

## HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Date de la soutenance : **28 novembre 2024**

Nom de famille et prénom de l'auteur : **Monsieur PASTORE Alessandro**

Titre des travaux : « *Construction d'une interaction nucléon-nucléon effective : des noyaux finis aux étoiles à neutrons* »



### Résumé

Au cours de ma carrière j'ai publié 80 articles avec h-index=25 (Google Scholar). J'ai travaillé sur différents sujets qui couvrent aussi bien les sujets fondamentaux de la physique nucléaire de basse énergie que l'astrophysique nucléaire et, plus récemment, le Machine Learning.

Mon travail est bien évalué par la communauté internationale dans le sens où j'ai été régulièrement invité à présenter mes travaux dans les conférences, à écrire deux revues (Physics Reports [1] et Progress in Nuclear and Particle Physics [2]) ainsi que trois articles pour des Special Issues [3,4,5]. Par ailleurs, dans ma liste de publications, j'aimerais mettre en évidence un Nature Physics [6] et un Physical Review Letters [7] issus d'une étroite collaboration théorie - expérience et deux Physical Letters B [8,9].

Ma recherche tourne principalement autour d'une question scientifique : comment comprendre et modéliser les systèmes de fermions en interaction? Le sujet est fortement interdisciplinaire puisqu'il concerne à la fois la physique nucléaire (noyaux, étoiles à neutrons), la physique atomique [10] (atomes ultra-froids), la physique hadronique [11] (systèmes de quarks) et enfin les systèmes électroniques [12]. Vu la complexité du problème, j'ai développé de nombreuses collaborations avec d'autres collègues théoriciens dans les domaines nucléaire et astrophysique, mais aussi avec des expérimentateurs car le but final des modèles que j'utilise est d'expliquer et reproduire les données expérimentales disponibles, comme la peau de neutrons dans des noyaux lourds [13] ou la masse, le rayon ou encore la structure des étoiles à neutrons [14].

Mes compétences comme physicien à N-corps me permettent donc de travailler sur des systèmes apparemment différents, mais en réalité possédant des propriétés universelles dues à leur caractère fermionique comme par exemple les phénomènes de supraconductivité / superfluidité [15] que l'on retrouve aussi bien dans les noyaux, les étoiles à neutrons que les atomes froids ou les systèmes électroniques. Toutefois, chaque système possède ses caractéristiques (densité, nombre de particules, taille du système, etc) permettant ainsi de développer des compétences à la fois spécifiques et générales.

La plupart de mes articles est liée à la structure nucléaire. En particulier, je me suis spécialisé dans le formalisme de la Fonctionnelle de la Densité Nucléaire. Grâce au théorème de *Hohenberg-Kohn*, nous savons qu'il est possible de décrire des systèmes de fermions à différentes densités, mais liés par la même interaction, avec la même fonctionnelle. J'ai travaillé à la fois sur les aspects formels de la théorie et sur les aspects. Une étape majeure pour le développement des nouvelles fonctionnelles a été l'étude

des instabilités de taille finie [1] : la plupart des fonctionnelles présentent en effet des instabilités, *i.e.* des divergences non-physiques, dans les canaux de spin de l'interaction nucléaire [16]. Cela est principalement dû à un protocole de fit des paramètres qui est défaillant [17]. Les résultats de ce travail de longue haleine ont été publiés en 2017 dans la thèse de Pierre Becker et aussi dans une série d'articles.

La nouvelle fonctionnelle, appelée *Skyrme SN2LO1*, a été également utilisée pour étudier les propriétés macroscopiques d'une étoile à neutrons en montrant que les nouveaux termes aident à obtenir une équation d'état compatible avec toutes les contraintes astrophysiques connues mais aussi à conserver en même temps une bonne qualité de reproduction des observables des noyaux atomiques [18]. Ceci est très important spécialement pour pouvoir utiliser les fonctionnelles à haute densité (application aux étoiles à neutrons), c'est-à-dire faire des extrapolations fiables dans des régions où les données expérimentales sont inexistantes.

Le fait d'utiliser la même fonctionnelle de la densité pour les calculs dans les noyaux atomiques et les étoiles à neutrons est fondamentale pour pouvoir utiliser au mieux les contraintes expérimentales et donc comprendre les avantages et limites du modèle utilisé.

En travaillant sur des problèmes complexes de physique, j'ai rapidement réalisé l'importance des méthodes statistiques et tout d'abord pour développer le concept de barre d'erreur théorique. En effet, comme la plupart des modèles utilisés sont phénoménologiques, *i.e.* avec des paramètres ajustés sur les données, j'ai travaillé au développement de méthodes spécifiques pour estimer facilement les barres d'erreur et les corrélations entre paramètres. En particulier j'ai travaillé sur les aspects du Bootstrap et de Markov Chain Monte Carlo. Ces travaux ne sont pas limités à la physique théorique mais sont d'intérêt plus général puisqu'il s'agit de méthodes statistiques utilisables pour n'importe quel modèle.

Plus récemment, j'ai travaillé sur d'autres méthodes telle que le Processus Gaussien (GP). L'avantage de cette méthode est qu'en remplaçant un simulateur numérique, CPU-intensif, par un émulateur comme le GP, on peut réduire énormément les temps de calculs, spécialement quand il s'agit d'explorer un espace de paramètres et donc quand il est nécessaire de répéter de nombreuses fois les mêmes calculs. J'ai été l'un des premiers à introduire cette méthode en astrophysique nucléaire [5], pour rendre plus facile les calculs de la composition chimique des étoiles à neutrons, mais aussi pour améliorer la précision des modèles nucléaires : j'ai ainsi développé un modèle de masses nucléaires basé sur le GP avec une précision de < 200 keV [3].

## Références

- [1] **A. Pastore**, D. Davesne and J. Navarro, *Linear response of homogeneous nuclear matter with energy density functionals*, Physics Report **563**, 1-67, (2015)
- [2] D. Davesne, **A. Pastore**, J. Navarro; *Linear response theory with finite-range interactions*; Progress in Particle and Nuclear physics (in press/accepted) (2020)
- [3] M. Shelley and **A. Pastore**; *A new mass model for nuclear astrophysics: crossing 200 keV accuracy* Universe **7**, 131, (2021) (**Special issue: invited; Guest Editors: M. Baldo and I. Vidana**).
- [4] M. Shelley and **A. Pastore**; *Comparison between the Thomas-Fermi and Hartree-Fock-Bogoliubov methods in the inner crust of a neutron star: the role of pairing correlations*; Universe **6** 206 (2020) (**Special issue: invited; Guest Editor: N. Chamel**).
- [5] **A. Pastore**, M. Shelley, S. Baroni and C.A. Digeat, *New statistical methods to determine the structure of the inner crust of a neutron star*; J. Phys. G **44**, Special Issue: Emerging Leaders, 094003 (2017) (**invited**).
- [6] B. A. Marsh, *et al.*, *Characterization of the shape-staggering effect in mercury nuclei*, Nature Physics **14**, 1163 (2018).
- [7] R. D. O. Llewellyn, *et al.*; *Establishing the Maximum Collectivity in Highly-Deformed  $N = Z$  Nuclei*, Phys. Rev. Lett. **124**, 152501, (2020).
- [8] G. Colo, D. Gambacurta, W. Kleinig, J. Kvasil, V.O. Nesterenko and **A. Pastore**; *Isoscalar monopole and quadrupole modes in Mo isotopes: microscopic analysis*; Phys. Lett. B **811** 135940 (2020).
- [9] I. Vidana, M. Bashkanov, D.P. Watts, **A. Pastore**; *The  $d^*(2380)$  in neutron stars-a new degree of freedom?*, Phys. Lett. B **781**, 112-116 (2018)
- [10] **A. Pastore**, P. Schuck, M. Urban, X. Vinas and J. Margueron, *Pairing correlations of cold fermionic gases at overflow from a narrow to a wide harmonic trap*, Physical Review A **90**, 043634 (2014).
- [11] M. Bashkanov, D.P. Watts and **A. Pastore**, *Electromagnetic properties of the  $d^*(2380)$  hexaquark*, Phys. Rev. C **100**, 012201(R) (2019).

- [12] **A. Pastore**, P. Schuck, X. Vinas; *Generic size dependences of pairing in ultrasmall systems: electronic nano-devices and atomic nuclei* arXiv:2004.09423; *Annals of Physics* (under review) (2020).
- [13] **A. Pastore**; *Bootstrap analysis of the correlation between neutron skin thickness and the slope of symmetry energy*. *International Journal of Modern Physics E* **29** (07), 2050054 (2020).
- [14] A. Mantziris, **A. Pastore**, I. Vidana, D. P. Watts, M. Bashkanov and A. M. Romero; *Neutron star matter equation of state including  $d^*$ -hexaquark degrees of freedom*; *Astronomy & Astrophysics*, **638**, A40 (2020).
- [15] **A. Pastore**, F. Barranco, R. A. Broglia and E. Vigezzi; *Microscopic calculation and local approximation of the spatial dependence of the pairing field with bare and induced interactions*, *Physical Review C* **78**, 024315, (2008).
- [16] V. Hellemans, **A. Pastore**, T. Duguet, K. Bennaceur, D. Davesne, J. Meyer, M. Bender and P. -H. Heenen, *Spurious finite-size instabilities in nuclear energy density functionals*, *Phys. Rev. C* **88**, 064323, (2013).
- [17] **A. Pastore**, D. Davesne, K. Bennaceur, J. Meyer and V. Hellemans; *Fitting Skyrme functionals using linear response theory*, *Physica Scripta* **2013**, 014014, (2013).
- [18] P. Becker, D. Davesne, J. Meyer, J. Navarro, **A. Pastore**; *Solution of Hartree-Fock-Bogoliubov equations using N2LO Skyrme pseudo-potential in spherical symmetry*; *Physical Review C* **96**, 044330 (2017).