

Séminaire de Prospective 2009 du CNES

Contribution du groupe " Physique Fondamentale "

1) Introduction

La compréhension du cadre spatio-temporel dans lequel nous vivons est depuis longtemps l'une des préoccupations fondamentales des physiciens autour de laquelle se retrouvent, à côté de la communauté de physique fondamentale, les communautés voisines qui interviennent dans le domaine des sciences de l'Univers et dans celui de l'observation de la Terre. Les progrès dans ce domaine constituent aujourd'hui un enjeu majeur de la physique fondamentale, puisqu'ils fournissent un des moyens d'accès à la « nouvelle physique » qui résulterait de l'unification des lois de la physique, en particulier entre ces deux grands piliers que sont la relativité générale d'un côté, la théorie quantique des champs de l'autre.

L'observation des phénomènes qui se déroulent dans l'espace a été une des principales sources d'inspiration lors de la naissance de la physique classique, comme lors de la révolution relativiste du 20^{ième} siècle. Elle soulève aujourd'hui des questionnements nouveaux à l'interface entre physique fondamentale, astrophysique et cosmologie. Les observations aux grandes échelles galactiques ou cosmiques montrent de manière concordante que l'univers a une densité proche de la densité critique et est constituée pour environ deux tiers d'« énergie noire » et un petit tiers de « matière noire ». Malgré des efforts considérables, on ne sait toujours pas quelle est la nature physique de ces deux composantes qui constituent 96% de l'univers ! Des progrès dans ce domaine amèneront nécessairement des remises en cause profondes des représentations fondamentales du monde dans lequel nous vivons.

Les progrès dans l'expérimentation spatiale permettent aujourd'hui d'aller au-delà d'un simple rôle d'observateur. En quelques décennies, l'espace est devenu un nouveau laboratoire, présentant des propriétés exceptionnelles pour les physiciens parce que c'est une arène libérée des contraintes liées à l'environnement terrestre. Ce laboratoire, avec les technologies associées, ouvre la voie à de nouvelles découvertes, grâce à des mesures directes, et des précisions améliorées ou à l'exploration de nouveaux territoires.

Bien que la théorie de la relativité générale ait passé avec succès de nombreux tests expérimentaux, on sait que son unification avec les autres interactions conduira à des conséquences observables, sous la forme par exemple d'une violation du principe d'équivalence, d'une « variation des constantes fondamentales » ou d'une nouvelle force se superposant aux quatre interactions fondamentales déjà connues. La découverte d'un de ces effets serait un événement considérable ouvrant une « fenêtre » qui pourrait donner un accès à la nouvelle physique attendue « au-delà du modèle standard ».

Ces points sont clairement mis en évidence par deux missions spatiales, initiées par des équipes françaises, soutenues par le CNES depuis des années dans le cadre de collaborations européennes. Le projet MICROSCOPE (Micro Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence) utilisera des accéléromètres ultrasensibles dans l'espace pour gagner un facteur 1000 sur la précision du test du principe d'universalité de la chute libre des corps, indépendamment de leur composition. A ce niveau extrême de sensibilité pourront apparaître des violations du principe d'équivalence. Le projet ACES (Atomic Clocks Ensemble in Space) emportera dans l'espace des horloges à atomes froids, aujourd'hui les meilleures horloges sur Terre, ce qui ouvrira la voie à des performances nettement améliorées grâce à l'environnement de microgravité. Il conduira à la réalisation de tests avec une précision améliorée et lui aussi un potentiel de découverte majeure pour la physique fondamentale.

Le projet international LISA (Laser Interferometric Space Antenna), présélectionné par l'ESA et la NASA, présente également un intérêt scientifique indiscutable. Constitué d'un grand interféromètre optique avec des bras de 5 millions de kilomètres en orbite autour du Soleil, il permettra de détecter le rayonnement gravitationnel à des fréquences de l'ordre du milliHertz

pour lesquelles on connaît de nombreuses sources potentielles. Il ouvrira une nouvelle fenêtre d'observation astrophysique, qui accroîtra en particulier considérablement nos connaissances sur les trous noirs. Il permettra aussi de détecter les fonds stochastiques d'ondes gravitationnelles qui constituent une source d'information unique sur la cosmologie primordiale.

Au delà de ces projets, la physique fondamentale propose de nouveaux instruments ayant des performances nettement améliorées par rapport à celles d'aujourd'hui et ouvrant la voie à de nouvelles applications. La télémétrie laser, avec T2L2 (Transfert de Temps par Lien Laser) maintenant embarqué sur Jason 2 avec le soutien du CNES, permet d'obtenir des précisions remarquables dans les mesures de distance avec les satellites. Elle peut en principe être étendue avec une excellente précision à des objets naviguant dans le système solaire. Les horloges optiques, les senseurs inertiels à atomes froids, qui utilisent et développent les technologies quantiques dont PHARAO (horloge atomique dans ACES) est un précurseur, conduiront à la mise au point de nouveaux instruments, ayant des sensibilités remarquables en particulier sur le très long terme. Outre leur intérêt évident pour les tests de physique fondamentale et l'étude de la gravitation, ces performances améliorées se traduiront également en un bénéfice immédiat pour les applications géodésiques ou spatiales.

La métrologie du champ de gravité de la Terre offre un accès privilégié aux sources de ce champ et, donc, aux variations spatio-temporelles de masse volumique dans chacune des parties de la planète. Le champ de gravité conditionne aussi les mouvements de fluide à sa surface, par exemple la circulation océanique par rapport au géoïde. L'étude de ce champ est le but premier de la géodésie spatiale avec les missions en cours CHAMP (Challenging Mini-satellite Payload), GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) et GOCE (Gravity and Ocean Circulation Explorer), dont les accéléromètres de l'ONERA constituent le cœur instrumental. Elle est directement liée à l'altimétrie avec l'unification des systèmes d'altitude, et plus généralement aux sciences de la Terre solide, liquide et gazeuse. Les applications spatiales concernent la trajectographie très précise de certains satellites pour la constitution de systèmes de référence (l'altimétrie des océans en tire à nouveau un bénéfice direct), la localisation précise d'objets dans le système solaire (la mesure du système Terre-Lune en est un exemple spectaculaire au niveau de la précision) et donc l'amélioration de sa connaissance, le suivi télémétrique, le contrôle et la commande de missions de planétologie.

De manière générale, tout instrument permettant des gains dans la sensibilité de mesures cruciales a une importance pour la physique fondamentale aussi bien que pour les applications. Cette recherche est simultanément un moteur pour le développement d'une instrumentation de pointe avec des retombées en métrologie, intéressant dans le domaine de la physique fondamentale aussi bien que pour d'autres applications. A titre d'exemple, il est clair que la disponibilité de très bonnes horloges dans l'espace dessine une perspective à long terme où l'échelle de temps international sera construite dans l'espace et disséminée de manière précise et rapide à la surface de la Terre. Ceci permettra de dépasser les limites liées à l'environnement terrestre, qui sont déjà perceptibles aujourd'hui et d'imaginer des techniques de positionnement global ayant une résolution nettement meilleure que dans les systèmes GNSS (GPS et GALILEO), qui constituent des exemples éclatants d'application inattendue des ressources de la physique quantique aussi bien que de la relativité. Les nouvelles idées ou les nouveaux instruments discutés dans ce texte peuvent en particulier trouver des applications dans le nouveau programme « GNSS Evolution » que l'ESA vient de décider d'adosser au programme GALILEO.

2) Objectifs scientifiques

Ce chapitre décrit les objectifs scientifiques retenus par le groupe « Physique Fondamentale ».

Tests du principe d'équivalence

Le principe d'équivalence est le principe de base des théories géométriques de la gravitation. Il est testé avec un haut degré de précision par plusieurs méthodes mais il est violé (faiblement) dans tous les schémas théoriques de grande unification. Ceux-ci, qui généralisent le modèle

standard, contiennent de nouvelles interactions, en plus des quatre déjà connues : par exemple, l'existence de nouvelles particules (dilaton, axion...) est suggérée par certains modèles issus de la théorie des cordes et des considérations cosmologiques. Quelque soit leur origine, elles se manifestent à des portées qui dépendent de la valeur de leurs masses, et ont des effets en physique des particules (courte portée) ou dans des tests de gravitation (courte ou longue portée), pour lesquelles elles peuvent être mises en évidence comme une violation du principe d'équivalence.

Les expériences actuelles testent l'universalité de la chute libre pour des corps ayant des compositions différentes jusqu'à des niveaux de précision meilleurs que 10^{-12} en relatif. Ce niveau de précision atteindra 10^{-15} avec l'expérience MICROSCOPE. Son résultat scientifique sera donc considérable avec une amélioration de 3 ordres de grandeur sur ce test crucial, conduisant soit à la découverte de nouvelles interactions, soit (et c'est également intéressant) à la définition de contraintes plus sévères pour les modèles d'unification. Outre ces objectifs scientifiques rappelés brièvement ici, la mission permettra de qualifier les technologies critiques pour la réalisation des satellites à compensation de traînée qui sont indispensables pour la plupart des projets discutés dans ce rapport.

La prospective « post-Microscope » dépend du résultat de Microscope. En cas de détection d'une violation, la priorité serait de varier les conditions expérimentales pour obtenir le maximum d'informations utiles. En cas de confirmation du principe d'équivalence, la logique serait plutôt de viser une précision instrumentale encore améliorée.

Interactions et constantes fondamentales

Les tests d'horloges sont un autre moyen de vérifier la nature géométrique de la gravitation. En effet, celle-ci implique que des horloges atomiques fonctionnant sur des transitions quantiques différentes indiquent bien le même temps, qui est simplement la longueur métrique le long de la trajectoire de l'horloge.

Le projet ACES constitue une étape essentielle d'un programme à long terme qui a un intérêt considérable en physique fondamentale (horloges atomiques de très haute précision dans l'espace, tests de l'espace-temps relativiste, contraintes sur une dérive éventuelle des constantes fondamentales) et en métrologie (réalisation du temps affranchie des perturbations terrestres, comparaison globale des meilleures horloges existant sur Terre, contribution à une meilleure réalisation du Temps Atomique International). A terme, il ouvre la perspective d'une « géodésie relativiste » donnant accès à de nouvelles observables, ainsi que d'une contribution à l'amélioration des performances globales des systèmes GNSS, et d'une évolution future de ces systèmes.

Au moment de son vol, ACES sera le meilleur outil disponible pour les tests de relativité générale dans l'espace. La « mise en réseau » qu'il permettra entre toutes les horloges optiques au sol sera une condition indispensable pour l'utilisation scientifique optimale de ces horloges. L'intérêt scientifique de la mission est ainsi renforcé par la disponibilité prévisible dans les laboratoires d'horloges atomiques de grande exactitude et de principes de fonctionnement très divers, qui permettront de disposer d'un large spectre de tests de « variation des constantes fondamentales ». Cette idée inclut les horloges moléculaires ou pourquoi pas nucléaires qui seront développées dans l'avenir et qui permettront de varier la contribution des diverses constantes fondamentales de la physique quantique, au-delà de la seule constante de structure fine traditionnellement étudiée.

Des horloges ultra stables placées dans des satellites en orbite géostationnaire ou en orbite de type GPS pourraient dans le futur fournir la définition du Temps Atomique International avec une meilleure précision que les horloges au sol actuellement utilisées. A terme, on pourrait dépasser les limites imposées par la connaissance imparfaite des champs de gravité terrestres. Ceci suppose d'une part que les forces de surface agissant sur le satellite soient mesurées ou compensées par des techniques d'accélérométrie, d'autre part que l'on dispose de liens sol/bord au même niveau de précision que les horloges.

Les liens électromagnétiques, qui sont utilisés couramment pour la mesure de distance, le transfert de temps ou de fréquence, le positionnement relativiste (GNSS), mettent en œuvre dans la pratique une des principales révolutions conceptuelles de la relativité Einsteinienne. Ils évoluent aujourd'hui vers des sensibilités améliorées par le passage aux fréquences optiques. Par exemple, la télémétrie Laser-Lune, qui suit la distance entre une station terrestre et les réflecteurs lunaires avec une précision de quelques millimètres, a de nombreuses retombées scientifiques concernant les systèmes de référence, la physique lunaire aussi bien que les tests des théories de la gravitation.

La télémétrie laser est aussi mise en œuvre dans l'expérience T2L2 qui en démontre l'intérêt sur le satellite altimétrique Jason 2 (malgré les limitations liées à l'horloge embarquée). Au-delà de la distance de la Lune, la télémétrie laser fondée sur la mesure du temps aller-retour d'impulsions lumineuses rétro réfléchies n'est plus utilisable mais il est possible d'envisager des mesures entre la Terre et les planètes proches (jusqu'à Jupiter) en travaillant en aller simple, par différence entre les dates de départ au sol et les dates d'arrivée à bord du véhicule spatial. A plus grande distance dans le système solaire, des mesures très précises sont encore possibles avec des lasers modulés en phase plutôt qu'en amplitude.

Loi de la gravitation et Univers sombre

La relativité générale est caractérisée, dans l'ensemble des théories métriques relativistes de la gravitation, par l'équation d'Einstein qui décrit le couplage entre courbure et contenu en masse-énergie-impulsion de l'espace-temps. Cette équation est testée au travers de ses conséquences observées en termes de mouvement des masses ou de propagation des rayons lumineux.

Bien que la théorie de la relativité générale ait passé avec succès de nombreux tests expérimentaux, il existe néanmoins de bonnes raisons de continuer à faire de nouveaux tests avec une précision améliorée : des raisons théoriques d'abord puisque la relativité générale devra un jour être supplantée par une théorie unifiée avec nécessairement des (petites) modifications des phénomènes gravitationnels ; des raisons observationnelles ensuite puisque quelques mesures révèlent des désaccords par rapport à la relativité générale. Le mouvement des sondes Pioneer 10 et 11 suivi par effet Doppler par les antennes de la NASA a montré un écart aux prédictions qui peut être décrit comme une accélération anormale de la sonde de l'ordre du nm/s^2 dirigée vers le Soleil. Les incréments de vitesse lors des rebonds gravitationnels, mesurés également par suivi radio des sondes planétaires, montrent également des écarts significatifs par rapport aux prédictions, de l'ordre du cm/s . Ces effets sont largement au dessus de la résolution expérimentale mais pourraient être dus à des artefacts conduisant à des déviations à la trajectoire géodésique.

La question des tests de la relativité générale s'inscrit dans un contexte théorique dominé par les questions de la matière noire et de l'énergie noire. Celles-ci résultent d'écarts à la théorie observés aux très grandes échelles galactiques et cosmiques qui sont corrigés en introduisant des composantes supplémentaires dans le contenu en énergie-impulsion de l'univers. Comme la relativité générale est utilisée pour interpréter les observations galactiques et cosmiques, il est extrêmement important de la tester aux plus grandes distances possibles. Les mesures effectuées par les sondes Pioneer sont justement les expériences de plus grande échelle jamais dédiées au test de la loi de gravité. Et leur résultat est pour le moment une déviation entre les observations et les prédictions !

Dans ces conditions, il est de la plus grande importance de poursuivre les tests. Ceci peut se faire par une amélioration des méthodes désormais classiques de mesures des paramètres γ et β dans les extensions post-newtoniennes de la relativité générale. Il est nécessaire de continuer à interpréter en ce sens les observations réalisées sur le suivi des sondes planétaires ou les mesures d'astrométrie (en particulier dans le cadre de GAIA...). On doit aussi considérer la possibilité de missions dédiées au test de la loi de gravitation, ou d'instruments conçus à cette fin pour être embarqués sur des missions planétaires.

Il est également très important de mieux intégrer la question de la validité de la relativité générale aux programmes d'observation qui visent à caractériser les propriétés de la matière

noire et de l'énergie noire. C'est particulièrement vrai pour l'étude de l'équation d'état de l'énergie noire, qui doit permettre de confirmer (ou non) sa possible interprétation comme une constante cosmologique non nulle dans l'équation d'Einstein. C'est aussi le cas pour la comparaison entre les modèles de matière noire et les observations des structures de l'Univers à différentes échelles.

Il est à noter qu'une éventuelle modification des lois de la gravité à grande échelle aurait des conséquences sur les modèles de cosmologie primordiale, de formation des grandes structures ou même de formation du système solaire, selon les échelles impliquées. Ceci est une autre façon d'insister sur l'importance de ces tests, que le résultat en soit « positif » (découverte d'une modification) ou « négatif » (confirmation de la relativité générale).

Détection des ondes gravitationnelles

Une prédiction essentielle de la relativité générale est l'existence des ondes gravitationnelles se propageant comme les ondes électromagnétiques à la vitesse de la lumière. Ce rayonnement a été mis en évidence de manière indirecte par le chronométrage des pulsars binaires, mais aucune expérience n'a encore permis de le détecter directement. L'observation directe du rayonnement gravitationnel est l'objectif des grands interféromètres qui sont maintenant opérationnels, LIGO aux Etats-Unis, VIRGO près de Pise. Le projet spatial LISA vise à la détection des ondes gravitationnelles dans un domaine de fréquences de l'ordre du 0,1-100mHz à comparer au domaine 10Hz-10kHz couvert par les interféromètres terrestres.

A la différence des ondes électromagnétiques, les ondes gravitationnelles interagissent très peu avec la matière. C'est la raison essentielle de la difficulté à observer leurs effets physiques dans notre environnement immédiat. En contrepartie de cette difficulté, les ondes gravitationnelles se propagent sans perturbation sur de grandes distances, ce qui en fait un nouveau messager exceptionnel pour étudier l'univers. Les phénomènes susceptibles d'être observés correspondent aux processus astrophysiques les plus violents, explosions de supernovae, systèmes binaires impliquant des trous noirs, noyaux actifs des galaxies... L'ouverture d'une nouvelle fenêtre sur ces phénomènes conduira à une révolution de notre connaissance de ces objets, ce qui fait de la détection directe des ondes gravitationnelles un des grands défis de la physique actuelle.

Après des années d'efforts, on a accumulé depuis deux décennies des évidences indirectes de trous noirs de toutes masses, depuis quelques dizaines de masses solaires jusqu'à plusieurs milliards. L'intensité du champ gravitationnel à proximité de ces objets est cause d'effets physiques en grand nombre dont la modélisation n'est pas totalement maîtrisée. Les observations optiques à elles seules ne permettent pas une confrontation directe avec la théorie. Les ondes gravitationnelles émises lors des événements associés apporteront par contre des informations directes sur le cœur de ces phénomènes. La relativité générale fournit ainsi à la fois des prédictions d'effets nouveaux et passionnants à étudier sur ces objets et le messager capable de les révéler.

Les trous noirs se trouvent fréquemment dans des systèmes binaires (avec un autre trou noir, une étoile à neutrons, une étoile), ce qui donne lieu à des problèmes orbitaux complexes. La relativité générale permet de construire des modèles de ces systèmes, mais le caractère non linéaire de la théorie en champ fort rend délicates les approches analytiques. De nombreux travaux basés sur des développements « post-newtoniens » sont disponibles pour décrire ces mouvements orbitaux. Il existe maintenant des codes numériques simulant l'évolution orbitale de deux trous noirs en système binaire compact jusqu'à la coalescence. L'observation des ondes émises permettra de vérifier l'ensemble de ces prédictions, et ainsi de tester la relativité générale dans le régime de couplage fort.

Des ondes gravitationnelles sont également émises lors de l'évolution primordiale de l'Univers. On s'attend en particulier à pouvoir observer un fond d'ondes stochastiques dont les propriétés seraient une source unique d'information sur la cosmologie primordiale. Comme précédemment, on peut insister sur le fait que notre compréhension de l'Univers repose essentiellement sur des modèles cosmologiques qui supposent que la relativité générale s'applique aux échelles

cosmiques. La validité de cette hypothèse est donc une question cruciale, en connexion avec l'unification des interactions fondamentales.

L'observation directe des ondes gravitationnelles fournira un nouveau moyen de tester les prédictions de la relativité générale dans des régimes de champ fort, ou des situations de collisions permettant d'étudier divers couplages possibles (spin-orbite, spin-spin) et de pousser la théorie dans ses derniers retranchements. On peut penser également que l'analyse des signaux cosmiques apportera de nouveaux aperçus sur les questions brûlantes de l'astrophysique que sont l'énergie noire et la matière noire.

3) Missions et instruments

Ce chapitre décrit les idées de missions et d'instruments qui sont soutenues après étude par le groupe « Physique Fondamentale ».

Instrument « Gravity Advanced Package » (GAP) sur une mission lointaine

L'objectif de ce projet est de remplir certains des objectifs de la mission ODYSSEY (voir ci-dessous) sans attendre une mission dédiée. La charge utile GAP serait embarquée à bord d'une sonde interplanétaire, précisément celle des deux missions planétaires qui sera sélectionnée par l'ESA dans le cadre de Cosmic Vision, soit la mission EJSM (Europa Jupiter System Mission, ex-LAPLACE) soit la mission TSSM (Titan Saturn System Mission, ex-TANDEM). Lors de leur trajectoire jusqu'à leur destination, ces sondes exploiteront des rebonds gravitationnels et elles exploreront des distances héliocentriques jusqu'à 5 et 9 UA (unités astronomiques) respectivement.

L'instrument est constitué d'un accéléromètre électrostatique et d'un ensemble de mesures de radionavigation (Doppler et distance), présentes dorénavant dans toutes les missions planétaires. Cette technologie de « navigation hybride » tire profit de l'association des deux types d'observables, venant respectivement de la radionavigation et du senseur inertiel, pour séparer les forces gravitationnelles et non gravitationnelles exercées sur la sonde. Elle permet donc, grâce à une navigation nettement améliorée de la sonde, d'atteindre les objectifs scientifiques associés à l'emport de l'instrument.

Le premier de ces objectifs est le test de la loi de gravitation à l'échelle interplanétaire (jusqu'à 5 ou 9 UA selon la destination), effectué pendant les phases de croisière de la mission. Le second objectif est d'analyser les anomalies de rebonds lors des assistances gravitationnelles, à nouveau en tirant profit de la présence de l'accéléromètre pour mesurer (en 3D) l'accélération non gravitationnelle pendant toute la période de "black-out" radio puis intégrer ces informations aux vitesses mesurées par radio sur les segments entrant et sortant du rebond. Ces objectifs principaux de GAP ne doivent a priori pas interférer lourdement avec les objectifs planétaires de la mission mais il est à noter que la présence de l'accéléromètre peut constituer un complément précieux à la mission planétaire, au-delà de ces objectifs de physique fondamentale.

Mission « Solar System Odyssey » (ODYSSEY)

La mission proposée relève le défi d'effectuer le test de la loi de gravitation dans le système solaire jusqu'à des distances de 13 AU en utilisant des technologies matures.

Le premier objectif scientifique de la proposition est de vérifier la loi de gravité aux échelles du système solaire lors de la croisière de la sonde. L'anomalie d'accélération sur Pioneer 11 a été détectée lors de l'approche de Saturne pour le dernier rebond gravitationnel. Les analyses préliminaires des données récupérées récemment par le JPL confirment l'existence d'une région de transition autour de Saturne avec une augmentation d'un facteur 5 de l'anomalie lors du rebond gravitationnel. La détermination précise de cette région de transition constituera une percée en physique fondamentale. A contrario, un résultat « négatif » venant confirmer la loi de gravité aux échelles interplanétaires est important pour la physique du système solaire et l'astrophysique dont les modèles utilisent cette loi de gravitation.

Les assistances gravitationnelles successives seront mises à profit pour mesurer finement les trajectoires et permettre l'analyse des anomalies de vitesses (« flyby anomaly ») rencontrées

lors de ces phases. Lors de sa trajectoire interplanétaire, les conjonctions solaires permettront de réaliser de nouveau l'expérience menée avec Cassini, de déviation du trajet des ondes électromagnétiques au voisinage du soleil, mais en profitant de la présence d'un accéléromètre à bord pour lever l'ambiguïté de Cassini sur l'accélération de la sonde. L'option d'un instrument laser basé sur le concept TIPO (Télémétrie Inter Planétaire Optique) permettait d'atteindre une précision sur la mesure du paramètre γ de 10^{-7} .

La distance maximale de 13 UA peut être portée jusqu'à 50 AU avec l'option d'emporter une radiobalise pour atteindre les régions extrêmes du système solaire. Ceci permet d'aborder l'étude de la ceinture de Kuiper, décrite aussi ci-dessous pour la mission SAGAS.

Mission « Search for Anomalous Gravitation using Atomic Sensors » (SAGAS)

La mission est caractérisée par un ensemble extrêmement ambitieux de tests en physique fondamentale, en gravitation en particulier et en espace lointain (jusqu'à 53 UA), ainsi qu'une exploration du système solaire (informations sur la ceinture de Kuiper, le système de Jupiter). La charge utile est composée de senseurs innovants fondés sur les nouvelles technologies quantiques, une horloge atomique optique et un accéléromètre interférométrique à atomes froids, et d'un lien laser pour la navigation, la comparaison des fréquences et les communications.

Les objectifs scientifiques fournissent une caractérisation complète de la gravitation à grande échelle dans le système solaire, avec la mesure du décalage gravitationnel des horloges, le test d'invariance de Lorentz, la mesure du retard gravitationnel de la lumière (effet Shapiro), les tests des théories gravitationnelles à grande échelle, la navigation précise lors des assistances gravitationnelles (étude de l'anomalie de fly-by) et la recherche d'ondes gravitationnelles à basse fréquence (10 μ Hz à 1mHz).

Ils couvrent également des objectifs importants pour la science du système solaire avec la mesure de la masse totale et de la distribution de masse de la ceinture de Kuiper, la possibilité de mesure de la masse d'objets individuels de la ceinture de Kuiper et la mesure précise du champ de gravitation de Jupiter.

Mission « Global Earth and in-Orbit Synchronisation of Time Atomic References » (GEOSTAR)

Cette mission s'inscrit dans une prospective « post-ACES » visant à tirer bénéfice des techniques développées pour ACES pour une synchronisation globale d'horloges atomiques sol et espace, avec une résolution et une couverture bien meilleure que celles offertes par les techniques actuelles. En systématisant les méthodes de synchronisation/syntonisation, à l'échelle internationale, d'horloges atomiques ultrastables disponibles au sol, elle permet de prolonger sur le long terme des tests de physique fondamentale avec les horloges de laboratoire, ainsi que les comparaisons multi-techniques de transfert de temps (GPS, GALILEO, lien micro-onde MWL « MicroWave Link » d'ACES, T2L2).

Elle permet également de multiplier les applications en observation de la Terre (géodésie relativiste, étude de la propagation dans l'atmosphère...), en astronomie (échelles de temps pour le VLBI...), en technique de navigation (calibration et suivi des horloges embarquées dans les satellites GNSS). A terme, elle s'inscrit dans l'évolution des systèmes GNSS, avec la mise en opération de nouvelles générations de satellites puis la démonstration de faisabilité d'un segment spatial autonome pour GNSS, ces évolutions ouvrant elles-mêmes la voie à des applications scientifiques élargies en observation de la Terre ou en métrologie.

La mission peut être réalisée dans un cadre d'opportunité, éventuellement dans le cadre du programme « GNSS Evolution » qui vient d'être décidé par l'ESA.

Mission « Laser Interferometer Space Antenna » (LISA)

Rappelons que LISA est une mission dédiée à l'observation et à l'analyse des ondes gravitationnelles produites par des phénomènes astrophysiques violents ou permanents dans notre environnement galactique ou dans l'univers lointain. LISA est une mission conjointe de

l'ESA (Cosmic Vision) et de la NASA (Beyond Einstein) et sa date de lancement est au plus tôt en 2020. Une mission de démonstration technologique (LISA Pathfinder) doit être lancée fin 2010.

LISA est un ensemble de trois stations en orbites héliocentriques formant une constellation triangulaire de 5 millions de km de côté. Ces stations sont liées par des faisceaux infrarouges, et la signature des ondes gravitationnelles est recherchée dans les décalages Doppler entre la lumière reçue et la lumière locale dans chacune des stations et dans chaque sens (6 flux de données).

4) Briques technologiques

Ce chapitre est consacré aux briques technologiques caractéristiques des projets de physique fondamentale. Le but est de décrire (dans la mesure du possible selon les technologies considérées) leur rapport aux objectifs scientifiques, l'état de l'art et la position des équipes françaises et européennes, les questions cruciales pour l'avenir de la technologie considérée et de son utilisation dans les projets spatiaux.

Les horloges atomiques

Les horloges atomiques de très hautes performances sont au cœur de nombreux projets spatiaux avec un large spectre d'objectifs (physique fondamentale, positionnement et navigation, métrologie temps-fréquence et télémétrie, géodésie relativiste, plus généralement applications en observation de la Terre solide, liquide ou de son atmosphère...). Parmi ces projets, citons ceux en cours (ACES, GALILEO 1^{ère} génération) et ceux proposés dans le cadre de différents appels d'offre (SAGAS, EGE « Einstein Gravity Explorer », GEOSTAR, futures générations de GALILEO, ...).

Les différentes catégories d'horloges spatiales qui ont atteint à ce jour en Europe le stade industriel sont toutes des horloges micro-ondes, décrites dans le tableau ci-dessous :

Technologie d'horloge	Développé par	Performances en fréquence	Projet / Système
Horloge à rubidium en cellule	Suisse	Au niveau de 10^{-14}	GALILEO, 1 ^{ère} génération
Maser passif à hydrogène	Suisse	Meilleures que 10^{-14}	GALILEO, 1 ^{ère} génération
Horloge à jet thermique de césium à pompage optique	Consortium franco-suisse	Meilleures que 10^{-14}	GALILEO, 1 ^{ère} /2 ^{ème} génération
Maser actif à hydrogène	Suisse	Au niveau de 10^{-15}	Mission ACES sur ISS
Horloge à atomes froids PHARAO	France	Au niveau de 10^{-16}	Mission ACES sur ISS

D'autres technologies d'horloges micro-ondes (horloges compactes à atomes froids, horloges à piégeage cohérent de population, horloges micro-ondes à ions piégés) font actuellement l'objet de développements, entre autres en France, afin d'évaluer de nouvelles filières offrant un meilleur compromis performances/encombrement pour les prochaines générations des systèmes GNSS. A long terme, ces systèmes gagneront à utiliser une ou plusieurs horloges maîtresses (micro-ondes ou optiques) de très hautes performances installées dans des satellites géostationnaires, et qui synchroniseront directement - sans traversée de l'atmosphère - les horloges embarquées dans la constellation de satellites.

Les futures missions spatiales de physique fondamentale (prospective post-ACES, projets de tests de la gravitation dans le système solaire) nécessiteront quant à elles des horloges avec des performances en fréquence bien meilleures, typiquement dans la gamme 10^{-17} - 10^{-18} . De telles performances pourront être obtenues avec des horloges optiques, qui ont d'ailleurs déjà surpassé au sol les meilleures horloges micro-ondes à atomes froids.

Une horloge optique est constituée d'un laser de très haute pureté spectrale (laser ultra stable) qui joue le rôle d'oscillateur local optique dont on asservit la fréquence sur une fréquence de résonance optique d'un atome ou d'un ion. Cette référence atomique/ionique doit avoir une raie de résonance la plus étroite possible, ainsi que des effets systématiques réduits, en particulier celui dû au rayonnement du corps noir. Des techniques d'optique non-linéaire sont communément utilisées pour multiplier la fréquence du laser jusqu'à la fréquence atomique. La fréquence du signal utile de l'horloge, dans le domaine optique, est transférée vers d'autres domaines spectraux (optiques ou micro-ondes) à l'aide d'un laser femtoseconde générant un peigne de fréquences cohérentes.

Deux grandes classes d'horloges optiques sont aujourd'hui étudiées : les horloges à réseaux optiques d'atomes neutres qui, grâce au grand nombre d'atomes piégés, présentent une extraordinaire stabilité de fréquence ; les horloges à ions uniques piégés qui ont un fort potentiel d'exactitude (au détriment de leur stabilité) et dont la partie physique repose sur une architecture plus compacte. Il est probablement prématuré de décider quel concept d'horloge optique est le meilleur pour une future application spatiale, d'autant plus que le choix dépend de la mission (durée, fonctionnement continu de l'horloge ou non, niveau de vibrations, environnement thermique & radiatif, etc...). Toutefois, des grandes lignes d'études sont en train de se construire au niveau européen, suite à plusieurs études commanditées par l'ESA.

Parmi les horloges optiques à atomes neutres (Sr, Yb, Mg, Hg) étudiées en Europe, l'horloge Sr offre aujourd'hui le meilleur compromis performance/maturité pour une application spatiale ; l'horloge Hg est très prometteuse pour atteindre à long terme des performances encore meilleures, grâce à une réduction du déplacement de fréquence par le rayonnement du corps noir, mais au détriment de sa simplicité et fiabilité (sources lasers dans l'UV). En ce qui concerne les horloges à ions uniques piégés, dont plusieurs types sont étudiés en Europe (Sr^+ , Yb^+ , Ca^+ , In^+), l'horloge Sr^+ offre aujourd'hui le meilleur compromis performance/maturité pour une application spatiale, avec un atout sur la compacité de sa partie physique. Mais d'autres horloges à ions (Hg^+ , Al^+), plus complexes et développées uniquement aux USA, détiennent actuellement les records mondiaux de performances. La France est particulièrement bien positionnée dans les développements d'horloges à réseaux optiques.

Bien que les concepts et architectures des horloges optiques soient différents, ils ont en commun la problématique des lasers ultra-stables et celle des lasers femtosecondes générant les peignes de fréquences. Un travail conséquent, et urgent, de R&T reste à mener sur ces technologies critiques (abordées dans un autre paragraphe de ce chapitre, intitulé « lasers stabilisés »). Les technologies relatives à la partie physique d'une horloge optique (ultravide, magnétisme, ...) présentent quant à elles un meilleur niveau de maturité technologique, grâce en particulier aux développements menés sur des technologies similaires dans le cadre de PHARAO.

Accéléromètres électrostatiques

Les accéléromètres électrostatiques basés sur le savoir faire unique démontré depuis des années à l'ONERA constituent le cœur instrumental de plusieurs missions spatiales dédiées à la géodésie, parmi lesquelles GOCE qui sera lancé en 2009 par l'ESA, ou à la physique fondamentale comme MICROSCOPE dédiée au test du principe d'équivalence dans l'espace. Leur principe de base est de fournir la mesure des forces non gravitationnelles agissant sur le véhicule, par mesure capacitive du mouvement relatif de la masse d'épreuve (protégée de ces forces par la cage) et de sa cage (liée au véhicule). Les accéléromètres fabriqués pour les missions déjà sélectionnées atteignent des résolutions de l'ordre de 10^{-12} $\text{m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser ces forces non gravitationnelles et fabriquer ainsi un

environnement inertiel quasi-parfait (voir dans le paragraphe « Technologies LISA » les instruments reliés à ce principe qui sont étudiés dans le cadre du projet LISA).

Les accéléromètres électrostatiques définissent aussi l'instrument essentiel de la proposition Solar System Odyssey (ODYSSEY) dédiée au test de la loi de gravité dans le système solaire (PI français avec une forte implication de plusieurs équipes françaises). Cette proposition n'a pas été retenue dans le cadre de la sélection Cosmic Vision de 2007, mais elle a fait l'objet d'une recommandation positive du Fundamental Physics Advisory Group (FPAG) et du Space Science Advisory Committee (SSAC) pour embarquer un senseur accélérométrique tel que celui conçu pour ODYSSEY sur une mission planétaire à destination des systèmes de Jupiter ou de Saturne. C'est l'objectif du projet d'instrument « Gravity Advanced Package » (GAP), comprenant un accéléromètre avec réjection du biais, qui est considéré comme instrument candidat pour l'emport sur la mission planétaire sélectionnée pour une étude Cosmic Vision.

Dans ce nouveau contexte, l'accéléromètre est le moyen de tester si la sonde interplanétaire suit la trajectoire géodésique, et si ce n'est pas le cas de mesurer directement l'écart à cette géodésique. Cette information, associée aux mesures de radionavigation (mesure de la vitesse par « Doppler tracking », ou mesure de la distance par « radio ranging »), permet de restituer une navigation beaucoup plus précise de la sonde et donc de tester la loi de la gravitation. Autrement dit, l'accéléromètre fournit une observable indépendante de celle de la radionavigation qui permet de s'affranchir des modèles habituellement utilisés pour décrire les forces non gravitationnelles. S'il était disponible sur une mission lointaine, ce type d'information permettrait de lever les ambiguïtés qui subsistent sur les résultats de plusieurs expériences.

On pense bien entendu en premier lieu à l'anomalie de trajectoire observée sur les sondes Pioneer 10 et 11 par le « Deep Space Network » de la NASA, qui se traduit par un écart entre la vitesse Doppler mesurée et celle prévue à partir des modèles de navigation. L'observation, publiée par une équipe du JPL il y a une dizaine d'années, a été confirmée par plusieurs équipes qui ont confirmé l'existence d'une accélération anormale dirigée vers le Soleil et d'une valeur d'environ 1nm/s^2 . Des analyses refaites récemment sur les données disponibles fournissent de nouveaux indices : les études du bilan thermique conduisent à augmenter sa contribution possible au mouvement de la sonde, sans toutefois atteindre la valeur observée ; les études des données Doppler tendent à montrer que l'anomalie pourra difficilement être expliquée seulement par une cause liée à la sonde. En tout état de cause, la disponibilité de l'observable accélérométrique lèverait immédiatement cette incertitude : l'effet du bilan thermique, tout comme celui d'une force de friction liée à une cause inattendue dans le système solaire lointain, serait alors mesuré et corrigé.

Il existe d'autres observations dont les résultats s'écartent des valeurs attendues, et pour lesquelles on peut répéter ce raisonnement. D'autres sondes planétaires (Galileo par exemple) ont montré des anomalies de navigation. Cassini, qui a réalisé un des plus beaux tests de la relativité générale lors de sa phase de croisière vers Saturne, a lui aussi observé une accélération anormale, interprétée comme l'effet de son bilan thermique, mais sans que cette information puisse être validée par une mesure indépendante. Par ailleurs, les incréments de vitesse mesurés par la NASA et l'ESA lors des rebonds gravitationnels des sondes Galileo, Near, Cassini et Rosetta montrent des écarts significatifs, de l'ordre du cm/s, par rapport aux prévisions.

La résolution et l'étendue de mesure des accéléromètres développés à l'ONERA sont suffisantes pour lever l'ambiguïté sur l'origine des anomalies observées et ceux-ci se prêtent donc bien aux exigences des projets prévus sous les deux conditions suivantes. Tout d'abord, la résolution (que l'on peut fixer par exemple à $5 \cdot 10^{11} \text{ m/s}^2$, soit 5% de l'anomalie Pioneer observée) doit être atteinte dans le continu, ce qui soulève le problème du biais des accéléromètres électrostatiques. La solution à ce problème consiste à retourner l'instrument de façon périodique, afin de moduler l'accélération qu'il mesure et, ainsi, de profiter de sa meilleure gamme de fréquence. D'autre part, la performance requise suppose un contrôle des termes de couplage de l'instrument avec le satellite, avec éventuellement une correction aidée par le

contrôle d'attitude de ce dernier, et elle pose des contraintes techniques en terme de contrôle thermique. Pour un emport sur une mission non dédiée, ces problèmes doivent être pris en compte dès la conception du satellite, sans attendre la sélection des instruments qui intervient à un stade tardif.

Ces évolutions semblent en tout état de cause nécessaires par rapport aux modèles actuels. Le dispositif de réjection en vol du biais est déjà l'objet d'une R&T supportée par le CNES. L'amélioration recherchée pour les performances apparaît tout à fait réalisable dans le cadre d'un développement de quelques années et devrait permettre d'acquérir la maturité technologique suffisante pour la prochaine sélection « Cosmic Vision », à laquelle une évolution de la mission ODYSSEY sera à nouveau candidate.

Remarquons pour finir que les études consacrées à ce sujet permettent de préparer une charge utile générique susceptible d'être embarquée sur des missions très diverses, en particulier dans le cadre d'opportunités. L'objectif d'analyse des rebonds gravitationnels, prévu par toutes les missions projetant d'emporter un accéléromètre, peut se prêter à une telle stratégie.

Senseurs inertiels atomiques

L'interférométrie à atomes froids suscite un intérêt tout particulier pour une utilisation comme capteur inertielle. En effet, ces nouveaux capteurs permettent une très bonne connaissance a priori du facteur d'échelle et aboutissent donc à une très bonne exactitude. De plus, leur fonctionnement repose sur les principes physiques fondamentaux de la mécanique quantique, cette « originalité » permettant une compréhension très fine de leur fonctionnement. Ces qualités sont primordiales pour atteindre des niveaux de performance ultimes dans les tests de la relativité générale et ils sont directement connectés à des efforts importants dédiés par la communauté de physique atomique à l'utilisation de ce type de senseurs dans la définition des grandeurs de référence (horloges atomiques et balance du Watt).

En raison de ce contexte, plusieurs propositions utilisant des senseurs inertiels à atomes froids ont été déposées dans le cadre de la sélection « Cosmic Vision ». La mission SAGAS (Search for Anomalous Gravitation using Atomic Sensors ; PI français avec une forte implication de plusieurs équipes françaises), a des objectifs très ambitieux en physique fondamentale (test des diverses caractéristiques de la loi de gravitation jusqu'à 53 UA), ainsi qu'en exploration du système solaire (ceinture de Kuiper). La charge utile est composée d'une horloge atomique optique, d'un accéléromètre à atomes froids, et d'un lien laser pour la navigation, la comparaison des fréquences et les communications. D'autres projets comportaient également la participation d'équipes françaises : GAUGE « Grand Unification and Gravity Explorer », MWXG « Matter Wave Explorer of Gravity » et EGE « Einstein Gravity Explorer » (tests du principe d'équivalence et de la relativité générale).

La qualité des projets et des équipes proposantes démontre le dynamisme de la communauté scientifique européenne. Les objectifs scientifiques et potentiels technologiques de plusieurs de ces propositions (dont SAGAS) ont été jugés par le FPAG et le SSAC comme d'un grand intérêt et d'une grande importance. Cependant la maturité technique des instruments très innovants qui étaient proposés n'a pas été considérée par l'ESA comme suffisante pour une présélection à ce stade. Il est très important dans ce contexte de poursuivre les efforts de R&T déjà entrepris et de les pousser jusqu'à la réalisation de démonstrateurs.

C'est aujourd'hui l'objectif de nombreux efforts nationaux et européens parmi lesquels on peut citer la réalisation d'une base inertielle atomique compacte et d'un gravimètre atomique à Paris avec des performances de $4 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ pour le gravimètre et $2 \times 10^{-6} \text{ rad/s/Hz}^{1/2}$ pour le gyromètre. Plusieurs programmes soutenus par les agences ont démarré pour faire avancer la technologie de systèmes inertiels atomiques embarquables. Le projet allemand QUANTUS de condensât de Bose-Einstein en chute libre (soutenu par la DLR) et le projet français ICE d'interférométrie et test du principe d'équivalence avec des atomes froids en microgravité (soutenu par le CNES) ont abouti récemment à des premières scientifiques spectaculaires : premier condensât en microgravité (QUANTUS à la tour de Brème), première réalisation de franges d'interférences en microgravité (ICE dans l'Airbus 0g du CNES).

Le projet ICE (Interféromètre à source Cohérente pour l'Espace) porté depuis 2002 par des équipes françaises soutenues par le CNES a permis le développement de briques technologiques essentielles, ainsi que la première validation en microgravité. Il permet aujourd'hui d'avoir un premier « breadboard » d'interféromètre atomique compatible avec l'airbus 0-g. Ces performances étant limitées par l'environnement vibrationnel de l'Airbus, il est possible d'envisager gagner plusieurs ordres de grandeur dans l'espace. De manière plus générale, les études menées en Europe sur ce sujet explorent des approches différentes qui sont nécessaires pour faire avancer la maturité technologique des senseurs. Elles sont menées en parallèle avec un programme européen d'étude sur les senseurs inertiels soutenu par l'ESA dans le cadre du programme ELIPS.

Les interféromètres atomiques représentent un enjeu important en terme de senseur inertielle pour l'espace. Outre leurs performances améliorées par l'absence de gravité, ils présentent l'intérêt d'une parfaite connaissance du facteur de sensibilité et du biais de mesure. Les efforts réalisés ces dernières années ont permis de développer des briques technologiques performantes qui conduisent à un premier modèle de senseur inertielle. Les efforts entrepris en R&T doivent être poursuivis, soit par l'ESA, soit par le CNES au niveau national quand elles relèvent de propositions françaises importantes pour la prospective spatiale. Il est important également que ces activités soient mieux coordonnées entre les différentes directions de l'ESA et le CNES, dans une organisation qui privilégie les développements reconnus les plus prometteurs aux plans scientifiques et technologiques. Dans ce contexte, le FPAG a récemment recommandé un effort en R&T sur les senseurs inertiels, en particulier vers le développement d'un breadboard de senseur. En ce qui concerne la prochaine sélection « Cosmic Vision », la mission SAGAS exploite pleinement les performances des senseurs quantiques tout en proposant des objectifs scientifiques ambitieux, et il paraît important de se préparer à la prochaine sélection dans les meilleures conditions.

Liens optiques

Toutes les missions spatiales utilisent des liens électromagnétiques pour la navigation, le transfert de temps/fréquence, la transmission des données et les mesures in situ (altimétrie, vol en formation, etc...). D'une manière générale, la fréquence des ondes porteuses, de leur modulation ainsi que le type de modulation (amplitude ou phase/fréquence) jouent tous un rôle essentiel dans le design et le succès du lien et donc de la mission. Dans le domaine des liens radio, l'évolution des dernières décennies a été caractérisée par une augmentation constante des fréquences du GHz (bande L) à 30 GHz et plus (bande Ka). Cela s'est accompagné par une augmentation correspondante des fréquences de modulation ainsi que d'une utilisation accrue de la modulation en phase/fréquence au détriment de la modulation d'amplitude. La raison de cette évolution est le gain rapide dans le rapport signal sur bruit avec la fréquence, surtout à grande distance, et l'amélioration correspondante des performances des liens dans tous leurs domaines d'application. Les limites sont imposées par la disponibilité et stabilité des horloges aux fréquences en question, la stabilité spatio-temporelle de toute la chaîne de mesure à un niveau correspondant à la longueur d'onde et la période des signaux, et, à grande distance, par l'efficacité des optiques d'émission-réception, liée à leur dimension.

En physique fondamentale, les liens jouent un rôle essentiel pour transmettre les données des mesures locales, mais aussi et surtout en tant qu'instrument propre. En effet, les observables d'intérêt sont le mouvement gravitationnel des corps (déterminé par la navigation via le lien), le comportement des horloges distantes (déterminé par la comparaison à distance via le lien) et les trajectoires lumineuses elles-mêmes, en particulier leur caractéristiques gravitationnelles. On ne citera que quelques exemples : le Laser-Lune qui est un des meilleurs tests du principe d'équivalence, la mission GPA « Gravity Probe A » qui a permis la mesure la plus précise à ce jour du décalage de fréquence gravitationnel des horloges, et la mission Cassini qui a permis la mesure du retard gravitationnel de la lumière la plus exacte.

L'évolution future des liens de haute performance s'inscrit sans aucun doute dans la continuité des dernières décennies, à savoir une augmentation des fréquences. Dans cette perspective

une « rupture technologique » est en train de s'opérer en passant directement aux fréquences optiques ce qui représente un saut de 4 à 5 ordres de grandeur. Le premier pas de cette rupture a été franchi par l'utilisation de lasers pulsés pour la télémétrie des satellites terrestres (SLR « Satellite Laser Ranging ») et de la lune (LLR « Lunar Laser Ranging »), ainsi que pour l'altimétrie satellitaire. Ce type de système a été récemment adapté pour le transfert de temps/fréquences satellite-sol T2L2 qui est actuellement en cours de validation à bord du satellite JASON 2. Sur le principe, il s'agit de systèmes à porteuse optique modulée en amplitude (impulsions) avec un temps caractéristique de l'ordre de 10^{-11} s. Cela correspond à un gain effectif en fréquence (et donc en performance) d'un à deux ordres de grandeurs par rapport aux liens radio. La suite de cette évolution passera très probablement par des liens optiques qui utilisent directement la porteuse (10^{14} Hz) pour les mesures fines de navigation (Doppler) ou pour le transfert de fréquence. Une modulation en phase servira à la transmission des données, le transfert de temps, et la détermination absolue de la distance sol-satellite ou satellite-satellite (vol en formation).

Cette évolution accompagne naturellement l'amélioration des horloges. Les horloges atomiques de nouvelle génération à fréquence optique montrent déjà des performances plus d'un ordre de grandeur meilleures que les horloges micro-ondes « classiques », atteignant des incertitudes de 2×10^{-17} pour les meilleures d'entre elles grâce aux avancées scientifiques dans les domaines du refroidissement et piégeage d'atomes (prix Nobel 1997) et des comparaisons de fréquences avec des lasers femtosecondes (prix Nobel 2005). Des travaux de R&D pour la spatialisation de ce type d'horloges sont d'ores et déjà en cours avec le soutien de l'ESA et du CNES.

Pour comparer ce type d'horloges dans des laboratoires distants sur terre, les liens radio via satellites actuels ne sont plus suffisants. Pour des distances relativement courtes (jusqu'à 200 km), la méthode utilisée depuis peu est un lien optique fibré (fibres des réseaux de télécommunication) utilisant directement la porteuse optique. Cependant, la prospective à plus long terme de ce type de lien passe nécessairement par l'espace pour franchir les distances intercontinentales ainsi que pour des liens aux horloges spatiales de haute performance en orbite terrestre et interplanétaire, avec de nombreuses applications en perspective non seulement en physique fondamentale mais aussi en navigation et télécommunications, observation de la terre, science du système solaire.

Il existe plusieurs approches pour la réalisation de liens optiques de haute performance. T2L2 est un système pulsé à deux voies (aller-retour) dérivé du SLR. Le système TIPO (Télémétrie Inter Planétaire Optique) est un projet de lien pulsé similaire à T2L2 mais à seulement une voie (aller simple), en revanche sur des distances interplanétaires. L'inconvénient de cela (comme tout système une-voie) est la forte corrélation entre la position du satellite et la désynchronisation des horloges bord et sol. Le système T2M (Télémétrie laser à 2 Modes) est un lien laser développé dans le but d'effectuer de mesures absolues de distance entre satellites pour des vols en formation (distances de 0 à 1000 km). C'est un lien « deux-voies », où la fréquence de battement entre deux modes (issus d'un laser unique ou d'un couple de lasers avec décalage de fréquence) est utilisée pour déterminer la distance entre les deux satellites. L'évolution à plus long terme s'orientera vers des liens laser cohérents en phase avec détection hétérodyne de la porteuse optique. Un tel lien est réalisé sur chaque bras du projet LISA ou dans le lien optique du projet SAGAS « DOLL » (Deep space Optical Laser Link). Ce type de lien trouve ses applications dans des missions en orbite terrestre ou planétaire qui nécessitent des hautes performances pour la comparaison des horloges, la navigation, et la transmission de données à haut débit.

Plusieurs missions profitant des performances des liens optiques sont en cours ou proposées. On notera en particulier T2L2, embarqué sur JASON 2 (lancé en Juin 2008) ainsi que nombre de propositions dans le cadre de l'appel Cosmic Vision de l'ESA en 2007. En physique fondamentale étaient concernés en particulier les missions EGE qui utilise une version améliorée de T2L2, ODYSSEY qui utilise TIPO, SAGAS qui utilise DOLL.

Il est à noter, que l'Europe, et plus particulièrement la France, possèdent actuellement une

avance considérable sur la technologie des liens optiques, avec l'expertise en particulier aux Observatoires de la Côte d'Azur (SLR, LLR, T2L2, TIPO, T2M) et de Paris (horloges optiques, liens fibrés, DOLL). Il est donc tout naturel de pousser une prospective CNES en physique fondamentale qui profite pleinement des liens optiques actuels et futurs basée sur l'expertise des équipes françaises.

Lasers stabilisés

Un nombre croissant de projets de missions spatiales en physique fondamentale fait appel aux lasers ultra-stabilisés embarqués. Leur pureté spectrale et leur grande directivité sont mises à profit dans plusieurs projets dont ils constituent l'élément indispensable de réussite. Interroger et refroidir des atomes nécessitent des lasers puissants et à très faible largeur de raie, émettant à la longueur d'onde caractéristique des atomes en jeu. PHARAO utilise plusieurs faisceaux lasers stabilisés pour refroidir, préparer et manipuler les atomes de Césium permettant à l'horloge d'atteindre une exactitude de 10^{-16} . Ils sont aussi des composants essentiels de tous les dispositifs d'interférométrie atomique susceptibles de surpasser les senseurs inertiels (gyromètre et accéléromètre) actuels dans bon nombre de projets spatiaux dont ICE et SAGAS. Leur directivité et leur stabilité sur des temps de 10s à 10000s en feront des supports de transmission de l'information dans le cas des mesures Doppler entre satellites proche et lointain de plusieurs millions de km (LISA).

Pour PHARAO, des diodes laser à cavité étendue de 10 à 100 fois meilleures que les modèles courants fournissent la haute pureté spectrale requise ; ces diodes sont asservies sur une référence atomique fournie par la raie d'absorption du Césium à travers un asservissement rapide de la fréquence d'oscillation des diodes. Pour des missions dont l'orbite est plus éloignée de la Terre, il est important d'avoir des sources lasers fiables, que ce soit des lasers à semi-conducteurs fondées sur les technologies télécom, des lasers à solides, voire même fibrés pour les aspects encombrement. Une contrainte supplémentaire sur la longueur d'onde d'émission est nécessaire dans le cas de lasers de refroidissement ou d'interrogation d'horloges. Le nombre d'horloges optiques disponibles semble encore être limité par le nombre de couples lasers stables et transitions atomiques. Ceci peut être pallié par l'utilisation de lasers à modes bloqués générant un peigne de fréquences pouvant être doublées pour trouver des transitions atomiques. Ils peuvent donc jouer le même rôle que les lasers continus si on stabilise une raie du peigne sur une référence atomique et ils gardent l'avantage d'être utilisable en chronométrie si les impulsions sont courtes. Jusqu'ici ce domaine est encore peu développé en France par rapport aux autres pays européens (Allemagne, Grande-Bretagne). Leur développement devrait être encouragé par le CNES en vue de leur potentiel d'utilisation spatiale très prometteuse.

Pour les transmissions d'information de distances inter-satellites, des puissances de plusieurs Watts sont nécessaires pour recueillir encore quelques nanoWatts à des millions de kms. Les mesures interférométriques par hétérodynage requièrent des lasers stabilisés sur des références très stables à long terme. LISA mesure des variations de distance relatives de 10^{-21} en comparant la phase d'un faisceau laser local avec celui issu de satellites distants de 5 millions de kilomètres. Les lasers doivent présenter un niveau de bruit de l'ordre de $10\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ pendant des temps de mesure de 10s à 10000s. Les stabilisations proposées jusqu'alors pour LISA se font sur une cavité résonnante définie par une entretoise mécanique très stable à court terme. Pour éviter les dérives de température inhérentes au matériau, l'entretoise mécanique est thermostatée à quelques microkelvins ; cet ensemble est déjà en fonctionnement depuis quelques années au JPL et chez LZH (Laser Zentrum Hannover associé à Astrium), bien que ses performances ultimes à 10000s soient à la limite de la technologie. L'alternative est la stabilisation sur une référence moléculaire contenue dans une cuve en verre scellée, dont l'étude de miniaturisation/spatialisation est en cours actuellement dans les laboratoires français. Ici le couplage laser et molécule concerne un laser à Nd :YAG émettant à 1,06 microns doublé en fréquence vers 532 nm pour être en résonance avec la molécule d'iode à 532 nm. Les techniques de fabrication du signal d'erreur pour stabiliser le laser doivent être les plus simples possibles afin de mettre en jeu peu de composants consommateurs d'énergie : on peut citer la

technique du tilt-locking qui utilise une détection en continu sans aucune modulation optique.

Il est à noter que la technologie de mesure mise au point avec les lasers stabilisés pour LISA trouve aussi des applications dans les missions de géodésie spatiale où des mesures de distance absolues à quelques nanomètres requièrent des mesures interférométriques (missions futures de géodésie). Soulignons que la spatialisation des lasers stabilisés s'accompagne de l'étude de la fiabilité de plusieurs composants entrant dans la boucle d'asservissement ou dans la détection hétérodyne. Plusieurs d'entre eux (acousto-optique détecteurs, photodiodes,...) sont déjà étudiés dans les phases préliminaires de PHARAO et de LISA.

Il convient de noter que la France est présente au meilleur niveau dans le domaine des stabilisations de lasers avec entre autres le SYRTE, le LPL, ARTEMIS dans les deux domaines de stabilisation sur entretoise mécanique (cavité Fabry-Perot) ou sur atomes/molécules.

Technologies LISA

Nous citons ci-dessous les principaux secteurs technologiques en cours et en devenir, vitaux pour la mission LISA et son précurseur LISA Pathfinder, en soulignant que la technologie ne se limite pas au matériel, mais inclut le logiciel et le traitement de l'information.

LISA doit fonctionner en régime de compensation de traînée. Ce fonctionnement repose essentiellement sur deux catégories d'instruments : accéléromètres et moteurs de positionnement. L'accéléromètre doit lire la position de la station par rapport à une masse d'épreuve en chute libre, et les moteurs doivent asservir la position de la station pour suivre la masse d'épreuve.

L'accéléromètre retenu est du type développé par l'ONERA depuis des années (voir le paragraphe « Accéléromètres électrostatiques » plus haut), mais conçu avec des objectifs différents d'une résolution bien supérieure (de l'ordre de 10^{-15} m/s²/Hz^{1/2} en densité spectrale), au prix d'une dynamique de mesure nettement dégradée. L'instrument comporte une masse de référence rectangulaire enfermée dans une cage munie de capteurs/actuateurs électrostatiques donnant une lecture capacitive des micro-déplacements relatifs de la cage et de la masse. L'instrument a été développé et testé au sol par un groupe de l'Université de Trente (Italie). Une difficulté rencontrée et semble-t-il maîtrisée est le blocage de la masse d'épreuve durant les phases de lancement et de mise en orbite, et sa libération ultérieure.

Les moteurs de positionnement doivent exercer constamment des forces très faibles (μ N). Plusieurs solutions ont été discutées et expérimentées, les unes (USA) basées sur des jets de substance colloïdale, les autres (EU) sur des jets d'atomes ionisés, accélérés par un champ électrique. La solution de référence est un jet d'atomes de Césium à travers une fente, et est développée par un groupe italien. Il existe une solution de repli autrichienne basée sur un jet d'atomes d'Indium par une aiguille. L'ensemble « senseur + moteur » fonctionne dans un mode « compensation de traînée » qui est sans aucun doute destiné à un avenir qui dépasse les missions LISA Pathfinder et LISA. Ce mode sera également validé sur MICROSCOPE et il est essentiel que les acquis technologiques de l'ONERA (d'ailleurs utilisés comme « input » par LISA) soient maintenus et développés.

LISA lit les signaux gravitationnels comme de très faibles décalages Doppler. La grande dissymétrie des chemins optiques entre les faisceaux reçus et les oscillateurs locaux rend critique la stabilité de ces derniers. Un prétraitement des données basé sur la redondance de l'information dans les 6 flux, permet de réduire la demande de stabilité à un niveau de l'ordre de 10 Hz/Hz^{1/2} en densité spectrale. La solution actuelle consiste à asservir les lasers sur une cavité de référence. Cette solution a été développée par un groupe de l'Université de Hanovre. Il existe toutefois d'autres solutions basées sur une raie d'absorption atomique ou moléculaire (voir la partie « lasers stabilisés » ci-dessus). Ici encore, l'expertise nécessaire dépasse largement le cadre strict des missions « ondes gravitationnelles ».

L'exploitation des antennes gravitationnelles, au sol ou dans l'espace, réclame des développements algorithmiques spécifiques. Dans le cas de LISA, on s'attend à une superposition de signaux ayant un fort rapport signal sur bruit. Les événements les plus

intéressants sont ceux qui impliquent les trous noirs supermassifs entre eux ou leur voisinage. Pour comparer la théorie et les données d'observation, plusieurs domaines doivent être développés. Un premier domaine est la prédiction de la forme des signaux émis lors d'événements violents : cette prédiction demande d'abord des modèles de relativité générale analytiques et/ou numériques. Un deuxième domaine est celui de la séparation des sources, la reconstitution des signaux correspondants à partir des données, et la détermination de leurs paramètres. La communauté constituée autour de LISA développe les techniques nécessaires dans ces deux domaines. Cette communauté contient des équipes françaises groupées dans l'entité « LISA France », soutenue par le CNES et par un contrat ANR. Il est essentiel que ce soutien perdure sur les dix années à venir.

La place de la France dans LISA dépend en partie de sa participation active à LISA Pathfinder. La présence française, intervenue tardivement, consiste en la prise en charge par APC du suivi de réalisation d'un élément du banc optique, le modulateur acousto-optique. L'exploitation de LISA Pathfinder intéresse le laboratoire APC et LISA France et il est urgent de mettre en place la structure capable de préparer cette exploitation, à partir d'aujourd'hui jusqu'à fin 2010, et de la mener à bien en 2011. L'IN2P3 projette d'installer un centre spécial dédié au traitement des données des futures missions spatiales dont LISA Pathfinder pourrait être le premier exemple. Un soutien spécifique du CNES pourrait s'ajouter à ces efforts du CNRS.

L'ESA vient de formuler un appel d'offres pour la conception d'un banc optique compatible avec les exigences de stabilité de la mission LISA. Le « banc optique » vu par l'ESA comprend la majeure partie de la technologie de LISA. Il intègre senseurs inertiels, imageurs de surface d'onde en vue de contrôler l'attitude de la station, liaison intra-station par fibre optique, senseurs pour l'acquisition initiale du faisceau lointain, mécanisme de sélection de lasers en cas de panne, mesure de puissance des faisceaux, préstabilisation des lasers sur des cavités de référence, etc... Il est clair que les équipes de Hanovre sont bien placées pour répondre à cet appel, mais la communauté française pourrait aussi réagir avec le soutien du CNES.

5) Conclusions et recommandations :

Les quatre prochaines années vont constituer une époque fascinante pour le domaine de la physique fondamentale dans l'espace. Plusieurs missions spatiales, MICROSCOPE, ACES et LISA PathFinder (auxquelles il faut ajouter T2L2), vont voler avec pour but de tester la théorie de la gravitation, c'est-à-dire la structure spatio-temporelle même du monde dans lequel nous vivons.

Avec MICROSCOPE et ACES, il s'agit de scruter avec une précision accrue les fondements de la relativité générale, le principe d'universalité de la chute libre, ou celui de l'universalité du décalage de la fréquence des horloges. Au-delà de la performance technique (toujours plus de précision, à la limite du savoir-faire instrumental), il ne faut pas perdre de vue qu'il s'agit de chercher des indices sur les théories d'unification qu'imposent les questions fondamentales qu'affronte aujourd'hui la physique. Avec T2L2 sur JASON 2 et LISA PathFinder, il s'agit de préparer de nouvelles révolutions dans les techniques de mesure, avec comme enjeu une amélioration importante des méthodes optiques, puis la détection par LISA des ondes gravitationnelles, qui ouvrira la voie à une observation complètement nouvelle de l'univers.

Le processus Cosmic Vision de l'ESA puis celui du Séminaire de Prospective du CNES ont conduit à un nombre important de nouvelles propositions de grande qualité reçues au titre de la physique fondamentale. L'absence de la physique fondamentale dans la liste de missions présélectionnées en 2007 dans le processus Cosmic Vision doit être analysée dans un contexte marqué par le statut particulier du projet LISA, présent dans la compétition même s'il ne figure pas explicitement dans la liste. Les objectifs scientifiques et les potentiels technologiques de plusieurs de ces propositions ont été jugés par le FPAG et le SSAC comme d'un grand intérêt et d'une grande importance, même si leur maturité technique n'a pas été considérée par l'ESA comme suffisante pour une présélection.

Le groupe réaffirme que ces objectifs scientifiques et technologiques ont toute leur place dans le

domaine des sciences spatiales, avec un intérêt indiscutable non seulement pour la physique fondamentale elle-même, mais également pour des utilisations en astronomie (LISA...), observation de la Terre, du système solaire et des planètes (champ de gravité, environnement planétaire...), navigation, métrologie temps-fréquence et localisation (GALILEO...). La maturation technologique des instruments concernés est impressionnante tant par son rythme que par son ampleur et il serait dommage que le résultat de la sélection Cosmic Vision soit interprétée comme devant conduire à la ralentir.

C'est en tenant le plus grand compte de ce contexte que le groupe a adopté les recommandations ci-dessous qu'il propose au CNES ainsi que de diverses actions spécifiques à engager pour préparer au mieux l'avenir de ce domaine.

La liste des recommandations prioritaires est la suivante :

- GAP (instrument pour le premier appel à propositions de missions Cosmic Vision, CV1) : le développement d'un « accéléromètre sans biais », similaire à celui inclus dans la proposition ODYSSEY, a été proposé par les comités de sélection de l'ESA (FPAG et SSAC) pour un emport sur la mission planétaire sélectionnée dans le même cadre (mission L ayant pour but principal l'étude de Jupiter et Europe, ou celle de Saturne, Titan et Encelade). Cet instrument passager présente des objectifs de physique fondamentale très intéressants en ce qui concerne le test de la loi de gravité (lors des phases de croisière) ainsi que l'étude détaillée des rebonds gravitationnels ; pour ces deux objectifs, il peut déjà confirmer l'existence d'anomalies qui auraient un impact considérable, soit à contrario confirmer la loi de gravitation prédite dans le cadre de la relativité générale sur les distances héliocentriques explorées. De surcroît, cet instrument constitue une aide précieuse à la navigation qui peut apporter des informations essentielles sur le champ de gravité des objets visités et leur environnement. Le soutien apporté par le CNES à l'étude R&T du mécanisme permettant en vol la réjection du biais doit être poursuivi. L'intégration du « package » dans le satellite est également une question importante qui peut faire l'objet d'une aide de la part des ingénieurs du CNES.
- R&T et études de phase 0 pour les projets ODYSSEY et SAGAS (préparation de CV2) : ces projets ont vocation à être à nouveau présentés lors de la prochaine sélection « Cosmic Vision » ; le CNES peut participer à la définition des futurs projets et à la maturation de leur composants critiques, d'une part par soutien à la R&T en particulier sur les thèmes « accéléromètre sans biais » (déjà discuté ci-dessus), « horloges ultrastables » et « atomes froids », d'autre part par des études de phase 0 pour les deux missions. Les technologies « atomes froids », identifiées comme intéressantes par l'ESA, doivent être soutenues soit par l'ESA, soit par le CNES au niveau national quand elles relèvent de propositions françaises. Le CNES a en particulier intérêt à défendre toute sa place dans une filière technologique stratégique au niveau européen, qui fait suite au programme PHARAO/ACES.
- Phase 0 pour le projet GEOSTAR, dans un cadre à définir (opportunité) : cette mission s'inscrit dans une prospective « post-ACES » visant à tirer bénéfice des techniques de synchronisation globale d'horloges atomiques pour des tests de physique fondamentale, ainsi que des applications multiples en observation de la Terre, astronomie, en métrologie et navigation. La mission peut être réalisée dans un cadre d'opportunité, éventuellement dans le cadre du programme « GNSS Evolution » qui vient d'être décidé par l'ESA. La phase 0 permettra de définir les différentes options, en terme de physique fondamentale et d'applications, aussi bien qu'en ce qui concerne l'intérêt pour l'évolution des systèmes GNSS.

Le groupe a choisi d'insister aussi sur un certain nombre de recommandations qui concernent l'organisation de la communauté.

La communauté de physique fondamentale accède aujourd'hui à un nouveau statut vis-à-vis du

spatial, avec le prochain vol de plusieurs missions dédiées (MICROSCOPE, ACES, LISA PathFinder, plus T2L2 sur JASON 2). Son organisation, qui n'a pas encore pris en compte cette nouvelle réalité, doit être adaptée en tenant compte de l'expérience plus ancienne dans ce domaine des communautés de l'astrophysique et de la physique du système solaire.

Un problème important est celui de l'insertion de la physique fondamentale dans le pavage disciplinaire de l'INSU. Un autre problème relié est celui de l'absence de « laboratoire spatial » dans le domaine, même si plusieurs laboratoires ont maintenant acquis une réelle expérience du travail en commun avec les agences et les industriels. Une solution peut être trouvée par mise en place d'un « pôle spatial » ou d'un « pôle thématique » dédié à la Physique Fondamentale, et des discussions ont commencé à ce sujet entre les principaux laboratoires concernés.

A l'approche du vol, les problèmes du traitement des données, et de leur mise à disposition pour des communautés plus larges, vont se poser pour l'ensemble des missions concernées. Cette question, actuellement traitée au cas par cas, gagnera sans aucun doute à faire appel à des moyens mutualisés, là encore en tirant bénéfice de l'expérience des communautés de l'astrophysique et de la physique du système solaire.

En ce qui concerne la définition des réponses aux prochains appels d'offres, les objectifs scientifiques des futures propositions, leur faisabilité en terme de maturité technique, l'organisation de la communauté autour de ces propositions doivent être discutés dès maintenant par la communauté scientifique européenne en relation avec les agences jouant un rôle important à l'échelle européenne. Ceci implique un effort important d'organisation de la communauté à cette échelle, toujours en tirant bénéfice de l'expérience des communautés de l'astrophysique et de la physique du système solaire. Ceci implique aussi que les activités de développement R&T et de prospective soient mieux coordonnées entre les différentes agences, en particulier l'ESA et le CNES, dans une organisation qui privilégie clairement les développements reconnus les plus prometteurs aux plans scientifiques et technologiques.