

# THESE DE DOCTORAT DE

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 596

*Matière, Molécules, Matériaux*

Spécialité : Physique Théorique

Par

**Johannès JAHAN**

## **The Beam Energy Scan under the scope of EPOS 4**

Studying the impact of hadronic cascades on the 2<sup>nd</sup> order cumulants of conserved net-charges in heavy-ion collisions

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 30 septembre 2022

Unité de recherche : SUBATECH UMR6457

Thèse N° :

### **Rapporteurs avant soutenance :**

Boris TOMÁŠIK

Magdalena DJORDJEVIC

Professor, Univerzita Mateja Bela & České vysoké učení technické v Praze

Professor, University of Belgrade & Institute of Physics Belgrade

### **Composition du Jury :**

Président :

*(Pr. ou D.R. - à préciser après la soutenance)*

Examineurs : Boris TOMÁŠIK

Magdalena DJORDJEVIC

Jean-Yves OLLITRAULT

Marlene NAHRGANG

Sarah PORTEBOEUF-HOUSSAIS

Professor, Univerzita Mateja Bela & České vysoké učení technické v Praze

Professor, University of Belgrade & Institute of Physics Belgrade

Directeur de Recherche, Institut de Physique Théorique & CNRS

Maître assistante, IMT Atlantique & Subatech

Maître de conférences, Université Clermont Auvergne &

Laboratoire de Physique de Clermont

Dir. de thèse : Klaus WERNER

Professeur d'Université, Nantes Université & Subatech

### **Invitée**

Claudia RATTI

Associate Professor, University of Houston

---

**Titre :** Le *Beam Energy Scan* au travers d'EPOS 4 – Etude de l'impact des cascades hadroniques sur les cumulants d'ordre 2 des charges nettes conservées dans les collisions d'ions lourds

**Mots clés :** Collisions d'Ions Lourds, Plasma de Quarks & Gluons, Point Critique, Générateur d'événements EPOS, Logiciel d'Analyse RIVET

**Résumé :** Les collisions d'ions lourds aux énergies ultrarelativistes ont été utilisées durant les vingt dernières années afin d'étudier les propriétés du Plasma de Quarks & Gluons (PQG), un état de la matière où quarks et gluons sont déconfinés des hadrons. Un objectif de ces recherches est de cartographier le diagramme de phase de la matière nucléaire, rendu possible expérimentalement grâce au programme du *Beam Energy Scan* (BES). Il est réalisé, entre autres, afin de chercher des signatures d'une transition de 1<sup>er</sup> ordre et d'un point critique entre les phases de PQG et de gaz hadronique. Les ratios de cumulants de multiplicité nette ont ainsi été proposés comme grandeurs de procuracy (*proxies*) de choix, de par leur lien avec les susceptibilités thermodynamiques. La collaboration STAR a ainsi publié récemment la mesure des cumulants d'ordre 2 de multiplicité nette des pions, kaons et protons dans les collisions Au+Au à différentes énergies du programme BES.

Cependant, les signatures d'une transition de 1<sup>er</sup> ordre ou d'un point critique pourraient être modifiées par les derniers stades de la collision. Profitant de la conception modulaire du générateur d'événement EPOS, l'impact des cascades hadroniques sur ces cumulants d'ordre 2 a été étudié. Les résultats des *proxies* de STAR sont également comparés aux cumulants d'ordre 2 des charges conservées correspondantes, ainsi qu'à de meilleurs *proxies* proposés par les auteurs d'une étude basée sur des calculs de chromodynamique quantique sur réseau et l'utilisation d'un modèle de gaz de résonances hadroniques. Ce travail prend place dans le développement d'une nouvelle version d'EPOS, qui requiert de valider sa fiabilité en comparant les résultats de simulations aux données expérimentales pour un large panel de systèmes et d'énergies de faisceau. L'intégration du logiciel d'analyse RIVET, effectué afin de faciliter ce processus de validation, est également détaillée dans cette thèse.

---

**Title :** The Beam Energy Scan under the scope of EPOS 4 – Studying the impact of hadronic cascades on the 2<sup>nd</sup> order cumulants of conserved net-charges in heavy-ion collisions

**Keywords :** Heavy-Ion Collisions, Quark-Gluon Plasma, Critical Endpoint, EPOS Event Generator, RIVET analysis toolkit

**Abstract :** During the last two decades, heavy-ion collisions at ultra-relativistic energies have been used to investigate the properties of the Quark-Gluon Plasma (QGP), a state of matter in which quarks & gluons are deconfined from hadrons. One of the major goals of this research is to map the phase diagram of nuclear matter, made possible experimentally thanks to the Beam Energy Scan (BES) program. It is performed, among other objectives, to search for a 1<sup>st</sup> order phase transition and a critical endpoint between QGP and hadron gas phases. Ratios of net-multiplicities cumulants has been shown to be relevant experimental proxies for such study, due to their link with thermodynamic susceptibilities. In this regard, the STAR collaboration has recently published measurements of the 2<sup>nd</sup> order cumulants of net-multiplicities for pions, kaons and protons in Au+Au collisions at several energies of the BES program. However, signatures from a 1<sup>st</sup>

order transition or a critical point may be blurred out by the last stages of the collision. Taking advantage of the modular conception of the EPOS event generator, the impact of the hadronic cascades on these 2<sup>nd</sup> order cumulants has been studied. The STAR proxies results are also compared with the 2<sup>nd</sup> order cumulants of the corresponding conserved charges, and with enhanced proxies proposed by the authors of a study based on lattice quantum chromodynamics calculations and the use of a Hadron Resonance Gas model. This work takes place in the context of developments for a new version of EPOS, what requires to validate its reliability by comparing simulations with experimental data for a wide range of systems and beam energies. The integration of the RIVET analysis toolkit, which has been achieved to facilitate this validation process, is also presented in this thesis.