

## Nu-INCL : modélisation de l'interaction neutrino-nucléon dans INCL pour la physique des neutrinos

**Spécialité** Physique nucléaire

**Niveau d'étude** Bac+4/5

**Formation** Ingenieur/Master

**Unité d'accueil** [DPhN/LEARN](#)

**Candidature avant le** 17/04/2024

**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)

### Résumé

Il est proposé d'étendre les fonctionnalités du code de cascade intranucléaire INCL - un code largement utilisé pour traiter des réactions nucléaires - en ajoutant l'interaction neutrino-nucléon. Cet ajout permettra son utilisation par les futures expériences de neutrinos auprès d'accélérateurs pour accroître leur sensibilité.

### Sujet détaillé

Des avancées majeures ont été réalisées ces dernières décennies dans l'étude des neutrinos. Petit à petit ces particules furtives révèlent leurs secrets et le secret des symétries fondamentales qui gouvernent notre Univers. Mais compte tenu de leur faible interaction avec la matière, les prochaines générations d'expériences neutrinos vont buter sur la précision avec laquelle nous sommes capables de modéliser leur interaction avec un noyau de l'atome. C'est pourquoi un gros effort est consenti dans ce sens pour développer des modèles d'interaction précis et validés. A l'heure actuelle, les modèles s'appuient sur une décomposition en plusieurs étapes qui commencent par l'interaction du neutrino avec un nucléon du noyau, puis le nucléon résultant de l'interaction est ensuite propagé dans le noyau via une cascade intra-nucléaire. Cette factorisation est extrêmement pratique puisqu'elle permet de découpler les différentes contributions, mais elle ne permet pas d'avoir une modélisation cohérente prenant en charge toutes les corrélations.

Un travail liminaire sur le traitement de l'interaction neutrino-noyau avec le code de cascade intra-nucléaire INCL, que nous développons dans l'équipe et qui est implémenté dans Geant4, a montré l'intérêt d'un tel code pour traiter la complexité de la phase finale de l'interaction [1]. Ce travail a aussi montré les limites de l'utilisation de ce code sous sa forme actuelle : l'interaction neutrino-nucléon n'est pas implémentée dans le code.

Nous proposons dans ce stage de poursuivre le travail initié dans [1] en implémentant une interaction neutrino-nucléon dans le code INCL. Ce travail se fera dans le cas particulier d'une interaction quasi-élastique dans laquelle le nucléon garde son intégrité et sera basé sur un modèle simple d'interaction à quatre corps. Il rendra INCL autonome vis-à-vis du traitement de cette réaction pour les études menées dans le cadre de l'expérience T2K. C'est en effet la réaction dominante dans cette expérience où le faisceau de neutrino est de l'ordre de 600 MeV.

Il s'agira d'écrire la classe en C++ qui permettra de générer les produits finals de la réaction et qui servira d'entrée à la

---

cascade intranucléaire. Des comparaisons avec des données expérimentales ou des résultats d'autres calculs serviront à valider cette implantation.

[1] A. Ershova, thèse Université Paris-Saclay 2023 ; A. Ershova et al, Physical Review D 106 (2022) 3, 032009, arXiv:2202.10402 and A. Ershova et al, soumis à Physical Review D, arXiv:2309.05410.

### **Mots clés**

Physique des particules

### **Compétences**

Méthode Monte Carlo, programmation numérique

### **Logiciels**

C++, INCL, ROOT

---

# Nu-INCL : neutrino-nucléon interaction modeling in INCL for neutrino physics

## Summary

We propose to add new functionalities to the INCL intranuclear cascade code - a widely used code for handling nuclear reactions - by adding the neutrino-nucleon interaction. This will enable its uses to increase the sensitivity of future long-baseline neutrino experiments.

## Full description

Major advances have been made in the study of neutrinos in recent decades. These stealthy particles are slowly revealing their secrets, and the secrets of fundamental symmetries that govern our Universe. However, given their weak interaction with matter, the next generation of neutrino experiments will be hampered by the precision with which we are able to model their interaction with an atomic nucleus. This is why a major effort is being made to develop accurate, validated interaction models. At present, these models are based on a multi-step decomposition, starting with the interaction of the neutrino with a nucleon in the nucleus, and then propagating the resulting nucleon into the nucleus via an intra-nuclear cascade. This factorization is extremely practical, since it allows the different contributions to be decoupled, but it does not provide a coherent model that takes all correlations into account.

Preliminary work on the treatment of neutrino-nucleon interaction with the INCL intra-nuclear cascade code, which we are developing in the team and which is implemented in Geant4, has shown the interest of such a code for handling the complexity of the final phase of the interaction [1]. This work has also shown the limitations of using this code in its current form: the neutrino-nucleon interaction is not implemented in the code.

In this internship, we propose to continue the work initiated in [1] by implementing a neutrino-nucleon interaction in the INCL code. This work will be carried out in the special case of a quasi-elastic interaction in which the nucleon retains its integrity, and will be based on a simple four-body interaction model. It will make INCL autonomous in its treatment of this reaction for studies carried out as part of the T2K experiment. This is the dominant reaction in this experiment, where the neutrino beam is of the order of 600 MeV.

The aim is to write the C++ class that will generate the final products of the reaction and serve as the input to the intranuclear cascade. Comparisons with experimental data or the results of other calculations will be used to validate this implementation.

[1] A. Ershova, thèse Université Paris-Saclay 2023 ; A. Ershova et al, Physical Review D 106 (2022) 3, 032009, arXiv:2202.10402 and A. Ershova et al, soumis à Physical Review D, arXiv:2309.05410.

## Keywords

Particle physics

## Skills

Monte Carlo method, numerical programming

## Softwares

C++, INCL, ROOT