

Rapport SPS 2024 du groupe Physique Fondamentale

Amy-Klein Anne, Astier Pierre, Bertoldi Andrea, Boutelier Martin (thématicien), Brax Philippe, Cleva Frédéric, Courde Clément, Leponcin-Lafitte Christophe, Petiteau Antoine (président), Rodrigues Manuel, Wolf Peter

La communauté de la physique fondamentale dans l'espace s'intéresse principalement à deux questions majeures de la science contemporaine, questions également partagées par les autres communautés qui interviennent dans les sciences de l'univers, en particulier la communauté astronomie et astrophysique :

1. Comprendre les lois physiques qui régissent notre univers et résoudre l'incompatibilité qui existe depuis une cinquantaine d'années entre les deux grandes théories de la physique du XXe siècle : la Relativité Générale (RG) d'une part qui décrit les effets de la gravité ; la théorie quantique des champs d'autre part qui permet un traitement unifié des interactions fondamentales électrofaibles et fortes dans le cadre de son modèle standard.
2. Décrire les constituants fondamentaux de l'univers à grande échelle (énergie noire, matière noire), mesurés par les succès du modèle cosmologique Λ -CDM, mais dont la nature est jusqu'à présent inconnue.

Les tentatives de réponses à ces questions conduisent à étudier des théories incluant de nouveaux champs, potentiellement massifs, qui n'ont pas de raisons intrinsèques d'être couplés d'une manière universelle aux champs connus. Par exemple, la matière noire peut être recherchée sous la forme d'un champ classique comme l'axion. Ces nouveaux champs ont une signature sur la structure de l'espace-temps qui peut être mise en évidence par une mesure de la gravité ou de ses effets sur des objets physiques.

La gravité est donc au cœur de ces deux questions fondamentales. Il est alors essentiel d'observer ses effets à toutes les échelles, depuis la Terre jusqu'aux confins du cosmos. A l'échelle du système solaire, ce sont des mesures ultra précises des trajectoires d'objets (par ex. **Microscope**, **Galileo**, **Cassini**, **Juno**, laser lune, éphémérides planétaires, **Gaia**) et de l'écoulement du temps mesuré par des horloges atomiques (par ex. **Aces-Pharao**) qui nous renseignent sur la structure de l'espace-temps. Aux échelles cosmologiques, ce sont des observations du fond diffus cosmologique et des caractérisations des déformations gravitationnelles des grandes structures (**Planck**, **Euclid**) qui nous permettent de tracer l'effet de la gravitation. Par ailleurs, l'étude de l'inflation et de l'Univers jeune nous rapproche du régime où la RG et les théories des champs fondamentales se rencontrent. Enfin, avec les détections directes des ondes gravitationnelles (OGs) par les observatoires sol **Ligo**, **Virgo** et **Kagra**, nous disposons pour la première fois d'une observable directe de la gravité ouvrant une nouvelle fenêtre sur l'Univers. Les résultats déjà obtenus avec ces nouveaux messagers montrent la richesse et la diversité des sources et leur intérêt direct pour la physique fondamentale. La gamme de fréquence des sources d'OGs observables est en cours d'extension au nano-Hz (nHz) avec les récents résultats de la chronométrie de réseaux de pulsars (**PTA**) et sera très largement enrichie dans les décennies à venir avec la mission spatiale **Lisa** pour la bande du milli-Hz (mHz) et les observatoires sols **Einstein Telescope** et **Cosmic Explorer** pour la bande Hz-kHz. Ces nouveaux observatoires fonctionneront en synergie avec la nouvelle génération d'observatoires électromagnétiques (**JWST**, **VRO - Vera Rubin Observatory**, **newAthena**, **ELT**) ou neutrinos (**IceCube**, **KM3Net**) pour contribuer pleinement à l'astronomie multi-messagers dans laquelle la communauté française est pleinement investie.

L'ensemble de ces données permet une meilleure compréhension de la nature de l'espace-temps en lien avec les grandes interrogations des théories contemporaines (théorie des cordes, espace-temps de de Sitter, axion). Elles testent la RG dans des régimes encore peu étudiés.

L'accès à l'espace est absolument essentiel pour la physique fondamentale et complémentaire des expériences au sol. Par exemple, la mesure du principe d'équivalence a gagné 2 ordres de grandeur en précision, en rupture avec la tendance historique, lorsqu'elle a pu être effectuée

depuis l'espace (**Microscope**). C'est principalement dû à la réduction importante des perturbations, combinée à une augmentation significative des temps de mesures en chute libre. Pour les ondes gravitationnelles, seules les fréquences supérieures à la dizaine de Hz sont accessibles depuis le sol. L'espace est nécessaire pour explorer les fréquences plus basses grâce à un environnement moins perturbé et à la possibilité de déployer des instruments de très grande taille.

1 Bilan, faits marquants et avancées depuis le SPS 2019

1.1 Synthèse des priorités du précédent SPS

Pour répondre à ces grandes questions de la physique fondamentale, la communauté scientifique française a identifié des priorités et des recommandations lors du précédent séminaire de prospective scientifique.

Premièrement, la communauté physique fondamentale a soutenu un investissement très conséquent du Cnes dans la mission spatiale **Lisa** et un accompagnement des laboratoires impliqués. Cette priorité a été largement suivie avec une activité importante du Cnes et des laboratoires dans les phases A et B1. La France a consolidé son positionnement stratégique sur la vérification des performances du cœur interférométrique et est responsable du traitement scientifique des données, promettant un retour scientifique important et une forte visibilité pour la communauté française.

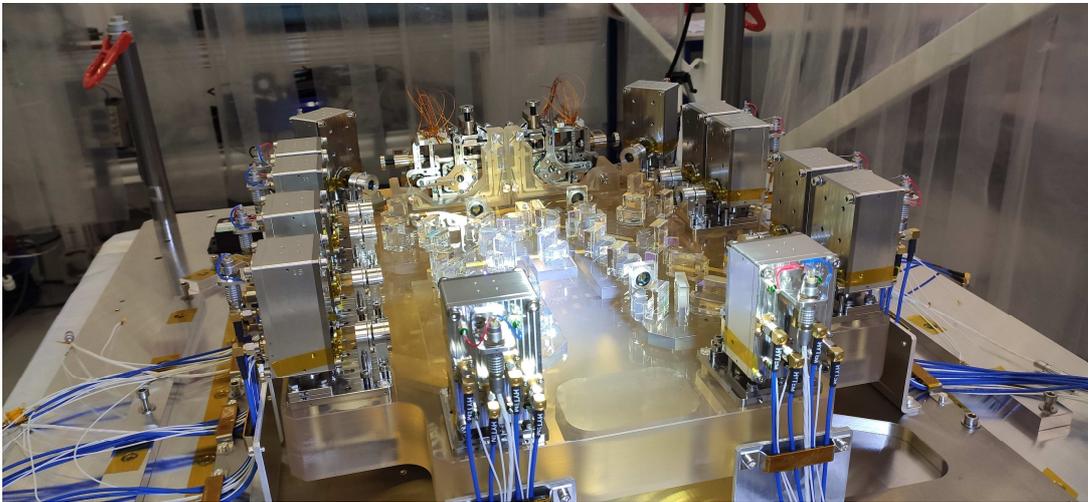


Figure 1 : Prototype d'un ensemble d'interféromètres zéro-dur (ZIFO) développé par la collaboration LISAFrance (équipes françaises et Cnes) préparant les activités de vérification des performances sous la responsabilité de la France. Ce prototype a permis de démontrer la capacité de LISAFrance à réaliser une mesure de stabilité picométrique au mHz.

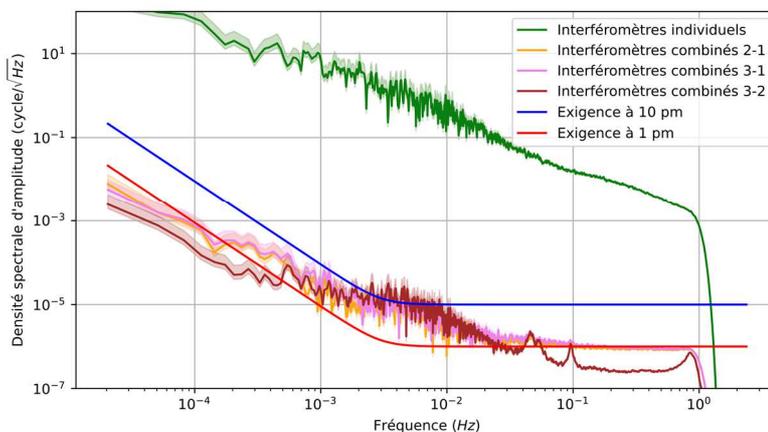


Figure 2 : Mesure des performances du ZIFO obtenues dans la chambre de simulation spatiale ERIOS au LAM (laboratoire d'astrophysique de Marseille). En combinant les mesures des

différents interféromètres, la stabilité du chemin optique atteint une précision picométrique au mHz, performance visée par les tests de performance de l'instrument **Lisa**.

Deuxièmement, la communauté physique fondamentale a soutenu la participation française à une mission de test de l'universalité de la chute libre dans le sillage de **Microscope**, avec une précision de 10^{-17} ou mieux. La mission a été soutenue par le Cnes et a passé tous les critères programmatiques et technologiques. Elle n'a cependant pas été retenue par l'ESA comme candidate M7: en l'absence d'une théorie consensuelle prédisant un niveau de violation réfutable, le comité de sélection a jugé que l'intérêt d'une recherche de violation du principe d'équivalence était limité. Ce raisonnement restreint l'ambition des projets du domaine pour les années à venir. Une meilleure représentation de la communauté physique fondamentale dans les structures de conseil de l'ESA serait également nécessaire.

Enfin, la communauté physique fondamentale a recommandé l'emport d'un accéléromètre ultra précis sur une mission planétaire ESA ou d'opportunité afin d'améliorer notre connaissance du champ gravitationnel dans le système solaire et pouvoir réaliser des tests de gravitation. Peu d'avancées ont été constatées dans ce domaine : les tentatives pour embarquer un accéléromètre de haute précision se sont révélées infructueuses, ce type d'instrumentation étant jugée trop contraignante (nécessité de connaître très précisément le centre de gravité de la sonde).

1.2 Test des violations prédites par les théories d'unification

Tester toute déviation des principes fondamentaux de la RG ou du modèle standard constitue la voie la plus prometteuse pour répondre aux deux grandes questions de la physique fondamentale. Au cours des 5 dernières années, des améliorations considérables des niveaux de contrainte ont été apportées sur plusieurs violations prédites par les théories sur le principe d'équivalence ou la symétrie de Lorentz.

1.2.1 Test du principe d'équivalence et universalité de la chute libre : résultats finaux de **Microscope**

Le principe d'équivalence d'Einstein (EEP) est le pilier fondamental de toute théorie métrique de la gravitation comme la RG. La plupart des théories d'unification prédisent une violation de ce principe et en particulier de sa manifestation la plus connue : l'universalité de la chute libre (Universal Free Fall - UFF). Le niveau où cette violation intervient ne fait pas consensus et varie entre 10^{-10} et 10^{-22} . Il est par conséquent absolument nécessaire de la tester au meilleur niveau possible.

Après une première publication scientifique en 2017 avec un test du EEP à 10^{-14} , les résultats finaux de la mission **Microscope** ont été publiés dans *Physical Review Letters* en 2022 accompagnés d'une dizaine de publications dans *General Quantum Gravity*. Ces résultats confirment la validité du principe d'équivalence avec une incertitude de 10^{-15} pour le couple de matériaux Platine et Titane, améliorant d'un facteur 100 les meilleures mesures au sol ou avec le laser lune. Pour les obtenir, les équipes scientifiques et le Cnes ont réussi le double défi de combiner de multiples sessions d'observations (~1900 orbites) pour améliorer la statistique avec une estimation très précise des effets systématiques liées à la température ou encore aux effets des craquements du satellite (déformations thermoélastiques de la protection thermique) sur les données. Ces résultats finaux sont repris dans de nombreuses publications de la communauté internationale.

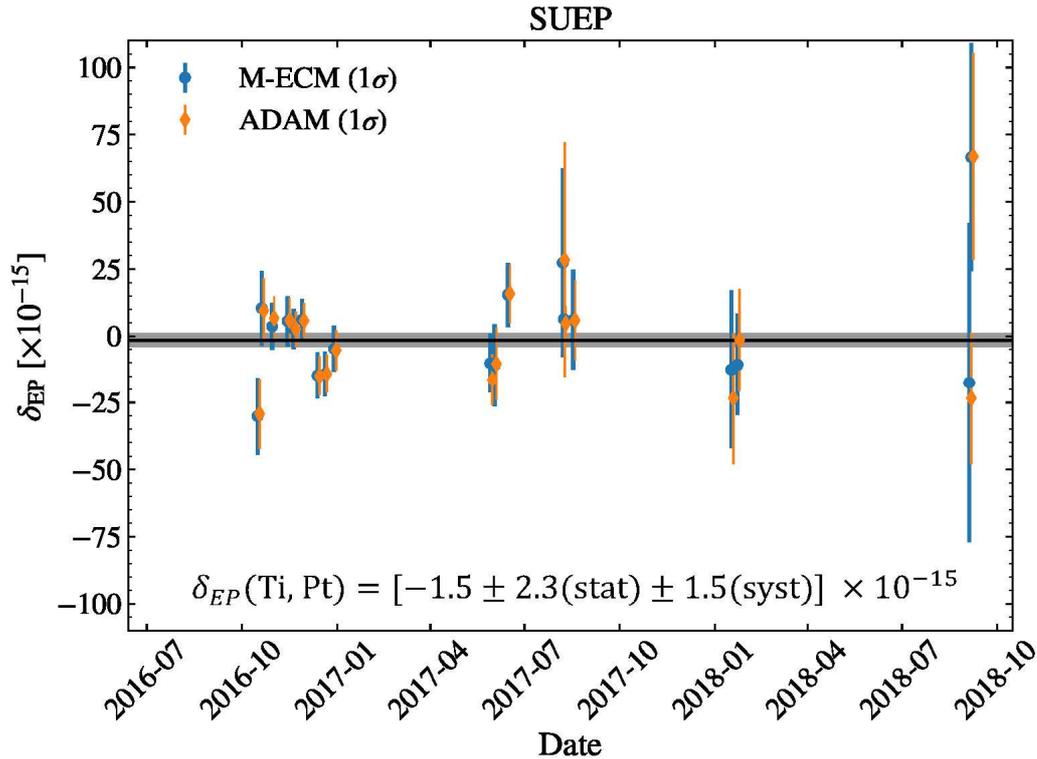


Figure 3 : Mesures de **Microscope** du test du principe d'équivalence (paramètre d'Eötvös) pour chaque segment de mesure en utilisant 2 types de traitement des données (M-ECM et ADAM). Ces deux techniques donnent une estimation du paramètre d'Eötvös compatible avec 0 à 10^{-15} près, démontrant une non violation du principe d'équivalence à ce niveau de précision

1.2.2 Violation de la symétrie de Lorentz/CPT

Les symétries de Lorentz et CPT (Charge, Parité et Temps) étant au cœur de la RG et du modèle standard des particules, tester leur violation représente un potentiel important de validation des extensions de ces deux théories. Plusieurs signatures phénoménologiques sont associées à ces violations comme par exemple une modification des équations du mouvement à deux corps qui dépend de la vitesse relative des corps en question. Le système Terre-Lune constitue un bon candidat pour étudier ce phénomène.

En utilisant 50 années de mesures de distances Terre-Lune obtenues par tir laser entre une station sol et un réflecteur positionné à la surface de la Lune, il a été démontré par une équipe française qu'il n'y avait pas de violation des symétries de Lorentz/CPT avec une amélioration de 3 ordres de grandeur sur la précision obtenue par de précédents résultats basés sur l'analyse des signaux de pulsar.

1.2.3 Masse du graviton

Au-delà de la RG, une théorie de la gravité massive suppose que la gravitation n'a pas une portée infinie et qu'elle est véhiculée via une particule hypothétique de masse non nulle, le graviton. Contraindre la masse de cette particule est donc essentiel pour progresser vers une unification de la description des forces fondamentales. Les éphémérides planétaires, modèle numérique de positions des corps célestes basé sur un modèle théorique du mouvement et différentes observations, constituent un outil essentiel pour étudier ces théories dans le système solaire.

Parmi les solutions développées, la solution INPOP (Intégrateur Numérique de l'Observatoire de Paris) développée par l'Observatoire de Paris et de la Côte d'azur s'est considérablement améliorée avec les solutions Inpop19a et Inpop21a. En intégrant de nouvelles données provenant des missions **Gaia** (observations d'astéroïdes et orbite de Pluton délivrées dans la *Data Release 2*), **Juno** (position de Jupiter), **Cassini** (position de Saturne) ou encore **Mars Reconnaissance**

Orbiter (position de Mars), les améliorations de la solution INPOP ont été utilisées pour établir une limite supérieure sur la masse du graviton à 10^{-24} eV ($1 \text{ eV} \sim 1,8 \times 10^{-36} \text{ kg}$). Cette amélioration d'un ordre de grandeur par rapport aux précédentes limites indique que les observations des éphémérides planétaires sont en faveur de la théorie de la RG.

1.3 Matière noire et énergie sombre

La recherche de la matière noire n'a pas connu de révolution majeure ces cinq dernières années, mais les limites se sont améliorées en utilisant trois méthodes : la production au collisionneur (principalement le **LHC** - Grand Collisionneur de Hadrons), la recherche indirecte de co-annihilation dans les objets astrophysiques, et la recherche directe dans les détecteurs souterrains. Au **LHC**, les limites actuelles éliminent la plupart des scénarios supersymétriques, repoussant les masses minimales à plusieurs TeV. Les recherches indirectes de matière noire dans les objets astrophysiques ont exclu presque entièrement les trous noirs primordiaux et auraient détecté une particule de masse inférieure à $\sim 200 \text{ GeV}$ s'annihilant via l'interaction faible si elle existait. La recherche directe dans les détecteurs souterrains a établi des limites plus générales, en particulier avec les détecteurs de xénon et d'argon qui couvrent le domaine des particules de masse entre 10 GeV et 10 TeV et produites par interaction faible.

L'étude de l'énergie noire utilise principalement les relevés optiques et infrarouges de l'astronomie pour déterminer si la constante cosmologique est responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Les dernières limites qui proviennent des mesures de distance utilisant les supernovae ou les BAO (Baryon Acoustic Oscillations), en particulier les relevés **SDSS** (Sloan Digital Sky Survey) et **DESI** (Dark Energy Spectroscopic Instrument), sont compatibles avec la constante cosmologique. La mise en service d'**Euclid** et sa mesure du cisaillement gravitationnel pour un grand nombre de galaxies doit améliorer ces résultats, en contraignant l'équation d'état au pourcent et en testant rigoureusement la RG aux grandes échelles.

1.4 Ondes gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles sont un nouvel outil d'observation de l'Univers qui nous renseigne sur la nature et les caractéristiques de la source responsable de l'émission et permettent des avancées majeures en physique fondamentale, cosmologie et astrophysique. La bande du 10 Hz - kHz a été ouverte en 2015 par les détecteurs au sol et celle du nHz en 2023 par **PTA**. La bande du mHz sera ouverte par la mission spatiale **Lisa**. Les différentes bandes sont complémentaires tant du point de vue des différentes populations qu'elles révèlent que du suivi des sources elles-mêmes.

1.4.1 Bande de 10Hz au kHz

La détection conjointe des OGs par les interféromètres au sol **Ligo** (USA), **Virgo** (France, Italie), et **Kagra** (Japon) a permis l'observation de 90 binaires d'objets compacts répertoriées dans le catalogue GWTC-3 publié en novembre 2021. Plus de 100 nouvelles binaires ont été détectées depuis le démarrage d'une nouvelle période de prise de données en mai 2023.

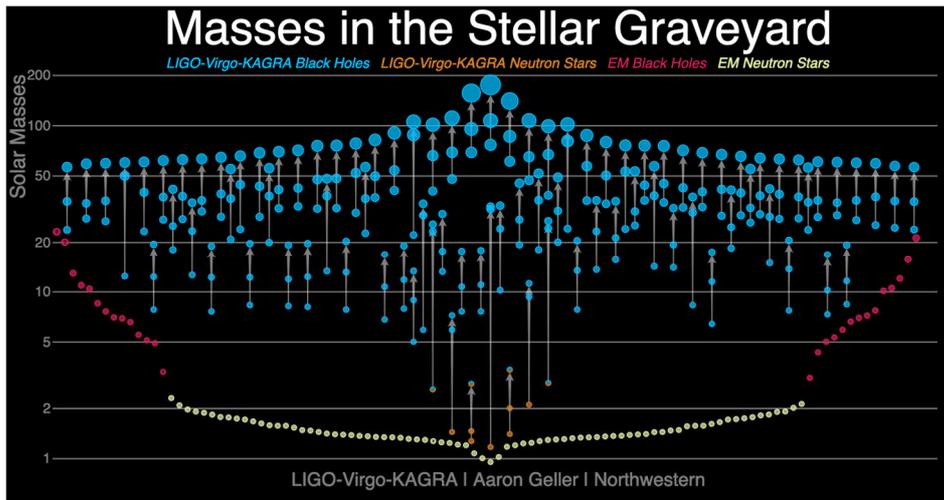


Figure 4 : Sources d'OGs détectées par la collaboration LVK. Les flèches représentent les fusions de deux objets compacts.

Cette large population d'événements a déjà permis des progrès spectaculaires comme la preuve de l'existence des trous noirs, la mesure de vitesse de propagation des OGs excluant de nombreuses théories, une nouvelle contrainte sur la constante de Hubble et de nouvelles approches sur la formation des sources.

De plus, l'exotisme de certains événements a permis des avancées singulières sur les modèles physiques et astrophysiques :

- test de la RG en champ fort avec la coalescence d'une binaire de trous noirs à grand rapport de masses (GW190412) ;
- étoile à neutrons très massive (GW190425) ;
- indication pour un modèle de formation hiérarchique des trous noirs avec l'observation de trous noirs très massifs (150 Mo après fusion pour GW190521) ;
- nature des objets avec un objet à 2.6 Mo pour GW190814 (trou noir très léger ou étoile à neutrons très massives ?) ;

1.4.2 Au nano-Hertz

Le système **PTA** (Pulsar Timing Array) permet d'observer les sources d'OGs entre 3 et 100 nHz par le chronométrage d'un ensemble de pulsars millisecondes observés par plusieurs radiotélescopes (perturbation par les OGs de la régularité des pulses). Les sources d'OGs attendues sont les binaires de trous noirs supermassifs de plusieurs milliards de masses solaires et de potentielles sources d'origine cosmologique. La collaboration PTA-France utilise le radiotélescope de Nançay et contribue au consortium European PTA (EPTA) et International PTA (IPTA).

En juin 2023, une évidence forte pour l'observation d'un fond stochastique d'OGs a été publiée de manière synchrone par quatre collaborations EPTA+InPTA (Europe et Inde), NANOGrav (Amérique du Nord), PPTA (Australie) et CPTA (Chine). Les différentes collaborations ont chronométré entre 25 et 60 pulsars sur des durées allant de quelques années à plus de 20 ans. Bien que la signature de la nature d'onde gravitationnelle ait été démontrée à 4 sigmas, il n'est pas encore possible de conclure sur l'origine du signal. Des analyses jointes organisées par l'IPTA sont en cours pour améliorer la significativité et mieux caractériser ce signal.

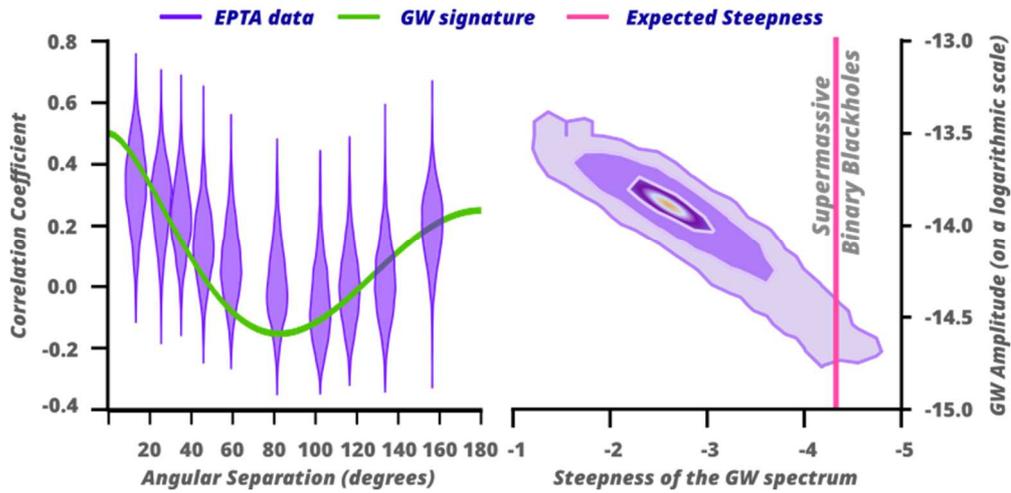


Figure 4 : Evidence forte pour un fond stochastique d'OGs observé par EPTA. A gauche, la corrélation entre pulsars en fonction de leur séparation angulaire : en violet les données et en vert la courbe théorique. A droite, l'estimation des paramètres d'un fond stochastique en loi de puissance : amplitude en fonction de la pente.

2 Situation programmatique de la physique fondamentale dans l'espace

L'exercice de prospective pour les cinq prochaines années se déroule dans un cadre programmatique avec trois missions d'intérêt pour la physique fondamentale déjà engagées :

- La mission **ACES** et son horloge atomique **Pharao** doit être lancée au début de l'année 2025 sur une fusée Falcon 9. Elle a pour objectif principal la mesure du décalage gravitationnel des fréquences (effet Einstein) dans le champ de la Terre avec une précision inégalée de 10^{-6} . Malgré de nombreux retards, le potentiel scientifique de la mission reste important. Dans le domaine de la physique fondamentale, ACES doit fournir une mesure du décalage gravitationnel des fréquences améliorée d'un facteur 10, par rapport aux dernières mesures. Cette mission permettra aussi de rechercher les variations temporelles des constantes fondamentales et contribuera à la recherche de la matière noire. La communauté scientifique française a été largement impliquée dans la réalisation de l'horloge à atomes froids **Pharao** et est très impliquée dans l'organisation de la mission **ACES** et l'analyse des données.
- La mission large de l'ESA, **Lisa** (adoptée par l'ESA et validée par le Cnes), a de nombreux objectifs scientifiques en astrophysique, cosmologie et physique fondamentale. Son lancement est prévu en 2035 et les premières données seront acquises en 2037. Cette mission permettra d'étudier la formation et l'évolution des binaires d'étoiles compactes dans la Voie Lactée, de retracer l'origine, la croissance et l'histoire de la fusion des trous noirs supermassifs à travers les âges cosmiques, de sonder les propriétés des trous noirs et leur environnement immédiat dans l'Univers local, d'effectuer de multiples tests de la RG, de mesurer le taux d'expansion de l'Univers ou encore d'obtenir des informations sur l'Univers très jeune. Avec plus de 200 membres dans le **Lisa** consortium, la communauté scientifique française est largement impliquée dans **Lisa** (communauté la plus importante en termes de force de travail, avec des responsabilités à tous les niveaux). La France est responsable des tests et de la mesure de la performance du cœur interférométrique de l'instrument. Elle est aussi responsable du segment sol scientifique (Distributed Data Processing Center) et coordonne l'ensemble des pays européens impliqués dans ce développement et héberge le centre de calcul principal.
- La mission **Euclid**, lancée en juillet 2023, a débuté sa cartographie du ciel profond. Les données d'excellente qualité fournies par les instruments VISible instrument et Near Infrared Spectrometer doivent permettre d'observer l'évolution des galaxies et des grandes structures de l'Univers jusqu'à des distances très importantes. Elles permettront de mieux comprendre la nature et le rôle de la matière noire et de l'énergie sombre dans l'accélération de l'expansion de l'Univers.

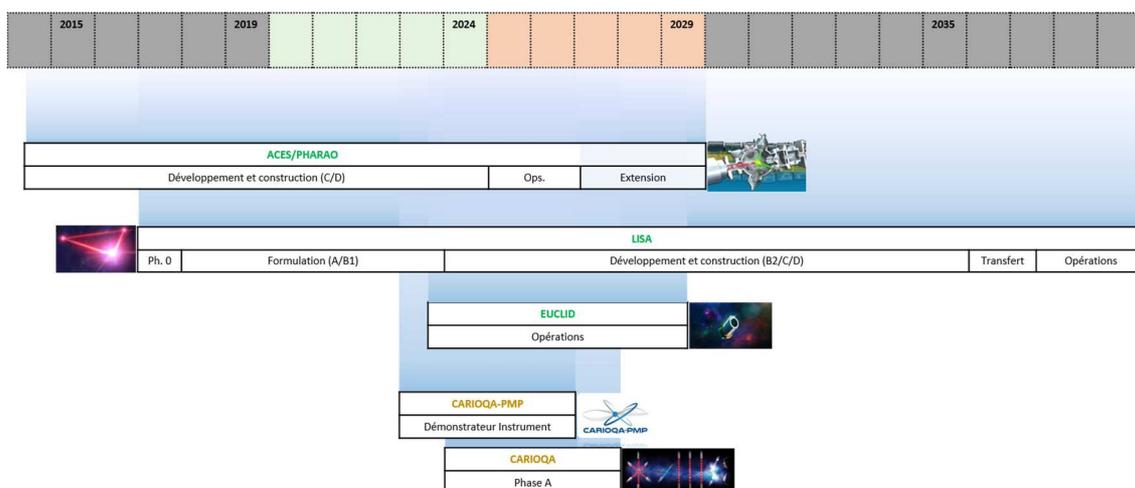


Figure 5 : Planning des missions pour la physique fondamentale.

Ces trois missions scientifiques décidées sont d'un intérêt primordial pour la communauté physique fondamentale et il est absolument essentiel que le Cnes soutienne fortement les équipes scientifiques en charge de ces missions, en particulier pendant les opérations et l'exploitation des données.

La communauté physique fondamentale soutient également la participation du Cnes dans les projets de démonstration technologique d'accéléromètres à atomes froids que sont **Carioqa** (première démonstration en vol début 2030) et **Carioqa PMP**. Ces projets, qui intéressent également la communauté Terre solide, sont fondamentaux pour bâtir les futurs instruments nécessaires à la physique fondamentale dans l'espace.

3 Recommandations du groupe

Ces recommandations visent à poursuivre les progrès scientifiques sur les deux grandes questions directrices tout en tenant compte de la situation programmatique, des développements au sol et des expériences passées dans la soumission de projets spatiaux.

Concernant l'identification et la contrainte des modèles unifiant la RG et les théories quantiques, les trois axes prioritaires dans le spatial sont (i) de continuer à améliorer les tests du principe d'équivalence par des mesures directes et répétées d'une potentielle violation sur différents corps et différentes masses (atomes, masses d'épreuve, petits corps ou planètes) ; (ii) d'étudier la gravitation en champs forts (trous noirs) et à grandes échelles ; et (iii) d'étudier l'Univers jeune à la recherche d'une nouvelle physique qui se manifesterait à très hautes énergies.

Concernant l'identification des constituants de l'Univers à grande échelle, les deux axes prioritaires sont (i) la recherche d'une signature directe de la matière noire ; et (ii) les études des différents modèles cosmologiques.

3.1 Améliorer le test du principe d'équivalence

L'amélioration des tests du principe d'équivalence est la première priorité de la physique fondamentale nécessitant une participation majeure du Cnes. Elle passe par la mesure de différences d'accélération s'étalant sur une large gamme de masses allant des atomes aux planètes. Pour les grandes masses, l'amélioration vient des tests au niveau du système solaire traité en 3.5.

Pour les tests avec des masses de l'ordre du kilogramme, la voie privilégiée est la mission **Microscope 2** qui est la suite naturelle de **Microscope** avec un objectif de 10^{-17} soit 100 fois mieux que **Microscope**. Des études sont menées à l'ONERA sur le retour d'expérience de **Microscope** pour améliorer les points limitant la performance dans un usage adapté pour **Microscope 2**, c'est-à-dire le maintien de la charge électrique de la masse d'épreuve et sa mesure de position. Une réflexion a lieu sur les matériaux à utiliser pour un retour scientifique optimal dans une configuration à 3 masses d'épreuve concentriques (au lieu de 2 pour **Microscope**). Cette configuration est motivée par la volonté de mieux différencier les erreurs systématiques de chaque paire de masses à tester. Une utilisation augmentée de la charge utile permettant d'autres objectifs scientifiques (matière noire, constante gravitationnelle G, ...) est également à l'étude. **Microscope 2** est envisagée dans un cadre international (bilatéral, trilatéral ou mission F à l'ESA) et une distribution des contributions à la mission (tâches / équipements / traitements).

Pour les tests au niveau atomique, la voie privilégiée est une mission spatiale d'interférométrie atomique à un coût acceptable (petite taille - mission F à l'ESA), **Carioqa** étant une première étape dans cette direction.

Les propositions de futures missions sur le principe d'équivalence intégreront l'expérience acquise après la non-sélection répétée de STE-QUEST à l'ESA.

3.2 Rechercher les preuves de l'inflation

La recherche de preuve de l'inflation est la seconde priorité de la physique fondamentale qui nécessite une participation majeure du Cnes. L'objectif est ici d'obtenir des informations sur l'Univers très jeune, bien avant l'émission du Cosmic Microwave Background (CMB - première lumière émise dans l'Univers observée par le satellite Planck). L'inflation est le modèle actuellement privilégié pour rendre compte de l'évolution de l'Univers juste après le Big Bang et consiste en une évolution extrêmement rapide. Sa mise en évidence et sa caractérisation sont des éléments cruciaux pour la compréhension de l'Univers et pour la nouvelle physique. Lors de la phase d'inflation, des ondes gravitationnelles de très grande longueur d'ondes ont été émises et ont imprimées des modes de polarisation particuliers dans le CMB, les modes B. Leur détection nécessite une mesure très précise de la polarisation du CMB, mesure qu'effectuera la mission **LiteBird** (JAXA + Europe) actuellement en phase A.

3.3 Physique fondamentale avec de nouvelles classes de sources d'ondes gravitationnelles et des observations multi-bandes

L'étude des phénomènes les plus violents de l'Univers est une des principales méthodes permettant d'accéder à une nouvelle physique. Les mesures en champ de gravité fort, comme dans les divers systèmes binaires de trous noirs, permettent de voir si la RG décrit bien la gravitation. Beaucoup de ces phénomènes violents émettent des ondes gravitationnelles dans des bandes de fréquence très variées. **PTA**, **Lisa** et **Ligo/Virgo** explorent et exploreront respectivement les bandes du nHz, mHz et 10Hz/kHz mais il n'existe pas de projet concret au micro-Hz et au déci-Hz. Du fait de la taille des instruments et de la stabilité nécessaires, l'espace est un lieu privilégié pour cet élargissement et ce type d'instrument est donc une priorité pour la physique fondamentale nécessitant une participation substantielle du Cnes.

Les sources n'émettant qu'au micro-Hz sont par exemple certaines binaires de trous noirs supermassifs dans l'Univers proche avec une forte probabilité de trouver une contrepartie électromagnétique et ainsi d'avoir une très bonne compréhension des systèmes. Le déci-Hz donne accès aux binaires dont le rapport de masses est entre 50 et 500 et à celles de masse intermédiaire (autour 1000 masses solaires), qui ouvrent sur l'étude de la gravité dans un nouveau régime. L'accès au micro-Hz et au déci-Hz permet également d'observer et d'étudier des sources dont l'émission s'étale sur une large gamme de longueur d'onde comme par exemple les fonds stochastiques émis par l'Univers primordial ou les binaires d'étoiles à neutrons. Ces nouvelles bandes sont donc complémentaires des projets actuels comme **Lisa**.

Plusieurs projets spatiaux au micro-Hz et au déci-Hz sont en cours d'étude : un interféromètre de type **Ligo/Virgo** sur la Lune (**Lila**) ou dans l'espace (**Decigo**), un interféromètre atomique (**Agis**) ou encore une constellation de Nanosat avec des horloges de précision ou une **Lisa** de grande taille (**LISAmx**). Ces projets très prospectifs s'inscrivent sur le long terme.

3.4 Rechercher une signature directe de la matière noire

L'espace est un lieu privilégié pour rechercher des signatures directes de la matière noire, en recherchant, par exemple, des oscillations résonnantes entre des masses d'épreuve en chute libre induites par un certain type de matière noire. La mission **Microscope 2** (décrite en 3.1) pourrait effectuer des mesures de ce type. Ce type de recherche est une priorité de la physique fondamentale nécessitant une participation substantielle du Cnes.

3.5 Test de gravité dans le système solaire

L'établissement d'une cartographie précise du champ de gravité dans le système solaire est un enjeu crucial pour la physique fondamentale. Cette cartographie qui passe par une trajectographie très précise des satellites, la réalisation des systèmes de référence et l'amélioration des éphémérides planétaires dans le système solaire, permet de faire des tests très précis de la physique sous-jacente, la gravité.

Pour cela, il est nécessaire d'emporter des accéléromètres suffisamment précis (10^{-11} m/s²) sur des missions vers les objets du système solaire pour supprimer les effets non gravitationnels et dépasser les limites des modèles actuels. L'emport d'accéléromètres sur des sondes permettrait :

- En phase orbitale, d'améliorer considérablement la description du champ de gravité de la planète et de ses satellites ;
- En phase de survol (lors des assistances gravitationnelles), d'avoir une meilleure étude de la planète survolée et de la dynamique de la sonde;
- En phase interplanétaire, d'obtenir pour la première fois une caractérisation précise de la dépendance en distance de la loi de la gravitation.

Ce type d'instrumentation nécessite un investissement substantiel du Cnes pour d'une part encourager et convaincre nos partenaires de l'intérêt de ce type d'instrumentation sur des missions planétaires, et d'autre part accompagner l'effort nécessaire en R&T pour améliorer les performances et miniaturiser ce type d'instrument.

3.6 Investir et soutenir les développements technologiques

3.6.1 Futurs capteurs et instruments

La physique fondamentale est une science qui repose sur des mesures extrêmement précises des effets de la gravité sur la structure de l'espace et du temps. Elle se trouve limitée aujourd'hui par la sensibilité des instruments. Par exemple, pour la mesure du temps, les dernières horloges atomiques optiques au sol atteignent des incertitudes inférieures à 10^{-18} en valeur relative et des progrès significatifs ont été faits pour les automatiser et les fiabiliser. Mais on ne dispose pas de moyens suffisamment performants pour les comparer au niveau intercontinental (comparaison de fréquences par fibres optiques sur des distances du millier de km). Il est donc nécessaire d'accélérer le développement des liens de transferts de temps en espace libre avec ce niveau de performance. Ceci permettra de mesurer avec une meilleure précision l'effet de la gravité sur l'écoulement du temps.

Autre exemple de limitation, la mesure de la distance Terre-Lune est étroitement surveillée au cm près. Cette mesure se fait via des liaisons lasers entre une station sol et des rétro réflecteurs déposés lors des missions lunaires Apollo. De nouveaux réflecteurs lasers plus précis vont être déposés dans les années à venir lors des futures missions lunaires. La précision accessible par ces nouveaux réflecteurs sera limitée par les lasers utilisés et les techniques de détection mises en œuvre. Il est absolument nécessaire de développer des lasers de plus forte puissance, avec une cadence de tir plus élevée et des impulsions plus courtes. Il faut également soutenir le développement de capteurs plus rapides et moins bruités, et développer des optiques adaptatives robustes.

Concernant les accéléromètres et les capteurs inertiels, les performances des capteurs tels que ceux utilisés sur **Microscope** sont proches de leurs limites intrinsèques et d'autres technologies sont nécessaires. Les capteurs quantiques à base d'atomes froids constituent une alternative très prometteuse mais leur spatialisation est encore loin d'être acquise. Il est donc absolument nécessaire de soutenir une mission satellite précurseur basée sur des capteurs à atomes ultra-froids telle que **Carioqa**. En parallèle, il faut améliorer la miniaturisation des accéléromètres électromécaniques pour rendre possible leur emport sur des missions d'exploration du système solaire.

3.6.2 Techniques d'analyse et de traitement des données

Les données issues des futures missions spatiales liées à la physique fondamentale nécessiteront des nouvelles techniques d'analyse, qui devront être plus massives et plus performantes pour faire face aux quantités de données générées. La mission **Lisa** est un bon exemple de ce que préfigure le futur. Pour réussir l'exploitation scientifique de la mission, d'importants développements doivent être fait en analyse bayésienne à grand nombre de paramètres et en démélange de signaux pour extraire l'ensemble des sources. Les équipes scientifiques ont également de plus en plus recours aux techniques issues de l'intelligence artificielle. L'ensemble de ces techniques doivent prendre en compte une flexibilité et une modularité dans le développement des chaînes d'analyse pour développer des cycles courts entre prototypage et production. Ces algorithmes seront distribués et exécutés sur de multiples fermes de calcul mutualisées CPU-GPU. Le Cnes doit accompagner les efforts de la communauté française dans ce domaine et continuer d'investir dans les développements associés, en particulier pour la mission **Lisa** où la France est responsable de l'analyse des données.

4 Conclusion

Au cours des 5 dernières années, la communauté française a obtenu d'importants résultats grâce à des mesures impliquant des moyens spatiaux. Cette communauté est fortement impliquée sur 3 missions où de nouveaux résultats sont attendus : **Lisa** qui vient d'être adoptée, **Aces/Pharao** qui sera lancée en 2025 et **Euclid** actuellement en opérations. Il est nécessaire de poursuivre les efforts et de préparer l'avenir par des investissements du Cnes sur l'étude de nouvelles missions et de la R&T. Le tableau ci-dessous résume les recommandations majeures et substantielles:

Question fondamentale	Objectif scientifique	Observable/type de mesure	Exemple de cadre de réalisation avec phase	R&T
Unifier la relativité générale et les théories quantiques	Comment réconcilier mécanique quantique et relativité générale ?	Mesures de différences d'accélération des atomes aux planètes pour tester le principe d'équivalence <i>[Priorité Majeure]</i>	Microscope2 à phase 0	Développement de l'interférométrie quantique (Carioqa à phase A) Amélioration des techniques de mesure de distance (laser lune) Amélioration des techniques de mesure de temps (lien de transfert de temps)
			Accéléromètres embarqués sur des sondes interplanétaires	Miniaturisation des accéléromètres
	Nouvelle physique : Que nous apprend l'Univers très jeune (inflation) ?	Détection des modes B comme preuve de l'inflation <i>[Priorité Majeure]</i>	LiteBIRD à phase A	
La relativité générale décrit-elle bien la gravitation à grande distance et en champ fort (observations des phénomènes les plus violents de l'Univers) ?	Détection d'ondes gravitationnelles au μHz et au $\text{d}\mu\text{Hz}$ <i>[Priorité Substantielle]</i>	Interféromètre type Ligo/Virgo sur la lune et constellation de satellites (prospectif, long terme)		
Décrire les constituants de l'Univers à grande échelle	Nature de la matière noire	Mesures de différences d'accélération des atomes aux planètes pour la recherche de matière noire <i>[Priorité Substantielle]</i>	Microscope2 à phase 0	Développement de l'interférométrie quantique (Carioqa à phase A)