

GROUPE DE TRAVAIL THEMATIQUE PHYSIQUE FONDAMENTALE

Anne Amy-Klein, Alain Blanchard, Luc Blanchet, Philippe Bouyer, Chiara Caprini, Bruno Christophe, Jacques Dumarchez, Agnès Fienga, Eric Gourgoulhon, Antoine Heidmann, Arnaud Landragin, Christophe Leponcin-Lafitte, Isabelle Petitbon (Thématicienne), Peter Wolf (Président)

1. Grandes questions scientifiques

Les motivations et les grandes questions dans le domaine de la physique fondamentale dans l'espace ont été définies lors des séminaires de Prospective précédents. Il s'agit de rechercher de nouveaux moyens d'accès à une physique nouvelle qui interviendrait :

- à la frontière entre la mécanique quantique et la relativité générale (RG), résultant d'une unification non comprise actuellement entre la gravitation et les autres interactions fondamentales qui sont décrites par la théorie quantique des champs ;
- et/ou dans la description des constituants fondamentaux de l'Univers à grande échelle (énergie noire et matière noire), mesurés par les succès du modèle cosmologique Λ -CDM, mais dont la nature est jusqu'à présent inconnue.

Ces questions sont au centre des préoccupations de la communauté de physique fondamentale, et elles sont étroitement imbriquées aux grandes questions que se posent les communautés voisines qui interviennent dans les sciences de l'Univers, car la gravitation joue un rôle primordial dans la compréhension de la quasi-totalité des observations à toutes les échelles, de la Terre jusqu'à la cosmologie. A titre d'exemple, les mesures ultra-précises des trajectoires des satellites (et du temps des horloges atomiques à bord) en orbite terrestre et dans le système solaire permettent les meilleurs tests des théories de la gravitation en champ faible et aux échelles du système solaire (MICROSCOPE, GALILEO, laser lune, éphémérides planétaires, GAIA). A l'autre extrême, les observations du fond cosmologique de rayonnement diffus (PLANCK, EUCLID) permettent d'étudier l'impact des théories alternatives de la gravitation dans l'univers primordial à des échelles d'énergie qui ne sont pas accessibles autrement.

D'une manière générale, en absence de mise en évidence d'une violation de la physique actuelle, le but de la recherche en physique fondamentale est d'une part une amélioration de l'exactitude des tests, et d'autre part une diversification vers des nouveaux domaines ou messagers. Deux exemples récents en sont le test du principe d'équivalence par le satellite MICROSCOPE et la récente détection directe des ondes gravitationnelles (OG) par LIGO et VIRGO. Les quelques événements observés en OG ont déjà donné lieu à une moisson de résultats en physique fondamentale, et la campagne d'observation en cours promet de les démultiplier. Dans le futur, les études seront étendues vers des objets de plus en plus massifs (trous noirs super massifs) et autres objets compacts grâce à la mission LISA, ainsi que l'observatoire ATHENA en X. Au voisinage de la terre, on cherche à améliorer l'exactitude des tests du principe d'équivalence mais aussi à aller vers des nouveaux objets quantiques (STE-QUEST) ou de l'antimatière (e.g. GBAR et AEGIS au CERN).

D'un point de vue théorique, toutes les tentatives d'unification (super-cordes, etc) de la relativité générale avec les autres interactions décrites par des théories quantiques renormalisables ont conduit à des champs nouveaux se superposant au champ de spin 2 de la relativité générale. L'énergie et matière noire peuvent d'ailleurs être constituées de tels champs. Comme a priori ces champs n'ont aucune raison d'être couplés d'une manière universelle aux champs connus et qu'ils peuvent être massifs, on attend comme conséquences observables :

- Une violation de principe d'équivalence et donc de toutes les théories métriques de la gravitation.
- Une violation des lois de la relativité générale.

En physique fondamentale nous cherchons à utiliser tout type d'expérience et observation qui mettrait en évidence de tels champs et éclairerait le chemin vers une physique nouvelle: expérience de précision dans des domaines variés, observations à toute échelle, nouveaux messagers, ...

2. Bilan et avancées depuis la prospective 2014

Le domaine de la physique fondamentale a connu un véritable âge d'or en Europe dans la période 2014-2019, grâce à des missions phares comme MICROSCOPE ou LISA Pathfinder, à des opportunités inattendues (satellites Galileo excentriques), ou des résultats au sol comme la détection directe d'ondes gravitationnelles. On se réjouit aussi de la sélection de LISA en L3, qui sera une des missions phares des prochaines décennies et la communauté contribuera de manière tout à fait significative à cette nouvelle fenêtre de la physique que constitue l'univers gravitationnel.

Cependant certaines priorités affichées en 2014 n'ont pas pu être satisfaites, en particulier la mission pour un test du principe d'équivalence au niveau quantique (STE-QUEST) ou l'embarquement d'un accéléromètre de précision sur une mission planétaire e.g. JUICE. De plus nous déplorons le retard d'ACES/PHARAO, retard dû uniquement à l'ESA, le CNES ayant livré l'horloge PHARAO, en juillet 2014.

Globalement le bilan est extrêmement positif et installe fermement la France et l'Europe comme leader mondial en physique fondamentale dans l'espace. Quelques faits marquants illustrent ce propos.

2.1. Test du principe d'équivalence

Le principe d'équivalence d'Einstein est le fondement de la relativité générale et plus généralement de toutes les théories métriques de la gravitation. Cela nécessite de le tester avec la meilleure incertitude possible et dans des domaines aussi différents que possibles e.g. en testant indépendamment ces différentes facettes (universalité de la chute libre, redshift gravitationnel, invariance de Lorentz) et en utilisant des « objets » aussi diverses que possibles (masses classiques, superpositions quantiques, antimatière, horloges de différents types, ...).

2.1.1. Universalité de la chute libre: MICROSCOPE

Les premiers résultats de l'expérience Microscope ont été publiés dans Physical Review Letters en Décembre 2017. Alors qu'ils ne portent que sur 120 orbites, ces résultats confirment le principe d'équivalence avec une incertitude de $2 \cdot 10^{-14}$ améliorée d'un facteur 10 par rapport aux meilleures mesures au sol ou avec le laser-lune. Ces résultats sont utilisés dans de nombreuses autres publications (> 60 citations en un an). Comme exemple, la fig. 1 montre les contraintes dans une théorie qui postule un champ scalaire massif additionnel (qui pourrait être la matière noire) couplé d'une manière non-universelle aux interactions connues. En fonction du type de couplage, MICROSCOPE permet d'améliorer les contraintes précédentes de 1 à 8 ordres de grandeur.

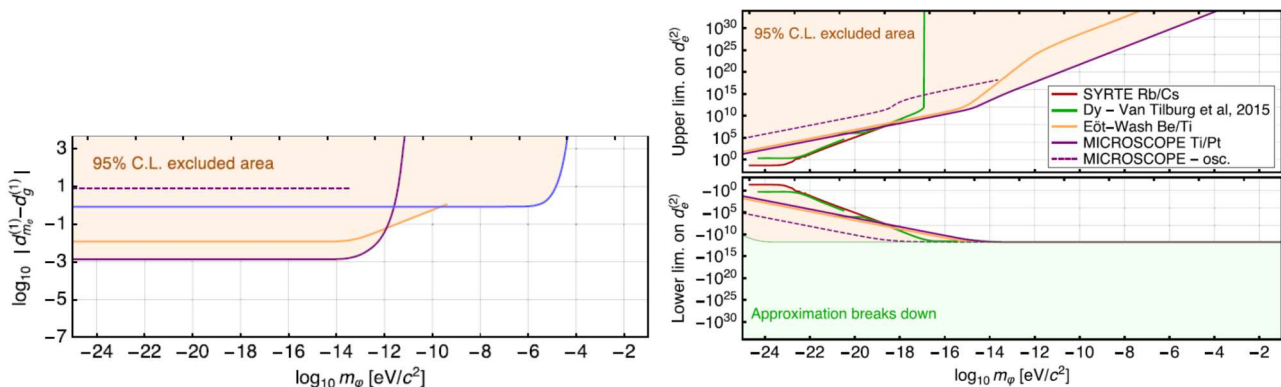


Fig. 1 : Contraintes sur le couplage d'un champ scalaire massif à l'électron et gluon (gauche) ou au photon (droite) pour un couplage linéaire (gauche) ou quadratique (droite), en fonction de la masse du champ scalaire. En absence d'une violation du principe d'équivalence $d_i = 0$. On voit que MICROSCOPE améliore les contraintes de 1 à 8 ordres de grandeur. Extrait de PRD 98, 064051 (2018).

L'analyse en cours de l'ensemble des mesures devrait permettre de gagner environ un facteur 10 par rapport aux premiers résultats. Les progrès seront acquis par une amélioration de la statistique (environ 1900 orbites utiles à la fin de la mission) et aussi par une estimation plus précise des effets systématiques liés à la sensibilité aux effets thermiques grâce à l'analyse fine des sessions dédiées.

2.1.2. Redshift gravitationnel : Galileo 5&6

Le 22 août 2014, les 2 satellites Galileo 5 et 6 ont été placés sur une orbite excentrique en raison d'une défaillance du lanceur Soyuz (étage Fregat). Dès 2015, une étude préliminaire menée par le SYRTE avait montré qu'il était possible d'exploiter, sur plus d'une année, les données de ces deux satellites excentriques

afin d'améliorer le test du décalage gravitationnel, une expérience jamais améliorée depuis 1976 et Gravity Probe A (GP-A), grâce à la modulation de l'effet par l'altitude variable des satellites, et des horloges atomiques stables à bord.

Sous l'égide de l'ESA, deux études parallèles et indépendantes ont été financées pour exploiter les données de Galileo, sous le nom de GREAT (Galileo gravitational Redshift Experiment with eccentric sATellites). L'une a été confiée au SYRTE à l'Observatoire de Paris et l'autre au ZARM, à l'Université de Brême. Après trois ans de mesures et d'analyse de données, les résultats de l'étude des chercheurs du SYRTE et du ZARM sont parus dans le journal *Physical Review Letters*. Ils confirment les prédictions de la relativité générale avec une incertitude relative de 2.5×10^{-5} , une amélioration d'un facteur 5 à 6 par rapport aux résultats de GP-A. La fig. 2 montre l'effet variable sur quelques orbites et le très bon accord entre la prédiction du principe d'équivalence d'Einstein et les mesures.

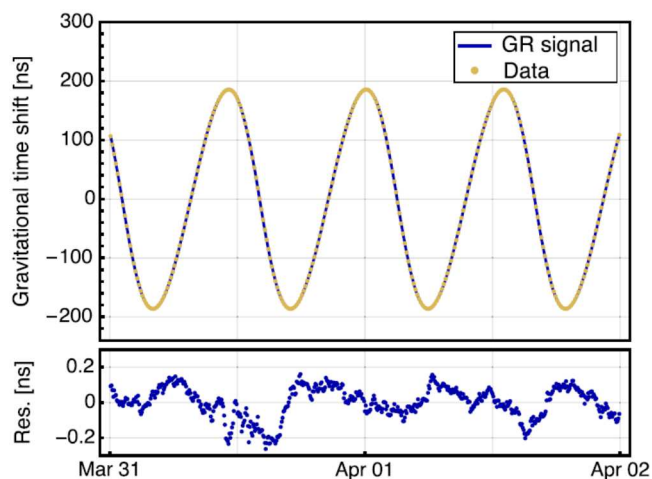


Fig. 2 : Décalage gravitationnel de l'horloge à bord d'un satellite Galileo excentrique, montrant le parfait accord entre les mesures et le modèle théorique. Extrait de *PRL* 121, 231101 (2018).

2.2. Ondes gravitationnelles

En 2014 lors du séminaire de La Rochelle le groupe de physique fondamentale avait recommandé en première priorité les ondes gravitationnelles avec l'interféromètre LISA dans l'espace pour l'observation des ondes de basses fréquences. Depuis deux facteurs ont considérablement augmenté l'intérêt scientifique (et la faisabilité technique) de LISA : (i) La détection des ondes gravitationnelles à hautes fréquences par les interféromètres LIGO et Virgo au sol ; (ii) Le succès de la mission LISA Pathfinder.

2.2.1. Détection au sol

Le 14 septembre 2015, les deux détecteurs LIGO observent le signal gravitationnel (GW150914) de la coalescence de deux trous noirs (TN) ayant des masses élevées de 36 et 29 $M_{\text{sol}}^{\text{aire}}$ à une distance d'environ 400 Mpc. Depuis, 10 événements de coalescence de trous noirs ont été identifiés, dont l'un (GW170729) ayant des masses de 50 et 35 M_{sol} (pour un trou noir final d'environ 80 M_{sol}) à 2700 Mpc. Les signaux gravitationnels reproduisent parfaitement la prédiction de la relativité générale : accord complet avec le développement post-newtonien dans la phase spirale (lors des derniers cycles orbitaux avant la coalescence), et avec les calculs de relativité numérique pour les phases de fusion et de ringdown. Certains TN de type LIGO auraient pu être détectés à basses fréquences par LISA plusieurs années avant la détection au sol. Grâce à cette possibilité LISA fera des prédictions de l'instant précis et de la direction d'observation des coalescences de LIGO-Virgo, d'où la possibilité de se préparer très à l'avance en particulier pour les recherches de contreparties électromagnétiques, et cela autorisera des tests très précis de la relativité générale sur des signaux observés à plusieurs années ou mois d'écart.

Le 17 août 2017 était observée une coalescence de deux étoiles à neutrons à 40 Mpc (GW170817). Cet événement constitue le début de l'astronomie multi-messagère avec un sursaut gamma observé par les satellites FERMI et INTEGRAL 1,7 secondes après le signal gravitationnel, puis un transitoire en optique identifié à une kilonova qui a été découvert par les télescopes au sol au voisinage de la galaxie NGC4993 à la distance prédite par les détecteurs gravitationnels.

L'ensemble de ces observations (purements gravitationnelles ainsi que multi messagers) a engendré une série de nouveaux tests de physique fondamentale, parmi lesquels des nouvelles contraintes sur la masse du graviton, une confirmation du principe d'équivalence fort, ou une mesure indépendante de la constante de Hubble. La fig. 3 montre les deux observations « historiques », la première (2015) et la première avec contrepartie électromagnétique (2017).

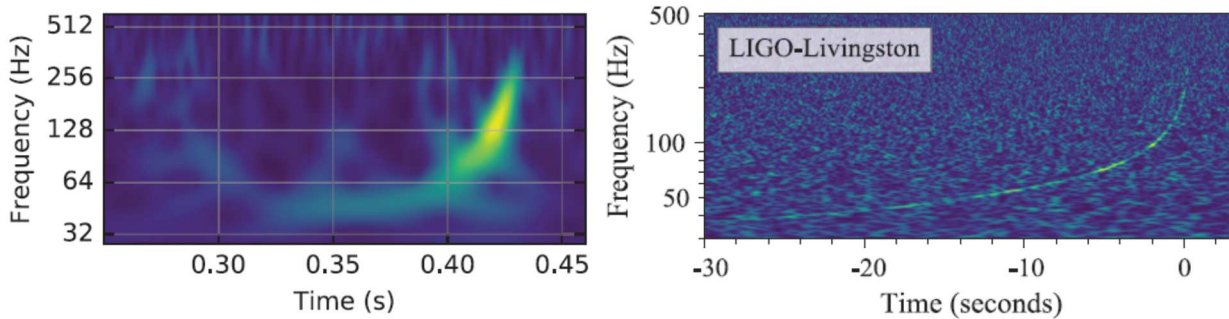


Fig. 3 : Signaux du premier signal GW observé (GW150914, à gauche) et de la coalescence de deux étoiles à neutrons (GW170817, à droite). On voit clairement l'augmentation en fréquence à l'approche de la coalescence et la coupure nette correspondant à la coalescence. Cette dernière permet une datation très précise du moment de coalescence permettant une comparaison fine aux contreparties électromagnétiques, comme les sursauts gamma. Extraits de PRL **116**, 061102, (2016) et PRL **119**, 161101 (2017).

2.2.2. LISA Pathfinder

LISA Pathfinder (LPF) est un démonstrateur technologique pour la future mission LISA. Son objectif est de valider une grande partie des technologies en particulier celles qui ne peuvent pas l'être au sol telles que le maintien de très haute qualité de masses de référence en chute libre (senseur inertielle), le contrôle d'attitude, la mesure interférométrique de la position des masses et la micro-propulsion de précision. LISA Pathfinder a été lancé le 3 décembre 2015 et les opérations scientifiques se sont déroulées jusqu'au 18 Juillet 2017. Les performances ont été meilleures que les spécifications de LPF de plus d'un ordre de grandeurs, et même meilleures que les besoins de LISA sur la totalité de la bande de mesure de LISA, voir fig. 4. C'était donc une démonstration éclatante de la capacité de mesure d'accélération fine, et de contrôle drag-free du satellite à un niveau bien suffisant pour LISA, mais aussi d'intérêt plus général pour toute autre mission qui cherche à réaliser des trajectoires purement gravitationnelles dans le système solaire.

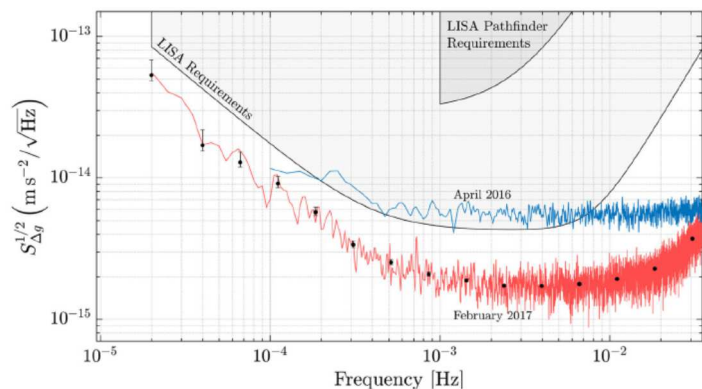


Fig. 4 : Densité spectrale de bruit d'accélération mesurée à bord de LPF, démontrant une performance bien suffisante pour LISA. Extrait de PRL **120**, 061101 (2018).

2.2.3. LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

Pendant les années 2015-2016 la communauté LISA a travaillé à la définition du retour scientifique de plusieurs configurations de l'interféromètre. Ceci a conduit à la proposition d'une configuration à trois bras de 2,5 million de km et durée de mission fixée à 4 ans, lors de la réponse à l'appel à mission lancé par l'ESA en fin 2016. LISA a été approuvé par le SPC de l'ESA le 20 juin 2017 comme mission L3 du programme Cosmic Vision. La Phase 0 s'est déroulée en 2017 en deux étapes : la définition de la mission et celle de la charge utile. Au niveau national, LISA France a évolué en une entité fournissant un accompagnement principalement scientifique à une collaboration gérée par le CNES qui coordonne la contribution technique des différents laboratoires à LISA, et soutient, avec d'autres instituts du CNRS et CEA, la contribution scientifique.

2.3. Gravitation dans le système solaire

Le système solaire reste un de nos meilleurs laboratoires pour des tests fins de gravitation, notamment à travers des mesures fines spatio-temporelles, autour de la Terre, à la Lune, et jusqu'aux planètes les plus lointaines de notre système solaire. C'est un travail de long haleine, utilisant des décennies et même des siècles de données dont une bonne partie est issue d'observations et de missions dont les objectifs principaux ne sont pas liés à la physique fondamentale, e.g. données de navigation des missions planétaires.

2.3.1. Ephémérides planétaires (INPOP)

Depuis 2014, les éphémérides planétaires INPOP ont évolué dans 3 directions: i) le développement d'un modèle Terre-Lune à la pointe de la précision mondiale permettant des exploitations scientifiques dans le domaine de la planétologie et de la physique fondamentale ii) l'analyse et la préparation des expériences de radio-science dans le cadre des missions Cassini, Juno, Bepi-Colombo et JUICE avec pour but l'amélioration

des éphémérides planétaires. iii) l'amélioration permanente des éphémérides INPOP et leur utilisation scientifique, comme les tests des théories alternatives de gravité. Entre 2014 et 2018, deux versions d'INPOP (INPOP13c en 2015 et INPOP17a en 2018) ont été mises à disposition des utilisateurs via le site www.imcce.fr/inpop.

Entre 2014 à 2019 les nouvelles modèles du système Terre-lune ont permis à INPOP17a d'atteindre une précision centimétrique ainsi que des nouvelles contraintes sur le test du principe d'équivalence fort. Au cours de ce travail, nous avons montré que 40% de l'incertitude sur le principe d'équivalence venait du modèle de structure interne de la Lune. L'analyse des données LLR et la construction d'un modèle Terre-Lune permet des avancées majeures pour notre connaissance de la structure interne de la Lune et pour les tests de physique fondamentale.

Les éphémérides planétaires sont contraintes à 70% par les données de positions des systèmes planétaires et des planètes obtenues par les expériences de radio-science ou par les données de navigation. Ces dernières années une collaboration forte a été mise en place avec l'équipe PI des expériences de radio-science sur Cassini, Juno, Bepi-Colombo (MORE) et JUICE (3GM), aboutissant à une ré-analyse complète des données de radio-science de la sonde Cassini. Cette collaboration utilise aussi les données de radio-science de la mission JUNO pour améliorer les éphémérides planétaires et permettre de nouveaux tests de la relativité générale comme l'estimation de la masse du graviton.

L'utilisation des données Gaia d'observations des astéroïdes de la ceinture principale (DR2) dans INPOP est en cours de finalisation. Ce travail, intègre les orbites de près de 14000 objets dans INPOP et l'ajustement de leurs orbites aux observations GAIA. Sur les aspects tests de la relativité générale avec INPOP, des travaux récents ont permis d'identifier différentes classes de théories alternatives de la gravité à tester avec INPOP, comme des théories de graviton massifs ou de champ scalaire (dilaton). En ce qui concerne des tests plus « classiques » INPOP a fourni les meilleures contraintes sur des paramètres post-Newtoniens, l'aplatissement du soleil et le taux de perte de masse gravitationnelle du soleil.

2.3.2. Laser lune et satellite

La station de télémétrie laser de Grasse traque aussi bien des satellites artificiels équipés de coins de cube que les différents réflecteurs posés sur la surface lunaire, (télémétrie laser vers la Lune (LLR)). Historiquement, la station tirait dans le vert à 532 nm car les détecteurs étaient performants dans cette gamme. Grâce à l'installation d'un détecteur supplémentaire dans l'infrarouge (1064 nm) récemment, la station est maintenant capable de détecter à la fois dans le vert et l'infrarouge (IR). Dans l'IR, le nombre de photons détectés en retour est beaucoup plus favorable avec un bien meilleur rapport signal sur bruit. Par ailleurs, cette longueur d'onde permet d'étendre la capacité d'observation de la station aux périodes de nouvelle et pleine lune, difficilement accessible dans le vert, et permet donc de densifier les observations.

La conséquence pour l'utilisation de la Lune à des fins de physique fondamentale est immédiate, en particulier lorsque l'on considère un test du principe d'équivalence fort qui nécessite une couverture optimale de l'ensemble de l'orbite de la Lune. Ainsi, les éphémérides lunaires INPOP ont permis, grâce à l'ensemble des données LLR, d'obtenir les meilleures contraintes actuelles sur ce test. INPOP a également été utilisé pour étudier une possible variation temporelle de la constante universelle de la gravitation et d'en obtenir les meilleures contraintes. Enfin, des tests de la violation de l'invariance de Lorentz ont été conduits jusqu'à l'état de l'art, via l'utilisation de la phénoménologie SME dans deux de ses secteurs : celui de la gravité et celui du couplage gravité-matière.

Plus généralement le laser satellite est un support nécessaire à des tests en physique fondamentale, par exemple le test récent du décalage gravitationnel grâce aux deux satellites Galileo 5 et 6 (voir plus haut); deux campagnes d'observation spécifique, par télémétrie laser sur ces satellites, ont été menées afin de permettre une bonne estimation des effets systématiques sur l'incertitude orbitale des deux Galileo.

2.3.3. Gravity Advanced Package (GAP)

La recommandation du groupe de physique fondamentale lors du SPS de 2014 était de favoriser l'emport, sur des missions d'opportunité vers les planètes lointaines, d'un accéléromètre de précision 10^{-11} m/s² afin de tester la relativité générale dans le système solaire. Cet instrument a été proposé dans les missions planétaires vers Uranus (Uranus Pathfinder pour M4) et dans la proposition ISLAND (mission dédiée) pour l'appel à idée ESA de 2016. Plusieurs leçons peuvent être tirées de ces tentatives :

- Nécessité de faire apparaître un objectif planétaire de l'emport de l'instrument, au-delà de ces objectifs de physique fondamentale pour faire accepter l'instrument par la communauté planétaire, du fait de la pression pour de telles missions ;
- Les contraintes imposées à la sonde pour exploiter la précision de l'instrument semblent rédhibitoires pour ces missions (il est à noter que sur la mission JUICE, le besoin d'un accéléromètre est apparu a posteriori pour mesurer les ballottements d'ergols qui perturbent la mesure de Radio-Science pour la gravité de Ganymède).
- Importance de continuer à travailler sur l'exploitation des données de navigation des missions précédentes, en montrant les limites des solutions ne reposant que sur des modèles pour supprimer les effets non gravitationnels (cf paragraphe sur INPOP).

2.4. Maturation technologique

Il n'est pas possible de lister ici l'ensemble des avancées technologiques qui ont été faites depuis 2014, ou même d'en détailler certaines. Cependant il est important de souligner certains progrès spécifiques à la physique fondamentale qui seront cruciaux pour les missions à venir.

Le contrôle inertiel des satellites a franchi un palier avec les missions MICROSCOPE et LISA Pathfinder (voir ci-dessus). Cela est une base essentielle pour des futures missions, en premier lieu des futurs tests du PE et, bien sûr, LISA.

Les horloges atomiques, en particulier horloges optiques, atteignent maintenant des incertitudes sub- 10^{-18} en fréquence relative et deviennent de plus en plus fiables. Leur utilisation, hors du labo et dans l'espace, nécessitera de nouveaux types de liens pour les comparer entre elles ou aux horloges au sol, basés sur des liens laser cohérents, technologie semblable à celle de LISA. Plusieurs actions sont en cours pour développer ce type de lien optique.

Les senseurs inertiels basés sur l'interférométrie atomique sont très prometteurs pour des futures missions en physique fondamentale (tests du PE) et en observation de la Terre (mesures du champ de gravité terrestre). Des améliorations considérables ont vu le jour depuis 2014, notamment en ce qui concerne les sources lasers et les sources atomiques. L'expérience ICE (Interférométrie atomique à sources Cohérentes pour l'Espace) développée avec le fort soutien du CNES, a abouti entre autres au premier test du PE en microgravité (vol parabolique) en interférométrie atomique, publié dans Nature Communications en 2016.

3. Recommandations du groupe

3.1. L'univers gravitationnel

LISA observera les sources d'ondes gravitationnelles émettant entre 0,02 mHz et 1 Hz telles que des binaires de trous noirs supermassifs, des binaires galactiques, des binaires à rapport de masses extrême, des binaires de trous noirs de masse stellaires (détectés également par les interféromètres sol), et des fonds stochastiques d'ondes gravitationnelles, qui peuvent être dus en partie à des potentielles sources opérantes dans l'Univers primordial.

Les domaines scientifiques couverts par LISA sont nombreux en astrophysique, cosmologie et physique fondamentale (ils sont détaillés dans le « Science Requirements Document » https://dms.cosmos.esa.int/COSMOS/doc_fetch.php?id=3752747). Les sources garanties sont les binaires galactiques, les sources attendues avec le signal sur bruit le plus élevé sont les collisions de trous noirs (TN) supermassifs de masse 10^5 à $10^7 M_{\text{sol}}$, situés au centre des galaxies, les sources plus spéculatives des TN de masse intermédiaire ($10^3 M_{\text{sol}}$), avec toujours la possibilité de découvrir des sources inconnues à l'heure actuelle.

L'environnement et la dynamique des centres des galaxies du même type que la voie lactée, sera explorée par le spiralement et la fusion d'objets compacts dans le champ gravitationnel des trous noirs supermassifs. Cela permettra aussi des tests poussés de la théorie de la gravitation. Nombreuses sont les observables que LISA fournira sur cet objectif : la phase de ring-down après la coalescence sera accessible dans le cas des signaux de collision de trous noirs; LISA permettra de tester l'existence de modes de propagation scalaire et vectoriel, ainsi que la relation de dispersion des ondes gravitationnelles, la masse du graviton, des violations de l'invariance de Lorentz ; il sera possible de sonder la présence de champs scalaires massifs (candidats pour la matière noire) en accréation autour des trous noirs supermassifs. Les binaires de trous noirs de quelque dizaine de masses solaires, dont les interféromètres terrestres observent la fusion, pourront être détectées par LISA quelques semaines à des dizaines d'années à l'avance, pendant leur phase spirale. Ces observations multi-bandes d'ondes gravitationnelles pourront fournir des informations importantes sur l'origine de ces trous noirs, et tester des modifications de la gravité comme par exemple une variation temporelle de la « constante » gravitationnelle, G . LISA aura également deux retombées cruciales en cosmologie. D'une part, elle pourra tester l'expansion de l'univers, en mesurant le paramètre de Hubble et les paramètres cosmologiques, à redshift inférieur à 5-7, d'autre part, LISA pourra contraindre ou détecter le fond stochastique d'origine primordiale, qui contient des informations fondamentales sur l'état de l'univers à des énergies supérieures à 100 GeV. Ceci permet de tester la théorie physique qui décrit l'univers à haute énergie au-delà du modèle standard, fournissant des contraintes à la physique fondamentale complémentaires à celles provenant des accélérateurs de particules. Un grand nombre de ces résultats profiteront des observations multi messenger et en particulier des follow-up électromagnétiques par les grands télescopes futurs (SKA, LSST, ELT, ATHENA, SKA, EUCLID, ...).

La communauté française est fortement impliquée dans LISA. Avec 168 membres (dont 108 « full » membres) dans le LISA consortium elle fournit le deuxième contingent en taille, avec des responsabilités à tous les niveaux. La France est en charge du DDPC (Distributed Data Processing Center) et de l'AIVT (Assembly Integration Validation and Tests) de la partie mobile de l'instrument et une participation conséquente aux activités de gestion des performances et de simulation.

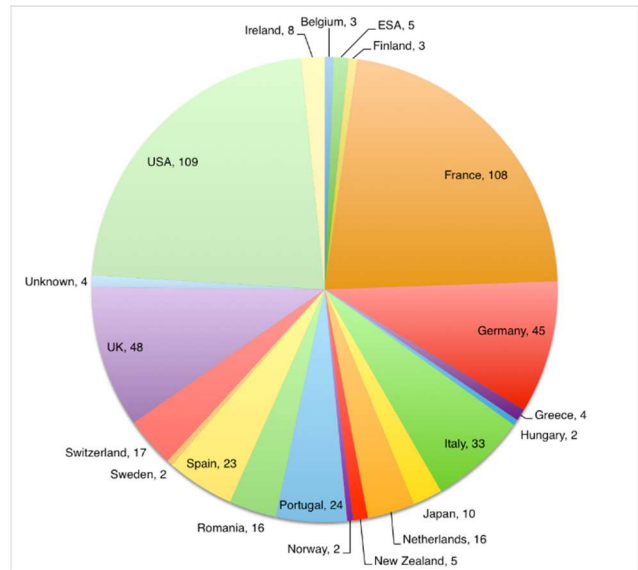


Fig. 5 : « Full members » du LISA consortium par pays (Jan. 2019).

LISA sera sans doute la mission principale de l'ESA dans le domaine de la physique fondamentale, et bien au-delà, des prochaines décennies. L'investissement dans cette mission doit être à la hauteur de ces engagements et responsabilités, et de la science que LISA fournira.

3.2. Le principe d'équivalence

Le principe d'équivalence d'Einstein est à la base des théories dites *métriques* de la gravitation, qui incluent la relativité générale. La distinction entre les théories métriques d'une part, qui décrivent la gravitation comme un phénomène géométrique, et celles qui ne le sont pas, et qui donc violent le principe d'équivalence, est fondamentale. Le formalisme des théories métriques de la gravitation est très différent de celui des autres interactions fondamentales connues (interaction électro-faible et forte), qui sont décrites par la théorie quantique des champs dans laquelle les champs se propagent dans un espace-temps de Minkowski fixé. En conséquence il est très difficile de réconcilier la théorie actuelle de la gravitation, avec tous ses succès à l'échelle macroscopique dont l'un des plus importants est la confirmation récente des propriétés des ondes gravitationnelles, avec la théorie quantique des champs qui conduit au modèle standard de la physique des particules, lui aussi extrêmement bien vérifié par les mesures effectuées au LHC et la découverte du boson de Brout-Englert-Higgs.

A côté du problème de l'unification des interactions fondamentales, une autre motivation importante concerne la cosmologie, car les modèles alternatifs pour l'énergie noire, qui tentent de résoudre un problème grave d'ajustement fin à la valeur observationnelle très petite de la constante cosmologique, sont basés sur des champs scalaires de longue portée, qui lorsqu'ils sont considérés dans le contexte de la physique des particules,

se couplent d'une manière non-universelle aux autres champs du modèle standard et donc violent le principe d'équivalence. Mentionnons aussi le problème de la matière noire, pour lesquels certains modèles sont aussi basés sur des champs scalaires avec les mêmes propriétés.

La conclusion est qu'il est essentiel de continuer à tester le principe d'équivalence jusqu'à des niveaux très fins et dans tous les domaines, car c'est l'une des clés d'accès possible à des scénarii d'unification des interactions fondamentales, et aux grands problèmes de la cosmologie comme l'énergie ou la matière noire.

La mission MICROSCOPE a permis de démontrer la capacité des équipes françaises à réaliser les différentes briques nécessaires à de futures missions, et aussi d'évaluer les efforts à mener pour une mission plus ambitieuse. Deux missions sont proposées par la communauté scientifique pour atteindre un test de l'EP à 10^{-17} ou mieux: MICROSCOPE 2 et STE-QUEST. MICROSCOPE 2 est la suite logique de MICROSCOPE, en utilisant le retour d'expérience afin d'améliorer l'instrument et le satellite pour gagner deux ordres de grandeurs (test EP à 10^{-17}). Une phase 0 instruite au CNES devrait permettre de mieux préciser cette proposition en profitant pleinement du retour sur expérience Microscope des équipes du CNES et de l'ONERA. La mission STE-QUEST, proposée dans le cadre des AO M3 et M4 de l'ESA, avait pour objectif un test du PE à $2 \cdot 10^{-15}$. Depuis plusieurs évolution théoriques (méthode d'annulation de l'effet de gradient de gravité) et expérimentaux (démonstrations en vol parabolique, tour 0-g de Bremen, et fusée sonde) ainsi que des études mission et techno (e.g. phases-0 GRICE et CARIOQA) ont permis de conforter la technologie et de pousser vers des niveaux de 10^{-17} à 10^{-18} . De plus, les retours d'expérience des missions MICROSCOPE et LISA PathFinder démontrent la capacité de contrôle inertiel et thermique de la plateforme.

3.3. Gravitation dans le système solaire

La mesure précise du champ métrique créé par le Soleil et les planètes est un enjeu crucial pour la physique fondamentale et les domaines reliés. Elle permet la trajectographie très précise des satellites, une meilleure réalisation des systèmes de référence, et l'amélioration des éphémérides planétaires dans le Système solaire. La connaissance du champ de gravitation à grande distance du Soleil est également intimement liée aux modèles de formation du Système solaire.

Au niveau des orbites des objets du système solaire, dans le cadre de la mission Bepi-Colombo, une nouvelle approche a été proposée pour l'analyse et la conduite de tests de la relativité générale. En effet, après un scénario de test basé sur un ajustement limité au couple Terre-Mercure, le nouveau scénario de traitement est basé sur l'ajustement complet des orbites des planètes du système solaire via INPOP avec l'ensemble des données disponibles incluant les données Bepi-Colombo. Cette approche garantit une meilleure prise en compte des effets systématiques et une meilleure cohérence des tests prévus et d'étendre le nombre de théories alternatives testées. Dans les années qui viennent, les tests de théories alternatives dans les éphémérides planétaires se poursuivront. Les données Gaia DR3 et DR4 pour les astéroïdes seront incluses dans INPOP suivant les algorithmes développés pour le DR2. Des déterminations de masse seront effectuées et des tests de raccordements à l'ICRF seront effectués.

Au niveau de l'orbitographie des sondes elles-mêmes, l'objectif d'emport d'un accéléromètre de type GAP sur des missions lointaines, reste important pour des projets futurs d'exploration des planètes géantes glacées, par exemple dans le cadre d'une mission s. Une solution séduisante consisterait à placer un instrument scientifique dédié dans une contribution instrumentale française en cours de discussion pour cette mission. La démonstration du principe de l'accéléromètre à biais compensé et de ses performances a été faite en laboratoire. L'ajout d'un tel accéléromètre sur une mission lointaine 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 dynamique de la sonde et de la planète survolée notamment en vue des éphémérides planétaires ;
- En phase interplanétaire, d'obtenir pour la première fois une caractérisation précise de la dépendance en distance de la loi de la gravitation.

Ces mesures sont complémentaires des mesures de planétologie en phase orbitale, avec une meilleure connaissance de la structure interne de la planète obtenue à partir de son champ de gravité. Le champ de gravitation créé par le Soleil au niveau d'Uranus ou de Neptune pourrait être caractérisé avec une précision relative d'environ 10^{-5} . L'accélération typique de la Galaxie au voisinage du système solaire est de l'ordre de 10^{-10} m/s², ce qui est du même ordre de grandeur que l'accélération MOND et un facteur plus de 10 plus petit que la connaissance actuelle, mais environ 10 fois plus grand que la précision de mesure de l'accéléromètre GAP.

3.4. Opportunités transverses

3.4.1. Cosmologie

La détection directe des ondes gravitationnelles renforce l'intérêt pour la recherche des modes de polarisation dans le fond cosmologique spécifiquement produits par les ondes gravitationnelles primordiales, les modes B aux grandes échelles. La présence d'un fond d'ondes gravitationnelles est une prédiction générique des scénarios d'inflation. La détection des modes B dans le fond cosmologique est donc un enjeu essentiel pour notre compréhension de la physique de l'univers primordial et donc de la physique aux très hautes énergies inaccessibles au laboratoire par les expériences directes. Les diverses théories d'inflation compatibles avec les données actuelles prévoient une grande plage de valeurs possibles pour l'amplitude de ces modes B. Leur détection nécessite un très bon contrôle des amplitudes des signaux des avant plans (principalement les poussières polarisées de notre galaxie), principales limites des expériences actuelles. Le signal des modes B du fond primordial étant attendu principalement aux grande échelles angulaires il est nécessaire de disposer de la couverture angulaire la plus grande possible, d'où l'intérêt des expériences spatiales. De plus la soustraction optimale des avant plans nécessite une couverture en fréquences inaccessibles depuis le sol. Une expérience comme LITEBIRD a été conçue et optimisée pour cet objectif. Sa sensibilité lui permettra de détecter le signal attendu dans un grand nombre de théories (même si certaines théories prévoient un signal extrêmement faible, qui pourrait rester inaccessible à jamais).

3.4.2. Terre Solide

L'interface entre Physique Fondamentale et Terre Solide s'articule autour de certaines problématiques (détermination du champ gravitationnel) et technologies communes. Par exemple, le développement des accéléromètres et gradiomètres (électrostatiques aussi bien que atomiques) ainsi que les liens optiques, trouvent des applications en étude du champ gravitationnel de la Terre (GRACE, GOCE, GRACE-FO, GRICE, CARIOQA) et de physique fondamentale (Microscope, LISA Pathfinder, ICE, LISA, STE-QUEST). Dans ce contexte un démonstrateur technologique d'accéléromètre atomique, à vocation d'application dans les deux domaines, est une piste intéressante vers l'amélioration du TRL de cette technologie prometteuse. D'une manière moins directe, les horloges optiques de haute performance commencent à être utilisées en géodésie chronométrique (détermination du potentiel au niveau centimétrique via le redshift relativiste), ce qui nécessite le développement des horloges bien sûr, mais aussi des liens optiques en espace libre pour les comparer, lien du type déjà mis en œuvre sur GRACE-FO et prévus pour LISA. Ce type de lien peut être utile aussi dans le contexte des liens inter-satellite Galileo. Au niveau infrastructures sol, les deux domaines partagent l'usage intensif des stations laser satellite et laser lune. Une pérennisation des activités des stations françaises et en particulier de la station Méo est fondamentale pour notre communauté et doit se faire en coordination avec celle de Terre Solide.

3.4.3. Navigation

Comme démontré avec le test du redshift utilisant Galileo 5 et 6 il y a des nombreuses opportunités à l'interface entre Navigation et Physique Fondamentale : L'ESA étudie la possibilité d'embarquer des instruments qui auront un intérêt pour la communauté scientifique, parmi lesquelles : horloges de haute performance, unités de mesure de la radiation, accéléromètres, émetteurs VLBI, retro-rélecteurs laser passifs et actifs, récepteurs GNSS, liens inter-satellites. De plus, l'ESA étudie la possibilité d'avoir des stations laser au sol dédiées à l'observation des satellites Galileo, afin d'inclure les données laser dans la détermination d'orbite. Toutes ces évolutions peuvent présenter des opportunités en physique fondamentale, dans le sillage de ce qui a été fait avec Galileo 5 et 6. Par ailleurs, Galileoscope est une proposition de mission scientifique dédiée, basée sur le GNSS avec un coût de mission réduit grâce à la réutilisation de la plate-forme et/ou des instruments Galileo existants, d'instruments supplémentaires et d'une orbite spécifique. On peut imaginer, par exemple, une horloge de haute performance, e.g. horloge optique, sur une orbite excentrique pour améliorer encore le test du redshift gravitationnel.

3.5. Synthèse des recommandations

Le groupe physique fondamentale a établi ses priorités scientifiques :

1. Un investissement très conséquent du CNES dans la mission LISA, avec une forte implication française (AIVT de l'instrument+ DDPC+ perfos et simulation). Un soutien du CNES aux laboratoires qui préparent l'exploitation scientifique, y compris pour les aspects multi-messagers, est également indispensable pour assurer d'un retour scientifique à la hauteur de l'investissement.
2. Une mission de test de l'universalité de la chute libre (PE) dans le sillage de MICROSCOPE, à un niveau de 10^{-17} ou mieux. Soit à base d'atomes froids (STE-QUEST) dans le cadre d'un prochain appel M de l'ESA, soit avec une version évoluée de la technologie Microscope dans un cadre programmatique qui reste à définir.
3. Inclure un accéléromètre avec une incertitude de l'ordre de 10^{-10} à 10^{-11} m/s² comme instrument sur les prochaines missions planétaires, en particulier vers les géantes glacées. Il s'agit là de l'incertitude de l'instrument, l'incertitude finale en termes de navigation sera le résultat d'un compromis entre les impératifs du satellite et les performances de l'instrument.

| Type de mesure/d'observables | Cadre de réalisation | R&T associée | Thème scientifique |
|---|---|---|--|
| Observation d'ondes gravitationnelles entre 10^{-5} et 1 Hz | L3 (ESA) | Interférométrie à 10 pm/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Moyens de test et intégration. | Les ondes gravitationnelles basse fréquence pour l'étude de la gravitation en champ fort, l'astrophysique, et la cosmologie. |
| Test du principe d'équivalence | M (ESA) ou autre (F, bilatérale) | Interférométrie atomique, accéléromètres électrostatiques | Recherche de nouvelles interactions ou champs liés à l'unification et ou l'énergie/matière noire |
| Mesure du champ de gravitation dans le système solaire lointain | Instrument sur mission ESA ou Opportunité | Accéléromètre électrostatiques et son accommodation sur satellite | Test de gravitation dans le système solaire lointain. Détermination du champ gravitationnel en phase de croisière et en phase de survol ou orbitale. |

De plus le groupe recommande :

- Une phase 0 sur MICROSCOPE2 avec REX MICROSCOPE, pour en étudier la faisabilité et le cadre programmatique le mieux adapté (M, F, bilatérale, ...).
- Une participation à LITEBIRD, porté par le groupe A&A, pour l'étude de la polarisation du CMB et notamment pour la détection des modes B, d'une grande importance pour la cosmologie et la physique fondamentale.
- De continuer les efforts en R&D dans le domaine de l'interférométrie atomique et des liens optiques en espace libre, pour des futures applications en physique fondamentale (e.g. STE-QUEST), mais aussi en observation de la Terre (e.g. phase 0 GRICE ou CARIOQA), en passant par un démonstrateur technologique si nécessaire.
- De soutenir l'exploitation des stations laser au sol, dont les données long terme et pérennes sont essentielles pour les tests de physique fondamentale, les systèmes de référence et les éphémérides lunaires et planétaires.
- De soutenir l'exploitation de données spatiales venant d'autres domaines (e.g. GNSS – Galileo, instruments radioscience des sondes planétaires) pour des tests de physique fondamentale et la construction d'éphémérides planétaires, lunaires et satellitaires.