

# Matière, lumière et processus quantiques

## ATOMES, IONS ET MOLÉCULES : SUPPORTS POUR LES MESURES DE PRÉCISION

Les expériences impliquant des atomes ou molécules et leurs interactions avec des champs électromagnétiques permettent déjà d'atteindre des **précisions de mesure** qui les rendent compétitives avec les expériences de hautes énergies en ce qui concerne les tests des lois fondamentales de la physique. Ces mesures reposent principalement sur l'estimation des forces d'inertie par transfert cohérent d'impulsions ou la comparaison de fréquences de champs électromagnétiques asservies sur des horloges atomiques. Ces dernières permettent de mesurer des fréquences optiques avec une stabilité de l'ordre de quelques  $10^{-18}$ . La stabilité en fréquence de telles ondes est attendue dans les 5 années qui viennent sous le seuil de  $10^{-20}$  alors que la meilleure exactitude est anticipée à quelques  $10^{-19}$ . Ces exactitudes extrêmes nécessitent de répondre à de nouveaux défis, particulièrement exigeants pour les horloges distantes, car elles impliquent de connaître la différence de position dans le potentiel gravitationnel terrestre avec une précision inférieure au millimètre. Des **systèmes quantiques hybrides** vont se développer pour contourner cette limitation avec comme fil conducteur la comparaison de références situées au même point, que ce soit des transitions différentes au sein du même système quantique ou de systèmes hébergés par le même piège, comme des nuages d'atomes froids alignés au sein d'un réseau optique ou des ions piégés au sein d'un même cristal de Coulomb.

Concevoir des systèmes quantiques hybrides permettra aussi d'assigner les tâches de caractérisation de l'environnement aux différents sous-systèmes, et d'exploiter ainsi la maîtrise acquise ces dernières années sur les systèmes individuels. L'hybridation peut aussi être envisagée avec un environnement électromagnétique contrôlé exploitant les interactions avec l'environnement, par exemple grâce à une surface structurée. Cela pourra permettre de protéger le système de sources de décohérence comme les collisions ou l'émission spontanée, avec un impact important, par exemple sur l'utilisation possible de molécules froides. Dans cet objectif, la **simplification des protocoles** éprouvés pour piéger et refroidir les systèmes simples semble une voie incontournable des prochaines années pour envisager d'étendre ces méthodes aux atomes polyvalents, aux molécules, même polyatomiques, et autres édifices quantiques non conventionnels comme les ions très chargés ou radioactifs, voire à des systèmes possédant un plus grand nombre de degrés de liberté comme

des cristaux d'ions piégés ou des nanostructures. Cette simplification sera aussi nécessaire à la démocratisation et au partage de ces méthodes au sein d'**équipes pluri-disciplinaires** qui seront sûrement plus à même d'exploiter pleinement ces systèmes hybrides.

La majorité des protocoles utilisés pour étudier la physique fondamentale, que ce soit dans des dispositifs de type horloges ou des interféromètres à ondes atomiques, ont jusqu'à présent utilisé la **superposition cohérente** d'états plutôt que l'intrication. Cette dernière stratégie est désormais envisagée comme une tendance majeure pour les années à venir. L'augmentation du **temps de cohérence** de ces états quantiques au-delà de plusieurs secondes sera certainement un enjeu essentiel dans les prochaines années. Celle-ci passe par l'exploitation de corrélations quantiques encore à mettre en œuvre, mais aussi par la poursuite des efforts permanents pour réduire les bruits de l'environnement et améliorer la cohérence des sources laser. Dans ce registre, un profond changement de paradigme est à prévoir pour dépasser les limites techniques rencontrées dans la cohérence de l'interaction laser-atome.

Les contextes expérimentaux où l'**intrication** est déjà utile aux mesures de précision sont encore rares. Ils concernent surtout les ions piégés où les techniques développées pour le calcul quantique sont exploitées pour attribuer à deux ions différents les tâches de référence de fréquence et d'échange avec l'environnement, nécessaires pour le refroidissement laser ou la lecture de l'état interne, dans l'esprit d'hybridation mentionné plus haut. Ce type d'expériences, encore inexistantes en France, est amené à se développer, car un gain en précision de plusieurs ordres de grandeur est attendu par l'utilisation d'espèces moins conventionnelles telles que les ions fortement chargés ou des atomes et molécules radioactifs. Même si dans un certain nombre de cas, l'intrication, ou plus généralement la création d'états collectifs fortement corrélés tels que les états compressés (*squeezing*), contribuera à améliorer la précision des mesures et à les protéger de certains types d'effets systématiques, elle sera aussi une source de fragilité et de plus grande sensibilité à des effets parasites. Hormis les mesures emblématiques réalisées par les observatoires d'ondes gravitationnelles à interféromètre laser (LIGO-VIRGO), la compression n'est encore que peu utile dans un contexte métrologique. Sa mise en pratique au sein de dispositifs tels que des horloges atomiques ou des interféromètres est aussi un axe de recherche majeur en perspective. Par ailleurs,

l'augmentation du nombre de systèmes quantiques participant à la mesure (taille des nuages d'atomes, flux de jets atomiques) pour gagner en précision est une voie privilégiée pour les années futures. D'autres voies de gain méritent encore d'être explorées comme le transfert de grand nombre de quanta d'impulsion ou la corrélation des systèmes uniques.

De façon générale, la quête d'une plus grande précision en exploitant la nature quantique des états laisse entrevoir pour les années futures le développement de nouveaux types de protocoles expérimentaux et de sources laser toujours plus performantes. Pour démocratiser les techniques de contrôle développées dans un contexte de mesure de précision, la communauté française dispose d'un outil précieux qui dispense d'opérer une référence de fréquence, le réseau REFIMEVE. Cet outil, qui possède aujourd'hui le statut d'infrastructure de recherche et qui permet de disséminer une référence de fréquence optique par lien optique fibré, est essentiel à l'évolution des protocoles vers une reproductibilité, stabilité et exactitude accrues. Ce réseau permet des mesures absolues de fréquence avec une instabilité relative de  $10^{-15}$  après une seconde d'acquisition et une incertitude relative ultime de  $2.10^{-17}$ . L'objectif pour les 5 prochaines années est de gagner un ordre de grandeur sur ces performances. Ce réseau permet aussi la comparaison de fréquence entre horloges distantes à mieux que  $10^{-19}$ , ce qui est un atout pour leur développement. Cet outil de démocratisation des mesures de précision aura un impact par exemple pour les bases de données moléculaires astrophysiques ou atmosphériques ou la mise au point de modèles plus précis pour traiter des molécules modèles.

## MATÉRIAUX QUANTIQUES ET PHASES ÉMERGENTES

L'étude des phases exotiques de la matière quantique repose sur la production de matériaux de haute qualité. De fortes corrélations électroniques impliquent une largeur de bande — énergie cinétique typique dans un cristal — étroite par rapport à l'intensité des interactions. Plusieurs recettes sont possibles, telles que des composés comportant des électrons des couches 3d ou 4f, des composés moléculaires, le remodelage de bandes dans les super-réseaux de moiré, les effets de fort couplage spin-orbite, les interférences destructives dans des réseaux complexes tel que le réseau de Kagomé. Au-delà des fortes interactions, de nouveaux ingrédients tels qu'un fort couplage spin-orbite, à l'origine de structures de bandes topologiques, ou la présence de textures de spin et orbitale, augmentent la richesse des nouveaux états émergents possibles. Au vu de l'éventail quasi infini de matériaux disponibles, naturels ou artificiels, il est certain que de nouveaux états exotiques de la matière seront mis à jour dans les années à venir.

### SUPRACONDUCTIVITÉ

L'étude de la supraconductivité et le défi posé par la com-

préhension des supraconducteurs à haute température critique ont été profondément renouvelés par la découverte de nouveaux matériaux, tels que les supraconducteurs à base de fer ou les hétérostructures de van der Waals à base de graphène ou de dichalcogénures de métaux de transition. La fabrication de bicouches de graphène dites «twistées», c'est-à-dire dont l'angle de rotation relatif peut être ajusté, a conduit à la préparation de systèmes de moirés possédant des propriétés électroniques remarquables. En parallèle, la course à la température critique élevée continue, visant à s'approcher de la température ambiante en particulier pour les matériaux sous très forte pression et comportant un fort couplage électron-phonon lié à l'hydrogène métallique.

L'avenir dans ce domaine repose sur une caractérisation améliorée d'états de la matière de plus en plus complexes, notamment via la **présence de plusieurs types d'ordres** coexistant avec la supraconductivité tels que le magnétisme ou les ordres de charge. Ainsi, les cuprates sont caractérisés par une compétition entre supraconductivité et ordre magnétique; dans les pnictures, la nématicité, qui décrit une hétérogénéité particulière de la densité, amplifie la température critique de supraconductivité. Citons également la recherche d'états de courants de boucle, nouvelle forme de magnétisme cristallin, coexistant potentiellement avec de la supraconductivité. Ainsi dans de nombreux cas, la détermination du seul type de supraconductivité, en particulier de la symétrie associée, s'avère insuffisante pour comprendre son origine. Remarquons que la juxtaposition de ces différents ordres requiert de nouvelles sondes expérimentales discutées plus loin. Du côté théorique, les études récentes, en particulier numériques, de modèles simplifiés tels que le modèle de Hubbard semblent converger vers une compréhension de leur complexe diagramme des phases. Cette compréhension sera le point de départ de **descriptions quantitatives de matériaux réalistes**, dans le cadre conceptuel d'études de ces matériaux quantiques à fortes corrélations proposé notamment par le champ moyen dynamique.

### MAGNÉTISME ET ORDRES FERROÏQUES

Ces dernières années ont vu un développement important de nouveaux matériaux magnétiques, notamment les matériaux magnétiques bidimensionnels tels que  $\text{CrI}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$  et ses dérivés, dont les propriétés sont très sensibles aux stimuli externes. En spintronique, l'intérêt s'est porté sur les systèmes antiferromagnétiques, leurs propriétés de transport de spin et leur dynamique. Récemment a également émergé le concept d'ordre altermagnétique correspondant à une situation intermédiaire entre ferromagnétisme et antiferromagnétisme. Dans les paragraphes suivants, nous passons en revue les avancées et perspectives dans plusieurs systèmes d'intérêts magnétiques et ferroïques au sens large.

Les **skyrmions** magnétiques sont des arrangements de spins non-coplanaires chiraux possédant une charge

topologique, résultant de la compétition entre l'énergie d'échange, l'anisotropie et l'interaction de Dzyaloshinskii-Moriya issue du couplage spin-orbite. Les skyrmions apparaissent soit dans des matériaux non-centrosymétriques tels que MnSi, soit dans des multicouches magnétiques intégrant des matériaux magnétiques et des métaux lourds. Les skyrmions peuvent avoir des tailles de quelques nanomètres seulement et ainsi être vus comme des bits magnétiques ultimes pour le stockage d'information. Ils sont manipulables par champ électrique ou par des courants de spin et se déplacent à des vitesses de l'ordre du km par seconde. Les travaux les plus récents explorent leur réalisation en trois dimensions, ce qui offre des degrés de libertés additionnels pour stabiliser des textures topologiques plus riches (cocons, *bobbers*, globules, hopfions, etc.). Les recherches futures viseront à mieux maîtriser leur génération par divers stimuli, leur dynamique dans la gamme hyperfréquence, leurs propriétés de transport (effet Hall topologique) et leur couplage avec d'autres ordres, ferroïques, topologiques, etc.

Dans certains systèmes magnétiques, la géométrie du réseau magnétique rend impossible la minimisation des énergies d'échange: **l'ordre magnétique est frustré**. Les pyrochlores de terre rare  $A_2B_2O_7$ , où A est une terre rare et B un élément de transition, jouent un rôle capital dans l'étude de phases exotiques magnétiques telles que la glace de spin ou les phases de moments fragmentées. La compréhension de nouvelles familles, à base notamment de cérium ou de praséodyme, et la modélisation des différents couplages permettant de comprendre leurs propriétés magnétiques s'annoncent comme un axe complémentaire très prometteur.

Les recherches récentes sur les **matériaux ferroélectriques** ont d'une part considérablement élargi l'éventail des composés disponibles, notamment dans les composés de van der Waals ou dans des phases à structure wurtzite, et d'autre part mis à jour des objets nouveaux de très petite dimension, tels que des vortex et skyrmions dipolaires. Leur rôle dans l'obtention d'une constante diélectrique négative, permettant de réaliser des transistors moins énergivores, apparaît comme une direction à explorer plus avant.

Les **matériaux multiferroïques** possèdent plusieurs ordres ferroïques généralement couplés entre eux et sont typiquement ferroélectriques et (anti)ferromagnétiques. Alors que les multiferroïques étaient initialement considérés comme très rares, deux décennies de recherche ont identifié de nombreux mécanismes par lesquels un caractère de ferroélectricité émerge dans un système magnétique en présence de certains ordres de spins non colinéaires. Le couplage magnétoélectrique entre ordres permet de modifier les propriétés magnétiques via un champ électrique, ce qui offre des possibilités intéressantes pour des dispositifs de logique à mémoire non volatile. Le seul multiferroïque à température ambiante est BiFeO<sub>3</sub>, son ordre de spin étant une cycloïde de 60

nm de période. Des travaux récents ont montré que ses configurations statiques et ses excitations de spin pouvaient être manipulées électriquement. Les enjeux pour l'avenir dans ce domaine concernent la découverte d'autres multiferroïques à température ambiante et de systèmes possédant des couplages magnétoélectriques plus forts, l'étude de leur dynamique à haute fréquence (électromagnons), et l'exploration des propriétés topologiques des ordres de spin et de dipôles électriques à faible dimension.

## MATÉRIAUX À COUPLAGE SPIN-ORBITE OU STRUCTURE DE BANDE TOPOLOGIQUE

Un fort couplage spin-orbite de type Rashba apparaît aux surfaces ou interfaces d'éléments lourds ou dans des gaz bidimensionnels (III-V basés sur InAs par exemple, ou oxydes basés sur SrTiO<sub>3</sub> ou KTaO<sub>3</sub>). Dans ces systèmes, la direction de spin est typiquement transverse à la direction de l'impulsion. Cela permet ainsi de générer un courant de spin à partir d'un courant de charge ou, réciproquement, de détecter un courant de spin en le convertissant en courant de charge. L'utilisation de tels matériaux permettrait d'éviter l'utilisation d'éléments ferromagnétiques en spintronique et de s'affranchir ainsi de plusieurs de leurs inconvénients associés à l'énergie nécessaire pour renverser leur aimantation ou au champ magnétique rayonné par ces éléments qui perturbe les éléments voisins dans des architectures de mémoires. Les courants de spin générés grâce au couplage spin-orbite donnent naissance à des couples agissant sur une aimantation de façon très efficace et ouvrent la voie à une nouvelle génération de mémoires magnétiques. Beaucoup reste à faire pour comprendre en détail la physique de l'interconversion spin-charge et pour identifier les meilleurs systèmes en termes d'efficacité de conversion. Un nouveau champ de recherche, **l'orbitronique**, vise à exploiter non plus les courants de spin, mais les courants de moment orbital. Outre de nombreuses questions fondamentales concernant la génération, la propagation et la détection de ces courants, les premiers résultats suggèrent de forts effets dans des éléments légers et abondants tels que le titane ou le chrome, ce qui présente d'indéniables avantages environnementaux pour des applications futures.

Initialement découvertes dans les matériaux à fort couplage spin-orbite tels que les puits quantiques de HgTe/CdTe ou les composés à base de bismuth, les propriétés topologiques des structures de bandes se retrouvent désormais dans de nombreux matériaux. Leur manifestation principale est l'existence d'états métalliques de surface, de bord ou de coin, sondés par des techniques de photoémission ou de transport. La notion d'isolants topologiques d'ordres supérieurs a permis de décrire les comportements de matériaux réalistes tels que le bismuth, au-delà du cadre idéal de la théorie. Les prochaines années permettront une meilleure caractérisation de ces phases topologiques et de la recherche de matériaux optimaux. Un axe fort de développement est

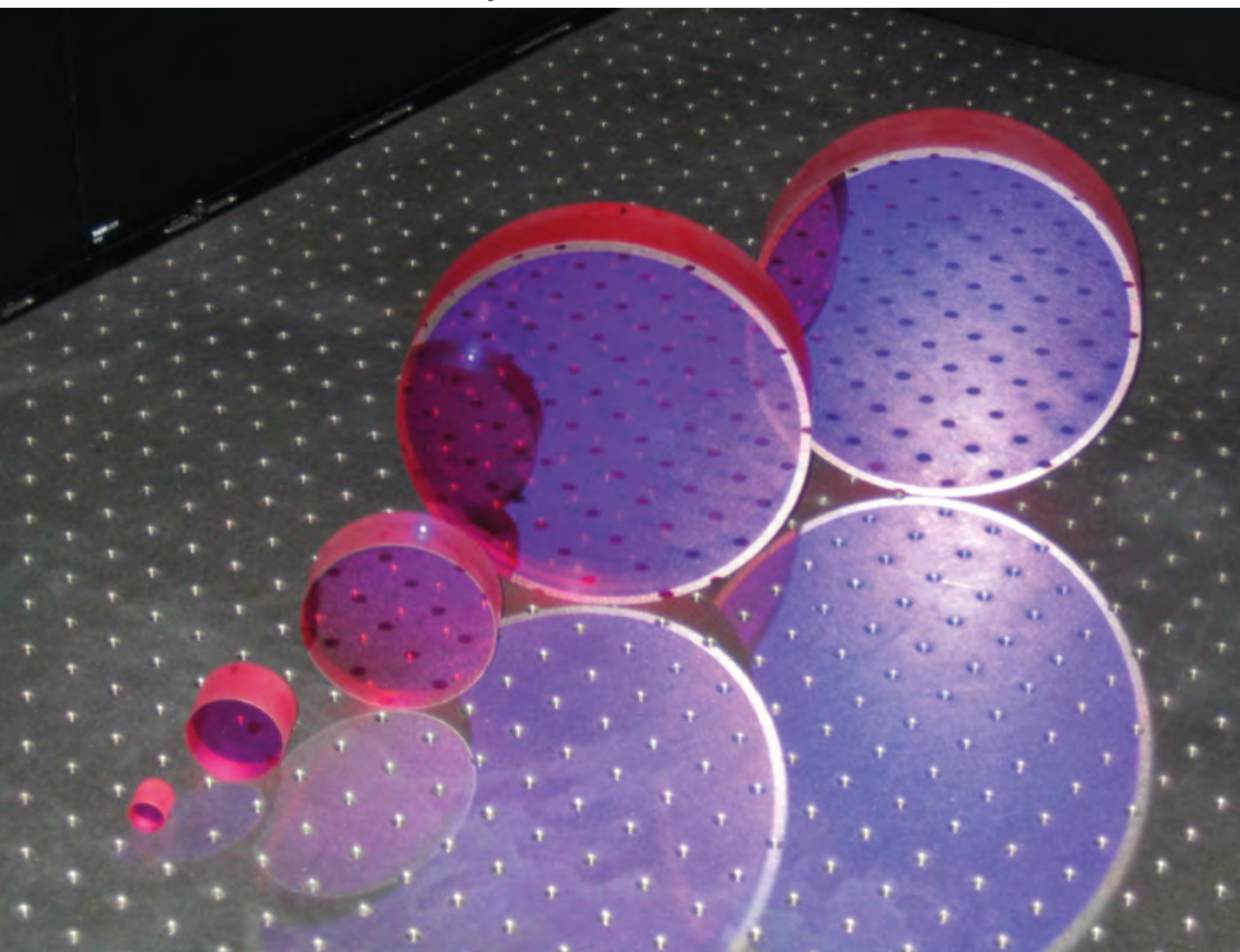
basé sur la synthèse de matériaux et **hétérostructures**, de van der Waals ou par croissance en épitaxie, combinant des **propriétés topologiques** à d'autres ordres, par exemple **magnétiques**, pour donner naissance à de nouvelles phases. Un exemple récent est la démonstration d'un effet Hall quantique intrinsèque sans champ magnétique, stable jusqu'à des températures de 7 K. Les perspectives majeures dans ce domaine correspondent à la recherche de matériaux dans lesquels interactions et propriétés topologiques des bandes seraient présentes conjointement.

Une évolution à plus long terme de ce domaine consiste à tirer parti des progrès considérables dans le domaine des matériaux topologiques pour les appliquer à d'autres types de degrés de liberté. Citons par exemple les bandes de magnons dans les composés magnétiques et la perspective de développement d'une **magnonique topologique**. Un tel développement passera par l'étude des conséquences de l'existence de phases de Berry sur le transport de la chaleur et du spin et la recherche d'analogues des isolants topologiques et des semi-métaux.

## ORDRE TOPOLOGIQUE

Les phases ordonnées topologiquement ne sont pas caractérisées par une brisure de symétrie et échappent donc au paradigme de Landau. Elles sont distinctes des matériaux à structure de bande topologique en étant intriquées quantiquement à longue portée. De plus, leurs excitations élémentaires sont caractérisées par une fractionalisation de leurs nombres quantiques, ce qui ouvre des perspectives fascinantes en particulier dans les cas où leur statistique est non abélienne, c'est-à-dire que les opérations d'échange entre excitations ne commutent pas entre elles. Parmi ces perspectives, de nombreuses pistes ont été proposées pour réaliser des opérations de calcul quantique à l'aide de telles excitations contrôlées. Cet ordre topologique tire son origine de la découverte et la caractérisation de l'effet Hall quantique fractionnaire. Depuis, d'autres phases ont été proposées dont les **phases de Kitaev** et les phases de **supraconductivité topologique**. Au-delà de l'exploration de nouveaux matériaux prometteurs, leur étude passe également par l'utilisation de simulateurs quantiques discutés plus bas.

Cristaux TiSa. © Gilles CHERIAUX/LULI/CNRS Images



Les aspects topologiques de la supraconductivité nécessitent une supraconductivité exotique. La signature attendue de cette supraconductivité topologique est l'existence d'états de bords, analogues de **fermions de Majorana**, c'est-à-dire qu'ils sont leurs propres antiparticules. Initialement, les propriétés de dispositifs à nanofils hybrides supraconducteur/semi-conducteur furent interprétées comme signatures de telles excitations. Le sujet est désormais fortement débattu et la recherche de ces états de bords connaît actuellement un fort renouveau. À faible dimensionnalité, les corrélations électroniques et les propriétés topologiques donnent naissance à une extraordinaire variété de propriétés physiques dont seule une fraction a été explorée à ce jour. Deux familles de systèmes ont particulièrement retenu l'attention de la communauté, les interfaces et hétérostructures d'oxydes et les hétérostructures de van der Waals. La découverte d'états supraconducteurs avec fort couplage Rashba (deux propriétés ajustables électriquement) dans des interfaces d'oxydes SrTiO<sub>3</sub> ou KTaO<sub>3</sub> ouvre des perspectives nouvelles. Une autre possibilité de réalisation de cette supraconductivité topologique repose sur des hétérostructures de van der Waals possédant un fort couplage spin-orbite et une aimantation intrinsèque. Une voie alternative pour réaliser ces états de Majorana consiste à sonder la nature topologique d'états terminaux de chaînes d'atomes magnétiques déposés à la surface d'un supraconducteur. Il convient de remarquer que la détection non ambiguë de ces états de bords topologiques requiert de nouvelles sondes adaptées à leur nature exotique.

La recherche de nouveaux états topologiques, appelés **liquides de spins**, est également un axe fort de l'étude des matériaux magnétiques frustrés. Une telle phase a été découverte dans les herbertsmithites, matériaux de type **réseau de Kagomé**. De nombreuses questions demeurent ouvertes, notamment sur la nature des excitations fractionnaires et les méthodes permettant de les sonder. Plusieurs matériaux ont été proposés, mais requièrent l'amélioration de leur modélisation au-delà du système idéal et de la compréhension des propriétés associées. Les perspectives comprennent une modélisation des défauts des matériaux permettant éventuellement de modifier les propriétés et de sonder ces nouvelles phases. Des réflexions plus approfondies sur d'autres matériaux tels que les vanadates, sur les effets de dopage dans ces liquides de spins, ou encore la possibilité de réaliser ces phases à l'aide d'aimants moléculaires sont en cours. L'élaboration de couches minces de tels matériaux permettrait l'utilisation de techniques de champ proche ou de techniques thermodynamiques pour la caractérisation de ces liquides de spins. Un second type de liquide de spin d'intérêt est celui des **matériaux de Kitaev**. L'existence de ces phases a été explorée dans plusieurs classes de matériaux: RuCl<sub>3</sub>, les iridates et les cobaltates. Cependant, la communauté est toujours à la recherche d'un système modèle. Les perspectives incluent la compréhension des effets de champ magnétique sur les phases candidates et une détection non ambiguë de leurs états de bord. L'utilisation de sondes en champ

proche sur des hétérostructures ou couches minces est ici encore une perspective attrayante. Mentionnons également que la modélisation quantitative de ces phases de liquides de spins pose des défis théoriques formidables et requiert le développement et l'utilisation de méthodes aussi bien analytiques que numériques poussées telles que celles de réseau tensoriels ou neuronaux. Les progrès récents ont été essentiellement algorithmiques et ont visé à décrire les excitations de ces phases au-delà de l'état fondamental et leurs manifestations observables. Du côté théorique, la notion de symétries généralisées semble un concept prometteur dont l'exploration mérite d'être poursuivie.

## DÉFIS EXPÉRIMENTAUX POUR LA SYNTHÈSE ET L'INTÉGRATION

La synthèse et l'intégration des matériaux quantiques dans des dispositifs posent de multiples défis. Alors que traditionnellement les matériaux peuvent être étudiés soit sous forme massive soit sous forme de couches minces, la découverte du graphène et l'essor des matériaux de van der Waals ont introduit une nouvelle méthode de fabrication par exfoliation de monocristaux. Il faut souligner le rôle essentiel des chimistes du solide dans ce domaine, et la capacité qu'ont eue physicien·nes, chimistes et ingénieur·es de travailler de concert pour faire avancer le sujet de façon spectaculaire. Cette méthode reste la plus employée à ce jour, notamment car elle est relativement facile à mettre en œuvre et permet d'étudier des flocons d'un très grand nombre de systèmes. Cependant, pour mener des études systématiques et dans l'objectif de fabriquer des dispositifs à partir des matériaux quantiques puis de les intégrer dans des architectures, il est indispensable de synthétiser des couches de plus grande surface (plusieurs cm<sup>2</sup> et à terme sur wafer de 200 voire 300 mm). Un large effort vise à élaborer des couches minces de ces matériaux par épitaxie. Il est essentiel d'élargir la classe de matériaux ainsi réalisables afin de créer des hétérostructures combinant plusieurs composés, essentiels pour les applications futures.

Concernant les oxydes fonctionnels, l'épitaxie d'un grand nombre de composés est désormais bien maîtrisée. La qualité des échantillons est au niveau des meilleures hétérostructures de semi-conducteurs, avec l'avantage d'une variété de propriétés bien plus grande, permettant de coupler entre eux des matériaux très différents et d'obtenir des fonctionnalités nouvelles. Des méthodes innovantes sont apparues récemment, permettant à partir d'un film épitaxié dans une phase de stabiliser via un traitement thermique et/ou chimique une autre phase, souvent très difficile, voire impossible à synthétiser directement. C'est le cas par exemple des nickelates *infinite-layer* supraconductrices synthétisées à partir d'une couche mince à structure pérovskite via une réduction topotactique. Enfin, il est désormais possible d'isoler une couche mince, voire une hétérostructure, de son substrat via la dissolution post-croissance d'une couche sacrificielle. Il est ainsi possible d'obtenir des membranes ul-

traminces d'oxydes fonctionnels qui peuvent être reportées sur d'autres substrats, combinées entre elles avec un angle contrôlable (à l'instar des approches utilisées dans les matériaux de van der Waals), ou combinées avec d'autres matériaux. Nul doute qu'à l'avenir cette approche conduira à la découverte de nouvelles propriétés.

## SYSTÈMES MODÈLES ET SIMULATION QUANTIQUE

La simulation quantique vise à reproduire à l'aide de systèmes expérimentaux contrôlés des hamiltoniens modèles utilisés notamment pour l'étude des matériaux quantiques. Bien que l'idée de simulation quantique ait été émise pour la première fois dans les années 1980 par Richard Feynman, son implémentation pratique n'a vu le jour qu'au tournant des années 2000 avec l'avènement des gaz quantiques. Grâce aux propriétés de contrôle de ces systèmes, une vaste zoologie de phénomènes physiques a pu être reproduite, allant des systèmes de fermions fortement corrélés, dans l'espace libre ou dans des réseaux optiques, aux champs de jauge artificiels et aux matériaux topologiques ou encore des systèmes soumis au désordre ou aux interactions à longue portée. Le programme de simulation quantique est complémentaire des méthodes numériques et analytiques et ces différentes approches se nourrissent mutuellement en permettant de certifier leurs précisions respectives.

Plus récemment, la simulation quantique est devenue accessible à des systèmes de matière condensée, notamment suite à la réalisation de condensats d'excitons polaritons ou encore à la découverte des moirés dans les hétérostructures twistées de graphène ou de dichalcogénures de métaux de transition, qui rendent accessibles un vaste catalogue de hamiltoniens modèles et de diagrammes de phases. La simulation quantique à base de circuits quantiques a permis de simuler des systèmes à fort couplage lumière-matière dans des jonctions Josephson, mais aussi l'effet Kondo sur des degrés de liberté de charge. En outre, l'utilisation de degrés de liberté variés permet d'espérer la simulation de nouveaux états de la matière et d'étudier les lois quantiques régissant la composition des conducteurs quantiques. Ce domaine est en pleine expansion et de nouvelles lignes de recherche s'ouvrent comme la simulation de l'électrodynamique quantique dans le graphène, l'étude de systèmes hybrides combinant atomes et lumière fortement couplés dans des cavités optiques, ainsi que les molécules ultra-froides. Les années qui viennent vont connaître l'utilisation croissante de nouveaux types de simulateurs et une extension du champ d'application de la simulation, grâce à une forte synergie indispensable entre expériences et théories.

Plusieurs enjeux majeurs ont été identifiés comme des motivations pour les années futures. En tout premier lieu, il s'agira d'**étendre le champ des espèces support** et de tirer parti de la variété des atomes et molécules diatomiques pour démontrer ou simplifier des protocoles, par

exemple en utilisant des espèces avec un grand dipôle magnétique pour réaliser des microscopes à gaz quantiques plus simples ou des systèmes de Rydberg dans les atomes alcalino-terreux afin de sonder les électrons de Rydberg. Il sera par ailleurs nécessaire de **certifier le système expérimental** et de quantifier sa vraisemblance avec les équations qu'il simule. Ceci passera par la réalisation de systèmes modèles reproduisant des problèmes simples de mécanique quantique, et permettra de **passer du simulateur au solveur quantique** ou de combiner des briques élémentaires réalisées à l'aide des systèmes modèles déjà bien maîtrisés afin de simuler des hamiltoniens plus complexes dont les propriétés sont encore hors de portée des moyens théoriques ou numériques, comme le modèle de Hubbard ou les modèles de spin. Un autre objectif vise à exploiter les architectures afin de **résoudre des problèmes inverses** ou de reconstruire et certifier le hamiltonien (éventuellement effectif) décrivant la dynamique d'un système physique à partir de la mesure de ces états. De façon plus fondamentale, le **couplage entre topologie, interactions et désordre** devra être étudié plus avant. Dans ce registre, les fermions de Majorana ou les anyons non abéliens restent des supports de choix. Un autre domaine d'application qu'il s'agira d'aborder est celui des **phénomènes hors équilibre et les systèmes ouverts**, pour traiter des phénomènes fondamentaux régissant le transport, la thermalisation, ou la réalisation d'états quantiques par des phénomènes dissipatifs. Enfin, il sera possible de **sonder la physique des deux infinis**: alors que la simulation quantique s'inspire traditionnellement de problèmes de matière condensée ou de physique nucléaire, elle s'étend désormais vers d'autres domaines de la physique. Des exemples incluent la physique des hautes énergies tels que l'effet Schwinger sondé récemment dans le graphène, ou la gravité et les trous noirs analogues qui simulent des espace-temps courbes dans des fluides ou matériaux quantiques. Au-delà de ces problématiques, des théories des champs formelles pourront être sondées comme théories émergentes de systèmes complexes tels que les matériaux magnétiques frustrés.

Un **défi majeur** pour la simulation par atomes ultra-froids est d'identifier une espèce d'atomes ou de mettre au point un protocole de refroidissement qui permettra d'amener la température de l'échantillon à une fraction bien plus faible qu'un centième de la température de Fermi, pour simuler des systèmes condensés à température ambiante. Pour aboutir, ces expériences devront réussir un **défi technique** en passant par une phase de simplification pour contenir la durée et le coût de leur construction.

## CIRCUITS QUANTIQUES ET SYSTÈMES HYBRIDES

### PHYSIQUE QUANTIQUE MÉSCOSCOPIQUE

L'utilisation de **circuits cohérents de phase** pour caractériser et manipuler des **quasi-particules exotiques** va

s'amplifier. Les motivations principales incluent l'utilisation de quasi-particule unique comme qubit volant, ou la découverte voire l'utilisation de particules de statistiques non abéliennes pour stocker de façon robuste l'information quantique. Cette caractérisation peut être difficile et ambiguë, comme l'attestent à ce jour les difficultés de la recherche de quasi-particules de Majorana dans les supraconducteurs topologiques. Le caractère exotique de ces excitations élémentaires requiert de nouvelles stratégies d'observation et des avancées dans la manipulation quantique d'électrons uniques: des interféromètres de Mach-Zender balistiques, le piégeage d'excitations uniques, leur dynamique assistée par des ondes sonores, des mesures de bruit renseignant sur les corrélations temporelles et une modélisation réaliste des dispositifs expérimentaux. Il s'agit d'un sujet très actif animé par une forte synergie entre théorie et expérience.

L'étude du **transport quantique de la chaleur** et de la thermodynamique des systèmes quantiques est en plein essor. Ce domaine de recherche, prometteur, mais à un stade de développement précoce, aborde des questions fondamentales de la thermodynamique de petits systèmes intriqués quantiquement. Ces études visent en particulier à mettre au point de nouvelles sondes de degrés de liberté telles que l'entropie de spin ou la calorimétrie de glissement de phase. Ces nouvelles sondes, alternatives au transport électronique, devraient permettre de caractériser les excitations exotiques susmentionnées. Expérimentalement, la limite quantique du transport de chaleur peut être atteinte dans les semi-conducteurs III-V, le graphène, ou les canaux de bord de l'effet Hall quantique fractionnaire. Cette limite quantique se signale habituellement par une violation de la loi de Wiedemann-Franz caractéristique du régime classique. Enfin, l'influence d'un gradient de température sur différents phénomènes quantiques tels que le bruit de grenaille demeure un sujet d'étude prometteur.

## CIRCUITS QUANTIQUES HYBRIDES

Les **circuits hybrides** dans lesquels un ou plusieurs supraconducteurs sont couplés à des conducteurs quantiquement cohérents constituent une sonde formidable de ces derniers, grâce au contrôle de la différence de phase supraconductrice et des expériences d'interférences quantiques qui en découlent. En particulier, la détection d'états d'Andreev de spin et d'états d'Andreev hélicaux sont des découvertes récentes dont il reste encore à explorer la dynamique. Au-delà des jonctions Josephson, les circuits hybrides peuvent être constitués d'interféromètres avec plusieurs supraconducteurs, ou encore des circuits non locaux combinant supraconductivité et effet Hall quantique polarisé ou dégénéré en spin. Leurs propriétés peuvent être contrôlables: par exemple, des progrès récents sur la qualité d'interface des hétérostructures semi-conducteur/supraconducteur rendront possibles des jonctions Josephson avec un couplage spin-orbite ajustable. De même, les circuits hybrides comportant des résonateurs supraconducteurs se généralisent grâce à

leur grande sensibilité de détection, jusqu'à permettre un couplage fort à des objets quantiques individuels, voire la limite du spin unique. Des circuits hybrides permettront également de sonder les propriétés combinées d'un assemblage de matériaux de van der Waals différents, en utilisant des électrodes métalliques, supraconductrices, magnétiques, ou encore des barrières tunnel elles-mêmes en matériaux de van der Waals.

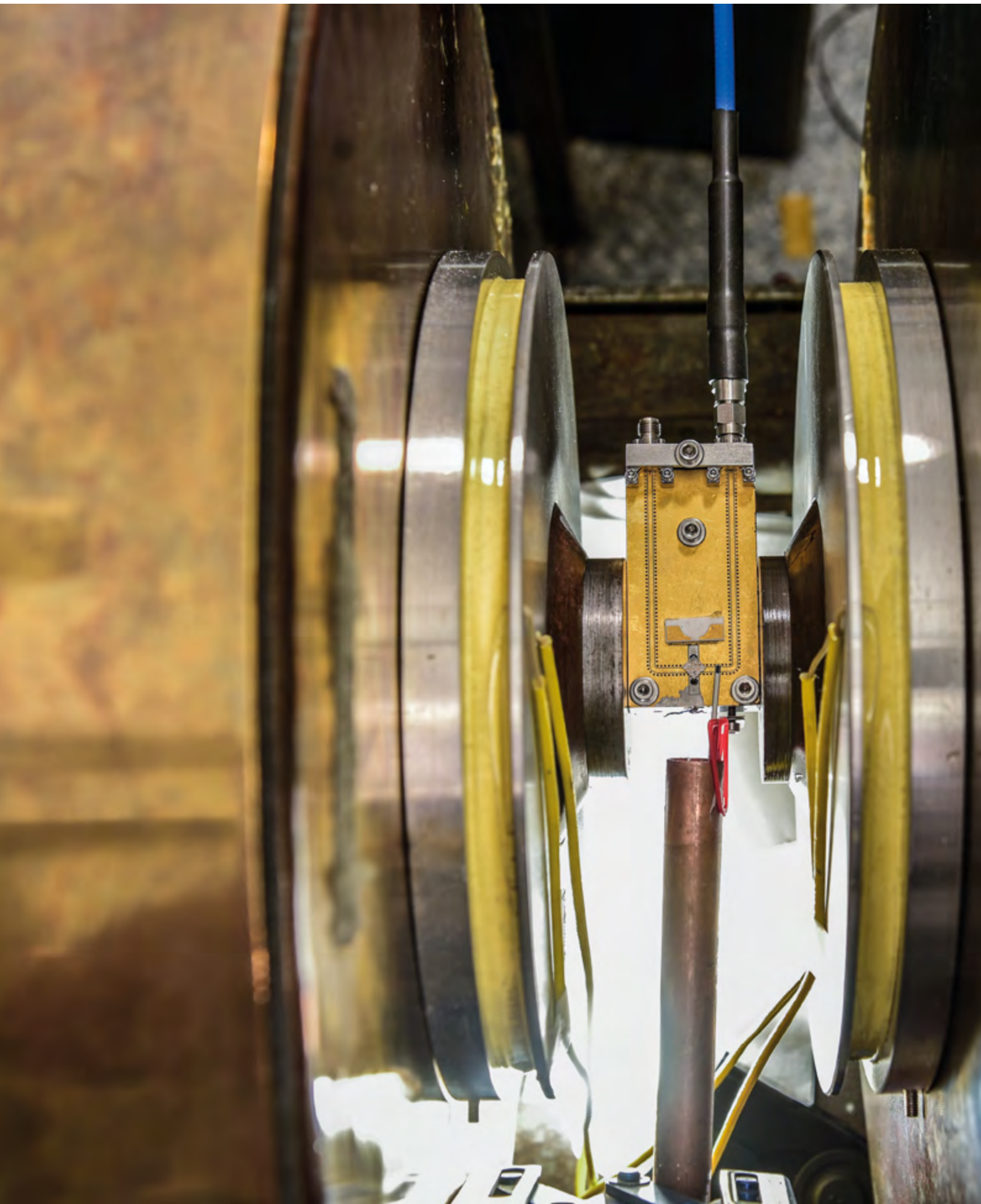
## OPTOMÉCANIQUE

L'optomécanique est un domaine de recherche visant à étudier et à exploiter les interactions entre degrés de libertés électromagnétiques et mécaniques. Ces systèmes opèrent aujourd'hui dans le régime quantique, l'interaction optomécanique permettant à la fois de préparer des états non classiques du champ électromagnétique et de refroidir un mode mécanique jusque dans son état fondamental, grâce à des techniques de refroidissement laser. L'optomécanique est donc le lieu pertinent de l'étude de la mécanique quantique à l'échelle macroscopique, depuis la transition entre l'échelle micro et macroscopique jusqu'à l'étude de la gravité quantique et son rôle dans les mécanismes de décohérence (comme avec le projet spatial MAQRO). Le couplage entre un système quantique microscopique et un résonateur mécanique macroscopique devrait permettre le transfert des superpositions quantiques cohérentes vers des états mécaniques via l'**hybridation** à d'autres systèmes quantiques, comme des lacunes dans des mailles cristallines (centres NV), des boîtes quantiques et des cristaux dopés terres-rares. Ce concept d'hybridation est également déployé avec succès dans le domaine micro-onde sur des qubits supraconducteurs, dont le couplage à des résonateurs mécaniques GHz a permis de démontrer l'acheminement et le stockage d'information quantique.

L'un des principaux défis à surmonter est le contrôle du transfert thermique dans les nanostructures mécaniques ultra-cohérentes conçues pour minimiser leur couplage au bain de phonons. Parmi les avancées prometteuses dans le domaine, citons l'utilisation de pinces optiques qui permettent de créer des ensembles de nano-résonateurs en lévitation isolés des fluctuations du substrat. À l'échelle opposée, de nouveaux concepts ont récemment émergé, notamment basés sur l'exploitation de résonances ultra-hautes fréquences de type Brillouin, qui présentent le double avantage d'une grande capacité thermique et d'une énergie de point zéro très élevée.

## NOUVELLES SONDES DE LA MATIÈRE QUANTIQUE : DES SOURCES AUX DÉTECTEURS

Notre compréhension accrue des phénomènes quantiques impliquera des progrès substantiels de ses moyens de mesure. Une tendance forte repose sur l'évolution de la microscopie et de la spectroscopie photoélectronique vers de hautes résolutions spatiales d'une part, et vers les mesures *in situ* et *operando* d'autre part. Une dynamique







Dispositif de mesures contenant un nano-oscillateur spintronique.  
© Hubert RAGUET / Laboratoire Albert Fert CNRS / THALES / FIRST-TF / CNRS Images

transverse à la plupart des techniques expérimentales consiste à développer de telles sondes locales résolues en temps et de sonder des propriétés dépassant la seule répartition de la charge et du spin.

## SONDES DE MAGNÉTISME

Les sondes de champ magnétique servent à mesurer autant le magnétisme de spin que le magnétisme orbital. Parmi les sondes récentes, mentionnons celles à base de lacunes dans des cristaux, dits centres colorés, dont l'état de spin dépend du champ magnétique local et est détectable optiquement, et les spins uniques cohérents. Si les centres NV du diamant ont été les plus utilisés jusqu'ici et donnent déjà lieu à la commercialisation de magnétomètres, d'autres se développent dans le silicium, le germanium, dans SiC sous forme de bi-lacunes, et dans le nitrure de bore hexagonal, intégrables à des hétérostructures de van der Waals. Ces sondes sont particulièrement utiles pour l'imagerie de nanostructures magnétiques ou de transitions supraconductrices sous pression. Des développements technologiques récents laissent présager des mesures de résonance magnétique nucléaire à l'échelle d'un seul atome. De nouvelles sondes en champ proche sont actuellement développées en France et méritent d'être soutenues, telles que les nanoSQUID sur pointe, balayables, qui permettent des mesures locales du champ magnétique et de la chaleur. Elles permettront de sonder des échantillons mésoscopiques et de détecter les centres de dissipation ou de mettre en évidence les propriétés topologiques telles que le nombre de Chern dans des matériaux 2D. Mentionnons également les sondes à base de microrubans de magnétorésistance géante, optimales pour la mesure des réponses de matériaux 2D à un champ magnétique hors du plan. Elles permettent l'exploration du magnétisme orbital et de courants de bord non accessibles par des mesures plus conventionnelles.

## MICROSCOPIE À EFFET TUNNEL

À l'origine, le microscope à effet tunnel (STM) se démarquait par sa capacité à imager des surfaces, en sonder les propriétés électroniques à l'échelle atomique, et manipuler des atomes un par un. S'est ajoutée plus récemment la spectroscopie sub-meV permettant de visualiser des gaps d'énergie, des orbitales moléculaires, des modes de vibration, des états magnétiques et des liaisons moléculaires. Le courant tunnel d'un STM permet également d'exciter avec une résolution spatiale sub-nanométrique la fluorescence de molécules se comportant comme des sources de photons uniques. Les progrès techniques les plus récents concernent les mesures de courant tunnel, associées à des excitations micro-ondes permettant la détection de la résonance de spin électronique de matériaux magnétiques. Ces progrès portent aussi sur la manipulation cohérente de spins atomiques individuels sur une surface et l'étude de l'influence du spin nucléaire. Des mesures de bruit dans la gamme radiofréquence par un circuit résonant devraient fournir une information

locale sur les quasi-particules de supraconducteurs non conventionnels, voire topologiques. En couplant une détection optique au STM, la photoluminescence peut être exaltée par la cavité formée entre la pointe et la surface, et résolue à l'échelle atomique, pour sélectionner des émetteurs uniques. Des expériences ont aussi été réalisées à l'échelle moléculaire, démontrant des résolutions pouvant surpasser le seuil du  $\mu\text{eV}$ , et une résolution temporelle ultime dans le domaine femto voire attoseconde, donnant accès à la caractérisation et au contrôle des spectres vibrationnels des états excités.

## MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE EN TRANSMISSION (MET)

En imagerie, les résolutions spatiales ultimes sont maintenant limitées par l'agitation thermique et une tendance émerge visant à exploiter les propriétés quantiques des électrons libres produits. Par exemple, l'injection de faisceaux laser dans un MET ouvre un nouveau champ d'études basé sur la cohérence quantique des électrons libres. Les techniques de 4D MET ou d'holographie utilisent déjà au maximum l'information sur la phase des électrons et permettent l'imagerie de champs électriques et magnétiques statiques dans l'échantillon. Par ailleurs, la sélection de la symétrie de l'état quantique de l'électron libre devrait permettre des mesures de dichroïsme magnétique à l'échelle atomique. L'arrivée de microscopies résolues en temps (sub-ps) permettra d'accéder à une combinaison unique de résolutions spatiale, temporelle et spectrale pour l'étude de systèmes photoniques ou optoélectroniques et de matériaux quantiques émergents. Par ailleurs, le développement de techniques corrélatives électron/électron ou électron/photon est en pleine expansion, permettant par exemple d'effectuer des expériences allant de l'optique quantique dans un MET à la spectroscopie attoseconde ou  $\mu\text{eV}$ . Ces avancées reposeront sans nul doute dans les années à venir sur le développement des détecteurs à électrons directs, en particulier résolus en temps, et d'instrumentation innovante incluant l'utilisation de nombreux stimuli extérieurs (température, en particulier cryogénique, courant, laser...) qui iront de pair avec la croissance des besoins en stockage et en analyse des données.

## PHOTOÉMISSION

Dans le domaine de la photoémission, nous observons des évolutions similaires en **physique de la matière condensée** et en **physique moléculaire**, par exemple avec la résolution angulaire de la distribution d'électrons émis en ARPES (spectroscopie de photoémission résolue en angle) en physique de la matière condensée et de la distribution angulaire par imagerie de vitesse en physique moléculaire, l'amélioration de la résolution temporelle, et l'exploitation d'effets de dichroïsme. La photoémission directe et inverse résolue en spin se renforcera pour l'analyse de la matière condensée et nous pouvons anticiper que le développement en phase diluée de l'analyse systématique des photoélectrons émis en fonction de

leur spin apportera la même richesse d'informations. De nombreux sujets émergents reposent sur une **sélectivité utilisant** des effets de chiralité ou de moment orbital de l'électron.

De nouvelles méthodes de caractérisation des molécules exploitent le dichroïsme circulaire grâce à des sources cohérentes basées sur la combinaison de deux peignes de fréquences ou sur le rayonnement synchrotron où la polarisation est très bien définie. Dans ce contexte, l'utilisation de lumière possédant un **moment orbital** sera de plus en plus explorée pour donner accès à des mesures et un contrôle complémentaire lors de l'interaction rayonnement-matière. Les techniques *operando*, qui sont utilisées dans certains domaines de la chimie, font leur apparition en ARPES. À cet égard, les sources laser compléteront utilement les lignes de lumière synchrotron. Les méthodes d'imagerie en ARPES sont en plein développement, ainsi que leur extension vers les rayons X. Les techniques pompe-sonde donneront accès à de nouveaux phénomènes hors équilibre. Elles permettront de suivre les dynamiques électroniques, de modifier les structures de bande des matériaux, d'étudier les paramètres réticulaires. Une perspective très intéressante est le contrôle des transitions de phase induites par les photons.

## SPECTROSCOPIES

Les techniques bien établies dans le domaine de l'optique pulsée cohérente, comme l'amplification par dérive de fréquences pour les peignes de fréquences, font leur entrée en spectroscopie THz ou micro-onde et en élargissent les champs d'applications. Les trains d'impulsions THz permettent de visualiser les vibrations cohérentes et la dynamique de molécules uniques ou de phonons, et la rapidité d'obtention des spectres laisse envisager des applications analytiques. Ces nouvelles techniques stimuleront des recherches sur les mouvements collectifs dans des systèmes complexes comme des molécules biologiques, la solvatation, la détection d'espèces instables et de radicaux, et de celles présentes dans les plasmas, dans le milieu interstellaire, ou intervenant en physico-chimie de l'atmosphère. À cet égard, la miniaturisation des sources dans le domaine THz favorise les analyses *in situ* y compris dans le domaine de la spectroscopie haute résolution (instruments embarqués, santé) et de nombreux progrès techniques y sont attendus. Enfin, **de nouveaux champs dans la spectroscopie THz** devraient s'ouvrir grâce à l'adaptation future de méthodes de détection très efficaces dans le domaine de l'infrarouge (IR). De plus, combiner le champ magnétique et les techniques IR et THz permettra d'étudier les excitations électroniques, magnétiques et phononiques aux basses énergies dans divers systèmes. Des améliorations de leurs résolutions spatiales et temporelles permettront l'exploration de structures nanométriques et de phénomènes hors-équilibre.

L'extension au domaine THz de méthodes et protocoles déjà opérationnels dans le domaine micro-onde

est en grande partie permise par l'émergence de nouvelles sources et détecteurs. Les ondes THz ont en effet l'avantage d'être transmises et insensibles aux perturbations, avec des applications possibles en cryptographie quantique. Parmi les sources THz, les lasers à cascade quantique peuvent produire des peignes de fréquences sources de lumière non classique (lumière comprimée). Côté capteurs, des progrès sont attendus dans la détection de photons uniques grâce à des matériaux 2D, y compris twistés, qui possèdent une densité de porteurs de charges de plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle des matériaux utilisés dans l'IR. Enfin, l'interférométrie aux fréquences THz offre une détection dans un domaine spectral où les détecteurs sont rares.

Dans d'autres domaines spectraux, de grands instruments comme les lignes de lumière de SOLEIL et sa prochaine mise à niveau, ainsi que le développement des sources innovantes, permettront l'analyse *in situ* ou *operando*. Une partie des expériences d'imagerie cohérente actuellement menées sur lasers à électrons libres pourra également s'effectuer au synchrotron SOLEIL, qui gagnera en brillance et assurera une haute cadence sur plusieurs dizaines de lignes en parallèle.

La gamme spectrale des peignes de fréquences optiques continue à s'étendre vers les hautes énergies pour étendre la spectroscopie double peigne à une gamme de fréquences optiques plus élevées. La maturité atteinte par certaines techniques de spectroscopies expérimentales ouvre la voie à des expériences complexes qui les couplent à des dispositifs *operando*, comme ceux dérivés de la spectrométrie de masse ou de la microfluidique et des méthodes de détection résolues en temps, en angle et en énergie. Deux défis sont à relever pour atteindre cette synergie: il sera tout d'abord nécessaire de mettre au point des sources à haut taux de répétition qui restent compatibles avec les contraintes expérimentales en termes d'exploration de l'espace des paramètres de contrôle. D'autre part, la complexité et la quantité des données à traiter devront faire de plus en plus appel à des méthodes nouvelles telles que celles issues de l'intelligence artificielle.

Enfin, dans une grande partie des domaines cités dans cette prospective, supraconducteurs, liquides de spins, multiferroïques, matériaux topologiques, matériaux magnétiques, textures magnétiques, skyrmions, etc., la diffusion des neutrons joue un rôle clef, de par sa capacité à révéler les corrélations entre spins, à mesurer la dispersion des excitations collectives, ou encore le spectre des excitations déconfinées. Innover en proposant de nouveaux concepts instrumentaux, disposer d'infrastructures de recherche permettant ce type de mesures constitue un atout de premier plan, dans un contexte où la compétition internationale est ardue.