

26^{ième} Festival d'Astronomie de Fleurance 2016

MESURER LA GRAVITÉ DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

EST-IL EINSTEIN SE TROUVAIT SUR LA LUNE ?

Agnès Fienga
Observatoire de la Côte d'Azur

Est-ce qu'Einstein se trouvait sur la Lune ?

I. La Gravité par l'étude du mouvement des corps dans le système solaire

II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?

III. Comment pourraient-ils se déplacer autrement ?

I. La Gravité par l'étude du mouvement des corps dans le système solaire



tablette astrologique 3500 avant J.-C.

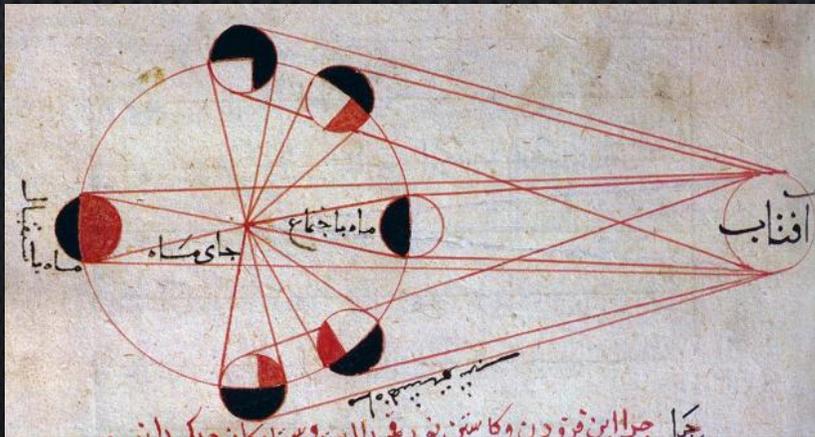


Calendrier astrologique aux signes zodiacaux
Uruk, époque séleucide ; début du IIe siècle avant J.-C.
Vorderasiatisches Museum Berlin

1ère prédictions d'eclipses: Babyloniens à partir de 2000 avant JC

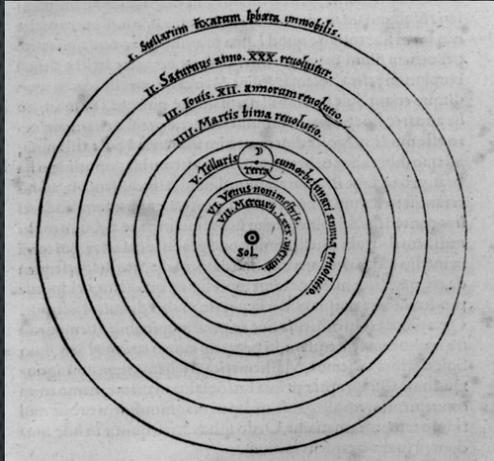


Avec Platon, née une astronomie fondée sur les mathématiques



- Apport de l'algèbre et de la numérotation décimale
- Perfectionnement du modèle de Ptolémée
- 9ième siècle: description des marées

I. La Gravité par l'étude du mouvement des corps dans le système solaire



Copernic (1473-1543)

Mais pas de démonstration mathématique à ce changement révolutionnaire !

Son modèle était seulement plus simple, plus logique et plus « harmonieux » que celui de Ptolémée.

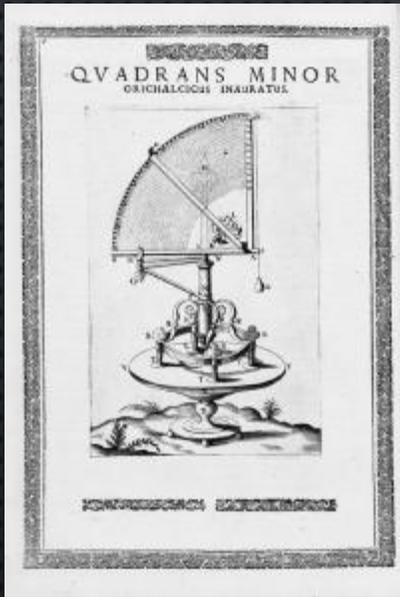
• Brahé: l'observateur de 1570 à 1601

- 1572: supernova
- 1573: comète

=> rupture avec le dogme d'Aristote

• Kepler: le « numérolgoue »

- les lois de Kepler
- Positions géocentriques = positions héliocentriques + position de la terre/ soleil

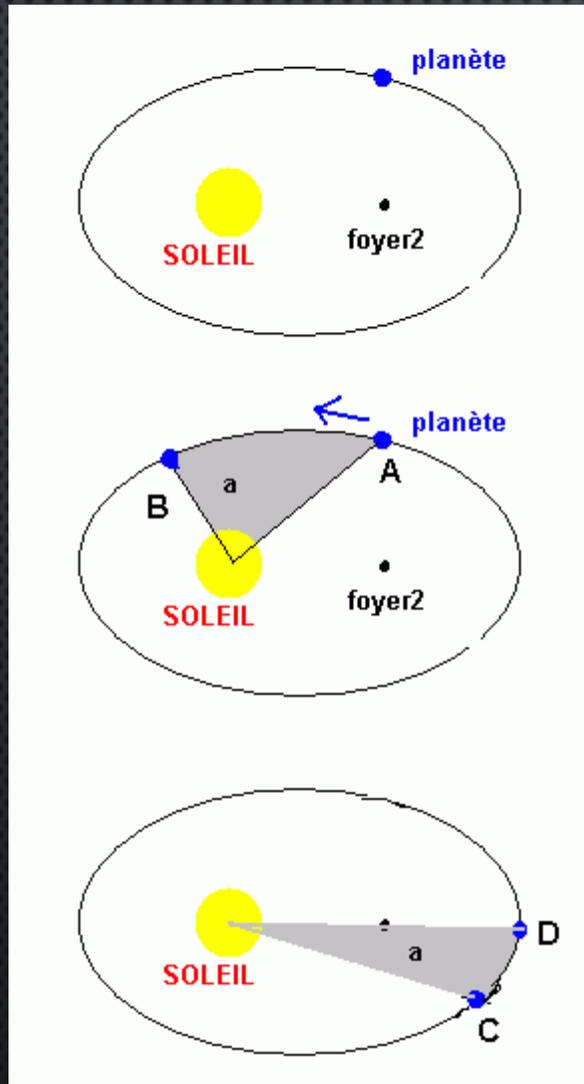


64 *Tabularum Rudolphi*
Tabula Aequationum MARTIS.

Anomalia Eccentri Conspicua superioris	Intra- horum Conspicua inferioris	Anomalia conspicua superioris	Intra- horum conspicua inferioris	Anomalia conspicua superioris	Intra- horum conspicua inferioris	Anomalia conspicua superioris	Intra- horum conspicua inferioris
170	180	180	180	180	180	180	180
4.55.56	1. 5.36	115.17.11	145.59.3	16.13.0	1.10.35	147.13.46	140.12.7
111	1. 5.50	116.19.52	145.58.0	15. 2.14.23	1.10.43	148.18.43	140.00.0
112	1. 5.59	117.22.39	145.56.3	14. 3.29.16	1.10.50	149.23.44	139.58.7
113	1. 6.11	118.25.51	145.54.0	13. 4.48.13	1.10.56	150.28.40	139.56.0
114	1. 6.23	119.28.59	145.51.0	12. 6.11.14	1.11.01	151.33.31	139.53.0
115	1. 6.34	120.31.53	145.47.0	11. 7.38.11	1.11.05	152.38.08	139.50.0
116	1. 6.45	121.34.33	145.42.0	10. 9.10.11	1.11.08	153.41.71	139.46.0
117	1. 6.57	122.37.00	145.36.0	9. 10.47.11	1.11.10	154.44.20	139.42.0
118	1. 7. 0	123.39.54	145.29.0	8. 12.29.11	1.11.11	155.46.56	139.37.0
119	1. 7. 19	124.42.37	145.21.0	7. 14.16.11	1.11.11	156.48.40	139.32.0
120	1. 7. 30	125.45.0	145.12.0	6. 16.08.11	1.11.10	157. 0.33	139.27.0
121	1. 7. 40	126.47.40	145.02.0	5. 18.05.11	1.11.08	158. 1.58	139.22.0
122	1. 7. 50	127.50.19	144.91.0	4. 20.07.11	1.11.05	159. 3.47	139.17.0
123	1. 8. 0	128.52.56	144.79.0	3. 22.14.11	1.11.01	160. 5.40	139.12.0
124	1. 8. 11	129.55.19	144.66.0	2. 24.26.11	1.10.56	161. 7.37	139.07.0
125	1. 8. 21	130.57.39	144.52.0	1. 26.43.11	1.10.50	162. 9.38	139.02.0
126	1. 8. 31	131.59.56	144.37.0	0. 29.05.11	1.10.43	163. 11.43	138.97.0
127	1. 8. 41	133.02.10	144.21.0	0. 31.32.11	1.10.35	164. 13.51	138.92.0
128	1. 8. 50	134.04.21	144.04.0	0. 34.14.11	1.10.26	165. 16.02	138.87.0
129	1. 9. 0	135.06.29	143.86.0	0. 37.01.11	1.10.16	166. 18.16	138.82.0
130	1. 9. 10	136.08.34	143.67.0	0. 39.93.11	1.09.55	167. 20.33	138.77.0
131	1. 9. 20	137.10.36	143.47.0	0. 42.90.11	1.09.43	168. 22.53	138.72.0
132	1. 9. 30	138.12.35	143.26.0	0. 45.92.11	1.09.30	169. 25.16	138.67.0
133	1. 9. 40	139.14.31	143.04.0	0. 48.99.11	1.09.16	170. 27.42	138.62.0
134	1. 9. 50	140.16.24	142.81.0	0. 52.11.11	1.09.01	171. 30.11	138.57.0
135	1. 10. 0	141.18.14	142.57.0	0. 55.28.11	1.08.45	172. 32.43	138.52.0
136	1. 10. 10	142.20.0	142.72.0	0. 58.50.11	1.08.28	173. 35.18	138.47.0
137	1. 10. 20	143.21.43	142.46.0	0. 62.07.11	1.08.10	174. 38.05	138.42.0
138	1. 10. 30	144.23.23	142.19.0	0. 65.19.11	1.07.51	175. 40.55	138.37.0
139	1. 10. 40	145.25.0	141.91.0	0. 68.26.11	1.07.31	176. 43.48	138.32.0
140	1. 10. 50	146.26.39	141.62.0	0. 71.28.11	1.07.10	177. 46.44	138.27.0
141	1. 11. 0	147.28.16	141.32.0	0. 74.25.11	1.06.48	178. 49.43	138.22.0
142	1. 11. 10	148.29.51	141.01.0	0. 77.17.11	1.06.25	179. 52.44	138.17.0
143	1. 11. 20	149.31.23	140.69.0	0. 80.04.11	1.06.01	180. 55.47	138.12.0
144	1. 11. 30	150.32.53	140.36.0	0. 82.46.11	1.05.36	181. 58.52	138.07.0
145	1. 11. 40	151.34.20	140.02.0	0. 85.33.11	1.05.10	182. 61.59	138.02.0
146	1. 11. 50	152.35.44	139.67.0	0. 88.15.11	1.04.43	183. 64.68	137.97.0
147	1. 12. 0	153.37.05	139.31.0	0. 90.52.11	1.04.15	184. 67.79	137.92.0
148	1. 12. 10	154.38.23	138.94.0	0. 93.25.11	1.03.46	185. 70.92	137.87.0
149	1. 12. 20	155.39.38	138.56.0	0. 95.53.11	1.03.16	186. 74.07	137.82.0
150	1. 12. 30	156.40.50	138.17.0	0. 98.16.11	1.02.45	187. 77.24	137.77.0
151	1. 12. 40	157.41.59	137.77.0	0. 100.34.11	1.02.13	188. 80.43	137.72.0
152	1. 12. 50	158.42.65	137.36.0	0. 102.47.11	1.01.40	189. 83.64	137.67.0
153	1. 13. 0	159.43.68	136.94.0	0. 104.55.11	1.01.06	190. 86.87	137.62.0
154	1. 13. 10	160.44.68	136.51.0	0. 107.08.11	1.00.31	191. 90.12	137.57.0
155	1. 13. 20	161.45.64	136.07.0	0. 109.16.11	1.00.00	192. 93.39	137.52.0
156	1. 13. 30	162.46.57	135.62.0	0. 111.19.11	0.59.28	193. 96.68	137.47.0
157	1. 13. 40	163.47.87	135.16.0	0. 113.27.11	0.58.55	194. 100.00	137.42.0
158	1. 13. 50	164.48.74	134.69.0	0. 115.30.11	0.58.20	195. 103.34	137.37.0
159	1. 14. 0	165.49.58	134.21.0	0. 117.28.11	0.57.44	196. 106.70	137.32.0
160	1. 14. 10	166.50.39	133.72.0	0. 119.21.11	0.57.07	197. 110.08	137.27.0
161	1. 14. 20	167.51.17	133.22.0	0. 121.10.11	0.56.29	198. 113.48	137.22.0
162	1. 14. 30	168.51.92	132.71.0	0. 122.54.11	0.55.50	199. 116.90	137.17.0
163	1. 14. 40	169.52.54	132.19.0	0. 124.43.11	0.55.09	200. 120.34	137.12.0
164	1. 14. 50	170.53.53	131.66.0	0. 126.37.11	0.54.27	201. 123.80	137.07.0
165	1. 15. 0	171.54.49	131.12.0	0. 128.26.11	0.53.44	202. 127.28	137.02.0
166	1. 15. 10	172.55.42	130.57.0	0. 130.10.11	0.53.00	203. 130.78	136.97.0
167	1. 15. 20	173.56.32	130.41.0	0. 131.59.11	0.52.15	204. 134.30	136.92.0
168	1. 15. 30	174.57.19	130.24.0	0. 133.43.11	0.51.29	205. 137.84	136.87.0
169	1. 15. 40	175.58.03	130.06.0	0. 135.22.11	0.50.42	206. 141.40	136.82.0
170	1. 15. 50	176.58.84	129.87.0	0. 136.56.11	0.50.00	207. 144.98	136.77.0
171	1. 16. 0	177.59.62	129.67.0	0. 138.25.11	0.49.12	208. 148.58	136.72.0
172	1. 16. 10	178.60.37	129.46.0	0. 139.59.11	0.48.28	209. 152.20	136.67.0
173	1. 16. 20	179.61.09	129.24.0	0. 141.28.11	0.47.40	210. 155.84	136.62.0
174	1. 16. 30	180.61.78	129.01.0	0. 142.52.11	0.46.56	211. 159.50	136.57.0
175	1. 16. 40	181.62.44	128.77.0	0. 144.11.11	0.46.10	212. 163.58	136.52.0
176	1. 16. 50	182.63.07	128.52.0	0. 145.25.11	0.45.22	213. 167.68	136.47.0
177	1. 17. 0	183.63.67	128.26.0	0. 146.34.11	0.44.33	214. 171.80	136.42.0
178	1. 17. 10	184.64.24	128.00.0	0. 147.39.11	0.43.42	215. 175.94	136.37.0
179	1. 17. 20	185.64.78	127.73.0	0. 148.39.11	0.42.50	216. 180.10	136.32.0
180	1. 17. 30	186.65.29	127.45.0	0. 149.34.11	0.42.00	217. 184.28	136.27.0
181	1. 17. 40	187.65.77	127.16.0	0. 150.24.11	0.41.08	218. 188.48	136.22.0
182	1. 17. 50	188.66.22	126.86.0	0. 151.10.11	0.40.15	219. 192.70	136.17.0
183	1. 18. 0	189.66.64	126.55.0	0. 151.91.11	0.39.21	220. 196.94	136.12.0
184	1. 18. 10	190.67.03	126.23.0	0. 152.67.11	0.38.26	221. 201.20	136.07.0
185	1. 18. 20	191.67.39	125.90.0	0. 153.39.11	0.37.30	222. 205.48	136.02.0
186	1. 18. 30	192.67.72	125.56.0	0. 154.06.11	0.36.33	223. 209.78	135.97.0
187	1. 18. 40	193.68.02	125.21.0	0. 154.70.11	0.35.35	224. 214.10	135.92.0
188	1. 18. 50	194.68.29	124.85.0	0. 155.30.11	0.34.36	225. 218.44	135.87.0
189	1. 19. 0	195.68.53	124.48.0	0. 155.86.11	0.33.36	226. 222.80	135.82.0
190	1. 19. 10	196.69.14	124.10.0	0. 156.38.11	0.32.34	227. 227.18	135.77.0
191	1. 19. 20	197.69.32	123.71.0	0. 156.86.11	0.31.31	228. 231.58	135.72.0
192	1. 19. 30	198.69.47	123.31.0	0. 157.30.11	0.30.27	229. 236.00	135.67.0
193	1. 19. 40	199.69.59	122.90.0	0. 157.70.11	0.29.22	230. 240.44	135.62.0
194	1. 19. 50	200.69.68	122.48.0	0. 158.06.11	0.28.16	231. 244.90	135.57.0
195	1. 20. 0	201.69.74	122.05.0	0. 158.38.11	0.27.09	232. 249.38	135.52.0
196	1. 20. 10	202.69.77	121.61.0	0. 158.66.11	0.26.01	233. 253.88	135.47.0
197	1. 20. 20	203.69.77	121.16.0	0. 158.90.11	0.24.52	234. 258.40	135.42.0
198	1. 20. 30	204.69.74	120.70.0	0. 159.10.11	0.23.42	235. 262.94	135.37.0
199	1. 20. 40	205.69.68	120.23.0	0. 159.26.11	0.22.31	236. 267.50	135.32.0
200	1. 20. 50	206.69.59	119.75.0	0. 159.38.11	0.21.19	237. 272.08	135.27.0
201	1. 21. 0	207.69.47	119.26.0	0. 159.46.11	0.20.06	238. 276.68	135.22.0
202	1. 21. 10	208.69.32	118.76.0	0. 159.50.11	0.18.52	239. 281.30	135.17.0
203	1. 21. 20	209.69.14	118.25.0	0. 160.00.11	0.17.37	240. 285.94	135.12.0
204	1. 21. 30	210.68.93	117.73.0	0. 160.06.11	0.16.21	241. 290.60	135.07.0
205	1. 21. 40	211.68.69	117.20.0	0. 160.08.11	0.15.04	242. 295.28	135.02.0
206	1. 21. 50	212.68.42	116.66.0	0. 160.06.11	0.13.46	243. 299.98	134.97.0
207	1. 22. 0	213.68.12	116.11.0	0. 160.00.11	0.12.27	244. 304.70	134.92.0
208	1. 22. 10	214.67.79	115.55.0	0. 160.00.11	0.11.07	245. 309.44	134.87.0
209	1. 22. 20	215.67.43	114.98.0	0. 160.00.11	0.09.46	246. 314.20	134.82.0
210	1. 22. 30	216.67.04	114.40.0	0. 160.00.11	0.08.24	247. 318.98	134.77.0
211	1. 22. 40						

I. La Gravité par l'étude du mouvement des corps dans le système solaire

Les 3 lois de Kepler



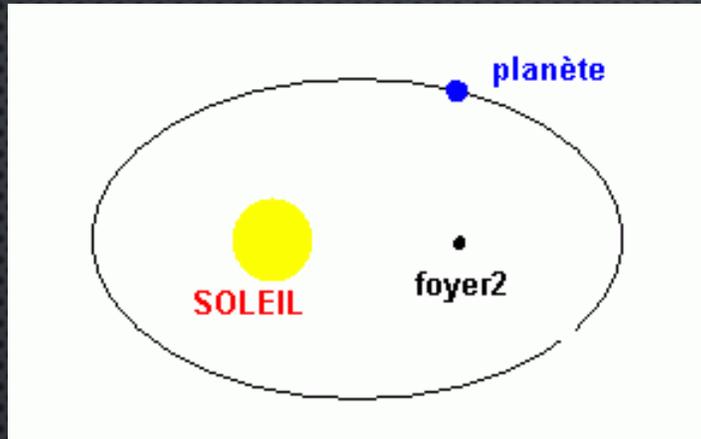
1. Les planètes ont une orbite elliptique avec le soleil comme un des deux foyers

2. Les aires "balayées" par le segment reliant l'astre central au satellite pendant des durées égales sont égales

les planètes ne tournent pas avec une vitesse uniforme :
elles vont plus vite quand elles sont près du Soleil et plus lentement quand elles en sont loin.

3. La période ("année") au carré est proportionnelle au cube de la distance moyenne au Soleil

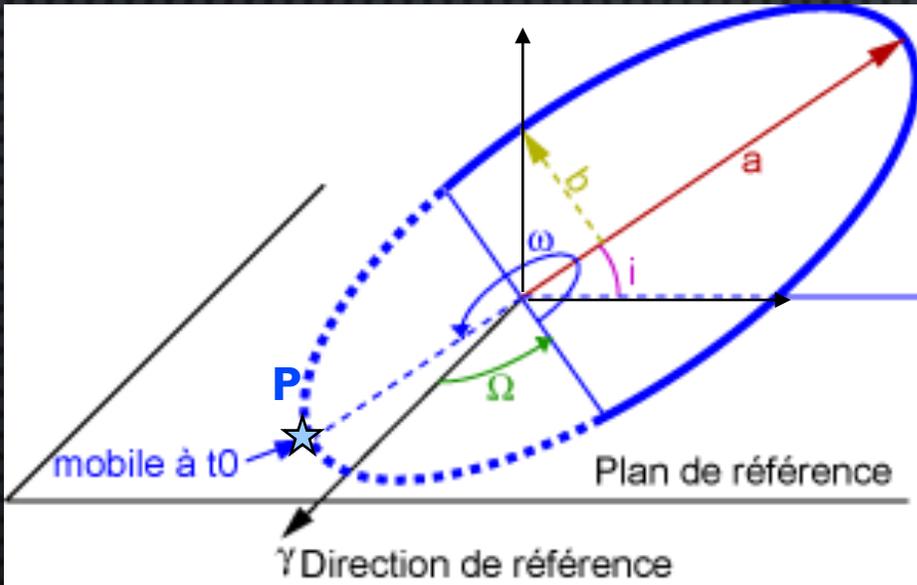
I. La Gravité par l'étude du mouvement des corps dans le système solaire



1. système héliocentrique avec une terre mobile sur une orbite non circulaire => rupture complète avec Ptolémée

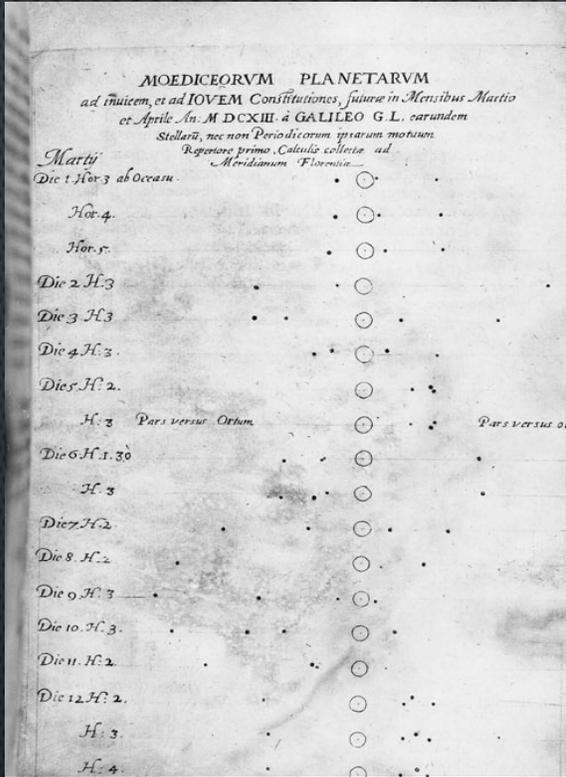
2. Nouvelle description des orbites en coordonnées képlériennes

- * le demi-grand axe a
- * l'excentricité e
- * l'inclinaison i sur un plan de référence (équateur ou écliptique)
- * Ω la longitude du noeud ascendant sur le plan de référence
- * ω , la longitude du périastre P / à la ligne des noeuds et du noeud ascendant
- * l'instant t_0 de passage du corps au périastre P ou l'anomalie moyenne $M = n \cdot (t - t_0)$ où $n = 2\pi/T$ avec T période de révolution définie par la 3ème loi de Kepler (qui dit que $n^2 \cdot a^3$ est une constante connue).



3. Lien direct entre les lois de Kepler et les observations de Tycho Brahé !

I. La Gravité par l'étude du mouvement des corps dans le système solaire



Galilée (1564-1642)

Tout corps non soumis à une force extérieure est animé d'un mouvement rectiligne uniforme et se trouve dans un référentiel appelé maintenant « galiléen »

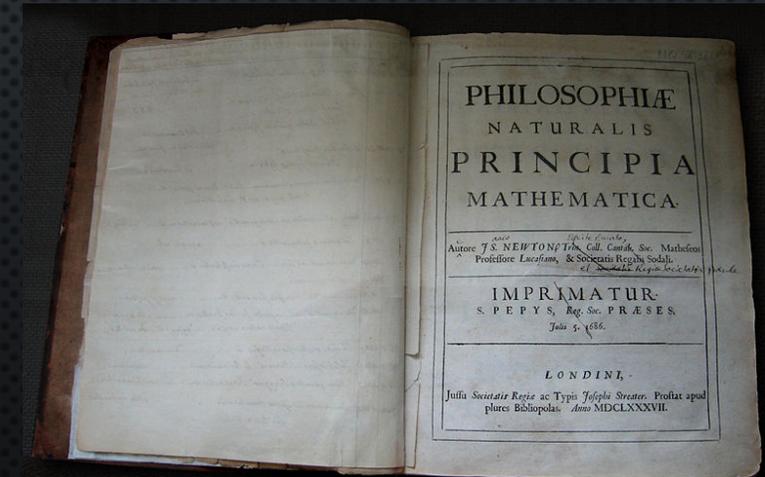
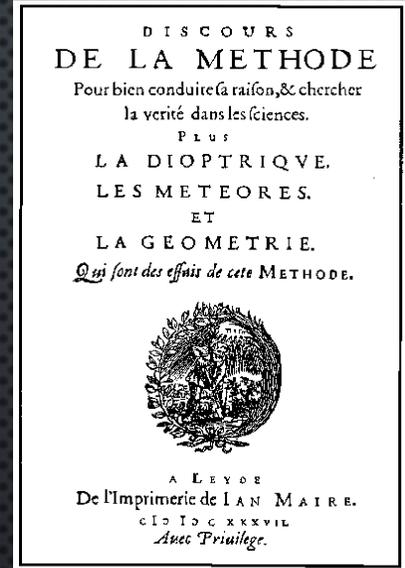
Descartes (1596-1650)

Base de la géométrie analytique et de l'utilisation de repère et de description d'objet géométrique par des équations

La lumière se déplace en ligne droite

Newton (1643-1727)

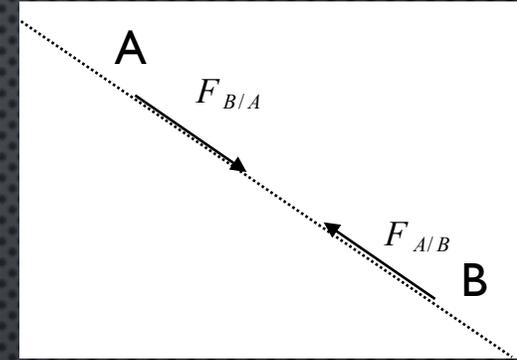
Newton se pose la question fondamentale : la chute des corps et la révolution de la Lune autour de la terre, obéissent-elles à la même loi physique ?



I. La Gravité par l'étude du mouvement des corps dans le système solaire

A) La loi de la gravitation universelle s'énonce ainsi :

"deux points matériels A et B de masse m et M exercent l'un sur l'autre une force attractive directement proportionnelle aux masses et inversement proportionnelle au carré de la distance r les séparant".

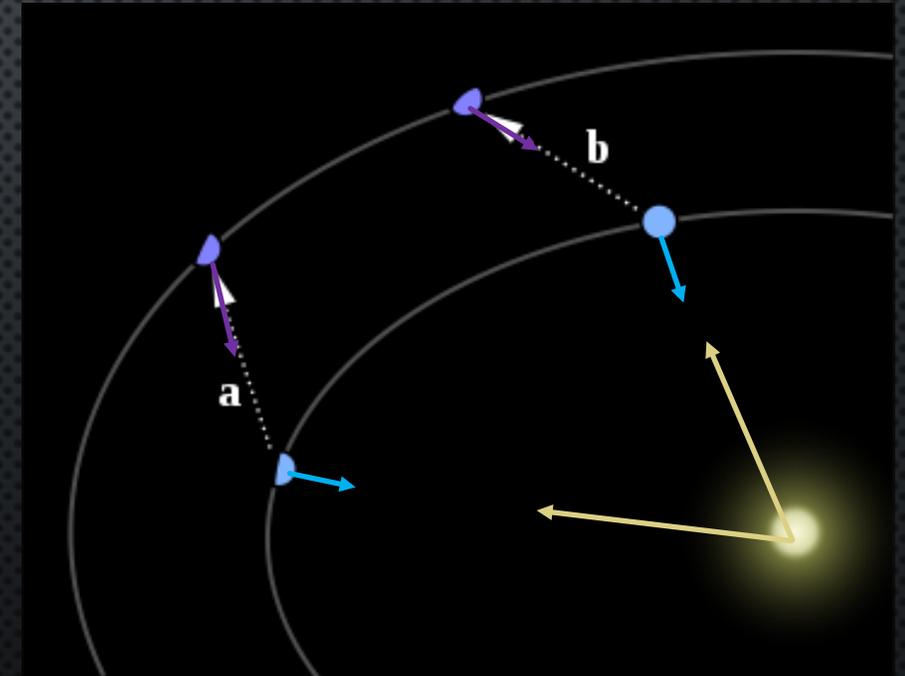


Si r est la distance entre A et B, la force subit par B est dirigée de B vers A et a pour valeur

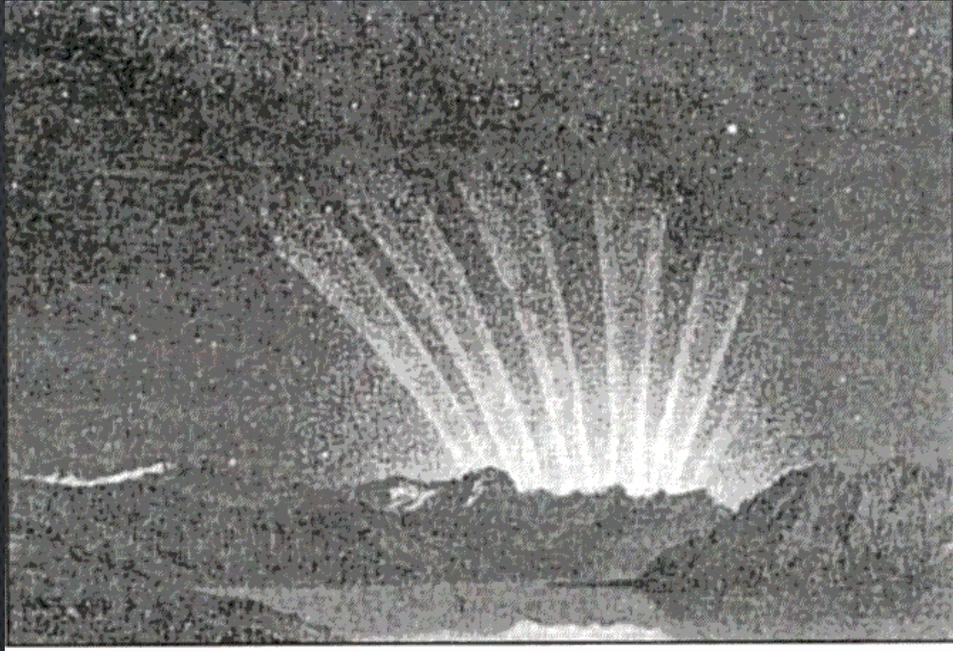
B) Les changements qui arrivent dans la quantité de mouvement (« les variations de vitesse») sont proportionnels à la force motrice et ont lieu dans la direction de cette force.

$$\vec{F} = m\vec{\gamma}$$

Le système solaire est comme un grand billard avec une propagation rectiligne de la lumière



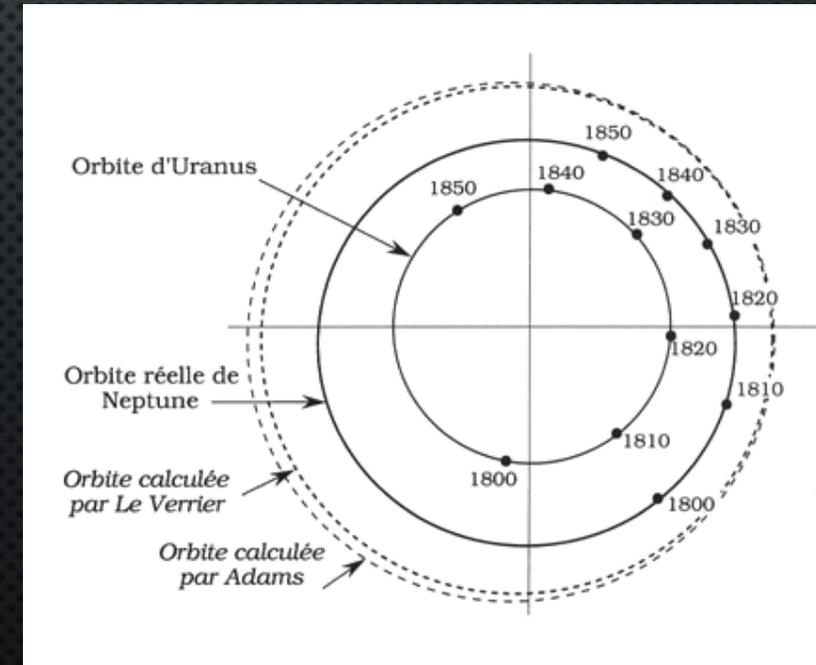
I. La Gravité par l'étude du mouvement des corps dans le système solaire



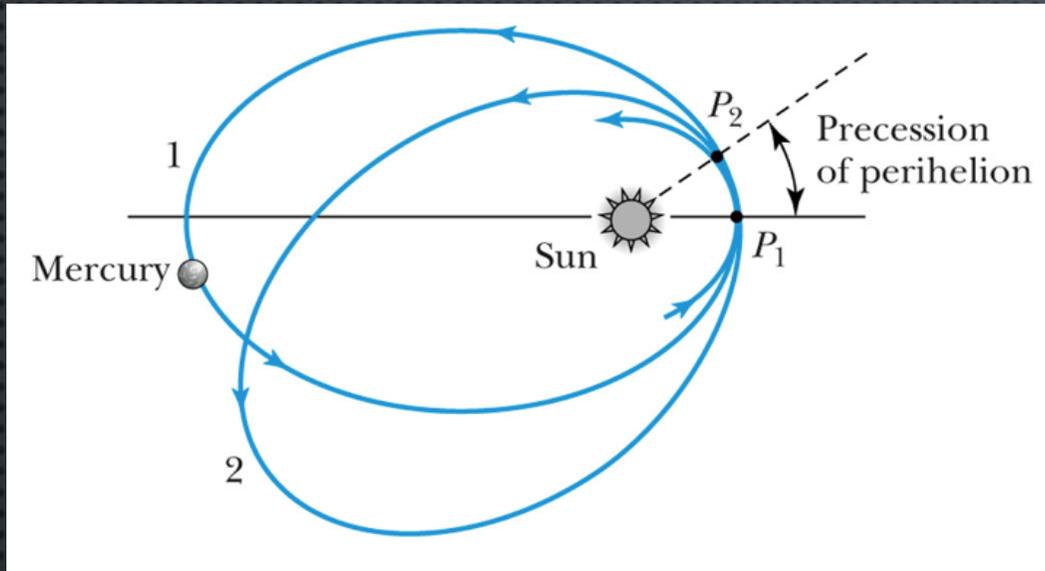
1758: Clairaut, Lalande et Lepaute prédisent le retour d'une comète très brillante apparue en 1744 vers printemps 1759

La comète sera aperçue le 12 mars 1759 !

- 1800-1840; décalage de 20'' sur les positions d'Uranus
- Le Verrier prévoit les positions de la planète inconnue
- 1ère observation de Neptune par Galle à Berlin en 1846

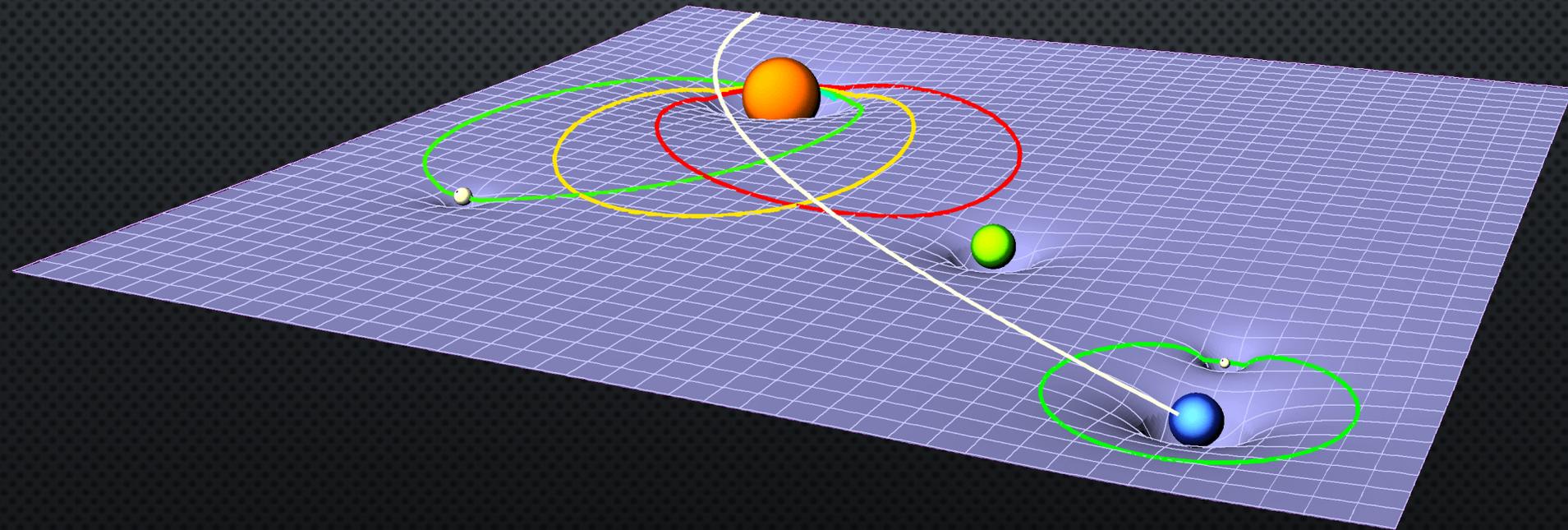


I. La Gravité par l'étude du mouvement des corps dans le système solaire

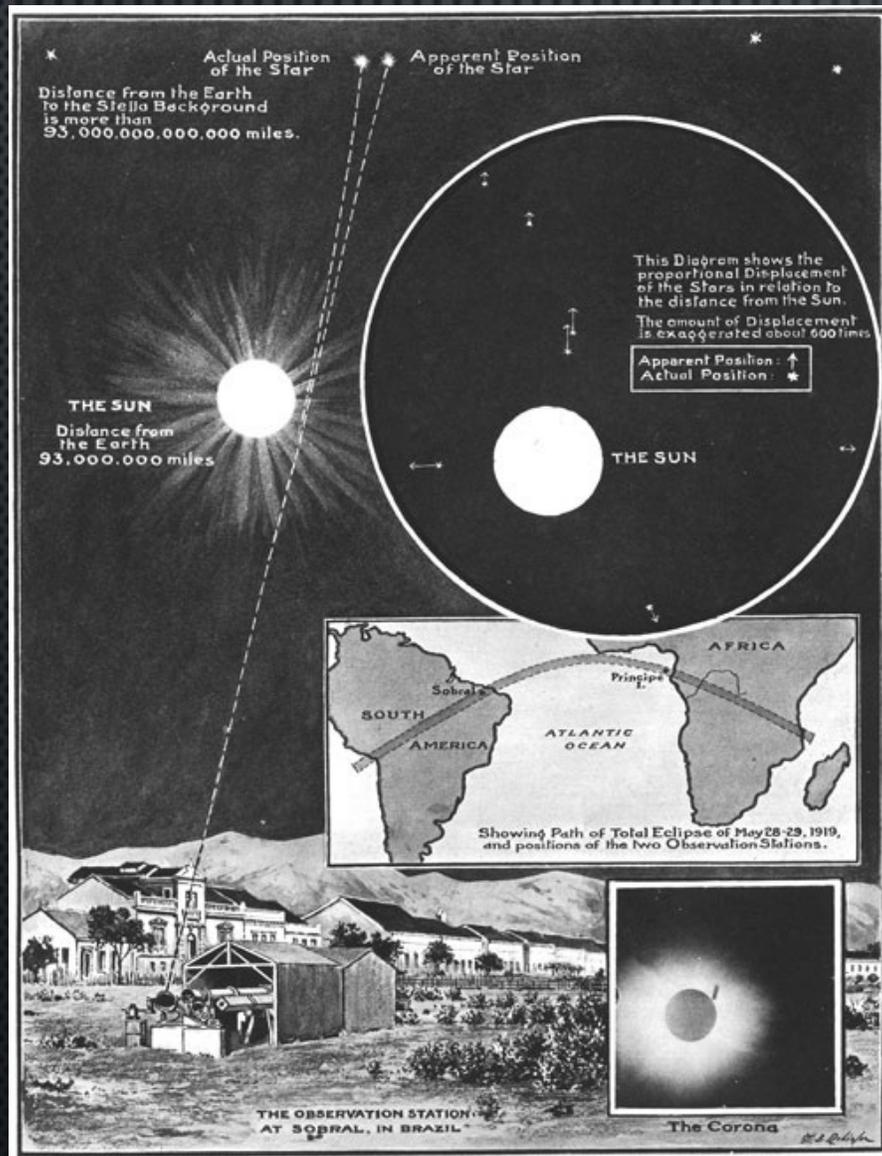


- 1845, Le Verrier note un excès de 35'' dans le périhélie de Mercure
- 1846, Neptune -> Vulcain
- Ether
- **1915, la relativité générale d'Einstein prédit une avancée du périhélie de 42.9''**

1915, Les orbites ne sont plus régulières mais subissent la géométrie de l'espace

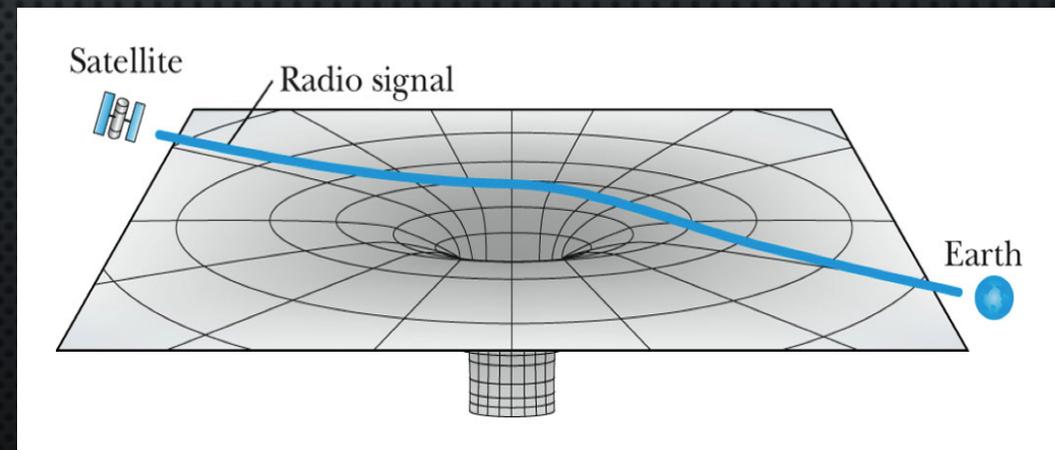


I. La Gravité par l'étude du mouvement des corps dans le système solaire



- 1919, Eddington mesure la déflexion des étoiles au cours d'une éclipse solaire totale – 1.75''

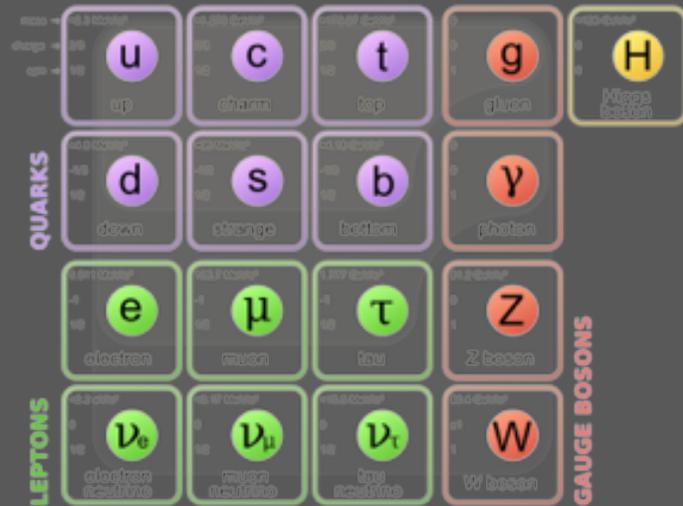
1919, La propagation de la lumière n'est plus rectiligne mais subit aussi la géométrie de l'espace



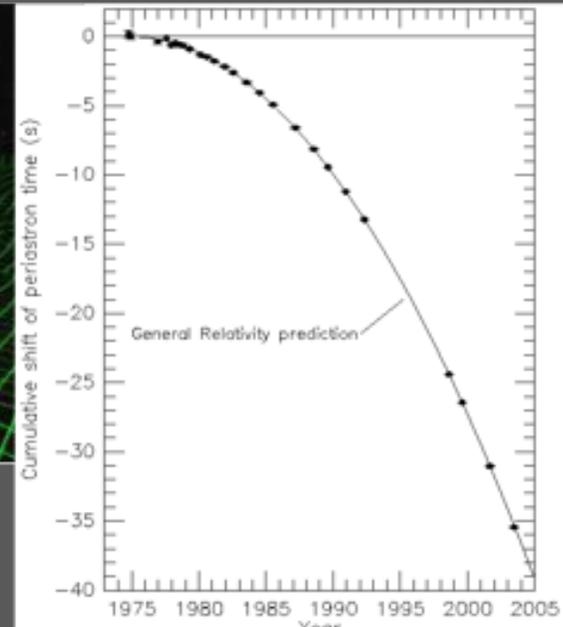
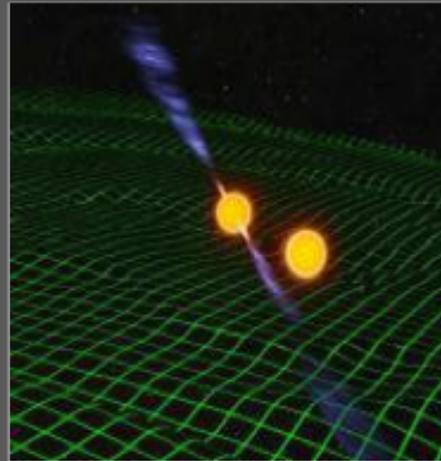
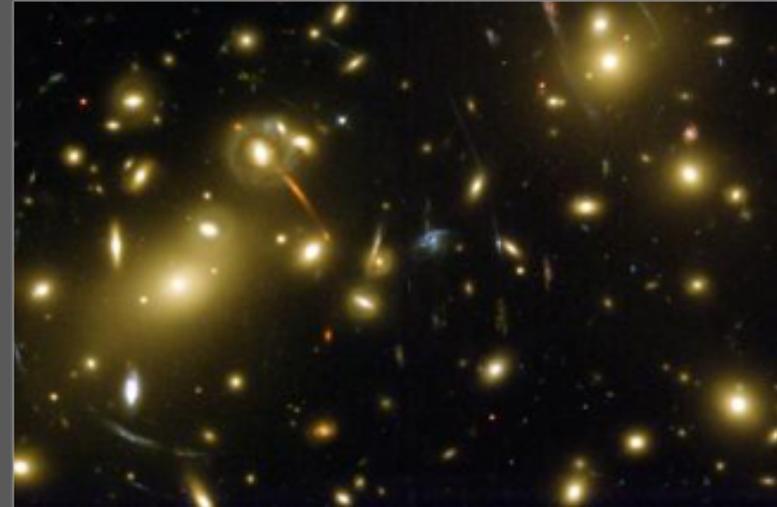
Contexte de la physique fondamentale actuelle

Particle physics: Standard Model

3 forces, fermions et les bosons



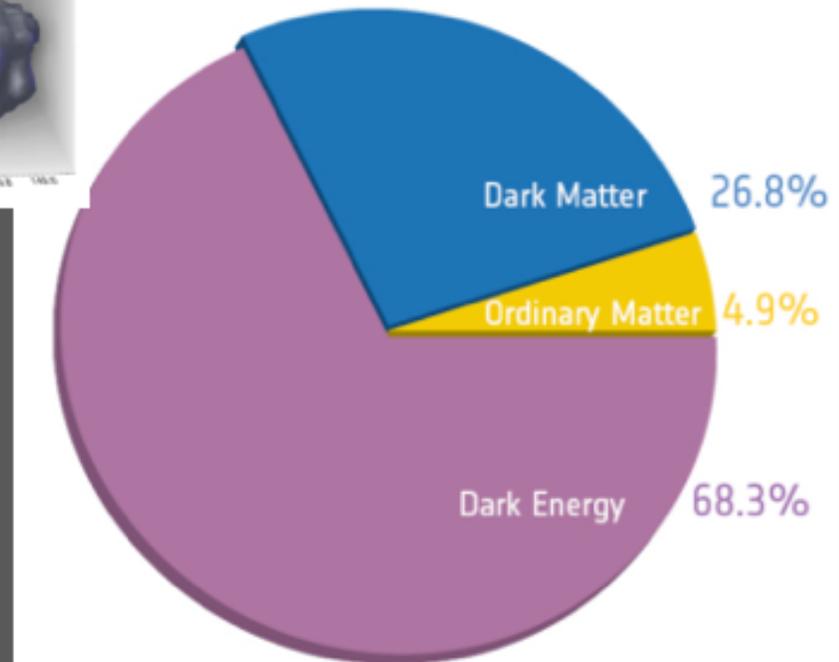
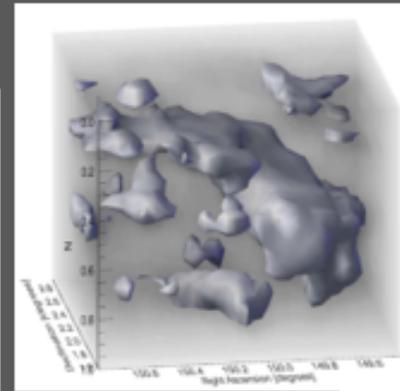
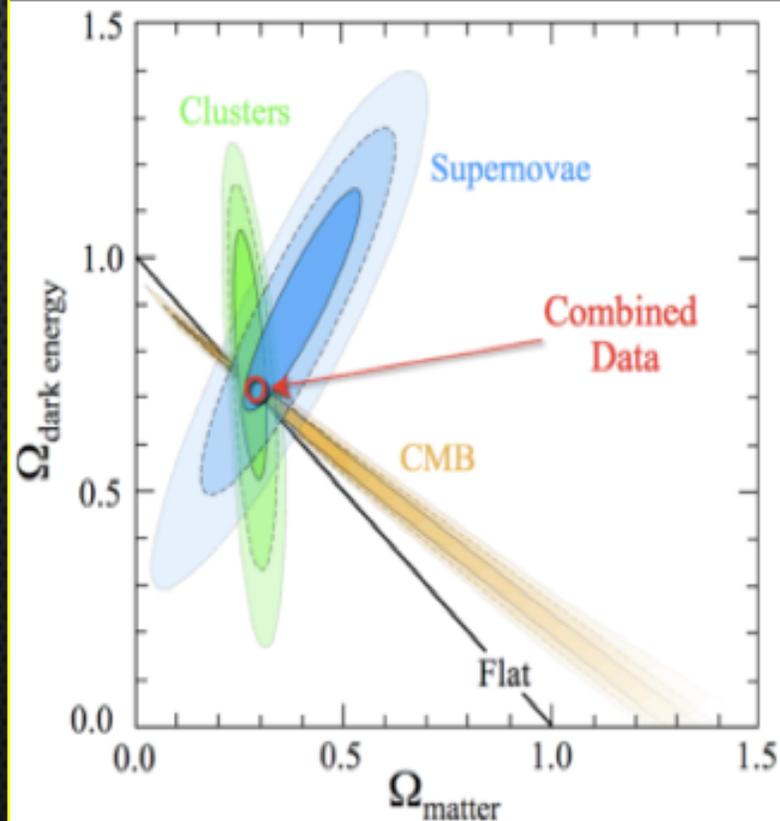
Gravitation: General Relativity



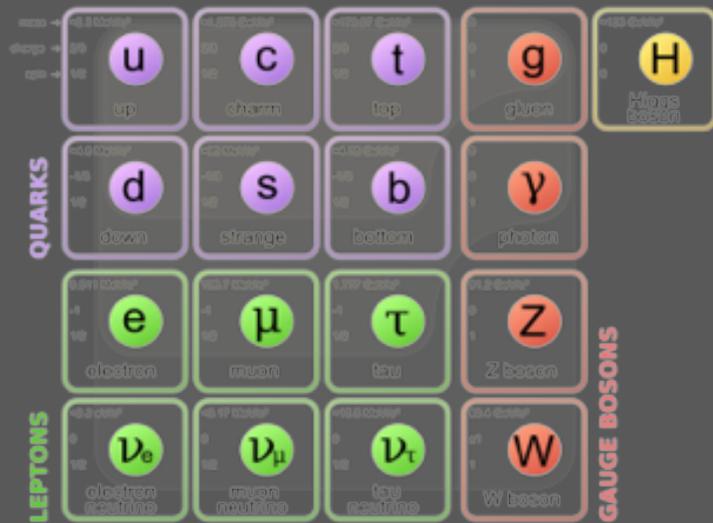
Validée à chaque échelle mais ...

mais des problèmes demeurent ...

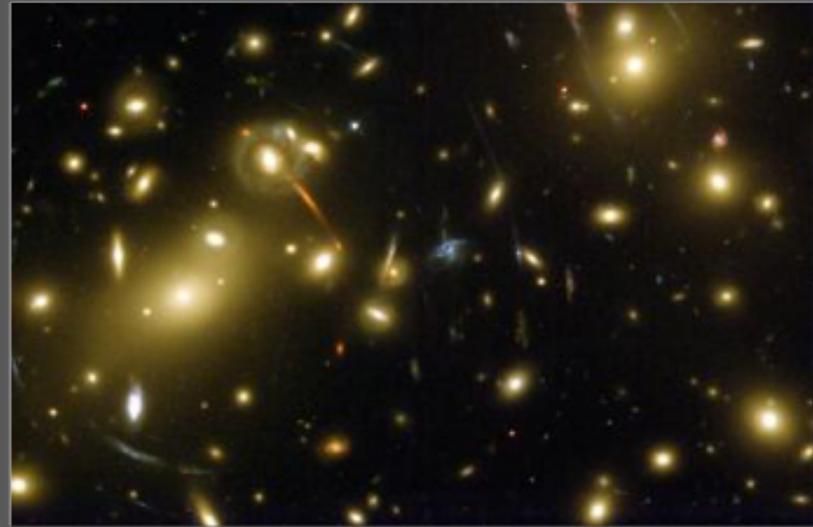
- Pour la gravité est-elle si faible par rapport aux autres forces ?
- Est-il possible d'unifier la gravité et les forces d'interactions faible et forte ?
- Qu'est-ce que la matière noire et l'énergie noire ?



Standard model



GR



Modification des équations d' Einstein

- Extension du modèle standard aux grandes échelles
- couplage avec la matière noire/énergie noire (dilaton, chameleon...)

- Modification de la gravité
- théories de champs scalaires
- $f(R)$
- ISL, Yukawa

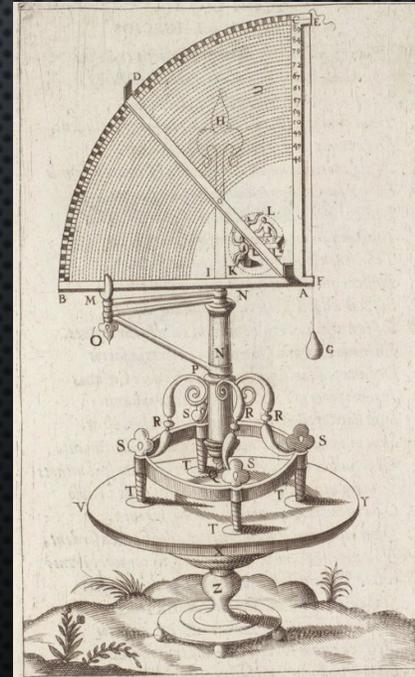
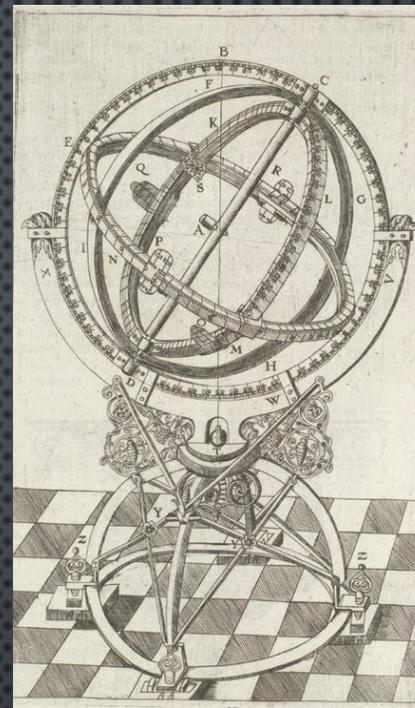
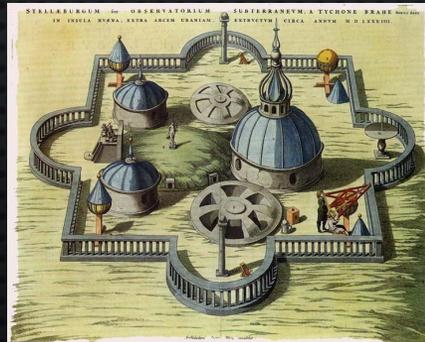
Prédiction de deviations de la GR
mesurable dans des labos ou dans le système solaire

Est-ce qu'Einstein se trouvait sur la Lune ?

- I. La Gravité par l'étude du mouvement des corps dans le système solaire
- II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?**
- III. Comment pourraient-ils se déplacer autrement ?

II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?

T. Brahé observe de 1570 à 1601



Les sphères armillaires (1602)

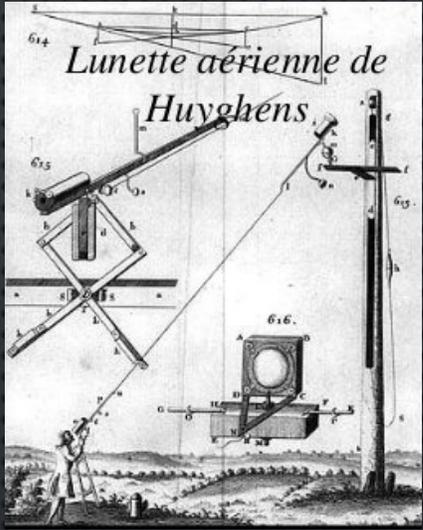
(α, δ) avec α à 2 / 3 s près

Les $\frac{1}{4}$ cercles (1602)

(δ) à 1' / 2' près
pour un diamètre de 4 à 6m

Astrolabe (1348)

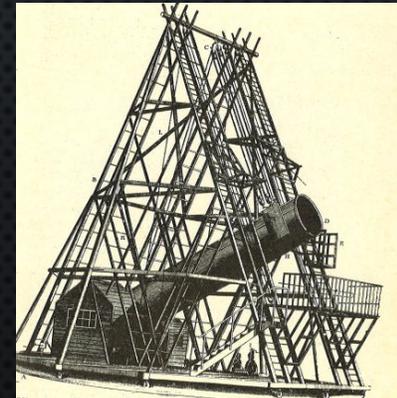
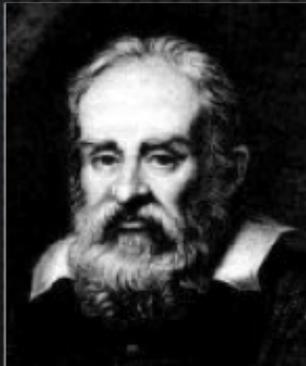
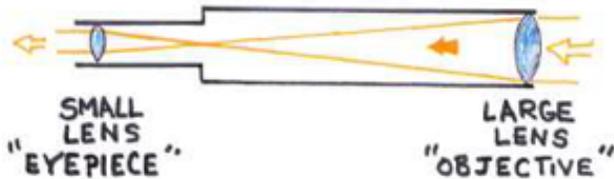
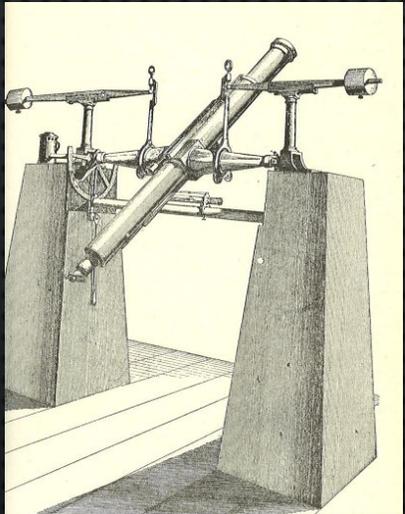
II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?



Les Réfracteurs

Lentilles (1590)

Lunettes équatoriales,
Lunettes méridiennes,
Grand coudé, astrographes



Les Réflecteurs

Miroirs (1672)

Télescopes (gregory, newton,
cassegrain, photographique)

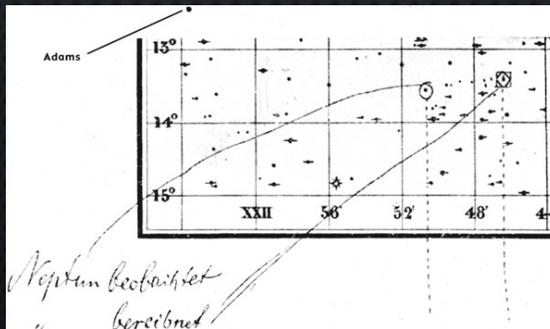
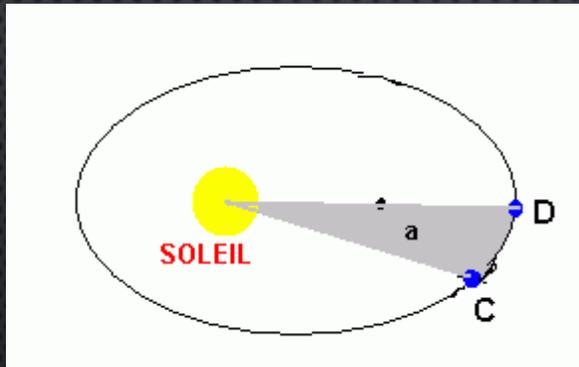
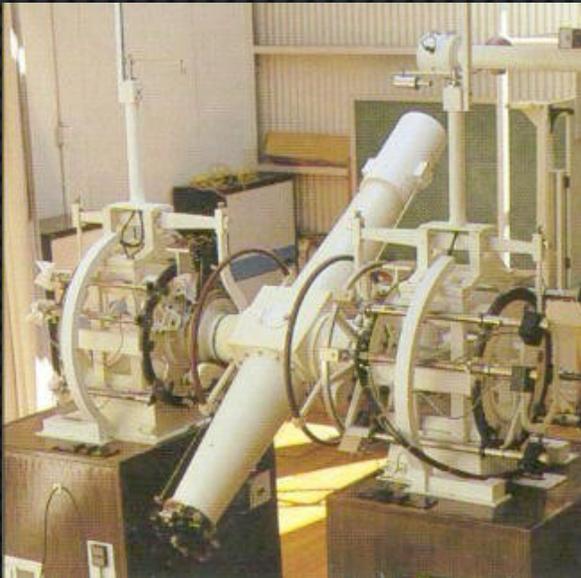


II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?

Précision obtenue à la fin du XIX^{ème} siècle >

Pas de mesure directe des distances mais uniquement des mesures angulaires et les éclipses

On ne connaît la taille des orbites que par les périodes orbitales



Planètes	Le Verrier / Gaillot		RG
	angle	distance / terre	
Mercure	1"	450km	0,43 "/an
Venus	0.5"	100km	0,09 "/an
mars	0.5"	150km	0,015 "/an
Jupiter	0.5"	1400km	0,006 "/an
Saturne	0.5"	3000km	0,001 "/an
Uranus	1"	12700km	0,0002 "/an
Neptune	1"	22000km	
Pluton	1"	24000km	
Terre			0,04 "/an

II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?

3 révolutions après la seconde guerre mondiale

- Les techniques d'observations Radar
- La conquête spatiale
- L'informatique
- Vers 1887 première expérimentation sur les ondes (Maxwell, Hertz, Doppler)
 - 1935, invention officielle du radar par sir Watson-Watt
 - Développement militaire pdt la II guerre mondiale
 - 1958, Première antenne pour suivi des sondes Pioneer 8 et 9
 - 1960, Premier tirs radar vers des surfaces planétaires

Arecibo avec 305m de diamètre



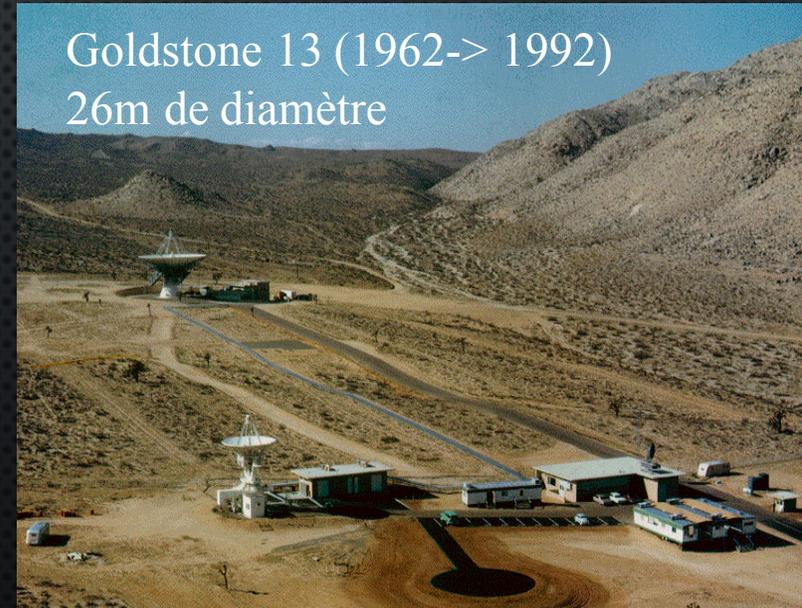
70m de diamètre



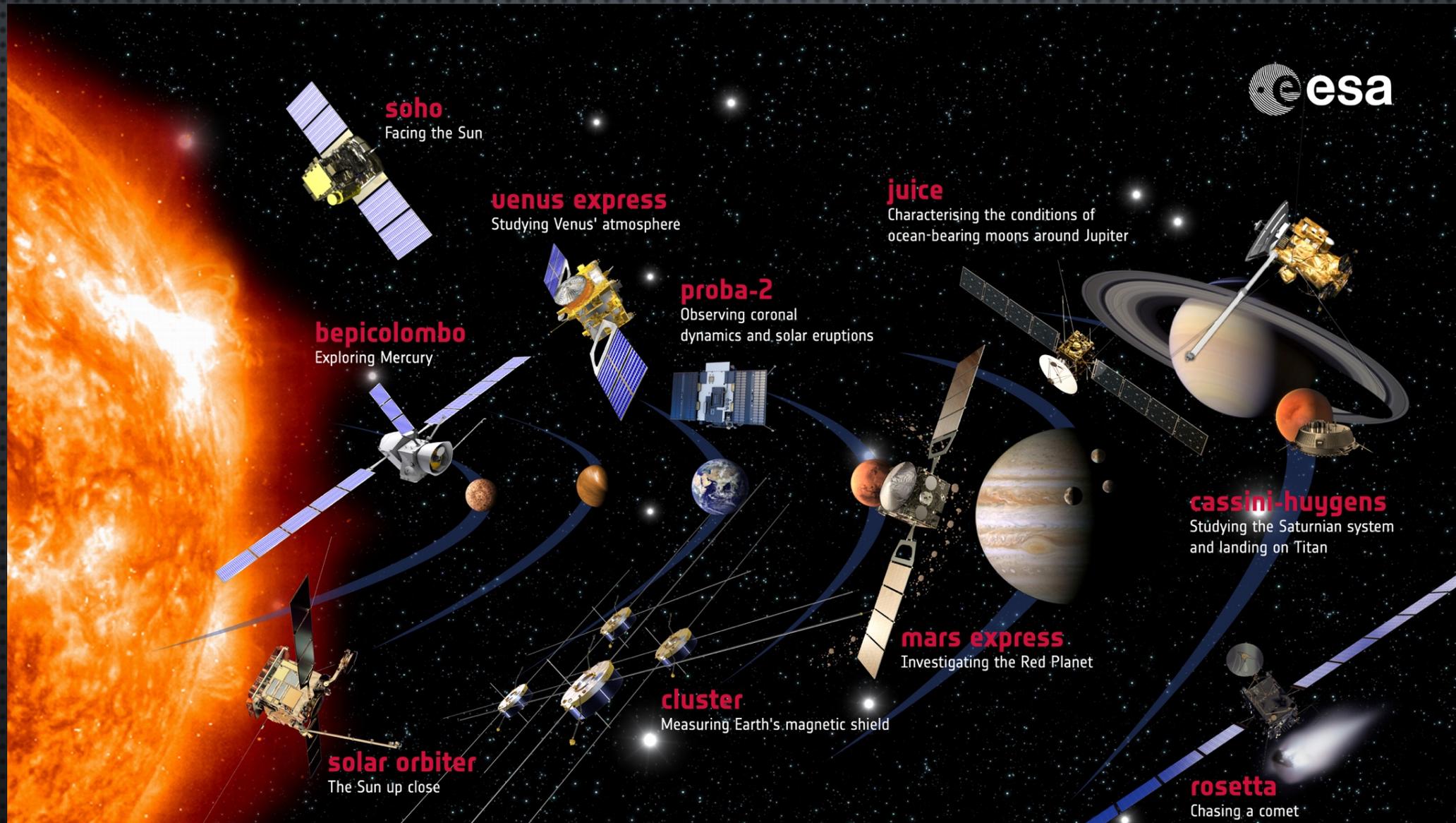
Goldstone 11 (1957)
35m diamètre



Goldstone 13 (1962-> 1992)
26m de diamètre



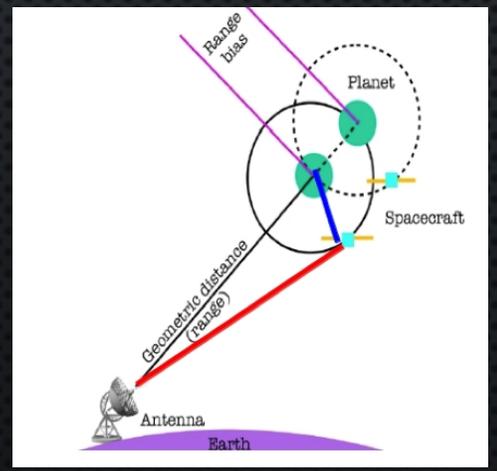
II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?



II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?

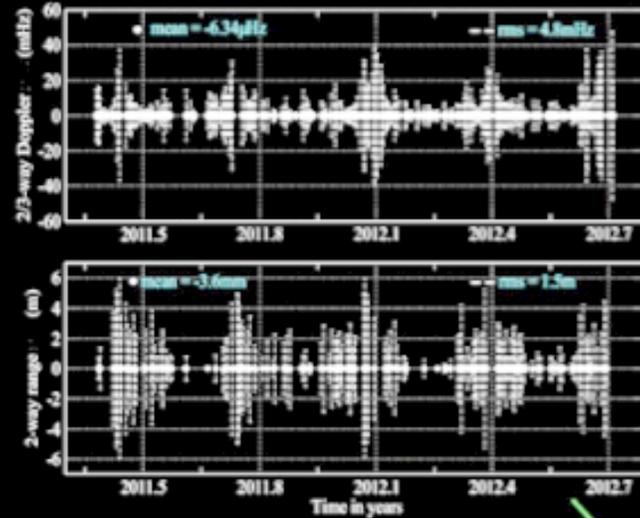


Le temps que met le signal à nous revenir nous donne la distance entre la sonde et la terre et entre la planète et la terre



II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ? : la mesure de distance d'une sonde

- Range tracking: two-way light time \rightarrow distance $s/c \ v$ Earth
- Doppler \approx differences between 2 range at about 60s interval
- Doppler \approx 98% s/c navigation or radio-science data \rightarrow S/C orbit versus the planet
- S/C orbit model = Gravity field, Atmosphere, S/C specifications (shape, reflectivity, NG-A)
- Range \approx 2 % \rightarrow s/c orbit versus Earth
- Solar plasma, Shapiro delay (GR)
- S/C Range + S/C orbit \rightarrow Planet versus Earth distances



2-way Doppler

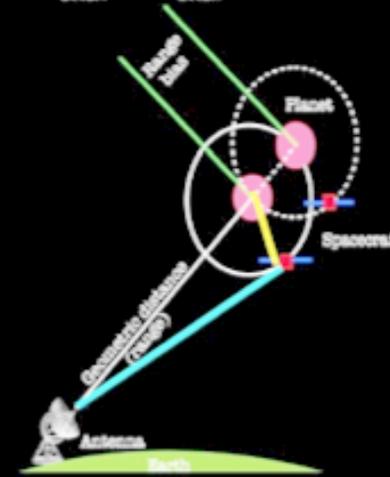
Differences between estimated **velocities** of s/c orbiting the planet and the observed Doppler shift

2-way range

Differences between estimated **distances** of s/c orbiting the planet and the Earth observed time delay

Orbit of the s/c about the planet very well known

Constraints on distances between the planet and the Earth

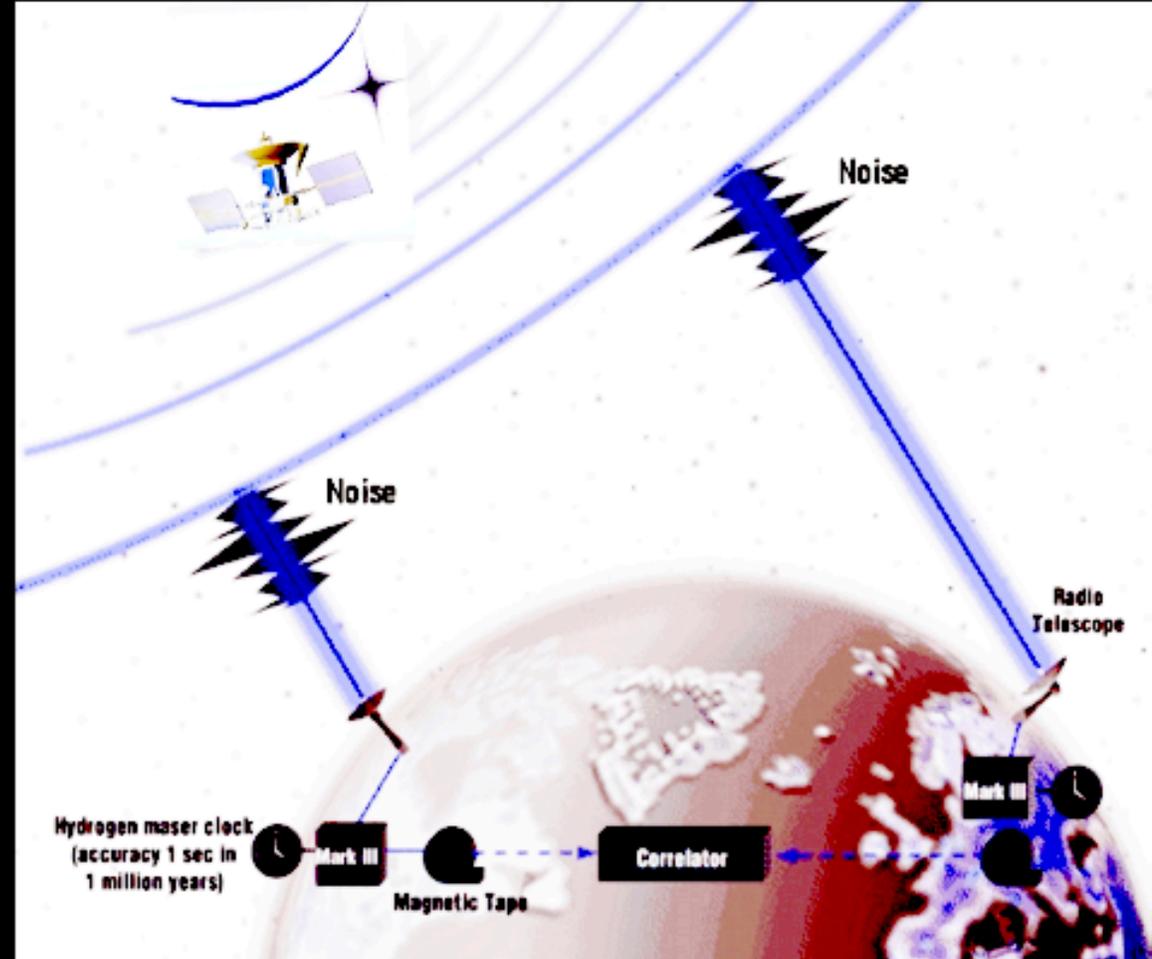


Me	MSG	11-13	300	10 m
Ve	VEX	06-12	25000	10 m
Ma	MEX-MGS-MO	00-15	50000	2 m
Sat	Cassini	04-14	200	100 m

II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ? : la mesure d'angle d'une sonde par VLBI

- Very Long Base Interferometry 8GHz
- Relative positionning S/C versus ICRF QSO
- with S/C Orbit \rightarrow angle Earth/planet/ICRF
- mas-level accuracy but very few points
- crucial for linking the planetary planes together

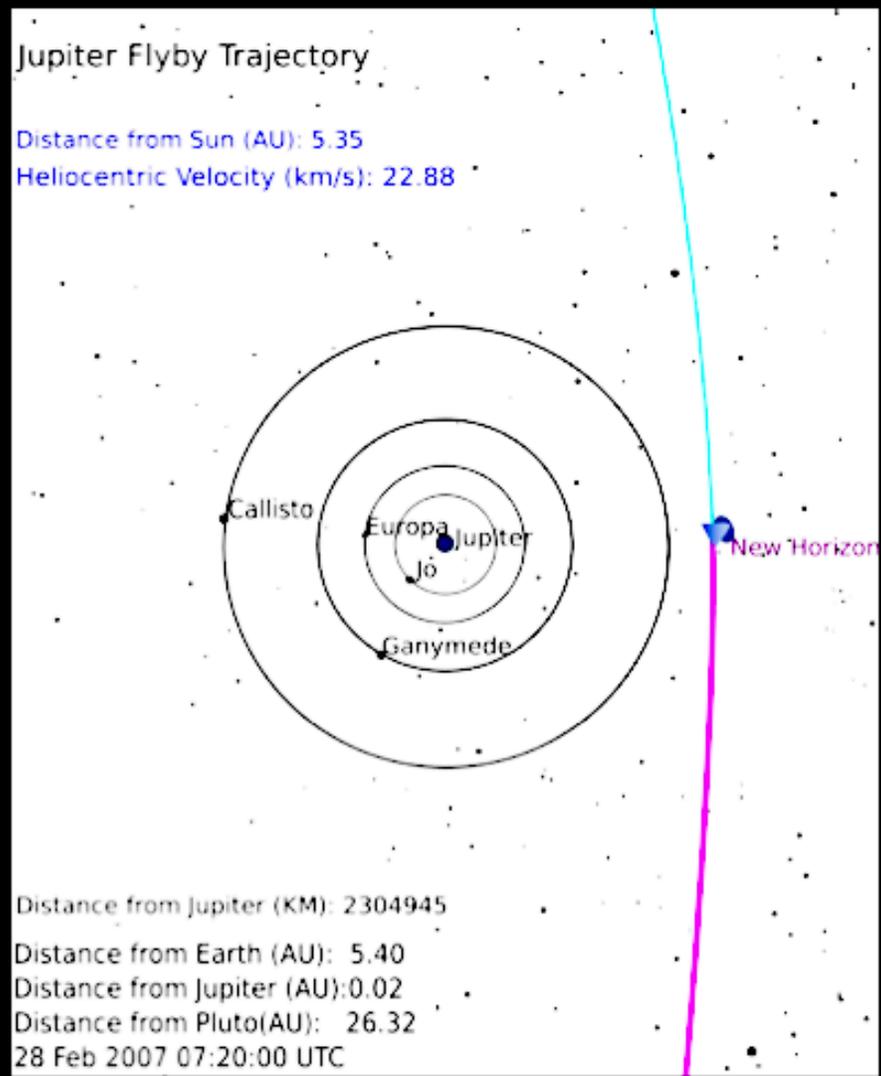
Ve	VEX	10-13	100	2 mas
Ma	MEX-MGS-MO	00-15	200	2 mas
Jup	Galileo	96-97	12	11 mas
Sat	Cassini	04-14	30	1 mas



II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ? : la mesure durant un survol

- Very short arc analysis
- Combination of Doppler, Range, VLBI
- with S/C Orbit → angle and distances Earth/planet/ICRF
- Very very few points
- crucial for outer planet orbits

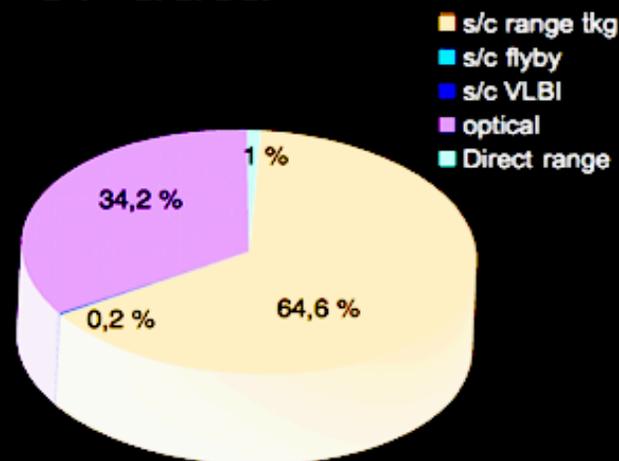
	α, δ	ρ		
Mer	2 mas	1 m	MSG	3 (08-09)
Jup	5 mas	1.5 km	Pioneer, Cassini Voyager, Ulysses	5 (75-01)
Ura	10 mas	1000 km	Voyager	1 (86)
Nep	10 mas	2000 km	Voyager	1 (89)



II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ? : Le bilan

More than 1 century of data

- **Mercury**: independent analysis of MESSENGER data (Verma et al. 2014)
- **Saturn**: Cassini VLBI and radio tracking
- **Jupiter**: Galileo VLBI and 5 s/c flybys
- **Venus, Mars**: VEX, MEX, MGS, MRO, MO, ...



		α	δ	ρ
S/C VLBI 1990-2010	V, Ma, J, S	1/10 mas	1/10 mas	
S/C Flybys 1976-2014	Me, J, S, U, N	0.1/5mas	0.1/5 mas	1m/2000km
S/C Range 1976-2014	Me, V, Ma, Sat			10,10,2,100 m
Direct range 1965-1997	Me,V			1 km
Optical 1914-2014	J, S, U, N, P	300 mas	300 mas	
LLR 1980-2014	Moon			1cm

II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?

	Gaillot 1913		DE200 1983		INPOP10a 2011	
	angle	distance Earth-	angle	distance Earth-	angle	distance Earth-
	"	km	"	km	"	km
Mercury	1	450	0.050	5	0.050	0.002
Venus	0.5	100	0.050	2	0.001	0.004
Mars	0.5	150	0.050	0.050	0.001	0.002
Jupiter	0.5	1400	0.1	10	0.010	2
Saturn	0.5	3000	0.1	600	0.010	0.015
Uranus	1	12700	0.2	2540	0.100	1270
Neptune	1	22000	0.2	4400	0.100	2200
Pluto	1	24000	0.2	4800	0.100	2400

RG

0,43 "/an

0,09 "/an

0,015 "/an

0,006 "/an

0,001 "/an

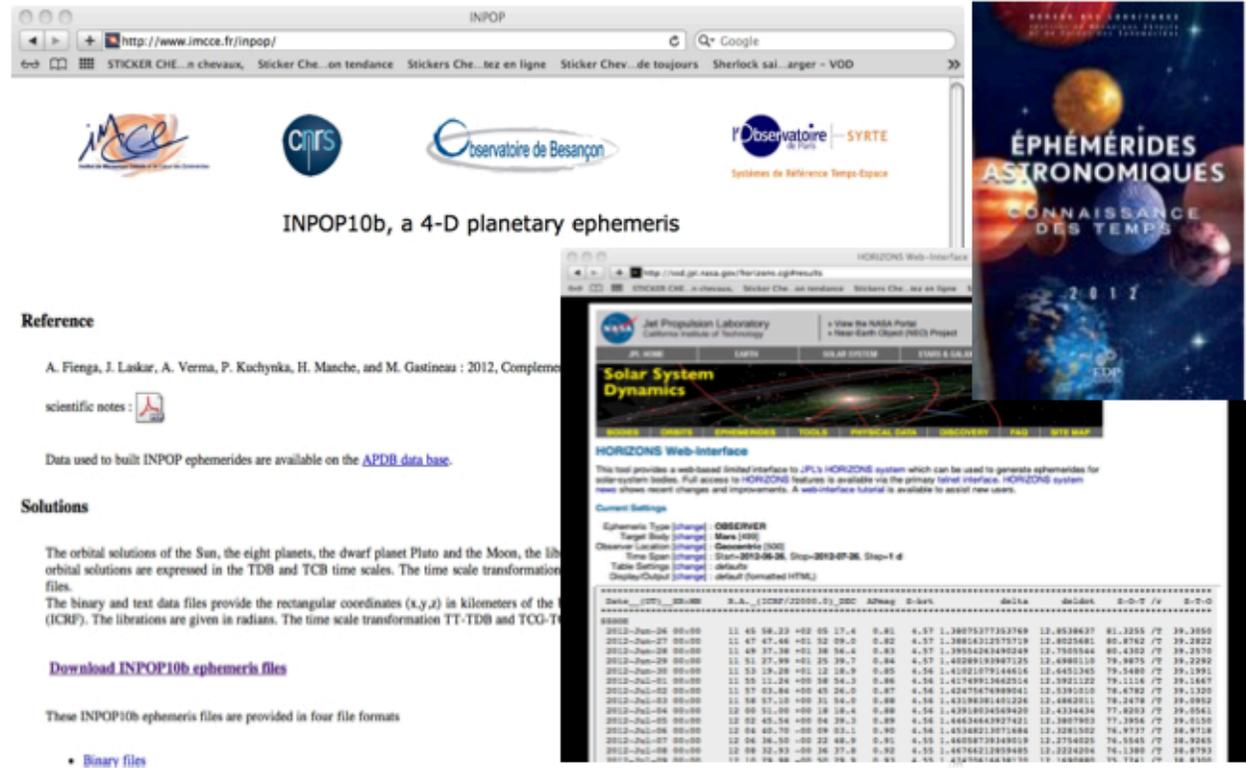
0,0002 "/an

II. Qu'est-ce qu'une éphéméride planétaire ?

Définition du Larousse

Table donnant de jour en jour, ou pour d'autres intervalles de temps, les valeurs calculées de diverses grandeurs astronomiques variables.

Par extension, les *éphémérides*, sont le résultat de modèles dynamiques d'objets célestes (planètes, satellites, petits corps naturels et artificiels, pulsars).



The image shows a screenshot of a web browser displaying the INPOP website. The browser address bar shows <http://www.imcce.fr/inpop/>. The page features logos for IMCCE, CNRS, Observatoire de Besançon, and l'Observatoire de Paris - SYRTE. Below the logos, the text reads "INPOP10b, a 4-D planetary ephemeris".

Under the heading "Reference", there is a citation: "A. Fienga, J. Laskar, A. Verma, P. Kuchynka, H. Manche, and M. Gastineau : 2012, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 347, 101-106." Below this is a small icon of a document and the text "Data used to build INPOP ephemerides are available on the [APDB data base](#)."

Under the heading "Solutions", there is a paragraph: "The orbital solutions of the Sun, the eight planets, the dwarf planet Pluto and the Moon, the libration solutions are expressed in the TDB and TCB time scales. The time scale transformation files. The binary and text data files provide the rectangular coordinates (x,y,z) in kilometers of the (ICRF). The librations are given in radians. The time scale transformation TT-TDB and TCG-TDB are provided in the following table."

Below this text is a link: "Download INPOP10b ephemeris files".

At the bottom, there is a note: "These INPOP10b ephemeris files are provided in four file formats" followed by a bullet point: "Binary files".

Overlaid on the right side of the browser window is a book cover titled "ÉPHÉMÉRIDES ASTRONOMIQUES CONNAISSANCE DES TEMPS 2012". The cover features a colorful illustration of planets and stars.

Overlaid on the bottom right of the browser window is a screenshot of the JPL HORIZONS web interface. The interface shows a "Solar System Dynamics" section with a 3D visualization of the solar system. Below the visualization, there are various settings and a table of data. The table has columns for "Data", "J2000", "MJD", "S.A.", "(ICRF)", "(J2000.0)", "DCC", "AZdeg", "D-lev", "delta", "deltad", "D-O-T", "v", "D-T-O". The table contains numerical data for various celestial bodies and time intervals.

II. Qu'est-ce qu'une éphéméride planétaire ?

Les éphémérides planétaires aujourd'hui

3 équipes

DE JPL DE405 (Standish et al. 1998)
DE421 (Folkner et al. 2008)
DE423 (Konopliv et al. 2011) JPL
pas d'adaptation possible

EMP IAA EMP20.. (Pitjeva 2009) Proche de DE
Distribution limitée

INPOP IMC/ UTI INPOP06 (Fienga et al. 2008)
INPOP08 (Fienga et al. 2009)
INPOP10a (Fienga et al. 2011)
INPOP10x (en cours) Usage scientifique
ESA GAIA
Adaptable
1Myr
IAU TT-TDB, GM_☉

■ Intégration numérique des équations du mouvement

(Einstein-Infeld-Hoffmann, c^{-4} PPN approximation).

$$\ddot{\mathbf{x}}_{Planet} = \sum_{A \neq B} \mu_B \frac{\mathbf{r}_{AB}}{\|\mathbf{r}_{AB}\|^3} + \ddot{\mathbf{x}}_{GR}(\beta, \gamma, c^{-4}) + \ddot{\mathbf{x}}_{AST,300} + \ddot{\mathbf{x}}_{J_2^\odot}$$

■ Adams-Cowell en précision étendue

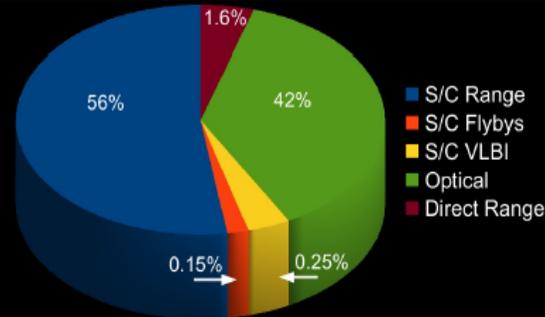
■ 9 planètes + lune + astéroïdes, GR, J₂[☉]

■ Lune: orbite et librations

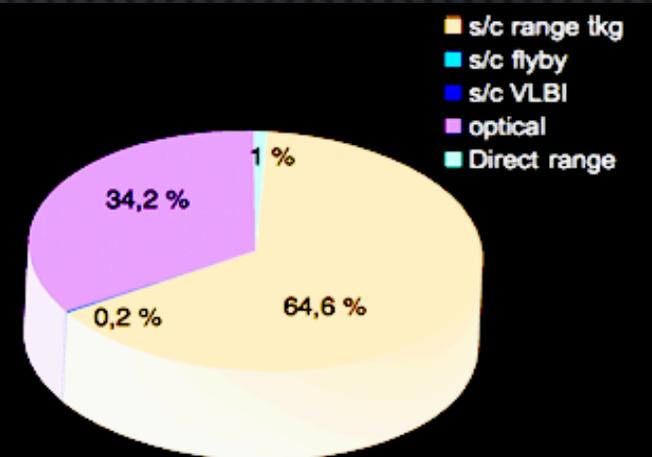
■ ICRF

■ Ajustement aux observations

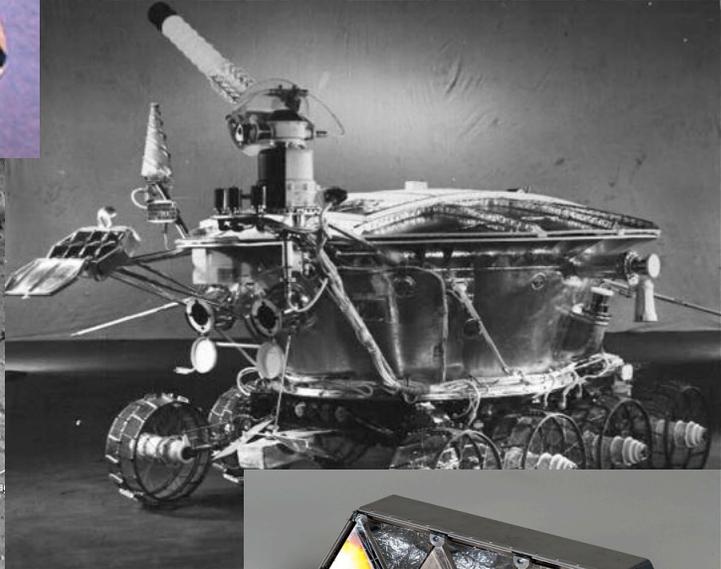
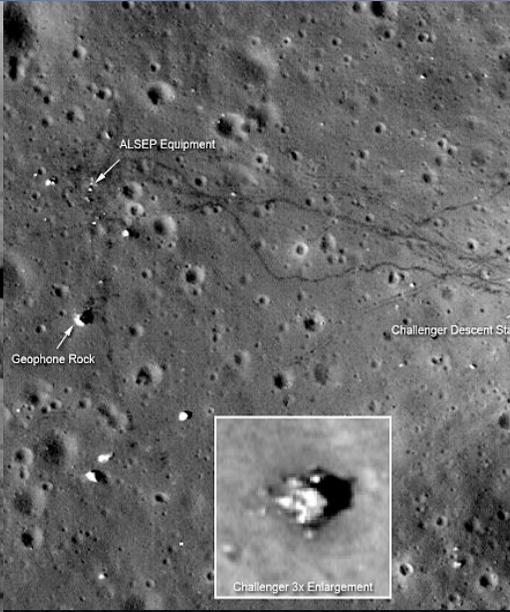
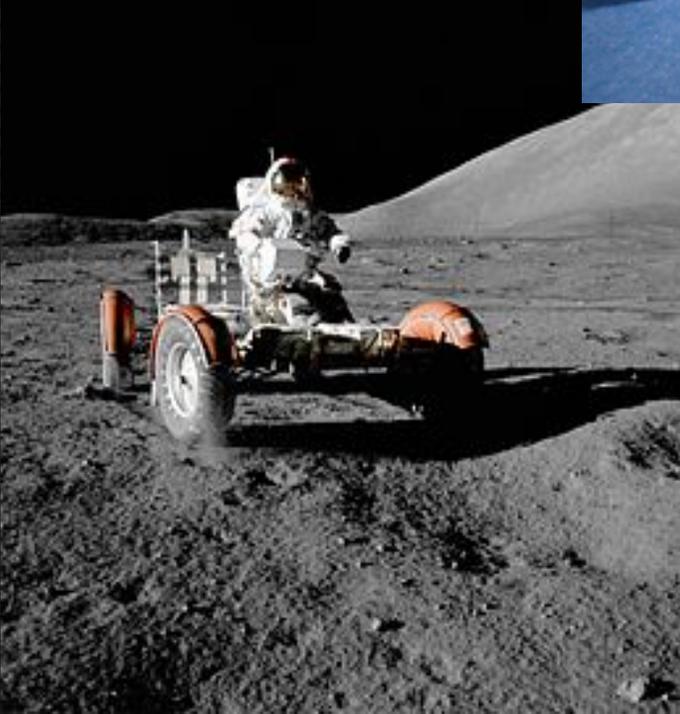
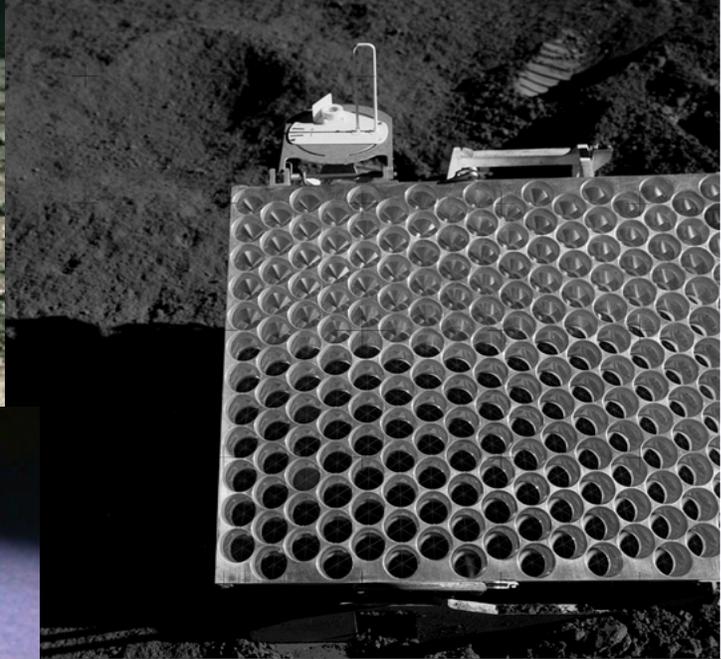
Très dépendantes de la navigation spatiale



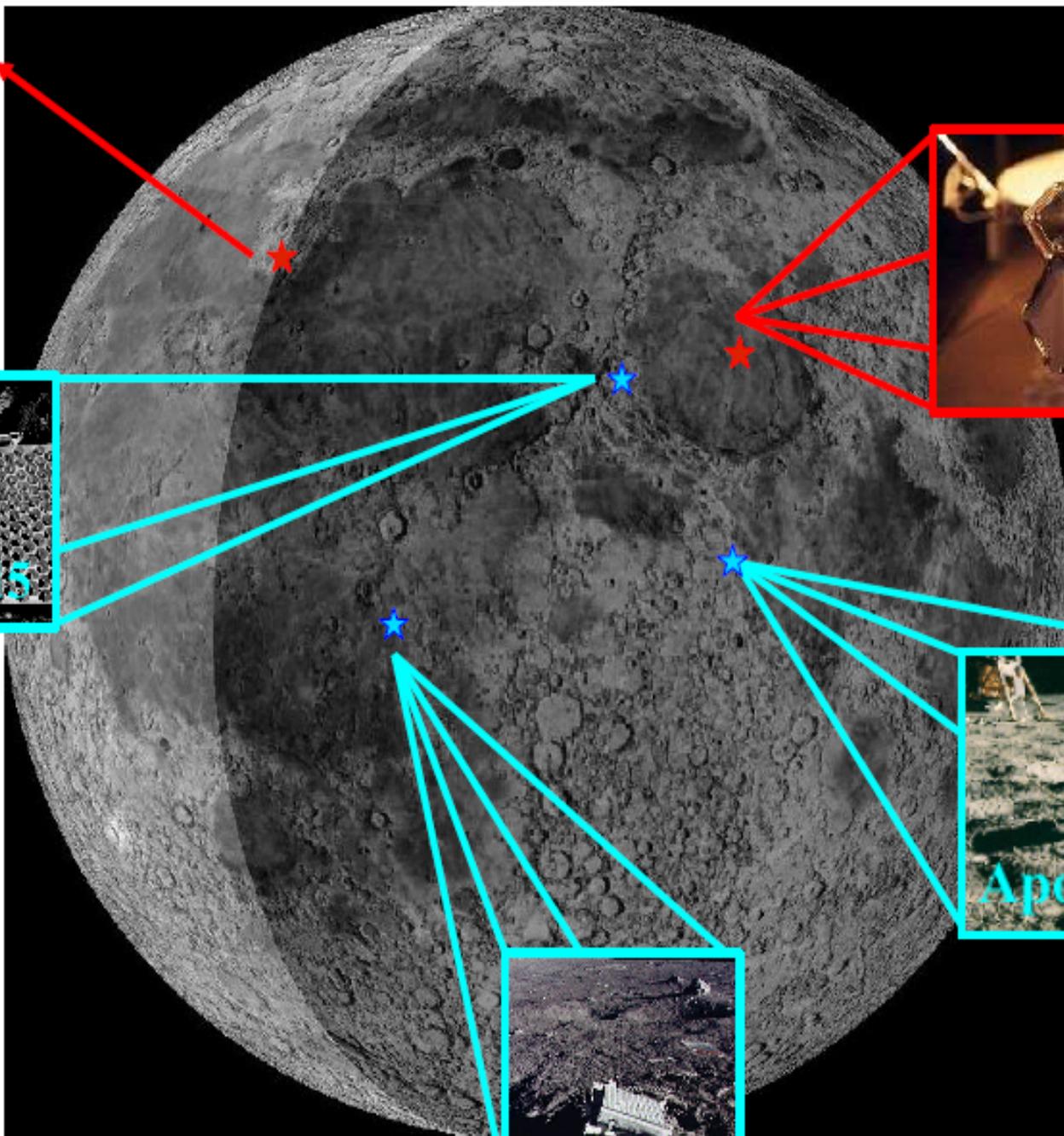
Data	Planet	α (mas)	δ (mas)	ρ (m)
S/C Range	Me, Ve, Ma	-	-	2-30
Flybys	Me, Ju, Sa, Ur, Ne	0.1-10	0.1-10	1-30
VLBI	Ve, Ma, Ju, Sa	1-10	1-10	-
Direct range	Me, Ve	-	-	~ 1000
Optical	Ju, Sa, Ur, Ne, Pl	~300	~300	-



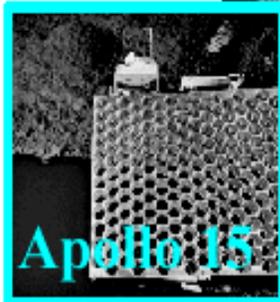
II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?



Lunakhod 1
(lost and retrieved by LROLR in 2010)



Lunakhod 2



Apollo 15

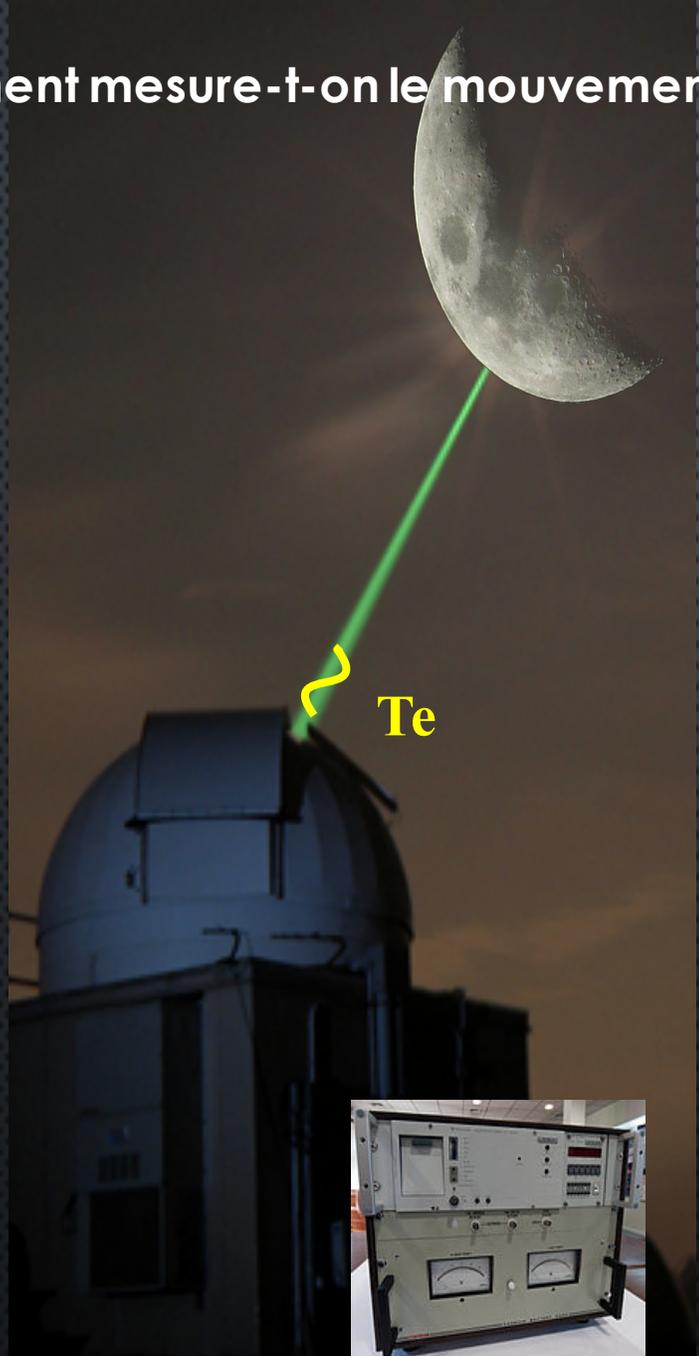


Apollo 11



Apollo 14

II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ? **Principe de la mesure**

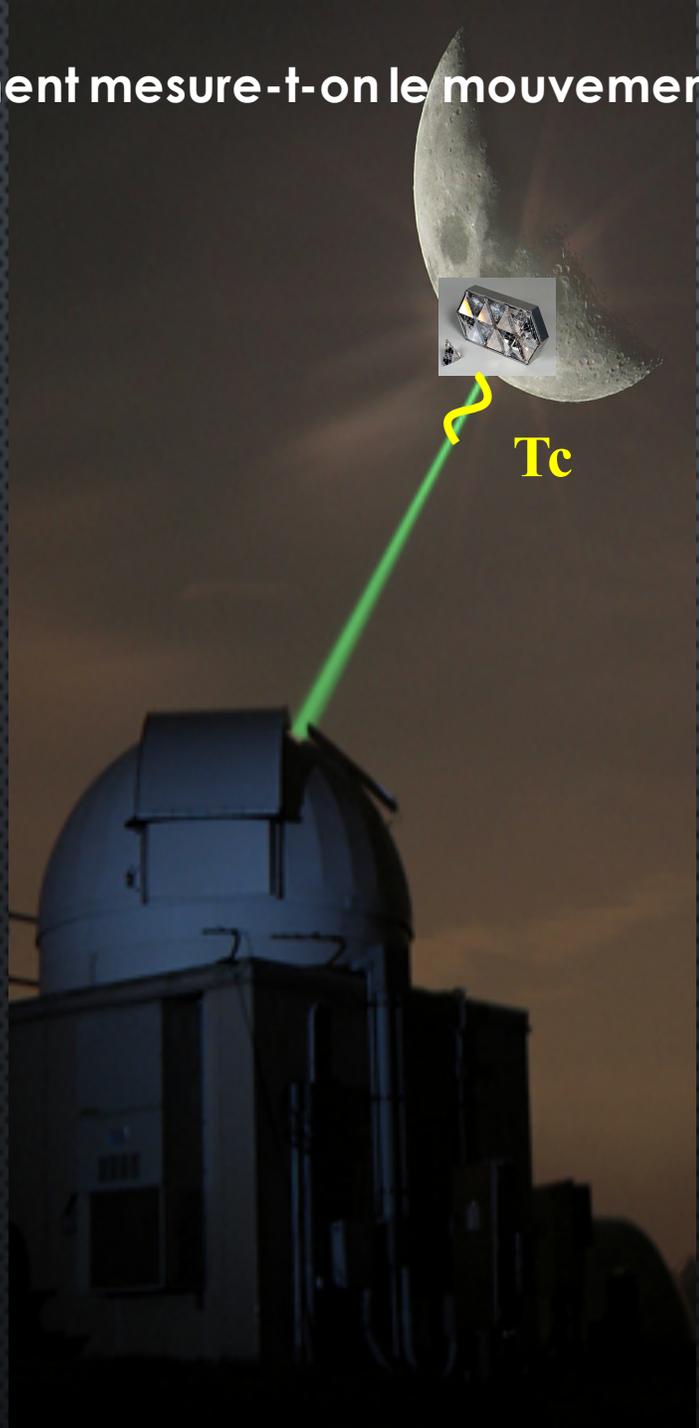


**Te : émission d'un train de photon
par le laser**

**Atmosphère + rotation de la terre +
mouvement de la station**



II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ? **Principe de la mesure**



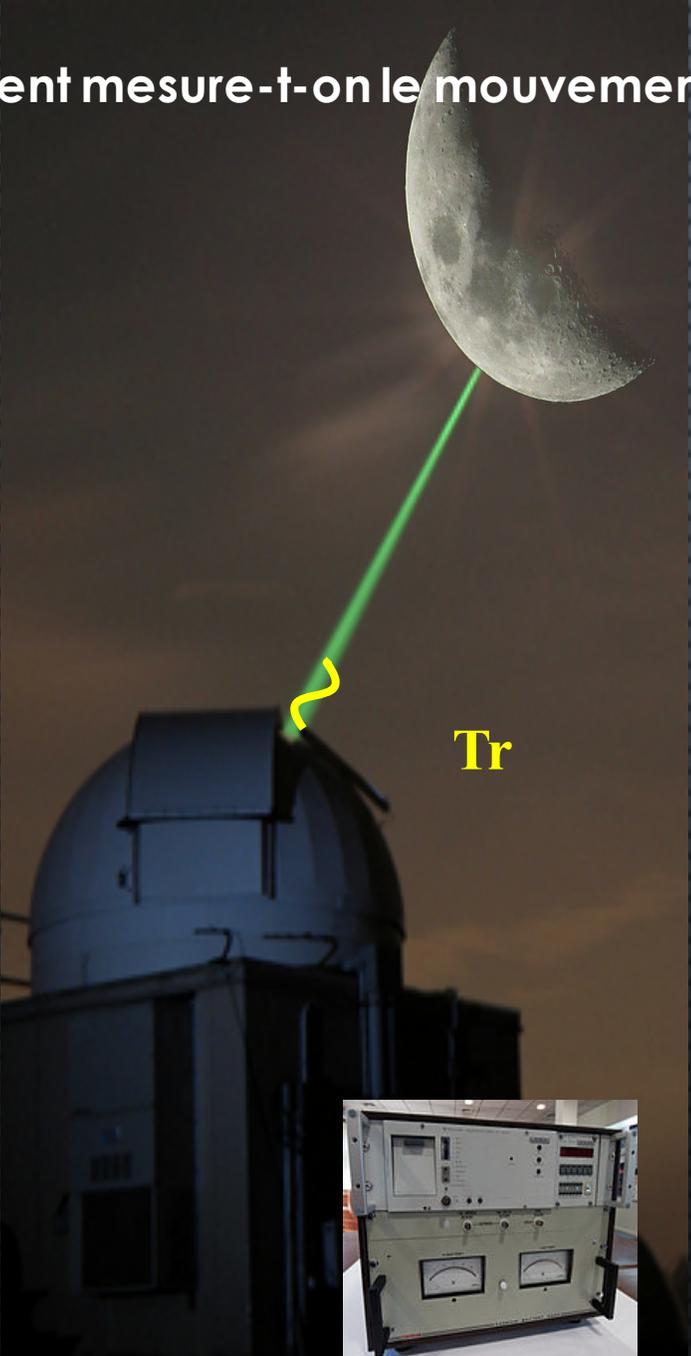
Te : émission d'un train de photon
par le laser

Atmosphère + rotation de la terre +
mouvement de la station

Tc : le photon est réfléchi par le
réflecteur à la surface de la lune et
ré-émis en direction de la station

**Géométrie réflecteur / lune / terre /
soleil**

II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ? **Principe de la mesure**



Te : émission d'un train de photon
par le laser

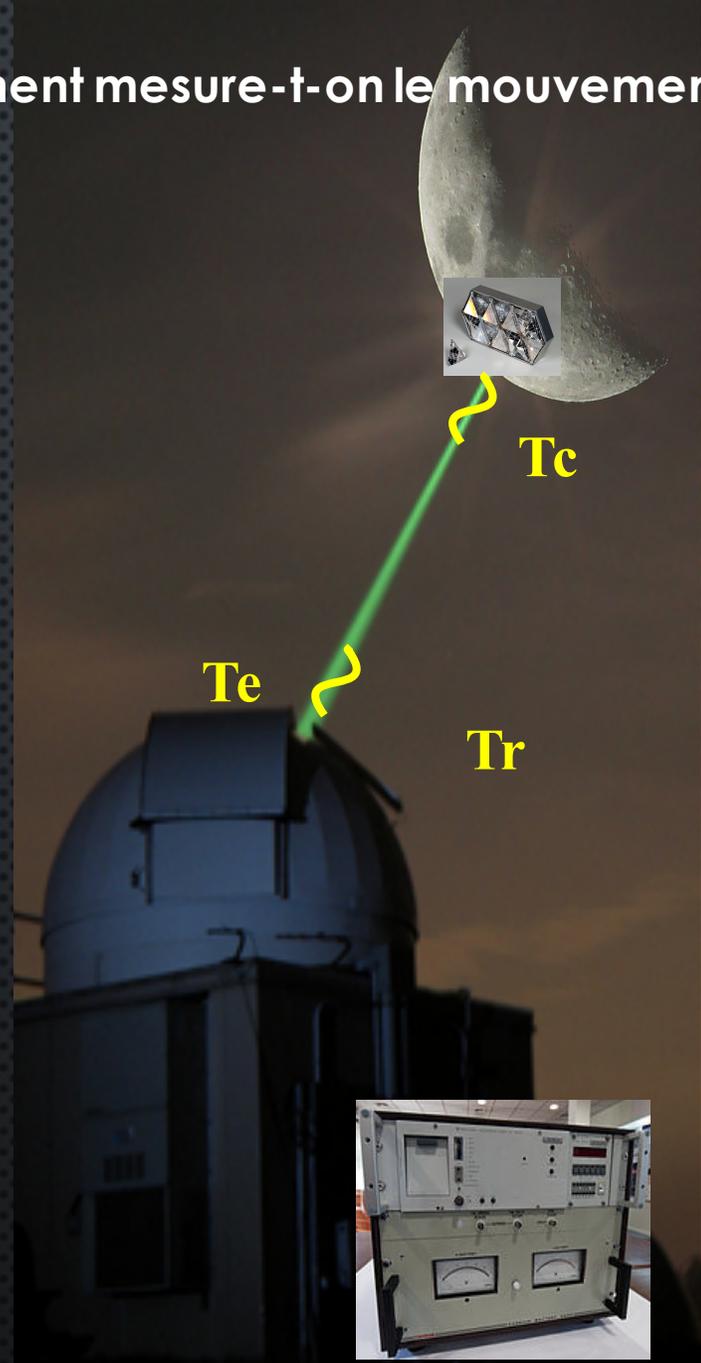
**Atmosphère + rotation de la terre +
mouvement de la station**

Tc : le photon est réfléchi par le
réflecteur à la surface de la lune et
ré-émis en direction de la station

**Rotation de la lune + mouvement
du réflecteur + atmosphère +
retards instrumentaux (horloge,
optique)**

II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?

Principe de la mesure

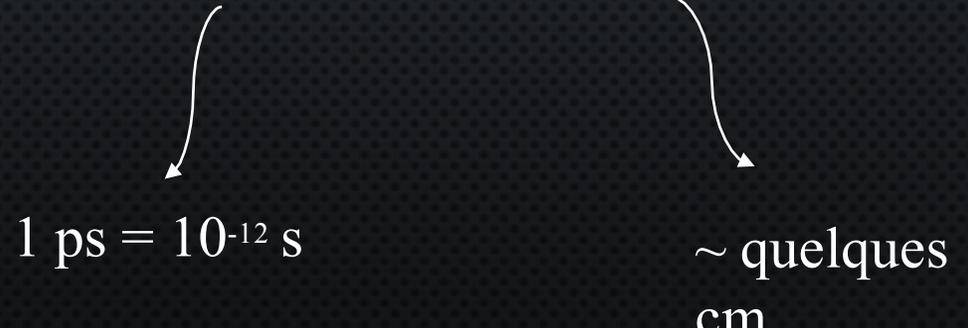


Tr - Te : mesure → distance terre-lune

- **Atmosphère**
- **rotation de la terre + mouvement de la station**
- **Rotation de la lune + mouvement du réflecteur**
- **retards instrumentaux (horloge, optique)**

Performances actuelles

Tr - Te : mesure → distance terre-lune



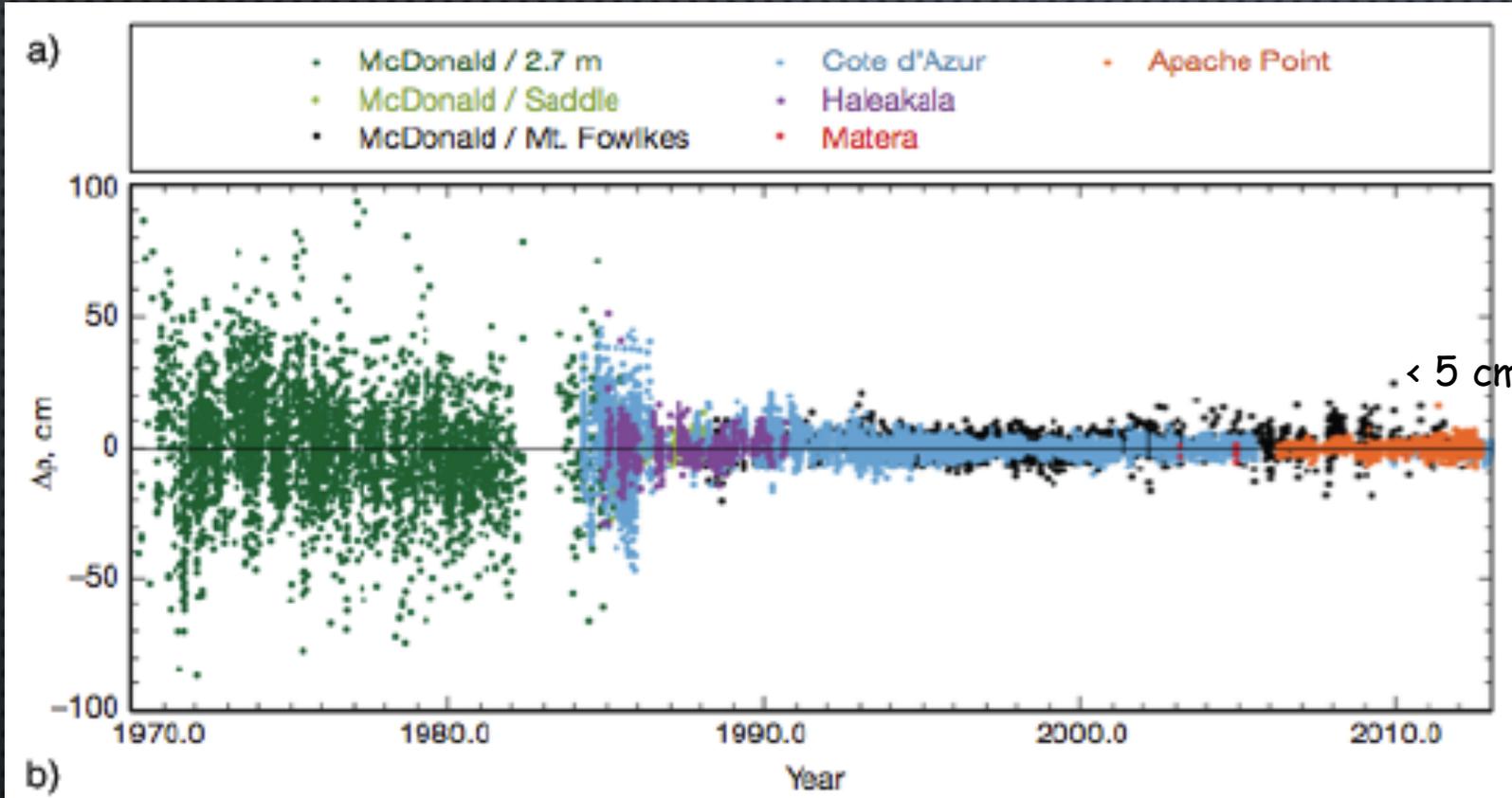
1 ps = 10^{-12} s

~ quelques cm



II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?

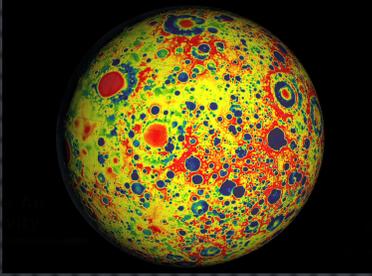
Quelques statistiques sur les mesures de télémétrie laser-lune



OCA : + 50% des données
mondiales avec une précision
croissante avec le temps

II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?

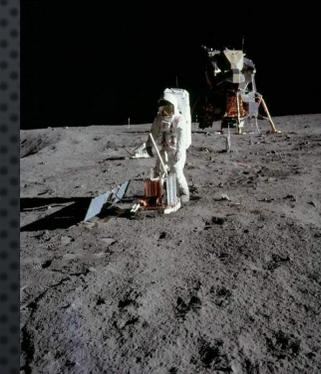
Ce que nous ont apportés les orbiters lunaires (GRAIL, LRO...)



- Champs de gravité et topographie très précis → impact, anomalies de gravité avec des concentrations de masses
- Cliché « instantané » très détaillé et très précis (GRAIL ~ 30km) de la surface
- Géométrie très différente / LLR
- MAIS mesures sur quelques années

Ce que nous ont apportés les missions lunaires (APOLLO, LUNOKHOD)

- Structure du manteau
- Mesures locales
- Echantillons
- Lunar Geophysical Network



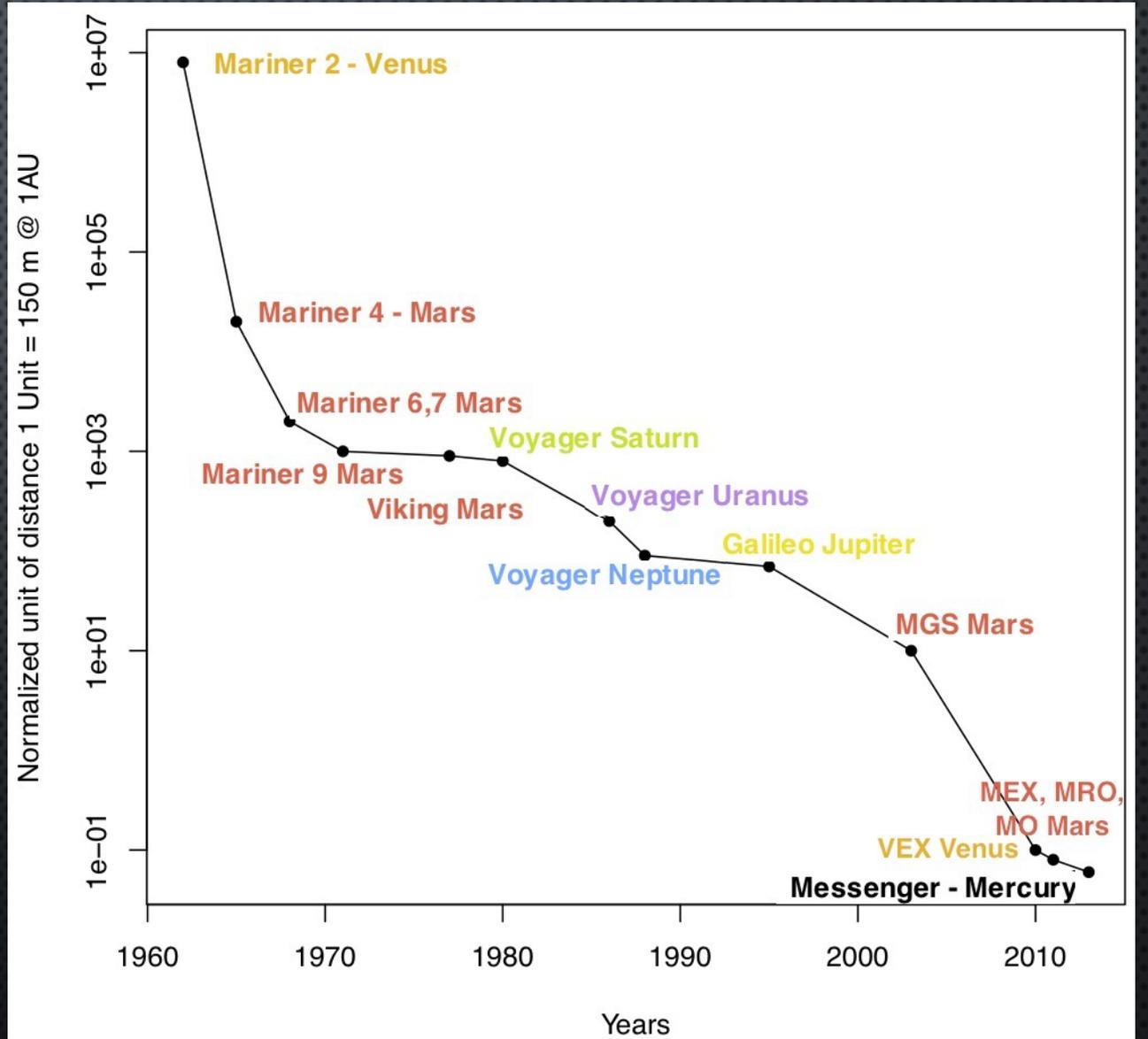
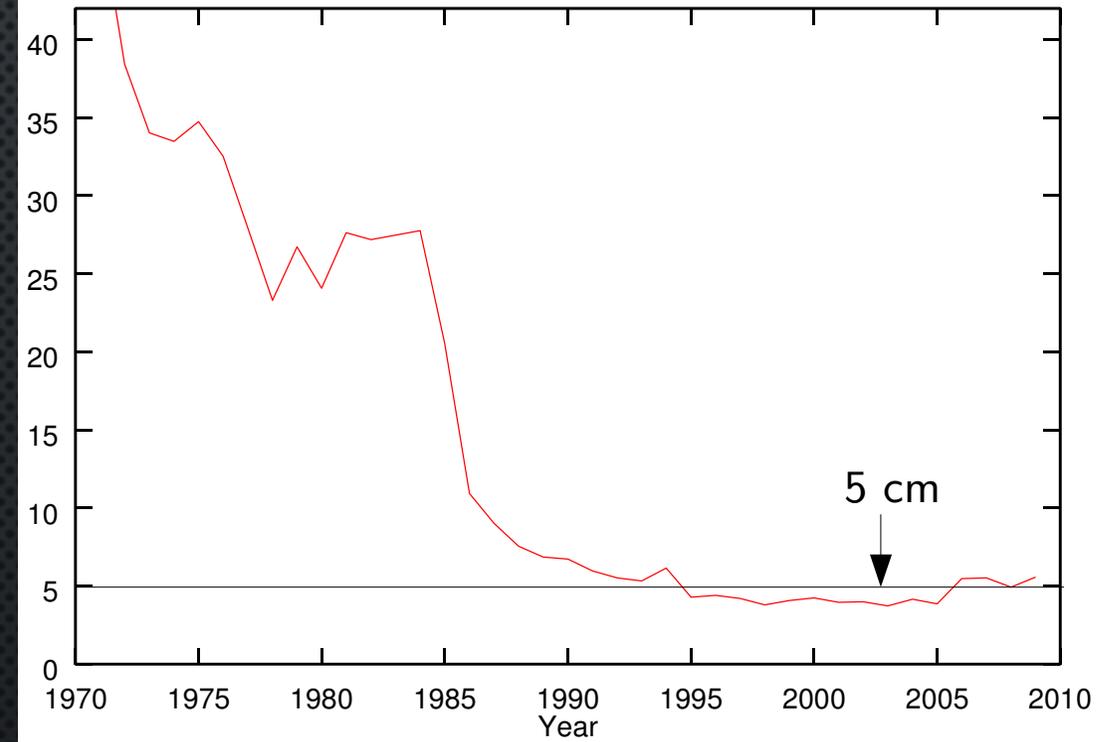
Ce que nous apporte la télémétrie Laser Lune



- Librations physiques libres (resonances, fluctuations limite noyau-manteau)
- Noyau fluide ~ 400 km de rayon
- Evolution orbitale (effet de marées, dissipation)
- Mesures précises depuis plus de 40 ans
- Mesures dynamiques très complémentaires des s/c
- MAIS géométrie limitée aux réflecteurs actuels

II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?

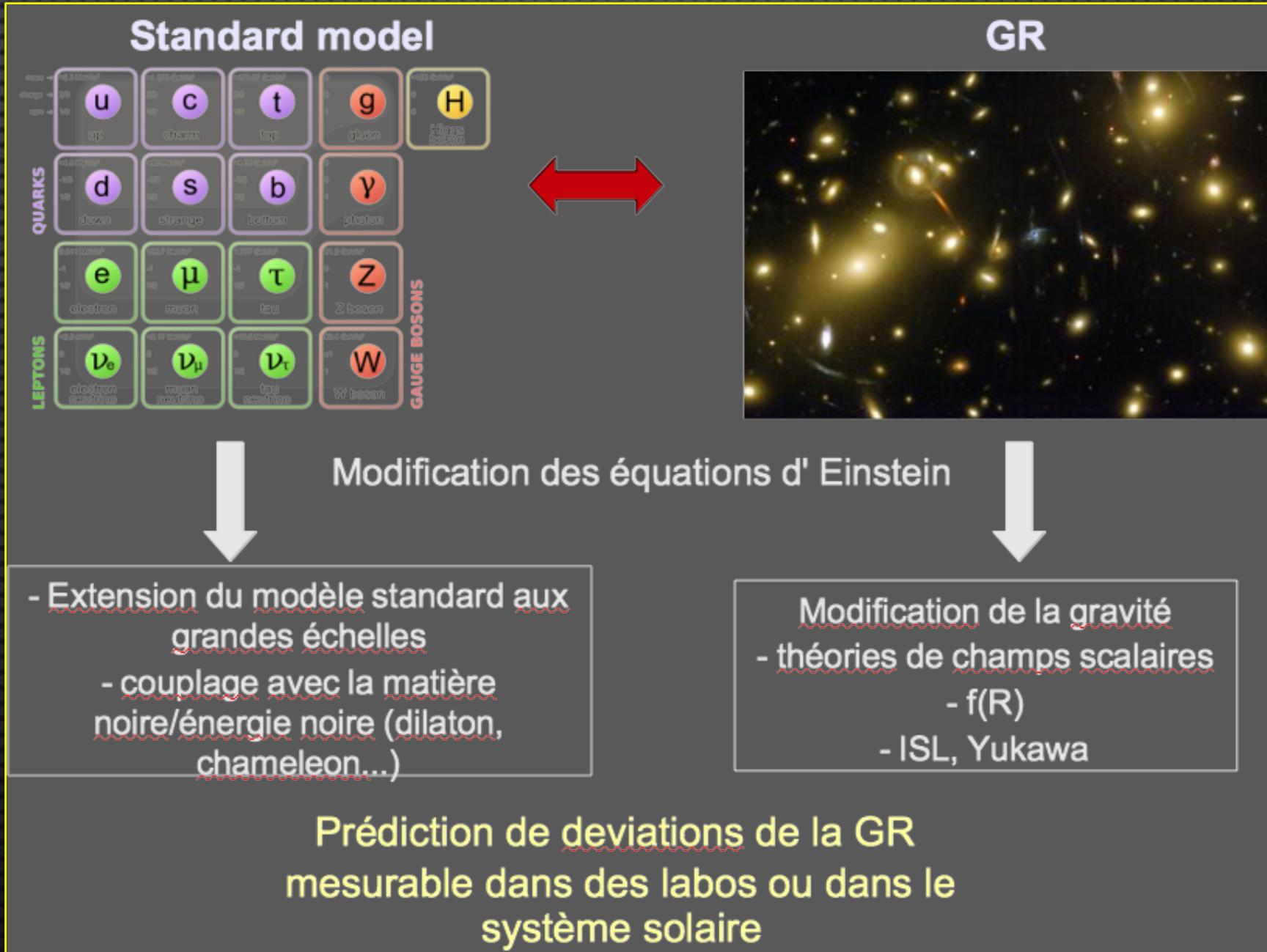
LLR WRMS based on INPOP10a



Est-ce qu'Einstein se trouvait sur la Lune ?

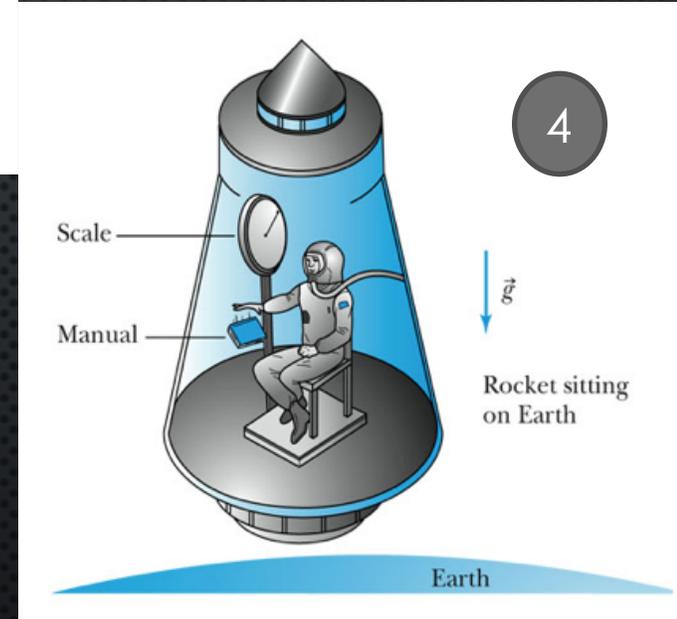
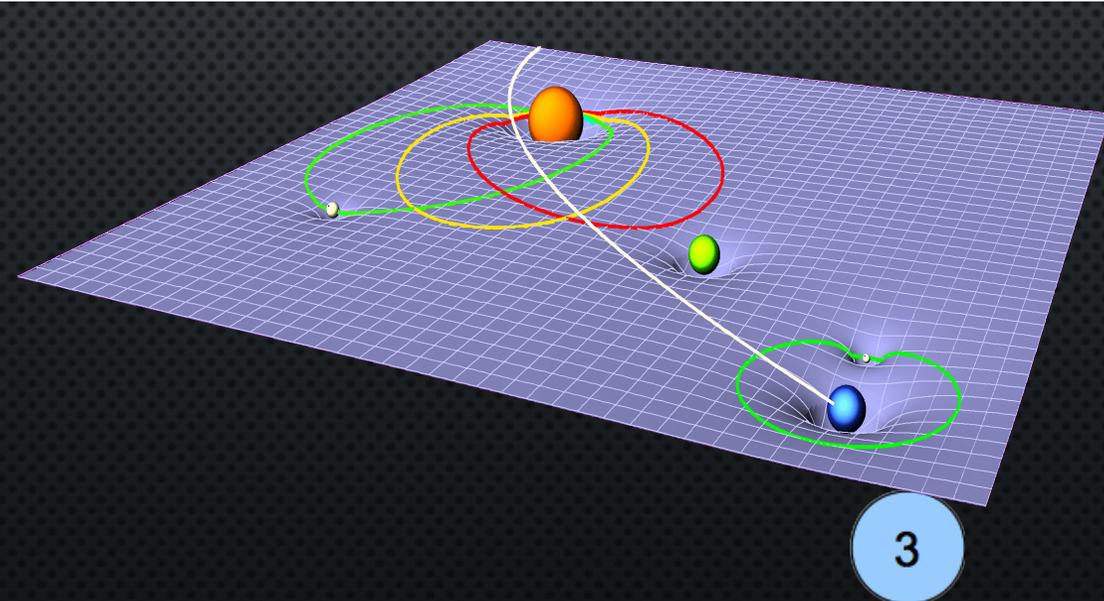
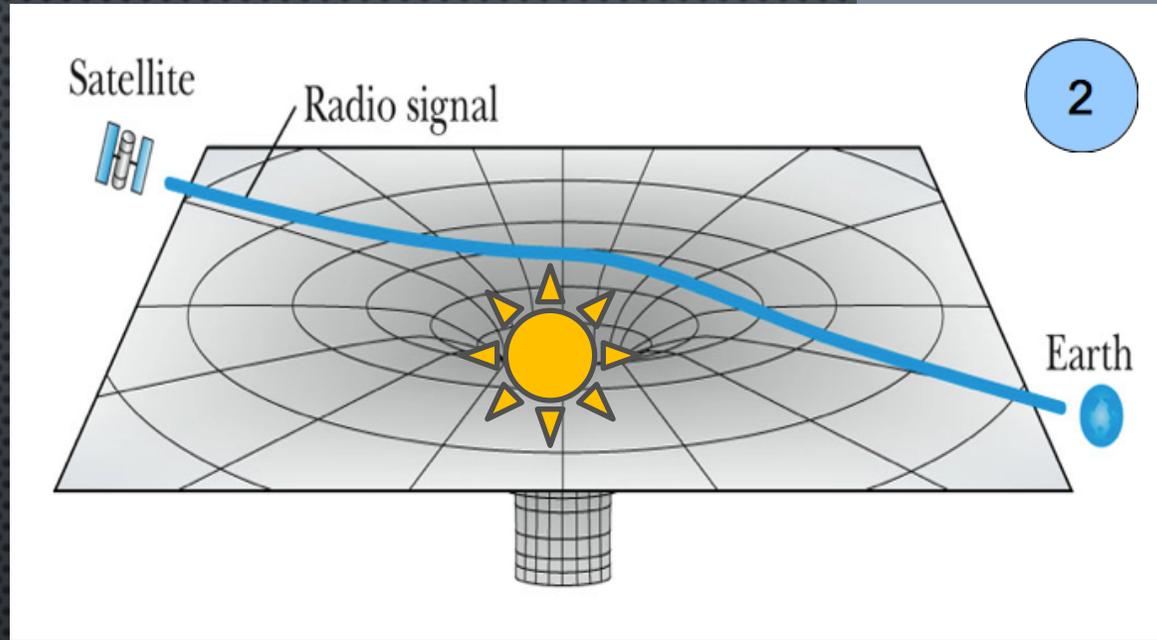
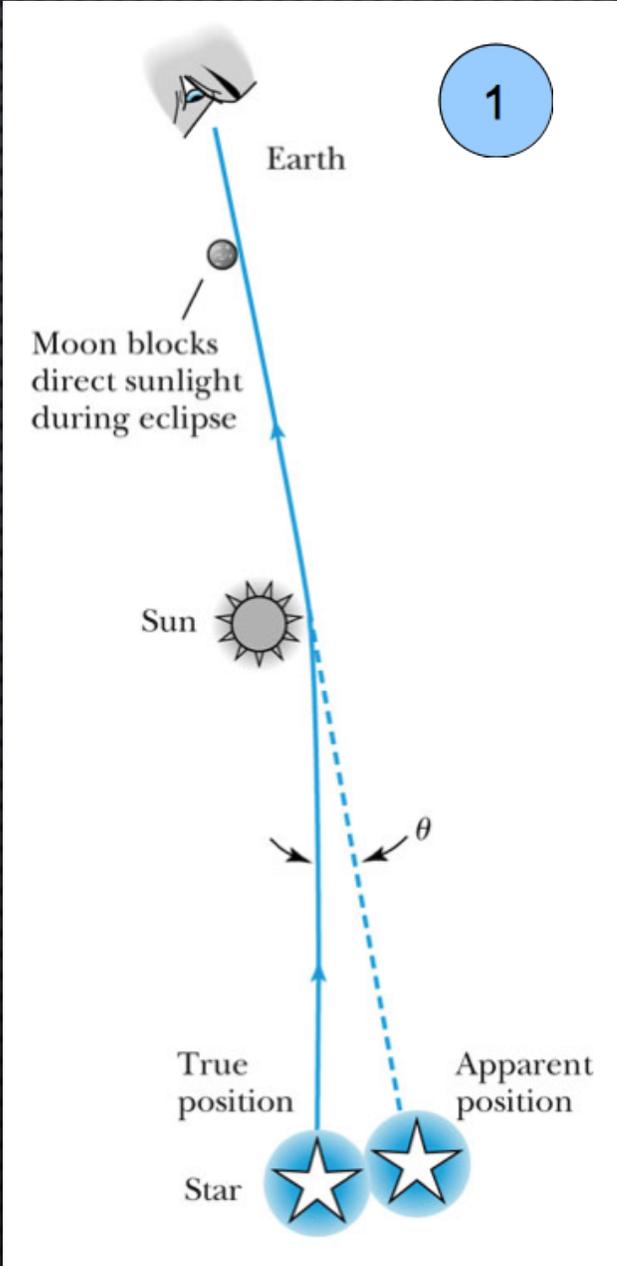
- I. La Gravité par l'étude du mouvement des corps dans le système solaire
- II. Comment mesure-t-on le mouvement de ces corps ?
- III. Comment pourraient-ils se déplacer autrement ?**

III. Comment pourraient-ils se déplacer autrement ?

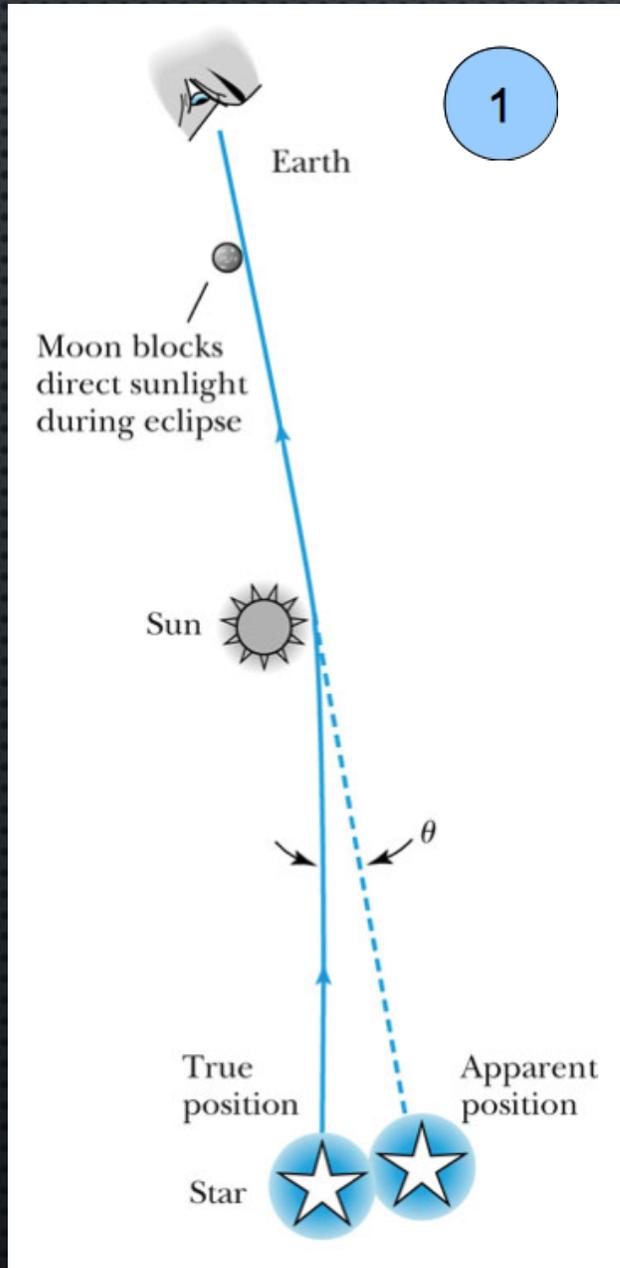


III. Comment pourraient-ils se déplacer autrement ?

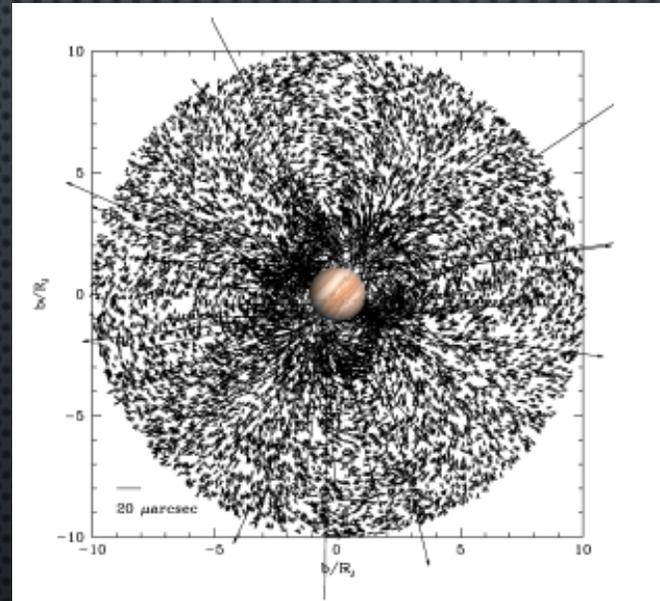
4 effets mesurables dans le système solaire



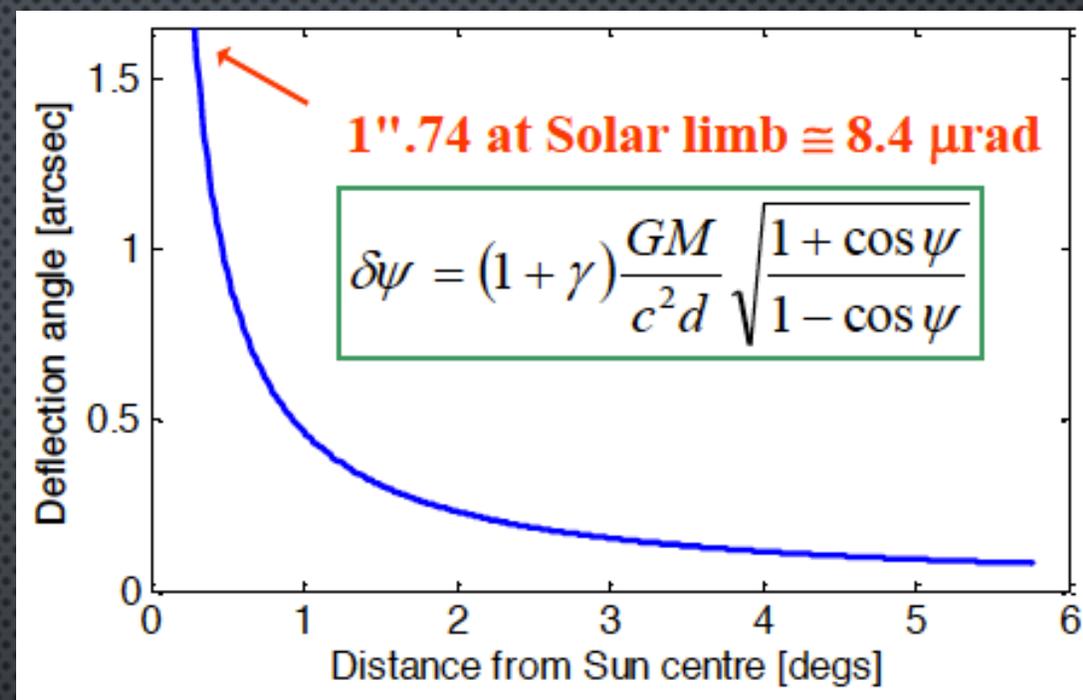
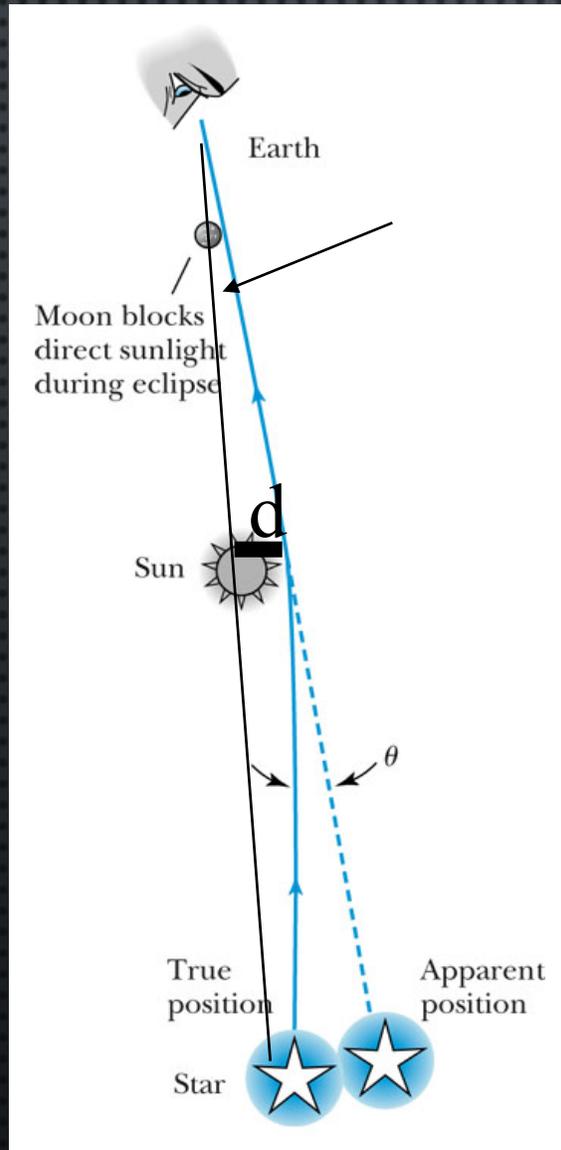
III. Comment pourraient-ils se déplacer autrement ?



courbure de l'espace-temps et trajet de la lumière:
effet sur la positions des étoiles avant et après le
passage d'un corps massif dans le champ



- Pendant une éclipse



courbure de l'espace-temps et trajet de la lumière

- Eddington : 1919 → 1973

SCLERA: an Astrometric Telescope for Experimental Relativity

APPLIED OPTICS / Vol. 13, No. 1 / January 1974

J. R. Oleson, C. A. Zanoni, H. A. Hill, A. W. Healy, P. D. Clayton, and D. L. Patz



An $f/100$, 12.2-m focal length photoelectric telescope designed specifically for daytime astrometry of objects near the sun is now operative at its Tucson, Arizona, site. The design goal was to achieve accuracies of order 0.001 sec of arc in field position measurements of stars. To accomplish this, many features reducing systematic and random errors are employed, including Schupmann medial telescope optics, compensation for lateral color aberration, apodization for reduction of diffracted light, and use of an accurately measured solar diameter for calibrating the field.

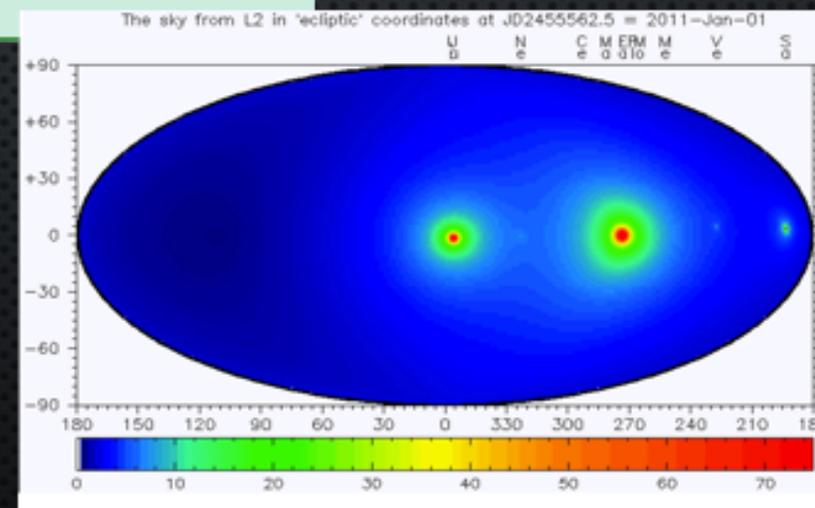
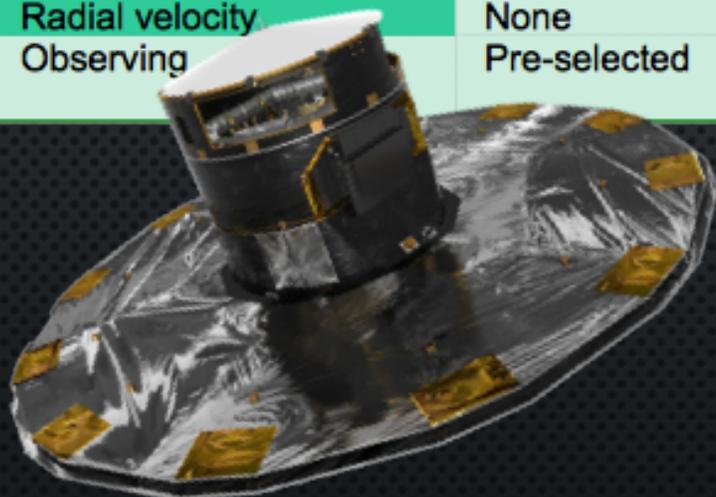
Precision limitations from ground at the few milli-arcsec level...

Authors	Year	Deflection ["]
Dyson & al.	1920	1.98 ± 0.16
Dodwell & al.	1922	1.77 ± 0.40
Freundlich & al.	1929	2.24 ± 0.10
Mikhailov	1936	2.73 ± 0.31
van Biesbroeck	1947	2.01 ± 0.27
van Biesbroeck	1952	1.70 ± 0.10
Schmeidler	1959	2.17 ± 0.34
Schmeidler	1961	1.98 ± 0.46
TMET	1973	1.66 ± 0.19

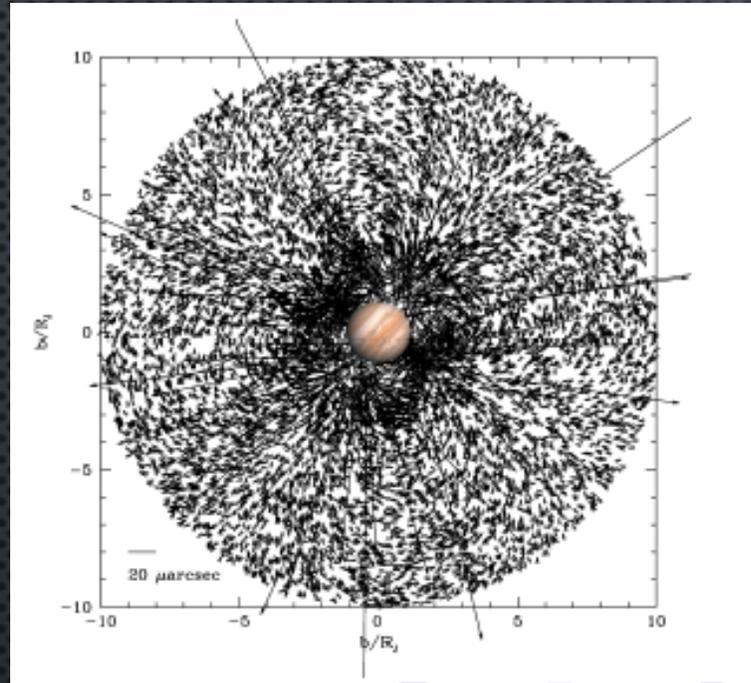
- GAIA



	Hipparcos	Gaia
Magnitude limit	12 mag	20 mag
Completeness	7.3 – 9.0 mag	20 mag
Bright limit	0 mag	3 mag (assessment for brighter stars ongoing)
Number of objects	120,000	47 million to G = 15 mag 360 million to G = 18 mag 1192 million to G = 20 mag
Effective distance limit	1 kpc	50 kpc
Quasars	1 (3C 273)	500,000
Asteroids	48 main belt	250,000 main belt + 50 KBO
Galaxies	None	1,000,000
Accuracy	1 milliarcsec	7 μ arcsec at G = 10 mag 26 μ arcsec at G = 15 mag 600 μ arcsec at G = 20 mag
Photometry	2-colour (B and V)	Low-res. spectra to G = 20 mag
Radial velocity	None	15 km s ⁻¹ to GRVS = 16 mag
Observing	Pre-selected	Complete and unbiased



GAIA et suivants (AGP...)

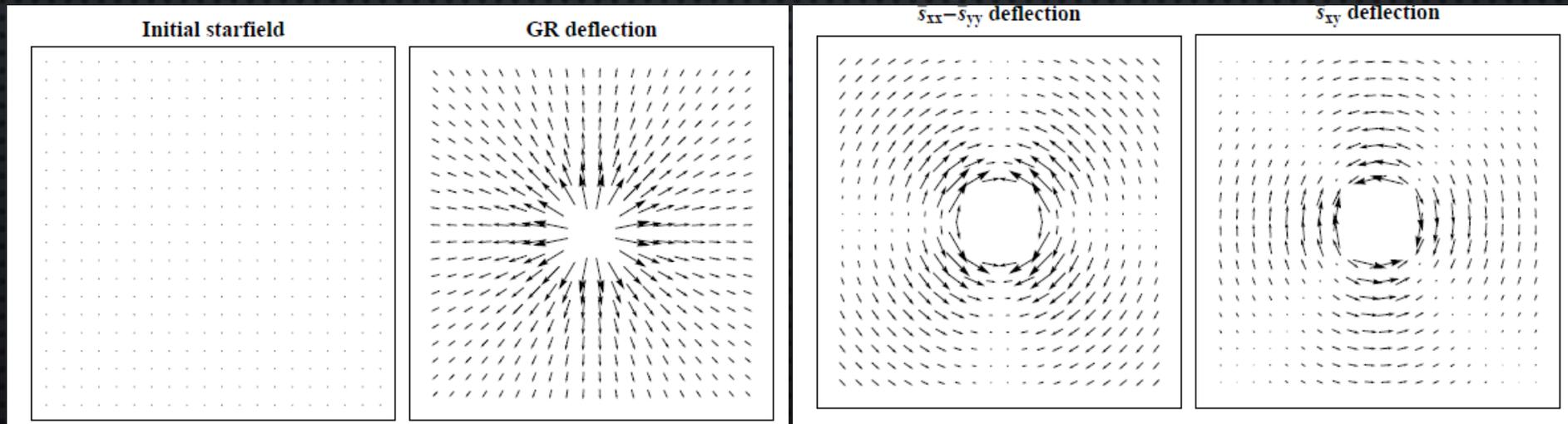


→ déflexion de la lumière par les planètes qui sont légèrement aplaties

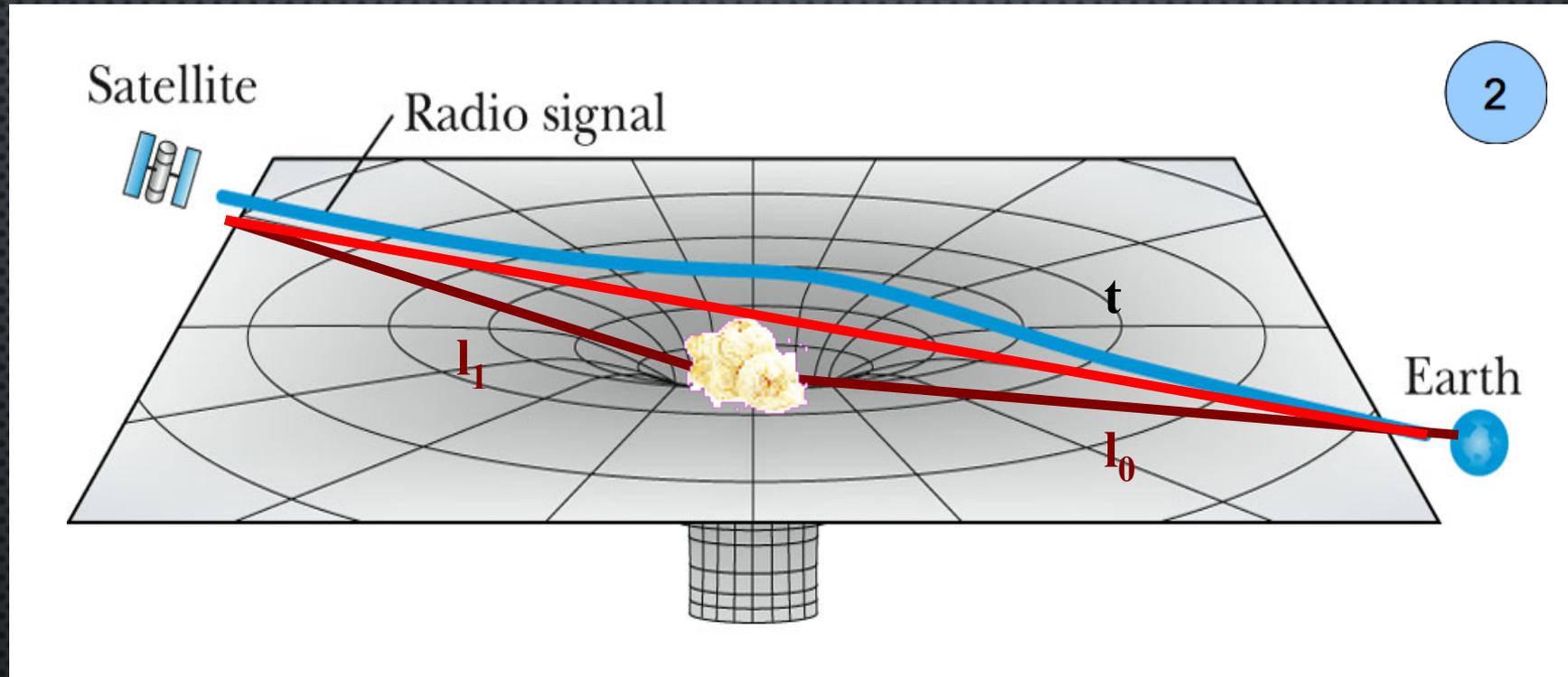
→ effet encore jamais observé

→ modèle standard étendu à la GR

→ forme de la déflexion



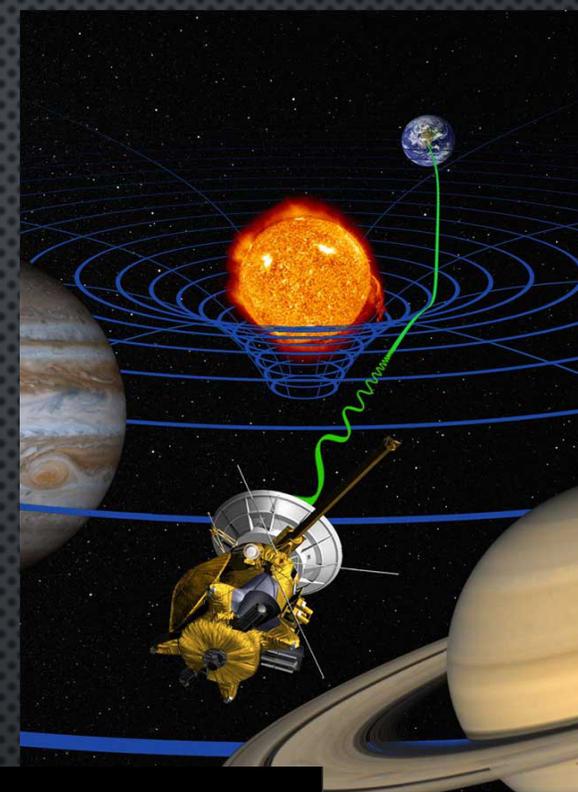
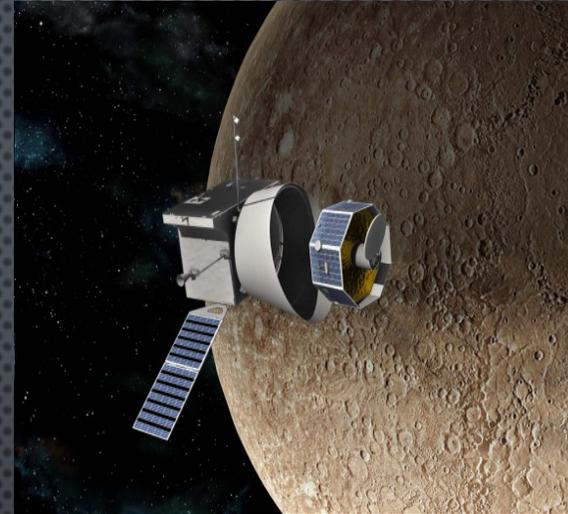
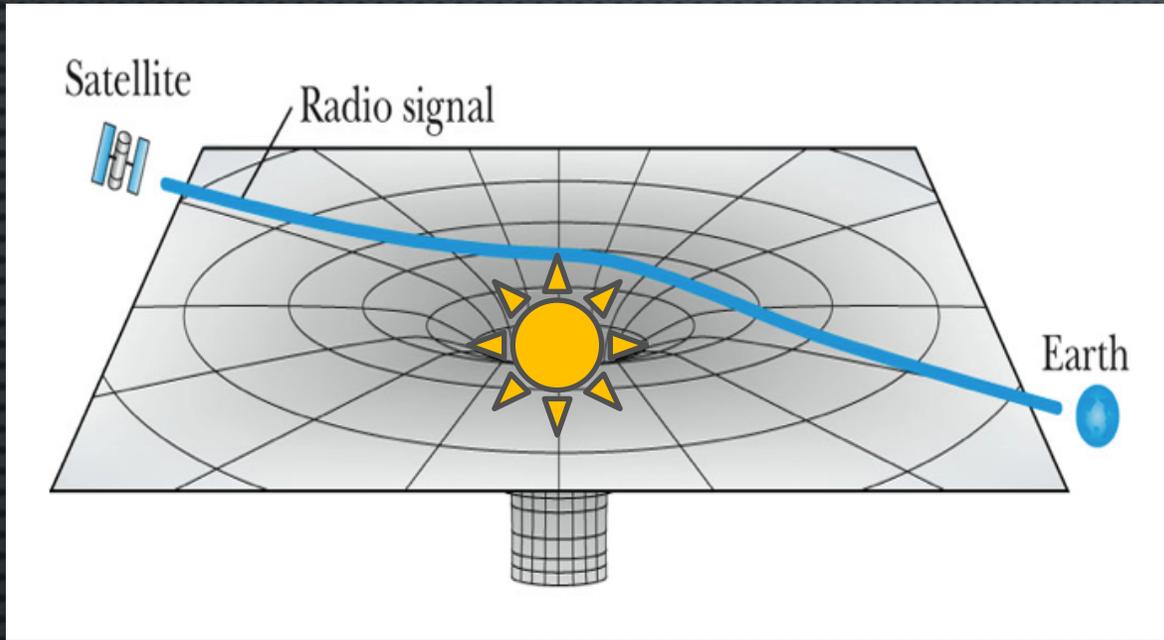
courbure de l'espace-temps et trajet de la lumière



Retard du temps aller-retour d'un signal radio (effet Shapiro)

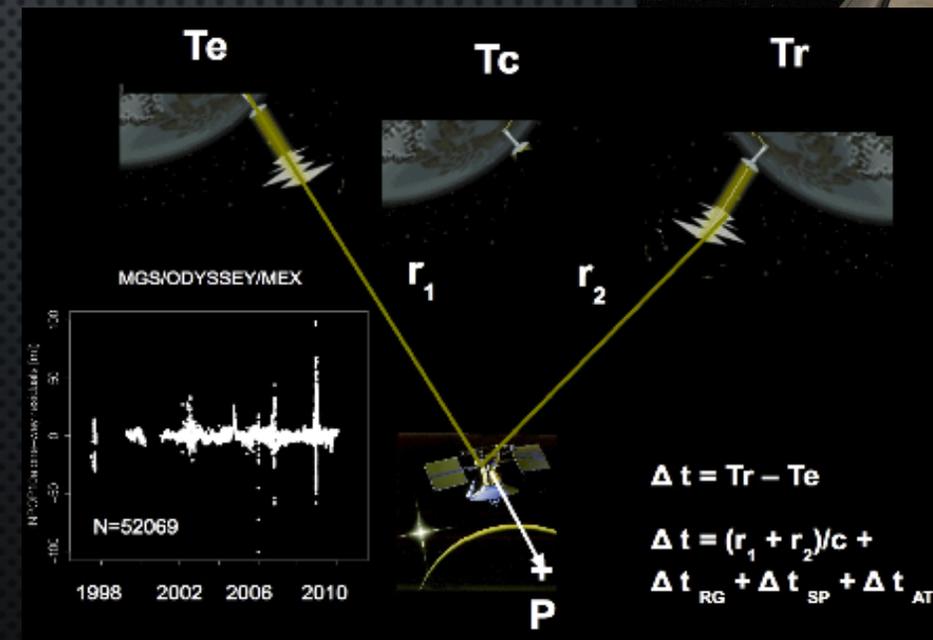
$$\Delta t = (1 + \gamma) M_{sun} \ln \frac{l_0 + l_1 + t}{l_0 + l_1 - t}$$

III. Comment pourraient-ils se déplacer autrement ?



Mesure du temps aller-retour du signal entre la sonde et l'antenne Δt

- **Orbite de la sonde** → conditions spéciales pour γ
- **Position de la station** (rotation de la Terre, effets locaux)
- **Plasma solaire** (très fortes variations)
- **Atmosphère**



Mesure de γ dans le système solaire

$$\Delta t = (1 + \gamma) M_{sun} \ln \frac{l_0 + l_1 + t}{l_0 + l_1 - t}$$

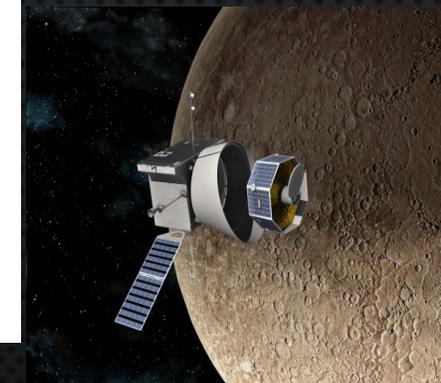
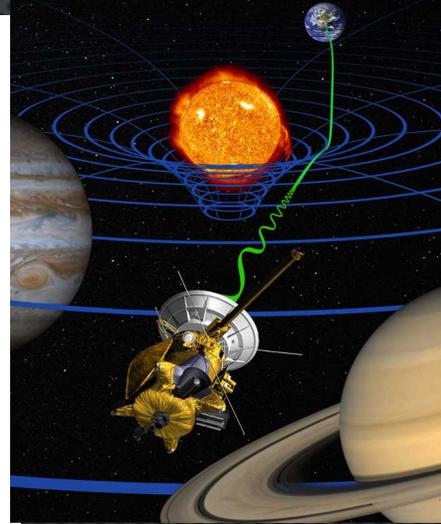
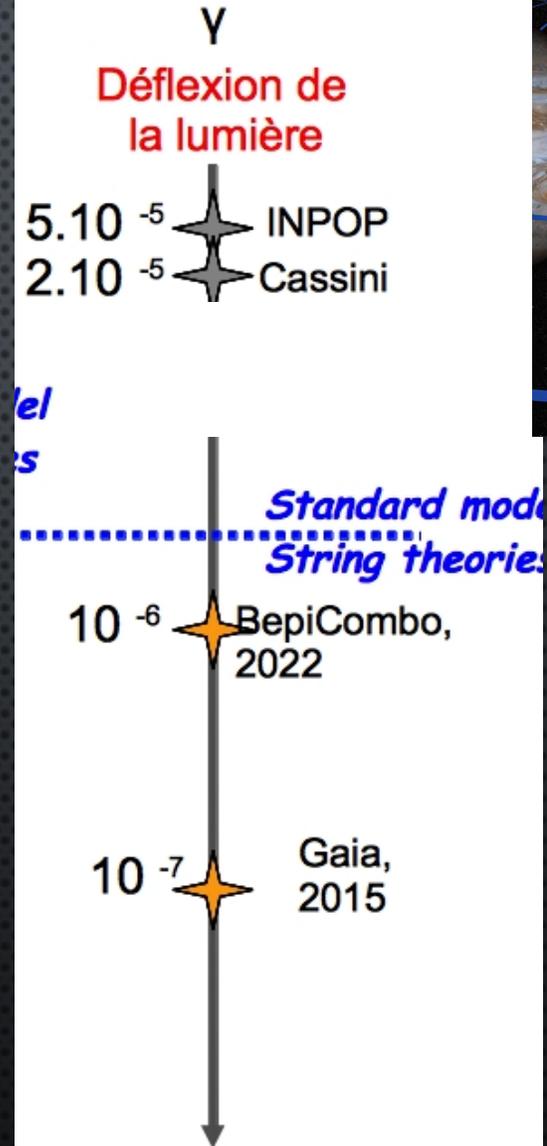
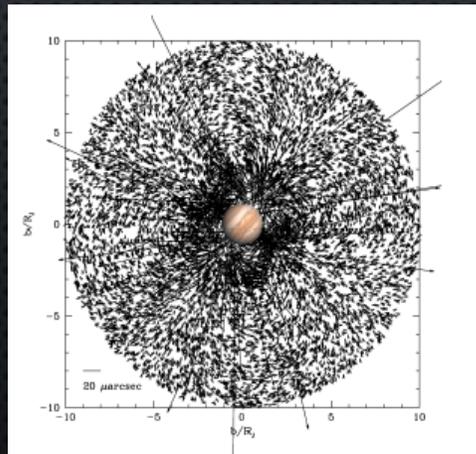
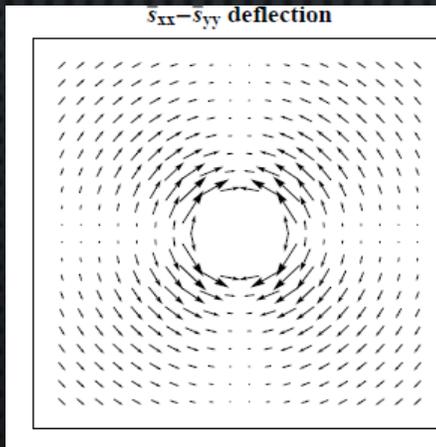
$$\delta\theta = \frac{1}{2}(1 + \gamma) \frac{4 M_{\odot}}{d} \frac{1 + \cos \Phi}{2}$$

GR $\gamma_R^{PPN} - 1 = 0$

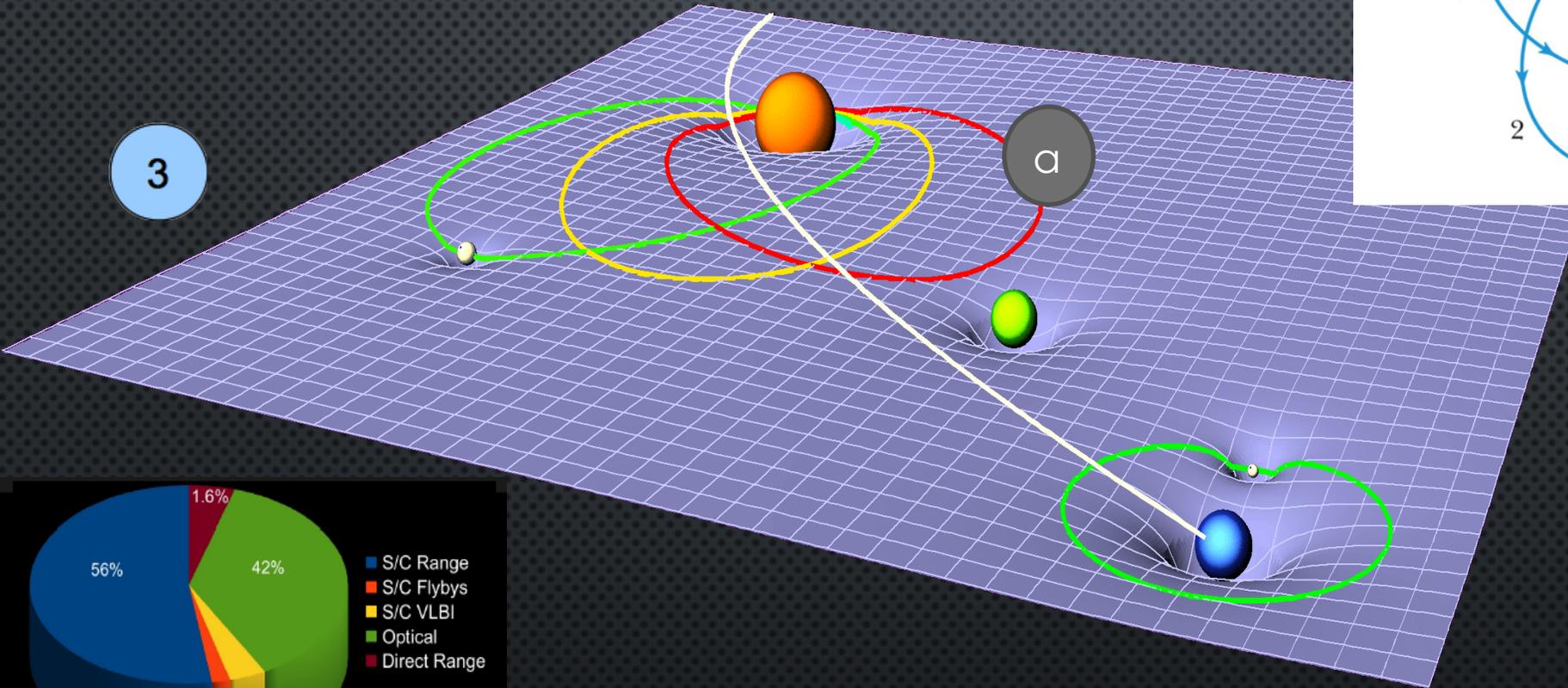
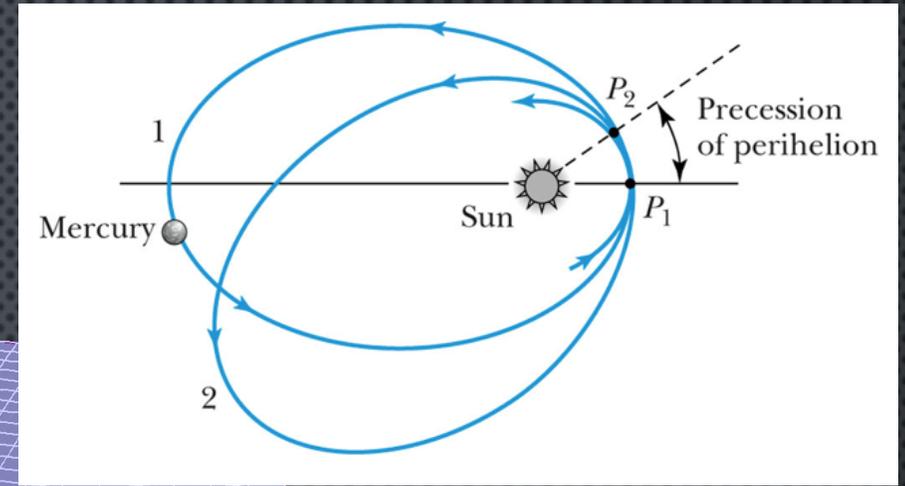
f(R) theories $\gamma_R^{PPN} - 1 = \frac{-f''(R)^2}{f'(R) + 2f''(R)^2}$,
[Capozziello & Troisi 2005]

Alternative formulations $\gamma_R^{PPN} - 1 = \frac{-\left(f'' \frac{dR}{d\varphi}\right)^2}{Zf' + 2\left(f'' \frac{dR}{d\varphi}\right)^2}$,
[Capone & Ruggiero 2010]

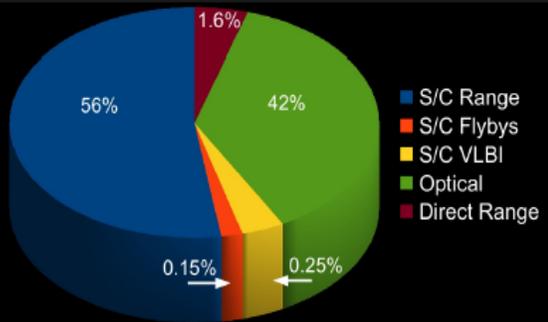
Dilaton $\gamma_R^{PPN} - 1 < 10^{-7}$



courbure de l'espace-temps et le mouvement des corps: effet sur les orbites

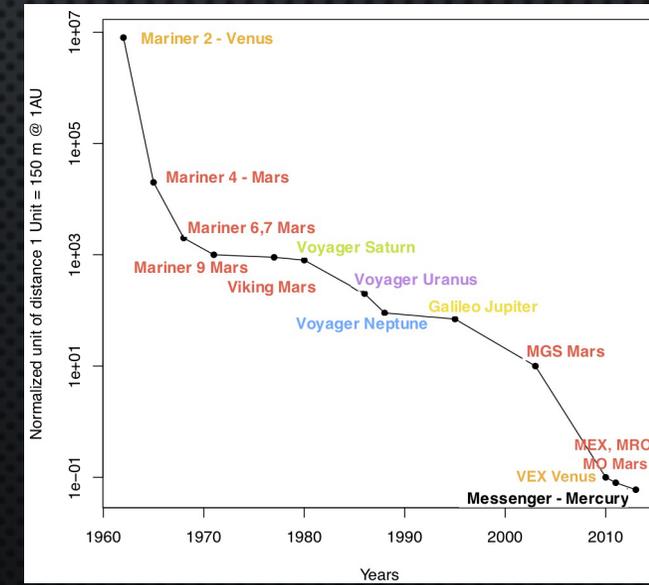


3



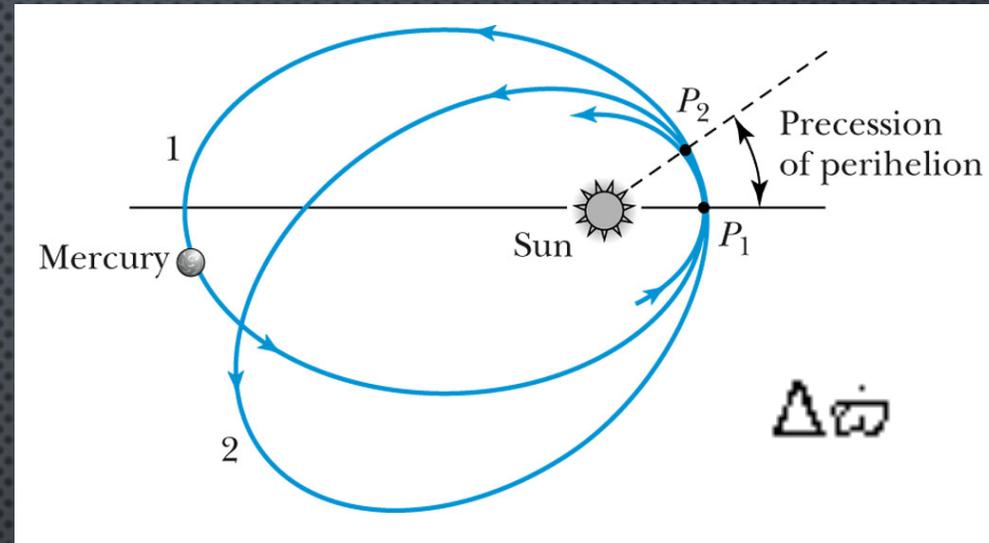
Data	Planet	α (mas)	δ (mas)	ρ (m)
S/C Range	Me, Ve, Ma	-	-	2-30
Flybys	Me, Ju, Sa, Ur, Ne	0.1-10	0.1-10	1-30
VLBI	Ve, Ma, Ju, Sa	1-10	1-10	-
Direct range	Me, Ve	-	-	~ 1000
Optical	Ju, Sa, Ur, Ne, Pl	~300	~300	-

$$\Delta \dot{\omega}_{PLA} = \frac{2\pi(2\gamma - \beta + 2)GM_{\odot}(t)}{a(1 - e^2)c^2} + \frac{3\pi J_2 R_{\odot}^2}{a^2(1 - e^2)c^2} + \Delta \dot{\omega}_{AST}$$



L'action du champ gravitationnel n'est pas linéaire

⇒



avec $p = a(1-e^2)$.

$$\Delta\bar{\omega} = \frac{6\pi m}{p} \left(\frac{1}{3}(2 + 2\gamma - \beta) + \frac{1}{6}(2\alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 + 2\zeta_2) \frac{\mu}{m} + \frac{J_2 R^2}{2mp} \right),$$

Si on se place dans le repère de la RG, pour Mercure, on a :

$$\dot{\bar{\omega}} = 42.''98 \left(\frac{1}{3}(2 + 2\gamma - \beta) + 3 \times 10^{-4} \frac{J_2}{10^{-7}} \right).$$

Mesure de β par l'étude des orbites planétaires et des sondes

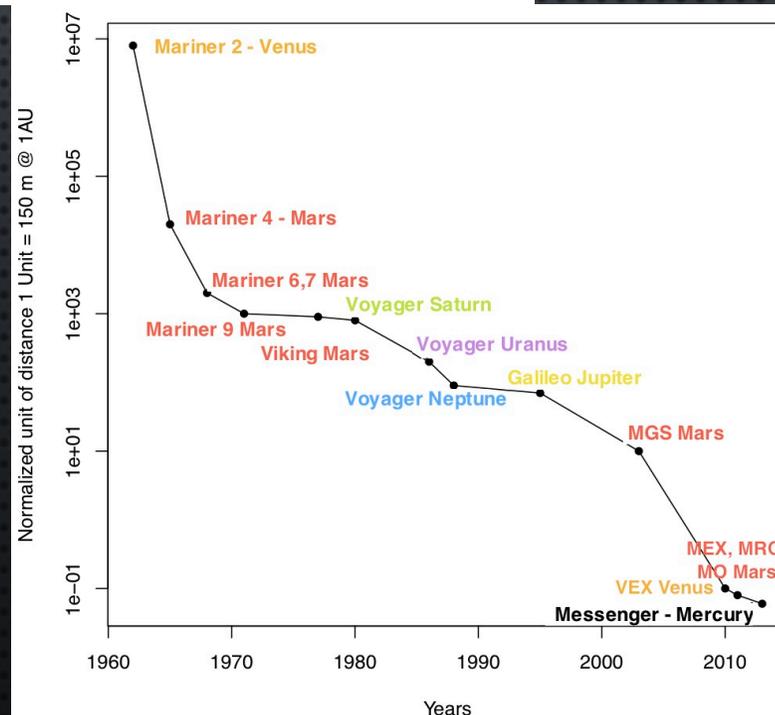
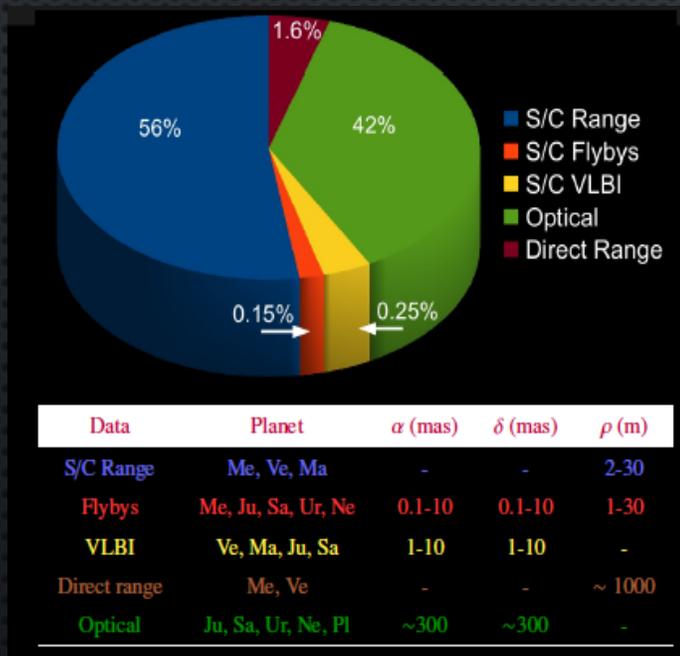
■ Intégration numérique des équations du mouvement

(Einstein-Infeld-Hoffmann, c^{-4} PPN approximation).

$$\ddot{X}_{Planet} = \sum_{A \neq B} \mu_B \frac{r_{AB}}{\|r_{AB}\|^3} + \ddot{X}_{GR}(\beta, \gamma, c^{-4}) + \ddot{X}_{AST,300} + \ddot{X}_{J_2^\odot}$$

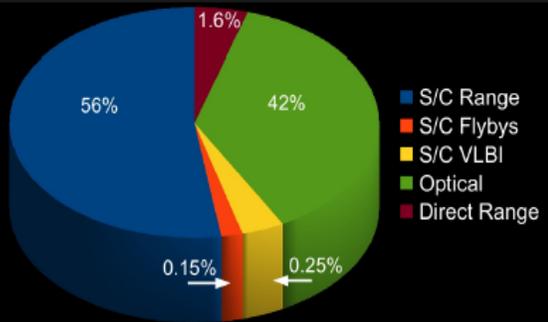
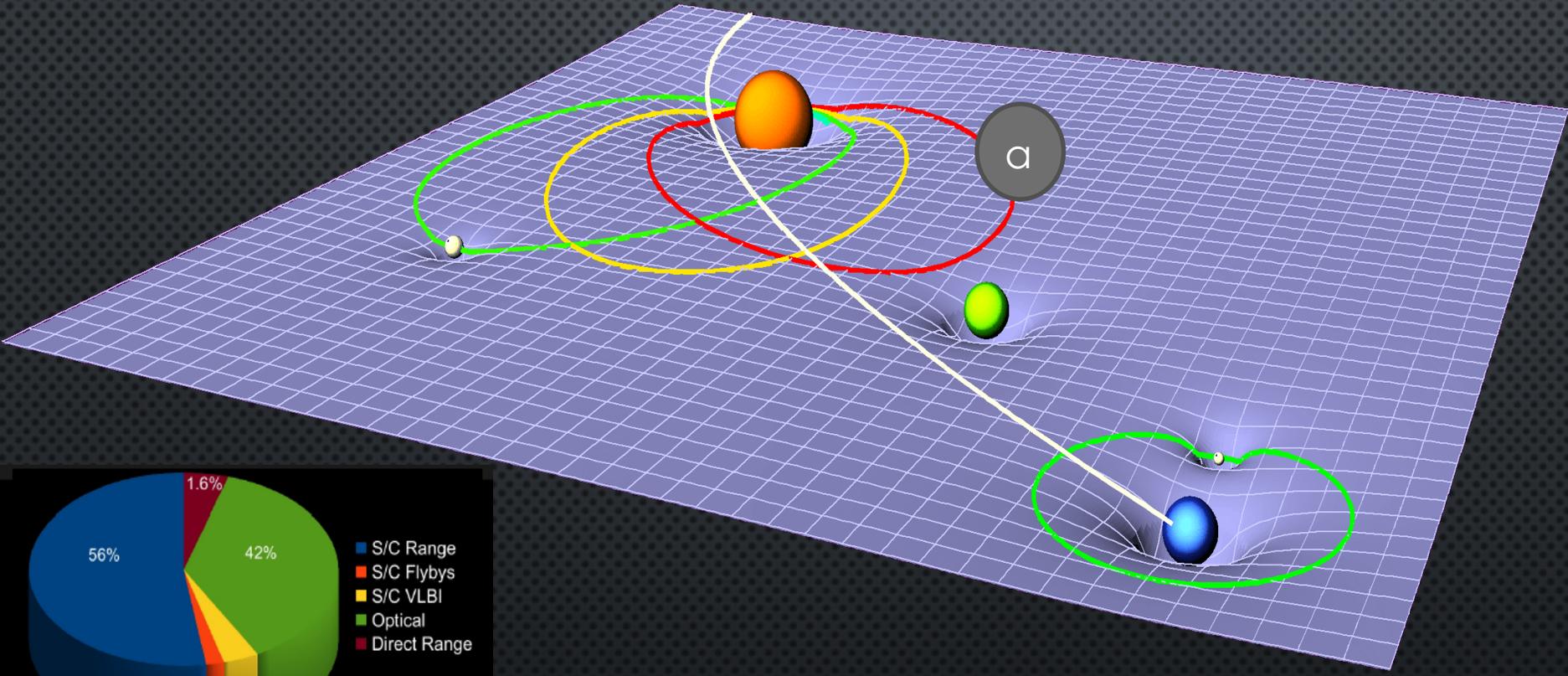
- Adams-Cowell $\Delta \dot{\omega}_{PLA} = \frac{2\pi(2\gamma - \beta + 2)GM_\odot(t)}{a(1 - e^2)c^2} + \frac{3\pi J_2 R_\odot^2}{a^2(1 - e^2)c^2} + \Delta \dot{\omega}_{AST}$
- 9 planètes + lune + astéroïdes, GR, J_2^\odot
- Lune: orbite et librations

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{r}}_{i \text{ point mass}} = & \sum_{j \neq i} \frac{\mu_j (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{r_{ij}^3} \left\{ 1 - \frac{2(\beta + \gamma)}{c^2} \sum_{k \neq i} \frac{\mu_k}{r_{ik}} \right. \\ & - \frac{2\beta - 1}{c^2} \sum_{k \neq j} \frac{\mu_k}{r_{jk}} + \gamma \left(\frac{v_i}{c}\right)^2 + (1 + \gamma) \left(\frac{v_j}{c}\right)^2 \\ & - \frac{2(1 + \gamma)}{c^2} \dot{\mathbf{r}}_i \cdot \dot{\mathbf{r}}_j - \frac{3}{2c^2} \left[\frac{(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \cdot \dot{\mathbf{r}}_j}{r_{ij}} \right]^2 \\ & \left. + \frac{1}{2c^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot \ddot{\mathbf{r}}_j \right\} + \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{\mu_j}{r_{ij}^3} \\ & \times \{ [\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j] \cdot [(2 + 2\gamma)\dot{\mathbf{r}}_i - (1 + 2\gamma)\dot{\mathbf{r}}_j] \} (\dot{\mathbf{r}}_i - \dot{\mathbf{r}}_j) \\ & + \frac{3 + 4\gamma}{2c^2} \sum_{j \neq i} \frac{\mu_j \ddot{\mathbf{r}}_j}{r_{ij}} \end{aligned}$$



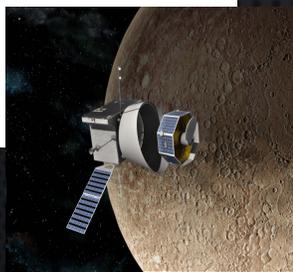
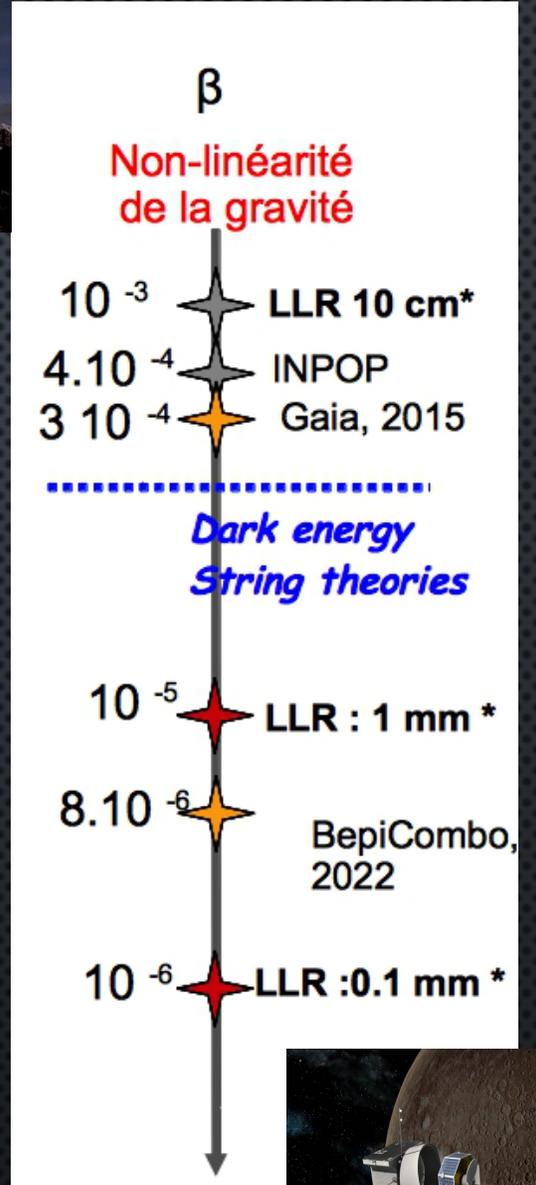
III. Comment pourraient-ils se déplacer autrement ?

3



Data	Planet	α (mas)	δ (mas)	ρ (m)
S/C Range	Me, Ve, Ma	-	-	2-30
Flybys	Me, Ju, Sa, Ur, Ne	0.1-10	0.1-10	1-30
VLBI	Ve, Ma, Ju, Sa	1-10	1-10	-
Direct range	Me, Ve	-	-	~ 1000
Optical	Ju, Sa, Ur, Ne, Pl	~300	~300	-

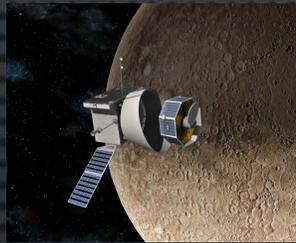
$$\Delta \dot{\omega}_{PLA} = \frac{2\pi(2\gamma - \beta + 2)GM_{\odot}(t)}{a(1 - e^2)c^2} + \frac{3\pi J_2 R_{\odot}^2}{a^2(1 - e^2)c^2} + \Delta \dot{\omega}_{AST}$$



Mesure de β dans le système solaire



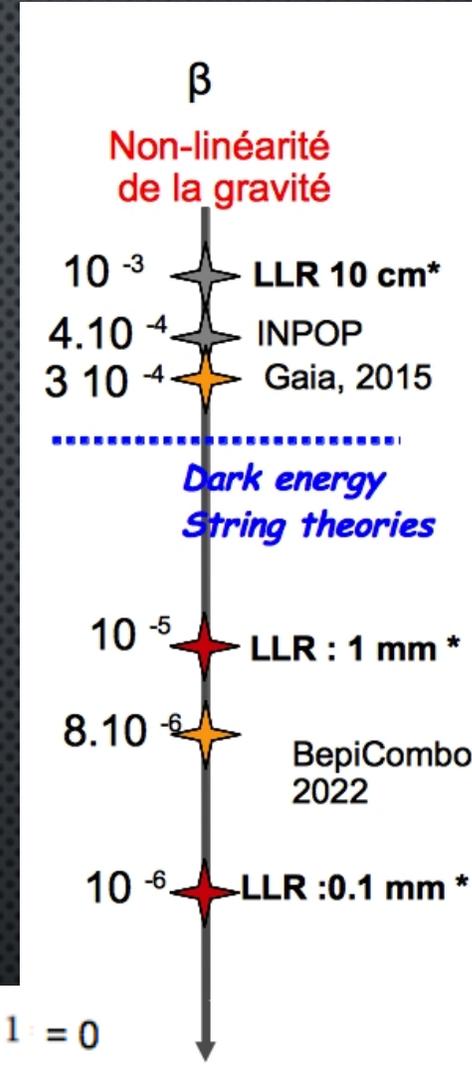
Mesure de β et γ avec les orbites des planètes



Mesure de β avec l'orbitographie de sonde autour des planètes (Mercure)



Mesure de β et γ avec les orbites des astéroïdes



f(R) theories $\beta_R^{PPN} - 1 = \frac{1}{4} \left[\frac{f'(R) \cdot f''(R)}{2f'(R) + 3f''(R)^2} \cdot \frac{d\gamma^{PPN}}{d\phi} \right]$

[Capozziello & Troisi 2005]

GR $\beta_R^{PPN} - 1 = 0$

Alternative formulations $\beta_R^{PPN} - 1 = \frac{1}{4} \left[\frac{f' \cdot f'' \frac{dR}{d\phi}}{2Zf' + 3 \left(f'' \frac{dR}{d\phi} \right)^2} \cdot \frac{d\gamma}{dR} \cdot \frac{dR}{d\phi} \right]$

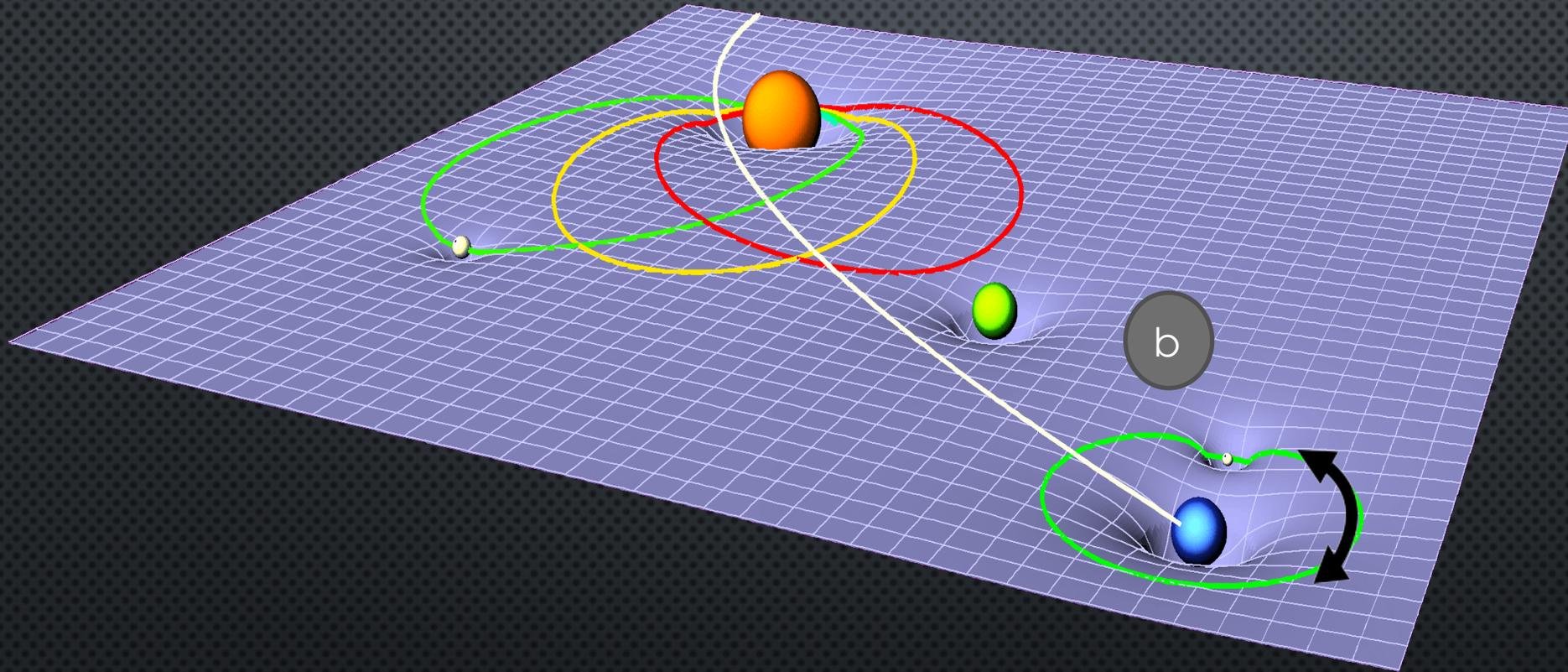
Capone & Ruggiero 2010]

MOND, DM $\Delta\omega_{supp}$

III. Comment pourraient-ils se déplacer autrement ?

3

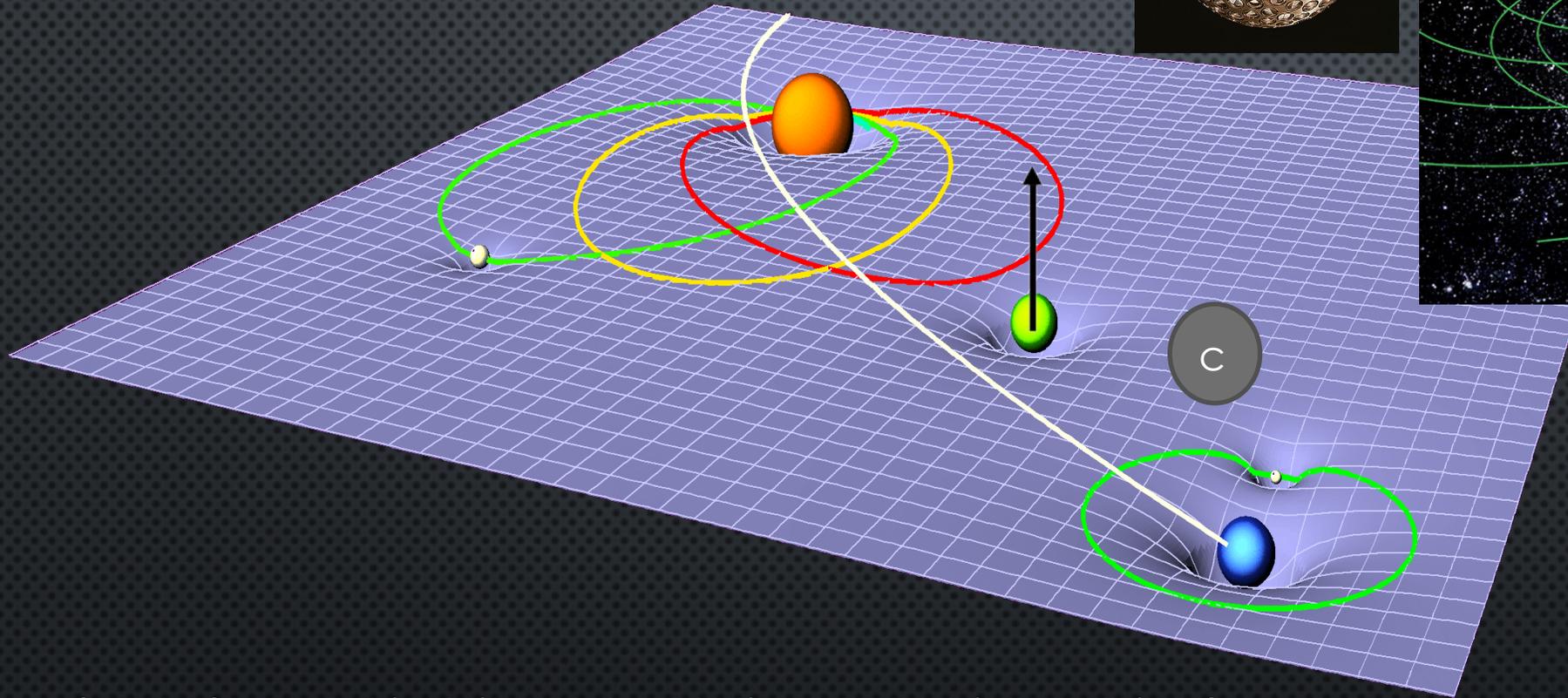
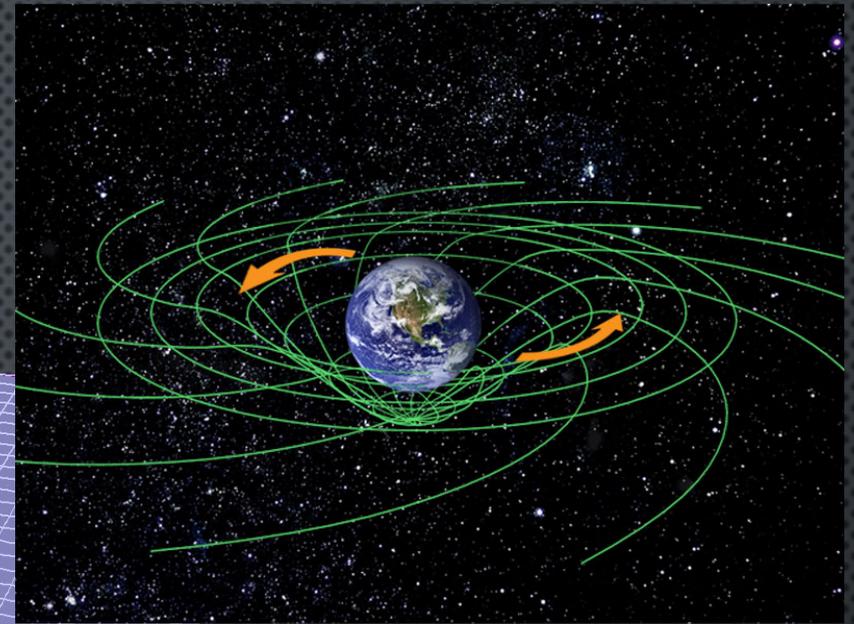
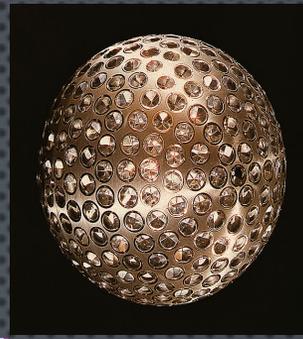
courbure de l'espace-temps et le mouvement des corps:
effet sur les rotations et les orbites



b) entraînement de l'espace-temps induit par le mouvement de l'objet
(Effet de Sitter)

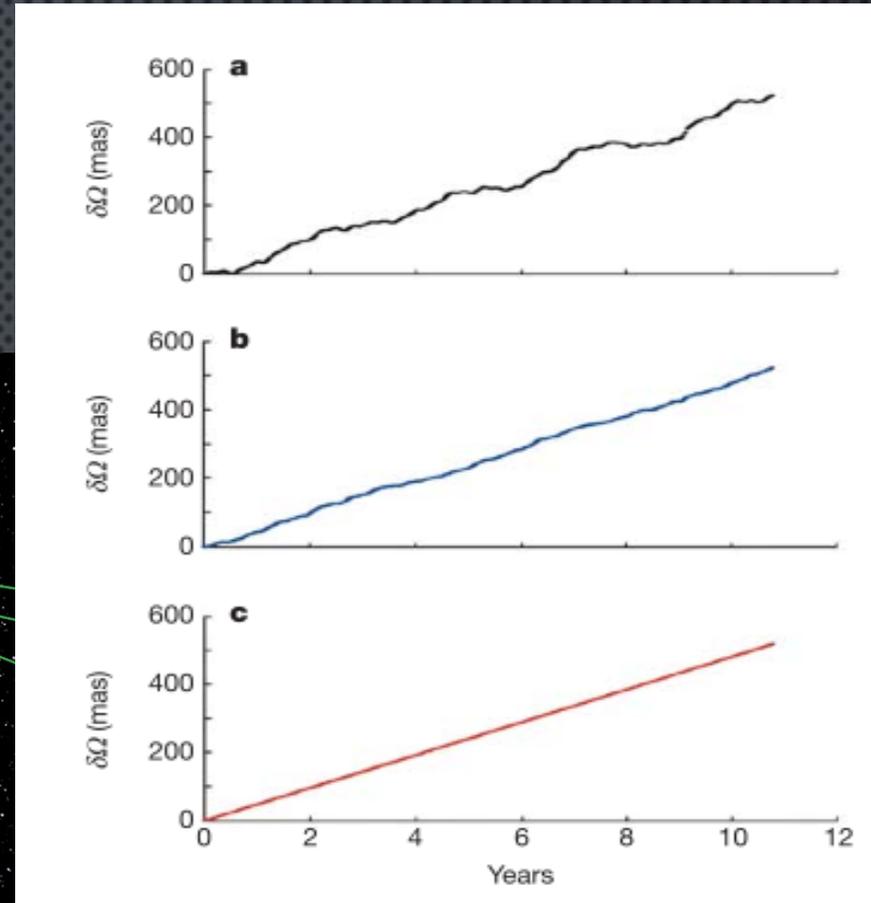
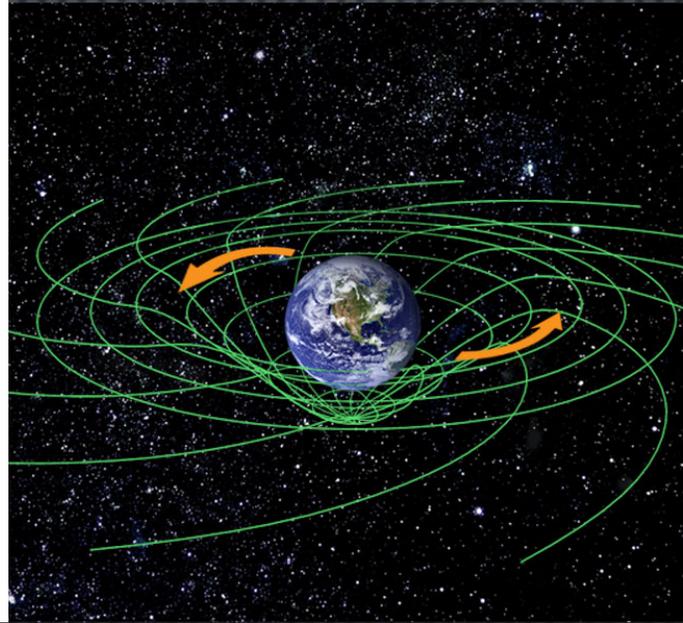
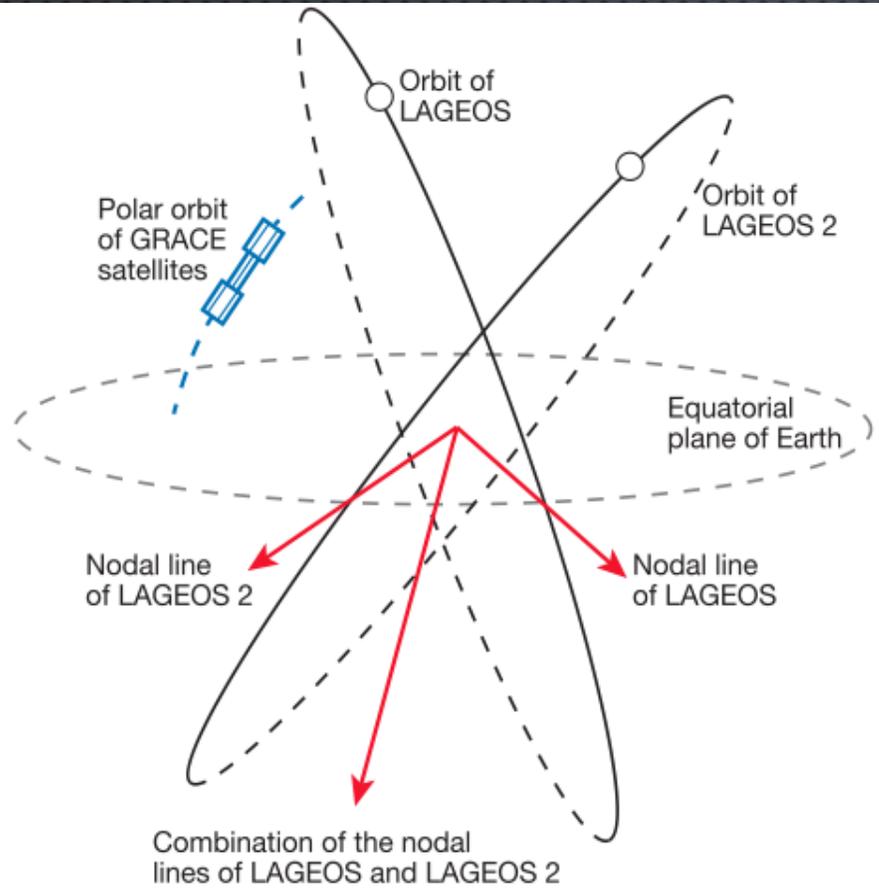
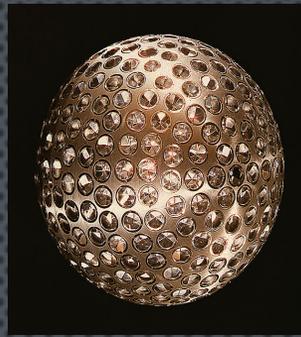
III. Comment pourraient-ils se déplacer autrement ?

3



c) entraînement induit par la rotation de l'objet sur lui-même (effet Lens-Thirring)

III. Comment pourraient-ils se déplacer autrement ?



c) entraînement induit par la rotation de l'objet sur lui-même (effet Lense-Thirring)

$$\delta\dot{\Omega}_I^{\text{OBS}} + k\delta\dot{\Omega}_{II}^{\text{OBS}} = \dot{\Omega}_I^{\text{Lense-Thirring}} + k\dot{\Omega}_{II}^{\text{Lense-Thirring}} \pm \sum_{2n \geq 4} (K_I^{2n} |\delta J_{2n}| + k K_{II}^{2n} |\delta J_{2n}|)$$

III. Comment pourraient-ils se déplacer autrement ?

En gravité classique,

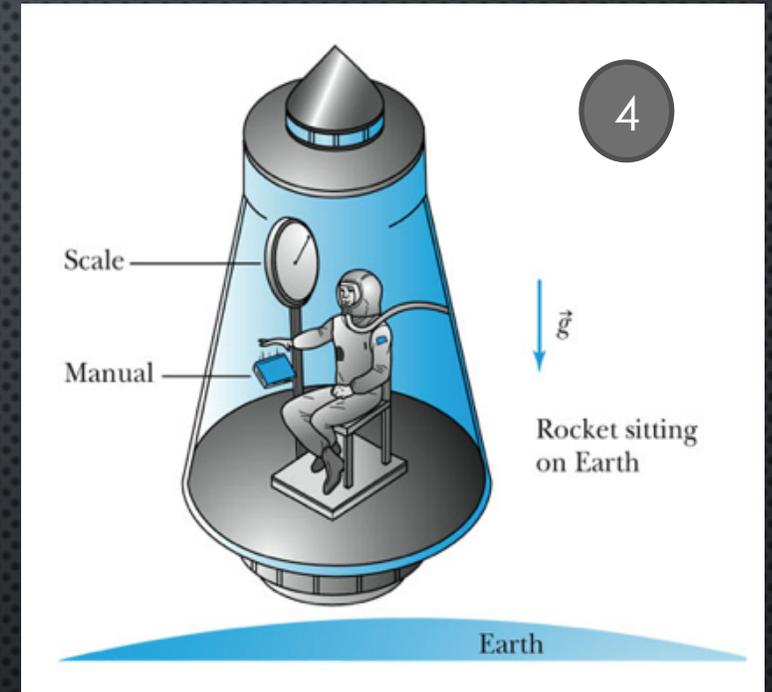
Un observateur ne peut pas dire si il subit une attraction d'ûe:

- à la gravité
- OU à une autre force

-> Ce principe est postulé vrai en relativité générale

« 1kg de plume tombe de la même manière qu' 1kg de plomb »

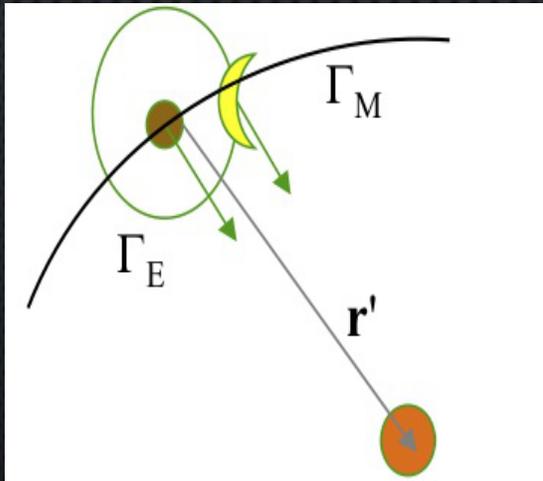
Test fondamental de la relativité générale



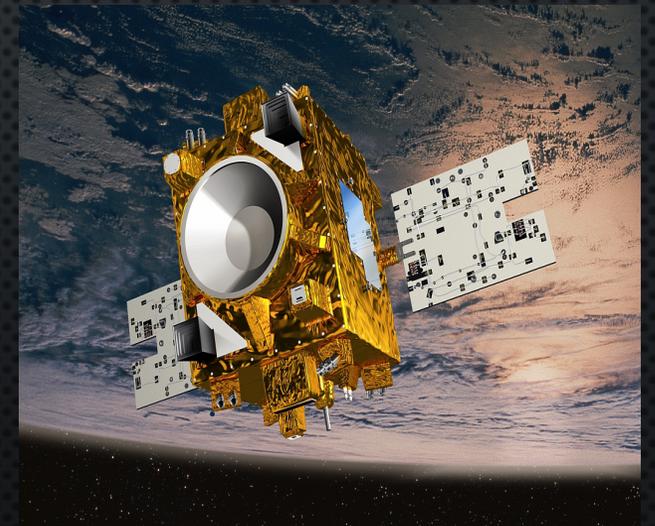
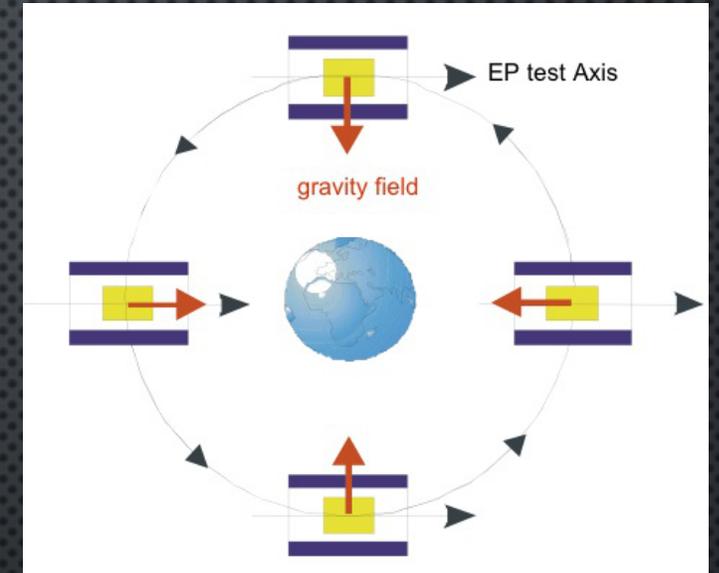
III. Comment pourraient-ils se déplacer autrement ?

Pour d'autres théories de la gravité ,

- La gravité peut avoir une signature particulière comme par exemple un couplage avec l'espace ou l'énergie
- Extension du modèle standard de la mécanique quantique aux grandes échelles



Test fondamental de la relativité générale

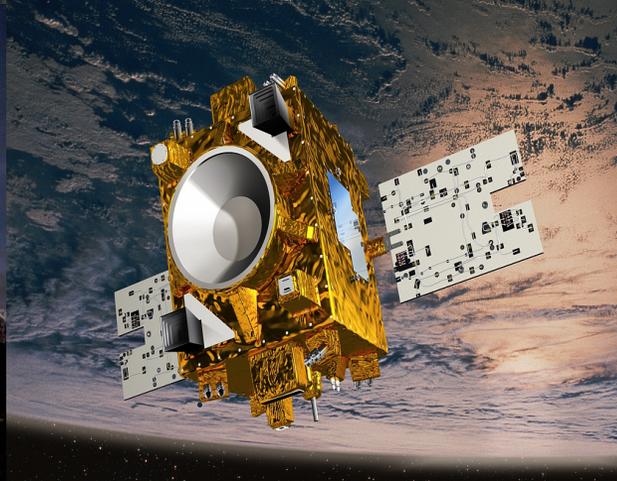
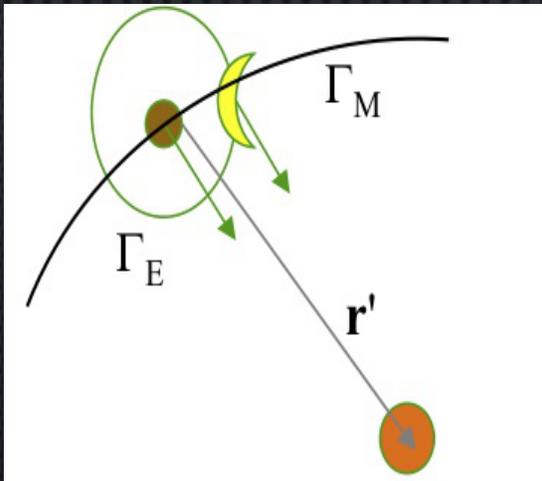


III. Comment pourraient-ils se déplacer autrement ?

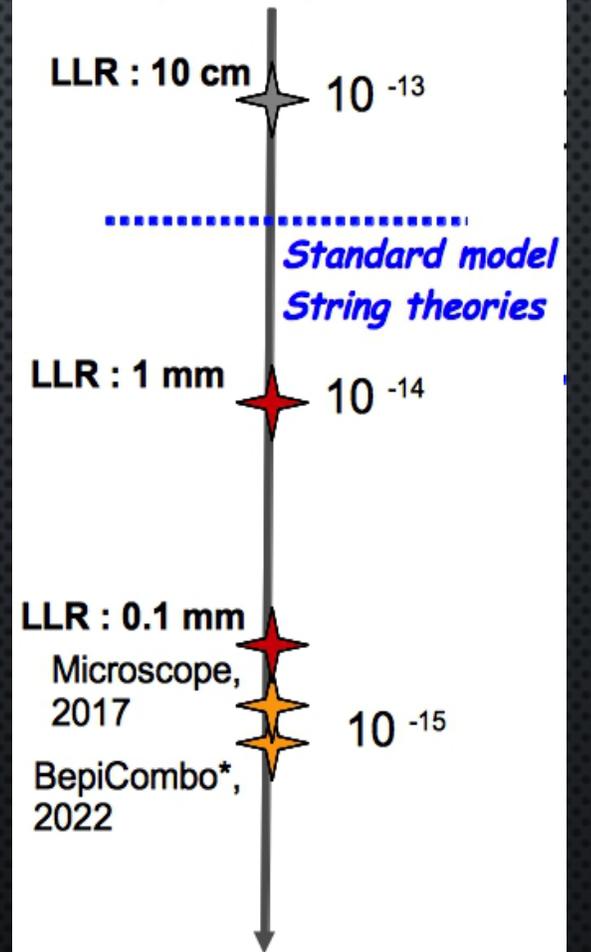
Test fondamental de la relativité générale

Pour d'autres théories de la gravité ,

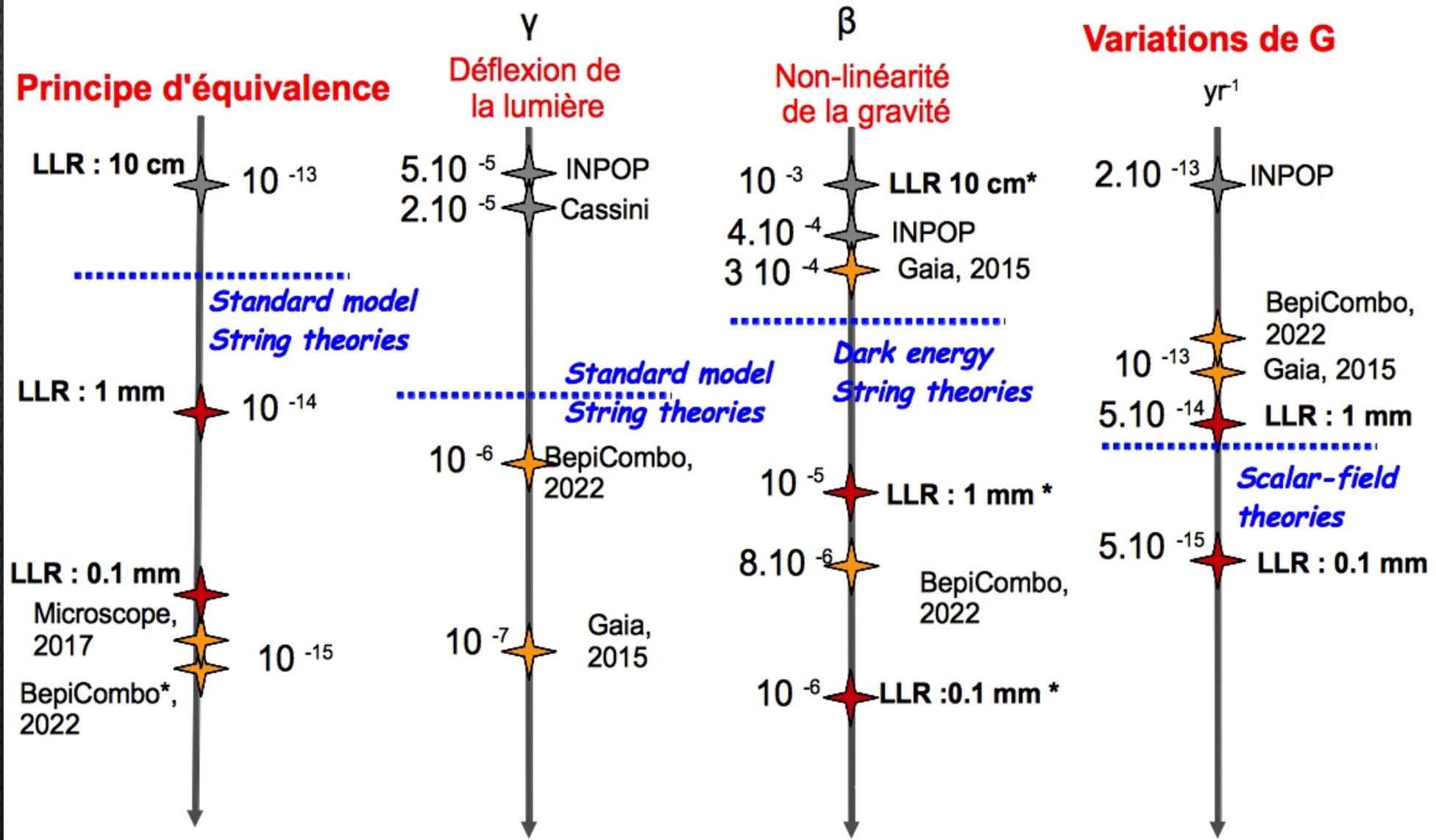
- La gravité peut avoir une signature particulière comme par exemple un couplage avec l'espace ou l'énergie
- Extension du modèle standard de la mécanique quantique aux grandes échelles



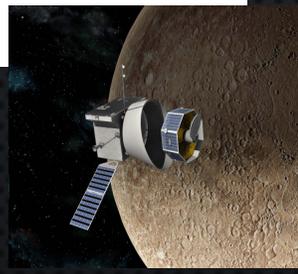
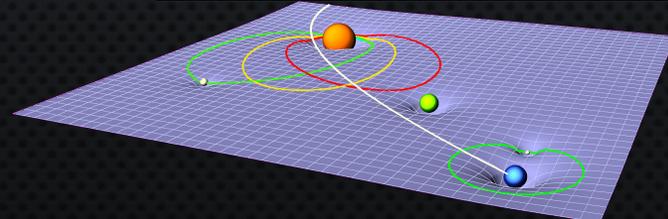
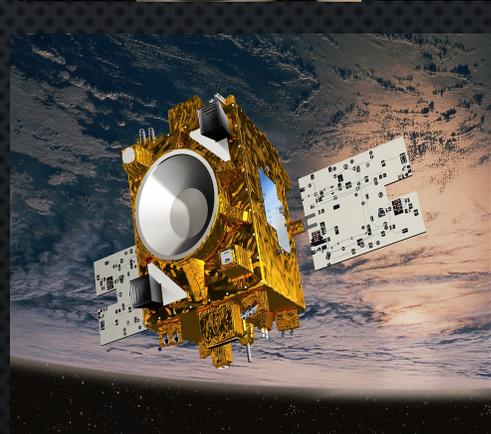
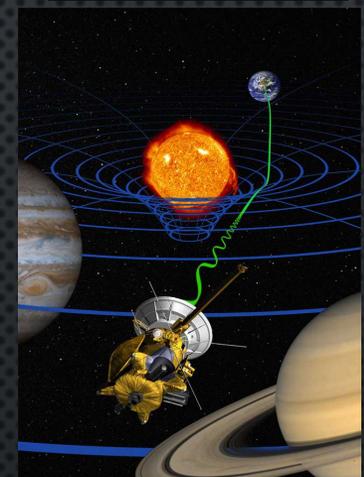
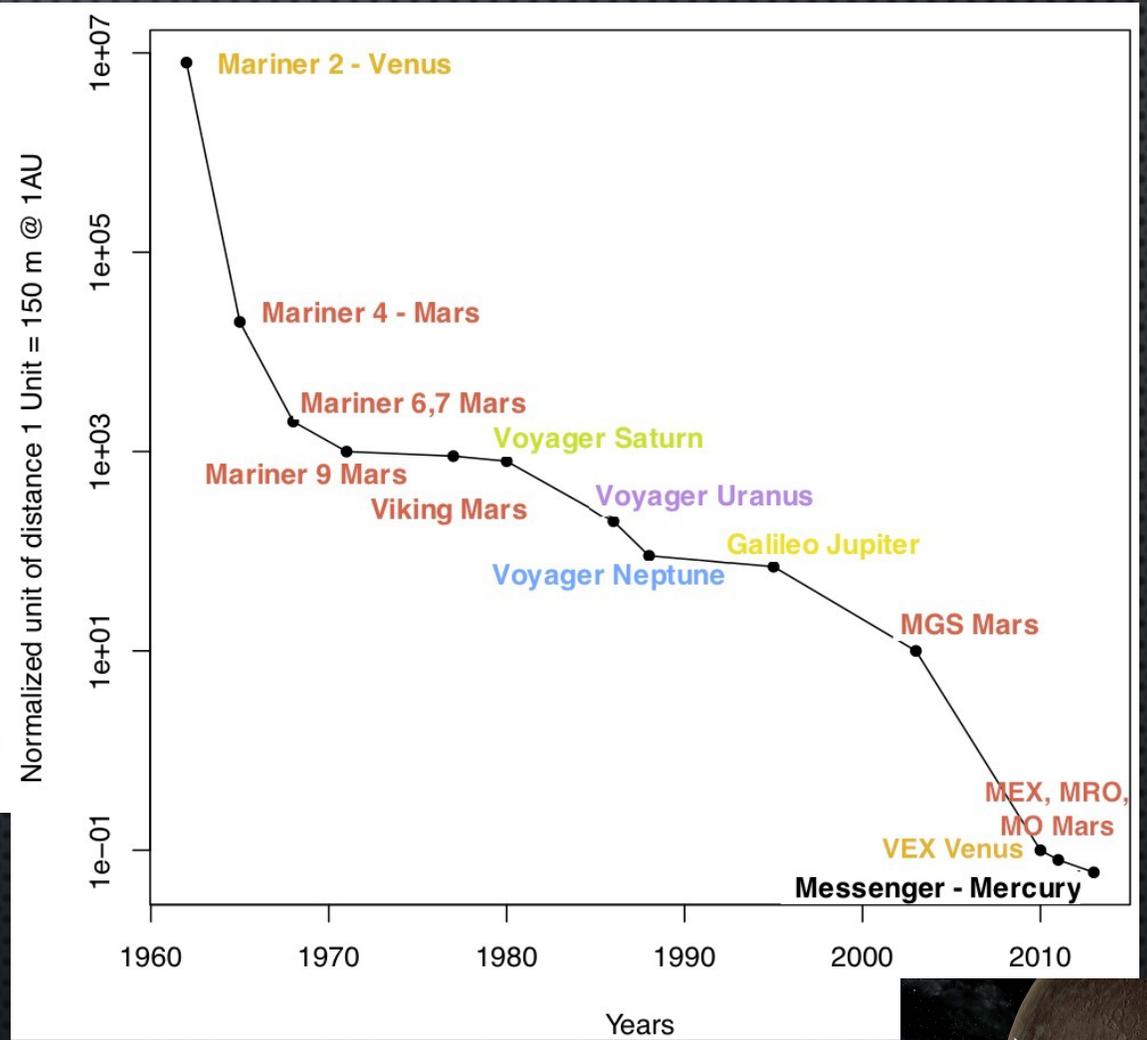
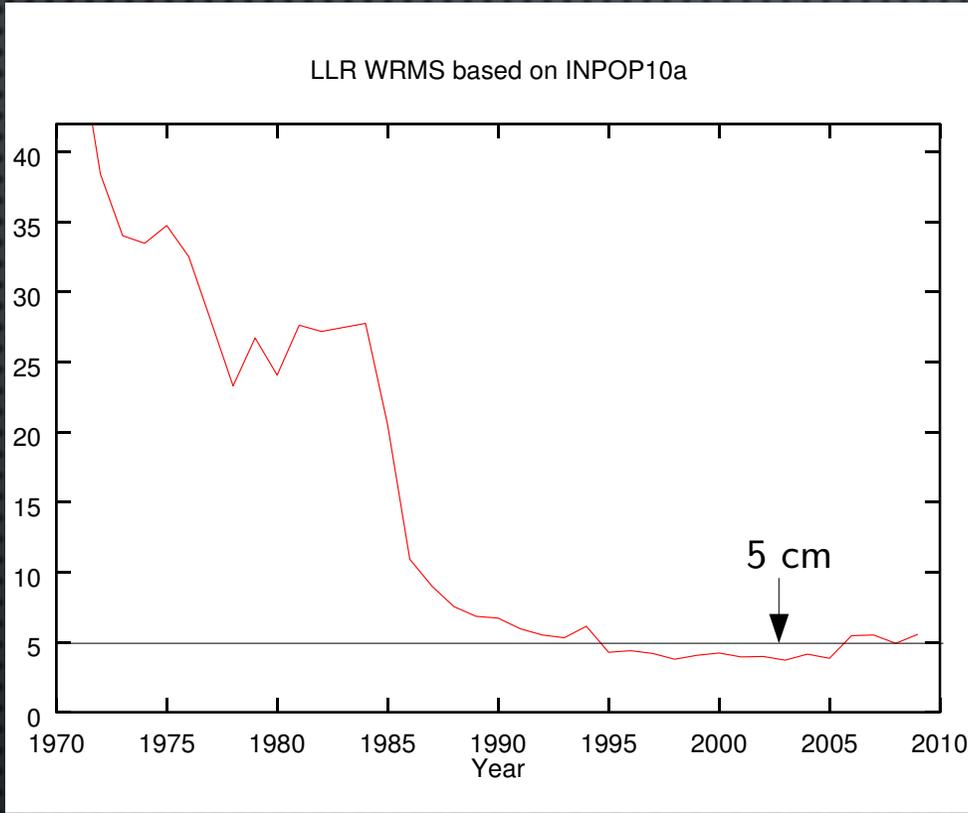
Principe d'équivalence



Bilan des tests de RG et la Lune



Le système solaire est un excellent laboratoire pour étudier la gravité



Einstein se trouverait-il sur la Lune ? ... OUI

