



Anomalie Pioneer : analyse des données et proposition de mission

SF2A 06/07/2007

Agnès Levy & Bruno Christophe (ONERA)

Jean-Michel Courty (LKB)

Gilles Metris & Philippe Berio (OCA)



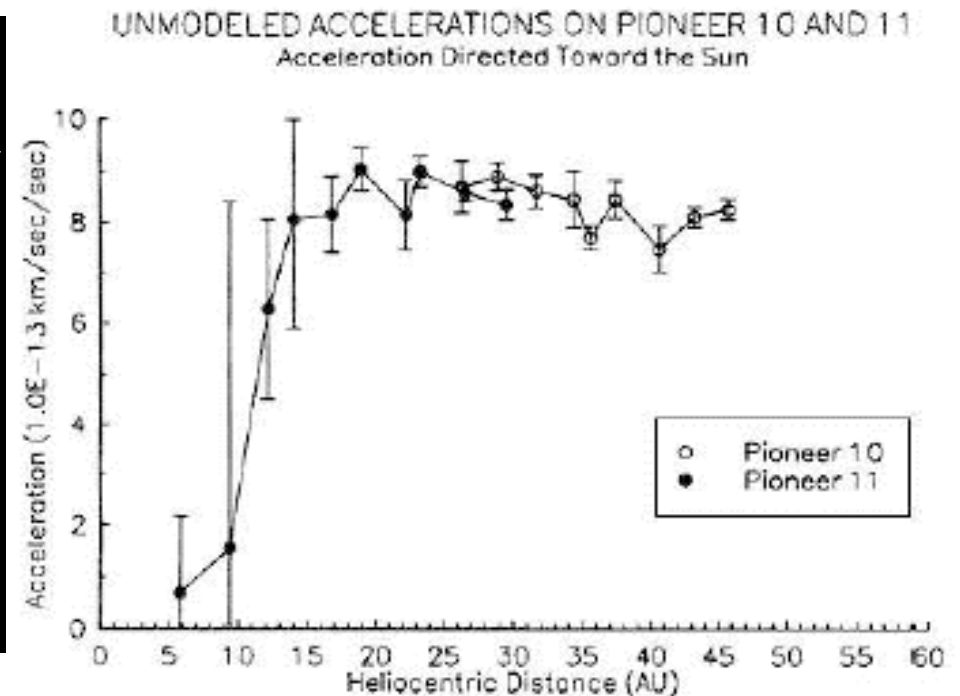
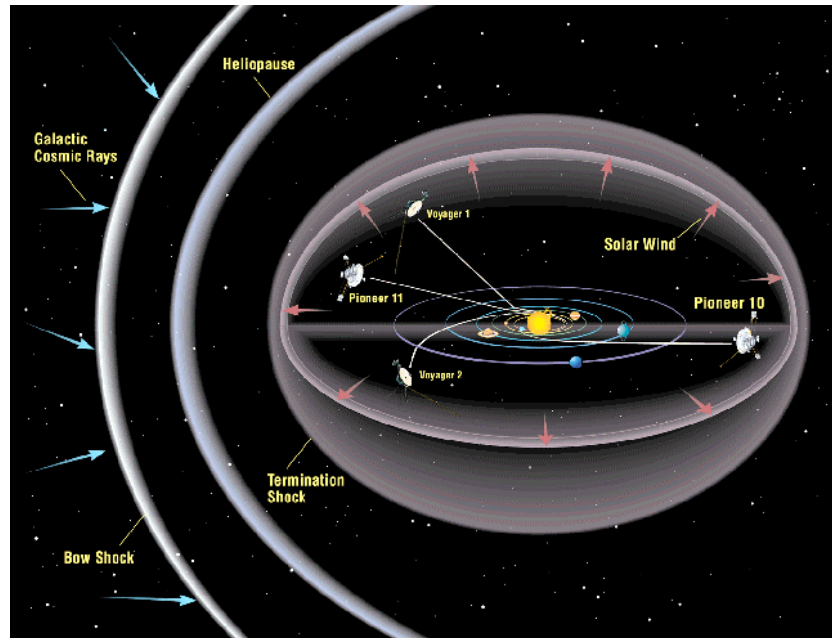
Groupe Anomalie Pioneer - FRANCE

Introduction : l'anomalie Pioneer

Pioneer 10 lancée le 2 Mars 1972

Pioneer 11 lancée le 5 Avril 1973

Décélération : $(8.74 \pm 1.33) 10^{-10} \text{ m.s}^{-2}$



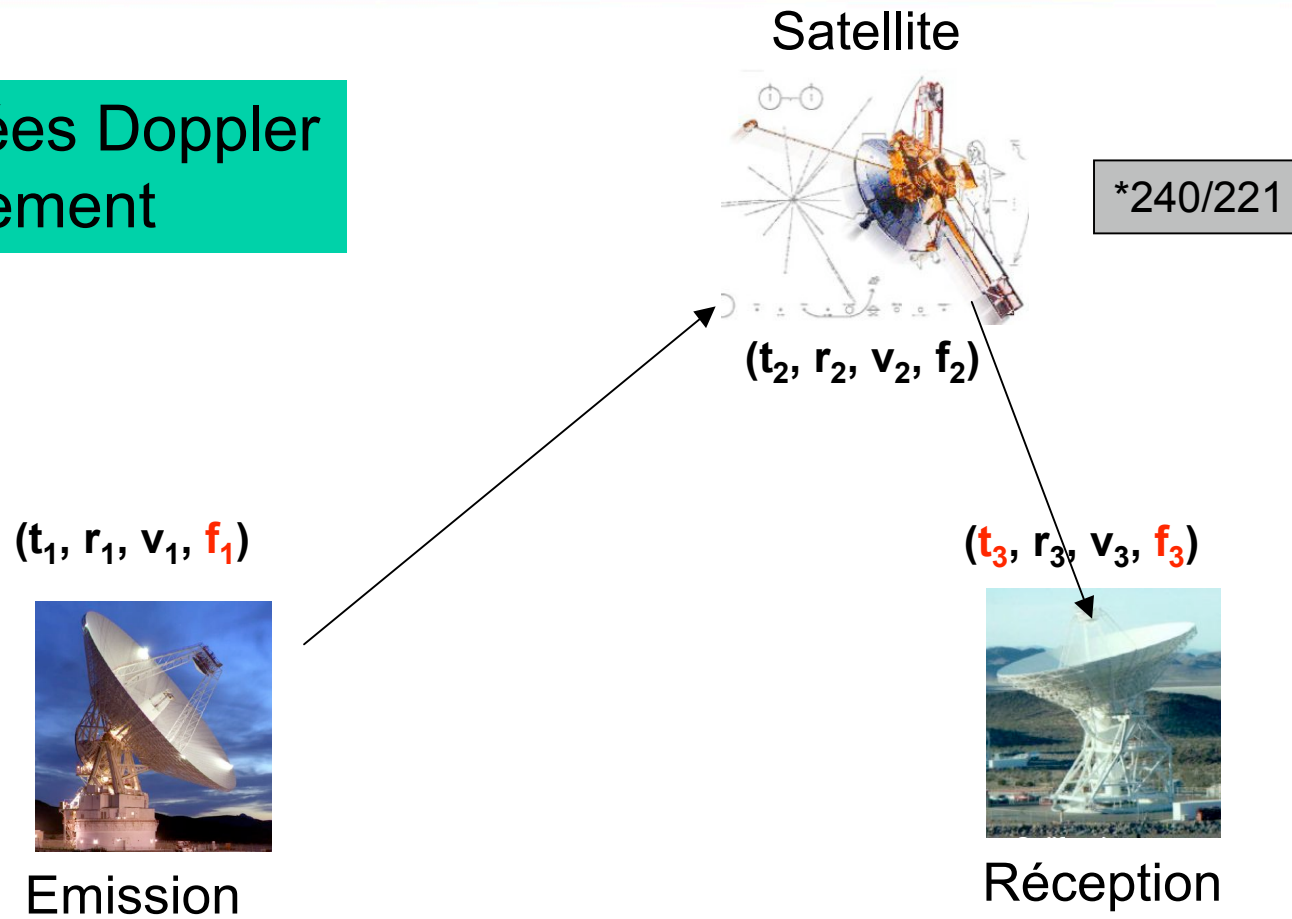
J. Anderson et al, Phys. Rev. D 65 (2002) 082004

Plan de l'exposé

- Description des données
 - Fichiers ATDF
 - Fichiers ODF
- Analyse des données
 - Description du logiciel
 - Résultats obtenus
- La mission ODYSSEY
 - Description générale de la mission
 - Charge utile

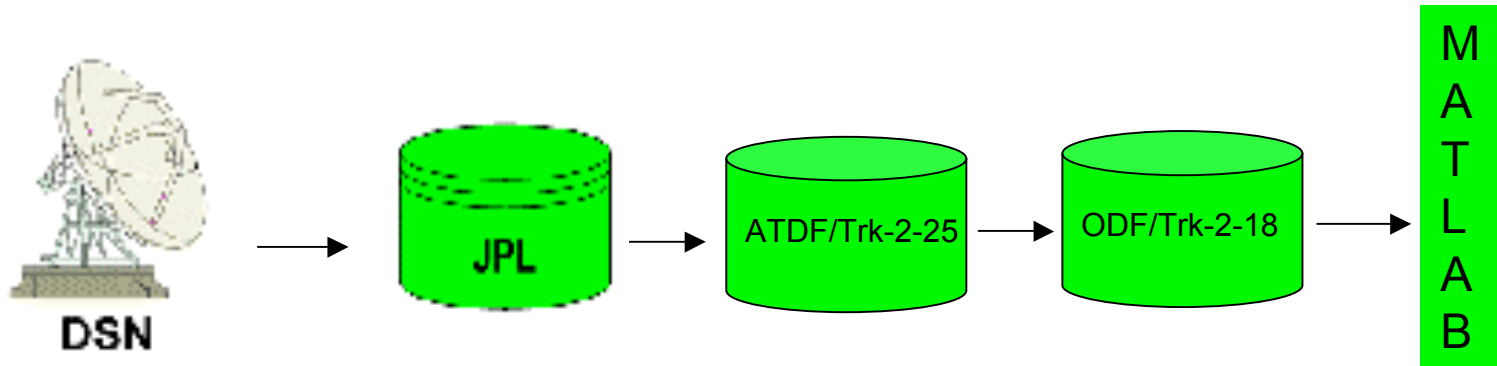
Description des données : principe de la mesure

Données Doppler
uniquement



A partir de f_1 , f_3 et t_3 , il est possible de remonter aux autres informations

Description des données : les ATDF et les ODF



Contenu ODF :

Instant de détection
Observable Doppler : $(240/221) * f_{up} - f_{down}$
Fréquence de référence : fréquence émise
Antenne de détection
Antenne d'émission
Temps de compression $t_i - t_j$

Pioneer 10 : 1987 to 1998
Pioneer 11 : 1986 to 1990

Contenu ATDF :

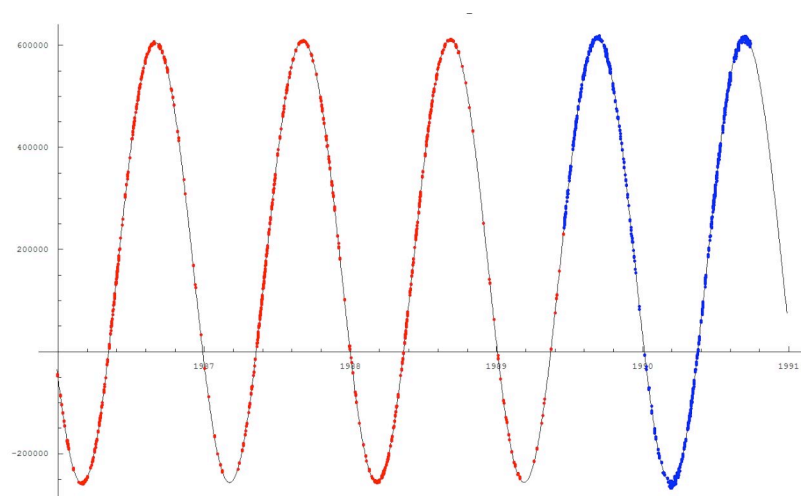
Instant de détection
Comptes Doppler
Fréquence de référence
à l'instant de détection
Antenne de détection

Pioneer 10 : 1987 to 1994

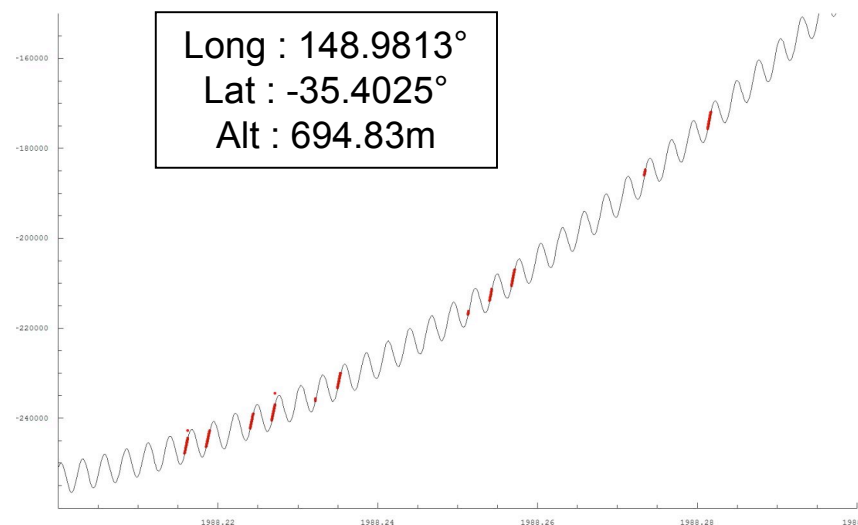
Description des données : contenu ODF Pioneer 11

Décalage Doppler Pioneer 11 :

Variation annuelle : Mouvement de la terre Variation journalière : Rotation de la terre



— 2-Way
— 3 Way
— éphéméride Horizon (NASA)



— 2 way station DSN 43 Camberra
— éphéméride Horizon (NASA)

Analyse des données : le logiciel de détermination d'orbite

- Logiciel ODYSSEY (Orbit Determination and physical studies in the Solar Environment Yonder)
- Développé à l'Observatoire de la Côte d'Azur (GEMINI, Grasse) en collaboration avec l'ONERA
- Méthode des moindres carrés avec intégration numérique des équations dynamiques et variationnelles

Modèle dynamique

Attraction du Soleil et des planètes
Pression de radiation
Manœuvres
Accélérations anormales

Fonction de mesure

Doppler (ATDF/ODF)
Range

Estimation

Conditions initiales
Manœuvres
Accélérations anormales

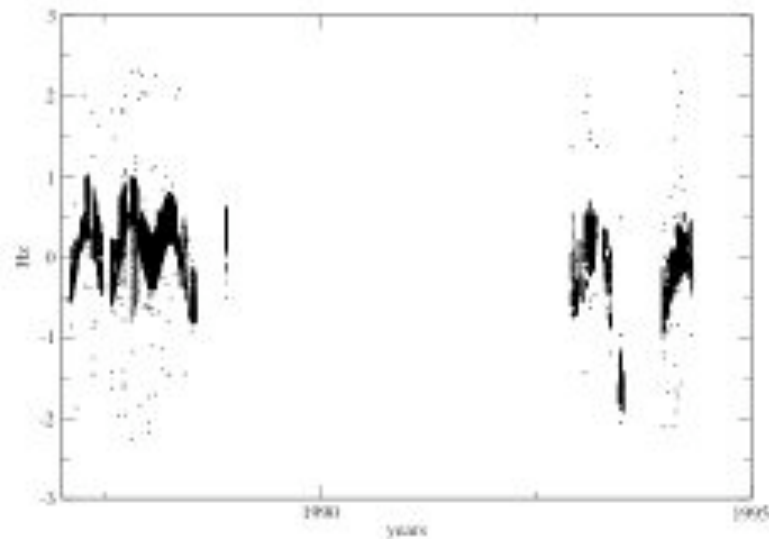
Analyse des données : modèles d'anomalies

- Accélération constante : $\mathbf{r} \mathbf{a} = \mathbf{a}_o \begin{cases} \mathbf{u}_{\text{Soleil/Sat}} \\ \mathbf{r} \\ \mathbf{u}_{\text{Terre/Sat}} \end{cases}$
- Accélération parabolique : $\mathbf{r} \mathbf{a} = (a + b * t + c * t^2) \begin{cases} \mathbf{u}_{\text{Soleil/Sat}} \\ \mathbf{r} \\ \mathbf{u}_{\text{Terre/Sat}} \end{cases}$
- Accélération modulées : $\mathbf{r} \mathbf{a} = (a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t)) \begin{cases} \mathbf{u}_{\text{Soleil/Sat}} \\ \mathbf{r} \\ \mathbf{u}_{\text{Terre/Sat}} \end{cases}$
- Anomalies modulées de mesure : $\Delta f = (a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t))$
- Estimation simultanée de plusieurs modèles
- Paramètres estimés par arc (par exemple entre 2 manœuvres)

Analyse des données : résultats ATDF Pioneer 10

Estimation

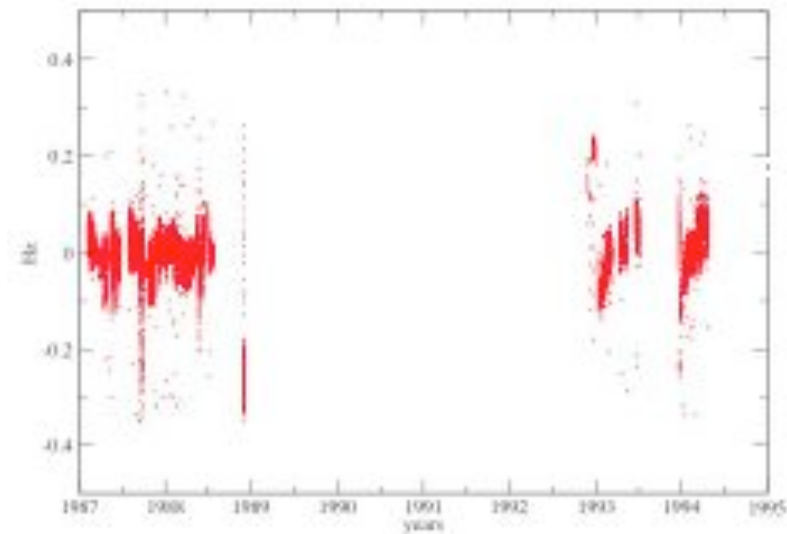
- des conditions initiales



RMS des résidus = 387 mHz

Estimation

- des conditions initiales
- des manœuvres radiales

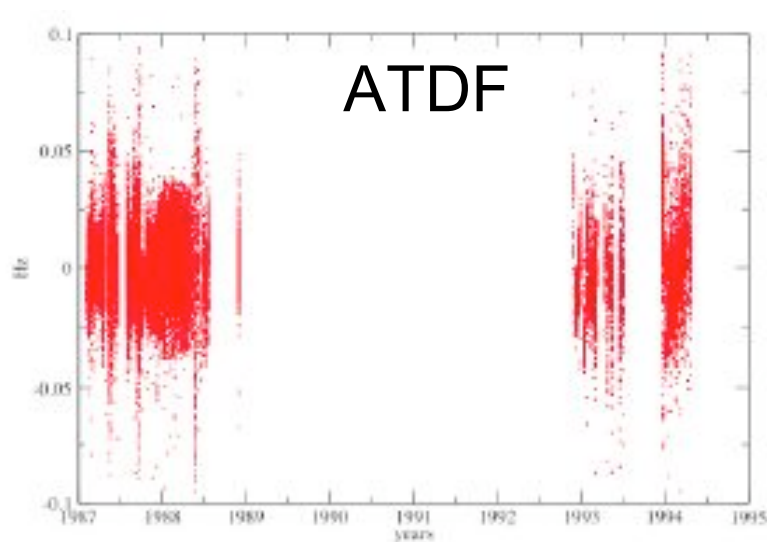


RMS des résidus = 59 mHz

Analyse des données : résultats ATDF et ODF Pioneer 10

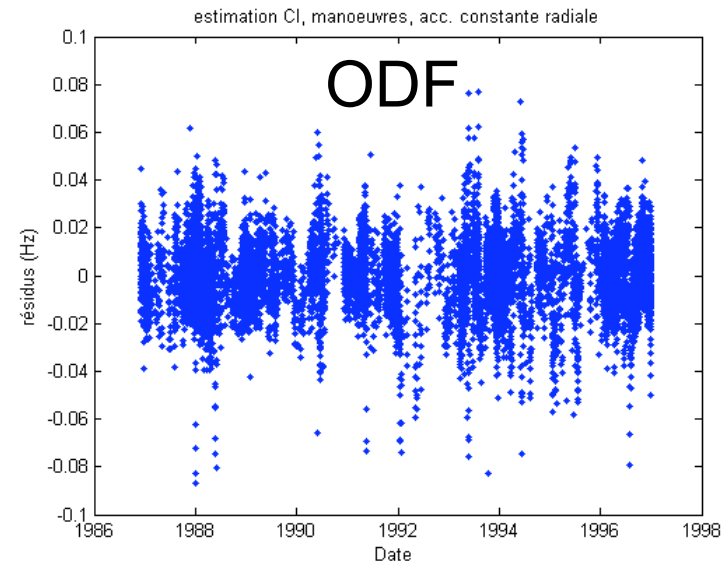
Estimation

- des conditions initiales
- des manœuvres radiales
- d'une anomalie constante radiale



RMS des résidus : 16 mHz

Anomalie estimée :
 $-(8.40 \pm 0.003) \cdot 10^{-10} \text{ms}^{-2}$

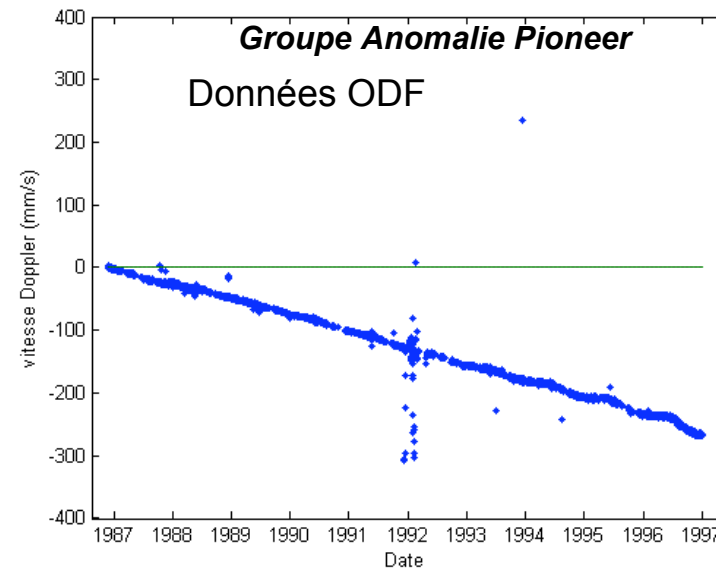
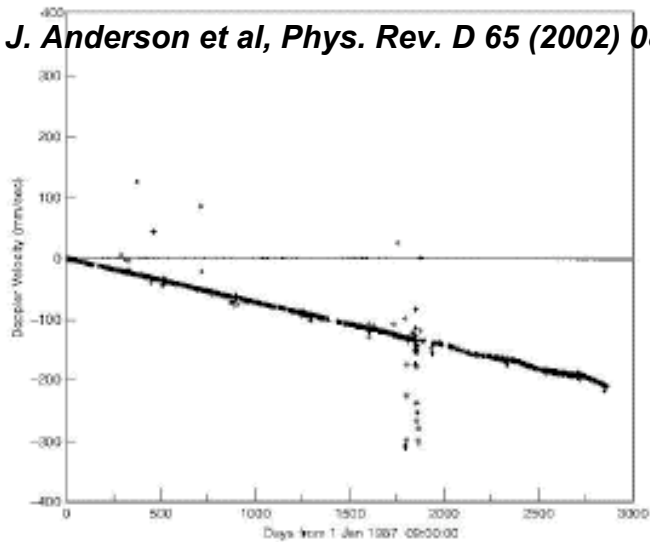


RMS des résidus : 15.23 mHz

Anomalie estimée :
 $-(8.35 \pm 0.02) \cdot 10^{-10} \text{ms}^{-2}$

Analyse des données : résultats Pioneer 10

J. Anderson et al, Phys. Rev. D 65 (2002) 082004



Anderson et al . : ODF Pioneer 10	GAP : ODF Pioneer 10	GAP : ATDF Pioneer 10
$8.74 \cdot 10^{-10} \text{ ms}^{-2}$	$8.35 \cdot 10^{-10} \text{ ms}^{-2}$	$8.4 \cdot 10^{-10} \text{ ms}^{-2}$

Confirmation indépendante de l'existence d'une accélération anormale constante sur les données ATDF et ODF

Analyse des données : étapes suivantes

- Amélioration de la prise en compte des effets troposphériques et ionosphériques
- Implémentation de modèles théoriques pour la gravité

Extensions métriques de la Relativité Générale

M.T. Jaekel & S. Reynaud, Class. Quant. Gravity 23 (2006) 7561

« Modified Gravitational Theory »

J. Moffat, arXiv : gr-qc/0405076v1

- Estimation des effets thermiques
 - Utilisation des données de « housekeeping »

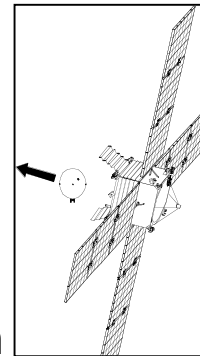
Mission ODYSSEY : objectifs scientifiques et profil de la mission

Mission de classe M (<300 M €) proposée à Cosmic Vision de l'ESA

Scenario	Instruments	Scientific objective (value at 1σ)			
		Deep space gravity test <i>Sirens experiment</i>	Fly-by investigation <i>Charybdis & Scylla experiment</i>	Solar conjunction <i>Polyphemus experiment</i>	Outer Solar System <i>Calypso experiment</i>
3	a Accelerometer Radio-science VLBI Laser ranging	$ \delta a < 40 \text{ pm/s}^2$ (3-axes) up to 13 AU	$ \delta \Delta V < 10 \text{ } \mu\text{m/s}$ (3-axes)	Largely better than Cassini $ \delta y < 10^{-7}$	-
	b Radio beacon with VLBI	$ \delta a < 8 \text{ pm/s}^2$ (3-axes) from 10 AU	-	-	$ \delta a < \text{a few pm/s}^2$

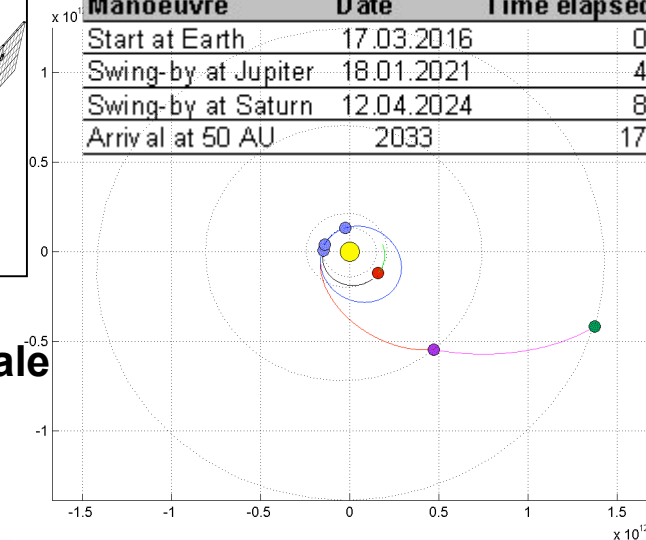
Etapes de la mission :

- 1 UA : Début de mission
- 7.5 UA : Extinction laser ranging
- 10 UA : Ejection du Radio-beacon
- 13 UA : Fin de mission de la sonde principale
- 50-80 UA: Fin de mission du radio-beacon



Trajectoire EMEEJS (2017)

Manoeuvre	Date	Time elapsed
Start at Earth	17.03.2016	0,0
Swing-by at Jupiter	18.01.2021	4,7
Swing-by at Saturn	12.04.2024	8,0
Arrival at 50 AU	2033	17,6



Outer Solar System

Deep Space gravity

Fly-by + solar conjunction

Mission ODYSSEY : la sonde

Masse totale : 422 kg
(avec radio-beacon)

**Solar panel with
LILT cells (Rosetta) – 4 x 5 m²**

**TIPO telescope
One-way laser ranging**

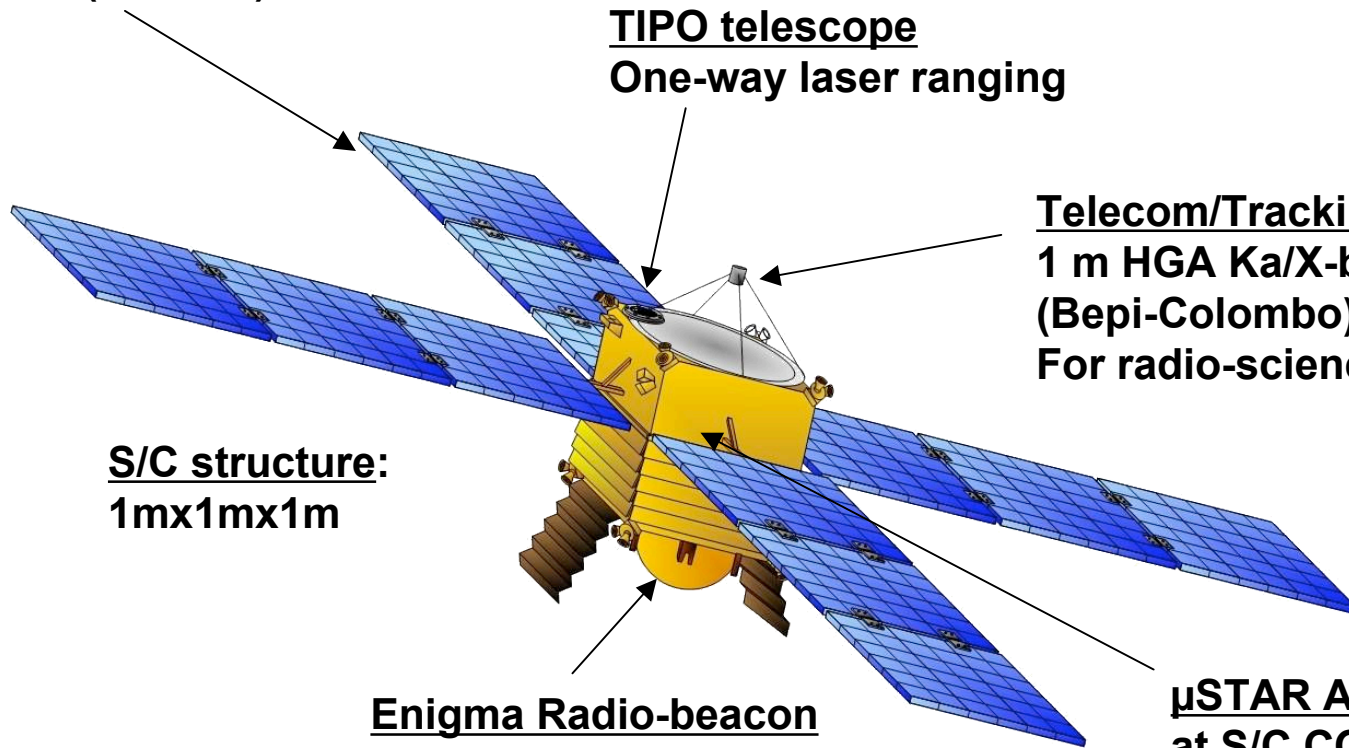
**Telecom/Tracking
1 m HGA Ka/X-band
(Bepi-Colombo)
For radio-science and VLBI**

**S/C structure:
1mx1mx1m**

**Enigma Radio-beacon
Released at 10 AU**

**μSTAR Accelerometer
at S/C COM**

**S/C attitude:
3-axes stabilisation
with reaction wheels up to 7.5 AU
Spin stabilised after 7.5 AU**

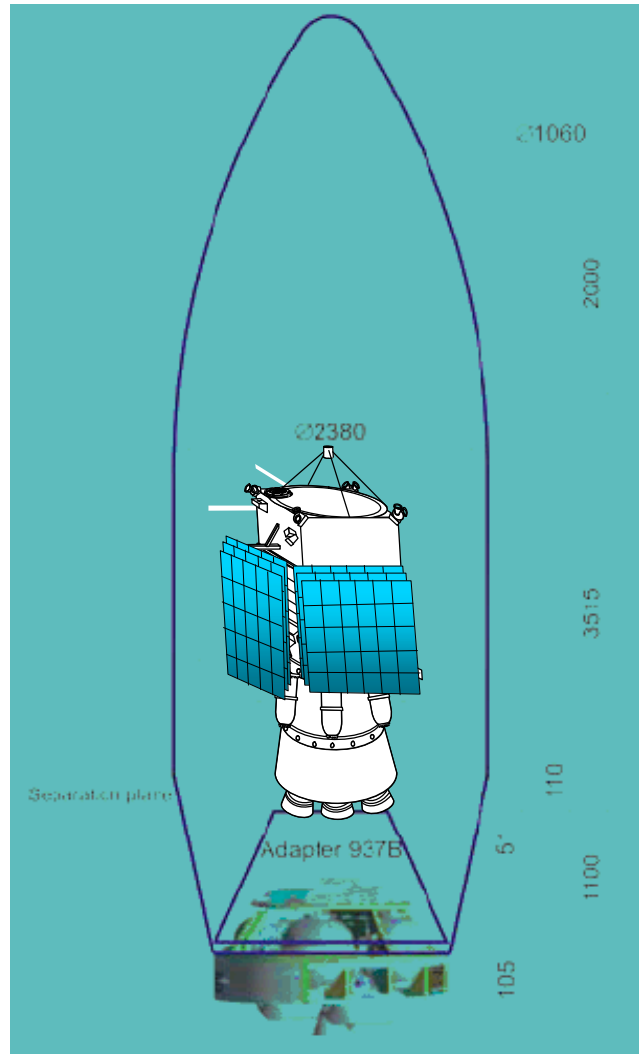


Conclusion

- Confirmation indépendante de l'existence d'une anomalie sur les données ATDF et ODF
- Analyse plus fine des variations de cette anomalie en cours (modèles empiriques et théoriques)
- Les lois de la gravité doivent être testées à grande échelle
 - Proposition de la mission ODYSSEY pour le programme Cosmic Vision de l'ESA
 - Sélection : Octobre 2007

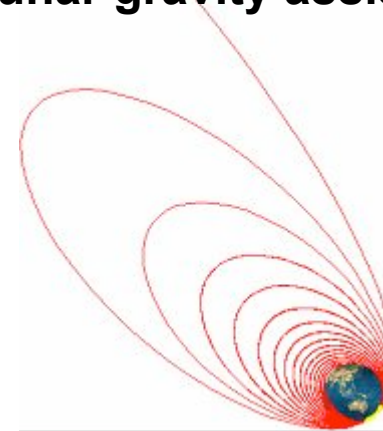
Mission ODYSSEY : Mise en orbite interplanétaire

Launch with VEGA on LEO: 2240 kg



Earth Escape:

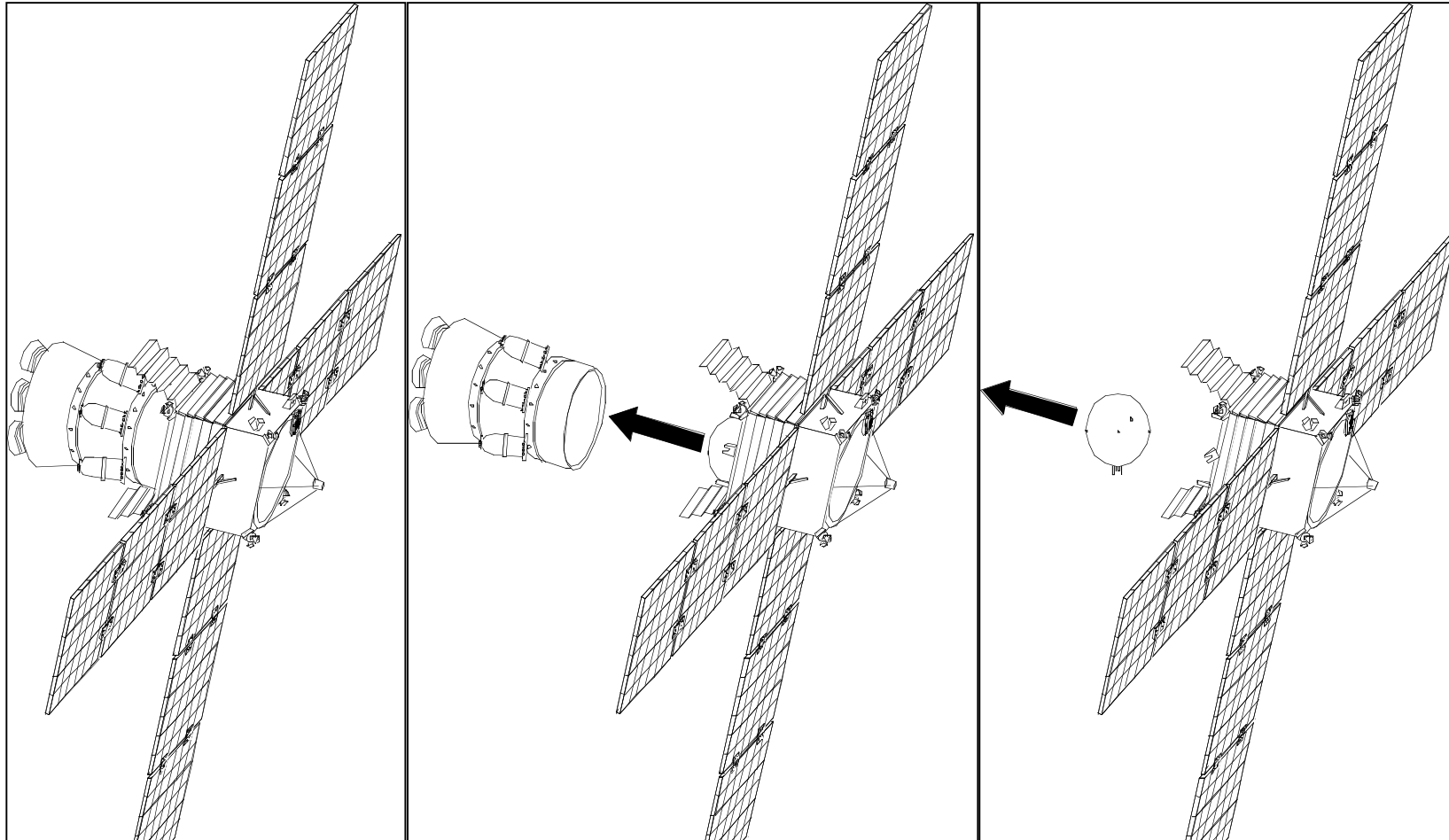
- 1) Apogee raising sequence
- 2) Lunar gravity assist



Bi-propellant propulsion module
(Astrium EUROSTAR / LisaPathfinder)

Item	Impactor with scaled PM [kg]
PM Dry Mass	226
Safe Propellant Load	1756
Odyssey Spacecraft	422
Total Dry Mass	648
Required Propellant	1592
PM Wet Mass	1818
Launch Mass of Stack	2240

Mission ODYSSEY : Séquence d'éjection

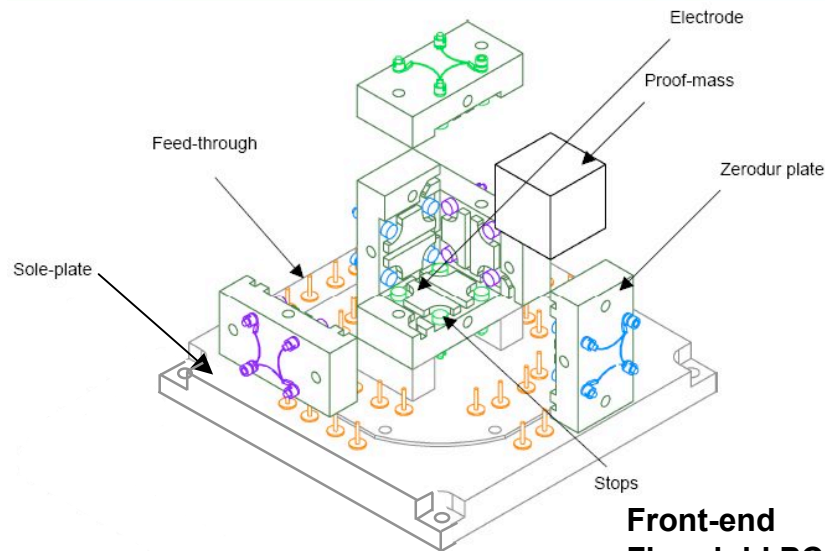


Main spacecraft with propulsion module for Earth escape

Release of the propulsion module after Earth escape

Release of Enigma radio beacon probe after Saturn fly-by

Mission ODYSSEY : μ STAR Accelerometer



Front-end
Flex-rigid PCB

Getter

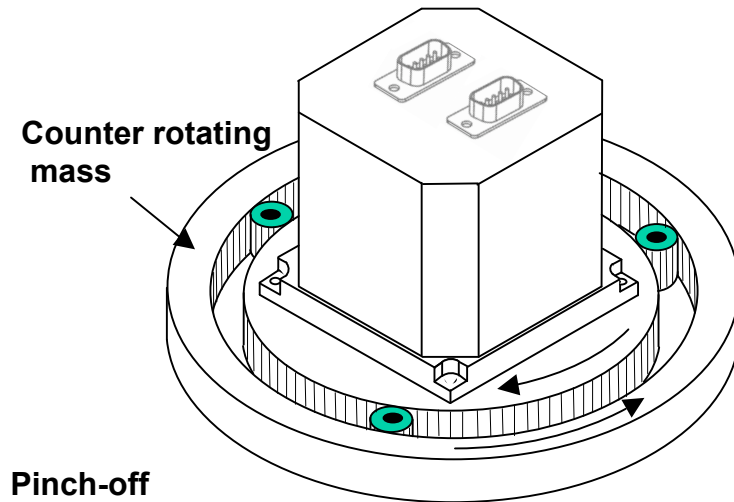
Pinch-off
pipe
Hermetic
Housing

Sensor Core

Sole plate

Feedthroughs

μ STAR
Miniature accelerometer
Low consumption



Calibration system
with accelerometer

Volume = 2.5 l
Mass = 3.1 kg
Consumption = 3 W
Data rate = 300 bits/10s

Mission ODYSSEY : Enigma Radio-beacon

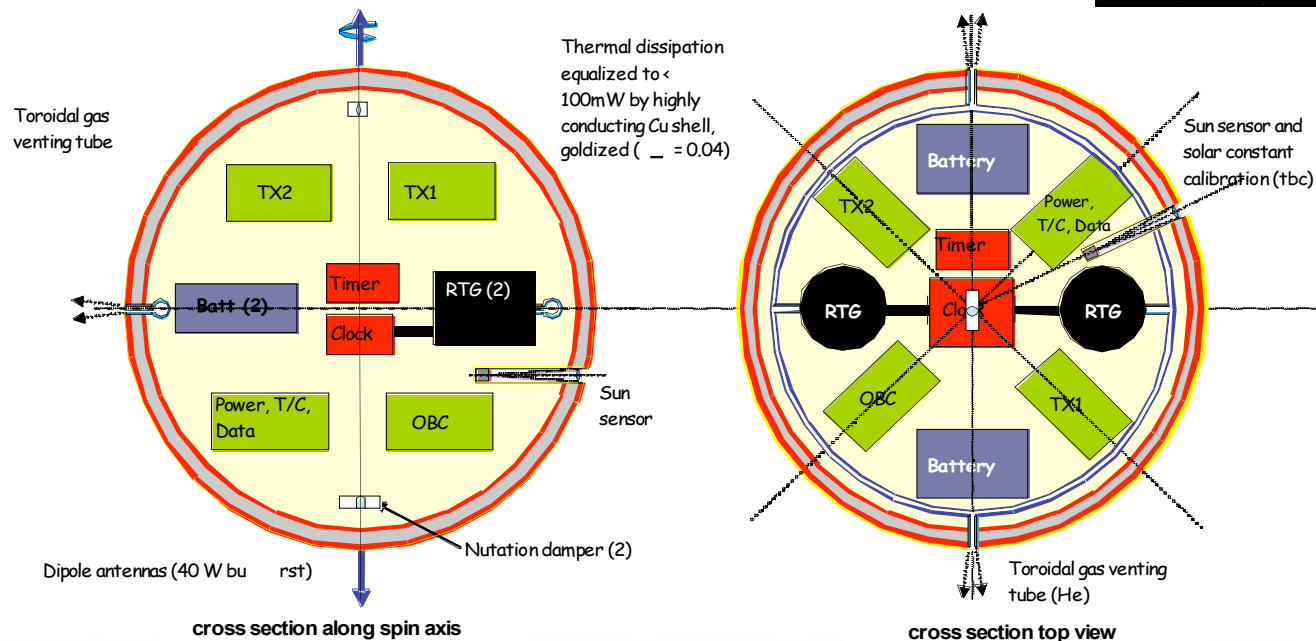
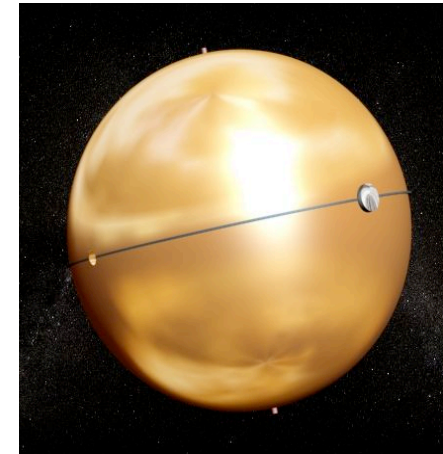
Dipole antennas (40 W burst of 2 hours every month)

Use of small RTG (1.4 W)

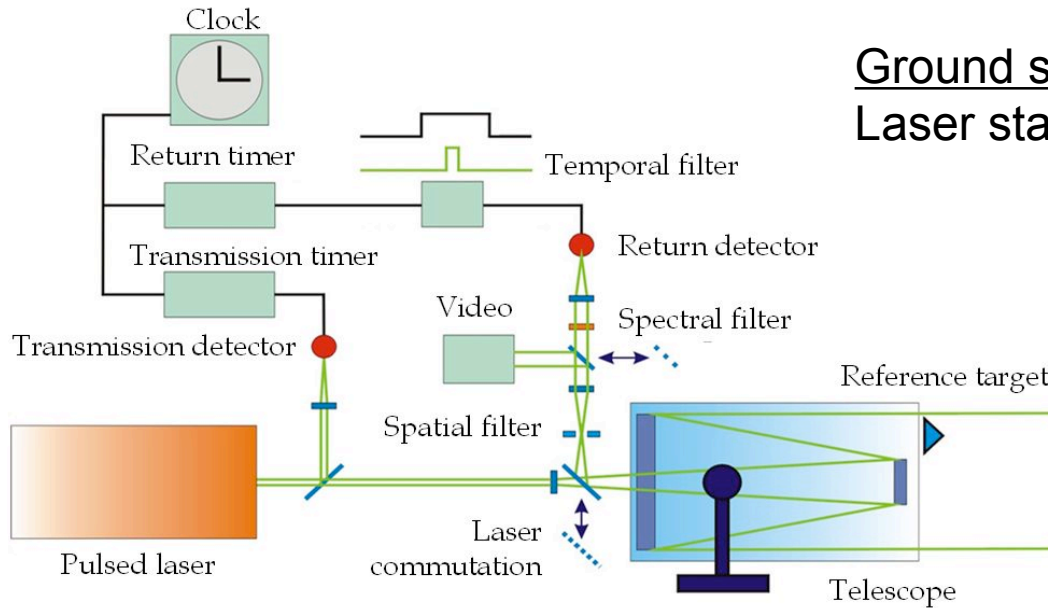
One-way ranging with clock (USO – 10^{-13})

Passive spin stabilisation

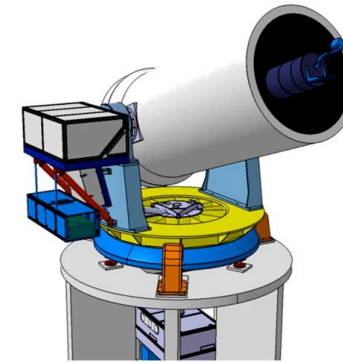
Optimised shape to minimise non-gravitational acceleration



Mission ODYSSEY : TIPO laser ranging



Ground segment: Laser station



- ### Space segment
- Telescope ϕ 25 cm
 - Electronic
 - Clock (10^{-14})

