

--> Titre :

"Search for axion-like particles decaying into collimated photon pairs using machine learning with the ATLAS detector at the LHC"

--> Groupe :

ATLAS – LPNHE

--> Nom et coordonnées du directeur de thèse :

José OCARIZ

Adresse électronique : ocariz@in2p3.fr

--> Liens web :

<https://atlas.cern/>

<http://lpnhe.in2p3.fr/spip.php?article83>

--> Lieu de travail :

LPNHE, 4 place Jussieu 75252 Paris cedex 05

--> Déplacements éventuels :

Missions régulières au CERN, Genève

Un séjour de courte/moyenne durée au Brésil peut être envisagé

Un séjour de courte/moyenne durée au CERN peut être envisagé

--> Nom de la collaboration :

ATLAS

--> Thème de recherche :

Physique au-delà du Modèle Standard

--> Proposerez-vous un stage avant la thèse?

Oui

--> Description du sujet et de la nature du travail propose en quelques lignes :

(Voir pages suivantes)

Light and weakly-interacting particles are predicted by a wide range of theoretical models and are of particular interest as potential dark matter (DM) mediators. Among these, **axion-like particles (ALPs)** would couple predominantly to gluons and photons. As a result, they could be produced abundantly in proton-proton collisions, yielding a distinctive experimental signature: narrow resonances decaying into photon pairs. This final state benefits from the outstanding performance of the **ATLAS liquid-argon (LAr) electromagnetic calorimeter**.

The **ATLAS and CMS experiments** have conducted searches for new diphoton resonances across a broad mass range, both above and below the Higgs boson mass. In 2023, an **ATLAS publication led by the LPNHE team** extended the diphoton mass search down to **10 GeV** for the first time, using **138 fb⁻¹ of Run-2 proton-proton collision data at 13 TeV** and focusing on boosted diphoton pairs. In early 2025, **CMS presented a preliminary result** based on a similar search using **58 fb⁻¹ of 2018 data**. More recently, **LHCb submitted for publication** the results of a search for diphoton resonances in the forward pseudorapidity range, probing masses as low as **4.9 GeV**. In all three cases, no evidence of new physics was observed. For ATLAS, the primary limitations arose from **energy thresholds in the online diphoton trigger chains** used during Run-2 and from **reduced selection efficiency for low-energy photons**.

This PhD proposal aims to significantly enhance the search potential for ALPs in the diphoton channel during **Run-3** by addressing these two limitations. It will leverage the exceptional data-taking conditions of **LHC Phase-I**, which is expected to conclude in 2026 with an ATLAS dataset exceeding **500 fb⁻¹**. The proposal builds on **innovative machine learning (ML) techniques** to redesign the offline ATLAS diphoton reconstruction and selection criteria, specifically optimized for **closely collimated diphotons**.

Currently, photons in ATLAS are identified using information from the calorimetric and tracking systems, with criteria trained on **single, isolated photon candidates**. These criteria are **not optimized for collimated photon pairs**, where signatures overlap. However, a **2025 PhD thesis** from the LPNHE team demonstrated that a **ML-based approach**, integrating multivariate information, can substantially improve photon and diphoton identification at multiple stages of the ATLAS reconstruction chain. This translates into a **major sensitivity boost** for searches targeting narrow diphoton resonances, reaching previously unexplored, very low-mass ranges.

The **ATLAS LPNHE team** has long-standing expertise in electromagnetic calorimetry, dating back to the R&D and construction of the ATLAS LAr calorimeter. Since the LHC startup, the team has contributed to nearly all aspects of electron and photon triggering, reconstruction, and identification. Team members played a key role in the **2012 Higgs boson discovery in the diphoton channel** and have led several ATLAS physics analyses involving photons and diphotons, including searches for dark matter produced in association with a Higgs boson decaying to photons, as well as searches for new diphoton resonances across a wide mass range. The team is also an active participant in **DMwithLLPatLHC**, an ANR-funded project involving three French laboratories focused on exploring dark matter signatures at the LHC.

Currently, the LPNHE ATLAS team is heavily involved in two major upgrade projects for the **High-Luminosity LHC (HL-LHC or Phase-II)**: the development of a **new silicon pixel tracker (ITk)** with extended acceptance and a **high-granularity timing detector (HGTD)** for tracks at large pseudorapidities. The group also maintains a productive collaboration with the **Brazilian ATLAS cluster**, focusing on improving electron/photon triggers using ML techniques. This includes the design of **new trigger chains based on neural networks**, intended for implementation in the Phase-II ATLAS trigger system.

This PhD proposal includes contributing to the LPNHE upgrade activities and the development of a **new trigger chain** dedicated to strongly collimated, low-mass diphotons. The chain will fully exploit **ML algorithms optimized for HL-LHC detector conditions**, ensuring maximal sensitivity to potential ALP signals.

Déterminer la nature de la Matière Noire (MN) est un des défis les plus importants en physique contemporaine. Des nouvelles particules légères et faiblement interagissantes sont prédites par une grande variété de modèles théoriques en tant que médiateurs potentiels entre le Modèle Standard et la matière noire. Parmi celles-ci se trouvent les **particules de type axion (ALP)** qui peuvent se coupler aux gluons et aux photons. Elles pourraient ainsi être produites abondamment dans les collisions proton-proton, donnant lieu à une signature expérimentale distinctive : des résonances étroites se désintégrant en paires de photons. Cet état final bénéficie des **performances exceptionnelles du calorimètre électromagnétique à argon liquide (LAr) d'ATLAS**.

ATLAS et CMS ont mené des recherches sur de nouvelles résonances en diphoton dans une large gamme de masses, aussi bien au-dessus qu'en dessous de celle du boson de Higgs. En 2023, une **publication d'ATLAS dirigée par l'équipe du LPNHE** a étendu pour la première fois la recherche de résonances en diphoton jusqu'à **10 GeV**, en exploitant **138 fb⁻¹ de données proton-proton du Run-2 à 13 TeV** et en se concentrant sur les paires de photons boostées. Début 2025, **CMS a présenté un résultat préliminaire** utilisant **58 fb⁻¹ de données de 2018**. Plus récemment, **LHCb a soumis pour publication** les résultats d'une recherche de résonances en diphoton dans la région de pseudorapidité vers l'avant, explorant des masses descendant jusqu'à **4,9 GeV**. Dans les trois cas, aucune preuve de nouvelle physique n'a été observée. Pour ATLAS, les principales limitations provenaient des **seuils d'énergie des chaînes de déclenchement en ligne** utilisées pendant le Run-2, ainsi que d'une **efficacité réduite pour l'identification des photons de basse énergie**.

Cette proposition de thèse vise à améliorer significativement le potentiel de recherche des ALP dans le canal en diphoton lors du **Run-3**, en surmontant ces deux limitations. Elle tirera parti des **conditions exceptionnelles de prise de données de la Phase-I du LHC**, qui devrait s'achever en 2026 avec un lot de données ATLAS dépassant les **500 fb⁻¹**. La proposition s'appuie sur des **techniques innovantes d'apprentissage automatique (ML)** pour redéfinir les critères de reconstruction et de sélection des diphotons, spécifiquement optimisés pour les **paires de photons fortement collimatées**.

Actuellement, l'identification des photons dans ATLAS repose sur des critères entraînés sur des **candidats photons uniques et isolés**. Ces critères ne sont **pas optimisés pour les paires de photons fortement collimatées**, pour lesquelles les signatures se chevauchent. Cependant, une **thèse de doctorat soutenue en 2025 au LPNHE** a démontré qu'une **approche basée sur le ML** permet d'améliorer substantiellement les performances d'identification des diphotons. Cela se traduit par une **amélioration majeure de la sensibilité** pour les recherches ciblant des résonances étroites, notamment dans le domaine des très basses masses.

L'équipe **ATLAS du LPNHE** possède une expertise de longue date en calorimétrie électromagnétique, remontant aux phases de R&D et de construction du calorimètre LAr d'ATLAS. Les membres du LPNHE ont joué un rôle clé dans la **découverte du boson de Higgs en 2012 dans le canal en diphoton**, et ont piloté plusieurs analyses physiques d'ATLAS impliquant des photons, notamment des recherches de matière noire produite en association avec un boson de Higgs se désintégrant en photons, ainsi que des recherches de nouvelles résonances en diphoton sur une large gamme de masses. L'équipe participe également activement au projet **DMwithLLPatLHC**, financé par l'ANR et regroupant trois laboratoires français, dédié à l'étude de signatures de matière noire au LHC.

Actuellement, l'équipe ATLAS du LPNHE est fortement impliquée dans deux projets majeurs de jouvence pour le **LHC à haute luminosité (HL-LHC ou Phase-II)** : le développement d'un **nouveau trajectographe à pixels de silicium (ITk)** à acceptance étendue et d'un **détecteur de temps à haute granularité (HGTD)** pour les traces dans la région à grande pseudorapidité. Le groupe entretient également une **collaboration fructueuse avec le cluster brésilien d'ATLAS**, axée sur l'amélioration des déclenchements électron/photon à l'aide de techniques de ML. Cela inclut la conception de **nouvelles chaînes de déclenchement basées sur des réseaux de neurones**, destinées à être intégrées dans le système de déclenchement d'ATLAS pour la Phase-II.

Cette proposition de thèse inclut également des contributions aux activités de jouvence de ATLAS en cours au LPNHE et au développement d'une **nouvelle chaîne de déclenchement** dédiée aux diphotons de basse masse et fortement collimatés. Cette chaîne exploitera des **algorithmes de ML optimisés pour les conditions du détecteur HL-LHC**, garantissant une sensibilité maximale aux signaux potentiels des ALP.