

Astrophysique nucléaire théorique (F.Gulminelli, LPC Caen)

Présentation au Conseil Scientifique de l'In2p3, le 29 juin 2021

Implication de la communauté In2p3

La communauté des chercheur(e)s permanents en astrophysique nucléaire théorique est constituée de 8 chercheur(e)s dans des laboratoires à tutelle In2p3 (GANIL, IJCLab, IP2I, LPC Caen, LUTh) qui font de l'astrophysique nucléaire théorique leur thème principal de recherche, et d'approximativement 15 chercheur(e)s qui ont une activité explicite d'astrophysique nucléaire théorique, mais sont principalement impliqué(e)s dans d'autres thématiques corrélées (structure nucléaire, astroparticules ou astrophysique) au sein de laboratoires In2p3 ou pas (APC, GANIL, IP2I, IJCLab, SUBATECH, IPHC, CENBG, IAP, Dap/IRFU).

Les grandes questions du domaine

L'astrophysique nucléaire se décline schématiquement autour de trois grandes thématiques:

- L'origine des éléments chimiques (nucléosynthèse)
- La composition de la matière dense, et son diagramme de phase
- La modélisation des objets compacts et les signaux multi-messagers qui en découlent

Ces grands thèmes sont clairement interconnectés et font partie d'un seul et même grand projet sur la compréhension du rôle de l'interaction forte dans les phénomènes astrophysiques. Pour donner quelques exemples, tous les éléments au-delà du Fer sont produits dans des événements explosifs comportant des astres compacts, ce qui montre l'interconnection entre la problématique de la nucléosynthèse et celle de la modélisation des astres compacts; de plus, les propriétés de la matière dense déterminent la forme des signaux électromagnétique et gravitationnels lors du processus de supernova et de fusion de binaires d'étoiles à neutrons, ce qui montre l'importance de la modélisation de la composition et structure de phase de la matière dense dans l'astrophysique multi-messager des objets denses.

Les axes de recherche

En ce qui concerne les problématiques de nucléosynthèse, la communauté française n'est pas impliquée dans la modélisation des différents processus en tant que tels, mais les calculs microscopiques des chercheurs In2p3 des différentes propriétés des noyaux impliqués, fournissent des références indispensables pour optimiser les modèles de réaction.

Dans la thématique des astres compacts, l'impact des chercheur(e)s français(es) concerne à la fois: (i) la modélisation microscopique de la matière dense dans ses différentes phases, (ii) les connexions avec les expériences en physique nucléaire, (iii) le calcul systématique des taux d'interactions faible, (iv) l'influence des ingrédients microphysiques dans les propriétés mesurables des astres compacts, (v) et le développement d'outils numériques pour la modélisation macroscopique, en étroite collaboration avec les observations.

Les résultats scientifiques marquants

1. Propriétés statiques des étoiles à neutrons et l'équation d'état de la matière dense.

L'équation de l'équilibre hydrostatique en relativité générale impose une correspondance biunivoque entre l'équation d'état (EoS) de la matière dense, à savoir

la relation fonctionnelle entre la pression et la densité d'énergie, et le rayon d'une étoile à neutron pour une masse donnée, dans la limite de vitesse de rotation faible. Cette correspondance s'étend à l'observable de polarisabilité de marée de l'étoile, telle que peut être extraite du signal d'onde gravitationnelle lors de la fusion de deux étoiles à neutrons. C'est pourquoi la connaissance de l'EoS permet de fournir, sans autres hypothèses ou approximations, une prédiction directe de ces observables statiques. Toutefois, l'EoS dépend des hypothèses sur la composition de la matière dense (purement nucléonique, ou incluant des résonances et des hyperons, jusqu'à l'hypothèse d'une matière déconfinée de quarks et gluons). Même dans une hypothèse purement nucléonique, aucune théorie ab-initio ne permet de calculer l'EoS au-delà d'une densité de l'ordre de 0.2 fm^{-3} , et des approches phénoménologiques et/ou des extrapolations sont nécessaires [Oertel 2017]. De plus, nous avons montré qu'il est important de développer des EoS unifiées [Fortin2016, Pearson2018] pour le cœur homogène et la croûte à structure cristalline, constituée de noyaux très exotiques immergés dans un gaz d'électrons et – dans ses parties plus denses – de neutrons superfluides. Nous développons deux approches complémentaires pour la description théorique de l'EoS. D'une part, des approches microscopiques basés sur la théorie de la fonctionnelle de la densité (HFB [Pearson2018] ou ETF [Carreau2020]) et optimisées sur les données nucléaires, qui permettent une plus grande précision de la description et fiabilité de l'extrapolation. D'autre part, nous avons conçu une méta-modélisation semi-agnostique très flexible [Margueron 2018a], qui permet un traitement contrôlé des incertitudes via l'inférence Bayésienne et un traitement unifié des contraintes provenant des observations et des expériences en laboratoire.

2. Dynamique des astres compacts. Les simulations en relativité numérique sont indispensables pour la modélisation des étoiles compactes et des supernovae. Une bibliothèque numérique (LORENE) a été développée par la communauté française depuis les années 1980 pour modéliser des objets compacts en relativité générale complète, en utilisant des méthodes spectrales [Gourgoulhon 2016]. Plus récemment, beaucoup d'efforts ont été faits pour incorporer des modèles microphysiques détaillés et l'interaction entre les propriétés du modèle global, l'EoS et le champ magnétique [Chatterjee 2015]. Les simulations de supernovae à effondrement de cœur (CCSN) sont extrêmement complexes et exigeantes, puisqu'en principe, des modèles numériques tridimensionnels complets avec un transport précis des neutrinos sont nécessaires pour décrire en détail le mécanisme d'explosion. Cependant, des simulations à 1D avec des codes comme CoCoNuT ou ACCEPT [Pascal 2020] sont également utiles en tant que modèles jouets pour sonder l'influence d'une hypothèse/modèle physique sur les observables [Pascal 2020]. L'outil numérique est également essentiel pour relier propriétés microscopiques aux observables dans le cas des glitches des pulsars. Dans ce domaine, des modèles locaux (mésoscopiques) de la croûte des étoiles à neutrons ont été développés et des solutions numériques à l'hydrodynamique superfluide ont été obtenues [Martin 2016, Sourie 2017]. En ce qui concerne les fusions d'étoiles à neutrons, il s'agit à nouveau de simulations très exigeantes et aucun code n'a été développé par les équipes In2p3.

3. Taux de réaction, neutrinos et nucléosynthèse. Les neutrinos jouent un rôle important dans l'astrophysique des étoiles compactes : le chauffage par neutrinos est l'un des

principaux ingrédients des CCSN, leur opacité ainsi que les changements de saveur interviennent dans la détermination des conditions initiales pour la nucléosynthèse des éléments lourds [Frensel 2017], les interactions neutrino-matière déterminent la composition de la matière dans les fusions d'étoiles à neutrons, et le refroidissement des étoiles à neutrons est dominé par l'émission de neutrinos. Pour toutes ces applications, les taux de réactions faibles (neutrinos et électrons) doivent être déterminés non seulement sur les nucléons [Oertel 2020], mais aussi sur une large variété de noyaux exotiques, pour lesquels les incertitudes sur les taux sur les noyaux individuels sont principalement dues à la structure nucléaire. En particulier, nous avons montré dans les simulations du CCSN [Pascal 2020] que les incertitudes sur les taux de capture d'électrons (EC) sur les noyaux individuels pendant le collapse induisent des modifications plus importantes de la masse du noyau central au moment du rebond et du maximum du pic de luminosité des neutrinos que le modèle du progéniteur ou l'EoS. Un traitement correct de la corrélation nucléaire est crucial dans ce contexte, car les taux de capture des électrons peuvent être considérablement modifiés [Litvinova2020]. Des problèmes similaires se posent pour les noyaux pertinents pour la nucléosynthèse par processus r : la trajectoire du processus r est déterminée par la compétition entre la capture des neutrons rapides et la désintégration bêta subséquente de noyaux très riches en neutrons. Des calculs de modèle en couche sur large échelle de spectres, facteurs spectroscopiques et largeurs gamma sont effectués [Sieja 2021] avec le but de fournir des références pour les approches alternatives plus systématiques (RPA), ainsi que d'évaluer explicitement les taux avec des inputs détaillés de structure nucléaire.

Les liens avec la physique nucléaire expérimentale

La dépendance isovectorielle de l'équation d'état, en particulier l'énergie de symétrie et sa dépendance en densité, font l'objet de différentes études de la communauté expérimentale $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$, par le biais de collisions d'ions lourds (collaboration INDRA/FAZIA) et par l'étude de résonances géantes et pygmées, en particulier la résonance géante de monopole (GMR) et les résonances dipolaires (GMR/PDR). Les paramètres de l'EoS sont contraints en comparant les prédictions des fonctionnelles avec les données nucléaires, ce qui nécessite une très forte collaboration entre les équipes expérimentales et théoriques. Les mesures de masse sont aussi cruciales pour nos applications, non seulement pour optimiser les fonctionnelles microscopiques basée sur la théorie de la fonctionnelle de la densité, mais aussi pour déterminer la distribution des noyaux dans la matière de supernova [Grams 2018]. Nos calculs ont ainsi conduit à la proposition d'une expérience de mesure de précision de masses autour du ^{78}Ni avec des porte-parole issus de la théorie et de l'expérience [Bastin 2018].

Un autre domaine de collaboration directe avec l'expérience concerne l'extraction de la modification des énergies de liaison des noyaux légers dans un milieu dense, à partir des constantes chimiques mesurées en collisions d'ions lourds [Pais 2020], expérience pour laquelle nous avons élaboré la méthode d'analyse avec les collègues de la collaboration INDRA.

Les liens avec l'observation astronomique

Nos modélisations ont par vocation naturelle de pouvoir se comparer aux différentes observations des objets denses par les observatoires terrestres et spatiales sensibles aux différentes sondes de la matière dense (gravitationnelles, électromagnétiques et neutrinos). Ceci inclue en particulier les mesures d'ondes gravitationnelles lors de la fusion d'étoiles à

neutrons par Virgo/LIGO, les mesures de rayons (XMM-Newton, Chandra, NICER) à partir des spectres thermiques de rayons X, les mesures de masse par chronométrage de pulsar (SKA, EPTA).

L'approche de meta-modélisation de l'EoS [Margueron 2018a] et ses analyses bayésiennes associées [Margueron 2018b] sont particulièrement adaptées pour tester les hypothèses sur la composition de la matière dense, en comparant les distributions mesurées avec l'espace de paramètres compatible avec les modèles nucléoniques, ou ceux qui incluent des degrés de liberté supplémentaires [Guven 2020].

La synergie avec l'observation va au delà de la simple comparaison de prédictions théoriques avec les données. En effet dans plusieurs observations les EoS entrent dans le processus de fit des paramètres de sources, les modèles nucléaires et les contraintes associées doivent donc être inclus directement dans l'analyse. Un exemple concerne l'extraction de contraintes de rayon d'étoiles à neutrons à partir de spectres de binaires X de faible masse dans des amas globulaires avec des distances bien mesurées [Baillot 2019]. Très récemment, les membres des groupes du IP2I, LPC, GANIL, LUTH ont rejoint la collaboration VIRGO afin d'éteindre ces collaborations à l'inclusion des modèles d'EoS dans les codes d'estimation des paramètres utilisés dans l'analyse des spectres gravitationnels. Un autre but de la création du groupe théorique dans VIRGO consiste à contribuer au cas physique pour VIRGO après O5, particulièrement pour des optimisations du détecteur et la préparation de l'interféromètre de nouvelle génération Einstein Telescope (ET) [Bauswein 2019].

L'investissement actuel de la communauté est particulièrement centré sur le développement de codes numériques en hydrodynamique relativiste avec microphysique réaliste, afin de fournir des prédictions quantitatives sur les signaux gravitationnels dans le domaine du kHz, produits par le résidu de fusion d'étoiles à neutrons.

Références

- [Baillot 2019] N. Baillot d'Etivaux, S. Guillot, J. Margueron, N. Webb, M. Catelan, A. Reisenegger, "New constraints on the nuclear equation of state from the thermal emission of neutron stars in quiescent low-mass X-ray binaries", *ApJ* 887 (2019) 48
- [Bastin 2018] experience I220@IGISOL, "Mass measurements in the vicinity of ^{78}Ni to constraint core collapse supernovae models and to study the $N=50$ and $Z=28$ shell closures evolution towards the neutron dripline", et S. Giraud et al, "Mass measurements towards doubly magic ^{78}Ni : Hydrodynamics versus nuclear mass contribution in core-collapse supernovae", soumis à *Phys.Rev.Lett.*
- [Bauswein 2019] A. Bauswein, N.F. Bastian, D. B. Blaschke, K. Chatziioannou, J. A. Clark, T. Fischer, M. Oertel "Identifying a First-Order Phase Transition in Neutron-Star Mergers through Gravitational Waves", *Phys.Rev.Lett.* 122 (2019) 061102
- [Carreau2020] T. Carreau, A. Fantina, and F. Gulminelli, "Inner crust of a neutron star at the point of crystallization in a multicomponent approach", *A&A* 640 (2020) A77.
- [Chatterjee 2015] D. Chatterjee, T. Elghozi, J. Novak, M. Oertel, "Consistent neutron star models with magnetic-field-dependent equations of state", *MNRAS* 447 (2015) 3785.
- [Fortin 2016] M. Fortin, C. Providencia, A. R. Raduta, F. Gulminelli, J. L. Zdunik, P. Haensel, M. Bejger, « Neutron star radii and crusts: uncertainties and unified equations of state », *Phys.Rev.C* 94 (2016) 035804.
- [Frensel 2017] M. Frensel, M. Wu, C. Volpe, A. Perego, "Neutrino flavor evolution in binary neutron star merger remnants", *Phys. Rev. D* 95 (2017) 023011.
- [Gourgoulhon 2016] É. Gourgoulhon et al. "LORENE: Spectral methods differential equations solver", *Astrophys. Source Code Library*, rec. ascl:1608.018 (2016), <https://lorene.obspm.fr>
- [Grams 2018] G. Grams, S. Giraud, A. F. Fantina, and F. Gulminelli, "Distribution of nuclei in equilibrium stellar matter from the free-energy density in a Wigner-Seitz cell", *Phys. Rev. C* 97, (2018) 035807
- [Guven 2020] H. Guven, K. Bozkurt, E. Khan, J. Margueron, "Multimessenger and multiphysics Bayesian inference for the GW170817 binary neutron star merger" *Phys.Rev. C* 102 (2020) 015805

- [Litvinova2020] E. Litvinova, C. Robin, and H. Wibowo, “Temperature dependence of the nuclear Gamow-Teller resonance”, Phys Lett. B800 (2020) 135134
- [Margueron 2018] J. Margueron, R. Hoffmann Casali, and F. Gulminelli, “Equation of state for dense nucleonic matter from metamodeling. I. Foundational aspects”, Phys. Rev. C 97 (2018) 025805.
- [Margueron 2018b] J. Margueron, R. Hoffmann Casali, and F. Gulminelli, “Equation of state for dense nucleonic matter from metamodeling. II. Predictions for neutron star properties”, Phys. Rev. C 97 (2018) 025806.
- [Martin 2016] N. Martin and M. Urban “Superfluid hydrodynamics in the inner crust of neutron stars”, Phys. Rev. C 94 (2016) 065801.
- [Oertel 2017] M. Oertel, M. Hempel, T. Klähn, S. Typel, “Equations of state for supernovae and compact stars”, Rev. Mod. Phys. 89, 015007 (2017).
- [Oertel 2020] M. Oertel, A. Pascal, M. Mancini, J. Novak, “Improved neutrino-nucleon interactions in dense and hot matter for numerical simulations”, Phys. Rev. C 102 (2020) 035802
- [Pais 2020] H. Pais, R. Bougault, F. Gulminelli, C. Providencia and the INDRA collaboration, “Low density in-medium effects on light clusters from HI data”, Phys. Rev. Lett. 125 (2020) 012701
- [Pascal 2020] A. Pascal, S. Giraud, A.F. Fantina, F. Gulminelli, J. Novak, M. Oertel, A.R. Raduta, “Impact of electron capture rates for nuclei far from stability on core collapse supernovae”, Phys. Rev. C 101 (2020) 015803.
- [Pearson 2018] J. M. Pearson, N. Chamel, A. Y. Potekhin, A. F. Fantina, C. Ducoin, A. K. Dutta, and S. Goriely, “Unified equations of state for cold non-accreting neutron stars with Brussels–Montreal functionals – I. Role of symmetry energy”, MNRAS 481 (2018) 2994.
- [Sourie 2017] A. Sourie, N. Chamel, J. Novak, M. Oertel, “Global numerical simulations of the rise of vortex-mediated pulsar glitches in full general relativity”, MNRAS 464 (2017) 4641.

L’organisation de la communauté

Les chercheurs en astrophysique nucléaire théorique participent à des nombreux projets collaboratifs à l’échelle nationale et internationale, et ils en sont souvent les porteurs.

Au niveau national :

- **Master Projet** “modélisation des astres compacts” (MAC) (9 participants, 4 labos, responsable: F. Gulminelli) (2016-2019)
- **Master Projet** “modélisation des astres compacts” (New-MAC) (22 participants, 5 labos, responsable: F. Gulminelli) <http://mac.in2p3.fr/> (2019-2022)
- **GDR** « Réactions, Structure et Astrophysique Nucléaire : Expériences et Théories » (RESANET) (responsable: J. Margueron, vice-président CS: F. Gulminelli, groupe leader WG4: M. Oertel) (2018-2023)
- **GDR** “Ondes Gravitationnelles” (OG) (membre du CS: J. Novak, responsables du WG NS, SN et synthèse des éléments lourds: A.F. Fantina, J. Novak) (2018-2023)
- **Groupe théorie Caen-Meudon@VIRGO** (MoA 23/12/2020) (8 participants, coordinateur : J. Novak)

Au niveau international :

- **Action COST** “Exploring Fundamental Physics with Compact Stars” (NewCOMPSTAR) (Sinergy Agent nuclear physics: M. Oertel) (2014-2017)
- **Action COST** « the Multi-Messenger Physics and Astrophysics of Compact Stars” (PHAROS) (2017-2021)
- **PICS** France-Belgique “Core-collapse Supernovae: more realistic equations of state and their impact on the core collapse phase” (coordinateur: A.F. Fantina) (2018-2020)
- **IRP** France-Belgique “Origine des éléments lourds dans l’Univers : astres compacts et nucléosynthèse » (ACNu) (coordinateur : A.F. Fantina) (2021-2026)

La structuration internationale

Les chercheurs en astrophysique nucléaire théorique bénéficient de nombreuses collaborations internationales, gérées (ou pas) par des accords bilatéraux spécifiques. Pour en donner une image (non exhaustive), sont listées ici les collaborations qui ont conduit les membres théoriciens du Master Projet NewMAC à des collaborations dans des revues internationales à comité de lecture, pendant la période août 2016- octobre 2020.

Allemagne

- *Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS)*: A.Sedrakian
- *Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt*: A.Bauswein, S.Blacker
- *Institut für Theoretische Physik, Justus-Liebig-Universität, Gießen*: K.Otto, B.J.Schaefer
- *Institut für Physik, Universität Rostock* : G.Roepke
- *Technische Universität Darmstadt: Darmstadt (Allemagne)*: S.Typel

Belgique

- *Institut d'Astronomie et d'Astrophysique, Université Libre de Bruxelles*: N. Chamel, S. Goriely

Brésil

- *Universidade de Florianópolis*: D.Menezes, C.Barros Junior, M.Benghi Pinto,U.Furtado

Canada

- *Université de Montréal* : J.M.Pearson

Etats Unis

- *Los Alamos National Lab, New Mexico*: I.Tews
- *Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Berkeley* : C.Drischler
- *Department of Physics, University of Washington, Seattle*: S.Reddy
- *Florida State University, Florida*: J.Piekarewicz
- *California State University, Long Beach (USA)* : T.Klahn

India

- *Inter-University Centre for Astronomy and Astrophysics (IUCAA), Pune*: D.Chatterje
- *Variable Energy Cyclotron Center (VECC), Kolkata* : G.Chaudhuri, S.Mallik

Pologne

- *Nicolaus Copernicus Astronomical Center, Polish Academy of Sciences, Varsovie* : P. Haensel, J.L. Zdunik M.Fortin

Portugal

- *Universidade de Coimbra* : C.Providencia, H.Pais

Roumanie

- *Horia Hulubei National Institute of Physics and Nuclear Engineering (IFIN-HH), Bucarest*: Ad.R.Raduta

Russie

- *Ioffe Physical-Technical Institute, St.Petersburg* : A.Y. Potekhin

Suisse

- *Université de Basel*: M.Hempel

Turquie

- *Yildiz Technical University, Istanbul*: K.Bozkurt

Vietnam

- *Institute for Nuclear Science & Technology, Hanoi*: D.T.Khoa

Quelques chiffres

Un certain nombre de physiciens In2p3 travaillant en astrophysique théorique ont aussi une autre activité scientifique en structure nucléaire, physique hadronique, ou physique des neutrinos. Leurs publications et plus généralement les produits de la recherche sont comptabilisés dans la production scientifique des groupes concernés. On donne ici seulement les chiffres concernant la production en astrophysique nucléaire théorique des membres du Master projet NewMAC (actuellement 6 membres permanents des laboratoires GANIL, IP2I, LPC, LUTH), qui font de l'astrophysique nucléaire théorique leur thème principal de recherche. Ces chiffres concernent la période aout 2016- octobre 2020.

70 Publications

60 Communications/seminaires

40 Conférences invitées

12 Présentations ou posters des PhD

22 Conférences grand publique

3 Chapitres de livres

6 thèses soutenues : (N.Baillot d'Etivaux, Lyon, H.Guven, Orsay, S.Giraud, Caen, T.Carreau, Caen, M.Marques, LUTH, A.Sourie, LUTH)

Atelier « Physique Théorique des deux infinis » 7-8 juin

Les résultats marquants de la communauté française en astrophysique nucléaire théorique ont été présentés, avec les perspectives du domaine, lors de l'atelier « physique théorique des deux infinis » du 7-8 juin 2021. Sur la base des propositions récoltées, cinq exposés de revue de 15 minutes chacun ont été sélectionnés pour la session d'astrophysique nucléaire du 8 juin de 14 :30 à 16 :30, selon le programme suivant :

- Jérôme Margueron (I2PI) : « Probing extreme matter physics with gravitational waves »
- Jérôme Guilet (DaP/IRFU): “Supernova and compact star simulations”
- Micaela Oertel (LUTH) “Weak interaction rates in compact star physics”
- Michael Urban (IJCLab) “Theoretical modelling of the neutron star crust”
- Anthea F. Fantina (GANIL): “Modelling dense matter in finite temperature in compact stars”

Les transparents des présentations et les résumés sont disponibles sur <https://indico.in2p3.fr/event/23540/> .

Le grand nombre de co-auteurs de chaque exposé (de l'ordre de 10) a montré la bonne cohésion de la discipline.

Le caractère interdisciplinaire de la discipline est aussi clairement apparu lors de divers exposés dans la session de structure nucléaire (K.Sieja), physique hadronique (M.Nahrgang) et physique des astroparticules (C.Volpe), exposés qui ont traité des thèmes à la frontière entre les sous-disciplines de la physique théorique des deux infinis.