

# GDR Réactions, Structure et Astrophysique Nucléaire : Expériences et Théories

## GDR Nucléaire RESANET

### Plan du document :

A. Introduction – Objectif du GDR	2
B. Le contexte scientifique	2
C. Les groupes de travail (GT)	4
GT1: Quelle est la structure et la dynamique des systèmes faiblement liés (noyaux exotiques) ?	4
GT2 : Quelles sont les formes des noyaux et les symétries sous-jacentes aux frontières en spin et en masse ?	7
GT3 : Quelles sont les nouvelles frontières dans la description microscopique des noyaux ?	10
GT4 : Quel est l'apport de la physique nucléaire à la compréhension de l'astrophysique ?	13
GT5 : Réflexions générales sur le programme de R&D commun	18
D. Organisation et moyens	19
D.1 Fonctionnement	19
D.2 Administration des tutelles et des sections du comité national	20
D.3 Budget	20
D.4 Echelle de temps et calendrier	20
D.5 Site web et liste de diffusion	21
E. Signataires de ce document	21

## A. Introduction – Objectif du GDR

Le but du Groupement de Recherche (GDR) proposé dans ce document est de fédérer, autour d'actions et de projets communs, les équipes de recherche du CNRS, des Universités et du CEA travaillant en physique nucléaire de basse énergie au niveau expérimental, théorique ou observationnel. L'objectif est donc de consolider et d'accroître l'expertise de la communauté française dans la compréhension des propriétés complexes du noyau et de la matière nucléaire. Cette initiative « bottom-up » permettra à la communauté de discuter de science, de nouvelles idées théoriques et expérimentales et d'intensifier les échanges entre les différents groupes de travail (GT) proposés (voir partie C) pour la physique nucléaire de basse énergie jusqu'aux interfaces (QCD, physique des particules, astrophysique, astronomie, chimie théorique et physique atomique). Les responsables du GDR tiendront les tutelles ainsi que le comité national informés des avancées scientifiques et pourront faire des propositions aux tutelles issues des discussions ayant lieu au sein du GDR (voir partie D.1).

Ce document détaille le contenu du projet de GDR et présente les groupes de travail qui le constitueront (GT), ainsi que son organisation et ses moyens.

## B. Le contexte scientifique

Actuellement plusieurs révolutions sont en cours, qu'il s'agisse de développements ultimes des capacités des accélérateurs et détecteurs actuels comme à SPIRAL2 et à FAIR-GSI, qu'il s'agisse d'outils nouveaux dont les capacités sont totalement inexplorés comme ELI-NP, ou encore qu'il s'agisse des télescopes sur Terre et dans l'espace qui recueillent une quantité de signaux d'une qualité inégalée, pour ne citer que VIRGO-LIGO. Ces révolutions soulignent la très forte vitalité de la physique nucléaire ainsi que l'étendue de son champ d'investigation. Ainsi, au moment où la construction de la phase 1 de SPIRAL2 s'achève d'une part, où d'autres installations comme ALTO, ATLAS-CARIBU, ELI-NP, ISAC-ARIEL, ISOLDE, FAIR-GSI, FRIB, RIKEN sont en cours d'exploitation ou de construction, et au moment où de nombreuses nouvelles données nous proviennent ou sont attendus des observatoires astronomiques, tels que XMM-Newton, FERMI, le radiotélescope de Nançay, NICER-ISS, VIRGO-LIGO, ATHENA\*, et nécessitent une meilleure compréhension de la physique nucléaire dans le cosmos, ce GDR permettra de rassembler la communauté scientifique française autour des questions à la fois fondamentales et interdisciplinaires liées à la compréhension du noyau atomique et de la matière nucléaire, de leurs degrés de liberté et de leurs interactions.

Le GDR établira plusieurs groupes de travail (GT), pour une durée déterminée, autour de questions importantes du domaine, allant des questions fondamentales - outils théoriques que nous développons et leurs confrontations aux mesures - aux questions plus interdisciplinaires comme l'astrophysique nucléaire, le diagramme de phase de la matière dense, le problème à N corps à l'interface avec d'autres disciplines (chimie quantique, gaz d'atomes froids), l'interaction neutrino-noyaux, les décroissances beta et double- $\beta$ , etc... Ainsi les activités du GDR seront développées autour de trois volets

---

\* en projet

principaux : les mesures et analyses expérimentales, les analyses de données observationnelles, et le développement d'outils théoriques fiables et universels.

Dans le domaine des recherches expérimentales, qui a pour sujet le noyau atomique modélisé comme un système quantique fini à N-corps, le programme scientifique à court, moyen et long terme de la communauté de physique nucléaire est déjà bien établi. Les équipes françaises travaillent en priorité sur les mesures des propriétés nucléaires dans des conditions extrêmes d'isospin, de spin, de charge et de masse. Les objectifs sont de sonder l'évolution de la matière nucléaire en fonction des paramètres  $N/Z$ ,  $I$ ,  $\omega$ ,  $Z$  et  $A$ . Il s'agit par exemple de mettre en évidence des structures nucléaires exotiques (nouveaux nombres magiques, nouvelles formes de collectivité, coexistence de formes, condensats et structures moléculaires) et des mécanismes nucléaires originaux (nouvelles radioactivités, modes de résonances), d'étudier les états non liés aux driplines ou d'avancer dans la compréhension et la formation des noyaux super-lourds. C'est un ensemble cohérent qui nous permet de progresser vers une description microscopique et unifiée de la structure et des réactions nucléaires.

Les recherches observationnelles proviennent de laboratoires très variés qui peuvent être sur Terre ou bien embarqués sur des satellites. Ces laboratoires sont sensibles à des longueurs d'onde allant des ondes radio aux rayons  $\gamma$ , et depuis 2015 les premières ondes gravitationnelles observées ont ouvert un nouveau champ d'investigation de l'astronomie qui pourra, entre autres, permettre d'établir des contraintes inédites sur l'équation d'état de la matière. Les données recueillies auprès de ces laboratoires sont extrêmement nombreuses et variées. Les sources qui intéressent ce GDR sont celles qui mettent en jeu des processus nucléaires à travers des réactions spécifiques, des radioactivités observables ou les propriétés de la matière dense : novae, supernovae, étoiles compactes et leur coalescence, nucléosynthèse, etc... L'analyse de ces données nécessite des mesures très précises en laboratoire, comme des taux de réactions, des mesures de masses, etc..., ainsi qu'un cadre théorique cohérent permettant des prédictions fiables pour des systèmes difficilement reproductibles sur Terre. La profusion de données est une richesse incroyable et requière des échanges entre les différents acteurs de ces recherches. Ce GDR permettra aux équipes concernées de se rencontrer et de partager leurs dernières découvertes.

Enfin, le troisième volet de ce GDR concerne la modélisation théorique des noyaux et de la matière nucléaire, ainsi que les liens interdisciplinaires avec la chimie théorique et les gaz d'atomes froids. La modélisation s'intéresse à la fois aux fondations de la physique nucléaire et à la compréhension de l'émergence de l'interaction nucléaire à partir de la théorie sous-jacente (la chromodynamique quantique), mais aussi aux processus nucléaires complexes qui ont lieu durant les réactions nucléaires, mettant en jeu par exemple un fort couplage au continuum et pouvant, dans certains cas, être complété par une partie statistique. La modélisation nucléaire s'intéresse aussi à la résolution du problème à N corps nucléaire que cela soit au travers des approches de mélanges de configurations (modèle en couches) ainsi qu'à la compréhension et à l'optimisation des approches dites « de la fonctionnelle de la densité » qui permettent de décrire la majorité des noyaux. Enfin, la modélisation théorique est au cœur des données nécessaires à la compréhension des phénomènes astrophysiques. Ce GDR rassemblera cette communauté à travers ses différents groupes de travail. Un groupe de travail est aussi axé sur les derniers développements théoriques.

## C. Les groupes de travail (GT)

Les GT regrouperont des théoriciens et des expérimentateurs, experts de la physique du noyau ainsi que d'autres disciplines aux interfaces avec la physique nucléaire : QCD, physique des particules, astrophysique, astronomie, chimie quantique, gaz d'atomes froids. Les GT seront décidés par le conseil de direction (CD) du GDR et discutés annuellement au sein du conseil scientifique (CS). Au démarrage du GDR, les GT tels qu'ils sont décrits dans cette section seront proposés au CD.

### **GT1: Quelle est la structure et la dynamique des systèmes faiblement liés (noyaux exotiques) ?**

Les systèmes faiblement liés sont au cœur des efforts expérimentaux pour repousser les limites de la connaissance. Il s'agit d'approcher au plus près de la frontière de stabilité, du côté des neutrons comme des protons, pour produire et analyser des noyaux instables dont la durée de vie est extrêmement courte. En France, le GANIL s'est orienté vers la production des noyaux exotiques depuis le début des années 1990, d'abord via la fragmentation en ligne d'un faisceau primaire, puis depuis le début des années 2000, via le procédé ISOL (SPIRAL1) et son extension SPIRAL2. Plus récemment, ALTO permet de produire des noyaux exotiques via un procédé ISOL complémentaire à celui du GANIL. La France est aussi associée, via le CERN, à l'installation ISOLDE. Ainsi, les équipes françaises sont impliquées auprès de l'ensemble des machines en fonctionnement, en France et à l'étranger. A RIKEN (Japon) des faisceaux de noyaux exotiques les plus extrêmes sont produits depuis la fin des années 2000. Le cycle de fonctionnement de cette installation est cependant faible, et de nouvelles installations sont en phase de construction en Allemagne (FAIR) et aux Etats-Unis (FRIB). Ce GT est une opportunité pour aider à la synergie entre les installations françaises et étrangères à travers des questions scientifiques spécifiques ou des concepts théoriques communs.

#### ***Peut-on prédire dans un cadre théorique cohérent des observables de réactions de basse énergie (transfert, noyaux anti-protoniques, diffusion électron-noyaux) ? Quelles nouvelles mesures seraient utiles aujourd'hui à cette fin ?***

A l'exception des systèmes de masse  $A < 10$  à très basse énergie, les approches décrivant la structure des noyaux (modèle en couches, champ moyen, etc...) sont souvent déconnectés de celles qui permettent de traiter les mécanismes de réactions. Les informations issues de réactions demeurent donc aujourd'hui au niveau "d'indication expérimentale". Peut-on imaginer des approches théoriques qui permettent d'aborder structure et réaction d'un même pied d'égalité tout en contrôlant les incertitudes ? Quelles sondes expérimentales pourraient permettre une telle approche cohérente ?

Deux pistes peuvent être envisagées: (i) des réactions de très basse énergie où l'espace en moment est suffisamment restreint pour qu'un traitement numérique soit envisageable (ex. transfert à très basse énergie, annihilation de nucléon après capture d'antiproton), (ii) les sondes électromagnétiques dont le Hamiltonien est connu, par exemple diffusion d'électron, photons  $\gamma$  de haute énergie (plusieurs MeV), qui permettraient éventuellement de traiter les interactions dans l'état final de façon contrôlée.

[Lien avec les GT2, GT4]

#### ***Quel est l'effet des états du continuum dans la description des systèmes nucléaires ?***

Contrairement aux noyaux stables, les états du continuum jouent un rôle très important pour la description de la spectroscopie et des réactions des systèmes faiblement liés. La modélisation

théorique est ainsi cruciale dans l'analyse des mesures expérimentales. Il s'agit par exemple de la compréhension des spectres  $\gamma$  d'états faiblement liés et de résonances, des effets proches du seuil d'émission pouvant révéler des corrélations à plusieurs particules, l'apparition d'agrégats « exotiques » ( $^2n$ ,  $^4n$ ,  $^3H$ ,  $^2He$ ,  $^3He$ , etc...), ou encore de paires d'états non-liés. Les états du continuum jouent un rôle très important dans les corrélations d'appariement proches de la dripline. Ils peuvent renforcer ou bien fortement réduire ces corrélations et faire apparaître de nouveaux phénomènes qui défient à la fois la modélisation théorique mais aussi les possibilités de mesure expérimentales. Le continuum joue un rôle important dans les réactions de basse énergie, dont certaines sont d'intérêt astrophysique, comme  $(N,N')$  et les captures radiatives  $(N,\gamma)$ , où  $N=n, p$ , ainsi que les réactions binaires avec des projectiles complexes comme  $(d,d')$ ,  $(^3He, ^3He')$ ,  $(\alpha, \alpha')$ ,  $(d,N)$ ,  $(\alpha,N)$ , où les enjeux théoriques concernent l'anti-symétrisation entre les états du projectile, de la cible, et du noyau composé (projectile+cible).

[Lien avec les GT3, GT4]

### ***Quel est le lien entre dynamique et statistique pour les réactions nucléaires complexes ?***

Les réactions nucléaires complexes ne peuvent pas être décrites en termes d'éléments de matrices de transition entre états nucléaires discrets du fait du très grand nombre d'états intermédiaires dans le continuum. Il est souvent préférable d'utiliser les outils théoriques de mécanique statistique. C'est le cas des réactions entre ions lourds aux énergies supérieures à l'énergie de Fermi, des réactions centrales avec des projectiles légers aux énergies relativistes, ainsi que des réactions entre ions lourds autour de la barrière Coulombienne. Dans ces collisions les temps caractéristiques de réaction sont comparables aux temps de relaxation vers l'équilibre, et des phénomènes dépendants de la dynamique de la voie d'entrée (émission à mi-rapidité, flot radial et transverse,...) coexistent avec des phénomènes purement thermiques (population statistique des canaux de fragmentation en voie de sortie, spectres maxwelliens de particules...). Un contrôle complet de la dynamique de réaction est indispensable pour pouvoir discriminer entre ces deux aspects et pouvoir ainsi extraire des observables expérimentales à la fois les propriétés thermiques de la matière nucléaire et des noyaux finis (capacité calorifique, densité des états, modification des propriétés des noyaux dans un milieu dense et chaud) et les propriétés de transport (viscosité, modification des sections efficaces dans le milieu). L'ensemble de ces propriétés constitue l'équation d'état de la matière nucléaire à température finie et joue un rôle important dans de nombreux phénomènes astrophysiques. Ce programme ambitieux a considérablement avancé dans les dernières décennies grâce à l'avènement des multi-détecteurs de particules chargées, qui ont permis de mettre en évidence la transition liquide-gaz nucléaire et de poser des contraintes importantes sur l'équation d'état proche de la symétrie neutron-proton. Toutefois les analyses restent incomplètes et affectées de grandes barres d'erreur à cause de limitations à la fois de détection et de modélisation. De plus, le comportement de la matière riche en neutrons, qui est la plus intéressante du point de vue astrophysique, est encore largement inexploré. Par ailleurs, la fission nucléaire est un mécanisme privilégié des collisions d'ions lourds autour de la barrière Coulombienne. Les études expérimentales et théoriques sont menées en France à GANIL, SPIRAL2 avec NFS, et ALTO, pour mieux comprendre ce processus complexe qui associe des effets collectifs de structure à des effets dynamiques. Ces études permettront aussi d'enrichir les données nucléaires existantes qui sont utilisées pour comprendre la nucléosynthèse des éléments lourds.

[Lien avec le GT4]

***Comment caractériser et modéliser les états moléculaires dans les noyaux ? Les états moléculaires peuvent-ils s'interpréter en terme de localisation / délocalisation ?***

La mise en évidence d'états cluster dans les noyaux rassemble des efforts à la fois expérimentaux et théoriques, comme la compréhension du mécanisme d'émergence d'états cluster et la signature expérimentale de ces états. Du point de vue théorique, les différents aspects à l'origine des états cluster pourront être discutés sous l'angle de la localisation spatiale, du couplage au continuum, de la déformation, etc... Du point de vue expérimental, la nature en cluster du noyau peut se manifester de différentes façons : par ses propriétés de fragmentation, par des intensités de transition monopolaires anormalement grandes, ou encore par des transitions  $\gamma$  spécifiques dans les régions de grandes déformations. Dans ces régions, la signature caractéristique de la déformation est le regroupement des états excités dans des bandes de rotation à grand moment d'inertie. Ces états excités sont le plus souvent connectés par des transitions  $\gamma$  E2 collectives. Un autre indice expérimental consiste à identifier une transition  $\gamma$  très collective entre états résonants clusters, comme celle récemment observée dans  $^8\text{Be}$ . Nous discuterons des nouvelles techniques de détection  $\gamma$  et de fragments, ainsi que du lien avec les états super déformés dans les masses moyennes ou légères et les états cluster. En outre, l'étude des réactions comme la diffusion quasi-libre ou bien le transfert de clusters, permet d'obtenir des informations précieuses sur la structure en cluster des noyaux étudiés. Plus généralement, nous nous poserons aussi les questions suivantes : comment mesurer la localisation spatiale ? Quel est le lien entre clusterisation au sein des noyaux et dans l'écorce des étoiles à neutrons ? Que nous apprend la complémentarité des différentes approches théoriques capables de prédire la clusterisation nucléaire ?

[lien avec les GT2, GT5].

***Quelle est la limite de stabilité des noyaux à halos ? Comment les halos émergent-ils de la théorie ?***

Les noyaux à halo sont situés à la limite de la stabilité nucléaire des noyaux légers ( $Z < 10$ ) et ont la particularité d'être spatialement beaucoup plus étendus que leurs voisins. Cette propriété de très basse énergie se répercute sur leur stabilité et le halo a généralement une énergie de liaison de l'ordre de quelques centaines de keV seulement. Des questions se posent encore sur les propriétés de l'état fondamental de certains noyaux, comme  $^{26}\text{O}$  (avec seulement 18 keV d'énergie de liaison),  $^{28}\text{O}$  (doublement magique), ainsi que les halos de di-neutrons comme  $^{19}\text{B}$  et  $^{22}\text{C}$  dont les  $S_{2n}$  sont compatibles avec 0. Du point de vue théorique, l'apparition d'une échelle de très basse énergie permet de formuler une théorie effective pour ces noyaux dite « Halo EFT ». De nombreuses questions restent en suspend : reste-t-il encore des noyaux à halos à découvrir ? Peut-on former un halo de 4 neutrons ? Existe-t-il une radioactivité tétra-neutron ? Quelles sont les propriétés du tétra-neutron ? La dripline est-elle une limite définitive, où bien y a-t-il des « îlots » de stabilité au delà ? Comment la propriété de halo évolue-t-elle avec la charge des noyaux (pour  $Z > 10$ ) ? Quel est le lien entre noyau à halo et peau de neutron dans les noyaux plus lourds ?

[Lien avec le GT3]

***La décroissance beta nous réserve-t-elle encore des surprises ?***

La plupart des noyaux, à l'exception des noyaux stables, sont soumis à la décroissance beta :  $\beta^+$  pour les pauvres en neutrons, et  $\beta^-$  pour les riches en neutrons. La dépendance en isospin de la décroissance beta est encore un sujet d'actualité, à la fois pour la compréhension des processus fondamentaux mis en jeu, mais aussi pour la physique des réacteurs dont la modélisation repose encore sur de nombreuses prédictions théoriques. La détection des anti-neutrinos des réacteurs nécessite aussi de connaître la forme des spectres beta des transitions interdites non-unicues, encore très peu connues.

D'un point de vue fondamental, les courants vectoriels (Fermi) et axial-vectoriel (Gamow-Teller) sont bien connus et l'on recherche des traces d'autres courants comme les courants scalaires, tensoriels, pseudo-scalaires dans les décroissances  $\beta$ . Si ces courants existent, comment les mesurer (dispositifs, analyse, support théorique) ? Y a-t-il un lien entre les mesures de décroissance  $\beta$  de précision à basse énergie et les études à haute énergie au LHC ? Enfin, l'étude de la désintégration double-beta permet de mieux caractériser les propriétés des neutrinos. En effet, la physique nucléaire y joue un rôle très important à travers les éléments de matrice de transition, mais il reste encore de nombreuses incertitudes théoriques à ce sujet. Comment résoudre ces problèmes théoriques et rendre les études de désintégration double-beta plus conclusives ?

***Comment étendre l'interaction nucléaire aux noyaux avec étrangeté ? Quelles nouvelles données sont nécessaires ?***

La compréhension de la force nucléaire peut s'étendre à la symétrie SU(3) via l'étude des hypernoyaux. Les hypernoyaux proches de la ligne de stabilité ont été étudiés principalement via des réactions induites par des faisceaux de kaons ou d'électrons et leur spectroscopie est d'abord associée aux mesures de durées de vie. En plus du nouveau degré de liberté relié à l'étrangeté, l'asymétrie en isospin permet de former des noyaux « hyper-exotiques », comme par exemple  $2n-\Lambda$ . Ajouter un hyperon dans un noyau peut aussi être utilisé comme sonde du cœur des noyaux, non sujet au principe de Pauli. Les hypernoyaux pourraient donc permettre d'extraire des propriétés du noyau difficiles à mesurer directement. Finalement, les hypernoyaux apportent des contraintes pour la matière hyperonique qui pourrait exister dans le cœur des étoiles compactes. Cette thématique concerne essentiellement les études expérimentales qui pourraient être faites à FAIR-GSI.

[Lien avec le GT4]

**GT2 : Quelles sont les formes des noyaux et les symétries sous-jacentes aux frontières en spin et en masse ?**

Ce thème est directement lié aux effets de couches qui peuvent apparaître dans le spectre des niveaux de particules individuelles protons ou neutrons, pour certaines combinaisons magiques de neutrons et de protons lorsque la densité de niveaux devient très faible. Les caractéristiques de la structure individuelle en couches à la surface de Fermi influencent également les propriétés collectives rotationnelles des noyaux, au travers de la cohérence quadripolaire, de la symétrie SU(3) et ses approximations associées. Les modèles théoriques incluant des degrés de liberté de déformation ont très rapidement suggéré que ces effets de couches pouvaient aussi apparaître pour certains noyaux ayant des formes exotiques comme la super-déformation (ellipsoïde allongé avec un rapport d'axes 2:1) ou l'hyper-déformation (ellipsoïde allongé avec un rapport d'axes 3:1), ainsi que pour certains noyaux très lourds de forme allongée ou triaxiale de la région  $Z=104-108$ . La stabilisation des noyaux très lourds et super lourds est aussi la conséquence des effets de couches. L'existence de ces formes nucléaires est reliée à la présence d'un minimum dans l'énergie potentielle du noyau, minimum d'autant plus prononcé que le moment angulaire du système est élevé.

En outre, les phases dites « pasta » dans les étoiles à neutrons constituent l'extrême de la déformation nucléaire, lorsque les noyaux de l'écorce sont tellement proches qu'ils se déforment pour donner naissance à des structures uniques : formes très allongées (gnocchi), formes planaires (lasagnes), formes effilées (spaghetti), ainsi que toutes les formes intermédiaires. La déformation dans les noyaux et dans les phases « pasta » ainsi que l'îlot de stabilité des noyaux super lourds résultent de la compétition des interactions nucléaire et Coulombienne. Dans l'espace des paramètres de déformation,

ces systèmes possèdent une surface d'énergie très riche pouvant avoir plusieurs minimums en compétition. Ils sont donc aussi très sensibles aux corrélations nucléaires complexes. Ainsi, leur étude permet de contraindre de façon très précise l'interaction nucléaire ainsi que les corrélations entre nucléons dans le noyau. Du point de vue théorique, cette étude nécessite le développement de méthodes avancées, basées sur les brisures et restaurations de symétries, et du point de vue expérimental, elle requiert l'utilisation d'instruments souvent très complexes et coûteux, d'installations spécifiques mais aussi des temps de faisceaux très longs.

### ***Qu'apprend-on des études de la coexistence de formes et de la super-déformation ?***

Le noyau a une tendance naturelle à se déformer et cet effet purement fermionique fait intervenir des ingrédients, comme la déformation de la surface nucléaire, le moment angulaire, l'énergie d'excitation, ou encore la masse et l'asymétrie d'isospin, qui sont essentiels à la compréhension de l'organisation des nucléons dans le noyau et à la modélisation de l'interaction forte. La coexistence de différentes formes au sein d'un même noyau est un sujet de première importance pour mieux comprendre le développement de la tendance naturelle du noyau à se déformer sous l'action de l'évolution des fermetures des couches. Lorsqu'on s'éloigne de la stabilité, comme par exemple du côté des noyaux riches en neutrons, l'appariement devient très faible et le couplage avec le continuum doit être considéré. Quelle structure gouverne le comportement de ces noyaux ? Comment déterminer la balance entre l'affaiblissement de l'appariement et la persistance ou la disparition des couches fermées dans les noyaux exotiques riches en neutrons ? Il serait intéressant de voir comment les propriétés des structures collectives habituelles, comme les vibrations, rotations, et triaxialités, seraient modifiées par le couplage au continuum ou par les corrélations d'appariement dans ces noyaux exotiques. Où se situent ces noyaux par rapport aux limites du « triangle de Casten ». De ce point de vue les noyaux les plus intéressants commencent à peine à être accessibles dans les installations de faisceaux radioactifs. Différentes observables (vies moyennes, transitions E0, etc ...) peuvent être mesurées par spectroscopie  $\gamma$  et/ou électron mais aussi par spectroscopie laser dans diverses réactions comme par exemple les réactions de transfert de nucléon, de fusion-fission, de fusion-évaporation ou de fragmentation.

[Liens avec les GT1, GT3, GT4, GT5]

### ***L'hyper-déformation (HD) nucléaire existe-t-elle ?***

Une des questions brûlantes qui reste entièrement ouverte concerne l'existence des noyaux hyper-déformés (HD) prédits par la théorie à très haut moment angulaire (J), où l'on atteint  $J = 80 \hbar$ . Ce spin correspond à une probabilité de formation de plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle d'un noyau super déformé, en particulier à cause de la probabilité de fission fortement augmentée. Ainsi les noyaux hyper-déformés sont le laboratoire ultime vis-à-vis de la rotation des systèmes nucléaires et ils pourraient même subsister aux limites du chaos : si on les compare aux faibles déformations, les états HD seraient noyés parmi une énorme quantité d'états (plus de  $10^{10}$ ) ! A cette densité de niveaux, la désexcitation des états HD vers les états de déformation normale correspondrait à une transition de phase ordre-chaos-ordre. Cette recherche nécessite l'utilisation d'un spectromètre  $\gamma$  puissant tel AGATA (dans sa phase finale) mais aussi des faisceaux radioactifs riches en neutrons. Une réaction privilégiée pour cette étude est  $^{26}\text{Mg}(^{92}\text{Kr}, 6n)^{112}\text{Cd}$ , car le noyau HD exotique formé pourrait être plus stable qu'avec un faisceau stable, grâce à une barrière de fission qui pourrait être plus élevée.

[Liens avec les GT1, GT3, GT4, GT5]



### ***Quelle théorie/expérience pour la recherche des noyaux hyper-déformés (HD) ?***

Le GT permettra une émulation entre expérimentateurs et théoriciens pour définir les expériences clefs, les sites appropriés à l'étude des noyaux HD, mais surtout pour aider à faire émerger une compréhension solide des structures HD en question. En effet, certains résultats expérimentaux ont montré qu'il pouvait y avoir plusieurs interprétations possibles aux mêmes données. A titre d'exemple, les structures générant des déformations peuvent être interprétées de façon microscopique par l'occupation des orbitales de Nilsson qui se réarrangent en fonction de la déformation alors que les approches algébriques mettent en exergue des symétries du groupe SU(3). Le lien entre ces approches théoriques est complexe mais pourrait trouver son unité à travers une approche basée sur le modèle en couches. Les questions liées à la modélisation théorique et à l'interprétation des données expérimentales sont donc cruciales. L'expérience acquise par les théoriciens dans la compréhension des noyaux HD peut en outre être utile pour comprendre les phases « pasta » des étoiles à neutrons.

[Liens avec les GT1, GT3, GT4]

### ***Comment peut-on former de nouveaux noyaux super-lourds ? Quel est l'apport de la structure des noyaux très-lourds ?***

La quête des noyaux super-lourds tente de répondre à un ensemble d'interrogations très fondamentales, comme la limite en masse de la carte des noyaux, ainsi que le rôle des effets de couches et de sous-couches à la stabilisation de structures nucléaires évanescentes. L'intérêt de l'étude des noyaux super-lourds repose sur la prédiction théorique de l'existence d'un îlot de stabilité, mais dont la position varie largement d'un modèle à l'autre : (Z=114, N=184) ou (Z=120, N=172), ou (Z=126, N=184). Ces noyaux doivent leur existence à de forts effets de couches qui sont capables de vaincre la fission induite par l'interaction Coulombienne. Ces éléments sont recherchés depuis longtemps dans les réactions de fusion et leurs propriétés (temps de vie, décroissance, fission) permettent de déduire des informations sur leur structure. Les sections efficaces de production d'éléments super-lourds sont très faibles : de l'ordre de quelques pico barn pour l'élément 114 par exemple. D'un point de vue expérimental, ces études requièrent donc des équipements spécifiques dédiant des temps de faisceau très longs. La rareté de la production des éléments super-lourds empêche en outre les études de spectroscopie  $\gamma$ .

L'étude des noyaux très-lourds déformés autour de Z=104-108 est très intéressante à plusieurs titres : les sections efficaces de production sont plus grandes, quelques nbarn voire  $\mu$ barn, et ils permettent de sonder les orbitales en provenance des gaps sphériques des noyaux super-lourds. C'est une alternative très prometteuse à la synthèse des éléments super-lourds ultimes (au delà de Z=118). La communauté française est déjà reconnue sur ce sujet. Elle dispose d'une visibilité internationale sur la majeure partie des installations à travers le monde où sont effectués les programmes scientifiques de spectroscopie et de synthèse des éléments super-lourds. Il existe en outre une complémentarité entre les différents sites de production de ces éléments super-lourds. Celle-ci est indispensable à la compréhension des mécanismes de réaction mis en jeu lors de la synthèse d'éléments super-lourds, à l'étude de la structure nucléaire des noyaux de masse extrême grâce notamment aux mesures de spectroscopie gamma/électrons de conversion interne, ainsi que alpha prompt et retardée, et finalement à la synthèse de nouveaux éléments qui nécessitent une connaissance complète de toute la chaîne de décroissance. Ce GT sera le lieu pour débattre des meilleurs sites et outils pour la poursuite d'un programme ambitieux en France comme à l'étranger mais aussi pour débattre et définir les meilleurs outils théoriques permettant d'identifier les meilleurs candidats aux campagnes de mesures expérimentales.

### **GT3 : Quelles sont les nouvelles frontières dans la description microscopique des noyaux ?**

Ce groupe de travail porte sur les fondations théoriques de la physique nucléaire, en couvrant les méthodes de résolution « ab initio » du problème à N corps, les liens qui existent avec la théorie QCD régissant leurs constituants et leurs interactions au sein des neutrons et des protons, ainsi que les approches plus phénoménologiques permettant d'effectuer des calculs là où les approches « ab initio » échouent. Ces dernières approches sont à ce jour souvent encore les seules capables d'être utilisées dans l'analyse des observations expérimentales. En outre, elles peuvent aussi inspirer les approches plus fondamentales, soit pour guider une hiérarchisation de phénomènes, soit pour calibrer ces dernières approches. Il existe donc une complémentarité entre les approches fondamentales et phénoménologiques que ce GT explorera. L'objectif de ce GT est donc de faire émerger des modèles théoriques permettant d'approcher avec une meilleure fiabilité les extrêmes de la carte des noyaux, vers les noyaux riches en protons ou en neutrons ainsi que vers les noyaux super-lourds, ainsi que d'améliorer la fiabilité des prédictions théoriques pour les propriétés des étoiles compactes. D'immenses progrès ont été réalisés cette dernière décennie, notamment en France, et de nombreux défis demandent encore à être relevés tant du point de vue de la formalisation des interactions que de la résolution du problème à N corps quantique.

La théorie accompagne très souvent l'analyse expérimentale, voir observationnelle, des systèmes nucléaires, et les GT 1, 2 et 3 rassemblent déjà de nombreuses questions à leur interface. Cependant, certaines questions théoriques, par leurs technicités ou bien par leurs liens avec d'autres disciplines, par exemple la chimie quantique ou la matière condensée, nécessitent un espace de discussion propre. Ce GT a donc pour objectif de permettre des discussions approfondies sur les fondations théoriques de la physique nucléaire et, plus largement, de ses liens avec le problème à N corps. Ce GT, principalement composé de théoriciens travaillant sur le noyau atomique, agrège donc également des chimistes quantiques et des physiciens travaillant sur les gaz d'atomes froids.

Les questions qui seront abordées dans ce GT sont détaillées ci-dessous.

#### ***Peut-on relier l'interaction nucléaire effective (à deux, trois et peut-être plus de corps) directement à la QCD ?***

Des progrès considérables ont été effectués ces 15 dernières années sur le lien entre les modèles utilisés en physique nucléaire et la théorie chromodynamique quantique (QCD) sous-jacente, grâce notamment à la formalisation de la théorie effective des champs avec, ou sans, pion. Cette avancée résout l'une des plus grandes difficultés liées à l'interaction nucléaire de basse énergie, qui se trouvent dans le régime non-perturbatif de la QCD. Elle permet aussi d'établir une connexion avec la méthode de résolution sur réseau de QCD. Cette dernière permet maintenant d'effectuer des calculs directs des propriétés nucléaires pour des masses arbitrairement petites des quarks. La précision de ces données rend possible de les substituer aux véritables données expérimentales (à la masse physique des quarks), et de les utiliser pour calibrer de nouvelles théories effectives. La liberté de varier la masse des quarks de façon théorique peut permettre d'étudier dans quelle mesure certaines propriétés nucléaires (comme par exemple l'état de Hoyle du  $^{12}\text{C}$ ) sont liées à ce paramètre. Par ailleurs, on peut se demander si les propriétés nucléaires émergent directement des interactions élémentaires entre les nucléons ponctuels ou s'il est plus adapté d'incorporer de nouveaux degrés de liberté dans la théorie effective des champs actuelle. On pense notamment à l'excitation nucléonique Delta, mais cette réflexion est plus générale et comprend celle de l'identification des degrés de liberté pertinents des théories effectives. Peut-on hiérarchiser ces degrés de liberté en fonction d'un niveau de précision attendu, ou bien de la masse des noyaux ou encore de leur asymétrie d'isospin ?

[Lien avec GT1 et le GDR QCD]

### ***Comment étendre le domaine d'application des méthodes « ab-initio » ?***

Les physiciens Français sont très avancés dans le développement et l'application de méthodes « ab initio » de résolution exacte de systèmes à peu de corps (4 ou 5 particules). Ces méthodes permettent aujourd'hui de prédire de façon cohérente les propriétés de structure et de réaction de noyaux très légers. L'extension de ces méthodes pour des noyaux plus lourds à un coût « exponentiel » que les moyens numériques actuels ne peuvent a priori pas supporter. Pour repousser ce « plafond de verre », des méthodes « ab initio » à coût « polynomial » ont été développées et implémentées ces 15 dernières années, notamment en France, permettant ainsi d'atteindre la région de masse 70. Ces méthodes restent cependant limitées en masse et essentiellement restreintes aux propriétés de structure. Au final, il semble pertinent d'envisager l'extension des méthodes « ab initio » dans les trois voies suivantes : extension en masse, calculs de réactions au-delà des noyaux légers, extension de ces méthodes au degré de liberté d'étrangeté.

Dans les prochaines années, on peut envisager de développer et/ou utiliser des méthodes d'approximations permettant un gain de temps (CPU) et en place mémoire. En effet, la place mémoire associée au stockage des éléments de matrice d'interactions à 3 corps constituent actuellement la limite principale à l'extension des calculs « ab initio » aux noyaux au-delà de la masse 100. En formulant le problème nucléaire de basse énergie en termes de degrés de liberté moins élémentaires ou en ne résolvant explicitement le problème à A corps que dans un sous espace de Hilbert de l'espace complet à A corps, on peut également envisager de calibrer des approches effectives sur les calculs « ab initio » existants. Une telle approche permettrait de faire le lien avec des approches plus phénoménologiques utilisées aujourd'hui jusque dans les noyaux lourds et dont les hypothèses nécessitent d'être vérifiées.

[Lien avec le GT1, GT2, GT4]

### ***Est-ce que la résolution de l'équation de Schrödinger peut être découplée de la modélisation des interactions élémentaires entre nucléons ?***

Un grand nombre des enjeux relatifs à la résolution de l'équation de Schrödinger sont, en première approximation, indépendants de l'interaction mise en jeu. Ils sont donc communs à d'autres systèmes quantiques mésoscopiques, i.e. les atomes froids ou bien les molécules chimiques.

En théorie quantique des champs, les interactions sont toujours définies dans un espace-modèle précis, tout comme le sont les méthodes de résolution de l'équation de Schrödinger. Peut-on donc vraiment découpler l'interaction et la méthode de résolution du problème à N corps ? Selon la proposition canonique formulée par Weinberg, les systèmes nucléaires à plus de 1 nucléons doivent effectivement être traités en deux temps ; i.e. i) la construction d'un Hamiltonien à N corps et ii) la résolution non-perturbative de l'équation de Schrödinger. Cependant, de sérieuses difficultés, qu'il apparait de plus en plus inévitable d'affronter, sont apparues dans ce contexte. Aujourd'hui, plusieurs propositions transformant en profondeur les méthodes de résolution du problème quantique à N corps sont sur le point d'émerger et méritent d'être étudiées en profondeur.

En particulier, les systèmes « à couche(s) ouverte(s) » au-delà des noyaux légers offrent un terrain d'application des techniques du problème à N corps qui sont partagées, par exemple, avec la chimie quantique. Ces questions se concentrent autour des corrélations, laissant de côté celles liées à l'interaction elle-même. Tandis que les noyaux « à couches fermées » ne mettent en jeu que des corrélations « dynamiques » efficacement captées par une somme limitée d'excitations « particules-trous » basées sur un état de particules indépendantes et respectant les symétries du système, les

noyaux « à couches ouvertes » nécessitent l'inclusion de « corrélations statiques » qu'il est difficile, voire impossible, de traiter efficacement de la même façon. Il s'agit de développer de nouvelles méthodes permettant de simplifier cette complexité, largement indépendante des détails de l'interaction. Malgré de nombreux efforts, l'inclusion combinée et cohérente de ces deux types de corrélations reste aujourd'hui un challenge majeur et commun en physique nucléaire et en chimie quantique, mais aussi pour d'autres systèmes quantique mesoscopiques fortement corrélés.

[Lien avec le GT1]

### ***La théorie effective la plus appropriée aux systèmes nucléaires doit-elle s'organiser autour de la « limite d'unitarité » ?***

Tout comme les gaz d'atomes froids proches de la résonance de Feshbach, l'interaction nucléaire a la particularité d'avoir une longueur de diffusion large par rapport à l'échelle donnée par son médiateur le plus étendu (le pion). Cette propriété dite d'unitarité devrait se comprendre grâce à la QCD, mais il s'agit plutôt ici de l'utiliser habilement pour la compréhension des propriétés des systèmes nucléaires. En outre, la limite d'unitarité est universelle aux systèmes à N corps. Les gaz d'atomes froids sont donc considérés comme des « simulateurs quantiques » qui permettent d'apporter les réponses aux questions que se posent les physiciens nucléaires dans des contextes variés, allant de la nature de l'interaction nucléaire aux prédictions de l'équation d'état de la matière dense. La manipulation des gaz atomes froids est ainsi un outil extrêmement puissant pour simuler des situations complexes du problème à N corps. Par exemple, en couplant ces gaz avec l'interférométrie laser, on peut envisager de réaliser des systèmes équivalents à la matière clusterisée de l'écorce des étoiles à neutrons et d'en déduire directement les propriétés de transport qui sont très difficile à prédire avec les théories actuelles.

[Lien avec le GT4]

### ***Peut-on réellement ignorer la relativité en physique nucléaire ?***

La masse élevée des nucléons fournit une justification aisée à la formulation non-relativiste de la physique nucléaire de basse énergie. Pourtant l'interaction spin-orbite nécessaire à la bonne reproduction des données nucléaires, en particulier des effets de couches, est une manifestation directe des propriétés relativistes du nucléon. En outre aux densités de la matière élevées des supernovae et des étoiles compactes, la nature relativiste des nucléons ne peut plus être ignorée. Une connexion entre la physique de basse énergie, et sa formulation en théorie effective des champs, et la théorie des champs relativistes, est donc nécessaire pour sonder la matière nucléaire aux extrêmes du diagramme de phase.

[Lien avec les GT1, GT4]

### ***Comment étendre le domaine d'application du modèle en couche à des noyaux de masse plus lourde?***

Actuellement les approches de types « modèles en couches » restent très adaptées à la description des observables de basses excitations dans la mesure où elles permettent la description simultanée de toutes les propriétés du noyau (déformation ET durée de vie  $\beta$  par exemple). L'applicabilité sur toute la charte des noyaux reste cependant délicate avec l'explosion exponentielle des dimensions des bases à traiter par diagonalisation classique. Plusieurs voies sont possibles pour contourner ces difficultés numériques et étendre le domaine d'applicabilité à des régions de masse plus lourdes. Une première possibilité réside dans l'utilisation des techniques de perturbations pour ce qui est du Hamiltonien (opérateurs à 3 corps) et des opérateurs (à 2 corps) associés aux espaces de valence. La seconde

consiste en l'application de méthodes de champ moyen à la base du modèle en couches, en particulier pour la description des systèmes déformés. Les passerelles avec d'autres aspects contenus dans ce GDR comme ceux relatifs à la théorie de la fonctionnelle de la densité existent et sont à développer. Enfin quelles que soient les solutions techniques utilisées, les interfaces avec les approches ab-initio sont naturelles quant à l'utilisation d'Hamiltoniens effectifs déduits de théories effectives des champs.

[Lien avec les GT1, GT2, GT4]

***Quelle est la meilleure théorie de la « fonctionnelle de la densité » pour décrire la carte des noyaux ? Quels sont les nouveaux noyaux à mesurer pour améliorer la prédictivité des approches fonctionnelles ?***

Les approches basées sur des fonctionnelles de la densité sont les seules à ce jour à pouvoir prédire les propriétés des noyaux de masse intermédiaire aux noyaux super-lourds, ce qui représente la grande majorité des noyaux. Ces approches permettent en outre de prédire l'équation d'état de la matière nucléaire. Elles font donc le lien entre les analyses expérimentales et la prédiction du diagramme de phase de la matière nucléaire autour de la densité de saturation. L'existence d'une fonctionnelle reproduisant les propriétés nucléaires est acquise du point de vue théorique, mais sa détermination reste du domaine de l'exégèse empirique. La sélection des couplages ou des vertex relativistes pertinents est souvent complexe, et nécessite en outre, un cadre théorique adapté aux comparaisons avec les données expérimentales (masses, rayons, modes collectifs, paramètres empiriques, etc...). Quel est le meilleur cadre théorique pour déterminer la fonctionnelle nucléaire ? Cette fonctionnelle est-elle universelle ? Quels sont les nouveaux noyaux qui permettront d'améliorer la prédictivité de ces approches ? Quelles sont les propriétés de ces noyaux à mesurer pour mieux contraindre l'équation d'état de la matière dense ? Est-ce que des méthodes statistiques, telle que l'inférence Bayésienne, peuvent orienter les analyses expérimentales et théoriques et faire le lien avec les contraintes nécessaires aux observations astrophysiques ?

[Lien avec les GT2, GT3, GT4]

**GT4 : Quel est l'apport de la physique nucléaire à la compréhension de l'astrophysique ?**

De nombreux sites astrophysiques sont le siège de processus mettant en jeu des énergies allant de quelques dizaines de keV à quelques dizaines de MeV. Il s'agit de réactions nucléaires, de matière nucléaire (étoile compacte, supernova d'effondrement gravitationnel, coalescence d'étoiles compactes binaires) ou de processus chimiques complexes dans le système solaire. Dans ces trois cas, des questions propres animent la communauté d'astrophysique nucléaire. Il existe aussi une interface forte entre ces thématiques qui justifie leur rassemblement au sein d'un même GT. On peut citer par exemple le lien entre la nucléosynthèse des éléments lourds et la compréhension des supernovae d'effondrement gravitationnel et des coalescences de binaires compactes. De nombreuses autres questions sont au cœur de l'expertise française et nous en présentons un rapide résumé. L'objectif des recherches de ce GT est de faire le lien entre les mesures en laboratoire, les besoins en données théoriques pour la compréhension globale des processus astrophysique, et les données observationnelles. Ce groupe est donc principalement composé de physiciens nucléaires, d'astrophysiciens et d'astronomes.

### *Quelle est l'origine des éléments dans l'Univers ?*

Cette question porte ici sur la compréhension de la nucléosynthèse stellaire calme et explosive. La première est responsable de la production de tous les éléments allant du  $^{12}\text{C}$  au  $^{56}\text{Fe}$  ainsi que de la moitié des abondances des éléments lourds au-delà du Fer (processus s). La seconde est responsable de la production de l'autre moitié des abondances des éléments lourds (processus r et p) dont le site n'est pas encore identifié de façon certaine (supernova d'effondrement gravitationnel ou bien coalescence d'étoiles à neutrons). La nucléosynthèse nécessite une énorme quantité de données nucléaires à la fois sur la structure des noyaux qui sont impliquées et sur les réactions nucléaires qui ont lieu (radioactivités, capture de neutrons, fission, etc...). Elle permet de mieux comprendre l'évolution chimique de notre Galaxie, en confrontant les modélisations théoriques aux abondances observées. La communauté française est particulièrement investie dans les mesures expérimentales de sections efficaces des réactions de synthèse (GANIL, Alto, Andromède, etc...) et dans les programmes d'observation (VLT, GAIA, XMM-Newton, e-Astrogam, etc...). Le programme à venir à SPIRAL2 avec NFS permettra d'avancer sur la contribution de la fission à la nucléosynthèse des éléments lourds. La modélisation des sites astrophysiques où la nucléosynthèse a lieu est cependant peu présente en France, et des contacts de longue date existent avec des groupes à l'étranger (Barcelone, Darmstadt, Garching, etc...). Ce GT permettra de renforcer les liens existants, et aidera à une meilleure synergie entre les communautés de physiciens nucléaires et d'astrophysiciens.

Du côté nucléaire, les sections efficaces des réactions d'intérêt astrophysique sont très difficiles, sinon impossible, à mesurer de manière directe dans la gamme d'énergie d'intérêt astrophysique, à cause de la très faible section efficace et/ou de la nature radioactive des espèces impliquées. Les mesures directes, quand elles sont possibles, sont souvent réalisées à plus hautes énergies puis extrapolées aux énergies astrophysiques plus basses. Ces extrapolations peuvent mener à des résultats erronés quand elles ne tiennent pas compte de la présence éventuelle de résonances à très basse énergie ou de la queue à haute énergie de résonances sous le seuil. La contribution de ces dernières peut être évaluée grâce à la détermination des propriétés spectroscopiques des noyaux en question, à travers des méthodes de mesures indirectes (réactions de transfert, diffusion résonante élastique, ...). Par ailleurs, quand les mesures directes à très basses énergies sont possibles, ce qui est très rare, celles-ci doivent être corrigées de l'effet de l'écrantage électronique qui amplifie la section efficace aux énergies très faibles. Ce phénomène n'est d'ailleurs toujours pas bien compris : la valeur mesurée de l'écrantage électronique dépasse souvent la prédiction théorique. C'est un des problèmes qu'il faudra résoudre ces prochaines années. Une nouvelle piste pour éclairer cette problématique consiste à utiliser la durée de vie des noyaux radioactifs pour sonder l'écrantage électronique.

La communauté française s'intéresse à plusieurs problématiques liées à la nucléosynthèse stellaire calme et explosive. La nucléosynthèse calme concerne essentiellement l'étude des réactions nucléaires clés impliquées i) dans la combustion hydrostatique de l'hélium des étoiles massives, telles que les réactions de capture alpha  $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$  et  $^{17}\text{O}(\alpha, n)^{20}\text{Ne}$ , et ii) dans les phases tardives où les réactions suivantes sont importantes :  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ ,  $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$  et  $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ . Les sections efficaces de ces réactions sont très mal connues. Les réactions de capture alpha nécessitent des méthodes indirectes, et un des points à discuter dans ce GDR concerne la fabrication des cibles implantées  $^{22}\text{Ne}$  et  $^{17}\text{O}$  minces. Les réactions impliquées dans les phases tardives peuvent être mesurées par des méthodes directes (projet STELLA) et l'enjeu principal à discuter concerne l'amélioration des techniques de réduction du bruit de fond (détection  $\gamma$ , particules, cible, vide), le blindage, les mesures souterraines, ou encore les systèmes novateurs pour les cibles (carbone diamant, liquides, ...). Enfin, nous mentionnons aussi le phénomène de fusion « hindrance » qui se manifeste par une forte réduction de la section efficace

prédite aux basses énergies. Ce phénomène nouvellement identifié a été observé dans tous les systèmes de masses moyennes étudiés jusqu'à présent. Son origine est encore mal connue, ainsi que son rôle dans les réactions d'intérêt astrophysique. Il pourrait pourtant avoir un effet majeur sur la nucléosynthèse stellaire.

Au sujet de la nucléosynthèse explosive, la communauté française s'intéresse à la nucléosynthèse des noyaux appelés "noyaux p". Ces noyaux sont produits lors de l'effondrement gravitationnel des étoiles massives à des températures supérieures à 1,5 milliards de degrés, essentiellement par des réactions de photo-désintégration ( $\gamma, n$ ), ( $\gamma, \alpha$ ) et ( $\gamma, p$ ) sur des noyaux stables ou riches en neutrons. A ce jour, aucune simulation astrophysique n'arrive à reproduire globalement les abondances mesurées des éléments « p ». Pour améliorer les prédictions théoriques, il est nécessaire de contraindre davantage les modèles nucléaires en mesurant un nombre limité et bien choisi de réactions de capture radiative sur des noyaux « p ». Il faudrait également faire un bilan de tous les résultats expérimentaux obtenus ces 10 dernières années pour les intégrer dans une nouvelle approche théorique : l'idée la plus souvent débattue étant de développer un nouveau potentiel optique nucléaire pour les particules alpha à basse énergie.

[Lien avec les GT1, GT5]

### ***Comment contraindre la modélisation des novæ et des sursauts X grâce à la confrontation des observations (rayons gamma, rayons X, grains pré-solaires) à la physique nucléaire ?***

Le phénomène de novæ classique et celui des sursauts X ont lieu dans des systèmes binaires en accrétion et proviennent de la combustion explosive d'hydrogène (ou d'hélium) à la surface d'une naine blanche (pour les novæ) ou d'une étoile à neutrons (pour les sursauts X). La détection des rayons gamma et de grains pré-solaires aux rapports isotopiques caractéristiques provenant des novæ, et la détection des sursauts X, nous livrent des informations précises sur l'environnement où ils ont été produits. Toutefois, la connaissance précise des sections efficaces des réactions nucléaires impliquées dans ces phénomènes est cruciale pour l'interprétation des observations et la validation des modèles décrivant ces sites astrophysiques.

Pour les novæ classiques, le réseau de réactions nucléaires est bien connu expérimentalement, à l'exception des réactions  $^{25}\text{Al}(p,\gamma)^{26}\text{Si}$ ,  $^{18}\text{F}(p,\alpha)^{15}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Na}(p,\gamma)^{23}\text{Mg}$  et  $^{30}\text{P}(p,\gamma)^{31}\text{S}$ . La connaissance précise de ces réactions est primordiale pour la compréhension de la contribution des novæ i) à l'émission gamma de  $^{26}\text{Al}$  et de  $^{22}\text{Na}$  dans la galaxie, ii) à l'émission à 511 keV du  $^{18}\text{F}$  qui pour l'instant n'a pas été détecté et iii) au rapport isotopique  $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$  observé dans les grains pré-solaires. En plus des mesures indirectes avec des faisceaux stables ou radioactifs déjà réalisées, ces études nécessitent le développement de faisceaux radioactifs de  $^{25}\text{Al}$  et  $^{30}\text{P}$  avec une intensité suffisante et de faisceau de  $^{18}\text{F}$  plus intense.

Pour les sursauts X, un des enjeux de leur étude est la compréhension de leur courbe de lumière. Celle-ci a pour origine l'énergie libérée principalement par des réactions de type ( $\alpha, p$ ) et mettant en jeu des noyaux radioactifs de masse  $A \leq 35$ , présents dans l'écorce des étoiles à neutrons. Les réactions les plus représentatives de cette problématique sont  $^{14}\text{O}(\alpha, p)$ ,  $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)$  et  $^{30}\text{S}(\alpha, p)$ . Ces réactions sont pour la plupart résonnantes et nous voulons discuter des moyens expérimentaux pour effectuer les mesures spectroscopiques nécessaires (spin, parité, largeur particule, énergie d'excitation des niveaux mis en jeu) : mesures directes avec un faisceau de basse énergie ou mesures indirectes avec un faisceau radioactif (SPIRAL1). A certains points d'attente dans le réseau des réactions nucléaires ( $^{15}\text{O}$  par exemple), la réaction de double capture de protons ( $2p, \gamma$ ) pourrait permettre de court-circuiter les noyaux bloquants. Une première étude effectuée il y a 20 ans avait montré le faible impact de ce

mécanisme de réaction sur l'astrophysique. Plusieurs études théoriques réalisées depuis lors ont montré que le taux estimé aujourd'hui, avec de meilleurs modèles à 3 corps, est jusqu'à 100 000 fois plus intense que le taux estimé précédemment, ce qui augmente l'intérêt de l'étude de ces réactions pour l'astrophysique.

### ***Quelles sont les propriétés des étoiles à neutrons ?***

Les étoiles à neutrons sont le siège d'un très grand nombre de phénomènes astrophysiques qui nécessitent d'une part des ingrédients de microphysique fiables et d'autre part, une modélisation globale permettant de faire le lien avec les observations. En outre, les expériences en laboratoire offrent la possibilité de contraindre les modèles nucléaires dans des régimes différents mais s'approchant des conditions astrophysiques. Cette question rassemble donc des études théoriques, expérimentales et observationnelles, et permet de mieux comprendre l'équation d'état de la matière dense (et froide) ainsi que sa réponse dynamique (coefficients de transport) aux phénomènes violents qui régissent l'évolution de ces astres.

La région la moins bien comprise des étoiles à neutrons est le cœur interne. Il pourrait par exemple être le siège de transitions de phase vers de la matière hypéronique ou bien vers de la matière de quarks et de gluons déconfinés. La composition du cœur nécessite de mieux déterminer l'équation d'état de la matière dense, grâce notamment à une meilleure connaissance des interactions entre ses constituants et à la description précise des transitions de phase. D'un point de vue expérimental, la connaissance de la matière dense hypéronique peut être caractérisée par diverses sondes complémentaires : les hypernoyaux, les mesures d'étrangeté ouverte et d'agrégats étranges en collisions d'ions lourds. Celle de la matière de quarks et de gluons nécessite l'utilisation de modélisations phénoménologiques, partiellement contraints par les mesures du QGP au LHC. Des progrès récents de la résolution de QCD sur réseau permettent aussi d'envisager des contraintes plus réalistes sur cet état de la matière.

Il existe une relation très contraignante entre l'équation d'état de la matière dense, d'une part, et la masse et le rayon des étoiles compactes, d'autre part. Si nous disposons de mesures de masses, en particulier dans des systèmes doubles, les mesures de rayons constituent actuellement un défi observationnel qui pourrait être en passe d'être résolu. La mesure directe est impossible, mais diverses techniques sont déjà envisageables comme, par exemple, l'émission thermique de surface des étoiles à neutrons dont le maximum est situé dans la gamme des rayons X (XMM-Newton), la courbe de lumière des pulsars millisecondes dans les rayons X (Neutron Star Interior Composition Explorer : NICER-ISS), les sursauts X de type 1 (NICER-ISS), ou encore la coalescence d'étoiles compactes (VIRGO/LIGO). A plus long terme, les observations d'étoiles à neutrons avec le futur télescope spatial à rayons X de l'Agence Spatiale Européenne ATHENA (avec une sensibilité 10 fois plus importante que les instruments actuels) permettront la pleine exploitation de ces méthodes de mesures de rayons, pour un échantillon d'étoiles à neutrons plus large. L'un des objectifs scientifiques de la mission ATHENA porte sur la détermination précise du rayon des étoiles à neutrons dans le but d'obtenir des contraintes sur l'équation d'état de la matière dense. Par ailleurs, le rayon des étoiles à neutrons de faible masse peut aussi être très fortement contraint par la mesure en laboratoire de la pente de l'énergie de symétrie ( $L_{\text{sym}}$ ) et de sa courbure ( $K_{\text{sym}}$ ) via des mesures de peau de neutrons, de modes collectifs iso-vectoriels, des collisions d'ions lourds, etc...

Au cours de leur existence, les étoiles à neutrons changent car elles se refroidissent, elles ralentissent, ou bien elles peuvent accréter de la matière d'une étoile compagne (voir question précédente). Ces changements globaux requièrent des données microscopiques précises pour être compris. L'impact de la superfluidité des neutrons, de l'énergie de symétrie, ou encore de l'énergétique des noyaux dans la



matière accrétée, sur le refroidissement est encore mal compris ; de même que le rôle de la superfluidité dans les « glitches » observés dans quelques étoiles à neutrons jeunes ; ou encore la détermination des coefficients de transport pour l'étude de la sismologie de l'écorce. Ces données sont généralement issues de modèles théoriques qui peuvent être partiellement contraints grâce aux mesures en laboratoire de l'appariement des noyaux pour les propriétés de superfluidité par exemple.

Le rôle des champs magnétiques sur l'ensemble des phénomènes régissant l'évolution de la vie des étoiles à neutrons est encore mal compris, en particulier en ce qui concerne les magnétars. Ces derniers sont des étoiles à neutrons dont les champs magnétiques sont extrêmement intenses (jusqu'à environ  $10^{15}$  G estimés en surface). Leur description nécessite une modélisation magnéto-hydro-dynamique avancée où l'équation d'état de la matière dense est elle-même modifiée par la présence des champs magnétiques intenses. D'où proviennent ces champs magnétiques ? La matière dense peut-elle se polariser spontanément ? Comment évoluent les champs magnétiques et comment se couplent-ils avec la matière dense ? Quel rôle jouent-ils sur l'évolution des magnétars (refroidissement, glitches, etc...) ?

[Lien avec les GT1, GT3, et les GDR QCD et OG].

***Comment explosent les supernovae et coalescent les binaires compactes ? Quelle est l'influence quantitative des données nucléaires ? Où et comment sont formés les éléments lourds dans l'Univers ?***

La formation des étoiles compactes via l'effondrement gravitationnel des étoiles massives et la coalescence des binaires compactes sont des sujets centraux et fédérateurs entre physiciens nucléaires et astrophysiciens. Leur compréhension nécessite une modélisation macroscopique très avancée mêlant relativité générale, rotation, hydrodynamique multidimensionnelle et transport des neutrinos, ainsi que des données microscopiques issues des modèles nucléaires comme l'équation d'état de la matière dense et chaude, les réactions de capture électronique, l'interaction neutrinos matière, etc... Il s'agit ici d'une question très générale associant à la fois des astrophysiciens spécialistes des modèles globaux d'effondrement gravitationnels et de coalescence de binaires compactes, des physiciens nucléaires de la matière dense et chaude, des physiciens nucléaires des processus de nucléosynthèse, et enfin des astronomes qui observent ces phénomènes violents dans l'espace grâce aux signaux électromagnétiques et aux ondes gravitationnelles. Les premières ondes gravitationnelles ont été observées en 2015 pour des trous noirs, et l'on attend de façon imminente les premières observations de coalescence d'étoiles à neutrons.

Les supernovae d'effondrement gravitationnel et la coalescence de binaires compactes sont deux sites où les conditions de température et de pression extrêmes permettraient la nucléosynthèse des éléments lourds (processus r), en mettant en jeu une multitude de réactions nucléaires et de processus physiques complexes. Ce processus est responsable de la formation de la moitié des éléments lourds. Le rôle respectif de ces sites reste encore mal compris car il nécessite des simulations hydrodynamiques extrêmement complexes (multi-dimensionnalité, relativité générale, rotation, champs magnétiques, etc...) ainsi que des données nucléaires précises (équation d'état, réactions nucléaires, etc...). Bien qu'un effort important ait été engagé ces dernières décennies dans la modélisation multidimensionnelle de ces explosions stellaires (principalement hors de France) et dans les expériences en laboratoire visant à mesurer précisément les taux des réactions nucléaires, il reste encore beaucoup d'incertitudes dans les données nucléaires que nous discuterons ici.

Les équipes françaises sont très avancées sur la modélisation microscopique (équation d'état statistique, calculs RPA de sections efficaces, etc...), et des efforts continus sur la modélisation macroscopique existent. Sur ce dernier point, les équipes à l'étranger, notamment en Allemagne, aux

Etats-Unis et au Japon sont très en avance et les rattraper nécessiterait des efforts concertés et cohérents de la part de la communauté française d'astrophysique nucléaire. En plus des échanges scientifiques, ce GT permettra de renforcer les liens entre physiciens nucléaires et astrophysiciens, et de définir ensemble les moyens nécessaires pour acquérir une visibilité équivalente à nos partenaires étrangers dans la modélisation des phénomènes violents.

[Lien avec les GT1, GT5 et le GDR OG]

### ***Quel est le contexte astrophysique de naissance du système solaire ? Quelle est l'origine de la matière organique interplanétaire ?***

A la frontière entre la planétologie et l'astrophysique, l'analyse isotopique de matériaux extraterrestres (météorites et micrométéorites) permet d'apporter des informations uniques sur le contexte astrophysique de naissance du soleil. Depuis de nombreuses années, les chercheurs de l'IN2P3 collectent et font des analyses isotopiques de poussières interplanétaires (micrométéorites). Ces analyses nécessitent des instruments dédiés, comme la plateforme SCALP (irradiation ionique de basse énergie, analyses infra-rouge, JANNUS-TEM), ainsi que des analyses ioniques qui se font en collaboration avec l'institut Curie. La collection de micrométéorites CONCORDIA (plateforme MYRTHO) est unique au monde et permet d'étudier des échantillons cométaires dans un état de conservation inégalé. Les études sur ces échantillons nous renseignent sur la composition isotopique de la matière primitive du système solaire, ce qui peut apporter de nouvelles contraintes sur la nucléosynthèse stellaire. Des chercheurs de l'IN2P3 ont ainsi proposé un scénario pour expliquer l'injection d'isotopes de courtes durée de vie ( $^{26}\text{Al}$  et  $^{10}\text{Be}$ ) dans le nuage parent du système solaire. Ces échantillons nous informent aussi sur l'origine et la formation de la matière organique à la surface des objets trans-neptuniens et dans les régions froides des disques protoplanétaires.

### **GT5 : Réflexions générales sur le programme de R&D commun**

Un programme de R&D commun sur différentes expériences semble, compte tenu de la multitude des mesures de physique nucléaires possibles, difficile à établir. Cette diversité engendre une grande variété de détecteurs et d'accélérateurs. De plus il semblerait naturel qu'un programme de R&D transversal résulte des réflexions cristallisées au sein du GDR, ce qui est à ce stade très précoce. Cette réflexion devrait donc s'alimenter des discussions qui auront lieu au sein des GT dans les prochaines années. Le GT5 est donc plutôt un inter-GT et son objet d'étude se précisera au fur et à mesure du temps. On peut néanmoins donner quelques pistes de synergies qui existent d'ailleurs dans certaines structures nationales voire internationales (exemple pour GANIL, SPIRAL2, ICC). Nous en faisons une liste non-exhaustive ci-après.

- Un programme de R&D commun peut se faire sur de nouveaux détecteurs. Par exemple, les scintillateurs de nouvelle génération (LaBr3 / CeBr3) peuvent aussi bien être utilisés pour un détecteur des particules neutres gamma-neutron que pour un détecteur de particules chargées.
- La mise en place de plateformes de simulations communes peut être envisagée (exemple plateforme GATE pour le médical).
- Le développement d'électronique intégrée, au plus près du détecteur (exemple ASIC à froid), peut constituer un axe commun en association avec les électroniques de lectures associées. Tout comme

pour le développement de détecteurs, ces aspects de la chaîne expérimentale semblent plus difficilement mutualisable compte tenu de la pluralité intrinsèque. L'infrastructure d'acquisition (systèmes distribués, trigger soft) pourrait éventuellement être plus facilement mutualisable.

- La gestion des données brutes, notamment de forte volumétrie (BigData), générées par les expériences, ainsi que leur cycle de vie, peuvent être un point commun à un ensemble d'expériences.

- Certaines expériences requièrent une très grande puissance de calcul: des exemples typiques sont les algorithmes d'analyse de formes d'impulsion (AGATA, NEDA). Des développements conjoints de calcul sur matériel hétérogène peuvent être envisagés sur les thèmes suivant: parallélisation, multi-threading, clusters, clouds, accélérateurs matériels (GPU, FPGA).

- A l'instar de SPIRAL2, les nouvelles installations expérimentales, type ELI-NP, peuvent potentiellement générer des R&D communes. Mais pour quelles mesures, pour quelle physique ?

## **D. Organisation et moyens**

### **D.1 Fonctionnement**

Le GDR fonctionnera avec un comité de direction (CD), un conseil scientifique (CS), des correspondants laboratoires (CL) et les groupes de travail (GT).

Le CD sera constitué d'un/une directeur/trice, d'un/une directeur/trice adjoint/e, d'un/une responsable de la communication (site web, liste de diffusion). Le CD définira l'ordre du jour des réunions du CS et sollicitera le CS pour prendre ses décisions. Le CD fonctionnera de façon collégiale et ses décisions résulteront du vote de ses trois membres. Il pourra aussi décider de soumettre certaines décisions au vote du CS. Le CD veillera à l'organisation générale des GT, recevra les rapports annuels des GT et rédigera celui du GDR. Il sera aussi en charge de l'organisation du colloque général du GDR.

Le CS d'une quinzaine de membres assistera le CD pour préciser les orientations scientifiques, identifier les domaines ou sujets sur lesquels des groupes de travail seront mis en place, proposer les noms des coordinateurs des GT, et évaluer les activités des GT. Etant donné le rôle du CS, ses membres seront choisis de façon à représenter les différentes composantes thématiques impliquées dans le GDR et seront cooptés. Le cas échéant, le remplacement d'un membre du CS se fera aussi par cooptation. Le CS se réunira au moins une fois par an, au moment du colloque général du GDR.

Le CD, avec le CS le cas échéant, rencontrera l'ensemble des tutelles du GDR une fois par an, pour faire le bilan des activités passées et présenter le programme futur et les demandes financières. Le CD pourra aussi faire des propositions issues des réflexions au sein du GDR.

Le GDR aura un correspondant par laboratoire (CL) qui permettra de transmettre les informations et recevoir les demandes de la communauté. Si possible le CL sera un membre du CS.

Le GDR aura un colloque général auquel participeront tous les GT. Les GT se réuniront en dehors du colloque en fonction de leurs besoins propres (au moins une fois par an en plus du colloque). Des réunions thématiques sur des sujets clairement identifiés pourront aussi être organisées par le GDR, ou en commun par plusieurs GT. Les GT pourront aussi s'associer à des organisations de workshops sur des sujets communs.

## **D.2 Administration des tutelles et des sections du comité national**

Le GDR sera sous la tutelle principale de l'IN2P3/section 01 du CNRS.

Un rattachement supplémentaire à l'INP/section 02 et 04, à l'INC/section 13, à l'INSU/section 17 sera aussi demandé.

## **D.3 Budget**

Sauf exception, le financement sera réservé à l'organisation du colloque général et des réunions des GT. Le budget sera uniquement utilisé pour le remboursement des missions et en priorité à destination des jeunes. Les laboratoires seront sollicités pour proposer des lieux de réunions gratuits pour les GT. Les réunions du CD et du CS (hors colloque général) seront organisées par visio-conférence pour réduire les frais et le temps de déplacement. Un budget de 2 k€ sera cependant réservé pour les frais de fonctionnement du CD et du CS (les excédants éventuels seront redistribués). Les GT auront un budget d'environ 4 k€ pour le financement de leurs réunions (hors colloque annuel) et le colloque général du GDR aura un budget d'environ 8 k€. Cette distribution des ressources sera discutée annuellement au sein du CS.

### **Budget demandé en 2018 : 30 k€**

- **Organisation du colloque annuel du GDR : 8 k€.**
- **Organisation des réunions des GT : 20 k€ (4 k€ par GT).**
- **Frais liés au fonctionnement du CD et CS : 2 k€**

Ce budget de fonctionnement plancher du GDR nécessitera des sources externes pour le compléter. Des entités non CNRS pourront contribuer au GDR (par exemple Universités, CEA, CNES, etc...).

## **D.4 Echelle de temps et calendrier**

Durée du GDR 4 ans (renouvelable si nécessaire).

Calendrier :

- Fin aout 2017: finalisation du document présentant le GDR, information à la communauté, identification de partenaires (CEA, CNES, etc...)
- Septembre 2017: réunion pour finaliser le projet, identification des membres du comité de direction et du conseil scientifique, des laboratoires impliqués, de leur correspondants, liste de tous les chercheurs associés et mise en place d'une mailing-list.
- Début octobre 2017 : dépôt du dossier de GDR au CNRS.
- Novembre-décembre 2017: réunion des sections du comité national pour évaluation du GDR.
- Janvier-février 2018: démarrage du GDR, première réunion du conseil scientifique. L'organisation générale des GT y sera discutée pour les années à venir (dates, lieux, etc...).
- Printemps 2018: réunions des GT.

- Automne 2018 : premier colloque général du GDR et réunion du CS.

### **D.5 Site web et liste de diffusion**

Pour diffuser les informations liées aux activités du GDR, un site web et une liste de diffusion à deux sens, permettant les échanges entre tous les membres, seront mis en place. Une personne sera en charge du site web et de la communication. Il/Elle sera membre du CD.

### **E. Signataires de ce document**

Ce document résulte des discussions qui ont eu lieu entre mai et septembre 2017 entre les personnes suivantes :

- Eric Bauge (DAM/CEA),
- Bertram Blank (CENBG Bordeaux),
- Sandrine Courtin (IPHC Strasbourg),
- Thomas Duguet (Irfu Saclay),
- Muriel Fallot (SUBATECH Nantes),
- Francesca Gulminelli (LPC Caen),
- Fairouz Hammache (IPN Orsay),
- Elias Khan (IPN Orsay),
- Amel Korichi (CSNSM Orsay),
- Jérôme Margueron (IPN Lyon & INT Seattle),
- Frédéric Nowacki (IPHC Strasbourg),
- Alexandre Obertelli (Irfu Saclay),
- Micaela Oertel (LUTH Meudon),
- François de Oliveira (GANIL Caen),
- Gary Simpson (LPSC Grenoble),
- Hervé Savajols (GANIL Caen),
- Olivier Stezowski (IPN Lyon),
- David Verney (IPN Orsay).