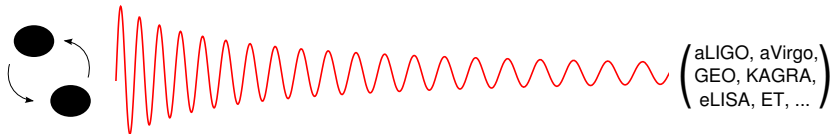


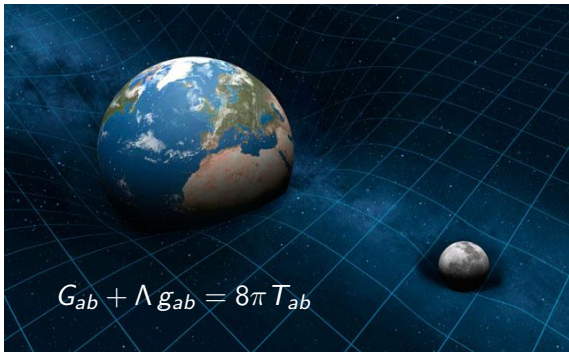
# 100 ans de relativité générale et 99 ans d'ondes gravitationnelles

Alexandre Le Tiec

Laboratoire Univers et Théories  
Observatoire de Paris / CNRS

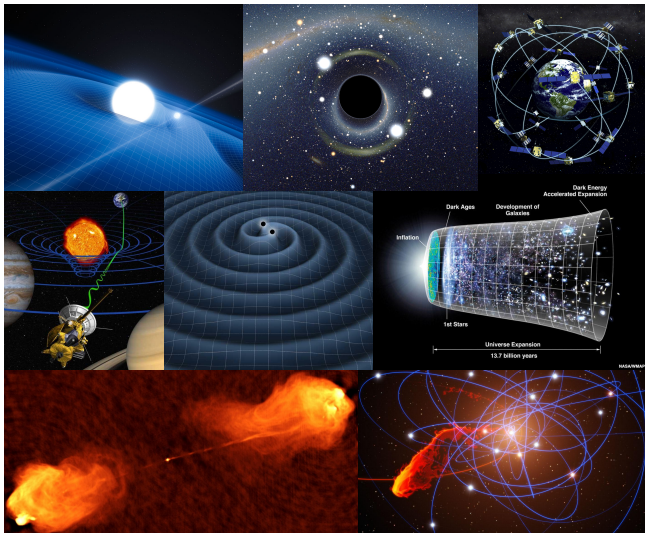


# La relativité générale d'Einstein



La relativité générale est la théorie de l'**espace**, du **temps** et de la **gravitation** formulée par Albert Einstein en 1915

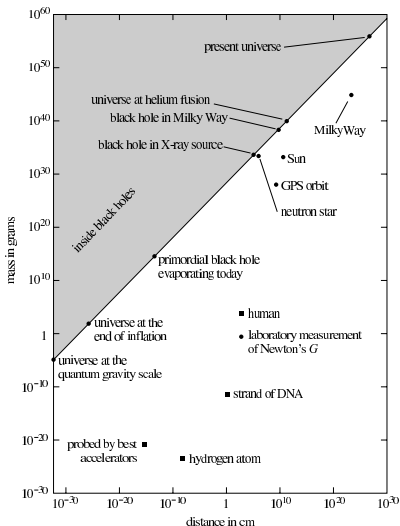
# Relativité générale et astrophysique



# Domaine d'application de la relativité générale

$$C \equiv \frac{G}{c^2} \frac{M}{R}$$

Système	Compacité
Terre	$\sim 10^{-9}$
Soleil	$\sim 10^{-6}$
Naine blanche	$\sim 10^{-3}$
Étoile à neutrons	$\sim 0,2$
Trou noir	$\sim 0,5$
Univers	$\sim 0,5$



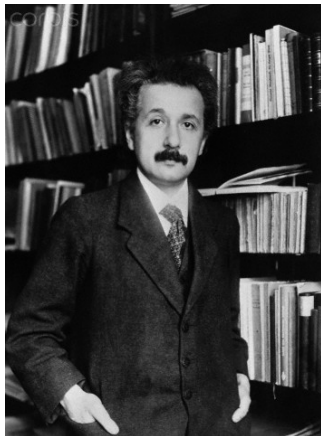
---

**Année**   **Théorie/prédictions**

---

**Expériences/observations**

1915   Équation d'Einstein



---

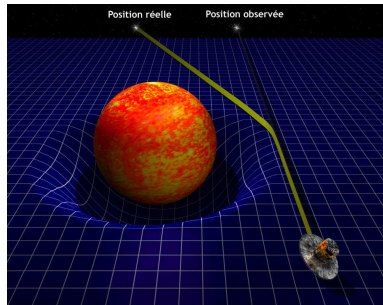
Année Théorie/prédictions

Expériences/observations

---

1915 Équation d'Einstein

1915 Déviation de la lumière



---

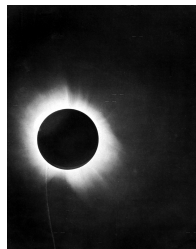
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
-------	---------------------	--------------------------

---

1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	

1919

Déviations de la lumière



---

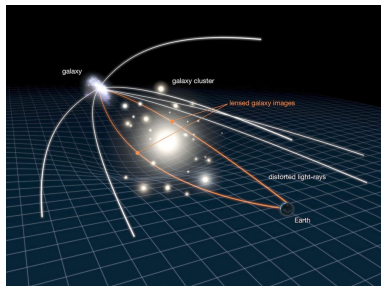
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
-------	---------------------	--------------------------

---

1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	

1919		Déviations de la lumière
------	--	--------------------------

1936	Lentille gravitationnelle	
------	---------------------------	--

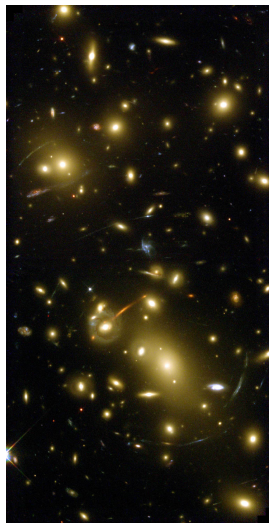




---

Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1919		Déviations de la lumière
1936	Lentille gravitationnelle	
1979		Lentilles gravitationnelles

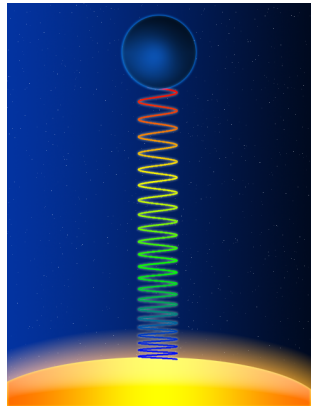
---



---

Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1919		Déviations de la lumière
1936	Lentille gravitationnelle	
1979		Lentilles gravitationnelles

---



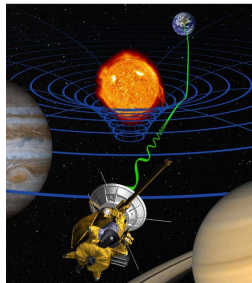
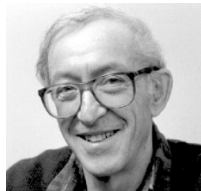
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1919		Déviations de la lumière
1936	Lentille gravitationnelle	
1959		Redshift gravitationnel
1979		Lentilles gravitationnelles



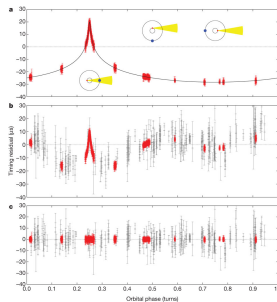
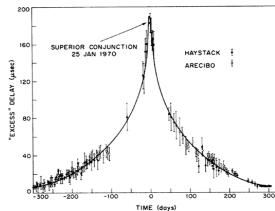
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1919		Déviations de la lumière
1936	Lentille gravitationnelle	
1959		Redshift gravitationnel
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles



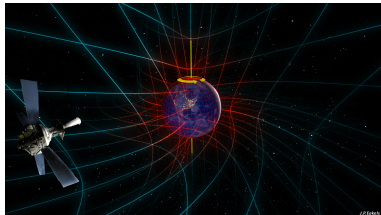
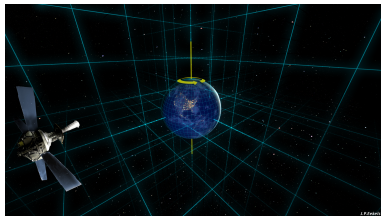
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1919		Déviations de la lumière
1936	Lentille gravitationnelle	
1959		Redshift gravitationnel
1964	Effet de retard Shapiro	
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles



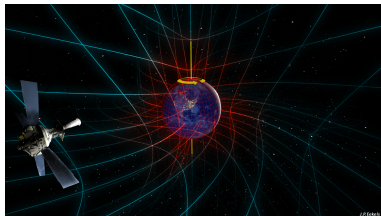
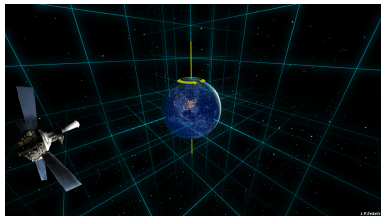
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1919		Déviations de la lumière
1936	Lentille gravitationnelle	
1959		Redshift gravitationnel
1964	Effet de retard Shapiro	
1968		Effet de retard Shapiro
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles



Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Précession géodétique	
1919		Déviations de la lumière
1936	Lentille gravitationnelle	
1959		Redshift gravitationnel
1964	Effet de retard Shapiro	
1968		Effet de retard Shapiro
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles

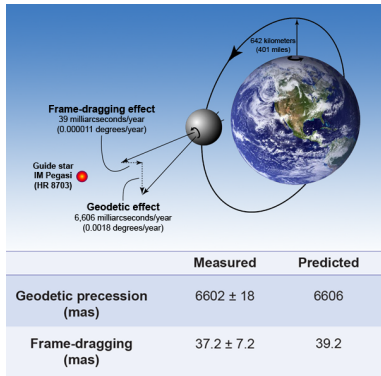


Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1936	Lentille gravitationnelle	
1959		Redshift gravitationnel
1964	Effet de retard Shapiro	
1968		Effet de retard Shapiro
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles

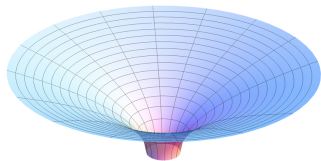
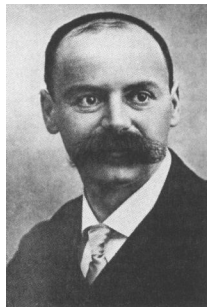




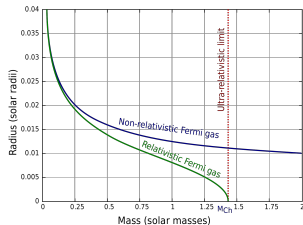
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1936	Lentille gravitationnelle	
1959		Redshift gravitationnel
1964	Effet de retard Shapiro	
1968		Effet de retard Shapiro
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
2011		Gravity Probe B



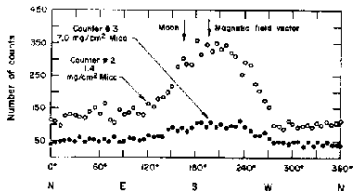
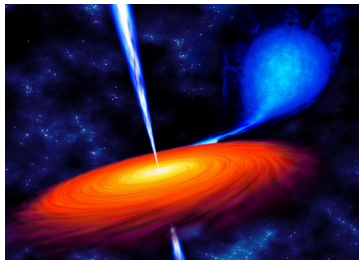
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1936	Lentille gravitationnelle	
1959		Redshift gravitationnel
1964	Effet de retard Shapiro	
1968		Effet de retard Shapiro
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
2011		Gravity Probe B



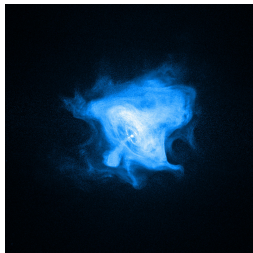
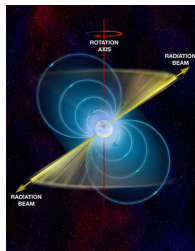
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviaton de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviaton de la lumière
1930	Masse de Chandrasekhar	
1936	Lentille gravitationnelle	
1959		Redshift gravitationnel
1964	Effet de retard Shapiro	
1968		Effet de retard Shapiro
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
2011		Gravity Probe B



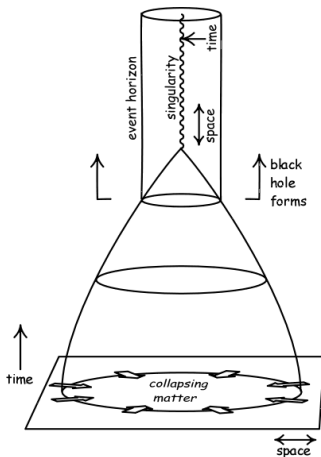
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1930	Masse de Chandrasekhar	
1936	Lentille gravitationnelle	
1959		Redshift gravitationnel
1962		Binaires X
1964	Effet de retard Shapiro	
1968		Effet de retard Shapiro
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
2011		Gravity Probe B



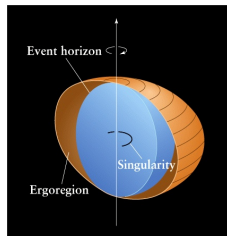
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1930	Masse de Chandrasekhar	
1936	Lentille gravitationnelle	
1959		Redshift gravitationnel
1962		Binaires X
1964	Effet de retard Shapiro	
1967		Pulsars
1968		Effet de retard Shapiro
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
2011		Gravity Probe B



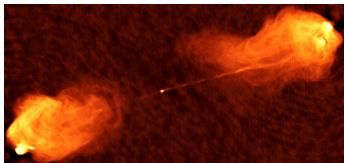
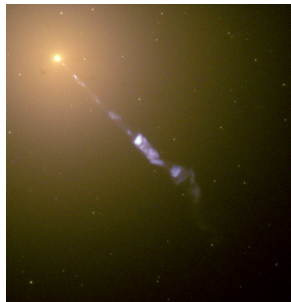
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1930	Masse de Chandrasekhar	
1936	Lentille gravitationnelle	
1939	Limite de O&V	
1959		Redshift gravitationnel
1962		Binaires X
1964	Effet de retard Shapiro	
1967		Pulsars
1968		Effet de retard Shapiro
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
2011		Gravity Probe B



Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviation de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviation de la lumière
1930	Masse de Chandrasekhar	
1936	Lentille gravitationnelle	
1939	Limite de O&V	
1959		Redshift gravitationnel
1960	<b>Solution de Kerr</b>	
1962		Binaires X
1964	Effet de retard Shapiro	
1967		Pulsars
1968		Effet de retard Shapiro
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
2011		Gravity Probe B

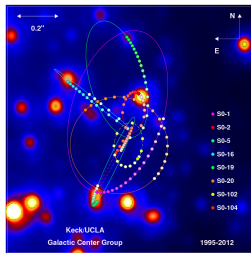
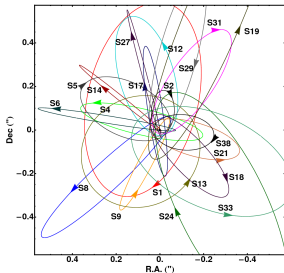


Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1930	Masse de Chandrasekhar	
1936	Lentille gravitationnelle	
1939	Limite de O&V	
1959		Redshift gravitationnel
1960	Solution de Kerr	
1962		Binaires X
1964	Effet de retard Shapiro	
1967		Pulsars
1968		Effet de retard Shapiro
1969		Noyaux actifs de galaxies
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
2011		Gravity Probe B

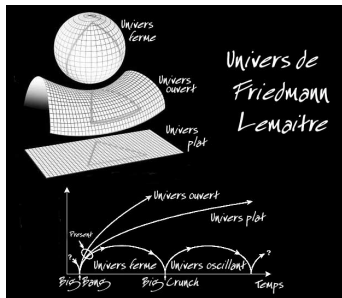




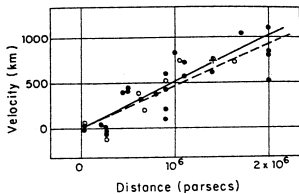
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1930	Masse de Chandrasekhar	
1936	Lentille gravitationnelle	
1939	Limite de O&V	
1959		Redshift gravitationnel
1960	Solution de Kerr	
1962		Binaires X
1964	Effet de retard Shapiro	
1967		Pulsars
1968		Effet de retard Shapiro
1969		Noyaux actifs de galaxies
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
2000'		Sagittarius A*
2011		Gravity Probe B



Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1920'	Solutions de F&L	
1930	Masse de Chandrasekhar	
1936	Lentille gravitationnelle	
1939	Limite de O&V	
1959		Redshift gravitationnel
1960	Solution de Kerr	
1962		Binaires X
1964	Effet de retard Shapiro	
1967		Pulsars
1968		Effet de retard Shapiro
1969		Noyaux actifs de galaxies
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
2000'		Sagittarius A*
2011		Gravity Probe B



Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1920'	Solutions de F&L	
1929		Loi de Hubble
1930	Masse de Chandrasekhar	
1936	Lentille gravitationnelle	
1939	Limite de O&V	
1959		Redshift gravitationnel
1960	Solution de Kerr	
1962		Binaires X
1964	Effet de retard Shapiro	
1967		Pulsars
1968		Effet de retard Shapiro
1969		Noyaux actifs de galaxies
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
2000'		Sagittarius A*
2011		Gravity Probe B



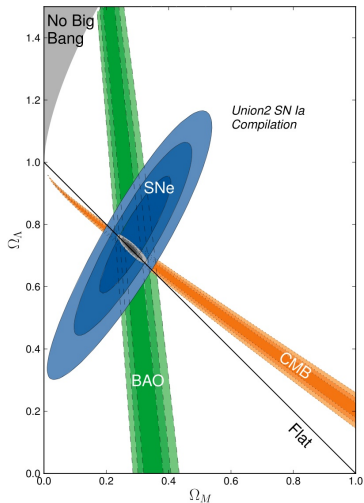
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1920'	Solutions de F&L	
1929		Loi de Hubble
1930	Masse de Chandrasekhar	
1933		Matière noire
1936	Lentille gravitationnelle	
1939	Limite de O&V	
1959		Redshift gravitationnel
1960	Solution de Kerr	
1962		Binaires X
1964	Effet de retard Shapiro	
1967		Pulsars
1968		Effet de retard Shapiro
1969		Noyaux actifs de galaxies
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
2000'		Sagittarius A*
2011		Gravity Probe B



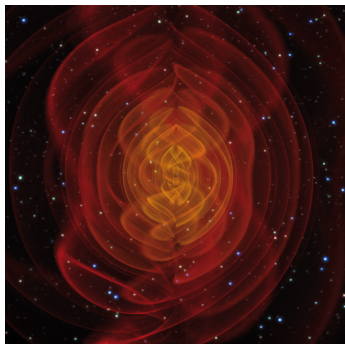
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1920'	Solutions de F&L	
1929		Loi de Hubble
1930	Masse de Chandrasekhar	
1933		Matière noire
1936	Lentille gravitationnelle	
1939	Limite de O&V	
1959		Redshift gravitationnel
1960	Solution de Kerr	
1962		Binaires X
1964	Effet de retard Shapiro	
1964		Fond diffus micro-onde
1967		Pulsars
1968		Effet de retard Shapiro
1969		Noyaux actifs de galaxies
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
2000'		Sagittarius A*
2011		Gravity Probe B



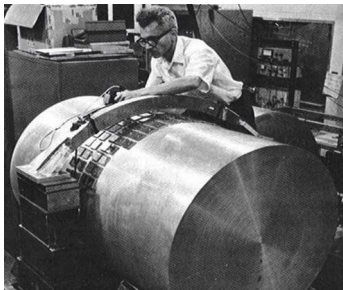
Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1920'	Solutions de F&L	
1929		Loi de Hubble
1930	Masse de Chandrasekhar	
1933		Matière noire
1936	Lentille gravitationnelle	
1939	Limite de O&V	
1959		Redshift gravitationnel
1960	Solution de Kerr	
1962		Binaires X
1964	Effet de retard Shapiro	
1964		Fond diffus micro-onde
1967		Pulsars
1968		Effet de retard Shapiro
1969		Noyaux actifs de galaxies
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
1998		Énergie noire
2000'		Sagittarius A*
2011		Gravity Probe B



Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Ondes gravitationnelles	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1920'	Solutions de F&L	
1929		Loi de Hubble
1930	Masse de Chandrasekhar	
1933		Matière noire
1936	Lentille gravitationnelle	
1939	Limite de O&V	
1959		Redshift gravitationnel
1960	Solution de Kerr	
1962		Binaires X
1964	Effet de retard Shapiro	
1964		Fond diffus micro-onde
1967		Pulsars
1968		Effet de retard Shapiro
1969		Noyaux actifs de galaxies
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
1998		Énergie noire
2000'		Sagittarius A*
2011		Gravity Probe B

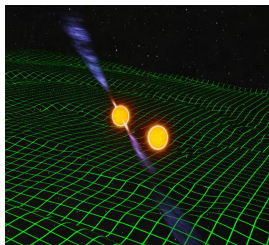


Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviaton de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Ondes gravitationnelles	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviaton de la lumière
1920'	Solutions de F&L	
1929		Loi de Hubble
1930	Masse de Chandrasekhar	
1933		Matière noire
1936	Lentille gravitationnelle	
1939	Limite de O&V	
1959		Redshift gravitationnel
1960	Solution de Kerr	
1962		Binaires X
1964	Effet de retard Shapiro	
1964		Fond diffus micro-onde
1965		Barres de Weber
1967		Pulsars
1968		Effet de retard Shapiro
1969		Noyaux actifs de galaxies
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
1998		Énergie noire
2000'		Sagittarius A*
2011		Gravity Probe B



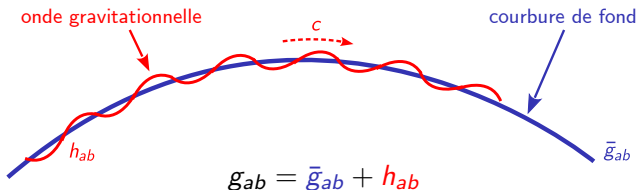


Année	Théorie/prédictions	Expériences/observations
1911	Redshift gravitationnel	
1915	Équation d'Einstein	
1915	Déviations de la lumière	
1916	Solution de Schwarzschild	
1916	Ondes gravitationnelles	
1916	Précession géodétique	
1917	Effet Lense-Thirring	
1919		Déviations de la lumière
1920'	Solutions de F&L	
1929		Loi de Hubble
1930	Masse de Chandrasekhar	
1933		Matière noire
1936	Lentille gravitationnelle	
1939	Limite de O&V	
1959		Redshift gravitationnel
1960	Solution de Kerr	
1962		Binaires X
1964	Effet de retard Shapiro	
1964		Fond diffus micro-onde
1965		Barres de Weber
1967		Pulsars
1968		Effet de retard Shapiro
1969		Noyaux actifs de galaxies
1974		Pulsars binaires
1976		Gravity Probe A
1979		Lentilles gravitationnelles
1998		Énergie noire
2000'		Sagittarius A*
2011		Gravity Probe B



# Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?

Une **onde gravitationnelle** est une perturbation dans la **courbure de l'espace-temps** qui se propage à la vitesse de la lumière  $c$



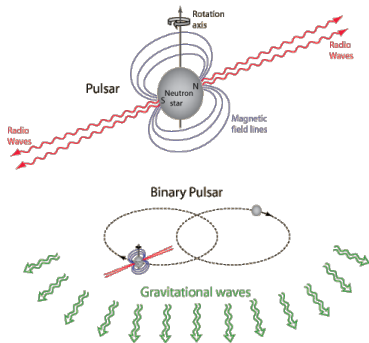
**Prédiction fondamentale** de la théorie de la relativité générale

# Complémentarité avec les ondes électromagnétiques

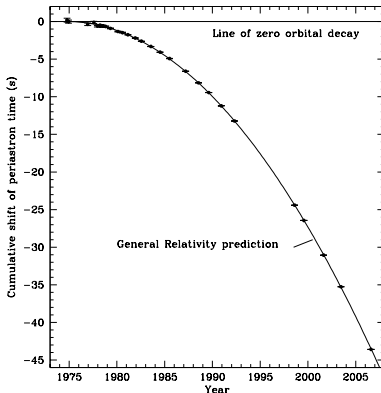
	Ondes électromagnétiques	Ondes gravitationnelles
<b>Nature</b>	ondes dans l'espace-temps	ondes de l'espace-temps
<b>Sources</b>	oscillations de charges	accélération de masses
<b>Superposition</b>	incohérente d'ondes	cohérente d'ondes
<b>Long. d'onde</b>	$\ll$ taille source	$\gtrsim$ taille source
<b>Structure</b>	dipolaire	quadrupolaire
<b>Interaction</b>	forte avec matière	faible avec matière
<b>Propagation</b>	diffraction, dispersion	essentiellement libre
<b>Détection</b>	puissance ( $\sim 1/D^2$ )	amplitude ( $\sim 1/D$ )
<b>Sens</b>	vision	audition

Sources d'informations **complémentaires** sur l'Univers

# Preuves de l'existence des ondes gravitationnelles



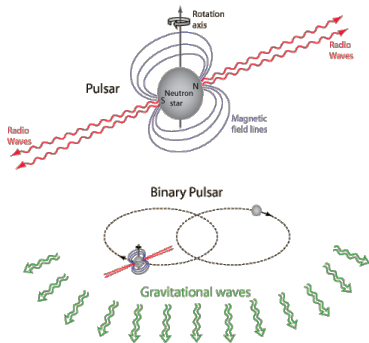
Pulsar binaire PSR B1913+16  
[Hulse & Taylor, ApJ 1975]



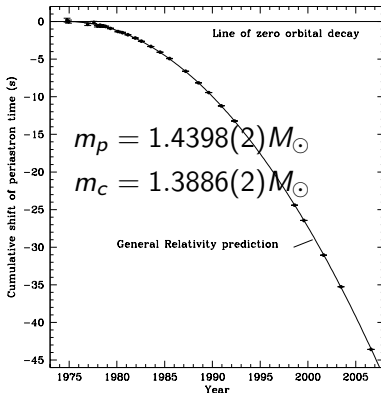
[Weisberg *et al.*, ApJ 2010]

Décroissance orbitale confirmée avec une précision de **0,2%**

# Preuves de l'existence des ondes gravitationnelles



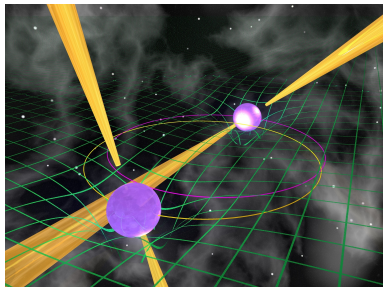
Pulsar binaire PSR B1913+16  
[Hulse & Taylor, ApJ 1975]



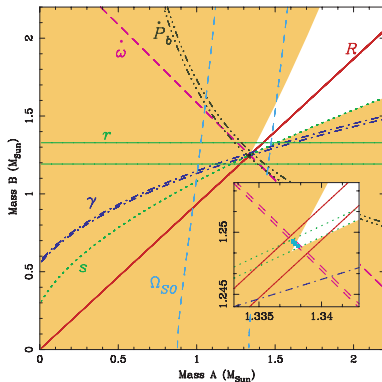
[Weisberg *et al.*, ApJ 2010]

Décroissance orbitale confirmée avec une précision de **0,2%**

# Preuves de l'existence des ondes gravitationnelles



Pulsar double PSR J0737-3039  
[Burgay *et al.*, Nature 2003]



[Kramer & Wex, CQG 2009]

Décroissance orbitale confirmée avec une précision de **0,1%**

# Astronomie gravitationnelle

## Physique fondamentale

- Tests de la relativité générale en champ fort
- Existence des trous noirs, théorème de calvitie
- Équation d'état de l'énergie noire  $w = p/\rho$

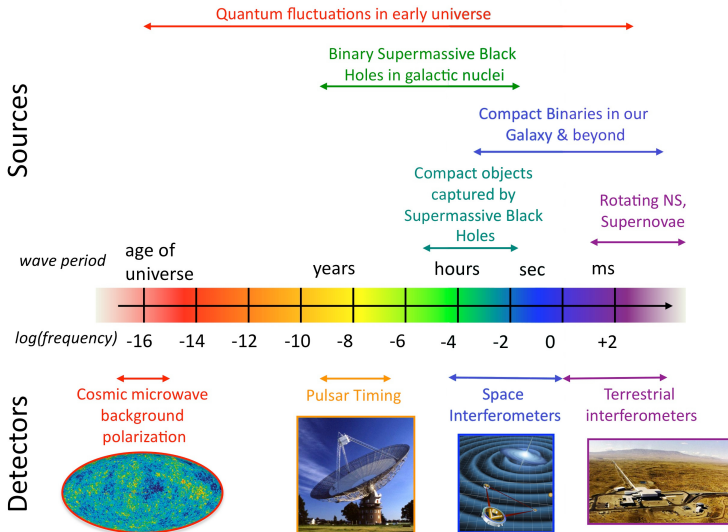
## Astrophysique

- Formation et évolution des binaires compactes
- Origines et mécanismes des sursauts  $\gamma$
- Structure interne des étoiles à neutrons

## Cosmologie

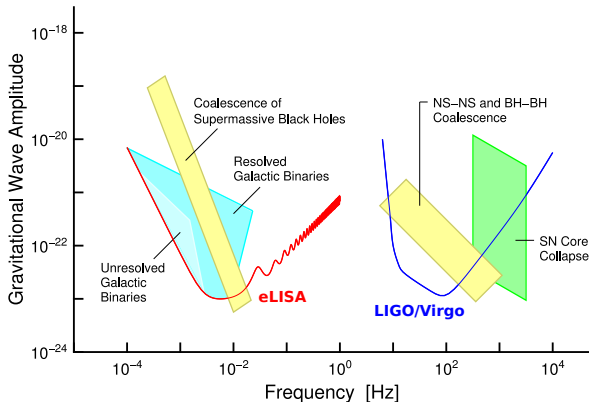
- Cosmographie et mesure indépendante de  $H_0$
- Origine and croissance des trous noirs supermassifs
- Transitions de phase durant l'Univers primordial

# Le spectre des ondes gravitationnelles





# Sources prometteuses d'ondes gravitationnelles



- Binaires d'étoiles à neutrons ( $2 \times \sim 1.4 M_{\odot}$ )
- Binaires de trous noirs de masses stellaires ( $2 \times \sim 10 M_{\odot}$ )
- Binaires de trous noirs supermassifs ( $2 \times \sim 10^6 M_{\odot}$ )
- Binaires à rapport de masse extrême ( $\sim 10 M_{\odot} + \sim 10^6 M_{\odot}$ )

# Détecteurs interférométriques terrestres



Virgo (Italie)



LIGO (États-Unis)

- 2004-2015: **6 campagnes d'observations** et  $\sim 100$  publications
- Aucune détection mais **limites supérieures contraignantes** :
  - Ellipticité du pulsar du Crabe  $< 10^{-4}$
  - Densité d'énergie d'un fond stochastique  $< 7 \times 10^{-6}$
  - Coalescence dans M31 exclue comme progéniteur de GRB 070201
  - ...

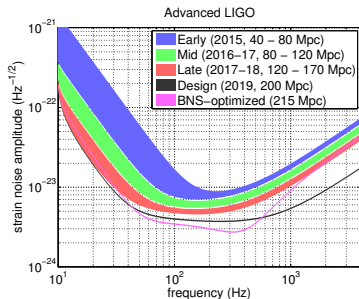
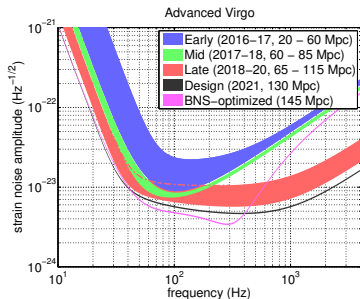
# Un réseau mondial d'observatoires gravitationnels



- **Mise à jour** vers Advanced LIGO/Virgo, KAGRA au Japon
- 2<sup>nd</sup>e génération : sensibilité  $\times 10 \Rightarrow$  **taux d'événements  $\times 10^3$**
- Début de l'astronomie gravitationnelle attendu  $\sim$  **2015-2020**

# Feuille de route pour les détecteurs avancés

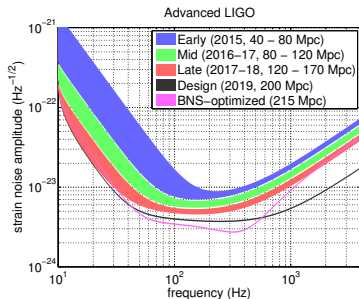
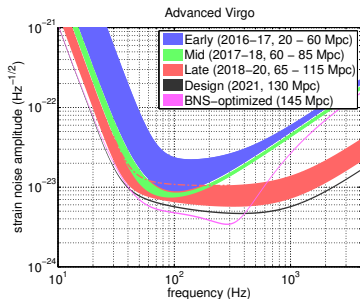
arXiv:1304.0670 [gr-qc]



Epoch	Estimated Run Duration	$E_{\text{GW}} = 10^{-2} M_{\odot} c^2$ Burst Range (Mpc)		BNS Range (Mpc)		Number of BNS Detections	% BNS Localized within	
		LIGO	Virgo	LIGO	Virgo		$5 \text{ deg}^2$	$20 \text{ deg}^2$
2015	3 months	40 – 60	–	40 – 80	–	0.0004 – 3	–	–
2016–17	6 months	60 – 75	20 – 40	80 – 120	20 – 60	0.006 – 20	2	5 – 12
2017–18	9 months	75 – 90	40 – 50	120 – 170	60 – 85	0.04 – 100	1 – 2	10 – 12
2019+	(per year)	105	40 – 80	200	65 – 130	0.2 – 200	3 – 8	8 – 28
2022+ (India)	(per year)	105	80	200	130	0.4 – 400	17	48

# Feuille de route pour les détecteurs avancés

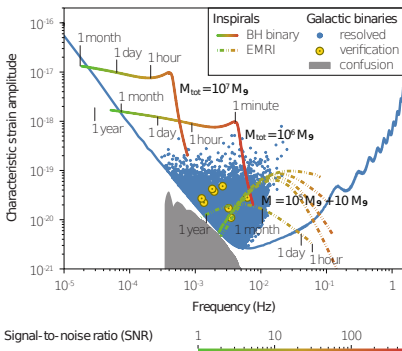
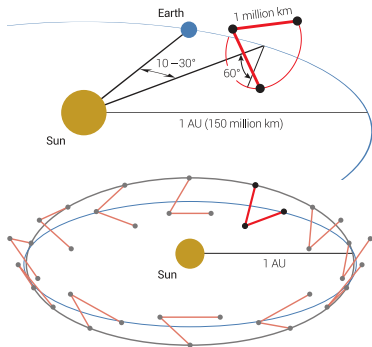
arXiv:1304.0670 [gr-qc]



Epoch	Estimated Run Duration	$E_{\text{GW}} = 10^{-2} M_{\odot} c^2$ Burst Range (Mpc)		BNS Range (Mpc)		Number of BNS Detections	% BNS Localized within	
		LIGO	Virgo	LIGO	Virgo		5 deg <sup>2</sup>	20 deg <sup>2</sup>
2015	3 months	40 – 60	–	40 – 80	–	0.0004 – 3	–	–
2016–17	6 months	60 – 75	20 – 40	80 – 120	20 – 60	0.006 – 20	2	5 – 12
2017–18	9 months	75 – 90	40 – 50	120 – 170	60 – 85	0.04 – 100	1 – 2	10 – 12
2019+	(per year)	105	40 – 80	200	65 – 130	0.2 – 200	3 – 8	8 – 28
2022+ (India)	(per year)	105	80	200	130	0.4 – 400	17	48

# eLISA : une antenne gravitationnelle dans l'espace

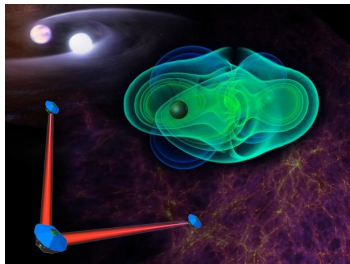
<http://elisascience.org/whitepaper>



## eLISA : une antenne gravitationnelle dans l'espace



LISA Pathfinder



eLISA

- Lancement de LISA Pathfinder programmé : **septembre 2015**
- Thème scientifique *l'Univers gravitationnel* sélectionné pour mission L3 avec une date nominale de lancement en 2034
- **Sélection de eLISA probable** si LISA Pathfinder est un succès

## En résumé...

- Presque **100 ans** après sa formulation, la relativité générale a passé *tous les tests* avec succès :
  - Principe d'équivalence  $\rightarrow 10^{-13}$
  - Avance du périastre  $\rightarrow 10^{-6}$
  - Redshift gravitationnel  $\rightarrow 10^{-4}$
  - Déviation de la lumière  $\rightarrow 10^{-4}$
  - Effet de retard Shapiro  $\rightarrow 10^{-5}$
  - Précession géodétique  $\rightarrow 10^{-3}$
  - Effet Lense-Thirring  $\rightarrow 10^{-1}$
  - Décroissance orbitale  $\rightarrow 10^{-3}$



## En résumé...

- Presque **100 ans** après sa formulation, la relativité générale a passé *tous les tests* avec succès :
  - Principe d'équivalence  $\rightarrow 10^{-13}$
  - Avance du périastre  $\rightarrow 10^{-6}$
  - Redshift gravitationnel  $\rightarrow 10^{-4}$
  - Déviation de la lumière  $\rightarrow 10^{-4}$
  - Effet de retard Shapiro  $\rightarrow 10^{-5}$
  - Précession géodétique  $\rightarrow 10^{-3}$
  - Effet Lense-Thirring  $\rightarrow 10^{-1}$
  - Décroissance orbitale  $\rightarrow 10^{-3}$
- La relativité générale a fait **trois prédictions majeures** :
  - ✓ Existence des trous noirs
  - ✓ Caractère dynamique de l'Univers
  - ✓ Existence du rayonnement gravitationnel

## En résumé...

- Presque **100 ans** après sa formulation, la relativité générale a passé *tous les tests* avec succès :
  - Principe d'équivalence  $\rightarrow 10^{-13}$
  - Avance du périastre  $\rightarrow 10^{-6}$
  - Redshift gravitationnel  $\rightarrow 10^{-4}$
  - Déviation de la lumière  $\rightarrow 10^{-4}$
  - Effet de retard Shapiro  $\rightarrow 10^{-5}$
  - Précession géodétique  $\rightarrow 10^{-3}$
  - Effet Lense-Thirring  $\rightarrow 10^{-1}$
  - Décroissance orbitale  $\rightarrow 10^{-3}$
- La relativité générale a fait **trois prédictions majeures** :
  - ✓ Existence des trous noirs
  - ✓ Caractère dynamique de l'Univers
  - ✓ Existence du rayonnement gravitationnel
- Les futures observations d'ondes gravitationnelles seront **complémentaires** de celles d'ondes électromagnétiques

## En résumé...

- Presque **100 ans** après sa formulation, la relativité générale a passé *tous les tests* avec succès :
  - Principe d'équivalence  $\rightarrow 10^{-13}$
  - Avance du périastre  $\rightarrow 10^{-6}$
  - Redshift gravitationnel  $\rightarrow 10^{-4}$
  - Déviation de la lumière  $\rightarrow 10^{-4}$
  - Effet de retard Shapiro  $\rightarrow 10^{-5}$
  - Précession géodétique  $\rightarrow 10^{-3}$
  - Effet Lense-Thirring  $\rightarrow 10^{-1}$
  - Décroissance orbitale  $\rightarrow 10^{-3}$
- La relativité générale a fait **trois prédictions majeures** :
  - ✓ Existence des trous noirs
  - ✓ Caractère dynamique de l'Univers
  - ✓ Existence du rayonnement gravitationnel
- Les futures observations d'ondes gravitationnelles seront **complémentaires** de celles d'ondes électromagnétiques
- Début de l'astronomie gravitationnelle attendu  $\sim$  **2015-2020**