

SECTION 04

PHYSIQUE DES ATOMES, MOLECULES ET PLASMAS. OPTIQUE ET LASERS

TAKI Abdelmajid (président de section), GREGOIRE Gilles (secrétaire scientifique), BENICHOU Emmanuel, BERNARD Jean-Claude, CAMY Patrice, CORDE Sébastien, FIRPO Marie-Christine, GRANDET Sophie, GRECH Mickael, HANNA Marc, CHAIBI Oualid, CHICIREANU Radu, JULLIEN Aurélie, KLEINER Isabelle, LEVEQUE Camille, LONG Romain, MIVELLE Mathieu, HOUEL-RENAULT Ludivine, OUVRARD Aimeric, SINATRA Alice, WESTBROOK Christoph

Introduction Générale

Les activités de recherche de la section 04 s'inscrivent dans le cadre de la physique fondamentale et sont basées sur les deux piliers de la recherche scientifique à savoir l'expérience d'une part et la théorie assistées et complétées par des simulations numériques d'autres part. L'expérience représente l'activité primordiale de la section ; la modélisation et les simulations numériques étant intimement liées à la compréhension et l'interprétation des observations expérimentales. Plus précisément, le cœur de métier de la section 04 est de répondre aux enjeux fondamentaux de caractérisation, d'interaction et de dynamique des atomes et molécules. S'ajoutent à ces enjeux les problématiques de systèmes lasers y compris les sources lasers, l'optique linéaire et non linéaire, la photonique à des échelles nanométriques et la physique des plasmas chauds.

Au cours des cinq dernières années, les aspects fondamentaux ont été particulièrement mis à l'honneur par la médaille d'or du CNRS décernée à Jean Dalibard en 2021 pour ses études sur la matière quantique ultrafroide, et par le prix Nobel décerné à Alain Aspect en 2022 pour ses expériences pionnières sur l'intrication quantique des photons issus d'une cascade atomique. Les travaux de ces deux lauréats ont spécifiquement ouvert la voie aux "technologies quantiques" (voir la sous-section I.4).

Notre communauté joue aussi un rôle actif dans le domaine de la physique attoseconde, tant au niveau de la génération de ces impulsions lumineuses ultrabrèves que des applications en physique atomique et moléculaire. Cette discipline a récemment été consacrée par le Prix Nobel de Physique 2023 (Anne L'Huillier, Pierre Agostini, et Ferenc Krausz). Ces sources ouvrent la voie à une exploration sans précédent des processus dynamiques se déroulant à l'échelle du mouvement des atomes et électrons. La communauté française pourra s'appuyer sur la création du PEPR LUMA Interaction Lumière-Matière, dédié à la compréhension et au développement des technologies laser pour l'étude de systèmes physico-chimiques et biologiques dans une approche interdisciplinaire.

Grace à leur caractère interdisciplinaire, les processus non-linéaires sont en progrès considérable dans plusieurs domaines de recherche et permettent de faire émerger de nouvelles propriétés de la lumière, comme la stabilité de la phase entre l'enveloppe temporelle et la porteuse. Ce paramètre devient critique dans le cadre de la production d'impulsions attosecondes isolées et bénéficie également à la réalisation de peignes de fréquences robustes pour la spectroscopie. Des travaux visant à exploiter ces phénomènes non linéaires émergent dans de nombreux contextes : lasers et amplificateurs à fibre, peignes de fréquences, compression temporelle d'impulsions ultrabrèves, génération de

supercontinua, et photonique intégrée, y compris pour les technologies quantiques.

Un défi majeur que rencontre notre société est le changement climatique et les crises drastiques pour l'humanité qui en découlent. La place de la physique comme facteur de choix dans le progrès accompagnant l'évolution rapide et permanente de nos sociétés lui confère un rôle déterminant pour contribuer, d'une manière significative, à apporter des réponses à ce défi climatique. La nécessité de réaliser la production d'électricité décarbonée au moyen de la fusion thermonucléaire contrôlée n'a jamais été aussi manifeste.

Dans ce cadre, un évènement notable a été le lancement en France, le 8 décembre 2023, du Programme et équipements prioritaires de recherche exploratoire (PEPR) SupraFusion, porté par le CNRS et le CEA, pour étudier la faisabilité d'une centrale à fusion compacte à fort champ magnétique, pouvant permettre une réduction drastique des coûts.

Par ailleurs la demande de données spectroscopiques engendrées par les missions spatiales de télédétection et surveillance des gaz à effets de serre et de la qualité de l'air ne cessent d'augmenter, induisant de nouveaux challenges théoriques et expérimentaux en physique moléculaire.

Enfin, l'apparition de l'intelligence artificielle (IA), déjà à l'œuvre dans toutes les thématiques de la section 04 va révolutionner, dans un avenir proche, notre méthodologie et nos approches. C'est particulièrement tangible dans le domaine de la physique moléculaire où l'IA ouvre la voie aux développements de nouveaux outils pour l'analyse des données, la compréhension, l'échantillonnage et la recherche conformationnelle.

Les activités déterminantes au sein de la section 04, dont certaines sont des premières mondiales, seront abordées dans la suite de ce rapport. Elles sont illustrées par quelques exemples soulignant leurs caractère innovant et original. Pour une présentation synthétique, elles sont organisées selon quatre axes :

- Physique quantique des atomes et des photons
- Physico-Chimie des molécules, agrégats et nanoparticules
- Optique non linéaire, lasers, photonique, nano-optique et imagerie
- Plasmas chauds

Groupements et Réseaux associés à la section 04

Le caractère fortement interdisciplinaire de la section est aussi reflété dans les groupements de recherche (GDR) et fédération de recherche (FR) qui sont des lieux d'échanges et forment des ponts entre différentes sections du comité national, notamment les sections 02, 03, 05, 08 et 11, mais aussi un lieu de rencontre et de formation de jeunes chercheurs.

I. Physique quantique des atomes et des photons

1. Introduction

La physique quantique des atomes et des photons occupe une place centrale dans les thématiques de la section 04 du CNRS, tant sur le plan fondamental que sur le plan des applications et des avancées techniques avec le développement d'instruments. Sur le plan fondamental, elles englobent la théorie quantique, l'interaction lumière-matière, les systèmes ouverts, et plus récemment les systèmes impliquant un grand nombre de corps en équilibre ou hors équilibre. Quant aux applications, elles concernent les lasers, les interféromètres, les capteurs macroscopiques et miniaturisés, les pinces optiques et autres, qui ont un impact majeur sur les progrès des différentes branches appliquées de la physique et des autres sciences à l'interface.

2. Atomes froids, gaz quantiques et fluides quantiques

Nous donnons ici comme premier exemple notable celui du gaz unitaire de fermions, où la force d'interaction entre deux fermions de spin opposé est la plus grande autorisée par la mécanique quantique. Après avoir exploré les propriétés d'équilibre du gaz unitaire, théorie et expériences sont maintenant lancées dans l'étude des propriétés dynamiques de ces systèmes, telles que le spectre des excitations de basse énergie, l'interaction entre phonons et excitations fermioniques, et le retour à l'équilibre du système suite à une excitation ; des phénomènes élémentaires qui, au niveau macroscopique,

déterminent les propriétés de transport et de cohérence de ces systèmes superfluides. La possibilité de réaliser un mélange unitaire de fermions de masses différentes ouvre aussi de nouvelles perspectives fascinantes, notamment en ce qui concerne l'effet Efimov à plusieurs corps, où grâce à l'interaction avec un seul fermion léger, N fermions lourds peuvent former avec ce dernier une succession infinie d'états liés de $N + 1$ particules. Outre le gaz unitaire de fermions, les gaz quantiques de bosons ou de fermions soulèvent un certain nombre de problèmes fascinants, allant des gaz avec des interactions à longue portée avec un comportement "supersolide" (superfluide à densité spontanément modulée) aux systèmes superfluides en rotation. De plus, un effort croissant est mis dans les simulations de systèmes de matière condensée avec des gaz quantiques dans des réseaux optiques. En effet, la possibilité conjointe d'"ingénierie" des hamiltoniens modèles et de mesures globales ou locales sur les atomes (par exemple des fonctions de corrélation à plusieurs corps), ainsi que la possibilité d'une description théorique microscopique du système, pourraient permettre d'isoler et de comprendre les mécanismes élémentaires qui sous-tendent le comportement macroscopique de divers matériaux, dont les supraconducteurs et les matériaux topologiques ou magnétiques, fournissant ainsi des informations complémentaires à celles provenant de l'étude des systèmes de matière condensée. Maintenus dans des pièges immatériels de lumière ou de champs magnétiques et bien isolés de l'environnement, les gaz quantiques sont enfin des systèmes idéaux pour la préparation d'états avec des corrélations quantiques, qui pourraient être exploitées pour améliorer encore la précision des instruments de mesure basés sur des capteurs atomiques. Au-delà des sujets que nous avons évoqués, un grand éventail de recherches repose sur les atomes froids, dont des exemples notables sont les systèmes d'atomes de Rydberg, les ions et les molécules froides. Enfin, les fluides quantiques d'excitons-polaritons dans des microcavités semi conductrices, partagent certaines propriétés avec les superfluides atomiques et d'autres avec les systèmes d'optique quantique. Notamment, il s'agit de systèmes ouverts qui bénéficient de l'arsenal de l'optique quantique pour détecter les fluctuations quantiques et l'intrication. Parmi les nombreuses directions de recherche avec ces systèmes, nous citons celle de la "gravité analogue", qui permet d'étudier la propagation de

champs dans des espaces courbés en laboratoire, en simulant ainsi la propagation à proximité d'un trou noir ou dans un univers en expansion.

3. Métrologie et test fondamentaux

La métrologie rapproche la recherche appliquée et fondamentale, combinant des projets d'intérêt sociétal avec des recherches visant à repousser les limites actuelles des connaissances des lois de la nature. Les expériences ultra précises de métrologie contribuent ainsi à tester des théories au-delà du modèle standard de la physique des particules (quêtes de la matière noire), le principe d'équivalence et l'électrodynamique quantique. Les tests de variation des constantes fondamentales dans le temps et dans l'espace peuvent apporter des indices précieux sur des phénomènes physiques encore inexplorés. De nombreux projets permettront de tester les lois fondamentales de la physique à diverses échelles, allant des plus petites, utilisant des capteurs développés en laboratoire, jusqu'aux plus grandes, avec des dispositifs métrologiques employés dans des missions spatiales. Et même au-delà : avec l'interférométrie optique à très longue base, l'interféromètre LISA permettra de détecter les signaux issus de la coalescence des trous noirs supermassifs. La majorité des protocoles utilisés pour étudier la physique fondamentale, que ce soit dans des dispositifs de type horloges ou des interféromètres à ondes atomiques, utilisent la superposition cohérente d'états. Parmi les enjeux des années à venir citons l'augmentation du temps de cohérence, l'augmentation du nombre de systèmes quantiques participant à la mesure (taille des nuages d'atomes, flux de jets atomiques pour les interféromètres atomiques), ou encore l'utilisation de l'intrication pour gagner en précision, notamment les effets optomécaniques et de squeezing basse fréquence. Ces dernières ont déjà des applications directes pour la détection optique des ondes gravitationnelles.

Avec les améliorations incessantes des horloges atomiques, la fréquence est depuis plusieurs décennies la grandeur physique mesurée de la manière la plus précise. Beaucoup d'autres mesures de précision se ramènent à des mesures de fréquence. La France dispose d'une longue tradition et d'une grande expertise dans le domaine des horloges atomiques micro-ondes, qui aujourd'hui continue avec le développement des horloges optiques. Bénéficiant d'un grand facteur de qualité, ces horloges affichent une précision relative de l'ordre de quelques 10^{-19} , avec des

progrès visant une stabilité en dessous de 10^{-20} dans les années à venir. Une feuille de route a déjà été établie pour redéfinir la seconde utilisant des horloges optiques. Outre les horloges développées en laboratoire, depuis plusieurs années on assiste au déploiement à grande échelle du réseau REFIMEVE, qui réalise la dissémination à grande échelle d'une référence de fréquence ultra stable par le réseau fibré internet. Un grand nombre de structures de recherche bénéficie de ce réseau, et ce dans tout le territoire et au niveau européen, dans des domaines de recherche très variés, ainsi qu'à la réalisation des comparaisons entre horloges atomiques distantes et sur le long terme, exploités dans des tests fondamentaux. D'autres projets visent par ailleurs à créer des horloges compactes et transportables, ou encore ont vocation à être envoyées dans l'espace (c'est le cas, par exemple, de ACES-PHARAO dont le lancement initialement prévu en 2016 a été reporté en 2025).

L'interférométrie atomique est un autre domaine porteur, dans lequel la France a d'importantes compétences. Les interféromètres atomiques utilisent des ondes de matière pour mesurer des forces ou des déplacements extrêmement faibles avec une très grande précision. On peut réaliser ainsi des senseurs inertiels (comme les gyromètres, gradiomètres, gravimètres, etc.) qui servent dans des nombreuses applications, mais aussi dans des projets de physique fondamentale. Les interféromètres atomiques permettent ainsi d'effectuer des mesures de forces à courte distance, entre une particule et une surface, de tester les différentes théories de la gravitation ou la force de Casimir. La construction de nouveaux détecteurs d'ondes gravitationnelles basés sur l'interférométrie atomique permettra d'étendre la plage de détection vers les basses fréquences. Un autre exemple est la mesure du rapport h/M (où h est la constante de Planck et M la masse d'un atome d'une espèce atomique donnée), qui est déterminé via des mesures très précises du recul atomique à l'aide d'un interféromètre atomique à grand transfert d'impulsions. Ces mesures ont à la fois un intérêt métrologique (définition du kg) et fondamental - car ils constituent un moyen de déterminer la constante de structure fine, α , importante dans les tests de l'électrodynamique quantique ou de l'anomalie du moment magnétique de l'électron. Des applications récentes de la métrologie visent des mesures de l'accélération de la chute libre d'atomes d'antihydrogène dans le champ gravitationnel terrestre pour tester le principe d'équivalence avec

de l'antimatière. D'autres tests de physique fondamentale sont effectués par spectroscopie ultra résolue, et visent à mesurer le rayon du proton, la stabilité du rapport m_p/m_e (rapport de la masse du proton à celui de l'électron) permettant des tests des théories au-delà du modèle standard, et de la matière et énergie noires. Des systèmes moléculaires sont également sondés pour, entre autres, mesurer le moment dipolaire électrique de l'électron ou encore tester la non-conservation de la parité dans des molécules chirales.

4. Technologies quantiques

Initiées par des recherches fondamentales sur l'intrication quantique saluées par le prix Nobel 2022, les technologies quantiques ont connu ces dernières années un développement remarquable à la croisée de différents domaines de recherche couverts par plusieurs sections du CNRS (02, 04, 05, 08). Leur fort rôle structurant s'est manifesté par la création du GDR TeQ, la mise en place du PEPR "Technologies Quantiques" dans le cadre de la stratégie nationale sur les technologies quantiques et le lancement du Quantum Flagship européen.

Les principaux enjeux de cette thématique à savoir les capteurs et la métrologie, la communication et la cryptographie quantique, ainsi que la simulation et le calcul quantique, mobilisent un grand nombre d'acteurs de la recherche tant publique qu'industrielle. Cela a conduit à la création de plusieurs jeunes pousses dans le périmètre de la section (Muquans, Pasqal, Welinq, ...), soulignant son dynamisme dans ce domaine. Cette poursuite d'objectifs applicatifs doit néanmoins aller de pair avec le maintien d'une recherche fondamentale à long terme, à même de relever les défis complexes des différents axes de ce champ de recherche.

Capteurs et Métrologie quantique

Divers objets quantiques (atomes froids, photons, centre NV, systèmes opto-mécaniques, ...) sont utilisés comme capteurs afin de mesurer de manière ultra-sensible une grande variété de paramètres (Cf. partie métrologie). Certains de ces systèmes sont déjà commercialisés soulignant la maturité d'un axe où la recherche française académique et industrielle sont très bien positionnées. Plusieurs défis restent à relever. Le premier, porte sur la réduction de la taille et de la complexité des dispositifs pour permettre leur intégration et leur déploiement, ce qui doit s'accompagner de la recherche de nouvelles plateformes émergentes. La métrologie améliorée

par l'intrication est également un enjeu majeur, offrant la perspective de capteurs quantiques dépassant la limite quantique standard grâce à l'utilisation d'états possédant des corrélations quantiques. Par ailleurs, la mise en œuvre d'architecture de capteurs distribués en réseau, éventuellement bénéficiant de corrélations quantiques, offre également des potentialités prometteuses.

Communication et cryptographie quantiques

Le transfert d'information quantique au travers de réseaux quantiques et sa sécurisation sont au cœur de la communication et de la cryptographie quantique. Les systèmes photoniques, fonctionnant généralement aux longueurs d'ondes "télécom", jouent un rôle central dans ce transfert et des systèmes de cryptographie quantique sont déjà commercialisés. Au niveau des nœuds du réseau, différentes architectures matérielles sont explorées pour développer des mémoires et des répéteurs quantiques, ouvrant de nouvelles perspectives de réseaux interconnectés. Les prochaines années verront des efforts de miniaturisation des composants optiques et leurs intégrations dans des circuits photoniques multifonctionnels pour un déploiement à grande échelle.

Simulations et calcul quantiques

Le niveau de précision atteint dans le contrôle des systèmes quantiques individuels (atomes et ions piégés, photons, ...) permet d'envisager l'élaboration de processeurs quantiques pour implémenter certains algorithmes de calcul quantique. Les applications potentielles ont motivé un investissement sans précédent des acteurs privés et publics. Cependant, les défis à relever restent nombreux et exigeants. Un défi majeur consiste en le passage à l'échelle pour réaliser des processeurs à plusieurs milliers voire millions de qubits logiques. Les limitations matérielles inhérentes aux différentes plateformes physiques font du développement de codes d'erreurs un enjeu crucial pour améliorer la fidélité des portes quantiques. Ces développements doivent être menés de pair avec l'exploration fondamentale de plateformes physiques nouvelles potentiellement révolutionnaires. Dans le domaine des simulations quantiques, où l'on vise à réaliser des hamiltoniens modèles à l'aide de systèmes quantiques contrôlés, un des défis consiste à développer et à implémenter des algorithmes pour les plateformes NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum), permettant d'étendre le champ des simulations

quantiques au-delà de la traditionnelle physique à N corps, notamment à la chimie quantique.

En lien avec ce domaine des technologies quantiques, qui en assure à la fois les fondations et leur prolongement, on peut souligner les apports fondamentaux toujours renouvelés de l'optique quantique, de l'interaction photon-matière dominée par les processus quantiques et de l'optomécanique. Enfin, on voit naître le concept d'une thermodynamique des systèmes quantiques en relation avec le développement de technologies quantiques durables.

II. Physico-Chimie des molécules, agrégats et nanoparticules

La physique moléculaire évolue traditionnellement grâce aux développements expérimentaux et théoriques. Les études récentes dépassent les mécanismes élémentaires et se portent sur la compréhension de mécanismes complexes à l'œuvre en biologie, en astrophysique, au sein des atmosphères planétaires ou terrestres et en nanosciences. L'un des points communs aux développements expérimentaux réside dans un meilleur contrôle des conditions de production et de caractérisation des espèces, avec notamment les trappes à ions refroidies à température cryogénique, les agrégats d'hélium superfluide, les matrices quantiques de para hydrogène, les écoulements de type CRESU ou la fonctionnalisation et l'assemblage sur surface.

Les sources d'excitation utilisées par la communauté sont très diverses : collisions atomiques, les synthétiseurs de micro-onde, les techniques d'amplification par dérive de fréquence (« chirped pulse »), les lasers THz-IR-Visible, les lasers à cascade quantique, le développement des peignes de fréquences stabilisés sur les références ultra-stables, les cavités optiques de haute finesse, les chaînes de lasers ultra rapide femtoseconde ou attoseconde ainsi que le rayonnement synchrotron à très large gamme spectrale comme SOLEIL (du THz au rayons X) et les sources lasers à électron libre dans l'IR (CLIO) et les XFEL. Les méthodes théoriques sont développées pour attribuer les spectres expérimentaux en termes de structures moléculaires et pour interpréter les processus réactionnels.

1. Spectroscopie à haute résolution spectrale

La spectroscopie à haute résolution permet d'accéder à la détermination précise de la structure des molécules ou des complexes. Grâce aux études

de spectroscopie quantitative en intensité et en profil de raies, et aux modèles théoriques développés en parallèle, des applications très diverses sont possibles. Cela comprend la détection de molécules – parfois en très faibles quantités – le contrôle de la qualité de l'air ou d'un processus industriel, la mesure des variations des rapports isotopiques, la concentration de molécules présentes à l'état de traces dans des échantillons gazeux pour des applications dans le domaine médical, la chimie des atmosphères terrestre et planétaires ainsi que les géosciences. Les expériences réalisées sont complétées par une approche théorique basée sur des calculs de chimie quantique pour pouvoir simuler les spectres et les comparer aux résultats expérimentaux. En lien étroit avec les expériences, la modélisation a fait des avancées considérables. De nouvelles méthodologies voient le jour pour traiter les espèces moléculaires, neutres ou radicalaires. Elles combinent calculs ab initio, densité de fonctionnels de haut niveau et calculs variationnels avec des développements d'Hamiltonien quantiques effectifs qui permettent de reproduire les données spectrales observées à leur précision expérimentale. A cela s'ajoute l'extraction des paramètres spectroscopiques alimentant, de manière toujours croissante, les banques de données internationales (HITRAN, JPL, CDMS, LSD, GEISA ...). La modélisation théorique permet de traiter des états ro-vibrationnels ou électroniques hautement excités et donne accès à l'étude d'atmosphères planétaires « chaudes » ou de milieux à haute température. L'intelligence artificielle (IA) ouvre aussi de nouvelles possibilités pour utiliser les données expérimentales et théoriques comme base d'entraînement pour améliorer les prédictions théoriques et l'identification autonome de composés chimiques dans les spectres expérimentaux à différentes longueurs d'ondes. L'avènement des Lasers à Cascade Quantique, stabilisés sur des peignes de fréquences optiques référencés aux standards primaires de fréquences est à l'origine d'une révolution en spectroscopie moléculaire à très haute résolution. Couplé aux méthodes de refroidissement de molécules, ceci offre des performances ultimes en termes d'exactitude et de stabilité de fréquence et permet de réaliser des tests ultimes de physique fondamentale comme la détermination du moment dipolaire de l'électron et la non conservation de la symétrie de parité dans les molécules chirales.

2. Dynamiques électroniques et nucléaires

La technologie attoseconde fournit de nouveaux outils pour explorer la photophysique moléculaire. Le suivi de la dynamique des électrons à l'échelle de l'attoseconde est une observable physique prometteuse qui ouvre un nouveau champ d'investigation. La mesure de l'amplitude et de la phase du paquet d'ondes électronique est une sonde sensible du potentiel moléculaire à l'échelle de l'Angström. La spectroscopie de photoélectron avec détection de l'angle d'émission est sensible à la fois à la structure électronique, aux structures moléculaires (isomères, conformères, agrégats), et aux dynamiques vibrationnelles et électroniques. Cette technique a été appliquée avec succès à la caractérisation de molécules chirales présentant une forte asymétrie en fonction de l'énantiomère et de l'hélicité de la lumière ionisante. Les sources de lumières attoseconde fournissent aussi la résolution spatio-temporelle requise pour développer de nouvelles approches de cartographie bidimensionnelle d'orbitales moléculaires en analysant l'énergie, l'intensité et la phase de lumière UVX émises par des molécules alignées et soumises au champ laser intense.

Dans le domaine des rayons X, la spectroscopie Auger résonante a été utilisée pour accéder aux changements dynamiques de la structure électronique dans les molécules suite à une excitation de cœur. Cette spectroscopie est utilisée comme sonde des effets de corrélations électron-électron et les corrélations électron/noyaux sur des échelles de temps attosecondes et femtosecondes et est sensible aux effets de conjugaison et d'hyperconjugaison dans les molécules aromatiques excitées.

Les processus dynamiques associés aux mécanismes réactionnels dans l'UV évoluent sur des échelles de temps plus longues. On peut observer des processus de relaxation électronique et vibrationnelle, de transfert d'électron et de proton, de photo ionisation et photo fragmentation ou d'isomérisation, l'interaction de molécules aux interfaces solides métalliques ou semi-conductrices en lien avec la photocatalyse, la plasmonique chimique, le photovoltaïque et la nanophotonique, non seulement aux temps courts mais aussi d'une manière continue sur les temps longs (jusqu'à la seconde).

L'étude théorique des états excités des molécules est cruciale pour compléter les expériences et éclairer de nombreux processus fondamentaux. La photosynthèse, la vision humaine, le

photovoltaïque ou la photostabilité des molécules du vivant sont le résultat de réactions induites par la lumière. La caractérisation des états électroniques excités, les couplages non-adiabatiques, reste un domaine encore difficile à appréhender, notamment par la coexistence d'échelles de temps multiples qui nécessite un développement méthodologique important. La dynamique moléculaire classique est un outil incontournable pour étudier l'évolution temporelle de molécules organiques, biomolécules ou les matériaux. L'intelligence artificielle (IA) s'est révélée comme un outil de choix pour permettre des simulations plus précises, avec l'obtention de champ de forces nécessitant peu de calcul ab initio pour des molécules de tailles moyennes, plus rapide avec l'optimisation des méthodes d'échantillonnages d'événements rares voire la suppression de l'échantillonnage grâce au « Boltzmann generator », et des systèmes plus larges sur des échelles de temps plus grandes. L'utilisation de l'IA pour optimiser une fonction d'onde multiélectronique par calcul Monte Carlo variationnel montre un potentiel prometteur pour le calcul des états électroniques moléculaires.

3. Champs d'application de la physique moléculaire

La spectroscopie s'est imposée comme un domaine incontournable pour l'étude des spectres enregistrés par les observatoires astrophysiques (ALMA, NOEMA) ou encore les observatoires spatiaux comme le télescope James Webb (JWST) lancé récemment. La spectroscopie est indispensable pour détecter et déterminer les abondances de molécules organiques complexes dans le milieu interstellaire ou les comètes et pour caractériser les atmosphères planétaires et exoplanétaires pour lesquels la détermination des continua d'absorption reste à poursuivre. Il s'agit ensuite pour la phase diluée de déterminer les sections efficaces d'ionisation et de dissociation de molécules isolées ou d'agrégats, et de mesurer les rapports de branchements.

Les études liées à l'atmosphère terrestre dans le contexte actuel lié aux changements climatiques sont essentielles et nécessitent une précision extrême sur les profils spectraux, expérimentalement mais aussi en termes de modèles théoriques. Enfin, il y a un intérêt croissant pour l'étude des composés précurseurs des aérosols organiques secondaires et de leur micro-solvatation dans le but de comprendre la formation des particules atmosphériques de taille

inférieur au micron, particules dont les effets sont attestés sur la qualité de l'air et la santé.

Les développements actuels des études de molécules d'intérêt biologique couvrent un large spectre allant de la spectroscopie de glycanes et de molécules chirales en phase gazeuse, d'ions biomoléculaires isolés ou au sein de complexes non covalents refroidis en trappe, sélectionnés en taille et en conformation qui permet d'établir le lien entre structure et propriété photophysique tel que la dynamique de transfert de charges (électron/proton) sondée sur dix ordres de grandeurs. En lien direct avec des problématiques rencontrées en biologie, des études ont porté sur la détection de molécules uniques géantes telles que les capsides virales et sur le couplage de la mobilité ionique avec la spectroscopie laser avec des implications structurales et analytiques importantes pour l'utilisation des glycanes par exemple dans le domaine pharmaceutique.

La maturité des techniques et des connaissances acquises sur les systèmes isolés permet de se projeter vers l'étude de systèmes moléculaires encore plus complexes. Cette complexité peut venir à la fois de la densité et de la dimensionnalité du système (phase condensée liquide, solide ou aux interfaces), de la nature des molécules (polymères organiques, inorganiques, biomolécules) ou par la formation de systèmes hybrides avec des composés métalliques (catalyse), semi-conducteur (électronique) ou plasmonique (nanophotonique). Des méthodes optiques couplées ou non avec la microscopie en champ proche, permettent maintenant de sonder l'émission de lumière de molécules individuelles sur des surfaces (fluorescence, Raman, optique non-linéaire) suite aux transferts de charge et d'énergie. A l'avenir, la dynamique femtoseconde à l'échelle de la molécule unique sera accessible pour résoudre les processus photo physiques ultrarapides dans des systèmes d'intérêt pour la production d'énergie ou l'électronique moléculaire. L'étude des phases liquides, cristallines et amorphes de l'eau peut être réalisée par spectroscopie vibrationnel du mode OH qui est une sonde très sensible des distances intermoléculaires et par spectroscopie non-linéaire (seconde harmonique ou somme de fréquence). Enfin les sources FEL (laser à électrons libres) sont également utilisées pour étudier la structure et la dynamique de l'eau liquide à l'échelle de la femtoseconde.

III. Optique non linéaire, lasers, photonique, imagerie

1. Sources lasers

L'activité récente autour du développement de sources lasers est extrêmement féconde, portée en cela par de nombreux champs applicatifs et interdisciplinaires : biologie, communications, physique des plasmas, environnement ou médecine, pour n'en citer que quelques-uns.

Des études spectroscopiques approfondies sont consacrées à l'optimisation de nouveaux matériaux lasers, notamment des ions de terres rares et des métaux de transition dans divers types de matrices. L'étude de sources THz utilisées notamment en imagerie connaît un intérêt croissant : lasers à cascade quantique, dispositifs optoélectroniques basés sur des transitions inter-sous bandes, ou dispositifs non-linéaires. Certaines sources gagnent en maturité et permettent de reconsidérer diverses applications : lasers organiques accordables à capsules jetables, lasers pompés par LED (diode électroluminescente) à haute efficacité énergétique, lasers en guides d'onde femtosecondes ultra compacts, ou même des lasers aléatoires reposant sur l'utilisation de milieux très désordonnés mais dont les modes spatiaux sont néanmoins finement contrôlés. Les résultats du NIF [National Ignition Facility ; du laboratoire national Lawrence Livermore (LLNL)], en Californie sur la fusion inertielle ont également provoqué un regain d'intérêt pour les architectures laser de forte énergie, compatibles avec ces applications.

En plus d'augmenter l'intensité crête disponible, les recherches sur les sources cohérentes ultrabrèves visent à gagner en puissance moyenne, grâce à l'essor de matrices dopées Yb, et à étendre la gamme spectrale accessible en utilisant des phénomènes d'optique non linéaire. Les sources non-linéaires permettent ainsi aujourd'hui de couvrir une large part du spectre électromagnétique et servent d'injecteur pour la génération d'harmoniques d'ordre élevées, dans les gaz ou les cristaux, permettant de délivrer des impulsions de durée attoseconde dans le domaine XUV. Elles permettent aussi la réalisation de peignes de fréquences robustes adaptés à une grande variété d'applications allant de l'astrophysique aux impulsions attosecondes en passant par la spectroscopie moléculaire à large bande spectrale. Ces développements s'accompagnent de la conception de techniques de

façonnage temporel, d'amplification en régime ultra-court et de combinaison cohérente. Enfin, d'importants efforts de métrologie sont mis en œuvre afin de mesurer précisément les propriétés spatiales, temporelles et spatio-temporelles du champ électrique.

2. Processus optique non linéaire et complexité

Le champ de l'optique linéaire et non-linéaire est en progression constante. Il bénéficie des récentes avancées des sources laser qui délivrent de plus en plus de puissance, de pureté spectrale, d'accordabilité et de possibilités de fonctionnement innovant. Les récents développements témoignent de sa transversalité et son interdisciplinarité, couvrant plusieurs domaines allant de la chimie jusqu'à la biologie en passant par la physique des plasmas et l'hydrodynamique. Des progrès récents sont obtenus grâce à une activité de recherche soutenue dans l'étude de la propagation d'ondes dans les milieux complexes ou désordonnés. La complexité ou le désordre dans les systèmes optiques qui, pendant longtemps, ont été évités par les chercheurs sont ici mis à profit pour mettre en évidence le surprenant phénomène de localisation d'ondes dans ces milieux.

L'optique non linéaire a également vu des avancées importantes à la fois sur les plans théorique et expérimental qui ouvrent la voie à la compréhension des phénomènes complexes en optique extrême et plus généralement à la compréhension des processus non linéaires fondamentaux au-delà du domaine de l'optique (turbulence d'ondes, gaz de solitons, ondes scélérates, événements extrêmes). On peut notamment mentionner un développement important de l'étude et du contrôle des phénomènes d'optique non linéaire en régime multimode.

3. Nano-optique

La nano-optique a bénéficié des progrès récents dans les domaines des nanomatériaux et de la nanostructuration de surfaces. Cette thématique est de plus en plus multidisciplinaire, tant en termes de concepts que d'applications en biologie, en catalyse, en photonique et pour les capteurs ou l'optoélectronique.

L'un des aspects cruciaux de la nano-optique est la capacité à manipuler les interactions entre la lumière et la matière à l'échelle nanométrique. Ceci englobe des domaines tels que le nano-magnétisme, qui permet le contrôle optique des

couches magnétiques à l'échelle nanométrique, la création de nanodispositifs pour les technologies quantiques, notamment des sources efficaces de photons uniques, et le développement de métasurfaces, qui permettent de contrôler le front d'onde de la lumière et de créer des méta-lentilles ultraminesces. Sur ce domaine, on peut notamment citer les nouveaux concepts de désordre corrélé. Un autre domaine de recherche important en nanophotonique concerne la manipulation locale de la polarisation de la lumière, avec l'émergence du concept de lumière superchirale visant à maximiser les interactions entre la lumière et la matière chirale à l'échelle nanométrique. Des efforts considérables sont également déployés pour combiner des techniques d'optique ultrarapide à l'échelle nanométrique, ce qui permet de générer des phénomènes hautement non linéaires en manipulant, par exemple, l'enveloppe des impulsions lumineuses. Ces expériences sont souvent réalisées à l'aide de pointes à effet tunnel (STM), soulignant l'importance croissante dans ce domaine des interactions électrons-photons. Les travaux relatifs au contrôle de photocourants à l'échelle nanométrique, à l'excitation électronique de molécules fluorescentes, ainsi que des techniques de microscopie à photoélectrons (PEEM) et de spectroscopie de perte d'énergie des électrons (EELS) s'inscrivent dans cette même tendance. Aussi, l'optomécanique joue un rôle clé en nanophotonique, avec des recherches portant sur la lévitation de nanoparticules par piégeage optique et leur refroidissement par réduction de leur mouvement, ouvrant la voie à des expériences de mécanique quantique sur des objets nanométriques.

Ces dernières années, la nanophotonique a également vu l'émergence de nouveaux matériaux prometteurs pour le contrôle de la lumière à l'échelle nanométrique : nouveaux métaux plasmoniques, matériaux diélectriques à fort indice optique, matériaux bidimensionnels tels que le graphène et le nitrure de bore hexagonal.

4. Imageries et biophotonique

L'essor des méthodes d'imagerie se poursuit et permet de comprendre de plus en plus finement de nombreux phénomènes biologiques, sur des échelles spatiales et temporelles très diverses. Cette évolution bénéficie des progrès des sources lasers et des technologies des capteurs et du traitement de données. Elle se fait également en lien avec les nombreuses études sur la propagation

en milieu complexe et les méthodes d'ingénierie du front d'onde pour l'imagerie en milieu diffusant.

Les géométries et les phénomènes physiques utilisés pour former les images sont de plus en plus divers : l'ingénierie de molécules fluorescentes permet d'obtenir des images résolues au-delà de la limite de diffraction, à l'échelle nanométrique, ainsi que le ciblage de certains constituants par marquage fluorescent. Ainsi les microscopies super-résolues basées sur la localisation de molécules uniques par contrôle de leur émission ou par déplétion sélective, continuent à avoir un essor important. Elles donnent l'accès à de nouvelles informations spectrales et de durée de vie à l'échelle nano et sont en plein développement pour s'étendre à des échantillons biologiques complexes in-vivo. L'excitation de ces marqueurs à plusieurs photons permet de gagner en profondeur de pénétration dans l'échantillon et de sectionner l'image.

De façon complémentaire, les techniques sans marqueurs continuent de se développer de façon importante, et leur sélectivité réside dans la nature de l'interaction non-linéaire à l'origine de l'image : génération de second ou troisième harmonique, effet Raman stimulé, spectroscopie Raman anti-Stokes. De plus en plus d'information structurale sur l'échantillon parvient à être récoltée, en associant plusieurs des techniques susmentionnées (imagerie multimodale), en implémentant des mesures sensibles à l'état de polarisation, ou encore en ajoutant la résolution spectrale. Toutes ces méthodes visent à établir des images ou des volumes de plus en plus résolus, sur un champ large, en profondeur, avec une vitesse d'acquisition permettant d'étudier des organismes vivants.

Au-delà et en plus de l'observation, la lumière est également utilisée pour contrôler l'activité de neurones génétiquement modifiés pour exprimer des protéines photo-activables. Ce domaine nommé optogénétique a un fort impact sur le progrès des neurosciences.

La physico-chimie des biomolécules est également un domaine en expansion, allant de l'étude de molécules fluorescentes photo-stables pour l'imagerie à la compréhension des processus biologiques moléculaires, par exemple l'étude de la conformation et de la dynamique de l'ADN ou des protéines. Ce dernier champ d'étude repose sur l'utilisation de méthodes de spectroscopies résolues en temps multi-échelles avancées.

IV. Plasmas chauds

1. Fusion par confinement magnétique

Développer la fusion thermonucléaire contrôlée pour la production d'électricité décarbonée est à la fois un défi scientifique et technique et un enjeu sociétal majeur du 21^{ème} siècle. Il s'agit à la fois de limiter le changement climatique et ses effets délétères et de fournir une source d'énergie propre et abondante pouvant prendre le relais des énergies fossiles non renouvelables.

En ce qui concerne la fusion par confinement magnétique, le programme ITER en construction à Cadarache, sur lequel collaborent trente-cinq pays, demeure le programme de référence. Il doit sur la base de lois d'échelle déduites des données d'opération obtenues durant des années sur les tokamaks les plus performants au monde aboutir à produire une énergie de fusion dix fois plus importante que l'énergie injectée dans le plasma. Ce gain se fait ici au prix d'une augmentation du volume, et donc du coût de construction, de la machine. Le volume du plasma dans ITER est de 830m³, alors qu'il est au plus de 100m³ dans les plus grands tokamaks ayant fonctionné, JET et JT-60U. Ceci induit des contraintes d'ingénierie majeures dans la construction de la machine qui sont une explication au retard dans l'avancement du projet. En parallèle, on assiste à une émergence au niveau mondial de projets alternatifs, plus ou moins robustes scientifiquement, visant à atteindre la production d'électricité par la fusion avec, en 2023, une quarantaine de start-ups adhérant à la « Fusion Industry Association ». Ceci induit une situation nouvelle où doivent coexister un milieu scientifique ouvert, faisant de la recherche fondamentale, et des entreprises à but commercial en devenir qui n'ont pas nécessairement intérêt à détailler leurs approches ou diffuser leurs résultats.

Sur le plan scientifique, un plasma de fusion par confinement magnétique est un système physique particulièrement riche. Sur le plan expérimental, diagnostiquer un milieu confiné de façon non intrusive est une science en soi. Sur le plan de la simulation numérique comme sur le plan théorique, la difficulté peut être considérée comme supérieure à celle rencontrée dans la turbulence des fluides neutres (qui reste un problème ouvert). En effet, il faut adjoindre à la modélisation de la dynamique des particules chargées celle des champs électromagnétiques dans un couplage auto-cohérent. De plus, la description fluide des plasmas peut être mise en

défaut par des effets cinétiques dont des manifestations sont l'amortissement Landau ou le piégeage résonant de particules.

Au niveau national, les activités de recherche pluridisciplinaires sur la fusion par confinement magnétique sont coordonnées par la fédération de recherche pour la fusion par confinement magnétique (FR-FCM) sur le large spectre de thématiques nécessaire à la réalisation d'un réacteur de fusion (physique de la turbulence et de la dynamique non-linéaire, des processus atomiques, des surfaces et des matériaux). Ces recherches expérimentales, numériques et théoriques intègrent de plus en plus, comme c'est le cas dans d'autres domaines de recherche, des outils d'intelligence artificielle (IA). Leur motivation est à la fois de contribuer à la réussite d'ITER et de mener une recherche fondamentale pour expliquer des phénomènes encore imparfaitement compris tels que la transition entre le mode de bas (L) et de haut (H) confinement (transition L-H), les conditions d'apparition ou d'évitement des « edge-localized modes » (ELMs) en mode H, les bénéfices pour le confinement d'une section poloïdale de triangularité négative ou l'existence d'une limite de densité (appelée limite de Greenwald) bridant les performances de la fusion. Les recherches actuelles s'attachent aussi à étudier les effets des impuretés et proposer des scénarios limitant leur production. Par ailleurs, dans la perspective d'un fonctionnement en réacteur, un défi important est celui de l'évacuation rapide de la chaleur et de l'approvisionnement adéquat de la machine en tritium. Il motive des recherches pionnières et exigeantes sur le plan de l'ingénierie sur l'usage de parois en métal liquide offrant des avantages potentiels en termes de conductivité thermique et de compatibilité avec le tritium.

L'entrée en jeu de start-ups de fusion par confinement magnétique soutient désormais aussi une recherche exploratoire vers des dispositifs, concepts et configurations magnétiques plus compacts et donc moins coûteux. Dans ce cadre, un évènement notable a été le lancement fin 2023, du PEPR SupraFusion, porté par le CNRS et le CEA, pour étudier la faisabilité d'une centrale à fusion compacte à fort champ magnétique, pouvant permettre une réduction drastique des coûts.

2. Physique aux hautes densités d'énergie

Les hautes densités d'énergie se définissent au-delà de l'eV/ Å³, rapport caractéristique de l'énergie de liaison d'une molécule par son volume. Elles correspondent à des pressions dépassant 1

Mbar, atteignables en laboratoire grâce aux lasers de puissance. Si l'on omet les ultra-hautes intensités discutées ultérieurement, la physique des hautes densités d'énergie emploie principalement des lasers haute énergie (\geq kJ) nanosecondes. La France a été pionnière dans le développement de ces installations, ouvrant la voie à des recherches en fusion inertielle, astrophysique et planétologie de laboratoire, matière dense et tiède, et physique atomique des plasmas chauds.

La fusion par confinement inertiel a été essentielle au développement des lasers de puissance et de la physique des plasmas chauds en France. Un nouvel élan émerge, stimulé par l'*ignition* obtenue récemment à la National Ignition Facility (NIF) aux États-Unis, les progrès des technologies laser et le besoin d'énergie bas-carbone. Atteindre une production industrielle d'énergie de fusion implique de surmonter de grands défis physiques et technologiques. Il est impératif d'augmenter significativement le gain des réactions de fusion, visant des gains de 100 voire plus, tout en menant ces expériences à haute cadence, plusieurs fois par seconde. Cela nécessite des avancées technologiques des lasers et une simplification du design de cibles pour garantir fiabilité et robustesse. Maîtriser l'interaction laser-plasma et la physique de l'implosion est essentiel et requiert une compréhension profonde des instabilités paramétriques et hydrodynamiques, des équations d'états des plasmas chauds et denses, et des processus de transport et de dépôt d'énergie dans ces plasmas. Le développement d'outils de simulation avancés et l'amélioration des capacités expérimentales et de diagnostics sont indispensables. Parallèlement, il faut explorer les technologies laser émergentes et de renforcer les collaborations avec les industriels français et les organismes de recherche comme le CEA/DAM. Ces efforts, au-delà de la fusion inertielle, permettront de développer des thématiques connexes.

C'est le cas de l'astrophysique de laboratoire avec notamment des études sur les chocs hydrodynamiques, magnétisés ou radiatifs rencontrés dans les restes de supernovæ ; les processus d'accrétion et jets de plasma tels que rencontrés dans les étoiles en formation et certains objets compacts ; la turbulence, omniprésente à toutes les échelles de l'Univers. Instabilités plasmas, chocs non-collisionnels et reconnexion magnétique sont également étudiés pour mieux comprendre l'origine des rayons cosmiques, des éruptions solaires et des émissions électromagnétiques associées. Des études sont

aussi menées sur des plateformes complémentaires comme Apollon pour explorer les régimes relativistes ou les opacités stellaires.

L'utilisation des lasers de puissance couplés à des sources X (synchrotron ou FEL) offrent également des opportunités pour l'étude de la matière dense et tiède (de l'eV à quelques dizaines d'eV). La matière est alors dans un état partiellement ionisé et fortement corrélé, rendant sa modélisation complexe. Or, ces conditions sont caractéristiques des intérieurs planétaires et mieux connaître les propriétés (structure, équations d'état, conductivité etc.) des différents matériaux pertinents pour la planétologie (fer, eau, ammoniac) dans ces conditions est important pour contraindre les modèles de structure et de formation planétaire. Cette recherche est particulièrement opportune eu égard aux nouvelles missions vers les planètes géantes du système solaire et la découverte de nombreuses exoplanètes. De plus, elle ouvre des perspectives prometteuses en physique des matériaux, e.g. pour explorer leurs mécanismes de rupture, ou pour la chimie du Mbar avec des applications en synthèse de matériaux innovants.

On notera enfin les études de physique atomique portant sur les opacités et émissivités des plasmas chauds et ses applications aux opacités stellaires, à la physique des cavités en fusion inertielle ou aux pertes radiatives en fusion magnétique.

La physique des hautes densités d'énergie est donc une physique riche, avec des interfaces disciplinaires multiples, et des applications à fort impact sociétal et technologique. La communauté française a aujourd'hui des atouts importants : installations multi-kJ, formation de qualité, expérience académique et industrielle, et devrait se voir renforcée par le développement de nouvelles installations multi-kJ nationales ou européennes, potentiellement couplées à des XFEL, et les opportunités nouvelles en fusion inertielle.

3. Plasmas sous ultra-haute intensité laser

Soumis à des impulsions laser de très haute intensité, au-delà de 10^{18} W/cm², les plasmas sont le siège de processus d'accélération de particules et de génération de rayonnement. Différentes stratégies sont étudiées pour développer des sources secondaires, prometteuses pour de nombreuses études fondamentales, de l'astrophysique à l'électrodynamique quantique (QED) en champs forts.

L'accélération laser-plasma a aujourd'hui atteint une certaine maturité. Grâce à des champs électriques dépassant de plus de trois ordres de grandeurs ceux des accélérateurs radiofréquences, utilisés sur une dizaine de centimètres de plasma sous-dense (densité gaz) dans l'accélération par sillage laser, des énergies de l'ordre de 10 GeV ont été atteintes pour les électrons. Sur cible solide, la barrière des 100 MeV pour les protons a été dépassée. L'accélération plasma est aujourd'hui considérée comme très prometteuse pour produire des qualités extrêmes, en particulier pour l'émission et la brillance pic du faisceau. La démonstration d'une photocathode plasma, surpassant la qualité des faisceaux produits par les accélérateurs conventionnels, ouvrirait une nouvelle voie pour cette thématique.

Les accélérateurs laser-plasma ont démontré leur potentiel dans divers domaines.

Les faisceaux d'électrons, utilisés comme diagnostics, sondent des phénomènes physiques avec une précision spatiotemporelle inédite (μm et fs). La génération de rayonnement X et gamma via les mécanismes bêta-tron et Compton a permis des études pompe-sonde, notamment de la matière dense et tiède et hors d'équilibre. De plus, l'obtention des premières preuves expérimentales de FEL UV et XUV utilisant l'accélération laser-plasma a marqué un tournant majeur pour le domaine, ouvrant la voie à une décennie de développements pour arriver à la saturation d'un XFEL.

Sur cibles solides, de nouveaux mécanismes d'accélération d'ions utilisant les lasers multi-PW ouvriront la voie à l'obtention de jets relativistes permettant d'étudier des instabilités plasma d'intérêt astrophysique. Ces jets pourraient également permettre d'atteindre une production abondante de neutrons en régime de spallation et d'étudier la nucléosynthèse d'éléments lourds.

Les lasers XUV amplifiant un faisceau harmonique dans un plasma pompé par laser offrent une source complémentaire aux FEL bien que moins performante. Dans un régime de pompage collisionnel à haute densité plasma et en utilisant un laser de pompe avec des couplages spatiotemporels permettant de contrôler la vitesse du pic d'intensité du laser pompe et de l'accorder à la propagation du faisceau harmonique, il est possible d'améliorer significativement l'extraction d'énergie et d'obtenir des durées d'impulsion sous la picoseconde.

Un objectif également majeur pour ces sources et accélérateurs plasma est d'augmenter leur

cadence, d'améliorer leur fiabilité, et de déployer des approches d'ingénierie et d'intelligence artificielle (IA) pour améliorer leur contrôle et performances. Le domaine a déjà progressé avec un accélérateur laser-plasma kHz à basse énergie, et l'optimisation ou la prédiction des performances par de l'apprentissage machine. Les gains potentiels de cette stratégie avec des lasers haute cadence et de puissance moyenne élevée pourraient permettre de nombreuses applications sociétales comme la radiothérapie à haut débit de dose.

Ces avancées permettent d'envisager des études de QED en champs forts, un sujet clé pour les projets de lasers multi-PW. Des champs électriques surpassant le champ de Schwinger pourraient entraîner la production spontanée de paires électron-positron depuis le vide. En pratique, ces champs sont atteignables dans le référentiel d'un faisceau d'électrons ultrarelativistes, menant à la production de photons gamma et de paires électron-positron (processus Compton et Breit-Wheeler non linéaires). L'objectif est donc double : obtenir des faisceaux d'électrons de très haute énergie et atteindre des champs et intensités extrêmes. Pour maximiser l'énergie des faisceaux d'électrons accélérés par laser, le guidage plasma et les couplages spatiotemporels sont essentiels pour surmonter les limites de diffraction et de déphasage. Des pistes comme la compression temporelle et spatiale de l'énergie laser via la génération d'harmoniques élevées et d'impulsions attosecondes focalisées par des miroirs plasmas sont explorées pour atteindre les intensités extrêmes. Ces développements pourraient conduire à des expériences inédites produisant abondamment photons gamma et jets, voire plasmas de paires. De même, ces développements pourraient également mener à des preuves expérimentales d'interactions photon-photon dans le vide et à l'exploration des régimes non-perturbatifs de la QED en champs forts.

ANNEXE :

Liste des DGR et Fédérations associés à la Section 04

<u>Fédération de physique André Marie Ampère</u>	<u>FRAMA</u>
<u>GDR2017</u>	<u>Lasers énergétiques et intenses et plasmas sous conditions extrêmes</u>
<u>GDR2080</u>	<u>Effets non-linéaires dans les fibres optiques</u>
<u>GDR3322</u>	<u>Ingénierie quantique: fondements et applications</u>
<u>GDR3533</u>	<u>Edifices Moléculaires Isolés et Environnés</u>
<u>GDR3575</u>	<u>Dynamique quantique dans les systèmes moléculaires: théorie, modélisation, simulation</u>
<u>GDR3731</u>	<u>Optomécanique et nanomécanique quantiques</u>
<u>GDR3754</u>	<u>Ultrafast Phenomena</u>
<u>GDR2117</u>	<u>Gaz quantiques</u>