

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES HDR

NANTES UNIVERSITE

Spécialité : Physique

Par

Marcus BLUHM

Transport phenomena in strongly coupled quantum fluids

Travaux présentés et soutenus à Nantes, le 26 mars 2026

Unité de recherche : Subatech, UMR 6457

Rapporteurs avant soutenance :

Prof. Jan M. PAWLOWSKI	Professeur, Université de Heidelberg (Allemagne)
Dr. Jean-Yves OLLITRAULT	Directeur de Recherche, IphT CEA Paris-Saclay
Dr. Steffen A. BASS	Professeur, Duke Université, Durham (Etats-Unis)

Composition du Jury :

Président :	Prof. Thierry GOUSSET	Professeur, Nantes Université
Examineurs :	Prof. Jan M. PAWLOWSKI	Professeur, Université de Heidelberg (Allemagne), Rapporteur
	Dr. Jean-Yves OLLITRAULT	Directeur de Recherche, IphT CEA Paris-Saclay, Rapporteur
	Dr. Steffen A. BASS	Professeur, Duke Université, Durham (Etats-Unis), Rapporteur
	Dr. Béatrice RAMSTEIN	Directrice de Recherche, HDR, IJCLab Orsay

Titre : Phénomènes de transport dans les fluides quantiques fortement couplés

Mots clés : Plasma de quarks et de gluons, gaz de Fermi atomique ultra-froid, viscosité, dynamique des fluides anisotropes, fluctuations, diagramme de phase

Résumé : Cette HDR aborde divers aspects des phénomènes de transport dans deux fluides quantiques fortement couplés et corrélés très distincts: le plasma ultra-chaud de quarks et de gluons (QGP) et le gaz de Fermi atomique ultra-froid (UFG) au voisinage de l'unitarité. L'HDR synthétise mes travaux de recherche antérieurs visant à comprendre et à relier la physique de ces formes de matière les plus chaudes et les plus froides jamais créées en laboratoire. Dans le contexte du QGP, elle traite des aspects d'équilibre (équation d'état) et des coefficients de transport (viscosités de volume et de cisaillement) de la matière QCD à température et densité baryonique finies, de la perte d'énergie des quarks lourds au sein du QGP, des fluctuations d'équilibre lors du freeze-out chimique (pour explorer le diagramme de phase de la QCD) et de la dynamique hors équilibre des fluctuations hydrodynamiques et critiques (pour étudier l'existence possible d'un point

critique de la QCD). Dans le contexte du UFG proche ou à l'unitarité, la détermination de la viscosité de cisaillement est présentée. Cette détermination s'effectue par comparaison de données expérimentales avec des résultats obtenus dans le cadre de la dynamique des fluides anisotropes. Ce travail confirme les prédictions antérieures selon lesquelles QGP et UFG représentent les fluides normaux les plus parfaits jamais étudiés. De plus, une explication théorique du décalage anormal observé est fournie. Les perspectives de recherche futures se concentrent sur trois aspects principaux: la dynamique des fluctuations critiques dans le cadre d'une approche de transport assistée par la QCD, afin de déterminer les exposants critiques; la simulation de la transition de phase fluide normal-superfluide et du comportement des fluctuations lors de cette transition; et la simulation de la diffusion de spin dans un UFG.

Title : Transport phenomena in strongly coupled quantum fluids

Keywords : Quark-Gluon Plasma, ultra-cold atomic Fermi gas, viscosity, anisotropic fluid dynamics, fluctuations, phase diagram

Abstract : In this HDR various aspects of transport phenomena in two very distinct strongly coupled and correlated quantum fluids, the ultra-hot Quark-Gluon Plasma (QGP) and the ultra-cold atomic Fermi gas (UFG) near unitarity, are discussed. This work summarizes past research activities that aimed at understanding and bridging the physics of the hottest and coldest forms of matter ever created in laboratories. In the context of the QGP, equilibrium aspects (equation of state) and transport coefficients (bulk and shear viscosities) of strongly interacting (QCD) matter at finite temperature and baryon density, the energy loss of heavy quarks inside the QGP, equilibrium fluctuations at the chemical freeze-out to explore the QCD phase diagram or the non-equilibrium dynamics of fluid dynamical and critical fluctuations to study the possible existence of a QCD critical point are covered. In

the context of the UFG near or at unitarity, the determination of the density and temperature dependence of the shear viscosity through the comparison of experimental data with results obtained within a newly developed framework, anisotropic fluid dynamics, is presented. This work confirms previous expectations that both QGP and UFG represent the most perfect normal fluids ever studied. Also, a theoretical explanation for the observed anomalous shift with interaction strength is provided. Potential future research directions focus on three aspects in particular: the dynamics of critical fluctuations in the QCD phase diagram within a QCD assisted transport approach with the goal to determine critical exponents, the simulation of the normal fluid superfluid phase transition and the behavior of fluctuations across it, as well as the simulation of spin diffusion in cold atomic gases.