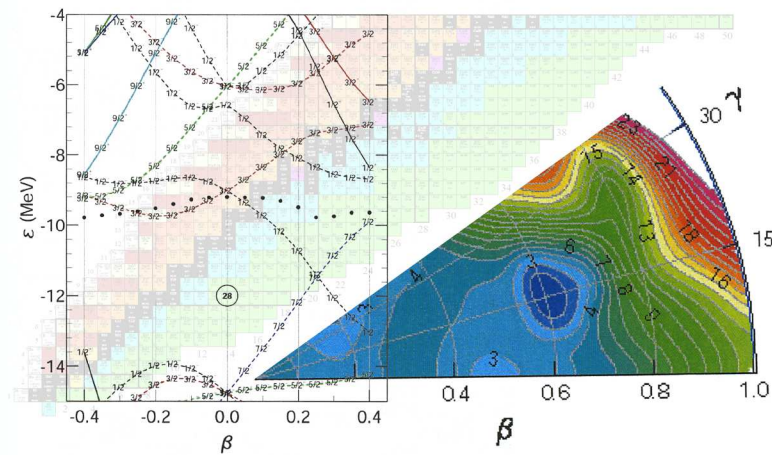


Recherche d'une approche fondamentale des noyaux moyens et lourds



Vincent Rotival

Master 2 Physique Fondamentale et Appliquée
Spécialité Noyaux, Particules, Astrophysique et Cosmologie
Rapport de pré-thèse

Commissariat à l'Énergie Atomique
Direction des Applications Militaires - Bruyères-le-Châtel
Service de Physique Nucléaire

Directeur de Thèse : Jean-François Berger

13 avril 2005

Table des matières

Contexte théorique	2
Formalisme du champ moyen	4
Travail proposé	7
Organisation de la thèse	8
Motivation personnelle	9

Ce rapport présente de façon succincte le travail que j'effectuerai lors de ma thèse au sein du Service de Physique Nucléaire de la Direction des Applications Militaire du Commissariat à l'Énergie Atomique. Cette thèse aura pour but de poser les fondements théorique à une approche fondamentale des noyaux moyens et lourds, pour lesquels les calculs actuels de structure présentent encore des difficultés. En effet, dans le cas des noyaux très exotiques, les calculs actuels utilisent des interactions nucléon-nucléon effectives phénoménologiques, et sont peu prédictifs. Pour aborder la physique des noyaux moyens et lourds très exotiques, seule une approche au delà du champ moyen, qui vise à déterminer la forme de l'interaction effective à partir de l'interaction nucléon-nucléon nue dans un formalisme totalement microscopique, paraît adaptée.

Il va de soi que le but de ce rapport est de présenter les grands axes du travail qui sera mené pendant ma thèse, sans entrer véritablement dans les détails du formalisme, que bien évidemment je ne maîtrise pas encore.

"Physics is much too hard for physicists."
(David Hilbert)

Contexte théorique

Depuis le modèle de l'atome de Rutherford en 1912 et la découverte du noyau par Chadwick en 1932, la physique nucléaire a toujours été un domaine de recherche actif, aussi bien pour ses applications civiles et militaires que pour étudier les interactions fondamentales de l'univers, comme le souligne James Chadwick lui-même dans la conclusion de sa conférence de Prix Nobel en 1935[CHA35] :

"These ideas thus explain the general features of the structure of atomic nuclei and it can be confidently expected that further work on these lines may reveal the elementary laws which govern the structure of matter."

Jusqu'à récemment, l'étude de la structure du noyau a reposé sur les noyaux et isotopes stables, que l'on pouvait trouver sur Terre. Il s'agissait donc d'espèces proches de la vallée de stabilité nucléaire. Les récents progrès expérimentaux, notamment en physique des faisceaux, ont entraîné la construction d'accélérateurs de faisceaux radioactifs au GANIL, RIKEN, Michigan State University, Oak Ridge Laboratory... Ces installations ont rendu possible l'exploration du tableau des nucléides loin de la vallée de stabilité, dans le domaine des noyaux exotiques, et ont ouvert de nouvelles perspectives quant à l'étude de la structure du noyau. De nouvelles voies d'exploration vers les noyaux exotiques de plus en plus lourds sont sans cesse ouvertes, avec l'évolution des accélérateurs et des systèmes de détection, à travers par exemple les projets RIA (*Rare Isotope Accelerator*) aux USA ou le projet européen EURISOL (*European Isotope Separation On-Line*).

De telles réactions ont donné des informations expérimentales sur près de 2500 noyaux, alors que les propriétés de près de 4000 autres espèces très exotiques au voisinage des *drip-lines* proton (le noyau est instable vis à vis de l'émission de protons) ou neutron (le noyau est instable vis à vis de l'émission de neutrons) sont encore inconnues.

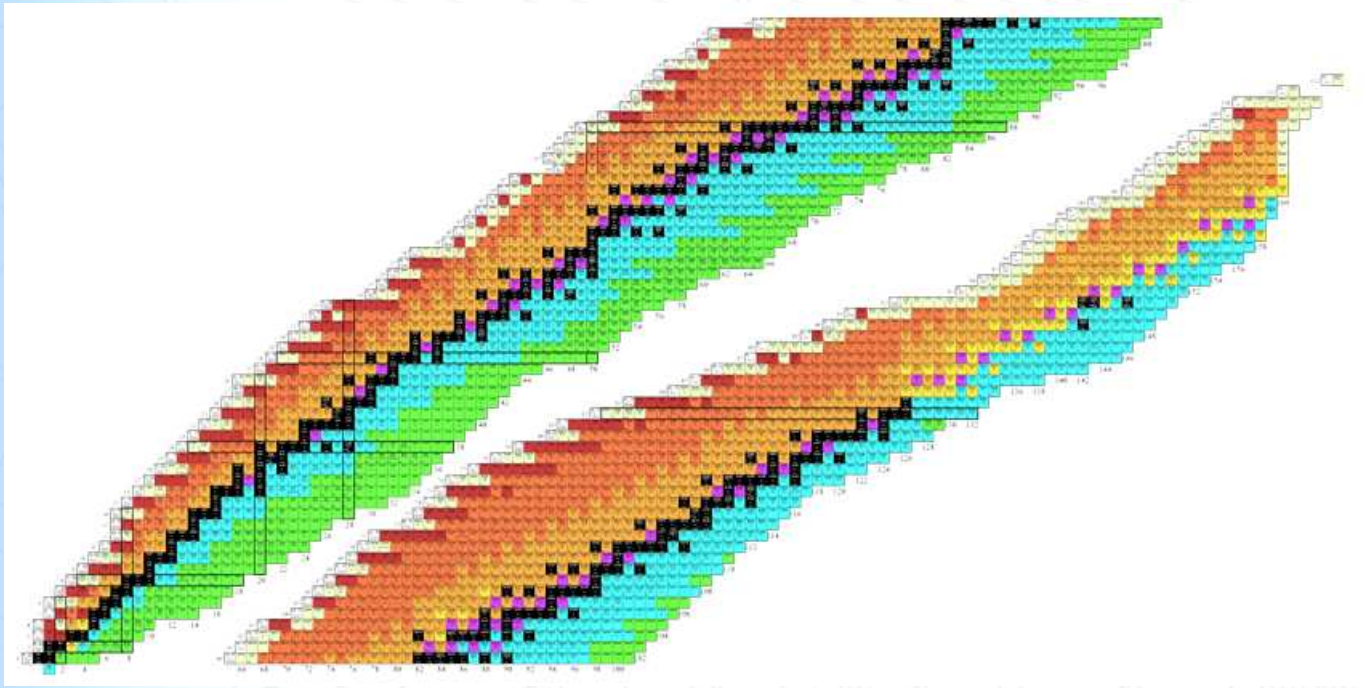


FIG. 1 – Tableau des isotopes connus en 2004. Les noyaux représentés en noir sont stables et abondants dans la nature

L'objectif est alors d'utiliser ces données pour parvenir à une compréhension de la structure des noyaux suffisamment précise, et ainsi d'être en mesure d'aborder la physique de n'importe quel système de nucléons, notamment ceux que l'on rencontre en astrophysique et en cosmologie, à savoir les espèces de la nucléosynthèse stellaire.

De nombreux modèles ont été développés pour rendre compte du comportement des noyaux. Le plus simple d'entre eux est sans conteste celui de la goutte liquide, qui permet de rendre compte des propriétés générales des noyaux, notamment les rayons carrés moyens, masses nucléaires et énergies de liaison. Ce modèle assimile un noyau à une goutte de liquide chargé, et exprime l'énergie de liaison en fonction de contributions volumiques b_{vol} , surfaciques b_{surf} et coulombiennes b_{coul} , en ajoutant un terme de symétrie b_{sym} et un terme d'appariement δ , regroupés dans la formule de Weizsaecker[WEI35] :

$$B = b_{vol}a - b_{surf}A^{2/3} - b_{coul}\frac{Z^2}{A^{1/3}} - b_{sym}\frac{(N - Z)^2}{A} + \delta$$

Les paramètres de ce modèle sont ajustés sur les données expérimentales. Ce modèle a par exemple permis d'interpréter les grands résultats de la fission nucléaire et montrer l'existence d'une barrière énergétique à la fission, en incluant dans le modèle le paramètre de déformation quadrupolaire β , par la formule de Bohr et Wheeler[BOH39]. Cependant, de nombreuses imperfections sont apparues en étudiant les écart entre les valeurs mesurées et les tendances prédites par la goutte liquide, notamment dans le cas des rayons carrés moyens ou des masses atomiques. Une paramétrisation plus précise dans le cadre de la goutte liquide, en tenant compte par exemple des corrections de couche, a remis d'actualité ce modèle[MYE82]. Mais, ses paramètres étant ajustés phénoménologiquement, sa prédictivité dans la région des noyaux exotiques est faible.

La véritable révolution dans la physique nucléaire est le modèle en couche introduit il y a plus de 50 ans par Maria Goeppert Mayer en 1948[MAY48], qui réalise la synthèse de résultats expérimentaux mettant en évidence l'existence de couches de nucléons, par analogie avec les couches électroniques, notamment en étudiant les surstabilités de certains noyaux pour des valeurs de N ou Z appelées nombres magiques[ELS34].

Un tel résultat a mis en évidence l'existence d'un champ moyen pour les nucléons, comme l'a écrit Maria Goeppert Mayer dans sa conférence Nobel de 1963[MAY63] :

"In analogy with atomic structure one may postulate that in the nucleus the nucleons move fairly independently in individual orbits in an average potential which we assume to have spherical symmetry."

Le formalisme du champ moyen permet donc d'écrire l'hamiltonien total du noyau

$$\hat{H}_{tot} = \sum_{i=1}^A \hat{T}_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1 < k} \hat{V}_{i,k}$$

où $\hat{T}_i$ est l'opérateur énergie cinétique du nucléon i et $\hat{V}_{i,k}$ l'interaction entre les nucléons i et k ; sous la forme réduite qui utilise le champ moyen $\hat{V}_i$

$$\begin{aligned} \hat{H}_{tot} &= \sum_{i=1}^A [\hat{T}_i + \hat{V}_i] + \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1 < k} \hat{V}_{i,k} - \sum_{i=1}^A \hat{V}_i \right] \\ &= \hat{h}_0 + \hat{h}_1 \end{aligned}$$

où $\hat{h}_0$ est l'hamiltonien de A nucléons indépendants dans le champ moyen $\hat{V}_i$, et $\hat{h}_1$ correspond à une interaction résiduelle entre ces nucléons.

Le champ moyen peut alors être construit à partir d'une interaction effective entre les nucléons, une force *habillée* par les effets du milieu. Il inclut par exemple de le terme du couplage spin-orbite. L'interaction résiduelle rend alors compte de l'ensemble des effets s'exerçant au-delà du comportement collectif. Cette interaction résiduelle contient notamment :

- un terme d'appariement entre nucléons.
- des termes multipôlaire correspondant aux différents modes de vibration du noyau.

Ce formalisme est extrêmement intéressant au vu de la complexité du problème du noyau. En effet, l'étude du noyau constitue un problème extrêmement complexe. La raison en est que le noyau atomique constitue un des systèmes quantiques à N corps les plus difficiles à étudier et à comprendre, cumulant la complexité inhérente à tout système à N corps quantique et les spécificités liées à sa taille finie et à notre méconnaissance de l'interaction entre ses constituants.

Ainsi, une méthode de résolution du problème à N corps nucléaire *ab initio*, en cherchant directement les solutions de l'hamiltonien total à l'aide de techniques de Faddeev-Yakubovsky n'est réalisable que pour un nombre de nucléons petit[LAZ93][NAV99][NAV00][KAM00]. Des techniques de résolution basées sur la méthode de Monte-Carlo[PAN98] ou de modèle en couche sans coeur permettent de résoudre le problème jusqu'à l' ^{16}O , au prix de calculs gigantesques, et donnent de bons accords pour les énergies de liaison au détriment d'erreurs notables sur les rayons moyens. La résolution pour des noyaux plus lourds nécessite donc d'avoir recours à des approximations, notamment celle du champ moyen.

Formalisme du champ moyen

Le formalisme du champ moyen consiste à construire, à partir du terme d'interaction $\hat{V}_{i,k}$ entre deux nucléons i et k , l'opérateur $\hat{V}_i$ de particule indépendante pour le nucléon i , qui contient l'ensemble des interactions entre i et les autres nucléons du noyau.

La théorie Hartree-Fock (HF) permet alors d'exprimer ce champ moyen, en supposant que l'état fondamental $|\Phi_0\rangle$ s'écrit comme un déterminant de Slater des fonctions d'onde de particules individuelles $|\phi_{\alpha_i}\rangle$. On cherche alors à minimiser la fonctionnelle d'énergie

$$\epsilon[\Phi_0] = \frac{\langle \Phi_0 | \hat{H} | \Phi_0 \rangle}{\langle \Phi_0 | \Phi_0 \rangle}$$

sous la contrainte de normalisation $\langle \Phi_0 | \Phi_0 \rangle = 1$. Le champ moyen à un nucléon $\hat{U}$ découle alors de cette minimalisation en utilisant la méthode des multiplicateurs de Lagrange, et peut s'exprimer dans la base réduite $|i\rangle = |\vec{r}_i, \sigma_i, \tau_i\rangle$ par

$$\langle 1 | \hat{U} | 1' \rangle = \int d2 \int d2' \sum_{j=1}^A \phi_{\alpha_j}(2) \langle 1, 2 | \hat{V}_{1,2} | 1', 2' \rangle \phi_{\alpha_j}(2')$$

où $|1', 2'\rangle$ est la fonction antisymétrisée $|1', 2'\rangle - |2', 1'\rangle$, qui fait apparaître un terme direct et un terme d'échange.

La méthode HF permet donc de déterminer le champ moyen des nucléons, mais des extensions de cette méthode permettent d'inclure dans les calculs une partie de l'interaction résiduelle. On peut ainsi considérer :

- La méthode HFB (Hartree-Fock-Bogoliubov), qui utilise une forme de l'état fondamental $|\Phi_0\rangle$ différente d'un déterminant de Slater, à savoir un état $|\widetilde{\Phi}_0\rangle$ de l'approximation BCS (Barden-Cooper-Schrieffer), qui est une superposition d'états de paires de nucléons

$$|\widetilde{\Phi}_0\rangle = \prod_{\alpha>0} \left(u_{\alpha} + v_{\alpha} a_{\alpha}^{\dagger} a_{\bar{\alpha}}^{\dagger} \right) |0\rangle$$

où les états $|a_{\alpha}\rangle$ correspondent aux états à une particule de spin positif et $|a_{\bar{\alpha}}\rangle$ à des états de spin négatif. La fonctionnelle d'énergie $\epsilon[\widetilde{\Phi}_0]$, qui doit alors être minimisée sous les contraintes de normalisation $u_{\alpha}^2 + v_{\alpha}^2 = 1$ et de conservation en moyenne du nombre de particules $\langle \widetilde{\Phi}_0 | \hat{N} | \widetilde{\Phi}_0 \rangle = A^1$, inclut alors les corrélations d'appariement entre les nucléons.

- La méthode de la coordonnée génératrice (GCM) utilise d'autre part des fonctions d'onde de Hill et Wheeler $|\widetilde{\Phi}_0'\rangle$ qui incluent le mouvement collectif de vibration, qui fait partie de l'interaction résiduelle à prendre en compte.

Différentes formes phénoménologiques d'interaction effective sont utilisées couramment pour les calculs, notamment :

- la force de Skyrme[SKY56] ($S_I, S_{II}, S_{III}, SL_y1 \dots SL_y7 \dots$), qui paramétrise l'interaction nucléon-nucléon sous la forme d'une force de contact, par

¹Une spécificité de la théorie BCS est qu'une fonction d'onde BCS ne correspond pas à un nombre fixé de particules, contrairement à une fonction d'onde HF.

$$\begin{aligned}
\hat{V}_{1,2} = & t_0 \left(1 + X_0 \hat{P}_\sigma \right) \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \\
& + \frac{1}{2} t_1 \left[\delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \hat{p}^2 + \hat{p}^2 \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \right] \\
& + t_2 \hat{p} \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \hat{p} \\
& + i W_{so} \hat{p} \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) [\hat{p}(\hat{\sigma}_1 + \hat{\sigma}_2)] \\
& + \frac{1}{6} t_3 \left(1 + \hat{P}_\sigma \right) \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \left[\rho \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right)^\alpha \right]
\end{aligned}$$

où $\hat{P}_\sigma$ est l'opérateur d'échange de spin entre les nucléons 1 et 2, $\rho(r)$ la densité nucléaire, et les paramètres du modèle $t_{0,1,2,3}$, X_0 , W_{so} et α sont ajustés phénoménologiquement. Le paramètre α permet de simuler une interaction à plus de deux corps à travers la dépendance en densité.

- La force de Gogny, qui est une force effective qui décrit à la fois le champ moyen et l'appariement. En particulier celle-ci n'est donc pas une force de contact²[GOG80]. La paramétrisation utilisée consiste alors à remplacer les termes de contact par des termes gaussiens :

$$\begin{aligned}
\hat{V}_{1,2} = & \sum_{i=1}^2 e^{-\frac{(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^2}{\mu_i^2}} \left(W_i + B_i \hat{P}_\sigma - M_i \hat{P}_\sigma \hat{P}_\tau - H_i \hat{P}_\tau \right) \\
& + i W_{so} \hat{p} \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \hat{p} (\hat{\sigma}_1 + \hat{\sigma}_2) \\
& + t_0 \left(1 + X_0 \hat{P}_\sigma \right) \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \rho^\alpha \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right)
\end{aligned}$$

De telles méthodes de calcul de champ moyen permettent alors de construire les états de particule individuels du noyau, et d'en déduire notamment les énergies des premiers états excités.

²Une force de contact qui décrit l'appariement divergerait.

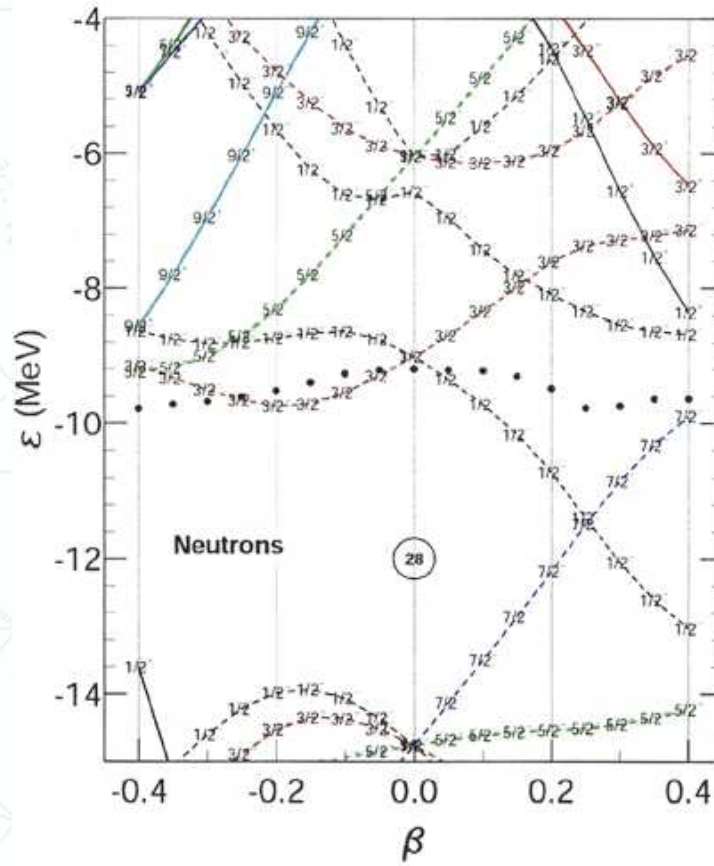


FIG. 2 – Exemple de calculs HFB: niveaux des neutrons dans le champ moyen créé par les 57 nucléons du ^{57}Fe , calculés avec une force de Gogny en fonction du paramètre de déformation quadrupolaire β

Le problème est que ces forces phénoménologiques, dont les paramètres sont ajustés à partir des résultats expérimentaux de nucléons proches de la vallée de stabilité dans le cadre du champ moyen, ne sont pas prédictives dans le cas des noyaux très exotiques, notamment ceux dont le rapport N/Z est grand.

Travail proposé

Pour répondre à ce problème, le travail qui m'est proposé pendant ma thèse consiste à construire une nouvelle forme de la force nucléaire effective à partir du potentiel d'interaction entre deux nucléons libres. Il s'agit donc de poser les fondements et de tester une nouvelle approche des noyaux dans laquelle l'interaction effective est dérivée à partir de l'interaction nucléon-nucléon nue, dans un cadre complètement microscopique. La méthode devra en particulier déterminer la forme de l'interaction effective qu'il faut utiliser dans les approches au-delà du champ moyen.

L'idée principale est de partir des approches variationnelles qui ont été appliquées jusqu'ici avec succès à un grand nombre de noyaux aussi bien lourds que légers, avec des forces nucléon-nucléon effectives phénoménologiques comme les forces de Skyrme et de Gogny : approches de champ moyen, mélanges de configurations nucléaires, méthodes de projection... et de les généraliser à un cadre complètement microscopique. De premiers essais particulièrement pro-

metteurs dans ce sens ont déjà été réalisés par Thomas Duguet[DUG03] en ce qui concerne l'interaction effective responsable de l'appariement des nucléons.

Il s'agira tout d'abord de développer une théorie perturbative du problème à N corps capable de traiter les différents types de corrélations présents dans la structure des noyaux : corrélations de courte portée, corrélations d'appariement, corrélations provenant des vibrations de grande amplitude (vibrations multipolaires, vibrations d'appariement notamment) et de la restauration des symétries spontanément brisées. Cette étape de l'étude consistera à exprimer et à analyser les vertex d'interaction effectifs dans les canaux particule-trou et particule-particule en fonction de ceux de la force nucléon-nucléon nue. L'étude du canal particule-particule, celui de l'appariement, est d'un grand intérêt car un certain nombre de phénomènes, comme par exemple l'influence des vibrations de grande amplitude sur la force d'appariement, ne sont pas du tout compris dans les noyaux finis. Dans un deuxième temps, des approximations des vertex effectifs devront être trouvées de façon à rendre les calculs microscopiques réalisables sur le plan numérique. Cette phase de l'étude demandera la mise en oeuvre de codes de calcul permettant de tester les approximations effectuées et de comparer les résultats avec les données expérimentales existantes, et avec ceux que donnent les forces effectives phénoménologiques. Les comparaisons porteront sur des lignes isotopiques et isotoniques comportant à la fois des noyaux stables et des noyaux exotiques.

Dans un premier temps, le stage de pré-thèse sera consacré à l'apprentissage des différentes méthodes précédemment citées, mais également à l'étude d'un problème apparu dans les calculs de structure avec la méthode HFB et la force effective de Gogny $D1S$. En effet, les résultats obtenus pour un ensemble très vaste de noyaux allant du carbone aux actinides sont en général en bon accord avec l'expérience, mais des désaccords manifestes apparaissent pour certains noyaux. C'est le cas du ^{96}Zr . Ce noyau est un noyau de transition entre un noyau sphérique semi-magique, le ^{90}Zr et un noyau très déformé, le ^{100}Zr . Le désaccord porte en particulier sur le premier état 2^+ , que le calcul trouve plus de deux fois trop bas en énergie, et le premier état 0^+ , que le calcul donne comme le quatrième état excité alors qu'il devrait être le premier. Il est clair que la description utilisée, basée sur les excitations collectives de type quadrupolaire, est insuffisante à rendre compte de ce noyau. Le but du stage sera donc d'explorer d'autres modes d'excitation, comme les modes octupolaires ou hexadecapolaires, qui n'ont pas été pris en compte jusqu'à présent, et qui pourraient expliquer le désaccord. Le travail consistera à calculer à l'aide des codes existants les surfaces d'énergie potentielles ainsi que les inerties collectives dans ces deux modes, et d'en déduire la spectroscopie. Il faudra alors analyser les résultats, les discuter et éventuellement avancer d'autres hypothèses si cette étude ne réussit pas à réduire, sinon à supprimer, le désaccord avec l'expérience.

Organisation de la thèse

Cette thèse sera encadrée de façon conjointe par Jean-François Berger, physicien au service de physique nucléaire de la Direction des Applications Militaires (DAM) du Commissariat à l'Énergie Atomique; et Thomas Duguet, professeur assistant à l'université du Michigan (MSU). Ainsi, les trois années de travail seront réparties en alternance entre la France et les États-Unis, par périodes d'environ six mois. Ceci me permettra de profiter simultanément de l'expertise de ces deux centres de recherche.

La vocation principale de la Direction des Applications Militaires, qui constitue le pôle défense du CEA, est de concevoir, fabriquer, maintenir en condition opérationnelle puis démanteler les têtes nucléaires qui équipent les forces océaniques et aéroportées. Depuis l'arrêt des essais nucléaires atmosphériques en 1996, la simulation numérique de ces armes est effectuée à la DAM. Le Service de Physique Nucléaire, situé sur le site de Bruyères-le-Châtel, sert la simulation avec une double mission d'expertise en recherche fondamentale et d'appui scientifique aux programmes armes. Ce service dispose notamment d'une grande expérience dans les calculs de structure à partir de focres nucléons-nucléons effectives.

D'un autre côté, le *National Superconducting Cyclotron Laboratory* (NSCL) de l'université du Michigan se concentre sur l'étude des isotopes aux frontières des *drip-lines*, notamment grâce à un accélérateur de faisceaux radioactifs, complété par le groupe de physique théorique qui m'accueillera pendant ma thèse, chargé de prédire et d'interpréter ces résultats expérimentaux.

De manière générale, mon travail au NSCL consistera à développer une nouvelle forme d'interaction effective nucléon-nucléon, en utilisant un formalisme développé notamment par Thomas Duguet, qui porte entre autres sur un développement diagrammatique de la théorie perturbative de Brueckner-Goldstone d'interaction effective. D'autre part, j'y serai amené à développer un code de simulation qui utilisera ce formalisme, à l'aide des spécialistes en informatique de MSU. La majeure partie de mon travail à la DAM sera consacrée à l'incorporation et la validation de cette force dans le cadre du champ moyen, et au-delà.

La participation à de nombreux séminaires et groupes de travail, par exemple le "*workshop*" "*Nuclear Structure Near Limits of Stability*" qui se déroulera à Seattle début octobre 2005, me permettront de mieux prendre conscience des enjeux et des développements mis en oeuvre, ainsi que, dans un second temps, de faire partager mes résultats.

Motivation personnelle

Ma passion pour la physique est somme toute assez récente, car elle m'a été communiquée lors des enseignements de physique à l'Ecole Polytechnique, notamment les cours de physique quantique de Jean-Louis Basdevant, et le cours de physique des particules d'André Rougé et Michel Gonin. C'est ce dernier qui m'a convaincu d'abandonner un cursus d'ingénieur classique et de suivre les enseignements de physique fondamentale. J'ai ainsi effectué mon stage d'option scientifique de mars à avril 2004 sous son aile au sein du groupe PHENIX du laboratoire Leprince-Ringuet. Ce stage expérimental, pendant lequel j'ai pu participer à la prise de données sur le site du *Relativistic Heavy Ion Collider* du laboratoire national de Brookhaven (NY, USA), mais aussi prendre part à l'analyse des données, m'a confirmé dans mon goût pour la recherche, et je me suis logiquement inscrit au DEA de physique fondamentale et appliquée d'Orsay, avec en point de mire une thèse expérimentale sur PHENIX.

Si les enseignements du DEA m'ont conforté dans ma passion pour la recherche fondamentale, le cours de physique nucléaire de Jean-Luc Sida et Laurent Tassan-Got m'a permis de me rendre compte que, malgré mon goût prononcé pour la physique expérimentale, j'étais également capable d'accomplir un travail de théoricien. En effet, j'ai trouvé du plaisir à réaliser les devoirs qu'ils nous ont proposé, en m'attaquant à des questions facultatives, en effectuant

des recherches bibliographiques poussées pour maîtriser tous les aspects des solutions que je proposais, et en réalisant des simulations pour les confirmer.

C'est dans ce sens que Jean-Luc Sida m'a proposé un sujet de thèse au sein du groupe de physique théorique de la DAM. Sur ses conseils, j'ai été amené à contacter Thomas Duguet, initialement pour lui poser des questions sur les possibilités de recherche aux USA après ma thèse, mais nos échanges se sont vite transformés en proposition concrète, jusqu'à finaliser un projet thèse conjointe entre la France et les Etats-Unis que je n'ai pas hésité à accepter.

J'ai tout d'abord été séduit par la possibilité de pouvoir effectuer mon travail de thèse en alternance entre la DAM et MSU. En effet, le séjour de cinq semaines que j'ai eu l'occasion d'effectuer au sein du groupe PHENIX près de New-York m'a permis d'apprécier la vie américaine, mais aussi de réaliser l'étendue des moyens accordés outre-Atlantique à la recherche fondamentale. Pour ces raisons, je désirais poursuivre une partie de ma formation là-bas, même si je ne me sentais peut-être pas encore prêt pour un PhD complet. En fait, il était initialement prévu que la thèse se passe en véritable cotutelle, et se solde par l'obtention conjointe d'une thèse européenne et d'un PhD, mais le refus de la chaire de physique de MSU n'a pas rendu cela possible, sans pour autant me dissuader d'y passer la moitié de mon temps. L'occasion qui m'a été donnée était donc trop belle...

Ensuite, il m'a semblé extrêmement profitable d'effectuer mon travail de thèse dans une équipe réduite, à l'antithèse de la collaboration PHENIX, qui regroupe près de 450 physiciens. En effet, je trouve dommage de travailler conjointement sur une même expérience avec des dizaines d'étudiants, dont les sujets de thèse se ressemblent tous plus ou moins, même si la possibilité d'interagir avec des chercheurs du monde entier est un plus indéniable dans de telles collaborations. Le sujet qui m'a été proposé me permettait au contraire de travailler sur un thème réellement innovant, dans une petite équipe dont l'expertise unique est mondialement reconnue, ce qui me permettrait de mettre en valeur mes résultats.

Enfin, le sujet lui-même, et son caractère novateur, m'a bien évidemment conquis. La perspective de poser les fondements d'une approche microscopique inédite du noyau, est un défi que j'ai voulu relever. Je trouve en effet bien plus stimulant de réfléchir à partir d'une feuille blanche, sans - ou presque - points de références auxquels se raccrocher, formuler chaque jour de nouvelles hypothèses à vérifier, explorer de nouvelles pistes de façon totalement libre à son propre rythme... avec notamment la perspective de rédiger un code de simulation "*from scratch*", qui me permettra de continuer à pratiquer l'informatique pour laquelle je me suis découvert une passion depuis mon entrée à l'X.

Cette thèse répond donc à toutes mes attentes, tout comme elle s'inscrit parfaitement dans mon projet de carrière, même si évidemment je n'en ai pas encore de vue à très long terme. En effet, j'aurais l'occasion de rencontrer de nombreuses personnes, aussi bien en France qu'aux États-Unis, ce qui me permet d'envisager mon avenir aussi bien dans un de ces pays que l'autre. Les nombreuses présentations que j'ai eues à réaliser au long de ma formation m'ont donné un goût prononcé pour la pédagogie, et je sais que si je décide de poursuivre dans la voie de la recherche fondamentale, je rechercherai un poste d'enseignant chercheur. Mon rêve serait en fait d'accéder à un poste de maître de conférence à l'Ecole Polytechnique, pour à mon tour partager ma passion et faire naître des vocations. Mais je reste conscient des difficultés du monde de la recherche en France, et j'écouterai avec attention d'éventuelles propositions d'outre-Atlantique. Je n'oublie enfin pas ma formation initiale d'ingénieur, qui pourrait se révéler profitable dans une carrière au sein du CEA, si je décidais de quitter progressivement le monde de la recherche au profit d'une carrière administrative de gestion de projets, no-

tamment le projet ITER.

En ce sens, cette thèse me donne donc l'occasion d'effectuer un travail de recherche fondamentale, mais sans pour autant me fermer à d'autres perspectives.

Bien évidemment, la perspective d'un tel travail a également suscité le doute, notamment sur mes capacités à "être à la hauteur" des attentes qui ont été placées en moi. Je tiens donc à remercier chaleureusement Jean-Luc Sida, Jean-François Berger et Thomas Duguet pour avoir su trouver les mots justes qui ont dissipé ces doutes, et j'espère ardemment me montrer digne de la confiance qu'ils ont placé en moi.

"Il existe différents métiers de physicien suivant les disciplines. Nous sommes tous en train de marcher dans une forêt sombre. L'un se ballade avec une carte et il sait où il doit aller pour vérifier la validité de sa carte, un autre se promène en regardant les étoiles sans se rendre compte qu'il a les pieds dans la boue, le dernier est perdu dans la forêt et fouille au voisinage de ses pieds crottés. Le physicien nucléaire s'apparente assez à la dernière espèce."

(Jean-Luc Sida)

Bibliographie

- [ELS34] W. Elsasser, J. de Phys. et Rad. 5 (1934) 625.
- [CHA35] James Chadwick, Nobel Lecture, *The neutron and its properties*, 12 Décembre 1935.
- [WEI35] C.F. von Weizsaecker, Z. Phys. 96 (1935) 431.
- [BOH39] N. Bohr et J.A. Wheeler, Phys. Rev. 56 (1939) 426.
- [MAY48] M. Goeppert Mayer, Phys. Rev. 74 (1948) 235.
- [SKY56] T. H. R. Skyrme, Philos. Maga. 1 (1956) 1043; Nucl. Phys. 9 (1959) 615; E. Chabanat et al. Nucl. Phys. A627 (1997) 710; Nucl. Phys. A635 (1998) 231; Nucl. Phys. A643 (1998) 441...
- [MAY63] M. Goeppert Mayer, Nobel Lecture, *The shell model*, 12 Décembre 1963.
- [GOG80] J. Decharge et D. Gogny, Phys. Rev. C 21 (1980) 1568.
- [MYE82] Myers, W. D., et W. J. Swiatecki, 1982, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 32, 309.
- [LAZ93] R. Lazauskas, *Etude de la diffusion de particules lourdes sur des systèmes atomiques et nucléaires*, Thèse de doctorat de l'université Grenoble I, 13 octobre 2003.
- [PAN98] V.R. Pandharipande, *International Nuclear Physics Conference, Paris, France, 24 August 1998*, Nucl. Phys. A654 (1999) 157c.
- [NAV99] P. Navrátil et B. R. Barrett, Phys. Rev. C 59 (1999) 1906.
- [NAV00] P. Navrátil, J.P. Vary et B. R. Barrett, Phys. Rev. C 62 (2000) 054311.
- [KAM00] H. Kamada et al., Phys Rev. C 61 (2000) 044001.
- [DUG03] T. Duguet, Phys. Rev. C 67 (2003) 044311.