



## Modélisation du problème à N-corps appliqué à la dynamique nucléaire

**Spécialité** Physique nucléaire

**Niveau d'étude** Bac+5

**Formation** Master 2

**Unité d'accueil** [DPHN/LEARN](#)

**Candidature avant le** 01/06/2019

**Durée** 4 mois

**Poursuite possible en thèse** oui

**Contact** [LETOURNEAU Alain](#)

+33 1 69 08 76 01

[alain.letourneau@cea.fr](mailto:alain.letourneau@cea.fr)

**Autre lien** <http://irfu.cea.fr/dphn/Spallation/incl.html>

### Résumé

Une des approches que nous développons pour traiter la dynamique nucléaire consiste à considérer les nucléons comme des boules de billard en collision (cascade intra-nucléaire INCL). Dans ce stage nous proposons d'étendre cette approche en introduisant des interactions entre les nucléons.

### Sujet détaillé

La matière nucléaire et son comportement dynamique sont au cœur des grandes questions sur la structuration de la matière à l'échelle du noyau de l'atome mais également à l'échelle astrophysique. Les réactions élémentaires induites par nucléon sont à l'œuvre dans les milieux stellaires et sont riches en informations sur la dynamique d'évolution de la matière nucléaire, en particulier sur le réarrangement de ses constituants sous contrainte pouvant conduire à des phénomènes collectifs de déformation extrêmes entraînant la cassure du noyau.

La dynamique nucléaire nécessite de traiter un système quantique à N-corps en interaction. Actuellement, deux approches approximent la résolution de ce problème : la résolution de l'équation de Schrödinger en champs moyen et l'approche dynamique de Boltzmann. La première approche permet de calculer assez précisément la structure de l'état fondamental du noyau et de ses premiers états excités, ainsi que l'évolution moyenne du système quantique. Elle est cependant limitée aux réactions de basse énergie et ne traite pas de la collision entre les nucléons. La seconde est plus adaptée pour décrire la dynamique du noyau, incluant les collisions entre nucléons, mais ne permet pas un traitement quantique complet.

Une des approches que nous développons au sein du laboratoire est celle de la cascade intra-nucléaire qui résout l'équation de Boltzmann dans l'approximation de particules classiques et indépendantes. Cette approche est très bien adaptée pour traiter des réactions nucléaires induites par des particules légères de plusieurs dizaines de MeV jusqu'à la dizaine de GeV. Elle permet d'inclure les collisions entre nucléons et la production de méson et de particules étranges via les excitations nucléon-nucléon. Cependant, dans cette approche le potentiel qui agit sur chaque nucléon n'est pas traité de manière auto-cohérente et la formation d'amas de nucléons doit-être ajoutée de manière ad'hoc.

Dans ce stage, nous proposons d'étendre cette approche de cascade en incluant des interactions entre nucléons. Ce

---

travail nécessite d'optimiser le traitement du problème à N-corps afin de réduire le temps de calcul. Plusieurs méthodes et algorithmes existent, principalement développées en astrophysique pour calculer l'évolution de systèmes stellaires ou galactiques. La méthode la plus répandue est celle dite en arbre qui permet de hiérarchiser l'importance du traitement des interactions à deux corps. Cette méthode à l'avantage de réduire le temps de calcul à  $N \ln(N)$  au lieu de  $N^2$ . Le travail de stage consistera dans un premier temps à regarder ces différentes méthodes et approches afin de dégager celle qui semble la plus pertinente. Une interaction nucléon-nucléon réaliste sera introduite dans un code traitant du problème à N-corps par la méthode des arbres afin de tester cette méthode, d'évaluer ses performances et d'étudier le comportement du système sous l'action de ces interactions. Dans un second temps, l'implantation de cette méthode dans INCL sera étudiée.

### **Mots clés**

Modélisation, dynamique nucléaire, matière nucléaire, problème à N-corps

### **Compétences**

Méthodes numériques

### **Logiciels**

C++

---

## **N-body modelisation applied to nuclear dynamics**

### **Summary**

One of the approaches we are developing to address nuclear dynamics is to consider nucleons as colliding billiard balls (intra-nuclear cascade INCL). In this course we propose to extend this approach by introducing interactions between nucleons.

### **Full description**

Nuclear matter and its dynamic behavior are at the heart of the major questions on the structuring of matter at the scale of the atomic nucleus but also at the astrophysical scale. Elementary nucleon-induced reactions are at work in stellar environments and are rich in information on the evolution dynamics of nuclear material, in particular on the rearrangement of its components under constraints that can lead to extreme collective deformation phenomena leading to nuclear fission.

Nuclear dynamics requires processing an interacting N-body quantum system. Currently, two approaches approximate the solution of this problem: the resolution of the Schrödinger equation in mean fields and the Boltzmann dynamic approach. The first approach allows to calculate quite precisely the structure of the fundamental state of the nucleus and its first excited states, as well as the average evolution of the quantum system. However, it is limited to low energy reactions and does not deal with collision between nucleons. The second is better suited to describe the dynamics of the nucleus, including collisions between nucleons, but does not allow a complete quantum processing.

One of the approaches we are developing in the laboratory is the intra-nuclear cascade approach, which solves the Boltzmann equation by approximating conventional and independent particles. This approach is very well adapted to deal with nuclear reactions induced by light particles from several tens of MeV to ten of GeV. It allows to include collisions between nucleons and the production of meson and strange particles via nucleon-nucleon excitation. However, in this approach the potential that acts on each nucleon is not treated in a self-coherent way and the formation of nucleon clusters must be added ad hoc.

In this internship, we propose to extend the cascade approach by including interactions between nucleons. This work requires optimizing the treatment of the N-body problem in order to reduce computation time. Several methods and algorithms exist, mainly developed in astrophysics to calculate the evolution of stellar or galactic systems. The most common method is the so-called tree method, which makes it possible to prioritize the importance of processing two-body interactions. This method has the advantage of reducing the calculation time to  $N \ln(N)$  instead of  $N^2$ . The internship work will first consist in looking at these different methods and approaches in order to identify the one that seems most relevant. A realistic nucleon-nucleon interaction will be introduced into a code addressing the N-body problem by the tree method in order to test this method, evaluate its performance and study the behavior of the system under the action of these interactions. In a second step, the implementation of this method in INCL will be studied.

### **Keywords**

Modelization, nuclear dynamics, N-body, nuclear mater

### **Skills**

Numerical techniques

### **Softwares**

C++