectromètre PACS du satellite Herschel (les très grandes longueurs d'ondes sont destinées à l'observation d'objets très froids dans l'Univers, près du zéro absolu). Ce composant fonctionnant à 0,3 K utilise une architecture de détecteurs à base de microbolomètres refroidis. Ces programmes spatiaux sont réalisés en collaboration avec le service d'astrophysique du CEA (SAp) responsable des instruments (voir *Infrarouge, X et gamma : des lumières invisibles pour sonder l'Univers*).

De la deuxième à la troisième génération

Seuls quelques groupes dans le monde ont été capables, au cours des vingt dernières années, de mener jusqu'à la maturité industrielle ces filières de détecteurs à très hautes performances. Ce sont principalement Raytheon, DRS et Rockwell Scientific aux États-Unis, Sofradir dans le reste du monde et, dans une moindre mesure, AIM en Allemagne, Selex en Angleterre et SCD en Israël. D'autres filières entrent progressivement en concurrence avec celle du HgCdTe : ce sont celles à base des semi-conducteurs InSb (qui opèrent dans la bande 3-5 µm), de GaAlAs et de InAs/GaSb, ces dernières utilisant des puits quantiques (2) ou des super-réseaux (3) et opérant en bandes 3-5 ou 8-12 µm. Elles présentent toutes des performances inférieures au HgCdTe à température de fonctionnement équivalente.

Le grand enjeu des dix ans à venir est la maîtrise de la troisième génération de composants, les matrices de détection multicolores qui remplaceront progressivement les matrices monospectrales. Elles devront être capables de réaliser simultanément des images dans plusieurs bandes afin, en particulier, d'obtenir une information sur la température absolue des objets observés. Pour le HgCdTe, seule la croissance en **épitaxie** par jets moléculaires permet d'obtenir des structures multicouches capables



Emplacement sur la sonde américaine Cassini, en orbite autour de Saturne depuis 2005, du spectromètre CIRS (*Composite InfraRed Spectrometer*) équipé d'une matrice de 10 détecteurs infrarouge en HgCdTe réalisée par le CEA/Leti et dont l'électronique associée a été fabriquée au Dapnia, en partenariat avec le Cnes. On distingue à droite la sonde européenne Huygens, qui s'est posée sur Titan en janvier 2005.

(1) *np planar* : procédé d'élaboration de semi-conducteur dans lequel on obtient finalement trois zones superposées : l'une est constituée par le semi-conducteur d'origine (silicium *n*), une autre est formée par la première diffusion (silicium *p*) et une autre est créée par la deuxième diffusion (silicium *n*). Avec la technique *planar*, il est possible d'obtenir simultanément un nombre élevé de transistors.

(2) puits quantique : composant de dimension nanométrique dans lequel chaque électron ne peut se déplacer que dans deux dimensions de l'espace, contraint par un semi-conducteur de plus grande bande interdite.

(3) super-réseau : multicouche périodique d'atomes ou de molécules formée par la répétition d'un motif élémentaire constitué de couches successives chimiquement différentes.

d'opérer une telle détection en conservant une cohérence spatiale de l'information. Le CEA/Leti conduit des programmes de recherche importants dans ce domaine avec le soutien de la DGA, en collaboration avec Sofradir pour HgCdTe et Thalès pour GaAlAs. Des premiers prototypes de formats représentatifs (320 × 256) au meilleur niveau mondial ont déjà été réalisés.

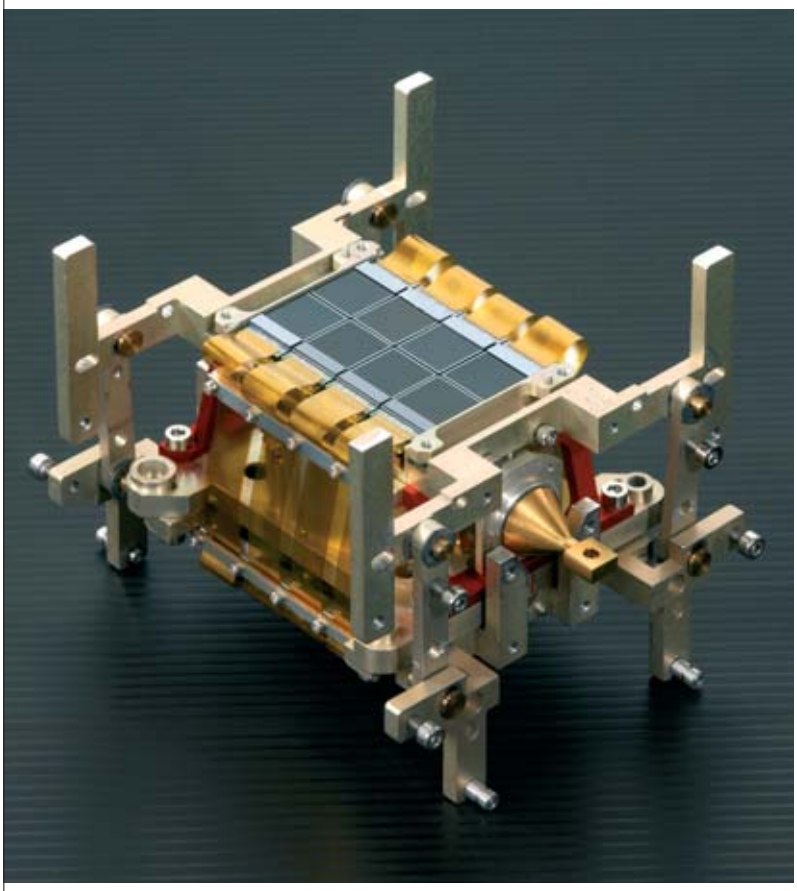
Des détecteurs infrarouge à faible coût à base de microbolomètres

Une révolution en imagerie infrarouge a eu lieu il y a une quinzaine d'années lorsque la société américaine Honeywell a dévoilé un nouveau concept de détecteurs permettant de faire de l'imagerie thermique sans avoir besoin de refroidir le capteur. Exploité par des sociétés comme Raytheon, DRS, BAe et Flir system, ce concept utilise des bolomètres de toutes petites dimensions fabriqués de façon matricielle directement sur des tranches de circuits CMOS. Ces microbolomètres sont constitués d'une lamelle extrêmement fine (0,1 µm d'oxyde de vanadium), appelée thermomètre, suspendue entre deux plots de connexion. Ces détecteurs fonctionnent sur un principe très différent des détecteurs quantiques qui utilisent la conversion directe photon-**électron**. Ce sont des détecteurs thermiques : en recevant les photons infrarouge dans la bande 8-12 µm, cette lamelle s'échauffe, conduisant à une variation de sa **résistivité**, permettant au circuit CMOS la conversion de ce signal optique en signal électrique et en image vidéo. La combinaison de cette technologie ***above IC*** extrêmement simple, collective (et donc peu coûteuse) avec l'absence de cryogénie permettait d'envisager très rapidement une baisse considérable des coûts et sa disponibilité pour des applications civiles. La sensibilité de ces caméras était seulement d'un vingtième de degré, suffisante pour la majorité des applications qui ne nécessitent pas de collecter des images à très grandes distances.

Le CEA/Leti a débuté des travaux très rapidement après la publication d'Honeywell, avec le soutien de la DGA. Après dix ans de recherche, un procédé plus simple et industrialisable que celui d'Honeywell a été mis au point. Il utilise une lamelle en silicium amorphe au lieu de l'oxyde de vanadium. Ce procédé a été transféré en 2000 à Sofradir qui a créé en 2001 une filiale, appelée Ulis, pour l'industrialiser et qui est aujourd'hui le plus important producteur mondial de matrices de détection infrarouge à base de microbolomètres hors États-Unis.

Des progrès importants ont été apportés en terme de performances et de réduction de pas. Des matrices de formats 320 × 240 au pas de 35 µm sont déjà accessibles avec des sensibilités de quelques centièmes de degré et les 640 × 480 au pas de 25 µm commencent à être produits. Pour cette technologie, le défi est de conserver la résolution thermique lorsque l'on réduit le pas des détecteurs car il est de plus en plus difficile de conserver une bonne isolation thermique de la lamelle thermomètre par rapport aux plots de connexion, gage de sensibilité. Le CEA/Leti collabore avec Ulis sur cette filière dont la production est, à terme, estimée à plusieurs millions de composants par an.

Les domaines d'application des caméras infrarouge thermiques non refroidies à base de microbolomètres sont multiples. Très compactes, elles équipent déjà de nombreux utilisateurs, notamment dans le domaine de la santé (surveillance des passagers fiévreux dans les aéroports et des malades dans les hôpitaux, détection précoce de cancers de la peau…). Dans le domaine de la sécurité, elles permettront de voir la nuit des intrus dans des bâtiments, de surveiller dans l'industrie la surchauffe d'éléments électriques ou d'équipements risquant de provoquer une explosion ou une pollution. Les pompiers sont extrêmement demandeurs de ce type de matériel qui leur permet de repérer à travers la fumée des corps inertes ou de visualiser les parois chaudes des immeubles en feu. Les pilotes d'avions pourraient disposer d'un système d'aide à l'atterrissage tous temps sur petits aérodromes. Mais c'est l'aide à la conduite automobile qui devrait constituer le plus grand domaine d'application, les caméras infrarouge permettant de voir obstacles ou piétons même à travers la fumée et le brouillard, la nuit et en cas d'éblouissement par les phares d'un véhicule venant en sens inverse. Des prototypes montrant leur efficacité ont déjà été validés au CEA/Leti.



Artechnique/CEA-Leti

Plan focal de 2 048 pixels du détecteur infrarouge à microbolomètres du télescope PACS de la mission Herschel réalisé par le Leti.
Il permettra l'observation dans la plage 60-210 µm de l'infrarouge lointain (émission du corps noir entre 14 K et 50 K).

> Gérard Destefanis
Laboratoire d'électronique
et de technologie de l'information
Direction de la recherche technologique
CEA centre de Grenoble

Rayons X et gamma : des détecteurs à la température ambiante

L'apport décisif du tellurure de cadmium

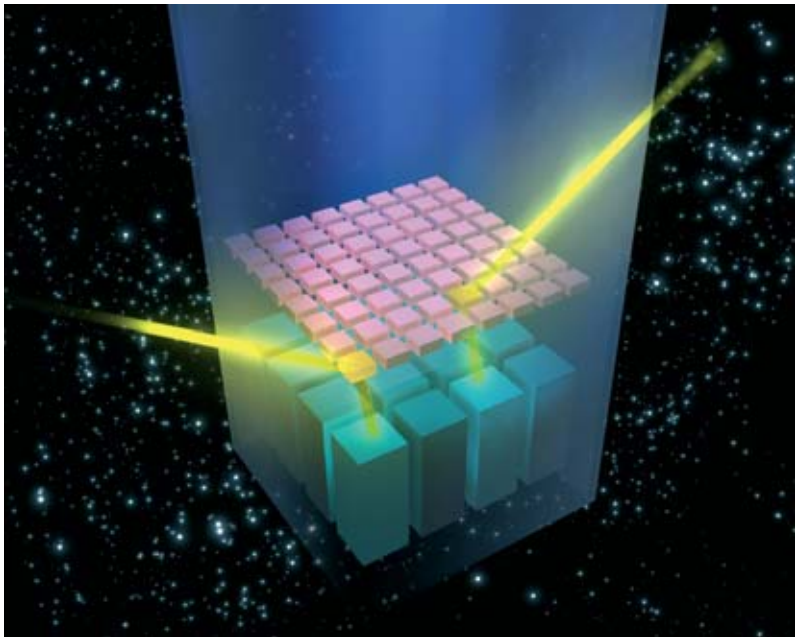
Pour étudier les sources célestes émettant à haute énergie (de quelques **keV** à quelques **MeV**), les astronomes ont besoin d'instruments capables, non seulement de réaliser des images, mais également de mesurer avec précision l'énergie (performance spectrale) de chaque **photon** émis par la source et intercepté dans l'instrument. Une caméra **gamma** est constituée de **pixels** qui sont autant de chaînes de spectro-imagerie dans lesquelles chaque photon est mesuré individuellement.
Le tellurure de cadmium (CdTe) et le tellurure de cadmium et de zinc (CdZnTe) sont des matériaux reconnus pour constituer d'excellents détecteurs de rayons gamma présentant des avantages par rapport aux habituels détecteurs à base de germanium (Ge). D'une part ils fonctionnent à des températures proches de l'ambiante (typiquement entre - 20 °C et + 20 °C) alors que le germanium fonctionne à une température d'environ - 200 °C qui nécessite un environnement **cryogénique** lourd, compliquant la mise au point de détecteurs spatiaux.
Le CdTe est, d'autre part constitué d'atomes lourds (**numéro atomique** moyen ***Z*** élevé, de l'ordre de 50, contre 32 pour le germanium) et, a une densité importante (autour de 6), supérieure à celle du germanium (5,3). Ces paramètres font du CdTe un matériau efficace pour la détection des photons gamma et la réalisation d'ensembles de détection très compacts au sein d'instruments légers et sensibles.
Des **cristaux** de CdTe et de CdZnTe sont utilisés pour des applications variées de spectro-imagerie des rayons gamma, tant dans le domaine de l'astrophysique (voir *Infrarouge, X et gamma : des lumières invisibles pour sonder l'Univers*) que dans l'imagerie médicale, la surveillance de matières dangereuses ou encore la physique nucléaire.

À l'origine, la caméra gamma d'Intégral

Deux grandes caméras gamma à base de cristaux de CdTe ou de CdZnTe sont actuellement en orbite. L'une équipe le satellite américain de détection des *sursauts gamma* Swift, mis en orbite le 20 novembre 2004. L'autre, Ibis/Isgri, est à bord du satellite Intégral de l'Esa, lancé le 17 octobre 2002. Le développement au CEA de cet imageur pour une application astrophysique haute énergie a permis de démontrer qu'il est possible d'utiliser avec une grande fiabilité une très grande quantité de cristaux de CdTe.
Chaque cristal individuel est utilisé comme pixel d'une caméra gamma : 16 cristaux constituent un bloc *Polycell*; 128 de ces blocs sont rassemblés dans chacun des 8 modules d'Isgri. Cette construction modulaire de l'instrument présente un grand intérêt en matière de fiabilité exigée pour une application spatiale puisqu'une éventuelle panne reste "compartimentée".

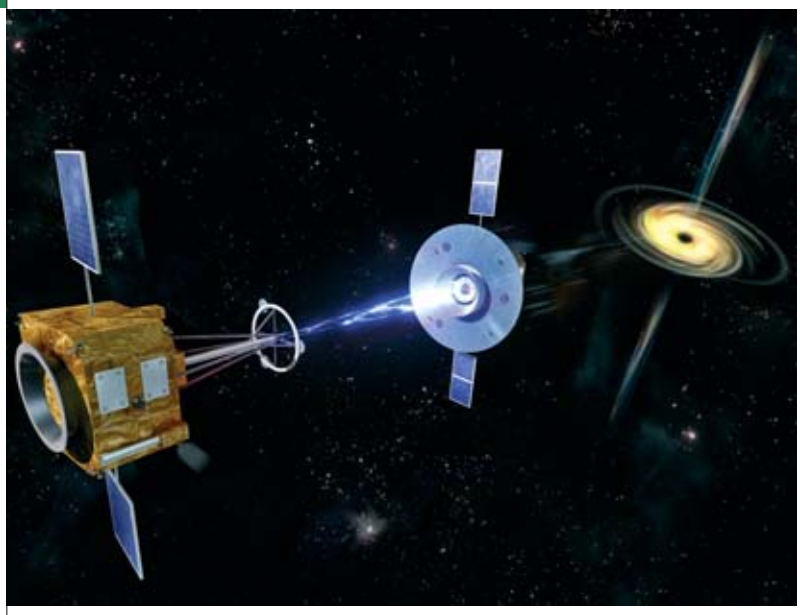
Améliorer encore les systèmes à base de CdTe

Les chercheurs développent des solutions pour améliorer les performances spectrales des systèmes de détection et les porter au niveau ultime pour ce type de matériaux, et leur faire approcher celles des meilleurs détecteurs en germanium refroidis. Les efforts portent sur l'amélioration de la fabrication des cristaux, la *cristallogenèse*. La qualité cristallographique (homogénéité) des détecteurs limite la taille des cristaux, alors qu'il est intéressant de fabriquer de gros cristaux, d'une part, pour augmenter le rendement de production – et donc diminuer le coût de fabrication –, et d'autre part, pour pouvoir fabriquer des détecteurs plus épais que quelques millimètres afin d'être capable de détecter des photons de plus haute énergie (plus le cristal est épais, plus on a de chance d'intercepter et mesurer des photons gamma de haute énergie, très pénétrants). Enfin, la fabrication reproductible de cristaux est nécessaire pour leur usage en nombre dans un spectro-imageur de grande taille.
Bien que le CdTe soit généralement limité par les difficultés liées à sa croissance cristallographique d'une part et par ses propriétés électriques d'autre part, il est possible de pousser plus avant l'étude et l'emploi de ce type de détecteurs afin d'augmenter leurs performances spectrales (qualité cristallographique, type et géométrie des électrodes, électronique associée et filtrage…) et leur **résolution spatiale**.
Pour augmenter cette dernière, il faut soit disposer de cristaux très petits, difficiles à manipuler, soit dessiner les pixels sur l'électrode d'un plus gros cristal. On peut ainsi fabriquer sur une face d'un cristal un motif de plusieurs petites électrodes individuelles et juxtaposées.



ESA/C. Carreau

Schéma illustrant la façon dont l'imageur IBIS, co-développé au CEA pour le satellite Integral de l'Esa, peut reconstruire des images d'événements comme les sursauts gamma.
Les rayons gamma perdent une partie de leur énergie dans la première couche de détection (Isgri) composée des mosaïques de détecteurs semi-conducteurs en tellurure de cadmium et qui couvre la gamme 15 keV – 1 MeV). Les rayons défléchis par diffusion Compton peuvent être absorbés par les cristaux de la seconde couche (PICsIT) qui couvre la gamme 300 keV – 10 MeV. Le masque codé de l'instrument est représenté en bleu.



Cnes

Vue d'artiste de la mission Simbol-X, impliquant deux satellites "volant" en formation. Le premier comporte une optique à rayons X de haute énergie à incidence rasante. Les photons des sources pointées seront focalisés à une trentaine de mètres au foyer du télescope, sur le plan détecteur, équipé entre autres de CdTe, positionné sur le second satellite.

L'objectif est de progresser simultanément sur tous ces points. Les recherches sont axées sur l'amélioration conjointe des performances spectrales, de la **résolution spatiale** et l'efficacité de détection à haute énergie (région du MeV). Pour ce faire, le CEA étudie les détecteurs en les caractérisant, les modélisant et les testant, en développant spécifiquement des moyens électroniques miniatures de lecture, en élaborant la technologie pour les intégrer dans des systèmes plus vastes, susceptibles de constituer de véritables gamma caméras spatiales, fiables, consommant peu d'énergie et tolérantes aux radiations.

Développements en cours et résultats acquis

Les travaux sur le CdTe entamés en 1992 au Dapnia ont conduit à la réalisation d'Isgri. Une nouvelle action de recherche et développement sur les détecteurs à base de CdTe a démarré en 2003 avec le soutien du **Cnes**. Des résultats très prometteurs ouvrent de nouvelles perspectives pour les futures expériences dans le domaine de l'astronomie des hautes énergies.

En particulier, une série de circuits microélectroniques (IDeF-X, *pour Imaging Detector Front-end*) a vu le jour et a permis de démontrer la capacité des équipes du CEA, moyennant l'emploi de détecteurs CdTe pixélisés adaptés, à atteindre des performances spectrales excellentes sans que le senseur soit refroidi. Un refroidissement modéré a également amélioré les résultats.

Les chercheurs ont réalisé des avancées en améliorant d'un facteur 5 la **résolution spectrale**, c'est-à-dire la précision de mesure de l'énergie des photons qui interagissent dans le détecteur. Le *seuil de détection* – l'énergie minimale des photons enregistrés par le détecteur – a également été amélioré en passant de 12 keV pour Isgri à moins de 2 keV pour les nouveaux prototypes. Ce dernier point est essentiel dans la mesure où il permet aux "astronomes gamma" d'étudier avec le même instrument les sources dans le domaine des rayons X, domaine où les photons sont bien plus abondants qu'à plus haute énergie. Dans le cas particulier de recherche des sursauts gamma, par exemple, détecter les photons de basse énergie augmente d'une manière significative les chances de détection et accroît celles d'observer les sursauts les plus lointains.

De nouvelles missions spatiales en perspective

Forts de ces résultats, les scientifiques du Dapnia ont pu proposer de nouvelles expériences pouvant tirer parti de l'utilisation de ces nouveaux détecteurs, en particulier pour les télescopes ECLAIRs et de la mission de vol en formation Simbol-X.

Le télescope ECLAIRs à bord du satellite sino-français SVOM (*Space based multi-band Variable Object Monitor*) est dédié à l'observation des sursauts gamma dans la bande d'énergie 4 keV - 300 keV et pourra probablement voir les premières explosions d'étoiles, lorsque l'Univers avait moins d'un milliard d'années. Cette mission, actuellement en phase A (étude de faisabilité) au Cnes et au CEA, est prévue à l'horizon 2010. Outre le Dapnia du CEA, elle implique de nombreux laboratoires : le **CESR** à Toulouse, l'**APC** et l'**IAP** à Paris et le MIT à Boston. L'instrument, placé en orbite basse, doit pouvoir détecter et localiser les sursauts gamma, en mesurer le spectre dans les bandes des photons X et gamma, alerter en temps réel la communauté scientifique de l'apparition d'un sursaut et en fournir les coordonnées. En effet, ces objets célestes très brillants sont fugaces (de quelques secondes à quelques minutes). Une analyse multi-longueurs d'ondes, employant par exemple des télescopes basés au sol ou d'autres télescopes spatiaux, impose que le télescope ECLAIRs fournisse l'alerte et transmette en moins d'une minute la position du sursaut sur la voûte céleste avec une précision de l'ordre de 10 minutes d'arc.

Pour détecter les sursauts gamma, le télescope ECLAIRs sera composé d'une ouverture à masque codée associée à une caméra gamma d'environ 1 000 cm^2 de CdTe capable de mesurer les photons à partir de 4 keV. Les détecteurs du CEA sont parfaitement adaptés à la situation et ont été proposés pour cette expérience.

Ces détecteurs pixélisés sont également bien adaptés à la mesure des photons gamma émis par les trous noirs et autres objets compacts qui pourront être mesurés avec une précision, une sensibilité et une résolution angulaire jamais égalées dans ce domaine d'énergie (quelques keV à 80 keV) par la mission de vol en formation Simbol-X. Cette mission principalement franco-italienne, à l'initiative du Cnes et sur proposition du CEA, est actuellement en phase A. Elle implique également d'autres laboratoires dont, notamment, l'observatoire de Brera Milan et le MPE Munich.

La mission sera un observatoire mettant en service deux satellites asservis volant en formation. Le premier comporte une optique à rayons X de haute énergie à incidence rasante. Les photons des sources pointées seront focalisés à une trentaine de mètres au foyer du télescope, sur le plan détecteur équipé entre autres de CdTe, positionné sur le second satellite de la formation. La mission sera propulsée sur une orbite fortement excentrique vers 2013.

En plus de leur utilisation astrophysique, les détecteurs CdTe pourraient s'avérer très intéressants pour la surveillance de l'environnement et des activités sensibles (matières dangereuses) et le contrôle des activités nucléaires (matières, essais).

> Olivier Limousin
Direction des sciences de la matière
CEA Dapnia, centre de Saclay

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 :

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

où A est l'**absorbance** du milieu traversé par le rayonnement, I_0 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.

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.

(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.

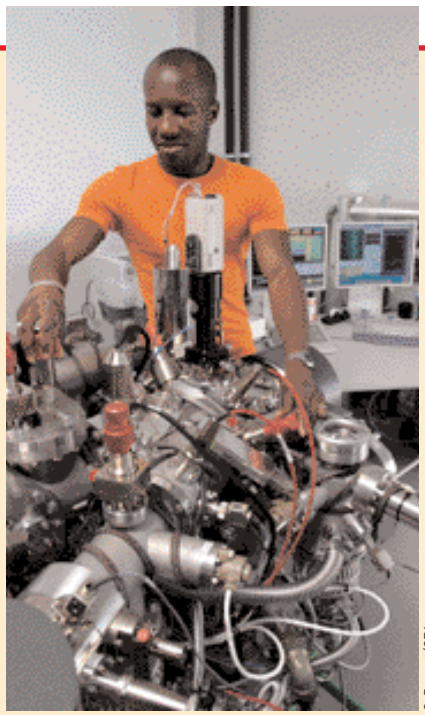
(2) À noter par ailleurs que la cristallographie à rayons X n'est pas considérée comme une méthode spectroscopique à proprement parler.

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.



C. Dupont/CEA

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 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 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 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 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/c^2 pour $W^\pm$ et 91 GeV/c^2 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

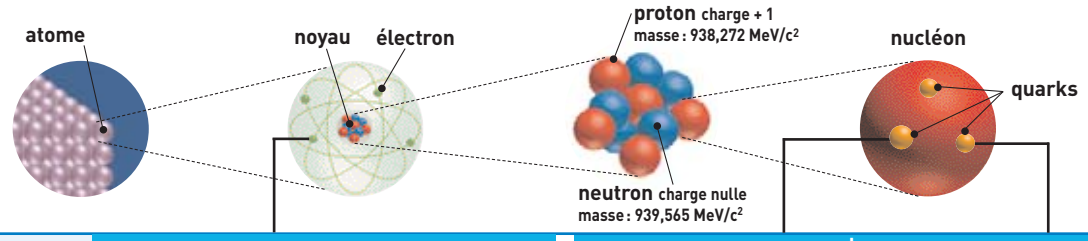
(1) La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs charges d'interaction (charge électrique, charge de couleur) ou "nombres quantiques conservés". La charge de couleur, nombre quantique qui détermine la participation aux interactions fortes, peut 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-



		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.	première famille	**électron (e)** responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est - 1 masse : 0,511 MeV/c²	**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/c²	**haut (u)** sa charge électrique est + 2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 – 4 MeV/c²
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.	deuxième famille	**muon (μ)** un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c²	**neutrino muonique** (ν_μ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique	**étrange (s)** un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 – 130 MeV/c²	**charmé (c)** un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1,15 – 1,35 GeV/c²
	troisième famille	**tau (τ)** encore plus lourd masse : 1 776,99 ± 0,29 MeV/c²	**neutrino tauique (ν_τ)** propriétés similaires à celles du neutrino électronique	**beauté (b)** encore plus lourd masse : 4,1 – 4,4 GeV/c²	**top (t)** le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 171,4 ± 2,1 GeV/c²
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.

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 *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 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'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.

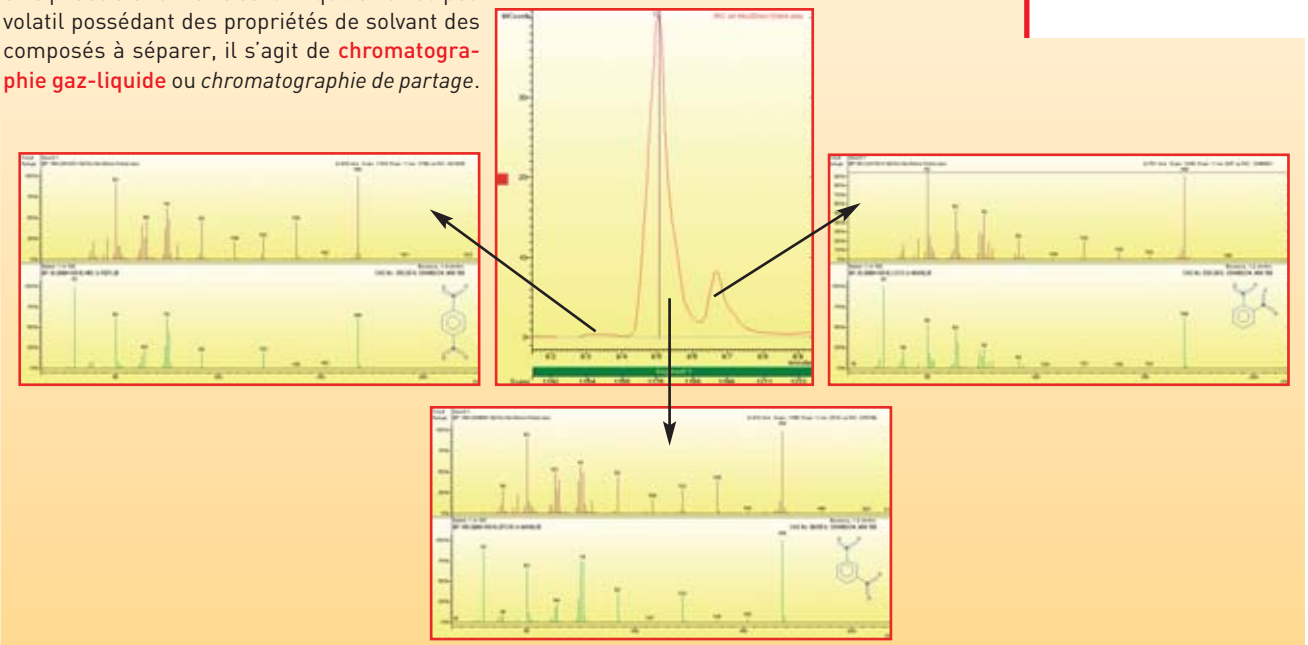


Figure.
Exemple d'utilisation combinée de la spectrométrie de masse et de la chromatographie : séparation des isomères ("molécules sœurs") d'une molécule explosive (le dinitrobenzène DNB) après prélèvements par micro-extraction en phase solide par chromatographie en phase gazeuse et détection par spectrométrie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