

Tableau noir.
© Institut PÉRIMÈTRE de physique théorique, 2016

Lois fondamentales

RÉSUMÉ

L'énoncé et l'étude des lois et des interactions fondamentales de la physique s'étendent sur un très vaste spectre : du rayon de Hubble, $r_H = 10^{26}$ m, à l'échelle de Planck, $l_p = 10^{-35}$ m. Ce spectre couvre intimement la physique des particules élémentaires et des astroparticules, la cosmologie et la gravité en passant par la physique de basse énergie comme la physique atomique et de la matière condensée.

Au-delà de l'interprétation d'observations à travers des principes fondateurs qui reposent sur un fort socle mathématique, une étude théorique peut mener à un nouveau paradigme dont la vérification expérimentale, au moment de son énoncé, n'est pas encore possible. La théorie peut aussi développer des outils de calcul et d'analyse inédits pour **fournir des prédictions** de plus en plus précises d'observables expérimentales, en cours ou à venir, afin de **valider un modèle théorique**, délimiter et guider des perspectives originales, ou déceler un signe avant-coureur de **nouvelle physique**. Cette approche théorique est dans la lignée d'une longue tradition. En repensant le temps et l'espace dans un cadre mathématique novateur, il aura tout de même fallu attendre plus d'un siècle la détection des **ondes gravitationnelles** (OG). Depuis, une ère sensationnelle commence pour sonder l'Univers. Les futures analyses de

données haute précision en OG et cosmologie auront besoin d'outils mathématiques tout aussi novateurs. D'ailleurs, des développements fascinants voient le jour, empruntant de nouvelles techniques (amplitudes) et des approches (*bootstrap*) héritées des calculs de précision en physique des hautes énergies. Ainsi, la découverte récente du boson de Higgs aura requis des calculs héroïques et des simulations phénoménologiques poussées. Cet effort sera poursuivi, d'autant que les calculs théoriques ont mis en avant des structures mathématiques ouvrant un domaine en pleine expansion. On trouve une effervescence similaire dans l'extraction et l'interprétation des paramètres cosmologiques dans le cadre du **modèle Λ CDM**, avec la confirmation que trois quarts du bilan énergétique actuel de l'Univers semblent dus à une constante cosmologique de nature inconnue, un quart à une matière noire insaisissable, et seulement quelques pourcents aux ingrédients de notre physique standard. En outre, ce modèle n'explique pas l'asymétrie matière-antimatière. Il se pourrait cependant que la masse des neutrinos fournisse une explication si ces neutrinos sont du type Majorana. La **physique des neutrinos** est dans une phase foisonnante à la fois en physique des hautes énergies, en cosmologie, en astrophysique et à travers les OG. Le problème d'une **formulation quantique fondamentale de la gravité** reste un défi majeur qui questionne les principes fondateurs de la mécanique quantique, la nature de l'espace-temps et l'origine de l'énergie noire et de la matière noire. Par exemple, l'étude des corrélations dans les fluctuations de densité primordiales — qui conservent une trace de leur genèse, quand à la fois la mécanique quantique et la gravité jouaient un rôle fondamental — permettra d'élucider plusieurs mystères. Une activité intense repose sur la découverte de dualités entre certaines théories de jauge et certaines formulations de la gravitation dans des espaces courbes, avec des ramifications multiples et captivantes. Les propriétés des dualités, l'apport de l'étude des systèmes intégrables et la découverte de symétries sous-jacentes (insoupçonnées jusqu'à récemment) promettent des développements considérables. On trouve une application à la matière condensée de la dualité holographique qui relie la gravitation quantique dans un espace anti-de Sitter à une théorie des champs conforme définie sur le bord de cet espace. En effet, des métaux dits étranges (ou planckiens) pourraient avoir une intrication quantique et un lien avec la physique des trous noirs. De même, en astrophysique des particules, l'approche **synergique multi-messagers** est amenée à se développer considérablement. Cette approche vise à combiner les manifestations multiples d'un même événement à travers plusieurs observables : signaux électromagnétiques sur un large spectre incluant ceux émis par les supernovæ et kilonovæ, période des pulsars, télescopes à neutrinos, rayons cosmiques chargés notamment d'antimatière, OG, fond diffus cosmologique (CMB), cartographie des grandes structures (LSS) et autres sondes cosmologiques. Une autre synergie en mouvement

concerne l'exploitation de différents aspects de la métrologie quantique par la communauté des physiciennes et physiciens des hautes énergies.

Aux basses énergies, les avancées réalisées dans **le contrôle précis de la lumière et de la matière** ont conduit à la montée en puissance et à la diversification des mesures de précision. La convergence de nombreuses technologies et méthodologies promet de réels progrès sur une décennie dans divers domaines (métrologie des fréquences, l'interférométrie atomique, opto-mécanique...). Celles-ci couvrent le contrôle à l'échelle quantique de systèmes de complexité croissante, l'extension de la métrologie temps-fréquence ainsi que des dispositifs photoniques à des fenêtres spectrales jusque-là inaccessibles avec des puretés spectrales inégalées et des gammes de puissances étendues du photon unique au pétawatt. De nouveaux objets d'étude qui présentent une sensibilité accrue sont proposés pour sonder la **variation des constantes fondamentales**, tester les symétries fondamentales et l'électrodynamique quantique aux ordres supérieurs ou rechercher des signatures de matière noire ultralégère. L'ensemble des expériences dédiées aux mesures de précision a un potentiel de progression et de renouvellement indiscutable, tout d'abord via l'amélioration des dispositifs expérimentaux existants en termes de bruit/stabilité et biais/exactitude, mais aussi via l'exploitation des phénomènes quantiques les plus poussés tels que 1) l'intrication et la génération d'états comprimés de spins ou de la lumière pour atteindre des sensibilités au-delà de la limite quantique standard, 2) le contrôle quantique optimal, 3) les mesures combinant plusieurs sous-systèmes couplés (certains servant à sonder l'environnement ou à protéger de la décohérence). En outre, **l'hybridation entre différents capteurs** devrait permettre un gain substantiel en sensibilité et un accès à de nouvelles grandeurs d'intérêt. De même, la mise en réseau des horloges et capteurs quantiques à grande échelle promet des avancées significatives qui devraient surpasser la portée des capteurs individuels. Dans ce contexte, **l'infrastructure de recherche REFIMEVE** unique au monde est un atout pour la France. L'espace et les laboratoires souterrains sont des environnements privilégiés. En particulier, les expériences de physique quantique dans l'espace suscitent une attention croissante en raison des nombreuses possibilités qu'elles offrent pour tester les lois fondamentales de l'Univers, que ce soit avec des atomes froids, des dispositifs photoniques ou opto-mécaniques.

Lois fondamentales

PRÉAMBULE

La distribution des thématiques au sein des instituts du CNRS fait que, pour la physique des lois fondamentales, on retrouve dans CNRS Physique surtout d'une part les mesures de précision à basse énergie et d'autre part la théorie des hautes énergies et des grandes distances, la contrepartie expérimentale de celle-ci étant développée dans d'autres instituts tel que CNRS Nucléaire & Particules pour la physique des (astro) particules, et CNRS Terre & Univers pour l'astrophysique et la cosmologie. Ce texte de prospective reflète les thématiques d'intérêt plus direct pour CNRS Physique, sans pour autant manquer de souligner la nécessité de collaborations et synergies avec les autres instituts.

THÉORIE

L'énoncé et l'étude des lois et des interactions fondamentales de la physique couvrent un très vaste spectre d'échelles allant du rayon de Hubble, $r_H = 10^{26}$ m, à l'échelle de Planck, $l_p = 10^{-35}$ m. Il n'est donc pas étonnant que le sujet recouvre intimement la physique des particules élémentaires, les astroparticules, la cosmologie et la gravité en passant par la physique de basse énergie comme la physique atomique et la matière condensée. Au-delà de l'interprétation d'observations à l'aide des principes fondateurs qui reposent sur un fort socle mathématique, la modélisation théorique prend souvent une approche réductionniste, qui à partir de quelques lois et briques fondamentales (constituants de la matière et forces), explique et prédit un très grand nombre d'observables.

Une étude théorique peut mener à un nouveau paradigme dont la vérification expérimentale, au moment de son énoncé, n'est pas encore possible. La théorie peut aussi développer des outils de calculs et d'analyses inédits pour fournir des prédictions de plus en plus précises d'observables expérimentales, en cours ou à venir, afin de valider un modèle théorique, de délimiter et guider des perspectives originales, ou de déceler le signe avant-coureur d'une nouvelle physique. Cette approche théorique est dans la lignée d'une longue tradition. En repensant le temps et l'espace, dans un cadre mathématique novateur, il aura tout de même fallu attendre plus d'un siècle la détection des ondes gravitationnelles (OG). Depuis, une ère sensationnelle commence pour sonder l'Univers. Les futures analyses de données haute précision en OG et cosmologie auront besoin d'outils mathématiques tout aussi novateurs. D'ailleurs, des développe-

ments fascinants voient le jour, empruntant de nouvelles techniques (amplitudes) et des approches (*bootstrap*) héritées des calculs de précision en physique des hautes énergies.

La découverte relativement récente du boson de Higgs a contribué à la validation du concept de symétrie cachée, essentielle pour rendre compte de la masse des particules tout en intégrant le principe de symétrie de jauge. Pour révéler cette particule, prédite 50 ans plus tôt, des calculs héroïques et des simulations phénoménologiques poussées ont été requis. Cet effort sera poursuivi d'autant que les calculs théoriques ont mis en avant de nouvelles structures mathématiques, ouvrant un domaine en pleine expansion.

On trouve une effervescence similaire dans l'extraction et l'interprétation des paramètres cosmologiques dans le cadre du modèle Λ CDM, avec la confirmation que trois quarts du bilan énergétique actuel de l'Univers semblent dus à une constante cosmologique de nature inconnue, un quart à une matière noire insaisissable, et seulement quelques pourcents aux ingrédients de notre physique standard. En outre, ce modèle n'explique pas l'asymétrie matière-antimatière et ne rend donc pas compte du déficit d'antimatière. Il se pourrait cependant que la masse des neutrinos, révélée par le biais des oscillations de saveur, fournisse une explication si ces neutrinos sont du type Majorana. La physique des neutrinos est dans une phase foisonnante à la fois en physique des hautes énergies, en cosmologie, en astrophysique et à travers les OG.

Le problème d'une formulation quantique fondamentale de la gravité reste un défi majeur qui questionne les principes fondateurs de la mécanique quantique, la nature de l'espace-temps et l'origine de l'énergie noire et de la matière noire. Par exemple, l'étude des corrélations dans les fluctuations de densité primordiales — qui conservent une trace de leur genèse, quand à la fois la mécanique quantique et la gravité jouaient un rôle fondamental — permettra d'élucider plusieurs mystères.

Une activité intense repose sur la découverte de dualités entre certaines théories de jauge (supersymétriques) et certaines formulations de la gravitation dans des espaces courbes, avec des ramifications multiples et captivantes. Les propriétés des dualités, l'apport de l'étude des systèmes intégrables et la découverte de symétries sous-jacentes (insoupçonnées jusqu'à récemment) promettent

des développements considérables — par ex., avec des méthodes de calculs d'amplitudes de diffusion bien plus efficaces que l'approche diagrammatique de Feynman. On trouve une application à la matière condensée de la dualité (ou correspondance) holographique qui relie la gravitation quantique dans un espace anti-de Sitter à une théorie des champs conforme définie sur le bord de cet espace. En effet, des métaux dits étranges (ou planckiens) pourraient avoir une intrication quantique et un lien avec la physique des trous noirs.

De même, en astrophysique des particules (ou astroparticules), l'approche multi-messagers vise à combiner les manifestations multiples d'un même événement à travers plusieurs observables: signaux électromagnétiques sur un large spectre incluant ceux émis par les supernovæ et kilonovæ, période des pulsars, télescopes à neutrinos, rayons cosmiques chargés notamment d'antimatière, OG, fond diffus cosmologique (CMB), cartographie des grandes structures (LSS) et autres sondes cosmologiques... Cette approche permet, par exemple, d'analyser l'environnement des trous noirs supermassifs avec des techniques d'interférométrie nouvelles en radio ou en infrarouge, ou encore une association probable entre des neutrinos énergétiques et des observations de déchirement gravitationnel. Cette approche multi-messagers est amenée à se développer considérablement.

Au niveau international, un effort expérimental monumental est mené afin d'explorer ces domaines. On peut citer LIGO-Virgo-Kagra, EPTA, LISA, Einstein Telescope, Euclid, LiteBird, le run 3 du LHC avant sa phase haute luminosité, DUNE, KM3NeT, CTA... Leurs résultats seront livrés sur une période de 10 ans et plus. L'essor des techniques de détection continuera d'aller de pair avec le développement de nouvelles méthodes de calculs. Les aspects mathématiques devront être renforcés, à travers, par exemple, des collaborations avec CNRS Mathématiques.

Nous insistons sur le fait que les nouveaux paradigmes décrits dans ce document impliquent des synergies qui restent à développer, au niveau français d'abord. Une incitation forte à **dépasser les frontières** doit être instituée. De nombreux développements futurs ne pourront être menés correctement que grâce à des collaborations inter-instituts. Il faut aller au-delà des cloisonnements, et favoriser les projets et les structures intra- et inter-instituts. À cet égard, et dans le contexte d'une prospective à dix ans, notons que la nature même de cette thématique implique des collaborations très étroites entre CNRS Physique et des instituts tels que CNRS Nucléaire & Particules, CNRS Terre & Univers et CNRS Sciences Informatiques. Certains de ces instituts ont une tradition de travail et de stratégie ancrée sur des projets internationaux autour des grandes infrastructures. La théorie a toujours joué un rôle fondateur et précurseur dans l'établissement des priorités (nationales et internationales) aboutissant à ces structures, ainsi que dans l'exploitation de leurs données. Il est donc **fondamental** que la physique théorique,

au sein de CNRS Physique, renouvelle son ambition, et investisse à la hauteur de ces défis futurs.

INTERACTIONS FONDAMENTALES : PHYSIQUE DES PARTICULES, LE VIDE, LA MASSE, LES CALCULS ET LES MESURES DE PRÉCISION

LHC, Higgs et théories effectives. La découverte du Higgs, seule particule scalaire élémentaire connue, constitue le couronnement du modèle standard de la physique des particules qui décrit les forces fondamentales (électrofaible et forte) dans le cadre d'une théorie quantique des champs incorporant une brisure spontanée de symétrie. À ce jour, il n'existe aucune déviation entre les calculs théoriques de haute précision et les mesures expérimentales sur, par ex., les *processus rares*, reléguant l'échelle d'une nouvelle physique dans ce secteur à quelques milliers de TeV. Cependant, une nouvelle physique devrait exister, pour expliquer la matière noire ou l'origine de la masse des neutrinos... Notons qu'avec une masse de Higgs de 125 GeV il semblerait que nous vivions dans un état métastable! De plus, une masse de Higgs si faible, comparée à la masse de Planck ou même aux échelles sondées par les instruments actuels paraît « non naturelle ». En effet, aucune symétrie du modèle standard ne protège la masse d'une particule scalaire au contraire des bosons vecteurs ou des fermions. Bien que l'on essaie, et essaiera, de trouver une telle symétrie et un modèle dynamique associé, comme ce fut le cas pour la supersymétrie, par ex., les études phénoménologiques se concentreront de plus en plus vers une approche sans parti pris exploitant la formulation et les techniques des théories effectives en tandem avec des calculs de précision accrue.

Masse et physique de la saveur. Bien que le mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible oblige à penser la masse non comme une entité intrinsèque de la particule, mais comme une propriété du vide dont la valeur moyenne est source de toute masse, il reste à élucider les textures de masse ou l'agencement des valeurs disparates des couplages de Yukawa. Même si une hiérarchie semble établie dans le secteur des quarks, la dynamique sous-jacente est à trouver. Avec trois familles, une violation de CP est possible, mais elle n'est pas suffisante pour expliquer le déficit d'antimatière requis pour la baryogénèse. Reste aussi le mystère de l'absence de violation de la symétrie CP en QCD. L'hypothétique solution postulant l'existence de l'axion, un scalaire pseudo-Goldstone, connaît un fort regain d'attention, faisant de cette particule de très faible masse et couplage une candidate pour la matière noire. Des investigations dans le secteur de la saveur des quarks devraient être poursuivies pour contraindre les textures de masse et chercher les premiers signes d'une nouvelle physique.

Les neutrinos. En parallèle, la découverte que les neutrinos ont une masse vient d'ouvrir un chapitre fascinant où une recherche tant théorique qu'expérimentale est en pleine effervescence. La masse infime des neutrinos

qu'imposent les données (cosmologiques, de faisceaux et réacteurs pour les expériences d'oscillation ou de la désintégration β) suggère que cette masse n'est (en grande partie) pas due à la brisure électrofaible, d'autant que la structure des masses et mélanges dans ce secteur semblerait tout autre que celle dans le secteur des quarks. Les neutrinos pourraient très bien être de type Majorana, associés dans un schéma «see-saw» à des neutrinos stériles restant à découvrir. Les neutrinos ont aussi une place de premier plan en astroparticules. Une violation de la symétrie CP dans ce secteur pourrait permettre d'expliquer l'asymétrie matière-antimatière (via la leptogénèse). Pour que ceci soit possible, il faudra travailler non seulement sur les modèles de neutrinos et l'implémentation des ingrédients de la leptogénèse, mais aussi sur la physique standard, notamment les calculs de flux pour les prochaines expériences. Un effort reste à faire dans le calcul des éléments de matrices nucléaires. Cela concerne en premier lieu la double désintégration β , notamment celle sans émission de neutrino, qui serait un signal sans ambiguïté de la nature Majorana des neutrinos suggérant un scénario de leptogénèse. Cela concerne aussi les futures mesures du moment électrique dipolaire (neutron, noyaux légers, molécules radioactives...). Des avancées dans les calculs de structure nucléaire et de nouvelles méthodes et algorithmes de calculs sur réseau permettant de construire une physique nucléaire *ab initio* seraient alors nécessaires.

Précision et métrologie. L'apport de la physique standard et d'une possible nouvelle physique aux processus rares relevant de la structure de la saveur dans le secteur des quarks et des leptons (moments/transitions magnétiques, dipolaires, désintégrations rares...) devra être précisément quantifié pour accompagner l'effort expérimental (expériences à basses énergies sur les facteurs de forme électromagnétiques, LHCb, BELLE-II...). Pour les mesures à très basse énergie et la spectroscopie de précision, l'apport de la métrologie sera crucial. On pense à la possibilité de champs scalaires de très faibles masses et couplages, au-delà du set-up des axions, qui constitueraient une cinquième force, et à l'extraction des constantes fondamentales en présence de nouvelle physique émanant de très légères masses.

Calculs de précision. La découverte d'une nouvelle physique requiert des calculs de haute précision. En effet, les prédictions théoriques sont basées en grande partie sur des développements perturbatifs en théorie des champs. Ils sont essentiels pour déterminer les corrections à des ordres sous-dominants et sonder les effets indirects des particules virtuelles. Ils le seront encore plus pour sonder, par ex., les propriétés du Higgs. Les prédictions théoriques incluent aussi des éléments non perturbatifs tout aussi essentiels quand il s'agit de prendre en compte les hadrons. C'est le cas du calcul du moment magnétique du muon au-delà de l'ordre dominant, de la physique de la saveur, et également de la physique au LHC si ce n'est pour tenir compte de la structure des protons et de leur contenu en quarks et gluons (PDF-Parton Density

Functions), de l'hadronisation et même les phénomènes de resommation. Le développement de techniques de sous-structure des jets en physique des hautes énergies connaîtra des progrès remarquables, surtout après la validation des approches de l'apprentissage profond.

Précision: aspects perturbatifs et approche amplitude. L'identification de nouvelles structures mathématiques a permis de dépasser les difficultés calculatoires de l'approche traditionnelle basée sur les diagrammes de Feynman dès lors que l'ordre de perturbation (le nombre de boucles ou de pattes externes) est grand. Grâce à ces structures mathématiques, des formalismes élégants et efficaces ont pu être développés. De nouvelles symétries et des relations de récursions ont été dévoilées permettant de construire des boucles à partir d'amplitudes à l'arbre. Par ailleurs, une systématisation des fonctions analytiques représentant les intégrales de Feynman et leur itération a récemment donné lieu au concept de symboles qui encodent les fonctions transcendantales via l'alphabet (collections de fonctions mathématiques composées de logarithmes, les polylogarithmes, les valeurs zêta multiples, les courbes elliptiques, et peut-être plus à venir). Cette activité (amplitudes), qui se nourrit de plusieurs aspects de la physique mathématique et qui nourrit à son tour les domaines de la cosmologie et des ondes gravitationnelles, est en pleine expansion. L'application de ces idées au calcul de boucles dans la théorie électrofaible reste embryonnaire, des développements de fond sont à penser. La renormalisation complète de la théorie électrofaible au-delà d'une boucle n'a pas encore été achevée. Elle sera pourtant essentielle pour un futur collisionneur e^+e^- .

Précision: aspects non perturbatifs. En ce qui concerne l'aspect non perturbatif, les calculs *ab initio* sur réseau (notamment pour la QCD et la théorie quantique des champs en général) atteindront des précisions accrues et s'appliqueront à de nouvelles observables (par ex. désintégrations hadroniques inclusives). On s'attaquera à des simulations avec des mailles plus fines dans des volumes plus grands, ce qui est loin d'être évident avec les algorithmes actuels. Par ailleurs, il est vivement encouragé d'accroître l'effort mis sur l'étude des observables de la physique hadronique sur le cône de lumière. Un axe important est la détermination des PDF, cruciale pour le LHC, mais aussi pour les expériences futures de neutrinos énergétiques (LBNF/DUNE ou HyperK). En plus de la structure longitudinale, une tomographie tridimensionnelle de la structure en quarks du proton et plus généralement une tomographie partonique en position, impulsion et spin des hadrons devront être réalisées. Avec des faisceaux de noyaux, on pourra isoler les collisions dites «diffractives», qui devraient mettre en évidence le phénomène de saturation qui se produit lorsque le nombre d'occupation des états quantiques est grand. L'équation d'état de la matière nucléaire est indispensable pour la modélisation des étoiles à neutrons (EN), et les propriétés de noyaux très instables, dits exotiques, sont essentielles pour comprendre la synthèse des éléments lourds dans

l'Univers au sein des supernovæ. Ces études sont en plein essor. D'une part, la détection des OG émises lors de la fusion des EN donne des contraintes nouvelles sur l'équation d'état. D'autre part, de nouveaux accélérateurs délivrant des faisceaux d'ions radioactifs voient le jour à travers le monde et transformeront notre connaissance des noyaux exotiques. De nouvelles idées pour la QCD sur réseau sont nécessaires pour étudier ces systèmes à grande densité à cause du problème de signe lié aux fermions à densité non-nulle, les méthodes holographiques (formulées directement en signature Lorentzienne) pourraient venir à la rescousse. Les théories chirales, tel le secteur électrofaible, ne peuvent pour le moment pas être mises en œuvre pour une étude non perturbative. Cependant une théorie des champs sur réseau peut en principe être utilisée pour étudier des théories de jauge avec un contenu en matière qui les rendraient conformes à basse énergie. De telles théories pourraient apporter une explication plus fondamentale au mécanisme de Higgs (ce dernier serait alors un pseudo-dilaton ou un pseudo boson de Goldstone composite). L'étude de ces théories permet également des comparaisons avec l'approche du « conformal bootstrap ».

Codes de simulations. Les codes de simulation Monte Carlo pour la physique aux collisionneurs resteront un outil crucial. Un long chemin est encore à parcourir afin de pouvoir simuler de façon systématique les processus pertinents pour le LHC et les collisionneurs futurs (les mesures des couplages du Higgs, l'exploitation de distributions à grand p_T dans plusieurs processus...). Par exemple, les calculs à l'ordre sous-dominant en QCD ne peuvent toujours pas être combinés de façon systématique avec les algorithmes de cascades partoniques nécessaires à la description de l'environnement d'un collisionneur hadronique, et de nombreux processus importants restent trop compliqués pour les performances des ordinateurs actuels. L'automatisation des calculs aux ordres sous-dominants élevés pourrait ainsi voir le jour dans les prochaines années. Une inclusion systématique des corrections sous-dominantes électrofaibles combinées aux cascades partoniques reste à faire. Ce sera crucial au vu de la précision des futures données.

MATIÈRE NOIRE

La matière ordinaire qui nous constitue représente une toute petite partie de la composition énergétique de l'Univers. Une recherche intense tant théorique qu'expérimentale continuera d'être menée pour comprendre la nature de la matière noire (MN) et la meilleure façon de la détecter. Ses propriétés restent inconnues au-delà de ses effets gravitationnels. Son spectre de masse, immense, s'étend de 10^{-22} eV à 10^{70} eV. La possibilité de plusieurs composantes de MN n'est pas exclue.

Matière noire ultra-légère. Pour des masses inférieures à l'eV, on entre dans le domaine de la matière noire ondulatoire. Pour des scénarios impliquant l'axion de la QCD ou des particules similaires (ALPs), les techniques de

mesure quantique (métrologie) constituent un « lampadaire » sous lequel une recherche innovante est à peine amorcée, et nécessitera un support théorique. Notons que certaines techniques développées pour traquer ce type de MN peuvent être appliquées aux ondes gravitationnelles de haute fréquence (au-delà du kHz).

Du keV au 100 TeV : le domaine de la MN en tant que particule. Des calculs plus précis et des idées sur l'exploitation de la détection directe et/ou des détections indirectes devraient être menés. Ceci concerne les particules de MN avec des masses et couplages à l'échelle électrofaible (WIMP) et celles avec des couplages encore plus faibles (FIMP). Ces dernières n'entreraient pas en équilibre thermique avec les particules connues, mais pourraient être produites avec la bonne densité relique grâce à un mécanisme de gel, même si de tels scénarios restent sensibles aux conditions initiales de l'univers primordial.

Dans la gamme de masse du keV au MeV, la possibilité de sonder cette matière noire grâce à la diffusion non seulement par des noyaux, mais aussi par des électrons doit être poursuivie. Ici plusieurs idées foisonnent, faisant appel à des techniques basées sur la rupture de liaisons chimiques, production de centres de couleurs (défauts) dans les cristaux, électrons libres dans des métaux supraconducteurs, des cristaux diélectriques... De nouvelles idées pourraient émerger d'échanges entre astroparticules et matière condensée, combinant du côté théorique l'approche DFT (pour la fonctionnelle de densité) et les techniques des théories effectives (EFT) en physique des particules. Le lien entre MN et recherches aux collisionneurs, notamment le LHC, devrait être poursuivi : certains modèles de MN prévoient aussi des particules avec des durées de vie macroscopiques, donnant lieu à des vertex déplacés et des « traces évanescentes » (*disappearing tracks*).

Matière noire hyper-lourde. Au-delà du PeV on entre dans le domaine des objets compacts lourds (tels que les trous noirs primordiaux) pour lesquels des contraintes ou des découvertes pourraient émaner de la cosmologie et des données astrophysiques (rayons X, microlentillage, neutrinos).

La masse et les diverses propriétés de la MN devront être testées par les mesures de précision en cosmologie (grâce au CMB et aux catalogues de grandes structures), les données des OG et les observations multi-messagers en physique des astroparticules. À titre d'exemple, les EN, grâce à leur forte gravité, pourraient accréter des particules de MN (axions...). Cette MN pourrait aussi être produite lors de fusion de tels objets. La MN bosonique ultra-légère pourrait former des objets compacts imitant de véritables EN et des trous noirs, avec un impact sur les OG. Les interactions des neutrinos avec une MN bosonique ultra-légère peuvent produire des signaux dans le flux de neutrinos solaires, tout comme les neutrinos stériles. Encore une fois, les ajustements globaux étant complexes, le développement et l'adaptation profonde

d'outils numériques avancés sont essentiels. Ces thématiques sont un des exemples de la **synergie** que nous avons soulignée et qui appelle au décloisonnement.

ONDES GRAVITATIONNELLES, COSMOLOGIE ET ASTROPARTICULES

Ondes gravitationnelles

Les OG ouvrent une nouvelle ère de détection multi-messagers pour sonder la gravité, la cosmologie et l'astrophysique. La communauté scientifique française y est très investie. Soulignons que la détection directe des OG par LVK en 2015 n'aurait pas pu avoir lieu sans, entre autres, la modélisation des **formes d'ondes** qui, à l'origine, a été développée principalement en France. À l'horizon 2030, avec le réseau actuel de détecteurs, nous aurons réuni suffisamment de données pour déterminer, par ex., la population des trous noirs dans l'univers local (distributions de masse et de décalage vers le rouge), contraindre la constante de Hubble avec une précision inférieure au pourcent, ou encore tester la relativité générale (RG) en champ fort. Plusieurs grandes expériences (NRT, EPTA, LISA, ET, etc., ainsi que l'interférométrie atomique), qui couvriront un plus large spectre de fréquences, verront le jour. Ces expériences de plus grande sensibilité permettront de détecter des événements à des distances plus élevées, et nécessiteront une meilleure compréhension du phénomène de lentillage gravitationnel des OGs, ainsi que de nouvelles méthodes d'analyse pour traiter d'énormes quantités de données avec des signaux qui se chevauchent.

Formes d'onde. L'analyse du signal d'OG repose sur l'exploitation des formes d'ondes émises par différentes sources qu'il faut prédire avec la plus haute précision, que ce soit en RG ou dans des théories de gravité modifiées (un domaine dans lequel la France est pionnière). Une forme d'onde gravitationnelle complète doit décrire les trois phases de la coalescence d'un système binaire : la phase spiralante, la fusion et la relaxation. Pour comparer ces formes d'ondes avec les données des interféromètres gravitationnels et avoir une compréhension analytique de la physique des OGs sur un large éventail de paramètres, il faut inclure les effets de spin, de marée, la rétroaction du rayonnement gravitationnel, le flux d'OG et l'évolution séculaire du système binaire. Il est également nécessaire de dépasser l'approximation de faible excentricité. L'approche « effective à un corps », initialement développée en France, est l'une des méthodes pour déterminer les formes d'ondes des phases spiralantes et de relaxation. Il est donc nécessaire de développer (i) des résultats analytiques aux ordres les plus élevés possibles dans un développement post-newtonien (limite des petites vitesses, champs faibles) ou post-Minkowskien (champs faibles, mais à tous les ordres en vitesses), (ii) la méthode de la force propre (développement pour des binaires de petit rapport de masse), (iii) la relativité numérique et (iv) les techniques de théorie effective. Les approches analytiques post-Minkowskiennes ont grandement bénéficié des méthodes de calcul des amplitudes de diffusion pro-

venant de la physique des hautes énergies et ont effectué récemment des progrès considérables.

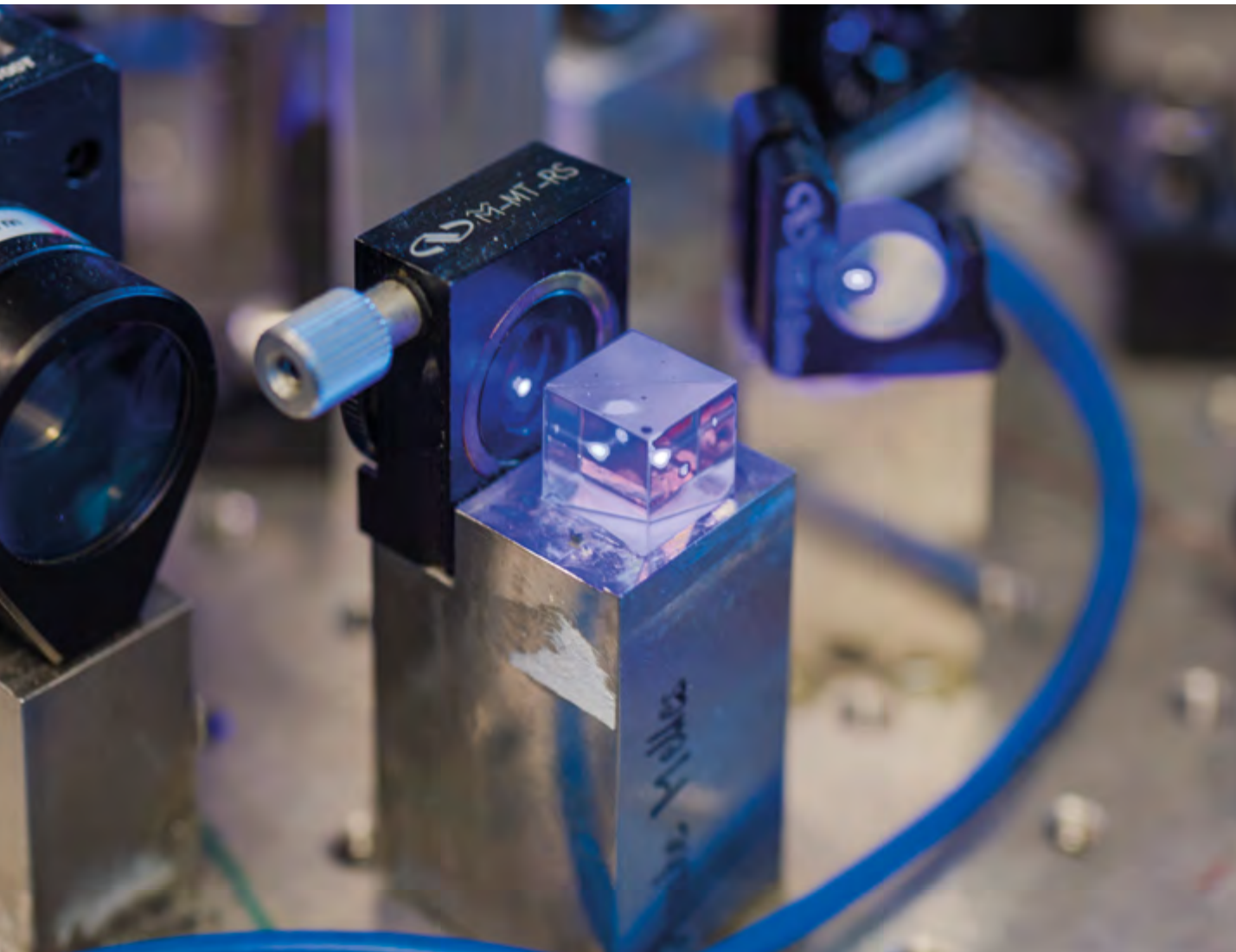
Les binaires avec des rapports de masse extrême (*extreme mass ratio inspiral*, EMRI) seront détectées en grand nombre par LISA. Obtenir leurs formes d'onde avec les méthodes de force propre jusqu'au second ordre, notamment pour les trous noirs de Kerr, est crucial. L'étude des résonances dans les EMRIs et la question de leur durabilité en présence d'un troisième corps perturbateur sont des questions ouvertes importantes. Il existe également une possibilité de dynamique chaotique dans ces systèmes.

En ce qui concerne la phase de relaxation, un calcul plus précis des modes quasi-normaux est nécessaire. Des travaux supplémentaires sur la déformabilité de marée des trous noirs en RG et les moments multipolaires induits par les effets de marée permettront également de futurs tests du « théorème de la calvitie des trous noirs » en RG. Dans le cadre des théories de gravité modifiées, il faudra adapter et étendre ces techniques, caractériser les propriétés des étoiles et des trous noirs (notamment l'existence ou non d'un horizon des événements), et évaluer l'existence d'autres objets compacts tels que les trous de ver. Pour le moment, des formes d'ondes précises n'ont été calculées que pour les théories scalaire-tenseur. Il sera, par exemple, nécessaire de prendre en compte des dégénérescences possibles avec une équation d'état inconnue pour les EN, des relations de dispersion non triviales ou un amortissement gravitationnel non standard. Des tests ultimes de l'équation d'état, utilisant par exemple la base de données COMPOSE développée en France, devront être effectués en collaboration avec, entre autres, les physicien·nes travaillant sur le plasma de quarks-gluons.

En plus des systèmes binaires qui ont été détectés jusqu'à présent, il peut exister d'autres sources ponctuelles d'OG, Ce cordes cosmiques, les étoiles à bosons, et d'autres objets exotiques dont il faudra prédire les formes d'ondes. Il est aussi essentiel d'obtenir une meilleure compréhension des mécanismes de production du fond diffus cosmologique d'OG au-delà de l'inflation standard, notamment pendant le réchauffement cosmologique et les transitions de phase, ou par l'intermédiaire de défauts topologiques, de pics dans le spectre primordial et de trous noirs primordiaux. Un calcul précis du spectre en fréquence associé à ces mécanismes facilitera leur détection.

Cosmologie

Une moisson de nouvelles données cosmologiques, auxquelles on associera les analyses émanant des OG, va déferler dans les prochaines années : cartographie des grandes structures, du lentillage gravitationnel, des raies d'émission spectrale, de la polarisation du fond diffus cosmologique, mesures du taux d'expansion de l'univers avec de nouvelles chandelles standards et sirènes standards ou directement par suivi temporel du décalage vers le rouge d'objets donnés, mesures plus précises de l'abondance des éléments primordiaux, observation de



Cube séparateur du banc optique d'une horloge à réseau optique au strontium. © Cyril FRESILLON / SYRTE / FIRST-TF / CNRS Images

la morphologie et de l'évolution des galaxies dans l'univers lointain et peut-être, à plus long terme, mesure des distorsions de fréquence du fond diffus cosmologique (CMB) et des anisotropies du fonds d'OG. L'investissement du côté théorique doit être à la hauteur de la précision de ces données. Cela constitue un éventail de motivations pour intensifier les recherches dans les directions suivantes :

Univers primordial. La communauté se fixe pour objectif d'importants progrès théoriques dans la compréhension de l'inflation et du réchauffement cosmologique. À un niveau phénoménologique, des questions se posent sur la génération de la non-gaussianité et des trous noirs primordiaux. À un niveau plus fondamental, il semble possible de réinterpréter les observables inflationnaires en tant que conséquence de symétries, afin de mieux comprendre l'univers primordial. Ceci inclut l'exploration et l'adaptation à la cosmologie des approches *bootstrap* et holographiques. Il serait également fructueux de mieux comprendre le problème de la complétude ultra-violette et le rôle de la physique quantique pendant l'inflation (transition quantique-classique, décohérence, confronta-

tion aux interprétations de la mécanique quantique). La communauté sera par ailleurs appelée à étudier plus en détail la cosmologie des trous noirs primordiaux (mécanismes de production, formation, évolution, accrétion, agrégation, fusion). Finalement, dans le domaine de la physique du CMB, un travail théorique reste à accomplir en ce qui concerne certains effets de physique non-standard sur la polarisation (bi-réfringence) ou les distorsions de fréquence.

Cosmologie des particules. La nucléosynthèse primordiale devra être modélisée avec plus de précision, en intégrant notamment les progrès sur la mesure des taux de réaction nucléaire. Les progrès dans l'observation du CMB, des grandes structures et des abondances d'éléments primordiaux devront être répercutés sous forme de nouvelles contraintes sur la masse des neutrinos (avec une détection plausible dans la prochaine décennie) et d'autres propriétés des neutrinos (interactions, potentiel chimique, distribution non thermique, neutrinos stériles), de la matière noire et du secteur sombre.

Tests cosmologiques des théories de gravité. Le domaine

à l'interface entre cosmologie et gravitation est appelé à se développer, avec des études systématiques de l'impact des théories de gravité modifiées sur le CMB, la formation des grandes structures (aux échelles linéaires et non-linéaires) et la nucléosynthèse. Ceci implique entre autres une meilleure compréhension des mécanismes d'écrantage, ainsi qu'une recherche de cadres théoriques cohérents pour expliquer l'accélération de l'expansion cosmologique (et éventuellement le problème de la matière noire) à partir des théories de gravité.

Théorie de la formation des grandes structures aux échelles non-linéaires. La précision des futures données sur la distribution des galaxies, le cisaillement gravitationnel et les cartes de raies d'émission dans le domaine des radio-fréquences sera telle qu'une révolution au niveau de la modélisation théorique des observables est indispensable pour extraire l'information contenue dans ces données. Leur statistique complexe peut être compressée de diverses manières dont certaines restent à explorer. Ces observables sont fortement impactées par les mécanismes non-linéaires liés à l'effondrement gravitationnel, qui requièrent une modélisation avancée grâce à des techniques sophistiquées issues de la théorie quantique des champs (renormalisation, théories effectives). En parallèle, les simulations numériques sont appelées à se développer considérablement, afin de mieux prendre en compte l'effet des baryons, des neutrinos massifs, des modèles de matière noire non-minimaux tels que la matière noire tiède, en interaction ou « floue » (avec un champ scalaire ultra-léger), et enfin, des différentes théories de gravitation ou modèles d'énergie noire. Il est également nécessaire de modéliser et d'exploiter les corrélations croisées entre les cartes des grandes structures, des OGs et des rayons gamma, pour comprendre par exemple l'origine des trous noirs dans les systèmes binaires (stellaires ou primordiaux), l'histoire des trous noirs supermassifs et leur rôle dans la formation des galaxies, ou l'origine des rayons gamma.

Tests des modèles cosmologiques, origine des tensions. Les théoriciens doivent continuer à travailler à l'interface entre théorie et observation pour confronter tous les modèles intéressants (issus notamment de la cosmologie des particules et des théories de gravité) aux données futures. L'interprétation des données actuelles indique des tensions entre plusieurs types de mesures (tension de Hubble, tension du paramètre S_8 lié à l'amplitude des fluctuations aux échelles inter-galactiques, excès de fluctuations aux échelles sous-galactiques, etc.). Les tensions pourraient soit se résorber avec une meilleure modélisation des données, soit persister et impliquer l'effet de nouveaux ingrédients dans le modèle cosmologique. Dans cette optique, il faudra continuer à élargir le champ des hypothèses et à affiner les prédictions théoriques concernant notamment le secteur sombre, les théories de gravité et de possibles déviations aux grandes échelles par rapport à l'hypothèse d'homogénéité et d'isotropie du modèle de Friedmann-Lemaître, dont la mise en défaut serait révolutionnaire.

Astroparticules

L'exploration de l'approche multi-messagers requiert aussi une expertise combinée dans plusieurs domaines, allant de la physique des plasmas dans des conditions extrêmes (milieux relativistes non-collisionnels, fortement magnétisés, à grande densité de rayonnement, et parfois composés de matière et d'antimatière) à l'astrophysique des hautes énergies et à la physique des particules.

Accélérateurs cosmiques. Ce domaine en pleine expansion explore les mécanismes d'accélération mis en jeu pour porter des particules chargées (électrons, ions) à de très hautes énergies. Ces particules peuvent soit peupler le spectre du rayonnement cosmique galactique ou extragalactique, soit produire des photons et neutrinos secondaires de haute énergie par interaction avec les fonds radiatifs ou les plasmas ambiants. Les mécanismes d'accélération étudiés sont la reconnexion magnétique, l'accélération imprimée par les ondes de choc, ou l'accélération dans une turbulence. Cette physique de l'accélération est donc directement liée à certains problèmes fondamentaux de physique des plasmas. La physique sous-jacente, très riche, fait intervenir des processus non-linéaires et multi-échelles pour prendre en compte la rétroaction des particules accélérées sur les champs électromagnétiques qui pilotent l'accélération (par turbulence ou instabilité de plasma), et parfois même le rayonnement qu'elles produisent. Afin de connecter ces processus microphysiques aux phénomènes astrophysiques, il est nécessaire d'obtenir une modélisation avancée des sources sur des échelles spatiales souvent bien inférieures à celles qui sont directement accessibles à l'observation. Parmi les sources les plus étudiées, on peut citer les supernovæ, les amas d'étoiles, les objets compacts (pulsars et trous noirs) et leur environnement, les systèmes binaires, et enfin, à plus grande échelle, les galaxies actives et les jets relativistes.

Transport cosmique. Pour comprendre la propagation des rayons cosmiques ou plus généralement tout processus d'accélération de particules, il est fondamental de modéliser le transport de particules chargées dans une turbulence magnétisée, avec un processus de diffusion multi-échelle. Ce problème théorique complexe suscite un intérêt grandissant, y compris dans la communauté de cosmologie, car il est désormais reconnu que les rayons cosmiques galactiques, en se couplant à la dynamique du gaz galactique, ont une influence sur la structure et l'évolution des galaxies.

Nouvelle physique et astroparticule multi-messagers. L'analyse du spectre des différents types de rayons cosmiques offre une opportunité pour mettre en évidence l'annihilation de la matière noire (et révéler son identité). De nouvelles données à plus basse énergie (MeV-GeV) vont ouvrir une nouvelle fenêtre vers des candidats de matière noire légers. De plus, certaines propriétés des neutrinos ou de particules de matière noire lourdes ou légères (tels les axions) sont potentiellement accessibles grâce au spectre d'émission des objets compacts (so-

leil, autres étoiles, naines blanches, supernovæ, étoiles à neutrons) et à leur évolution. Ces objets ouvrent en particulier une nouvelle fenêtre pour tester la physique des neutrinos, que ce soit leurs oscillations de saveur, leur moment magnétique ou leurs éventuelles propriétés non-standard, tout en soulevant des défis théoriques passionnants pour modéliser le comportement complexe de systèmes quantiques à N -corps. D'autres tests de la matière noire sont fournis par l'analyse de la corrélation croisée entre les anisotropies de plusieurs observables multi-messagers : cartes des rayons cosmiques, des grandes structures, du CMB et des OGs. Finalement, l'observation de l'environnement des trous noirs supermassifs permet de tester les théories de gravité modifiée et la physique des plasmas en champ gravitationnel fort.

GRAVITÉ

À cause de son caractère universel, la force de gravitation s'exerce à toutes les échelles et sur tout type de matière. Comprendre comment se comporte une telle force sur un intervalle d'échelles aussi vaste est un défi majeur. Les difficultés tant techniques que conceptuelles pour asseoir la gravitation dans un cadre quantique conventionnel suggèrent que cette force pourrait être un phénomène émergent. L'extrême faiblesse de la force de gravitation par rapport aux autres forces élémentaires complique la mesure des phénomènes gravitationnels. Cependant, les futures mesures de précision en cosmologie, l'exploitation des OGs et les observations des trous noirs fourniront des informations importantes sur la physique des horizons, l'origine des conditions initiales et même la dynamique de l'énergie noire, dont les propriétés pourraient dépendre de la nature quantique de la gravitation. Par ailleurs, des mesures de précision de la gravité sur diverses échelles (GRAVITY+, EHT...) seront effectuées. Elles permettront de contraindre les extensions de la théorie d'Einstein de la gravitation.

En ce qui concerne la **gravitation quantique**, on peut suivre principalement deux approches : (1) la formulation d'une théorie quantique fondamentale de la gravitation valable à haute énergie, ou (2) une analyse des propriétés génériques de la gravitation quantique et ses manifestations à diverses échelles d'énergie. La première approche est celle suivie par de nombreuses théories (la théorie des cordes, la gravitation quantique à boucles, la triangulation dynamique causale...). Un enseignement important est la présence d'un grand nombre de solutions possibles. Il est nécessaire donc de formuler des critères fondamentaux pour exclure des familles de modèles, en utilisant par exemple des raisonnements de théorie effective, ou en adaptant des principes de causalité et d'analyticité pour contraindre les couplages et la nature des interactions. Ce domaine a connu un renouveau important grâce aux progrès conceptuels issus de la théorie des cordes. Il est également nécessaire de dériver des conséquences physiques observables de ces théories.

Les méthodes de correspondance holographique tentent de reformuler la gravitation quantique comme une théorie des champs définie sur le bord d'une région de l'espace-temps. Ainsi, des calculs perturbatifs sur le bord permettent de prédire des quantités physiques émergent de la gravitation quantique en couplage fort, notamment grâce au développement des techniques de «bootstrap conforme».

Une question importante de la gravitation quantique est l'origine de l'entropie des trous noirs et la violation potentielle de l'unitarité lors de leur évaporation. Pour aborder ces questions, il est nécessaire de travailler dans le cadre de théories fondamentales de gravitation quantique. Le comptage des micro-états de trous noirs supersymétriques dans les modèles de théorie des cordes a, par ex., de fortes connexions avec les développements récents en théorie des nombres et le domaine de l'information quantique.

PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

La physique mathématique bénéficie d'une importante synergie avec des développements récents en mathématiques fondamentales et appliquées, telles que la topologie (en utilisant la théorie des champs topologiques ou la classification des phases quantiques via les groupes de cobordisme), la géométrie algébrique et symplectique (en étudiant les variétés de Calabi-Yau et leurs généralisations avec des flux, des branes et des orientifolds), la théorie des représentations (algèbres d'opérateurs de vertex, algèbres de von Neumann, espaces de modules de carquois, etc.) et la théorie des nombres.

Amplitudes, bootstrap et holographie. Nous avons tout le long de ce chapitre soulevé l'importance grandissante de l'approche **amplitude** dans plusieurs domaines. Du côté formel, un des exemples concerne des algorithmes innovants pour résoudre les équations différentielles liées aux intégrales de Feynman, en utilisant des techniques de géométrie algébrique pour identifier les structures cohomologiques associées.

Les méthodes holographiques et les approches basées sur les systèmes intégrables sont utilisées pour évaluer des intégrales à partir des fonctions de corrélation d'une théorie conforme duale. Des avancées récentes permettent l'évaluation analytique d'intégrales de Witten, équivalentes aux intégrales de Feynman aux espaces anti-de Sitter et de Sitter, et une comparaison directe avec les calculs dans la théorie duale par des méthodes de bootstrap. Ces calculs d'amplitude dans l'espace de Sitter sont importants pour l'analyse des fonctions de corrélation cosmologique, mais cette recherche est encore à un stade préliminaire. Les méthodes de résurgence qui permettent de donner un sens aux séries divergentes des calculs perturbatifs grâce à des idées introduites initialement en France, connaissent un renouveau... sauf en France où elles sont maintenant sous-développées.

Des techniques nouvelles ont été développées pour analyser la matrice de diffusion S au-delà de l'approche en perturbation. Ces méthodes de *bootstrap*, permettent de contraindre les interactions causales en mécanique quantique relativiste en utilisant des données à basse énergie. Elles ont des applications potentielles dans des domaines tels que l'analyse des amplitudes de diffusion des pions, la gravité quantique et la recherche de manifestations de la théorie des cordes. En utilisant des contraintes de symétrie, d'unitarité et de positivité, ces techniques ont été appliquées à des systèmes en trois et en quatre dimensions.

Systèmes intégrables. Les systèmes intégrables, utilisés dans de nombreux domaines, offrent des résultats exacts. Une synergie entre les méthodes d'intégrabilité et les probabilités a mené à une description rigoureuse des propriétés d'une transition de phase. Des avancées sont attendues grâce au développement de nouvelles méthodes de résolution et à l'extension de l'intégrabilité à de nouveaux modèles. Ils permettent de comprendre des propriétés fondamentales des théories physiques et jouent un rôle clé dans l'analyse de la limite planaire des théories de jauge et la correspondance AdS/CFT. Une approche rigoureuse pour la quantification des modèles sigma intégrables est un développement important avec des applications en théorie des cordes et en matière condensée.

MATIÈRE CONDENSÉE ET PHYSIQUE DES HAUTES ÉNERGIES

Il y a toujours eu un échange très fructueux entre ces deux disciplines concernant les concepts et les techniques. Des modèles de gravité analogue, ainsi que des expériences correspondantes, étudient des phénomènes de relativité générale à partir de systèmes physiques équivalents consistant en des champs de basse énergie en matière condensée et dans les gaz quantiques ultra-froids. La théorie des catégories est utilisée à la fois en gravité quantique à boucle et dans l'étude d'ordre topologique en matière condensée. Des progrès dans ce sens sont à signaler sur la réalisation expérimentale d'anyons et leur utilisation pour le calcul quantique topologique (que ce soit dans l'effet Hall quantique fractionnaire ou dans les systèmes artificiels avec des qubits supraconducteurs).

Des phases de la matière avec un comportement non-liquide de Fermi, dépourvu de quasi-particules bien définies, et l'observation expérimentale d'une dissipation planckienne universelle dans plusieurs familles de métaux demandent un changement de paradigme. Un tel changement vient d'émerger avec une connexion surprenante entre un modèle de physique quantique désordonné, le modèle SYK, et la physique des trous noirs. Cette correspondance holographique (bord-volume) ouvre la voie à une approche moins conventionnelle pour étudier ces systèmes fortement corrélés, dont la phase métallique étrange des supraconducteurs à haute température critique constitue un exemple typique.

Les travaux sur le graphène twisté, la classification des isolants topologiques ou bien à l'interface entre matière condensée, physique des hautes énergies et information quantique mériteraient d'être poussés. En particulier, le développement de nouvelles méthodes numériques, inspirées par l'information quantique, comme l'approche de renormalisation de l'intrication multi-échelles (MERA) ou basées sur les réseaux de tenseurs, a permis d'obtenir des progrès notables dans les systèmes fortement corrélés ces dernières années et pourrait être très fructueux pour étudier les effets non-perturbatifs des théories quantiques des champs de la physique des hautes énergies.

SUPERCALCULATEURS, APPRENTISSAGE PROFOND, SIMULATIONS QUANTIQUES

Le calcul sur réseau, souvent sur des supercalculateurs dédiés, a toujours eu besoin de ressources informatiques conséquentes. L'arrivée dans le paysage international des machines exascale, d'une puissance de calcul à l'échelle EFlops, ne doit pas reléguer la France à un rang secondaire. L'approche standard (métrique euclidienne) ne permet pas d'étudier la dynamique de diffusion en temps réel, les systèmes à densité finie (plasma de quark-gluons à densité élevée, étoiles à neutrons), ou les théories de champs avec un couplage topologique... Ici, la simulation pourrait permettre de surmonter ces limitations dans une approche hamiltonienne à l'aide de réseaux de tenseurs. Les méthodes Monte-Carlo feront appel au calcul massivement parallèle et aux GPU.

De grands progrès sont nécessaires dans les simulations et l'analyse des données (pour les OG, l'astrophysique, la cosmologie, la physique des particules telle que l'étiquetage des sous-structures de jets). Les algorithmes s'adapteront à l'apprentissage profond, l'intelligence artificielle et l'informatique quantique. Pour le calcul sur réseau cela permettra de réduire les erreurs avec la prise de la limite du continu, ainsi que de permettre l'exploration de l'espace des théories des champs pour la physique au-delà du modèle standard.

MESURES DE PRÉCISION À BASSES ÉNERGIES

Les deux dernières décennies ont été marquées par une transformation profonde des expériences dédiées aux mesures de précision grâce à des avancées extraordinaires dans le contrôle de la matière et la lumière. Ces expériences exploitent désormais la sensibilité extrême des systèmes quantiques pour mesurer les propriétés fondamentales de l'espace, des particules ainsi que de leurs interactions. Elles sont en ce sens complémentaires, voire compétitives vis-à-vis des approches de la physique des hautes énergies pour la compréhension des lois qui gouvernent notre univers.

La France a été pionnière dans l'exploitation des techniques de refroidissement d'atomes pour les mesures de précision, y compris dans le cadre de missions spa-

tiales. Elle jouit d'une reconnaissance internationale dans ce domaine. Elle est à la pointe dans de nombreux domaines qui impactent les mesures de précision (opto-mécanique, photonique quantique...). L'infrastructure de recherche REFIMEVE¹ est unique au monde et constitue un atout pour la France et l'Europe.

En revanche, certaines thématiques en plein essor dans le monde et identifiées comme très prometteuses pour tester les lois fondamentales (ex. : les ions piégés, les molécules froides et les co-magnétomètres) sont trop peu représentées. Les spécificités du domaine (longue durée des projets) sont en décalage avec les programmes de financement, la durée des thèses et la volatilité des recrutements de contractuels, ce qui constitue une menace face aux efforts engagés dans d'autres pays.

MÉTHODOLOGIES ET AVANCÉES TECHNOLOGIQUES AU PROFIT DES MESURES DE PRÉCISION

La montée en puissance et la diversité croissante des **mesures de précision** sont portées par les avancées réalisées ces dernières années dans le domaine des horloges atomiques et nucléaires, des capteurs à base de spins tels que les magnétomètres atomiques ou à centres colorés dans le diamant, de l'interférométrie optique et atomique, de la spectroscopie des ions lourds ou des molécules, des capteurs opto-mécaniques ou à circuits supraconducteurs... Les progrès récents sont annonciateurs d'avancées significatives à l'échelle d'une décennie au moins, grâce à la convergence d'un large éventail de technologies et de méthodologies. Celles-ci couvrent le contrôle à l'échelle quantique de systèmes de complexité croissante, de l'atome jusqu'à des dispositifs de taille mésoscopique voire macroscopique, l'extension de la **métrologie temps/fréquence** ainsi que des dispositifs photoniques (sources lasers, peignes de fréquence, détecteurs ultra-sensibles...) à des fenêtres spectrales jusque-là inaccessibles avec des puretés spectrales inégalées et des gammes de puissances étendues du photon unique au petawatt. On peut aussi mentionner les nouvelles installations pour la production de faisceaux exotiques et le piégeage d'ions lourds multichargés ainsi que les détecteurs micro-calorimétriques à transitions supraconductrices ou magnétiques pour des mesures d'énergies de rayons X ou d'électrons.

Il y a aujourd'hui un foisonnement de nouveaux objets d'étude qui présentent une sensibilité accrue pour sonder la variation des constantes fondamentales, tester les symétries fondamentales et l'électrodynamique quantique aux ordres supérieurs ou rechercher des signatures de matière noire et de nouvelles sources d'ondes gravitationnelles. Une même plateforme est d'ailleurs souvent exploitable pour une variété de mesures. Les horloges et capteurs quantiques affichent déjà des per-

formances remarquables. Mais l'ensemble des expériences dédiées aux mesures de précision a un potentiel de progression et de renouvellement indiscutable, tout d'abord via l'amélioration des dispositifs expérimentaux existants en termes de bruit/stabilité et biais/exactitude, mais aussi via l'exploitation des phénomènes quantiques les plus poussés tels que 1) l'intrication et la génération d'états comprimés de spin ou de lumière pour atteindre des sensibilités au-delà de la limite quantique standard, 2) le contrôle quantique optimal, 3) les mesures combinant plusieurs sous-systèmes couplés (certains servant à sonder l'environnement ou à protéger de la décohérence en utilisant par exemple la contre-réaction en temps réel et des protocoles de découplage de l'environnement). En outre, l'hybridation entre différents capteurs devrait permettre un gain substantiel en sensibilité et un accès à des grandeurs d'intérêt nouvelles. De même, la mise en réseau des horloges et capteurs quantiques à l'échelle continentale et au-delà promet des avancées significatives qui devraient surpasser la portée des capteurs individuels. L'exploitation de références de fréquence de qualité métrologique d'une stabilité relative meilleure que 10^{-15} après 1 s d'intégration et, dans le futur, de l'intrication, mais ici délocalisée entre nœuds du réseau et du partage de sources de lumière comprimée pourrait révolutionner le domaine des mesures de précision à l'échelle de 10 ans.

L'espace est également un environnement propice pour les mesures de précision. Les expériences de physique quantique dans l'espace suscitent une attention croissante en raison des nombreuses possibilités qu'elles offrent pour tester les lois fondamentales de l'univers, que ce soit avec des atomes froids, des dispositifs photoniques ou opto-mécaniques. Renforcer la collaboration entre le CNRS et les acteurs de la recherche spatiale en France et en Europe est crucial au moment où d'autres nations comme la Chine et les USA se lancent dans des projets d'envergure. Les laboratoires souterrains offrent aussi un environnement protégé et sont une alternative à l'espace. Signalons enfin le potentiel des expériences de gravité analogue exploitant les fluides quantiques de lumière ou les condensats de Bose-Einstein pour simuler la physique d'un trou noir ou l'expansion de l'univers primordial.

PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE, RELATIVITÉ GÉNÉRALE ET GRAVITATION

Les mesures de précision dans divers domaines permettent de réaliser des tests en champ gravitationnel faible sur Terre, au voisinage de la Terre et dans le système solaire.

Une partie de ces tests reposent sur des missions spatiales embarquant de l'instrumentation dédiée et très poussée. Après la mission spatiale MICROSCOPE qui a récemment établi l'état de l'art en matière de test de l'universalité de la chute libre avec des objets macroscopiques, une version avancée de cette mission est

¹ Réseau fibré pour la comparaison temps-fréquence avec connexions européennes et au CERN, labellisé en 2021. www.refimeve.fr

considérée. Une autre possibilité, déclinée dans la proposition STE-QUEST, est une mission qui étend ce test à des objets microscopiques grâce à l'interférométrie atomique. Parallèlement, des expériences de laboratoire, récemment mises en œuvre en Allemagne, aux USA et en France, comparent la chute libre de deux espèces atomiques. Elles ont un fort potentiel de développement avec l'avantage de pouvoir diversifier les tests, entre plusieurs isotopes d'une même espèce, entre des espèces atomiques différentes, ou entre matière et antimatière avec les expériences GBAR, AEGIS et ALPHA.

Concernant les tests de la relativité générale via des mesures de déplacement gravitationnel vers le rouge, la première perspective est de mener à bien la mission ACES qui doit voler en 2025 et permettre de dépasser le résultat obtenu avec l'exploitation opportuniste des satellites Galileo 5 et 6. Par ailleurs, les horloges optiques et les méthodes associées ont récemment donné un test compétitif au sol dans la Tokyo Skytree. Les progrès en cours des horloges et des liens optiques (par fibres et en espace-libre) permettront de gagner au moins un ordre de grandeur. Les tests d'invariance locale de position de type mesure différentielle de déplacement gravitationnel vers le rouge (*null redshift*), qui peuvent être de plus analysés comme des tests de variation des constantes fondamentales en fonction du potentiel, bénéficieront d'une progression constante des horloges, avec des stabilités et exactitudes attendues dans les années à venir au niveau de 10^{-20} et 10^{-19} respectivement, et de la spectroscopie moléculaire ultra-précise. Il en va de même pour les tests de variations en fonction du temps qu'on peut exploiter pour contraindre certains modèles cosmologiques combinés à des théories alternatives visant à unifier gravitation et physique quantique. Ces expériences ont un fort potentiel d'amélioration par le raffinement des dispositifs expérimentaux existants ainsi que par l'utilisation des liens optiques fibrés cohérents, la mise en réseau donnant accès à des mesures plus diversifiées. Pour cela, la France dispose d'un atout très important qu'est l'infrastructure de recherche REFIMEVE.

Un autre axe est celui de l'étude puis de l'utilisation de nouvelles espèces particulièrement prometteuses parce qu'elles possèdent des transitions hautement sensibles ou avec des sensibilités complémentaires, comme la transition nucléaire isomérique du ^{229}Th , ou des niveaux métastables d'ions lourds multichargés, ou dans des molécules, éventuellement, avec des noyaux lourds exotiques.

Un troisième axe consiste à étendre ces tests à des situations nouvelles faisant intervenir les superpositions quantiques délocalisées. Les progrès attendus sur les dispositifs expérimentaux mentionnés ci-dessus permettent aussi, via la recherche de signaux temporels de signatures particulières, de pousser les tests d'invariance de Lorentz. La précision des horloges, toujours en forte progression, permet, depuis quelques années seulement, d'observer le déplacement gravitationnel vers le rouge

dans des dispositifs de laboratoire. Cela rend possible une nouvelle catégorie d'expériences qui explore la frontière entre relativité générale et mécanique quantique en réalisant des expériences où les deux interactions exercent en même temps une influence observable. Des perspectives similaires existent à partir de dispositifs de type interféromètre atomique opérés individuellement ou en réseaux. Dans cette catégorie, on peut inclure des expériences visant à tester les limites à la cohérence des superpositions quantiques macroscopiques sous l'effet de l'interaction gravitationnelle.

Une autre catégorie d'expériences concerne la simulation de la théorie quantique des champs en espaces courbes en utilisant d'autres systèmes physiques que la gravitation. Les fluides quantiques font partie des systèmes prometteurs pour étudier, par exemple, le rayonnement de Hawking ou les états métastables typiques de l'inflation.

ONDES GRAVITATIONNELLES

Le domaine des mesures de précision apporte une contribution spécifique à la thématique des ondes gravitationnelles sous plusieurs aspects.

Premièrement, le développement et la mise en œuvre de méthodes susceptibles d'améliorer les grands instruments existants, basés sur l'interférométrie optique. Il s'agit d'exploiter notamment les avancées de l'opto-mécanique pour réduire ou maîtriser le bruit thermique des miroirs et par ailleurs l'utilisation d'états non classiques de la lumière pour atteindre des sensibilités dépassant la limite quantique standard.

Deuxièmement, l'utilisation de l'interférométrie atomique peut permettre, pour les instruments au sol, de maîtriser le bruit newtonien et d'étendre ainsi la fenêtre de sensibilité vers les basses fréquences. Le laboratoire souterrain LSBB qui accueille le projet MIGA pour étudier ces questions est en atout français à valoriser et à coordonner avec d'autres projets européens ayant des objectifs similaires. Les mesures de précision sont également mises à profit pour fournir des dispositifs de référence et de l'expertise dans le cadre de la contribution française à la mission LISA qui comporte notamment l'intégration et la validation des satellites.

Enfin, des travaux visent l'utilisation de l'interférométrie atomique ou d'horloges optiques pour de futures missions. Ils concernent à la fois des aspects technologiques pour la spatialisation, des aspects instrumentaux pour comprendre et adapter les instruments à l'environnement spatial et des aspects de conception et de modélisation de missions prenant en compte les caractéristiques spécifiques de ces instruments. Ces travaux sont souvent en synergie avec des développements instrumentaux ou des missions dans le domaine des sciences de la Terre (géodésie, systèmes de référence et positionnement) et également de l'exploration du système solaire.

TEST DE L'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE (QED)

Les tests de précision de la QED sont effectués en comparant aux prédictions du modèle standard les résultats expérimentaux des propriétés de particules libres comme l'anomalie du moment magnétique de l'électron ($g_e - 2$) et des fréquences de transition entre niveaux d'énergie de particules liées comme le déplacement de Lamb.

La théorie perturbative de la QED en champ faible est bien établie et elle a été confirmée par l'accord remarquable entre les valeurs théorique et expérimentale de $g_e - 2$. Ces comparaisons sont aussi une approche prometteuse pour rechercher des signatures de la physique au-delà du modèle standard. Pour cela, il est crucial d'affiner les incertitudes sur les mesures de spectroscopie des systèmes simples (hydrogène atomique ou moléculaire, positronium...) et de certaines espèces atomiques et de la constante de structure fine α qui repose sur l'interférométrie atomique.

Dans le régime des champs intenses, les effets non linéaires ne peuvent plus être ignorés et la théorie n'a pas été testée au-delà du premier ordre. Les ions lourds multichargés sont d'excellents candidats pour observer ces effets. Par exemple, l'électron le plus interne des nucléides lourds comme le plomb ou l'uranium est exposé à un champ de Coulomb du noyau d'environ 10^{16} V cm⁻¹, une valeur difficilement atteignable en laboratoire par d'autres moyens. Dans un tel champ, les effets QED fortement exaltés se manifestent dans les énergies de liaison et les moments magnétiques des électrons considérés, à un niveau mesurable. Dans les années à venir, la spectroscopie des ions lourds multichargés devrait permettre d'observer les contributions des termes QED d'ordres 2 et 3, grâce notamment aux performances de la nouvelle génération de détecteurs dans la gamme d'énergie 20-100 keV. L'étude de différents isotopes est nécessaire pour différencier les contributions QED de celles liées à la structure du noyau. La spectroscopie d'atomes exotiques dans des états de Rydberg circulaires est à explorer, car moins sensible aux effets du noyau et plus sensible à la structure du vide.

Une meilleure compréhension de la structure du vide grâce aux atomes exotiques où le champ électrique moyen est des ordres de grandeur au-dessus de la limite de Schwinger, ou dans des champs supercritiques susceptibles de créer des paires électron-positron par « désintégration du vide », pourrait aussi aider à la compréhension de l'évolution des trous noirs liée à la création de particules dans le vide. L'exploitation des résultats de ces expériences nécessite le développement de nouvelles approches théoriques et numériques pour calculer la contribution des termes QED d'ordre 2, voire 3, à l'énergie et aux facteurs de Landé des atomes (y compris exotiques) etc. Enfin, dans les prochaines années l'infrastructure Apollon devrait atteindre l'intensité critique pour la génération de paires e^+e^- ou pour la

manifestation de la biréfringence du vide, ouvrant ainsi une nouvelle ère pour l'étude du vide quantique.

PROBLÈME DE L'EFFONDREMENT DE LA SUPERPOSITION QUANTIQUE

De nombreuses approches expérimentales sont proposées pour sonder les mécanismes à l'origine de l'effondrement de la superposition quantique avec des masses, des tailles et à des échelles de temps de plus en plus élevées. Ceci résulte des progrès récents dans le contrôle des degrés de liberté internes de molécules massives, l'ingénierie photonique et la conception de résonateurs nano-mécaniques avec des facteurs de qualité atteignant 10^9 dans un environnement cryogénique.

Parmi ces expériences citons : 1) l'interférométrie d'ondes de matière avec des condensats de Bose-Einstein ou des grosses particules telles que les molécules organiques et les nanoparticules ; 2) la spectroscopie à très haute résolution de molécules non-rigides possédant comme l'ammoniac ou les molécules chirales une dynamique interne régie par effet tunnel entre puits de potentiel ; 3) la création d'un chat de Schrödinger massif en couplant un résonateur nano mécanique avec un qubit supraconducteur.

Mentionnons aussi le projet MAQRO (*macroscopic quantum resonators*) en cours d'évaluation par l'ESA pour étudier la superposition quantique avec des nanoparticules dans l'espace. Ces expériences visant à placer des objets massifs en superposition quantique devraient par exemple atteindre un régime où le taux d'effondrement gravitationnel prédit par le modèle Diósi-Penrose dépasse tous les autres mécanismes de décohérence.

SYMÉTRIES FONDAMENTALES DISCRÈTES

Il est possible de tester les prévisions du modèle standard (MS) et d'en explorer les limites par des tests à basse énergie de symétries fondamentales avec des atomes, des molécules, des neutrons... Des mesures de violation de la symétrie de parité (P) dans le césium ont fourni le test le plus précis du secteur électrofaible à basse énergie, et des contraintes pour la physique au-delà du MS. Des expériences recherchent une brisure de la symétrie par renversement du temps (T) sans laquelle le déséquilibre matière-antimatière observé ne peut être expliqué, en cherchant à mesurer le moment dipolaire électrique (EDM) de l'électron, du neutron et des noyaux. En effet, certaines extensions au MS, introduisent des sources de violation de T — donc de CP, avec C la symétrie par conjugaison de charge, si l'on suppose l'invariance par CPT satisfaite — associées à de nouvelles particules ayant une masse à l'échelle du TeV. Elles prédisent une valeur de l'EDM de l'électron qui frôle les contraintes les plus strictes imposées par des expériences sur des molécules diatomiques comme ThO ou HfF⁺. Ces expériences sondent donc la physique à des échelles d'énergie comparables à celles des accélérateurs, voire au-delà. Tester

l'invariance par CPT, la symétrie par permutation de particules identiques, la relation spin-statistique... sont autant d'autres défis persistants à relever. Ces expériences relèvent de la résonance magnétique nucléaire, la magnétométrie, l'interférométrie, la spectroscopie de précision, la métrologie des fréquences. Elles bénéficient des avancées réalisées dans la production, le refroidissement et l'ingénierie quantique d'atomes et molécules neutres ou ionisés variés et de complexité croissante.

Parmi les enjeux pour la prochaine décennie on trouve (I) la recherche de signatures de l'EDM de l'électron, du proton, du neutron, et de sources de violation de T hadronique (moments nucléaires de Schiff ou magnétiques quadripolaires); (II) la mise en évidence des effets de violation de P dépendants du spin nucléaire particulièrement sensibles à de la nouvelle physique comme le couplage entre le moment anapolaire d'un noyau (provenant des interactions faibles hadroniques) et le spin d'un électron (seul le moment anapolaire du ^{133}Cs a été mesuré, et il est en désaccord avec les prédictions déduites d'autres mesures); (III) la mesure de la violation de P dans les ions héliumoides lourds qui présentent des sensibilités potentiellement accrues de plusieurs ordres de grandeur comparées au césium; (IV) la mesure de la différence d'énergie entre énantiomères d'une molécule chirale résultant de la violation de P .

Une approche prometteuse est celle des systèmes dont la sensibilité aux effets mesurés est accrue: atomes lourds et déformés (Fr, Ra⁺, ions héliumoides...), mais aussi molécules, objets de progrès récents remarquables en matière de refroidissement, piégeage et manipulation cohérente. La tendance est à la conception, en interaction avec des chimistes, de molécules sur mesure à la fois plus sensibles, et fonctionnalisées pour permettre le refroidissement laser, une détection optique de haute sensibilité, la protection contre la décohérence...

Une alternative à l'étude d'échantillons en phase gazeuse est celle en plein essor des expériences en cristaux ou matrices qui permettent un gain considérable sur la densité de l'échantillon, et donc sur la sensibilité à condition que les effets systématiques soient maîtrisés. Soulignons l'importance des mesures de précision sur l'antimatière et particulièrement l'antiproton et l'anti-hydrogène qui ont connu des progrès significatifs au cours des dernières années. La comparaison des propriétés des particules et antiparticules (masse, moment magnétique et fréquences de transition) permet de tester la symétrie CPT dont la violation serait une signature sans équivoque d'une nouvelle physique.

MATIÈRE NOIRE ULTRA-LÉGÈRE

La recherche de matière noire basée sur des expériences de laboratoires concerne des masses inférieures à 1^{10} eV et fait l'objet d'un intérêt très fort. De premières expériences ont été proposées et réalisées en exploitant la stabilité des horloges atomiques et des données existantes.

Par exemple, la comparaison de fréquences atomiques hyperfines de la fontaine à atomes froids double Rb/Cs pour rechercher un champ scalaire massif qui pourrait constituer la matière noire. On s'attend à ce qu'un tel champ oscille à une fréquence qui est proportionnelle à sa masse, qui pourrait donc induire des variations périodiques des constantes fondamentales de la physique comme la constante de structure fine, ou les masses des particules élémentaires. Ces constantes impactent directement le ratio des fréquences atomiques. Avancer cette recherche passe par plusieurs axes de développement.

Une première catégorie de test repose sur l'analyse de mesures de précision de type spectroscopie atomique ou moléculaire, interférométrie, magnétométrie, etc., distribuées spatialement et temporellement. Pousser ce type de recherche passe par l'amélioration des bruits et de la précision de ces systèmes. Cela passe aussi par la diversification des systèmes (utilisation de nouvelles espèces atomiques et moléculaires et également de résonateurs, de lignes à retard fibrées, par exemple) qui renforce les opportunités de détection et permet d'obtenir des signatures claires et spécifiques aux modèles de matière noire considérés. Un saut qualitatif très important viendra de la mise en réseau et de la coordination des diverses expériences, pour obtenir des prises de données nouvelles, nombreuses, continues et simultanées. Dans cette optique, l'infrastructure de recherche REFIMEVE constitue pour ce type d'expérience un fort atout français et européen pour la mise en réseau d'horloges et d'expériences de spectroscopie, pour la comparaison de fréquences à mieux que 10^{-19} . De futures expériences de recherche de matière noire utiliseront par exemple, des comparaisons de 10 à 20 horloges et systèmes moléculaires divers à travers le réseau fibré européen sur plusieurs mois, coordonnées avec des actions similaires aux USA et en Asie et avec des mesures issues de magnétomètres, d'interféromètres atomiques, etc.

Une autre voie en pleine expansion consiste en l'utilisation de réseaux corrélés d'interféromètres atomiques déployés sur des longueurs de base allant de la centaine de mètres au kilomètre, dont l'antenne MIGA constitue une plate-forme de test unique à l'échelle internationale. De telles recherches permettent de tester des modèles de matière noire de type *ultra-light dark matter* dans une gamme de masse allant de 10^{-22} à 10^{-9} eV, déterminée par les durées caractéristiques des observations. Une forte activité de modélisation globale de ces expériences sera nécessaire à l'interface entre, d'une part, la physique atomique et moléculaire, l'optique quantique, et l'astrophysique d'autre part.

Une autre catégorie de tests, qui permettent d'explorer des masses plus élevées (jusqu'à environ 10 eV) incluant la gamme supposée des particules axioniques, se fonde sur des expériences dédiées visant à créer les conditions d'une interaction entre particules de matière noire et un champ (champ magnétique ou laser intense) induisant la création d'une particule standard (typiquement un pho-

ton) qu'il s'agit de détecter. Ces expériences reposent sur le fait de pousser à leurs limites des méthodes de détection ultra-sensibles (par exemple, détection de photons micro-ondes uniques à l'aide d'un circuit supraconducteur, etc.).

RECHERCHE DE NOUVELLES INTERACTIONS À BASSE ÉNERGIE

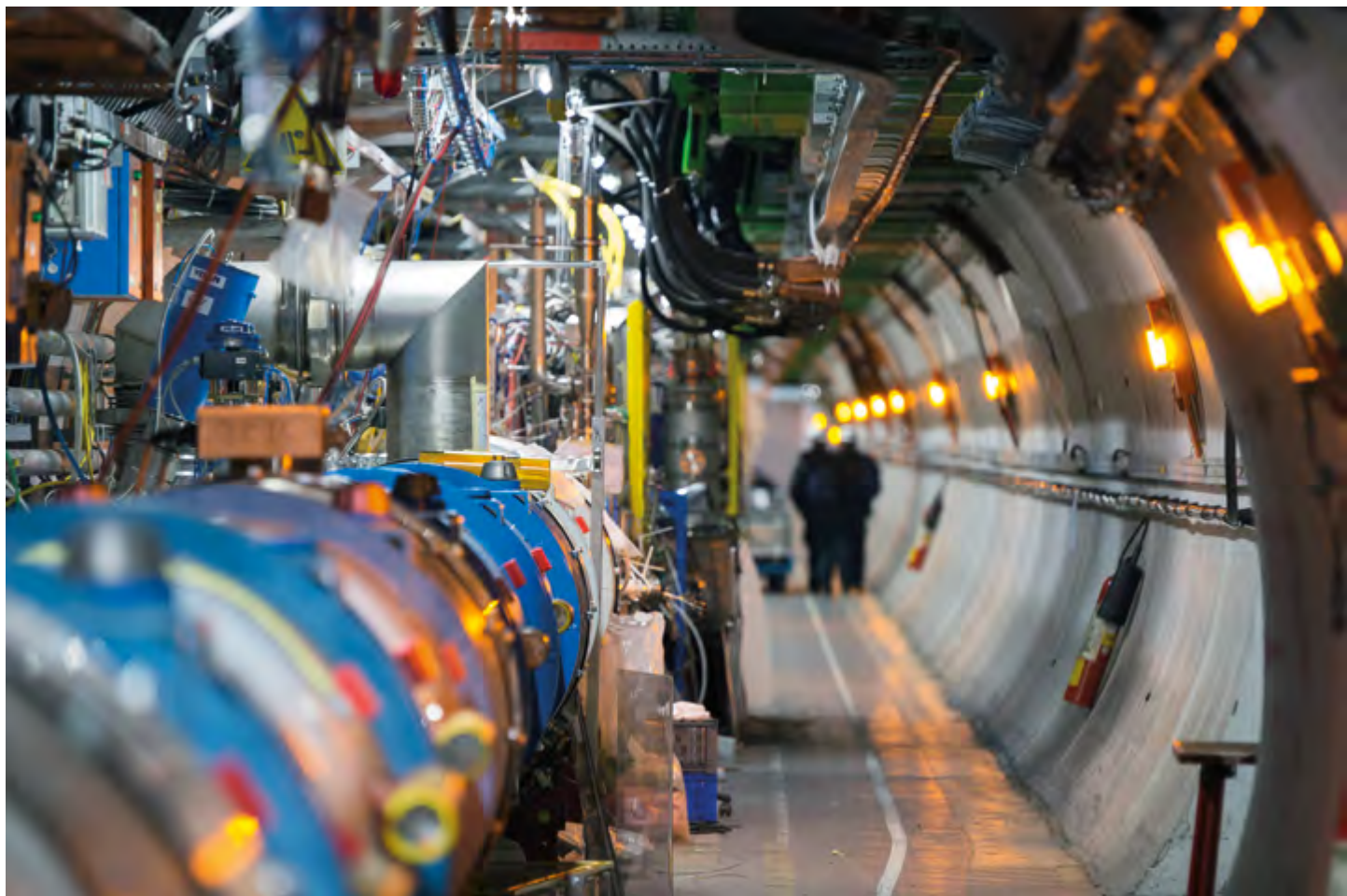
Les expériences évoquées dans les paragraphes précédents permettent de fournir des contraintes toujours plus sensibles sur une variété de scénarios pour la physique au-delà du MS (non seulement les signatures de la matière noire, mais aussi d'énergie noire, d'une 5e force, d'interaction exotiques dépendantes du spin...). Un travail conjoint entre théoriciens et expérimentateurs est indispensable pour concevoir les nouveaux schémas expérimentaux les plus pertinents, pour l'analyse des données, l'interprétation des résultats et la prédiction des quantités non encore mesurées.

Une stratégie nouvelle consiste par exemple à conduire une analyse globale auto-cohérente de l'ensemble des données de spectroscopie d'atomes (y compris exotiques), molécules et ions via un ajustement simultané des constantes fondamentales et des paramètres décrivant la nouvelle physique. Récemment, une première analyse a

révélé des tensions liées notamment à la détermination du rayon de charge du proton. Parmi les extensions du modèle standard testées, l'une d'entre elles réduit ces tensions. Un enjeu dans les prochaines années sera d'affiner cette analyse, en l'enrichissant avec de nouvelles données expérimentales (ex. : $g-2$ du muon, spectroscopie du muonium...), en améliorant encore la précision des expériences (hydrogène normal et muonique, ions moléculaires hydrogène, constante de structure fine...) et des prédictions théoriques, pour déterminer si le «signal» observé est significatif. Cette approche peut être étendue à de nouvelles particules se couplant à une seule espèce (électron ou muon par exemple) grâce à leur contribution aux corrections à une boucle. Ces contributions permettraient aussi d'explorer de nouvelles particules avec P ou CP impair. L'extension aux spectroscopies de structure fine/hyperfine permettrait en particulier de contraindre des interactions au-delà du MS dépendantes du spin.

Un autre outil pour contraindre la nouvelle physique est la mesure de déplacements isotopiques permettant de tracer des «King plots». De nombreuses études expérimentales ont été publiées ces dernières années. Il serait intéressant de les étendre à d'autres espèces (atomes neutres ou ions) pour améliorer la sensibilité de ces recherches et mieux comprendre les éventuelles non-linéarités d'origine nucléaire ou exotique des «King plots».

Tunnel du LHC. © Cyril FRESILLON/LHC/CNRS Images



SIGLES

Λ CDM: Lambda Cold Dark Matter. Lambda Matière Noire Froide. Λ fait référence à la constante cosmologique

p_T : Impulsion transverse

AdS Anti-de-Sitter

BELLE-II: B-factory experiment. Expérience usine de mésons B, à KEK, laboratoire national des hautes énergies japonais à Tsukuba. Opérationnelle jusqu'en ~ 2025

CFT: Conformal Field Theory. Théorie des champs conforme

CODATA: Committee on Data for Science and Technology

CP: La symétrie CP est une combinaison de deux symétries fondamentales: la symétrie de charge (C) et la symétrie de parité (P). La présence d'un moment électrique dipolaire est signe d'une violation de cette symétrie. Cette violation est un des ingrédients pour expliquer l'asymétrie matière anti-matière

CTA: Cherenkov Telescope Array. Projet international d'observatoire terrestre de rayons gamma de très haute énergie. En construction

DFT: Density Functional Theory. Théorie de la fonctionnelle de densité (pour le calcul des structures électroniques et les propriétés des matériaux)

DUNE: Deep Underground Neutrino Experiment. Projet d'expérience de neutrinos en profondeur souterraine, USA

EFT: Effective Field Theory. Théorie effective des champs

EHT: Event Horizon Telescope. Réseau mondial de télescopes utilisé pour observer, en particulier, les trous noirs supermassifs. En avril 2019 EHT a fourni la première image directe d'un trou noir. L'image montre un anneau lumineux brillant, connu sous le nom de «l'ombre du trou noir», qui est l'horizon des événements du trou noir lui-même

EMRI: Extreme Mass Ratio Inspiral. Inspirale à rapport de masse extrême

EN: Étoile(s) à neutrons

EPTA: European Pulsar Timing Array. EPTA est une des collaborations internationales travaillant sur les pulsars et les ondes gravitationnelles, aux côtés d'autres projets tels que le NANOGrav (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves) aux États-Unis et le PPTA (Parkes Pulsar Timing Array) en Australie

ET: Einstein Telescope. Projet de 3^e génération de détecteur d'ondes gravitationnelles

Euclid: Télescope spatial lancé le 1^{er} juillet 2023. La mission (sur 6 ans) d'Euclid de l'ESA est conçue pour explorer la composition et l'évolution de l'Univers sombre. Il permettra de créer une grande carte de la structure à grande échelle de l'Univers

GPU: Graphics Processing Unit. Unité de traitement graphique: composant matériel spécialisé dans les calculs graphiques et parallèles. Son architecture permet d'accélérer diverses tâches, allant de la visualisation graphique aux calculs scientifiques et à l'apprentissage automatique

Gravity+: GRAVITY+ est la phase 2 du projet GRAVITY installé sur le grand interféromètre, VLTI (Very Large

Telescope Interferometer de l'Observatoire Européen Austral (ESO) au Chili

HyperK: Hyper-Kamiokande. Projet de détection des neutrinos en développement au Japon

Kagra: Kamioka Gravitational-wave Detector. Détecteur d'ondes gravitationnelles à Kamioka (Japon)

KM3NeT: Cubic Kilometer Neutrino Telescope. Projet d'observatoire, réseau de télescopes, de neutrinos à grande échelle dans les profondeurs de la mer Méditerranée

LBNF: Long-Baseline Neutrino Facility. Fait partie du projet DUNE

LHC: Large Hadron Collider. Le grand collisionneur hadronique au CERN à Genève

LHCb: Large Hadron Collider beauty experiment. Un des 4 détecteurs auprès du LHC, celui-ci est destiné à l'étude de la physique de la saveur (lourde) hadronique, notamment la physique du b

LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser (USA)

LISA: Laser Interferometer Space Antenna. Antenne spatiale d'interférométrie laser. Le projet LISA est développé par l'Agence spatiale européenne (ESA) en collaboration avec la NASA. Il est prévu que les premiers satellites soient lancés dans les années 2030

LiteBird: Lite (Light) Satellite for the Study of B-mode Polarization and Inflation from Cosmic Microwave Background Radiation. Il s'agit d'un projet de mission spatiale pour étudier le fond diffus cosmologique (CMB) et plus particulièrement la polarisation des modes B

LSS: Large-Scale Structure. Structure à Grande Échelle

LVK: Le réseau Ligo-Virgo-Kagra

MERA: Multi-Scale Entanglement Renormalization Ansatz. Ansatz de renormalisation d'entrelacement à échelles multiples

MN: Matière Noire

NRT: Nançay Radio Telescope

OG: Ondes Gravitationnelles

pdf Parton distribution function. Fonction de distribution des partons

PNGRAM: Programme National Gravitation, Références, Astronomie, Métrologie. Le PNGRAM est financé par CNRS Terre & Univers, CNRS Nucléaire & Particules, CNRS Physique et le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)

QCD: Quantum Chromodynamics. Chromodynamique Quantique

QFT: Quantum Field Theory. Théorie quantique des champs

QGP: Quark Gluon Plasma. Plasma de quarks et gluons

RG: Relativité Générale

SYK: Modèle Sachdev-Ye-Kitaev

SYM: Super Yang — Mills

Virgo: Virgo Interferometric Gravitational-Wave Observatory. Interféromètre VIRGO pour l'observation des ondes gravitationnelles. Implanté en Italie

WIMP: Weakly Interactive Massive Particle. Particules massives interagissant faiblement