

Proposition de stage – Année 2027

Niveau du stage : M2

Durée du stage : 4-6 mois

Ouverture éventuelle vers un sujet de thèse : Oui

Type de financement envisagé : École doctorale ou autres sources de financement

Responsable du stage : Anna Chrysostomou, Aldo Deandrea, Zakaria Belkhadria

Téléphone : 0472448439

Email : a.chrysostomou@ip2i.in2p3.fr ; deandrea@ip2i.in2p3.fr ; z.belkhadria@ip2i.in2p3.fr

Adresse : IP2i Lyon – Bureau 336

Domaine Scientifique de la Doua – Bât. Paul Dirac

4 rue Enrico Fermi – 69622 Villeurbanne Cedex - France

Equipe d'encadrement : Anna Chrysostomou, Aldo Deandrea, Zakaria Belkhadria, S. Hohenegger

Thématique : Physique théorique : physique gravitationnelle, relativité générale et ondes gravitationnelles

Intitulé du stage : Les trous noirs au-delà de la RG et leurs signatures dans les ondes gravitationnelles

Description du travail demandé :

Les trous noirs en relativité générale (RG) sont des objets remarquablement contraints. Sous certaines hypothèses, les trous noirs stationnaires et isolés sont caractérisés par un petit nombre de paramètres macroscopiques, comme établi dans les célèbres théorèmes d'unicité et d'absence de « cheveux » [1]. Leur réponse aux perturbations est gouvernée par un spectre de modes quasi-normaux (MQN), dont les fréquences et les temps d'amortissement contiennent des informations sur la structure de l'espace-temps et la dynamique gravitationnelle, permettant ainsi de sonder les propriétés fondamentales des trous noirs et de tester la gravitation [2,3]. La disponibilité croissante des données d'ondes gravitationnelles, ainsi que les sensibilités prévues des futurs observatoires tels que LISA et Einstein Telescope, ouvrent la voie à des tests de plus en plus précis de la RG et à de meilleures perspectives pour identifier des signatures de nouvelle physique [4,5]. Cela soulève plusieurs questions : quelles propriétés des trous noirs sont robustes, lesquelles sont modifiées au-delà de la RG, et lesquelles peuvent être sondées par l'observation ?

L'objectif de ce stage est d'étudier les solutions de trous noirs et leurs MQN, en RG et dans ses extensions, en s'intéressant particulièrement aux propriétés fondamentales révélées par leurs spectres de perturbations. En RG, les MQN permettent notamment d'explorer des questions relatives à la structure des trous noirs et à la causalité [6]. Au-delà de la RG, la présence de champs supplémentaires, de modifications des interactions gravitationnelles ou de dimensions supplémentaires peut modifier les propriétés des trous noirs et leurs spectres de perturbations [7,8]. Le projet cherchera à comprendre comment ces modifications affectent la stabilité et la dynamique des trous noirs, et si elles peuvent produire des signatures distinctives dans les observations d'ondes gravitationnelles.

Au cours du stage, la personne recrutée étudiera les solutions de trous noirs, la théorie des perturbations et le calcul des modes quasi normaux. Les pistes possibles comprennent l'étude de la robustesse des propriétés caractéristiques de la RG, l'analyse de trous noirs comportant des champs supplémentaires et de leur stabilité,

ou encore l'exploration de nouvelles familles de modes. Selon les intérêts de la personne candidate, le projet pourra privilégier une approche (semi-)analytique ou numérique, comprenant le calcul de MQN, l'exploration d'espaces de paramètres et la comparaison de différentes méthodes de calcul.

Ce stage pourra déboucher sur un projet de doctorat, sous réserve de l'obtention d'un financement, portant sur les perturbations des trous noirs, leurs signatures dans les ondes gravitationnelles et les tests de physique fondamentale par la spectroscopie des trous noirs.

References:

- [1] Astrophysical Black Holes: A Compact Pedagogical Review,
C. Bambi, *Annalen Phys.* 530, 1700430 (2018),
e-Print: 1711.10256 [gr-qc].
- [2] Quasinormal modes of black holes and black branes,
E. Berti, V. Cardoso, and A. O. Starinets, *Class. Quant. Grav.* 26, 163001 (2009),
arXiv:0905.2975 [gr-qc]
- [3] Black holes, gravitational waves and fundamental physics: a roadmap.
L. Barack, V. Cardoso, S. Nissanke, T. P. Sotiriou et al., *Class. Quantum Grav.* 36, 143001 (2019).
arXiv:1806.05195 [gr-qc]
- [4] GWTC-5.0: Tests of General Relativity,
LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, and KAGRA Collaboration (2026),
arXiv:2607.19293 [gr-qc]
- [5] Black hole spectroscopy: from theory to experiment.
E. Berti, V. Cardoso, G. Carullo, J. Abedi et al., *Class. Quantum Grav.* 43, 123001 (2026).
arXiv:2505.23895 [gr-qc]
- [6] A note on strong cosmic censorship and its violation in Reissner–Nordström de Sitter black hole space-times,
A. Chrysostomou, A. S. Cornell, A. Deandrea, and S. C. Park, *Class. Quant. Grav.* 42, 107001 (2025),
arXiv:2501.12968 [gr-qc]
- [7] Black holes and nilmanifolds: quasinormal modes as the fingerprints of extra dimensions?,
A. Chrysostomou, A. Cornell, A. Deandrea, É. Ligout, and D. Tsimpis, *Eur. Phys. J. C* 83, 325 (2023),
arXiv:2211.08489 [gr-qc]
- [8] New model of spontaneous scalarization of black holes induced by curvature and matter
Z. Belkhadria, S. Mignemi, *Phys.Rev.D* 112 (2025) 4, 044015
arXiv:2506.12137 [gr-qc]

Internship offer – Year 2027

Internship level: M2

Duration: 4-6 months

Possible PhD follow up: Yes

Proposed PhD funding type: Doctoral school or other sources of funding

Supervisor: Anna Chrysostomou, Aldo Deandrea, Zakaria Belkhadria

Phone: 0472448439

Email: a.chrysostomou@ip2i.in2p3.fr ; deandrea@ip2i.in2p3.fr ; z.belkhadria@ip2i.in2p3.fr

Address: IP2I Lyon – Bureau 336

Domaine Scientifique de la Doua – Bât. Paul Dirac

4 rue Enrico Fermi – 69622 Villeurbanne Cedex - France

Mentoring team: Anna Chrysostomou, Aldo Deandrea, Zakaria Belkhadria, S. Hohenegger

Research field: Theoretical Physics: gravitational physics, General Relativity and gravitational-waves

Internship title: Black holes beyond GR and their gravitational-wave signatures

Work description:

Black holes in four-dimensional General Relativity (GR) are remarkably constrained objects. Under suitable assumptions, stationary and isolated black holes are characterised by only a few macroscopic parameters, as established by the celebrated uniqueness and no-hair results [1]. Their response to perturbations is governed by a spectrum of quasinormal modes (QNMs), whose frequencies and damping times encode information about the underlying spacetime and gravitational dynamics, providing a means of probing fundamental black hole properties and testing gravity [2,3]. The growing availability of gravitational-wave data, together with the projected sensitivities of future observatories such as LISA and the Einstein Telescope, promises increasingly precise tests of GR and improved prospects for identifying new physics [4,5]. This raises the questions: which black hole properties are robust, which change beyond GR, and which can be probed observationally?

The aim of this internship is to explore black hole solutions and their QNMs, within GR and its extensions, focusing on the fundamental properties revealed by their perturbation spectra. Within GR, QNMs can probe questions on black hole structure and causality [6]. Beyond GR, additional fields, modified gravitational interactions, or extra dimensions may alter black hole properties and perturbation spectra [7,8]. The project will investigate how such modifications affect black hole stability and dynamics, and whether they produce distinguishable signatures in gravitational-wave observations.

During the internship, the candidate will study black hole solutions, perturbation theory, and QNM computation. Possible directions include testing the robustness of GR properties, investigating black holes with additional fields and their stability, or exploring possible new families of modes.

Depending on the candidate's interests, the project may take a (semi)analytical or numerical approach, including QNM calculations, parameter-space scans, and comparisons of computational methods.

The internship may lead to a PhD project, subject to funding, on black hole perturbations, gravitational-wave signatures, and tests of fundamental physics through black hole spectroscopy.

References:

- [1] Astrophysical Black Holes: A Compact Pedagogical Review,
C. Bambi, *Annalen Phys.* 530, 1700430 (2018),
e-Print: 1711.10256 [gr-qc].
- [2] Quasinormal modes of black holes and black branes,
E. Berti, V. Cardoso, and A. O. Starinets, *Class. Quant. Grav.* 26, 163001 (2009),
arXiv:0905.2975 [gr-qc]
- [3] Black holes, gravitational waves and fundamental physics: a roadmap.
L. Barack, V. Cardoso, S. Nissanke, T. P. Sotiriou et al., *Class. Quantum Grav.* 36, 143001 (2019).
arXiv:1806.05195 [gr-qc]
- [4] GWTC-5.0: Tests of General Relativity,
LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, and KAGRA Collaboration (2026),
arXiv:2607.19293 [gr-qc]
- [5] Black hole spectroscopy: from theory to experiment.
E. Berti, V. Cardoso, G. Carullo, J. Abedi et al., *Class. Quantum Grav.* 43, 123001 (2026).
arXiv:2505.23895 [gr-qc]
- [6] A note on strong cosmic censorship and its violation in Reissner–Nordström de Sitter black hole space-times,
A. Chrysostomou, A. S. Cornell, A. Deandrea, and S. C. Park, *Class. Quant. Grav.* 42, 107001 (2025),
arXiv:2501.12968 [gr-qc]
- [7] Black holes and nilmanifolds: quasinormal modes as the fingerprints of extra dimensions?,
A. Chrysostomou, A. Cornell, A. Deandrea, É. Ligout, and D. Tsimpis, *Eur. Phys. J. C* 83, 325 (2023),
arXiv:2211.08489 [gr-qc]
- [8] New model of spontaneous scalarization of black holes induced by curvature and matter
Z. Belkhadria, S. Mignemi, *Phys.Rev.D* 112 (2025) 4, 044015
arXiv:2506.12137 [gr-qc]