

# Prospective INP: Physique Fondamentale-*Théorie*

Fawzi Boudjema, Julien Lesgourgues, Danièle Steer, Pierre Vanhove

## Comité de Lecture

C. Bachas, L. Bernard, A. Falkowski, G. Korchemsky, J. Lavalley, P. Serpico and F. Vernizzi

Nous avons fait la synthèse à partir de plusieurs contributions:

- Écrits transmis par les membres inscrits au groupe de travail.
- Certaines personnes non inscrites au groupe de travail ont été sollicitées. Plusieurs ont transmis des documents. Pour d'autres, leurs remarques et réflexions suite aux ébauches, par section, sur le wiki ont été intégrées au document final.
- Nous avons aussi consulté la totalité du sondage mené par l'INP et avons filtré les écrits relevant de notre thématique.
- Les rapports *Snowmass White Papers (2021/2022)* et le White Paper *EuCAPT White Paper (Oct. 2021): Opportunities and Challenges for Theoretical Astroparticle Physics in the Next Decade* auxquels ont participé des collègues de la communauté française ont été utiles.

Un listing des documents et l'historique des échanges peuvent-être consultés sur le wiki de notre WG:  
<https://lapth.cnrs.fr/ppf/doku.php?id=allcontributions>

## Personnes ayant fourni des contributions et/ou participé aux échanges

A. Amy-Klein, J. Avan, E. Babichev, P. Baseilhac, B. Basso, I. Bena, L. Bernard, L. Blanchet, B. Blossier, P. Brax, M. Cacciari, C. Caprini, C. Charmousis, E. Chassande-Mottin, D. Chicherin, M. Cirelli, Th. Damour, C. Deffayet, C. Delaunay, J. N. Fuchs, B. Fuks, S. Fumeron, M. Geiler, E. Gourgoulhon, B. Goutéreaux, M. Grana, Y. Ikhlef, E. Kiritsis, D. Langlois, J. Lavalley, A. Le Tiec, Ph. Lecheminant, L. Lellouch, M. Lemoine, E. Levine, M. Magro, Y. Mambrini, J. Martin, G. Moreau, F. Nitti, K. Noui, J. Novak, J. Y. Ollitrault, C. Pepin, E. Perlmutter, P. Peter, B. Pioline (au nom de l'IRN:QFS), C. Pitrou, S. Poulin, A. Puhm, E. Ragoucy, S. Renaud-Petel, G. Rousseaux, S. Rychkov, H. Saleur, D. Serban, P. Serpico, G. Soyez, S. Speziale, N. Tamanini, R. Tito D'Agnolo, V. Terras, P. Tourkine, V. Vennin, F. Vernizzi, C. Volpe et S. Wallon

Nos recommandations sont en [bleu](#).

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,  $r_H = 10^{28}$  cm, à l'échelle de Planck,  $l_P = 10^{-33}$  cm. Il n'est donc pas étonnant que le sujet recouvre intimement la physique des particules élémentaires, l'astroparticule, 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 travers 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 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.

À travers la découverte relativement récente du boson de Higgs, il aura fallu plus de 50 ans pour 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, 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 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  $\Lambda$ 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 pour-cents aux ingrédients de notre physique standard. En outre, ce modèle n'explique pas l'asymétrie matière-antimatière et ne rend pas compte du déficit d'antimatière. Il se pourrait cependant que la masse des neutrinos, révélée récemment 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 – p. 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, de mystérieux métaux dits étranges (ou planckiens) pourraient avoir une intrication quantique et un lien avec la physique des trous noirs. S'il fallait donner un exemple éloquent qui souligne la **synergie** entre les différents aspects de notre groupe de travail, notons les efforts menés par des groupes issus de divers horizons pour réaliser une version, *toy-model*, holographique d'un trou de ver sur un ordinateur quantique par correspondance holographique d'un métal étrange. Cela augure de futures collaborations soutenues entre plusieurs communautés en physique, tant la synergie entre diverses thématiques se renforce. 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, p. ex., 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-messager 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 run3 du LHC avant sa phase haute luminosité, DUNE, KM3NeT, CTA... Leurs résultats seront délivrés 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, p. ex., des collaborations avec l’INSMI.

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 notre thématique implique des collaborations très étroites entre l’INP et des instituts tels que l’IN2P3, l’INSU et l’INS2I, d’autant qu’aucun GDR porté par l’INP ne couvre une thématique de notre groupe de travail. 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 l’INP, renouvelle son ambition, et investisse à la hauteur de ces défis futurs.

## 1 Physique des Particules : Le vide, la masse et calculs 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’y a aucune déviation entre les calculs théoriques de haute précision et les mesures expérimentales sur, p. 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 (matière noire, origine de la masse des neutrinos...). Notons qu’avec une masse de Higgs de 125 GeV il semblerait que nous vivons dans un état méta-stable! 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, p. 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’anti-matière 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 basse masse et couplage une candidate matière noire (voir Section 2). **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  $\beta$ ) 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, voir Section 3.3. 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  $\beta$ , 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 basses énergies et spectroscopie de précision, l'apport de la métrologie sera crucial. On pense à la possibilité des champs scalaires de très faibles masses et couplages, au-delà du set-up des axions, qui constitueraient une cinquième force. Ses effets pourraient être testées via l'effet Casimir, des tests de violation du principe d'équivalence (balance de torsion, satellites tels que Microscope) et interférométrie atomique. Les horloges atomiques pourraient aussi être sensibles aux transitions atomiques qui peuvent être affectées. Soulignons ici l'importance de "démocratiser" l'accès à des signaux d'horloge pour référencer une large gamme de mesures de précision pour la physique fondamentale. L'extraction des constantes fondamentales en présence de nouvelle physique émanant de très légères masses est un autre exemple. Il faudra dès à présent préparer les communautés de la physique des hautes énergies et celle de métrologie à nouer des collaborations plus intenses. Certaines collaborations ont à peine commencé (exploitation CODATA...). Les initiatives inter-instituts tel PNGRAM devraient être renforcées et mieux relayées auprès des physiciens des hautes énergies.

• **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, p. 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, c'est le cas de la physique de la saveur, c'est le cas 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 (les fameux pdf), 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 an-

alytiques 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, 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. Elle mérite d’être fortement soutenue en France. 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 une future machine  $e^+e^-$ .

- **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 (*e.g* 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 fonctions de distribution des partons, crucial pour le LHC mais aussi pour les expériences futures de neutrinos énergétiques (LBNF/DUNE ou HyperK). En plus de la structure longitudinale, une tomographie tri-dimensionnelle 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 un 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 signes liés 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”, voir section 5.

- **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 sous-dominants 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.

## 2 Matière Noire

La matière ordinaire qui nous constitue représente une toute petite partie du budget énergétique dont est composé 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.

- **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 détections directe et/ou des détections indirectes devraient être menés (voir section 3.3). 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 qui va 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 les 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 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.](#) Parmi les pistes nouvelles, on citera l'effet de la MN sur les mesures de stabilité des horloges atomiques, l'exploitation des senseurs quantiques, les cavités supraconductrices, les télescopes à axions, ... [Une recherche interdisciplinaire est en mouvement. Elle doit se mettre en place en France.](#) Notons que certaines techniques développées pour traquer ce type de MN peuvent être appliquées aux ondes gravitationnelles de haute fréquence (au delà du kHz).

- **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, voir aussi Section 3.](#) 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 fits globaux étant complexes, le développement et l'adptation 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.](#)

## 3 Ondes Gravitationnelles, Cosmologie et Astroparticules

### 3.1 Ondes gravitationnelles

[Les OG ouvrent une nouvelle ère de détection multi-messager 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, p. 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, vont voir 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.

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 spirale, 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 spirales 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-Minkowskienne ont grandement bénéficié des méthodes de calcul des amplitudes de diffusion provenant de la physique des hautes énergies et ont effectué récemment des progrès considérables. Nous recommandons de renforcer et les approches analytiques et l'approche numérique.

Les binaires avec des rapports de masse extrême ("Extreme Mass Ratio Inspiral", EMRI) seront détectés 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 physiciens travaillant sur le QGP, voir Section 1.

En plus des systèmes binaires qui ont été détectés jusqu'à présent, il peut exister d'autres sources ponctuelles d'OG, telles que les cordes cosmiques, les étoiles à bosons, et d'autres objets exotiques dont il faudra prédire les formes d'ondes.

Il est aussi d'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.

### 3.2 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 CMB, 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 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 CMB et des anisotropies du fond 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 (voir section 5). 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, confrontation 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 faire 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.



### 3.3 Astroparticules

L'exploration de l'approche multi-messager 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'anti-matière) 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 extra-galactique, 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 chocs, 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-messager.** 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 (soleil, 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-standards, 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-messager : 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.

## 4 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 suggère 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 émergentes de la gravitation quantique en couplage fort – notamment grâce au développement des techniques de “bootstrap conforme”.

Une question importante de 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, p. ex., de fortes connections avec les développements récents en théorie des nombres et le domaine de l'information quantique.

Dans le domaine de la gravité quantique, **il est temps d'outrepasser les limitations techniques qui existent dans les différentes approches et conceptions. Il est recommandé de trouver des points de convergence et, peut-être, de combiner les différentes techniques développées à ce jour. Un groupement fédérateur, au niveau français, serait bienvenu. Il inclurait aussi les idées émanant de la gravité analogue, voir section 6, qui exploite les avancées technologiques allant des fluides quantiques aux fibres optiques non linéaires pour simuler, en laboratoire, la propagation de champs dans des espaces courbés.**

## 5 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 rapport soulevé l'importance grandissante de l'approche **amplitude** dans plusieurs domaines et la nécessité absolue de renforcer cette thématique.** 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 résurgences 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, appelées “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 dimensions 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.

## 6 Matière Condensée et Physique des Hautes Energies

Il y a toujours eu un échange très fructueux entre ces deux disciplines concernant et 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 ultrafroids. 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 porteurs 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. Compte-tenu du large spectre de ce thème de recherche, allant de la matière condensée à la gravitation, en passant par la théorie des cordes, et à son côté émergent, il paraît important de structurer cette communauté à l’échelle nationale.

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.

## 7 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 (QGP à densité élevée, EN), ou les théories de champs avec un couplage topologique... Ici, la simulation quantique 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 ou les 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.

## Glossaire et acronymes

- $\Lambda$ CDM** Lambda Cold Dark Matter. Lambda Matière Noire Froide.  $\Lambda$  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  $\sim 2025$ .
- 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<sup>ème</sup> génération de détecteur d'ondes gravitationnelles.
- Euclid** Telescope spatial lancé le 1<sup>er</sup> 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.
- IN2P3** Institut national de physique nucléaire et de physique des particules du CNRS.
- INP** Institut de Physique.
- INS2I** Institut des sciences de l'information et de leurs interactions.
- INSMI** Institut national des sciences mathématiques et de leurs interactions.
- INSU** Institut national des sciences de l'Univers.
- 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 l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), l'Institut de Physique (INP) et l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3) du CNRS 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.