

Tester la relativité générale

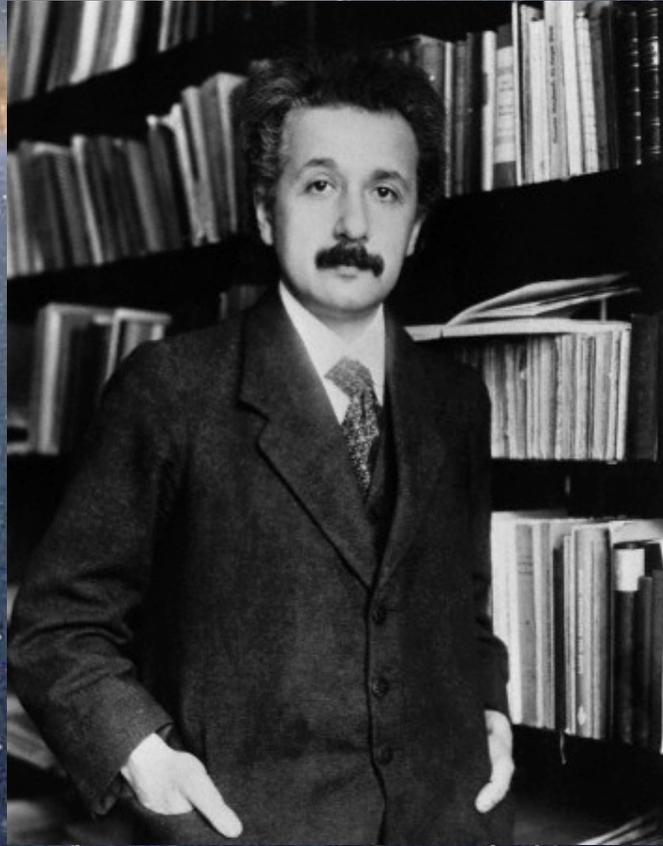
Gilles Esposito-Farèse



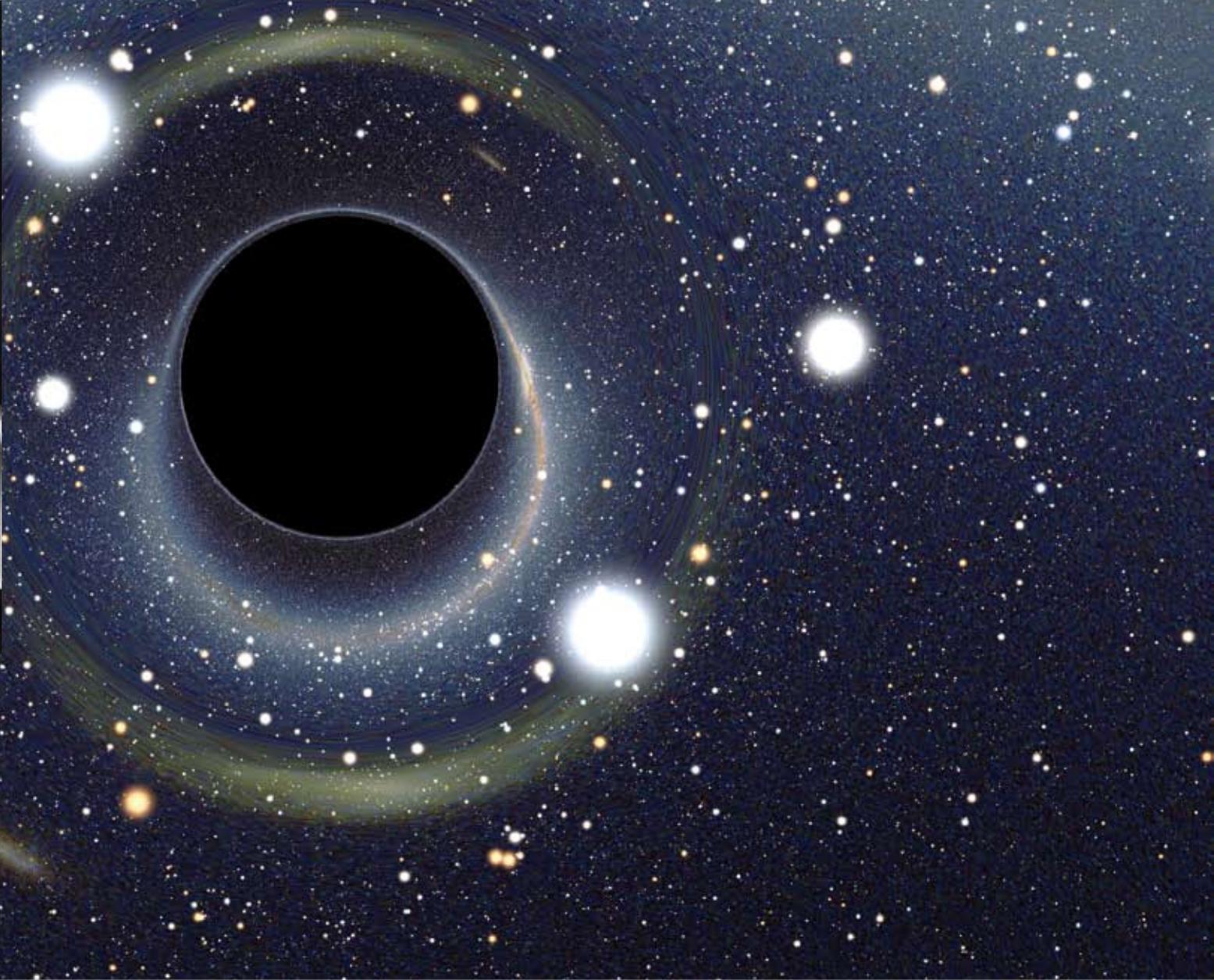
SAF

16 janvier 2016

Tester la relativité générale



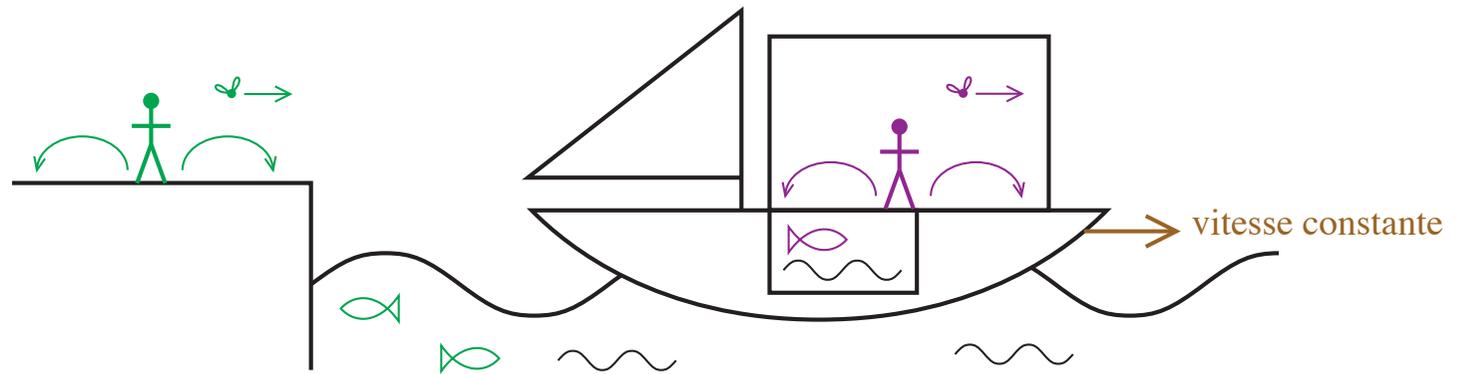
Einstein 1915



Relativité générale = théorie relativiste de la gravitation

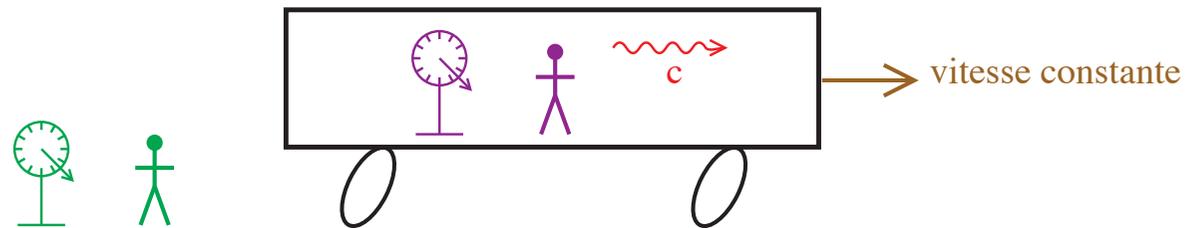
■ Relativité restreinte

- Galilée 1632 : « Le mouvement est comme rien. »



- Einstein 1905 : *principe de relativité (restreinte)* =

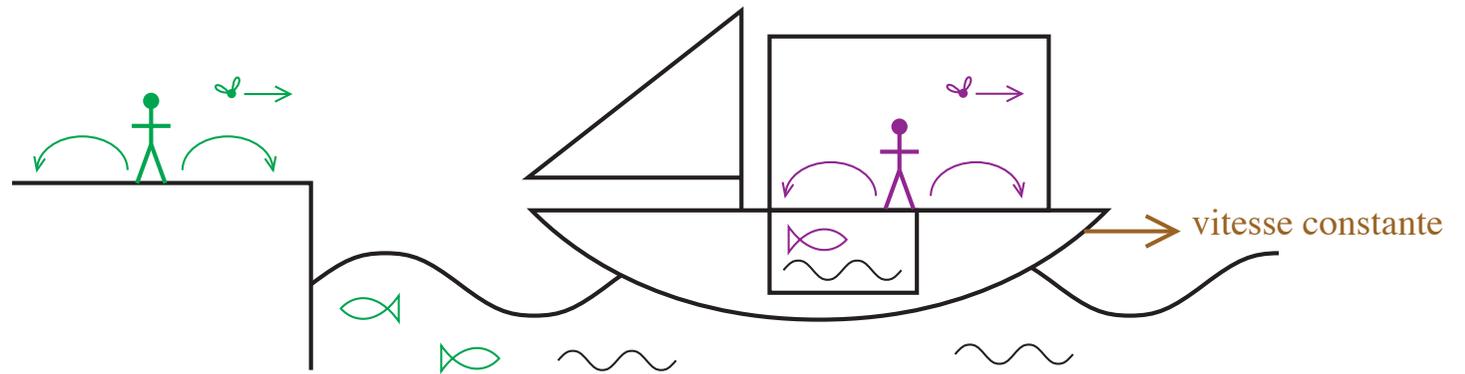
Toutes les lois de la physique sont indépendantes du référentiel (inertiel) [= système de coordonnées], y compris l'électromagnétisme (mais pas encore la gravitation).



Relativité générale = théorie relativiste de la gravitation

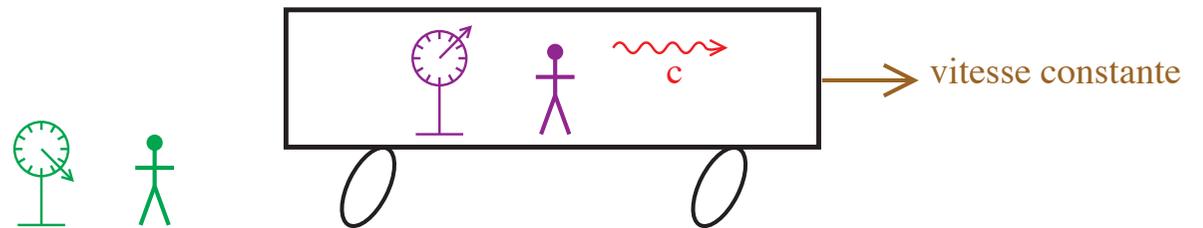
■ Relativité restreinte

- Galilée 1632 : « Le mouvement est comme rien. »



- Einstein 1905 : *principe de relativité (restreinte)* =

Toutes les lois de la physique sont indépendantes du référentiel (*inertiel*) [= système de coordonnées], y compris l'*électromagnétisme* (mais pas encore la gravitation).

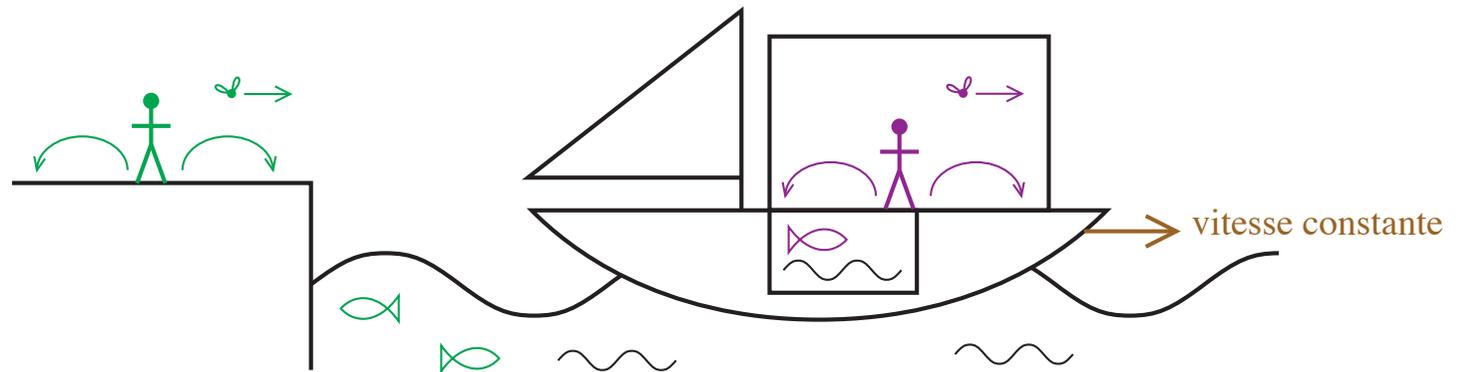


⇒ Modification de la structure de l'*espace-temps*

Relativité générale = théorie relativiste de la gravitation

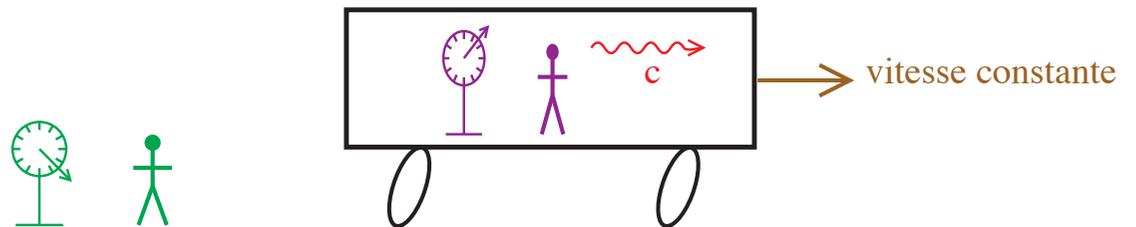
■ Relativité restreinte

- Galilée 1632 : « Le mouvement est comme rien. »



- Einstein 1905 : *principe de relativité (restreinte)* =

Toutes les lois de la physique sont indépendantes du référentiel (inertiel) [= système de coordonnées], y compris l'électromagnétisme (mais pas encore la gravitation).

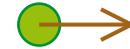


⇒ Modification de la structure de l'espace-temps

■ Gravitation newtonienne

● **Newton 1687** : *loi de la dynamique*

$$m \vec{a}_{\text{accélération}} = \vec{f}_{\text{force}}$$

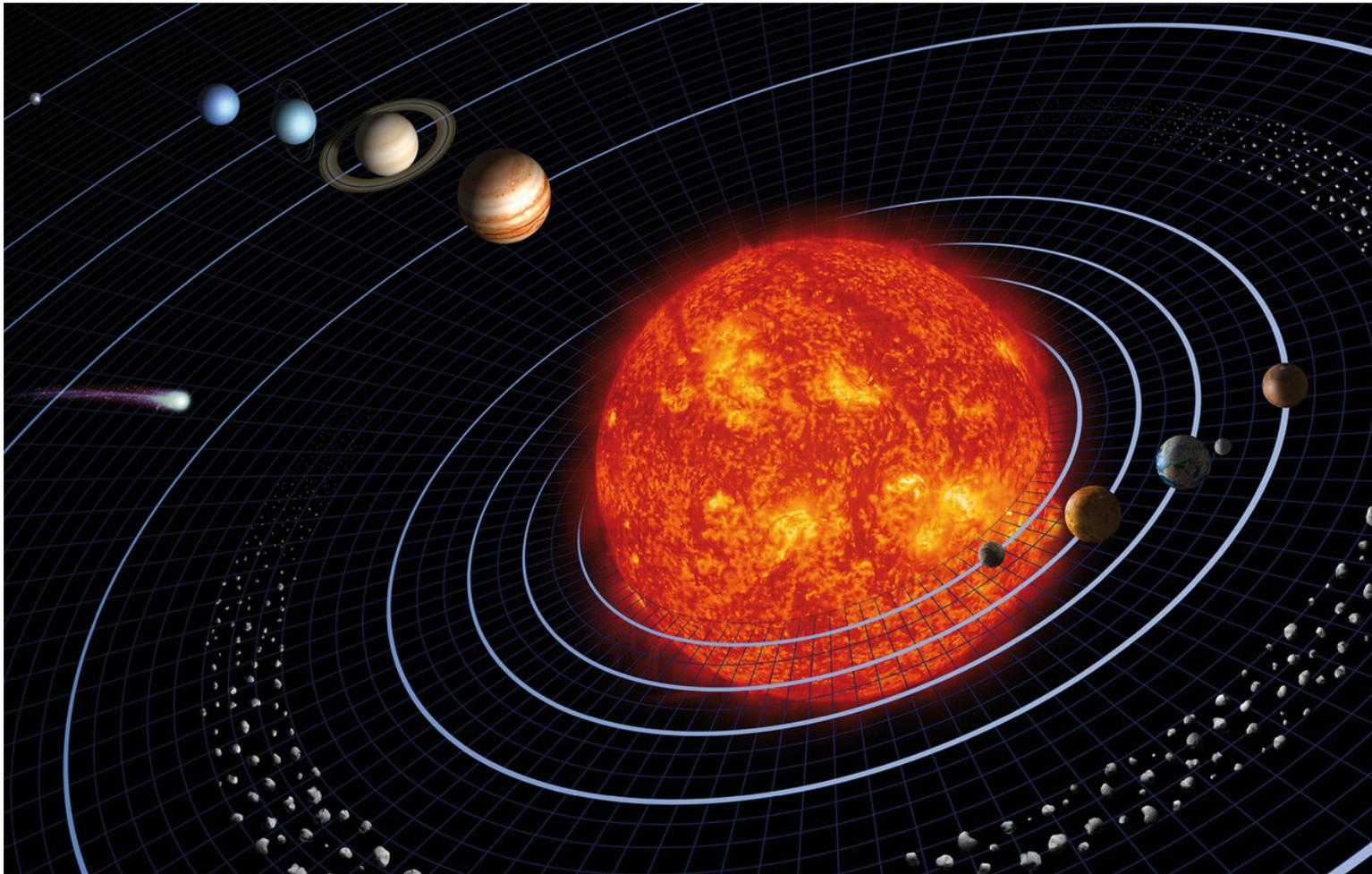


force gravitationnelle

en $1/r^2$



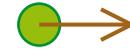
⇒ Prédit le mouvement des planètes (lois de Kepler), les marées, ...



■ Gravitation newtonienne

- Newton 1687 : *loi de la dynamique*

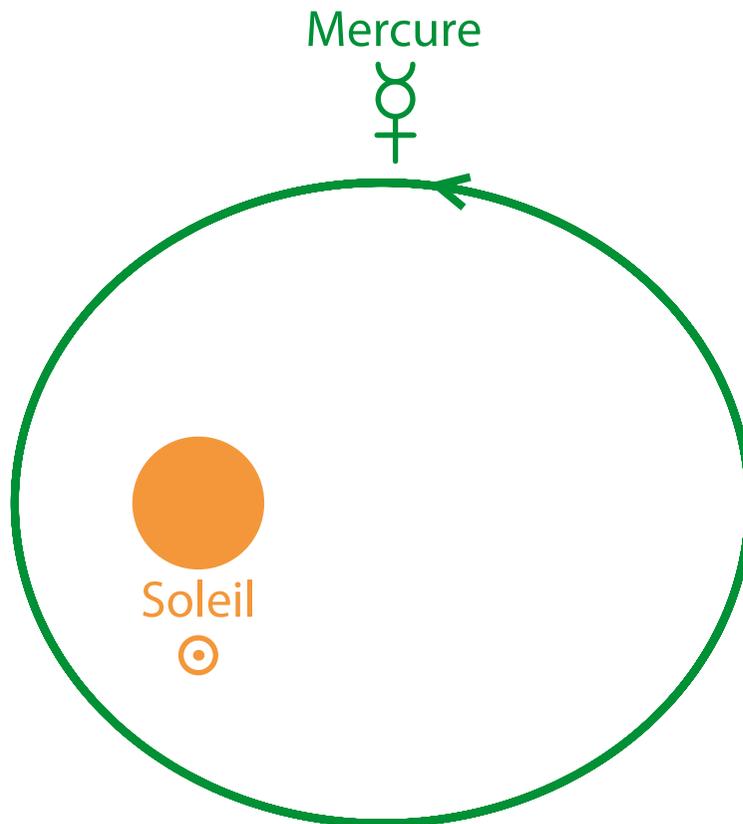
$$m \vec{a}_{\text{accélération}} = \vec{f}_{\text{force}}$$



force gravitationnelle en $1/r^2$

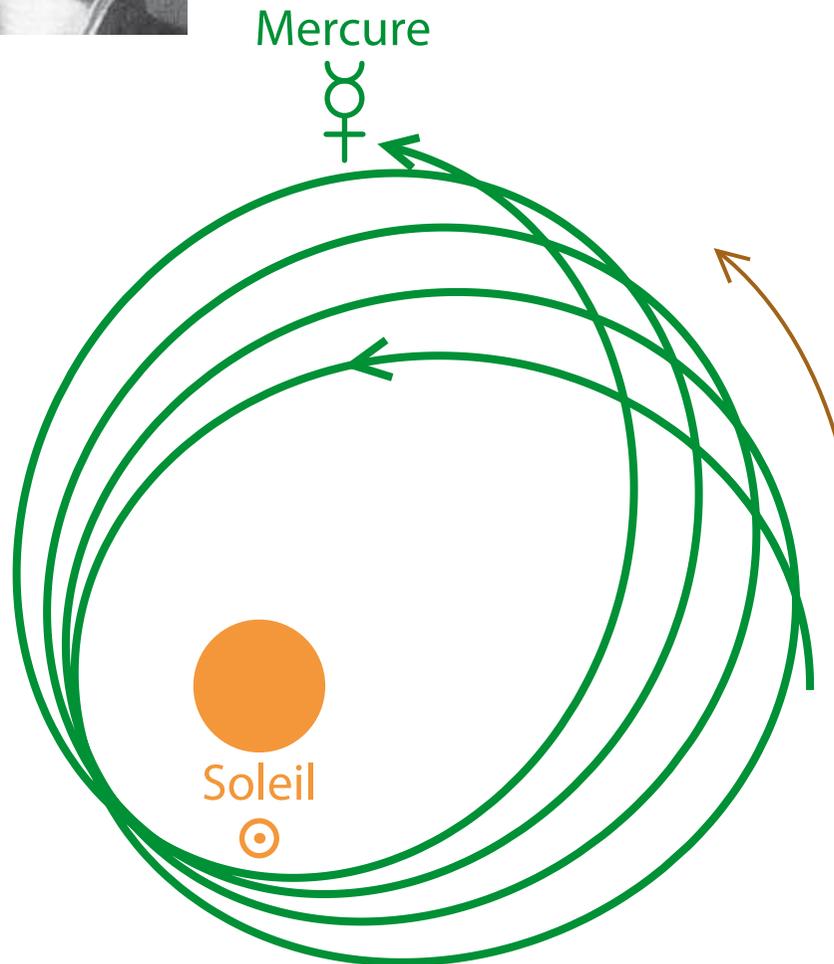


⇒ Prédit le mouvement des planètes (lois de Kepler), les marées, ...



■ Gravitation newtonienne

- Laplace (1749–1827) : perturbations du mouvement des planètes

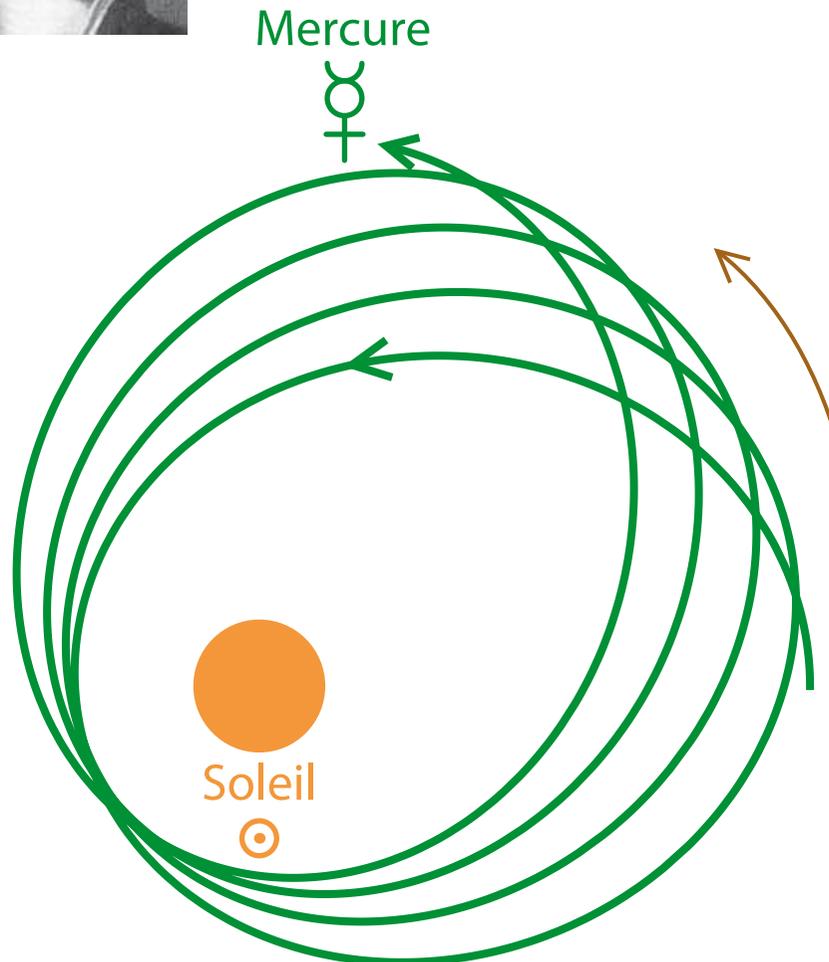


■ Gravitation newtonienne

- Laplace (1749–1827) : perturbations du mouvement des planètes



Le Verrier (1811–1877)



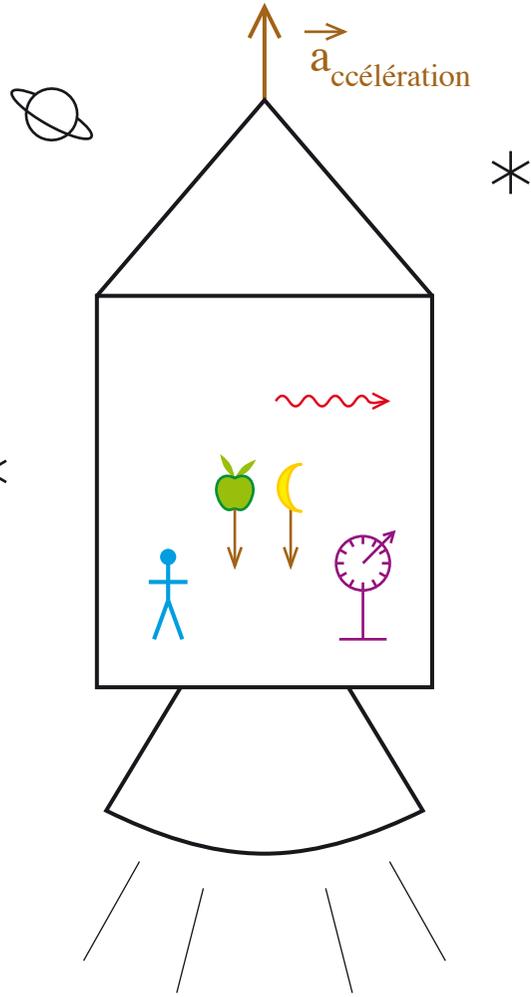
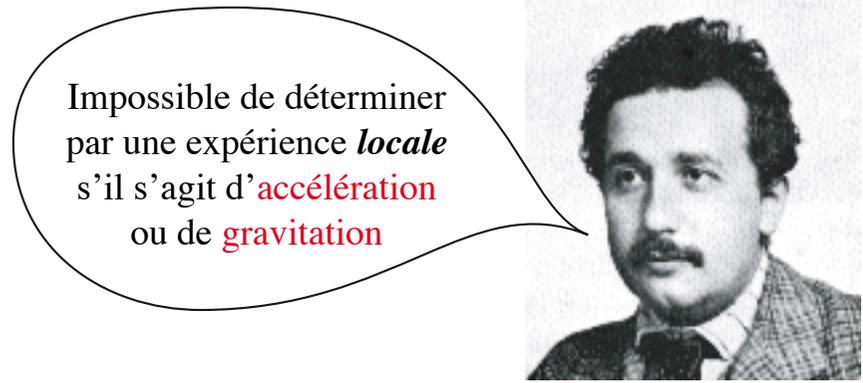
Avance du périhélie observée
= 5600" par siècle
= 5025" dues à la rotation du système
de coordonnées terrestre
+ 532" dues aux perturbations
des autres planètes

{	278"	Vénus	♀
	+ 90"	Terre	⊕
	+ 3"	Mars	♂
	+ 154"	Jupiter	♃
	+ 7"	Saturne	♄

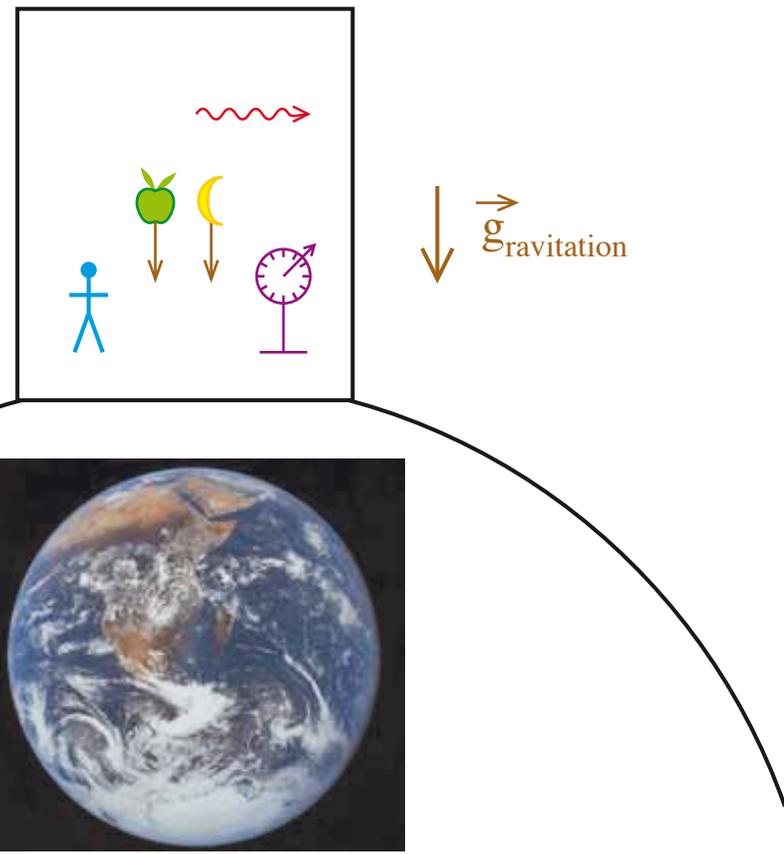
+ 43" pas comprises

■ Gravitation relativiste

- Einstein 1907 : *principe de relativité* généralisé aux observateurs **accélérés** et à la **gravitation**



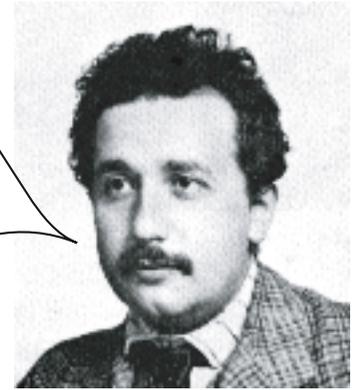
principe d'équivalence



■ Gravitation relativiste

- Einstein 1907 : *principe de relativité* généralisé aux observateurs **accélérés** et à la **gravitation**

Impossible de déterminer par une expérience *locale* s'il s'agit d'**accélération** ou de **gravitation**



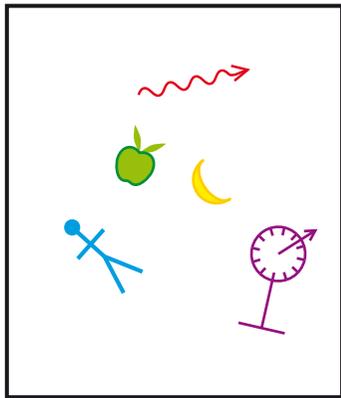
*

Ascenseur
en chute libre

principe d'équivalence

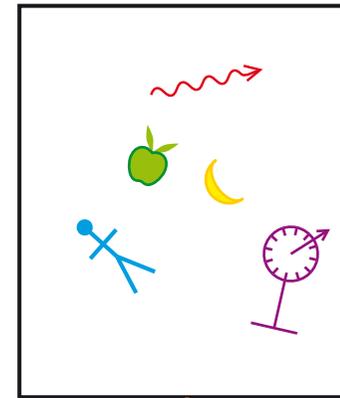


*

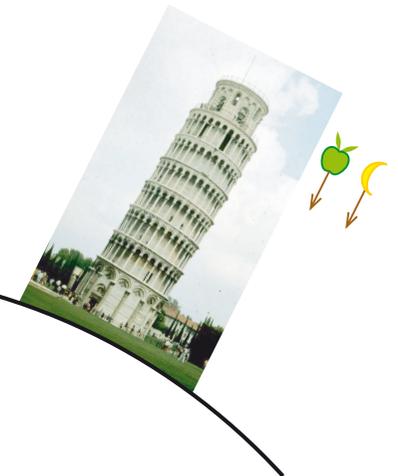


(relativité restreinte)

*



Terre



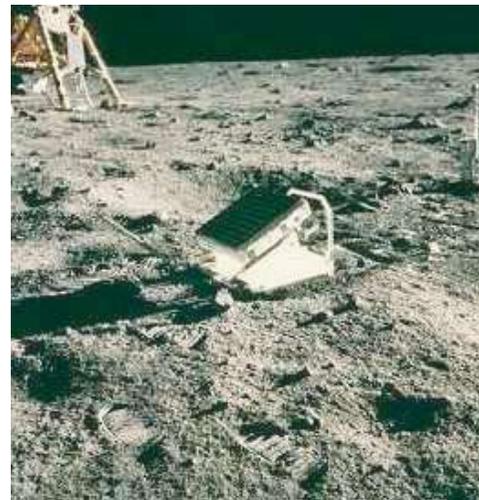
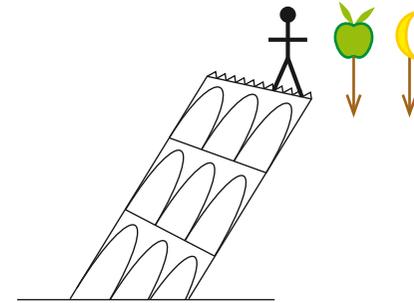
● Tests de l'universalité de la chute libre $\left(\frac{a_1 - a_2}{|a|}\right)$

– Galilée : 2 %

– Newton 1686, pendules de différents matériaux : 0,1 %

– Eötvös 1922, pendule de torsion : 10^{-9} (= 0,0000001%)

– Aujourd'hui, pendules de torsion et système Terre-Lune : 10^{-13}



● Tests de l'universalité de la chute libre $\left(\frac{a_1 - a_2}{|a|}\right)$

– Galilée : 2 %

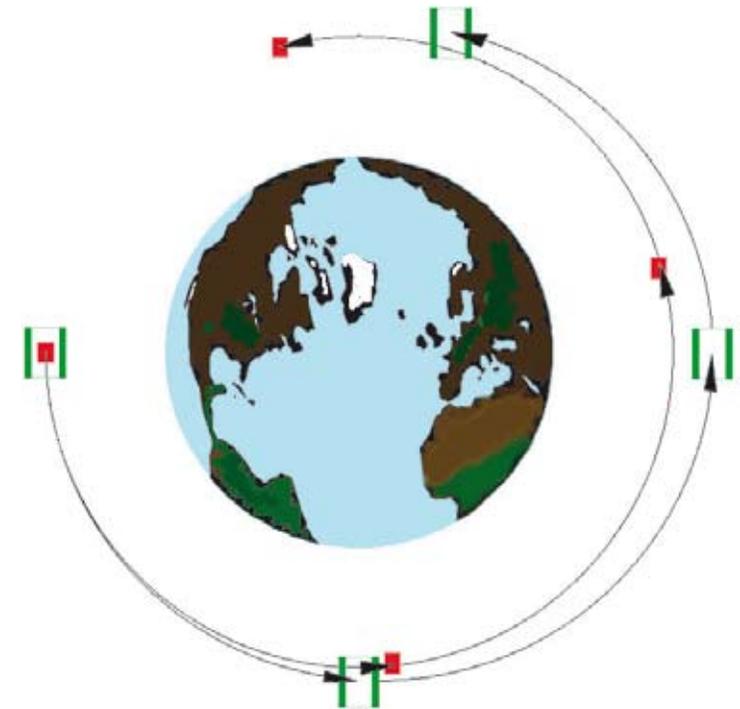
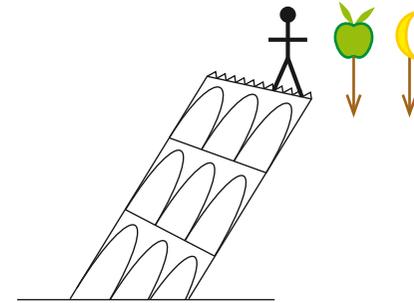
– Newton 1686, pendules de différents matériaux : 0,1 %

– Eötvös 1922, pendule de torsion : 10^{-9} (= 0,0000001%)

– Aujourd'hui, pendules de torsion et système Terre-Lune : 10^{-13}

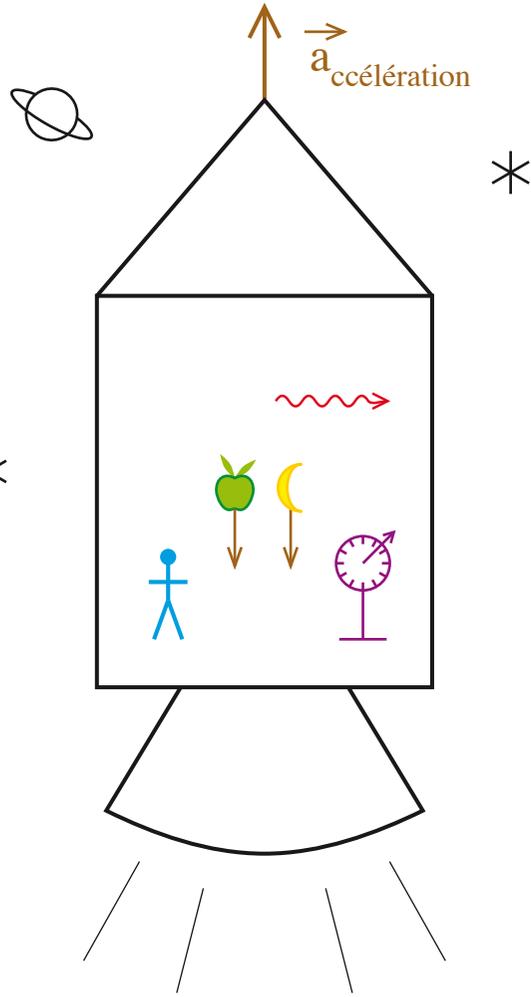
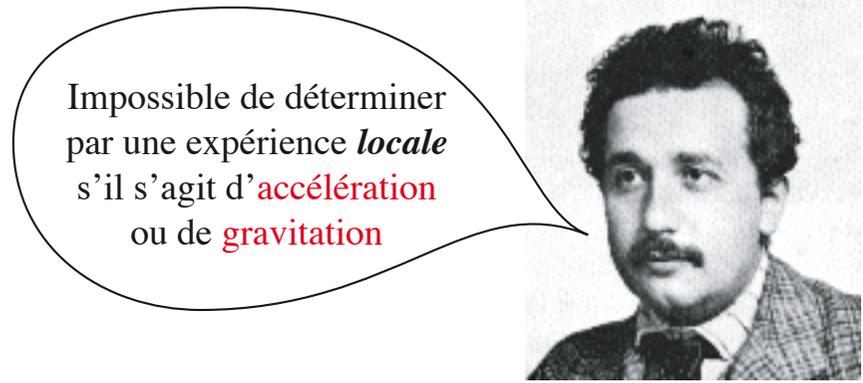
– Mission MicroSCOPE 2016 : 10^{-15}

– Projet STEP (pas financé) : 10^{-18}



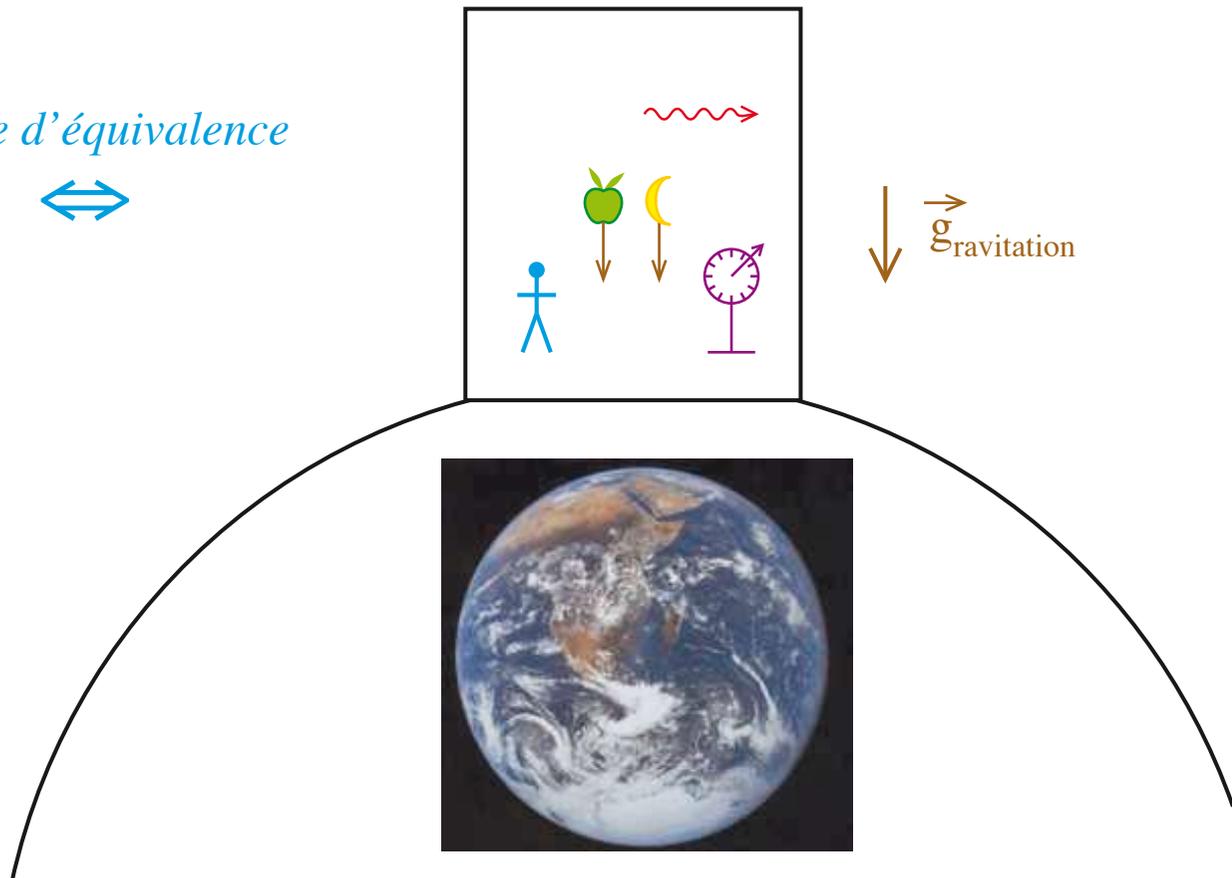
■ Gravitation relativiste

- Einstein 1907 : *principe de relativité* généralisé aux observateurs **accélérés** et à la **gravitation**



principe d'équivalence

\Leftrightarrow



■ Conséquence immédiate

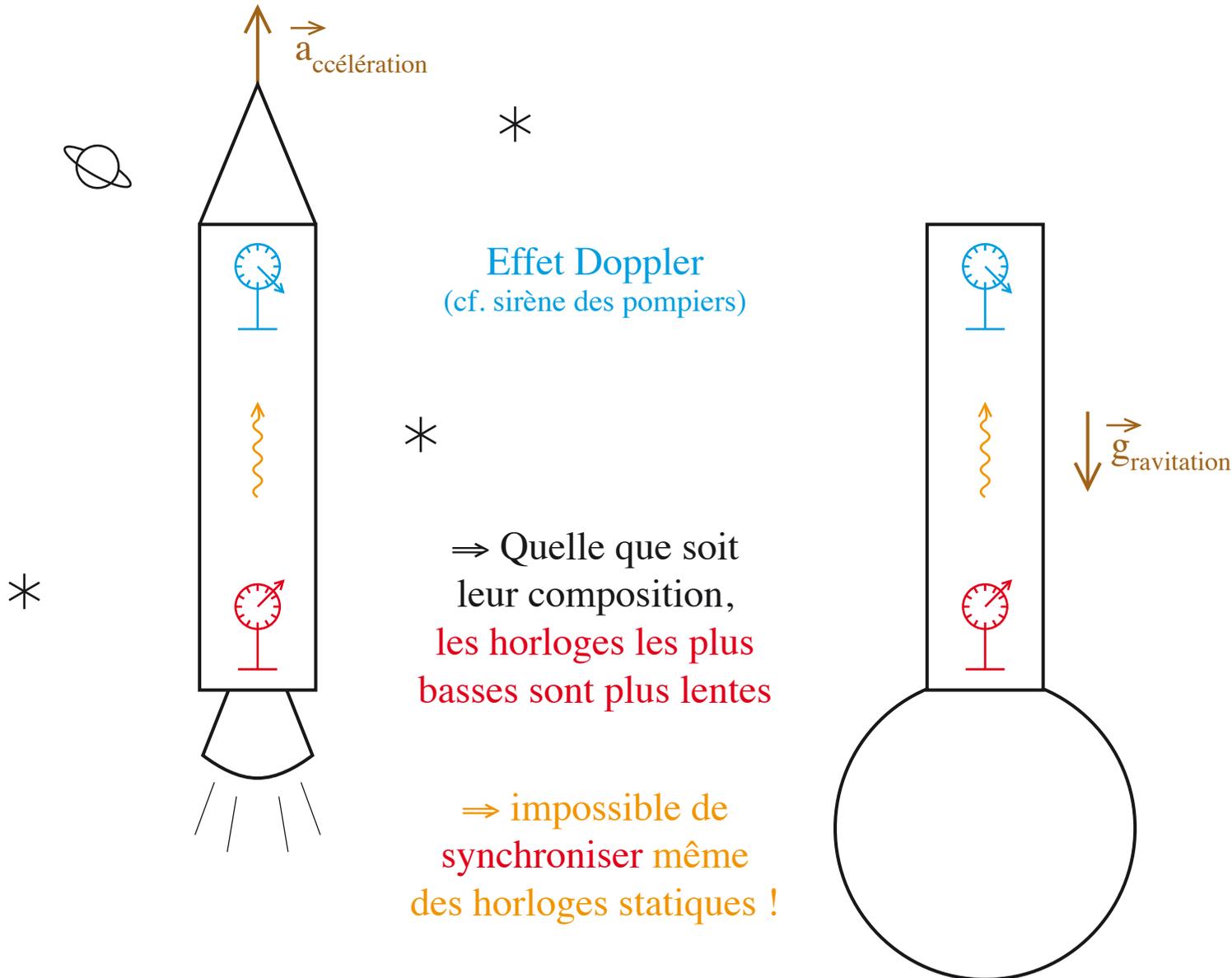
● Retard gravitationnel des horloges



■ Conséquence immédiate

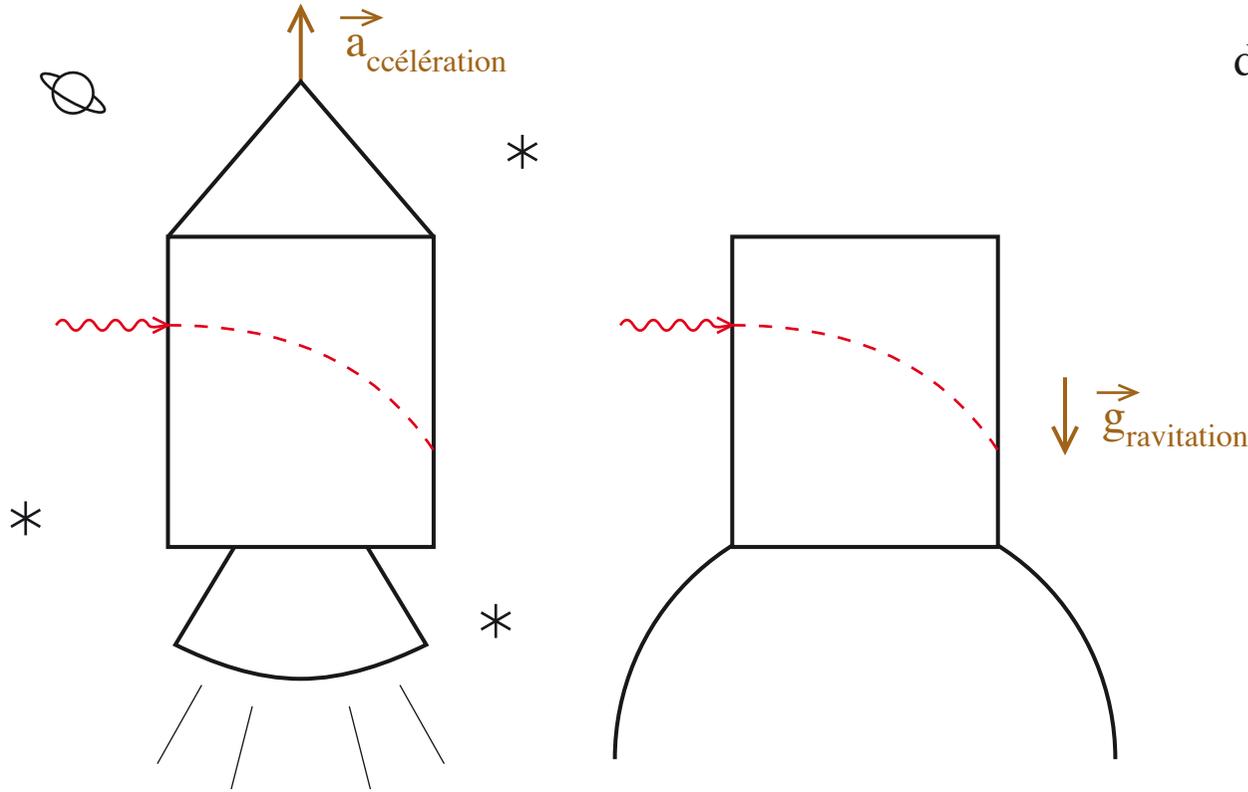
● Retard gravitationnel des horloges

[= dilatation du temps] \Leftrightarrow rougissement

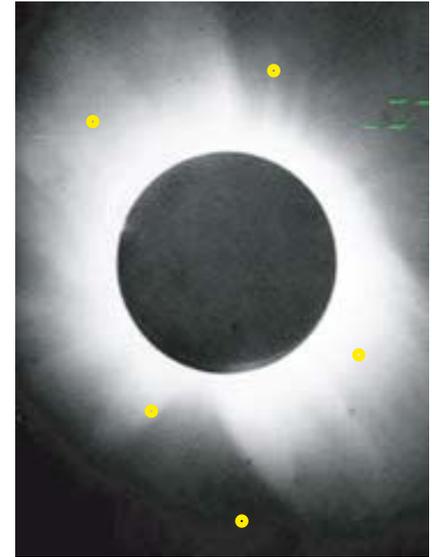
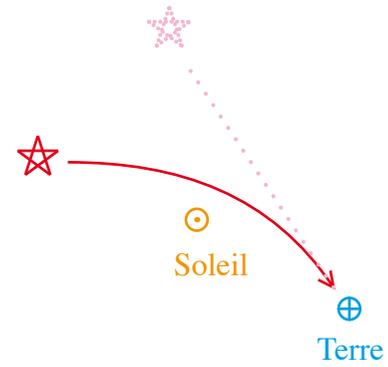


■ Autre conséquence immédiate

● Déflexion de la lumière par la gravitation

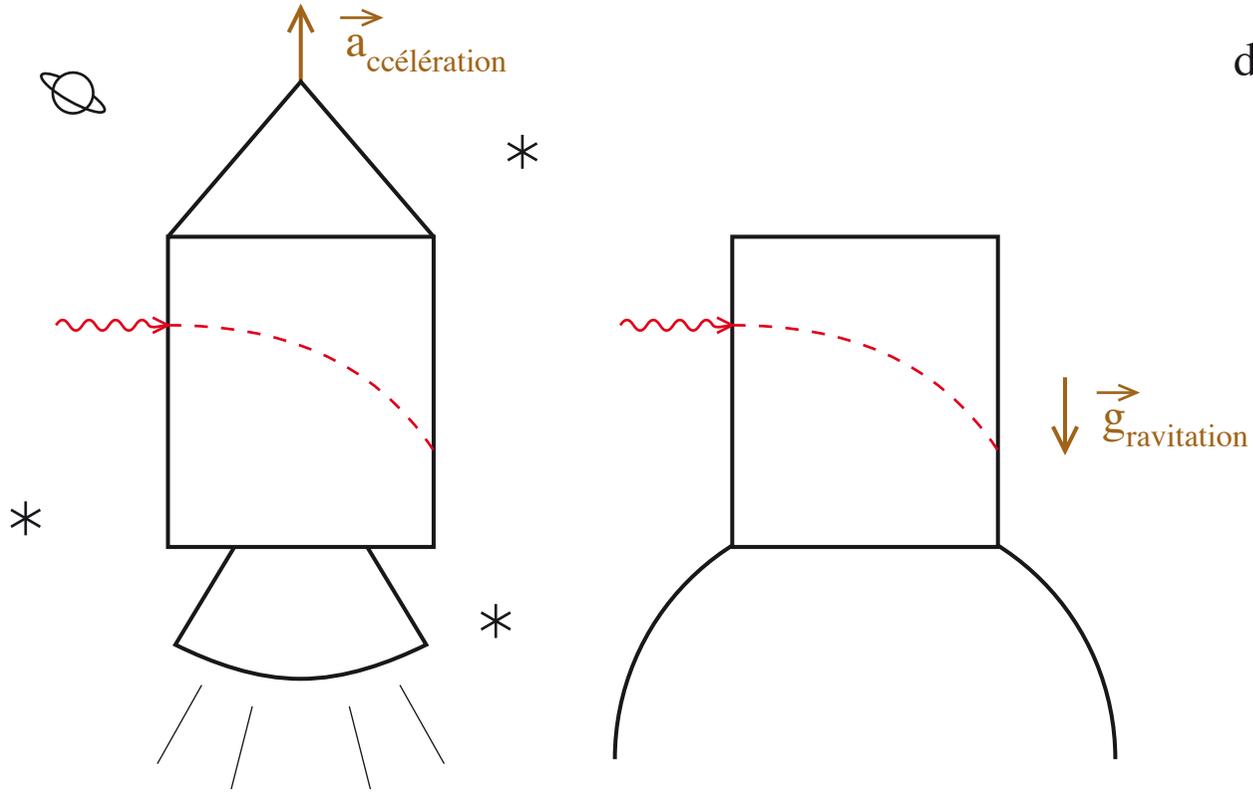


⇒ Modification de la position apparente des étoiles

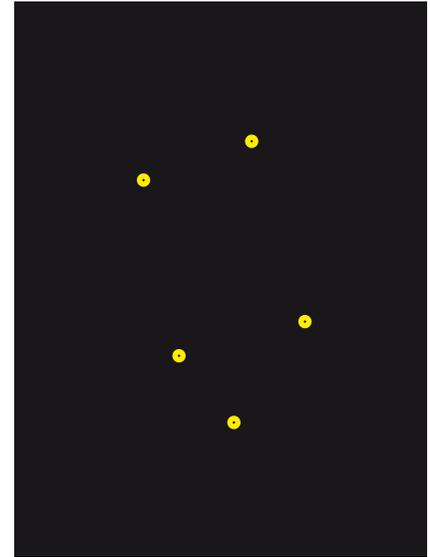
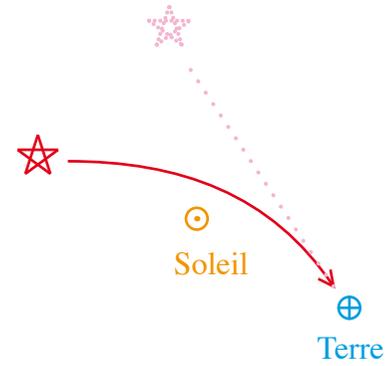


■ Autre conséquence immédiate

● Déflexion de la lumière par la gravitation

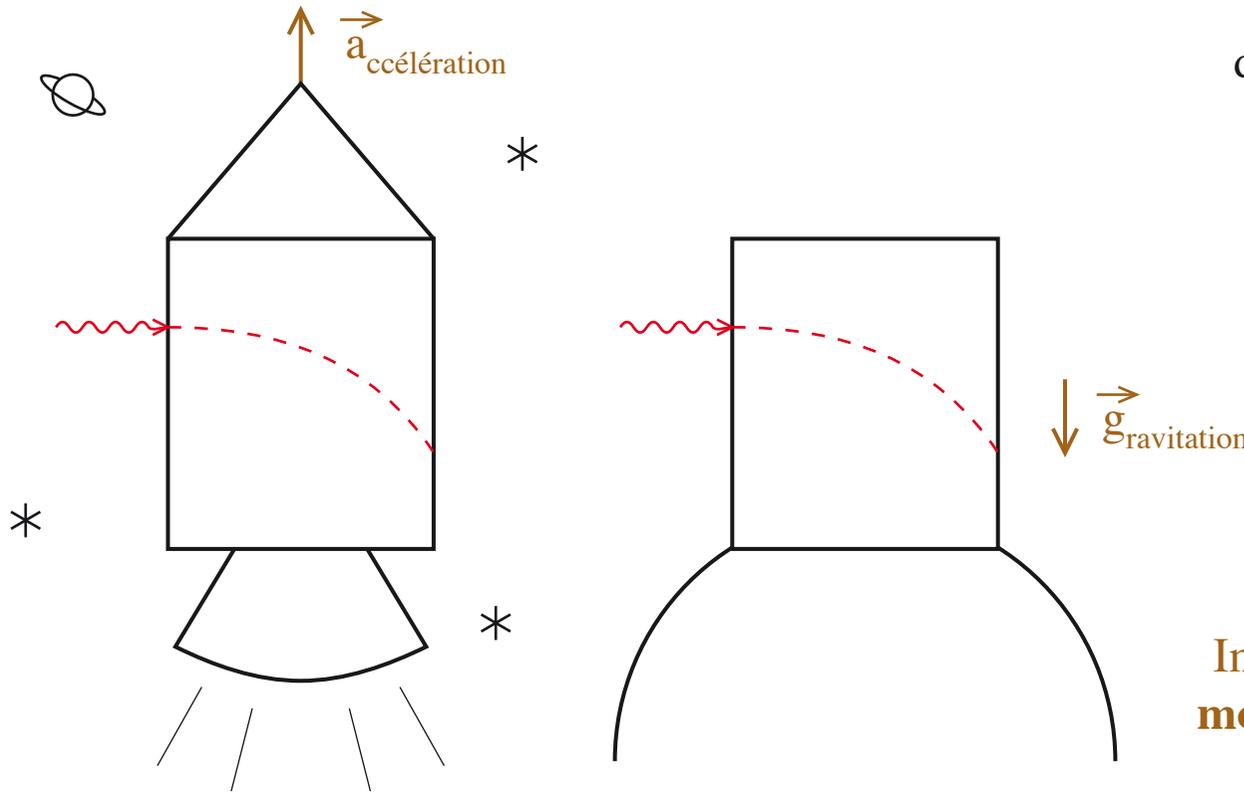


⇒ Modification de la position apparente des étoiles

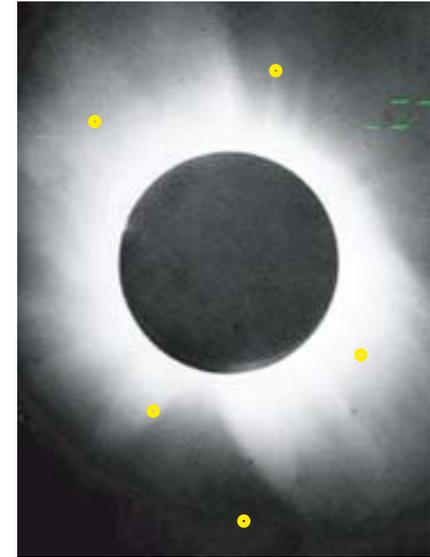
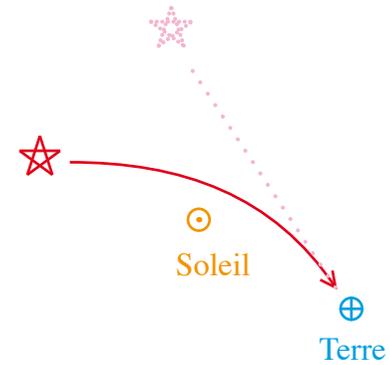


■ Autre conséquence immédiate

● Déflexion de la lumière par la gravitation



⇒ Modification de la position apparente des étoiles



In 1911, Einstein prédit la moitié de la valeur correcte

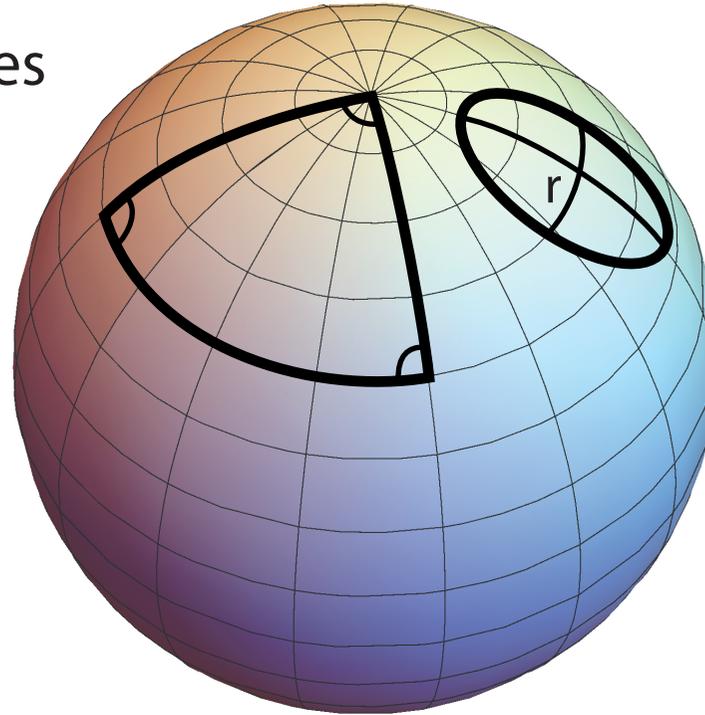
C'est parce qu'il existe aussi une déformation de l'espace

Grossmann & Einstein 1911–1913 : géométrie courbe (“riemannienne”) de l'espace-temps.



Courbure positive

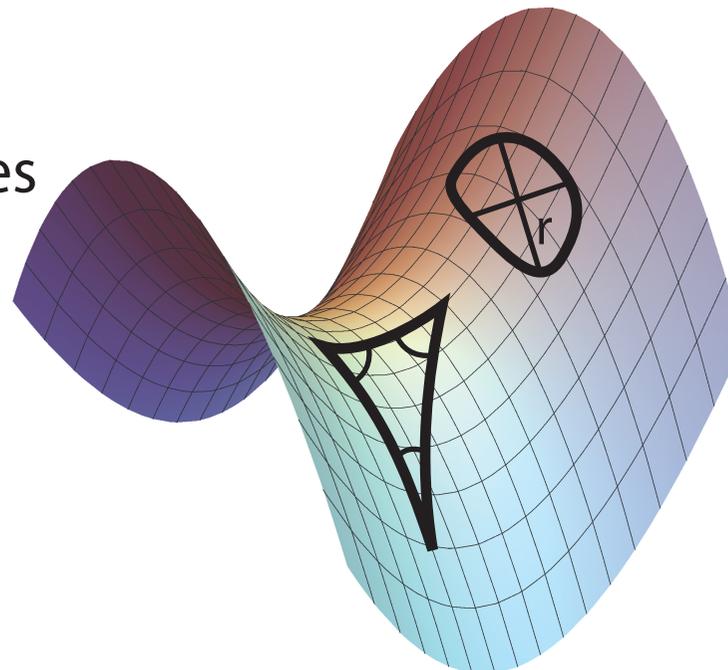
Somme des angles
du triangle $> \pi$



circonférence du
cercle $< 2 \pi r$

Courbure négative

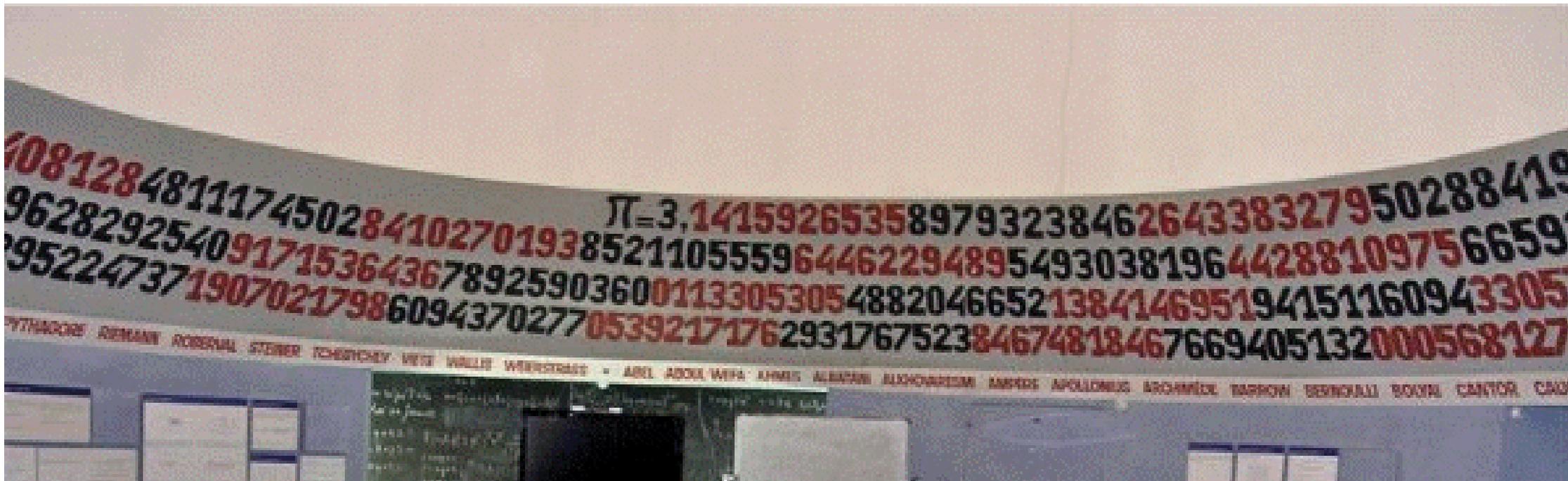
Somme des angles
du triangle $< \pi$



circonférence du
cercle $> 2 \pi r$

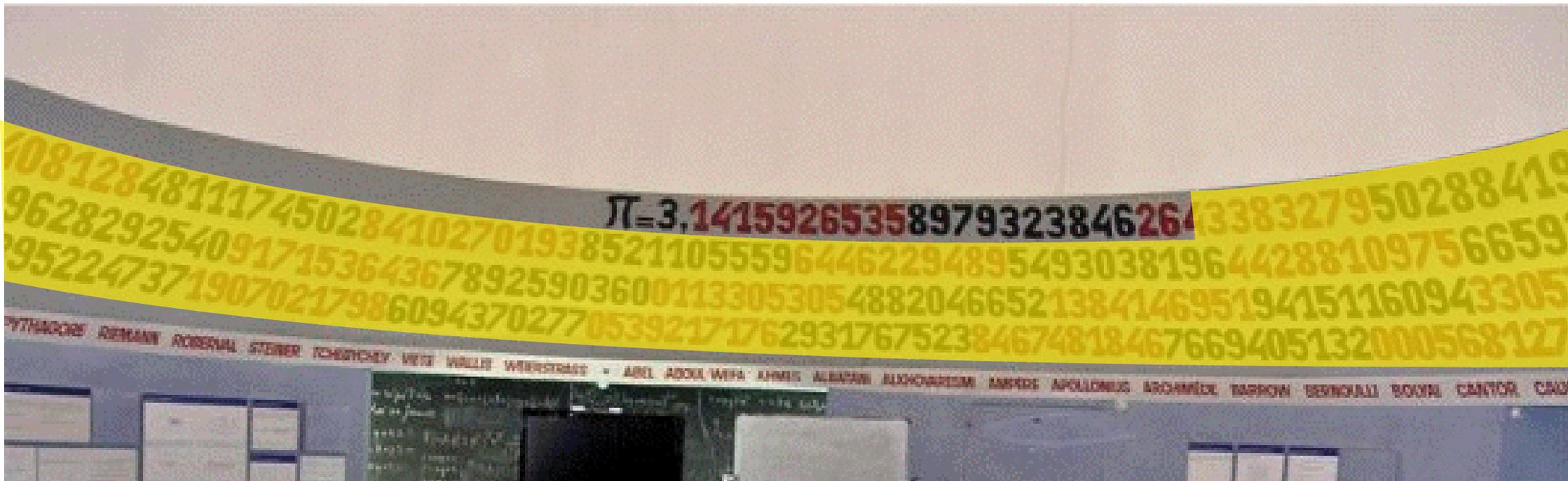
Effet d'une masse
sur la géométrie :

circonférence $\neq 2 \pi r$



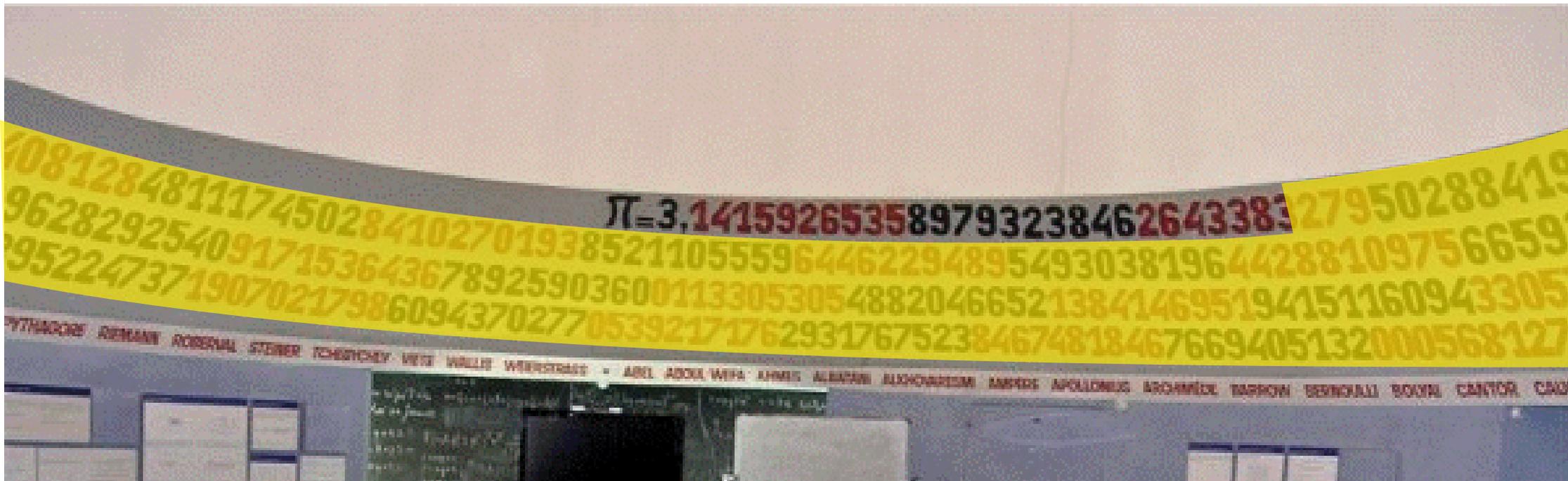
Effet de la masse de la Terre
sur la géométrie :

circonférence $\neq 2 \pi r$



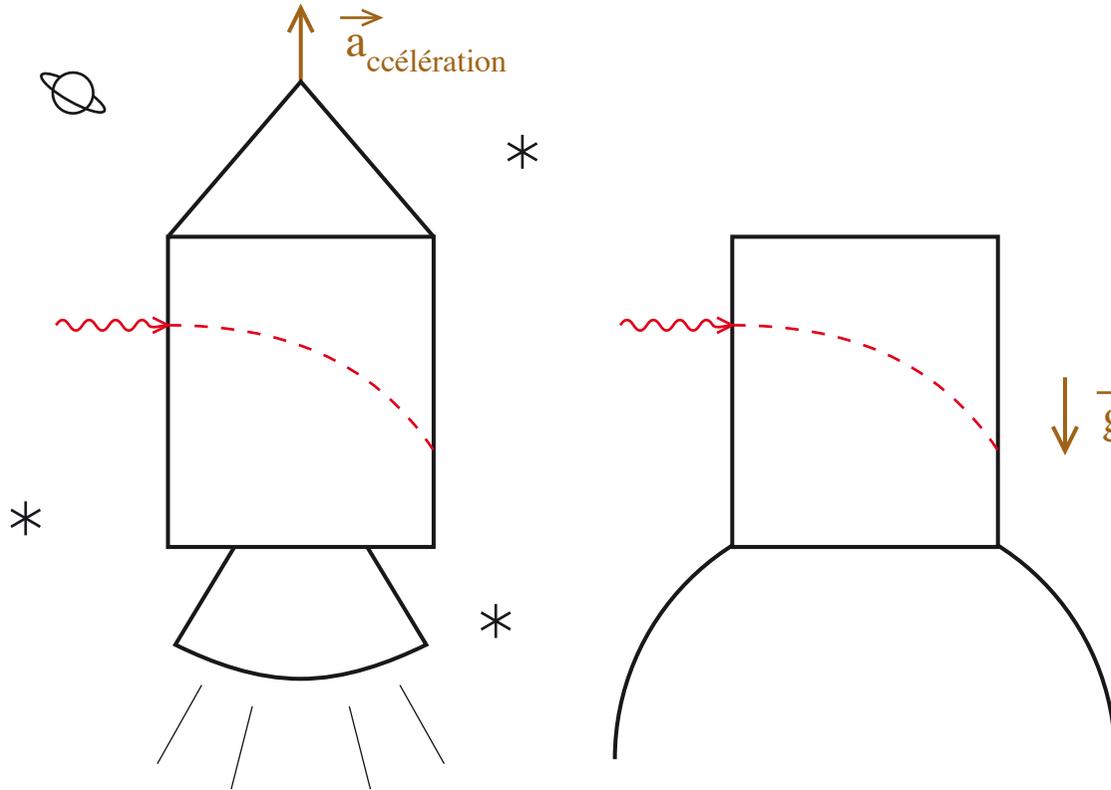
Effet de la masse de l'observateur
sur la géométrie :

circonférence $\neq 2 \pi r$

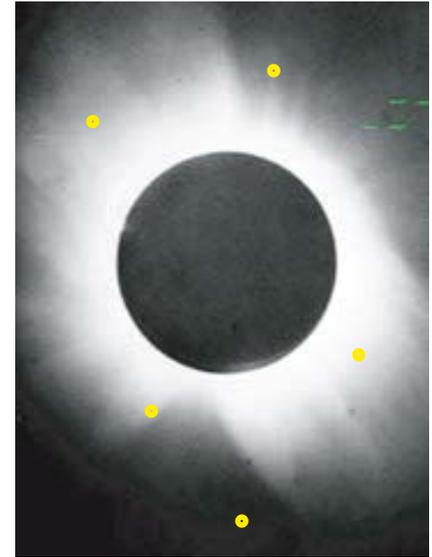
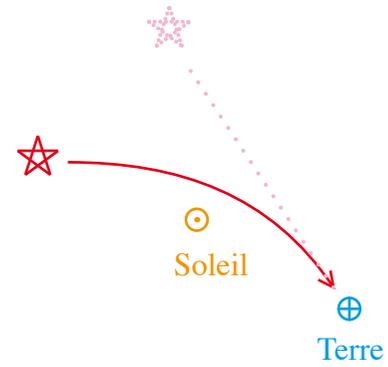


■ Autre conséquence immédiate

● Déflexion de la lumière par la gravitation

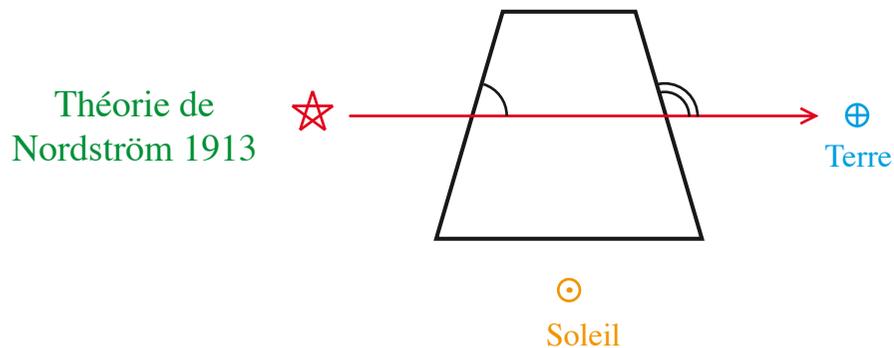


⇒ Modification de la position apparente des étoiles



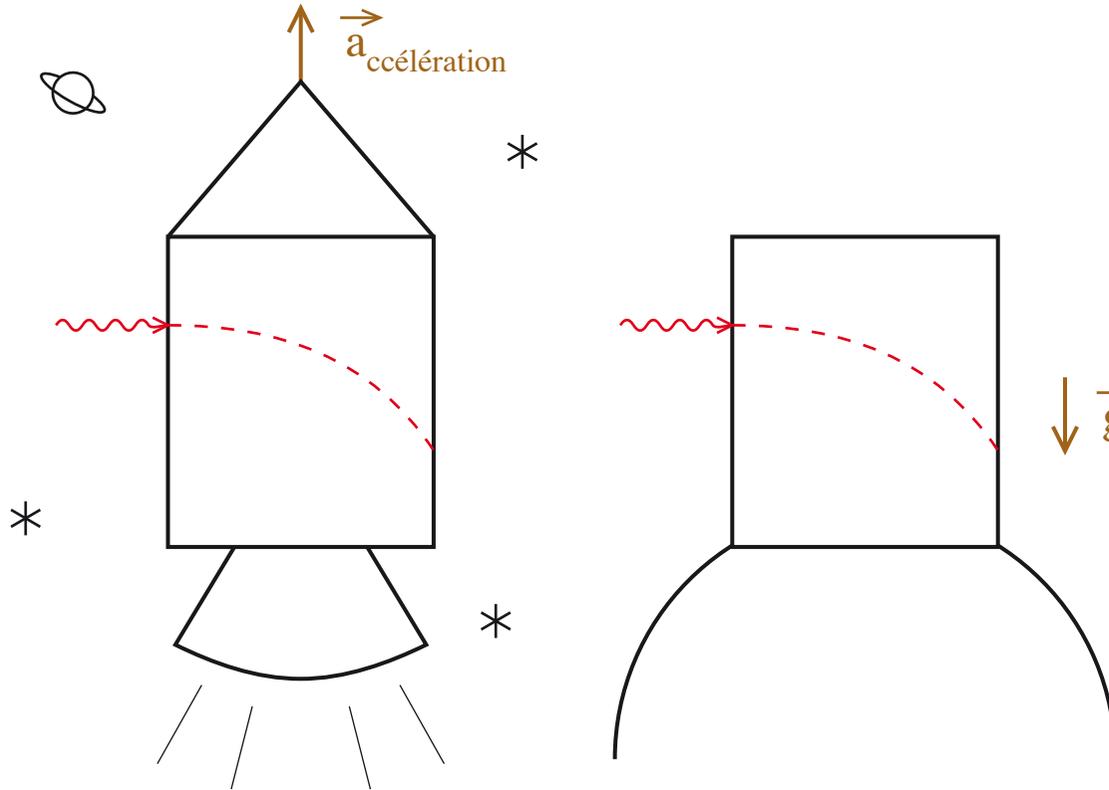
In 1911, Einstein prédit la moitié de la valeur correcte

C'est parce qu'il existe aussi une déformation de l'espace :

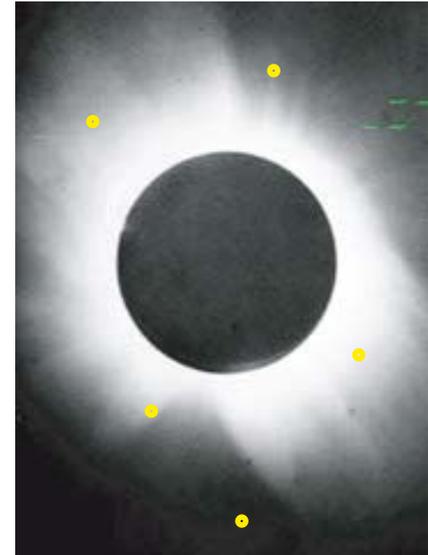
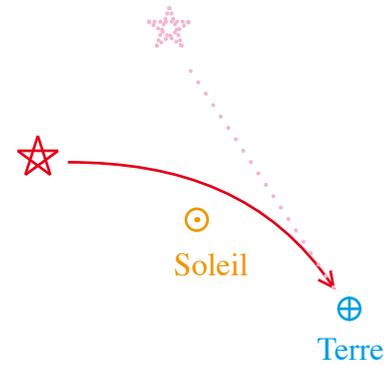


■ Autre conséquence immédiate

● Déflexion de la lumière par la gravitation



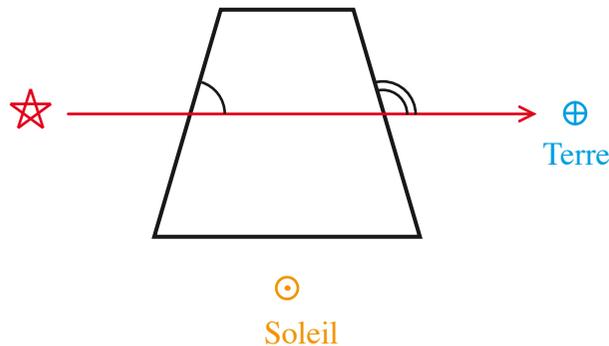
⇒ Modification de la position apparente des étoiles



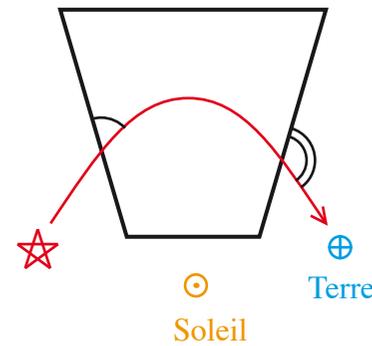
In 1911, Einstein prédit la moitié de la valeur correcte

C'est parce qu'il existe aussi une déformation de l'espace :

Théorie de Nordström 1913



Relativité générale d'Einstein 1915



■ Deuxième composante (cruciale) de la gravitation relativiste

- Einstein 1912–1915 : Comment une masse courbe-t-elle l'espace-temps ?

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8 \pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

équations d'Einstein

Courbure = G × énergie-impulsion de la matière



constante
de Newton

■ Deuxième composante (cruciale) de la gravitation relativiste

- Einstein 1912–1915 : Comment une masse courbe-t-elle l'espace-temps ?

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

équations d'Einstein

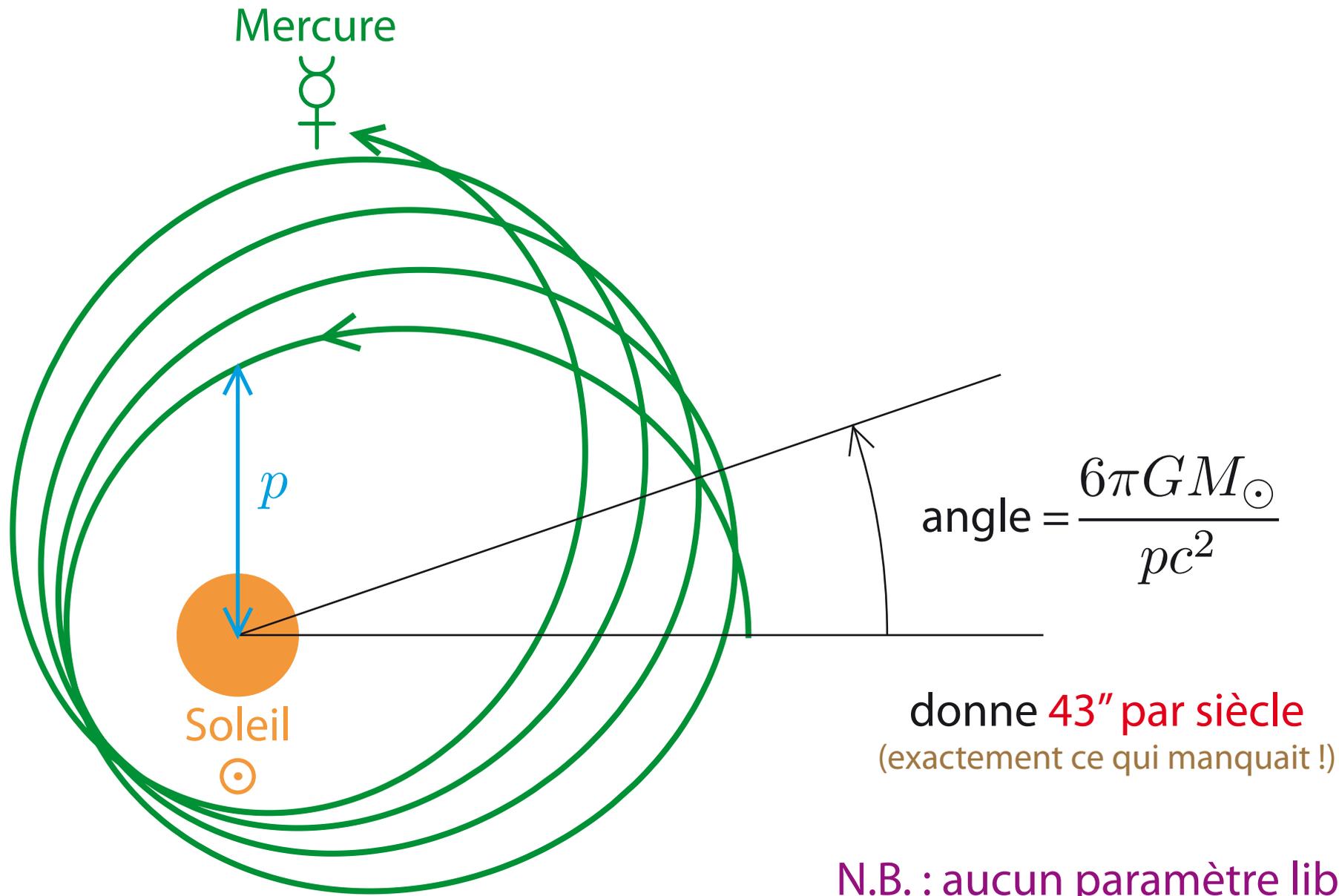
Courbure = G × énergie-impulsion de la matière



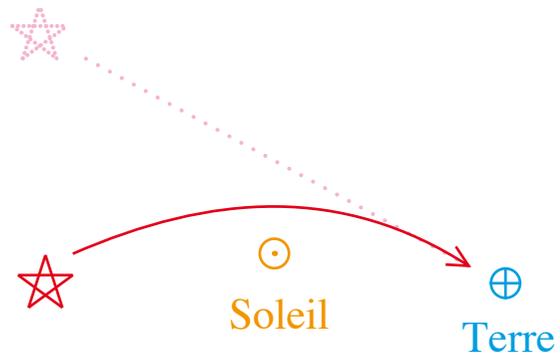
constante
de Newton

- Maintenant, la géométrie engendrée par le Soleil & les planètes peut être calculée, et Einstein prédit
 - le mouvement de Mercure
 - la trajectoire correcte de la lumière

– Avance du périhélie de Mercure :

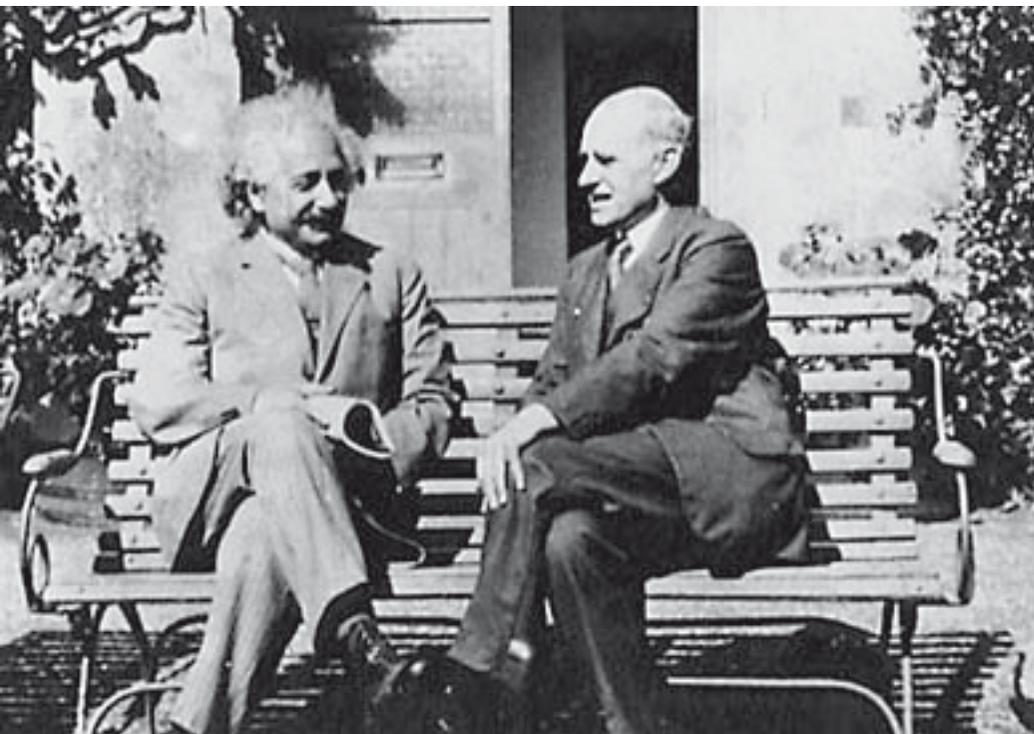


- Déflexion de la lumière :

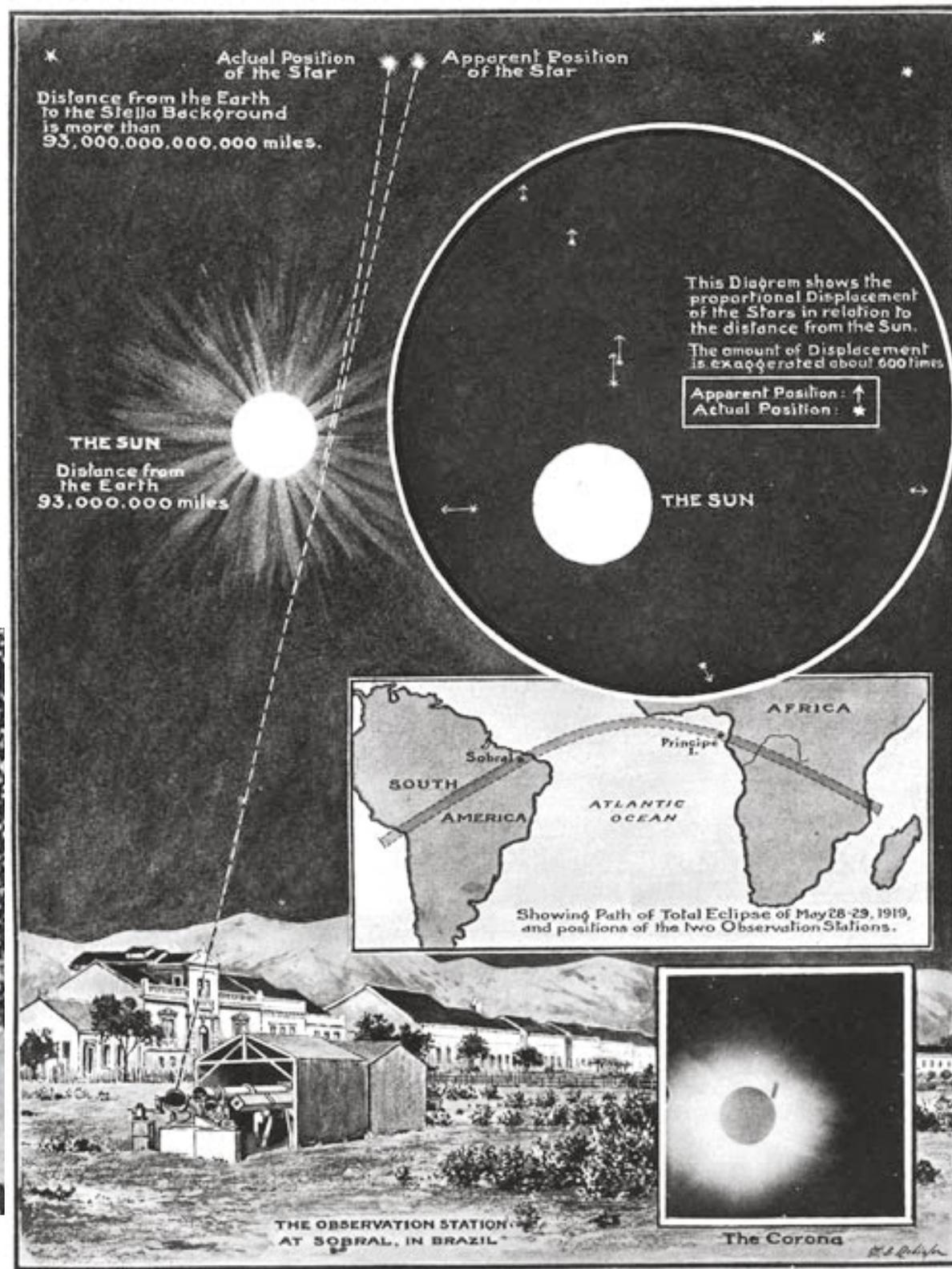


1,7'' pour rayon frôlant le Soleil

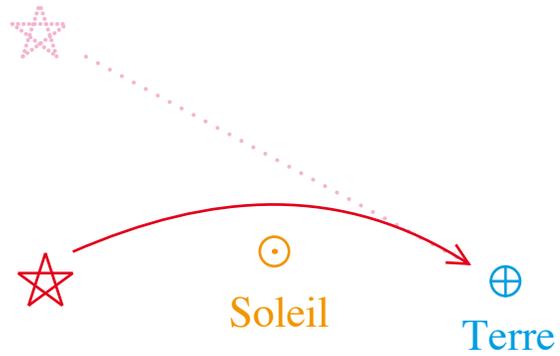
Vérifié par Eddington pendant l'éclipse de 1919



Einstein et Eddington



– Déflexion de la lumière :



1,7'' pour rayon frôlant le Soleil

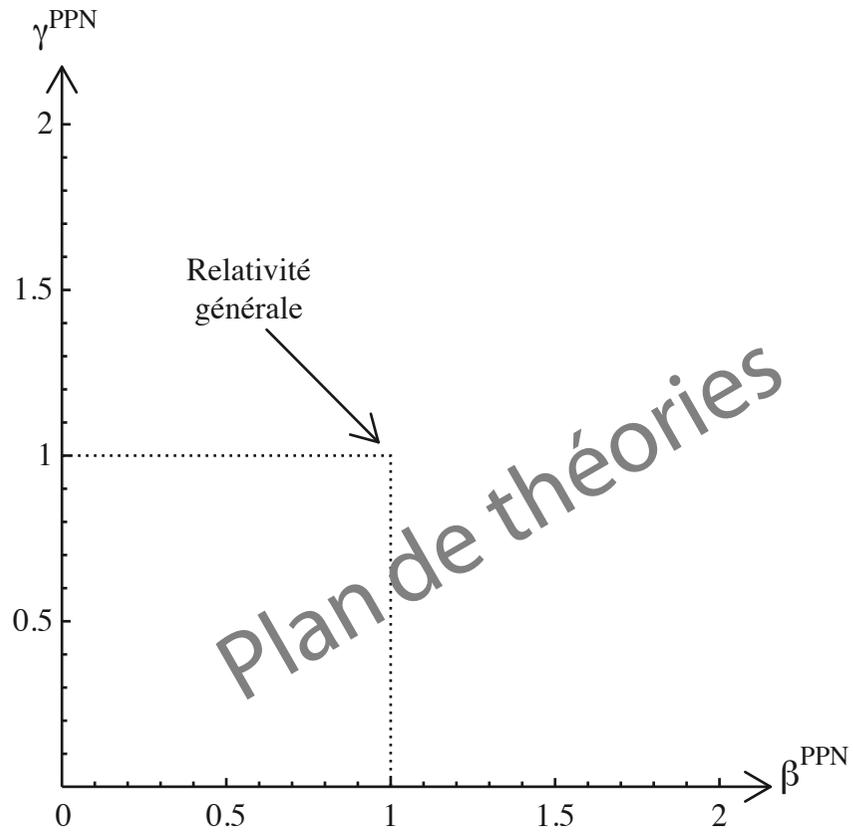
Vérifié par Eddington pendant l'éclipse de 1919

– Autres effets observables dans le système solaire :



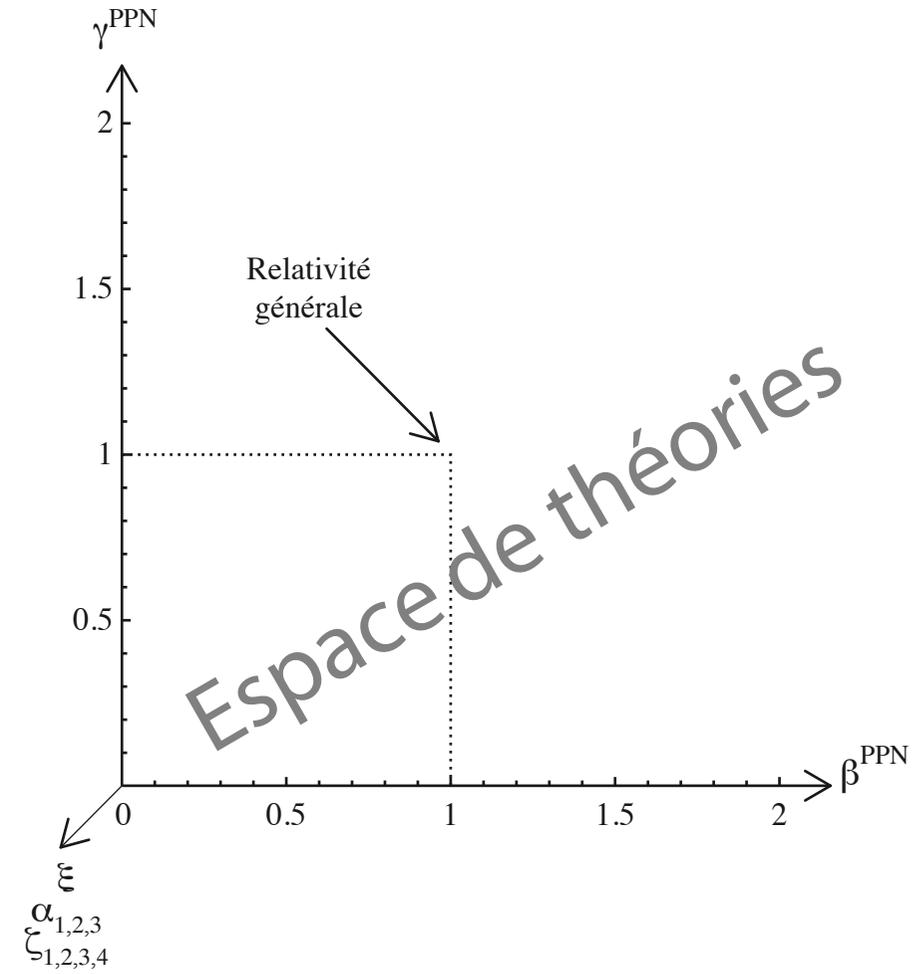
retard des échos radar vers Mars

Tests du système solaire dans le cadre
Paramétrisé Post-Newtonien

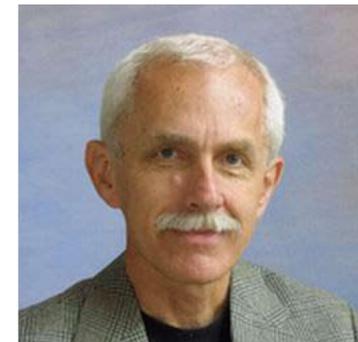
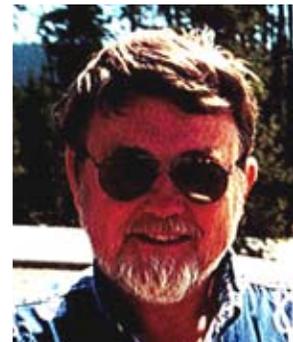


Arthur Eddington (1923)

Tests du système solaire dans le cadre
Paramétrisé Post-Newtonien

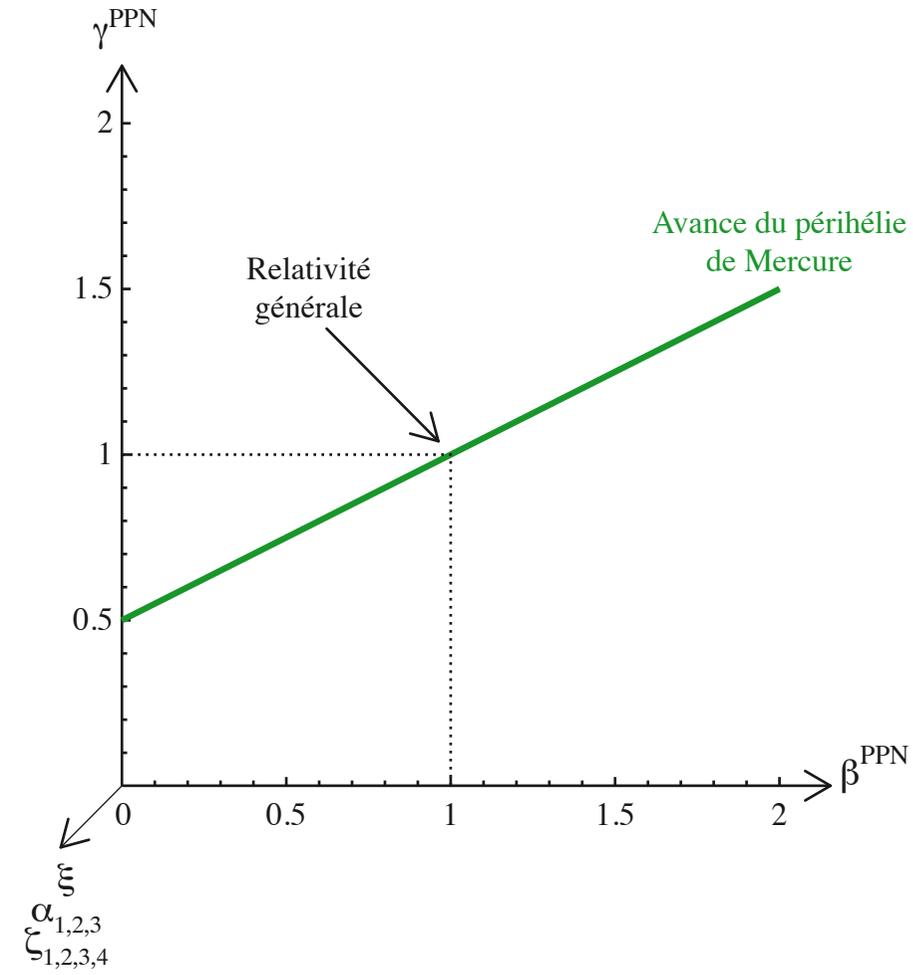


Arthur Eddington (1923)

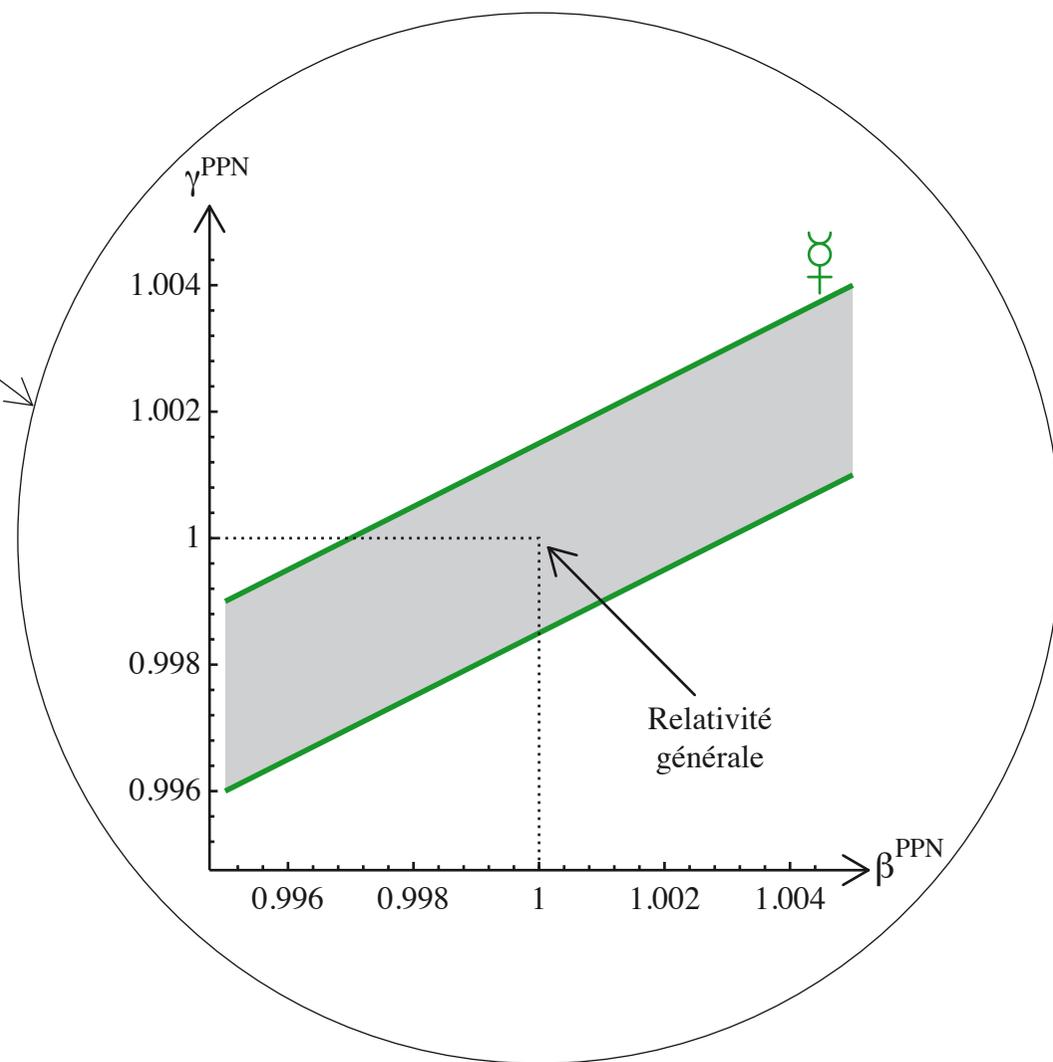
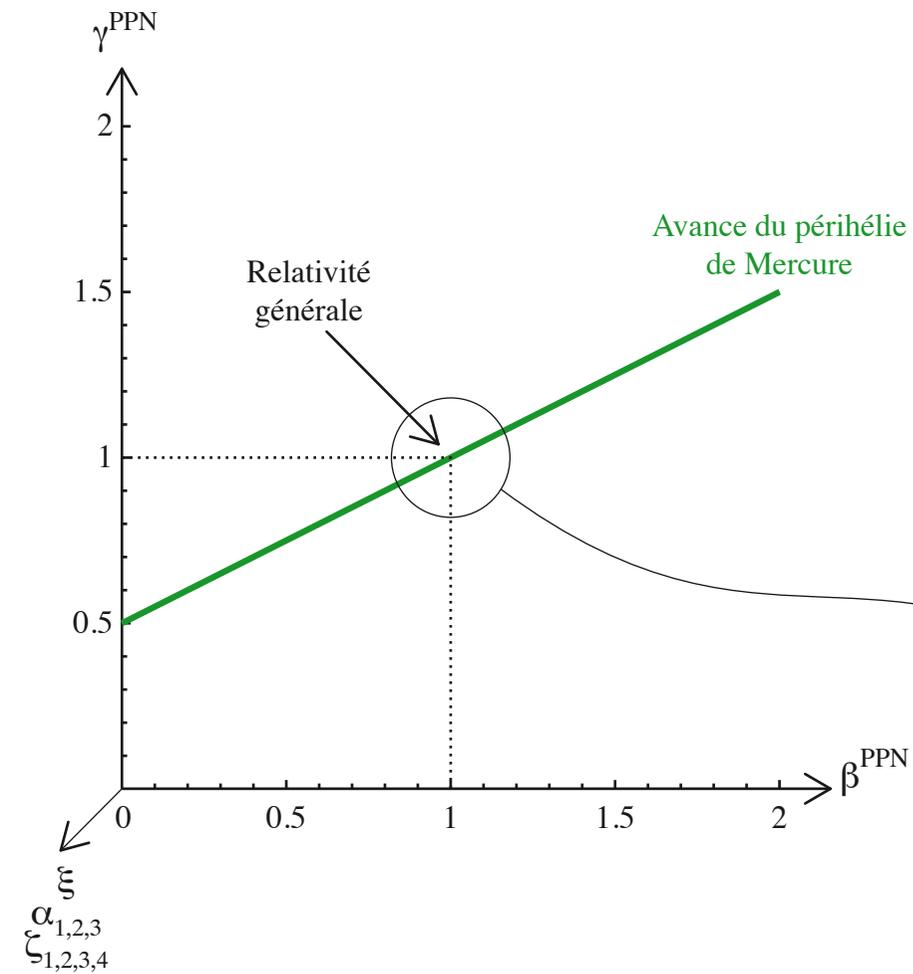


Kenneth Nordtvedt & Clifford Will (1972)

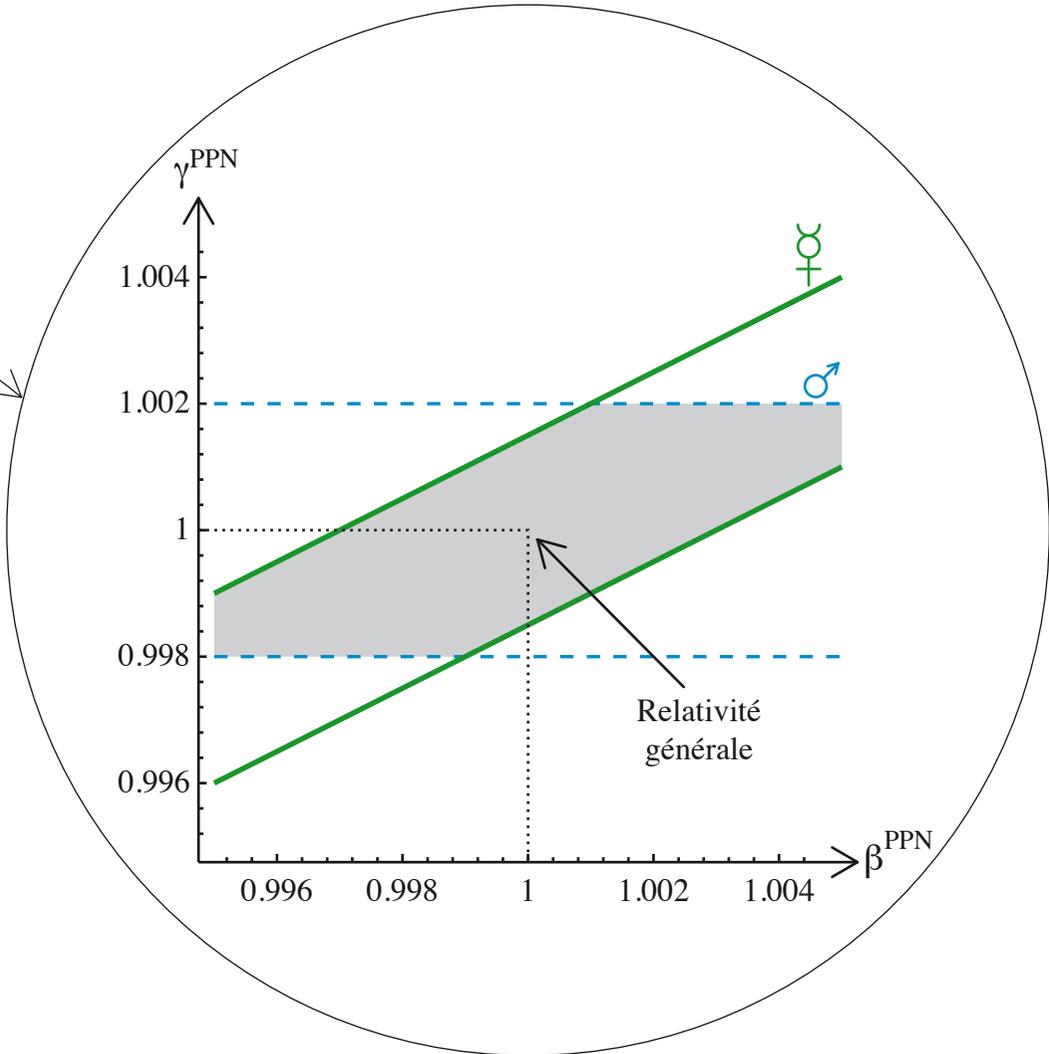
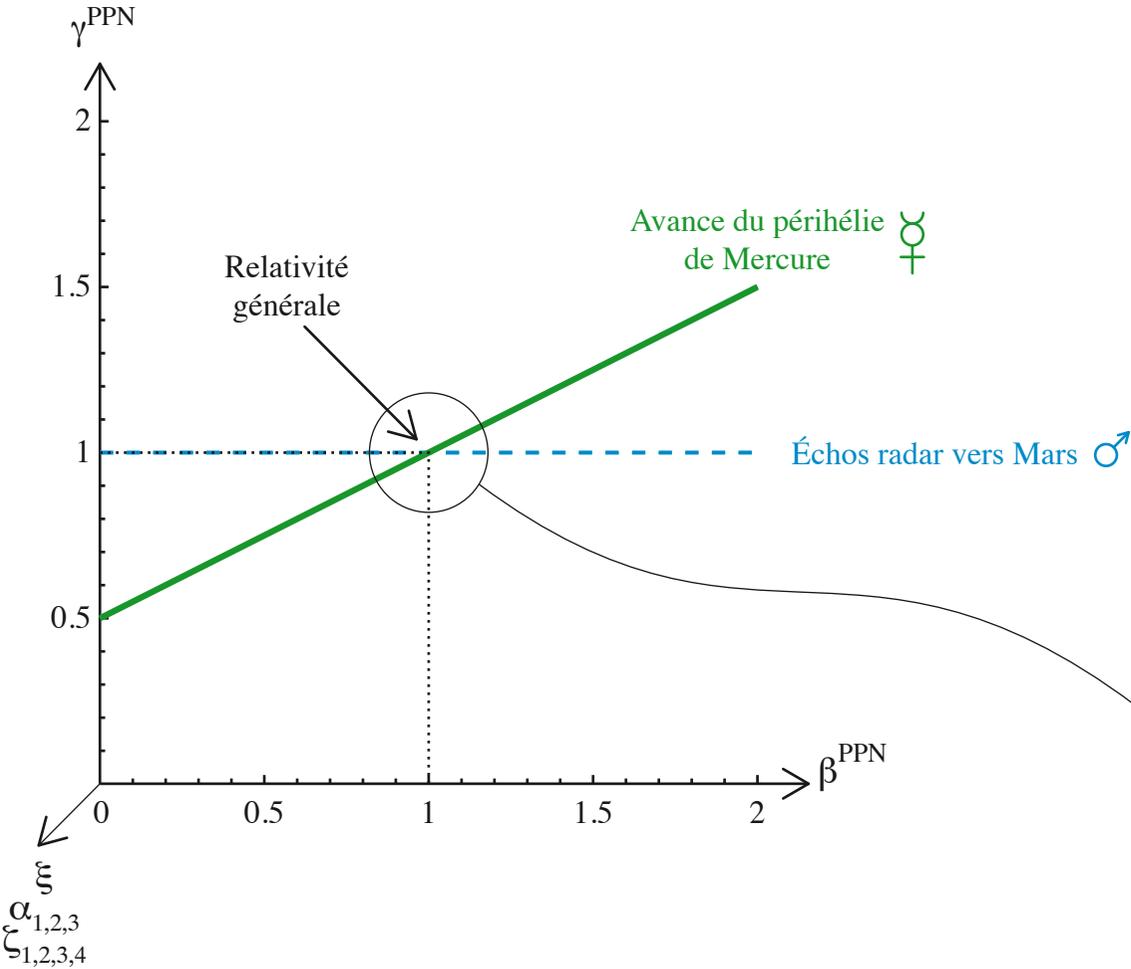
Tests du système solaire dans le cadre Paramétrisé Post-Newtonien



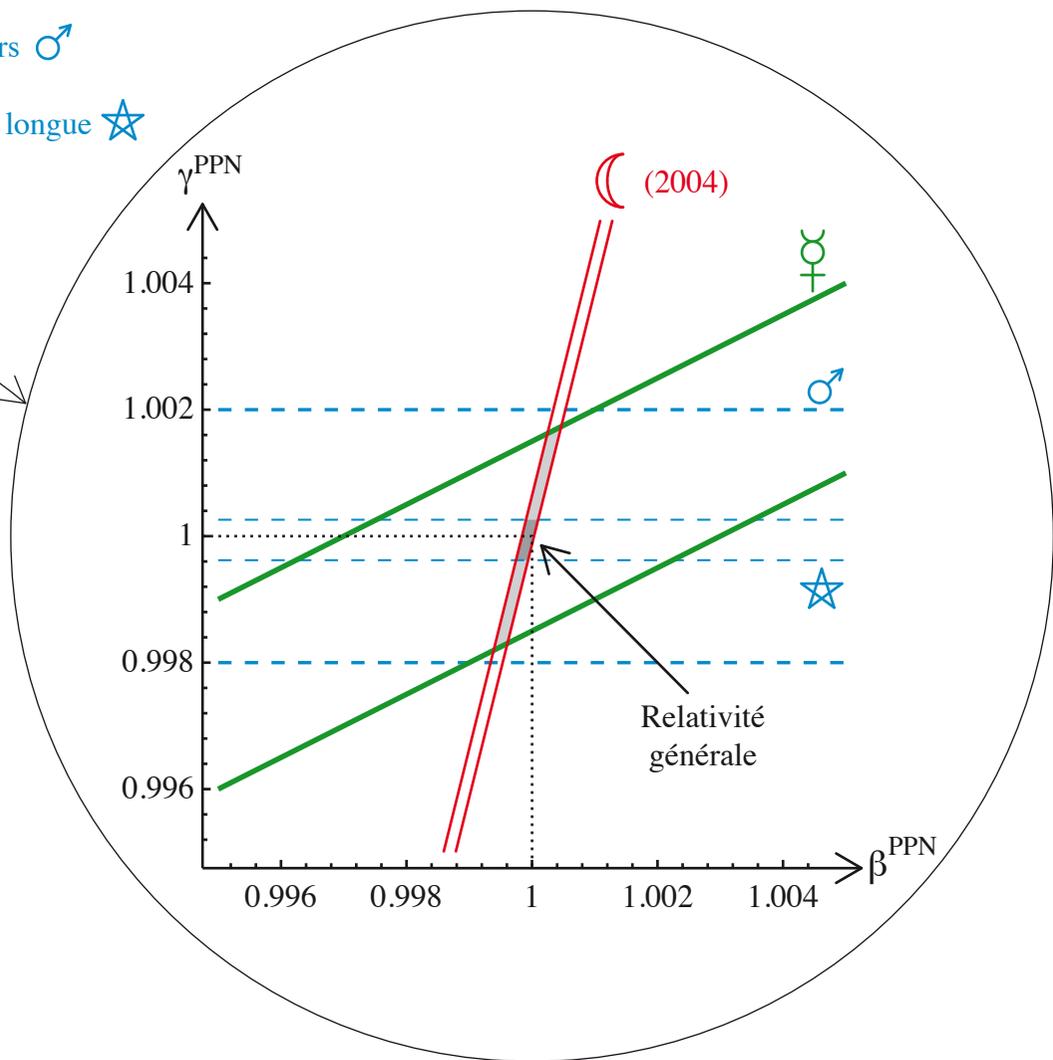
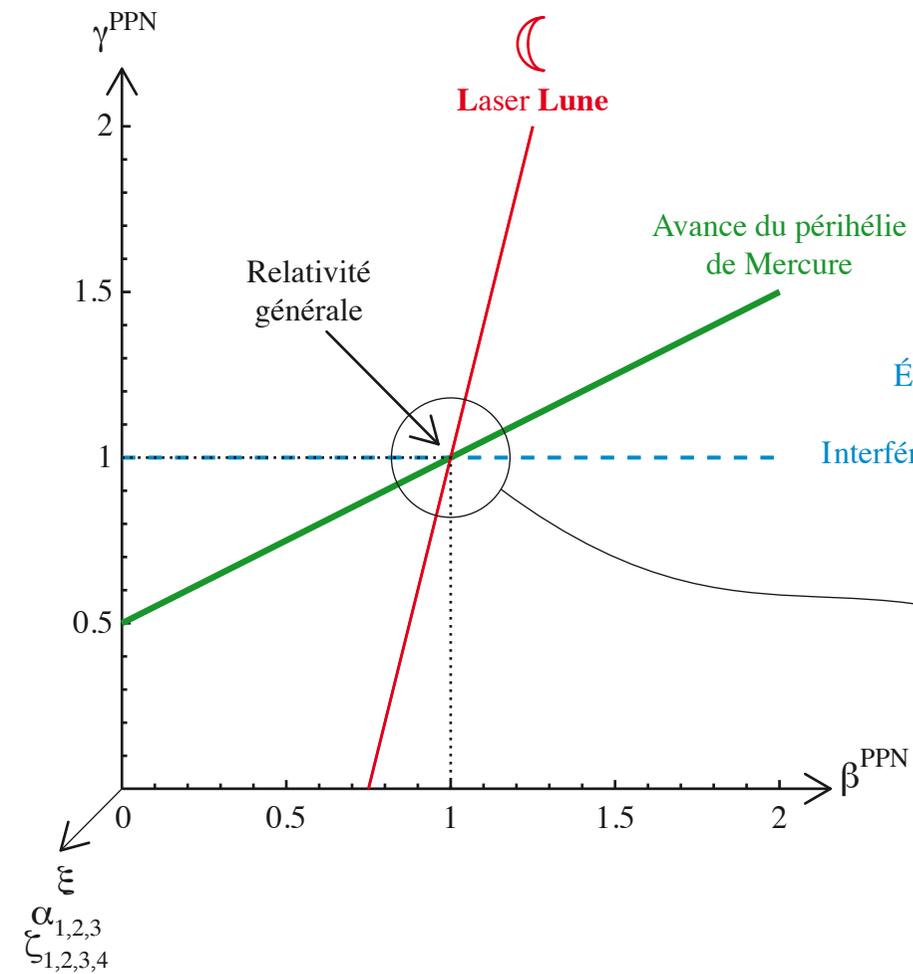
Tests du système solaire dans le cadre Paramétrisé Post-Newtonien



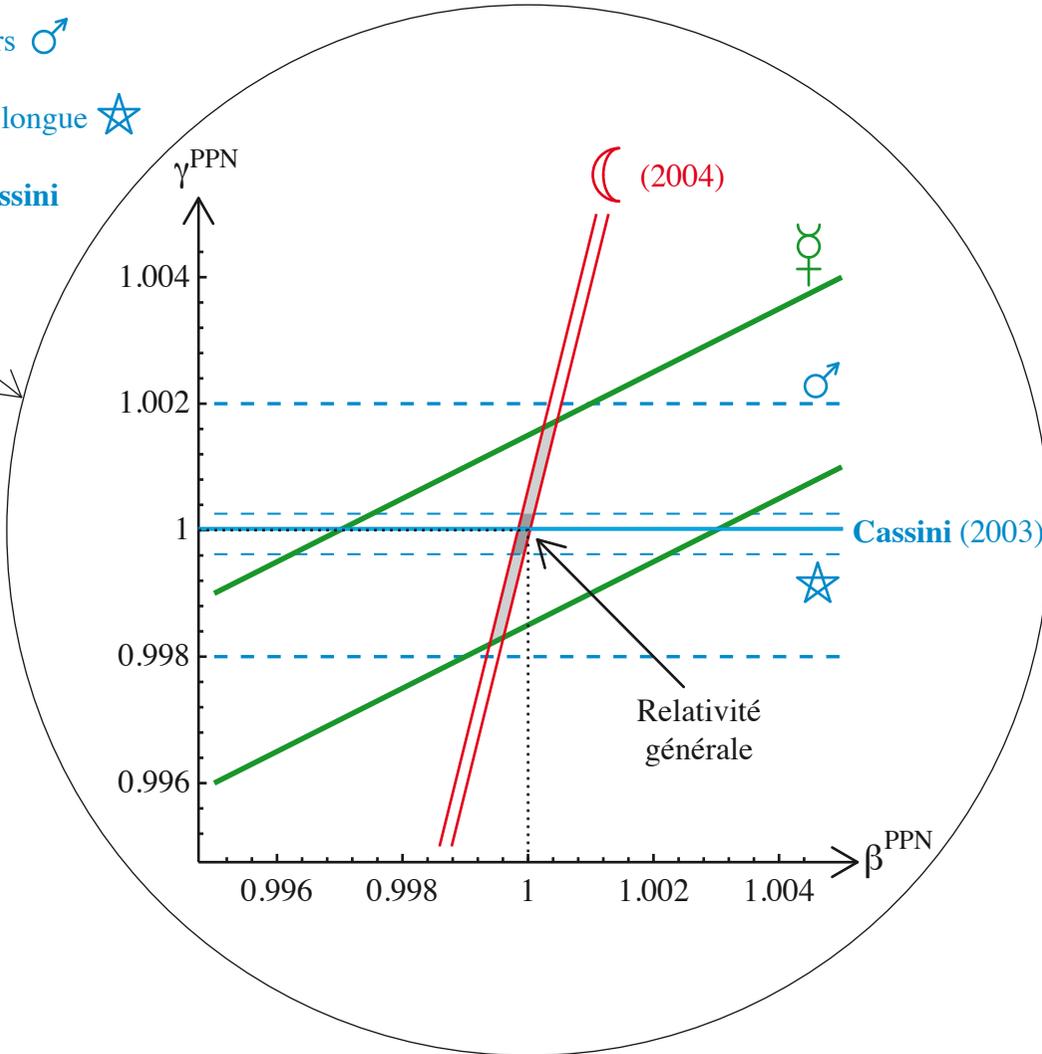
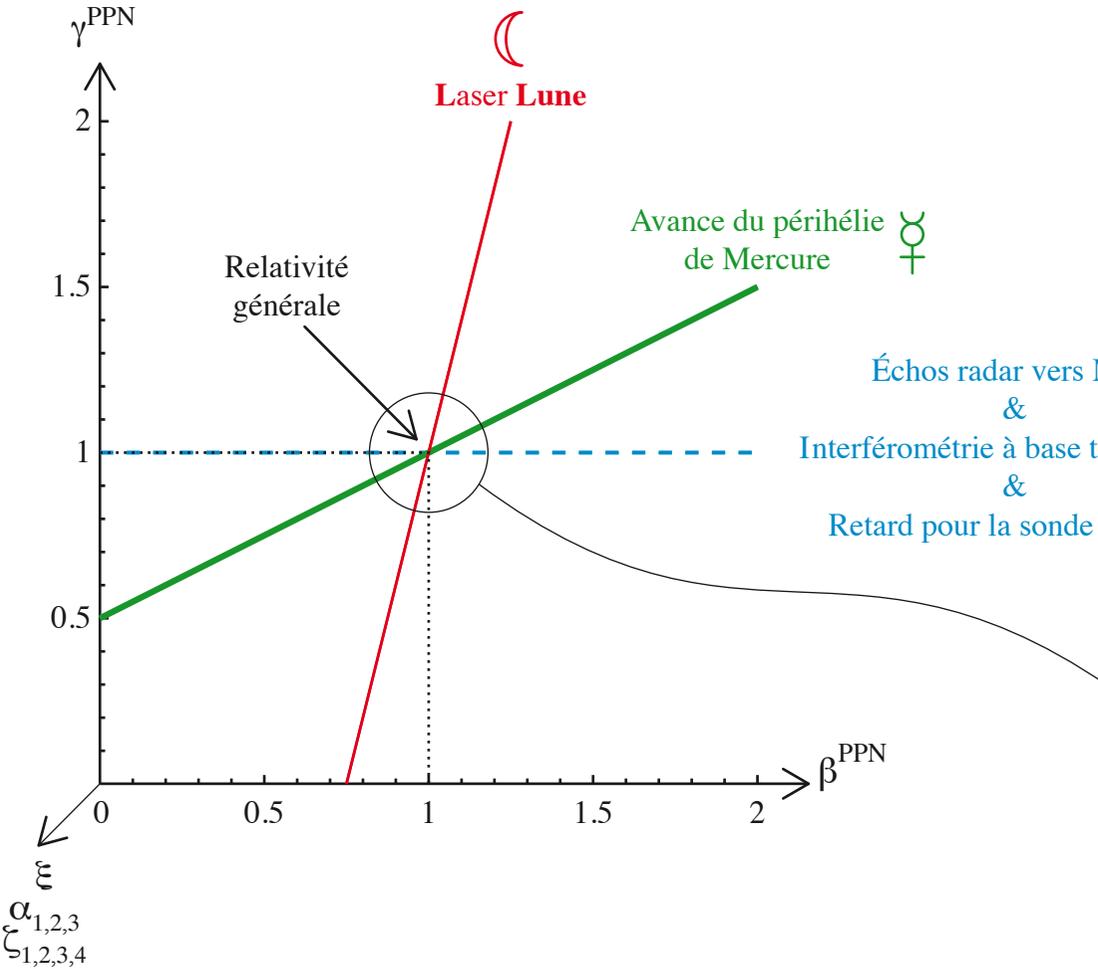
Tests du système solaire dans le cadre Paramétrisé Post-Newtonien



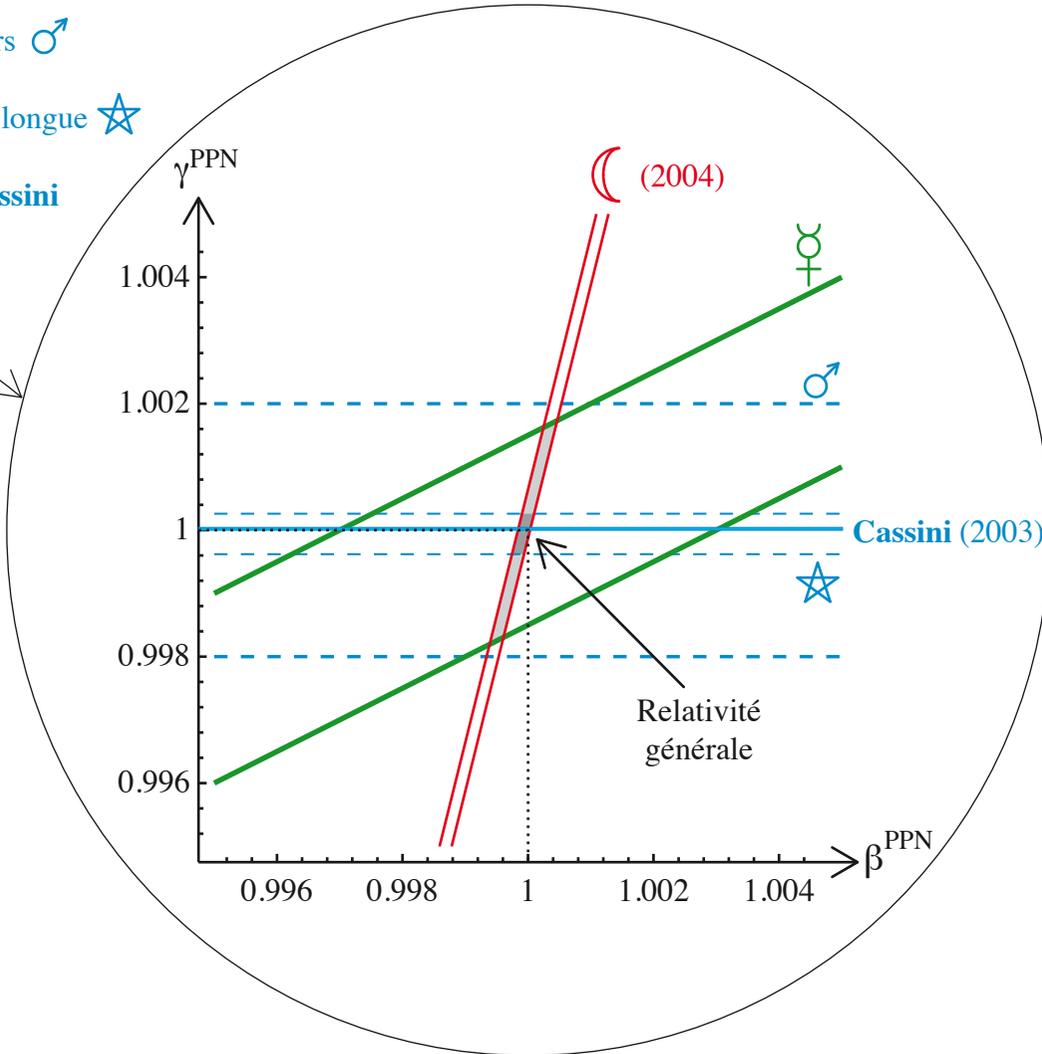
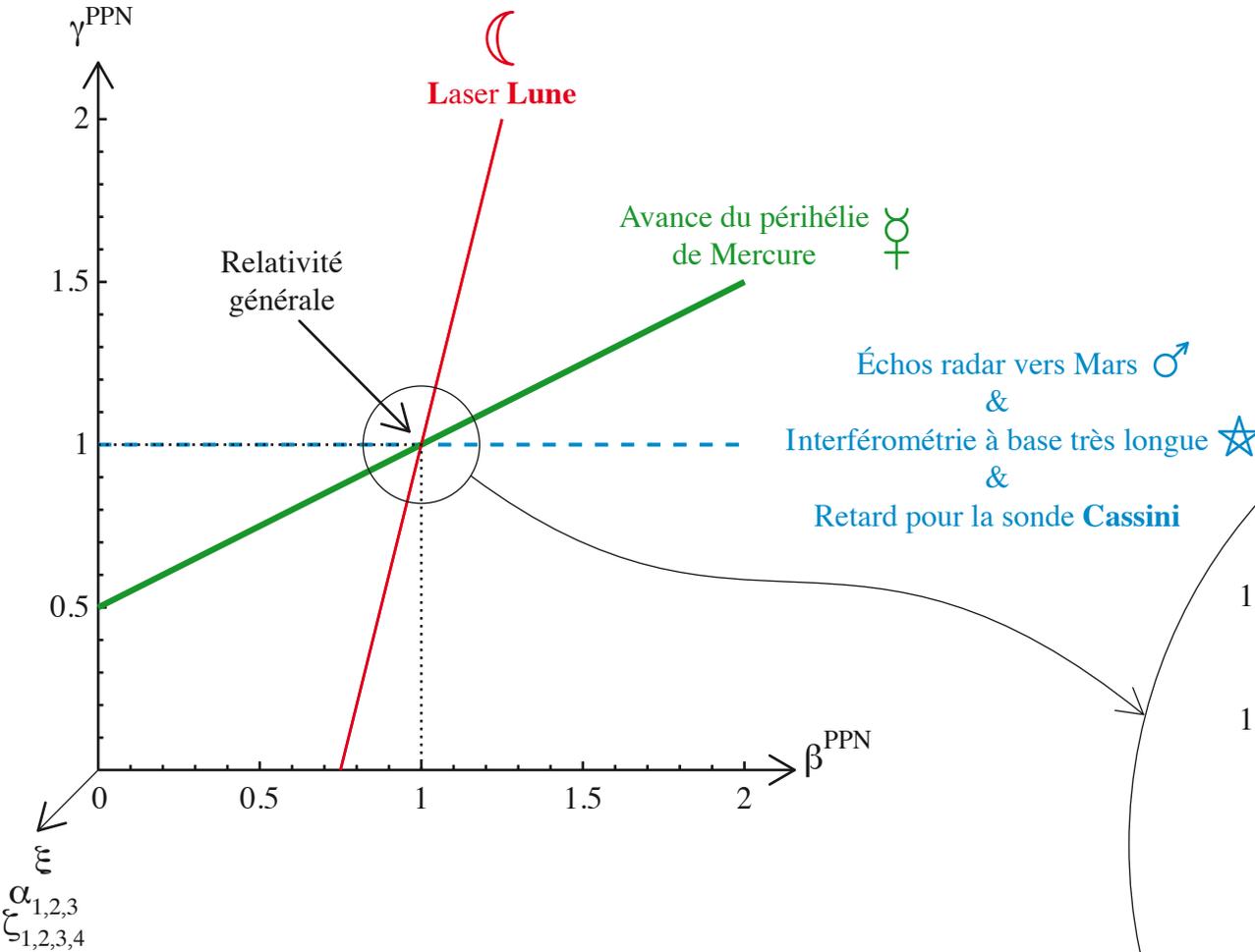
Tests du système solaire dans le cadre Paramétrisé Post-Newtonien



Tests du système solaire dans le cadre Paramétrisé Post-Newtonien

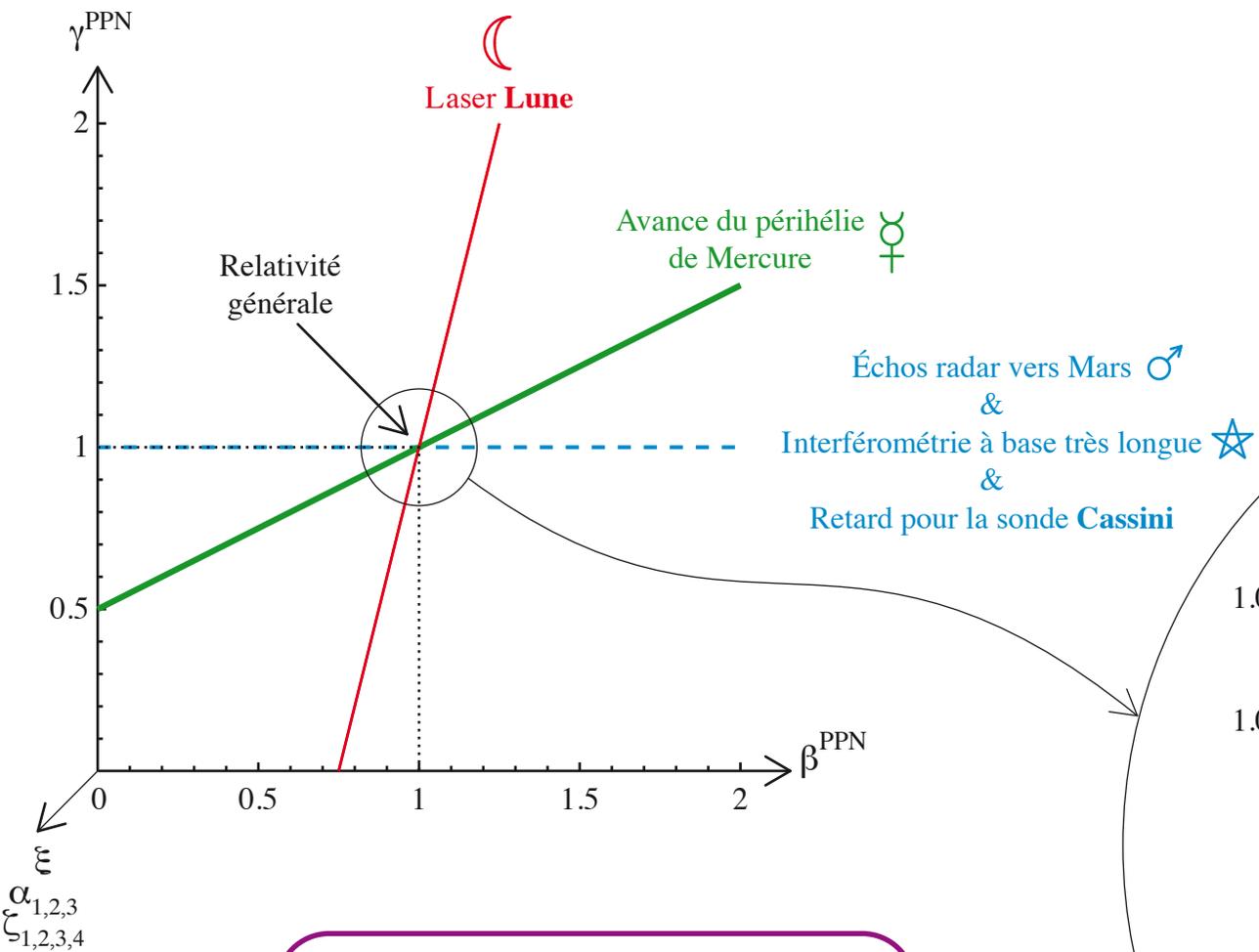


Tests du système solaire dans le cadre Paramétrisé Post-Newtonien

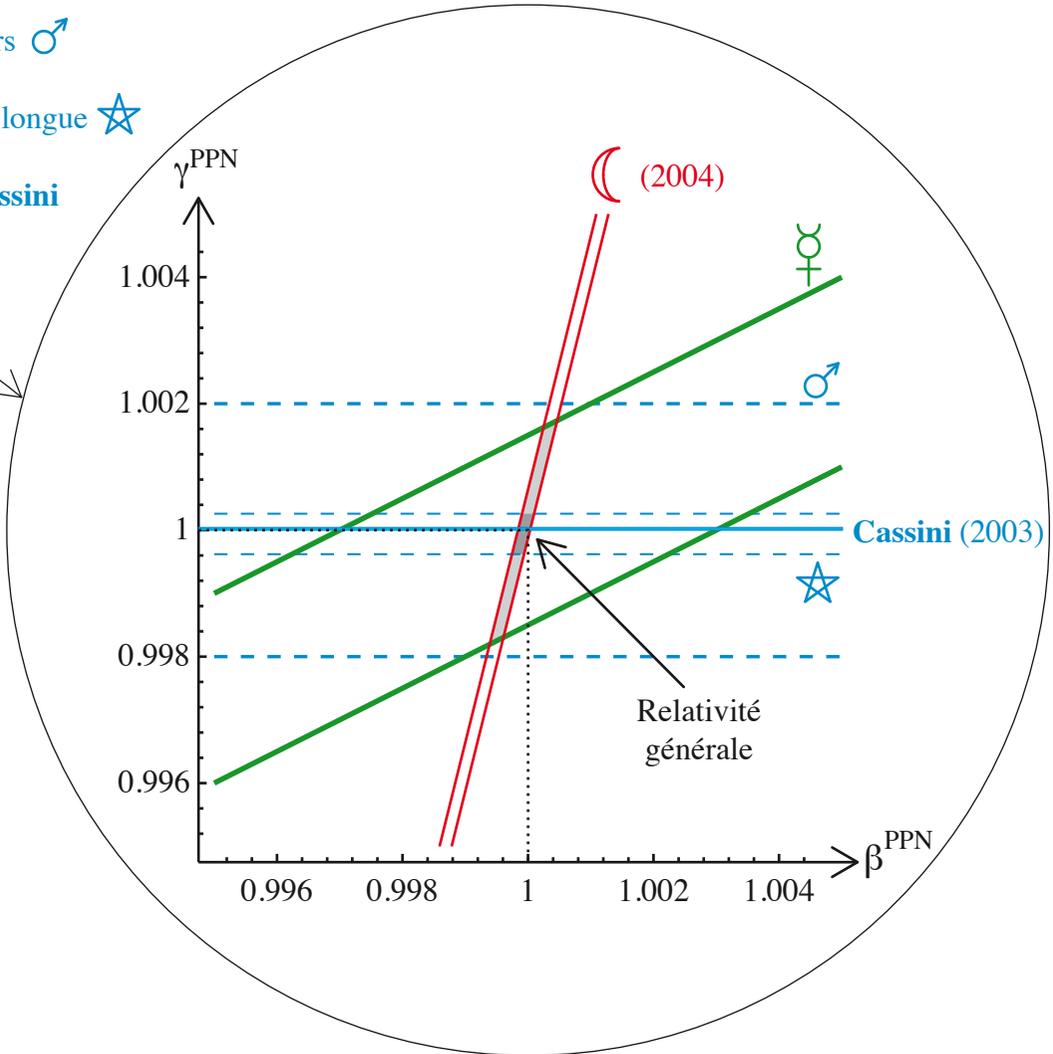


La RELATIVITÉ GÉNÉRALE
est testée à **0,002 %** près
dans le système solaire

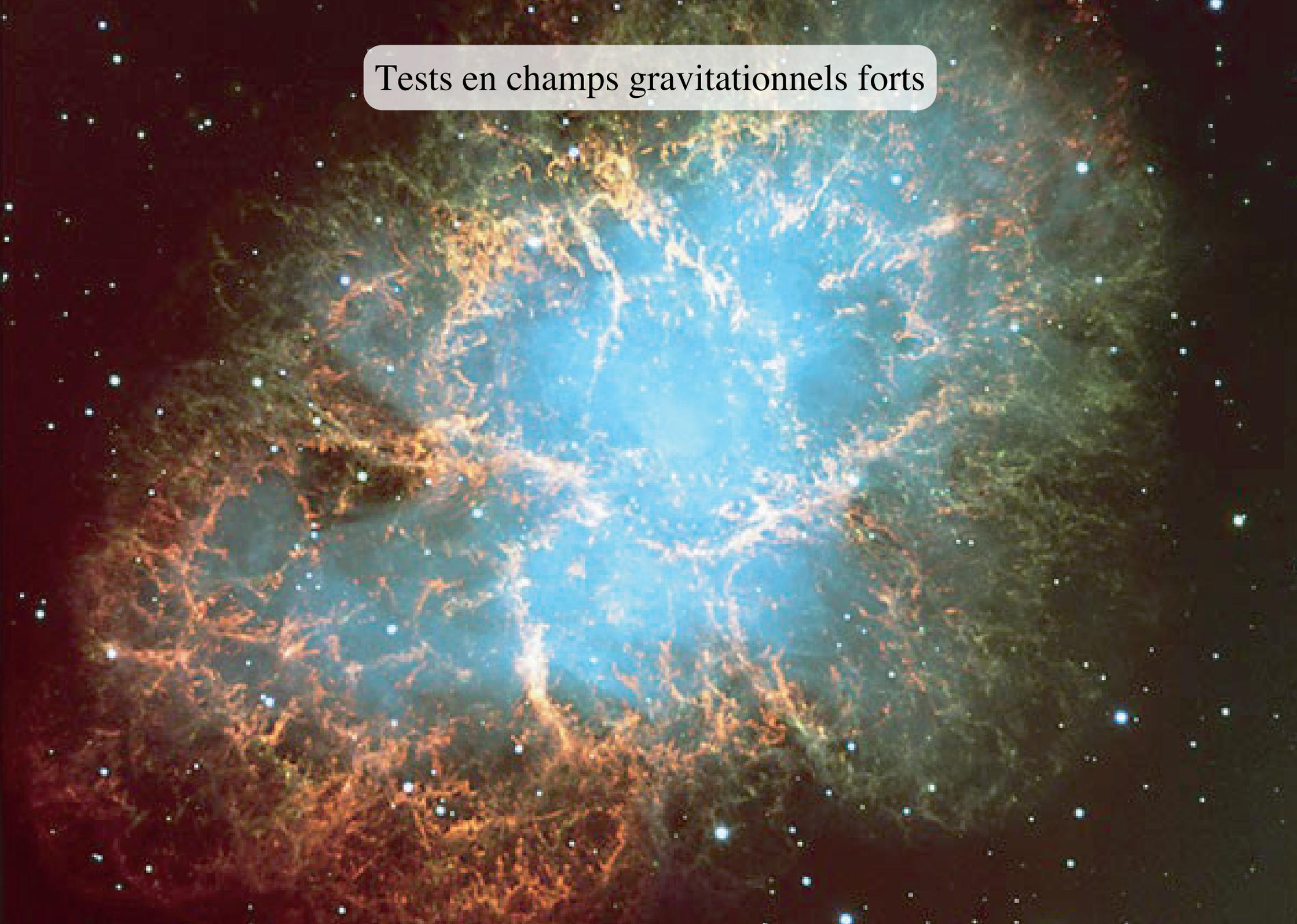
Tests du système solaire dans le cadre Paramétrisé Post-Newtonien



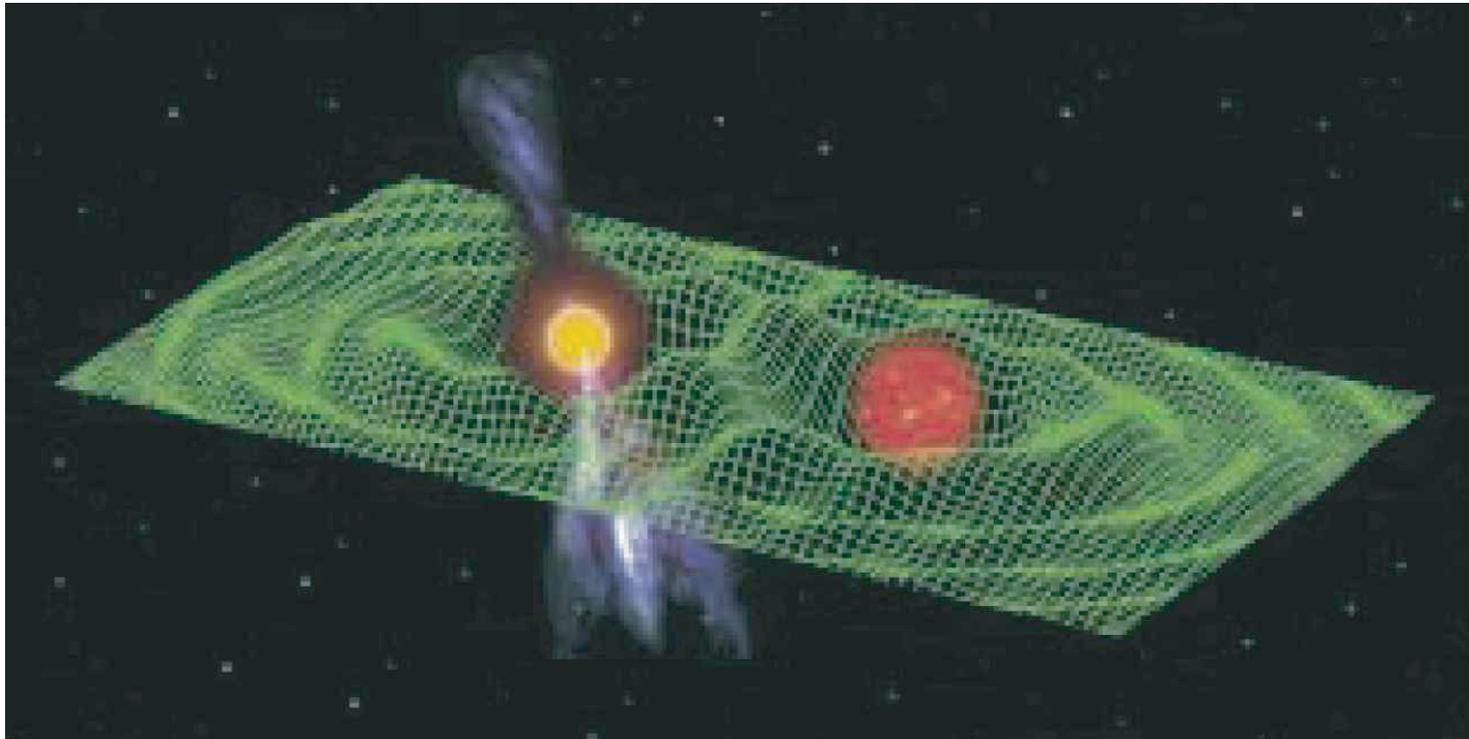
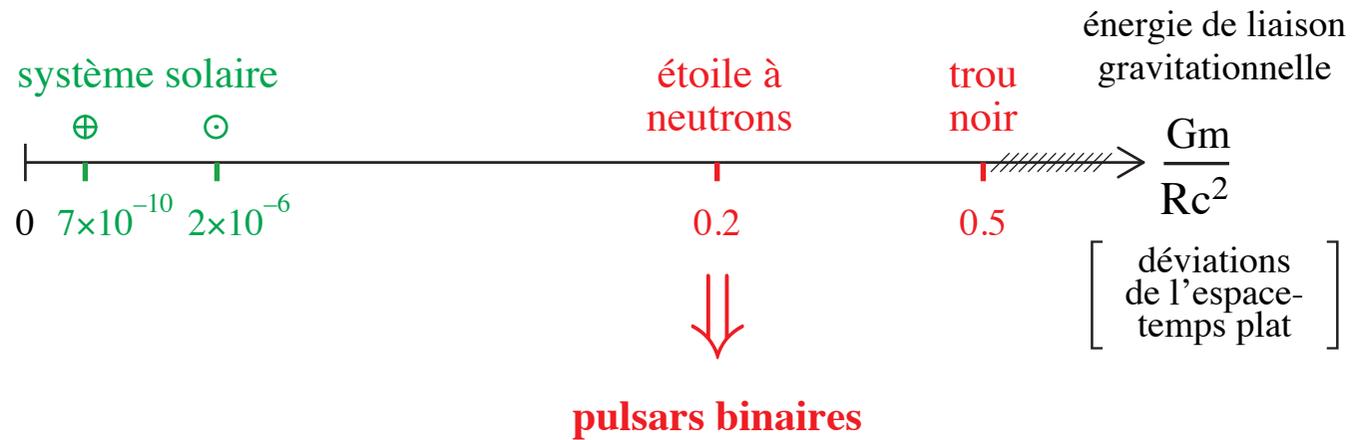
La RELATIVITÉ GÉNÉRALE
 est essentiellement la **seule**
 théorie compatible avec les
 observations en champs faibles



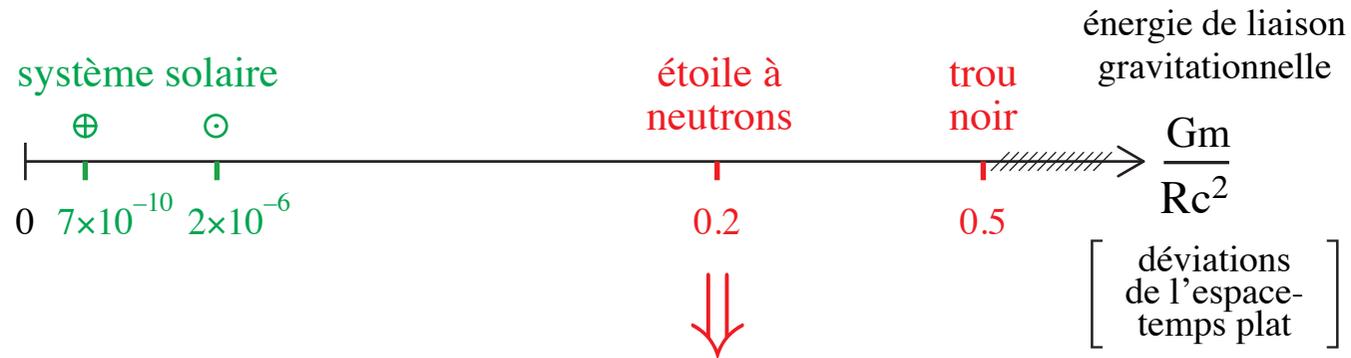
Tests en champs gravitationnels forts



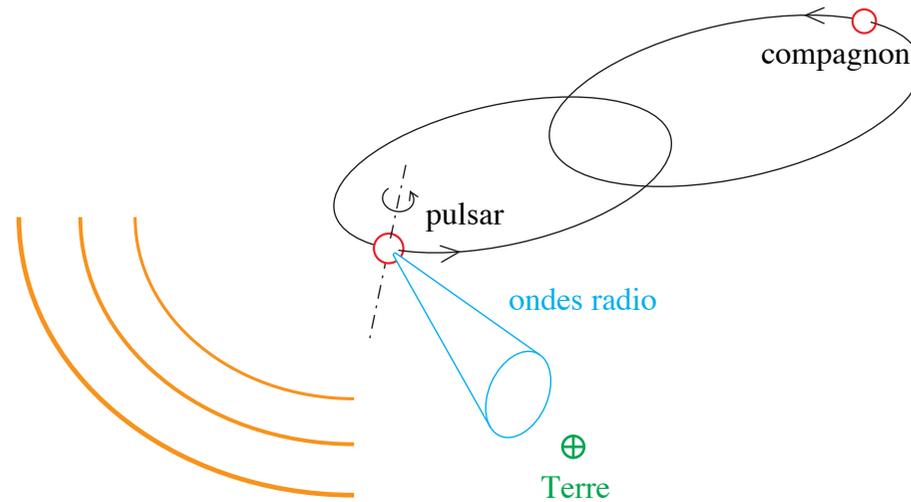
Tests en champs gravitationnels forts



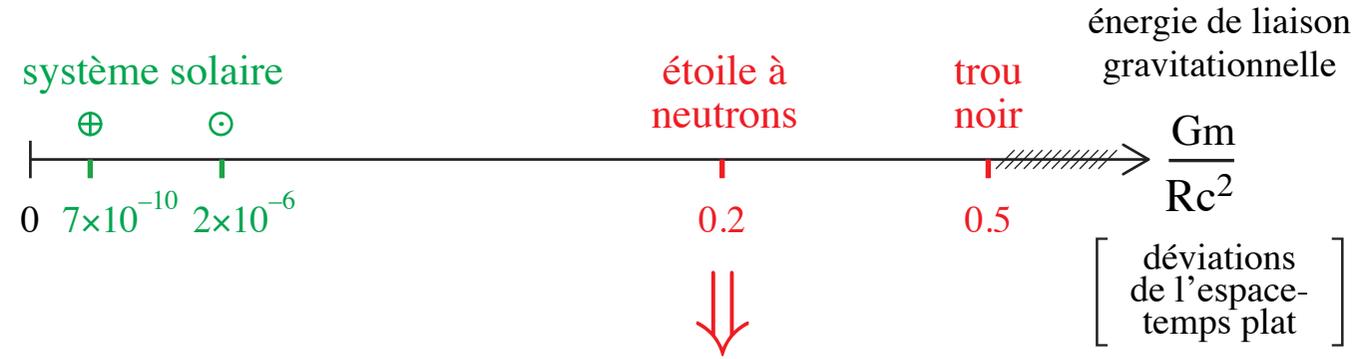
Tests en champs gravitationnels forts



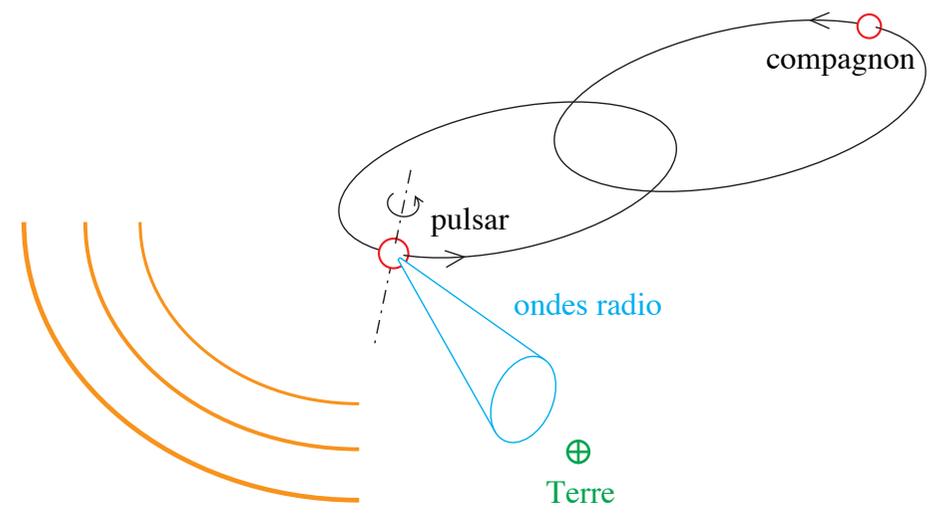
pulsars binaires



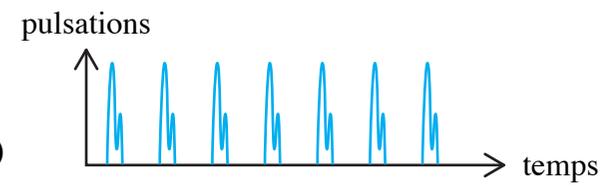
Tests en champs gravitationnels forts



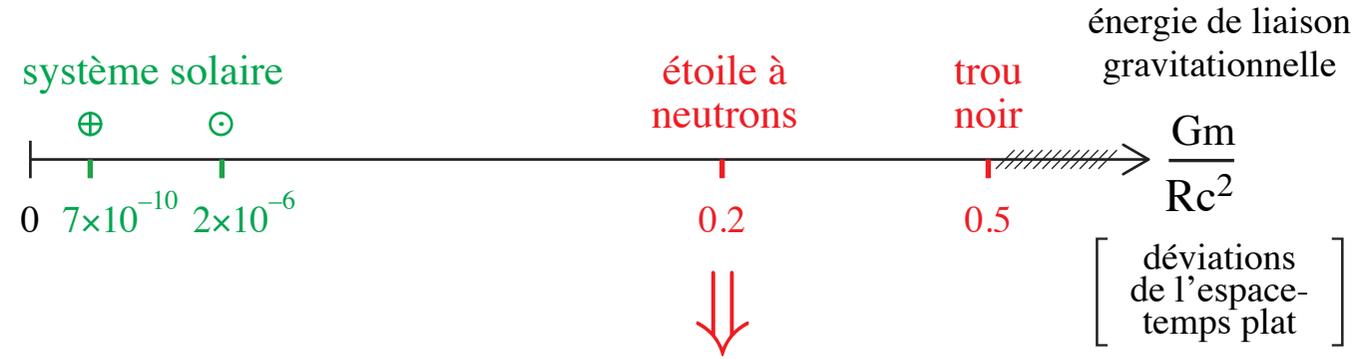
pulsars binaires



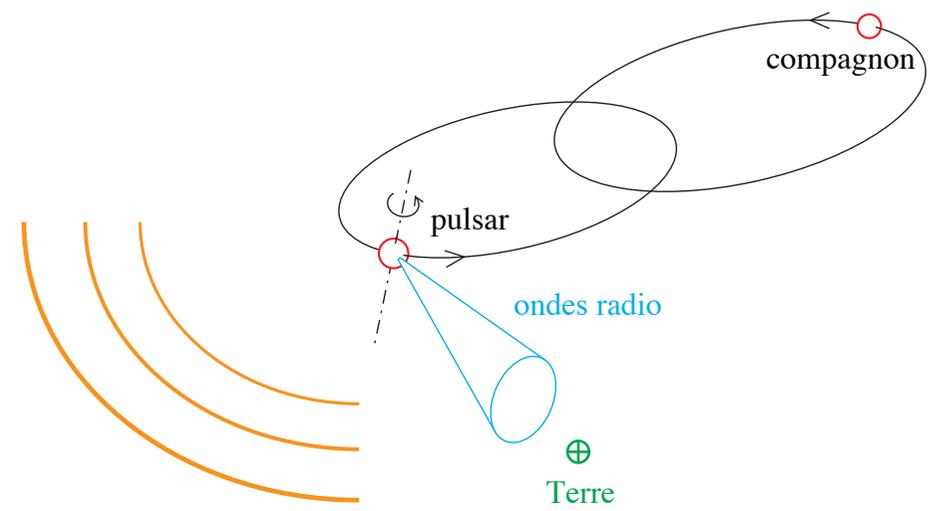
pulsar = horloge (très stable)



Tests en champs gravitationnels forts

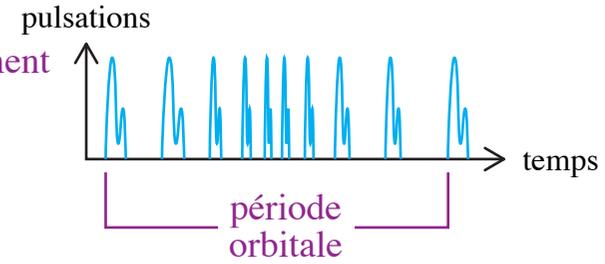
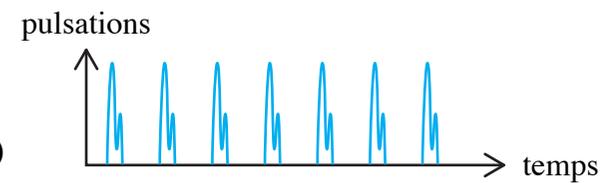


pulsars binaires



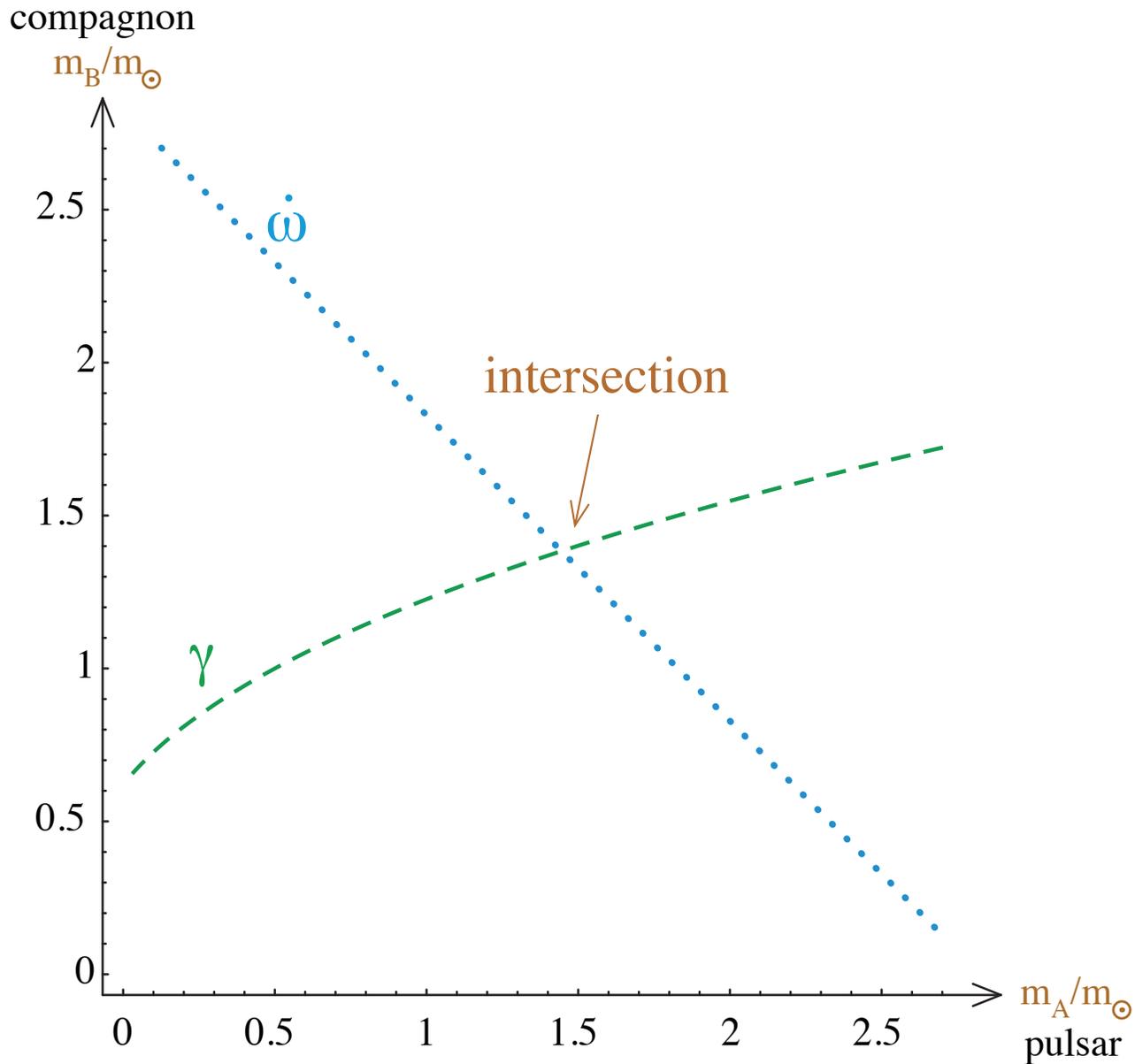
pulsar = horloge (très stable)

pulsar binaire = horloge en mouvement

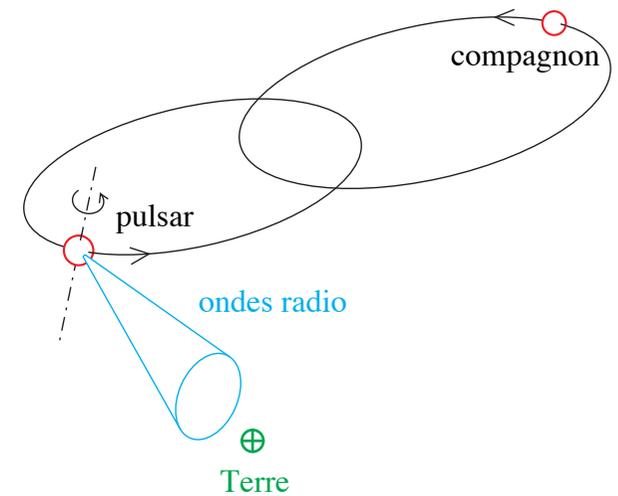


Le pulsar binaire
PSR B1913+16

2 observables = **détermination des masses**



R. Hulse & J. Taylor
(prix Nobel 1993)

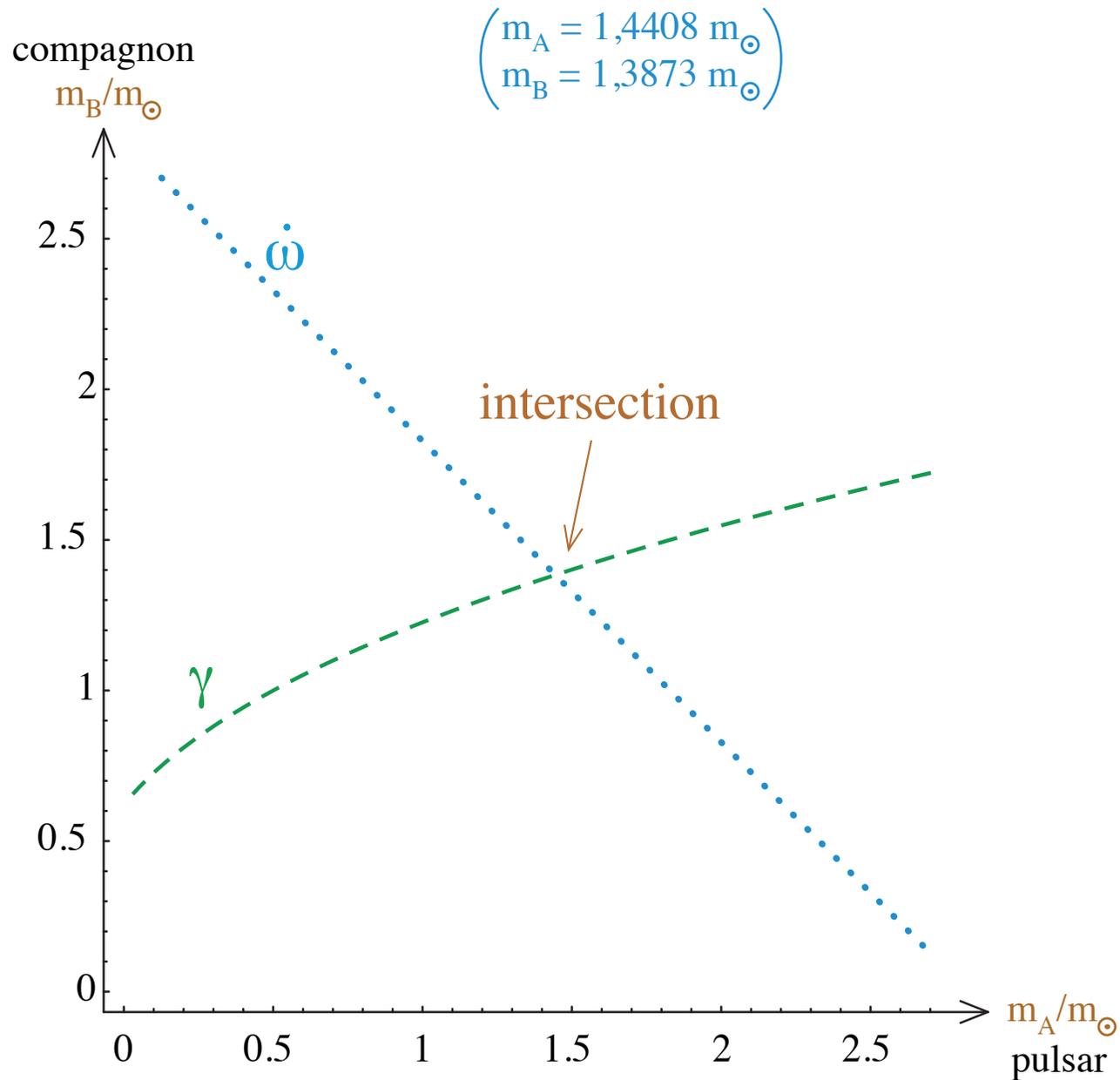


$$P = 7 \text{ h } 45 \text{ min } 6,9795859 \text{ s}$$

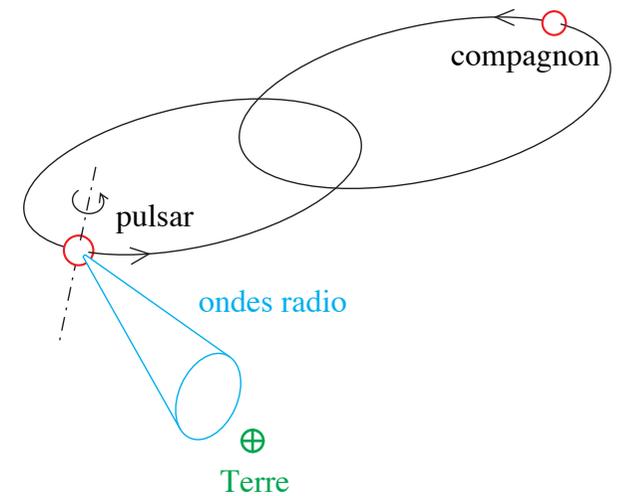
$$\dot{\omega} = 4,22660^\circ/\text{an}$$

Le pulsar binaire
PSR B1913+16

2 observables = **détermination des masses**



R. Hulse & J. Taylor
(prix Nobel 1993)

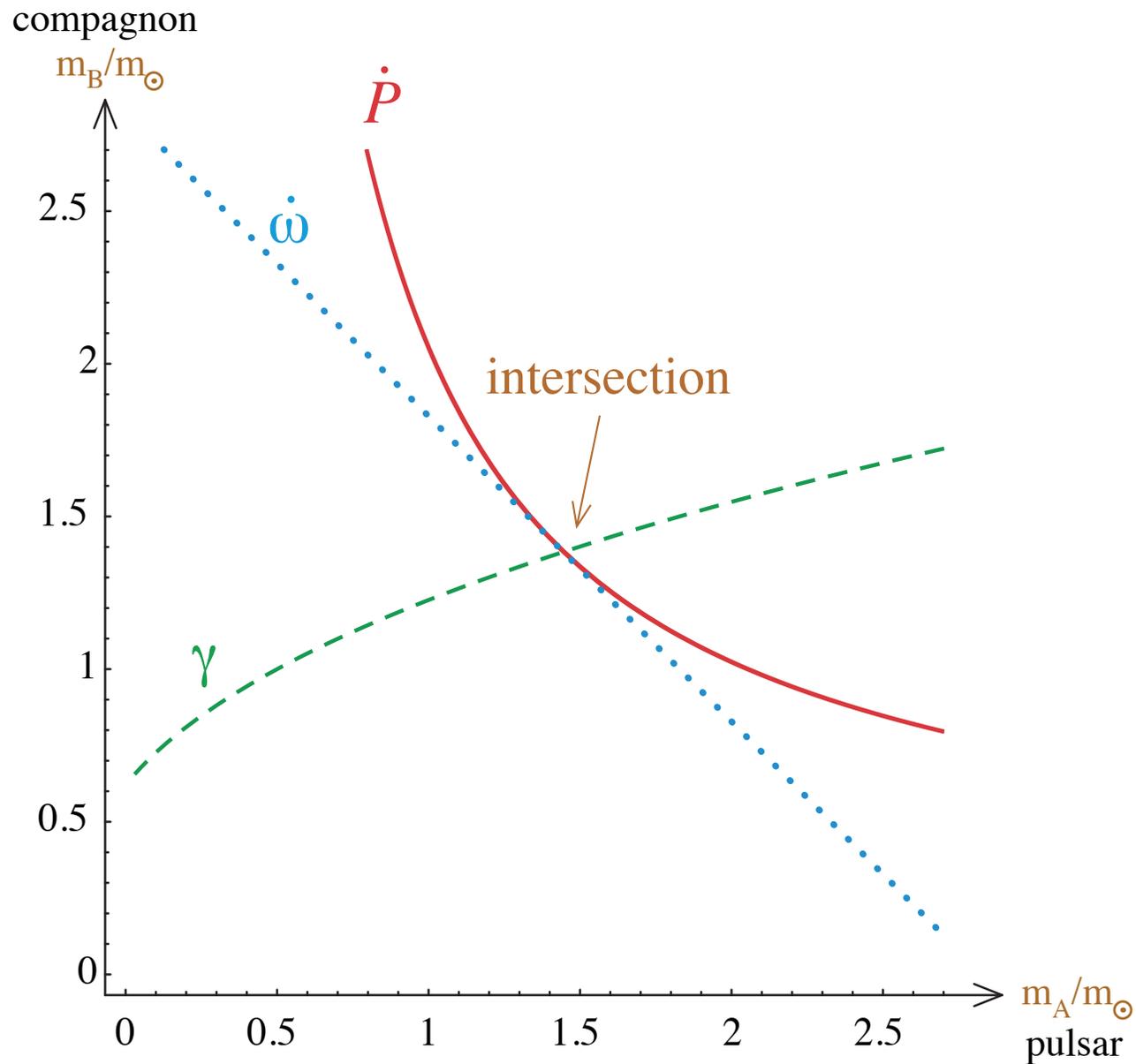


$P = 7 \text{ h } 45 \text{ min } 6,9795859 \text{ s}$

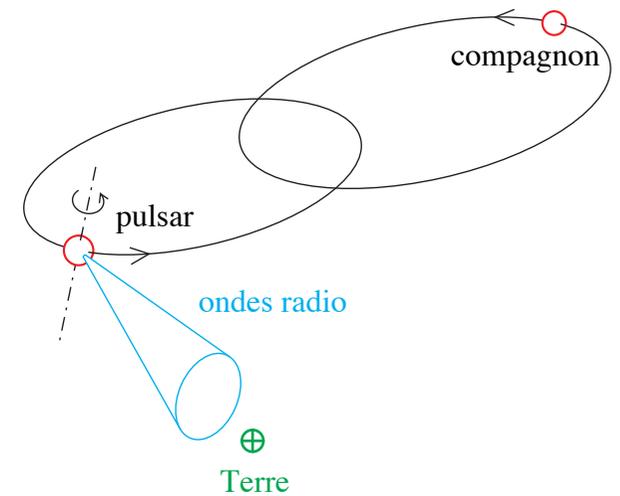
$\dot{\omega} = 4,22660^\circ/\text{an}$

Le pulsar binaire
PSR B1913+16

3 observables – 2 masses inconnues = 1 test



R. Hulse & J. Taylor
(prix Nobel 1993)

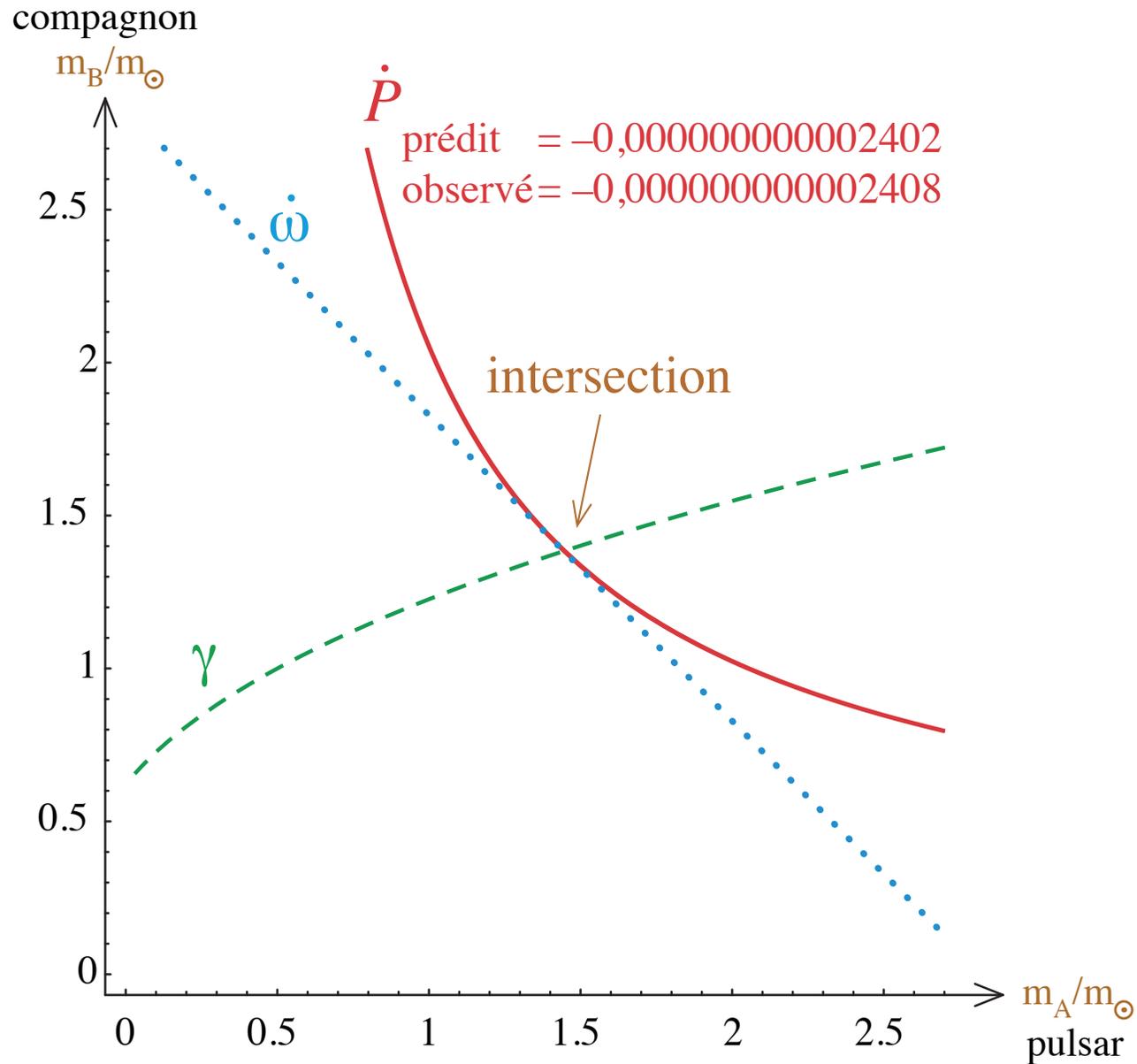


$$P = 7 \text{ h } 45 \text{ min } 6,9795859 \text{ s}$$

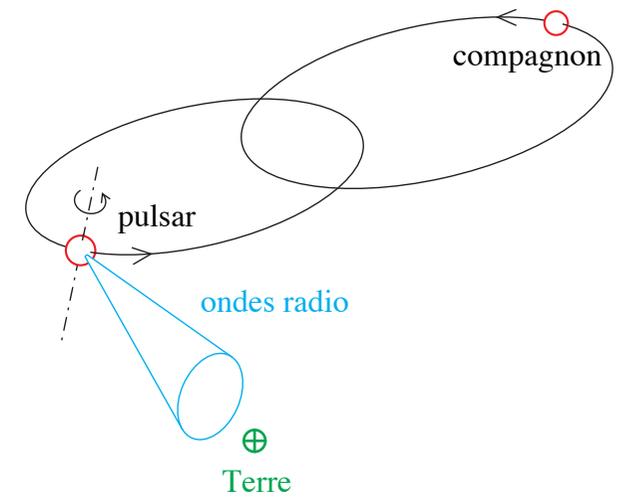
$$\dot{\omega} = 4,22660^\circ/\text{an}$$

Le pulsar binaire
PSR B1913+16

3 observables – 2 masses inconnues = 1 test



R. Hulse & J. Taylor
(prix Nobel 1993)

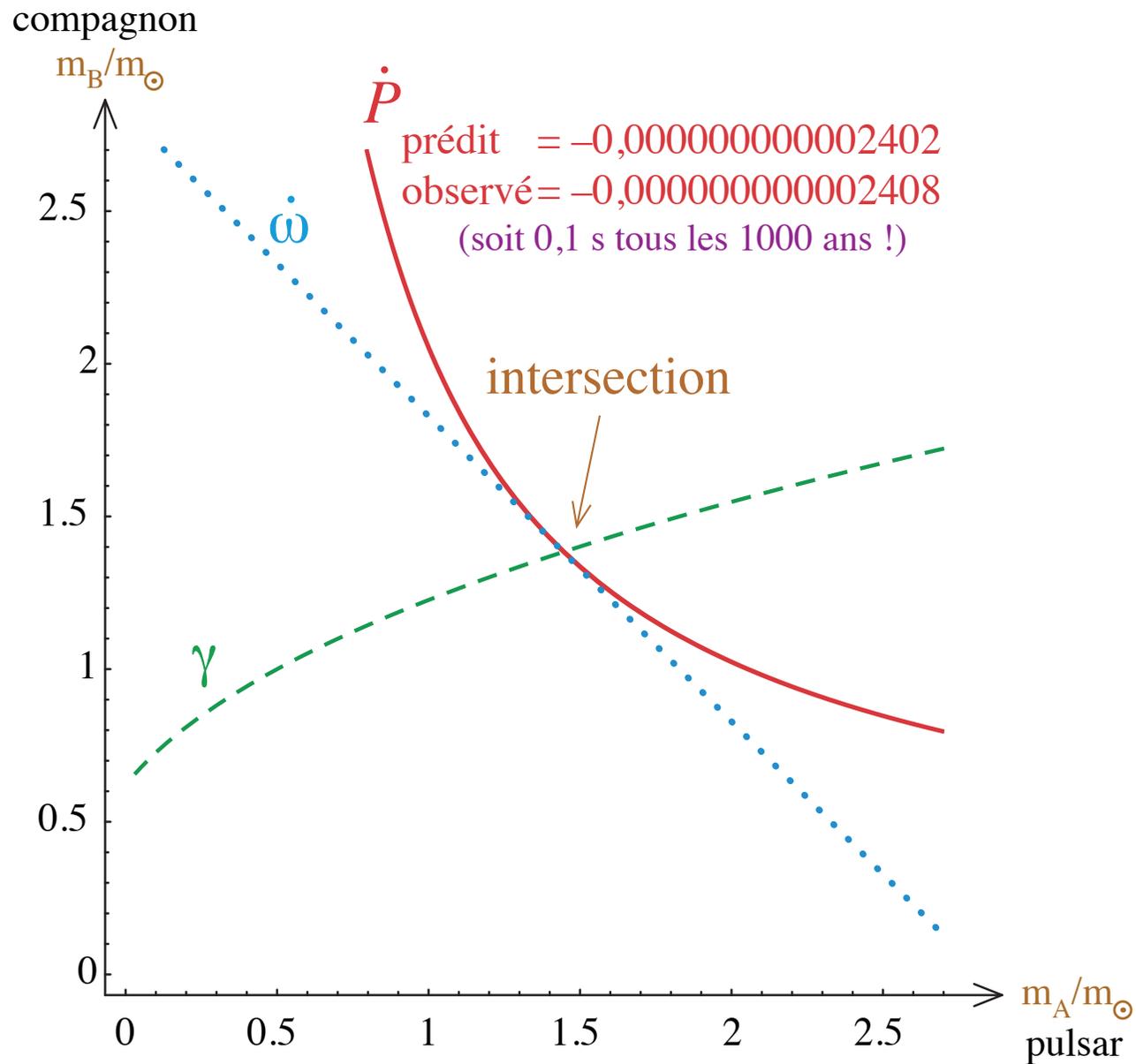


$P = 7 \text{ h } 45 \text{ min } 6,9795859 \text{ s}$

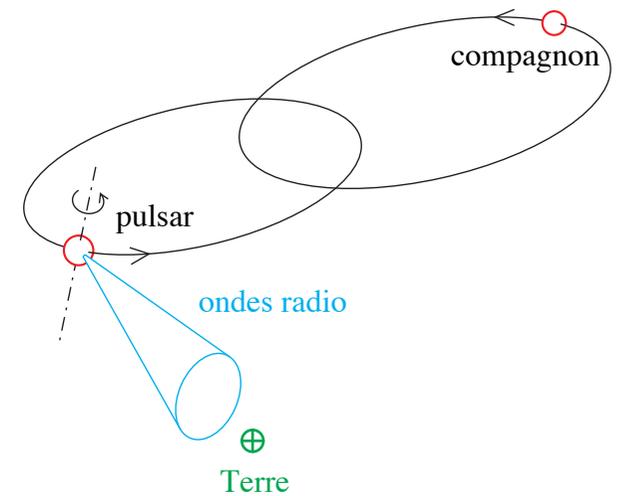
$\dot{\omega} = 4,22660^\circ/\text{an}$

Le pulsar binaire
PSR B1913+16

3 observables – 2 masses inconnues = 1 test



R. Hulse & J. Taylor
(prix Nobel 1993)

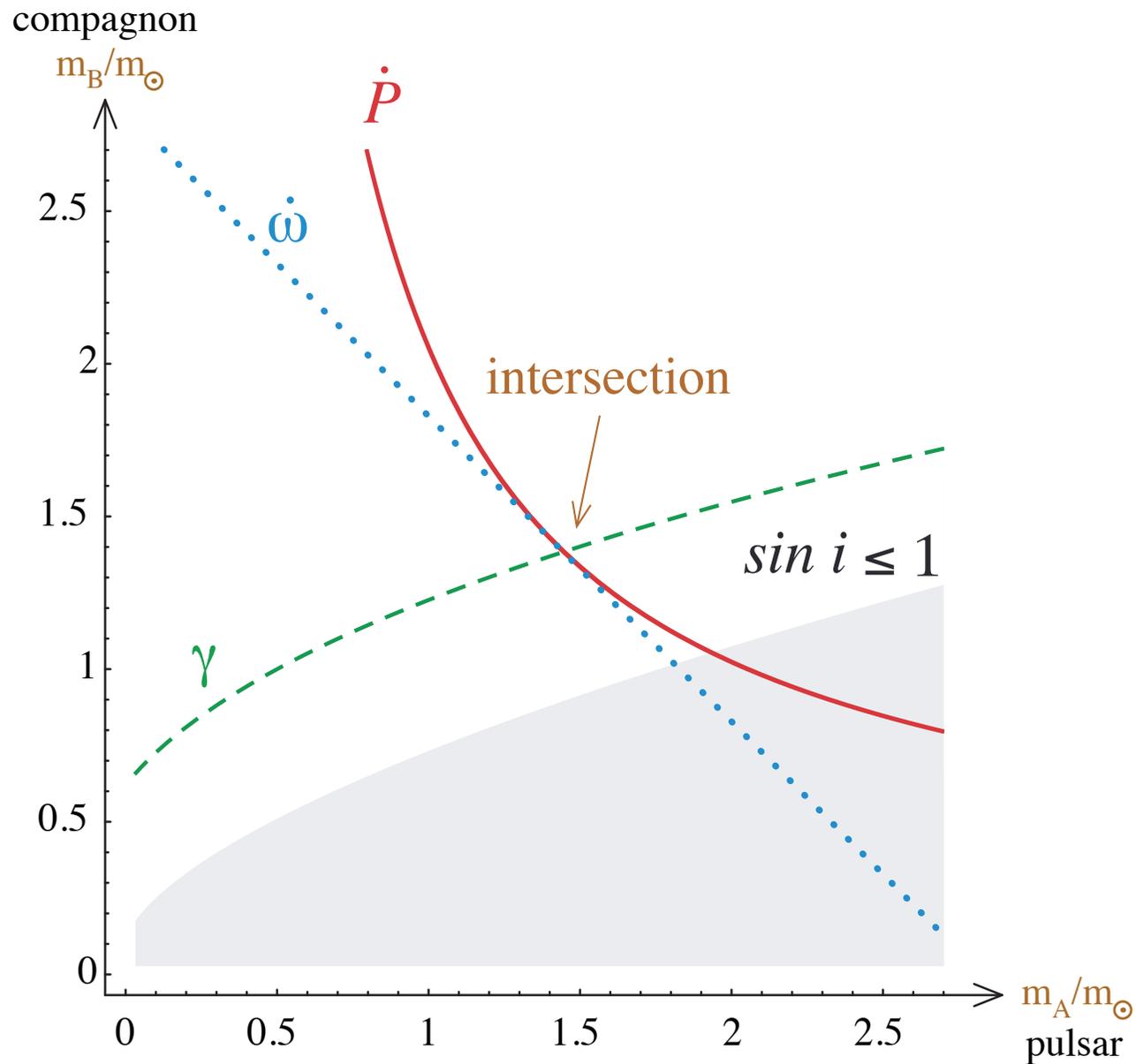


$P = 7 \text{ h } 45 \text{ min } 6,9795859 \text{ s}$

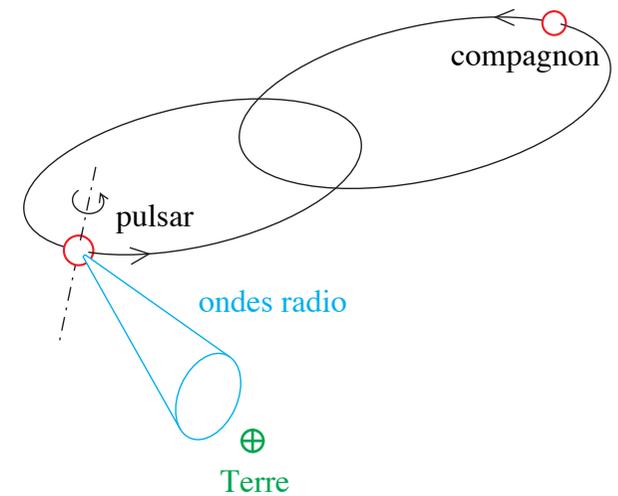
$\dot{\omega} = 4,22660^\circ/\text{an}$

Le pulsar binaire
PSR B1913+16

3 observables – 2 masses inconnues = 1 test



R. Hulse & J. Taylor
(prix Nobel 1993)



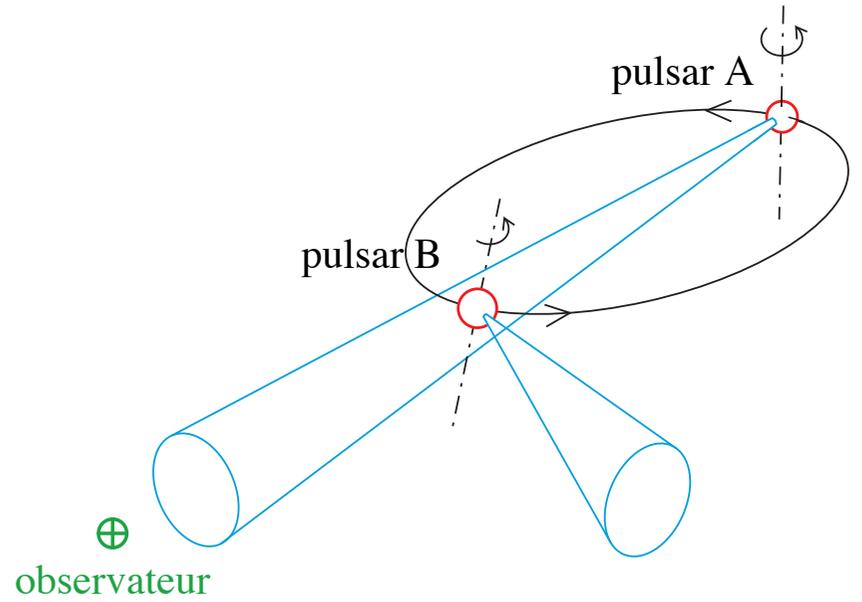
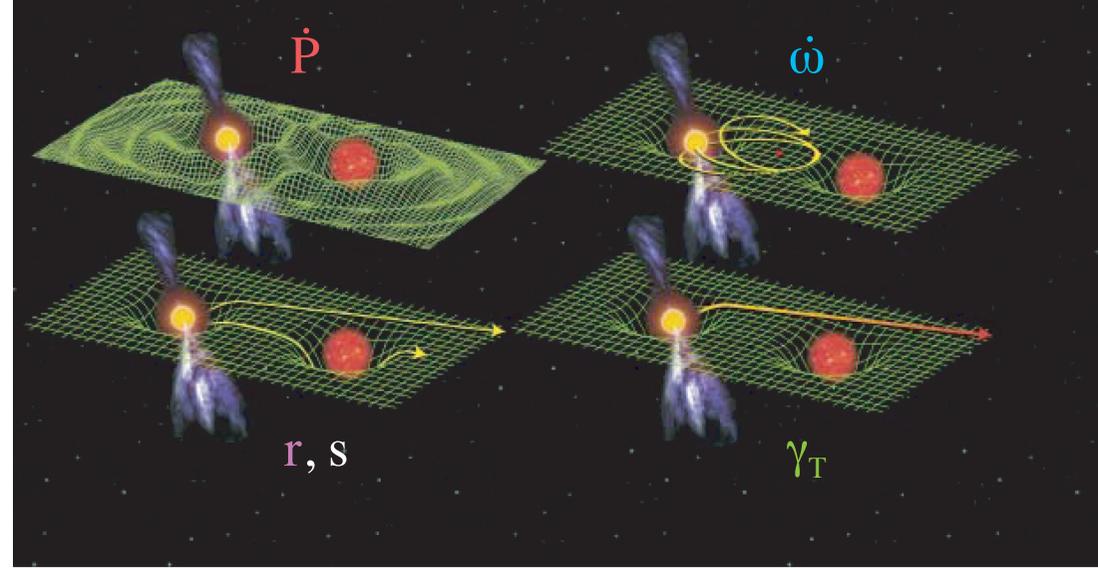
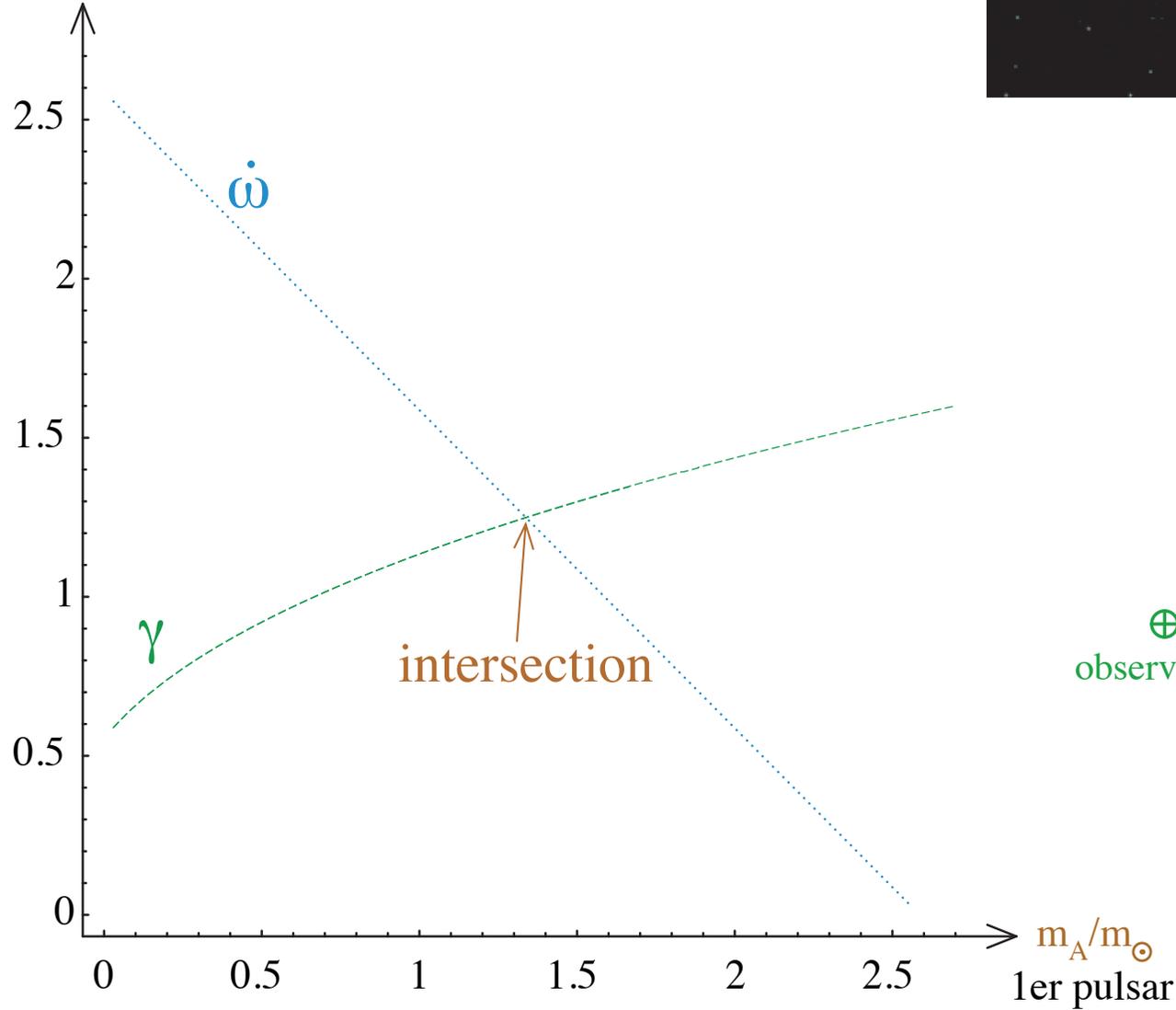
$$P = 7 \text{ h } 45 \text{ min } 6,9795859 \text{ s}$$

$$\dot{\omega} = 4,22660^\circ/\text{an}$$

Le pulsar double
PSR J0737–3039

2 observables = **détermination des masses**

2nd pulsar
 m_B/m_\odot

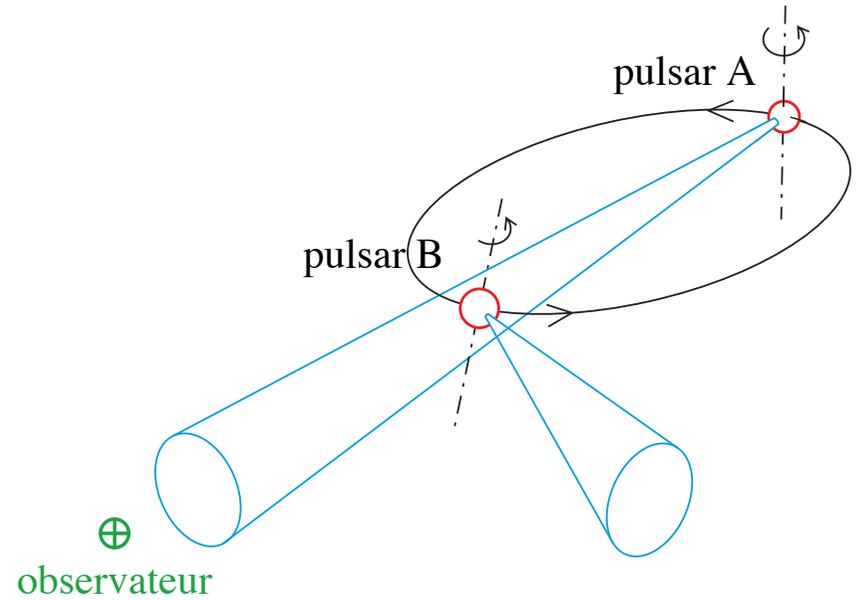
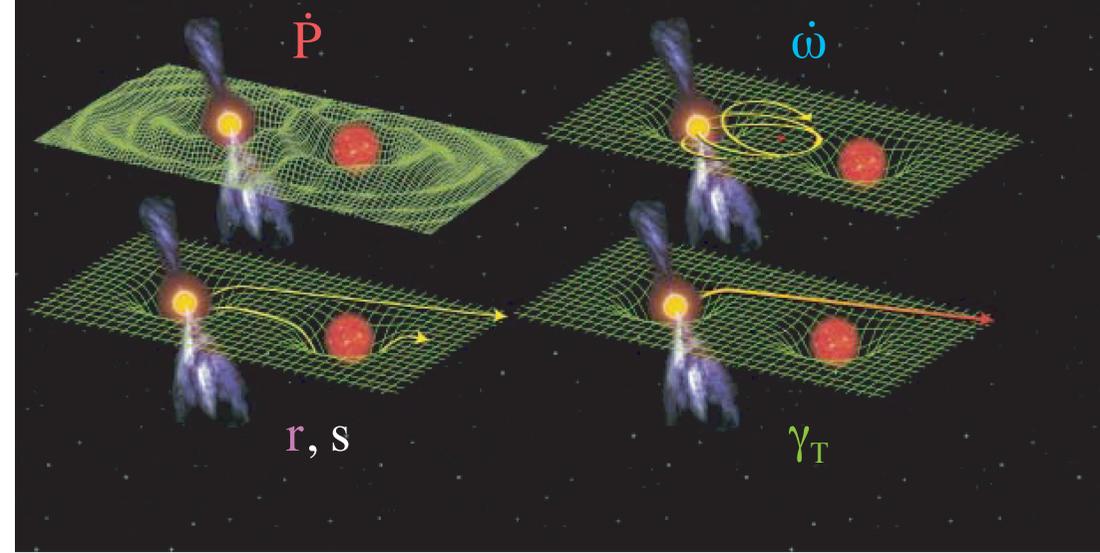
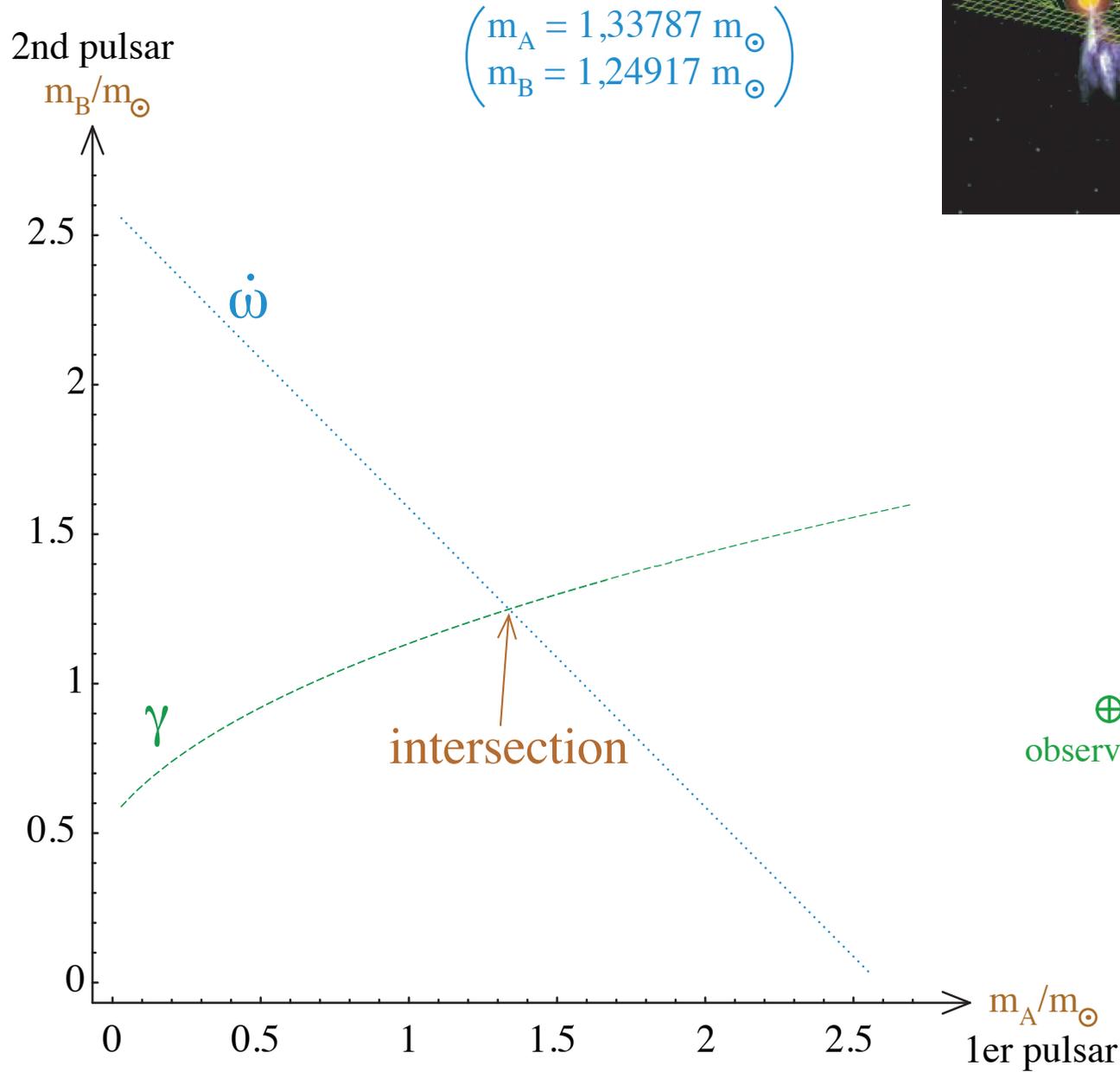


$$P = 2 \text{ h } 27 \text{ min } 14,5350 \text{ s}$$

$$\dot{\omega} = 16,8993^\circ/\text{an}$$

Le pulsar double
PSR J0737–3039

2 observables = **détermination des masses**



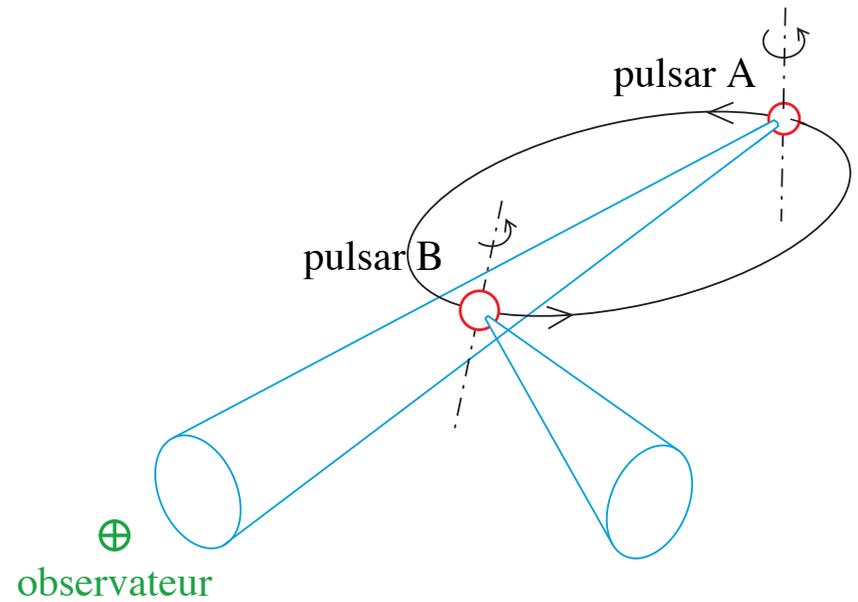
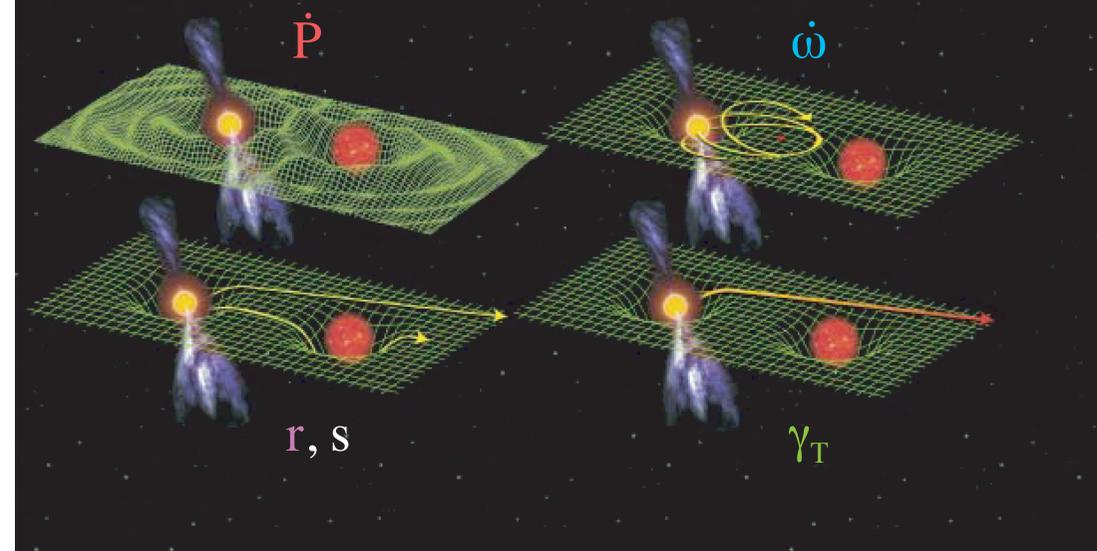
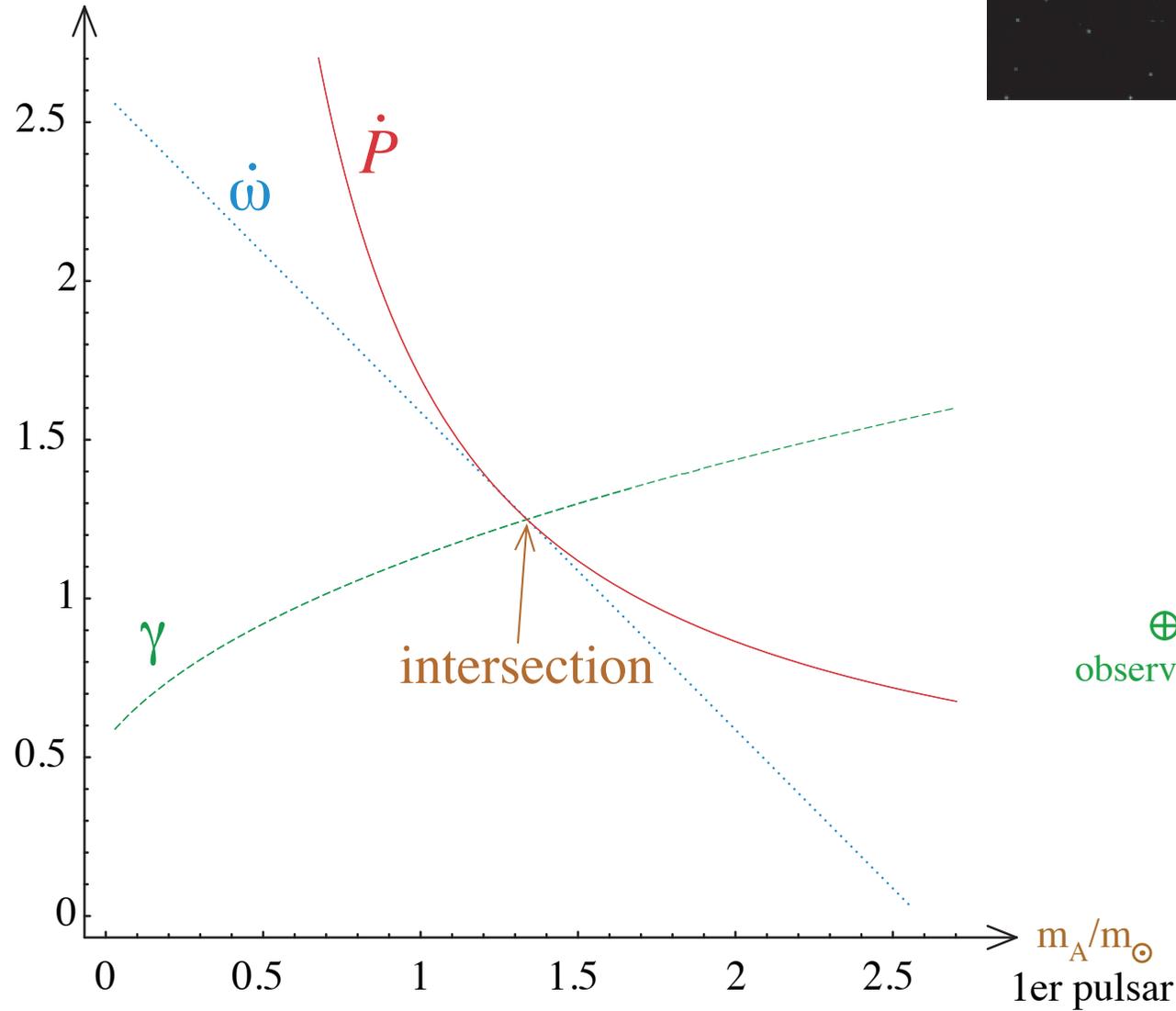
$P = 2 \text{ h } 27 \text{ min } 14,5350 \text{ s}$

$\dot{\omega} = 16,8993^\circ/\text{an}$

Le pulsar double
PSR J0737–3039

3 observables – 2 masses inconnues = 1 test

2nd pulsar
 m_B/m_\odot



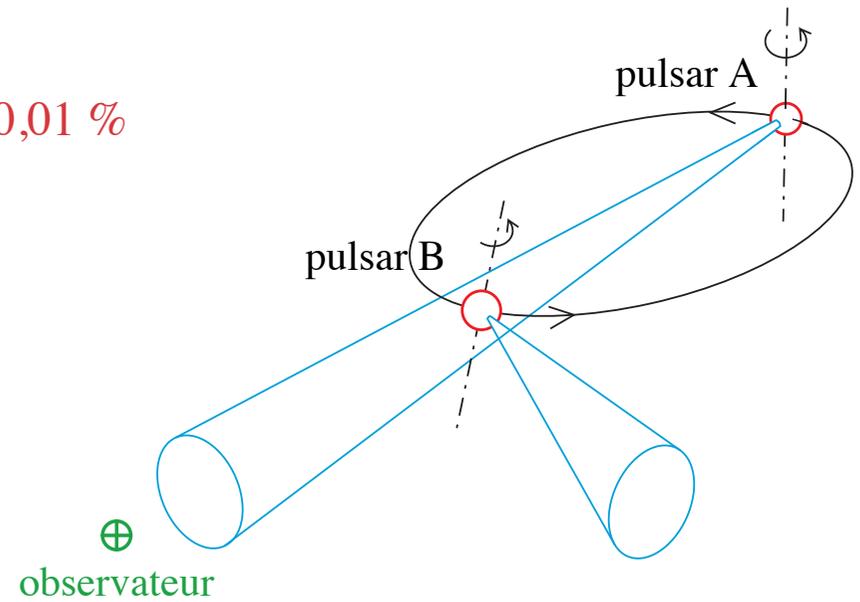
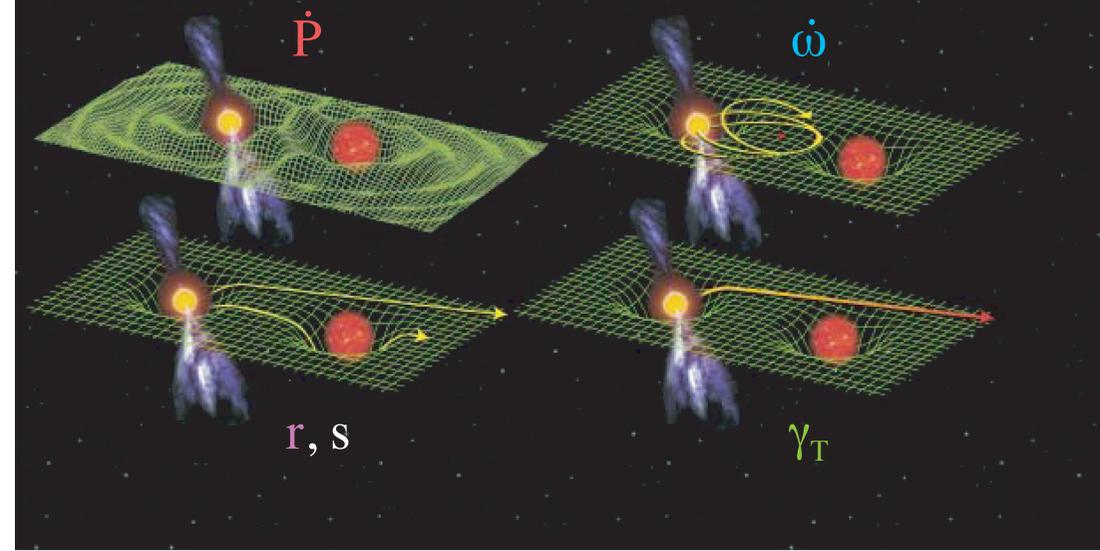
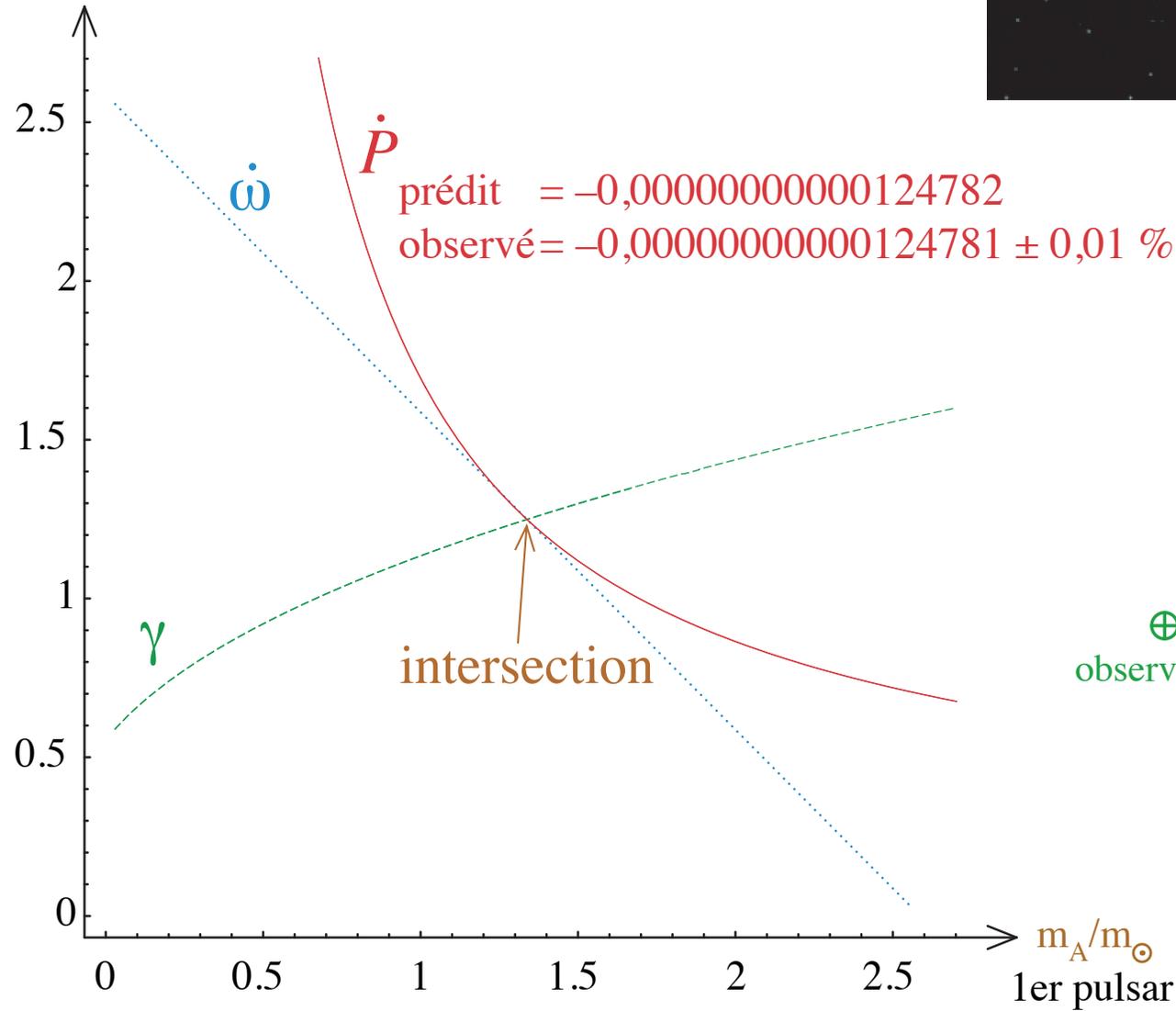
$$P = 2 \text{ h } 27 \text{ min } 14,5350 \text{ s}$$

$$\dot{\omega} = 16,8993^\circ/\text{an}$$

Le pulsar double
PSR J0737–3039

3 observables – 2 masses inconnues = 1 test

2nd pulsar
 m_B/m_\odot



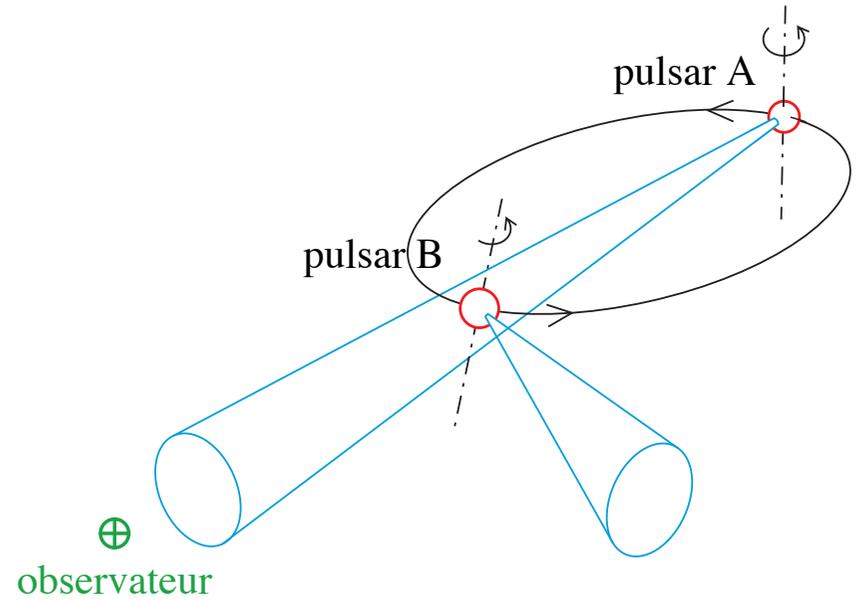
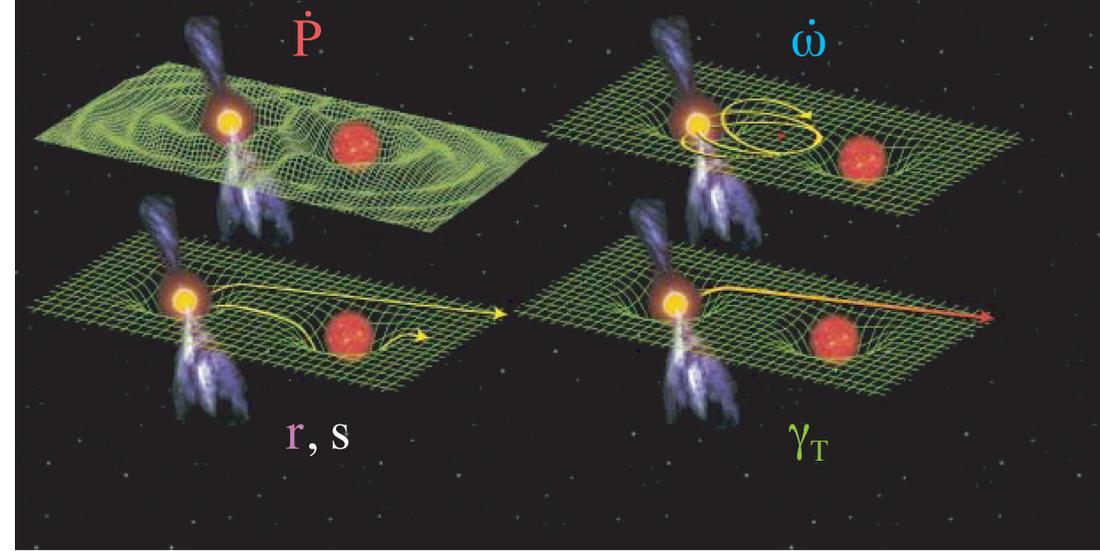
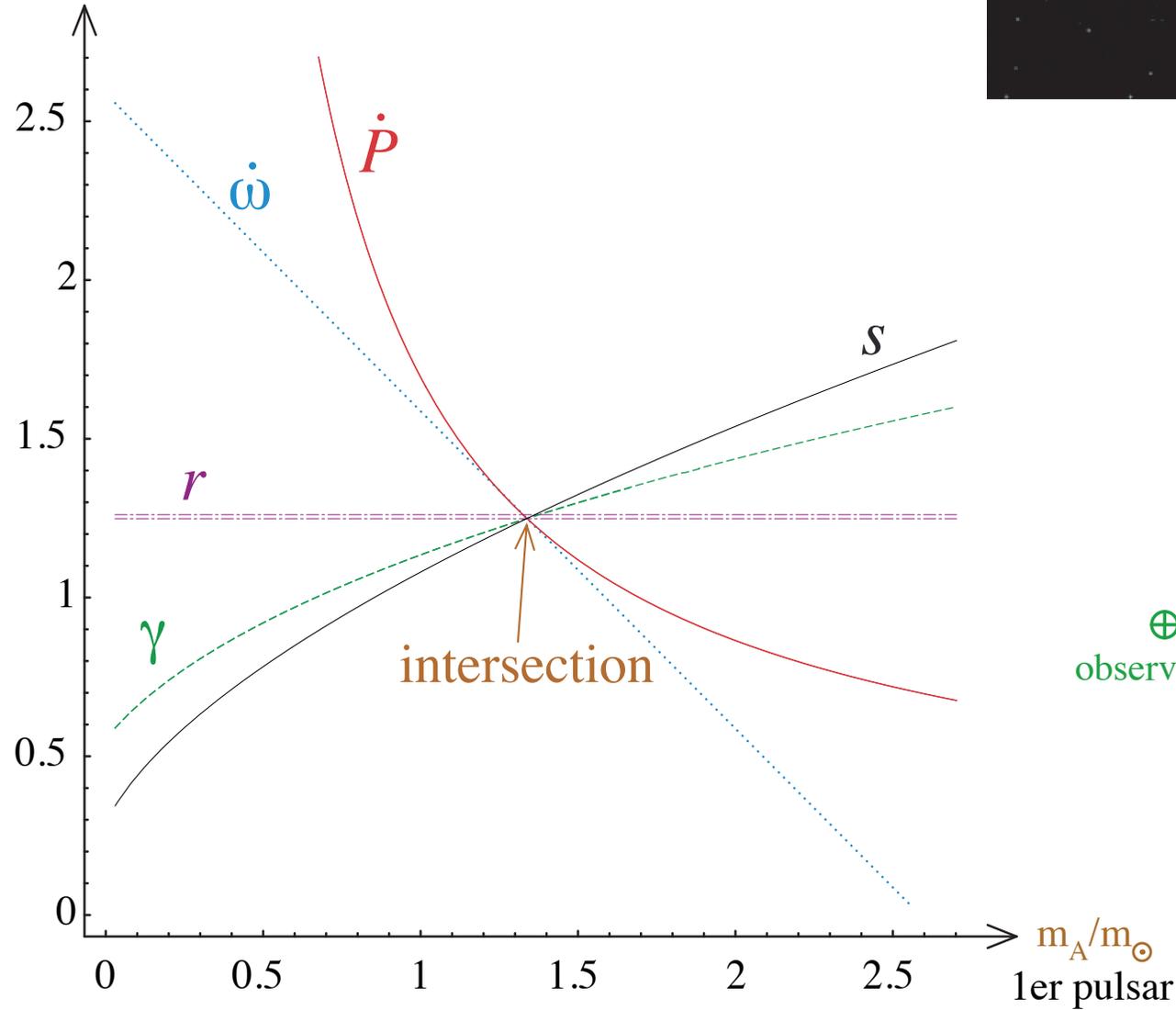
$P = 2 \text{ h } 27 \text{ min } 14,5350 \text{ s}$

$\dot{\omega} = 16,8993^\circ/\text{an}$

Le pulsar double
PSR J0737–3039

5 observables – 2 masses inconnues = 3 tests

2nd pulsar
 m_B/m_\odot



$$P = 2 \text{ h } 27 \text{ min } 14,5350 \text{ s}$$

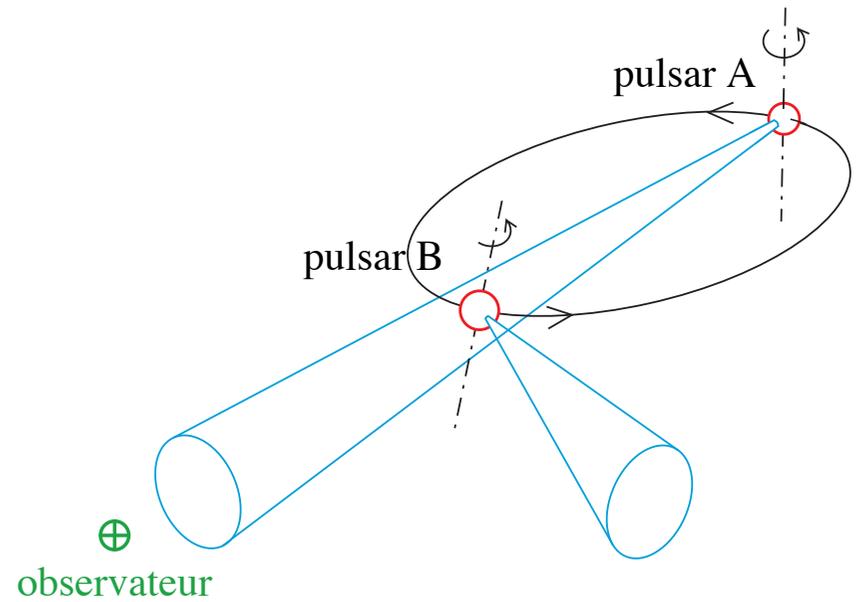
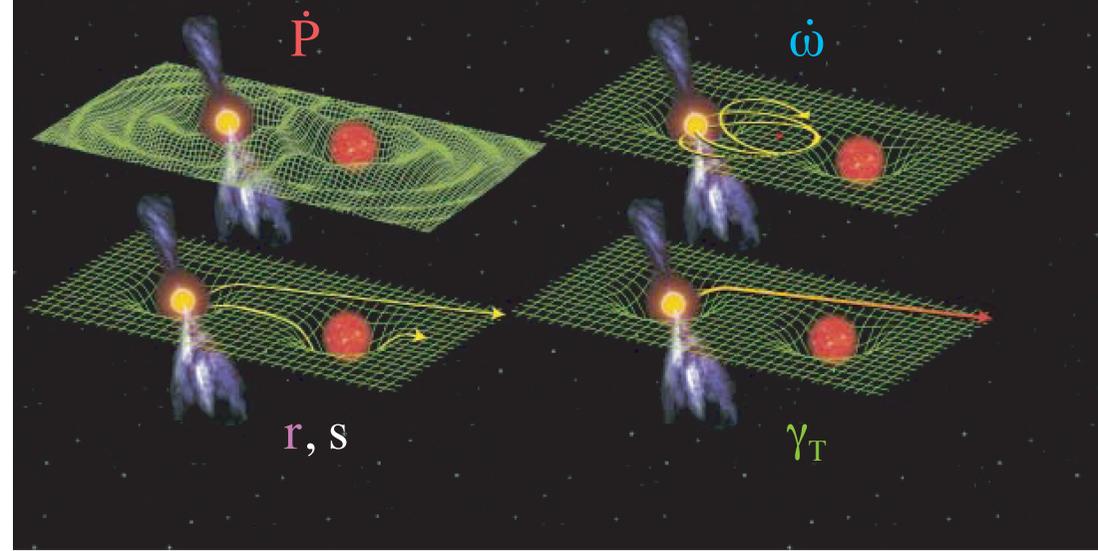
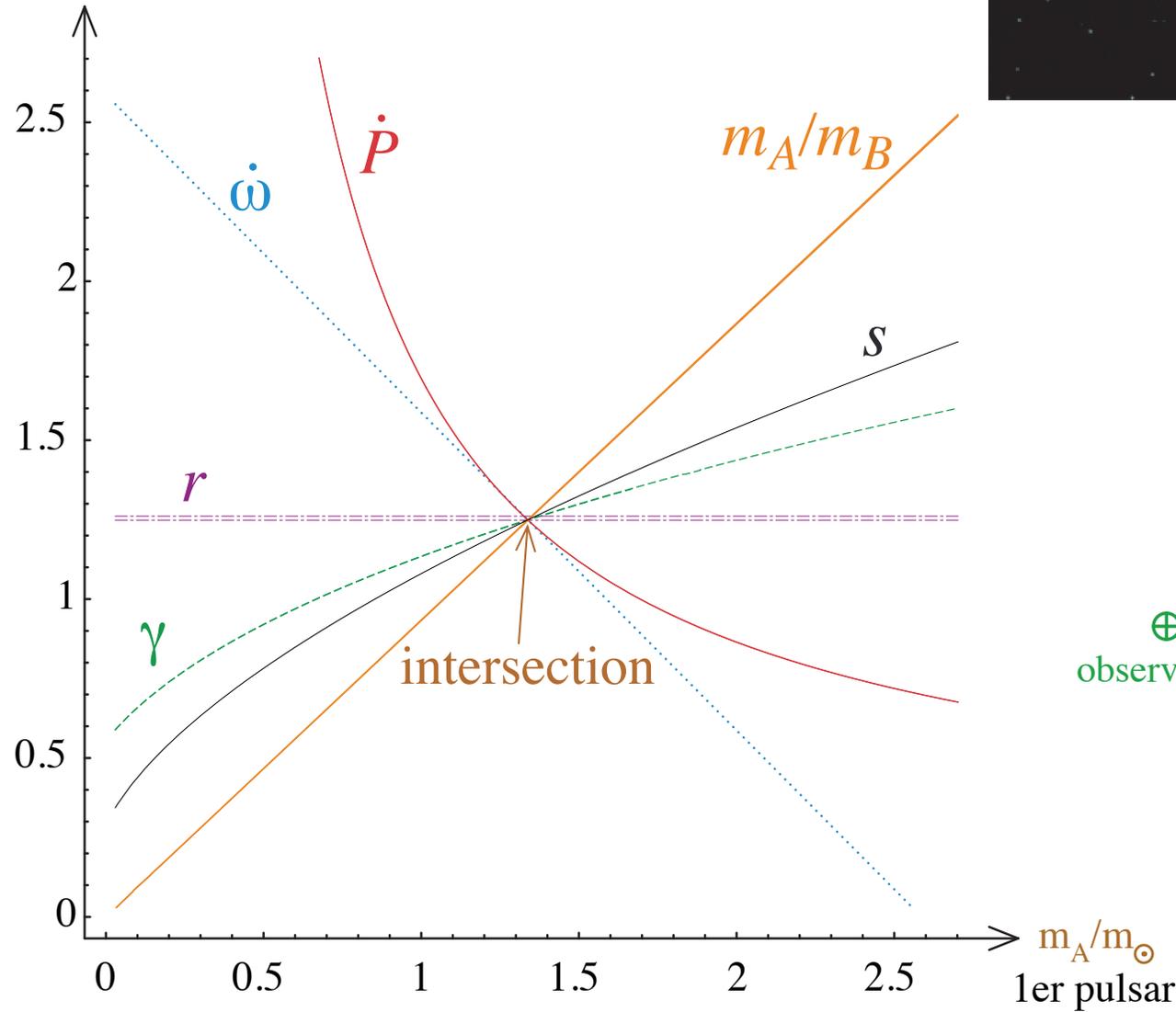
$$\dot{\omega} = 16,8993^\circ/\text{an}$$

Le pulsar double
PSR J0737–3039

6 observables – 2 masses inconnues = 4 tests

2nd pulsar

m_B/m_\odot



$P = 2 \text{ h } 27 \text{ min } 14,5350 \text{ s}$

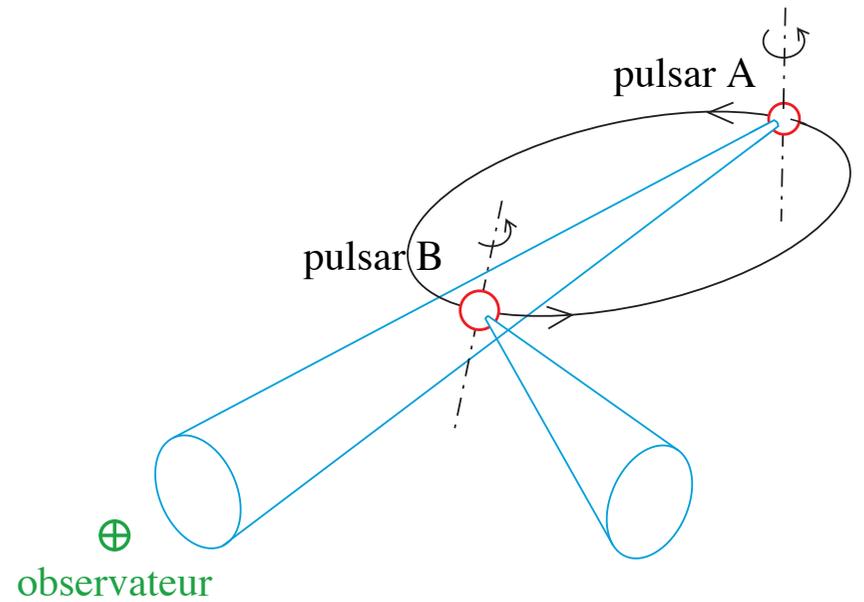
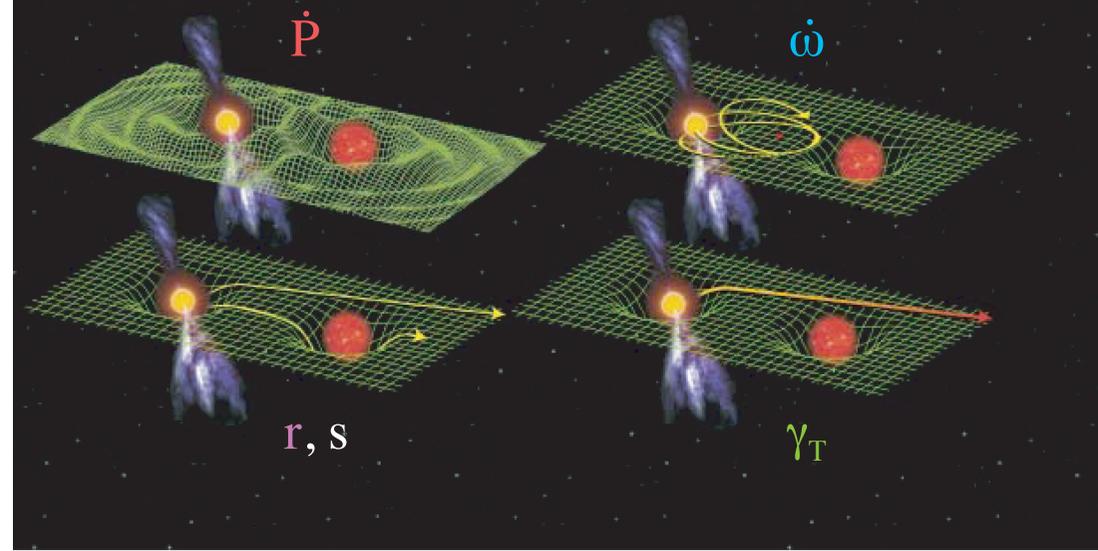
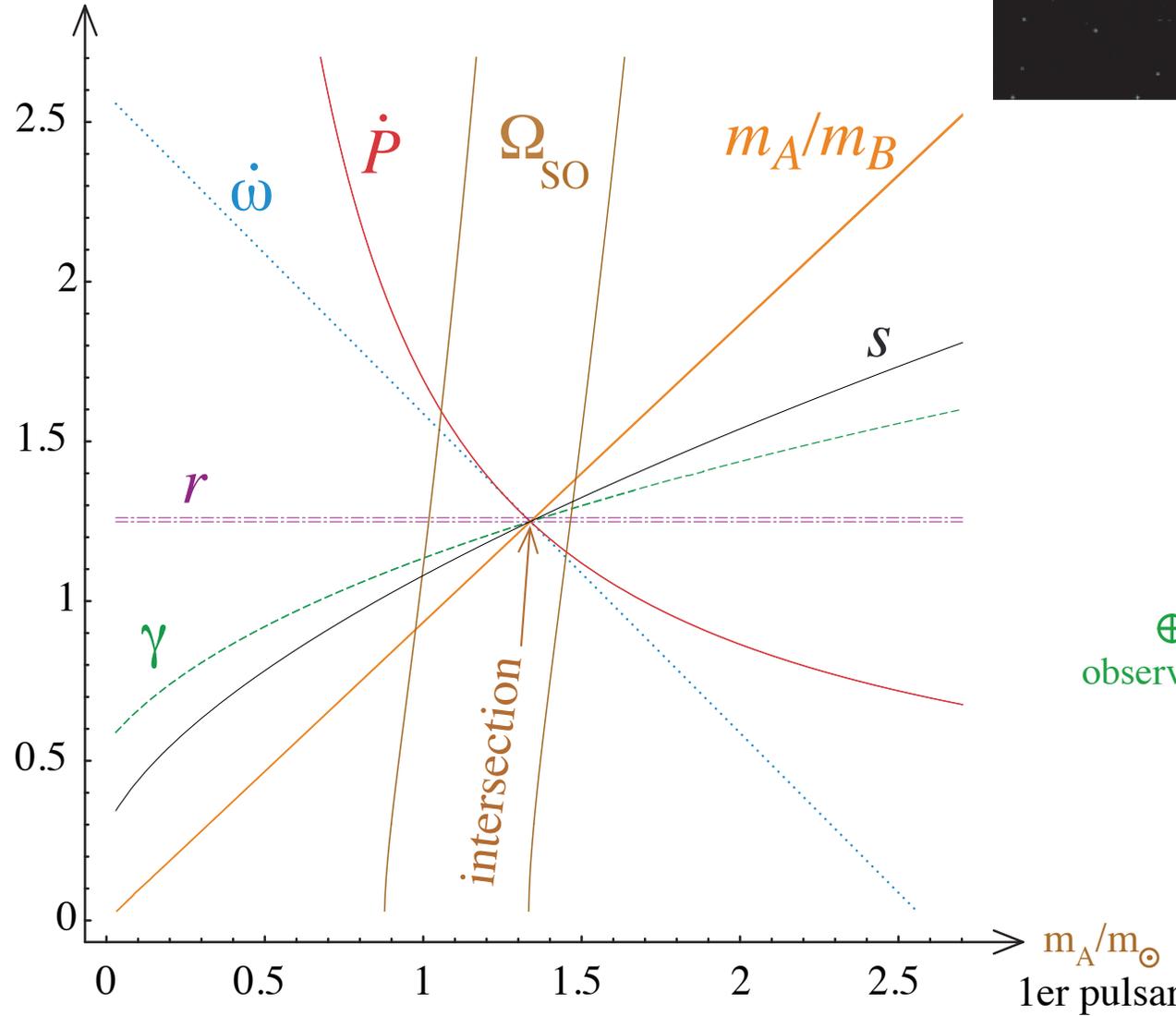
$\dot{\omega} = 16,8993^\circ/\text{an}$

Le pulsar double
PSR J0737–3039

7 observables – 2 masses inconnues = 5 tests

2nd pulsar

m_B/m_\odot



$P = 2 \text{ h } 27 \text{ min } 14,5350 \text{ s}$

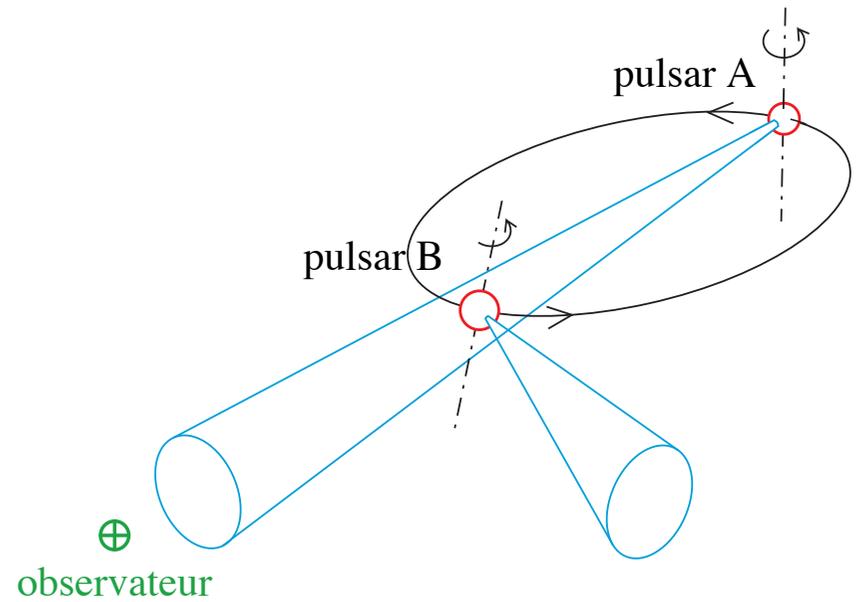
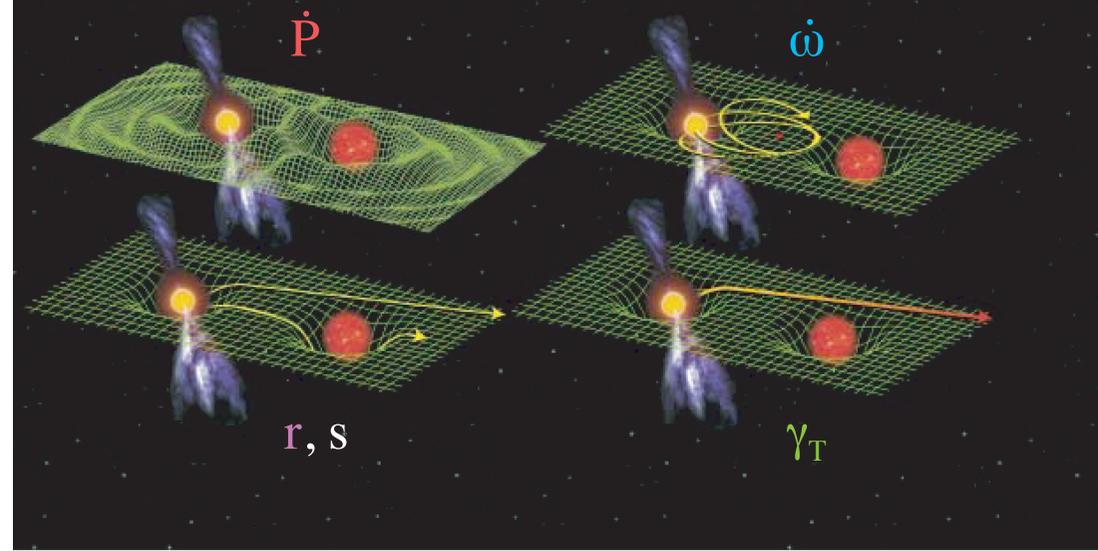
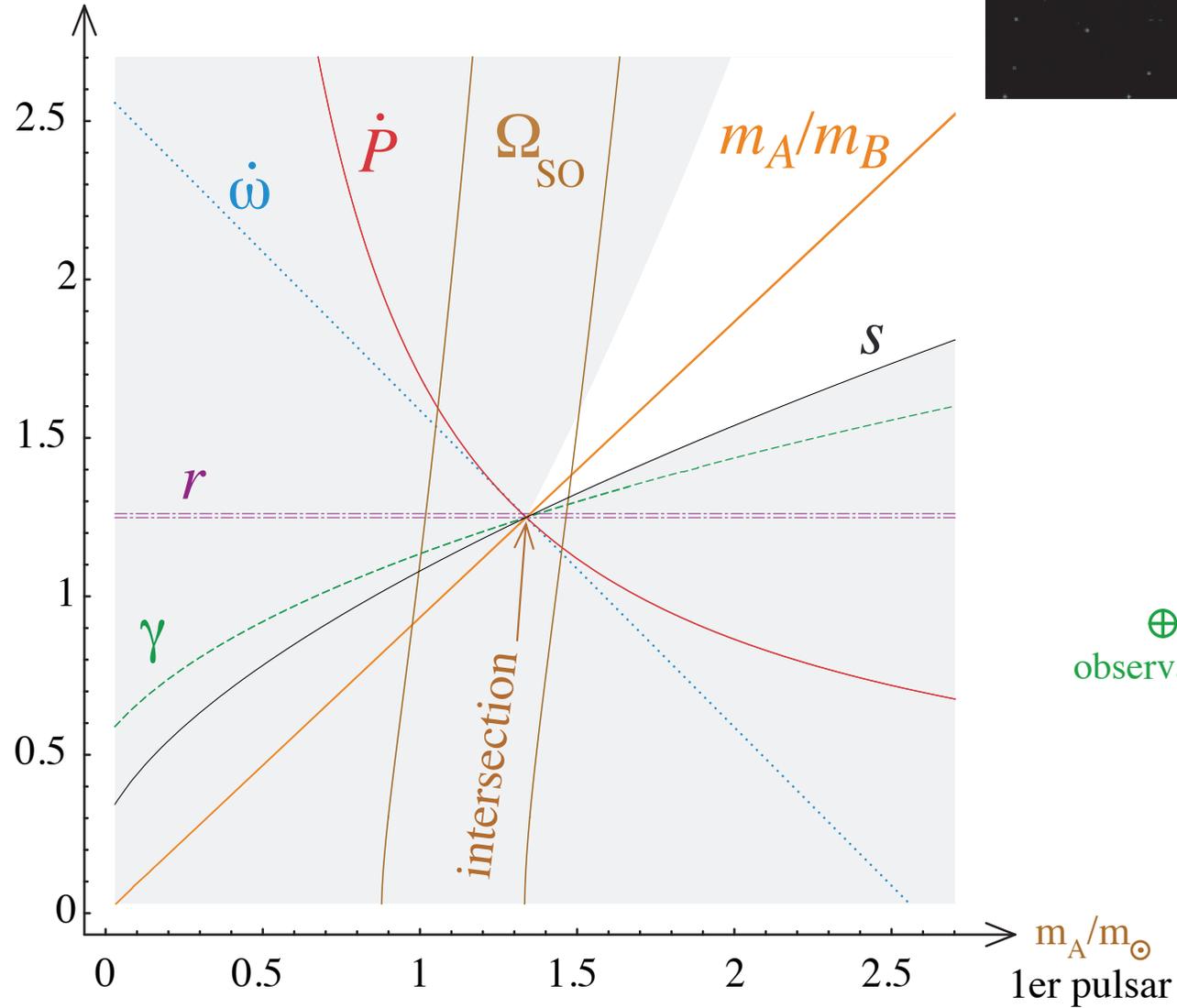
$\dot{\omega} = 16,8993^\circ/\text{an}$

Le pulsar double
PSR J0737–3039

7 observables – 2 masses inconnues = 5 tests

2nd pulsar

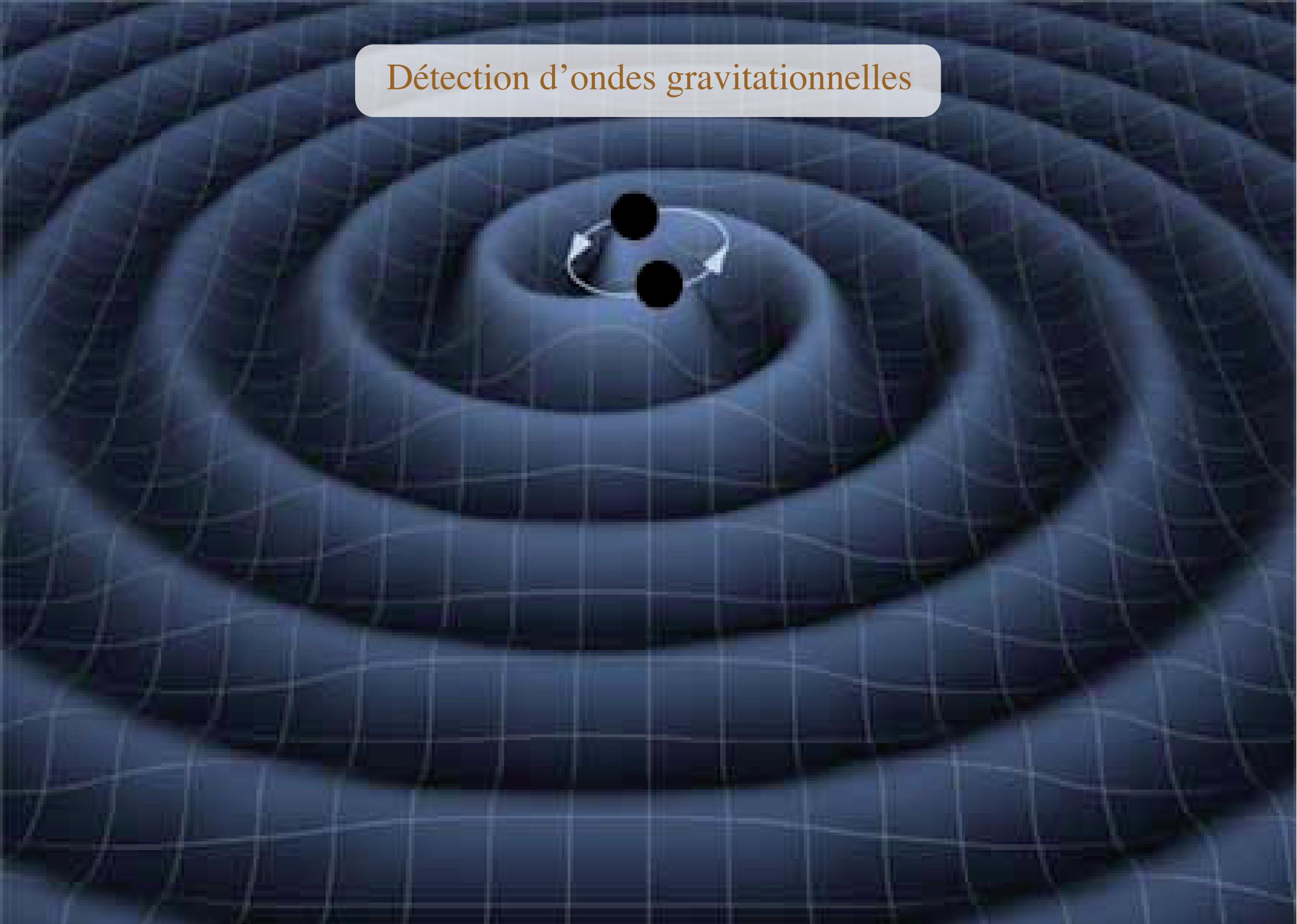
m_B/m_\odot



$P = 2 \text{ h } 27 \text{ min } 14,5350 \text{ s}$

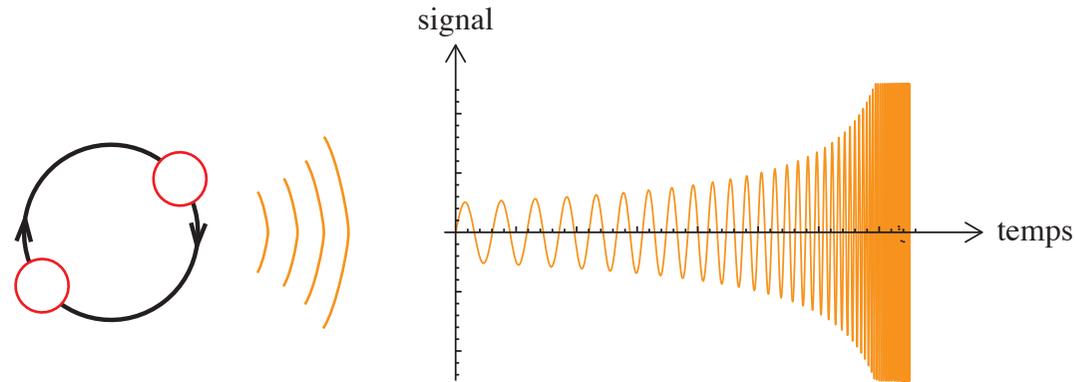
$\dot{\omega} = 16,8993^\circ/\text{an}$

Détection d'ondes gravitationnelles



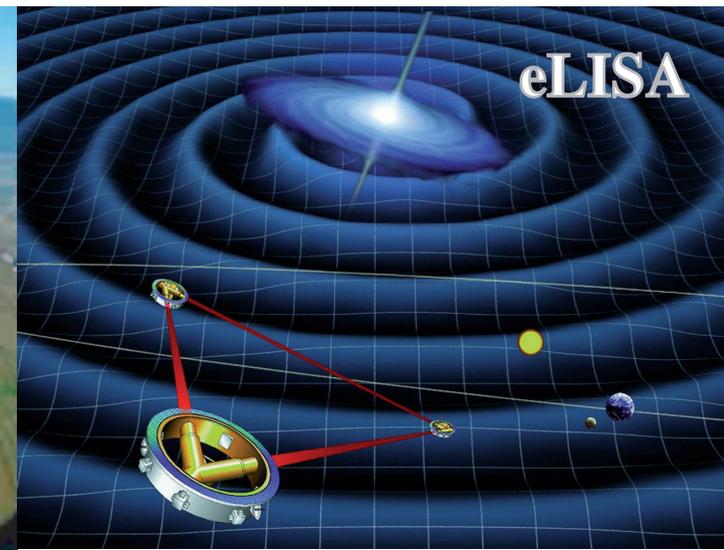
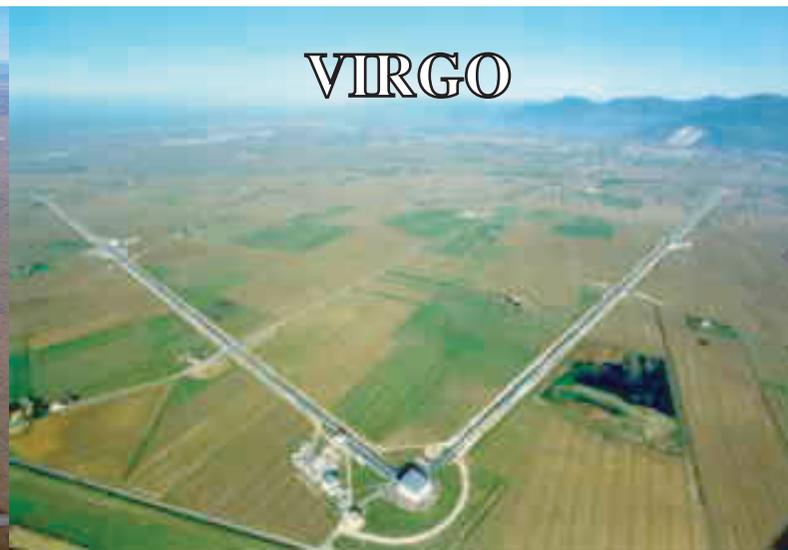
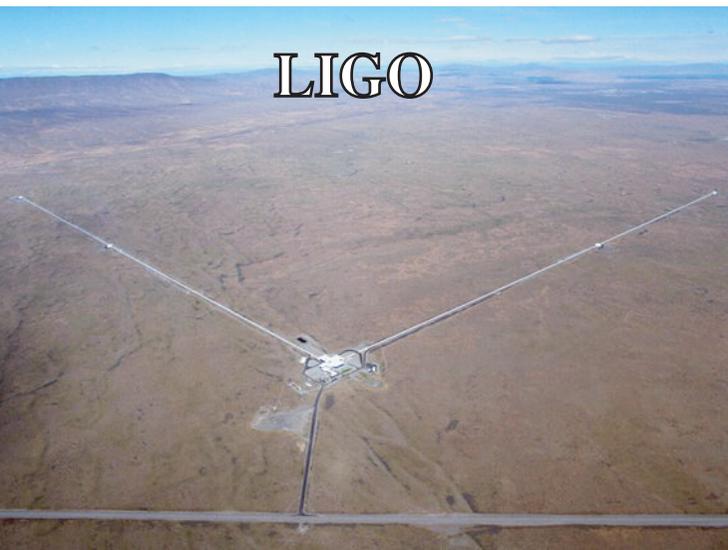
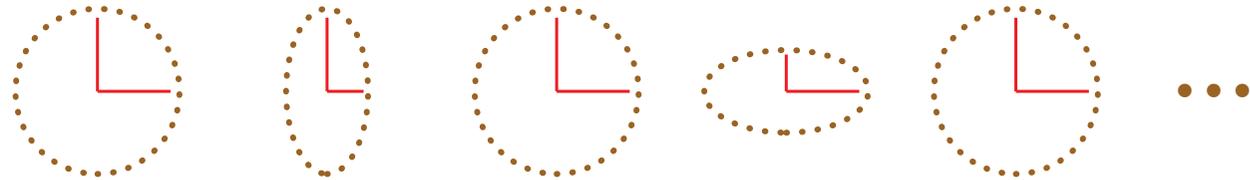
Détection d'ondes gravitationnelles

- Signal émis par un système binaire spiralant :



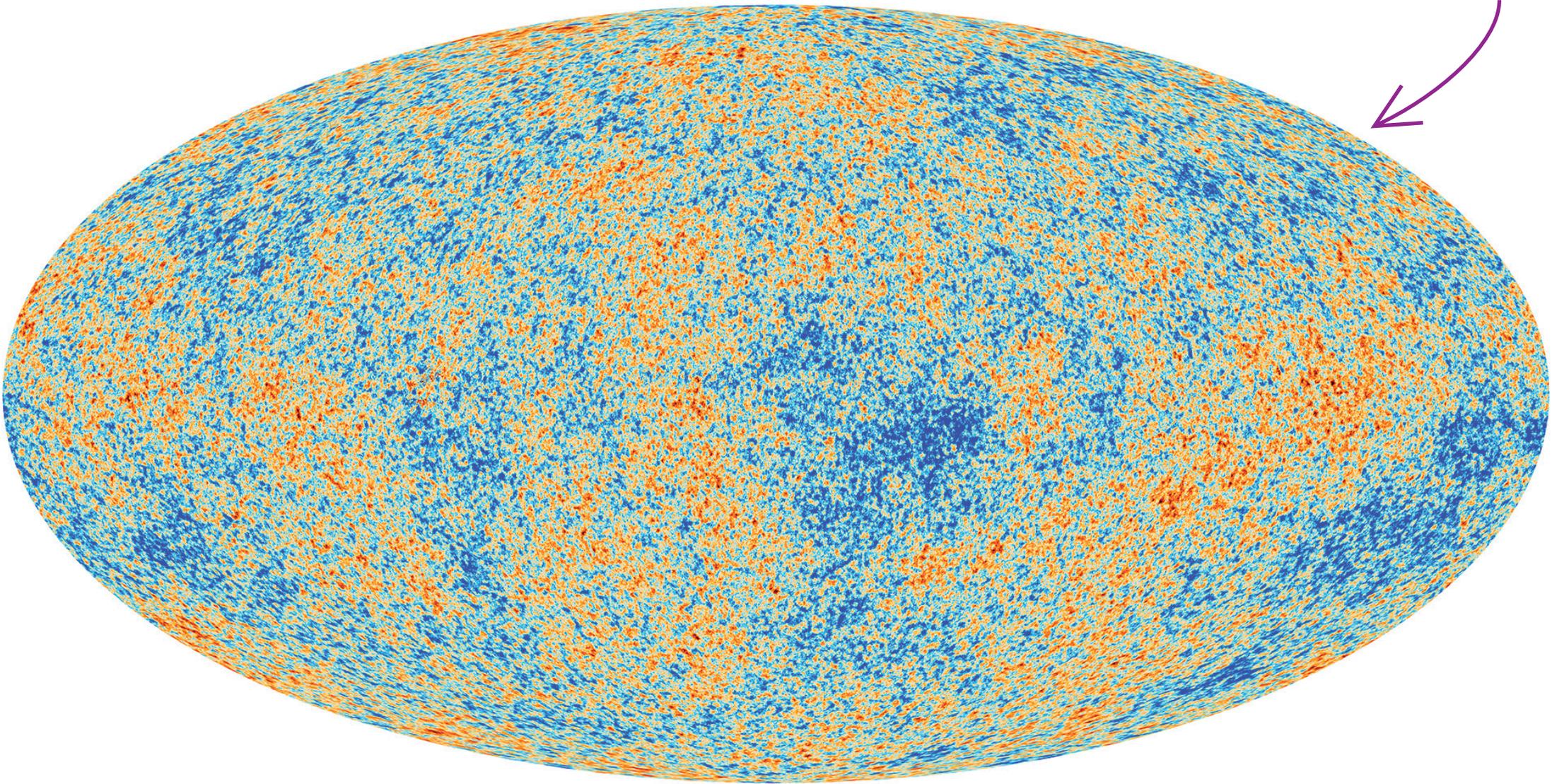
Dépend de centaines de coefficients prédits par la relativité générale

- Effet sur un détecteur :



Observations cosmologiques

Photo de l'Univers à 380 000 ans
(aujourd'hui 13 800 000 000 ans)



Difficile de distinguer gravitation & matière, mais information sur l'évolution temporelle de l'Univers \Rightarrow moins propre mais plus riche

Observations cosmologiques

69% d'“énergie sombre”

Univers en
expansion accélérée

“constante cosmologique”

$$\Lambda \approx 3 \times 10^{-122} \frac{c^3}{\hbar G}$$

ou “quintessence” ?

+ 26% de “matière noire”

Les galaxies tournent
comme des disques rigides

Modification de
la loi de Newton

à grandes distances

ou vraiment matière noire ?

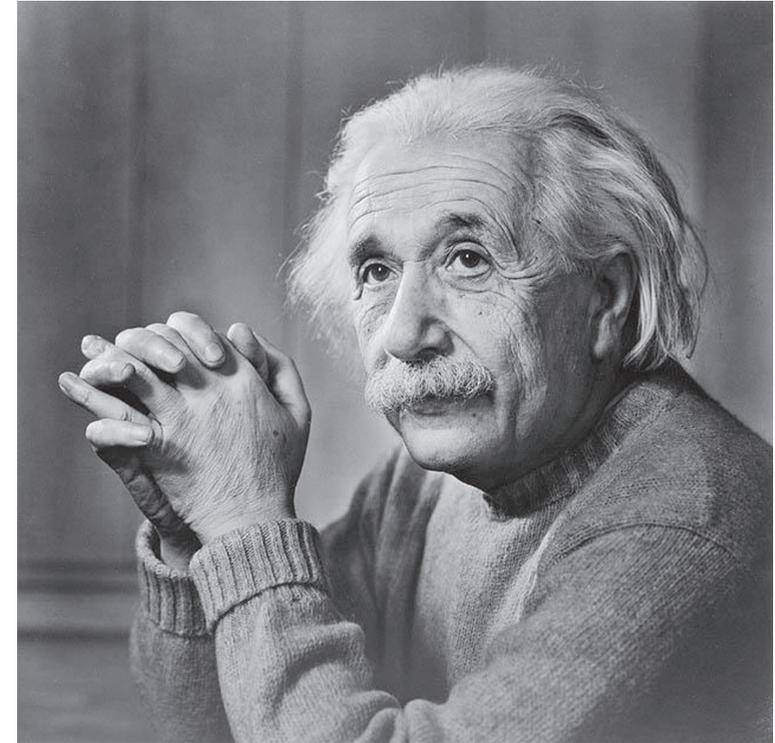
(neutrinos massifs, particules supersymétriques...)

+ 5% de matière baryonique (< 0,5% émettant de la lumière)

Conclusions

Différents aspects de la relativité générale ont été testés avec un grand succès :

- Fondements conceptuels : “principe d'équivalence”
 - Universalité de la chute libre
 - Dilatation temporelle et rougissement gravitationnel
- Dynamique de la gravitation : “équations d'Einstein”
 - Mouvement des planètes (avance du périhélie)
 - Propagation de la lumière (déflexion et retard)
 - Effets de champs forts et “principe d'équivalence fort”
 - Existence des ondes gravitationnelles (pulsars binaires)
- Future détection directe d'ondes gravitationnelles
 - ⇒ nouveaux tests de prédictions très subtiles
- Observations cosmologiques
 - ⇒ tests de la gravitation pendant l'évolution de l'Univers



Pourquoi continuer à la tester ?

- Certaines prédictions pas encore vérifiées (propriétés des trous noirs, ...)
- Quelques faits expérimentaux à comprendre (énergie sombre & matière noire)
- Déviations de la relativité générale prédites par divers travaux théoriques (quantification...)