L'insoutenable légèreté du halo

Jean-Luc Sida (jean-luc.sida@cea.fr)

CEA/DAM Île-de-France, 91680 Bruyères-le-Châtel

pour la collaboration EFFE (Étude de la Fusion avec des Faisceaux Exotiques)

Il ne faut pas moins qu'une étoile ou bien qu'un « tokamak » pour réussir à faire fusionner une population de noyaux, à cause de la forte répulsion coulombienne qui les repousse loin les uns des autres. Dans nos laboratoires, nous pouvons étudier le processus de fusion de couples de noyaux en utilisant un accélérateur de particules. Cette étude est particulièrement intéressante aux énergies pour lesquelles le processus se produit par effet tunnel. Ce processus a été étudié dans les années 1980 pour les noyaux stables. Nous présentons ici l'une des premières études faites pour des noyaux étranges, découverts à la fin des années 80 : les noyaux à halo.

“The neutron halo sleeps” : c'est avec ce titre que la revue *Nature* a résumé les résultats obtenus par une collaboration, principalement franco-belge, sur la fusion de deux noyaux, dont l'un possède la propriété inattendue d'avoir des neutrons peu liés, sous forme d'un halo. Ces travaux viennent de valoir à l'un des collaborateurs, Riccardo Raabe, le prix 2007 de la SCK-CEN, l'équivalent belge de notre prix Joliot-Curie. Vous n'allez pas comprendre ce travail si l'on ne retourne pas à sa genèse.

Il était une fois, en 1991...

1991. Premiers pas d'un post-doc

Saclay, une bibliothèque mal éclairée ; mon responsable de post-doctorat, Nicolas Alamanos (CEA, Saclay), et Wolfgang Mittig (GANIL, Caen) me demandent de les rejoindre. Ils me parlent d'un projet de physique nucléaire qui allie l'improbable à l'inconcevable. Improbable, car la réaction à étudier, la fusion à des énergies inférieures à la barrière de répulsion coulombienne (voir la figure 1 pour les détails), ne peut être réalisée que par un processus très peu probable en mécanique quantique, qui est l'effet tunnel. Inconcevable, parce qu'avant 1989, on n'imaginait pas que les nucléons d'un noyau pourraient circuler dans un nuage allant très au-delà de la portée de l'interaction forte. Ce phénomène de « halo » nucléaire semblait être une propriété des noyaux à la frontière de la stabilité, pour lesquels les derniers neutrons liés ont une énergie dix à cent fois plus faible que l'énergie de liaison des nucléons dans un noyau

stable. Cette faible énergie leur confère une grande extension spatiale et ils vont explorer des régions de l'espace allant au-delà des nucléons qui ne participent pas au halo (voir l'illustration de la figure 2). À l'heure actuelle, seule une poignée de noyaux à halo, dits « légers » (car de masse inférieure à une vingtaine de nucléons), ont été observés. Après la découverte de ces noyaux, une bataille d'idées a commencé sur leur probabilité de « fusion ».

Que se passe-t-il pour des noyaux « normaux » ?

Quand les noyaux ont suffisamment d'énergie pour pouvoir se toucher, ils fusionnent. L'interaction forte est tellement dominante qu'il suffit que les nucléons de surface des noyaux cible et projectile se « sentent » pour que les deux noyaux soient irrémédiablement attirés vers une symbiose nucléaire. Il y a cependant quelques conditions énergétiques à respecter. Si, par exemple, l'un des noyaux est envoyé avec une énergie cinétique plus grande que l'énergie de liaison des nucléons, la collision casse les deux noyaux et ils ne pourront pas fusionner. Pour des énergies inférieures à cette valeur, mais plus grandes que la barrière coulombienne, les noyaux peuvent se rapprocher suffisamment et fusionneront. La probabilité d'un tel phénomène est gouvernée par des considérations purement géométriques : c'est le principe du « touché-fusionné ». Pour des énergies inférieures à la barrière, le processus va être gouverné par l'effet tunnel au travers de la barrière.

Figure 1 : Représentation schématisée de la barrière de potentiel en fonction de la distance L entre les noyaux, lors de la collision de deux noyaux dans le cas d'un choc frontal. Dans la zone 1, les deux noyaux, représentés par les cercles, sont loin l'un de l'autre, le potentiel est purement coulombien. La quantité Q représente la différence entre la somme des énergies de masse des deux noyaux projectiles dans leur état initial, à l'infini l'un de l'autre, et celle du noyau fusionné ; elle peut être positive ou négative. Dans la zone 2, les deux noyaux sont à portée de l'interaction forte et celle-ci réduit la répulsion coulombienne. La zone 3 correspond au potentiel du noyau composé, représenté par une ellipse. Comme le système est régi par les lois de la mécanique quantique, le noyau projectile peut être assimilé à une onde qui va sonder le potentiel. Ainsi, si son énergie cinétique est inférieure à la hauteur de la barrière (V_B), la fusion ne pourra être réalisée que par effet tunnel.

La mesure de l'effet tunnel pour différentes énergies incidentes permet donc d'obtenir une image point par point du potentiel d'interaction entre les noyaux.

Figure 2 : Un exemple de noyau à halo, le lithium 11. Le lithium 11 est constitué d'un lithium 9 entouré d'un halo de deux neutrons. Sa structure est déterminée d'après les distances les plus probables entre le lithium 9 et les deux neutrons, ainsi qu'entre ces deux derniers. On voit clairement que la distance (en fermi, i.e. 10^{-15} m, sur les axes) entre les neutrons du halo, ainsi que celle entre le halo et le cœur, sont supérieures à la portée de l'interaction forte (de l'ordre du fermi). Les autres noyaux à halo connus sont les bérylliums de masse 11 et 14, les carbones 16 et 19 et les héliums de masse 6 et 8.

À quoi pouvait-on s'attendre si l'un des noyaux possède un halo ?

Suivant la logique précédente, la grande extension spatiale du halo modifie le recouvrement géométrique entre les noyaux et augmenterait donc la probabilité de fusionner avec d'autres noyaux. Cet effet devrait être amplifié si la réaction a lieu à des énergies légèrement inférieures à la hauteur de la barrière coulombienne. En effet, le halo étant constitué de particules neutres, il jouera le rôle de « sondeur-attracteur » : les neutrons du halo peuvent atteindre le noyau cible sans ressentir la répulsion coulombienne (rôle de sondeur) et, lorsque ses neutrons ressentent l'attraction forte, ils entraînent l'ensemble du noyau vers la fusion (rôle d'attracteur). Le halo agit ainsi comme une langue de caméléon. Ceci est la thèse du groupe de théoriciens que nous appellerons A.

« Billevesées ! » disent les théoriciens du groupe B, « vous oubliez que les neutrons de ces halos sont faiblement liés. En arrivant près du noyau cible, le projectile se brisera et sera éjecté par la répulsion coulombienne bien avant que la fusion puisse avoir lieu. » Ainsi, ces théoriciens prédisent, au contraire, une forte diminution, de plusieurs ordres de grandeur, de la probabilité de fusion pour une énergie voisine de la barrière coulombienne (indiquée sur la figure 3 par une flèche), si un des partenaires est un noyau à halo. Les prédictions de ces deux écoles sont représentées sur la figure 3.

« Observons ! », me disent donc Nicolas et Wolfi. Puisque les théories s'opposent, l'expérience tranchera. La Physique nucléaire n'en est pas encore au stade des théories prédictives : elle ne permet pas de prévoir les caractéristiques d'un noyau, elle permet encore moins d'expliquer le comportement de deux noyaux au cours d'une réaction ; le physicien nucléaire reste l'observateur d'un monde qu'il ne comprend pas. Nicolas et Wolfi me proposent de prendre la responsabilité de ce travail et de définir l'expérience qui pourrait donner tort et raison. Cette expérience était loin d'être triviale, car ces noyaux exotiques à halo sont produits en très faible quantité et les probabilités de réaction par effet tunnel sont faibles. Il fallait donc obtenir des temps de faisceau hors norme. De plus, pour étudier le processus à différentes énergies, il était nécessaire de modifier le réglage du cyclotron, ce qui augmentait d'autant le temps nécessaire à

l'expérience. Pour vous donner une idée des statistiques, nous avons, pour certaines énergies, de l'ordre d'un événement par heure. Le temps total de faisceau nécessaire était trois fois plus important que la moyenne des durées d'expérience au GANIL, mais le jeu en valait la chandelle.

Je passe sous silence le chemin, qui a été long, pour arriver à un protocole simple et efficace (pour plus de détails, voir la référence [1]). Sachez juste que les premières expériences ont eu lieu au GANIL⁽¹⁾ avec un faisceau de ^{11}Be , mais que nous n'avons pas réussi à répondre sans ambiguïté à la question.

2000. La bonne piste

Alinka Lépine, physicienne brésilienne-hongroise, se trouve en séjour longue durée en Belgique, non loin de l'accélérateur de Louvain-la-Neuve. « Jean-Luc, tu devrais venir voir ce qu'ils font ici. Ils ont un très bon faisceau de ^6He . Tu pourrais peut-être faire ta manip dans de bien meilleures conditions qu'au GANIL. »

Au GANIL, avant l'arrivée de SPIRAL⁽²⁾ en 2001, les faisceaux de noyaux exotiques étaient réalisés par la cassure d'un noyau projectile de haute énergie (20% de la vitesse de la lumière) sur un petit noyau cible qui agissait comme un scalpel. Les particules résultantes avaient des vitesses de l'ordre de la vitesse du noyau incident, beaucoup trop élevées car dix fois supérieures à la barrière coulombienne. Il fallait donc ralentir ces faisceaux en leur faisant traverser de la matière, ce qui dégradait leurs qualités optiques. Du coup, nous avions des faisceaux très dispersés en énergie, en angle et en position, qui rendaient les expériences imprécises. À Louvain-la-Neuve, les faisceaux de noyaux exotiques étaient produits par une technique différente : la technique ISOL (*Isotope Separation on Line*). Le faisceau primaire (dans notre cas des protons) interagit avec une cible de production (dans notre cas du fluorure de lithium). Les espèces d'intérêt sont extraites grâce à une source d'ions, puis accélérées dans un cyclotron. Le faisceau secondaire

a donc les qualités d'un faisceau « usuel », bien que de très faible intensité. L'intensité maximale des faisceaux dont nous avons disposé était d'environ un million de particules par seconde. Il faut comparer ce nombre avec le nombre d'Avogadro pour se rendre compte du peu de matière « exotique » dont nous avons disposé pour faire l'expérience.

Le voyage de Caen à Louvain nous met sur la bonne piste. Le projet est accepté par les experts du comité d'expériences, et nous commençons à réfléchir au dispositif expérimental adapté à ces conditions de faisceau. Cette expérience nécessite de travailler étroitement avec les ingénieurs de la machine, car elle impose de nombreux changements d'énergie et de source. Nous choisissons d'utiliser une cible d'uranium, car ce noyau possède la propriété de « fissionner » à chaque collision nucléaire comme, par exemple, lorsqu'il fusionne. Cela peut paraître étrange de mesurer la fission quand on veut étudier la fusion, mais c'était la conclusion naturelle de nos réflexions. Pourquoi ?

- Premièrement, nous avons besoin d'une cible générant la barrière coulombienne la plus élevée possible pour optimiser le domaine de fonctionnement en énergie de l'accélérateur. La hauteur de barrière dépend directement du produit des charges du projectile et de la cible. Pour le projectile, la charge est fixée, elle est de 2 (le nombre de protons de l'hélium). Pour la cible, dans la nature, l'élément avec le nombre de protons le plus élevé est l'uranium ($Z = 92$). Nous aurions aussi pu travailler avec des noyaux dans la région du plomb ($Z = 82$).

- Deuxièmement, il était inenvisageable d'identifier directement le noyau composé car, d'une part, sa vitesse de recul étant très faible, il reste dans la cible et, d'autre part, il se désexcite dans des temps extrêmement courts ($< 10^{-20}$ s). Seuls les produits de décroissance du noyau composé peuvent être mesurés. La quantité mesurée dépend donc de la probabilité de fusion, mais aussi des probabilités de désexcitation du noyau composé dans les différents états possibles. Pour une cible de plomb, les probabilités de décroissance sont toujours plus faibles que la probabilité de fusion elle-même : donc la quantité mesurée est inférieure à celle de la fusion seule. De plus, ses probabilités de

décroissance sont mal connues. Par contre, pour une cible d'uranium, quelle que soit la réaction (ou presque), le noyau composé fissionne. La mesure de la fission nous permet ainsi d'accéder à une quantité qui est supérieure à celle résultant de la fusion seule. Pour des projectiles stables, les deux quantités sont équivalentes dans le domaine d'énergie qui nous intéresse. En mesurant la probabilité de fission, on mesure une quantité qui inclut donc le processus de fusion. Que pourrions-nous donc conclure ? Si la probabilité de fission d'un système impliquant un noyau à halo est plus faible que sans halo, alors c'est la victoire des théoriciens B. À l'inverse, si elle est plus grande, nous ne pouvons pas être sûrs que cette augmentation de la fission provienne d'une augmentation de la probabilité de fusion...

- Dernier point, tout aussi crucial : il est facile, à faible coût, de détecter les fragments de fission en mesurant les énergies totales et les positions des particules émises. Si l'on observe deux particules en coïncidence, émises dos-à-dos avec une énergie cinétique totale supérieure à 100 MeV, on est sûr d'avoir observé un événement de fission.

Le protocole était donc basé sur la mesure du nombre de fissions induites par un faisceau de noyaux à halo et cela pour différentes énergies incidentes. Ce nombre devait être comparé avec celui obtenu pour des noyaux projectiles sans halo. Dans cette expérience, nous utilisons l'isotope exotique de masse 6 de l'hélium, qui présente un halo de deux neutrons, et l'isotope de masse 4, la particule alpha, qui est très lié et ne possède pas de halo.

Monica Trotta est une jeune physicienne italienne en thèse à Naples. Cette expérience sera son aventure. Décembre 1999 : à peine

Figure 3 : On montre ici la probabilité de fusion du ^{11}Li sur une cible de ^{238}U en fonction de l'énergie cinétique du projectile dans le centre de masse selon différents scénarios. La prédiction des théoriciens A, pour lesquels la présence du halo augmente la probabilité de fusion, est représentée en tirets ; le calcul des théoriciens B, pour lesquels le halo peut se casser avant d'atteindre la cible, est en trait plein. À basse énergie, le halo ne se casse jamais et les prédictions A et B sont égales. Enfin, la courbe en pointillés correspond au cas d'un noyau normal. La flèche indique la position de la barrière coulombienne. Attention à l'échelle, les variations attendues selon les différentes théories sont de plusieurs ordres de grandeur.

(1) GANIL : Grand Accélérateur National d'Ions Lourds, situé à Caen. Laboratoire d'accueil CEA-CNRS, le GANIL fournit des faisceaux d'ions (de l'hélium à l'uranium) de moyenne énergie (20 à 100 MeV par nucléon), permettant d'étudier les noyaux atomiques.

(2) SPIRAL : Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne, situé au GANIL, qui délivre depuis 2001 des faisceaux d'atomes exotiques n'existant pas sur Terre.

Références

- [1] J.L. Sida, mémoire de HDR, Université Paris 7 (2005).
- [2] M. Trotta *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 2342.
- [3] R. Raabe *et al.*, *Nature* **431** (2004) 823.

Un article de revue est à paraître dans *Progress in Particle and Nuclear Physics* : <http://arxiv.org/nucl-ex/0702038>

Séquence d'images illustrant le processus de transfert du halo vers la cible, décrit page 20.
En bleu : le noyau cible.
En rose : le cœur du noyau projectile.
En jaune : le halo du noyau projectile.
En vert : la barrière de potentiel.

Figure 4 : Résultats des mesures expérimentales de la probabilité de fission des noyaux composés dans les réactions $^4\text{He} + ^{238}\text{U}$ (en carrés bleus) et $^6\text{He} + ^{238}\text{U}$ (en cercles rouges), en fonction de l'énergie cinétique du projectile dans le centre de masse. Les mesures représentées par des symboles ouverts correspondent à des travaux d'autres auteurs (voir détails dans [2]). Aux énergies inférieures à la barrière coulombienne, la probabilité de fission augmente jusqu'à trois ordres de grandeur pour les noyaux à halo.

débarquée du soleil napolitain dans le froid pluvieux de la campagne wallonne, elle se joint à l'équipe, physiciens et ingénieurs de la machine frémissant quand les noyaux obèses flirtant avec l'uranium génèrent les premiers signaux dans nos détecteurs. Après trois semaines de prises de données, Monica commence le soigneux travail d'analyse pour faire émerger le résultat : le nombre de fissions générées par les noyaux à halo est plus important que pour leurs *alter ego* « normaux » (fig. 4). On serait prêts à conclure que les théoriciens A sont les meilleurs, et nous le disons dans un article publié dans *PRL* [2], qui a été cité une centaine de fois depuis 2000.

Seul bémol, la fission peut être induite par la fusion, mais elle peut aussi l'être par de nombreuses autres réactions comme la diffusion inélastique ou le transfert de quelques nucléons. Il nous faut donc aller un pas plus loin pour séparer la fusion des autres réactions.

2002. La conclusion de l'Européen

Riccardo Raabe a participé à l'expérience de 2000 en tant que doctorant et il vient faire un post-doc au CEA Saclay. Riccardo est italien, fils d'un père allemand, a fait sa thèse en Belgique et sa petite amie est hongroise. Il fait partie d'une génération de vrais Européens, pleins d'envie et d'espoir. Nous élaborons un nouveau détecteur plus complet. Il devait être capable de détecter les noyaux produits lors de la fission, mais aussi les noyaux légers qui accompagnent toutes les réactions nucléaires, excepté la fusion complète. Ainsi, si l'on détectait un noyau léger en plus des deux fragments de fission, nous rangerions la réaction dans « ceci n'est pas un événement de fusion ». À l'inverse, si

aucun résidu léger n'était observé, c'est qu'une fusion venait d'avoir lieu. Simple dans le principe, mais un peu plus compliqué à réaliser en pratique. Par exemple, il était nécessaire de détecter les résidus légers tout autour de la cible. Ce nouveau détecteur était donc composé de 40 jonctions silicium couvrant tout l'angle solide.

Nous sommes retournés à Louvain-la-Neuve pour reprendre des données plus précises. Les résultats sont publiés dans *Nature* [3] et ont fait l'objet d'articles dans les presses belge et brésilienne. «*The neutron halo sleeps*», nous avons la réponse ! Claire et limpide : la présence d'un halo ne change rien au phénomène de fusion ; c'est comme s'il ne participait pas, comme s'il dormait, à moins qu'il ne rêve, insoutenable légèreté.

Ainsi, la grande probabilité de fission observée par Monica venait de réactions de transfert entre le projectile et la cible. Dans ce processus, seuls les neutrons du halo atteignent la cible, le cœur étant chassé par la répulsion coulombienne. On observe donc en coïncidence deux fragments de fission et une particule alpha (le cœur du noyau de ^6He). Aux énergies inférieures à la barrière, tous les fragments de fission que nous avons observés étaient accompagnés d'une particule alpha. Avant de conclure, il fallait être sûr que cette particule alpha était bien le cœur du projectile et non une particule émise par le noyau composé ou bien par les fragments de fission. On touche ici à la magie, à l'émotion que peut faire ressentir la science : on en était sûr parce que le cœur avait « vu » le noyau cible. En effet, si la particule alpha provenait d'une émission secondaire, elle était émise de façon isotrope. Par contre, si c'était bien la particule alpha du cœur, alors on devait observer un phénomène non isotrope. Ainsi, aux énergies supérieures à la barrière,

on attendait les alphas aux angles avant, alors qu'aux énergies inférieures à la barrière, les alphas du cœur allaient buter sur le noyau cible et repartir en arrière. Dans notre expérience, nous avons vu que les particules alpha accompagnant la fission passaient des angles avant aux angles arrière au fur et à mesure que l'énergie du faisceau décroissait. Nous avons là une signature non ambiguë d'une réaction de transfert du halo et non d'une émission de particules du noyau composé. En faisant cela, moi, homme de l'échelle du mètre, j'avais l'impression fascinante de voir le noyau à son échelle de 10^{-15} m.

On peut résumer nos observations en disant que la présence d'un halo de neutrons ne change pas la probabilité de fusion, mais qu'elle rend possible d'autres réactions comme le transfert du halo vers la cible. C'est là que se trouve la découverte la plus intéressante, celle que personne n'avait prédite : quand le halo interagit avec le noyau cible, il n'entraîne pas le cœur comme cela était évoqué par les théoriciens A, il n'est pas non plus éjecté comme le prédisaient les théoriciens B, mais au contraire il s'acoquine avec la cible pendant que le cœur est éjecté par le champ coulombien, « arrache-cœur plutôt qu'attrape-cœur » (voir la séquence d'images en bas des pages 18 et 19).

2007. C'est déjà l'avenir

Nous pouvons douter du caractère général de nos conclusions, dans la mesure où nous n'avons étudié qu'un seul couple de noyaux, ^6He et ^4He . À l'avenir, nous allons poursuivre l'étude de la série des isotopes d'hélium, en allant auprès de l'installation européenne SPIRAL du GANIL, et découvrir les surprises que nous réserve le plus exotique d'entre eux, celui de masse 8. Comme il a plus de constituants, sa densité de matière est supérieure à celle de l'hélium 6, elle-même supérieure à celle de l'hélium 4. Par contre, paradoxalement, alors que ce noyau d'hélium 8 est plus « exotique » (il est plus riche en neutrons), ses neutrons sont plus liés que ceux de l'hélium 6. Les paris sont lancés quant aux effets de ces caractéristiques sur la fusion. Les résultats de notre étude précédente nous laissent envisager une probabilité de fusion plus grande pour l'hélium 8 que pour l'hélium 6 et l'hélium 4, car il est à la fois plus gros et plus lié...

Ainsi, nous pouvons imaginer que le halo de l'hélium 8 sera le « neutron halo that never sleeps ». ■