

LES FORGERONS DE L'IMPROBABLE

Notre bonne vieille planète (4,5 milliards d'années et des poussières) est faite dans sa quasi-totalité d'atomes datant de la nuit des temps. Les noyaux de ces atomes ont été assemblés dans le grand chaudron cosmique à partir de corpuscules créés aux premiers instants. La Terre (et tout ce qu'elle porte, nous, par exemple) est faite de ces noyaux qui nous arrivent du cosmos. Nos protons ont 15 milliards d'années. Nos pierres, nos fleurs, nos neurones gardent l'empreinte des débuts de l'univers. Nous sommes une parcelle de la mémoire du monde.

Mais la Terre a recelé jadis d'autres noyaux aujourd'hui disparus. Car ils sont éphémères. Poussière d'espace, poussière de temps. Une étoile explose et les voilà projetés dans l'univers. Ils existent l'espace d'un instant et les voilà transformés, disloqués, dispersés. Au bout d'un jour, au bout d'un an, d'une poussière de seconde ou d'un milliard d'années. Mais la Terre est si vieille ! Ces noyaux exotiques ne sont plus de ce monde.

Alors on a envie de passer le film à l'envers. De retrouver ces noyaux perdus. Nos noyaux familiers, carbone, hydrogène, oxygène ont des cousins fugaces. Ce brave

plomb si solide est le rejeton d'une longue lignée de noyaux radioactifs. Il n'est pas le seul. Alors on a envie de reconstituer les arbres généalogiques. De faire revivre les chaînes de ces ancêtres morts d'avoir enfanté. De reconstituer la matière du passé. De recréer ces noyaux éphémères, et même d'en forger de nouveaux, de plus en

plus gros, qui n'ont peut-être jamais existé, ou dont la chance d'exister est minime faute de temps. Ou, au contraire, qui n'ont pas fini de nous émerveiller par leur surprenante longévité. Mais pas inattendue. Les lois de la physique « autorisent » de tels noyaux. On ignore si la nature a pu les forger. Alors l'homme cherche à le faire.

Aussi passionnés que les chercheurs d'or, voici les chercheurs de noyaux inconnus, les forgerons de l'improbable. Il y a quelque chose de magique dans leur quête. Roland Dayras est de

ceux-là. Déroulez avec lui la fresque des noyaux exotiques, des noyaux superlourds. Plus d'un demi siècle de recherche acharnée. Le DAPNIA, à GANIL, y joue un rôle (radio)actif.

Joël Martin (SPhN et ScintillationS)



L'illustration est empruntée au « Report from the Working group on Nuclear Physics » de l'OCDE, avec l'aimable autorisation de Gary Bernstein.
 Copyright : Regents of the University of Michigan and Lucent Technologies.

Ce rapport est disponible sur le Web : http://www.oecd.org/dsti/sti/s_t/ms/prod/NUCLEAR2.pdf

Le « Courrier du Cern » vol. 39, n° 4 (mai 99) lui consacre un article pages 21 à 24.

Contact : Bernard Frois (SPhN)

BR@NCHEZ-VOUS BIEN SUR 2000 !

LA QUÊTE DES ÉLÉMENTS SUPERLOURDS

La matière rencontrée sur Terre, n'est pas représentative du reste de l'univers. Au sein des étoiles et des supernovae, règnent des températures et des pressions inimaginables. Ce sont de gigantesques réacteurs nucléaires où sont synthétisés en permanence des noyaux d'atome éphémères que l'on ne peut trouver sur Terre à l'état naturel.

En effet, notre planète est vieille de 4,5 milliards d'années, et seuls les noyaux ayant au moins cette longévité y sont encore présents.

Or on sait maintenant que des noyaux naturellement absents de notre environnement peuvent rendre de grands services. Ainsi, le cobalt et l'iridium traitent certains

cancers, radiographient de gros ensembles, contrôlent des soudures ; l'américium sert aux détecteurs de fumée. Maints noyaux instables servent de « traceurs » en recherche médicale, hydrologie, en contrôle d'usure des pièces en mouvement, en recherche pétrolière, géologie etc. On le sait car depuis près de soixante ans, les physiciens se sont échinés à recréer ces noyaux disparus dont ils ont établi et exploité les propriétés.

Mais au delà des applications, c'est notre désir de mieux comprendre la matière de notre univers qui a motivé l'énorme travail de synthèse de noyaux artificiels toujours plus lourds.

Noyau, qui es-tu ? – Un noyau d'atome est constitué de nucléons : protons et neutrons. L'atome, électriquement neutre, renferme le même nombre d'électrons que son noyau contient de protons. Ce nombre Z conditionne les propriétés chimiques de l'atome. Il est donc caractéristique de l'élément correspondant. C'est son numéro atomique. Sur Terre, on a pu identifier 89 éléments, de l'hydrogène ($Z=1$) à l'uranium ($Z=92$). Un élément donné peut avoir plusieurs isotopes selon le nombre N de neutrons que contient son noyau. Un noyau est complètement caractérisé par son numéro atomique Z et sa masse atomique $A=N+Z$ où A est donc le nombre de nucléons du noyau.

On a identifié 352 isotopes naturels parmi lesquels 285 sont stables et 67 radioactifs. Trois éléments entre $Z=1$ et $Z=92$ n'ont jamais été trouvés à l'état naturel car leurs isotopes les plus stables ont une vie bien plus brève que l'âge de la terre : le technétium ($Z=43$), le prométhéium ($Z=61$) et l'astate ($Z=85$). Ces trois éléments artificiels seront synthétisés entre 1936 et 1941. Depuis lors, plus de 3000 noyaux nouveaux ont été synthétisés, dont la majorité sont des isotopes d'éléments connus, et parmi ces nouveaux noyaux, 20 éléments nouveaux, dits superlourds, plus massifs que l'uranium ($Z=93$ à 112). Trois nouveaux superlourds découverts en 1999 s'ajoutent à cette liste, les éléments $Z=114$, 116 et 118.

Tous les noyaux créés artificiellement sont instables et vivent de quelques millièmes de seconde à plusieurs millions d'années

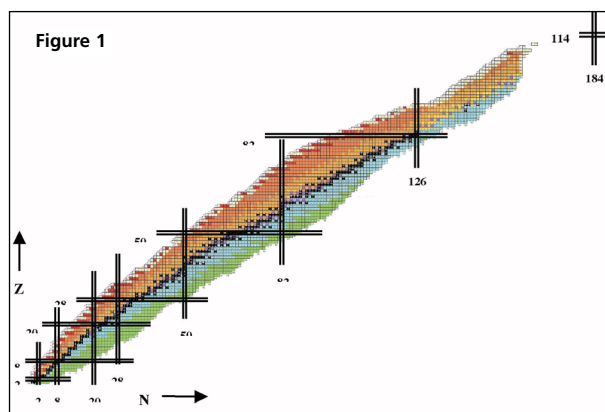
Les nucléons sont liés par l'interaction forte, cent à mille fois plus intense que la force électromagnétique (Voir *ScintillationS* n° 42) qui fait se repousser les protons du fait de leur charge positive (répulsion coulombienne). Alors que la portée (rayon d'action) de la force électromagnétique est infinie, celle de la force forte est de l'ordre de la taille du nucléon. Ainsi, l'existence d'un noyau est régie par un équilibre subtil entre une force de cohésion, l'attraction nucléaire et une force de dislocation, la répulsion coulombienne moins intense à distance égale mais de portée très supérieure. Au delà d'une certaine distance entre protons, la répulsion l'emporte sur l'attraction et le noyau ne peut s'assembler. Cela limite la taille des noyaux et le nombre de leurs nucléons car au delà d'un certain nombre de protons, aucun proton supplémentaire ne peut se lier durablement au

noyau : on a atteint la limite de stabilité en protons ; il existe de même une limite de stabilité en neutrons. Existence ne veut pas dire stabilité : parmi les quelques 3000 noyaux connus à ce jour, seuls 285 sont stables, les autres disparaissent par radioactivité (voir l'encart page 3). Si l'on porte sur un diagramme le nombre de protons des éléments naturels en fonction de leur nombre de neutrons (fig. 1), on constate que les noyaux se répartissent autour d'une ligne étroite appelée vallée de stabilité. De l'hydrogène ($Z=1$) jusqu'au calcium ($Z=20$), ces noyaux contiennent approximativement autant de protons que de neu-

trons. Dans les éléments plus lourds, pour compenser la répulsion coulombienne qui tend à disloquer le noyau, le nombre de neutrons (insensibles à cette répulsion et attracteurs forts d'autres nucléons) tend à augmenter plus vite que le nombre de protons. L'uranium-238, l'élément naturel le plus lourd, contient 92 protons et 146 neutrons.

Des modèles de plus en plus précis pour le noyau.

Une goutte d'eau s'allonge et se casse lorsqu'on l'étire avec une force plus intense que la tension superficielle* et l'attraction entre molécules. De façon un peu analogue, la répulsion coulombienne tend à étirer le noyau jusqu'à le scinder lorsqu'elle l'emporte sur la force de cohésion.



La « Charte des noyaux ». Chaque noyau est représenté par un point dont l'abscisse est N , le nombre de ses neutrons, et l'ordonnée est Z , le nombre de ses protons. Les doubles traits horizontaux et verticaux indiquent les nombres magiques en protons et en neutrons. Les noyaux stables se répartissent sur une étroite zone noire : la vallée de stabilité. Les noyaux avec « trop » de neutrons sont dans la zone bleue, zone de radioactivité b^- . Les noyaux déficitaires en neutrons se situent dans la zone saumon de radioactivité b^+ . La zone jaune est celle des noyaux radioactifs a , de plus en plus nombreux vers les valeurs élevées de Z et de N . Le mythique « îlot de stabilité » serait centré à l'intersection des double traits « magiques » 114-184, en haut à droite de la figure.

Modes de radioactivité des noyaux (liste non exhaustive)

Radioactivité β^- : Dans les noyaux « trop » riches en neutrons, un neutron se transforme en proton en émettant un électron et un antineutrino ; un noyau $A(Z,N)$ se transforme en un noyau $A(Z+1,N-1)$.

Radioactivité β^+ : Dans les noyaux déficitaires en neutrons, un proton se transforme en neutron avec émission d'un positron (antiélectron) et d'un neutrino ; un noyau $A(Z,N)$ se transforme en un noyau $A(Z-1,N+1)$. Ces deux formes de radioactivité sont dues à l'interaction faible, une des trois forces mises en œuvre dans le noyau.

Radioactivité α : un noyau $A(Z,N)$ émet un noyau d'hélium 4 (ou particule alpha : deux protons et deux neutrons) pour se transformer en un noyau $A-4(Z-2,N-2)$.

Fission spontanée (pour les noyaux les plus lourds) : le noyau se scinde en deux noyaux plus petits.

Ce modèle nucléaire de la goutte liquide** a permis bien des prédictions qui s'affinèrent lorsqu'on constata que 60% des noyaux naturels ont des nombres de protons et de neutrons pairs, 38% ont un nombre impair de protons ou de neutrons et seulement 2% ont un nombre impair de protons et de neutrons. Cela résulte du fait que protons et neutrons tendent à s'apparier deux à deux. Même perfectionné par l'introduction d'un terme d'appariement, le modèle de la goutte ne permettait de prévoir que des propriétés globales du noyau et ignorait l'arrangement des protons et des neutrons à l'intérieur du noyau. Mais cet arrangement détermine des propriétés « fines » comme l'énergie de liaison, énergie nécessaire pour éclater un noyau en nucléons dispersés. Or, pour certaines valeurs de Z et N , appelées « nombres magiques », l'énergie de liaison des noyaux correspondants est particulièrement élevée, leur conférant une stabilité particulière (cela rappelle la stabilité chimique propre aux « gaz rares », due au fait que la couche électronique périphérique de ces atomes est complète ce qui les rend chimiquement inactifs. Les nombres « magiques » de la physique atomique sont 2, 10, 18 etc., numéros atomiques des gaz rares : hélium, néon, argon etc.). Ces constatations engendrèrent le modèle en couches du noyau, faisant apparaître les nombres magiques 2, 8, 20, 28, 50, 82 et 126 (ce ne sont pas les mêmes que ceux de l'atome). Les noyaux comportant un nombre magique de protons et de neutrons sont particulièrement stables. De tels noyaux doublement magiques existent dans la

nature. Ce sont l'hélium-4 ($Z=2, N=2$), l'oxygène-16 (8, 8), le calcium-40 (20, 20), le calcium-48 (20, 28) et le plomb-208 (82, 126). On put dès lors prédire les valeurs des masses et des énergies de liaison de noyaux n'existant pas à l'état naturel, ce qui donna envie de les créer pour vérifier les prédictions. Cette confrontation entre expériences et calculs permet de perfectionner les modèles et de parvenir à une meilleure description de l'interaction nucléaire. Cette symbiose exemplaire entre théorie et expérience permet aujourd'hui de prédire très précisément de nombreuses propriétés du noyau. On prévoit actuellement l'existence d'environ 9000 noyaux dont un tiers seulement a été synthétisé à ce jour. On a appris en outre que la synthèse des éléments dans l'univers fait intervenir de nombreux noyaux instables. Ces noyaux se désintègrent essentiellement par des émissions β (voir encadré ci-contre) successives pour aboutir aux noyaux stables que nous connaissons sur Terre. Entourés de leurs électrons, ces noyaux constituent les atomes qui nous environnent et dont la structure donne leurs propriétés aux éléments chimiques correspondants. Notre substance est née des transmutations de noyaux éphémères le plus souvent extraterrestres. Voilà pourquoi les physiciens les appellent noyaux exotiques.

La course aux noyaux artificiels.

L'étape suivante fut de s'intéresser aux éléments au delà de l'uranium (transuraniens) dont aucun n'est observé à l'état naturel. En 1936, Fermi prédit que l'on pourrait créer de nouveaux éléments en bombardant un élément (Z,N) avec des neutrons, formant le noyau ($Z,N+1$) qui, par décroissance β^- , produirait l'élément ($Z+1,N$)***. Cette méthode permet de produire les transuraniens jusqu'à $Z=100$. Les réacteurs nucléaires en produisent aussi, par quantités qui varient beaucoup selon les éléments. Alors qu'on a créé de par le

monde plus de 1000 tonnes de plutonium ($Z=94$), on n'a pu récupérer que quelques millièmes de milliardième de gramme de fermium ($Z=100$). Mais les fabricants de curium Mais au delà de $Z=100$, la capture de neutrons est inopérante car les noyaux tendent de plus en plus à se casser par désintégration α ou fission spontanée à mesure que le nombre de protons augmente : le thorium-232 ($Z=90, N=142$) disparaît par fission en 14 milliards d'années, le fermium-258 ($Z=100, N=158$) en 400 millionnièmes de seconde. Pour créer des éléments plus lourds, on utilisa une autre technique, déjà rodée : bombarder une cible formée d'atomes d'un certain élément (Z_1) avec un faisceau de projectiles tous identiques, des noyaux d'un élément (Z_2), pour former, par fusion des deux noyaux (Fig. 2), l'élément de numéro atomique $Z=Z_1+Z_2$. De 1955 à 1974, on synthétisa ainsi les éléments $Z=101$ à 106.

* Les molécules d'un liquide s'attirent. Au sein du liquide, chaque molécule est attirée par l'ensemble de ses collègues qui l'entourent, mais la force d'attraction globale qui en résulte est nulle. C'est un peu comme lorsque des copains qui vous encerclent vous tirent à hue et à dia : leurs efforts s'annulent et vous ne bougez pas ou peu, autour d'une position moyenne. Mais si ceux qui sont devant vous vous lâchent, vous voilà tiré en arrière par ceux qui restent. C'est ce qui se passe pour les molécules situées à la surface d'un liquide : elles sont essentiellement attirées par leurs proches collègues qui sont à l'intérieur du liquide. Chaque petit morceau de surface du liquide est ainsi soumis à une force qui lui est perpendiculaire et qui l'attire vers l'intérieur. L'ensemble – la résultante – de ces forces de surface, c'est la tension superficielle. Cette attraction renforce la cohésion du liquide. Lorsqu'aucune autre force ne s'exerce sur le liquide (en apesanteur, par exemple), le liquide prend la forme d'une sphère au centre de laquelle convergent toutes les forces de surface. Voilà pourquoi quand on coupe les moteurs de sa fusée, le capitaine Haddock voit son whisky se mettre en boule et n'observe plus le débit des gouttes...

** Dans lequel a trempé, cela ne s'invente pas, un certain Rainwater (eau de pluie, en anglais).

*** Il en emballera plus d'un en parlant de curium (NDLR).

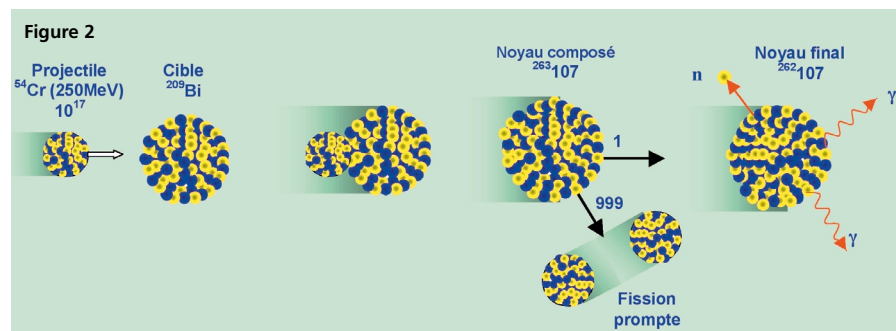


Figure 2
Fusion d'un noyau de chrome-54 et d'un noyau de bismuth-209 en un noyau à $Z=107$ protons et $N=156$ neutrons ($A=263$). Ce noyau artificiel se casse par fission rapide dans la quasi totalité des cas. Un sur mille de ces noyaux perd un neutron et se transmute en un noyau « excité » à 262 nucléons, qui se « désexcite » en émettant deux photons (radioactivité γ). Dans son état fondamental, ce noyau survit pendant environ un dixième de seconde avant d'émettre une particule α .

Cette méthode n'est simple que sur le papier. Primo, il faut donner assez d'énergie aux projectiles pour qu'ils « percent la barrière coulombienne » (répulsion électrique entre les deux noyaux). C'est le rôle des accélérateurs. Par souci d'économie, on prend comme projectile le plus léger des deux noyaux. Deusio, à l'époque, on n'accélérait les noyaux jusqu'à $Z=8$ (oxygène). Pour synthétiser au delà du fermium ($Z>100$), il fallait des cibles de $Z>92$, donc des transuraniens, que l'on ne trouvait en quantité suffisante que dans des réacteurs nucléaires. À cette époque (guerre froide) ces deux conditions n'étaient réunies qu'aux USA et en URSS. D'où une compétition féroce qui donne encore lieu à des chicanes sur l'antériorité de la découverte et la dénomination des éléments créés pendant cette période.

Des noyaux « superlourds » stables ?

Entre temps, munis des acquis nouveaux, les théoriciens avaient considérablement amélioré leurs modèles. Au milieu des années 60, le modèle en couche annonça qu'après le plomb ($Z=82$, $N=126$), le prochain noyau doublement magique devait être $Z=114$, $N=184$, au voisinage duquel les noyaux devaient avoir une stabilité remarquable. On se mit à parler d'îlot de stabilité. On prédisait alors des longévités de l'ordre du milliard d'années pour les noyaux les plus stables de l'îlot. Hélas, on remarqua très vite que ces estimations étaient ultra sensibles aux détails des calculs et pouvaient être surestimés d'un fac-

teur un million ! Néanmoins, encouragés par ces prédictions, des expérimentateurs cherchèrent pendant une dizaine d'années la trace de ces éléments dans la nature (minerais, météorites ou rayons cosmiques). En vain. Échec aussi, faute d'accélérateurs adaptés, des tentatives d'atteindre directement l'îlot de stabilité en créant les noyaux autour de $Z=114$ sans s'attarder aux noyaux précédents, particulièrement instables.

Mais, en 1974, arrive sur le marché à Darmstadt en Allemagne, l'UNILAC, première machine capable d'accélérer, à des énergies permettant la fusion, tous les ions de l'hydrogène à l'uranium. Cela permet d'utiliser des cibles de $Z<92$. Plus besoin de transuraniens. Il apparaît en outre que, contrairement à la fusion entre transuraniens et projectiles légers, la fusion avec comme cible le plomb-208, doublement magique, produit des noyaux très peu excités (voir n° 42), qui ont une chance de survie plus grande.

De 1981 et 1984 on synthétise les noyaux de $Z=107$ à 109. En 1994, c'est le tour des 110 et 111. Puis, en 1996, du 112 (voir *ScintillationS* n° 27). Mais la probabilité de fusion décroît d'un facteur 3 à chaque nouvel élément, soit en gros d'un facteur 60 000 entre $Z=102$ et $Z=112$. On est pessimiste pour le 113 et les suivants.

C'est alors, contre toute attente, qu'une équipe de Doubna annonce fin 1998, la synthèse du noyau $Z=114$, $N=175$ par fusion du plutonium-244 avec du calcium-48. Les Russes sont en fête. Ce résultat est d'autant plus remarquable que ce noyau 114 a une demi-vie d'environ 30 secondes soit cent mille fois plus que le 112 découvert à Darmstadt.

Début 1999, remplaçant la cible de plutonium-244 par une cible de plutonium-242, les Russes créent le noyau $Z=114$, $N=173$ avec une demi-vie d'environ 5 secondes. Ces deux synthèses confortent l'hypothèse de l'existence d'un îlot de stabilité au voisinage du nombre magique de protons $Z=114$, stabilité qui augmente à mesure qu'on s'approche du nombre magique de neutrons $N=184$. Quelques mois plus tard, Berkeley annonce la synthèse de l'élément 118 par bombardement de plomb-208 par du krypton ($Z=36$).

Ces derniers résultats qui restent à confirmer ont jeté l'émoi parmi les physiciens nucléaires. Cinquante neuf ans après la découverte du premier transuranien, le mythique et tant convoité îlot de stabilité est là, à portée de main. Cependant un dernier écueil subsiste : comment atteindre le nombre magique de neutrons $N=184$? Ce sera l'objet d'un autre article.

Explorer l'îlot ?

La conquête de l'îlot de stabilité s'est avérée une aventure difficile, entrecoupée de longues périodes d'incertitude. Il a fallu beaucoup d'opiniâtreté, de détermination et d'imagination aux chercheurs. Mais seule la symbiose entre progrès techniques et raffinement toujours plus sophistiqué des modèles théoriques leur a permis d'atteindre le Graal. Le DAPNIA, qui dispose à GANIL de faisceaux d'ions d'une intensité inégalée, se lance à son tour dans cette quête.

Roland Dayras (SPhN)

LES TRANSURANIENS

(Au dessus de 109, les éléments n'ont pas encore de nom. Pour le 119, ce serait bien, le Dapnium...)

Z	Nom de l'élément
93	Neptunium
94	Plutonium
95	Américium
96	Curium
97	Berkélium
98	Californium
99	Einsteinium
100	Fermium
101	Mendélévium
102	Nobélium
103	Lawrencium
104	Rutherfordium
105	Dubnium
106	Seaborgium
107	Bohrium
108	Hassium
109	Meitnerium

La mise en évidence d'un nouvel élément

Elle s'effectue en deux étapes ayant chacune ses contraintes : la production puis l'identification. Impératif : il faut récupérer l'élément synthétisé avant que ses noyaux ne meurent.

Les transuraniens, de $Z=93$ à 100 ont été identifiés après séparation chimique à partir d'une cible irradiée. Cette méthode requiert que l'élément à séparer soit produit en quantité suffisante et que sa demi-vie soit au moins de l'ordre du temps de séparation qui peut difficilement être moins d'une heure. Ces deux limites sont atteintes pour le fermium car, à partir du neptunium, la demi-vie décroît en moyenne d'un facteur 10 d'un élément au suivant. Pour procéder à l'identification des éléments suivants, il a donc fallu développer une technique de séparation beaucoup plus rapide. Cette méthode consiste à bombarder une cible mince avec un

faisceau d'ions légers ; les noyaux résultants de la fusion du projectile sont captés dans un gaz (généralement à transporter en une centaine de millisecondes, les noyaux à travers un tube vers un système de détection situé à quelques mètres. Cette méthode qui permet une identification atome par atome s'accommode de taux de production réduits. Mais elle atteint ses limites pour $Z=106$ dont la demi-vie est du même ordre que le temps de transport. D'autre part, l'efficacité du transport - facteur important lorsque le taux de production devient très faible - est difficile à maîtriser et dépend des propriétés chimiques de l'élément. Là encore, il faut de nouveaux appareils pour poursuivre la quête des éléments superlourds. Ce sont les spectromètres magnétiques (Voir « Comment ça marche »).

COMMENT ÇA MARCHE ?

La fusion nucléaire dans tous ses états

Lorsque deux noyaux se choquent, il arrive qu'ils se fondent l'un dans l'autre pour ne former plus qu'un. Cette fusion nucléaire, source de l'énergie des étoiles où le « carburant » est essentiellement de l'hydrogène et ses isotopes : deutérium et tritium, est quasiment impossible à observer dans la matière ordinaire : la probabilité pour que deux noyaux se choquent, condition sine qua non d'une possible fusion y est de l'ordre d'une chance sur un nombre avec plusieurs dizaines de zéros !

Deux raisons à cela : les noyaux atomiques sont des dizaines de milliers de fois plus petits que leurs atomes. Même si deux atomes sont collés, leurs noyaux se trouvent à une distance valant des dizaines de milliers de fois leur taille¹. Leur chance de se rencontrer est infime. Deuxième raison : même si le hasard pousse deux noyaux l'un vers l'autre, ils commencent d'abord par se repousser électriquement car leurs protons portent des charges de même signe (positives). C'est la barrière coulombienne. Il ne peut y avoir fusion que si les noyaux vont assez vite pour percer cette barrière².

Pour augmenter les chances de fusion, il faut donc rapprocher les noyaux les uns des autres ou (et) leur donner de la vitesse, comme dans les étoiles où il règne des températures dépassant la centaine de millions de degrés³. À ces températures, les noyaux, épluchés de leurs électrons, peuvent se toucher. En outre, ils vont assez vite pour percer la barrière coulombienne. Et ça marche dans les étoiles, ça peut chauffer à 150 millions de kilomètres de distance : gare aux coups de soleil !

La fusion, source d'énergie.

Sur Terre où l'hydrogène peut être extrait de l'eau de mer en quantité quasi-illimitée, il est hélas très difficile de recréer les conditions régnant au cœur des étoiles. On n'y arrive hélas que dans les bombes thermonucléaires. Malgré d'immenses efforts, on n'obtient un mini-soleil que pendant quelques secondes dans des prototypes actuels de réacteurs à fusion contrôlée (*Tokamaks*). Pour l'instant, cela coûte plus d'énergie que cela n'en produit.

Tout en persévérant sur cette filière, les chercheurs en explorent d'autres comme *le confinement inertiel* par laser (un des buts du projet « Laser Mégajoule ») : on comprime une petite

sphère d'un mélange deutérium-tritium (isotopes de l'hydrogène à un et deux neutrons) sous l'impact de faisceaux lumineux convergents d'une extrême puissance. Les noyaux de deutérium et de tritium sont catapultés les uns vers les autres et des réactions de fusion ont lieu. Mais les puissances obtenues sont encore très inférieures à celle nécessaire au déclenchement du processus de fusion.

Une troisième filière a été explorée : *la fusion catalysée par les muons*. Deux noyaux ont d'autant plus de chances de se rencontrer que leur distance initiale est faible. Or, dans la matière ordinaire, c'est le cortège d'électrons des atomes qui maintient leurs noyaux très éloignés les uns des autres. Idée : diminuer la taille des atomes en remplaçant des électrons par des muons⁴, leurs cousins lourds.

C'est possible car hormis la masse et la durée de vie, le muon ressemble suffisamment à l'électron, pour pouvoir prendre sa place dans l'atome. On obtient alors un atome muonique. Mais comme le muon est en gros 200 fois plus massif que l'électron, son « orbite » est en moyenne 200 fois plus petite. Un atome muonique est 200 fois plus petit que son cousin à électrons.

La combinaison chimique de tels atomes muoniques avec des atomes ordinaires forme des molécules « mixtes » où les noyaux sont 200 fois plus proches les uns des autres que dans les molécules classiques. La probabilité de fusion en est accrue d'un facteur énorme. Si la fusion des deux noyaux a lieu, la molécule éclate sous la chaleur produite, le muon libéré peut squatter un atome voisin et ainsi œuvrer au rapprochement de son noyau et d'un autre au sein d'une nouvelle molécule mixte. Ces noyaux pourront à leur tour fusionner. Et ainsi de suite tant que vit le muon. C'est cela la catalyse par muons.

Malheureusement, chaque muon se désintègre en moyenne au bout de deux milliardièmes de seconde et initie trop peu de fusions. Là encore, le processus coûte plus d'énergie qu'il n'en produit.

Domage ! Si le muon vivait seulement dix fois plus longtemps, ça marcherait. Les recherches continuent pour rendre les fusions plus rapides, la catalyse plus efficace. De récents progrès ont été réalisés, mais il faut encore gagner un bon facteur 2. Si l'on échoue, il ne restera plus, comme le souhaite Chris Llewellyn-Smith⁵ et nous tous, qu'à découvrir une autre particule catalysante moins éphémère...

La fusion, outil de recherche.

Dans « La quête des éléments superlourds », la fusion s'avère un outil décisif pour forger des noyaux de plus de 100 protons. Notons qu'à l'opposé des noyaux légers, deux noyaux lourds qui fusionnent consomment de l'énergie.

Comme l'indique Roland Dayras (*page 3*), en accrochant un noyau projectile à un noyau cible immobile on crée un « noyau de fusion » dont la masse est la somme de celles des deux protagonistes. Ce noyau de fusion recule en bloc dans le prolongement de la direction du noyau incident. De par la sacro-sainte loi de conservation de la quantité de mouvement (quantité de mouvement = masse x vitesse), la quantité de mouvement du noyau de fusion est égale à celle du noyau incident plus celle du noyau cible, cette dernière étant nulle puisque la cible est immobile. Étant plus lourd que le noyau incident, le noyau de fusion recule moins vite que n'arrive le projectile. Il émet quelques neutrons (ce qui change un peu sa vitesse et sa trajectoire) avant de former un noyau résiduel qui constitue l'élément étudié. Lors de son parcours dans la cible, le noyau est ralenti et sa route modifiée par les atomes qu'il rencontre. Si la cible n'est pas trop épaisse, il en émerge un peu ralenti sous la forme d'un atome ionisé (c'est-à-dire épluché d'une partie de ses électrons), et dont la direction se situe dans un cône étroit axé sur le faisceau. La charge de cet ion dépend de sa vitesse⁶ et se répartit autour d'une valeur moyenne. Il ne reste plus qu'à séparer les différents résidus de fusion et à les transporter jusqu'au système de détection. On utilise pour cela des spectromètres magnétiques.

Roland Dayras et Joël Martin (*SPhN*)

1 Voir l'édito de ScintillationS n°39.

2 Voir ScintillationS n° 21.

3 Dans un gaz ordinaire ou incandescent, la vitesse moyenne « d'agitation » des corpuscules qui le constituent est proportionnelle à la racine carrée de la température.

4 Voir le tableau des particules, n° 19.

5 Voir n° 36

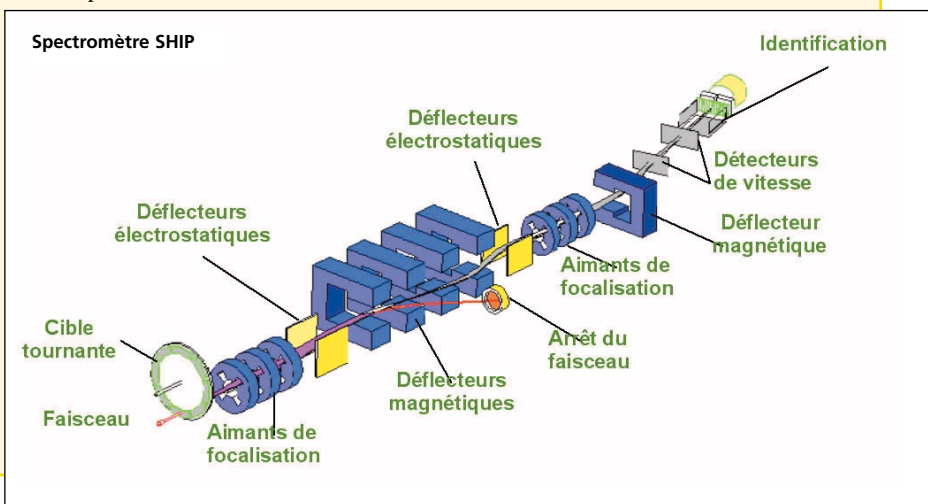
6 La charge finale de l'ion qui sort de la cible dépend du nombre d'électrons capturés par le noyau de fusion au cours de son transit dans la matière de la cible, nombre qui dépend lui-même du nombre d'interactions qu'il a eues avec les atomes de la cible. Lequel nombre dépend de la vitesse du noyau : plus il va vite, moins il a de chances de rencontrer un atome, et moins il accroche d'électrons.

Un spectromètre magnétique est un électroaimant à deux pôles où règne un champ magnétique. Les particules chargées qui y pénètrent décrivent une trajectoire circulaire dont le rayon est proportionnel à leur masse et à leur vitesse et inversement proportionnel à leur charge électrique et à l'intensité du champ magnétique. Des particules de masses identiques mais de charges et de vitesses différentes ont des trajectoires différentes ce qui permet de les distinguer. Les choses se compliquent lorsque la charge de chaque ion sortant dépend de sa vitesse, ce qui est le cas ici. Le point d'émergence d'un ion est ainsi relié à deux grandeurs statistiquement fluctuantes, ce qui rend plus ardue la tâche des physiciens voués au tri. Pour s'en sortir, ils ont deux astuces :

Les spectromètres à gaz – C'est la solution de Berkeley (spectromètre BGS). Pour relier le point d'émergence d'un ion à un paramètre unique et caractéristique du noyau de fusion, l'astuce consiste à remplir de gaz à basse pression l'espace où règne le champ magnétique. Chaque ion échange en permanence des électrons avec les atomes du gaz et acquiert une charge moyenne proportionnelle à sa vitesse et à son numéro atomique Z à la puissance $1/3$. Autrement dit, le rapport de la vitesse à la charge de l'ion, qui détermine le rayon de sa trajectoire, donc son point d'émergence, ne dépend que de son numéro atomique. On distingue ainsi facilement les ions projectiles n'ayant pas fusionné, des ions issus des noyaux de fusion puisque leurs Z sont très différents.

Les filtres de vitesse – C'est la solution choisie par le GSI à Darmstadt avec le spectromètre SHIP (*figure ci-dessous*), et Dubna (spectromètre VASSILISSA). Elle consiste à superposer au champ magnétique un champ électrique perpendiculaire. Les calculs montrent que, pour un choix convenable des valeurs respectives de ces deux champs, seuls les ions ayant une certaine vitesse qui dépend de ces valeurs ne subissent aucune force quelque soit leur charge.

Ils ne sont donc pas déviés et continuent tout droit. Les autres subissent une déviation d'autant plus grande que leur charge est élevée. Si l'on règle le rapport des valeurs des deux champs sur la vitesse des résidus de fusion, ceux-ci sont transmis en ligne droite quel que soit leur état de charge, tandis que les ions du projectile, de vitesse très différente, sont déviés. Le tri est donc facile.



LES PRIX NOBEL DE PHYSIQUE 1999

La physique des particules est à l'honneur cette année avec l'attribution du prix Nobel aux physiciens hollandais Gerard 't Hooft et Martin Veltman « pour leurs travaux déterminants sur la structure quantique dans la théorie électrofaible* de la physique » En 1969 M. Veltman accueillait G. 't Hooft pour diriger sa thèse. Ils s'attelèrent au difficile problème de la renormalisation : le problème était de faire disparaître des quantités infinies qui apparaissaient dans des calculs que requiert la théorie électrofaible proposée par Glashow, Weinberg et Salam (prix Nobel 1979).



Gerard 't HOOFT

Utilisant un logiciel développé par M. Veltman, G. 't Hooft réussit au-delà de toute espérance et les chercheurs publièrent en 1971 ce qui est resté une percée définitive dans l'établissement de la théorie électrofaible. Gerard 't Hooft sou-

tint sa thèse en 1972**. De nombreux travaux théoriques suivront, entre autres, au CEA, ceux de Itzykson, Zuber et Zinn-Justin (DSM/SPHT). On lira avec profit l'excellent article de Gilles Cohen-Tannoudji « Re-normalisation » dans le *Dictionnaire d'Histoire et de Philosophie des Sciences* aux Presses Universitaires de France.



Martin VELTMAN

L'expérience confirmera ces calculs de façon éclatante, de la chambre à bulles*** Gargamelle en 1973 au LEP (202 GeV dernier record !). Le DAPNIA y a contribué.

Yves Sacquin
(SPP et ScintillationS)

* Voir le glossaire du n° 42

** Il a eu droit à la moitié d'un Nobel pour sa thèse (NDLR)

*** Ces bulles n'étaient pas mornes, c'étaient des bulles modernes (NDLR)

Va-et-vient • Va-et-vient • Va-et-vient •

Août 1999 – Michel Chazalon (SED) et Jean Poinsignon (SEI) partent en retraite. Qu'elle soit belle mais revenez nous voir. Armand Sinanna (SEA) passe annexe 1. Toutes nos félicitations. Philippe Marlet passe de la DTA au SDA. Bienvenue au club !

Septembre 1999 – Deux congés sans solde pour Danielle Fahy (SED) et Pascale Beurtey (SEI). Bonne chance dans vos nouvelles activités. Bernard Delaître (SEI) s'en va en retraite. On la lui souhaite bien agréable. Philippe Fazilleau nous vient de Cadarache et rejoint le STCM. Chouette !

Octobre 1999 – Notre diva Monique Soyer (DIR), Nico De Botton (SPP)*, Jean Laugier (SPP) et Hubert Tirel (SDA) partent en retraite. Alain Joudon (SEI) est muté à Cadarache. Meilleurs souhaits à tous ces partant(e)s. Jean-Christian Toussaint (SGPI) passe annexe 1. Vives félicitations.

Novembre 1999 – Malgorzata Tkatchenko succède à Claude Curé à la tête du SGPI. Christian Brouzeng-Lacoustille est muté du STE (Service Technique du CE Saclay) au SDA. Christophe Coquelet est recruté au SEI et Sébastien Herlant au SED. Retour au ber-

caill et au DAPNIA/DIR pour Philippe Leconte en provenance de l'Institut Laue-Langevin (ILL). La plus cordiale bienvenue à tous ces arrivant(e)s. Yves Terrien (SPhN) est muté à la DSM/DIR. Bonne chance, Yves, dans tes nouvelles fonctions. Au revoir et à bientôt, on espère, aux deux retraités du mois : Jean-Marie Hisleur et Walter Schiarini. Que vos nouveaux horizons vous combent.

* Message personnel : « Té, salut, Nico ! Ce nigaud est un sacré chroniqueur » !

LAURIERS DU DAPNIA

Le DAPNIA est fier de faire savoir que la médaille d'argent 1999 du CNRS pour la Physique a été décernée à Marc Virchaux (SPP).

Cette récompense lui a été attribuée pour ses travaux en chromodynamique quantique (la théorie de l'interaction forte, voir *ScintillationS* n° 42) et ses contributions originales dans le domaine de la réalisation de détecteurs et de la conception d'expériences, notamment pour Atlas auprès du LHC.

Bravo, Marc ! Écrivez-nous vite quelque chose sur l'habile détecteur en nous parlant de groupes avec plein de chromodynamique !

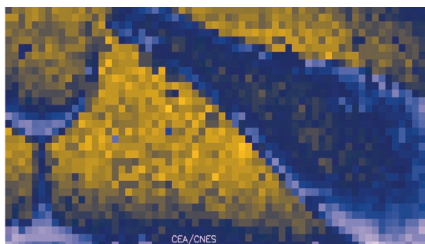
Le prix Félix Robin 1999 est décerné par la Société Française de Physique (SFP) à Michel Spiro – qui vient de passer le relais à Pascal Debu à la tête du SPP – pour « son rôle majeur dans plusieurs grandes expériences en physique des particules » (voir le Bulletin de la SFP, n°121 octobre 1999).

Citons-en trois : UA1 au CERN a mis en évidence les premiers « bosons intermédiaires » W_{\pm} et Z^0 de la force faible (voir *ScintillationS* n° 19 et 42) ; GALLEX au Gran Sasso a mesuré avec une sensibilité sans précédent le « déficit » en neutrinos solaires (n° 5, 19, 22) ; EROS (n° 16, 31, 38, 43) a observé des phénomènes de loupe gravitationnelle provoqués par des corps célestes (« Machos »), sans doute des étoiles avortées, et infirmé l'hypothèse que la « matière cachée » de l'Univers serait surtout faite de ces Machos.

Bravo Michel ! Écrivez-nous vite quelque chose sur les faibles masses, les faits cosmiques !

LA PREMIÈRE IMAGE D'ISGRI

La charge utile du satellite XMM comporte un télescope gamma, IBIS, auquel le SAp fournit ISGRI, un plan de détection formé de 8 caméras gamma indépendantes. Nous venons, après bien des vicissitudes, de réaliser la première de ces caméras.



Désolés pour le comité éditorial de ce journal : ce « modèle de qualification » est une caméra gamma de nouvelle génération sans scintillateur. Cette technologie sera peut être utilisée demain dans les hôpitaux. Elle nous a permis de produire notre première gammagraphie (photo du haut).

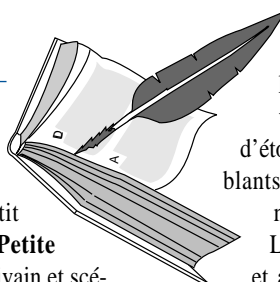
Cette image est une première mondiale que le groupe de travail scientifique d'INTEGRAL a dignement saluée (photo du bas) en soulignant l'étendue du chemin parcouru par le groupe de Saclay depuis la sélection des instruments en 1995. Ce succès repose sur un énorme travail des équipes des SAp, SIG, SEI, SED, SGPI, du LETI et de la SAGEM.

Récompense de dernière heure, XMM est sur orbite depuis le 10 décembre.

François Lebrun (SAp)

PLUME DU DAPNIA

Michel Cassé (SAp) signe avec l'astrophysicienne Élisabeth Vangioni-Flam un ravissant petit livre chez Odile Jacob : « **Petite étoile** », joliment illustré par l'écrivain et scénariste Jean-Claude Carrière. Une petite étoile, Star, naît de Cocon, nuage de poussières interstellaires et, telle le Petit Prince, s'en va découvrir le monde, son monde, la Voie Lactée, notre galaxie. Géantes bleues ou



rouges, naines blanches ou sombres, comètes à la chevelure de lumière, pulsars-derives, cœurs de neutrons d'étoiles défuntes, trous noirs troublants et boulimiques et finalement notre Terre jalonnent sa quête.

La petite étoile, parfois chagrine et apeurée, le plus souvent émerveillée, apprend le cosmos, les atomes, l'eau, la vie. Nous apprenons avec elle et avec notre âme d'enfant. Ce conte scientifique et philosophique est un bien joli poème.

CHAUD ET FROID SUR LES ANNEAUX DE SATURNE

Saturne, la sixième planète du système solaire est entouré d'une série d'anneaux formés de cailloux de glace. L'ensemble tourne sur lui-même avec une période d'environ 10 heures. C'est la durée d'un « jour saturnien ». Il y a, comme sur Terre, alternance du jour et de la nuit pour tout point du système selon qu'il « voit » ou non le Soleil ; il se passe pour les grains de glace des anneaux la même chose que pour des objets terrestres : ils se réchauffent la journée au soleil et se refroidissent dans l'ombre de la nuit.

Profitant d'une disposition favorable Soleil-Terre-Saturne, la caméra infrarouge CAMIRAS du SAp montée sur le télescope CFH* a pu récemment mesurer la différence de température qui en résulte** : elle est de 3 degrés. Cette mesure va permettre de mieux connaître l'inertie thermique de ces gravats cosmiques qui dépend de leur état de surface, et en déduire leur taille moyenne. C'est un excellent prélude aux futures observations de la sonde CASSINI-CIRS.***

Le SAp est impliqué dans cette collaboration. Contacts : Cécile Ferrari, Philippe Galdemard, Pierre-Olivier Lagage et Éric Pantin. L'astrophysicien n'use pas de sabir pour parler de Saturne (NDLR)

Inertie thermique des particules des anneaux de Saturne

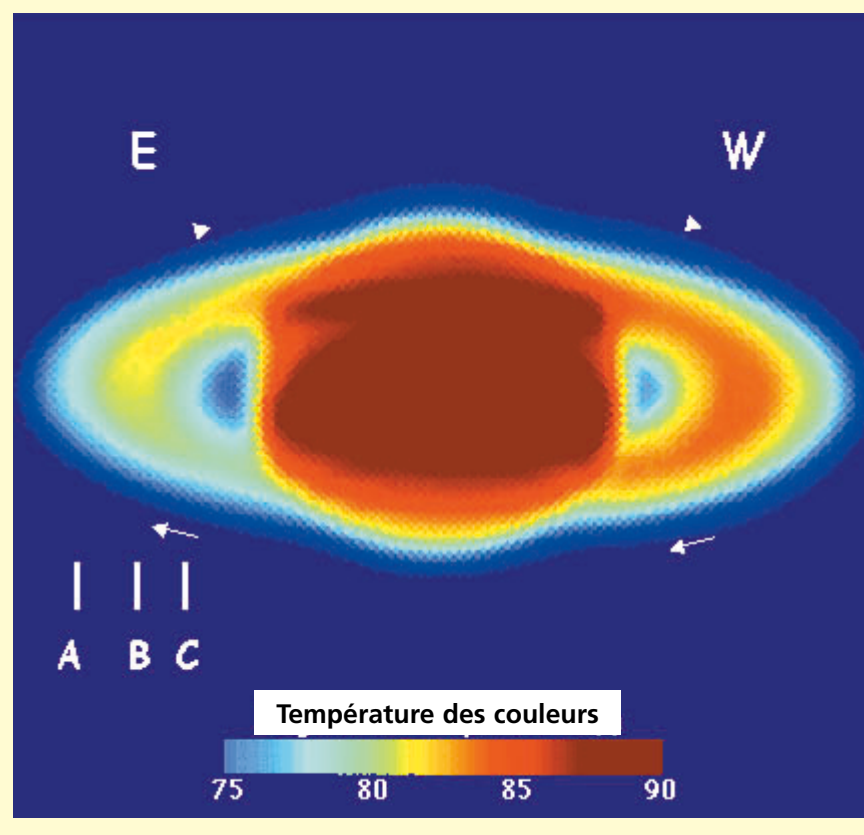


Image en fausses couleurs de Saturne et de ses anneaux obtenue en infrarouge (20,5µm) par CAMIRAS le 29 juillet 1999. Chaque couleur correspond à une température. Le rectangle d'arc-en-ciel donne l'échelle.

Les trois lettres A, B et C correspondent aux trois anneaux principaux. Sur cette image, la caméra voit la face de Saturne éclairée par le Soleil et le plan des anneaux par en dessous (schéma). L'ensemble tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. La partie des anneaux à gauche de la photo (en Est) fait face à la partie de la planète qui émerge de l'ombre.

C'est pour elle le lever du Soleil. En Ouest (à droite), les anneaux finissent leur journée et voient le Soleil se coucher. On voit bien leur réchauffement diurne d'Est en Ouest : l'anneau A passe du bleu clair au vert (en gros, de 77K à 80K), le B, du jaune au rouge (82K à 85K) et le C, du bleu-vert au jaune-orange (79K à 82K).

CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Joël FELTESSE

COMITÉ ÉDITORIAL : Joël MARTIN (porte-parole),

Claire ANTOINE, Pierre BORGEAUD, François

BUGEON, Rémi CHIPAUX, Nathalie COLOMBEL,

Thierry FOGLEZZO, Elizabeth LOCCI, Marc PEY-

ROT, Franck QUATREHOMME, Yves SACQUIN,

Angèle SÉNÉ, Thierry STOLARCZYK,

Christian VEYSSIÈRE

SECRÉTAIRE DE RÉDACTION : Maryline BESSON

MAQUETTE : Christine MARTEAU

MISE EN PAGE : TOTEM

CONTACT : Joël MARTIN

Tél. 01 69 08 73 88 – Fax : 01 69 08 75 84

E.mail : jmartin@cea.fr

* CFH : Canada France Hawaiï

** Les chercheurs ont activé leurs puces pour prendre la température de l'anneau (NDLR)

*** CIRS : Composite Infrared Spectrometer (voir ScintillationS n° 32 et 33)