

Tests de la gravitation relativiste

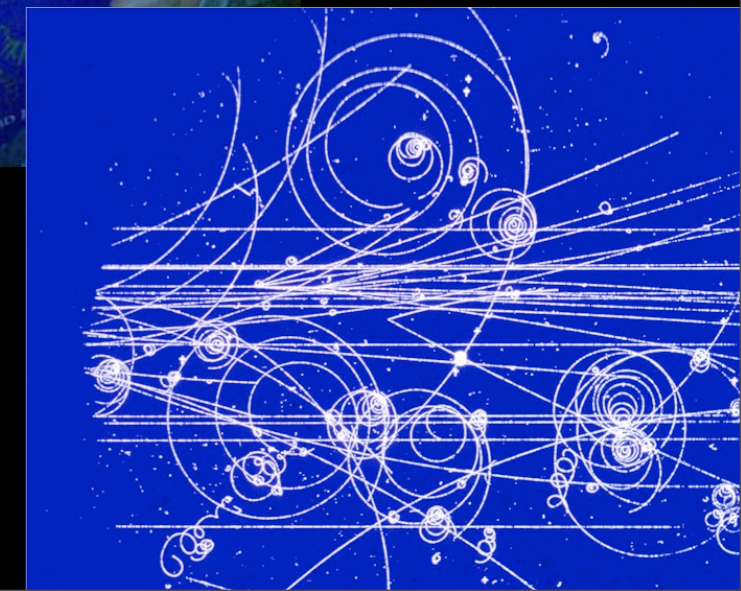
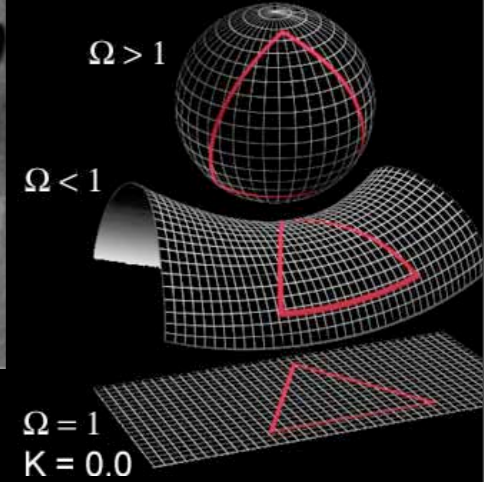
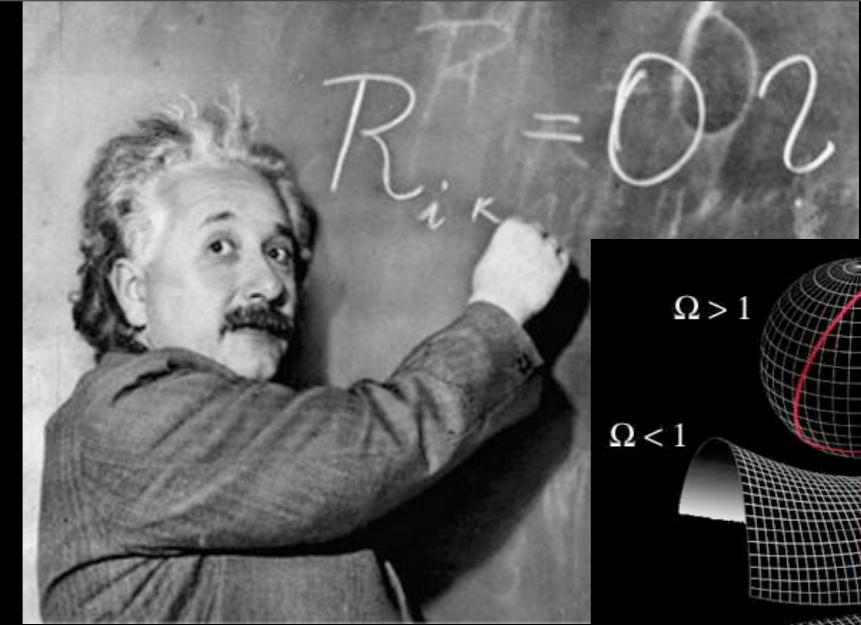
C. Le Poncin-Lafitte, Obs. de Paris - SYRTE

Enjeux des tests de gravitation

Newton 1686	Poincaré 1890	Einstein 1912	Nordstrom 1912	Nordstrom 1913
Einstein & Fokker 1914	Einstein 1916	Whitehead 1922	Cartan 1923	Fierz & Pauli 1939
Birkhoff 1943	Milne 1948	Thiry 1948	Papapetrou 1954	Papapetrou 1954
Jordan 1955	Littlewood & Bergmann 1956	Brans & Dicke 1961	Yilmaz 1962	Whitrow & Morduch 1965
Kustaanheimo & Nuotio 1967	Deser & Kaurent 1968	Bergmann 1968	Nodtvedt 1970	Bollini et al. 1970
Wagoner 1970	Rosen 1971	Ni 1972	Will & Nordtvedt 1972	Ni 1973
Bekenstein 1977	Barker 1978	théories modernes (après 1980...)		

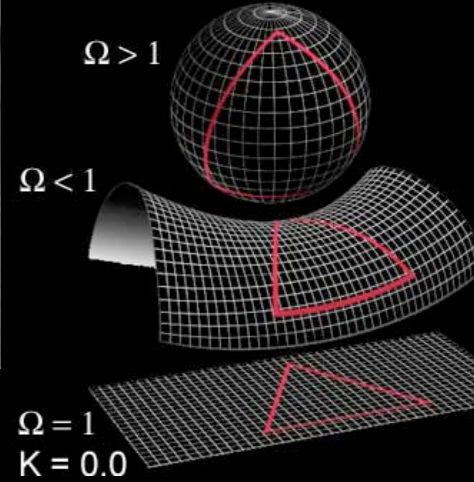
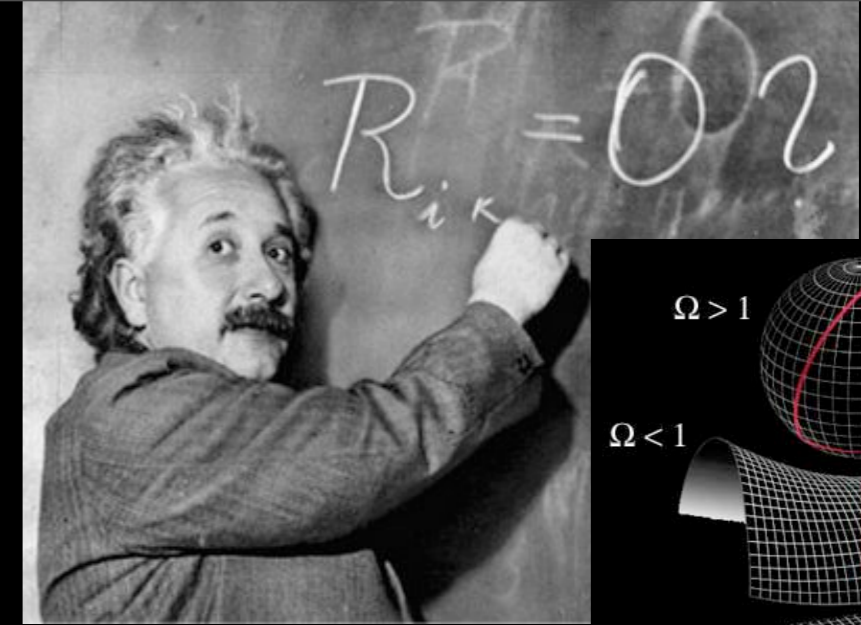
Enjeux des tests de gravitation

Newton 1686	Poincaré 1890	Einstein 1912	Nordstrom 1912	Nordstrom 1913
Einstein & Fokker 1914	Einstein 1916	Whitehead 1922	Cartan 1923	Fierz & Pauli 1939
Birkhoff 1943	Milne 1948	Thiry 1948	Papapetrou 1954	Papapetrou 1954
Jordan 1955	Littlewood & Bergmann 1956	Brans & Dicke 1961	Yilmaz 1962	Whitrow & Morduch 1965
Kustaanheimo & Nuotio 1967	Deser & Kaurent 1968	Bergmann 1968	Nodtvedt 1970	Bollini et al. 1970
Wagoner 1970	Rosen 1971	Ni 1972	Will & Nordtvedt 1972	Ni 1973
Bekenstein 1977	Barker 1978	théories modernes (après 1980...)		

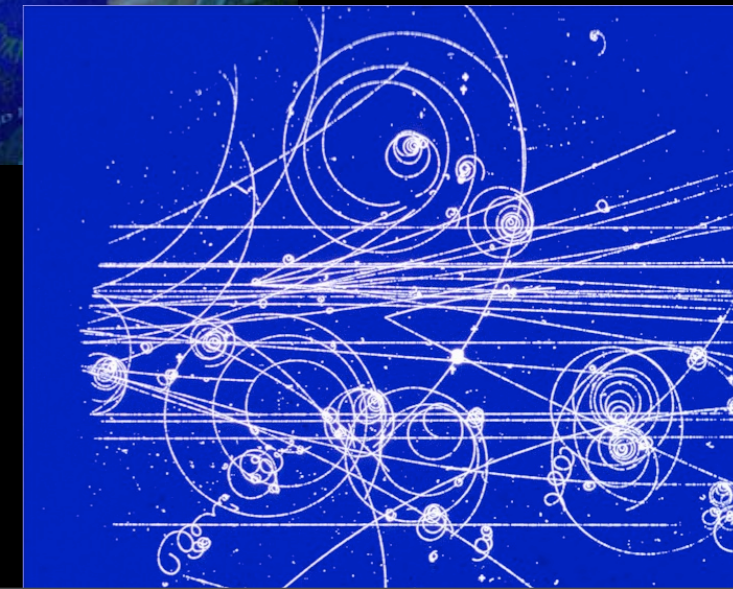


Enjeux des tests de gravitation

Newton 1686	Poincaré 1890	Einstein 1912	Nordstrom 1912	Nordstrom 1913
Einstein & Fokker 1914	Einstein 1916	Whitehead 1922	Cartan 1923	Fierz & Pauli 1939
Birkhoff 1943	Milne 1948	Thiry 1948	Papapetrou 1954	Papapetrou 1954
Jordan 1955	Littlewood & Bergmann 1956	Brans & Dicke 1961	Yilmaz 1962	Whitrow & Morduch 1965
Kustaanheimo & Nuotio 1967	Deser & Kaurent 1968	Bergmann 1968	Nodtvedt 1970	Bollini et al. 1970
Wagoner 1970	Rosen 1971	Ni 1972	Will & Nordtvedt 1972	Ni 1973
Bekenstein 1977	Barker 1978	théories modernes (après 1980...)		



Quel est le lien ?



Suivons les différentes échelles d'expérimentations pour notre plan d'exposé

- Dans le laboratoire...
- Dans notre banlieue proche...
 - Projets spatiaux dédiés à la gravitation
 - l'apport de la géodésie spatiale
 - les données du laser-Lune
- Passons à l'échelle du Système Solaire...
 - Des expériences dédiées
 - de l'utilisation des données de navigation spatiale
- Vers de nouveaux tests de haute précision...
- Les tests qui n'en étaient pas vraiment...

Travaux en laboratoire

Mais pourquoi au laboratoire ?

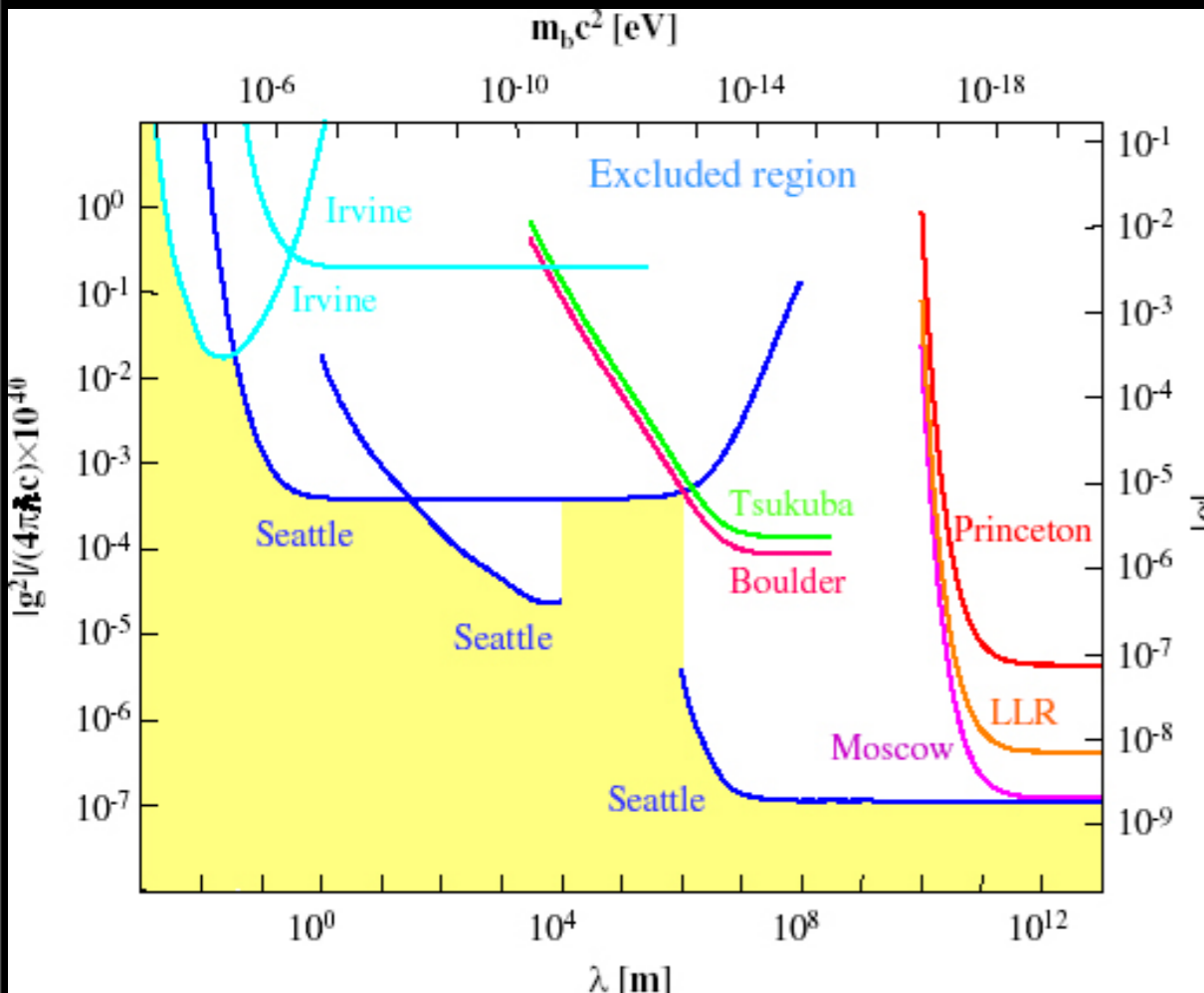
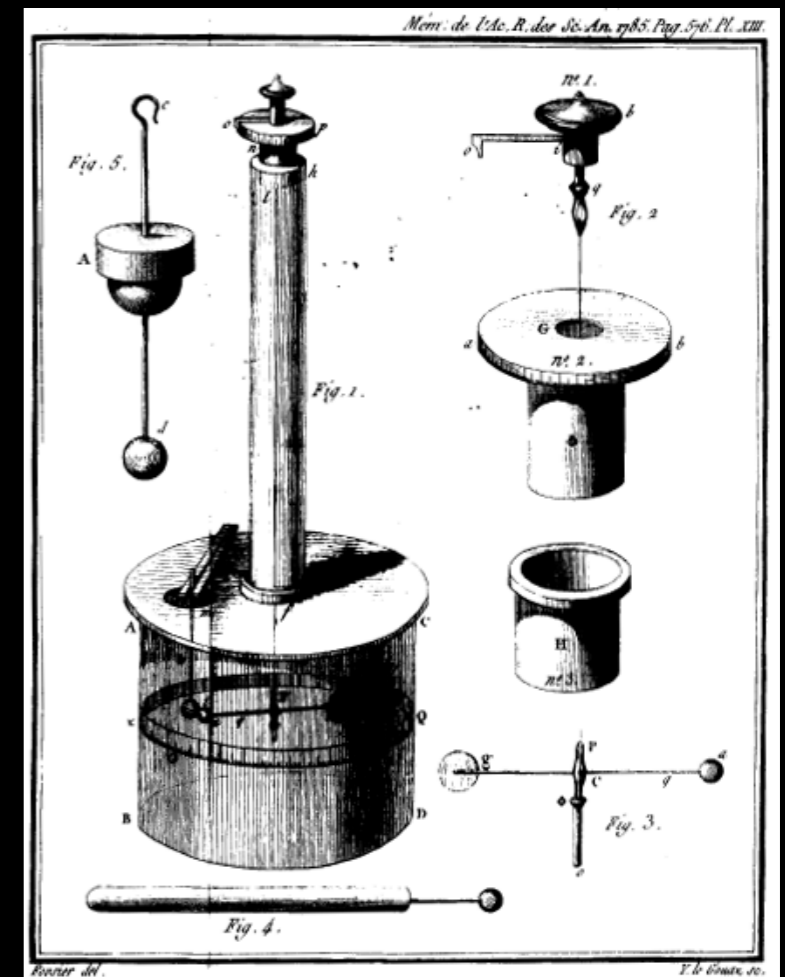
- Nombre de théories alternatives à la Relativité introduisent des forces à courte (ou longue) distance
 - tenseur-scalaire
 - tenseur-vecteur
- connexion non symétrique (torsion)
- Super-gravité, M-théorie
- Gravité quantique à boucle

TeVS (Milgrom, Bekenstein)

Méthodes expérimentales en labo

Test du Principe d'Equivalence:

- Balance de Torsion
- Expérience de chute libre avec des atomes froids



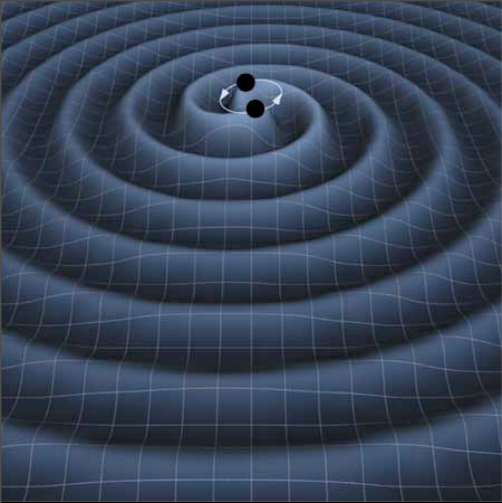
Contraintes sur un potentiel de Yukawa

Déviations de la loi de Newton en $1/r^2$

- Balance de torsion
- Pendule tournant
- Torsion parallel-plate oscillator
- "Spring board" resonance oscillator

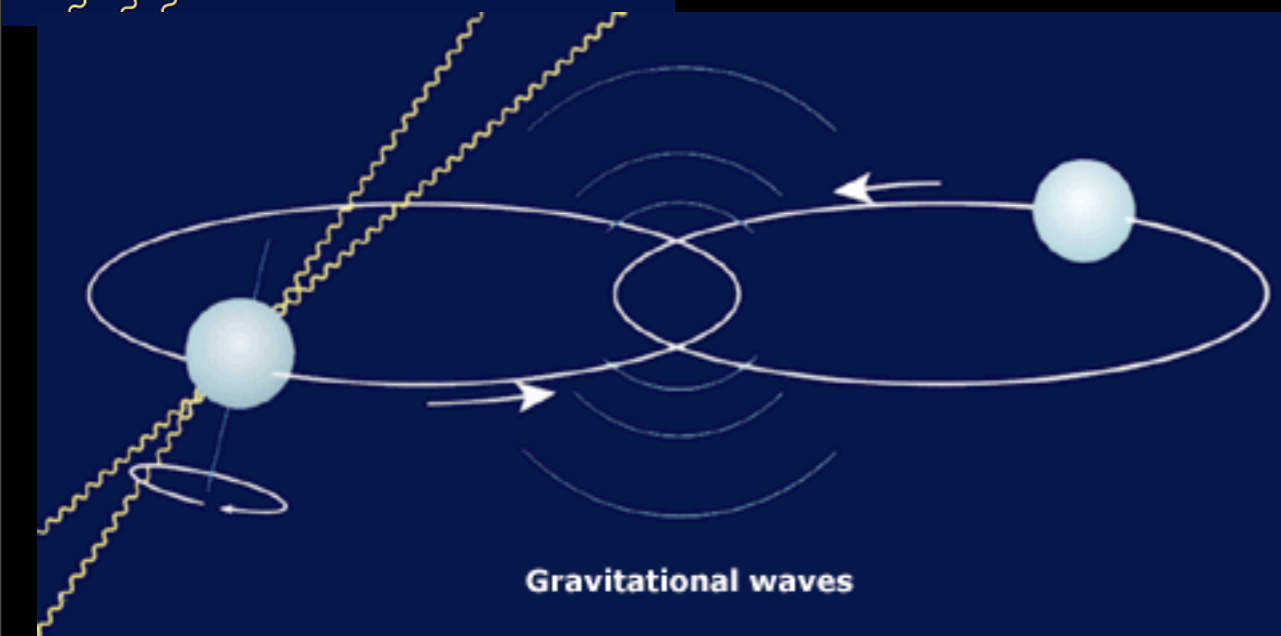
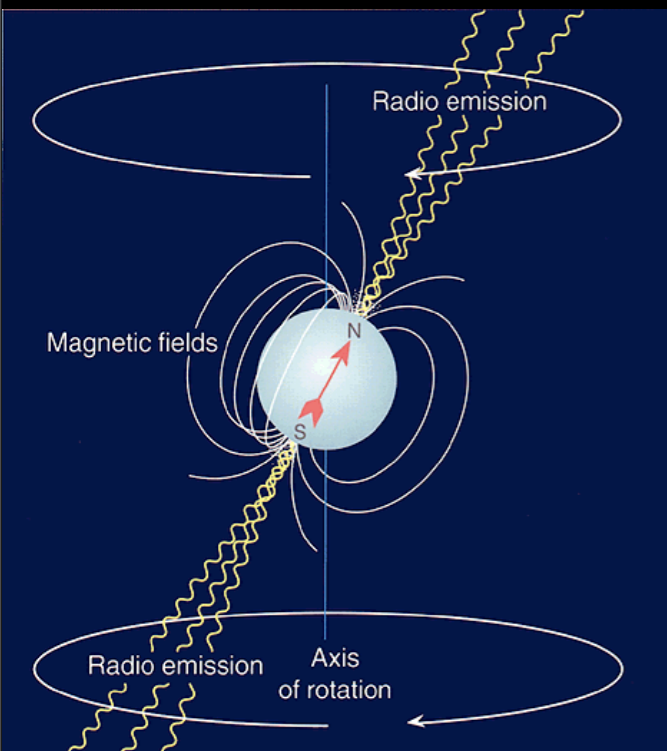
Existence d'extra-dimensions et d'échelle de compactification avec le LHC

Les Ondes Gravitationnelles.



On observe en radio
les pulsars binaires

En calculant leur
période orbitale, on
peut indirectement
détecter les ondes
gravitationnelles.



Détection Directe



Au voisinage de la Terre

Gravity probe A, Vessot et al. 1980

Lancement : 1976

Durée : 1h55mn

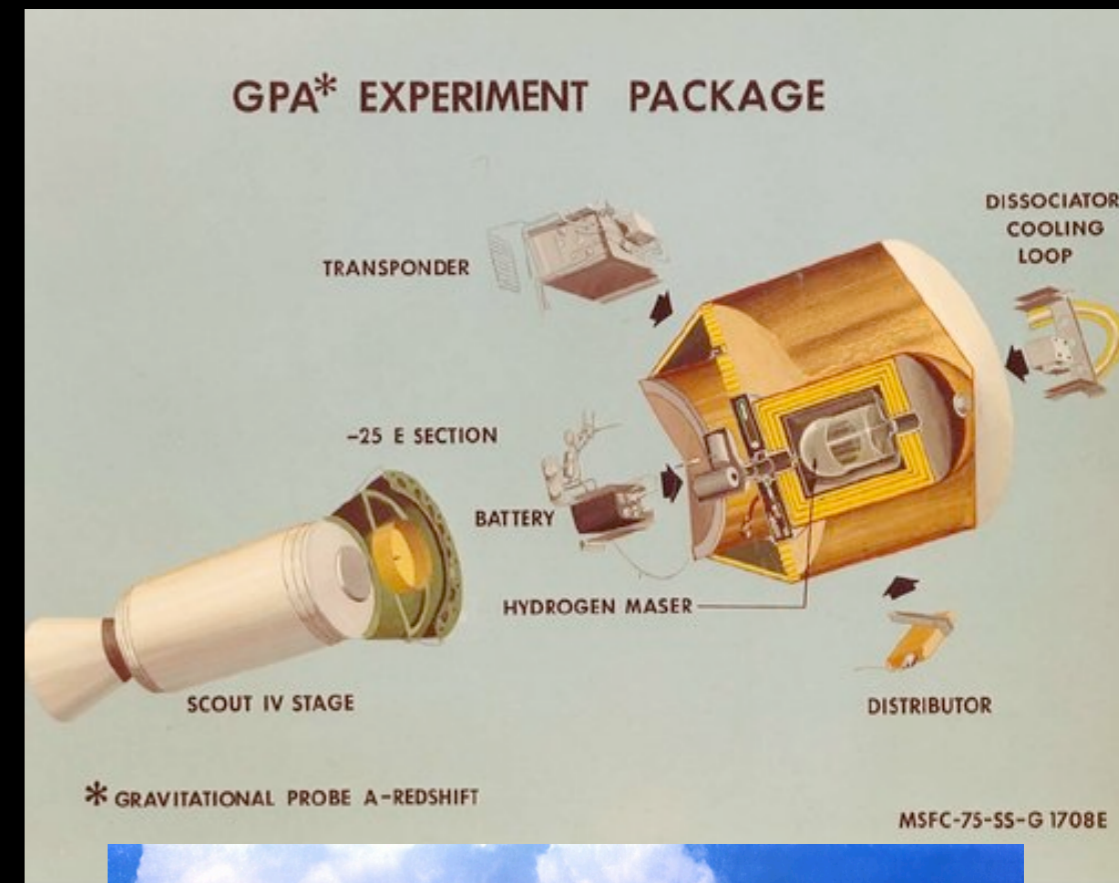
Où : quelque part près des Wallops
Island en Virginie

But: mesure du redshift

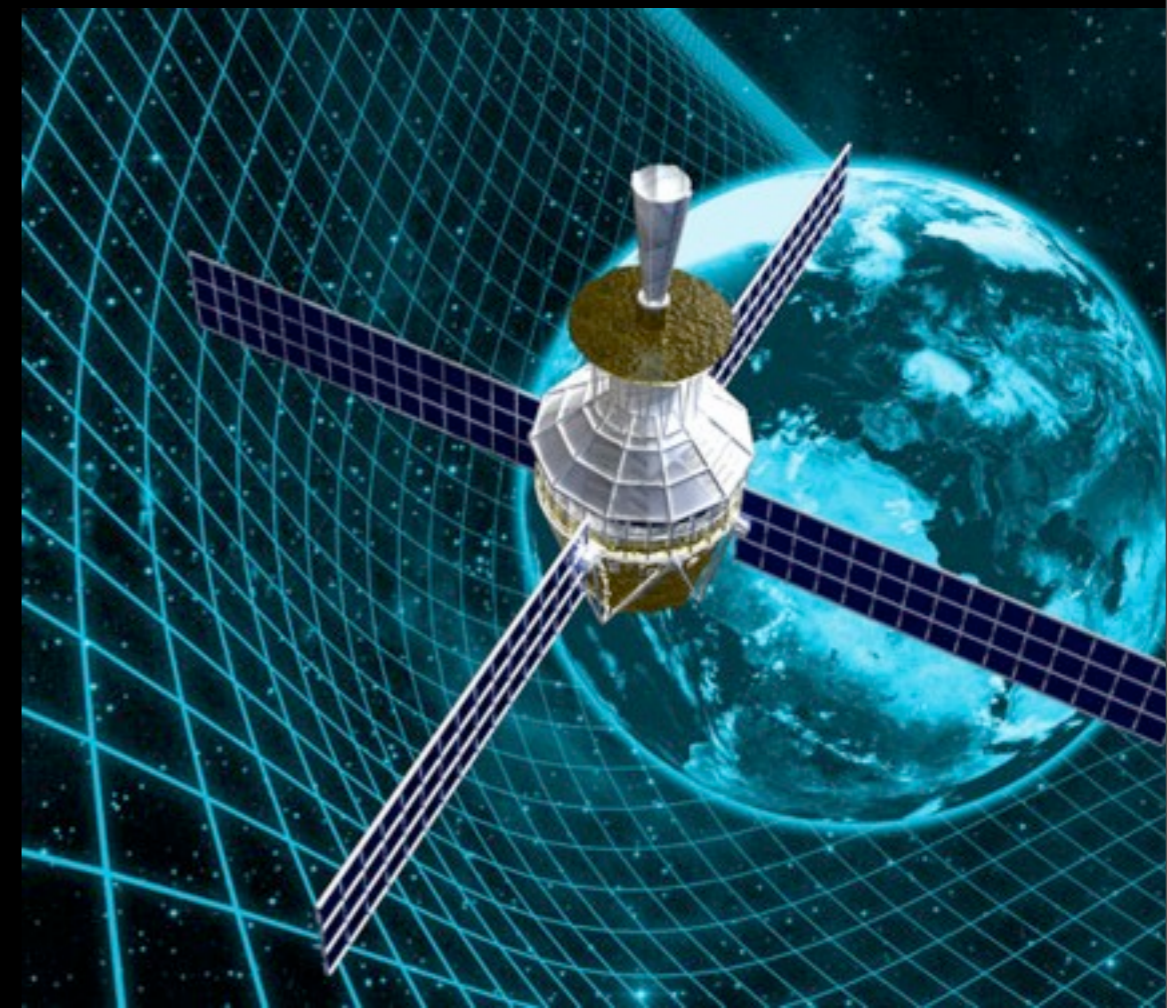
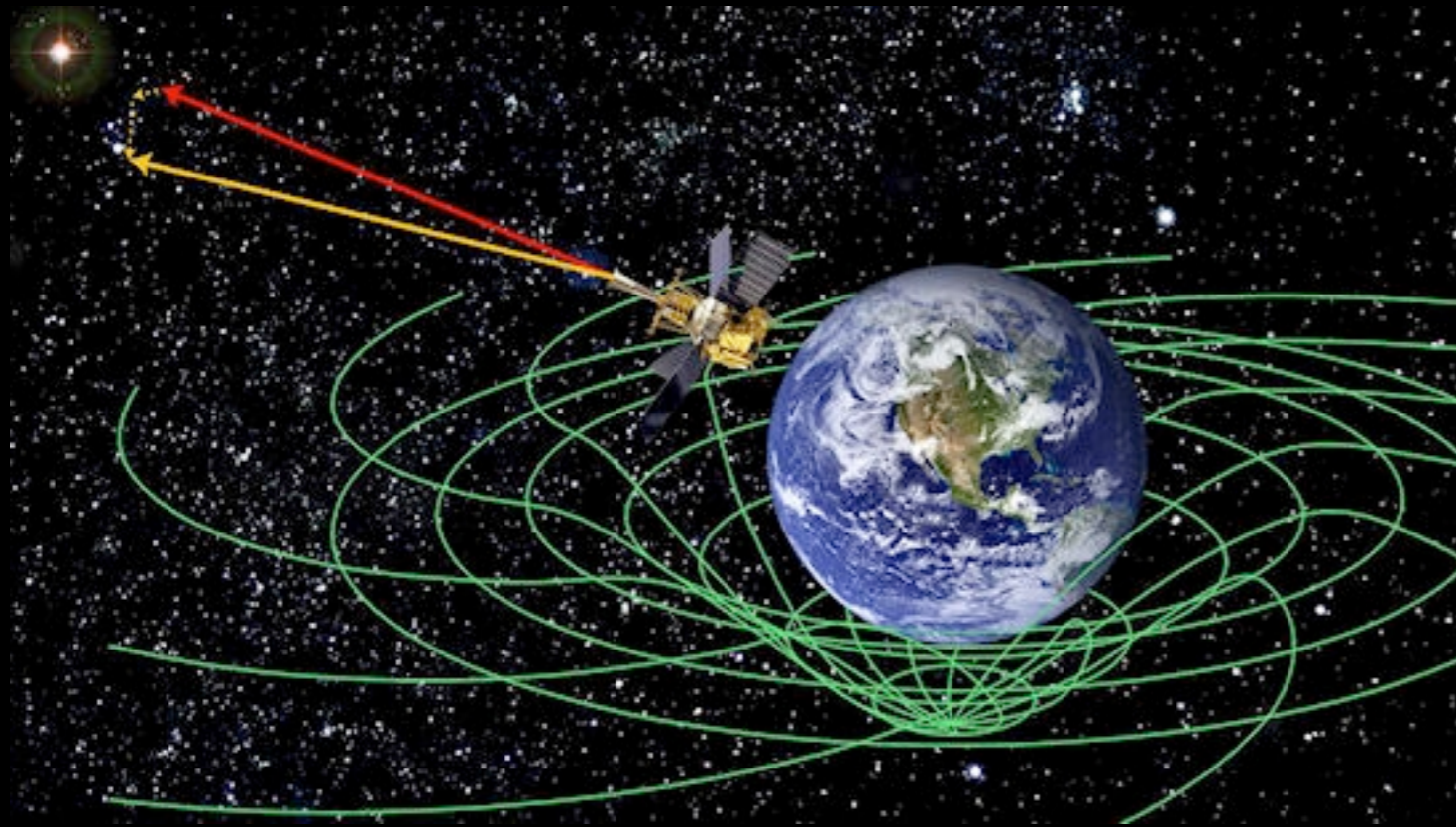
Un maser est placé dans une roquette Scoutt

On compare avec une horloge au sol

On trouve un décalage, précision 0.01%



Gravity Probe B



But : mesurer la précession de Lense Thirring

gyroscope de GPB

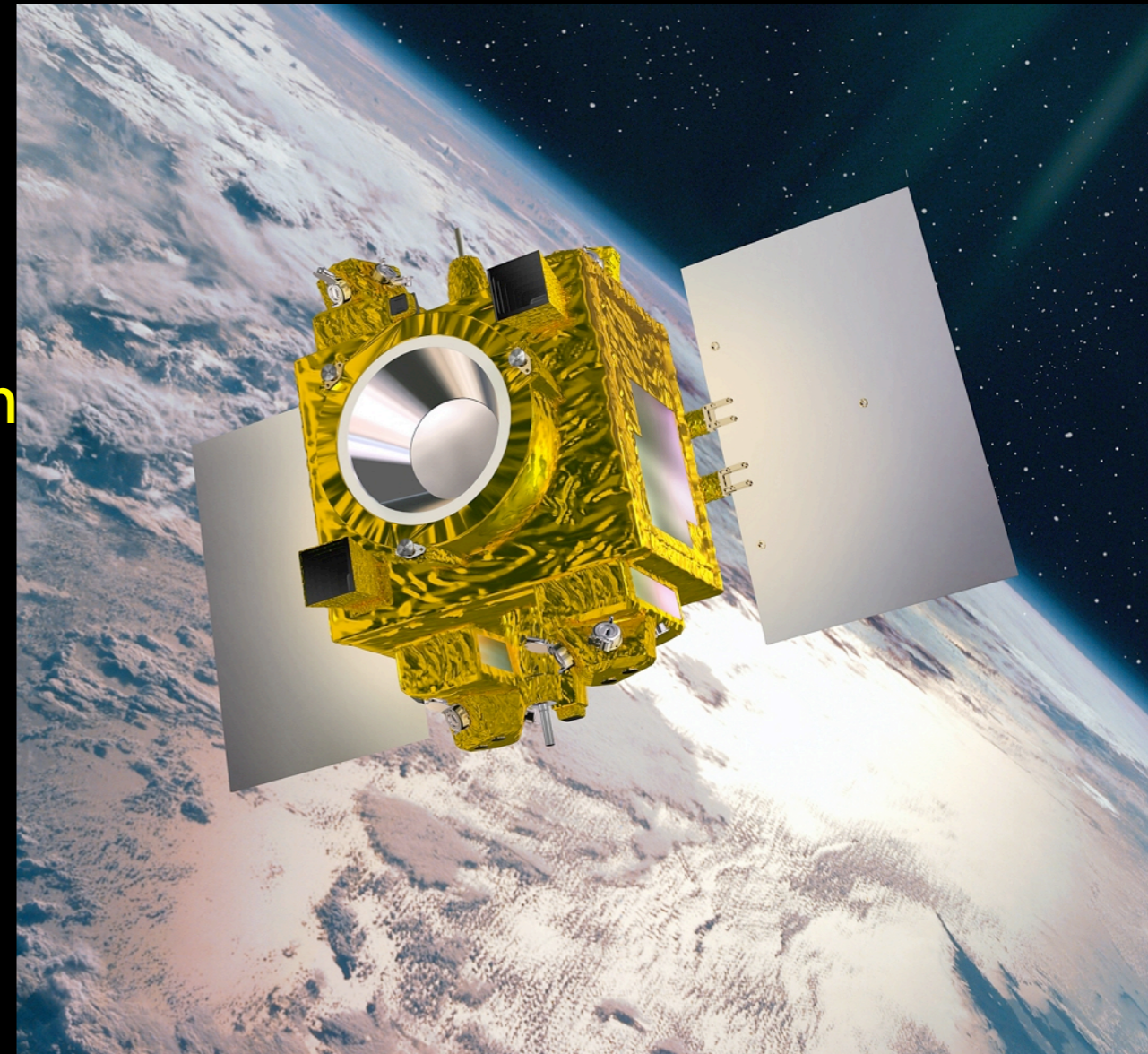
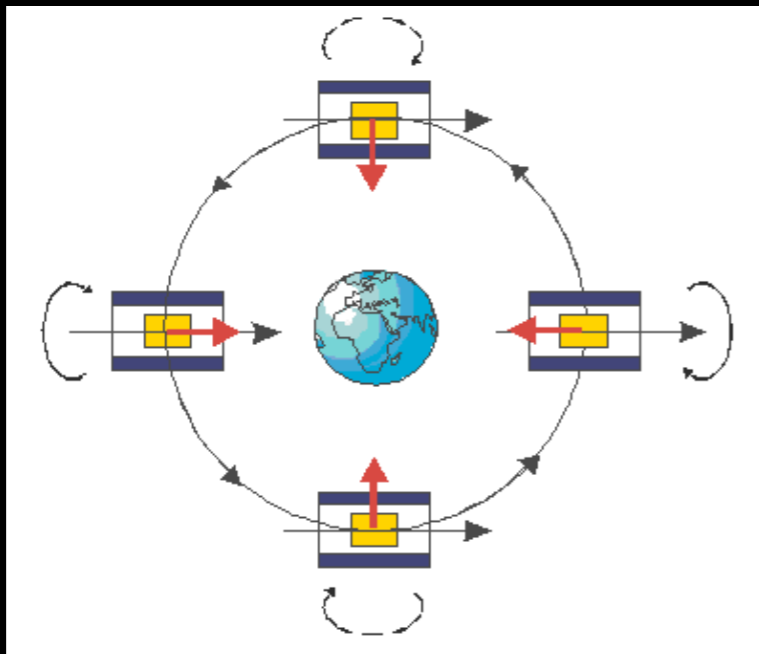
MICROSCOPE

MICRO-Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence

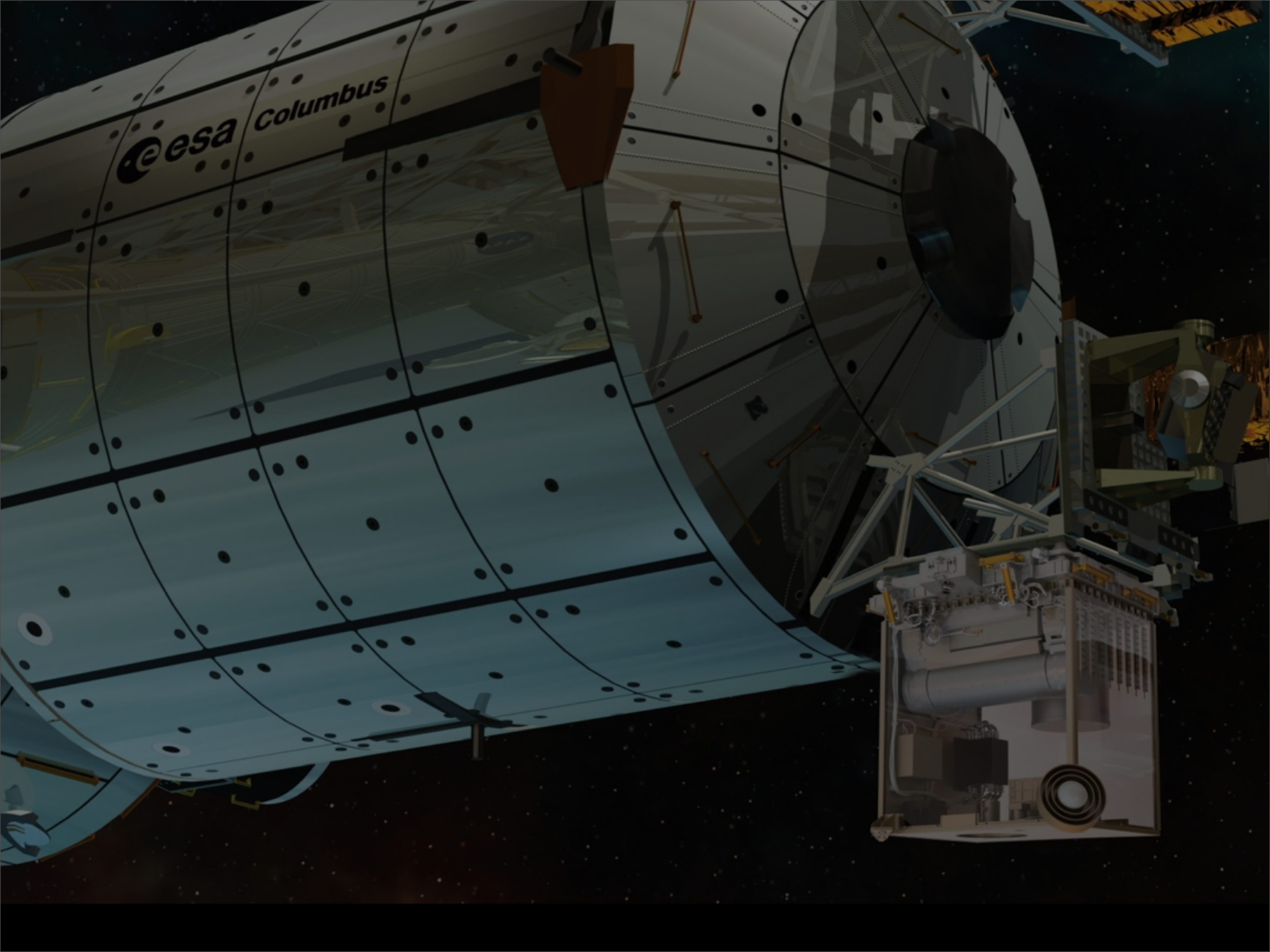
Durée de vie: 1an

Orbite polaire héliosynchrone à 700km

Instruments: 2 accéléromètres différentiels

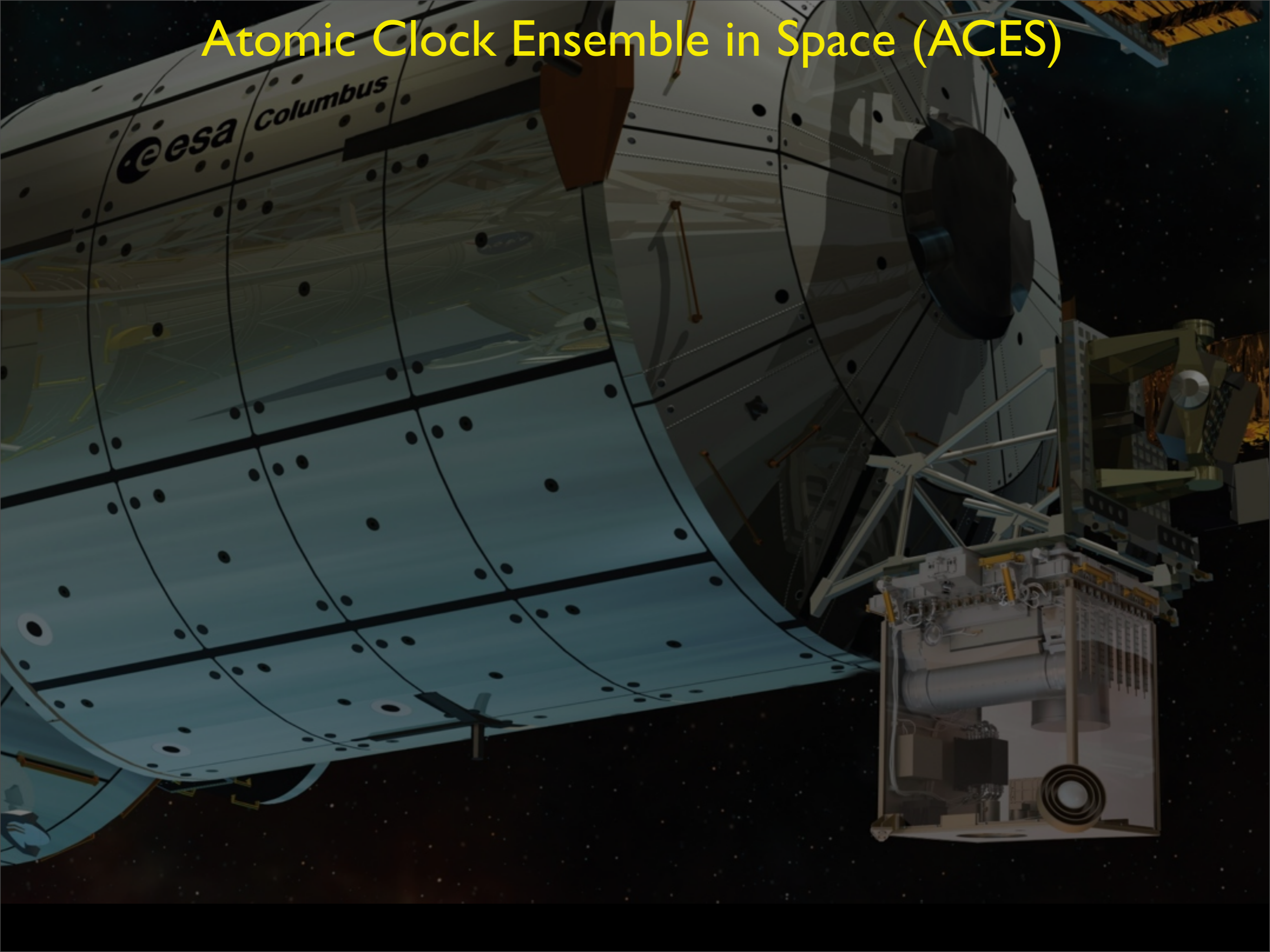


© CNES - Mars 2006/Illust. D. Ducros

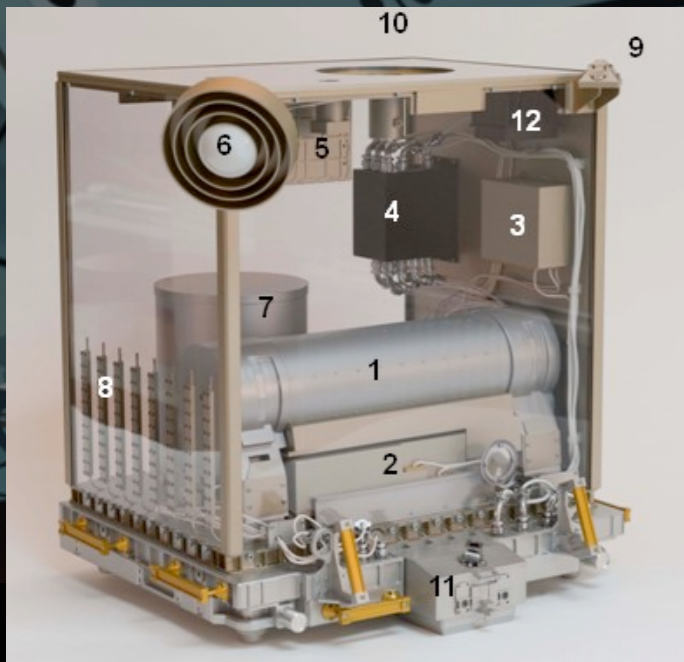
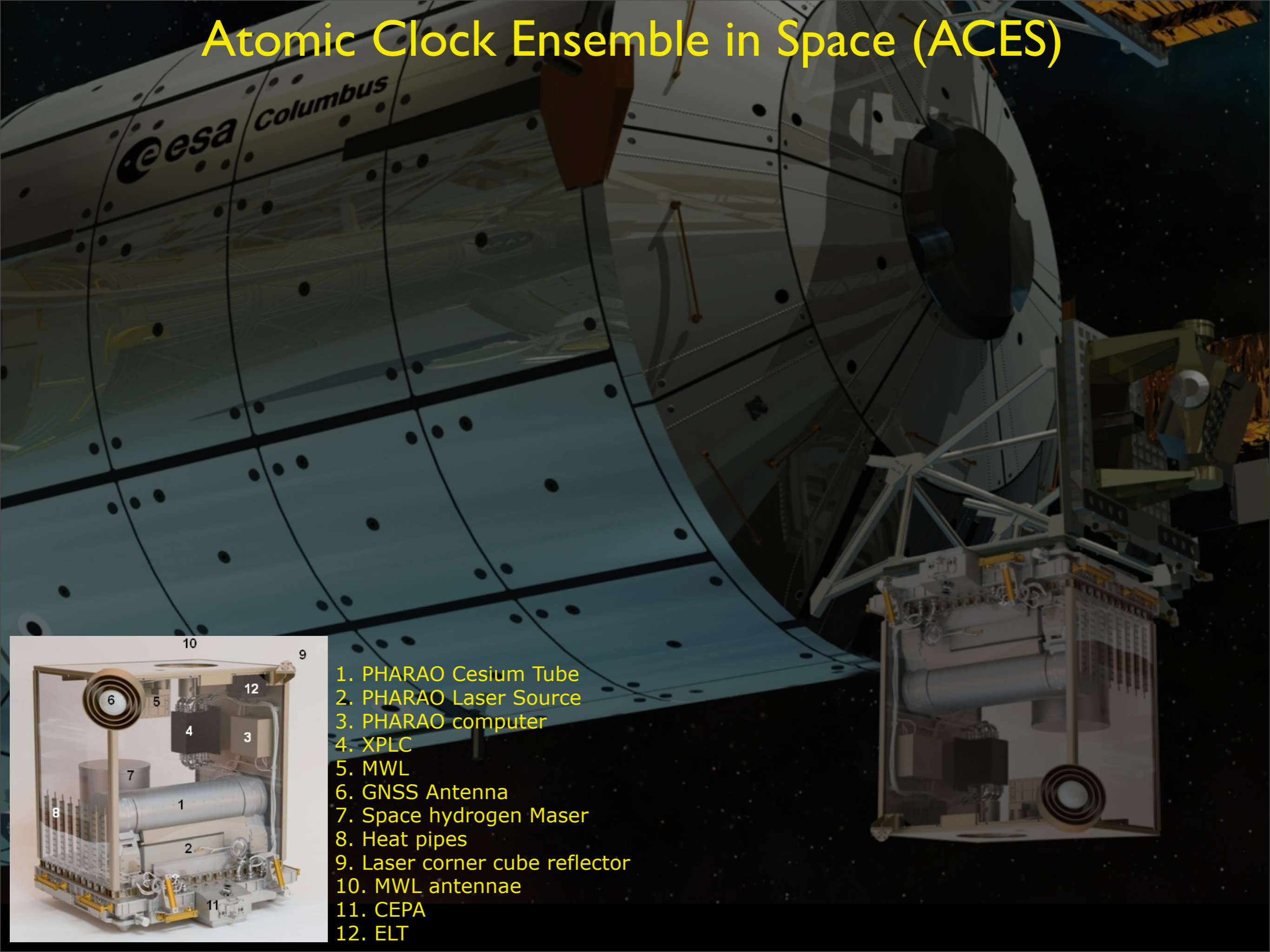


esa Columbus

Atomic Clock Ensemble in Space (ACES)



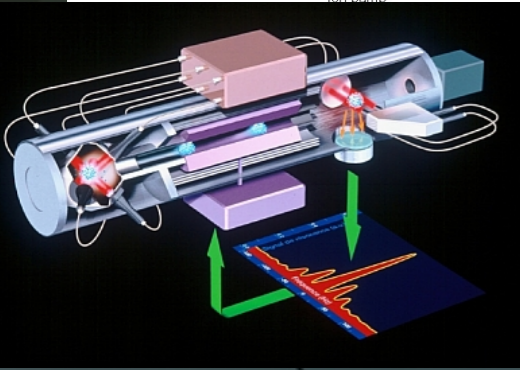
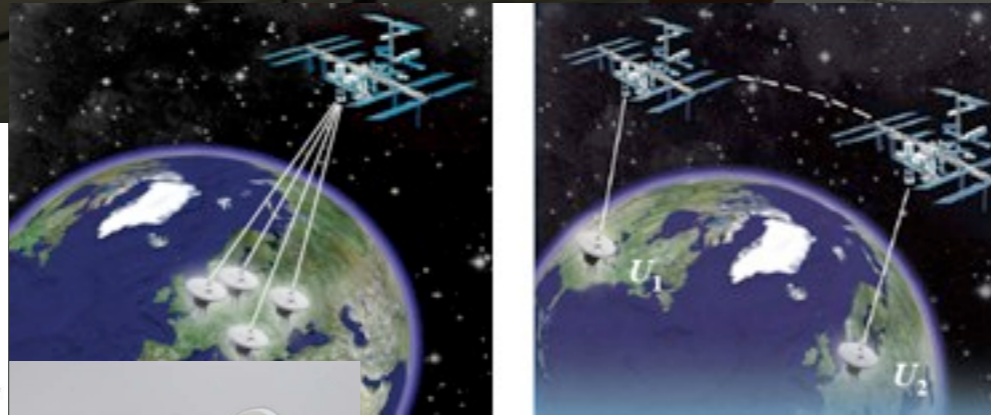
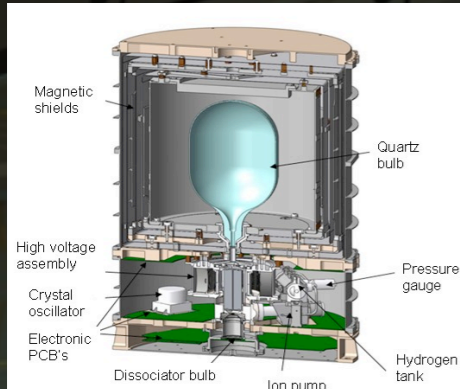
Atomic Clock Ensemble in Space (ACES)



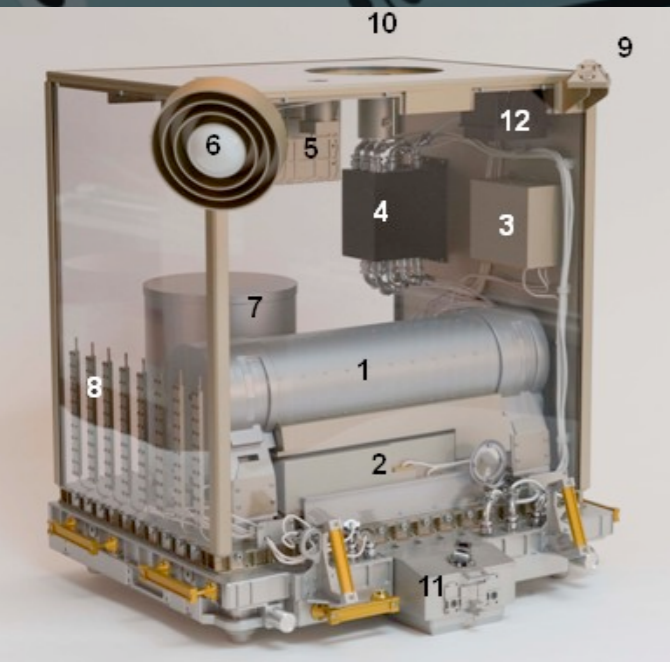
1. PHARAO Cesium Tube
2. PHARAO Laser Source
3. PHARAO computer
4. XPLC
5. MWL
6. GNSS Antenna
7. Space hydrogen Maser
8. Heat pipes
9. Laser corner cube reflector
10. MWL antennae
11. CEPA
12. ELT

Atomic Clock Ensemble in Space (ACES)

maser à hydrogène



PHARAO tube

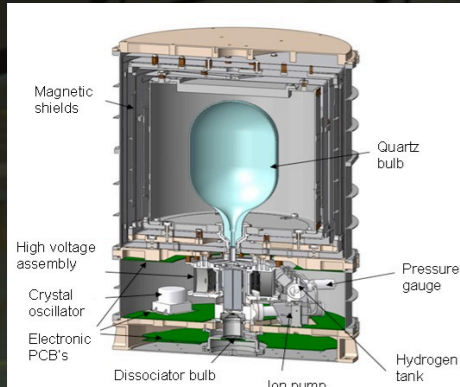


1. PHARAO Cesium Tube
2. PHARAO Laser Source
3. PHARAO computer
4. XPLC
5. MWL
6. GNSS Antenna
7. Space hydrogen Maser
8. Heat pipes
9. Laser corner cube reflector
10. MWL antennae
11. CEPA
12. ELT



Atomic Clock Ensemble in Space (ACES)

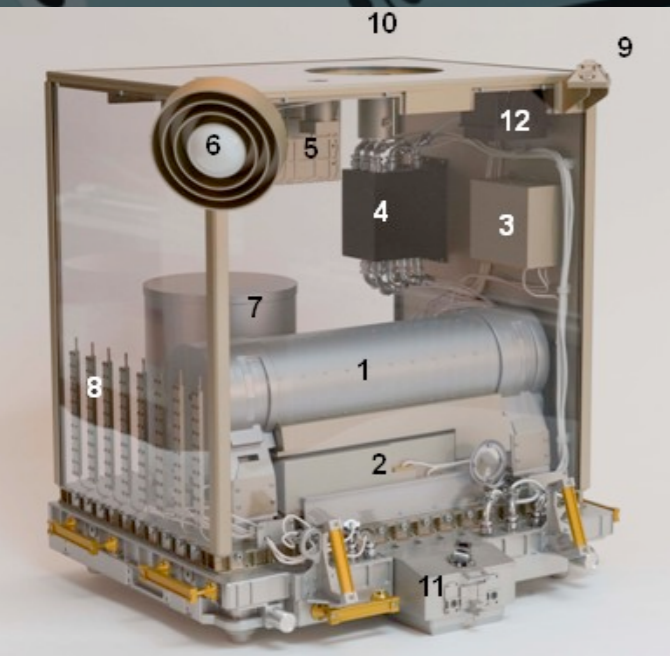
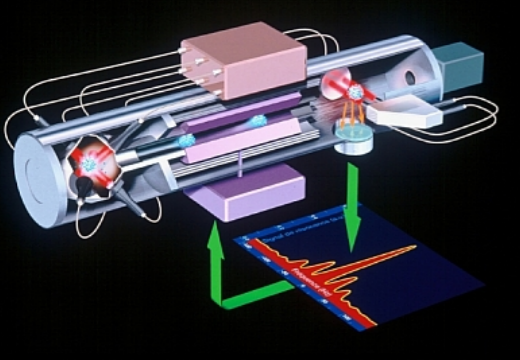
maser à hydrogène



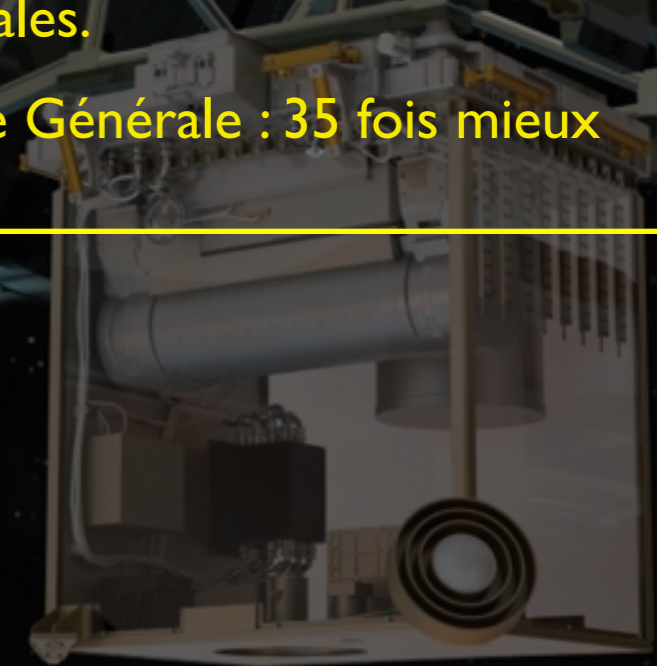
Objectifs:

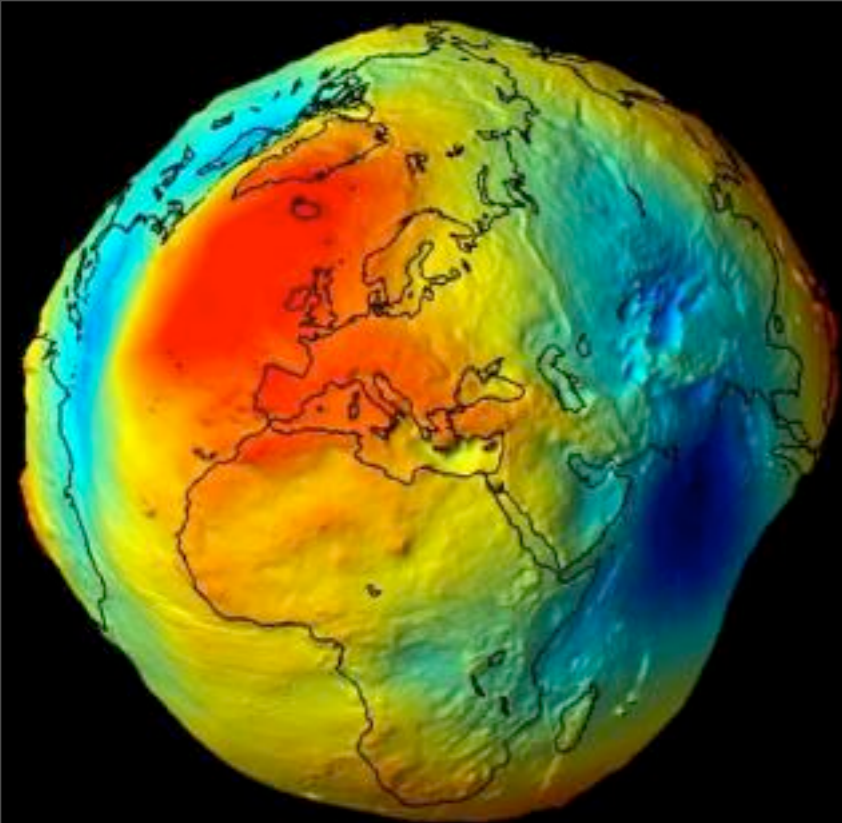
1. Etalon de fréquence performant dans l'espace (micro-gravité) à mieux de 10^{-16}
2. La comparaison d'horloges distantes espace-sol ou sol-sol sur des distances inter-contininentales.
3. Test du Redshift de la Relativité Générale : 35 fois mieux que Gravity Probe A.

PHARAO tube



1. PHARAO Cesium Tube
2. PHARAO Laser Source
3. PHARAO computer
4. XPLC
5. MWL
6. GNSS Antenna
7. Space hydrogen Maser
8. Heat pipes
9. Laser corner cube reflector
10. MWL antennae
11. CEPA
12. ELT





L'apport de la géodésie spatiale

Multiples techniques

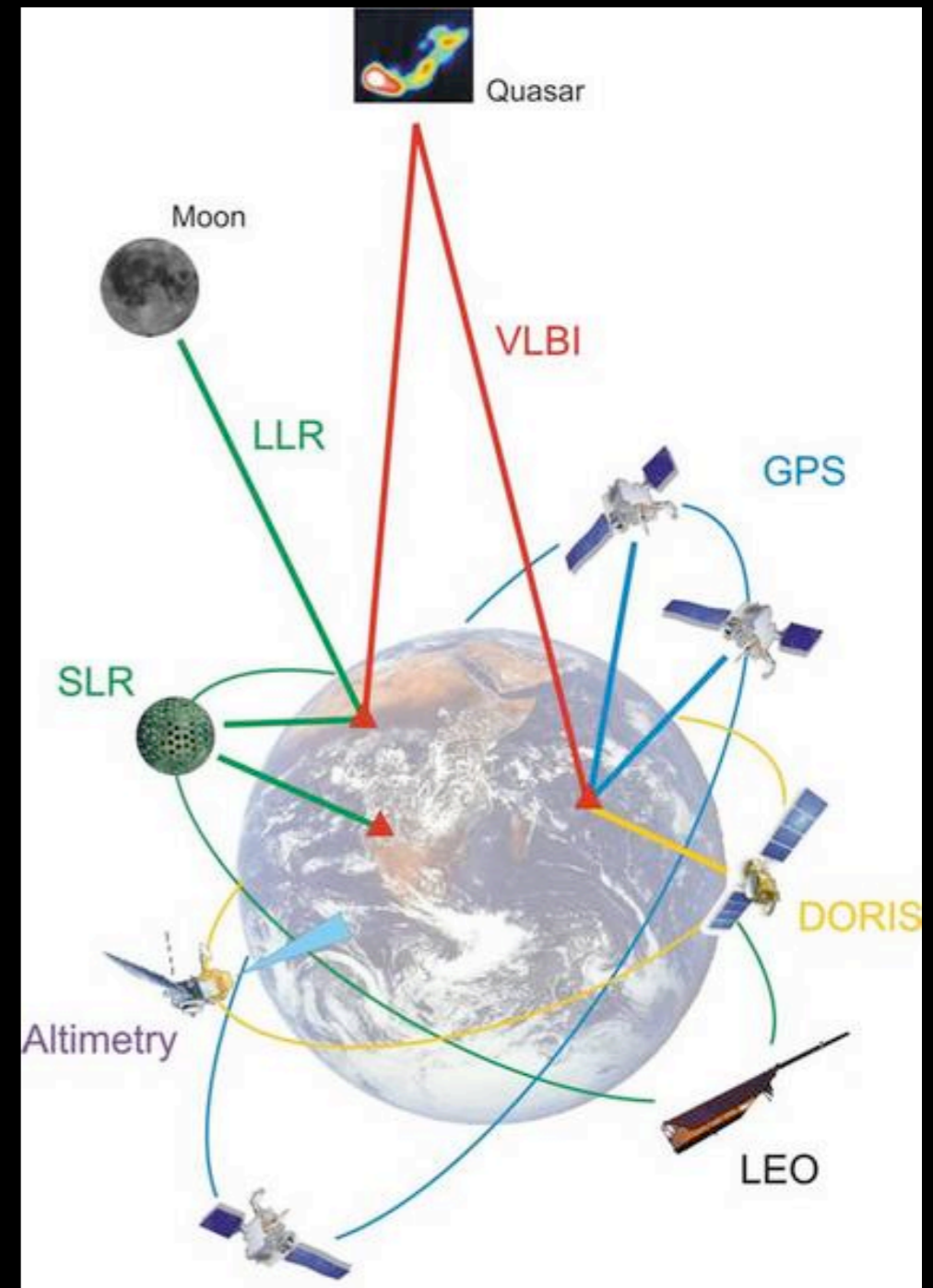
Comprendre la dynamique interne de la Terre

Déterminer le champ de gravité

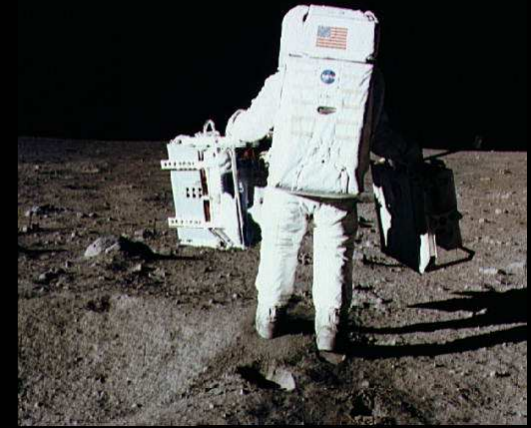
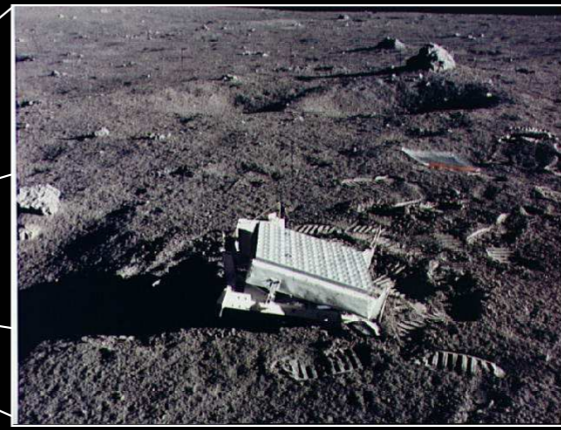
Se positionner correctement



Effet Lense-Thirring grâce à LAGEOS
Ciufolini & Pavlis, Nature 2004



Contributions du tir laser vers la Lune



Si masse inerte et masse gravitationnelle différentes:

Signal sur le mouvement orbital, test du Principe d'équivalence faible.



VOLUME 36, NUMBER 11

PHYSICAL REVIEW LETTERS

15 MARCH 1976

Verification of the Principle of Equivalence for Massive Bodies*

Irwin I. Shapiro and Charles C. Counselman, III

Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139

and

Robert W. King

Air Force Cambridge Research Laboratories, Bedford, Massachusetts 01731

(Received 10 December 1975)

Analysis of 1389 measurements, accumulated between 1970 and 1974, of echo delays of laser signals transmitted from Earth and reflected from cube corners on the Moon shows gravitational binding energy to contribute equally to Earth's inertial and passive gravitational masses to within the estimated uncertainty of 1.5%. The corresponding restriction on the Eddington-Robertson parameters is $4\beta - \gamma - 3 = -0.001 \pm 0.015$. Combination with other results, as if independent, yields $\beta = 1.003 \pm 0.005$ and $\gamma = 1.008 \pm 0.008$, in accord with general relativity.

Mais permet aussi:

- de tester le principe d'équivalence fort (effet Nordtvedt)
- de tester une variation de G

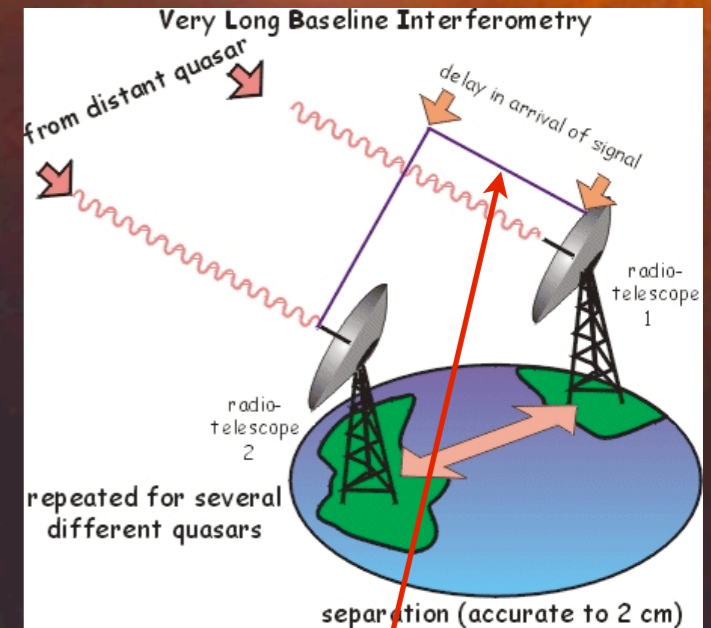
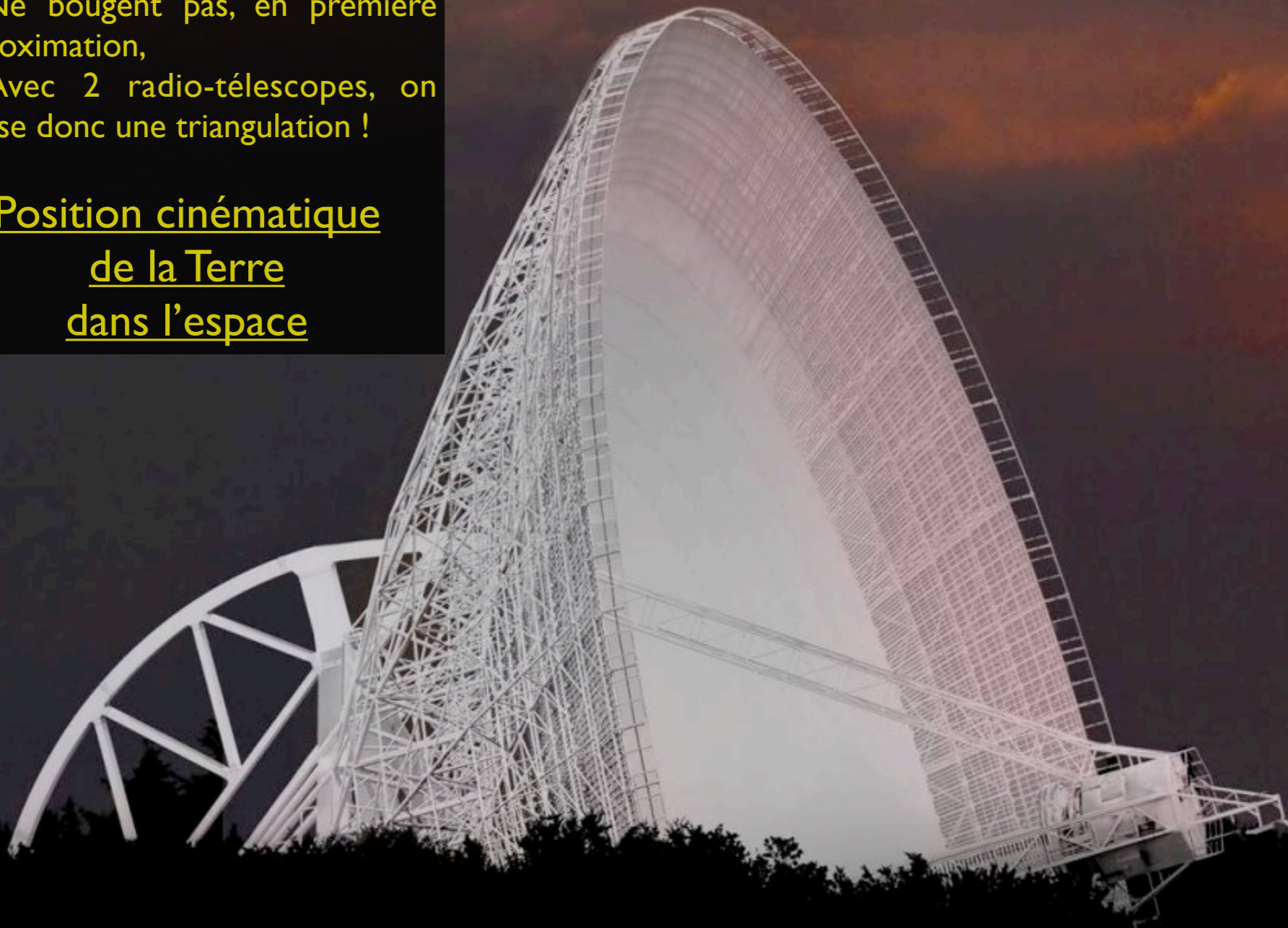
Tests à plus grande échelle dans le Système Solaire

Interférométrie à Très Longue Base: le VLBI

On observe les objets les plus lointains:

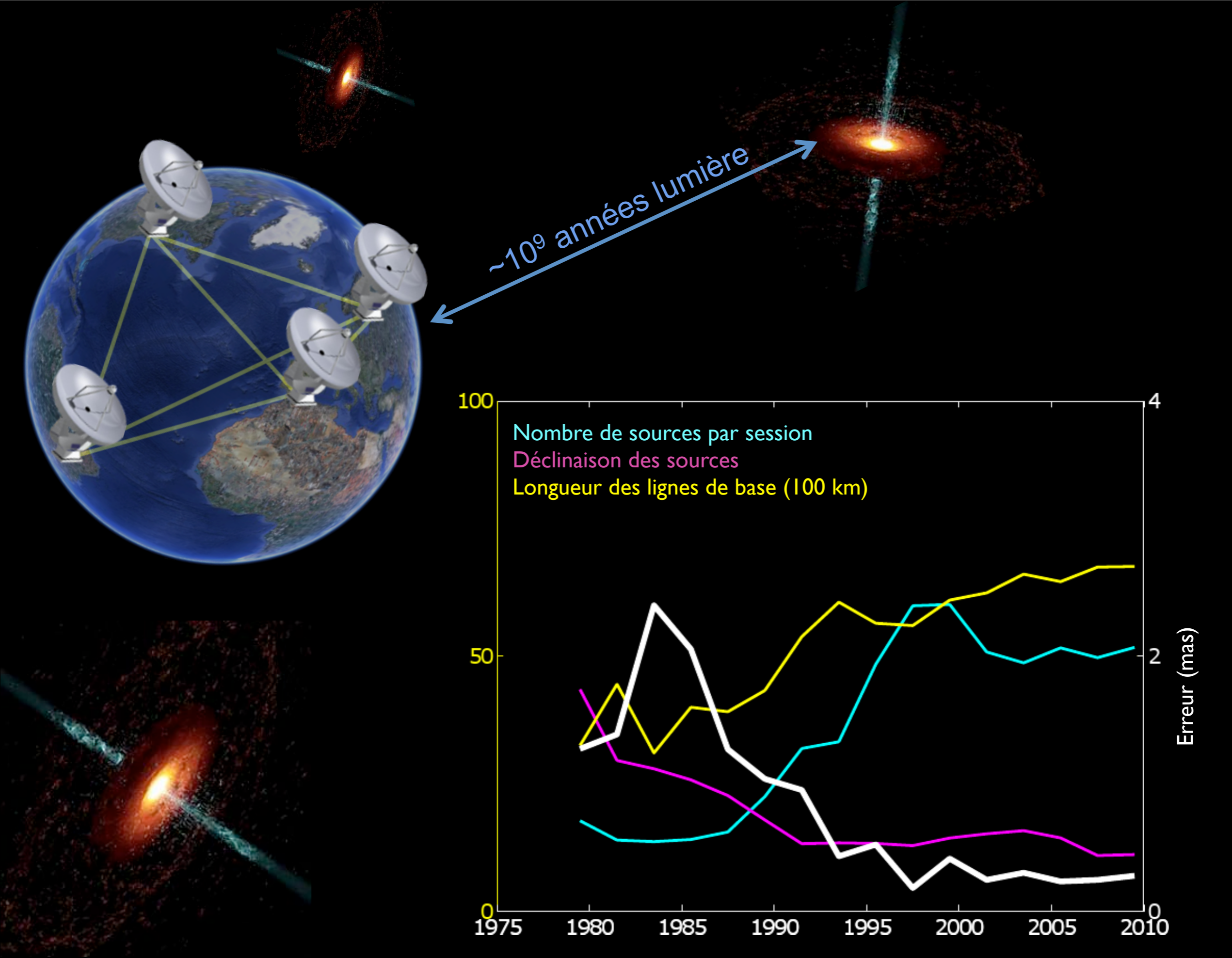
1. Ne bougent pas, en première approximation,
2. Avec 2 radio-télescopes, on réalise donc une triangulation !

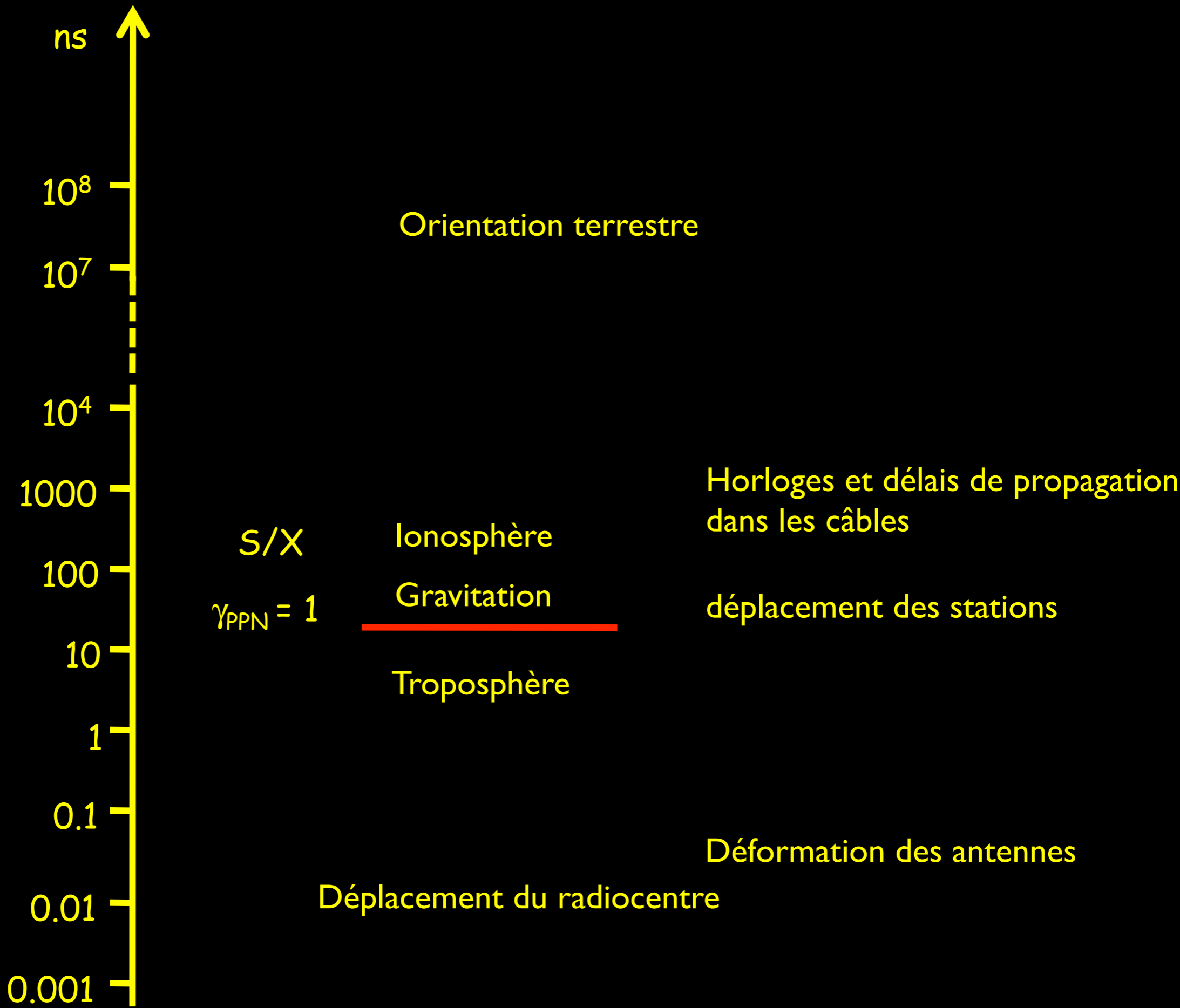
Position cinématique
de la Terre
dans l'espace



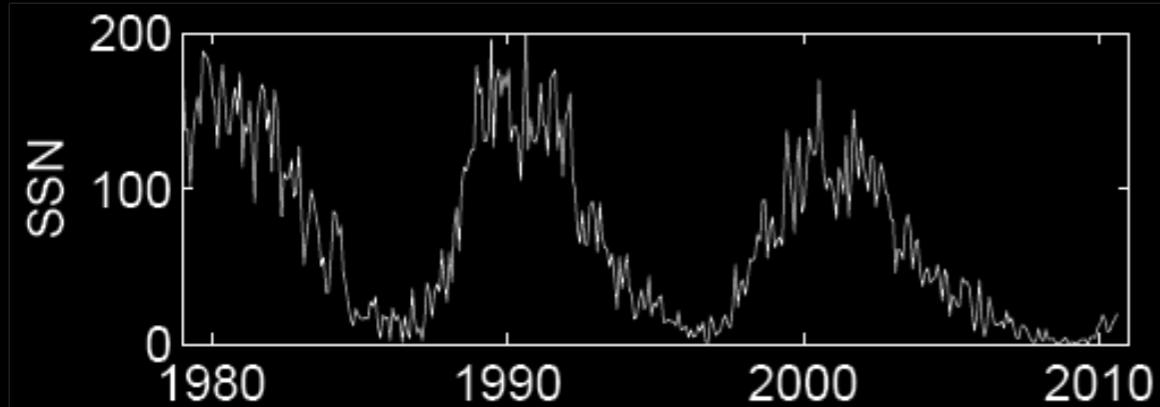
Délai temporel entre les réceptions des signaux: mesure temporelle !

Qui dit un laps de temps... dit une distance





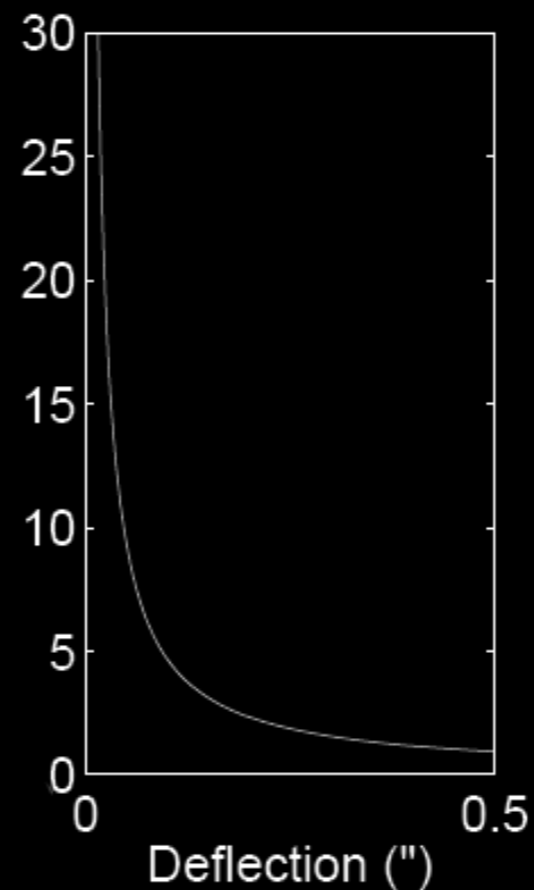
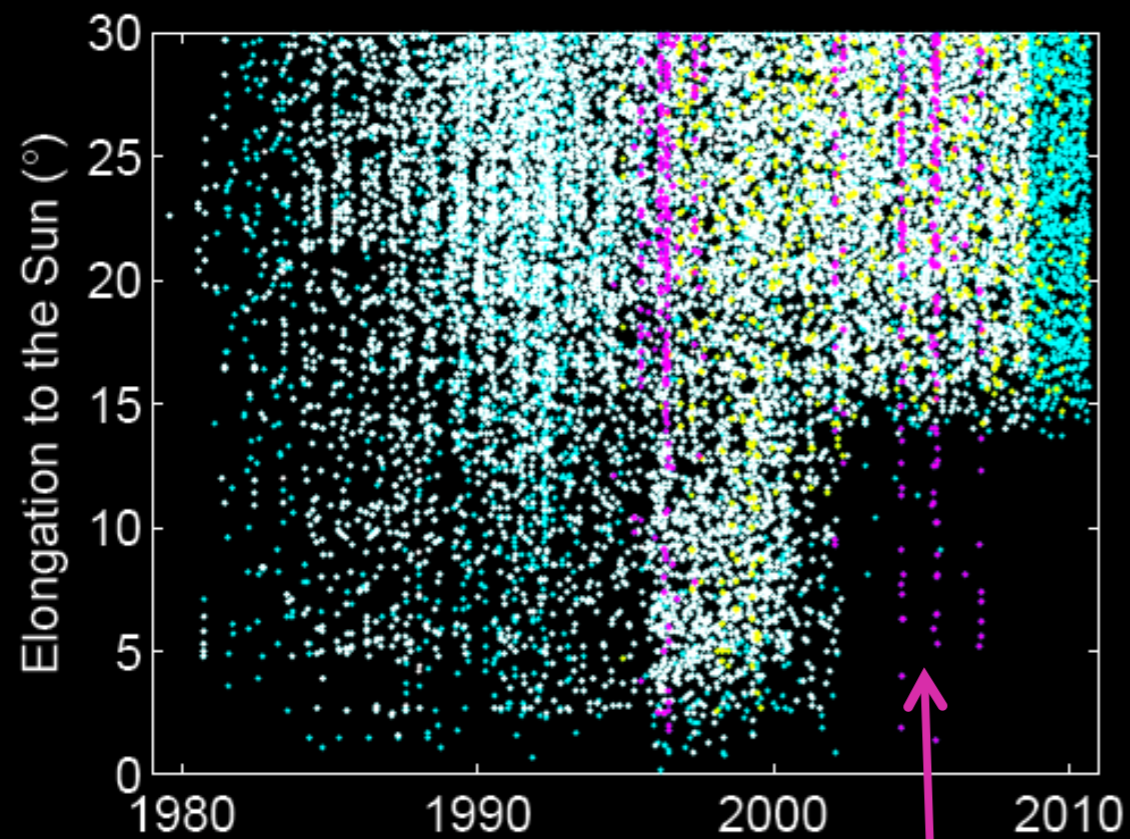
Lambert & Le Poncin-Lafitte 2009, 2010 : utilisation de la base de données VLBI complète



Activité solaire = déflexion plus forte
(Lebach et al. 1995)

$\sim 1-10 \text{ } \mu\text{s}$

γ = coef. de « déflexion »



Sans le VLBA :

$$\gamma - 1 = 0.4 \pm 1.4 \times 10^{-4}$$

+ RDV :

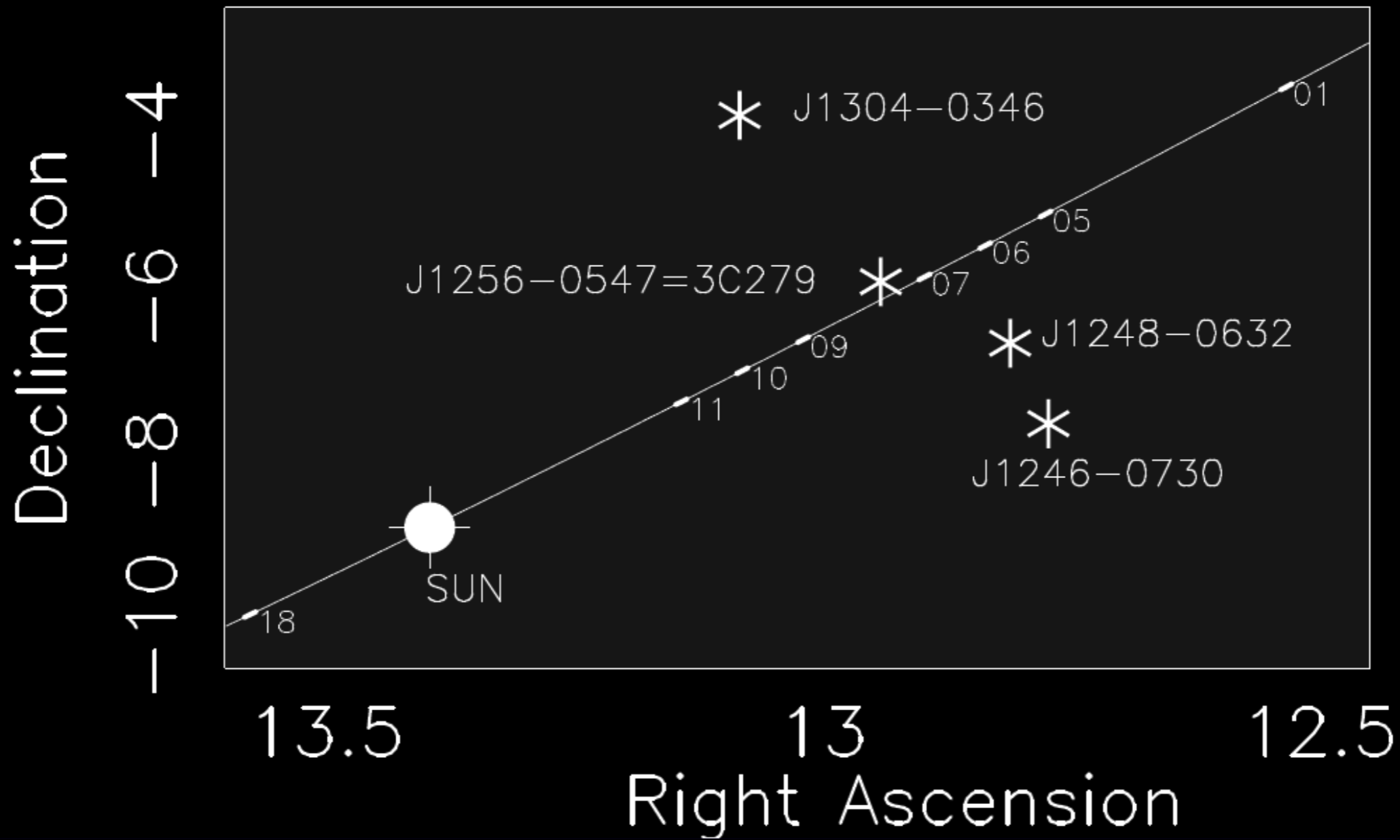
$$\gamma - 1 = -0.7 \pm 1.3 \times 10^{-4}$$

+ VCS :

$$\gamma - 1 = -0.8 \pm 1.2 \times 10^{-4}$$

VLBA $\sim 3\%$ des sessions $\sim 30\%$ des observations

Fomalont et al. 2009

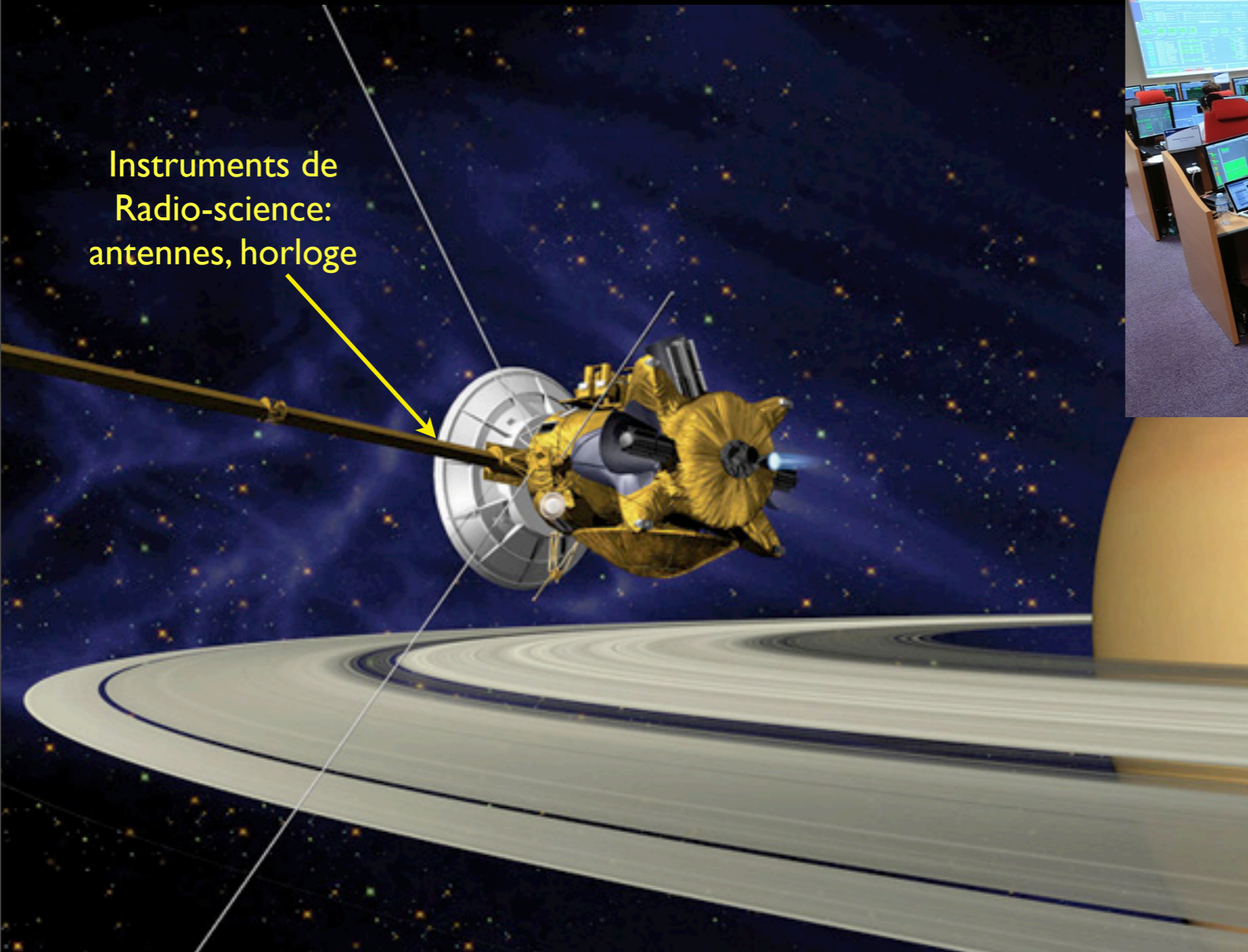


$$\gamma - 1 = 2 \pm 3 \times 10^{-4}$$

- Le VLBI mesure γ à 1.2×10^{-4} :
 - Effets coronaux difficiles à supprimer
 - Précision limitée par troposphère + structure de source
- Apport substantiel du VLBA
- Dommage que l'IVS « bloque » à 15° du soleil pour les sessions routinières
- Programmer des sources proches du soleil dans le futur (accepté par l'IVS depuis peu)...

Expérience de Radio-Science avec Cassini

Instruments de
Radio-science:
antennes, horloge

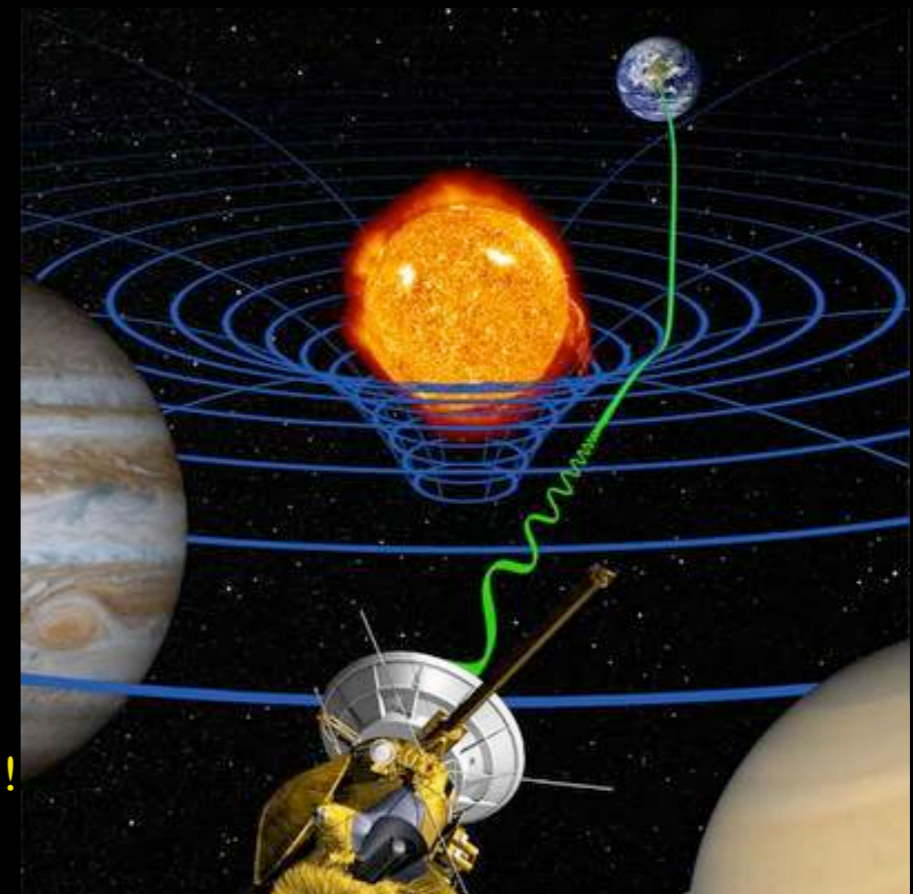


Conjonction entre la Terre
et Cassini en Septembre 2003



Maximum de déflexion relativiste !

Une équipe italienne mesure le changement de la fréquence du signal
avec une précision de quelques 10^{-14} de fraction de fréquence.

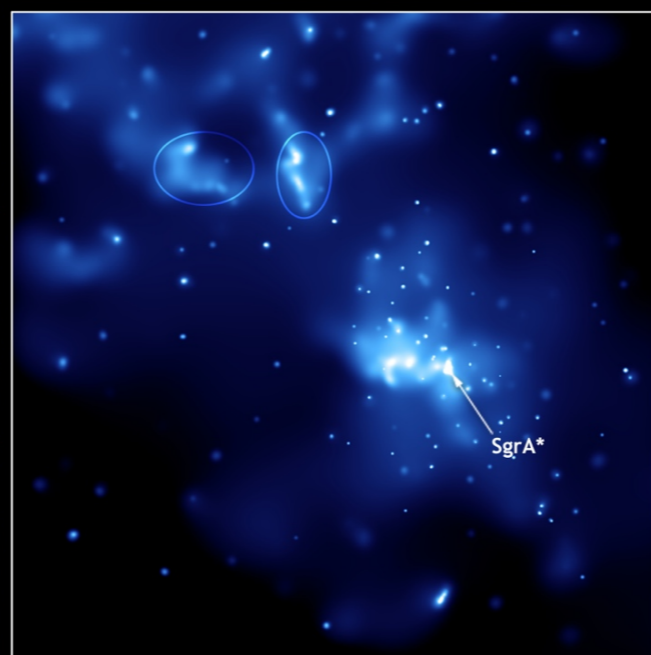
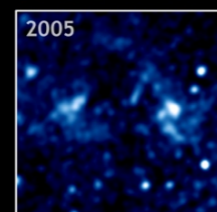
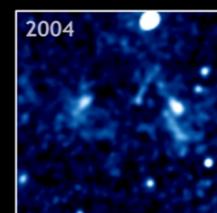
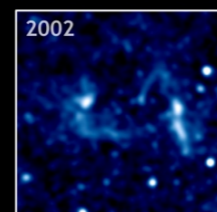
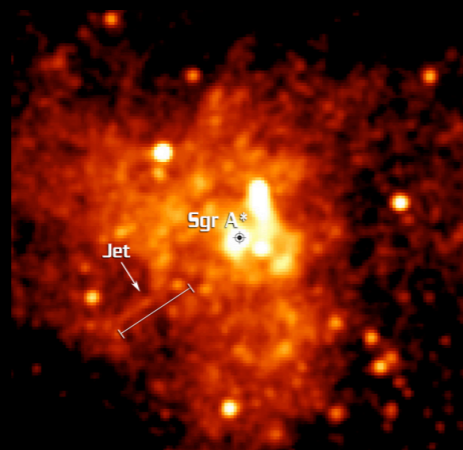
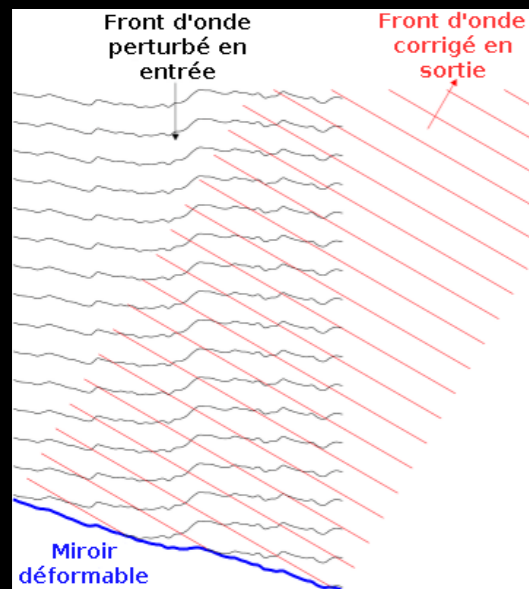


La Relativité serait correcte à 0.002% près

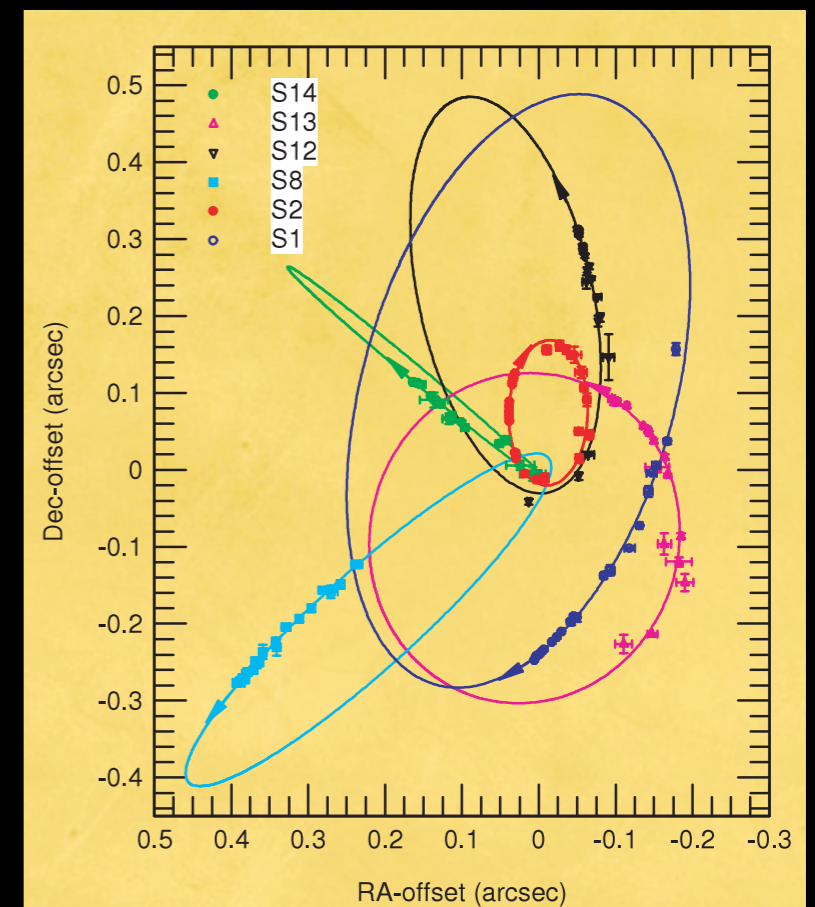
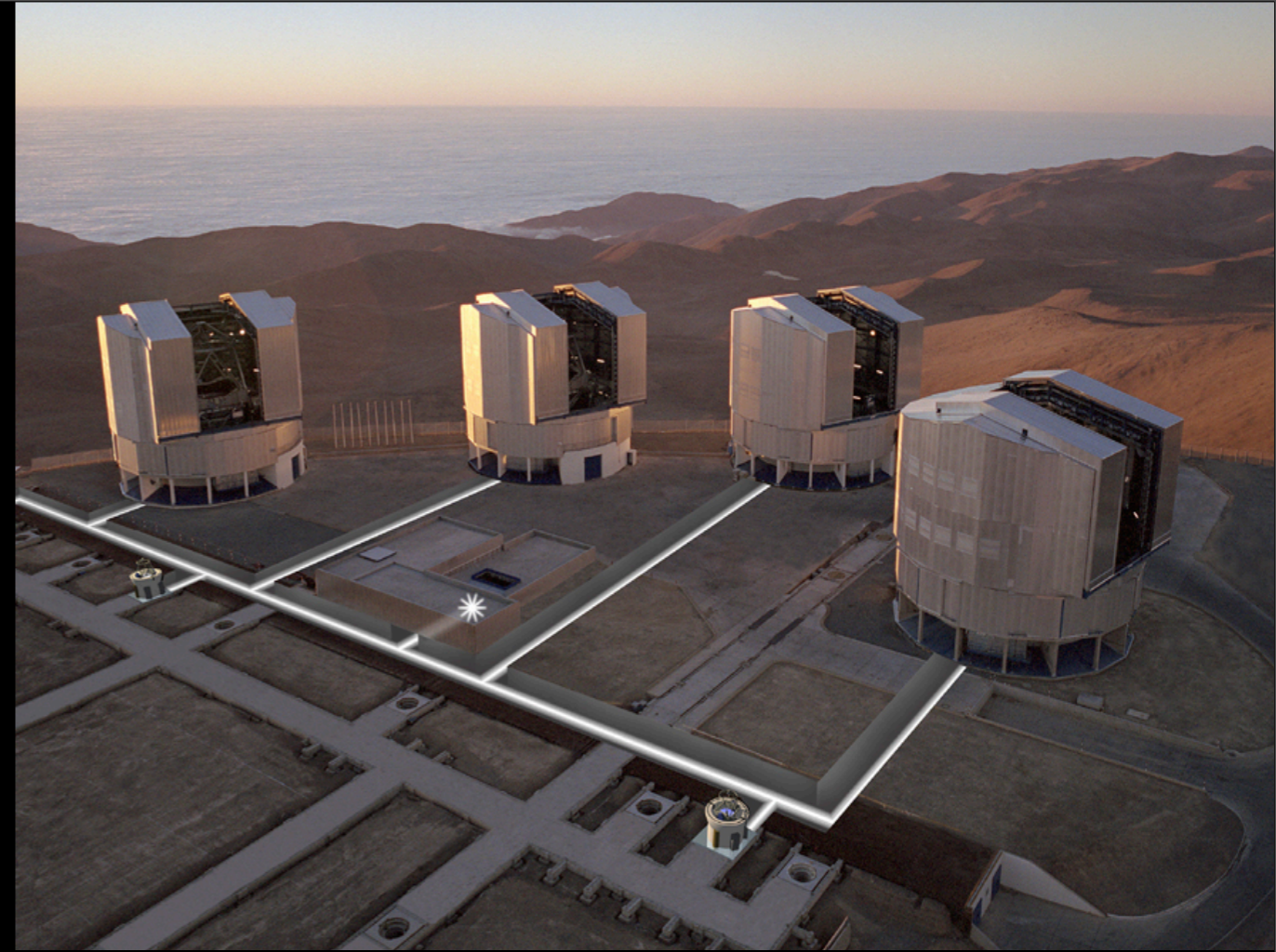
Bertotti et al. 2003, *Nature*, 425, 374

Les tests en champ fort: expérience GRAVITY

Mesure d'interférométrie
longueur d'onde infrarouge
Utilisation de l'optique adaptative



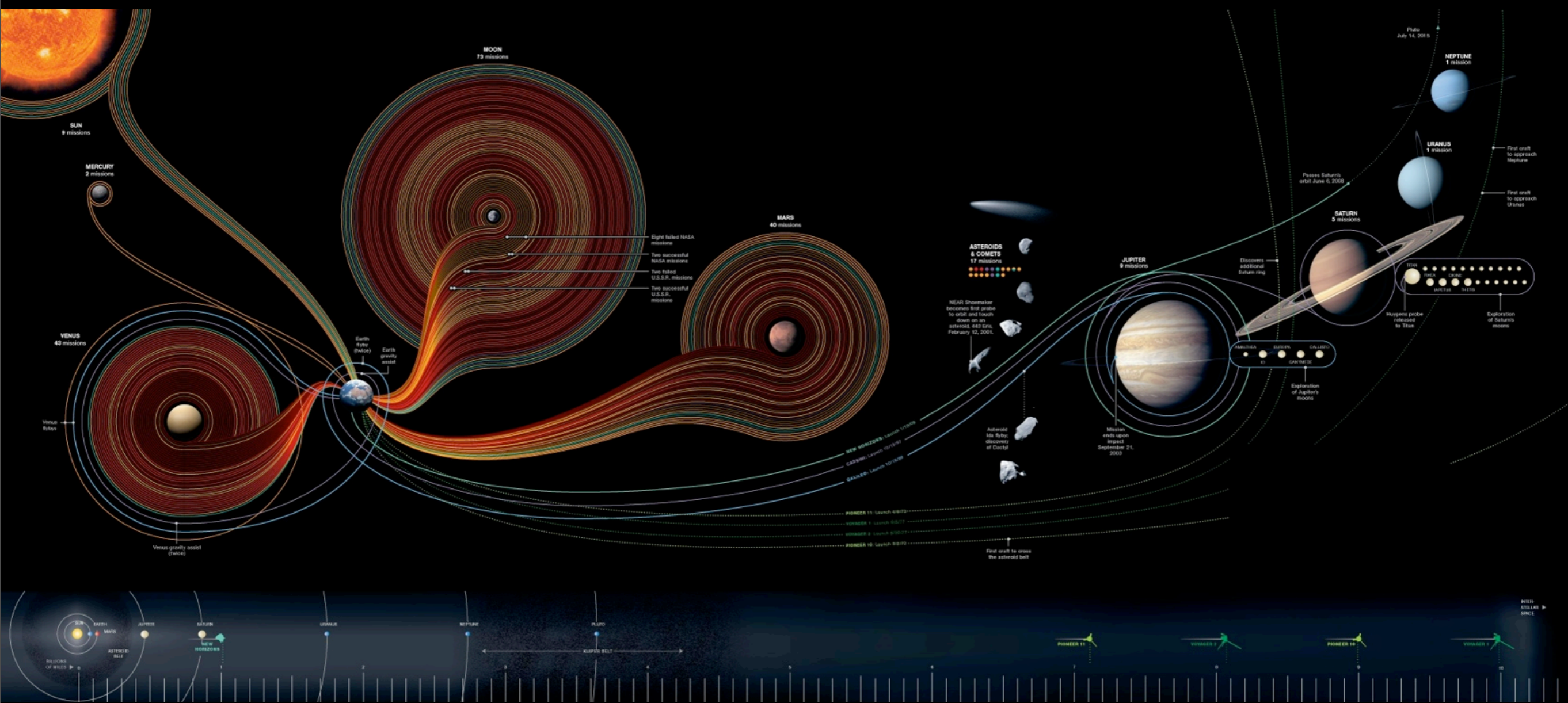
observations de Sgr A en X du satellite Chandra



Eisenhauer et al. 2005

Observations de
Sagittarius A près du
trou noir central

Exploration spatiale du Système solaire

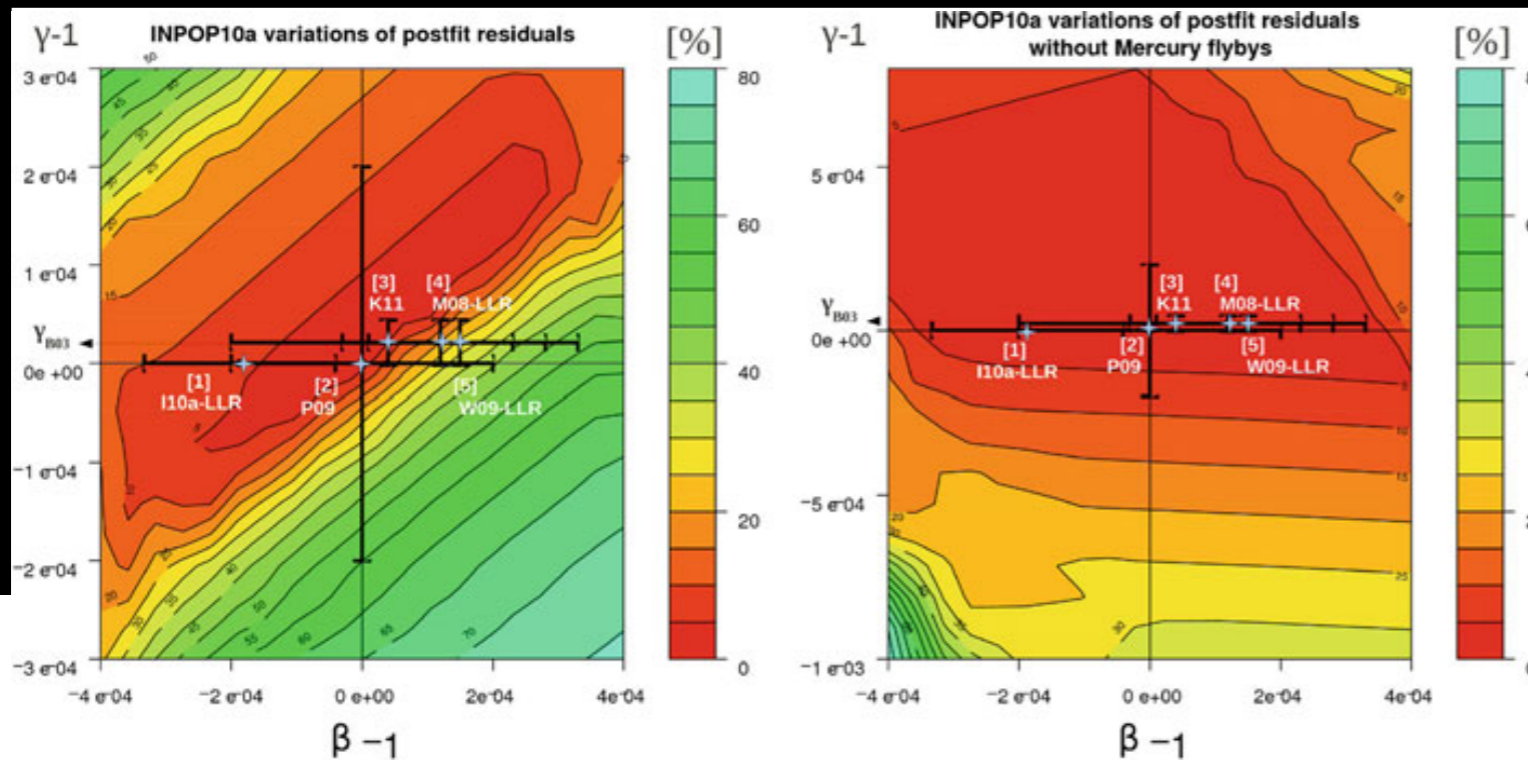


Nombreuses données de navigation
+ données astrométriques, radar...



1. Amélioration des éphémérides
2. Amélioration des tests de la gravitation

Les éphémérides planétaires et satellitaires.



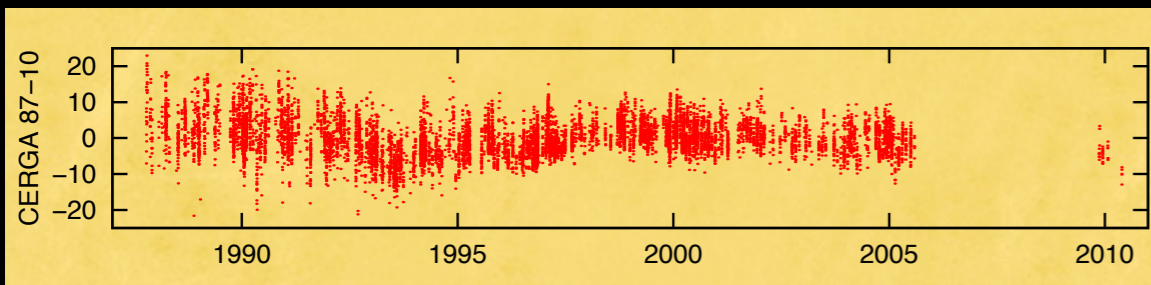
Fienga et al. 2011

- Ephémérides planétaires:
1. DE du JPL
 2. VSOP - INPOP
 3. EPM

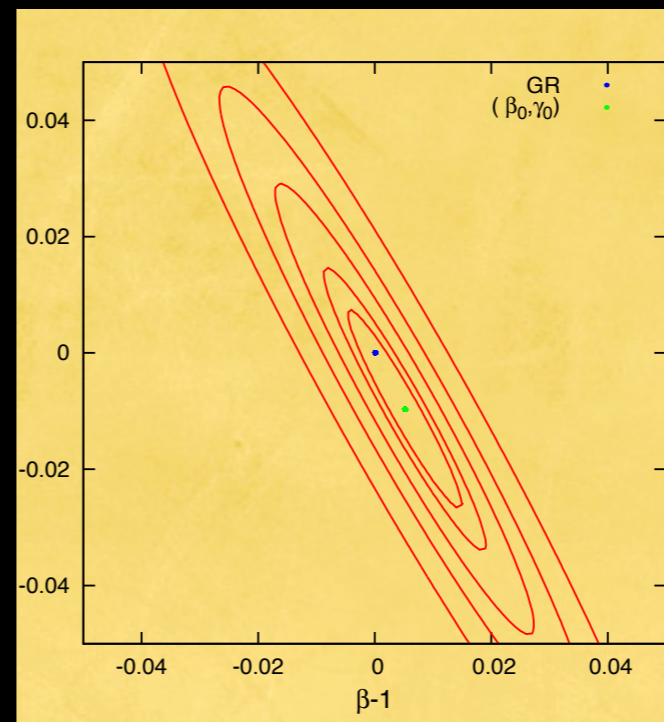
Fig. 7 Variations of postfit residuals obtained for different values of PPN β (x-axis) and γ (y-axis). [1] stands for a PPN β value obtained by [Manche et al. \(2010\)](#) using LLR observations with $\gamma = 0$, [2] stands for [Pitjeva \(2010\)](#) by a global fit of EPM planetary ephemerides. K11 stands for [Konopliv et al. \(2011\)](#) determinations based mainly on Mars data analysis. M08 for [Müller et al. \(2008\)](#) and W09 for [Williams et al. \(2009\)](#) give values deduced from LLR for a fixed value of γ , B03 stands for [Bertotti et al. \(2003\)](#) determination of γ by solar conjunction during the Cassini mission

Ephémérides de satellite:

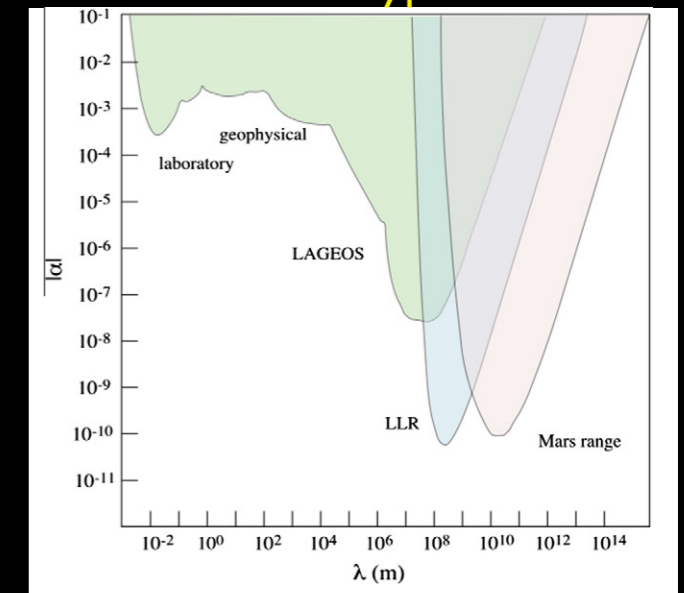
1. le mouvement de la lune (Laser-Lune)
2. les orbiteurs autour de Mars



Résidus Laser-Lune
Manche et al. 2010



Analyse pour Mars Déviation de type Yukawa



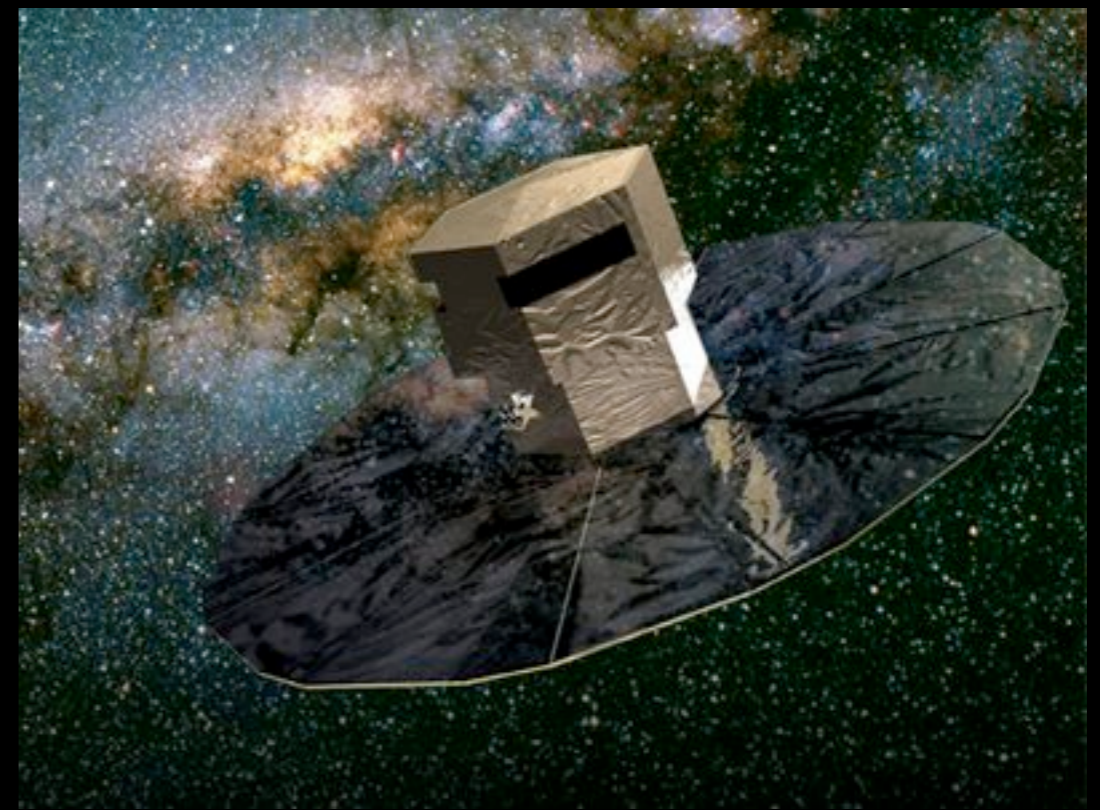
Konopliv et al. 2010

D'Hipparcos à Gaia

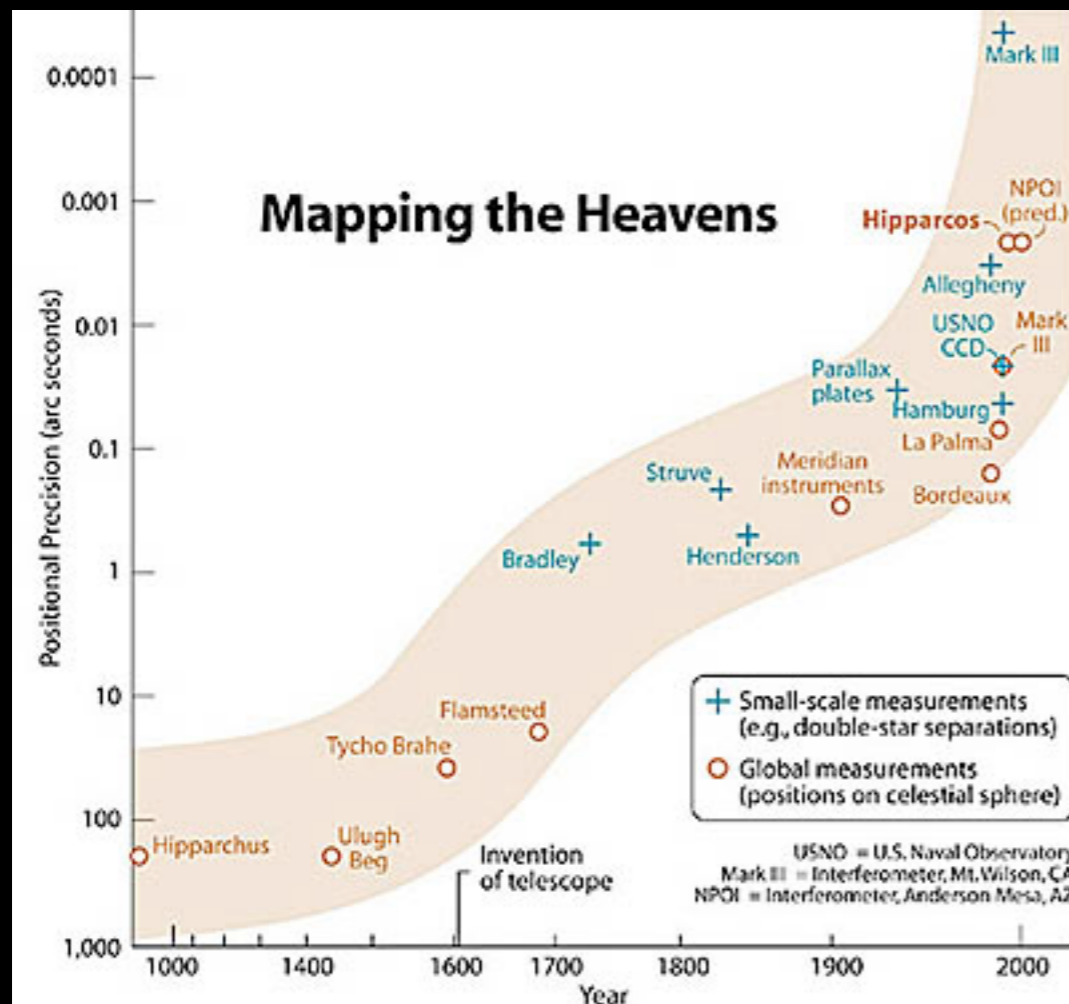
l'apport de l'astrométrie spatiale



Hipparcos:
100 000 étoiles proches
1 milli-as de précision



Gaia: 1 milliard d'étoiles de la galaxie
1 micro-as de précision



1 seconde d'arc (as) : 10^{-5} radian...

Depuis Hipparque et Ticho Brahe (à l'oeil),
on a gagné un facteur 100 millions sur la
précision

la Relativité joue-t-elle un rôle sur ces observations ?
Voir la présentation de F. Mignard.

Des tests de la gravitation qui n'en sont pas ?

Ca existe...

L'anomalie Pioneer

Révélee par le JPL en 2002
(Anderson *et al.*, PRD, 2002)

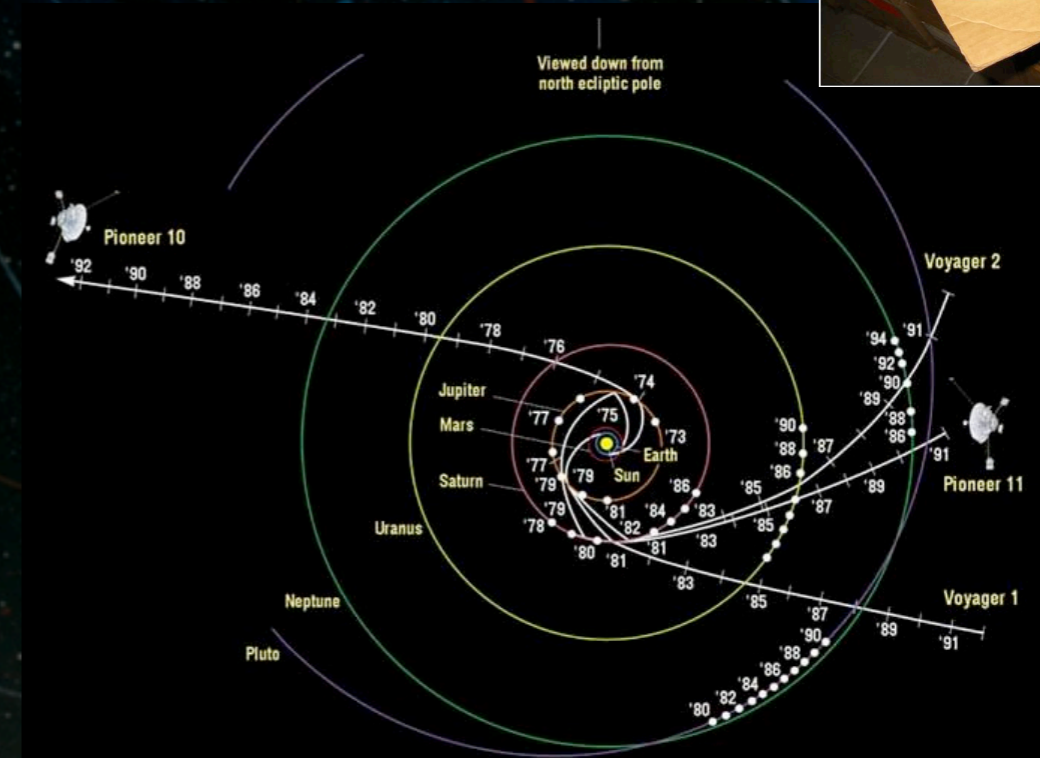
Evidemment propice à l'élaboration des théories les plus exotiques possible par centaine.

Officieusement a sombré corps et biens depuis quelques semaines.

Turyshchev *et al.* arXiv:1204.2507, 2012.

L'orbite de sortie de ces sondes étaient en fort désaccord avec les modèles.

Une longue analyse a eu lieu pour déceler l'effet thermique manquant

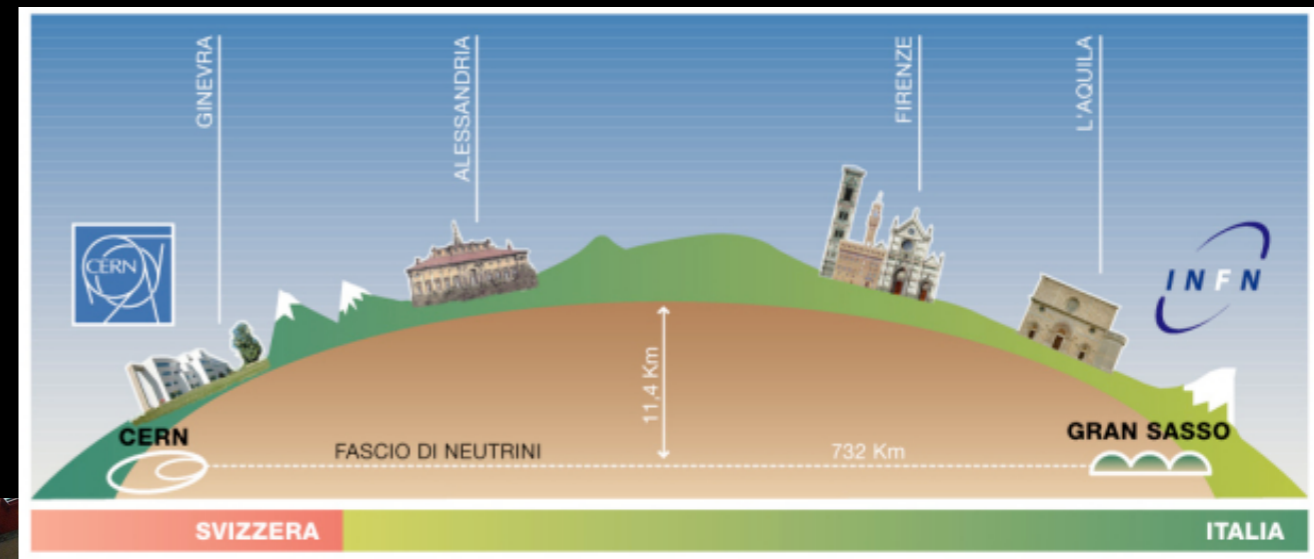


Un neutrino fou pris en excès de vitesse : -3 points

Sept. 2011, pour 60 ns de trop, un neutrino dépasse la limitation de vitesse. Le gendarme en charge de l'affaire : la collaboration OPERA (arXiv:1109.4897, 2011)



Centre de "traitement des amendes" de Gran Sasso.



Labo. d'OPERA à Gran Sasso

Mars 2012 : une collaboration concurrente, ICARUS, démontre que le résultat n'est pas fiable.

Le parquet a décidé de classer l'affaire sans suite. Le chef de la gendarmerie démissionne.

cause probable de l'erreur: un câble défectueux du récepteur GPS du "radar"

conclusions

- De très nombreuses alternatives à la RG
- Une activité intense tout azimut pour tester les théories alternatives
- Et finalement la RG reste au centre de l'espace des paramètres...
- De nouvelles façons de tester la gravitation grâce à la haute précision