

# La GRAVITATION de Newton à Einstein

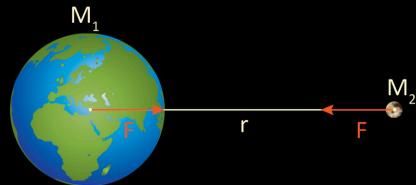
## La Gravitation Universelle de Newton



En 1687, Isaac Newton publie la Loi de la Gravitation Universelle : deux masses ponctuelles s'attirent et l'intensité de la force qui les relie est proportionnelle au produit de leurs masses divisé par le carré de la distance qui les sépare.

$$F = \frac{GM_1M_2}{r^2}$$

Dans cette équation les deux masses  $M_1$  et  $M_2$  sont éloignées d'une distance  $r$ . La constante de proportionnalité notée  $G$  s'appelle la constante de gravitation universelle. La force est attractive et dirigée le long de la droite qui sépare les deux objets.



Le génie de Newton a été de comprendre que c'est le même phénomène qui fait tomber les objets au sol sur Terre et qui maintient les planètes et les autres corps célestes sur leurs orbites.

## Trous Noirs et Théorie Newtonienne de la Gravitation

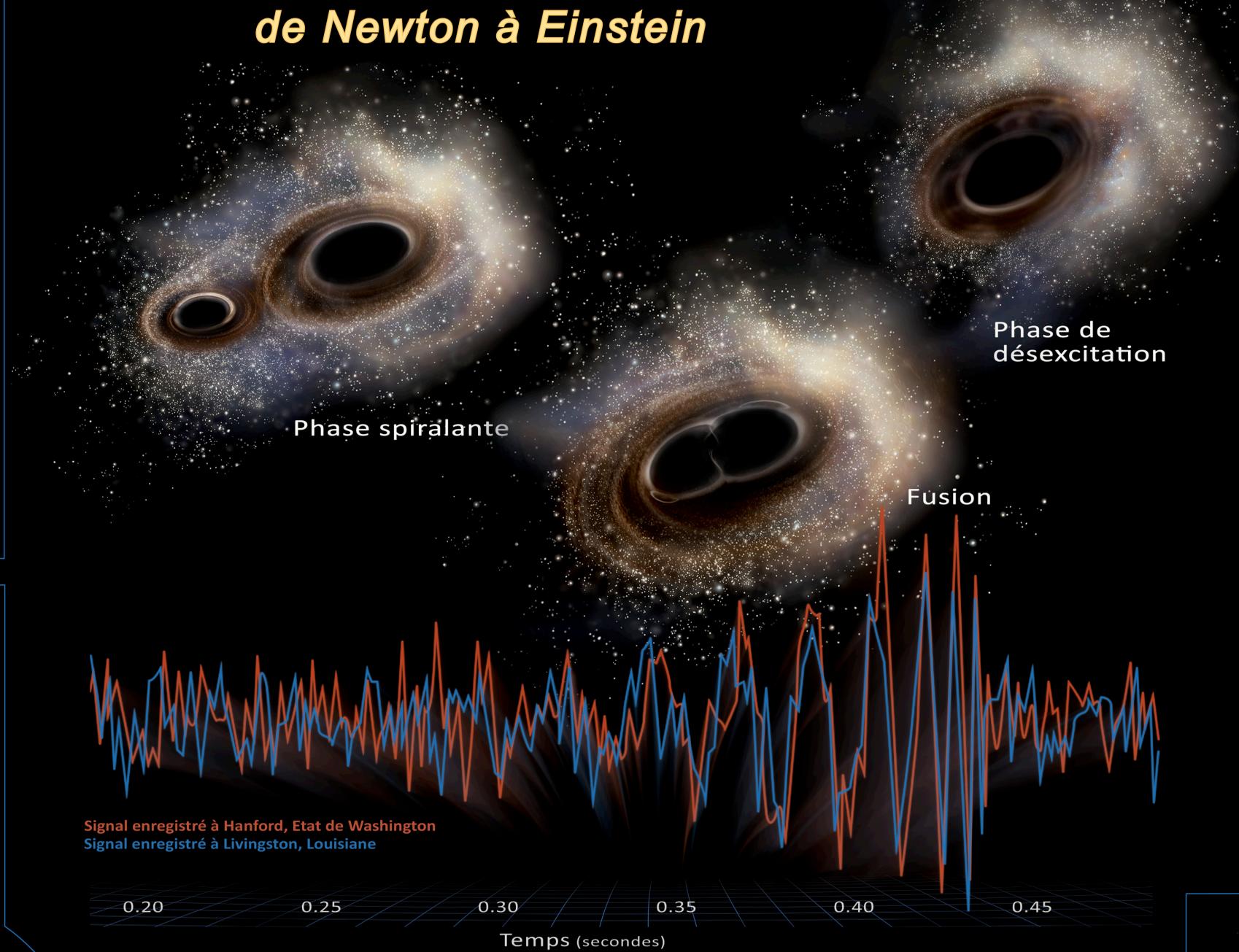
En 1783, le philosophe anglais John Michell est le premier à remarquer que la loi de Newton permet l'existence « d'étoiles noires ». Dans ce cadre, la vitesse de libération ( $v_{lib}$ ) est la vitesse minimale qu'une masse ponctuelle doit atteindre pour échapper à l'attraction gravitationnelle d'un objet de masse  $M$ . Cette vitesse de libération varie comme la racine carrée de la masse de l'objet et comme l'inverse de la racine carrée de la distance  $r$  entre la masse ponctuelle et le centre de l'objet massif. Pour une masse  $M$  donnée, le rayon ( $R_{Sch}$ ) de l'étoile noire imaginée par Michell correspond à la distance à laquelle la vitesse de libération atteint la vitesse de la lumière.

$$v_{lib} = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad R_{Sch} = \frac{2GM}{c^2}$$

Comme la vitesse de la lumière, notée  $c$ , est une vitesse limite indépassable, un objet dont toute la masse serait concentrée dans une sphère de rayon  $R_{Sch}$  aurait une gravité si forte que même la lumière ne pourrait s'en échapper : il serait donc « noir ».

On obtient le même résultat avec la théorie de la relativité générale d'Einstein ; toutefois, le calcul est beaucoup plus compliqué. C'est Karl Schwarzschild qui, le premier, a obtenu l'expression du « rayon de non-retour » pour un trou noir ne tournant pas sur lui-même. Depuis, on l'appelle « rayon de Schwarzschild » ( $R_{Sch}$ ) en son honneur.

C'est une coïncidence si le calcul de la taille d'un trou noir donne le même résultat selon que l'on utilise la loi de la gravitation universelle et la seconde loi de Newton ou la relativité générale. Lors de la formation d'un trou noir, la théorie de Newton n'est pas valable et c'est la relativité générale qui doit être utilisée.



Signal enregistré à Hanford, Etat de Washington  
Signal enregistré à Livingston, Louisiane

## La Détection Directe des Ondes Gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles ont été détectées pour la première fois le 14 septembre 2015 par les collaborations LIGO et Virgo. L'image ci-dessus compare les données enregistrées dans les deux détecteurs jumeaux « LIGO Avancés » : elles proviennent de la fusion de deux trous noirs. Les courbes rouge et bleue montrent les signaux observés respectivement par les détecteurs LIGO à Hanford (état de Washington) et à Livingston (Louisiane). Après avoir voyagé pendant plus d'un milliard d'années, l'onde gravitationnelle est arrivée d'abord à Livingston, puis sept millisecondes plus tard à Hanford.

Les deux signaux, très ressemblants, sont conformes aux prédictions théoriques de la relativité générale pour un système binaire de trous noirs de masses respectives 36 et 29 fois celle du Soleil. Au moment de la fusion, l'émission d'ondes gravitationnelles s'arrête brusquement : le trou noir unique nouvellement formé (de masse 62 fois celle du Soleil) revient à l'équilibre. Au final, au cours de ce processus, environ trois masses solaires (36+29-62) ont été converties en énergie sous forme d'ondes gravitationnelles. Il s'agit d'une quantité d'énergie colossale, émise en un temps très court.

La vue d'artiste au-dessus des formes d'onde montre le système binaire de trous noirs à différents instants. La phase dite spirante peut durer des millions voire des milliards d'années jusqu'à la fusion. Les données montrent les derniers 15 centièmes de seconde de la phase spirante. Les ondes gravitationnelles les plus fortes sont émises à l'instant de la fusion des deux trous noirs, entre les temps  $t = 0,35$  s et  $t = 0,44$  s sur le graphique. La phase de désexcitation du trou noir final, très brève, commence à  $t = 0,44$  s environ.

La constante de gravitation universelle étant petite, la gravitation est la plus faible des quatre interactions fondamentales connues (par exemple, un petit aimant reste collé sur la porte d'un réfrigérateur alors qu'il est attiré gravitationnellement par la Terre entière). Cependant, les forces gravitationnelles produites par des objets extrêmement massifs peuvent générer une énergie considérable. Ainsi, pendant les derniers instants de ce système de trous noirs, la puissance maximale émise sous forme d'ondes gravitationnelles a été plus de dix fois supérieure à la puissance lumineuse émise par toutes les étoiles de toutes les galaxies de l'Univers observable.

## La Relativité Générale d'Einstein



En 1915, Albert Einstein publie la théorie de la relativité générale. Dans ce cadre, la gravitation n'est plus une force mais une propriété de l'espace-temps (la réunion de l'espace usuel à trois dimensions et du temps, qui ne sont pas indépendants) en présence d'objets massifs. Ces objets déforment et étirent l'espace-temps autour d'eux ; on dit souvent qu'ils le « courbent ». Et la force de gravitation que nous ressentons est la conséquence de la courbure de l'espace-temps.

Les équations d'Einstein décrivent l'interaction entre les masses et l'espace-temps.

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

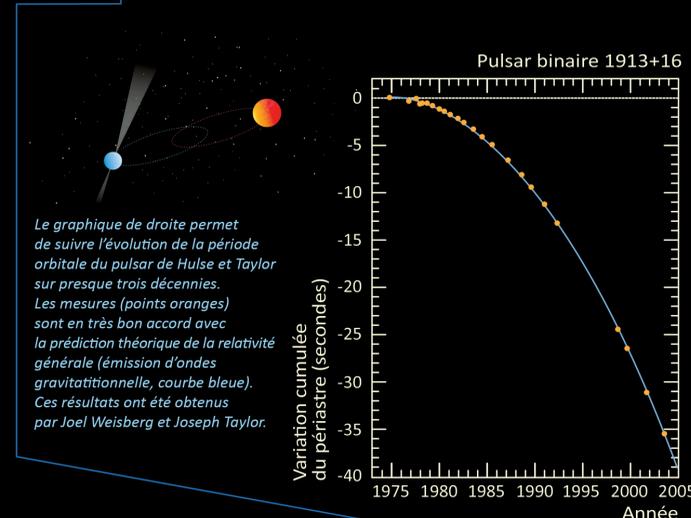
Elles peuvent être résumées par une citation célèbre de John Archibald Wheeler :

« L'espace-temps dit à la matière comment se déplacer ; la matière dit à l'espace-temps comment se courber. »

Dans ces équations,  $G_{\mu\nu}$  décrit la courbure de l'espace-temps tandis que  $T_{\mu\nu}$  rend compte des distributions de masse et d'énergie. Ces deux quantités mathématiques à quatre dimensions (trois d'espace et une de temps) sont proportionnelles. La constante qui les relie dépend de deux quantités fondamentales : la vitesse de la lumière  $c$  et la constante de gravitation universelle  $G$ . Dans la plupart des cas, les équations d'Einstein se simplifient et se ramènent à la loi de la gravitation universelle de Newton.

## Ondes Gravitationnelles

La théorie de la relativité générale d'Einstein prédit que deux astres orbitant l'un autour de l'autre émettent des ondes gravitationnelles. Ces ondes leur font perdre de l'énergie, ce qui fait qu'ils vont lentement spiraler l'un vers l'autre avant de fusionner. Si l'un de ces astres émet un signal régulier (comme le fait un pulsar), sa fréquence augmente à mesure que l'orbite se contracte. Ce phénomène a été observé pour la première fois pour PSRB 1913+16, un pulsar binaire découvert en 1974 par Russel Hulse et Joseph Taylor. Dans ce système, les deux astres sont des étoiles à neutrons. L'une d'elles est un pulsar qui émet des flashes périodiques d'ondes radio, utilisés pour suivre les variations de la période orbitale du système. La figure ci-dessous montre une vue d'artiste du pulsar binaire ainsi qu'un graphique retraçant l'évolution de la période du système sur 30 ans.



Le graphique de droite permet de suivre l'évolution de la période orbitale du pulsar de Hulse et Taylor sur presque trois décennies. Les mesures (points oranges) sont en très bon accord avec la prédiction théorique de la relativité générale (émission d'ondes gravitationnelle, courbe bleue). Ces résultats ont été obtenus par Joel Weisberg et Joseph Taylor.