

Pendule de Foucault et autres dispositifs inertiels 2/04/25

Introduction

Si on lance le pendule dans une certaine direction sur la Terre, le pendule de Foucault suit une trajectoire qui semble tourner par rapport au sol.

En fait, on constate expérimentalement, qu'au premier ordre au moins [1], notwithstanding l'action gravitationnelle des astres « proches » (Terre, Soleil, Voie lactée,..), il bat dans une direction pointant, au loin, vers un **point fixe** par rapport aux quasars lointains qui sont les repères du balisage de l'univers dans sa totalité, utilisés en astrométrie.

Le pendule étant un instrument de type « inertielle », sa trajectoire est une géodésique, mais de quelle géométrie?

Si on décrit ce phénomène qui semble (au premier ordre) ne **prendre en compte que l'univers entier**, en relativité générale, ce sera alors une géodésique de la géométrie de l'univers, telle que décrite par le modèle standard de la cosmologie.

Cette rotation du mouvement du pendule par rapport au référentiel donné par la Terre constatée est donc **apparente** car le phénomène physique détecté est la rotation de la Terre, ceci à l'instar du mouvement apparent du Soleil dans le ciel qui n'est, également, que la manifestation de la rotation de la Terre.

Les dispositifs de type inertielle (pendule, gyroscopes, gyromètres, accéléromètres, ..) ont la capacité de détecter des accélérations « propres », dont celles liées aux rotations qui sont des phénomènes **non inertiels**, ces phénomènes « non inertiels » ayant un caractère **intrinsèque**, (lié à la dynamique de l'objet concerné lui-même) ne pouvant pas être « annulés » dans un référentiel inertielle.

Principe de Mach

Mach a stipulé au 19^{ème} siècle que l'inertie [2] des corps résultait de leur interaction gravitationnelle avec tous les corps de l'univers. L'inertie était de nature **gravitationnelle**. En conséquence cela fondait le principe d'équivalence : masse inerte = masse pesante (masse gravitationnelle passive qui se couple au champ gravitationnel), puisque l'inertie était de nature gravitationnelle.

La relativité générale

En relativité générale tous les corps contribuent à la géométrie de l'espace-temps auquel, en retour, tous ces mêmes corps se couplent en suivant des géodésiques de cette géométrie. Sur le principe, on voit que cela va dans le sens de ce que Mach à stipulé.

On comprend alors que, le pendule est un instrument ayant un mouvement inertiel décrivant une géodésique, ce soit une géodésique de l'univers.

Pourquoi la direction ne change pas

Comme dans le modèle standard, l'univers est supposé **isotrope** en tout point, toutes les directions sont **équivalentes**, donc ce sont les conditions initiales qui vont déterminer une géodésique (parmi toutes celles possibles) dans l'univers, et il n'y a aucune raison physique pour qu'elle change, sauf à être perturbée.

Avant de passer à suite, considérons quelques autres instruments « inertiels, » permettant de détecter et mesurer des mouvements non inertiels.

Gyroscopes

Le gyroscope est un autre dispositif inertiel très utilisé. L'axe de rotation, d'une masse isotrope autour de cet axe de rotation et en rotation, en l'absence de perturbation, va pointer une direction fixe qui dépend des conditions initiales.

Accéléromètres et gyromètres

Accéléromètres

Cet instrument permet de détecter et mesurer des accélérations linéaires propres, par exemple, en utilisant l'inertie d'une masse, incluse dans le dispositif constituant l'accéléromètre, solidaire de l'accélération du corps.

Gyromètres

Ces instruments inertiels sont destinés à détecter et mesurer une rotation propre. On peut citer les gyromètres à fibre optique utilisant l'effet Sagnac pour leur précision.

Par rapport à quoi définit-on l' accélération et la rotation propres?

On entend souvent à propos de la rotation d'un objet : Mais par rapport à quoi tourne un objet?

Cette question sous-entend une approche newtonienne avec un espace absolu de référence. En fait, la détection d'un mouvement non inertiel (accélération linéaire propre ou rotation propre) par un dispositif inertiel, (Pendule, gyroscope, accéléromètre, gyromètre,..), se réfère au corps lui même.

Par rapport à son état à l'instant t , si l'état immédiatement suivant à $(t + dt)$ ne résulte pas d'un mouvement inertiel, indépendamment de toute référence extérieure, le dispositif va le détecter et éventuellement le mesurer.

L'exemple des trous noirs de Kerr en relativité générale

On peut se demander **par rapport à quoi** ces trous noirs dits « en rotation », par comparaison avec les trous noirs « statiques » de Schwarzschild par exemple, tourneraient.

Dans l'approche relativiste, comme un trou noir de Kerr définit un espace-temps complet (infini) effectivement, comme il ne tourne pas par rapport à lui-même, on peut être dubitatif.

En fait c'est la géométrie de cet espace-temps de Kerr, différente de celle des trous noirs « statiques » qui caractérise le phénomène de rotation.

Ainsi, par exemple, la **géodésique** d'un objet à l'infini, sans vitesse initiale tombant radialement, est une « radiale entrante », modélisée par une « **ligne droite** » pointant vers la singularité centrale (un rayon) dans la solution d'un trou noir statique, alors que le même objet, dans les mêmes conditions initiales va suivre des courbes, qu'on pourrait interpréter (de façon newtonienne) comme subissant une « rotation » alors qu'en fait il ne fait que suivre les géodésiques de cette géométrie .

La métrique de Kerr qui définit sa géométrie, qui contient un paramètre caractérisant cette rotation (un moment angulaire) est plus complexe de celle Schwarzschild, mais elle se ramène à elle quand ce paramètre est nul.

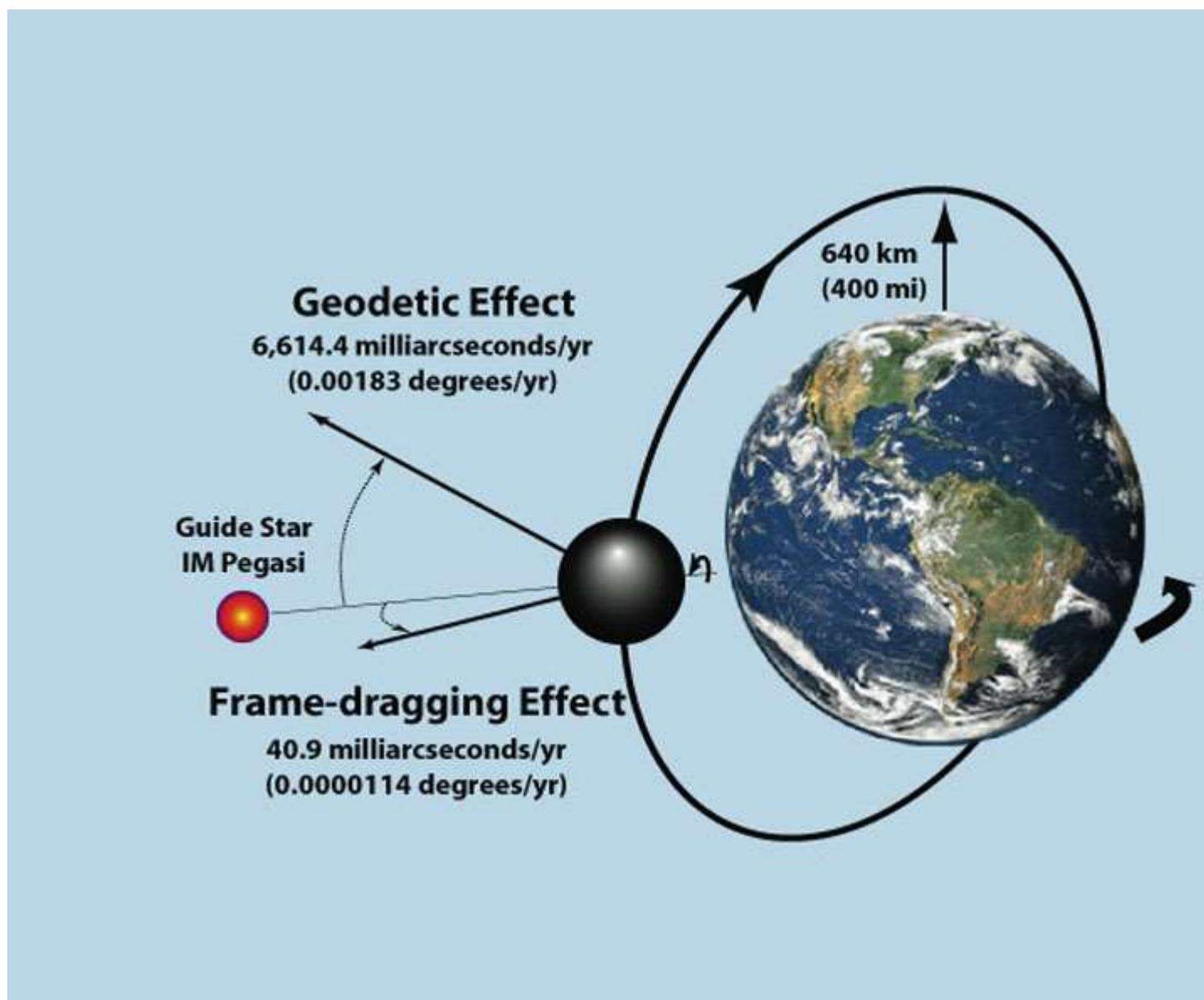
Situation physique

En fait cette condition d'homogénéité et d'isotropie que nous avons décrit pour expliquer pourquoi le pendule pointerait toujours une direction ne dépendant que

des conditions initiales est une **approximation** à l'échelle de l'univers, mais localement, elle n'est pas totalement respectée [3]. Ceci entraîne des effets locaux qui vont provoquer une **infime déviation** de la direction.

Exemple de mesure de la déviation géodésique dans un cas réel

Cela a été mesuré par l'expérience Gravity Probe B, [4] utilisant des gyroscopes ultra-précis qui ont montré une très faible déviation géodétique (liée à la courbure de l'espace-temps par la masse de la Terre) et une déviation « gravitomagnétique » (entraînement de référentiel) encore plus faible liée à la rotation de la Terre.



Article complet sur Gravity Probe-B, ci-dessous.

Le 8 Mai 2004 : Gravity Probe B

Lancement réussi, le 20 Avril 2004 (cf : <http://einstein.stanford.edu/>.)

En orbite polaire quasi idéale, à 640 km d'altitude, plan contient la référence.

Objectif : **Expérience** visant à vérifier « directement » **deux prédictions** de la **Relativité générale** dans le champ de gravitation terrestre (orbite polaire optimisée), les **effets sont « orthogonaux »** (cf figure ci dessous) ce qui permet de les séparer

- Effet de **précession géodésique (Effet de Sitter**, lié à la courbure de l'espace par le champ terrestre): **6,6 seconde d'arc/an** (précision de la mesure **0,01%**). [Remarque cet effet a déjà été validé expérimentalement sur le système Terre –Lune, précision **1%**]
- Effet **Lense Thirring** (entraînement du référentiel, liée à la rotation de la Terre, effet gravito magnétique): **0,042 seconde d'arc par an** (précision de la mesure **1%**): **Un défi technologique!!!!**
- En ce deuxième point, l'expérience permettra de valider les prévisions **«gravito-magnétiques»** de la Relativité générale, liés au champ crée par les masses en mouvement

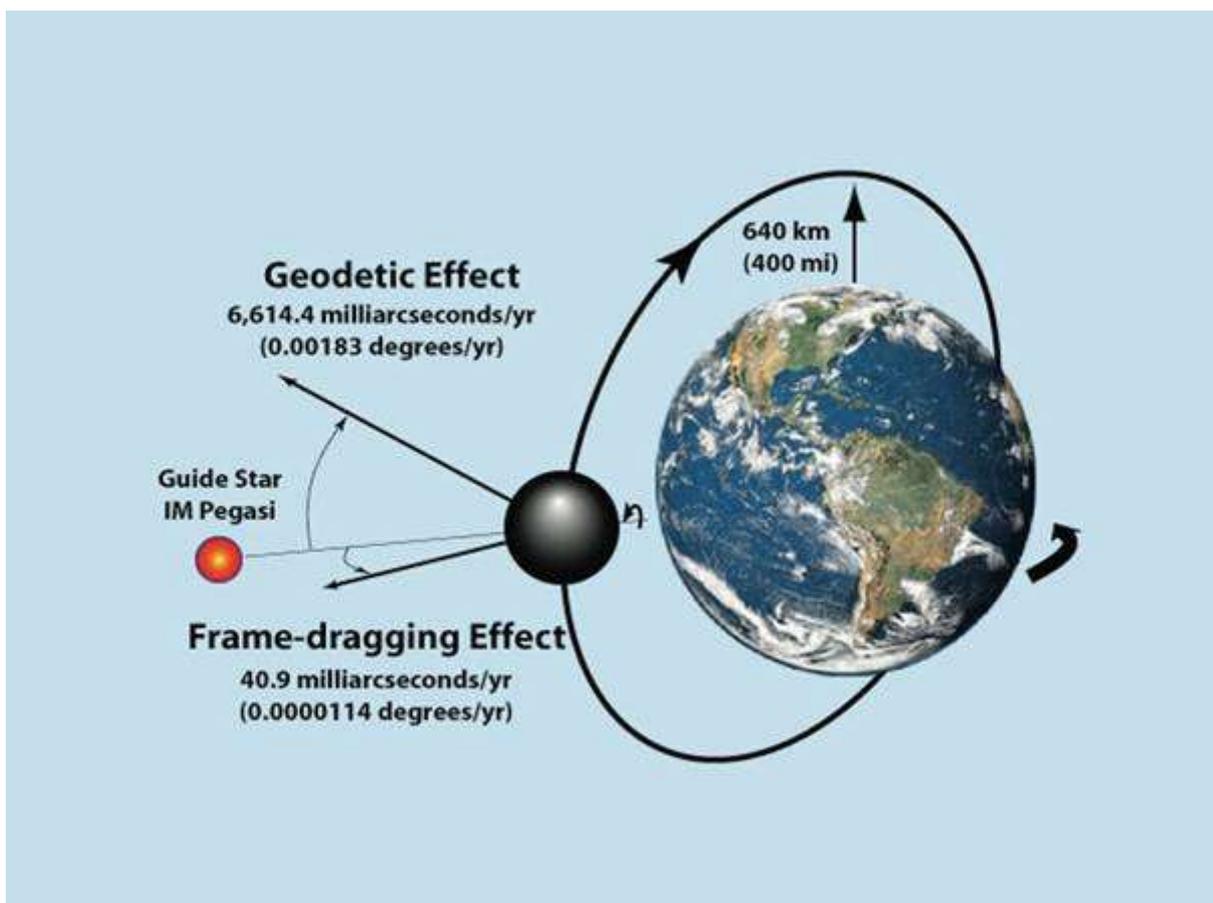
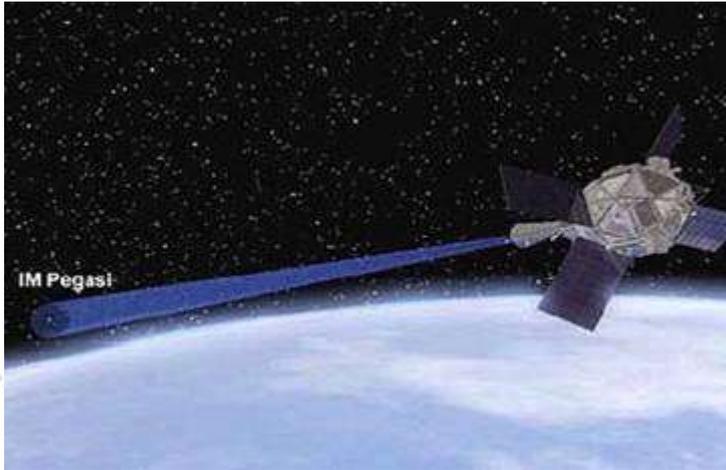


Schéma de principe (ci dessus) et vues du satellite en Vol (ci dessous)



Principe de l'expérience : Un système de **quatre gyroscopes** « ultra précis », (sens de rotation inversé par paire et le système tournant lentement autour de son axe de visée pour s'affranchir de dissymétries éventuelles), doivent fournir une référence inertielle stable, en l'absence de perturbation. Un **télescope** embarqué pointe très précisément (**0,0001 sec arc**) sur **une référence** lointaine dont la position (et dérive éventuelle) est connue (**HR8703, IM Pegasus**). Le plan de l'orbite polaire passe par cette référence. Une **dérive** de ces gyroscopes, dont l'axe est initialement // à celui de visée du télescope, par rapport à cette référence, liée aux deux effets testés de la valeur indiquée, est **prédite par la Relativité générale**

Défi technologique : Mesurer une dérive aussi faible que **0,042 seconde d'arc /an** du système inertielle ainsi constitué nécessite de réaliser un système 10^6 (**un million** de) fois plus stable que le meilleur système inertielle en service.

Gravity Probe se propose de vérifier cet effet à **1%** : nécessite une **stabilité de 10^{-11} degré d'arc / Heure**.

Réalisation de la prouesse technologique :

L'environnement : Les équipements expérimentaux du satellite sont à l'intérieur d'un Vase Dewar contenant **2328L** d'hélium superfluide, pour maintenir les équipements à **1,8 °K** pendant **2 ans**.

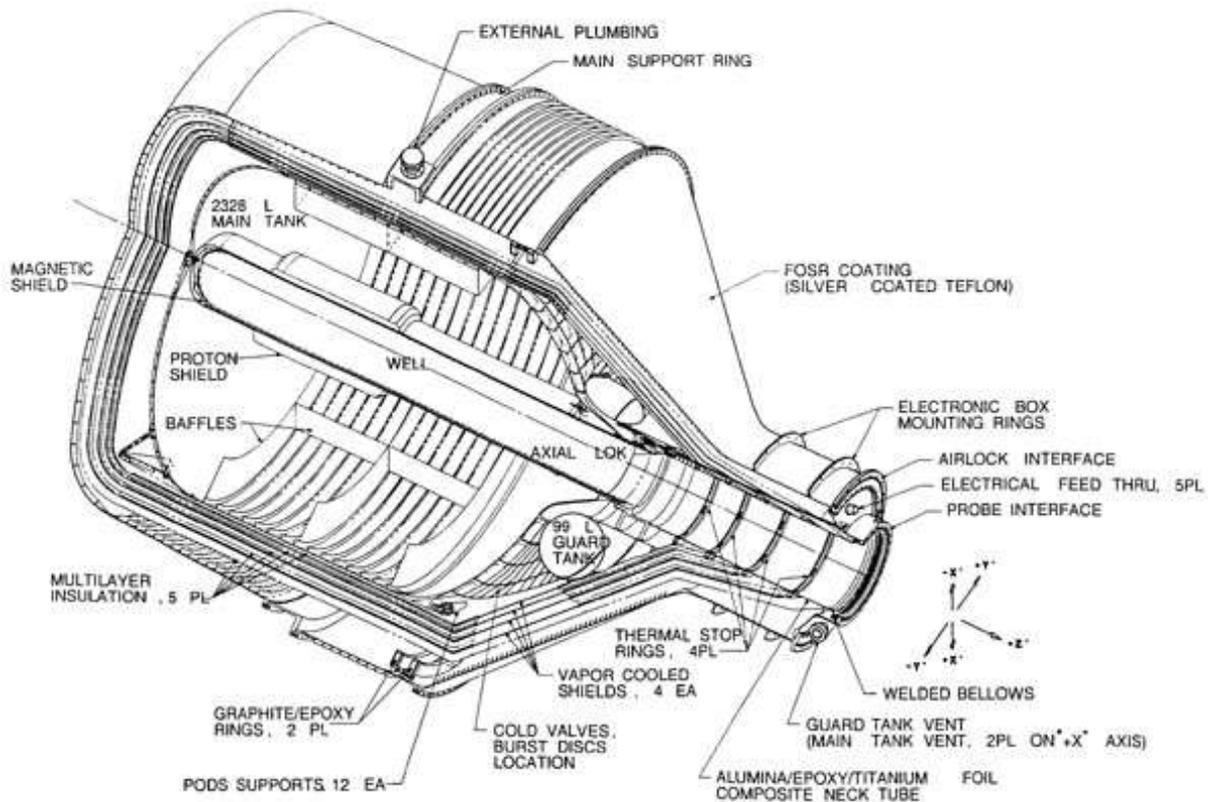
Un blindage magnétique pour s'affranchir du champ terrestre et solaire à plusieurs niveaux en particulier par des métaux en état de **supra conductivité** permettent de réduire le champ résiduel à l'intérieur à moins de **10^{-17} Gauss**.

Le vide fait dans l'équipement est de **10^{-14} bar**

Un boule libre identique à celle des gyroscopes, dans une cavité, à l'abri des perturbations extérieures (vent solaire, atmosphère résiduelle, magnétisme...) au centre de gravité, fournit la référence inertielle du centre de gravité du système sur la trajectoire géodésique (Accélération résiduelle à **$10^{-10}G$**).

Au froid, dans un vide poussé, en micro gravité, dans des conditions de symétrie maximum, protégés des perturbations électriques et magnétiques, les gyroscopes tournent dans un environnement qui les isole pratiquement complètement de leur milieu

Vue générale de l'enveloppe de l'expérience



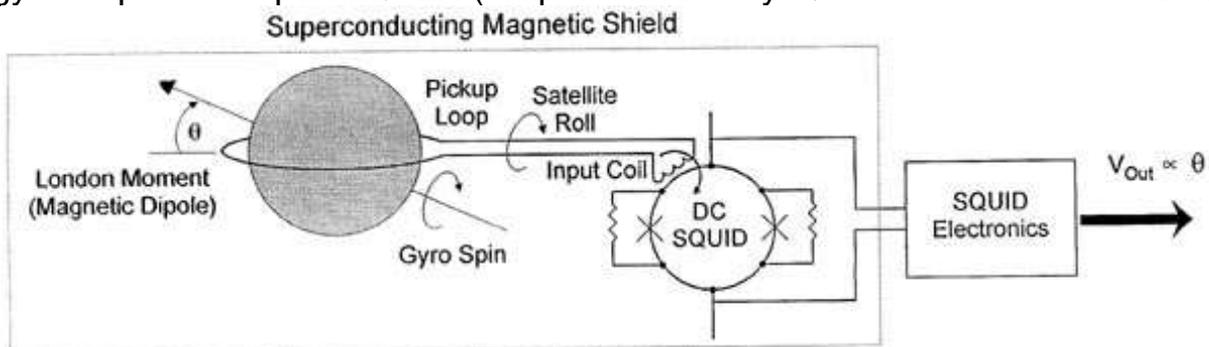
Les gyroscopes : Petites **boules de quartz** fondues de la taille d'une balle de ping pong, revêtues d'une couche de **nobium** (**supra conducteur** à cette température) , ils sont les **objets les plus ronds** et les plus homogènes que l'on trouve dans l'univers (à l'exception peut être des étoiles à neutrons). Ils sont en **lévitation électrostatique** dans une coquille munie d'électrodes (faible tension)

La vitesse de rotation **10 000 tr/mn** est communiquée (en vol par **un jet sonique d'hélium gazeux** (ensuite pompé)). Compte tenu du vide cette vitesse ne varierait pas de plus de **1% en 1000 ans**.



Vue du Gyroscope (en quartz non métallisé) et de sa coquille en quartz

Le système de lecture (le moins perturbant possible) de la position de l'axe du gyroscope se fait par **SQUID**. (Superconductivity Quantum Interference Device)



Principe de la lecture d'une variation de position de l'axe de rotation

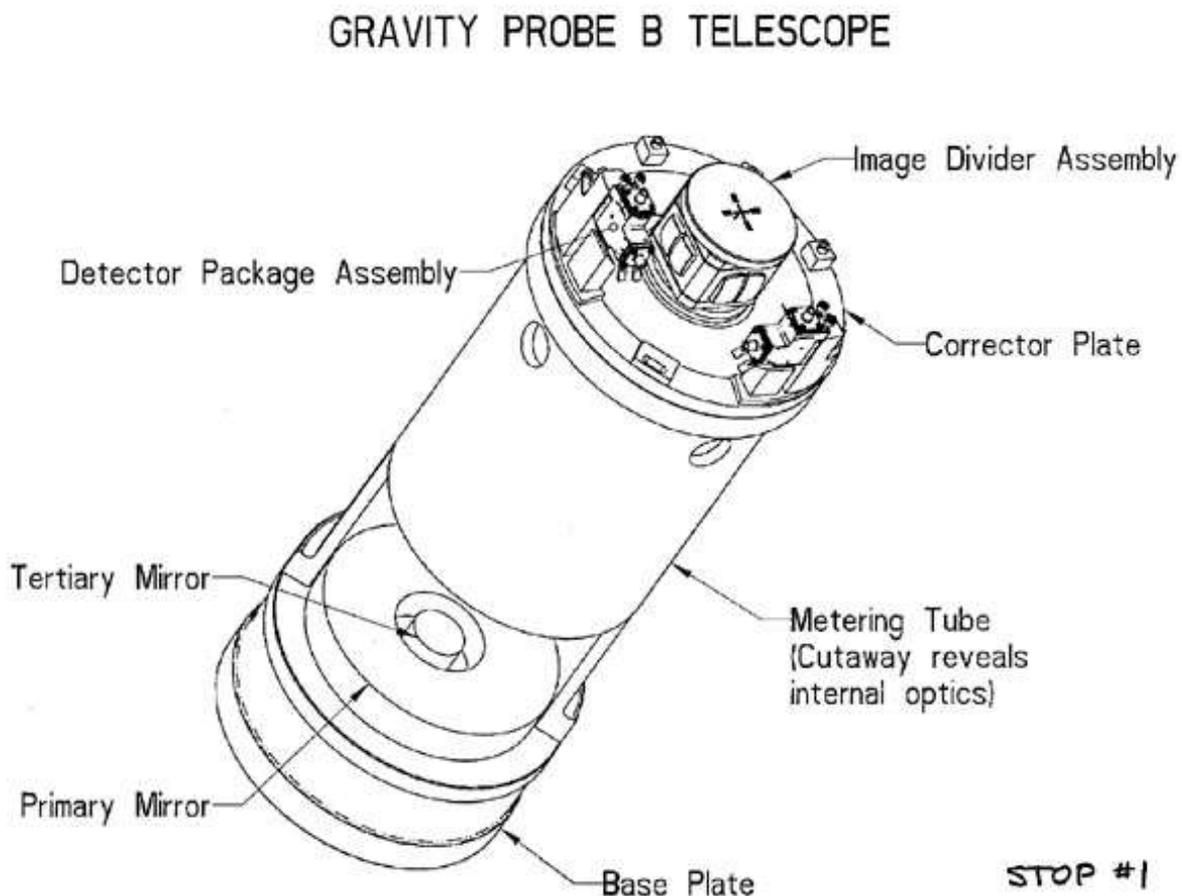
Le Télescope : Réaliser un pointage à **0,1 milliarcseconde, 1000 fois mieux** que le pouvoir séparateur des meilleurs télescopes n'est pas une mince affaire.

Comme le reste il fait d'un bloc de quartz fondu, son ouverture est de **15 cm** environ, sa focale de **3,75 m** (s'agissant d'un Cassegrain sa longueur est de **35 cm**)

Pour la mesure, il utilise une technique différentielle (séparation du faisceau en 2, et séparation de chaque image par un prisme en deux demi disques, chaque paire de demi images transmise à des photo-détecteurs qui génèrent un signal

proportionnel au déplacement). Il utilise « l'aberration astronomique » pour calibrer ses mesures.

La source IM Pegasus a été choisie pour sa luminosité et la connaissance très précise (**0,0002 sec-arc/an**) qu'on a de sa position et dérive par rapport à un référentiel extragalactique (Campagne de mesures par interférométrie avec le **VLBI**).



Précautions particulières : L'orbite étant « polaire » le satellite est particulièrement exposé aux agressions des rayonnements (hors de la protection du bouclier magnétique terrestre). Il a déjà subi et supporté avec succès ce genre d'épreuve au cours de sa courte période de pré-activité.

<https://physics.aps.org/articles/v4/43>

Notes

[1] En fait, comme l'univers n'est pas du tout homogène et isotrope localement, même si cet effet est faible localement pour la Terre et même le Soleil, la **géodésique** va subir **localement** d'infimes déformations par rapport à la géodésique d'un univers parfaitement homogène et isotrope.

Cet aspect du problème sera explicité dans la fin du document.

Insistons sur le fait que c'est bien la **géodésique qui est localement déformée** par rapport à la géodésique si l'univers était homogène et isotrope. La perturbation du mouvement du pendule, dispositif inertiel, est liée au fait que le pendule suit cette géodésique déformée localement.

Ceci peut être observé comme l'expérience « Gravity Probe-B » le montre (avec des gyroscopes). Bien entendu, compte-tenu de la faiblesse de la perturbation, le dispositif inertiel doit être quasi-parfait et très sensible.

[2] L'inertie cette capacité des corps de résister à un changement d'état, un état inertiel se caractérisant par le fait que, ponctuellement, aucune contrainte n'est ressentie.

[3] La géométrie locale n'est pas celle de l'univers global, par exemple autour de la Terre ce serait une géométrie décrite par la métrique de Schwarzschild avec un effet Lense-Thirring pour sa rotation.

[4] Pour l'effet géodétique, cela a été mesuré (et confirmé) avec une bonne précision, pour l'effet Lense-Thirring la précision est médiocre du fait de l'extrême faiblesse de la perturbation. Il semble que les auteurs de l'expérience aient un peu surestimé les performances des gyroscopes (réputés 10 fois plus performants que ce qui existait alors) qui ont été limités pour mesurer l'effet Lense-Thirring.

Bien entendu c'est parce que cet effet est très petit pour un astre comme la Terre, mais pour des étoiles à neutrons et encore plus pour des trous noirs de Kerr, où il existe une ergosphère, région entraînant inexorablement en rotation tous les éléments physiques y compris les photons, cet effet Lense-Thirring devient très important.

Certains ont même mis en doute la validité de la mesure, obtenue après de nombreux calculs destinés à éliminer les effets indésirables.

publié par J. FRIC

le [19 mars 2025](#)

FULL MENU: CLICK ON SEARCH ICON

Recherche pour :