



Institut de physique
Éléments de prospective

Séminaire de Cargèse, novembre 2017



TABLE DES MATIÈRES

Édito	3
Cartographie thématique des laboratoires de l'INP	4
Le métier de chercheur.e en physique aujourd'hui	6
Transport électronique, matière et cohérence quantiques, énergie	10
Régimes extrêmes	14
Systèmes complexes	18
Interface Physique Vivant	22
Présentation de l'ouvrage <i>Les jardins de la physique</i>	27
Interactions fondamentales et métrologie aux limites	28

Édito

Réunis à l'Institut d'études scientifiques de Cargèse en novembre 2017, une cinquantaine de physiciennes et de physiciens ont collectivement « levé la tête du guidon ». L'espace d'une petite semaine, ils ont fixé au loin l'horizon pour réfléchir sur notre métier en constante évolution et sur notre périmètre scientifique. Vous avez entre les mains les actes de ce séminaire. Il ne s'agit ni d'une vision prospective des activités de recherche des équipes de l'Institut de physique (INP), ni d'un livre blanc de la physique, et encore moins d'une liste exhaustive des thématiques sur lesquelles l'INP doit orienter ses moyens sur les années à venir. Ce document s'ouvre d'ailleurs sur une photographie du métier de chercheur.e en physique. Initialement nourri de longues discussions au sein de l'INP, ce texte a ensuite été présenté et largement discuté à Cargèse pendant le séminaire. Il ne constitue qu'une image, élaborée à un moment donné avec un échantillon limité de physiciennes et de physiciens. Nous avons toutefois la prétention d'imaginer qu'elle est à même de susciter réflexions et réactions.

L'aventure a en fait commencé il y a deux ans, à l'occasion de la préparation de la visite du comité international d'évaluation du CNRS fixée au mois de juillet. Au sein de l'Institut de physique s'initiait alors une réflexion sur les « grandes interrogations qui subsistent dans la compréhension des lois fondamentales qui régissent le monde dans lequel nous évoluons ». Convaincu de l'imperfection de nos analyses, nous avons décidé de poursuivre cette réflexion avec l'ensemble de l'équipe scientifique de la direction de l'INP, une vingtaine de personnes, avec comme point de mire le séminaire de prospective de novembre 2017. Nous avons commencé par définir le champ disciplinaire à aborder pour construire ce séminaire. Or, le champ d'application de la physique s'avère très large, allant des particules élémentaires à la cosmologie, en passant par les sciences de la matière et des ondes, jusqu'aux micro-technologies et aux processus chimiques et biologiques. Par ailleurs, s'il est évident que l'Institut de physique est concerné par cette discipline, d'autres instituts du CNRS se consacrent aussi grandement à la physique. Plutôt que d'élargir la réflexion à l'ensemble de ces communautés et par proximité avec les disciplines adjacentes, nous avons décidé de consacrer ce séminaire aux grands défis de la physique à moyen terme, observés et décrits depuis la communauté de l'Institut de physique.

Cinq champs thématiques ont été définis pour décrire notre horizon. Cela a une part d'arbitraire et n'a aucune prétention d'exhaustivité. Pour chacun de ces cinq défis, nous vous proposons un petit texte prospectif décrivant les grands défis et enjeux scientifiques que nous avons identifiés. Il y a probablement des manques, nous en sommes conscients. Mais l'ensemble de ces cinq textes nous semblent suffisamment pertinent pour nous convaincre qu'il pourra vous être utile et vous aider dans la définition de la stratégie scientifique de votre laboratoire.

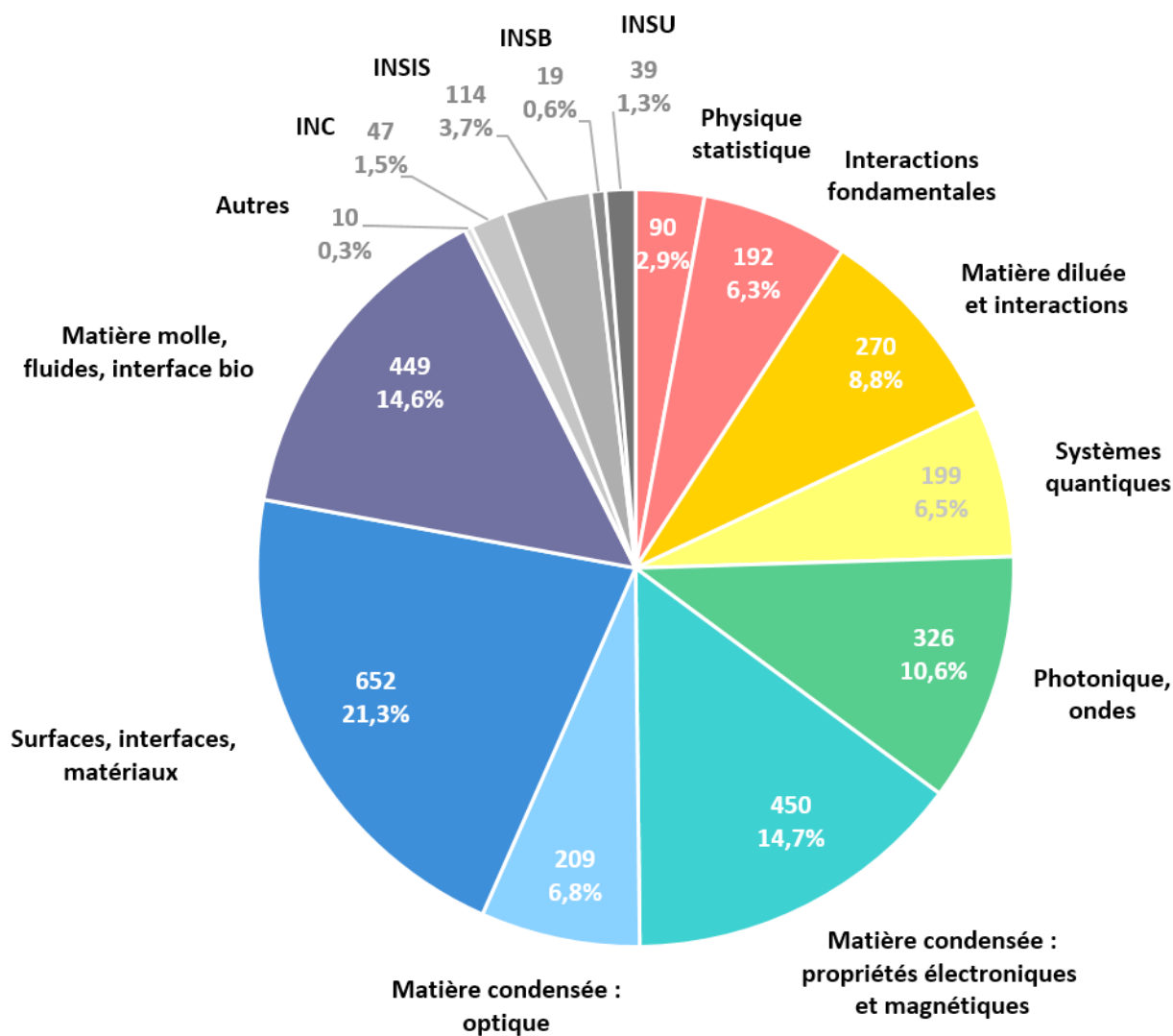
Bonne lecture à tous,

Alain Schuhl

Directeur de l'Institut de physique du CNRS

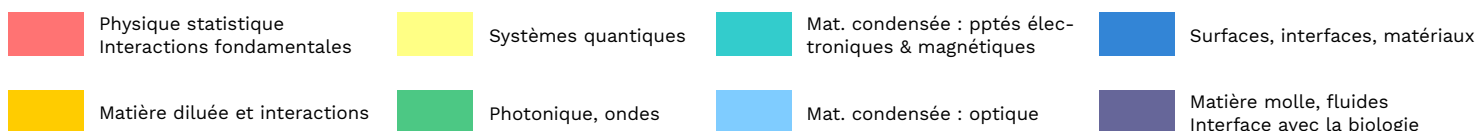
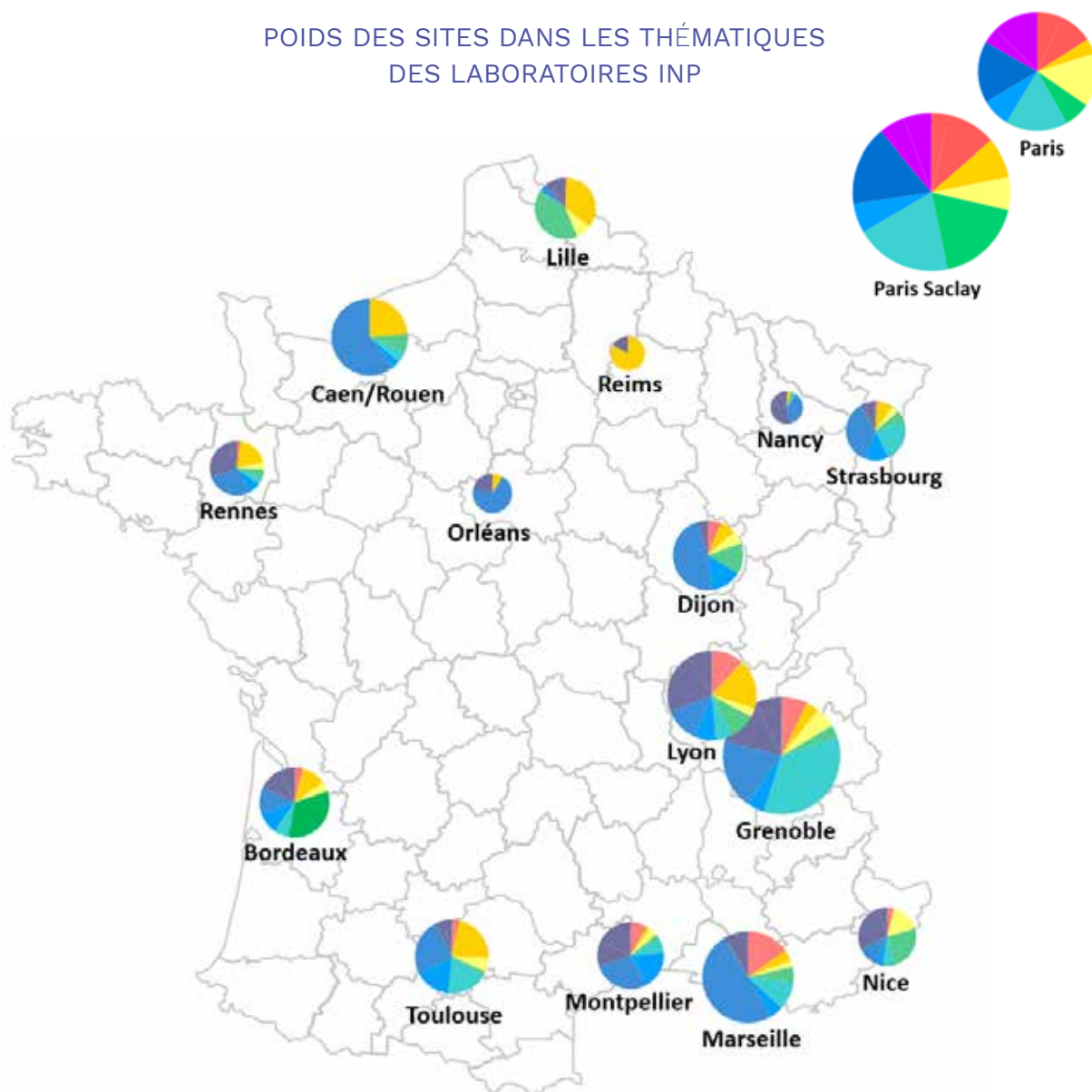
Cartographie thématique des laboratoires de l'INP

L'enquête thématique réalisée en 2017 nous a permis d'établir une cartographie des thématiques scientifiques pour les laboratoires de l'Institut de physique (INP). Le but de cette cartographie est multiple. Elle permet de visualiser le paysage thématique national de nos laboratoires ainsi que leur positionnement régional dans les différents sites, avec les forces qui sont présentes. Elle permet de faire des projections thématiques de sujets divers (succès à l'ANR, valorisation, communication, etc.) et de disposer ainsi d'un outil d'analyse complémentaire de la seule vision par laboratoire. Cette étude sera également mise à profit pour cartographier les laboratoires sur le nouveau site internet de l'INP.



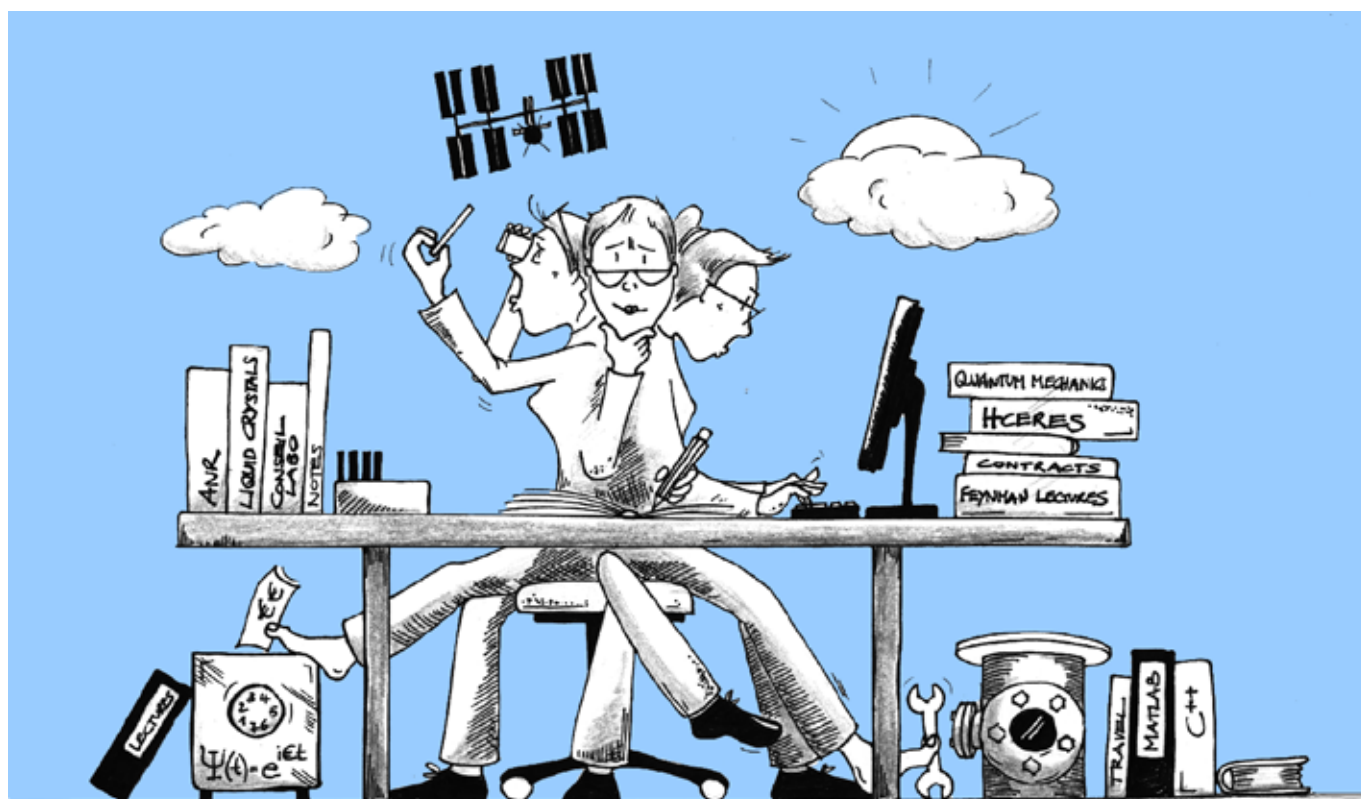
En amont, une réflexion sur le pavage thématique a été menée. Nous avons décidé de revoir le découpage de l'enquête précédente (2014) afin notamment de mieux mettre en évidence certaines thématiques, comme la matière molle ou l'interface avec la biologie. Un nouveau découpage en 8 grandes thématiques est proposé, avec un découpage plus fin en 25 sous-thématiques. Ce découpage résulte d'un compromis (imparfait) mêlant des angles « communautaires » et des angles plus transverses. Les figures représentent la répartition dans les 8 grandes thématiques déclinées en 8 couleurs (une partie de la physique statistique ne se retrouvant pas dans ces 8 thématiques a été identifiée et rassemblée dans la case « rouge », qui a une dominante forte de physique théorique). La figure ci-contre correspond à la répartition globale de l'ensemble des chercheurs et enseignants-chercheurs des laboratoires de l'INP dans les 8 grandes thématiques et également hors de ces thématiques (en gris). Ces derniers cas relèvent très largement de la pluri- ou de l'interdisciplinarité et sont identifiés ici par une affectation à des thématiques relevant principalement d'autres instituts. Le paysage national est représenté sur la carte de France ci-dessous.

POIDS DES SITES DANS LES THÉMATIQUES DES LABORATOIRES INP



Le métier de chercheur.e en physique aujourd'hui

Les chercheurs physiciens... cherchent. Ce sont des femmes et des hommes qui cherchent à comprendre les phénomènes qu'ils observent, ils cherchent à découvrir et à exploiter les lois fondamentales de la nature qui les sous-tendent. La physique est issue de la philosophie naturelle, qui comprenait, il y a quelques siècles, l'ensemble des sciences astronomiques, physiques, chimiques et biologiques. Même si les disciplines existent aujourd'hui séparément, le champ d'application de la physique est toujours très large, allant des particules élémentaires à la cosmologie, en passant par les sciences de la matière et des ondes, jusqu'aux micro-technologies et aux processus chimiques et biologiques.



LA DÉMARCHE

Dans ses démarches, le chercheur physicien se sent toujours très voisin du chercheur chimiste, astro- et géophysicien, qui est seulement « différent » au regard de sa thématique principale et de ses compétences. En effet, dans sa diversité thématique, la physique n'est pas définie par l'objet qu'elle étudie, mais plutôt par son approche, sa méthode et ses outils. Le chercheur physicien est solidement ancré dans le quantitatif dans toutes ses démarches. Lorsqu'il est confronté à la complexité, son approche est avant tout réductionniste et unificatrice. Il cherche à représenter l'objet de son étude aussi complexe soit-il par ses propriétés canoniques ou ses paramètres les plus fondamentaux, à trouver des points communs avec d'autres systèmes, afin de révéler les grands principes de base, exprimés par des lois mathématiques prédictives, universelles et largement applicables. Si la complexité n'est pas réductible dans un premier temps, elle devient alors elle-même le sujet de son étude. Les systèmes dits « complexes » sont nombreux aujourd'hui, notamment dans les sciences humaines et les sciences du vivant, où les méthodes issues de la physique ont fait leur entrée discrète. Cependant, pour l'instant, elles n'ont pas permis de révéler de grands principes de base, tels que l'ont été la deuxième loi de Newton, la deuxième loi de la thermodynamique ou les relations canoniques en mécanique quantique. La « complexité » s'impose par exemple à la compréhension et à la modélisation des réseaux sociaux, du climat et des transactions financières, ou des objets

vivants apparemment hors équilibre et multi-échelle. Malgré son succès, la méthode réductionniste du physicien traditionnel est parfois contestée, notamment avec la notion de l'émergence, c'est-à-dire le tout possède des propriétés autres que la somme de ses parties.

Le chercheur physicien a une approche empirique, toujours motivée par l'observation. Celle-ci est parfois aussi anodine que la pomme qui tombe ou la nuit qui est noire, mais elle est le plus souvent accompagnée et complétée par l'expérimentation, surtout depuis la Renaissance. L'observation sert à comprendre, inspirer, découvrir, trouver, créer... Comme le disait Einstein : *"it is theory which decides what we can observe"*. Parfois on observe ce que l'on cherche et cette logique s'applique, par exemple, au boson de Higgs, à la condensation des bosons ou à l'intrication quantique, et plus récemment aux ondes gravitationnelles. La théorie ici a été bien indispensable pour guider la recherche, mais elle n'est validée qu'avec l'observation du phénomène attendu. Par contre, la plupart du temps, on trouve parce que l'on observe minutieusement et pas nécessairement ce que l'on cherche, amenant à la démarche un certain caractère fortuit. On est alors en présence de ce que l'on qualifie de pure découverte, celles dont Murphy disait de façon provocante : *"all great discoveries are made by mistake!"* C'est le cas par exemple des découvertes associées à la supraconductivité du mercure ou du bruit de fond de l'univers, pour lesquelles les compréhensions théoriques sont venues après.

LES COMPÉTENCES

Dans sa démarche, toujours motivée par la curiosité, le chercheur physicien a développé de nombreuses compétences essentielles et caractéristiques : l'observation expérimentale et la quantification d'observables accompagnée par l'expérience, le développement d'instrumentation avancée, l'élaboration et la maîtrise de nouveaux objets, ainsi que la modélisation mathématique. La première compétence est celle de l'observation, minutieusement soutenue par l'expérimentation de plus en plus sophistiquée, afin de réaliser une représentation précise, contrôlée et reproductible de la nature pour obtenir des informations quantitatives et fiables en fonction de quelques paramètres bien maîtrisés. L'expérimentation s'appuie sur des instruments qui ont été spécialement conçus, souvent dans le cadre du laboratoire, par le physicien et son équipe, pour pouvoir réaliser l'observation, comme par exemple les outils de microscopie ou de cryogénie, ou bien les très grands instruments de la recherche. Le physicien peut être amené à créer des objets, voire des circonstances, que l'on ne trouvera pas forcément dans la nature, par exemple avec l'élaboration de nouveaux matériaux et/ou dispositifs, avec des applications importantes et accompagnées d'une nouvelle physique. La conception des hétéro-structures et des alliages semi-conducteurs dopés, des couches ultraminesces, la découverte du laser, du transistor, des cuprates avec leurs nouvelles propriétés extraordinaires, la conception des isolants topologiques, des matériaux photoniques, etc., sont autant d'exemples qui ont permis à la fois une meilleure compréhension des phénomènes fondamentaux et le développement de véritables innovations technologiques.

Depuis la fin du 20^e siècle, la démarche du chercheur profite pleinement de la montée en puissance de l'ordinateur : la simulation numérique, le calcul intensif et massivement parallèle, ainsi que l'imagerie digitale, l'enregistrement et le partage des *"big data"*. Là aussi, les outils sont développés avec une forte implication du physicien. Rappelons la conception du protocole World-Wide-Web au CERN motivée par les besoins des physiciens des hautes énergies, le développement de la simulation de Monte-Carlo quantique par les chimistes et les physiciens, ou la chromo-dynamique quantique (QCD) sur réseau. Le profil du physicien numéricien est aujourd'hui largement accepté comme une nouvelle facette du chercheur physicien contemporain.

PARTAGER, METTRE EN CAUSE, ET FORMER

La complexité et l'évolution rapide des différentes compétences ont créé des sous-métiers, en contraste avec le physicien *universalis* d'autrefois, qui savait tout faire. Toutefois, la force du métier réside dans les interactions importantes qui existent entre les différents spécialistes, notamment entre théoriciens, numériciens et expérimentateurs, entre physique fondamentale et physique appliquée, ou encore entre physiciens et scientifiques d'autres disciplines. La spécialisation thématique, bien qu'inévitable pour avancer, constitue une menace potentielle pour le métier du physicien. Elle exige une vigilance pour ne pas perdre de vue les avancées faites dans d'autres domaines. La synergie entre « différentes compétences » est essentielle pour avancer dans une problématique considérée. Pour cette raison, le travail du physicien est souvent un travail en équipe voire en collaboration. Une physique pour tous, tous pour une physique !

Le chercheur physicien, confronté à l'inconnu et à la découverte, est prêt à tout remettre en cause à chaque observation, ou mieux encore, est prêt à aller très loin pour remettre en cause ses connaissances déjà acquises. Pour citer deux exemples d'actualité, le microsatellite MICROSCOPE a été conçu pour tester le principe de l'équivalence des masses, la perle noire de la relativité générale, le prochain *"high-luminosity upgrade"* du CERN vise à observer une physique qui va au-delà du Modèle Standard des particules élémentaires, deux briques de base de la physique moderne qui sont solidement ancrées dans un formalisme mathématique.

Cette démarche d'interrogation continue est un élément clé du métier, transmise et stimulée par la formation à la recherche, notamment pendant la thèse de doctorat. L'inclure au plus tôt dans les programmes du lycée est fortement plébiscité par les communautés savantes. Certes, l'inconnu ne peut pas être enseigné, mais sentir et savoir découvrir l'inconnu en utilisant ou en développant une approche innovante, accepter de remettre en question les résultats obtenus, cela s'apprend. La formation du chercheur est permanente, souvent sur le terrain et constitue une condition sine qua non pour repousser les frontières des connaissances de la physique, *"to go where no man has gone before"*. Elle exige une proximité entre enseignement et recherche qui, en plus, nourrit le transfert des découvertes vers les applications. Le questionnement par les étudiants – central à l'enseignement – amène souvent d'autres points de vue dans la recherche, comme le matérialisent les *"Feynman Lectures on Physics"*, et la réussite de l'Ecole de Physique des Houches. L'enseignement, avec son double rôle de transmission et d'échanges entre professeurs et élèves représente ainsi un pilier essentiel au métier du chercheur physicien.

SANS FRONTIÈRES ET MULTITÂCHE

Le métier du chercheur ne connaît pas de frontières, que celles-ci soient géographiques, politiques, ou thématiques, si bien qu'il est aujourd'hui profondément « mondialisé ». Ceci est également vrai en ce qui concerne son rôle dans la société et dans le monde. En effet, à l'instar des autres scientifiques, le physicien prend de nombreuses responsabilités et diversifie ses activités, notamment en matière de dissémination, d'expertise, de valorisation et d'innovation.

La dissémination des travaux est cruciale pour le chercheur physicien et représente la première étape dans la valorisation de ses recherches. Elle laisse avant tout une trace pérenne de son activité. L'objectif principal de la publication est d'être lue, confrontée à d'autres résultats et exploitée. La publication seule, même dans une revue de fort impact et de forte visibilité, n'apporte pas ces garanties. Le chercheur physicien communique ses résultats dans des rencontres internationales, échange et confronte ses idées avec ses pairs. Parfois initié par un seul chercheur, c'est toujours la communauté internationale qui juge la pertinence d'une nouvelle avancée. En plus des échanges avec les pairs, le chercheur physicien se doit de communiquer ses avancées aux collègues scientifiques issus d'autres domaines et auprès du grand public. La physique révèle une nature surprenante et fascinante, elle révèle notre place minuscule dans l'univers, elle révèle le monde quantique, contre-intuitif et subtilement invisible dans la vie quotidienne, et elle ouvre des perspectives pour répondre à de nombreux défis sociétaux. La recherche en général est devenue l'un des principaux moteurs de la société contemporaine et mérite d'être largement partagée. Les avancées de la physique ouvrent de nouveaux questionnements, et constituent la base pour des développements originaux et innovants, avec des ramifications dans des domaines variés. Pour ces raisons, la société – grand public, collègues, industriels, jeunes – se sent concernée par les retombées de la physique. Une société qui en a conscience soutiendra plus aisément les travaux scientifiques. Le chercheur a donc pour mission de communiquer afin d'entretenir la relation de confiance entre la recherche et la société.

Une partie importante du métier du chercheur est consacrée à l'expertise. Les activités de tout chercheur sont examinées en amont ou en aval par ses « pairs », des experts dans le domaine qui peuvent discuter de la valeur scientifique d'un travail dans son contexte. Il peut s'agir d'une part des travaux déjà effectués, soumis à une revue scientifique (*peer review*), qui doivent être évalués quant à leur créativité, leur rigueur et leur pertinence scientifique. Examiner et évaluer les travaux de nos collègues est primordial pour maintenir la qualité scientifique de la recherche dans son ensemble et fait donc partie du métier du chercheur. Puisqu'il y a de plus en plus de manuscrits soumis – chaque année 5 % de plus au niveau mondial – le *peer review* traditionnel est aujourd'hui poussé à ses limites. Une alternative s'impose afin de garantir la qualité de la recherche sans pour autant surcharger les chercheurs. De plus, le chercheur est sollicité pour donner son avis sur les demandes de crédits soumises par ses pairs, notamment, car la science est de plus en plus soutenue par le financement sur projet. Cette activité, gourmande en temps, établit ainsi un lien avec le financement de la recherche. Malheureusement ce mode de financement se révèle régulièrement insuffisant, peu prévisible et précaire, et il fragilise trop souvent les actions du chercheur physicien.

VALORISER ET INNOVER

La valorisation de la science est un maillon essentiel du métier du physicien. Par « valorisation » on entend aujourd'hui transférer les résultats de ses recherches non seulement vers les pairs et le grand public, mais également vers les acteurs économiques, susciter leurs intérêts et connaître leurs besoins. Ce dernier aspect prend de plus en plus d'importance en raison des contextes économiques et sociétaux. De nombreuses avancées en physique ont été valorisées dans des produits que l'on trouve sur le marché, telles que le transistor, le CCD, le CD-ROM, les têtes de lecture à GMR, le GPS, etc. Le champ du physicien est large, il peut évoluer aussi bien dans le monde académique que s'exercer en milieu industriel. La valorisation est une richesse du métier, largement appréciée par la communauté des physiciens, car la méthodologie, la créativité et l'approche du physicien s'expriment aussi bien dans un contexte appliqué qu'industriel. Les activités du chercheur s'inscrivent au début de la chaîne dite TRL (*Technology Readiness Level*) laquelle décrit le parcours d'une découverte au laboratoire (TRL=1) jusqu'au produit du marché (TRL=9). Une grande partie de cette chaîne requiert l'intervention d'autres métiers. Même si le chercheur physicien intervient généralement jusqu'au niveau TRL=3 à 4 (*proof of concept* au laboratoire), de nombreux chercheurs se retrouvent aujourd'hui plus loin dans la chaîne, s'ouvrant alors à un monde motivé par le retour sur investissement. Le fort impact sociétal de la physique s'est révélé sans ambiguïté dans la révolution technologique qui a commencé au 19^e siècle. A l'instar de la recherche en amont, la valorisation parcourt parfois un chemin long, imprévisible et fortuit. De nombreuses idées résident longtemps au début de la chaîne TRL, comme celle de l'ordinateur quantique, faute de la maîtrise des effets de décohérence à grande échelle. Ainsi, le *flagship* européen sur les technologies quantiques, imminent et doté de 1 milliard d'euros, incite les chercheurs physiciens à aller au-delà de la preuve de concept et à améliorer suffisamment le TRL pour permettre d'initier le développement industriel proprement dit.

Innover c'est trouver de nouvelles solutions scientifiques à des questions et des besoins. On peut citer la compréhension de la propagation des épidémies, le développement des nano-architectures, la recherche de nouvelles sources d'énergie plus durables et plus économiques, la disponibilité d'internet à haut débit partout, etc. Contrairement à la valorisation, l'innovation est un processus plutôt top-down et répond à une demande, même si cette demande est parfois incitée par le monde industriel lui-même. Le chercheur physicien possède toutes les compétences pour être force d'innovation. De nombreux physiciens exercent leur métier dans des entreprises innovatrices, d'autres ont créé des start-up sur la base d'une idée novatrice. L'innovation et la valorisation s'inscrivent dans la stratégie nationale de la recherche en France pour « mieux répondre aux défis scientifiques, technologiques, économiques et sociétaux ». À ce titre, elles font partie du métier du chercheur d'aujourd'hui.

COMMENT TRAVAILLER DEMAIN ?

L'histoire a montré que l'exploration "*blue-sky*" du chercheur physicien peut engendrer des solutions originales et surprenantes. Le succès de ce métier réside dans son approche méthodologique et sa confrontation avec une grande diversité de problématiques. Une trop forte spécialisation thématique ou méthodologique risquerait de faire disparaître l'universalité du métier de physicien, reconnu encore aujourd'hui pour ses compétences d'« explorateur de solutions ». Par ailleurs, l'attribution de moyens avec un objectif prédéfini, pour livrer des résultats « prêts à porter », réduit l'espace de liberté vitale du chercheur physicien. Il est donc nécessaire de préserver un bon équilibre entre ce pilotage top-down, avec des résultats réclamés à courte échelle de temps, et une recherche exploratoire aux retombées à long terme pour que le physicien conserve sa motivation principale, la curiosité pour comprendre les lois de la nature.

INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

Ce texte a été discuté pendant le séminaire prospective de l'INP, qui s'est tenu à Cargèse en novembre 2017.

Contributions : Jean-Michel Courty, Benoit Devincré, Noël Dimarcq, Frédérique de Fornel, Philippe Gandit, Jean-Marc Grenèche, Niels Keller, Martina Knoop, Emmanuelle Lacaze, Astrid Lambrecht, Laurent Lellouch, Frédéric Petroff, Geneviève Pourroy, Pascale Roubin, Alain Schuhl, Marc Sentis, Marie Signoret, Francine Solal, Amina Taleb, Jean-Sébastien Tanzilli, Bart van Tiggelen.

Contact : Bart van Tiggelen, bart.van-tiggelen@lpmmc.cnrs.fr



Molécules exténuées
après une journée
de travail dans
un transistor

le chat de Schrödinger qui
lui aussi sera fatigué.

Transport électronique, matière et cohérence quantiques, énergie

Nous proposons ici une boîte à outils issue de la physique fondamentale au service de l'énergie, de l'éclairage, de la communication et du traitement de l'information. Les thématiques principales déclinées ici sont solidement ancrées dans la physique moderne. Elles couvrent de nombreux domaines, tels que l'électronique moléculaire, l'électronique quantique et la spintronique, la production et la manipulation cohérente d'états quantiques particuliers, ainsi que des nouveaux états électroniques, magnétiques, photoniques et atomiques. La science de la matière et de ses interactions avec la lumière est un élément essentiel du développement de ces thématiques et de son transfert vers les applications. Aussi, l'ingénierie des matériaux qui, réciproquement, s'appuie sur ces nouveaux concepts est une stratégie clé pour exacerber les propriétés électroniques et magnétiques, mais aussi pour faire émerger des propriétés nouvelles liées à la nature profondément quantique de ces systèmes. L'ensemble de ces thématiques possède un fort potentiel d'innovation dans de nombreux domaines. Sont concernées en particulier l'énergie pour sa production à l'aide de nouvelles sources, pour la diminution de la consommation des dispositifs ou pour son transport, et les technologies quantiques pour communiquer et traiter l'information de manière plus sécurisée et plus efficace.

Le transport électronique est un domaine en pleine mutation. Connexes et à forte dynamique au plan international, les domaines de l'électronique moléculaire, de l'électronique quantique et de la spintronique sont situés en amont de la micro-nanoélectronique silicium-CMOS et positionnés à la fois comme complément de cette dernière et comme générateurs de futures ruptures technologiques préparant des alternatives au traitement classique de l'information, en particulier moins consommatrices d'énergie.

La terminologie « matière et cohérence quantiques » concerne un large panel de la physique, couvrant notamment la physique atomique et moléculaire, les milieux dilués, l'optique et la photonique, la matière condensée, etc., panel trouvant de nombreuses répercussions dans les nouvelles technologies quantiques. La matière quantique est l'expression communément employée aujourd'hui pour décrire les nouveaux états

électroniques et magnétiques, tels ceux que l'on étudie, manipule ou encore exploite en supraconductivité non conventionnelle, au sein de matériaux à fortes corrélations quantiques, dans les matériaux antiferromagnétiques frustrés, dans la matière topologique ou encore dans les gaz quantiques ultra-froids.

À cette terminologie vient se greffer la notion du « contrôle et de cohérence quantiques », souvent abordée via l'interaction matière-lumière. En effet, on assiste depuis quelques années à l'émergence de thématiques et d'outils communs à plusieurs sujets de recherche, et qui relèvent de la production et de la manipulation cohérente d'états quantiques particuliers, de plus en plus tournés vers les applications. Ces états, pouvant être aussi bien associés au champ électromagnétique (optique ou micro-onde) qu'à des systèmes matériels, se trouvent au cœur de développements permettant la description et la mise en œuvre de systèmes quantiques individuels ou collectifs. Les interfaces entre les diverses composantes théoriques et expérimentales sont par exemple à l'origine du traitement et de la communication quantique de l'information, initiés avec des techniques issues de l'optique quantique (milieux dilués et photonique). Suite aux importants progrès technologiques réalisés sur de nombreux supports à l'information, quatre voies de recherche principales ont été identifiées dans le cadre du *flagship* européen sur les technologies quantiques : le calcul (essentiellement à base de systèmes issus de la matière condensée), la simulation (principalement à base de systèmes relevant des milieux dilués), la communication (marquant généralement photonique et milieux dilués), ainsi que la métrologie et les capteurs (basés, selon les besoins, sur des milieux dilués, la matière condensée ou la photonique). Les laboratoires répondent aux défis et enjeux de ces quatre piliers technologiques grâce à une véritable « ingénierie quantique » de la matière condensée (circuits supraconducteurs, défauts dans le diamant, boîtes quantiques), des milieux cristallins (silicium et autres composés), du piégeage d'ions ou d'atomes neutres ou encore des circuits photoniques. Au-delà des perspectives technologiques nouvelles, les enjeux actuels relèvent également des processus fondamentaux, tels que le passage entre mondes quantique et classique, de la manipulation de systèmes ultimes (individuels, collectifs, composés ou hybrides), de leurs interactions avec la lumière ou encore des apports de la thermodynamique quantique pour l'énergie.

Le développement de ces thématiques et le transfert vers les applications ne peut se faire sans une véritable science et ingénierie des matériaux. Réduire la dimensionnalité des matériaux est une stratégie intéressante pour en exacerber les propriétés électroniques et magnétiques, mais aussi pour faire émerger des propriétés nouvelles liées à la nature profondément quantique de ces systèmes. Les nano-objets de dimension zéro (atomes, molécules, nanoparticules) peuvent être vus comme les plus petites entités où s'expriment ces propriétés quantiques émergentes. Ces « briques élémentaires » quantiques sont ensuite utilisées pour constituer des systèmes en interaction, de plus grande dimensionnalité, pouvant présenter des propriétés différentes des objets isolés : par exemple organisés sous forme de chaînes 1D, réseaux 2D au sein de matrices, ou bien couplés/greffés sur des matériaux massifs ou des surfaces présentant eux-mêmes des propriétés remarquables. Dans ces systèmes quantiques couplés, la compréhension des interactions entre nano-objets, des effets collectifs (coopérativité) ou encore de l'interaction avec le substrat est un objectif clé à atteindre avant de pouvoir contrôler et moduler l'organisation ordonnée et orientée de ces systèmes. On peut mentionner à ce propos les espoirs suscités par l'approche *bottom-up* qui garantit l'organisation de systèmes rigoureusement identiques et une nécessaire mise à l'échelle pour des applications futures.

Une ingénierie des matériaux avec des structures de bandes parfaitement contrôlées permet d'imaginer de nouveaux concepts comme les hétérostructures de van der Waals (VdWs : graphène, h-BN, dichalcogénures de métaux de transition...) et la matière topologique (Topos : isolants topologiques 2D et 3D, métaux de Dirac et de Weyl, nanofils, etc.). Marquée par un retour en force de la physique du solide et de l'ingénierie des propriétés de symétrie qui fait émerger des propriétés électroniques nouvelles, la classification traditionnelle métal-isolant-semi-conducteur explose pour laisser place à la notion de « systèmes hybrides ». Il en va de même des approches expérimentales, qui mélangent transport électronique et optique, ainsi que des concepts qui combinent degrés de liberté orbital, de spin et de charge avec de forts couplages excitoniques, polaritoniques, plasmoniques, etc. L'accès aux matériaux de haute qualité, en France et/ou en Europe, est stratégique. VdWs et Topos sont porteurs d'applications (H2030) en optoélectronique et photovoltaïque (VdWs), en spintronique et technologies quantiques (Topos). La réalisation de tels systèmes pose de formidables enjeux tant sur le plan expérimental car elle nécessite une synthèse « haute couture » et des méthodes toujours plus avancées de caractérisation, que sur le plan théorique pour comprendre et prédire les propriétés de ces matériaux hybrides.

Tous ces développements en termes d'ingénierie de matériaux où la structure de bandes est parfaitement maîtrisée, de phénomènes quantiques comme la compréhension de la supraconductivité à haute ou très haute température critique ou d'interactions de la lumière avec la matière (émission et absorption de photons) ouvrent de nouvelles perspectives dans le domaine de l'énergie. Aujourd'hui, l'énergie représente un enjeu sociétal majeur et incontournable, dont l'importance ira croissant avec la raréfaction des ressources non-renouvelables, l'accroissement de la population mondiale, le développement industriel et la dégradation du climat. Elle est au cœur de problématiques environnementales (l'impact humain sur le dérèglement climatique, la gestion des ressources et des déchets), politiques (la dépendance aux autres pays, le choix du nucléaire), sociales (les inégalités sociales et territoriales d'accès à l'énergie), et industrielles (la relance de l'économie par l'industrie des « énergies vertes »).

Le photovoltaïque est une des technologies sur laquelle misent nos dirigeants et nos industriels pour atteindre les objectifs de bouquets énergétiques (pétrole/nucléaire/énergies renouvelables). C'est aussi une technologie qui change radicalement le concept de « centrale », puisque l'énergie peut être produite au plus près du consommateur. A ce jour, moyennant un prix de fabrication important, les matériaux inorganiques permettent d'atteindre les rendements quantiques les plus élevés. Si le photovoltaïque organique ne présente pas encore des efficacités aussi grandes, de nouveaux concepts apparaissent comme des cellules à bande intermédiaire dans le gap de la jonction (impuretés, boîtes quantiques) ou à absorption à plus haute énergie. Toute une ingénierie des matériaux se développe afin d'améliorer la stabilité des cellules, la collecte des photons et le coût de fabrication (pérovskite, nanofils, etc.). L'éclairage est également un domaine où l'efficacité peut encore être améliorée, bien qu'ayant fait d'énormes progrès ces dernières années, le rendement quantique maximum n'est pas encore atteint à cause notamment de la fréquence de la lumière émise qui implique l'utilisation de luminophores pour adapter le spectre d'émission.

Dans beaucoup d'applications où notamment les lois de l'électromagnétisme sont appliquées, la résistance électrique est un handicap. Afin de limiter l'échauffement des conducteurs, leur dimensionnement implique des moteurs, des alternateurs, des lignes électriques très massifs. Aujourd'hui, la mise en œuvre de la supraconductivité requiert une cryogénie plus ou moins lourde, ce qui cantonne cette technologie à des marchés de niche (IRM, champs magnétiques intenses, amenées de courant) ou expérimentaux (lignes supraconductrices, limiteurs de courant). La supraconductivité à température ambiante représente donc l'un des enjeux pour les prochaines décennies. La maîtrise de cette technologie

permettra de concevoir des dispositifs plus compacts et économes en énergie (lignes électriques de plus faible encombrement, pertes en ligne nulles, masses embarquées plus faibles).

D'autres techniques, comme la thermoélectricité ou la piézoélectricité sont également étudiées, notamment pour l'alimentation d'objets connectés peu énergivores. Là encore, le développement des nanotechnologies et la compréhension des matériaux permet de concevoir de nouveaux concepts en thermoélectricité où il faut allier un fort pouvoir thermoélectrique et une faible conduction thermique (aspect quantique de la conductivité thermique). Les énergies renouvelables sont souvent intermittentes, il est indispensable d'améliorer le stockage de l'énergie électrique (batterie ou supercondensateur) afin d'atteindre des densités de stockage comparable à celles des énergies fossiles. De nouveaux électrolytes solides sont à développer pour améliorer la mobilité au sein des accumulateurs et la collecte des charges au niveau des électrodes. Les matériaux 2D sont des candidats prometteurs.

ENJEUX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES :

- La supraconductivité à température ambiante reste un enjeu en soi. Quelles sont les nouvelles approches expérimentales et théoriques pour y parvenir ?
- Comment concevoir et exploiter des systèmes quantiques hybrides (photoniques/atomiques ou ioniques/supraconducteurs/semi-conducteurs/etc.), mariant divers supports à l'information quantique afin d'en tirer le meilleur parti, tout en préservant la cohérence des états manipulés lors du passage d'une plateforme à l'autre ?
- Comment augmenter la dimensionnalité des états utiles au traitement quantique de l'information, tous supports confondus (gaz d'atomes, photons, qbits supra- ou semi-conducteur, etc.), que ce soit à l'aide de systèmes individuels (dimension de l'espace de Hilbert), collectifs (intrication multipartite), ou encore composés (intrication hybride entre diverses approches au codage de l'information quantique) ?
- Développer une véritable ingénierie de bande à l'échelle du plan atomique et la synthèse de nouveaux matériaux.
- Photovoltaïque organique et inorganique ; développer des panneaux photovoltaïques à base de nouveaux matériaux plus facile à produire et à mettre en œuvre.
- Développer l'optoélectronique dans le domaine de l'éclairage et de la communication par la mise au point de nouveaux concepts et dispositifs (moléculaire et/ou quantique) et en améliorant l'efficacité des dispositifs (semiconducteurs IV/émetteurs optiques) et des luminophores pour adapter les domaines fréquentiels.
- Contrôle des propriétés topologiques de la matière pour intégration dans des circuits spintroniques et quantiques.
- Concevoir un ordinateur quantique à base de circuits quantiques supraconducteurs et semi-conducteurs, interfacé avec des ressources photoniques, tout en contrôlant la décohérence d'une assemblée de 10 voire 100 Qubits.
- Comment greffer aux solutions quantiques émergentes le savoir-faire acquis en matière de nanotechnologies afin de favoriser une intégration dense et des développements à grande échelle ?
- Créer des ponts efficaces entre les diverses communautés pour répondre aux enjeux théoriques et expérimentaux en matière de conception et de caractérisation de nouveaux matériaux ? ou encore pour établir un environnement technologique favorable au développement d'innovations quantiques ?

Marinellaaa



Eau chaude

Mars
6

Régimes extrêmes

La recherche sur les régimes extrêmes vise à comprendre une très large gamme de phénomènes dans des domaines couvrant principalement – mais pas exclusivement – la physique atomique, la physique moléculaire, la physique du solide et la physique des plasmas. L'adjectif « extrême » signifie à la limite ou au-delà de ce que l'état actuel des connaissances déclare possible, ou encore, exceptionnel. La plupart des travaux de recherche présentent un fort caractère pluri- ou interdisciplinaire et mettent en jeu des collaborations avec des laboratoires de l'INSIS, l'INC, l'INSU ou l'IN2P3. La recherche dans des conditions extrêmes requiert le développement d'outils de détection, de contrôle et de caractérisation, avec parfois la mise en œuvre d'interactions entre rayonnement et matière dépassant les capacités actuelles. Pour ce faire, les défis qui émergent de questions fondamentales sur les interactions entre champs et matière imposent des développements expérimentaux innovants ou des calculs théoriques poussant les capacités actuelles dans leurs retranchements. À court ou plus long terme, il existe des enjeux sociétaux dans les domaines de l'environnement et des matériaux, dans les domaines de l'énergie ou de la santé, pour ne citer que les principaux.

Quatre grands défis ont été identifiés pour la physique des régimes extrêmes :

Propriétés de la matière aux conditions extrêmes : Avec des recherches menées en matière condensée et diluée, le défi est d'observer, comprendre et modéliser les propriétés de la matière dans des régimes tels que les hautes pressions, les hautes températures, les champs magnétiques intenses. Les domaines scientifiques concernés sont notamment l'exploration du diagramme de phase, l'expérimentation à très haut nombre de Rayleigh, la fusion nucléaire magnétique et inertielle.

Physique des champs intenses : Les travaux de recherche concernent les plasmas et l'optique ultra-relativiste (lumière extrême), ainsi que les nouvelles sources de rayonnement et de particules (sources secondaires). Il s'agit aussi d'identifier des observables aux échelles

de temps femto- et attosecondes. L'avènement des générations d'harmoniques d'ordre élevé ouvre la voie vers l'exploration de la cohérence électronique de la matière. L'enjeu est alors de repenser les spectroscopies optiques usuelles afin de révéler et donc de comprendre et appréhender les processus cohérents initiés par le mouvement ultra-rapide d'électrons collectifs. L'enjeu porte aussi sur les outils de contrôle de la cohérence électronique.

Astrophysique de laboratoire : Activité interdisciplinaire identifiée dans les champs de l'astronomie et de la physique ainsi que de la chimie physique, il s'agit de reproduire en laboratoire les conditions extrêmes de notre environnement lointain, de les comprendre, et de contribuer à leur modélisation. Les enjeux identifiés sont la physique des interactions gaz-surface, la formation des molécules organiques complexes, la cinétique réactionnelle avec la détection quantitative des molécules et radicaux produits à l'état de traces, et l'étude des plasmas d'astrophysique à l'aide des lasers haute densité d'énergie.

Instrumentations de très haute sensibilité : Il s'agit ici de repousser les limites de l'instrumentation pour mesurer des phénomènes physiques de très faible amplitude ou bien avec une précision extrême, en exploitant les dernières avancées de métrologie fondamentale. Ce défi concerne essentiellement la spectroscopie, car la fréquence est la grandeur que l'on peut mesurer avec la meilleure précision. Les enjeux concernent les spectroscopies de très haute précision, ultra-haute résolution, et la détection de traces pour la physique atmosphérique et de l'astrophysique, l'extension vers de larges gammes spectrales (spectroscopie agile : peignes de fréquences, dérive de fréquences), la synchronisation de très haute précision et/ou à très grande échelle.

Les enjeux de ces quatre grands défis scientifiques sont à la fois expérimentaux et théoriques ; ils requièrent une grande expertise disciplinaire mais aussi une dimension interdisciplinaire forte ; ils nécessitent l'accès à des plateformes instrumentées au meilleur état de l'art ou à de très grandes infrastructures de recherche ; ils sont très souvent à l'origine de développements instrumentaux avec des retombées sociétales ; ils se positionnent pour partie dans la problématique du Big Data. Une synthèse de ces points de vue est présentée ci-après.

Note sur l'illustration ci-contre : Archimède contemple un ciel étoilé et un martien dans sa fusée dessinés par Baptiste, Capucine, Lucien et Luliana, en classe de CE1-CE2 à l'école de Cargèse. Ce dessin est extrait de *Un martien à Cargèse*, un imagier franco-corse illustré par les enfants et écrit par Hélène Maurel dans le cadre de sa résidence d'écriture avec le soutien de la CTC. Il raconte l'histoire d'un martien venant à Cargèse pour apprendre la langue corse.

CONDITIONS EXTRÊMES

Expérimenter dans des conditions extrêmes permet de tester les lois de la physique en dehors des domaines où elles ont été validées antérieurement, de sonder la matière dans des zones inconnues du diagramme de phase ou dans des états exotiques, de comprendre des états de conductivité ou des transitions ordre-désordre de la matière condensée en dehors des limites habituelles, de réaliser des matériaux aux propriétés physiques extrêmes, d'atteindre des conditions exceptionnelles de réactivité (qui peuvent concerner aussi bien des plasmas ultra-chauds que des jets moléculaires ultra-froids). Elles ouvrent la voie aux applications, notamment dans le domaine des matériaux et de leur résistance aux conditions extrêmes. Ces conditions extrêmes se réfèrent aussi à des milieux inaccessibles comme les étoiles, le milieu interstellaire ou le cœur des planètes, que l'on essaie de recréer par des systèmes modèles sur Terre. Dans cette recherche d'analogues de conditions extra-terrestres, si l'on peut reproduire certaines conditions comme la température ou la pression, nous devons forcément prendre en compte que d'autres grandeurs comme les échelles de temps ou d'espace ne sont pas accessibles, et de très loin. Avec la fusion thermonucléaire contrôlée, sujet d'intérêt pour l'énergie, nous cherchons à reproduire les réactions nucléaires du Soleil avec des plasmas chauds et leur confinement dans des champs magnétiques importants sur de très grands volumes.

RECORDS TECHNOLOGIQUES

La notion de record technologique est difficile à chiffrer dans l'absolu car elle dépend fortement du contexte (sur quel volume ou sur quelle durée sont considérés les records de température, de pression, de champ magnétique, d'intensité lumineuse). A titre d'exemple, des pressions extrêmes sont obtenues de façons très différentes par des méthodes statiques telles que l'enclume à diamant et de façon dynamique par des chocs laser. Cette dernière approche, en pleine expansion grâce aux lasers de très haute densité d'énergie (multi kJ à MJ) ainsi qu'aux XFELs, permet d'explorer des régions encore vierges des diagrammes de phase. Les records de champ magnétique sont obtenus soit en continu, soit en impulsionnel à l'aide de technologies différentes. Dans certains cas sont combinées plusieurs conditions extrêmes, par exemple à la fois de très fortes pressions et un fort champ magnétique pour comprendre les plasmas astrophysiques. La maîtrise de lasers de classe PW ouvre le domaine de la lumière extrême avec des records d'intensité permettant d'explorer la physique des champs intenses et ultra-intenses et le domaine de l'optique ultra-relativiste. De nombreux enjeux liés à l'interaction laser-matière en champ intense rentrent en jeu dans le développement de technologies alternatives

pour la création, et surtout l'accélération de particules, qui peut conduire à de nouvelles sources de rayonnement pour des applications médicales.

INSTRUMENTATION AUX LIMITES

Les détections ultra-sensible ou/et à ultra-haute résolution sont des enjeux majeurs, par exemple pour des traces ou des espèces très réactives à très faible durée de vie, ou bien encore pour sonder l'atmosphère avec la très haute précision nécessaire pour mesurer la dynamique physico-chimique. La cohérence optique à ses deux extrêmes sous-tend cette instrumentation innovante : nous cherchons à obtenir le plus grand nombre possible de cycles parfaitement identiques, afin de sonder les atomes ou molécules à la plus haute résolution possible, avec des applications en métrologie des fréquences, tandis qu'il faut atteindre la cohérence sur la gamme spectrale la plus large possible pour sonder les états transitoires à l'échelle attoseconde dans l'étude des dynamiques électroniques ou simplement pour explorer simultanément ces larges gammes spectrales. De tels développements techniques ouvrent des questionnements nouveaux et très divers : quelles sont les limites du temps de commutation en électronique, quels sont les champs nécessaires pour transformer un isolant en conducteur ou vice versa (et cela irréversiblement quelle que soit la valeur du dipôle en jeu), dans quel système moléculaire chiral aller sonder la violation de la parité comme manifestation de l'interaction faible ?

THÉORIE ET SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Les régimes extrêmes s'appuient toujours sur des modélisations à l'état de l'art, avec des enjeux numériques extrêmes nécessitant les plus hautes performances de calcul. Ils suscitent également de nouveaux développements théoriques afin de modéliser avec la même précision une mesure extrême, comme par exemple l'effet de violation de parité dans les molécules en chimie quantique, ou encore la mesure du rayon du proton en physique très fondamentale. Ce peut être dans le domaine de la physico-chimie et de la réactivité de systèmes moléculaires complexes pour lesquels un enjeu majeur est la modélisation à la fois de la molécule avec ses états excités et de la molécule interagissant avec son environnement, enjeu qui pousse les méthodes de calculs *ab initio* ou de dynamique moléculaire vers des dimensions et des précisions toujours plus grandes, pouvant se coupler à des traitements statistiques pour traiter le très grand nombre de configurations possibles. Ce peut être aussi pour des problématiques très appliquées comme celles qui concernent la fusion thermonucléaire magnétique où l'enjeu est d'être prédictif pour la construction des machines du futur : le caractère non collisionnel de ces plasmas chauds ainsi que

la nécessité d'intégrer les mouvements électroniques et ioniques à toute échelle nécessite de faire appel aux plus grandes capacités de calculs imaginables dans le futur.

PLATEFORMES ET GRANDS INSTRUMENTS

Les grands instruments sont utilisés pour créer certaines des conditions extrêmes, comme par exemple, en ce qui concerne les installations nationales, les lasers ultra-intenses du LULI ou encore PETAL, pour les hautes pressions dynamiques, les hautes densités d'énergie et la physique en champ fort, et les installations du LNCMI pour les champs magnétiques intenses, continus ou impulsionsnels. Les grands instruments tels que les sources synchrotrons ou les sources de neutrons sont aussi des outils de caractérisation nécessaires pour les enjeux ouverts par les XFELs où la matière subit des rayonnements extrêmes en termes de flux de photons, de durée et d'énergie, mais aussi pour reproduire les conditions extra-terrestres dans le domaine de l'astrophysique de laboratoire (plateformes instrumentées sur les lignes AILES et DESIRS à SOLEIL par exemple). Aux outils d'exploration des conditions extrêmes tels que les grands instruments traditionnels,

s'ajoutent les missions spatiales : l'espace est le plus stimulant des laboratoires, où une moisson de données est enregistrée et rapportée sur Terre pour être analysée, interprétée et mise à disposition des chercheurs.

BASES DE DONNÉES

L'établissement de bases de données et de métadonnées en physique atomique et moléculaire est un enjeu majeur pour lequel les expériences en laboratoire jouent un rôle clé pour attribuer et interpréter de nombreuses données, notamment celles qui concernent la spectroscopie d'espèces très réactives ou instables (donc difficiles à isoler), ou bien les constantes réactionnelles dans des conditions de température, de champ magnétique ou de pression inhabituelles. A la fois les milieux stellaires et interstellaires, les plasmas chauds, l'atmosphère terrestre et les atmosphères planétaires ont besoin de physique de laboratoire pour établir des bases de données. Une première grande catégorie d'enjeux est l'identification des espèces existant dans ces milieux extrêmes, et une seconde, l'alimentation avec des données fiables des codes qui modélisent à des fins explicatives ou prédictives ces milieux.



neige

avalanche

moune

cest
COM
PLIS
QUE

financier

feu

gel

ada

PAR

lav.
qui
dort

chat

Systemes complexes

Les systemes qualifies de « complexes » sont souvent ceux dont la dynamique met en jeu des processus couplant ou emboitant plusieurs echelles. Il s'agit generiquement, mais pas uniquement, de systemes hors equilibre avec un point de depart eloigne de la physique microscopique bien controlee. Leur description repose souvent sur des lois d'echelles correspondant a differents regimes, et sur une modelisation phenomenologique a partir d'observations experimentales ou empiriques. De facon historique, l'etude des systemes complexes prend ses origines en hydrodynamique, turbulence et en mecanique statistique avec l'etude des phenomenes critiques. Ils prolongent ainsi les recherches en matiere molle sur les polymeres, les granulaires, les micelles ou les membranes, et l'etude des systemes desordonnes, notamment les verres de spin et la transition vitreuse. Heritant de l'ecole de pensee de P.G. de Gennes, les physiciens francais ont joue un role majeur dans le developpement de ces thematiques et la France continue d'etre un des pays les plus influents dans ce domaine

La communaute de physiciens qui s'interessent aux systemes complexes travaille aujourd'hui a l'interface avec :

- l'hydrodynamique (p. ex. l'etude des colloides, des matieres granulaires, des mousses, des gels, des fluides a seuil, des suspensions, des emulsions, les fluides actifs) ;
- la chimie et les sciences de l'ingenierie (p. ex. l'etude des meta-matieriaux, des matieriaux activables) ;
- la mecanique (p. ex. l'etude des problemes d'instabilite et d'intermittence en science des matieriaux, de la soft-robotique) ;
- la geophysique et l'astrophysique (p. ex. transport sedimentaire, seismes, etude des instabilites a l'origine de motifs ou objets naturels) ;
- la biologie et le monde du vivant (p. ex. etude de la propagation d'epidemies, de la mecanique des cellules ou des plantes) ;
- le monde industriel, economique et les sciences humaines societales (p. ex. energie, climat, finance, propagation des feux, propagation d'idees).

On note ainsi une propension a s'interessent a des systemes aux frontieres voire hors du champ de la physique traditionnelle.

Une partie de cette communaute se caracterise par sa structuration en petites equipes et une facilite au changement de systeme d'etude – la continuite se situant davantage dans l'approche, la methode et les outils utilises. Certains sujets se pretent aux etudes relativement legeres (le fameux « coin de table »), mais de nombreuses experiences sont egalement menees aupres des grands instruments (TGIR), qui permettent des avancees importantes, notamment pour sonder les echelles les plus petites des solides ou fluides complexes.

Parmi les enjeux communs a ces divers systemes, il s'agit de decrypter les proprietes d'auto-organisation, d'instabilite ou d'avalanches, ou de mettre en evidence l'emergence de comportements collectifs. La complexite reside alors, non pas dans le manque de comprehension des lois fondamentales qui regissent les (nombreux) composants du systeme aux echelles microscopiques, mais dans le lien entre ses proprietes macroscopiques et l'interaction entre ces composants intervenant a une ou plusieurs echelles intermediaires. Par exemple, il est impossible de decrire le vol d'une nuee d'oiseaux comme la dynamique d'un ensemble de points modelise dans le seul cadre de la mecanique newtonienne (voir le defi « matiere active »). On peut ainsi illustrer la facon dont l'etude des villes peut etre abordee comme celle d'un systeme complexe. En raisonnant par analogie, l'idee est qu'une ville peut etre vue comme un milieu poreux bidimensionnel : les batiments et leur arrangement (i.e. la texture de la ville, plus ou moins ordonnee a plus ou moins grande distance) deviennent les barreaux d'une maille multi-echelle. On peut y appliquer les recettes de la physique atomique pour analyser la ville de maniere statistique, les interactions entre les elements de base (les batiments) etant donnees par des lois radiatives et/ou convectives. Il s'agit de reduire la complexite du systeme pour obtenir une representation statistique minimaliste, mais representative. Par exemple pour comprendre et decrire l'apparition « d'ilot de chaleur », un cluster de premiers voisins suffit.

Les defis sont nombreux et trois thematiques, choisies parmi le large champ d'etude des systemes complexes, peuvent etre soulignees : les matieriaux, meta-matieriaux

et matériaux intelligents ; la matière active ; la question des big data.

MATÉRIAUX, MÉTAMATÉRIAUX, MATÉRIAUX STIMULABLES

La science des matériaux est traditionnellement un des sujets d'étude privilégiés de cette communauté. Comprendre et maîtriser la cinétique d'évolution des matériaux, leur texture, leur fluctuation de composition et donc leurs propriétés physiques est un enjeu majeur dans bon nombre de domaines. Souvent, les matériaux que l'ingénieur souhaite utiliser pour une application sont intrinsèquement évolutifs. Leurs propriétés à l'échelle mésoscopique évoluent dans le temps et l'espace, le matériau « vieillit » avec des changements de comportement à l'échelle macroscopique. Les phénomènes dynamiques étudiés affectent de très nombreuses propriétés des matériaux telles que les propriétés mécaniques, magnétiques ou électriques. Au-delà des matériaux conventionnels comme les métaux, les alliages ou les oxydes, cette communauté s'intéresse à des systèmes aussi divers que la matière active, la matière granulaire, les structures auto-organisées, les matériaux vivants, les réseaux sociaux, etc. Pour tous ces systèmes, on cherche à identifier, à partir de formalismes de mieux en mieux définis, une loi d'échelle décrivant les processus en jeu et à proposer une théorie sans dimension donnant une cohérence aux phénomènes observés. Mais on cherche également à maîtriser la mise en forme des systèmes complexes, en particulier pour la formation de métamatériaux ou matériaux stimulables.

Depuis le début du millénaire, on assiste à une augmentation quasi exponentielle du développement des « métamatériaux » ou « matériaux stimulables ». Bien que tous ces matériaux n'appartiennent pas à la classe des systèmes complexes, les propriétés uniques des systèmes complexes en font des candidats idéaux pour être exploités pour la conception et la compréhension de matériaux méta- et stimulables.

Les métamatériaux sont constitués d'assemblages d'objets (« super-atomes ») plus grands que les atomes, mais plus petits que la longueur d'onde caractéristique (ondes électromagnétiques, ondes acoustiques, ondes sismiques, etc.) du stimulus. La conception intelligente de la nature des super-atomes et leur disposition dans l'espace 2D ou 3D confèrent à ces matériaux composites des propriétés vraiment remarquables. Des exemples incluent des bandes interdites, des indices négatifs ou des propriétés auxétiques. À l'heure actuelle, la plupart des métamatériaux sont assemblés selon une approche *top-down* qui est longue et coûteuse, et qui limite la taille d'échantillons que l'on peut obtenir. Les stratégies d'auto-assemblage de systèmes complexes (assemblages de copolymères séquencés, assemblages

de nanoparticules, mousses, émulsions, milieux granulaires, etc.) devraient fournir des moyens efficaces pour surmonter certaines des limites actuelles.

Les matériaux stimulables répondent à un stimulus physique, chimique ou biologique (température, pH, lumière, champs magnétiques, etc.) d'une manière contrôlable et prévisible. Si cette réponse est utile, fiable et reproductible, on parle souvent de « matériaux stimulables intelligents ». Un défi important dans le développement de ces matériaux est d'encourager une réponse importante avec un petit changement de stimulus. Les systèmes complexes sont des candidats parfaits pour de tels matériaux en raison de leur sensibilité aux conditions environnementales, du comportement émergent associé et de leurs échelles caractéristiques d'énergies/temps de relaxation caractéristiques au « niveau humain ».

Les défis futurs dans l'utilisation de systèmes complexes pour la conception de méta-matériaux et de matériaux stimulables concernent la conception contrôlée des super-atomes et leur auto-assemblage. Afin d'établir des relations structure/propriété, une meilleure compréhension de l'effet de l'ordre/du désordre/des défauts jouera un rôle très important. À plus long terme, les domaines des matériaux méta- et stimulables devraient fusionner partiellement dans le but de fournir des métamatériaux stimulables capables d'ajuster leurs propriétés à un contexte donné. Le camouflage optique et acoustique accordable en est un exemple parmi tant d'autres. De plus, nous supposons que les super-atomes de ces matériaux auront progressivement un caractère actif, afin de profiter des propriétés de la matière active. Les « métamatériaux actifs intelligents » qui en résultent peuvent constituer des étapes importantes vers une compréhension et une conception d'une « matière vivante ».

MATIÈRE ACTIVE

La matière active a émergé depuis une dizaine d'années comme une thématique importante au sein des « systèmes complexes » avec en particulier la mise en évidence de l'apparition de mouvements collectifs ordonnés dans des systèmes autopropulsés. Les exemples classiques sont issus du monde du vivant avec par exemple les mouvements des nuées d'oiseaux ou les mouvements des bancs de poissons. On peut aussi d'une certaine façon envisager les mouvements de piétons dans une foule ou la polymérisation-dépolymérisation de l'actine avec les moteurs moléculaires comme des exemples aux grandes ou petites échelles.

Dans ces systèmes, les éléments individuels sont susceptibles de se déplacer spontanément par eux-mêmes en puisant de l'énergie dans leur environnement. De tels systèmes sont donc toujours en dehors de l'équilibre

thermodynamique puisque de l'énergie est injectée dans le système à l'échelle des individus. Ceci permet alors au système de violer en apparence le second principe de la thermodynamique avec une diminution de l'entropie du système et une augmentation de l'ordre.

Il s'agit de questions de matière condensée puisqu'on y voit l'apparition d'ordres particuliers : nématique, polaire ou construction de clusters... Un des enjeux de cette physique est alors classiquement l'identification d'équations d'évolution de paramètres d'ordre qu'il faut définir dans des systèmes pour lesquels il est souvent illusoire de vouloir décrire le détail de l'hamiltonien des interactions. L'ordre apparaît spontanément, au sens où il n'est pas imposé par l'application d'un champ extérieur (électrique, magnétique, etc.), mais apparaît plutôt comme le résultat des conditions aux limites comme on le voit couramment dans le mouvement collectif des automobiles.

Une des avancées récentes dans ce domaine est liée à la création de systèmes de laboratoire permettant de reproduire les phénoménologies observées dans les systèmes vivants. Il s'agit souvent de colloïdes Janus ou placés au voisinage d'une paroi, mais on rencontre aussi des systèmes millimétriques qui permettent alors une observation directe plus aisée. Néanmoins, la synthèse de nouveaux systèmes modèles reste un enjeu à l'interface entre la physique et la chimie ou à l'interface entre la physique et l'ingénierie.

Finalement, il s'agit en utilisant des modèles de théorie cinétique, de physique statistique, d'hydrodynamique physique d'identifier ce qu'il y a d'universel dans des comportements que l'on observe aux différentes échelles allant du nanomètre pour les filaments d'actine à la dizaine de mètres pour certains bancs de poissons. Nous pouvons même étendre encore le champ d'études en analysant les épidémies, les systèmes économiques, les déplacements urbains comme des systèmes actifs. Il s'agit d'un champ de plus en plus riche et fécond de la communauté qui utilise le *data mining* comme source d'expérimentation.

BIG DATA

L'étude des systèmes complexes repose sur le développement d'outils et de méthodes d'analyses de données

issues d'expériences, de simulations et de plus en plus de la consultation de bases de données. L'optimisation constante des méthodes d'acquisition expérimentales, de la vitesse des supercalculateurs et des réseaux de communication doit nous interroger sur la question du stockage et de l'analyse de ces données. Ainsi, la recherche dans le domaine des systèmes complexes comme dans beaucoup d'autres domaines en physique fait face au défi du "*Big Data*" et des algorithmes de "*Machine Learning*".

De nombreux défis sont à relever pour stocker de façon stable et sécurisée l'ensemble des données générées par les chercheurs, mais aussi pour les rendre plus accessibles et intelligibles. L'utilisation de langages de balisages et la définition de métadonnées pertinentes sont des questions critiques. Ces questions ont motivé la mise en place de nombreux programmes internationaux d'incitations pour l'organisation et la diffusion des données. Ces points sont particulièrement discutés par les chercheurs travaillant sur les TGI et ceux exploitant des données issues des réseaux sociaux et de moteurs de recherche. On peut anticiper que la maîtrise des enjeux du *Big Data* permettra demain aux physiciens d'élargir leurs champs d'investigation et de s'intéresser à de nouveaux systèmes aux frontières de la sociologie, de l'écologie et la biologie.

Par ailleurs, la connaissance et l'interprétation des phénomènes complexes ne découlent pas directement de l'accumulation de données, mais de l'analyse de celles-ci par des méthodes statistiques bien établies. Les méthodes d'apprentissage profond (de *deep learning* en anglais) qui révolutionnent l'intelligence artificielle vont faire évoluer ces méthodes d'analyses. Ainsi, les succès obtenus sur des problèmes difficiles comme la détection d'événements rares (p. ex. détection du boson de Higgs) ou la classification automatique par apprentissage (p. ex. étude de la propagation des maladies contagieuses) nous permettent d'envisager l'intégration d'algorithmes de type « réseau de neurones » dans de plus en plus de processus scientifiques. Cette évolution méthodologique est en marche et se vulgarise rapidement. Nul doute que ces nouveaux outils vont nous aider à faire progresser la compréhension et la prédiction des systèmes complexes.

CNTRS



Interface physique vivant

De nombreux travaux collaboratifs entre physiciens et biologistes ont conduit à des découvertes importantes au cours du siècle dernier. La biophysique, discipline charnière, a permis de répondre à certaines questions mais a surtout permis d'initier de nouvelles thématiques plus orientées vers la compréhension du vivant où les outils de la physique fondamentale s'avèrent nécessaires, mais peuvent être impuissants à décrire certains phénomènes. Les questionnements actuels visent une compréhension à une échelle moléculaire voire atomistique *in operando* des objets biologiques et des organismes vivants, et/ou à la description statistique de leur complexité. A partir de la compréhension de ces phénomènes, il devient aussi possible de mimer les fonctions les plus complexes de la biologie, ce qui fournit de nouveaux outils pour la physique. Cet objectif permet par ailleurs d'envisager de nouvelles pistes de diagnostic, mais nécessite encore des développements pour l'accès à une imagerie fonctionnelle, la conception de marqueurs intelligents multifonctionnels, la génération de nouveaux outils numériques et technologiques pour l'intelligence artificielle mais également en biophysique théorique statistique pour aborder l'étude des populations d'organismes vivants à une échelle macroscopique.

Les différents défis présentés ci-après reposent sur de nouvelles méthodologies scientifiques pour répondre à des enjeux importants qui requièrent des approches interdisciplinaires où les physiciens doivent jouer un rôle moteur et sont porteurs de questionnements cruciaux dans le domaine du vivant. Cette liste n'est absolument pas exhaustive mais représente ceux qui nous semblent les plus significatifs.

MODÉLISATION

La biophysique statistique s'intéresse à la compréhension des organismes vivants et à la construction de théories quantitatives pour décrire leur fonctionnement. Les organismes vivants doivent obéir aux mêmes lois de la physique que celles du monde non animé. Cependant, leur fonctionnement implique des processus que nous ne rencontrons pas habituellement dans d'autres systèmes : ils se reproduisent et évoluent au moyen d'événements rares ; ils perçoivent l'environnement en transmettant des informations sur le monde extérieur au sein d'une représentation interne capable d'effectuer des calculs ; ils prennent des décisions, souvent irré-

versibles, leur permettant de répondre avec précision et fiabilité aux signaux. La physique ajoute des contraintes à ces processus, telles que les limites imposées par le bruit moléculaire, les coûts énergétiques, la diffusion, les échelles de longueur et de temps. Les systèmes vivants mettent en œuvre des solutions fiables et souvent reproductibles, et ce à toutes les échelles, depuis le niveau des récepteurs, voies de signalisation et circuits génétiques régulant le phénotype et la différenciation cellulaire, aux populations évolutives et groupes d'animaux, en passant par les tissus et les réseaux de neurones. L'un des objectifs de la physique biologique théorique multi-échelle est d'aller au-delà de la simple modélisation du comportement observé et de trouver les lois et les règles qui permettent d'élaborer des théories prédictives et si possible unificatrices.

Les systèmes vivants sont également d'excellents exemples du principe "*more is different*" qui guide la pensée moderne dans la physique à N corps. Ils nous mettent au défi de trouver les échelles adéquates et les descriptions efficaces pour rendre compte du comportement observé. Pour cette raison, ils sont un excellent laboratoire pour étudier les phénomènes collectifs, la physique hors d'équilibre, les idées de comportement émergent et les interactions fortes. Ils repoussent les limites de la physique théorique actuelle, fournissant des exemples qui peuvent mener à de nouvelles lois. D'une part, la physique existante explique souvent les comportements complexes observés en biologie, comme les attracteurs de mémoire et la chimiotaxie. D'autre part, les systèmes biologiques nous poussent à découvrir de nouveaux principes physiques ou états de la matière, tels que la matière active observée chez les oiseaux ou les poissons, ou l'égalité de Jarzynski motivée par des exemples moléculaires. L'analyse de données à grande échelle est un autre élément important de la physique biologique moderne, nécessitant souvent le développement de techniques statistiques avancées. La physique moderne du vivant utilise souvent des méthodes originellement développées en informatique, en théorie de l'information et en théorie de contrôle, en allant souvent plus loin dans l'interprétation pour faire un lien entre les résultats de ces approches et les mécanismes physiques.

Actuellement, nous manquons de modèles bien établis en physique biologique théorique, ce qui en fait un domaine jeune et passionnant où l'analyse statistique avancée des phénomènes observés à travers les échelles conduit à des modèles abstraits, dont les prédictions sont testées dans l'esprit de la physique. En

étudiant les systèmes vivants de manière quantitative, leurs interactions, leur nature stochastique et leurs non-linéarités, nous cherchons à comprendre les questions de reproductibilité, de précision et de prévisibilité des systèmes vivants.

Les défis actuels visent à :

- développer des méthodes d'analyse statistique avancées pour apprendre des expériences et des observations de types différents (par exemple le séquençage, la microscopie, les enregistrements neuronaux, la cytométrie) ;
- s'appuyer sur les observations et les théories existantes pour comprendre la reproductibilité dans une gamme de systèmes biologiques (par exemple le développement, la réponse, la détection, la régulation des gènes, les neurosciences) ;
- pousser la limite de la mécanique statistique moderne hors d'équilibre inspirée par exemple par l'évolution, la détection, la mécanique, l'adaptation sensorielle, pour étudier l'échelle de prévisibilité dans ces systèmes ;
- développer de nouvelles approches de descriptions collectives à N corps pour des systèmes avec des interactions fortes, identifier les échelles de temps et de force d'interaction pertinentes en étudiant par exemple le comportement collectif des animaux, la détection de quorum, la neuroscience, l'écologie, la régulation et la réponse cellulaire, la mécanique, la question des solutions dégénérées, la spécificité et l'interférence dans la signalisation et la régulation, et la régulation globale versus la régulation clairese- mée ;
- caractériser les limites physiques imposées aux systèmes biologiques et identifier les stratégies par lesquelles les systèmes vivants composent avec les contraintes physiques. Quel est le rôle des instabilités physiques (équilibre ou hors d'équilibre) en biologie ? Quelles propriétés doivent- être stables et lesquelles doivent- être instables ?
- aller au-delà de la modélisation mathématique pour identifier les principes et les lois en biologie, et construire des théories phénoménologiques qui donnent lieu à des prédictions vérifiables ;
- explorer les liens entre les différentes échelles et les différents modes de communication, et la réduction de dimensionnalité (par exemple, la signalisation chimique et mécanique, l'évolution et l'écologie, la réponse neuronale et le comportement, le lien entre génotype et phénotype, lien entre division cellulaire, croissance, et taille, caractérisation de l'état de la cellule ;

- questionner, analyser, et apprendre des données à grande échelle à l'aide de méthodes d'inférence statistique, construire des théories ou modèles, faire des prédictions, les confronter aux données et proposer des expériences.

IMAGERIE

Comprendre le monde vivant, développer des stratégies qui s'inspirent du monde vivant, agir sur le vivant d'un point de vue thérapeutique, nécessitent une vision spatio-temporelle et informative des processus qui le régissent. La motivation d'un développement méthodologique en imagerie pour la biologie est non seulement d'apporter de nouveaux éléments qui permettent de quantifier des processus à grande résolution spatiale et temporelle et sur des grandes échelles, d'émettre ou d'étudier des hypothèses, mais également de s'inspirer des phénomènes observés pour générer de nouvelles voies d'exploration pour la physique.

De nombreux types d'imageries pour la biologie nécessitent des développements en physique : imageries électroniques, optiques, acoustiques, de neutrons, en champ proche, etc. Dans ce champ très vaste, nous limiterons ici à l'exemple de l'imagerie optique, qui évolue considérablement depuis quelques décennies et bénéficie aujourd'hui d'une vraie approche multidisciplinaire où la biologie, la chimie et la physique coexistent et se complètent. Les travaux récents ont visé à dépasser les limites de la microscopie optique en lumière transmise, technique très ancienne mais (i) peu spécifique, (ii) peu résolutive, (iii) applicable uniquement à des échantillons 2D et (iv) essentiellement qualitative.

(i) Pour améliorer la spécificité et réaliser une imagerie dite « fonctionnelle », les travaux des chimistes et biologistes sur les marquages fluorescents ont été déterminants. Mais les physiciens apportent aujourd'hui de nouvelles approches sur la base de signaux physiques spécifiques, par exemple la sensibilité de la polarisation de la lumière à la structure et au désordre, la mesure de diffusion contrainte 3D de nanoparticules pour l'imagerie locale de viscosité, la détection optique de modes mécaniques par diffusion Brillouin ou l'utilisation de signatures photo-acoustiques.

(ii) La limite de Rayleigh de la résolution optique a été dépassée récemment par différentes techniques physiques, mais au prix d'une grande lenteur dans l'acquisition des images. De nouvelles stratégies pour accélérer l'imagerie super-résolue et la généraliser à des échantillons 3D sont donc en cours de développement, avec notamment une forte activité en ingénierie spatiale du volume focal, en stratégies d'illumination structurée et tomographie par reconstruction numérique.

(iii) L'imagerie 3D de tissus épais a été révolutionnée par

la microscopie multi-photons, basée sur des concepts d'optique non-linéaire, mais divers développements visent à améliorer sa rapidité d'acquisition et sa profondeur de pénétration, notamment par l'ingénierie de front d'onde ou le couplage à l'acoustique, ou par imagerie multi-photons par nappe de lumière. Ces méthodes sont par exemple capables aujourd'hui d'observer des processus complexes en neurosciences dans le petit animal, ou des dynamiques à l'échelle de l'organe entier en biologie de développement.

(iv) Enfin, de nouvelles approches quantitatives sont en plein développement qui participent à l'essor de la biologie intégrative. Les méthodes actuelles couplant mesures optiques, mécaniques, électriques, thermiques... et imageries à de multiples échelles (de la molécule unique à l'embryon entier par exemple) donnent accès à des éléments nouveaux sur les interactions qui gouvernent des processus actifs complexes. Ces approches nécessitent non seulement le savoir-faire du physicien en conception d'instrument, stratégies de mesures et développements de modèles ; elles demandent de nouveaux couplages entre analyse et mesure, comme la co-conception de l'imagerie et de l'analyse pour une imagerie dite « intelligente », ou les « pipelines » d'analyse d'image automatisée basés sur des algorithmes d'apprentissage profond.

Les défis pour l'imagerie apparaissent finalement à divers niveaux pour les physiciens :

- concevoir un instrument pour la quantification de propriétés physiques variées dans les systèmes vivants ;
- aborder les observations en incluant les questions biologiques (en intégrant les défis posés par l'intégration de différentes échelles, la dynamique, etc.) ;
- développer des outils de co-conception associant en temps réel imagerie et propriétés du signal (supportées par la théorie de l'information, par l'optimisation, etc.) ;
- développer des concepts pour la compréhension des phénomènes et pour leur modélisation, en intégrant les nouvelles propriétés physiques mesurées.

RÉPONSE DES MILIEUX VIVANTS À DES SOLLICITATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

La théranostique associant des techniques de diagnostic et de thérapie est en plein développement à l'interface de la physique pour le développement d'instrumentation très perfectionnée, de la chimie pour l'élaboration d'agents de contraste (marqueurs) pouvant aussi porter une fonction thérapeutique, et de la biologie. La combinaison d'une sollicitation physique et

d'un marqueur permet de délivrer des médicaments au plus près de la cible ou d'agir sur les cellules comme le fait l'élévation de température sous l'effet d'un champ magnétique. Néanmoins, l'interaction de la sollicitation physique avec les tissus et la cellule reste encore mal contrôlée et mal comprise. De plus, les propriétés des marqueurs peuvent être très bien caractérisées dans l'environnement du laboratoire mais sont modifiées dans le vivant du fait de la présence d'autres agents (par exemple « protéine corona ») qui modifient leurs propriétés physico-chimiques de surface et rendent plus difficile la compréhension de l'interaction avec les tissus. L'internalisation par les cellules peut être soit un inconvénient pour la toxicité, soit être recherchée pour la thérapie dans le cas du franchissement de la barrière hémato-encéphalique.

Il existe plusieurs défis à relever dans lesquels la physique a un rôle à jouer :

- modéliser complètement la cellule et les tissus : de la capacité à modéliser le vivant à l'échelle de la cellule découle la possibilité de contrôler le franchissement des membranes, en particulier la barrière hémato-encéphalique de manière contrôlée. Une modélisation prenant en compte tous les paramètres physico-chimiques, pH, température, environnement tissulaire est nécessaire ;
- simuler l'internalisation, le mode de fonctionnement et le rôle de la membrane permettra de mieux comprendre entre autres les mécanismes de toxicité. L'interaction combinée de plusieurs molécules sur les membranes et sur les cellules, la combinaison de la (des) sollicitation physique, avec le principe actif et leur effet sur les tissus peut conduire à des effets de toxicité à différentes échelles ;
- l'imager le transfert de médicaments *in operando* dans les tissus et à travers les membranes à l'échelle de la molécule en augmentant la sensibilité et la résolution des appareillages mais surtout en concevant des marqueurs adaptés.

BIOMIMÉTISME ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

L'intelligence artificielle est en plein essor. Pour certaines tâches bien spécifiques, ces réseaux de neurones peuvent désormais surpasser les humains. Cependant, nos cerveaux demeurent imbattables en termes d'énergie. Nous réalisons des tâches incroyables avec une consommation d'énergie inférieure à celle d'une ampoule électrique. À l'inverse, simuler le cerveau avec des super-ordinateurs demande des dizaines de mégawatts. Cette inégalité d'efficacité énergétique provient de deux différences fondamentales entre nos ordinateurs et le cerveau.

La première, l'organisation : dans nos processeurs actuels, mémoire et calcul sont deux blocs séparés spatialement. Une partie importante de leur consommation électrique résulte du mouvement incessant des données entre ces blocs. Au contraire dans le cerveau, les neurones qui sont en charge du calcul sont connectés au plus près par les synapses qui leur apportent la mémoire : mémoire et calcul sont intriqués, ce qui est très efficace du point de vue énergétique.

La seconde, le calcul : nos ordinateurs sont des systèmes compliqués reposant sur la physique des semi-conducteurs et les lois de l'électricité. Le cerveau, lui, est un système complexe qui utilise de multiples stratégies pour calculer par les propriétés émergentes électriques, dynamiques et stochastiques de ses composants. De plus neurones et synapses ont des comportements bien plus élaborés que les transistors-interrupteurs : ils sont analogiques, dynamiques, non-linéaires et intègrent la mémoire.

Il est prometteur de s'inspirer de ces deux stratégies du cerveau pour réaliser des puces électroniques capables d'apprendre à réaliser des tâches cognitives avec très peu d'énergie. Ces puces complèteraient idéalement nos ordinateurs et les applications envisageables sont multiples : véhicules autonomes, robotique, prothèses intelligentes, réseaux connectés etc.

Cependant, les défis sont eux-aussi multiples et visent à :

- stimuler l'interdisciplinarité : il s'agit d'un domaine de recherche naissant, qui pour aboutir doit réunir chercheurs de la physique aux neurosciences en passant par la micro-électronique et l'informatique ;
- imiter les propriétés des neurones, synapses et autres cellules à l'échelle nanométrique (Il y a 1011

neurones et 1015 synapses dans le cerveau). Etat de l'art : synapses = memristors, neurones = nano-oscillateurs. Ces composants multifonctionnels doivent traiter l'information : la variable qui porte l'information doit être contrôlée et stable, les composants doivent être durables ;

- modéliser ces composants de manière fine pour pouvoir prédire leurs capacités de calcul ;
- développer des algorithmes de calculs adaptés aux propriétés physiques de ces composants. Etat de l'art : reconnaissance de chiffres écrits à la main supervisée avec des réseaux de memristors. Les neurones sont simulés. Puces co-intégrant CMOS et memristors à venir. Apprentissage non-supervisé à démontrer expérimentalement ;
- interconnecter les nano-composants (10 000 synapses par neurone !). C'est un des défis majeurs. Pour l'instant, les pistes envisagées exploitent à la fois la micro-électronique et les propriétés nouvelles des composants: réseaux denses 3D de memristors, communication optique, communication micro-ondes, etc.

ET POURQUOI PAS DES COMPOSANTS BIOLOGIQUES ?

La nature a de tout temps imaginé des fonctions physiques (guidage de la lumière dans des guides optiques, phénomènes non linéaires, cristaux photoniques, etc.) bien avant les physiciens. Certains travaux utilisent déjà des éléments biologiques pour réaliser des fonctions physiques (diode à ADN). A beaucoup plus long terme, on pourrait imaginer une physique utilisant des composants biologiques pour leurs propriétés physiques. Un tel résultat ne peut être imaginé sans un intime mélange des compétences des physiciens et des biologistes.

LUC ALLEMAND
VINCENT MONCORGÉ

Les jardins de la physique

Préface de
CLAUDE COHEN-TANNOUJJI

CNRS EDITIONS

A l'écart du monde, loin des laboratoires, en contact avec la nature, des savants réputés du monde entier viennent enseigner les grands sujets de la physique et partager les dernières avancées avec de nombreux élèves.

Ouvrage disponible en **librairie** et sur **cnrseditions.fr**



grande ouïse



lyre →
pomme

chat de Schrödinger
↓



quark
inside

chat
s'intéressant
sur la
matière
← sombre



Interactions fondamentales et métrologie aux limites

Ce thème s'intéresse aux interactions et principes physiques fondamentaux qui gouvernent la nature, des échelles subatomiques à celle de l'Univers. A l'INP, ceci comprend la théorie des interactions fondamentales, la cosmologie et les astroparticules théoriques, les tests de physique fondamentale en laboratoire, dans l'espace ou sur des grands instruments, ainsi que le développement de mesures de plus en plus précises et de nouveaux outils mathématiques. Ce thème possède de fortes interfaces avec d'autres domaines, tels que la cosmologie et les astroparticules observationnelles, l'astrophysique, la métrologie ou les mathématiques. Il se situe ainsi naturellement à l'interface de l'INP avec d'autres instituts tels que l'IN2P3, l'INSU, l'INSIS et l'INSMI. Il recoupe aussi d'autres axes thématiques de l'INP, tels « matière et cohérence quantique et transport électronique » et « régimes extrêmes » pour ce qui concerne l'instrumentation, des tests de physique fondamentale et des outils théoriques. Il existe aussi de fortes collaborations avec le CNES, l'ESA et l'ONERA, autour des projets spatiaux, ainsi qu'avec le Bureau International des Poids et Mesures, le LNE ou la DGA, autour du développement de la métrologie et des systèmes de référence d'espace-temps.

MODÈLE STANDARD ET AU-DELÀ ET INSTRUMENTATION AUX LIMITES

Avec la découverte du boson de Higgs en 2012 au LHC du CERN, le modèle standard des particules élémentaires est au complet. Depuis le milieu des années 1970, les milliers de mesures, faites auprès de très nombreuses expériences, ont pratiquement toutes confirmé les prédictions de ce modèle. Malgré ses indéniables succès, nombre de ses aspects restent encore à tester. La structure même du modèle pose également de nombreuses questions.

Nombre des propriétés du boson de Higgs restent encore à vérifier expérimentalement. Parmi celles-ci sont ses couplages aux différents fermions du modèle standard, mais aussi son couplage à lui-même. Ce dernier, essentiel pour valider le modèle standard, ne pourra probablement pas être mesuré au LHC et sa détermination demandera des idées nouvelles et une collaboration étroite entre théoriciens et expérimentateurs.

Un secteur où le modèle standard n'est guère satisfaisant est celui des neutrinos. La découverte que ces particules ont une masse nécessite rajouter des interactions au modèle standard, mais nous ne savons pas lesquelles. En particulier, nous ne savons même pas si les neutrinos sont leurs propres antiparticules, ni quel est précisément leur spectre de masse !

D'autre part, aussi bien les différents saveurs de quarks que celles des neutrinos se mélangent entre elles. Ces mélanges sont à l'origine d'une asymétrie entre matière et antimatière. Dans le secteur des neutrinos, nous commençons tout juste à explorer ce mélange, et même dans le secteur des quarks, il reste une place non négligeable pour l'intrusion de physique fondamentale nouvelle. Tester ces mécanismes de mélange pour éventuellement révéler l'existence d'une physique nouvelle est un des défis théorique et expérimental des prochaines années.

Les questions conceptuelles que pose le modèle standard lui-même sont nombreuses également. Fait surprenant et inexpliqué, la valeur mesurée de la masse du boson de Higgs permet au modèle standard d'être mathématiquement cohérent jusqu'à la très haute énergie de Planck où la gravitation, omise par ce modèle, devrait devenir importante. Or génériquement, l'ajout de nouvelle physique au modèle standard tend à rendre le boson de Higgs beaucoup plus massif qu'il ne l'est expérimentalement. Quel est le mécanisme qui protège la masse du Higgs de ces corrections ? D'autre part, on peut se demander si le mécanisme de Higgs n'est pas l'ébauche d'une dynamique quantique plus fondamentale. Aussi, en plus des particules qui composent la matière ordinaire, le modèle standard contient deux copies plus massives de ces particules pour des raisons que nous ne comprenons pas.

Plusieurs aspects du modèle standard (la quantification de la charge électrique, la convergence des couplages de jauge du modèle vers une valeur approximativement commune à haute énergie, les très petites valeurs des masses des neutrinos, etc.) suggèrent que les interactions électromagnétique, faible et forte qu'il décrit sont différentes facettes d'une seule interaction, plus fondamentale, et que tous les fermions d'une génération appartiennent à un multiplet unique d'un groupe de jauge dit unifié : quelle est la forme de cette grande unification et est-elle réalisée dans la nature ? Et si la supersymétrie est ajoutée au mélange, même la gravitation pour-

rait être unifiée, au moins partiellement, avec les autres interactions : la supersymétrie est-elle présente dans le monde subatomique ? Par ailleurs, le modèle standard a 26 paramètres qu'il faut mesurer et qui obéissent à des hiérarchies de valeurs prononcées, et l'espace-temps pourrait avoir un nombre de dimensions supérieur à quatre. Peut-on expliquer ces hiérarchies et n'y a-t-il que quatre dimensions d'espace-temps ?

Pour répondre à ces questions, il faut inventer de nouveaux modèles, qui sont cohérents avec toutes les contraintes expérimentales, et tester expérimentalement les plus prometteurs d'entre eux.

Les tests du modèle standard et la recherche d'une nouvelle physique fondamentale se font le long d'au moins trois axes complémentaires. Il y a d'abord la recherche directe de nouvelles particules, auprès de collisionneurs de plus en plus énergétiques. Ce domaine est porté, du côté expérimental, par l'IN2P3, mais la plupart de la théorie qui guide ces expériences est faite par des théoriciens, principalement dans des laboratoires de l'INP.

Une seconde voie est de rechercher la nouvelle physique indirectement par les effets qu'elle produit sur des quantités mesurées très précisément, au travers de ses fluctuations quantiques minimes. Cela se fait en comparant des prédictions du modèle standard et des mesures expérimentales de plus en plus précises, un défi à la fois pour la théorie et l'expérience. Cette approche se poursuit auprès de grands instruments et en laboratoire avec des mesures d'une précision extrême, notamment à l'aide de spectroscopie atomique ou moléculaire. Cela comprend, par exemple, la mesure du moment magnétique dipolaire de l'électron, qui donne la détermination la plus précise de la constante de structure fine ou la mesure du spectre d'atomes muoniques, qui ont révolutionné la mesure du rayon électromagnétique du proton. Cela comprend également des tests de variations de constantes fondamentales au cours du temps ou dans l'espace, prédites par certaines théories de grande unification. Un exemple est la variation temporelle de la constante de structure fine qui est étudiée en comparant les fréquences de différents types d'horloges atomiques.

Le défi instrumental des prochaines années est d'atteindre la précision nécessaire pour observer une déviation aux prédictions du modèle standard ou, à défaut, contraindre plus fortement ses extensions possibles. Un rôle très important est donc joué par le développement d'instruments aux limites, tels les lasers stabilisés en fréquence, les horloges optiques ou les expériences de spectroscopie de très haute précision. Au-delà des tests du modèle standard, ces technologies permettent de tester les propriétés quantiques du vide et de mettre à l'épreuve la relativité générale.

Les défis sont ici théoriques aussi, puisqu'il faut que les prédictions du modèle standard soient faites au même

degré de précision que celles des mesures, afin de pouvoir tirer pleinement profit de celles-ci. Il faut également proposer des modèles de nouvelle physique, qui satisfont toutes les contraintes connues, et des observables de basse énergie où ces modèles pourront être testés.

INTERACTIONS FONDAMENTALES ET COSMOLOGIE

Une autre voie pour explorer la physique des interactions fondamentales est la cosmologie, puisque ces interactions gouvernent l'histoire de l'Univers depuis ses premiers instants.

Depuis plus de 80 ans, de nombreuses observations astronomiques suggèrent, indirectement, que la matière visible ne représente qu'une petite partie de la matière de l'Univers : c'est le problème de la matière sombre. Plus récemment, l'observation de supernovae lointaines suggère que l'expansion de l'Univers est accélérée par ce qui s'apparente à une constante cosmologique ou une « énergie sombre ». Nous savons aujourd'hui que, dans le contexte du modèle Λ -CDM de la cosmologie (i.e. avec constante cosmologique et matière sombre froide), ces deux composantes sombres représentent 95 % du contenu en énergie de l'Univers, dont la nature physique reste un mystère !

Pour la matière sombre, après des décennies de recherches, l'hypothèse privilégiée aujourd'hui est qu'elle vient sous la forme d'une ou de plusieurs nouvelles particules élémentaires encore inconnues. Dans les dix à vingt prochaines années, grâce à un riche programme expérimental et de nombreuses études théoriques, soit ces particules seront observées, soit il faudra remettre à plat de nombreuses hypothèses. Ce travail est complémentaire à la recherche de nouvelles particules auprès des collisionneurs et de signaux inattendus dans les rayons cosmiques.

En ce qui concerne l'énergie sombre, elle pourrait correspondre à la constante cosmologique des équations d'Einstein, mais il faudrait alors expliquer pourquoi cette constante de la physique classique annule presque exactement la contribution du modèle standard quantique. Celle-ci, calculée dans le cadre du modèle standard, est en effet plusieurs dizaines d'ordres de grandeur supérieure à la valeur mesurée (problème de l'énergie du vide). Mieux quantifier la quantité de matière et d'énergie sombre, ainsi que sa répartition spatiale et dans le temps, sont des défis que visent à relever, par exemple, le satellite européen Euclid, dont le lancement est prévu en 2020, ou le *Large Synoptic Survey Telescope*, qui devrait être mis en service en 2023.

Un autre défi pour les années à venir est de comprendre l'apparent excès de la matière sur l'antimatière dans l'Univers observable. Nous savons aujourd'hui que l'asymétrie matière-antimatière (violation de la symétrie CP) présente dans le modèle standard n'est pas suf-

fisante pour expliquer celle observée dans l'Univers. Il est donc primordial de proposer de nouvelles sources de violation de CP et de les rechercher expérimentalement. Dans le secteur des quarks, cela est fait principalement dans l'expérience LHCb, du CERN, et bientôt dans l'expérience Super Belle au Japon. Dans le secteur des neutrinos, bien moins compris, les projets DUNE aux USA et Hyper-Kamiokande au Japon, vont relever ce défi.

L'histoire de l'Univers implique bien sûr la relativité générale, qui joue le rôle dominant aux grandes échelles. En particulier, les grandes structures, et l'apparente isotropie et absence de courbure gravitationnelle de l'Univers suggèrent que ce dernier a connu une période de croissance exponentielle, l'inflation, quelques 10^{-36} secondes après le Big Bang. Or nous comprenons encore très peu le mécanisme derrière cette inflation. Le défi est donc de proposer des théories qui englobent l'inflation dans un scénario plus complet des interactions fondamentales. En parallèle, il convient de proposer des tests de ces théories auprès des expériences de physique des particules et de cosmologie des années à venir, ainsi que d'en proposer de nouvelles.

ONDES GRAVITATIONNELLES ET TESTS DE LA GRAVITATION

Avec les premières détections d'ondes gravitationnelles provenant de la coalescence de binaires de trous noirs (LIGO en 2015, Virgo en 2017) puis, en 2017, de binaires d'étoiles à neutrons, une nouvelle ère s'est ouverte pour l'étude de la gravitation et, plus généralement, de l'Univers. En particulier, la localisation dans le ciel de la coalescence de binaires d'étoiles à neutrons, apportée par la combinaison des interféromètres LIGO et Virgo, a permis à plus de 70 instruments, allant de l'infrarouge aux rayons gamma, d'observer ce phénomène extraordinaire. Cela a non seulement confirmé que les ondes gravitationnelles se propagent à la vitesse de la lumière, comme le prédit la relativité générale, mais a également conduit à une moisson de résultats en astrophysique et en cosmologie concernant, par exemple, la physique des étoiles à neutrons, l'origine des sursauts gamma courts, la nucléosynthèse des éléments chimiques plus lourds que le fer ou le taux d'expansion de l'Univers.

La France a joué un rôle moteur dans ces découvertes, aussi bien du point de vue instrumental, avec le développement des instruments impliqués dans la détection des ondes, que du point de vue théorique, par des calculs analytiques très poussés sur les ondes gravitationnelles émises par la coalescence de binaires d'objets célestes massifs et compacts. De plus, le CNRS a été à l'origine du projet Virgo et le soutient financièrement depuis 1993. Ces contributions très importantes ont été récompensées par l'attribution de la Médaille d'or du CNRS conjointement à Alain Brillet et à Thibaut Damour en 2017.

Les défis présentés par cette nouvelle fenêtre sur l'Univers sont multiples pour la physique des interactions fondamentales. Ces instruments peuvent être utilisés pour tester au mieux la relativité générale, notamment dans ses régimes les plus extrêmes. Les ondes gravitationnelles émises à différentes étapes de l'histoire de l'Univers pourraient devenir mesurables avec les instruments à venir. Répondre à ces questions va demander une collaboration étroite entre théoriciens et expérimentateurs, physiciens, astrophysiciens et cosmologistes. Du point de vue instrumental, le défi est le développement de nouveaux détecteurs d'ondes gravitationnelles plus sensibles dans une gamme spectrale élargie. Cela englobe notamment l'interféromètre spatial LISA développé par l'ESA avec un soutien de la NASA, composé de trois modules spatiaux en triangle distants de plus d'un million de kilomètres et reliés par des lasers puissants.

Les tests du principe d'équivalence entre gravitation et accélération, à la base de la relativité générale, représentent une autre voie importante dans l'exploration des limites de notre compréhension des interactions fondamentales. La sensibilité de ceux-ci devrait être améliorée par deux ordres de grandeurs dans l'année qui vient, grâce au satellite Microscope. Cet instrument permettra aussi de tester les violations de l'invariance de Lorentz prédites par des modèles de physique nouvelle. Un défi connexe des années à venir sera de vérifier que la gravitation agit de la même façon sur l'antimatière et la matière. Pour cela, plusieurs expériences de test du principe d'équivalence sur l'anti-hydrogène sont en cours d'installation au CERN auprès du décélérateur d'antiprotons (AD/Elena).

Un autre défi concerne le test de la dilatation du temps en champ gravitationnel, prédite par la relativité générale. Pour cela, dans le cadre de la mission spatiale ACES, portée par l'ESA, deux horloges atomiques seront installées à bord de la station spatiale internationale. L'une d'elle est l'horloge à atomes froids PHARAO réalisée en France. La fréquence de cette horloge sera comparée à celles d'un réseau d'horloges terrestres, avec pour but d'améliorer la précision de différents tests de la relativité générale, dont celui de la dilatation du temps en champ gravitationnel par pratiquement deux ordres de grandeur.

AUTRES TESTS EN LABORATOIRE

De nombreuses expériences menées en laboratoires visent à tester d'autres aspects de la relativité générale, de la QED, etc. Citons par exemple les expériences cherchant à mesurer précisément des constantes fondamentales (h , k_B , R_y) ou des rapports ($m_{\text{proton}}/m_{\text{électron}}$, h/m_{atome}) par spectroscopie ou interférométrie atomique. Il est nécessaire de poursuivre l'amélioration de la précision de ces expériences, ainsi que celle des horloges atomiques utilisées pour mettre en évidence une dérive

des constantes fondamentales. Un autre axe d'exploration concerne les propriétés du vide, et tout particulièrement la recherche d'une biréfringence magnétique du vide ou l'étude fine de la force de Casimir.

Comme pour les tests du modèle standard, ces mises à l'épreuve de théories et principes demandent le développement de techniques et d'instruments de performances inégalées qui, au-delà des tests de la physique des interactions fondamentales, ont des applications importantes pour la redéfinition des unités SI, pour la géophysique, pour le positionnement par satellite, etc. Une grande partie de ces capteurs quantiques émergera aux activités du *flagship* européen sur les technologies quantiques.

OUTILS THÉORIQUES : DU FONDAMENTAL AUX APPLICATIONS

Au cours de son histoire, la compréhension des interactions fondamentales a souvent demandé le développement de nouveaux outils théoriques et mathématiques. Cela reste d'actualité aujourd'hui.

L'une des grandes questions concerne la réconciliation de la gravitation, dont la description par la relativité générale est classique, alors que les trois autres interactions fondamentales sont décrites par une théorie des champs quantique. Quand ces interactions se côtoient dans certains phénomènes, en cosmologie, autour des trous noirs, ou dans le domaine de la métrologie fondamentale, cela mène généralement à des paradoxes flagrants (l'énergie sombre et le problème de l'énergie du vide, la perte d'information dans les trous noirs, etc.). Résoudre ces paradoxes représente l'un des grands défis de la physique qui demandera des sauts conceptuels importants ainsi que, probablement, de nouveaux outils théoriques.

Un autre problème où nous avons besoin de nouveaux outils théoriques est la description de l'interaction forte à densité baryonique finie. Nous pensons que cette interaction mène à une riche structure de phase pour la matière nucléaire, dans le plan du potentiel chimique baryonique et de la température. Il pourrait y avoir un point critique, des phases supraconductrices de couleur, une interface gaz-liquide de la matière nucléaire, etc. Or, une description quantitative de certaines de ces phases et de leurs propriétés est indispensable pour comprendre des phénomènes tels que les supernovae et des objets astrophysiques ultra-denses comme les étoiles à neutrons ou même à quarks. Pour décrire l'interaction forte à température finie dans son régime hautement non-linéaire, directement à partir de la chromodynamique quantique, la seule méthode disponible actuellement sont les simulations numériques massivement parallèles. Or ces méthodes souffrent d'un "*sign problem*" à densité baryonique finie, les rendant inutilisables au-delà de toutes petites valeurs du potentiel chimique. Ici, des méthodes nouvelles doivent être dé-

veloppées pour contourner ce problème qui concerne, en fait, la description de tout système contenant de nombreux fermions fortement corrélés.

Ce problème de signe, ainsi que d'autres, apparaissent aussi lorsque l'on souhaite décrire la physique des noyaux atomiques. Le défi ici est de créer une chaîne théorique contrôlée qui relie ces descriptions directement au modèle standard. Cela permettra, par exemple, de mieux comprendre la nucléosynthèse stellaire ainsi que certains aspects de la dynamique des supernovae. A plus long terme, cela devrait donner aussi naissance à une « chimie » nucléaire fine qui pourrait permettre des applications technologiques inédites, tels que des lasers à ultra-haute énergie ou du stockage d'énergie ultra-dense.

RÉSUMÉ DES ENJEUX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

- Comprendre les 95 % du contenu en énergie de l'Univers observés dans le contexte du modèle Lambda-CDM de la cosmologie et qui sont un mystère aujourd'hui (matière et énergie sombres).
- Comprendre l'origine de l'asymétrie observée entre matière et antimatière.
- Comprendre les limites du modèle standard et révéler de nouvelles interactions fondamentales ou particules élémentaires : indirectement, par leurs fluctuations quantiques, en comparant des prédictions du modèle standard et des mesures expérimentales de plus en plus précises ; directement, en étudiant des collisions de particules de plus en plus énergétiques.
- Comprendre pourquoi il existe trois générations des particules élémentaires, mais aussi la hiérarchie très prononcée des leurs masses et de leurs paramètres de mélange.
- Tester la relativité générale et les principes sur lesquels elle est basée à l'aide d'expériences allant du laboratoire à l'espace, en passant par les grands instruments.
- Explorer l'univers et son histoire à l'aide de la nouvelle sonde que sont les ondes gravitationnelles.
- Réconcilier physique quantique et gravitation.
- Repousser la mesure des constantes fondamentales de la physique et de leurs variations éventuelles au-delà des limites actuelles.
- Comprendre l'interaction forte à hautes densités pour mieux comprendre les objets stellaires très denses, des étoiles à neutrons aux trous noirs.
- Développer une description ab initio des noyaux atomiques et des interactions entre hadrons pour mieux comprendre la nucléosynthèse stellaire, la dynamique des supernovæ mais aussi pour des applications technologiques éventuelles.
- Développer de nouveaux outils mathématiques pour répondre aux aspects théoriques de ces défis.

