

Groupe n°6: Noyaux lourds et superlourds.

GANIL, Caen : B. Bouriquet, D. Boilley, G. de France, J. Frankland, M. Morjean, C. Stodel, A.C.C. Villari, J.P. Wieleczko. *I.R.E.S., Strasbourg* : O. Dorvaux, B. Gall, L. Stuttgé. *DAPNIA/SPhN, CEN Saclay*: R. Dayras, A. Drouart, C. Theisen. *IPN, Orsay* : D. Jacquet. *IPNL, Lyon* : M. Chevallier, D. Dauvergne, P. Latusse. *LPC, Caen* : J. Péter. *C.S.N.S.M., Orsay* : A. Korichi.

L'intérêt de l'étude des noyaux Super-Lourds (S-L) repose sur l'existence prédite théoriquement d'un îlot de stabilité. Rechercher de nouveaux éléments chimiques revient à répondre à des interrogations aussi fondamentales que : Quels éléments peuvent exister ? Qu'en est-il de leurs isotopes déficients et riches en neutrons ? Quel est leur temps de vie ? Quelles propriétés déterminent leur stabilité ? Comment peuvent-ils être synthétisés ? Ont-ils été synthétisés par la nature ? Quelles sont leurs propriétés chimiques ? Comment s'arrangent les électrons soumis au fort champ électrique du noyau ? Jusqu'à quel élément la classification de Mendeleïev est-elle valide ? La question sous-jacente est celle de l'équilibre des forces agissant à l'intérieur du noyau, résultant de l'interaction forte qui tend à lier les nucléons entre eux et de l'interaction coulombienne qui tend à repousser les protons les uns des autres, équilibre délicat perturbé, de plus, par les corrélations d'appariement et la force spin-orbite.

Les noyaux S-L ($Z > 104$) doivent leur existence à des effets microscopiques nucléaires faisant apparaître des surcroûts de stabilité. Ceci résulte en de forts effets de couche capables de vaincre les forces coulombiennes et de stabiliser le noyau vis à vis de la fission alors que les seules considérations macroscopiques (modèle de la goutte liquide) interdisent l'existence de noyaux possédant plus de 104 protons. Les nombres magiques de 2 à 82 étant communs aux protons et aux neutrons, la logique voudrait que la prochaine fermeture de couche en protons soit $Z=126$, analogue de $N=126$ connue pour le ^{208}Pb . Mais depuis les années 60, des calculs microscopiques-macroscopiques (approche de Strutinsky) ont conduit à envisager $Z=114$ et $N=184$, tandis que d'autres calculs (Hartree Fock Bogolyubov -HFB- et champ moyen relativiste -RMF) prédisent que l'îlot se répartirait sur une région centrée sur $Z=120$ ou $Z=126$.

La méthode la plus favorable pour synthétiser des S-L en laboratoire a été jusqu'à présent de former des résidus d'évaporation après des réactions de fusion avec des cibles lourdes. Ces résidus d'évaporation sont ensuite séparés du faisceau incident et identifiés après implantation dans des détecteurs sensibles en position. L'identification des noyaux se fait par la détection de la chaîne de décroissance reliant un noyau connu au résidu S-L produit dans la réaction. Récemment, des éléments jusqu'à $Z = 118$ ont été ainsi synthétisés par fusion chaude à Dubna. La confirmation de la synthèse de ces éléments reste cependant à réaliser rapidement.

La **synthèse** d'éléments plus lourds nécessite à moyen terme des développements techniques (séparateurs, cibles, détection) et l'accessibilité à de nouveaux faisceaux (stables de haute intensité et radioactifs). Les méthodes chimiques d'identification ainsi que le piégeage des résidus d'évaporation semblent incontournables pour ces études et doivent également être développés. A long terme, bénéficiant de ces apports techniques, l'accès aux noyaux S-L ($Z=120/126$ $N=184$) est envisageable par des systèmes tels que $(^{238}\text{U} (^{82}\text{Se}, xn)^{320-xn}_{194}126, ^{232}\text{Th} (^{86}\text{Kr}, xn)^{318-xn}_{192}126)$.

A plus court terme, les études conjointes de **structure nucléaire** et de **mécanismes de réaction** vont apporter des informations essentielles. Les dispositifs actuels permettent d'étudier la structure des éléments SL jusque $Z \sim 104$, et de comprendre son influence sur la stabilité, c'est-à-dire, connaître les formes et/ou leur période de décroissance. L'évolution de ces caractéristiques avec le nombre de neutrons pour des éléments de $Z < 105$ sera sans doute mesurée. Diverses méthodes (spectroscopie α , γ et électron, excitation Coulombienne, piégeage d'ions) permettent d'accéder aux caractéristiques des S-L (spin, parité, premiers états excités, moments quadripolaires, barrières de fission, masses).

L'étude des mécanismes responsables de la formation et de la survie des éléments S-L ainsi que la modélisation de ces mécanismes doivent être poursuivies et affinées. La preuve de l'existence d'un îlot de stabilité et son identification seront obtenues par des mesures directes de temps de fission caractérisant la stabilité des éléments formés par fusion. Afin de prouver l'existence ou non d'un îlot de stabilité, il est nécessaire de s'approcher de cette région en produisant des noyaux de plus en plus lourds en protons et en neutrons. Il est également indispensable de quantifier et de comprendre les processus, tels que la quasi-fission, les compétitions quasi-fission/fusion-fission ou fusion-fission/fusion-émission de particules (neutres ou chargées). D'autre part l'influence de la structure des partenaires et de la dynamique de la collision (symétrie, influence des couches fermées, isospin) doit être étudiée dans le cas du mécanisme de fusion-évaporation afin de favoriser la formation et la survie des résidus S-L.

II. Synthèse des éléments S-L

Jusqu'à ce jour, deux voies de réaction ont progressé avec succès vers l'îlot de stabilité prévu pour les S-L. La fusion froide utilise un projectile léger et une cible de plomb ou bismuth. Les éléments produits (jusqu'au Z=112 en 1996 à GSI) sont identifiés en Z et A grâce à leur chaîne de décroissance α qui se termine par des éléments connus. Cette méthode d'identification non ambiguë se heurte à deux difficultés :

- La systématique montre que la section efficace chute d'un facteur 10 lorsque le numéro atomique augmente de 2. Pour progresser au delà du 114, des nouvelles installations plus efficaces sont nécessaires.
- La méthode d'identification par décroissance α ne permet de valider que des isotopes pauvres en neutrons qui se terminent par des isotopes connus.

Parallèlement, la fusion chaude produit, en utilisant une cible d'actinide, des noyaux plus riches en neutrons. Les résultats obtenus à Dubna montrent des sections efficaces entre 5pb et 0,1pb pour les éléments du 112 jusqu'au 118. Par contre, leur identification reste ambiguë car la chaîne de décroissance des noyaux produits se termine par des éléments inconnus.

Validation des résultats via la fusion chaude obtenus à Dubna

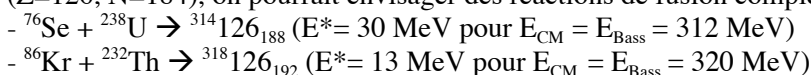
Les résultats obtenus en fusion chaude sont intéressants, mais ils doivent être validés dans un autre laboratoire ou via une autre méthode de production. Il est donc fondamental:

- dans un premier temps de confirmer les résultats de Dubna, en reproduisant les réactions à l'identique et en identifiant directement les résidus d'évaporation par une méthode alternative,
- dans un second temps d'améliorer ces données, en multipliant les événements, ce qui permettrait de mesurer leurs masses directement en utilisant un piège à ions, par exemple.

Le premier point peut débiter à court terme en parallèle avec le développement d'outils d'identification. Une des possibilités d'identification serait de faire la chimie des fils de l'élément synthétisé. Par exemple, la troisième filiation de l'élément 114 correspond à l'élément 108, dont la chimie est bien connue. A plus long terme, on peut estimer à un minimum de 3 mois le temps de faisceau nécessaire sur une installation à très haute intensité (avec un taux d'événements multiplié par 10 par rapport aux équipements actuels), pour compléter ces validations. Le second point demande plusieurs années.

Vers l'îlot de stabilité

Le but ultime de la synthèse des éléments S-L est d'atteindre l'îlot de stabilité. Pour atteindre le noyau (Z=126, N=184), on pourrait envisager des réactions de fusion complète telles que :



Aux masses estimées près, ces réactions sont énergétiquement possibles même si, malgré la relative « stabilité » de ces noyaux, leurs sections efficaces sont sans doute extrêmement faibles.

Quelle que soit la manière d'y parvenir, progresser vers ce but implique en premier lieu des intensités de faisceau très importantes, des temps de faisceau très longs, ainsi que les installations spécialisées et dédiées à ces mesures : cibles résistantes à la chaleur, outils de réjection du faisceau puissants et détection rapide.

Identification des S-L

Comme pour la fusion chaude, le rapport N/Z élevé de l'îlot rend inadéquate l'identification des noyaux par décroissance α : la continuité entre des noyaux connus et l'îlot ne peut être assurée. Il est nécessaire de développer de nouvelles méthodes d'identification directes en Z et A des noyaux créés afin d'ôter toute ambiguïté : pièges à ions, spectromètres temps de vol, calorimètres haute-résolution, spectroscopie laser et pour les noyaux ayant un temps de vie « long » (~1 min), les techniques chimiques d'identification. Ces méthodes devront être testées sur des « S-L légers » connus et peuvent être développées dans le cadre du programme S-L au GANIL.

Nouvelles voies pour les S-L

L'intensité des faisceaux riches en neutrons progresse (SPIRAL2 et EURISOL). Ils peuvent devenir à terme utilisables, dans une première étape, pour la synthèse de nouveaux isotopes de « S-L légers ». Des études de

mécanismes restent à faire pour montrer l'influence du nombre de neutrons sur les sections efficaces de production. Couplés avec la chimie, ces nouveaux isotopes peuvent aider à l'identification des noyaux manquants dans la charte des nucléides.

La fusion par voie symétrique offre des opportunités certaines pour la synthèse de certains isotopes. Elle est également intéressante pour l'étude du rôle du paramètre d'asymétrie de masse du système.

Il est certain que les études de synthèse se couplent très bien avec les études spectroscopiques et celles des mécanismes de réaction.

II. Structure des noyaux lourds et super-lourds

Les sections efficaces de production des noyaux transférmium sont suffisamment élevées pour permettre d'effectuer des études détaillées de spectroscopie. Leurs objectifs sont :

- déterminer les orbitales responsables de la configuration de tels noyaux et leurs propriétés.
- étudier la collectivité des noyaux, en particulier la déformation autour des îlots de déformation (^{254}No et ^{270}Hs).
- déterminer la masse des noyaux.
- estimer les barrières de fission.

Les modèles de champ moyen de type HFB ou RMF permettent de calculer ces quantités, mais d'importants désaccords sont constatés. Les études expérimentales doivent donc apporter de fortes contraintes, afin de mieux prédire les propriétés des noyaux super lourds. Cette étude, autour de la zone très lourde, aidera, par exemple, à déterminer le prochain nombre magique en Z, qui peut être $Z = 114, 120$ ou 126 , dépendant des modèles.

Moyens existants ou en cours de développements

Deux techniques complémentaires sont utilisées :

- spectroscopie gamma ou électron prompte. Ces études sont actuellement effectuées à l'Université de Jyväskylä (spectroscopie γ et électron, RITU, Sacred, Jurogam). Un projet est en cours d'étude à Dubna, avec comme spécificité la possibilité d'utiliser des cibles radioactives ainsi que l'utilisation d'électronique digitale autorisant des intensités de faisceau élevées (spectroscopie α , Dubna-ball, Vassilissa). Des études à l'aide de Vamos, d'Exogam ou d'un spectromètre électron au GANIL sont envisagées.
- Spectroscopie électron et γ après décroissance . Les expériences sont réalisées à Jyväskylä (RITU, Great), à Ganil (LISE), et prochainement à Dubna.

Avec les dispositifs actuels, l'étude de noyaux au delà de $Z \sim 104$ n'est pas réaliste. Sans développements innovants, une saturation des études est à craindre d'ici 5 ans.

Projets à moyen et long terme.

Des progrès sont possibles en améliorant l'efficacité des dispositifs de détection et en utilisant les accélérateurs actuels (GANIL, Dubna et Jyväskylä):

- nouveau spectromètre de très grande acceptance (transmission supérieure à 70%) et de très bonne rejection (supérieure à 10^{12}); MASHA.
- spectromètre γ de haute efficacité et granularité autorisant de très hauts taux de comptage : AGATA
- dispositifs expérimentaux associant des spectromètres électron et γ .

La disponibilité de faisceaux radioactifs intenses (Spiral II puis EURISOL) permettra d'explorer de nouvelles régions s'approchant de l'îlot de stabilité ou de la zone des noyaux déformés autour de ^{270}Hs . L'utilisation de faisceaux de très haute intensité (y compris d'isotopes rares) doit s'accompagner de développements des cibles adéquates et systèmes associés. L'utilisation de cibles radioactives doit se généraliser.

De nouvelles techniques doivent également être explorées : mesure de moments quadropolaire après fusion en cinématique inverse ou par mesure de temps de vie (avec l'utilisation d'un plunger ou d'un plunger d'états de charge) ; spectroscopie laser ; mesure de masse à l'aide de pièges ; mesure de barrière de fission par réaction (d,p) en cinématique inverse.

Experiences type

- Mesure du spin et de la parité de l'état fondamental et d'états excités dans des noyaux transfermium impairs, par spectroscopie α , électron et γ .
- Mesure de moment quadropolaire de ^{254}No par excitation coulombienne, mesure de temps de vie, mesure de distribution d'états de charge ou spectroscopie laser.
- Spectroscopie gamma et électron prompt de ^{270}Hs .
- Mesures de masse à l'aide de pièges ou de spectromètres efficaces et très sélectifs.

III. Mécanisme et dynamique de réaction

Le succès rencontré ces dernières années dans la synthèse des éléments S-L à la fois à Dubna et à Darmstadt ne doit pas faire oublier les nombreuses lacunes existantes dans ce domaine de recherche. En effet, les différents mécanismes responsables des faibles sections efficaces de fusion, en particulier la quasi-fission, ne sont pas bien compris. De même, la compétition entre fission et survie du noyau composé n'est pas bien maîtrisée.

Un des problèmes les plus épineux dans ce domaine de masse est la compétition entre quasi-fission et fusion-fission. En effet, ces deux mécanismes mènent à des observables très similaires et sont très difficiles à discriminer expérimentalement. Les caractéristiques des fragments ne permettent pas cette distinction. La différence la plus marquée entre les deux processus réside probablement dans les temps de vie des deux systèmes composites, la quasi-fission ayant un temps de vie beaucoup plus court que la fusion-fission à cause de trajectoires différentes suivies sur la surface d'énergie potentielle.

Du point de vue théorique, si la plupart des modèles s'accordent à prédire ou à reproduire les sections efficaces de capture et de formation du résidu d'évaporation, ils divergent de plusieurs ordres de grandeur dans la description des étapes intermédiaires qui mènent à la synthèse. Il apparaît donc indispensable d'apporter des contraintes expérimentales fortes à ces modèles qui comportent tous un grand nombre de paramètres.

Si les avancées récentes, mesures directes des temps de réaction par la technique d'ombre dans les monocristaux et distributions des neutrons de pré-scission par backtracing, permettent vraisemblablement de réaliser une discrimination expérimentale entre fusion et quasi-fission, il n'en reste pas moins vrai que des contraintes supplémentaires sont indispensables pour obtenir une modélisation fiable de ces réactions. Il s'agit principalement de mesurer les probabilités de fusion ainsi que les probabilités de survie en fonction de la voie d'entrée (asymétrie, isospin, énergie d'excitation, moment angulaire, effets de couche, ...). L'importance des aspects dynamiques, longtemps ignorés, est maintenant bien établie. Cependant la nature et l'amplitude de la dissipation (aussi bien dans la voie d'entrée que dans la voie de sortie), sa dépendance avec la température et la déformation sont toujours sujets à controverse. L'évolution dynamique des effets de couche reste également à préciser.

Au cours des années à venir, les temps de fission des éléments S-L seront mesurés de façon directe en fonction de leur charge, masse et énergie d'excitation par la technique d'ombre dans les monocristaux, permettant ainsi une localisation précise en Z et A de l'îlot de stabilité par un fort allongement des temps de fission. Les paramètres déterminant la compétition fission/évaporation seront affinés pour les noyaux très lourds et S-L grâce à la détermination de la chronologie d'émissions des particules par la technique de fluorescence X, une technique de mesure directe de temps complémentaire à la technique d'ombre dans les monocristaux.

Ces mesures de temps devront être associées à des mesures précises des distributions angulaires, des caractéristiques cinématiques (énergie, masse, charge, angle) des fragments de fission et des propriétés des particules de pré et de post-scission. Les corrélations entre les diverses observables permettront d'obtenir par backtracing les distributions des paramètres physiques décrivant l'évolution des systèmes. L'exploitation de telles données devrait permettre de répondre aux diverses questions encore objets de controverse et d'apporter un pouvoir réellement prédictif aux modèles en cours de développement. L'information γ a été peu exploitée jusqu'ici. Les investigations portant sur l'excitation des résonances géantes, la multiplicité ainsi que l'énergie totale emportée par les γ devraient constituer d'autres outils permettant la discrimination entre quasi-fission et fusion-fission. En particulier, l'influence de la déformation des partenaires en présence pourrait être mise en évidence. Des expériences visant cet objectif sont en cours de réalisation. Eventuellement, l'accès simultané aux différentes informations s'avèrera nécessaire. Dans ce cas, l'utilisation d'un multidétecteur γ très performant sera indispensable.

Les ressources actuelles (hommes, faisceaux, détecteurs) permettent à court terme la poursuite des

expériences en cours ou déjà envisagées au GANIL, à Legnaro et à Dubna concernant la compétition quasi-fission/fusion. Ces études réclament de l'ordre de 3 mois faisceau/an et nécessiteront 4 à 5 campagnes sur les différents sites. Les expériences visant à obtenir précisément les distributions de masse et de Z réclameront l'accès à VAMOS et à EXOGAM.

A moyen terme, la disponibilité des faisceaux radioactifs (SPIRAL II, DRIBS II, GSI) permettra l'étude de l'influence de l'isospin dans la voie d'entrée et l'accès à une zone de masse plus étendue. A plus long terme, des faisceaux stables intenses rendront possibles des synthèses actuellement hors d'atteinte pour des raisons évidentes de sections efficaces et permettront donc également l'accès à des zones nouvelles. L'ensemble de ces programmes demandera le développement de moyens de détection adaptés, particulièrement pour les neutrons, particules chargées et γ .

IV. Sommaire, programme, développements et moyens

Les questions sur l'existence d'un îlot d'éléments S-L, la simple recherche de nouveaux éléments chimiques, la structure des noyaux très lourds et les implications relativistes de la chimie dans la zone d'éléments extrêmement lourds sont des questions d'actualité auxquelles nous n'avons toujours pas de réponses précises. Les moyens théoriques et expérimentaux se trouvent *principalement* en Allemagne, Russie, Japon, Finlande, Etats-Unis et France. Au vu de l'importance de ce sujet, la communauté scientifique autour de ce thème n'est pas très grande. L'effort scientifique international peut s'estimer à environ une centaine de physiciens-an permanents et le budget d'investissement des dernières années n'est pas, non plus, très important. Nous l'estimons à environ 2M à 3Meuros par an depuis 10 ans. Les questions abordées par ce sujet scientifique se résument principalement aux quatre points :

1. Synthèse et identification de S-L
2. Spectroscopie de noyaux lourds et S-L
3. Mécanismes de réaction liés à la synthèse des éléments lourds et S-L
4. Chimie et techniques d'identification des éléments lourds et S-L

Les quatre thèmes bénéficient partiellement des mêmes outils expérimentaux, tout étant reliés entre eux.

A présent et avec les techniques et outils disponibles dans les différents laboratoires, nous pouvons prévoir la poursuite des activités dans ce domaine pour environ 5 ans. Ces activités seront poursuivies principalement sur les activités autour de :

- Thème 2 – Spectroscopie – pour la partie moins exotique, jusqu'à l'élément 104.
- Thème 3 – Mécanismes de réaction
- Thème 4 – Chimie – aussi pour des éléments moins exotiques, jusqu'à l'élément 112.

Il faut noter que, concernant la chimie des éléments lourds et S-L, nous n'avons pas identifié une communauté active, ce qui est d'une certaine façon regrettable pour le développement de ce thème en France.

La réalisation du thème 1 est fortement conditionnée par les progrès réalisés et les nécessaires études préalables effectuées grâce aux thèmes 2, 3 et 4.

L'avenir de cette discipline passera certainement par une évolution des moyens expérimentaux et théoriques à savoir :

- Tout d'abord, l'amélioration des performances des séparateurs actuels puis le développement de nouveaux spectromètres et séparateurs, avec une meilleure acceptance ($>70\%$) et une plus grande réjection des faisceaux incidents ($>10^{12}$).
- Le développement de nouveaux accélérateurs avec une intensité de faisceaux stables et radioactifs d'un à deux ordres de grandeur supérieure aux intensités disponibles actuellement.
- Le développement de nouvelles cibles supportant des intensités supérieures à celles actuelles et la construction d'un laboratoire de cibles radioactives.
- Le développement de nouveaux détecteurs (par exemple AGATA), et d'électronique numérique afin d'identifier des décroissances et d'effectuer de la spectroscopie de toutes sortes (α , γ , et électron).
- Le développement des nouvelles techniques de chimie rapide.
- L'implantation de pièges d'ions derrière les séparateurs, afin d'avoir une identification non ambiguë des masses synthétisées et d'effectuer de véritables mesures de masse (énergie de liaison) des noyaux. L'association d'un piège de Paul et d'un laser devra permettre de mesurer les déformations (jusqu'aux ordres élevés) avec une grande précision.

- Le développement de nouveaux détecteurs de neutrons, principalement pour les questions liées au mécanisme de réaction.
- L'amélioration des modèles de dynamique de réaction, afin de mieux comprendre les mécanismes et avoir un meilleur pouvoir prédictif des sections efficaces de synthèse des noyaux S-L.

Nous estimons que, afin d'avoir une véritable contribution de la communauté française dans ce sujet de physique, un effort équivalent à environ 30 hommes-an (physiciens permanents, ITA et étudiants) avec un budget d'environ 3 Meuros par an serait envisageable. Le budget n'inclut pas la construction d'un accélérateur dédié pour cette physique. Nous considérons que le temps d'accélérateurs de faisceaux stables ou radioactifs utilisée par la communauté française serait d'environ 4 mois par an.

Références :

1. P. Armbruster, "On the production of superheavy elements", C.R. Physique 4 (2003), pages 571-594
2. R-D. Herzberg. Journal of Physics G 30 (2004) R 123
3. Ch. Theisen. Des noyaux lourds aux super-lourds. Ecole Joliot Curie 2002.