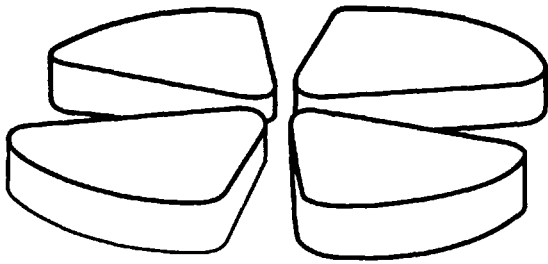




FR9603565

# GANIL



Section INIS  
Doc. enreg. le : 1.2.13/95  
N° TRN : FR 9603565  
Destination : I,I+D,D

## NOYAUX EXOTIQUES ET FAISCEAUX RADIOACTIFS

par Ph. CHOMAZ

GANIL, BP 5027, 14021 Caen, France

GANIL P 96 24

# Noyaux exotiques et faisceaux radioactifs

Les noyaux dit "exotiques" sont tous les noyaux qu'il faut recréer en laboratoire afin de pouvoir les étudier. En effet leur durée de vie est trop courte -par rapport à l'âge de la terre- pour qu'il en subsiste aujourd'hui suffisamment sur terre. Ils ont donc pour beaucoup échappé jusqu'ici à notre étude. Dans les années futures les chercheurs vont disposer, entre autre au GANIL à Caen avec le complexe SPIRAL, de faisceaux de noyaux exotiques et pourront ainsi étudier de nouveaux types de réactions nucléaires pour mieux comprendre le noyau de l'atome.

par Ph. CHOMAZ

**Le noyau des atomes :  
tout un monde microscopique.**

L'atome fut d'abord une idée de philosophe, celle de Démocrite qui dans sa quête de l'explication du monde émit l'idée que la nature était faite d'atomes dont il existait un petit nombre d'espèces s'organisant différemment selon les objets. Mais il supposa aussi que ces atomes étaient l'élément ultime, indivisible, fondamental; il n'en est rien, et d'objet philosophique l'atome devint objet de science. La taille de l'atome :  $\approx 10^{-10} m$ .

En 1911 Rutherford découvrait le noyau de l'atome, point de matière cent mille fois plus petit que l'atome lui-même mais concentrant presque toute sa masse.

On apprendra avec Chadwick, quelques années plus tard, que ce "point de

matière" est un assemblage de protons et de neutrons. On comprit alors que les noyaux étaient en fait tout un monde.

Ainsi était née la physique nucléaire dont le but était de comprendre le noyau, le coeur de tous les atomes et de tous les ions, le combustible de notre soleil et de toutes les étoiles de notre univers, le prototype du centre des supernovae et des étoiles à neutrons, une des clefs des mystères de la genèse des éléments...

Bien que connu et étudié depuis près de 100 ans, le noyau, cette infime poussière aux limites de nos possibilités d'investigation, se révèle aujourd'hui comme un univers d'une complexité extrême et comprendre sa structure demeure l'un des enjeux de la recherche fondamentale.

**Le royaume de la mécanique  
quantique.**

*"Si l'objet de la science n'est pas un obstacle à surmonter, un problème à résoudre, que sera-t-il donc?"  
G.Canguilhem*

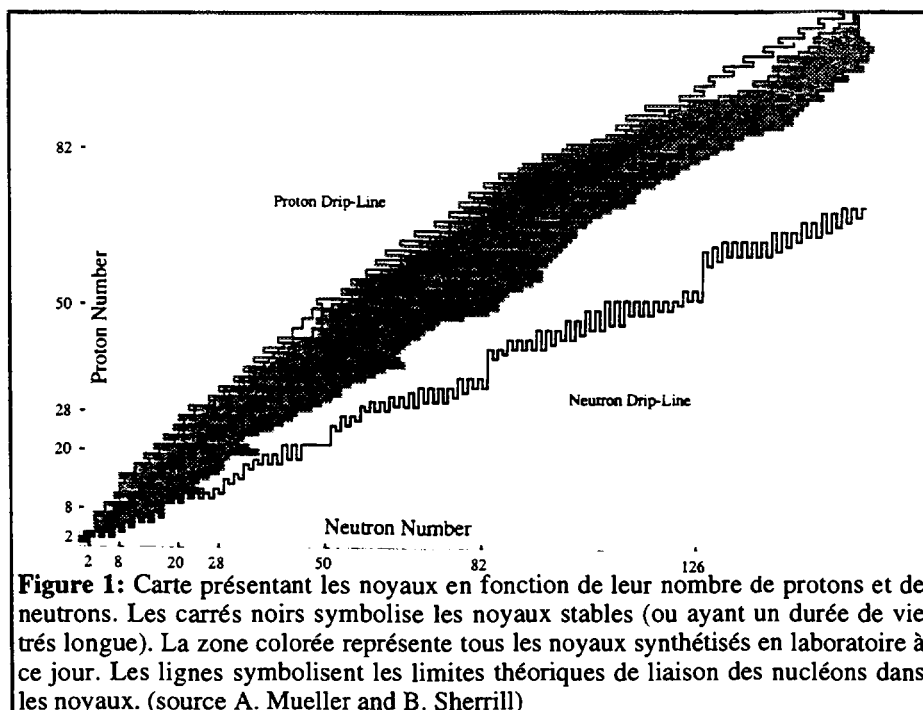
Nous savons aujourd'hui, que les protons et les neutrons forment une matière d'une densité extrême. En effet, un cube de 1 cm de côté rempli entièrement de noyaux, pèserait près de 300 000 000 de tonnes. On ne retrouve de telles densités que dans le coeur des supernovae et des étoiles à neutrons.

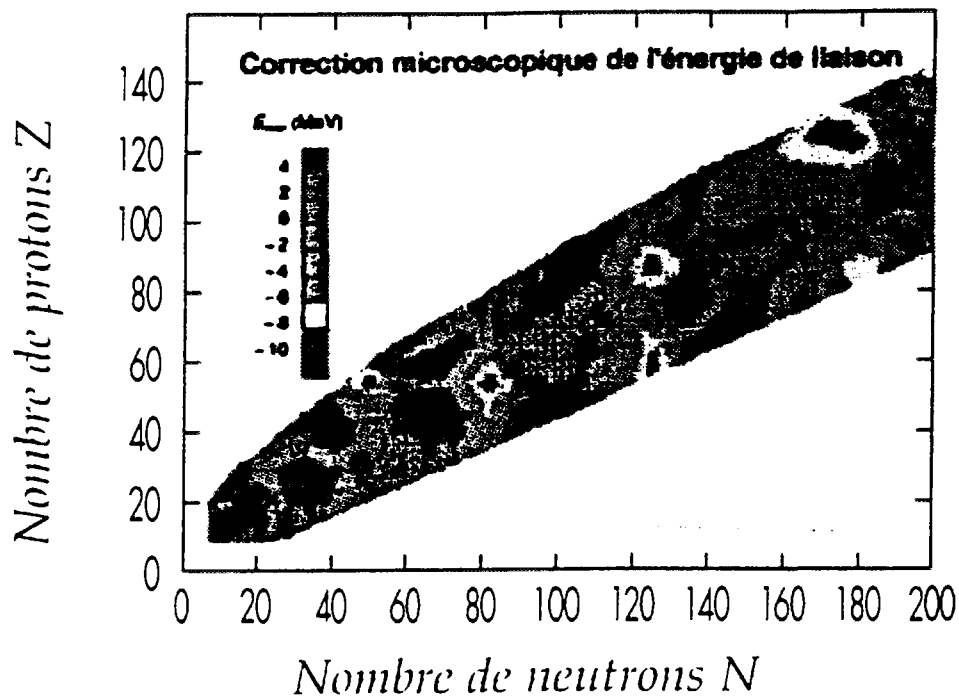
Dans le noyau règnent des forces colossales ("l'interaction forte") capables d'arrêter en moins de quelques milliardièmes de micromètres un nucléon lancé au tiers de la vitesse de la lumière. Cette interaction forte est  $10^{40}$  plus intense que la gravitation qui a capturé et qui maintient pourtant la terre autour du soleil. Un nucléon d'une masse de quelques  $10^{-24}$  g est maintenu dans le noyau par une force de plusieurs tonnes-force (milliers de Newton).

Au royaume de l'infiniment petit, les lois physiques ne sont pas celles qui régissent la vie quotidienne: ce sont les lois de la mécanique quantique qui s'appliquent introduisant leur ordre dans ce monde microscopique et imposant "la nécessité de dépasser les concepts familiers" (B. D'ESPAGNAT).

**La vallée de stabilité.**

On peut classer tous les noyaux sur une sorte de carte donnant en abscisse le nombre de protons et en ordonnée le nombre de neutrons. C'est la carte des isotopes. Le nombre de proton correspondant au numéro atomique définit le nom de l'élément considéré. Par exemple tous les noyaux qui ont 8 protons sont des noyaux d'oxygène. Les espèces différant seulement par leur





**Figure 2: Combat des forces et corrections quantiques.** Les protons étant chargés positivement ils se repoussent. Pour comprendre comment ils pouvaient être liés dans un noyau atomique il a fallu invoquer une nouvelle force très attractive: l'interaction forte. Nous avons aussi observé que l'attraction forte entre proton et neutron est plus forte que l'interaction entre nucléons de même type. Ainsi il est a priori plus favorable d'avoir dans un noyau autant de protons que de neutrons. Toutefois, le rôle respectif des protons et des neutrons dans les noyaux et dans les réactions nucléaires est encore partiellement inconnu.

L'interaction électrostatique est de portée infinie, sa répulsion est donc cumulative : plus l'objet est chargé plus les charges se repoussent. Par contre, l'interaction nucléaire est à courte portée. Chaque nucléon n'étant attiré que par ses proches voisins il n'y a pas d'effets cumulatifs et la force qui maintient un nucléon à l'intérieur du noyau dépend peu de la taille (et donc de la charge). Toutefois la cohésion des noyaux provient d'un jeu subtil entre cette répulsion électrostatique et l'attraction entre nucléons due à l'interaction forte. Quand le nombre des charges positives (protons) augmente, la répulsion électrostatique peut finir par l'emporter sur l'attraction forte et casser le noyau.

L'arbitre de ces délicats jeux d'équilibre c'est la mécanique quantique.

Ses règles "inhabituelles" changent les conditions de stabilité. Par exemple, elle impose aux nucléons localisés à l'intérieur du noyau d'avoir un mouvement incessant : le mouvement de point zéro dû au principe d'incertitude d'Heisenberg. Cette agitation réduit grandement la cohésion des noyaux. De plus les nucléons étant des fermions, d'après le principe d'exclusion de Pauli, deux nucléons de même type ne peuvent se trouver dans un même lieu avec la même vitesse. L'agitation des nucléons dans le noyau est donc augmentée et la liaison du système de nouveau réduite. Cet effet sera magnifié si il y a dans le noyau un excès de particules de même type (proton ou neutron). Quand cet excès est très important le noyau peut même devenir instable, les nucléons surnuméraires s'échappant rapidement de celui-ci. Ainsi peut-on définir les limites de liaison des noyaux riches en protons ou en neutrons.

De plus la mécanique quantique impose que les systèmes possédant des nombres bien précis de protons ou de neutrons aient une stabilité accrue : ce sont les nombres magiques (voir fig. 4). Ces contributions à la liaison nucléaire ont reçu le nom de correction de couche. Ainsi la mécanique quantique augmente-t-elle la stabilité de certains noyaux de charge élevée que la répulsion électrostatique devrait faire exploser: Ce sont les noyaux super-lourds. De même elle peut augmenter la cohésion d'un noyau doublement magique tel l'étain 100 pourtant proche de la limite de liaison des noyaux riches en protons.

La figure montre les corrections de couche à l'énergie de liaison en MeV (million d'électron volt) calculées par P. Möller et R. Nix.

nombre de neutrons sont des isotopes d'un même élément. Pour reprendre l'exemple des noyaux d'oxygène on a pu observer (à ce jour) des isotopes possédant entre 12 et 24 nucléons c'est à dire que le nombre de neutrons d'un oxygène peut varier (en laboratoire) entre 4 et 16.

Sur la carte des isotopes, on indique souvent le long de la troisième dimension une profondeur illustrant le

degré de stabilité des isotopes: leur énergie de liaison. C'est l'énergie minimale qu'il faut fournir pour séparer les uns des autres tous les nucléons d'un noyau. Le paysage ainsi formé s'appelle la "vallée de stabilité". Les états les plus stables correspondent au fond de la vallée de stabilité, les noyaux les plus instables étant sur les "flancs" des "collines" qui la bordent. On observe que les noyaux les plus fortement liés sont ceux qui ont un nombre de neutrons égal (ou légèrement

supérieur dans le cas des noyaux les plus lourds) à celui des protons. Par exemple l'oxygène 16 qui a 8 protons et 8 neutrons est le plus stable des 12 isotopes connus d'oxygène. Il occupe le fond de la vallée de stabilité. Les 11 autres isotopes sont sur les versants de part et d'autre de la vallée. Ce sont des isotopes exotiques de l'oxygène.

**Des noyaux exotiques**

La terre n'est que scories refroidies des hauts fourneaux cosmiques, Big-Bang, soleils, supernovae, ..., où tous les éléments ont été synthétisés. Malheureusement sur notre planète, qui a déjà quatre milliards d'années, seuls survivent quelques centaines ( $\approx 300$ ) d'espèces nucléaires parmi les milliers (plus de 3000 sont théoriquement prédites) qui peuplent l'univers.

Les noyaux qui sont suffisamment stables pour qu'on les trouve encore aujourd'hui sur terre ont de nombreuses caractéristiques communes:

- l'énergie qui lie chacun de leurs nucléons est forte et pratiquement indépendante du noyau considéré. Il peuplent en fait le fond de la vallée de stabilité.

Les noyaux que l'on ne trouve pas naturellement sur terre en quantité appréciable car leur durée de vie est trop courte pour leur avoir permis d'y subsister, sont les noyaux exotiques. Leur temps de vie varie entre moins d'une milliseconde et plusieurs années car ils se transforment grâce à la radioactivité en espèces plus stables rejoignant ainsi le fond de la vallée de la stabilité. Pour les étudier, il nous faut d'abord les recréer en laboratoire.

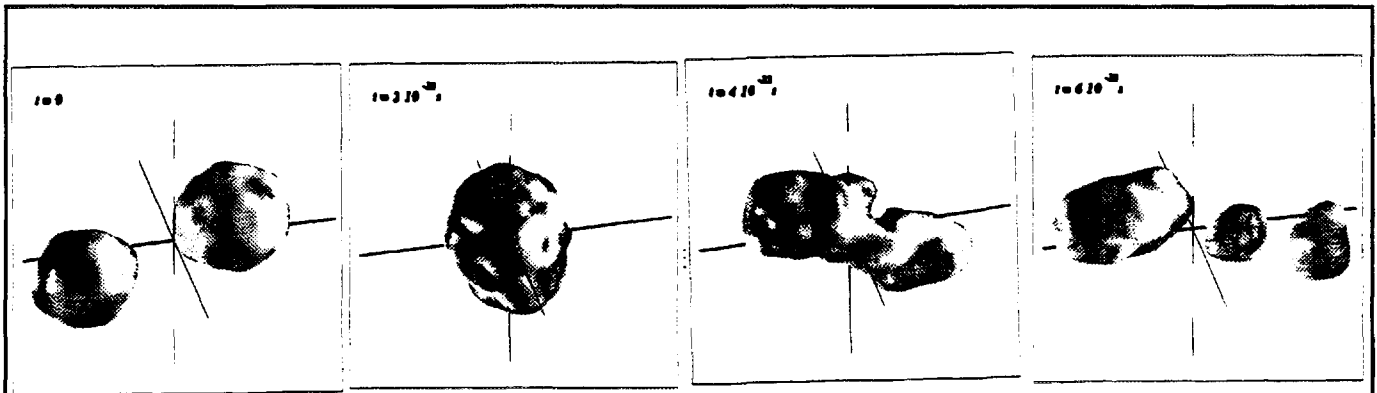
Les noyaux exotiques ont des caractéristiques beaucoup plus variées que celles des noyaux stables:

- certains sont à peine liés. Un rien peut suffire à les briser. Dans ces

stabilité. Ces noyaux devraient nous aider à comprendre le rôle respectif des protons et des neutrons.

- certains noyaux exotiques présentent des régions où la densité de matière est très faible (les noyaux à halo), pratiquement 10 fois plus faible que la densité normale. On peut ainsi étudier la matière nucléaire dans des états nouveaux.

Notre connaissance des noyaux stables, terrestres, ne nous permet pas par extrapolation de comprendre les noyaux exotiques. Ceci démontre que l'on ne connaît encore aucun noyau dans sa totalité. L'étude des propriétés des noyaux exotiques permet d'obtenir certaines clefs pour la compréhension du noyau des atomes. C'est pour cela que de



**Figure 3: Mais comment crée-t-on des noyaux nouveaux?** En ajoutant ou en enlevant des nucléons à un noyau, en le cassant en fragments ou en le fusionnant avec un autre noyau, on peut en laboratoire synthétiser des milliers d'espèces nucléaires nouvelles.

Par exemple, on peut accélérer de gros noyaux à des vitesses proches de la vitesse de la lumière ( $v \approx c/2$ ) pour les faire se fragmenter en les projetant sur une cible. Au hasard de ces réactions peut être créé le noyau exotique à étudié. Toutefois, sur ces dizaines ou centaines de millions voire milliards de collisions, il n'y en a souvent qu'une qui créera le système recherché. Tout l'art du physicien sera de réussir à isoler cette aiguille dans la botte de foin des résultats expérimentaux. C'est en employant cette méthode que de nombreux noyaux ont été synthétisés, par exemple plus d'une centaine de noyaux nouveaux ont été ainsi mis en évidence au GANIL à Caen au cours des dix dernières années.

La figure montre en réalité virtuelle une simulation (sur ordinateur) de ce type de collision. (Source A. Guarnera et al).

- leur composition en terme de mélange de neutrons et de protons ne subit que de faibles variations d'un élément à l'autre, ils occupent une seule ligne sur la carte des isotopes: le fond de la vallée de stabilité.

- la densité de protons et de neutrons qui règne à l'intérieur de ces noyaux est pratiquement toujours la même. Il y a un nucléon tous les 2.5 fm (i.e.  $2.5 \cdot 10^{-15}$  m).

noyaux on peut alors étudier réellement comment les nucléons du noyau sont liés car la faible liaison donne une plus grande importance à chaque phénomène qui participe à la construction des noyaux (voir figure 1).

- leur composition en terme de mélange de neutrons et de protons est très variée. On explore ainsi toute la carte des isotopes et plus seulement le fond de la vallée de

nombreux chercheurs de par le monde (Europe, États Unis, Japon) concentrent leur efforts pour créer et étudier les noyaux exotiques (voir figure 2).

*"Ce qu'on acceptait hier est remis à la meule aujourd'hui. La colossale machine science ne se repose jamais" V.HUGO*

## L'aventure des noyaux exotiques.

Cette aventure a commencé en 1934 avec la découverte de la radioactivité artificielle (et ainsi des premiers noyaux exotiques) par Frédéric et Irène Joliot-Curie. Depuis les découvertes n'ont cessé de se succéder permettant de faire progresser notre connaissance des propriétés du noyau.

Cette aventure s'inscrit dans la quête du savoir, de l'explorateur au chercheur, de l'aventurier à l'astronaute, ... En explorant des mondes nouveaux, en confrontant nos idées à une réalité plus vaste, en recherchant des cas exceptionnels mettant un phénomène en lumière, ... ils cherchent à mieux appréhender notre propre monde.

Ainsi étudier l'exotisme des noyaux n'est pas seulement connaître leur existence, leur masse, leur durée de vie, leur mode

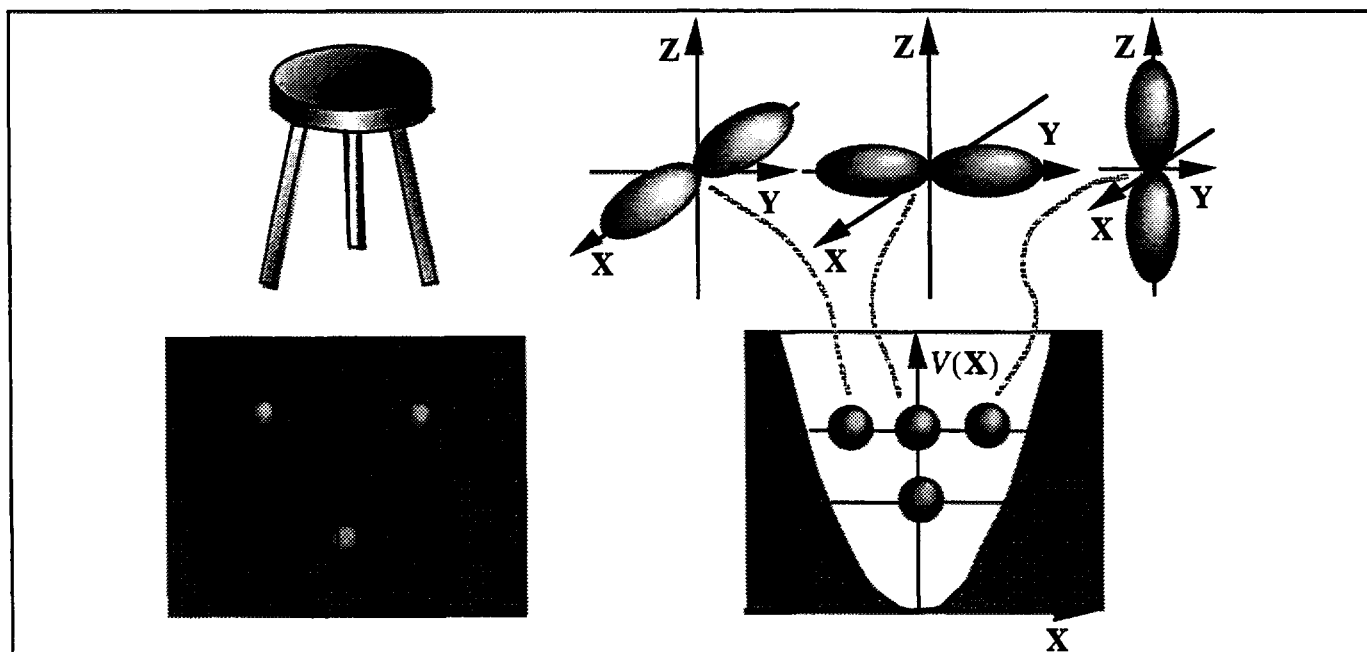
de désintégration, leur forme, la répartition de leurs constituants, leurs états excités, leurs diverses propriétés, ... c'est aussi et avant tout un moyen de connaissance: tout comme on crée, en recherche médicale, des cellules anormales afin de définir ce qui est de l'ordre du normal, tout comme on va chercher des pierres de lune pour mieux appréhender l'histoire de notre système solaire et donc de la terre... le détour par l'étude des noyaux exotiques permet de qualifier les états stables, d'enrichir la compréhension des phénomènes, de tester les prédictions des modèles théoriques.

### Magique et exotique! Paradoxe Étain 100.

Les limites de l'exotisme et donc les limites de la liaison nucléaire sont aujourd'hui recherchées activement. C'est ainsi que les premiers noyaux d'étain 100 ont pu être récemment identifiés simultanément aux laboratoires GSI

(Darmstadt-Allemagne) et GANIL (Caen-France). Ce noyau était recherché depuis plusieurs dizaines d'années car il est supposé être doublement magique (voir figure 2 et 4).

Parmi les différents noyaux magiques, peu sont à la fois magiques en protons et neutrons et encore moins ont un nombre égal de protons et de neutrons. On n'en dénombrait que 4 ( ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$  et  ${}^{56}\text{Ni}$ ) auparavant. Depuis 1994, l'étain 100, possédant 50 neutrons et 50 protons, est désormais le cinquième. Toutefois c'est le seul à posséder le double aspect à priori paradoxal d'être à la fois doublement magique et fortement exotique. C'est ce paradoxe qui passionne les physiciens: Les nombres magiques existent-ils encore aux confins de la stabilité?



**Figure 4: Des nombres magiques:** Dans la vie on remarque souvent des nombres qui jouent des rôles particuliers. Sans vouloir parler des anciennes croyances on sait tous qu'un tabouret à trois pieds n'est jamais bancal, qu'une structure nid-d'abeille hexagonale est d'une solidité étonnante, qu'un ballon de football est formé de 12 pentagones et 20 hexagones (cousus ensemble bien sûr!)

En physique ce n'est pas vraiment différent: certains nombres, appelés souvent nombres magiques, procurent une grande stabilité aux systèmes considérés. La preuve? On a découvert récemment des molécules en forme de ballon de football (qui a dit de tabouret?). En particulier, on sait depuis longtemps qu'il suffit de changer le numéro atomique d'une unité (i.e. un petit électron et un petit proton en plus ou en moins) pour passer d'un gaz rare inerte à un élément fortement réactif. C'est la mécanique quantique qui nous a fourni la clef du mystère des nombres magiques de l'atome. Les électrons sont rangés sur des couches successives. Ces couches pouvant accueillir un nombre maximum d'électrons, l'atome acquiert une grande stabilité chaque fois qu'une couche est pleine. Il en va de même pour les protons et les neutrons dans les noyaux pour lesquels les nombres magiques (sphériques) 2, 8, 20, 28, 50, 82 et 126 correspondent à des remplissages de couches majeures.

Le rapport entre les trois pieds des tabourets et les nombres magiques des noyaux et des atomes? Ces nombres sont avant tout déterminés par des propriétés géométriques de notre espace. Il faut trois pieds à un tabouret car il faut trois points pour définir un plan et la deuxième couche (1p) des noyaux et des atomes contient au maximum trois particules identiques car il n'y a que trois vecteurs indépendants dans notre espace (voir figure). C'est à cause de ces propriétés géométriques que la forme des noyaux est intimement liée aux orbitales et aux nombres magiques

## Masse et énergie

L'une des propriétés importantes d'un noyau est sa masse. En effet, depuis qu'Albert a énoncé sa formule magique:  $E=mc^2$ , nous savons que cette masse nous informe directement sur l'énergie qui fait la cohésion des noyaux. C'est donc un test important de notre compréhension de la structure nucléaire. C'est pour cela que de nombreuses masses de noyaux exotiques ont été déterminé au cours des dernières années par plusieurs groupes en France, en Europe et de part le monde.

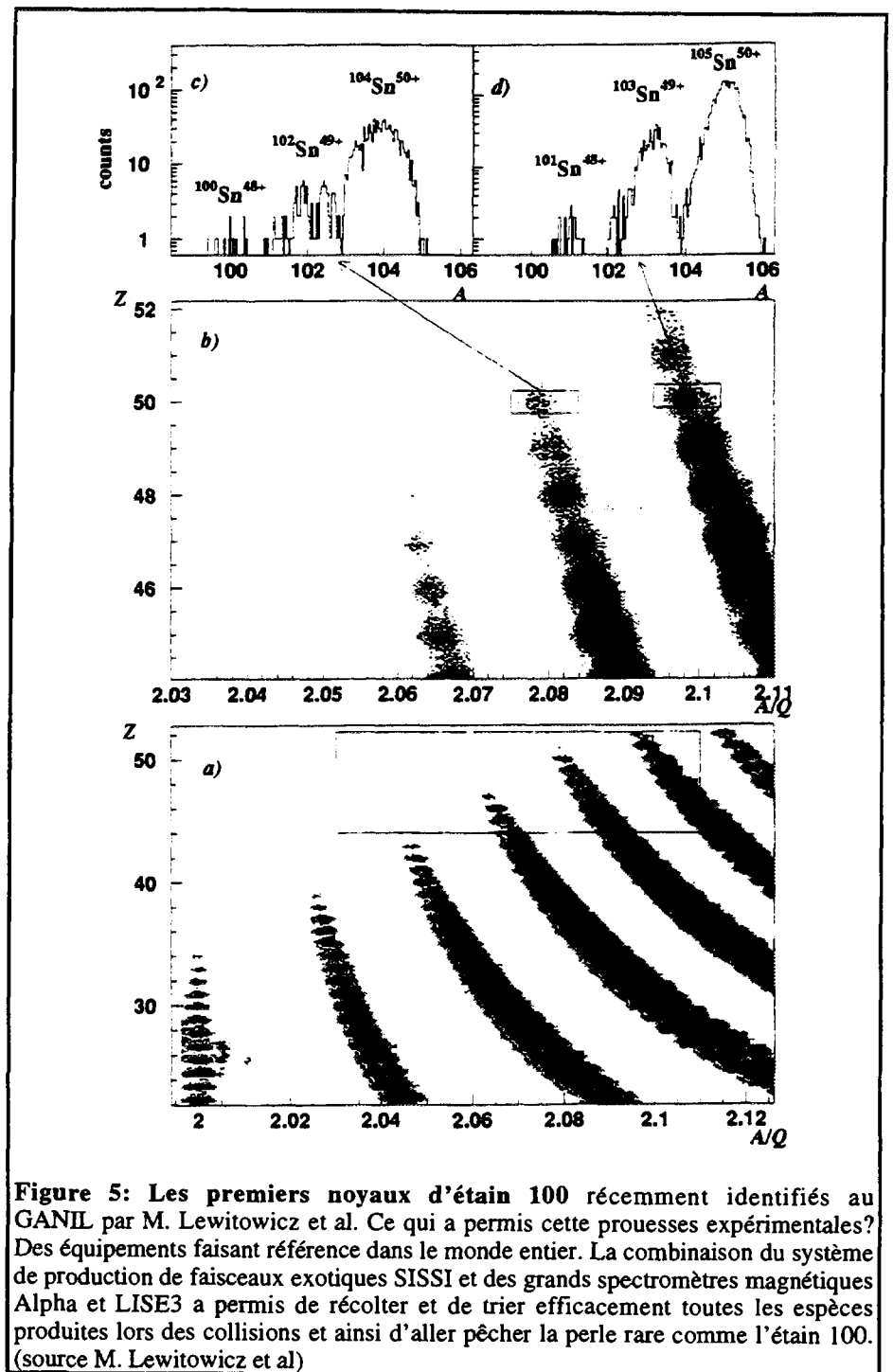
Plusieurs méthodes, de précision variable, ont été développées pour mesurer les masses de noyaux produits en très faible quantité. L'une d'elle consiste à mesurer la vitesse de chaque atome créé simplement en le chronométrant sur un parcours bien défini. A vitesse égale les noyaux plus lourds étant plus difficilement déviés, il suffit de mesurer la déviation induite par un fort champ magnétique pour remonter directement à leur masse. Toutefois, les distances utilisables (appelée "longueur de vol") pour mesurer les vitesses des atomes étant limitées à quelques dizaines de mètre les précisions obtenues sur les masses sont limitées.

### Quand un accélérateur se prend pour une balance: la masse de l'étain 100

Une méthode astucieuse a été récemment développée à Caen par W. Mittig, M. Chartier et al : utiliser un des accélérateurs du GANIL, le cyclotron CSS2, pour faire tourner en bourrique les malheureux atomes et ainsi leur faire parcourir des kilomètres. En effet, les atomes injectés dans un cyclotron, piégés par le champ magnétique, y effectuent un grand nombre de tours parcourant ainsi des centaines de mètres à l'intérieur même de la machine. Les atomes les plus légers seront les plus rapides et emporteront la "pole position". La mesure du temps d'arrivée de chaque atome permet ainsi de déduire sa masse. Cette importante augmentation de la "longueur de vol" permet d'améliorer d'un facteur 10 la précision de la mesure de la vitesse des ions et par conséquent celle de la masse.

Une expérience récente utilisant cette nouvelle technique a permis de mesurer les masses de noyaux exotiques possédant 100 nucléons au voisinage du noyau doublement magique d'étain 100.

Dans cette expérience, les ions exotiques ont été produits en fusionnant des



**Figure 5: Les premiers noyaux d'étain 100 récemment identifiés au GANIL par M. Lewitowicz et al.** Ce qui a permis cette prouesses expérimentales? Des équipements faisant référence dans le monde entier. La combinaison du système de production de faisceaux exotiques SISSI et des grands spectromètres magnétiques Alpha et LISE3 a permis de récolter et de trier efficacement toutes les espèces produites lors des collisions et ainsi d'aller pêcher la perle rare comme l'étain 100. (source M. Lewitowicz et al)

noyaux de  $^{50}\text{Cr}$  accélérés par le premier cyclotron du GANIL (CSS1) au dixième de la vitesse de la lumière avec les noyaux d'une cible de  $^{58}\text{Ni}$ . Les différents noyaux ainsi synthétisés étaient alors injectés dans le deuxième cyclotron, le CSS2. Les différences de masses relatives des ions secondaires de  $^{100}\text{Ag}$ ,  $^{100}\text{Cd}$ ,  $^{100}\text{In}$  et  $^{100}\text{Sn}$  étant faible ils peuvent être simultanément accélérés. L' $^{100}\text{Ag}$  et le  $^{100}\text{Cd}$  ayant des masses connues la méthode a pu être calibrée et contrôlée. Ainsi les masses de l' $^{100}\text{In}$  et de l' $^{100}\text{Sn}$  ont pu être déterminées pour la première fois. Ces mesures nous informant sur l'énergie qui lie ces noyaux, mettent à l'épreuve les models théoriques décrivant les processus à l'origine de la cohésion des noyaux.

### A quoi ressemblent les noyaux? Quelle est leur forme?

La nature n'ayant pas de direction privilégiée on pouvait penser que ces infimes gouttes de matière que sont les noyaux étaient sphériques. Pourtant il n'en est ainsi que pour quelques noyaux tels le plomb 208 ou le Calcium 40.

En effet, la plupart des noyaux sont déformés et peuvent prendre des formes de ballon de rugby, de soucoupe, d'amande, de poire ou même de cacahuète. Les physiciens ont déjà observé des formes très allongées des noyaux deux fois plus longs que larges: C'est la super-déformation.

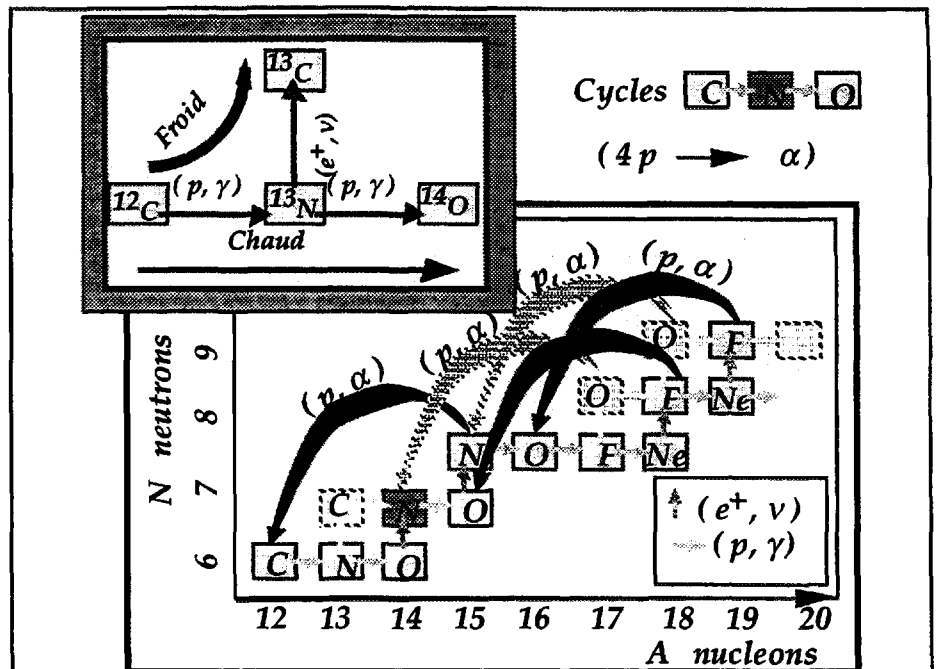
De nouveau c'est la mécanique quantique qui modifie les conditions de stabilité des noyaux et qui impose certaines formes. En effet, quand une couche est complètement occupée, le nuage de nucléons associé est sphérique. Par contre, si seulement quelques orbitales sont occupées par des nucléons, comme celles-ci ont souvent des formes particulières, elles peuvent imposer une déformation au noyau. On peut même observer de nouveaux nombres magiques quand les orbitales occupées stabilisent fortement un noyau déformé. Dans cette étude les noyaux exotiques jouent un rôle essentiel car non-seulement ils peuvent présenter des formes nouvelles et des déformations plus amples mais surtout ils peuvent nous donner les clefs de ces phénomènes : changement de forme, nouveaux nombres magiques déformés, coexistence de forme, isomères de forme

### Des jumeaux très excités

On sait aujourd'hui créer en laboratoire, auprès des accélérateurs de particules, des noyaux d'atome dans des états très excités. Ces états en général ne survivront pas longtemps (de quelques  $10^{-15}$ s à quelques  $10^{-22}$ s) et se désexciteront rapidement en émettant des radiations diverses afin de rejoindre un état plus stable. Toutefois, il est très vite apparu que quelques rares états excités pouvaient survivre durant des temps anormalement longs: de quelques picosecondes ( $10^{-12}$ s) à plusieurs jours. Ces noyaux, jumeaux des noyaux dans leur état fondamental s'appellent des isomères. Contenant une forte énergie d'excitation leurs propriétés devraient être différentes de celle de leur "homozygote". En particulier certains ont des formes différentes; ce sont les isomères de forme (plusieurs autres types d'isomères sont aussi possibles). Dans d'autres noyaux deux formes peuvent coexister sans pour autant que l'on puisse parler d'état isomérique. Simplement le noyau présente à la fois les spectres caractéristiques de deux formes différentes.

Étudier les déformations des noyaux permet de comprendre la structure de la matière qui les compose et les équilibres délicats qui sont liés à la mécanique quantique. C'est pourquoi l'étude des déformations des noyaux exotiques et la recherche de nouveaux isomères restent aujourd'hui un domaine très actif partout dans le monde.

### L'Alchimie de l'Univers



**Figure 6: Des cycles dans les étoiles.** Représentation schématique du célèbre cycle CNO qui correspond à une transformation de l'hydrogène en hélium "catalysé" par la présence de Carbone (et d'éléments plus lourds) qui a lieu dans certaines étoiles. En effet par une suite de capture de protons (le noyau de l'Hydrogène) et de décroissance  $\beta^+$  (transformation d'un proton en neutron) des noyaux de plus en plus lourds sont formés. Toutefois, en capturant un proton, certains noyaux ont tendance à émettre un  $\alpha$  (le noyau de l'Hélium) ce qui a pour effet de les faire redescendre les marches qui les menaient vers les noyaux lourds.

A chacun de ces cycles un noyau d'Hélium est produit. Ces cycles sont essentiels à la combustion de l'Hydrogène et à la nucléosynthèse des éléments lourds. Cependant, l'agencement précis des cycles dépend de façon cruciale des conditions de température et de pression de l'étoile. En particulier, après la première capture de proton qui conduit le Carbone 12 ( $^{12}\text{C}$ ) vers l'Azote 13 ( $^{13}\text{N}$ ) le système a le choix entre la capture d'un nouveau proton ce qui le mènerait vers l'Oxygène 14 ( $^{14}\text{O}$ ) ou bien la décroissance vers le Carbone 13 ( $^{13}\text{C}$ ). En fait le chemin suivi à cet embranchement dépend des vitesses des deux réactions.

A basse température la capture de protons étant très lente le système ira préférentiellement vers le Carbone 13. C'est le cycle CNO froid (représenté en pointillé sur la figure). En revanche, à plus haute température, la capture s'accélère pour finalement gagner sur la décroissance. Il se forme donc des noyaux d'Oxygène 14. C'est le cycle CNO chaud.

On voit que les réactions stellaires mettent en jeu des noyaux qui n'existent pas sur terre comme par exemple les noyaux  $^{13}\text{N}$ ,  $^{14}\text{O}$ . Ce sont ces réactions qui font actuellement l'objet d'études dans divers laboratoires de physique nucléaire en Europe et dans le monde.

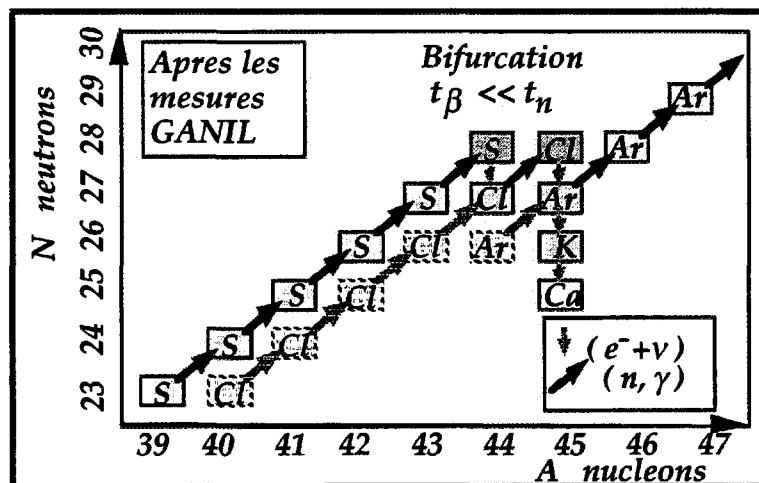
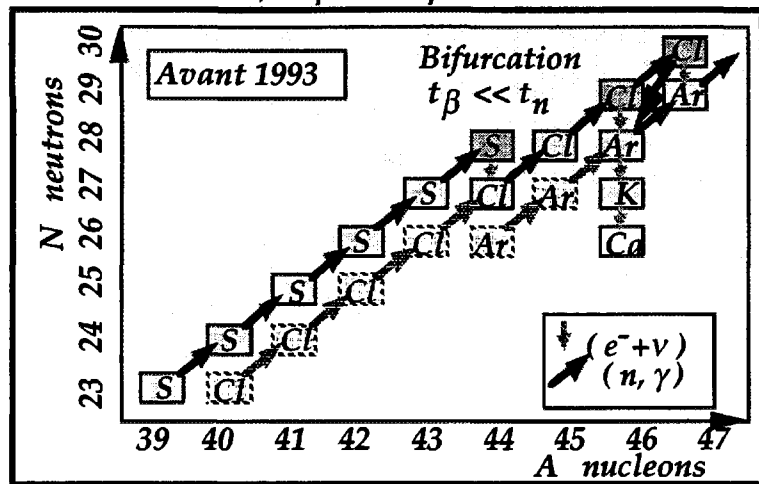
Depuis sa naissance jusqu'à nos jours et pour longtemps l'univers est une énorme machine à transmuter la matière. Tous les noyaux qui nous entourent ont été forgés dans divers sites astrophysique et ont probablement déjà eu plusieurs vies fantastiques dans différents chaudrons cosmiques et autres feux célestes.

Ces transmutations successives empruntent de nombreux chemins qui souvent passent par des noyaux exotiques. Un exemple en est donné par le cycle CNO de combustion de l'Hydrogène (voir figure 6) dans lequel entrent en jeu de nombreux noyaux

radioactifs. Afin de comprendre les processus qui se déroulent dans ces étoiles on ne peut donc se contenter d'étudier les noyaux que l'on trouve sur terre. C'est pourquoi de nombreux programmes sur les noyaux exotiques ont pour but de déterminer leurs propriétés afin de pouvoir modéliser le fonctionnement des étoiles et de comprendre la nucléosynthèse (fabrication de nouveaux noyaux) qui s'y déroule.

**Mais comment étudier ces noyaux si éphémères produits en si faible quantité ?**

### Processus r, capture rapide de neutrons



**Figure 7: Les chemins de la nucléosynthèse.** Lors des cataclysmes stellaires les noyaux se retrouvent dans des environnements tout à fait extraordinaires. Par exemple, pendant l'implosion d'une super nova ils peuvent se trouver soumis à de très hauts flux de neutrons. Par une chaîne de captures les noyaux vont très rapidement s'enrichir en neutrons, donnant naissance à des nouveaux noyaux très éloignés de la stabilité.

Ces noyaux étant de plus en plus fragiles il arrive un moment où le taux de capture et le taux de brisure s'équilibrent laissant au noyau le temps de redescendre vers la vallée de stabilité. C'est en étudiant ces points de bifurcation que l'on peut comprendre la nucléosynthèse de certains éléments. C'est par exemple le cas de la nucléosynthèse du Calcium 46 ( $^{46}\text{Ca}$ ) qui a longtemps été un mystère. En effet ce noyau quoique moins exotique que le Calcium 48 ( $^{48}\text{Ca}$ ) est en général comparativement très peu abondant.

Le mystère a été éclairci lors d'une campagne systématique entreprise au GANIL par O. Sorlin et al qui révéla que les propriétés supposées des noyaux de la région du Calcium n'étaient pas les bonnes et que les chaînes de nucléosynthèse n'alimentaient pas fortement la masse 46.

Ceci est illustré sur la figure ci contre qui montre les chaînes prédites avant les mesures de 1993 (partie du haut) comparées avec celles provenant des mesures effectuées sur des noyaux exotiques. On voit clairement que dans le nouveau scénario les chemins de la nucléosynthèse ne passent plus par le Calcium 46.

Jusqu'à aujourd'hui les physiciens n'avaient essentiellement pu qu'essayer de produire des noyaux exotiques pour constater leur existence (ou non-existence), déterminer leur durée de vie, mesurer leur masse. De plus, en les faisant interagir avec des faisceaux laser

ou en détectant les rayonnements qu'ils émettent spontanément les chercheurs ont pu déterminer certaines de leur caractéristiques comme leur forme ou les propriétés de certains de leur états excités. Toutefois, ces informations sont souvent partielles et ne permettent pas

d'appréhender la réalité des noyaux exotiques.

### Des "microscopes" pour aider à connaître.

Lorsque l'objet à observer est hors du champ de notre perception il faut recourir à des moyens techniques qui suppléent à nos limitations humaines. Un exemple pris dans notre vie de tous les jours est celui du radar, du sonar ou plus simplement de l'échographie : en dirigeant des ondes sur un objet inaccessible à l'observation directe puis en mesurant les caractéristiques des ondes réfléchies on peut produire une représentation de cet objet.

Un autre exemple connu emprunté à la physique est le microscope électronique dans lequel on bombarde l'objet à observer par des électrons que l'on détecte ensuite après qu'ils aient été diffusés. Ainsi, une "image" peut être obtenue grâce à l'interaction entre les électrons et la matière.

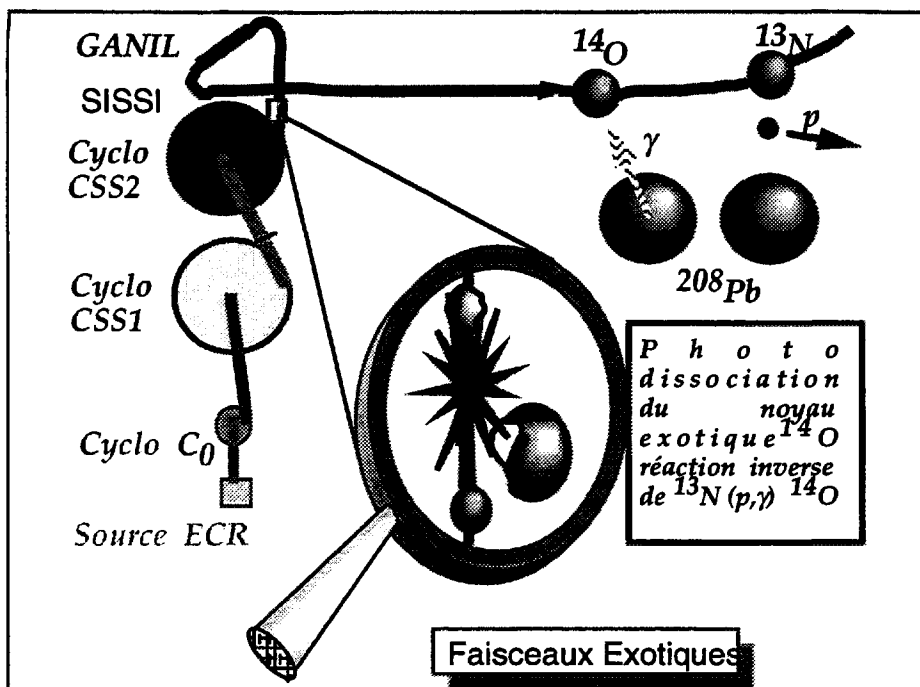
De façon analogue des accélérateurs sont parfois utilisés à la manière des microscopes électroniques. En effet, un faisceau de particules peut être projeté sur les noyaux d'une cible; en détectant les produits de la réaction puis en les analysant, enfin en appliquant les modèles théoriques aux données expérimentales recueillies, les représentations des caractéristiques du noyau recherché peuvent être établies.

C'est le principe de toute expérience en physique nucléaire que de faire interagir le noyau à étudier avec diverses "sondes" adaptées à l'objet étudié, l'une de ces sondes pouvant être un autre noyau projeté à grande vitesse. Habituellement l'une des méthodes consiste à bombarder une cible de matière contenant un très grand nombre de noyaux à étudier, par une quantité importante d'un noyau donné, le faisceau (de l'ordre de  $10^{11}$ - $10^{13}$  ions par seconde)

### Pourquoi accélérer les noyaux exotiques?

Pour constituer la cible on ne peut utiliser que des noyaux suffisamment stables et produits en quantité suffisante. Les noyaux radioactifs ayant une durée de vie trop courte et produits en quantité trop infime (au mieux quelques milliardièmes de microgrammes d'un noyau exotique d'un type donné) - il est impossible d'en faire une cible. On est donc contraint de procéder de façon inverse : projeter le noyau à étudier sur le noyau chargé de le sonder. Ces noyaux





**Figure 8: Des faisceaux pour comprendre.** Pour comprendre les processus qui ont lieu dans les étoiles il faut souvent étudier des réactions avec des noyaux qui n'existent pas (ou plus) sur terre. Il faut donc tout d'abord créer ces nouvelles espèces nucléaires grâce à une première collision nucléaire (réaction primaire). Puis il faut faire subir aux noyaux exotiques sélectionnés une seconde interaction (réaction secondaire), celle que l'on cherche à étudier. C'est ce que l'on fait actuellement dans de nombreux laboratoires de part le monde.

La figure représente schématiquement un exemple d'une expérience typique telle qu'elle a pu être récemment effectuée au GANIL à Caen par P. Aguer et al: à gauche un schéma de l'accélérateur avec sa source d'ions (atomes épluchés d'un ou plusieurs électrons) qui injecte un faisceau de particules dans un ensemble de 3 cyclotrons. Ces cyclotrons vont graduellement accélérer les ions jusqu'à près de la moitié de la vitesse de la lumière. Ces ions sont alors brisés en fragments lorsqu'ils percutent une cible. Parmi ces fragments, on sélectionne les noyaux à étudier, ici des noyaux d'Oxygène 14 afin d'en étudier les propriétés et entre autres le taux de dissociation vers l'Azote 13 ( $^{14}\text{O} (\gamma, p) ^{13}\text{N}$ ) Depuis cette expérience un nouveau système magnétique à base de solénoïdes, SISSI (illustré sur la figure), permet d'augmenter le nombre de noyaux exotiques sélectionnés en jouant en quelques sorte le rôle d'un entonnoir magnétique.

L'astuce, ici, est d'utiliser un noyau très lourd, possédant donc un fort champ électrique (de Coulomb), comme une source de photons virtuels. Ainsi, sous l'action de ce champ de photons, le noyau peut se briser en émettant un proton. Cette dissociation Coulombienne du noyau d'Oxygène en Azote peut être vue comme la réaction inverse de la réaction  $^{14}\text{N} (p, \gamma) ^{14}\text{O}$  qui est une des réactions clefs des cycles CNO (voir figure 5).

radioactifs interagiront alors avec les noyaux de la cible. On pourra ainsi mesurer la taille, la forme, la densité ... des noyaux exotiques du faisceau.

Disposer de faisceaux de noyaux exotiques nous permettra aussi d'étudier de nouvelles réactions nucléaires et de peut-être créer de nouveaux noyaux. (super déformés, super lourds,...). On pourra étudier le rôle de l'isospin, la différence entre le nombre de neutrons et celui des protons, dans les noyaux et dans les réactions nucléaires. Pouvoir enfin faire varier ce degré de liberté offre une nouvelle perspective à notre connaissance du noyau.

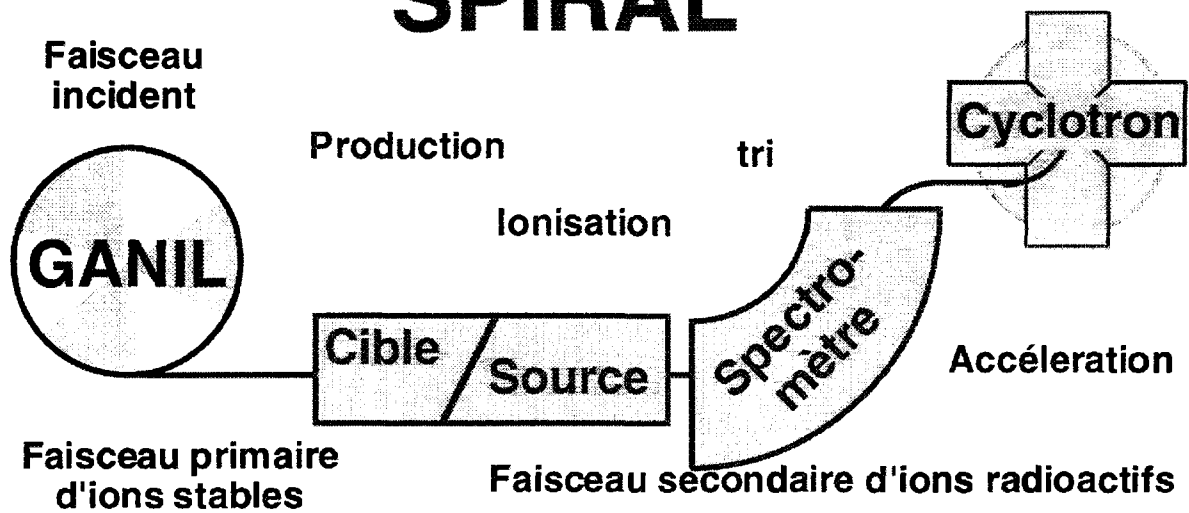
Voilà pourquoi de nombreux laboratoires de par le monde se sont lancés dans la course aux faisceaux de noyaux exotiques (aussi appelés faisceaux radioactifs). Plusieurs expériences pionnières ont déjà été effectuées tant en Europe qu'au Japon ou aux États Unis, au Canada et en Russie (voir figure 8). Dans la plus part de ces expériences, les noyaux exotiques ne sont pas accélérés mais ils gardent simplement la vitesse qu'ils avaient lors de leur création. Des systèmes essentiellement magnétiques essayent seulement de les regrouper en un faisceau. Les caractéristiques de ces "faisceaux" ne sont alors pas très bonnes

et surtout sont difficilement contrôlables et modifiables. Pour palier à ces défauts de nombreux projets d'accélérateurs de faisceaux exotiques ou d'anneau de stockage ont été proposés. Certains sont déjà en fonctionnement comme au laboratoire de Louvain La Neuve en Belgique où les chercheurs étudient des réactions avec des noyaux exotiques de basse énergie pour simuler des réactions ayant lieu dans les étoiles ou au complexe expérimental de GSI à Darmstadt en Allemagne où un anneau de stockage avec un refroidissement électronique a été mis en service en 1990. D'autres accélérateurs de faisceaux radioactif sont en constructions à l'étude ou en projet. Nous citerons ici les deux laboratoires américains d'Oack Ridge dont le système de production de faisceaux exotiques est pratiquement opérationnel et du laboratoire national de l'université du Michigan dont le projet est déjà très avancé. Mais ce ne sont pas les seuls projet en Amérique où Argone (US) et Vancouver (Canada) sont aussi sur les rang. L'Italie aussi est sur les rang avec un projet en Sicile auprès du laboratoire National du sud. Dans cette course à l'exotisme le Japon n'est pas en reste car c'est une véritable usine à faisceau radioactif qui est actuellement étudié avec un double anneau de stockage et même un accélérateur d'électron.

La communauté française est quant à elle impliquée dans trois projets qui sont à divers degrés d'avancement:

- ▽ L'un au CERN à Genève, qui consiste à accélérer les noyaux exotiques produit par le séparateur ISOLDE;
- ▽ L'un à Grenoble alliant les hauts flux de neutrons de l'ILL utilisé pour faire fissionner des éléments tel l'Uranium avec le système accélérateur SARA pour propulser les noyaux exotiques riches en neutrons issus de ces fissions. C'est le projet PIAFE qui est encore dans une phase d'étude.
- ▽ Le dernier à Caen qui utilise les faisceaux d'ions lourds du GANIL pour créer des noyaux exotiques qui après avoir été ionisés et triés sont accélérés dans un cyclotron jusqu'à près du quart de la vitesse de la lumière. Ce projet nommé SPIRAL est aujourd'hui en construction. Commencée en 1994, cette aventure à la fois scientifique et technologique s'échelonne sur une période de quatre ans. En 1998, le laboratoire GANIL sera la première installation au monde à

# SPIRAL



PLUS PHOTO DE CIME EN CONSTRUCTION

**Figure 9: L'aventure SPIRAL: Créer des noyaux exotiques en bombardant une cible avec le faisceau d'ions stables délivrés par GANIL;** l'interaction entre les ions projectiles et ceux de la cible donne naissance à une grande variété de noyaux, dont de nombreux exotiques. Comme la création d'un noyau exotique spécifique ne se produit que pour un noyau incident sur dix mille à un million, on comprend alors qu'il faut atteindre les plus hauts flux d'ions incidents produits pour accroître la production d'ions secondaires.

**En faire un faisceau :** Les noyaux formés sont arrêtés dans la cible. Les faisceaux d'ions secondaires sont alors constitués en extrayant de la cible les isotopes produits grâce à de très hautes températures (>2000°), puis en les ionisant, c'est-à-dire en leur arrachant une partie de leurs électrons dans une source ECR. Enfin il faudra isoler l'isotope souhaité de l'énorme quantité d'ions produits grâce à des systèmes de tri magnétiques. Voilà le coeur du projet.

**Accélérer ce faisceau secondaire** grâce à un nouveau cyclotron CIME, à des énergies de 2 à 25 MeV par nucléon pour qu'ils terminent leur course dans la cible du physicien. Par une multitude de petites accélérations électriques, CIME parvient à donner aux ions des vitesses s'approchant du quart de celle de la lumière. Pour y parvenir un fort champ magnétique maintient ces ions secondaires sur des trajectoires en forme de spirale dont la longueur avoisine les 2 km.

L'une des principales difficultés de ce projet réside dans la grande variété des éléments et de leurs isotopes produits simultanément et dans la faible intensité des faisceaux à régler (10 à 100 000 fois plus faible que le faisceau du GANIL)- car pour conduire le faisceau il faut le "voir", or avec les faibles intensités la détection des faisceaux est difficile. L'avantage de cette méthode de production de faisceau avec un accélérateur réside dans la possibilité d'exercer un contrôle fin de la qualité du faisceau produit, en ce qui concerne entre autre son énergie et sa taille, en plus de sa pureté. Ce sont des caractéristiques très importantes pour réaliser des nouvelles expériences précises apportant des informations claires.

délivrer des faisceaux de noyaux exotiques dans la gamme d'énergies choisie (voir figure 9).

## L'intérêt de cette aventure ?

Pouvoir utiliser des noyaux nouveaux comme faisceaux et ne plus être cantonné aux quelques centaines de noyaux terrestres ouvre un champ d'investigation étendu.

Aller plus loin dans l'exotisme et dans notre connaissance des noyaux exotiques. Les premières explorations de ce domaine nouveau nous ont déjà apporté la révélation de phénomènes inattendus, tels ces noyaux à halo (voir article sur le sujet). D'autres surprises nous attendent-elles? Notre compréhension actuelle du noyau en sera-t-elle confortée ou bouleversée? Par exemple, cette exploration nous fournira-t-elle des informations sur les forces s'exerçant entre les nucléons dans le noyau? De

nouveaux éléments seront-ils accessibles? Comprendrons-nous le rôle respectif des protons et des neutrons? Les noyaux à la limite de la liaison nucléaire présenteront-ils d'autres surprises? Les nombres magiques seront-ils modifiés aux limites de l'exotisme? D'autres déformations seront-elles observées ?...

De plus les noyaux exotiques jouent un rôle clef dans l'évolution de divers sites astrophysiques comme les étoiles et dans la synthèse de la plupart des éléments. La mesure de leurs propriétés nous aidera à déchiffrer le sens des observations astrophysique. Ainsi pourra-t-on mieux comprendre la formation et l'évolution des grandes structures qui peuplent notre univers.

Les faisceaux radioactifs permettront aux explorateurs de l'invisible de franchir les limites de cette "terra incognita" qui les fascine. Et c'est ainsi qu'en traquant de minuscules particules, objets éphémères

nés de chocs d'une rare violence, la science de l'infiniment petit rejoint celle de l'infiniment grand et l'histoire de notre univers.

Les découvertes seront-elle au rendez-vous? Comprendrons nous mieux notre environnement? *Qui sait où s'arrêtera la science ? Qui sait si l'homme ne parviendra pas à forger la clé du vent ?* Victor HUGO

Pour en savoir plus voir A.C. Mueller and B.M. Sherill, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 43 (1993) 529 ainsi que les divers comptes rendus de conférence tel le Nuclear Physics A588 (1995).

Je voudrais remercier M. Bex pour son aide dans la rédaction de cet article ainsi que B. Blanck, D. Guerreau, M. Lewitowicz et P. Roussel.