

Stratégie Recherche

Graduate School de Physique
Janvier 2022

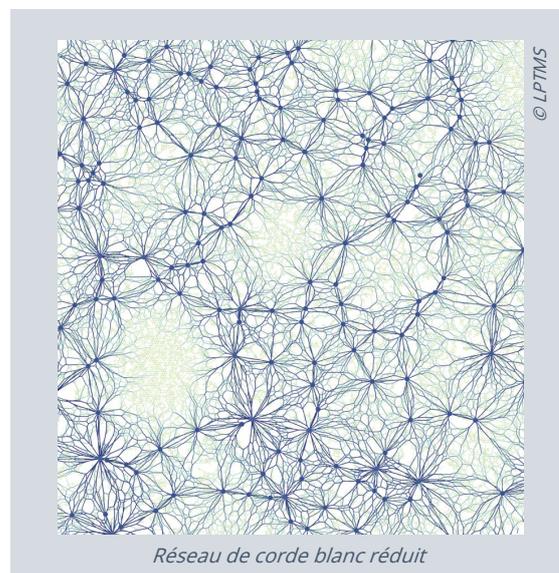
université
PARIS-SACLAY

GRADUATE SCHOOL
Physique



Sommaire

1. Introduction	5
2. Axe PhOM	6
2.1 Introduction	6
2.2 Grandes questions et thématiques de recherche	6
2.3 Environnement local	10
3. Axe P2I	11
3.1 Introduction	11
3.2 Grandes questions et thématiques de recherche	12
3.3 Environnement local	16
4. Axe Astrophysique	17
4.1 Introduction	17
4.2 Grandes questions et thématiques de recherche	17
4.3 Environnement local	19
5. Aspects transverses	19
5.1 Thématiques Inter axes	19
5.2 Thématiques Inter Graduate Schools	21
5.3 Plateformes	22
6. Lien avec les autres domaines d'action de la GSP	22
6.1 Formation	22
6.2 International	23
6.3 Monde industriel	23



1. Introduction

La Graduate School de Physique (GSP) rassemble à l'Université Paris-Saclay toute la recherche en physique, ainsi que la formation en physique du Master au Doctorat. Elle couvre l'ensemble des domaines de la physique, du fondamental à l'appliqué, de la théorie, la modélisation et la simulation à l'instrumentation, des expériences en laboratoire aux grands instruments placés sur des grandes infrastructures de recherche ou dans l'espace, du cœur disciplinaire aux interfaces. Elle touche aussi aux enjeux socio-économiques à l'interface avec la physique (énergie, santé, environnement, etc.).

Forte d'une communauté de plus de 3400 doctorants, enseignants-chercheurs, chercheurs, ingénieurs, techniciens, personnels dans les laboratoires et les services d'enseignement, la Graduate School de Physique de l'Université Paris-Saclay fédère pour la recherche et la formation des ensembles de compétences, de moyens et d'installations expérimentales de haut niveau, uniques en France et largement reconnus à l'international. Les activités de ses 40 laboratoires, impliquant 5800 personnes et 11 composantes / établissements composantes / organismes de recherche, sont structurées en 3 axes :

- Les équipes de **l'axe PhOM (Physique Ondes et Matière)** cherchent à comprendre et décrire les phénomènes physiques émergeant des interactions de nature multiple entre de très grands nombres de constituants de la matière, sur des objets dont les dimensions, les énergies et les temps de réactions permettent une expérimentation directe.
- Souvent membres de très grandes infrastructures de recherche, reconnues sur le plan international, les équipes de **l'axe P2I (Physique des 2 Infinis)** s'attachent à répondre aux questions concernant les constituants élémentaires de la matière (infiniment petits) et les lois fondamentales qui gouvernent leurs interactions ainsi qu'aux questions sur l'origine et l'évolution des composantes de l'Univers (infiniment grand).
- Les recherches menées au sein de **l'Axe Astro (Astrophysique)** couvrent un large domaine, des sciences planétaires à l'Univers primordial, selon 4 grandes questions : comment le système solaire fonctionne-t-il ? quelle est l'origine des étoiles et des planètes et comment évoluent-elles ? comment les galaxies se forment-elles et comment l'Univers évolue-t-il ? comprenons-nous les conditions extrêmes dans l'Univers ?

Chiffres clés

40 laboratoires

3400 chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs et techniciens

500 doctorants

650 étudiants en master

115 plateformes scientifiques et techniques

4 écoles doctorales



Bâtiment d'enseignement de la Physique h. 625 et étudiants

© Université Paris-Saclay

Les équipes de recherche, constituées d'expérimentateurs, de théoriciens, d'ingénieurs et de techniciens ont des **expertises scientifique et technique remarquables, certaines uniques au niveau national**. Leurs recherches bénéficient d'une forte interaction entre les nombreux expérimentateurs et théoriciens locaux, du développement continu d'installations de premier plan, en laboratoire comme sur grands instruments, de l'incorporation de méthodes et protocoles innovants (conception amont, modélisation, calcul HPC, IA...). Les équipes de la GSP sont également attentives à l'exploitation de ces recherches fondamentales pour des **problématiques industrielles et des enjeux sociétaux**.

Ce capital scientifique et technique, construit au fil des années, représente **15% du potentiel de recherche française en physique**. Il aboutit au classement 2022 de l'Université Paris-Saclay au 9^{ème} rang en physique (1^{ère} en Europe) selon l'Academic Ranking of World Universities (2020, 2021, 2022). Il constitue un **facteur essentiel d'attractivité et renommée internationale de l'Université**, à la fois pour la recherche, mais aussi pour la

formation à tous les niveaux (via la formation que ce soit sur des installations expérimentales ou par l'appropriation de concepts et d'outils théoriques, les stages de Master et d'Écoles d'ingénieur, le doctorat, les séjours postdoctoraux).

Le cadre de l'Université Paris-Saclay, avec la **création d'une Graduate School embrassant l'ensemble de la physique**, permet d'accroître ce potentiel scientifique et technique, ses avancées et ses retombées. La GSP vise en particulier à renforcer et multiplier les liens existant au sein des axes et de la GSP, mais aussi à créer de nouveaux liens interdisciplinaires avec d'autres domaines de recherche de l'Université.

2. Axe PhOM

2.1 Introduction

La physique des ondes et de la matière cherche à comprendre et décrire les phénomènes physiques émergeant des interactions de nature multiple entre de très grands nombres de constituants de la matière. Elle étudie les répercussions des lois fondamentales, des symétries, de la topologie, et des perturbations diverses sur la structuration, les propriétés, et la dynamique de la matière, de l'atome jusqu'à l'échelle de la planète et du système solaire. Elle se distingue par la faculté d'expérimentation, c'est-à-dire par la capacité à agir directement sur l'objet de ses études. L'axe PhOM rayonne grâce à la forte interaction entre les nombreux expérimentateurs et théoriciens locaux, au développement continu d'installations de premier plan, en laboratoire comme sur grand instrument (SOLEIL, neutronique et source de neutrons, microscopies, lasers...), à la conception amont, la modélisation, le calcul (HPC), et à l'incorporation de méthodes et protocoles innovants (IA...).

Axe PhOM

30 laboratoires

1500 chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs et techniciens

65 plateformes scientifiques et techniques

6 grands instruments

3 domaines thématiques

- Matière et systèmes quantiques
- Systèmes et matière complexes
- Matière hors équilibre et dynamique ultra-rapide

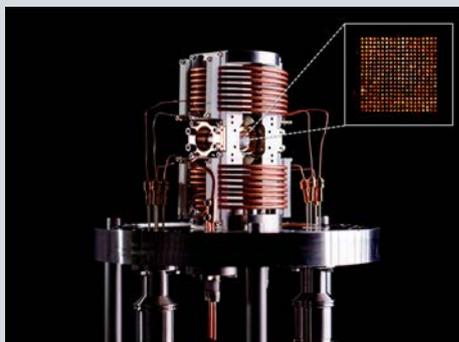
2.2 Grandes questions et thématiques de recherche

2.2.a. Matière et Systèmes Quantiques

Un défi majeur de l'axe PhOM est l'exploration de la nature quantique de la matière et de la lumière, indispensable pour aborder les phénomènes depuis l'échelle subatomique jusqu'au nanomètre. Or, quels que soient la taille et le nombre de constituants, la nature quantique d'un système est exploitable dès que celui-ci est suffisamment isolé pour que les effets de la décohérence, dus au couplage à l'environnement, soient bien maîtrisés voire négligeables.

Comprendre l'origine et la nature des **états cohérents de la matière**, des **corrélations quantiques** entre leurs constituants et de leur **dynamique quantique** spécifique, que ce soit en milieu dilué ou dans la matière

condensée, est fondamental. De nombreux systèmes autorisent des états quantiques collectifs de nature diverse, produits par des interactions fortes entre de très nombreuses particules et leurs couplages. Il s'agit de comprendre quels ingrédients produisent quels états, les transitions de phases entre états, les conditions sous lesquelles des états quantiques peuvent coexister ou entrer en compétition, la dynamique quantique émergente. On peut citer l'émergence d'états quantiques inattendus dans les matériaux bidimensionnels (2D), les oxydes ou les semi-métaux, la supraconductivité exotique, les effets de la topologie électronique, de la haute pression, ou encore de la frustration géométrique ou magnétique. Cette activité bénéficie de la capacité locale de synthétiser des « matériaux quantiques » (*quantum materials*) de haute qualité, la présence de

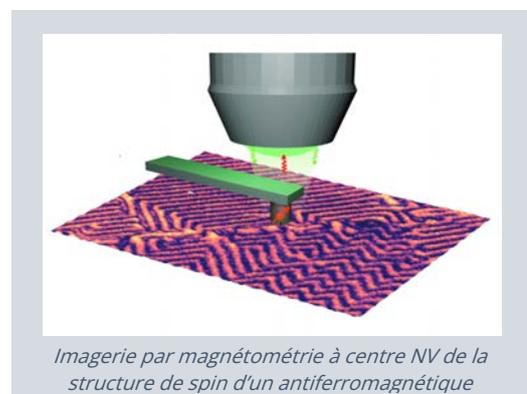


Dispositif de piégeage d'atomes fournissant un réseau pour effectuer des manipulations quantiques

microscopies locales ou globales, des faisceaux X, d'électrons ou de neutrons pour la diffraction, des nombreux types de spectroscopies, et l'utilisation de grands instruments locaux, nationaux, et Européens.

Le **pilotage précis d'états quantiques** par la variation d'un paramètre comme la contrainte ou l'application d'un champ électrique, par l'assemblage d'hétérostructures, ou par l'imposition d'architectures ou de topologies spécifiques constitue un terrain de jeu presque illimité, avec de très nombreuses ruptures paradigmatiques en perspective. Les travaux de l'axe PhOM s'appuient en partie sur le développement d'outils sophistiqués permettant la **manipulation directe** d'objets élémentaires d'un système quantique. Tel est le cas de l'assemblage d'atomes ou de molécules qui peuvent émuler pas à pas la matière condensée, mais aussi l'interférométrie atomique ou électronique qui réalisent des topologies et des puits quantiques de l'état solide. Ces réalisations ouvrent la voie vers des nouvelles plates-formes pour l'élucidation des lois physiques fondamentales (par exemple, la découverte récente d'anyons en milieu solide). Au-delà, elles permettent l'ingénierie d'architectures et de dispositifs mettant à profit propriétés et fonctionnalités nouvelles. Dans les toutes prochaines années, les équipes PhOM seront à même de manipuler des états quantiques impliquant de nombreux atomes, pour aller vers le calcul et la communication quantiques.

Les **nanotechnologies** permettent de structurer et manipuler la matière condensée aux échelles spatiales pertinentes. Cruciales pour comprendre la physique et la physico-chimie fondamentale des briques élémentaires de la matière, de leurs interactions en milieu dense et de **l'interaction lumière-matière**, leur essor local est spectaculaire grâce aux centrales technologiques RENATECH (C2N), RENATECH+ (LPS, SPEC), des autres laboratoires et des entreprises (Thales-TRT). Ainsi, les équipes de l'axe PhOM ont développé des sources compactes et puissantes de photons pour la communication quantique, des dispositifs employant le défaut azote-lacune du diamant, des bits quantiques supraconducteurs et hybrides, la manipulation de photons et de porteurs de charge uniques... La primauté en recherche fondamentale et la découverte continue de nouveaux concepts en **nanophotonique**, en **opto-électronique**, et en **spintronique** (électronique de spin) permettent à l'axe PhOM de répondre aux défis stratégiques de **l'électronique** : intégration à l'échelle (sub-)nanométrique, commutation ultra-rapide, gestion de la chaleur. Les équipes de l'axe PhOM se distinguent par le développement de stratégies totalement nouvelles : spintronique antiferromagnétique, contrôle de structures magnétiques topologiquement protégées, exploitation de matériaux 2D pour des transistors ultracompacts, architectures pour le calcul neuromorphique. Elles sont complétées par des composants électroniques à basse consommation exploitant les principes de la nanothermique et des nanodispositifs pour la **production et la récupération d'énergie** (piézo-électrique, photovoltaïque...) ou de la thermoélectricité. Enfin, les nanotechnologies de l'axe PhOM mettent à l'œuvre les modes collectifs (électroniques, plasmoniques, ou magnoniques...) des nanoparticules et des propriétés physiques, optiques, et magnétiques uniques des (nano-)matériaux (2D et autres) dans des nouveaux **capteurs** indispensables pour la recherche et les applications en biologie, en médecine/biomédical, pour l'environnement, les transports, et dans les dispositifs pour l'émission de lumière (imagerie à super-résolution, (O)LEDs, nanolasers, centres NV dans le diamant).



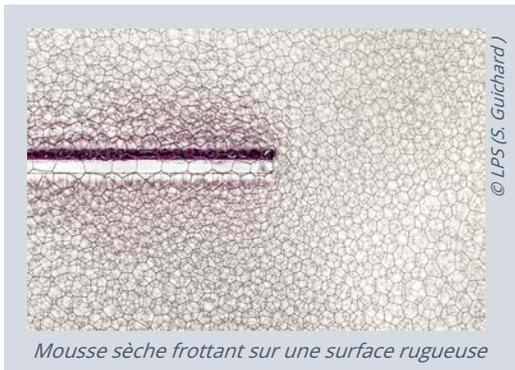
Imagerie par magnétométrie à centre NV de la structure de spin d'un antiferromagnétique

Les dispositifs saclaysiens et les paradigmes théoriques développés en science ultrarapide sont indispensables pour manipuler la matière condensée sur des échelles de temps quantiques. Au-delà d'axes établis comme le contrôle des phénomènes quantiques par des impulsions lumineuses ou électriques, on se dirige vers le **contrôle de la matière quantique avec la lumière quantique** (lumière cohérente, photons individuels). La recherche sur les états quantiques stationnaires hors équilibre dans des systèmes ouverts, fermés, ou entraînés, sur des phases non-thermiques de la matière (*i.e.* non existant à l'équilibre), et les transitions de phase photo-induites bousculera les paradigmes et stimulera le développement de nouveaux concepts pour l'information quantique. Les matériaux 2D et autres matériaux topologiques et les états électroniques exotiques qu'ils abritent sont d'intérêt particulier. Leur excitation cohérente permet la création d'états de Floquet-Bloch (ou « cristaux temporels ») inédits ou la localisation dans les systèmes fortement désordonnés, qui sont eux aussi candidats pour le **stockage d'information quantique**.

2.2.b. Systèmes et matière complexes

Le comportement collectif d'un grand nombre d'entités individuelles interagissant sur plusieurs décades d'échelles spatiales, temporelles ou énergétiques constitue un défi scientifique considérable pour la compréhension de **l'organisation et de la dynamique de systèmes complexes** divers : **matière molle, matière granulaire ou vitreuse**, phénomènes de **croissance, d'agrégation, d'auto-organisation**, et de **contagion** (prédominants dans la **physique du vivant**), réseaux d'énergie, **systèmes socio-économiques**, ou encore **fluides et turbulence, climat** et **activité sismique** de notre planète. Cette compréhension, issue de l'expérience et unifiée par le langage commun de la **physique statistique**, permet de développer des stratégies élégantes et efficaces d'atténuation des risques. La recherche dans ces domaines est portée par une importante communauté PhOM. Elle poursuit une longue tradition locale allant de l'étude des cristaux liquides et polymères par P.G. de Gennes aux milieux désordonnés comme les verres décrits par les méthodes pionnières de G. Parisi inspirant les approches actuelles en **intelligence artificielle (IA)**. Les enjeux actuels consistent à édifier des expériences et des théories couplées décrivant les états loin de l'équilibre, leur dynamique, lors d'interactions avec l'environnement par des échanges de matière, d'énergie ou d'information.

Les défis présentés par la **matière molle** concernent l'élucidation du lien entre structure et propriétés, entravée par le désordre, la frustration, la nature non-locale des interactions, et du lien entre structure et dynamique. La compréhension de l'interaction entre éléments individuels sur des échelles multiples de tailles, permet la conception de nouveaux matériaux et **méta-matériaux** aux propriétés et fonctions nouvelles ou exacerbées, absentes dans la matière homogène.



Le comportement dynamique de **systèmes non-cristallins ou hétérogènes** nous confronte à des phénomènes comme l'écoulement de matériaux **granulaires**, les avalanches, la plasticité, la fracture des verres, la friction ou l'adhésion de polymères, les interactions aux surfaces et aux interfaces dans les mousses et émulsions. La dynamique vitreuse de certains de ces systèmes est sujette au vieillissement, à l'effet du confinement ou de conditions extrêmes comme l'exposition au rayonnement. Ces phénomènes, dus à l'impossibilité d'atteindre l'équilibre thermodynamique, sont intrinsèquement non-linéaires et leur comportement est bien plus riche que celui des matériaux simples.

L'expérimentation dans le domaine, jusque-là effectuée « sur paillasse », évolue de plus en plus vers le suivi de traceurs en temps réel, ce qui permet une cartographie grâce à des techniques d'imagerie rapide de plus en plus sophistiquées et une puissance de calcul de plus en plus poussée.

La matière complexe rejoint la matière quantique pour l'étude de nouvelles **transitions de phase** (notamment structurelles) avec des nouvelles propriétés critiques. La **non-linéarité** intrinsèque des interactions donne lieu, en mécanique des fluides, à de motifs de séparation de phase, avec des phases dissymétriques et un couplage non trivial à la viscoélasticité, avec des enjeux fondamentaux et appliqués. La **matière vivante**, composée d'entités autopropulsées intrinsèquement hors équilibre et consommant de l'énergie, est quant à elle « active » car elle modifie son propre environnement et ses propres conditions d'évolution. Siège d'évènements rares et de dynamique irréversible, fondamentalement hors équilibre, le vivant présente de nombreux défis majeurs : interactions multi-corps, comportements actifs et non-linéaires, interactions collectives, émergence. Un défi actuel est la mise en évidence de structures de séparations de phases à différentes échelles des cellules vivantes, structures dont l'origine est encore inconnue.

Cette problématique est reliée aux mécanismes de **croissance, d'auto-assemblage**, et **d'auto-organisation** à toutes les échelles temporelles et spatiales. Comme les propriétés physiques et chimiques dépendent de la taille des édifices moléculaires ou nanométriques, l'approche résolument multi-échelle de l'axe PhOM vise à suivre leur évolution lors du processus d'agrégation, avec la formation de systèmes faiblement liés par l'interaction de van der Waals ou par liaison hydrogène (agrégats et complexes, notamment avec l'eau, une nano-solvatation simulant le « *in vivo* », ou agrégats biologiques simulant l'interaction entre une molécule active et sa cible). Les outils de spectroscopie (laser, synchrotron, techniques ultrarapides) sont cruciaux pour les défis de la santé (relation structure-fonction moléculaire, des briques élémentaires aux biopolymères, reconnaissance chirale), de l'environnement (formation d'aérosols...) et du climat. Les **nanotechnologies** couplent cette compréhension des mécanismes à l'assemblage contrôlé de nanoparticules ou de structures hybrides associant des molécules

organiques avec des métaux et des matériaux 2D, avec des retombées telles que des particules à fonctionnalités spécifiques et la fabrication des métamatériaux.

Les préoccupations liées au changement climatique et aux événements atmosphériques et océaniques extrêmes rendent primordiale l'étude de la **dynamique des fluides** géo- et astrophysiques. Les équipes de l'axe PhOM s'attaquent aux principaux défis du domaine : convection thermique, turbulence dans les fluides en rotation et stratifiés en densité, couplage océan-atmosphère à travers la génération de vagues. Parmi les enjeux, on trouve la paramétrisation du transport turbulent dans les modèles climatiques, la prédiction de tsunamis, l'interaction entre la dynamique interne des planètes, celle de leur surface et de leur atmosphère. Un autre défi majeur traité à Paris-Saclay concerne les propriétés mathématiques de l'équation de Navier-Stokes en régime turbulent (singularités conduisant à une dissipation anormale de l'énergie, régimes de turbulence d'ondes).

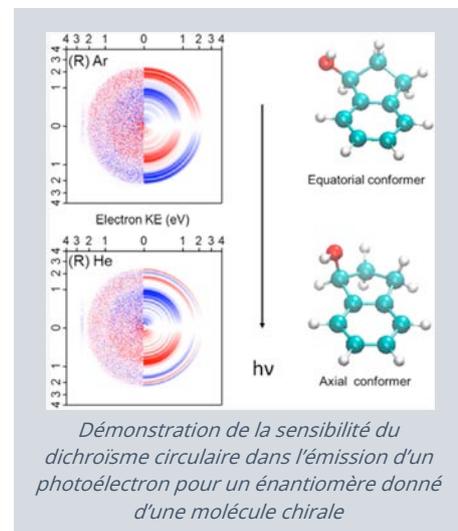
Les équipes de **physique théorique** de l'axe PhOM sont leaders dans le développement d'outils innovants en physique statistique et mathématique pour la description de l'évolution des systèmes complexes : étude de systèmes désordonnés, organisation de la matière vivante et apparition de motifs, écoulement intermittent, événement extrêmes (climatiques, par ex). Des progrès importants en théorie d'optimisation, en science des données, en **apprentissage machine**, et plus largement dans le domaine de **l'IA** proviennent de l'application de la physique statistique (en particulier verres de spin). L'application d'outils cinétiques et des théories des grands écarts permet de caractériser la statistique des événements fluctuations rares, mais cruciaux. Un grand enjeu futur est le déploiement de l'IA dans la communauté en contrôlant et comprenant le degré de précision de ses résultats.

2.2.c. Matière hors équilibre et dynamique ultra-rapide

Là où la matière et les systèmes complexes décrits ci-dessus s'intéressent aux phénomènes hors équilibre aux temps relativement longs, l'essor d'outils optiques et spectroscopiques de plus en plus rapides ouvre la possibilité jusque-là inédite d'appréhender les phénomènes physiques, physico-chimiques, biophysiques, biochimiques aux **temps ultra-brefs**, c'est-à-dire, ceux des réactions chimiques ou des excitations électroniques, pendant lesquels la matière se trouve fortement hors équilibre. Les chercheurs du domaine « ultra-rapide » sont organisés depuis bientôt deux décennies dans le contexte du plateau de Saclay, et, notamment, sous le thème PALM du même nom.

Le comportement de la matière sujette à des champs variant très rapidement dans le temps pose des défis majeurs, à la frontière de notre connaissance, qui vont de l'étude et du contrôle des mouvements électroniques à leur échelles intrinsèques de temps (attoseconde, $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) et d'espace (10^{-10} m), à la création de nouvelles phases de la matière n'existant *pas* à l'équilibre. La possibilité de comprendre et donc de prévoir et contrôler le déroulement des processus élémentaires dans des systèmes très divers (cellules photovoltaïques, l'atmosphère, la biosphère...) permettra de nombreuses ruptures scientifiques et technologiques (par ex, dispositifs aux temps de commutation en deçà de la femtoseconde, $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$). Le développement pionnier de sources de lumière extrême fournissant les champs en question et la maîtrise de leurs propriétés fait de Paris-Saclay un **centre mondial de référence sur cette thématique, en forte intrication avec le monde industriel**.

Le **développement de sources laser innovantes** est indispensable pour couvrir de larges plages de fréquence - allant du THz à l'X-UV, et pour produire les impulsions ultra-brèves de très haute intensité et de profil donné, exploitées pour les techniques d'imagerie du futur, jusqu'à l'échelle du nm et de l'as. La communauté des physiciens a su continuellement développer des concepts originaux, tels que la combinaison cohérente, le pompage par LED, ou la post-compression, et les associer à de nouveaux matériaux. Les voies de recherche les plus prometteuses comprennent les taux de répétition au-delà des 100 kHz, la génération et l'émission d'harmoniques d'ordre élevé dans le régime X-UV pour créer des impulsions utilisées dans les études d'**attophysique**, le développement de **lasers X** et l'utilisation de **lasers à électrons libres** (XFELs). Cette activité scientifique s'appuie notamment sur les plateformes laser locales de tout premier plan tels qu'AttoLab, LASERIX, UHI100 ou Apollon, qui doivent continuer à être accessibles à une large communauté d'utilisateurs, et



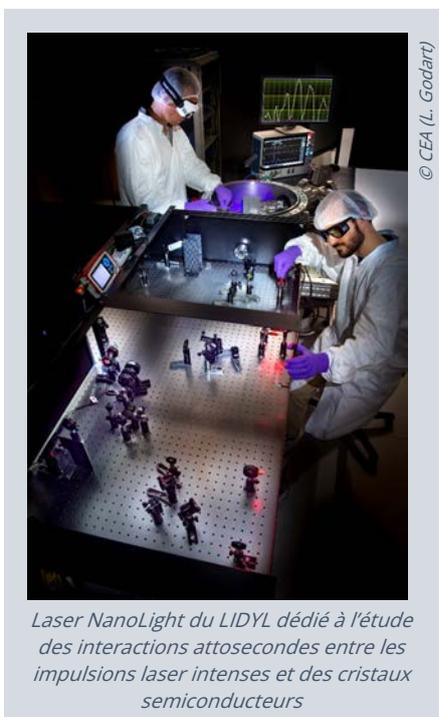
à jouer un rôle essentiel pour le développement de moyens de diagnostic. Leur succès confirme le bénéfice réciproque des collaborations entre les équipes de l'Université Paris Saclay et de l'IPP.

Le site de Paris-Saclay réunit une large communauté en chimie physique étudiant les processus réactifs élémentaires en phase gazeuse (incluant les plasmas) impliquant des transferts de charge et/ou d'énergie qui sous-tendent la dynamique réactionnelle uni- ou bimoléculaire d'espèces neutres, radicalaires ou ioniques. La caractérisation des intermédiaires et produits finaux (par moyens optiques ou spectrométrie de masse) permet de comprendre, et possiblement **contrôler l'issue de la réaction**. Les méthodes de détection avancées (imagerie, coïncidences) donnent accès à la dynamique de la matière diluée suite à une excitation IR-XUV, sur une large gamme temporelle allant de l'as aux temps longs. Souvent complétées par des mesures statiques à plus haute résolution spectrale (laser, synchrotron, etc.), ces études permettent de sonder directement, et à terme de **contrôler** les mouvements nucléaires et électroniques, ainsi que leur couplage à l'échelle de la fs/as. La **dynamique de relaxation** non-radiative (photo-dissociation/photo-isomérisation/photo-ionisation/séparation de charge) d'édifices moléculaires d'intérêt fondamental pour les processus *in vivo* (transport d'oxygène, photosynthèse), pour la biochimie/pharmacologie (espèces chirales), ou la génération d'énergie (photovoltaïque...) peut être élucidée de manière précise par différentes spectroscopies, notamment photo-électroniques, dont la communauté locale maîtrise un très large éventail.

La communauté des **ultra-hautes intensités** se concentre sur l'interaction laser-plasma, où des électrons sont conduits à des vitesses relativistes en quelques femtosecondes, entraînant le mouvement des ions. Ce domaine nouveau « d'optique relativiste » permet de créer des **faisceaux ultra-brefs d'électrons ou d'ions**, applicables,

par exemple, en **radiothérapie**. Son potentiel pour la physique des hautes énergies est l'objet du très large consortium Européen EUPRAXIA, comprenant les équipes de Paris-Saclay. L'obtention d'intensités laser toujours plus importantes, en réfléchissant le faisceau d'un miroir plasma relativiste oscillant à courbure optique, ouvre la perspective d'observer la **Dynamique Électronique Quantique (QED) relativiste en champ laser fort**; d'autres conditions conduisent à observer les propriétés inhabituelles et originales de la **matière dense et chaude**.

Dans ces conditions, les notions thermodynamiques habituelles de « température » ou d'« énergie » perdent leur sens au profit d'aspects dynamiques à considérer (interactions entre système et laser pour étudier l'évolution temporelle des systèmes pilotés par la lumière). Une activité locale intense en **physique théorique** aborde le développement de modèles incluant l'évolution spatiale et temporelle du champ externe, allant des impulsions électriques pour l'excitation de solides corrélés, à la lumière responsable de l'activation du transfert d'énergie et de charge dans les molécules ou dans des nano-objets, et à la description des corrélations électroniques et du couplage électron-noyau. Ces progrès sont soutenus par le développement de méthodes de codes numériques, essentiels aussi pour la description des plasmas et de l'interaction lumière-matière relativiste.



© CEA (L. Godart)

Laser NanoLight du LIDYL dédié à l'étude des interactions attosecondes entre les impulsions laser intenses et des cristaux semiconducteurs

2.3 Environnement local

L'axe PhOM de la GSP réunit presque 1400 ETP chercheurs (C), enseignant-chercheurs (EC), ITA, BIATSS, doctorants, et post-docs dans 30 laboratoires, et à peu près 1500 en comptant les personnels concernés du synchrotron SOLEIL. 25 % sont des femmes. Quelques 250 C/EC ont une activité de recherche principale en théorie, modélisation, ou dans la conception et le développement de méthodes numériques. 40% du personnel de l'axe PhOM est employé par le CNRS (correspondant à 25% de l'Institut de Physique), 30% par l'Université Paris-Saclay, et 25 % par le CEA. La forte synergie entre expérience et théorie, entre thématiques, entre compétences, entre différents établissements et organismes est une force de l'axe PhOM, avec environ 690 personnes émergeant à Matière et Systèmes Quantiques, 600 personnes à Systèmes et matière complexes et 200 personnes à Matière hors équilibre et dynamique ultra-rapide. Presque tous les laboratoires de l'axe PhOM

hébergent des EC/C d'au moins 2, voire des 3 thèmes, et d'au moins 2 établissements/organismes. Si le corps central des physiciens est visible, 10 unités accueillent physiciens et C/EC émargeant à la GS SIS, 3 unités physiciens et chimistes, et 1, physico-chimistes et scientifiques du patrimoine ; 3 laboratoires de Chimie accueillent de nombreux physiciens de l'axe PhOM. C'est un terreau fertile pour les activités interdisciplinaires, avec des travaux avec les sciences de la vie et la santé en forte croissance.



L'activité de recherche de l'axe PhOM s'appuie sur les nombreux **équipements de laboratoire** comme sur

des **plateformes communes** et les **grands et très grands instruments**. On nomme spécifiquement le Synchrotron SOLEIL, les installations laser Apollon, Attolab, UHI-100, LASERIX, et CLIO, les centrales techniques du réseau RENATECH et des laboratoires, les outils de microscopie électronique du plus haut niveau (CHROMATEM, NANOMAX, NANOTEM, MOSTRA), les outils d'irradiation, le réseau REFIMEVE (basé sur RENATER) pour la synchronisation de lasers et les mesures de précision. Les nombreux plateaux techniques, bâtis de croissance et dépôt de matériaux, de microscopie et de spectroscopies globales et locales, avec des capacités jusqu'aux très hautes résolutions temporelles, fréquentielles, et spatiales, d'imagerie, de magnétométrie, de cryogénie, ainsi que les outils de calcul/HPC, permettent une agilité et une réactivité sans égales – à condition que des solutions pérennes et soutenables soient élaborées pour garantir l'accès des équipes, intégrer les outils dans le périmètre global, et partager les frais d'opération, de maintenance, et de jouvence. On peut répondre au fort besoin de faisceaux de neutrons pour la recherche fondamentale et les applications industrielles par l'établissement d'une source compacte de neutrons basé sur accélérateur (CANS) sur le plateau de Saclay.

Les principales collaborations des équipes de l'axe PhOM sont avec l'IPP et les universités parisiennes, dont l'activité est fortement complémentaire à la recherche de Paris-Saclay. En Europe, elles concernent principalement l'Allemagne et l'Italie, et au-delà, le Canada (Sherbrooke), les États-Unis, la Russie, et la Chine (Hong Kong). Les équipes de l'axe PhOM sont très impliquées dans les projets européens pour la neutronique (ILL/Institut Laue-Langevin, Paul Scherrer Institut/PSI, et ESS / *European Spallation Source*), la lumière extrême (ESRF, Laser à Electrons Libres/*European XFEL, Extreme Light Infrastructure/ELI*, EuPRAXIA, consortium Laser Lab) et dans les réseaux européens (*Quantum Flagship, Graphene Flagship*).

3. Axe P2I

3.1 Introduction

L'axe P2I de la GSP mobilise plus de 1400 personnes autour des questions fondamentales de la physique des deux infinis et des thématiques interdisciplinaires (santé et énergie). Souvent membres de très grandes infrastructures de recherche, reconnues sur le plan international, les équipes s'attachent à répondre aux questions concernant les constituants élémentaires de la matière (infiniment petits) et les lois fondamentales qui gouvernent leurs interactions ainsi qu'aux questions sur l'origine et l'évolution des composantes de l'Univers (infiniment grand). Les équipes de recherche constituées d'expérimentateurs, de théoriciens, d'ingénieurs et de techniciens ont une expertise scientifique et technique remarquables, dont certaines unique au niveau national. Le cadre de l'Université Paris-Saclay permet d'accroître ce potentiel scientifique et technique, ses avancées et ses retombées en renforçant les liens existant au sein de la communauté P2I et en créant de nouveaux liens interdisciplinaires avec d'autres domaines de recherche.

Axe P2I

11 laboratoires

1400 chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs et techniciens

65 plateformes scientifiques et techniques

3 domaines fondamentaux

- Physique des astroparticules, astrophysique nucléaire et cosmologie
- Physique hadronique et nucléaire
- Physique des particules

2 domaines à impact sociétal

- Énergie nucléaire
- Santé

3 domaines technologiques

- Accélérateurs et aimants supraconducteurs
- Instrumentation et détecteurs
- Recherche et outils numériques

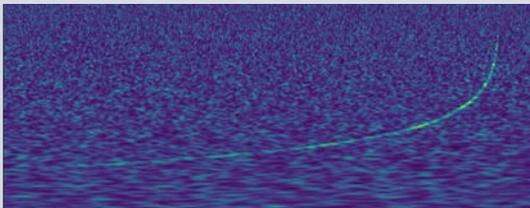
3.2 Grandes questions et thématiques de recherche

La recherche fondamentale sur les grandes questions des deux infinis regroupe principalement 3 domaines thématiques : (1) la physique des astroparticules, l'astrophysique nucléaire et la cosmologie, (2) la physique hadronique et nucléaire, (3) la physique des particules tant d'un point de vue expérimental que théorique, ainsi que l'instrumentation associée à ces recherches.

3.2.a. Astroparticules, astrophysique nucléaire et cosmologie

Les recherches de l'axe P2I dans cette thématique sont focalisées sur quelques sujets principaux : comprendre les phénomènes les plus violents de l'univers et la source des rayons cosmiques, l'origine et l'évolution de l'Univers, la nature de la matière et l'énergie noires et comprendre la nucléosynthèse.

Dans le domaine des **astroparticules**, le Cherenkov Telescope Array (CTA), observatoire pour les gammas de très haute énergie (au-delà de quelques dizaines de GeV), est un projet international phare ayant une place importante dans la stratégie française et européenne, dans lequel les équipes de P2I ont de grandes responsabilités. CTA permettra, entre autres, d'étudier les « accélérateurs cosmiques » (Noyaux Actifs de Galaxies, Supernovae) et de rechercher la matière noire par détection indirecte.



Visualisation du signal dans le plan temps-fréquence de l'onde gravitationnelle la plus emblématique (GW170817)

La **découverte des ondes gravitationnelles**, dans laquelle les équipes P2I ont joué un rôle important à travers le développement de l'interféromètre VIRGO, a été un événement majeur de ces dernières années. Il est maintenant essentiel de poursuivre cet effort en assurant la réussite d'Advanced VIRGO et de se lancer dans la prochaine génération d'instruments au sol avec le Einstein Telescope, approuvé en 2021 sur la feuille de route du European Strategy Forum on Research Infrastructures (aspects instrumentaux, exploitation scientifique des données, développements théoriques

de la physique des ondes gravitationnelles). En parallèle, l'axe P2I souhaite participer à la mise au point du projet spatial LISA à l'horizon 2037, visant la détection des ondes gravitationnelles à plus basses fréquences.

Transversalement à ces domaines, les études multi-longueurs d'ondes et multi-messagers sont en pleine expansion. En corrélant les observations multi-longueurs d'onde (divers domaines du spectre électromagnétique) et multimessagers (rayons cosmiques et neutrinos) ainsi que les ondes gravitationnelles, l'axe P2I est en mesure de mieux comprendre les sources et les phénomènes responsables de ces émissions. De nouveaux observatoires en construction commenceront à prendre des données dès 2022-23. En particulier, on peut mentionner le satellite franco-chinois SVOM (observations multi-longueurs d'onde) et le projet AugerPrime en Argentine (rayons cosmiques).

L'astronomie gamma dans la gamme d'énergie du MeV est également cruciale en **astrophysique** (nucléosynthèse, astronomie multi-messagers, rayons cosmiques) mais mal couverte par les missions internationales actuelles. Il existe plusieurs projets de missions spatiales telles que Enhanced ASTROGAM (e-ASTROGAM) pour effectuer les observations dans une gamme d'énergie complémentaire aux observations de CTA. L'astrophysique nucléaire profite des compétences de longue date en physique nucléaire des laboratoires de l'axe P2I. Une forte connexion avec l'axe Astrophysique permet aux équipes de pleinement mener ces recherches au sein de la GS Physique.

Les équipes expérimentales et théoriques de P2I travaillent aussi sur les grandes questions de la cosmologie, en particulier pour mieux comprendre les phénomènes liés à l'expansion de l'Univers (l'énergie noire, et l'inflation). L'axe P2I est impliqué dans l'observatoire Vera Rubin-Large Synoptic Survey Telescope (LSST) en construction au Chili pour obtenir des contraintes inédites sur des modèles cosmologiques pendant les dix prochaines années. L'implication des équipes dans eBOSS leur permet de jouer maintenant un rôle majeur dans le Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) prenant actuellement des données aux États-Unis. En parallèle, les équipes de l'axe P2I sont particulièrement actives dans les analyses du fond diffus cosmologique (Planck), et préparent les expériences du futur pour cartographier sa polarisation (Simons Observatory, CMB-S4 et LiteBIRD).

Concernant la recherche directe de la **matière noire**, EDELWEISS au laboratoire souterrain de Modane, continue à prendre des données et la phase suivante, le projet européen EURECA, est en préparation. L'expertise de plusieurs laboratoires de P2I dans le domaine des bolomètres, en collaboration avec les physiciens du solide au sein de l'Université Paris-Saclay, a permis aux laboratoires de P2I d'être en première ligne mondiale pour la recherche directe de matière noire.

Sur le plan théorique, la recherche en **cosmologie, astroparticules, et astrophysique nucléaire** concerne notamment les modèles d'inflation et de réchauffement, la baryogenèse et la leptogenèse, les fluctuations cosmologiques linéaires et non linéaires. Les recherches théoriques se portent également sur les modèles de matière noire et d'énergie noire, la relativité générale, les théories de gravité modifiée, les trous noirs et la modélisation des étoiles à neutrons. Les liens forts entre théoriciens et expérimentateurs sont ici un atout essentiel. Parallèlement, les équipes théoriques de P2I travaillent sur des questions plus fondamentales en gravitation et cosmologie (théorie quantique de la gravitation, théories de l'univers primordial).

3.2.b. Physique hadronique et physique nucléaire

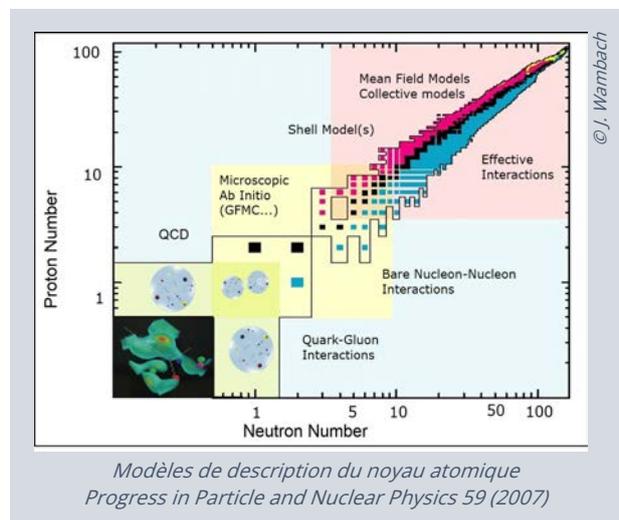
La physique hadronique et la physique nucléaire s'intéressent à la matière régie par l'interaction forte qui confine les quarks et gluons dans les protons et neutrons et qui lie ces derniers dans les noyaux atomiques. On distingue la physique nucléaire aux "grandes" distances (assemblage des protons et des neutrons dans les noyaux) et la physique hadronique correspondant au plus "petites" distances (structure en quarks et déconfinement).

En **physique hadronique**, la stratégie de recherche des équipes de l'axe P2I impliquées dans l'étude des collisions d'ions lourds ultra-relativistes pour la compréhension du plasma quark-gluon (QGP) s'appuie sur deux dispositifs expérimentaux fonctionnant auprès du Large Hadron Collider (LHC) : les expériences ALICE et LHCb. Dans ALICE, les équipes participent largement aux améliorations des performances (upgrades) du détecteur planifié pour les prises de données suivantes en 2022-30. Dans LHCb, les équipes se focalisent sur l'étude des collisions noyau-noyau et la production de la beauté et du charme dans les collisions proton-proton et proton-noyau. L'axe P2I possède un rôle majeur et initiateur dans ces deux expériences. Il constitue un creuset naturel pour mener les travaux théoriques de synthèse des résultats expérimentaux associés.

Pour la physique hadronique étudiant la structure des nucléons, les recherches futures de l'axe P2I s'appuient essentiellement sur Jefferson Lab aux USA et FAIR à GSI-Darmstadt en Allemagne. Les efforts se concentrent sur l'étude de la structure en quarks et en gluons du nucléon et l'étude de la matière hadronique à des températures modérées et de fortes densités baryoniques. Une grande partie de la communauté de physique hadronique de P2I souhaite se rassembler sur le futur collisionneur électron-ion (EIC) prévu à l'horizon 2030. L'axe P2I regroupe la quasi-totalité des forces françaises en physique expérimentale du nucléon et structure naturellement l'effort national sur EIC.

Dans le domaine du **noyau atomique**, les équipes de P2I portent leurs efforts en priorité sur les mesures des propriétés nucléaires dans des conditions extrêmes (température, isospin, moment angulaire) pour progresser vers une description microscopique et unifiée de la structure et des réactions nucléaires jusqu'aux limites de liaison du noyau. Les données expérimentales alimentent aussi les bases de données pour les applications en énergie nucléaire, santé, astrophysique nucléaire. Ces travaux requièrent une diversité de faisceaux d'ions (stables ou radioactifs) sur une large gamme d'énergie en utilisant des installations internationales complémentaires. La communauté s'implique fortement dans la mise en œuvre de nouvelles installations nationales, notamment SPIRAL2 au GANIL à Caen. Ces études nécessitent des détecteurs performants, souvent partagés par des collaborations internationales. On peut mentionner ici l'implication forte de l'axe P2I dans le détecteur AGATA pour la spectroscopie nucléaire, récemment devenu une infrastructure de recherche (IR).

Au sein de l'Université Paris-Saclay, ALTO est une plateforme expérimentale locale, avec un potentiel d'ouverture aux industriels et aux thématiques de l'énergie nucléaire, des matériaux sous irradiation, de la santé, mais aussi un instrument clé pour la physique nucléaire nationale en lien avec le GANIL. Le poids de l'Université Paris-Saclay sur ces sujets permettra de donner un nouvel élan au programme de physique à mener localement et au GANIL dans le futur.

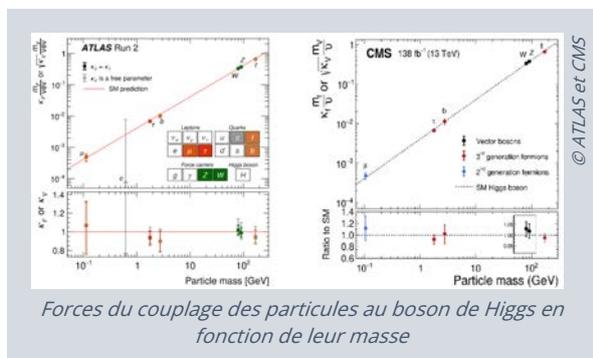


Dans le domaine théorique, le problème à N corps quantique que représente le noyau est abordé selon différentes approches (théorie des champs effective, méthodes "ab initio", fonctionnelles de densité, développements en réactions et dynamique nucléaires). Les équipes théoriques de P2I sont également fortement impliquées dans la tomographie en quarks et gluons des hadrons et des ions, y compris en régime de saturation gluonique, et dans l'étude du diagramme de phase de QCD à haute température et densité via les collisions d'ions lourds.

3.2.c. Physique des particules

La **physique des particules** a pour objet l'étude des constituants ultimes de la matière et de leurs interactions. Le dernier grand succès du Modèle Standard (MS) de la physique des particules est la découverte du boson de Higgs par les expériences Atlas et CMS au LHC en 2012 à laquelle les physiciens de P2I ont très largement contribué. Les recherches se concentrent sur la vérification et la meilleure compréhension du MS, et sur la recherche directe de nouvelles particules.

La **physique des particules expérimentale** nécessite souvent de très grands instruments (accélérateurs, détecteurs) à la pointe des avancées techniques et développés par des collaborations internationales (ATLAS, CMS et LHCb au CERN, Belle II au Japon) dans lesquelles les équipes de P2I ont une contribution importante. Pour atteindre un niveau de précision inédit, la prise de données «run3» du LHC démarrera en 2022 avec pour but de doubler la quantité de données enregistrées précédemment et améliorer significativement la précision des



mesures et des recherches. Des améliorations importantes sur certains détecteurs ont été réalisées pour ce run 3 pour mettre au défi le MS. Pour la physique qui étudie les quarks de saveurs lourdes, les mesures de précision dans LHCb vont se poursuivre avec une luminosité instantanée 5 fois supérieure à celle des prises de données précédentes. Les travaux sur cette physique de la saveur se concentrent actuellement en particulier sur l'étude des anomalies observées vis-à-vis de l'universalité leptonique (l'idée selon laquelle les trois leptons chargés interagissent tous de la même manière avec les autres particules).

En 2020 sous l'égide du CERN, la stratégie européenne en physique des particules a été mise à jour. Les priorités des laboratoires de P2I s'inscrivent pleinement dans l'application de ces priorités actualisées. La première priorité est la préparation de la phase haute luminosité du LHC. Cette nouvelle phase nécessite une importante jouvence des détecteurs en mettant en œuvre des technologies innovantes grâce aux infrastructures locales spécifiques (plateforme CAPTINNOV financée par le Labex P2IO, plateforme CICLAD soutenue par SESAME). Le deuxième axe mis en avant par la stratégie européenne est l'étude de la faisabilité de la prochaine génération de collisionneurs hadroniques d'une énergie d'au moins 100 TeV au CERN, avec une première phase éventuelle de la construction d'une usine à Higgs par collisions électron-positon pour étudier les propriétés du boson de Higgs. Outre les activités de R&D sur des technologies d'accélérateur de pointe, les équipes de l'axe P2I travaillent sur les perspectives de physique que ces nouvelles machines apporteront.

La **physique des neutrinos** offre de nouvelles voies de recherche de nouvelle physique, par des approches complémentaires aux autres recherches en physique des particules. L'oscillation de saveur des neutrinos a récemment été confirmée, prouvant que les neutrinos ont une masse non nulle (T2K et Double Chooz). Ces résultats, auxquels les équipes de P2I ont largement participé, ouvrent la voie à un excitant programme de mesures de précision. Une autre activité de recherche en physique des neutrinos a pour objet l'étude de leurs propriétés encore ignorées, comme leur nature de Dirac ou de Majorana (NEMO, CUPID...), ou l'origine de leur très faible masse. Pour les prochaines années, les développements portent sur un programme expérimental varié impliquant de nouveaux défis technologiques, avec une participation significative des équipes de P2I : mesure de la violation de CP dans le secteur leptonique, mesure de la hiérarchie de masse et recherche de la nature des neutrinos. L'axe P2I va poursuivre ses efforts dans les expériences à venir (DUNE aux USA et T2HK au Japon).

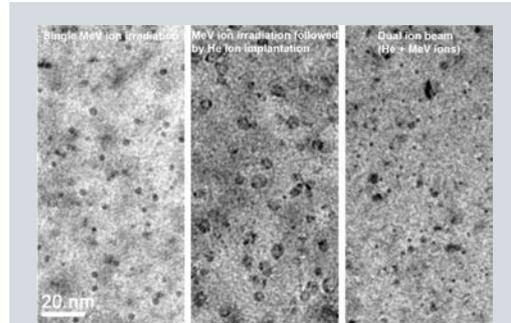
Au niveau théorique, les recherches menées dans l'axe P2I couvrent la **chromodynamique quantique, la physique de la saveur, la physique du et au-delà du MS**, en lien direct avec les expériences. Des questions plus fondamentales de physique des hautes énergies sont aussi abordées (unification des interactions dans le cadre de théories unifiées ou de la théorie des cordes, amplitudes en théorie de jauge et en gravité). La physique

mathématique (théories conformes, systèmes intégrables, matrices aléatoires...) fournit aussi des outils et des modèles pour ces recherches.

3.2.d. Recherche sociétale : Énergie et Santé

Les équipes de l'axe P2I, grâce à leurs compétences et expertises en recherche fondamentale, à leur mise en œuvre de technologies de pointe et à leur capacité d'innovation, apportent une contribution significative aux deux enjeux sociétaux que sont l'énergie et la santé.

Énergie Nucléaire. Les champs de R&D dans le domaine de l'énergie nucléaire (fission et fusion) pour l'axe P2I sont la physique nucléaire expérimentale et théorique en lien avec les données nucléaires, mesurées par nTOF au CERN et par Spiral2/NFS au GANIL. Les équipes travaillent aussi sur des systèmes producteurs d'électricité, la physique et la chimie des matériaux soumis à irradiation, la radiochimie, la neutronique, l'instrumentation nucléaire, la radioprotection, la sûreté-criticité dans les installations nucléaires, ainsi que la conception d'accélérateurs et d'aimants pour des installations de recherche. Dans les scénarios de mix énergétique envisagés, le nucléaire doit jouer un rôle important, et la stratégie de recherche de l'axe P2I inclut la recherche d'approches interdisciplinaires (physique, économie et sociologie) pour l'énergie nucléaire du futur, parallèlement à la R&D sur l'élaboration de matériaux innovants pour le nucléaire du futur et les études de l'interaction de l'industrie nucléaire et de ses résidus avec l'environnement pour une gestion innovante des matières radioactives.



Matériaux pour l'énergie : Cavités observées in situ par microscopie électronique en transmission (visibles ici en noir) dans un acier austénitique inoxydable lors d'irradiations



© IJCLab (C. Fresillon)

THIDOS, une gamma-caméra ambulatoire pour dosimétrie interne utilisable pendant les radiothérapies

Santé. L'axe P2I concentre ses recherches principalement autour de 4 thématiques : imagerie préclinique et clinique en cancérologie et neurosciences, développements de sondes pour l'imagerie biologique, nouvelles approches en radiothérapie, modélisation de l'évolution des tumeurs cérébrales cancéreuses. Les travaux développés dans P2I visent à mettre à profit spécifiquement les radiations ionisantes pour mieux comprendre les mécanismes en jeu dans le vivant, et surtout, les thérapies à mettre en œuvre pour lutter contre le cancer. Ils bénéficient de la forte participation de collaborateurs médecins et biologistes, de plateformes de l'Université Paris-Saclay et de réseaux impliquant des acteurs locaux, nationaux et internationaux, dont des centres hospitaliers d'Île-de-France.

3.2.e. Recherche et outils technologiques

Accélérateurs et Aimants Supraconducteurs. La physique des accélérateurs et la R&D associée visent à lever les verrous scientifiques et technologiques pour fournir des faisceaux de particules chargées ayant les caractéristiques requises pour la physique des particules, la physique nucléaire et la diffusion neutronique, ou pour des applications spécifiques pour la santé, l'énergie et l'industrie. Les laboratoires de l'axe P2I sont leaders en France et reconnus internationalement pour la conception et la réalisation d'accélérateurs, en particulier par leurs contributions à la construction de très grandes infrastructures de recherche (SPIRAL2, SOLEIL, XFEL, FAIR, ESS, LHC, MYRRHA, PIP-II). Ils assurent le fonctionnement d'accélérateurs locaux (ALTO, CLIO, Elsa, Elyse, IPHI-neutrons, JANNuS-SCALP, ThomX) dont certains aussi utilisés pour des recherches relevant d'autres GS. Les équipes de P2I s'illustrent aussi dans le domaine des aimants supraconducteurs pour les accélérateurs et détecteurs en physique des hautes énergies, développent la technologie



© ESS Lund

Cryomodule à cavités supraconductrices elliptiques en phase d'intégration - Accélérateur linéaire

des aimants à très haut champ pour les accélérateurs futurs du CERN (HE-LHC, FCC) et la mettent au service d'autres communautés (IRM pour neurosciences ISEULT, tokamaks pour la fusion). Les équipes P2I continuent à développer une expertise innovante en physique et technologie des accélérateurs du futur, en particulier pour les ERL (Electron Recovery Linac), l'accélération laser-plasma, les accélérateurs de forte puissance, les sources de rayonnement à forte brillance, les cavités et aimants supraconducteurs. Leurs compétences couvrent la dynamique faisceau, la conception et le développement de composants critiques, le prototypage et la qualification de systèmes intégrés, l'évaluation de la fiabilité et l'optimisation énergétique. Elles exploitent des plateformes technologiques de haut niveau (PANAMA, SUPRATech, Synergium, Pacifics) bénéficiant de soutiens financiers significatifs (SESAME, Labex P2IO, EQUIPEX).

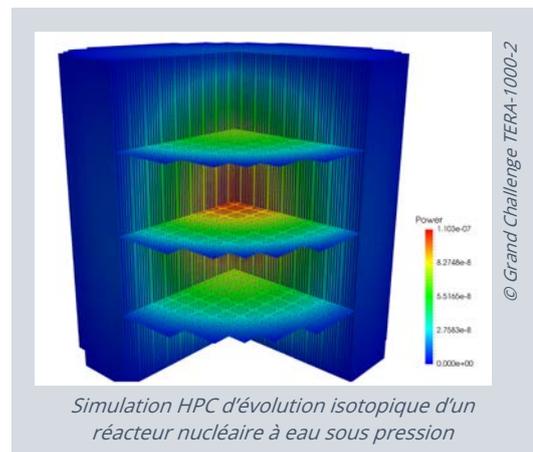


Photo du prototype de télescope CTA avec le prototype de caméra NectarCAM

Instrumentation et détecteurs. La physique de P2I nécessite le développement d'instruments complexes et originaux dont les performances sont atteintes grâce à une approche système englobant les détecteurs, l'électronique et leur intégration commune. Une spécialité de P2I est la détection toujours plus précise dans des environnements extrêmes (radiations, températures, flux). Ceci nécessite une R&D continue pour mettre au point des technologies novatrices de détecteurs (bolomètres, siliciums, micromégas, scintillateurs opaques...) répondant aux besoins spécifiques des expériences. Les laboratoires de P2I sont impliqués dans la plupart des grands projets des roadmaps européennes avec en particulier des développements ambitieux de détecteurs segmentés en millions de voies, impliquant une électronique et une acquisition de données complexes pour

lesquels la mesure précise de temps (quelques picosecondes) est importante. La R&D et la réalisation de tels systèmes bénéficient d'infrastructures locales telles que la plateforme CAPTINNOV, financée par le Labex P2IO, pour les tests de senseurs et de puces de silicium, ou CICLAD pour l'intégration et les tests de détecteurs en environnement propre, et bientôt la plateforme de conception mécanique 4 ϕ +

Recherche et outils numériques. Les activités de modélisation et simulation couvrent tous les domaines de recherche de l'axe P2I de manière transverse. Elles s'articulent autour de quatre axes : les composantes transverses de la modélisation, les outils de modélisation et de simulation numérique, les ressources et moyens associés, la valorisation des outils développés. Les activités de traitement de données et de calcul concernent le parallélisme et les nouvelles architectures matérielles, les infrastructures de stockage de données, les liens avec la science des données et les techniques de visualisation, entre autres grâce à des partenariats avec des entreprises. Cette R&D numérique s'appuie sur deux infrastructures locales (VirtualData, créée et opérée par les partenaires du Labex P2IO, et FUSION/RUCHE, une ressource HPC (High Performance Computing) créée et opérée par CentraleSupélec et l'ENS) et sur des ressources régionales : le Très Grand Centre de Calcul (TGCC) du CEA dont, le Centre de Calcul Recherche et Technologie (CCRT), l'IDRIS (Institut du Développement et des Ressources en Informatique) et GENCI (Grand Équipement National de Calcul Intensif).



Simulation HPC d'évolution isotopique d'un réacteur nucléaire à eau sous pression

3.3 Environnement local

L'atout incontestable de l'axe P2I est de combiner des recherches théoriques, expérimentales et technologiques, couplées aux modélisations et simulations numériques, ce qui lui permet d'être force de proposition et acteur visible de grandes collaborations internationales. Certains laboratoires de l'axe P2I sont présents sur le périmètre Paris-Saclay depuis plus d'un demi-siècle et les thématiques portées par ces laboratoires font de P2I un acteur internationalement reconnu. Les recherches se font en mode « projet » qui confère aux équipes de P2I une capacité à mener des programmes d'envergure sur de grandes échelles de temps. Dans le périmètre Paris-Saclay,

l'axe P2I mobilise plus de 1400 personnes (soit plus de 40% de la communauté nationale). Les ressources humaines sont réparties en physique nucléaire et hadronique (~200 ETP), physique des particules (~160 ETP), astroparticules et cosmologie (~110 ETP), énergie (~130 ETP) et santé (~30 ETP). Ces activités sont complétées par les recherches théoriques (~190 ETP) et fortement appuyées par les recherches technologiques en instrumentation.

4. Axe Astrophysique

4.1 Introduction

Les recherches menées au sein de l'Axe Astrophysique couvrent un large domaine, des sciences planétaires à l'Univers primordial. L'axe rassemble sur un seul site l'ensemble des compétences et des moyens pour intervenir dans toutes les phases d'instruments spatiaux et sol : conception, réalisation, étalonnage, opérations scientifiques puis traitement, analyse, interprétation, valorisation, diffusion et exploitation des données. Il a des responsabilités majeures sur de nombreuses missions spatiales pour l'observation astrophysique, avec de multiples succès scientifiques à très forte visibilité internationale.

4.2 Grandes questions et thématiques de recherche

4.2.a. Recherche fondamentale

Les enjeux des recherches de l'axe peuvent être organisés en quatre grandes questions :

Comment le système solaire fonctionne-t-il ? Le Soleil et les planètes sont accessibles à l'observation détaillée et à l'exploration spatiale. Caractériser les principaux processus physiques qui régissent leur formation, leur fonctionnement et leur évolution, étudier et rechercher les conditions d'apparition de la vie, sont quelques-uns des enjeux autour de cette question. Les études du Soleil et de son activité, les effets à grande échelle dans l'héliosphère, et les processus d'interaction avec le milieu interstellaire sont aussi des thématiques majeures. La prédiction des éruptions solaires et les interactions Soleil-Terre ont par ailleurs un volet enjeux socio-économiques, les événements solaires pouvant impacter les systèmes ou les personnes exposés au sol et dans l'espace.

Quelle est l'origine des étoiles et des planètes, et comment évoluent-elles ? La formation des étoiles et des planètes est l'aboutissement de processus multi-échelles complexes à l'œuvre dans les galaxies. De nombreuses questions restent ouvertes pour expliquer la formation stellaire (rôle du champ magnétique, formation des étoiles massives ainsi que des premières étoiles, etc.). La formation des planètes est de plus une thématique en profond renouvellement avec la découverte et l'étude des exoplanètes, qui montrent une très grande diversité qu'il faut expliquer, en association avec des observations de plus en plus détaillées de disques proto-planétaires et de matière primitive. Un autre enjeu d'importance concerne l'habitabilité et la recherche de bio-signatures, la question sous-jacente étant : y a-t-il de la vie ailleurs dans notre galaxie ?



Intégration du plan focal de l'instrument VIS de la mission Euclid

© CEA (L. Godart)

Comment se forment les galaxies, et comment l'Univers évolue-t-il ? Les infimes inhomogénéités mesurées sur le fond diffus cosmologique sont le point de départ de multiples études sur la structuration de l'Univers. Le modèle actuel "de concordance" rend compte de l'expansion accélérée de l'Univers et de sa structuration à grande échelle, notamment en amas de galaxies. Cependant, des énigmes fondamentales non résolues concentrent l'attention des équipes de cosmologie de l'axe Astrophysique, notamment l'existence et les propriétés d'une période d'expansion

Axe Astrophysique

4 laboratoires

450 chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs et techniciens

65 plateformes scientifiques et techniques

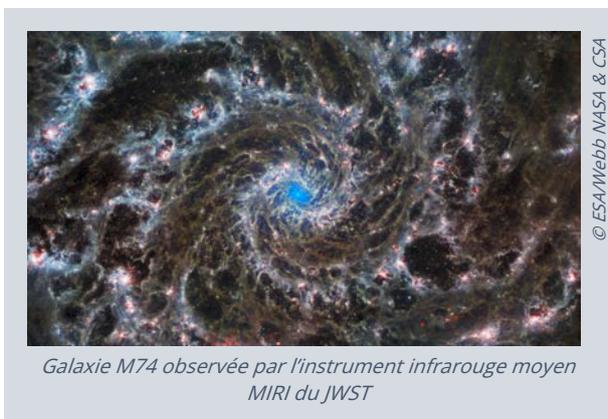
4 Domaines thématiques

- Fonctionnement du système solaire
- Origine et évolution des étoiles et des planètes
- Formation des galaxies et évolution de l'Univers
- Conditions extrêmes de l'Univers

accélérée primordiale (inflation), la nature des composantes sombres de l'Univers (matière noire et énergie sombre), et la sortie des âges sombres initiée par la formation des premières sources lumineuses. De plus, le modèle de concordance rend bien compte qualitativement de la formation et de l'évolution des galaxies et des amas de galaxies, mais des désaccords quantitatifs persistent. Pour les résoudre, un des enjeux principaux est de réconcilier observations et modélisation, par la prise en compte de processus physiques aux petites échelles ou la remise en cause de certaines bases mêmes du modèle.

Comprenons-nous les conditions extrêmes dans l'Univers ? Les observations astronomiques permettent de tester la physique dans des conditions « extrêmes » inaccessibles en laboratoire : Univers primordial, champs gravitationnels et magnétiques auprès d'objets compacts (étoiles à neutrons, trous noirs), rayons cosmiques, échelle des distances, échelle des temps, etc. Les observations ont déjà mis en évidence le besoin d'une nouvelle physique avec l'introduction de matière noire et d'énergie noire pour expliquer la structuration de l'Univers. L'un des enjeux majeurs des prochaines années est de contraindre, à partir d'observations, la nature de ces composantes.

4.2.b. Recherche et outils technologiques



Observations. Un outil principal est l'observation (sol, aéroportée, spatiale à distance ou in-situ), multisondes, multi-longueurs d'onde ou multi-messagers (neutrinos, ondes gravitationnelles, etc.) avec l'avènement du spatial et les progrès des techniques de détection. En lien avec les quatre grandes questions de nos recherches, nous sommes investis à haut niveau dans de nombreux projets spatiaux et des partenaires clés des agences spatiales nationales et internationales : Cluster (2000, ESA), Integral (2002, ESA), Mars Express (2003, ESA), Venus Express (2005, ESA), Themis (2007, NASA), Planck (2009, ESA), Herschel (2009, ESA), MSL (2011, NASA), Hayabusa 2 (2014, JAXA),

MMS (2015, NASA), BepiColombo (2018, ESA-JAXA), Exomars (2018, ESA-Roscosmos), Solar Orbiter (2020, ESA), JWST (2021, NASA, ESA, CSA), Euclid (2023, ESA), Mars 2020 (NASA), SVOM (2023, CNSA-CNES), JUICE (2023, ESA), PLATO (2026, ESA), ARIEL (2029, ESA), THESEUS (2032, ESA), ATHENA (2035, ESA), LiteBIRD (2030, JAXA), LISA (2037, ESA). Nous sommes également très impliqués dans plusieurs grands projets sol : ArTéMiS (APEX), NIKA (IRAM), CTA (Chili), METIS (ELT), SKA.

Instrumentation. Des instruments de très haute technologie sont mis en œuvre pour les missions spatiales et les grands télescopes au sol. Concevoir, développer, tester et opérer ces instruments, nécessite de maintenir un important potentiel humain hautement qualifié, notamment pour le spatial. Les compétences techniques sont cruciales aussi pour mener des R&D amont et lever les verrous technologiques en préparation des projets futurs (programme Voyage 2050 de l'ESA, etc.).

Traitement des données. Compte tenu de la complexité et des performances des instruments et du volume des données recueillies, le traitement et l'analyse des données sont des activités clé. Des compétences ont été affinées dans les équipes de l'axe Astrophysique (statistique, apprentissage, séparations de sources, etc.). L'accessibilité de grande quantité de données à une large communauté a aussi été développée. Des centres de données ont été mis en place, dont IDOC pour les opérations en vol, le traitement, l'archivage et la mise à disposition des données.

Simulations numériques. A côté des observations, les simulations numériques prennent de plus en plus d'importance au sein de l'axe et bénéficient pleinement du développement des calculateurs massivement parallèles ; le volume de données ainsi générées avoisine celui des données d'observations. Elles sont fondamentales dans de multiples domaines (évolution des galaxies, formation stellaire, magnétisme, disques protoplanétaires, vents stellaires, interactions étoiles-planètes, etc.).



Grandes plateformes. Essentielles pour le développement d'instruments spatiaux et sol, la station d'étalonnage, la Plateforme d'Intégration et de Tests, et la Plateforme de développement et d'intégration, représentent environ 50 % des moyens de l'Infrastructure de Recherche PARADISE labélisée par le CNRS. Le centre d'opération et de données IDOC est labélisé centre d'expertise régional par l'INSU.

4.3 Environnement local

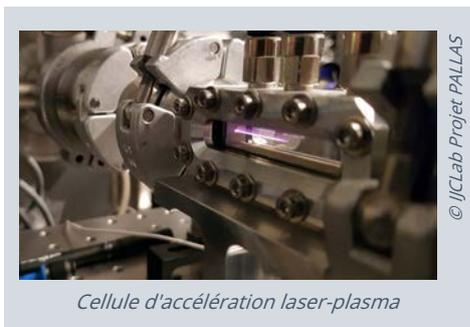
L'axe Astrophysique regroupe principalement les équipes de quatre laboratoires spatiaux (AIM, IAS, LATMOS, LPP), représentant un effectif d'environ 450 personnes dont la moitié de personnels techniques. Plusieurs autres laboratoires de la GSP des axes PhOM et P2I mènent aussi des recherches en astrophysique, ce qui augmente l'effectif d'environ 15%, et facilite les échanges avec les laboratoires de physique.

5. Aspects transverses

5.1 Thématiques Inter axes

La structure souple offerte par la GSP permet de dépasser les frontières disciplinaires et administratives des tutelles des laboratoires. Elle encourage l'émergence d'expertises locales sur des sujets impliquant des équipes impliquées dans différents axes, parfois en interaction avec d'autres GS.

A Paris-Saclay de nombreuses équipes et laboratoires localisés entre le plateau de Saclay et la vallée d'Orsay couvrent l'ensemble de la **physique des plasmas**, des plasmas thermonucléaires aux plasmas industriels en passant par les sources de rayonnement et les plasmas astrophysiques. Ces différentes thématiques, positionnées dans les trois axes de la GSP, partagent des outils et concepts communs, avec par exemple des convergences entre plasmas thermonucléaires par confinement magnétique et réacteurs haute densité à plasma froid illustrant également les liens potentiels entre recherche fondamentale et application



Cellule d'accélération laser-plasma

Diverse et morcelée, cette communauté bénéficiera d'une meilleure structuration et d'une animation notamment grâce à la GSP en concertation avec la GS SIS.

Activités transverses

10 objets interdisciplinaires en lien avec la GS Physique

115 plateformes scientifiques et techniques

Thématiques inter-axes

- Physique des plasmas
- Astrophysique de laboratoire
- Études multilongueurs d'onde et multimessagers
- Physique de l'irradiation
- Physique théorique
- Activités numériques

Thématiques inter-GS

- SIS : instrumentation et détection, quantification des incertitudes
- Chimie : chimie physique
- Mathématiques : physique théorique
- ISN : intelligence artificielle, calcul quantique
- Sciences de la Vie : physique santé

L'astrophysique de laboratoire met en synergie expériences de laboratoire (y compris sur des IR* comme Soleil), théorie et observations pour étudier des objets astrophysiques du système solaire et des disques protoplanétaires aux milieux interstellaire et (inter-)galactique. La complémentarité des approches apporte des diagnostics originaux pour interpréter les données observationnelles et les retours d'échantillons, afin de comprendre en particulier la formation multi-échelle des structures de l'Univers et les possibles implications pour l'origine de la vie. Elle repose sur les spectroscopies large bande (du millimétrique aux rayons X), la dynamique et la réactivité moléculaire, la simulation en laboratoire de processus énergétiques, pour lesquelles les laboratoires de la GSP possèdent une expertise et des équipements de pointe pour étudier et simuler des environnements astrophysiques et d'étudier leurs composants.

Les **études multi-longueurs d'onde et multi-messagers** sont devenues centrales dans les domaines de l'astrophysique, des astroparticules et de la cosmologie. Tous les types de signaux envisagés il y a une dizaine d'années ont maintenant été découverts. La proximité des axes P2I et Astrophysique offre un cadre unique pour

ces études au sein de l'Université Paris-Saclay. Leurs équipes travaillent sur des instruments spatiaux ou auprès d'infrastructures observant et analysant des rayonnements et des particules de l'Univers avec une vaste expertise, avec des interfaces significatives entre astrophysique, physique nucléaire et physique des particules. Ces connaissances complémentaires mises en synergie permettront des avancées originales sur les grandes questions scientifiques portant sur l'origine, l'évolution et les composantes de l'Univers.



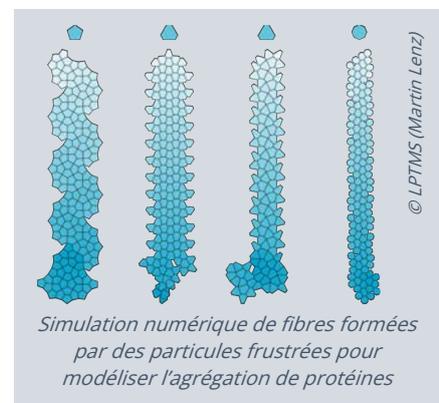
Plateforme d'irradiation
et de caractérisation JANNuS-Orsay

Les activités en **physique de l'irradiation**, conduites auprès d'accélérateurs de particules chargées capable d'irradier, de doper et de caractériser la cible choisie, concernent les trois axes de la GSP ainsi que d'autres disciplines, notamment la Chimie. Elles sont organisées sous la forme de réseaux de plateformes, largement ouverts aux communautés académiques et industrielles, tels que la Fédération de Recherche EMIR&A (Réseau National d'Accélérateurs pour l'Irradiation et l'Analyse de Molécules et Matériaux) regroupant 16 plateformes accélératrices à l'échelle nationale, dont 6 à l'échelle de l'Université Paris-Saclay (JANNuS-Orsay, JANNuS-Saclay, Andromède, ALIENOR, Elyse, microsonde LEEL-NIMBE). Certaines des plateformes permettent d'étudier les modifications physico-chimiques sous irradiation in situ via des techniques de caractérisation en ligne dans une large gamme de températures. Fondées sur des outils développés en physique (accélérateurs et détecteurs), ces techniques jouent un rôle important dans

l'étude de matériaux dans divers domaines : énergie (nucléaire et photovoltaïque), physique nucléaire, accélérateurs, spatial, électronique et photonique... Elles permettent aussi des analyses dans des domaines variés, de la biologie aux géosciences jusqu'aux sciences du patrimoine.

L'Université Paris-Saclay peut mettre en avant des forces majeures dans le domaine de la **physique théorique**, avec une large communauté présente à la fois dans des laboratoires entièrement dédiés à la physique théorique mais aussi de très nombreuses équipes théoriques à la pointe de leur domaine dans d'autres laboratoires, où elles sont au contact direct des expérimentateurs. La physique théorique fournit un cadre d'interprétation des mesures expérimentales, leur donne une cohérence, et aide à identifier des directions de recherches futures. Transverse par essence, elle ne se limite pas à une thématique spécifique mais couvre tous les domaines de la physique, favorisant ainsi l'émergence et la diffusion des idées nouvelles. Elle joue un rôle unificateur en fournissant des outils et un langage permettant d'étudier des phénomènes physiques en apparence très différents, allant de questions fondamentales à des aspects plus phénoménologiques. Cet aspect transverse, déjà présent au sein des trois axes de la GSP, se retrouve aussi entre les axes (par exemple approches théoriques du problème à N corps, méthodes de type Monte-Carlo, théorie de l'information quantique...). Par ses concepts et ses outils, la physique théorique trouve aussi des connexions avec d'autres disciplines comme les mathématiques, l'informatique, la biologie, la chimie, la mécanique ou encore l'économie.

Les **activités numériques**, transverses aux trois axes, concernent tous les domaines de recherche de la GSP, avec le traitement et l'analyse de données, la modélisation et la simulation nécessitant des moyens numériques sans cesse croissant et le développement des connaissances associées pour les opérer. Les défis techniques associés (stockage de volumes importants de données, parallélisation des calculs/traitements, calcul haute performance) nécessitent des compétences techniques et des architectures spécifiques, aboutissant au développement d'infrastructures locales dédiées au niveau des laboratoires de la GSP, complétées le cas échéant par l'usage des deux centres HPC nationaux membres de GENCI liés à Paris-Saclay (IDRIS et TGCC).



Simulation numérique de fibres formées
par des particules frustrées pour
modéliser l'agrégation de protéines

5.2 Thématiques Inter Graduate Schools

Les thématiques de la GSP mettent en évidence des thèmes communs à développer sur des questions plus spécifiques à l'interface entre GS et impliquant souvent plusieurs des axes de la GSP : chimie physique (GS Chimie), instrumentation et détection, quantification des incertitudes (GS SIS), intelligence artificielle et calcul quantique (GS ISN), physique théorique (GS Mathématiques), interfaces avec les GS liées aux Sciences de la Vie (Biosphera, HDS, LSH, Santé publique) ... La GSP contribue aussi à des recherches plus transverses, avec des retombées sociétales potentiellement importantes. Les activités de la GS sur ces questions s'articulent avec certains Programmes Interdisciplinaires mais aussi avec les autres communautés académiques et avec le monde industriel, en particulier :



- Si la nanophysique entre pleinement dans le cadre de l'axe PhOM, les aspects interdisciplinaires des nanosciences et nanotechnologies sont abordés par le programme interdisciplinaire **PSINano (Paris-Saclay Institute for Nanosciences)**, avec des retombées en nano-électronique (dans toutes ses ramifications), physique et les technologies quantiques, chimie physique, nanophotonique, nanothermique, production et récupération de chaleur (« *energy harvesting* »), capteurs, interface physique-biologie, santé et médecine. Il permettra d'articuler les liens sur ces thématiques avec les GS SIS, la GS Chimie, les GS en sciences du vivant, ainsi qu'avec l'ISL.
- Le **Quantum Center** est appelé à mettre en œuvre le lien entre la GSP, les GS SIS, Mathématiques, et Computer Sciences, et l'ISL en ce qui concerne l'application technologique de la physique quantique pour le calcul (protocoles, dispositifs...), la simulation, la communication, et les capteurs quantiques. Le lien avec la GSP pourra se faire en particulier via les actions de formation par la recherche (doctorats).
- L'**Institut Intégratif des Matériaux (2IM)** recouvre des intérêts partagés des GS Physique, Chimie, SIS, et HSP : nouveaux matériaux, croissance et mise en forme, caractérisation, approches numériques. La GSP sera aussi concernée par des aspects plus appliqués (durabilité et de recyclabilité des matériaux du futur, disponibilité des matériaux stratégiques) et/ou interdisciplinaires (vieillesse et préservation, impact environnemental, impact de conditions extrêmes). C'est le cas pour les études sur les différentes filières de réacteurs nucléaires (matériaux soumis à l'irradiation, chimie nucléaire, mesures nucléaires, matériaux réfractaires) avec les industriels du secteur.
- L'**Institut de l'Énergie Soutenable (IES)** concerne la GSP en particulier pour les (nano-)matériaux et systèmes pour le développement des technologies pour la génération durable et le stockage de l'énergie (thématiques communes avec les GS Chimie et SIS). L'IES pourrait toutefois avoir un recouvrement plus fort avec la GSP s'il incluait aussi des aspects liés à l'énergie nucléaire (scénarios énergétiques, chimie nucléaire, matériaux...).
- L'Université Paris-Saclay est un acteur majeur dans le domaine des sciences spatiales, avec d'une part des laboratoires jouant un rôle clé dans le développement et l'exploitation scientifique d'instruments à bord des missions spatiales, et d'autre part un large éventail d'expertises disséminées dans de nombreux laboratoires de Paris-Saclay. Le **Centre des Sciences Spatiales de l'Université Paris-Saclay (CPS3)** couvre des intérêts communs de la GSP et des GS Géosciences, ISN et SIS pour relever les nouveaux défis liés à l'évolution des sciences spatiales, comme l'instrumentation du futur, les méthodes d'analyse des données, les nouveaux développements liés au *New Space*.
- Plusieurs Programmes Interdisciplinaires liés aux systèmes vivants intéressent à divers degrés la GSP. Les équipes des axes PhOM et P2I participent activement au Programme Interdisciplinaire **INanoTheRad**, qui développera, avec l'Institut Curie et le Centre de Protonthérapie, de nouvelles radiothérapies en mettant au point de nouveaux protocoles, de nouvelles sources, et en utilisant des nanoparticules pour plus d'efficacité et de précision du dépôt énergétique au niveau des tissus cancéreux.
- Des équipes de la GSP participent aussi au réseau **BioMedical Engineering** et les centres hospitaliers locaux (**HUB PASREL-SmartImaging**) et d'Île-de-France. Des laboratoires des axes PhOM et P2I sont partie prenante du Programme **Brainviews** sur l'application de l'IRM fort champ et de l'IA à l'imagerie médicale. Des équipes de l'axe PhOM sont aussi impliquées à des degrés divers dans **LivingMachines@work** (organisation et fonctionnement intracellulaires), **Microbes** (organisation, dynamique interne et collective, interaction avec l'environnement d'organismes monocellulaires) et **BioProbe** (traceurs cellulaires, techniques d'imagerie).

5.3 Plateformes

La Physique de Paris-Saclay a la particularité de rassembler près de **115 plateformes scientifiques** et techniques capables d'accueillir des activités extérieures aux laboratoires où elles sont localisées et opérées. Ces plateformes couvrent l'ensemble des thématiques de la GSP ainsi que des thématiques connexes (chimie, ingénierie, biologie...).

Concentrées géographiquement, ces plateformes permettent à la fois de mener à bien des recherches disciplinaires de pointe dans les laboratoires, de faire bénéficier les communautés académique et industrielle d'expertises techniques et expérimentales uniques sur des sujets tant disciplinaires qu'interdisciplinaires, et de compléter les enseignements universitaires à tous les niveaux. Ces plateformes sont amenées à s'ouvrir de plus en plus largement aux entreprises qui souhaitent accéder à des infrastructures de haut niveau scientifiques (prestation de service ou R&D communes).



6. Lien avec les autres domaines d'action de la GSP

6.1 Formation

La **formation initiale** fournie par l'Université Paris-Saclay via son Master de physique (650 étudiants) et les Écoles Doctorales du programme doctoral GSP (550 doctorants) est en très bon accord avec les enjeux de recherche développés au sein des laboratoires de la GSP. L'attractivité internationale de la physique à Paris-Saclay est apparue très clairement dans les dossiers des étudiants venant depuis 2020 suivre les formations de physique, ce qui augmentera encore la qualité du vivier d'étudiants pour les laboratoires si la venue de ces étudiants est encouragée (via des dispositifs de bourses internationales IDEX ou équivalents, de programmes Erasmus Mundus et Erasmus MIC).

Le périmètre de Paris-Saclay autorise d'envisager un développement des activités de **formation permanente et continue** pour accroître les compétences des enseignants-chercheurs, chercheurs, ingénieurs et techniciens pour leurs projets de recherche. Un autre volet de cette réflexion est le développement de **l'apprentissage** sur des métiers techniques, afin de renforcer le lien avec les centres de formation concernés, d'élargir le vivier de recrutement des agents techniques des laboratoires avec des compétences élargies, d'aider les étudiants durant leur formation et de renforcer leur insertion professionnelle une fois diplômés.

Que ce soit pour la formation initiale ou la formation permanente, la GSP souhaite également encourager **l'ouverture plus large de plateformes de recherche** à des activités de formation afin de proposer des formations plus spécifiques, adaptées aux enjeux, outils et spécificités de la physique de Paris-Saclay.

Master

- 9 parcours de M1
- 21 parcours de M2
- 2 Erasmus Mundus
- 650 étudiants en master

Doctorat

- 550 doctorants
- 4 écoles doctorales

6.2 International

La recherche au sein de la GSP comporte **une forte composante internationale**, tant par l'implication des membres de la GSP, de ses équipes et de ses laboratoires dans de grands projets internationaux (en particulier pour P2I et Astrophysique) que par leurs collaborations internationales thématiques et leur participation à des réseaux de collaborateurs impliquant de nombreux centres de recherche et universités dans le monde entier.



Un indicateur en est le grand nombre de contrats de recherche internationaux et européens que décrochent les membres de la GSP pour soutenir leurs activités (ERC, EIC, actions Marie Skłodowska-Curie, réseaux de formation de doctorants et de post-doctorants, programmes de visiteurs de longue durée, accords bilatéraux). L'attractivité internationale des formations en physique est aussi mise en évidence par la vitalité, sans cesse croissante, des accords d'échanges académiques, notamment Erasmus. Ainsi la GSP est forte de 130 accords Erasmus et Erasmus MIC pour la mobilité d'études à tous les niveaux, de stage et de personnel, 17 accords bilatéraux avec des partenaires sur cinq continents, et 10 accords de double diplomation au niveau Master et/ou Doctorat. Par exemple, à la fin du 1^{er} semestre 2021-2022, une centaine de mobilités internationales entrantes (étudiants, stagiaires, personnel) en physique sont en cours ou déjà achevées.

6.3 Monde industriel

La GSP vise à promouvoir **l'insertion professionnelle** de ses diplômés et **la communication à destination des entreprises** au sujet des formations dispensées en constituant un point d'entrée naturel pour les entreprises intéressées. Il sera donc important de développer des actions spécifiques pour constituer et étendre le réseau des entreprises (forum recherche/industriel, visites de laboratoires...) et à interagir avec ces entreprises pour identifier leur perception des atouts et des faiblesses de la physique de Paris-Saclay (formation initiale, continue, compétences recherche).



La GSP veut ainsi contribuer à **mettre en relation les entreprises avec les laboratoires** ainsi qu'à accompagner ces laboratoires dans leurs démarches partenariales. Un objectif important est le développement d'actions recherche-formation-innovation, comme la valorisation des masters en entreprise, le développement de contrats doctoraux CIFRE, l'étude (en lien avec les Écoles Doctorales liées à la GSP) des débouchés des doctorants en entreprise. Un autre objectif est le soutien à des actions de **valorisation-amont** au sein des laboratoires, avant que d'autres structures (AAP POC in labs, SATT) ne prennent le relais pour une valorisation plus en aval.

Nous contacter

Par mail : gs.physique@universite-paris-saclay.fr

Site web: <https://www.universite-paris-saclay.fr/graduate-schools/graduate-school-physique>

université
PARIS-SACLAY

GRADUATE SCHOOL
Physique

