

*AerospaceLab
Conference
20 Sept 2012*

Serge Reynaud
Laboratoire Kastler Brossel

dans le cadre de
plusieurs collaborations

 **Laboratoire Kastler Brossel**
Physique quantique et applications

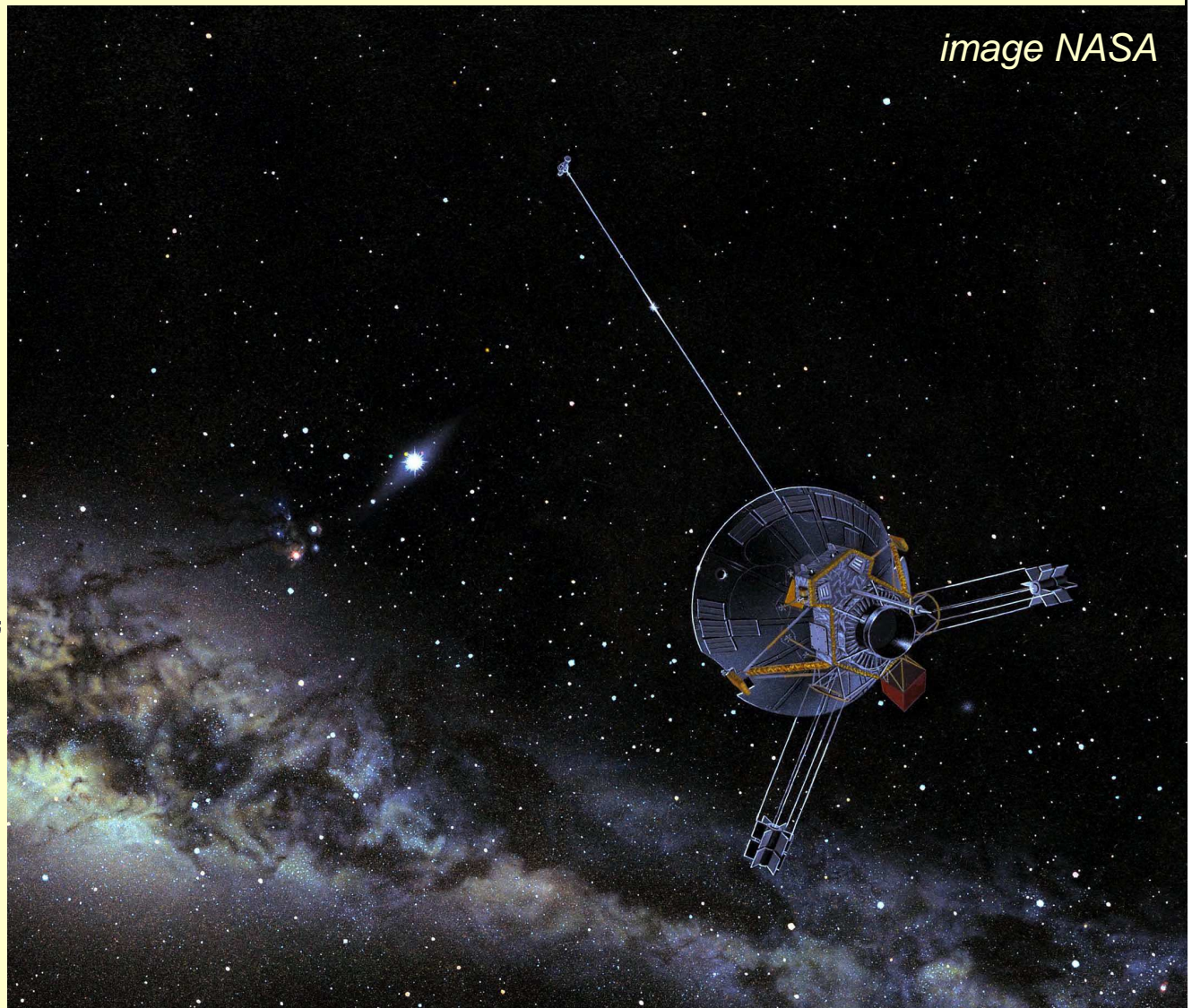


UPMC
PARIS UNIVERSITAS



Les lois de la gravitation à l'épreuve

image NASA



De la gravitation classique... ... à la gravitation relativiste

Galilée ...

Mouvement uniformément accéléré dans le champ de gravité
Universalité de la chute libre (dans le vide)

Newton ...

Equations du mouvement

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F} = m\mathbf{g}$$

Equations de la gravitation

$$\mathbf{g} = -\nabla\Phi \quad , \quad \Phi = -\frac{GM}{r}$$

Mouvements des planètes

Principe d'équivalence (dans le vide)

Einstein ...

La meilleure idée de sa vie !

« *Nous allons faire l'hypothèse de la complète équivalence physique entre un champ de gravitation et l'accélération correspondante du système de référence* » (1907)

La Relativité Générale (en quelques mots)

Einstein 1907-1913 (avec Grossmann...)

- applique le principe de relativité à la gravitation
- identifie la gravitation à la métrique de l'espace-temps $g_{\mu\nu}$
- donne un statut géométrique au principe d'équivalence

➡ Universalité des fréquences d'horloge

- les horloges idéales mesurent le temps propre le long de leur trajectoire (l'intégrale de l'élément métrique)

$$S \equiv \int ds$$

$$ds^2 \equiv g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

➡ Universalité de la chute libre

- les masses en chute libre suivent les lignes géodésiques (qui extrémisent le temps propre)

$$\delta S = 0$$

Un des principes les mieux testés de la physique

La Relativité Générale (en quelques mots)

Einstein 1912-1915 (avec Grossman, Hilbert ...)

- tenseurs de courbure = expressions différentielles non linéaires construites sur le tenseur métrique
- en géométrie riemannienne, l'un de ces tenseurs a une divergence nulle (identités de Bianchi), comme le tenseur des contraintes (lois de conservation)

$$E_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R$$

$$D^\nu E_{\mu\nu} \equiv 0$$

$$D^\nu T_{\mu\nu} \equiv 0$$

Equation d'Einstein

- les 2 tenseurs sont proportionnels l'un à l'autre
- équation différentielle à résoudre pour obtenir la métrique
- pas d'autre constante en Relativité Générale que G et c
- équations classiques retrouvées à la limite non relativiste

$$E_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

La Relativité Générale (en quelques mots)

Un modèle simple du système solaire

- Soleil traité comme une source ponctuelle immobile
- autres masses négligées dans une première approche
- solution écrite avec des coordonnées spatiales isotropes

$$ds^2 = g_{00}(cdt)^2 + g_{rr}d\mathbf{r}^2 \quad , \quad d\mathbf{r}^2 = dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

Solution de l'équation d'Einstein

$$g_{00} = 1 + 2\phi + 2\phi^2 + \dots \quad , \quad -g_{rr} = 1 - 2\phi + \dots$$

- écrite ici comme une expansion de Taylor dans le potentiel newtonien

$$\phi \equiv -\frac{GM}{c^2 r} \quad , \quad \frac{GM}{c^2} \simeq 1.5 \text{ km}$$

$$|\phi| \ll 1$$

- solution à tester en comparant les mouvements observés aux géodésiques calculées pour cette métrique

Des premiers succès...

Les observations planétaires étaient en accord avec la théorie de Newton, sauf pour l'anomalie du périhélie de Mercure

Désaccord confirmé
43'' d'arc par siècle

Résidu de la correction
des perturbations
planétaires
(plus de 10 fois plus grandes)

L'effet est expliqué
quantitativement par la
Relativité Générale

La Relativité Générale prévoit une déflexion de la lumière passant au voisinage du Soleil

Prédiction : 1,7'' d'arc
au ras du disque solaire

L'effet est observé pendant
l'éclipse de Soleil de 1919

... et leurs limites ...

Difficulté de ces mesures

pour le périhélie, défaut de sphéricité du Soleil mal connu

pour la déflexion, limites des mesures photographiques de l'époque, effet de la couronne solaire mal connu ...

« Décalage vers le rouge » ... pas démontré alors

« Influence du champ de gravitation sur les horloges : ... le processus mis en jeu dans l'horloge se déroule d'autant plus vite que le potentiel de gravitation est plus grand »

« La lumière qui vient de la surface solaire possède une longueur d'onde supérieure d'environ $2 \cdot 10^{-6}$ à celle de la lumière émise sur Terre par des substances identiques »

Difficulté principale

effet Doppler, dû au mouvement des atomes, masque l'effet Einstein

expérience pas concluante avant les années 1960

... jusqu'aux tests modernes ...

Pound et Rebka (Harvard, 1960)

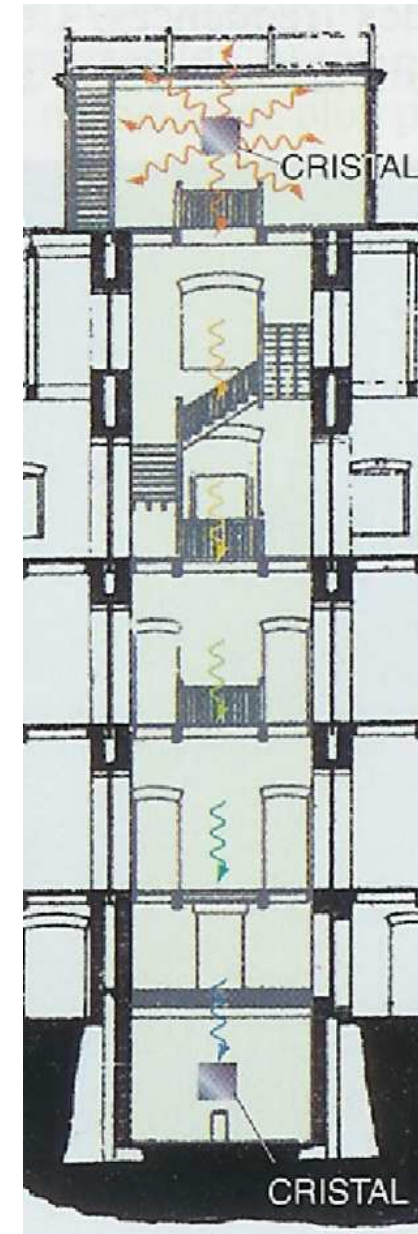
comparaison des raies d'émission γ
de noyaux de Fe (isotope 57) au sol
et au sommet d'une tour du campus

différence d'altitude : 22,5 m

champ de gravité de la Terre

effet de « décalage vers le
rouge » vérifié avec une
précision de quelques %

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \Delta\phi$$



... et aux premiers tests spatiaux

Vessot et al (Cambridge)

comparaison de deux horloges
(masers à hydrogène)
placées dans une fusée et
près d'une station sur Terre

soustraction de l'effet Doppler
différence d'altitude jusqu'à
10000 km

«décalage vers le rouge»
mesuré avec une précision
meilleure que 10^{-4}

R.F.C. Vessot *et al*, PRL (1980)

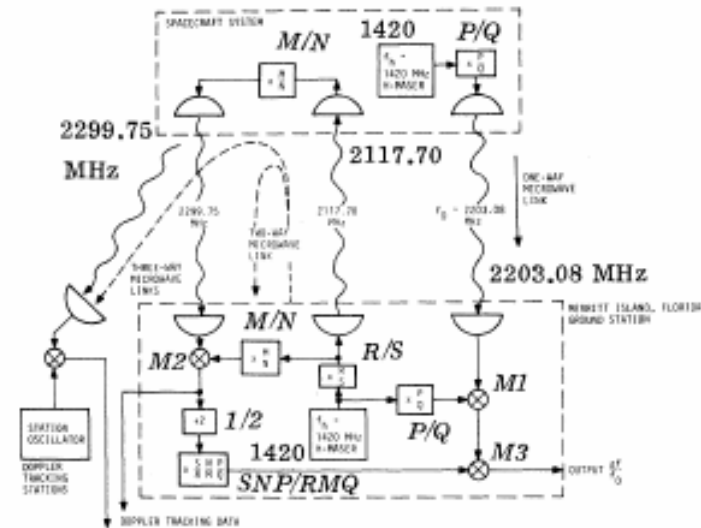


FIG. 1. Doppler cancellation and tracking system.

→ ACES

ACES : des horloges atomiques sur l' ISS

Horloges à atomes froids :

- Déjà les meilleures sur Terre aujourd'hui
- Performances améliorées dans l'espace grâce à l'environnement de microgravité
- Stabilité et exactitude espérées $\sim 10^{-16}$ en relatif sur un jour

Synchronisation d'horloges :

- Précision excellente disponible sur la planète
- Tests du "décalage vers le rouge" par comparaison d'horloges à des potentiels différents améliorés par un facteur 30
- Tests de l'universalité des fréquences d'horloges différentes (tests dits de « variation des constantes ») nettement améliorés

Christophe Salomon et al



Les tests du principe d'équivalence

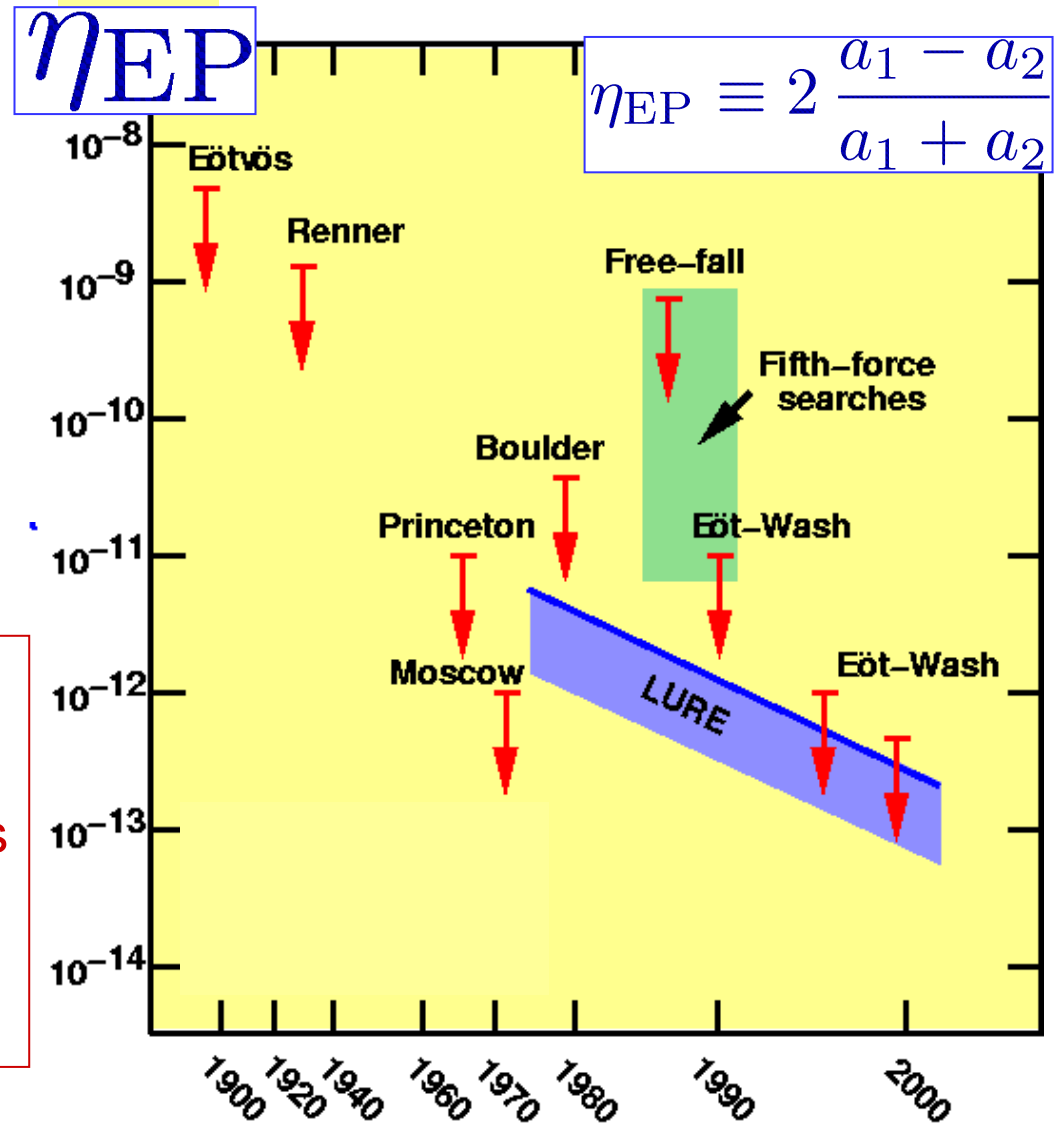
Expériences

- avec des pendules de torsion (Eötvös)
- avec des tests de chute libre
- avec la mesure de distance Terre-Lune

Un principe très bien testé :

- les chutes libres de masses de compositions différentes coïncident avec une précision meilleure que 10^{-12}

→ Microscope

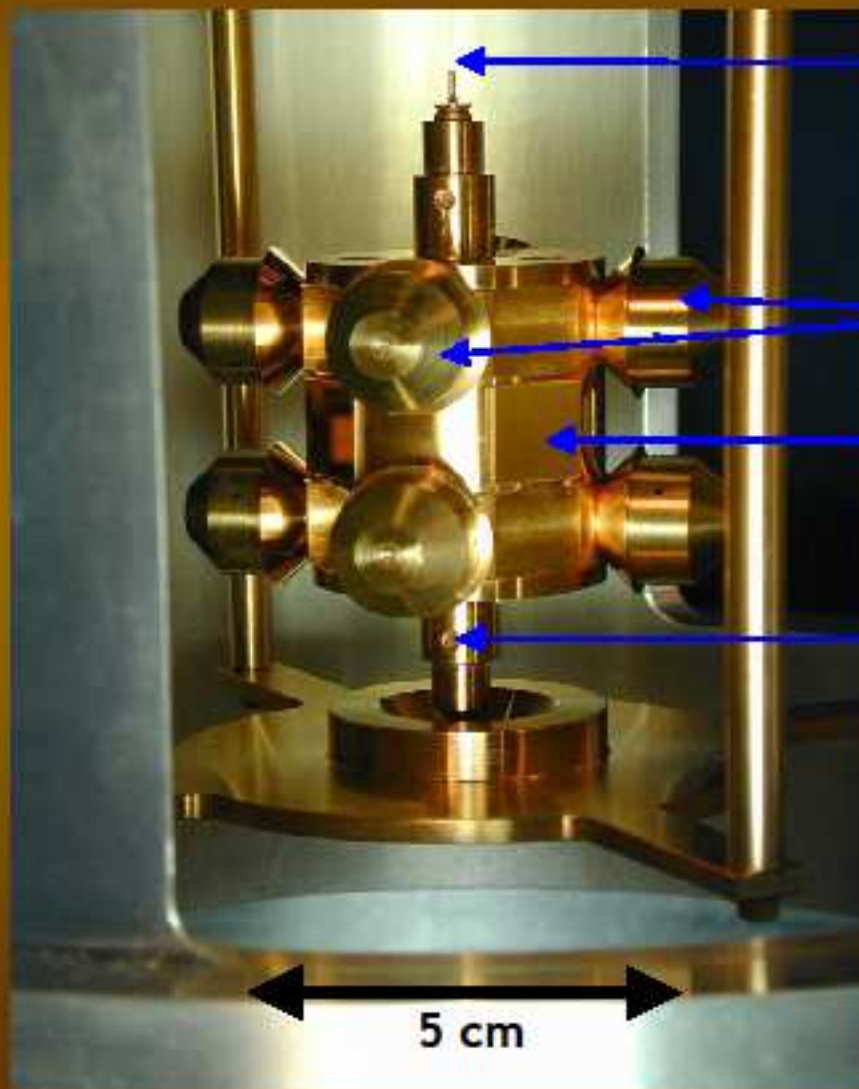


Crédit : Clifford Will (Washington University)

torsion pendulum of the recent Eöt-Wash EP test

S. Schlamminger et al., PRL 100, 041101 (2008)

Slide Eric Adelberger



20 μm diameter 108 cm long tungsten fiber

eight 4.84 g test masses (4 Be & 4 Ti) or (4 Be & 4 Al)

4 mirrors

tuning screws adjust the mass multipole moments & minimize sensitivity to gravity gradients

free osc freq:	1.261 mHz
quality factor:	4000
decay time:	11d 6.5 hrs
machining tolerance:	5 μm
total mass :	70 g

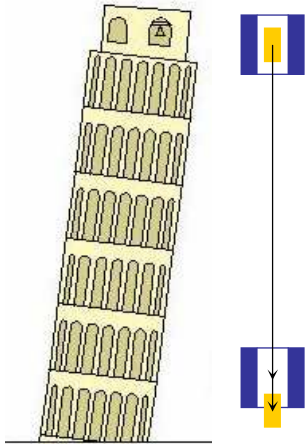
1 σ statistical + systematic uncertainties
from our Equivalence Principle experiment
with beryllium and aluminum test bodies;
beryllium and titanium data are similar

Source	Δa (cm/s ²)	$\Delta a/a_{\text{source}}$
Earth	$(-1.2 \pm 2.2) \times 10^{-13}$	$(-0.7 \pm 1.3) \times 10^{-13}$
Sun	$(-3.1 \pm 2.4) \times 10^{-13}$	$(-5.2 \pm 4.0) \times 10^{-13}$
Milky Way	$(-1.2 \pm 2.6) \times 10^{-13}$	$(-6.5 \pm 8.6) \times 10^{-6}$
CMB	$(-3.0 \pm 2.4) \times 10^{-13}$	$(-3.4 \pm 2.7) \times 10^{-4}$

Slide Eric Adelberger

PhD project of Todd Wagner

Microscope : le test du PE en orbite

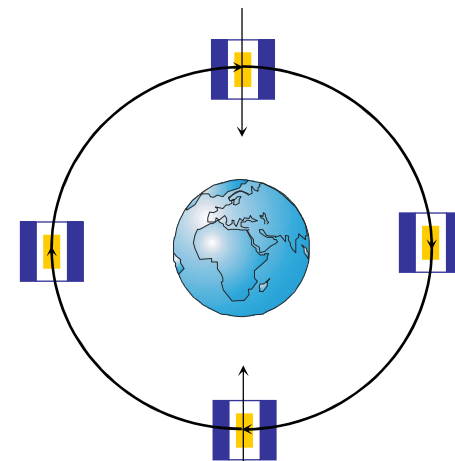


Le principe d'équivalence est testé avec une précision meilleure que 10^{-12} sur Terre.

Il est violé (faiblement) dans tous les modèles de grande unification des interactions fondamentales...

Pour améliorer encore la précision,
→ Expériences spatiales !

- Mesures différentielles
- Satellite en traînée compensée
- Temps de chute très long



Pierre Touboul et al



Les tests de la Relativité Générale (RG)

Solution dans le système solaire

- avec le Soleil traité comme une source ponctuelle immobile
- en utilisant des coordonnées spatiales isotropes
- avec le potentiel de Newton

$$g_{00} = (1 + 2\phi + 2\phi^2 + \dots)$$

$$g_{jk} = -(1 - 2\phi + \dots) \delta_{jk}$$

$$\phi \equiv -\frac{GM}{c^2 r}, \quad |\phi| \ll 1$$

La Relativité Générale (RG) est habituellement testée à travers sa confrontation aux métriques « paramétrisées post-Newtoniennes » (PPN)

$$g_{00} = (1 + 2\alpha\phi + 2\beta\phi^2 + \dots) \quad \alpha = 1 \text{ fixe } G$$

$$g_{jk} = -(1 - 2\gamma\phi + \dots) \delta_{jk} \quad \beta = \gamma = 1 \text{ en RG}$$

- La comparaison entre observations et prédictions est exprimée en termes de valeur des paramètres PPN

30 ans de tests de la Relativité Générale

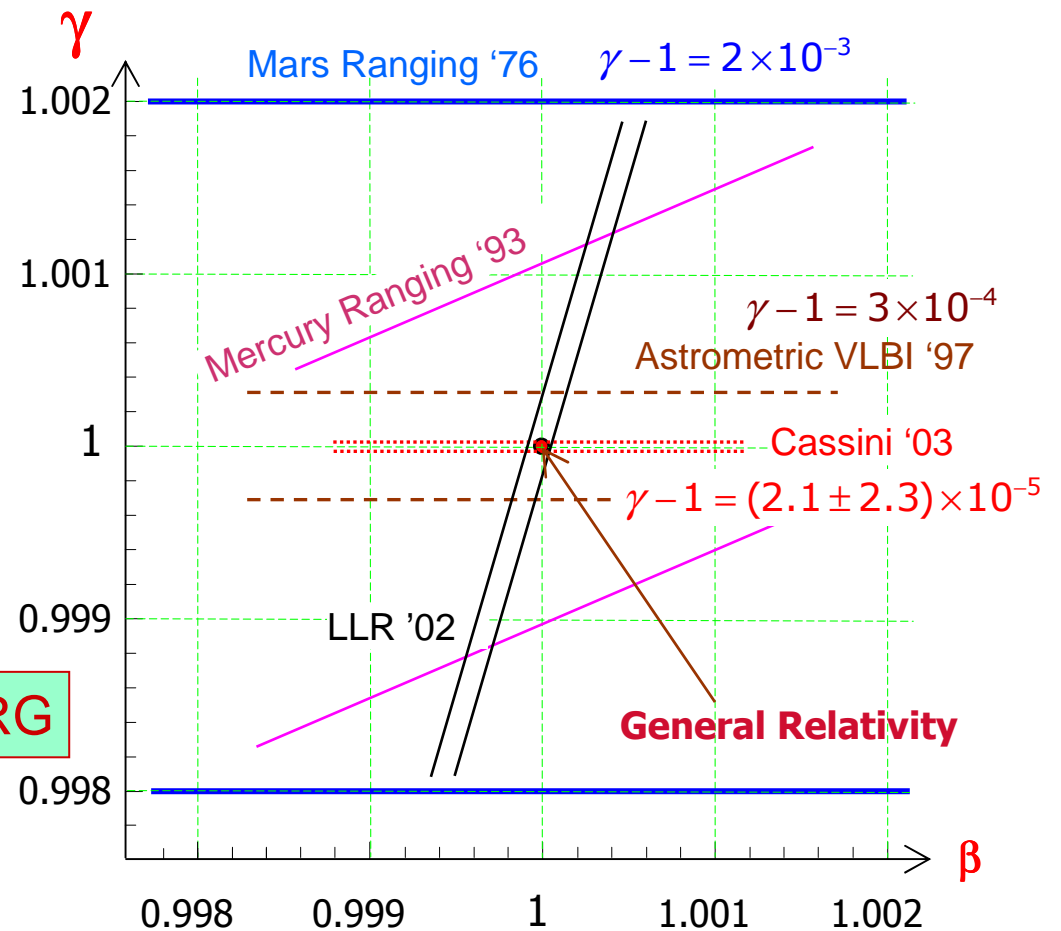
Expériences

- Mesures radar sur les planètes
- Astrométrie et VLBI
- Mesure de distance Terre-Lune (LLR)
- Vélocimétrie Doppler sur des sondes planétaires

Tous résultats compatibles avec RG

$$\beta = \gamma = 1$$

tous sauf exception ...



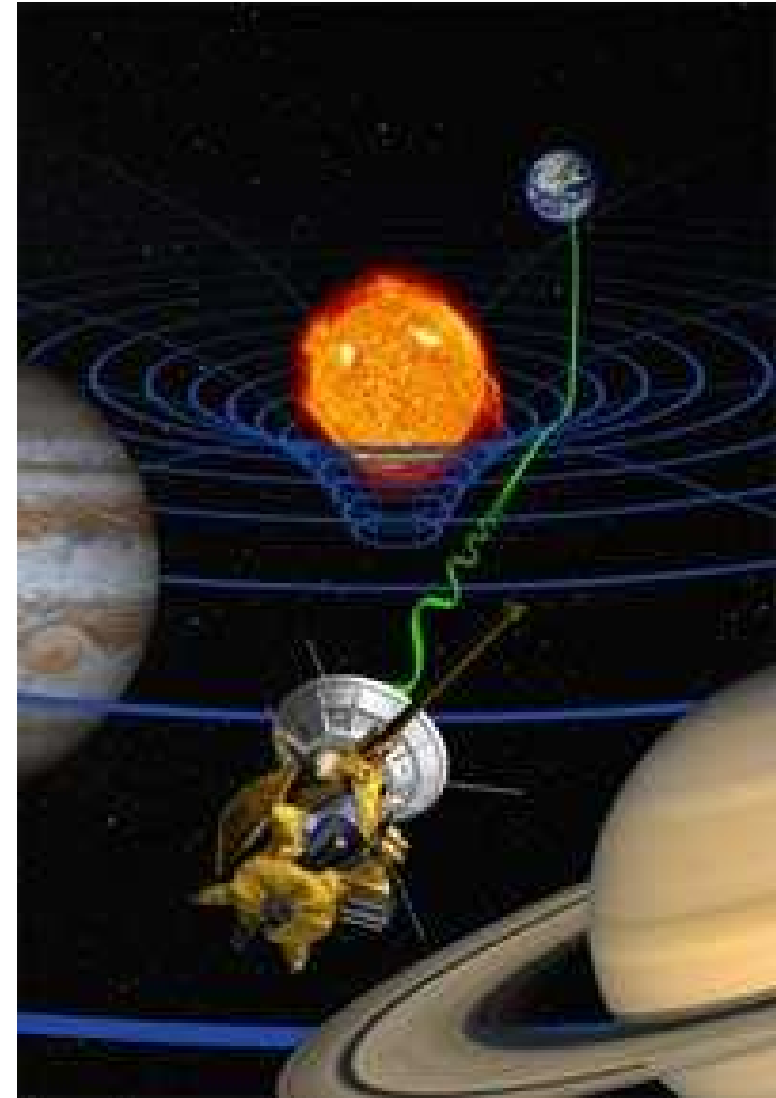
Crédit : Slava Turyshev et al, JPL NASA

Lors de son voyage vers Saturne,
Cassini a effectué un test de la
relativité générale lors d'un de ses
passages derrière le Soleil

Mesure faite par vélocimétrie
Doppler de la sonde

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{1 + \gamma}{2} \left(\frac{\Delta v}{v} \right)_{GR}$$

Résultat en accord avec
la Relativité Générale
à quelques 10^{-5}



L'histoire des tests continuera

parce qu'il y a de bonnes raisons !

Des raisons théoriques

- La RG est une théorie classique qui présente des incompatibilités avec la théorie quantique
- Les modèles d'unification prévoient des modifications des phénomènes gravitationnels aux échelles de longueur pas encore testées

Des raisons observationnelles

- La matière noire et l'énergie noire sont des anomalies gravitationnelles observées aux grandes échelles de l'astrophysique et de la cosmologie

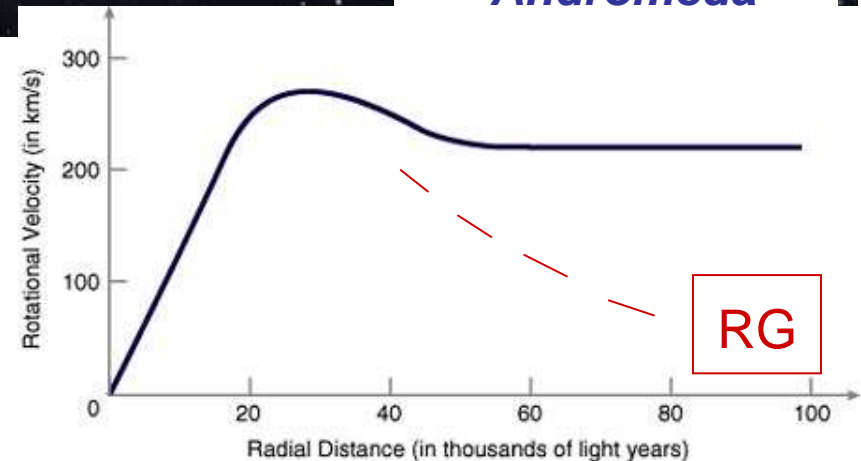
Anomalies galactiques

Les courbes de rotation des galaxies diffèrent des prédictions de la RG



Andromeda

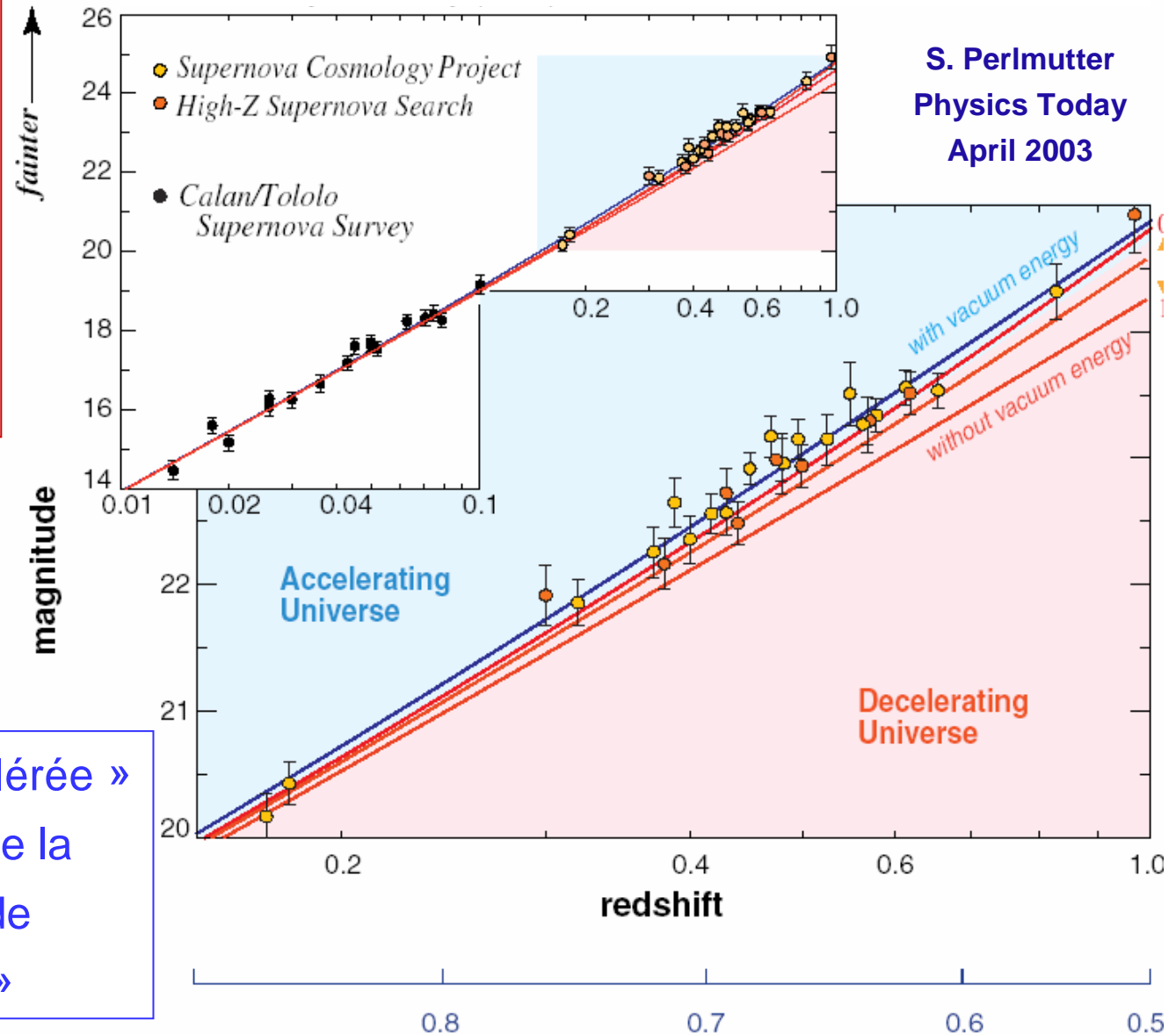
Cette « masse manquante » est interprétée comme la mise en évidence de la « matière noire »



Anomalies cosmiques

The Nobel Prize in Physics 2011
S. Perlmutter, B.P. Schmidt, A.G. Riess
<http://www.nobelprize.org>

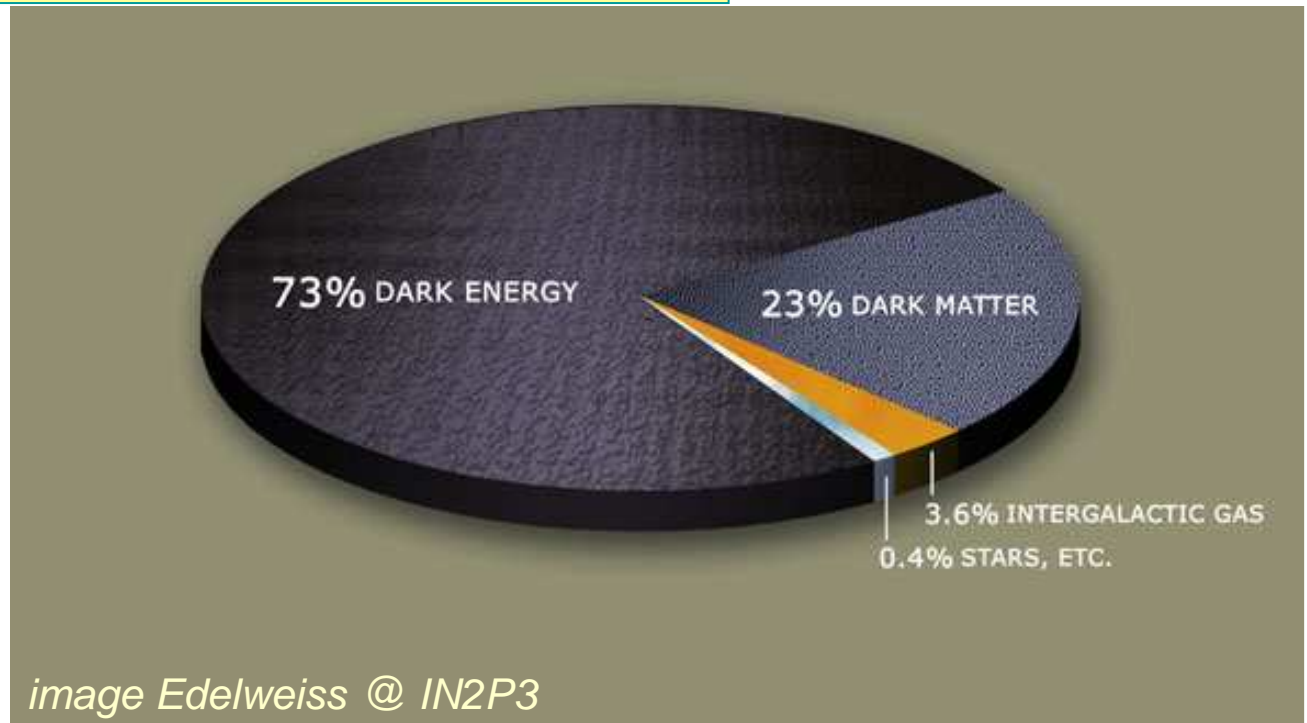
Les courbes
d'expansion
cosmique
diffèrent
des prédictions
de la RG



Cette « expansion accélérée »
est interprétée comme la
mise en évidence de
l'« énergie noire »

Le “coté obscur” de l’Univers

La nature de
96% du contenu
de l’Univers
est incomprise !



La RG est utilisée pour obtenir les informations sur
la « matière noire » et l’ « énergie noire ».

Tant que celles-ci ne sont pas observées par des moyens indépendants,
il est important de tester la validité de la RG à grande échelle.

Les tests dépendant de l'échelle

La recherche de la « cinquième force », une étude systématique de la dépendance d'échelle des tests

Recherche d'un potentiel de Yukawa superposé au potentiel de Newton

$$g_{00} = [g_{00}]_{GR} + \delta g_{00}$$

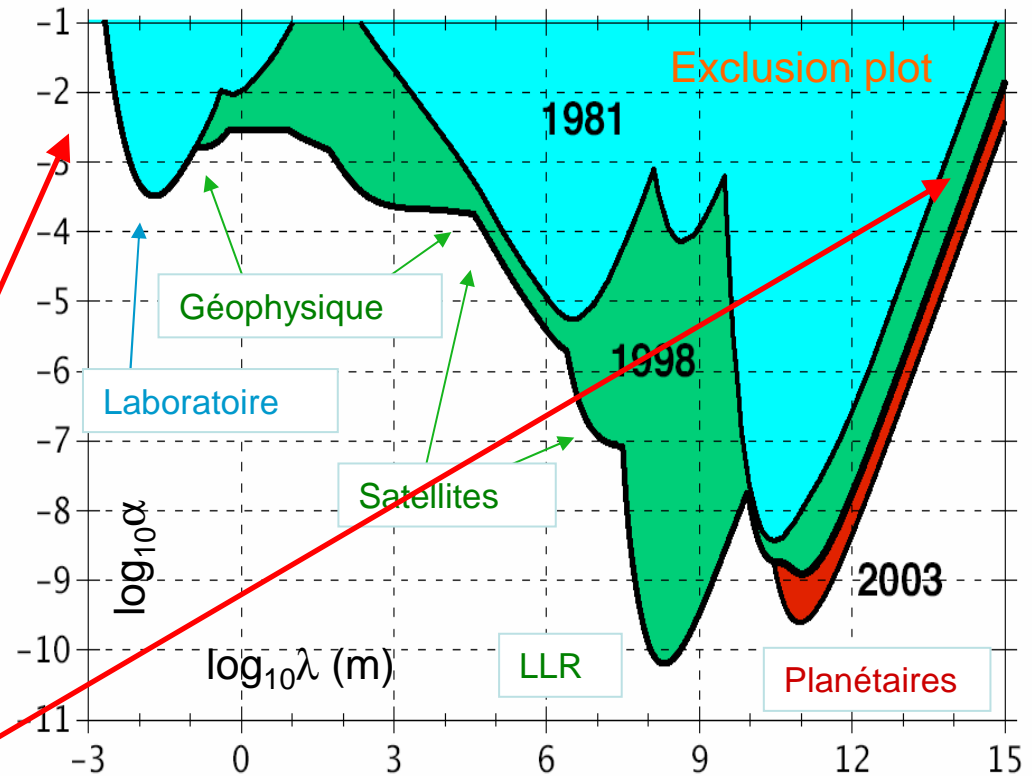
$$\delta g_{00}(r) = 2\phi(r) \times \alpha e^{-\frac{r}{\lambda}}$$

Des fenêtres restent ouvertes pour des déviations à courte distance

$$\lambda < 10^{-3} \text{ m}$$

ou longue distance

$$\lambda > 10^{15} \text{ m}$$



Courtesy : J. Coy, E. Fischbach, R. Hellings, C. Talmadge & E. M. Standish (2003) ; see M.T. Jaekel & S. Reynaud IJMP **A20** (2005)

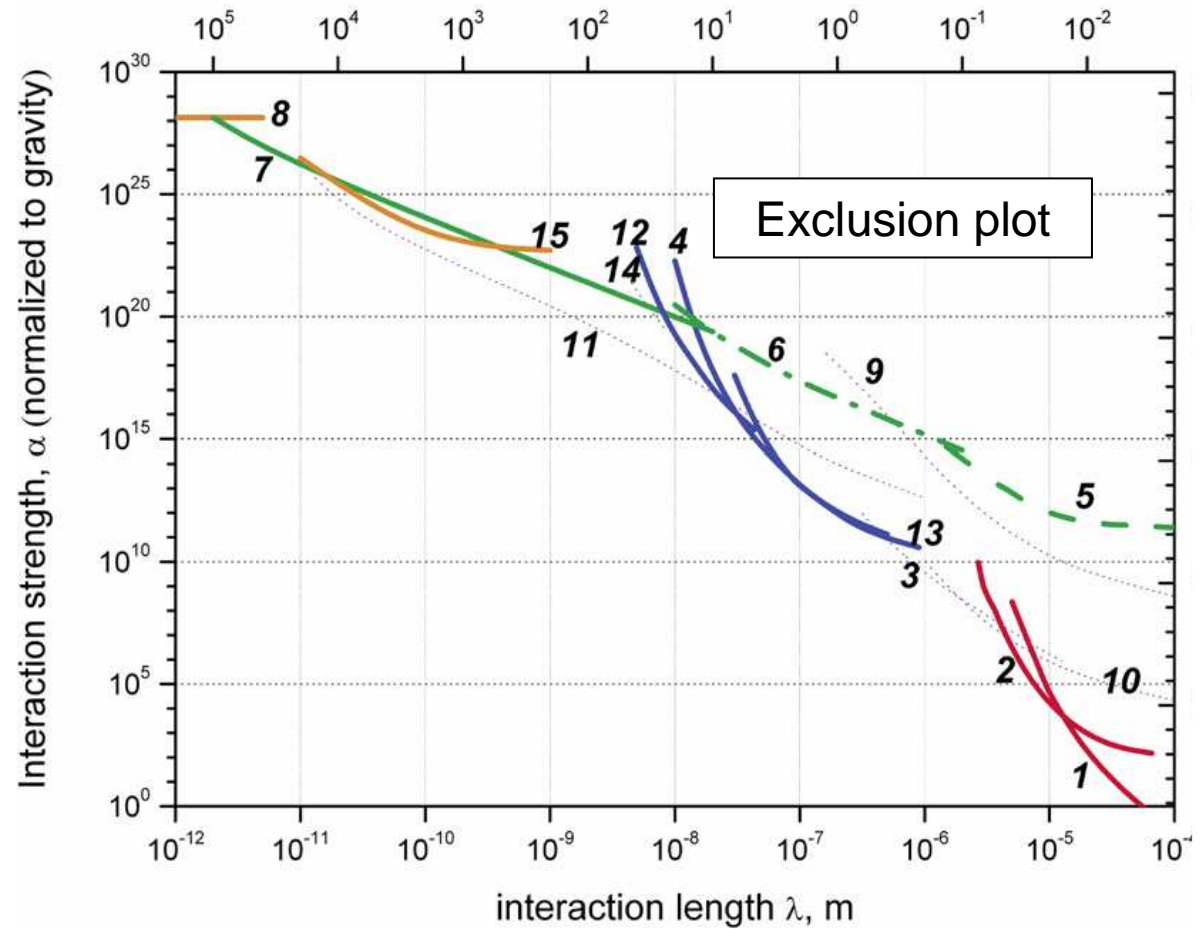
The Search for Non-Newtonian Gravity, E. Fischbach & C. Talmadge (1998)

Contraintes aux échelles sub-mm

Informations venant de
différents domaines

Du mm jusqu'au pm

- Pendules de torsion
- Force de Casimir
- Physique des neutrons
- Atomes exotiques



Revue récente : I. Antoniadis, S. Baessler, M. Büchner, V. Fedorov, S. Hoedl, A. Lambrecht, V. Nesvizhevsky, G. Pignol, K. Protasov, S. Reynaud, Yu. Sobolev, *Short-range fundamental forces* C. R. Phys. (2011)

doi:10.1016/j.crhy.2011.05.004

Contraintes aux grandes échelles

Meilleur exemple de test à des distances aussi grandes que possible :
extension par la NASA des missions Pioneer 10/11 après qu'elles
aient rempli leurs objectifs primaires



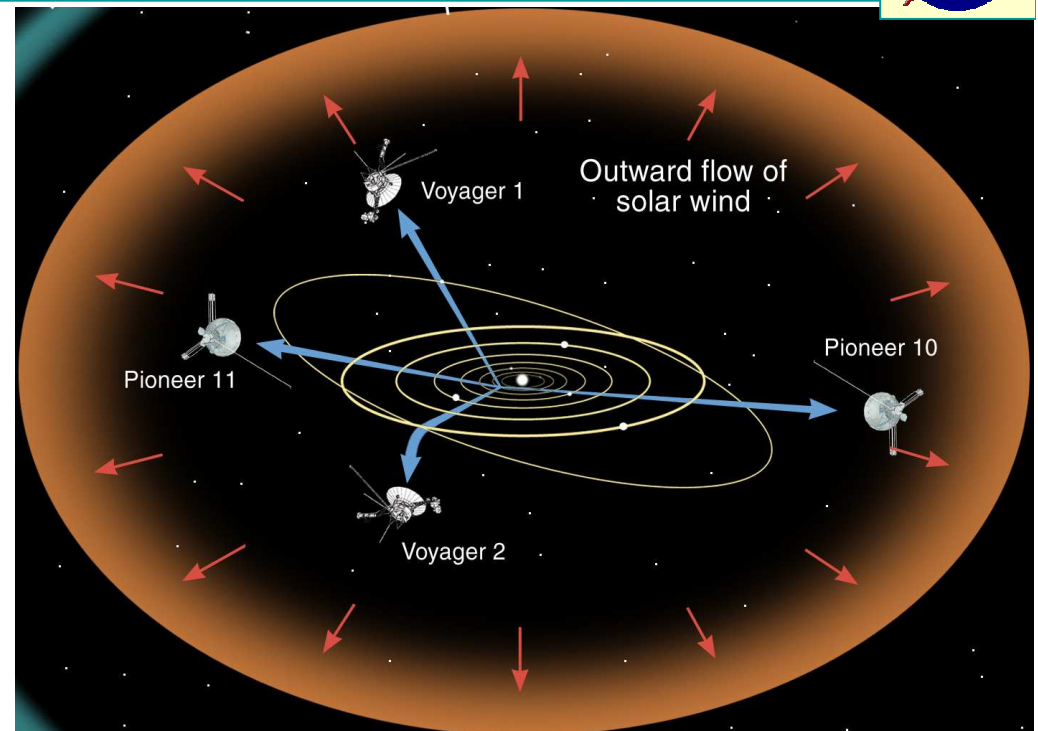
Test de plus grande échelle
jamais réalisé

Accélération anormale observée,
de l'ordre du nm/s^2 ,
en direction du Soleil

J.D. Anderson *et al*,
PRD **65** 082004 (2002)

Bilan du rayonnement thermique
récemment réévalué

B. Rievers *et al*, Space Sci Rev (2010)
F. Francisco *et al*, Phys Lett B (2012)
S. Turyshev *et al*, Phys Rev Lett (2012)



Incertitude sur la mesure de force de
Newton dans le système solaire
externe de l'ordre du nm/s^2

Tests de la gravité dans le système solaire

Nous avons développé un cadre phénoménologique pour tester la gravitation dans le système solaire

- extensions métriques de la RG
- qui doivent être en accord avec les nombreux tests existants
- mais peuvent éventuellement permettre l'existence de déviations avec la RG (probablement petites dans le système solaire)

M.-T. Jaekel, S. Reynaud, *Classical Quantum Gravity* (2005-2006)

Exemples

- données de navigation de sondes planétaires (Cassini, New Horizons, JUICE ...)
- données astrométriques (GAIA)
- missions dédiées avec des techniques améliorées ou instruments à embarquer sur de futures missions planétaires

A. Hess *et al* arXiv:1201.5041

Nouvelles idées de missions

Motivations :

- ✓ Avec un accéléromètre à bord (*jamais fait sur aucune sonde lointaine*), on a une observable supplémentaire qui élimine les incertitudes sur les modèles de forces non gravitationnelles
- ✓ Avec les techniques largement améliorées depuis, on supprime toutes les difficultés qui ont limité les mesures sur les *Pioneer*

Intérêt considérable pour la physique fondamentale :

- ➡ Tests de la loi de gravité pendant la croisière, de façon beaucoup plus précise et fiable (100 fois mieux)
- ✓ Tests possibles pour les rebonds gravitationnels (*flybys*)

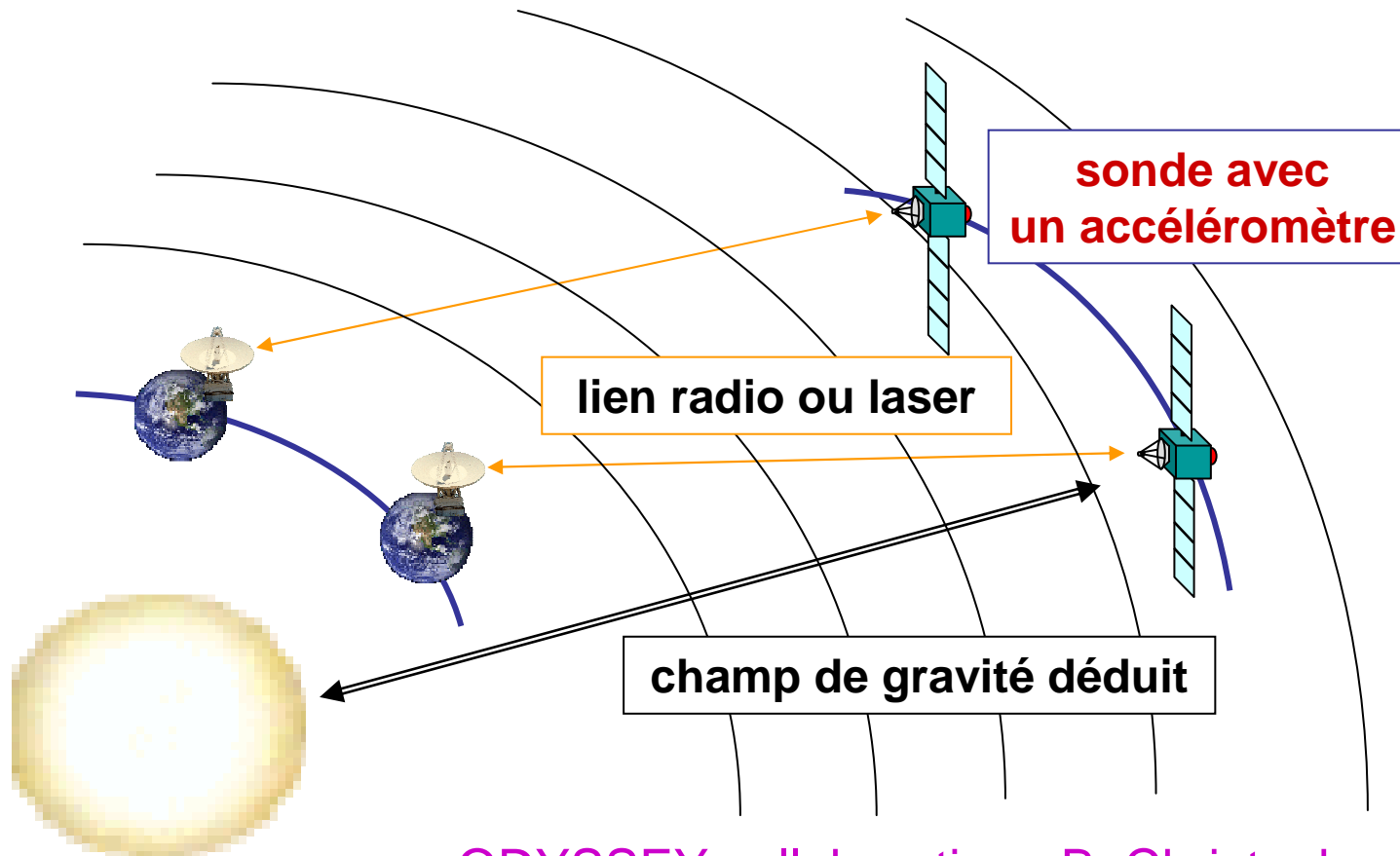
Très important aussi pour la physique des objets visités :

- ✓ Champ de gravité des planètes, de leurs lunes, des KBO (analogue à la géodésie terrestre avec GRACE, GOCE)
- ✓ Environnements des objets et du système solaire externe

Nouvelles idées de missions



Combiner suivi Doppler et accélérométrie
pour mesurer la force de Newton sans ambiguïté



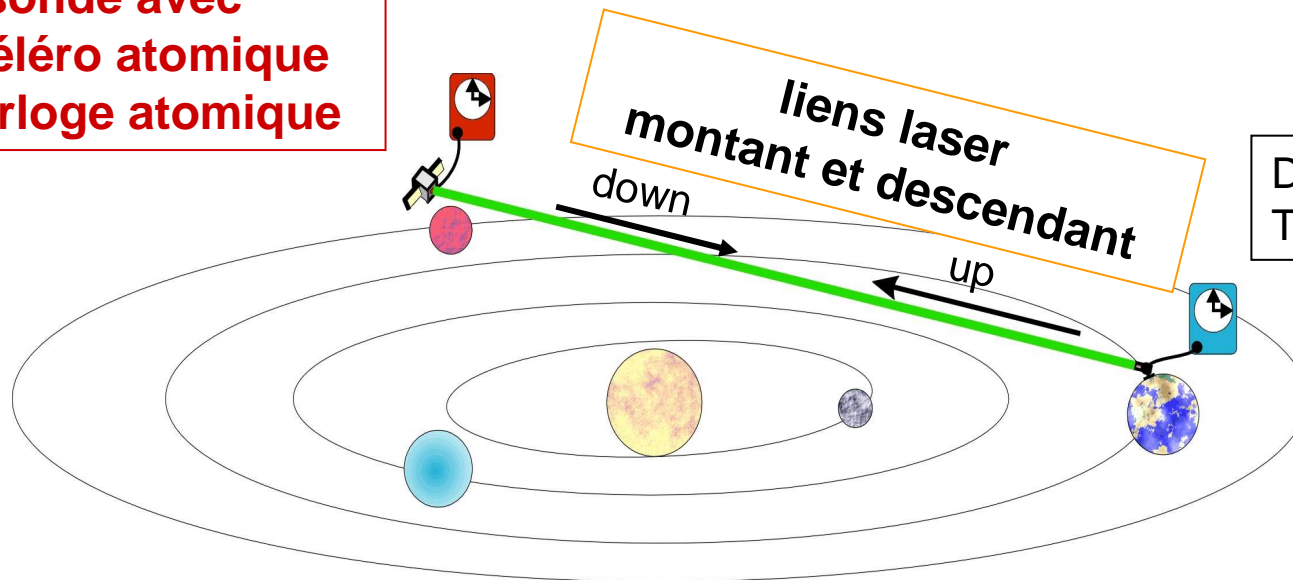
ODYSSEY collaboration : B. Christophe *et al*,
Experimental Astronomy **23** (2009) 529

Nouvelles idées de missions

Horloges atomiques et liens laser asynchrones
pour tester les lois de la gravitation
sous tous leurs aspects



sonde avec
accéléro atomique
et horloge atomique

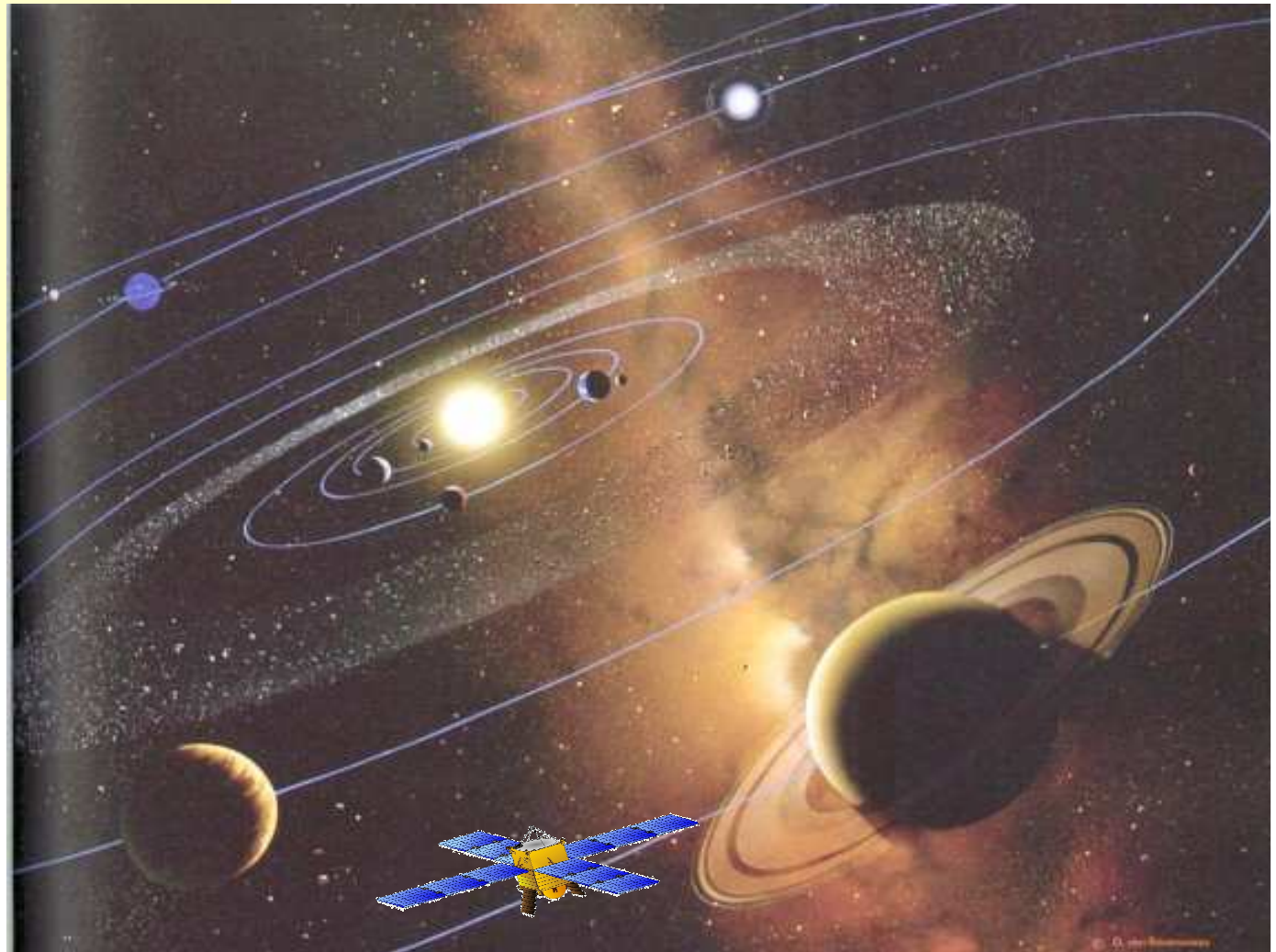
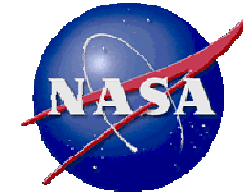


SAGAS collaboration : P. Wolf *et al*,
Experimental Astronomy **23** (2009) 651

Nouvelles idées de missions

Outer Solar System (OSS) :
Combiner le test de gravité
avec des objectifs
de planétologie
sur Neptune/Triton
et la ceinture
de Kuiper

OSS collaboration,
B. Christophe *et al*,
Experimental
Astronomy (2012)



Merci pour votre attention

Collaborations

“Pharao/ACES” Christophe Salomon *et al*

“MICROSCOPE” Pierre Touboul *et al*

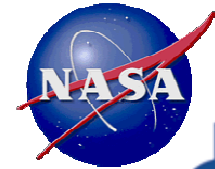
“Solar System ODYSSEY”, “Outer Solar System”,
“Gravity Advanced Package” Bruno Christophe *et al*

“SAGAS” Peter Wolf *et al*

“Scientific Exploitation of Navigation Data” Agnès Fienga *et al*

“STE-QUEST” ...

“GAIA” ...



ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

