

À l'écoute des ondes gravitationnelles

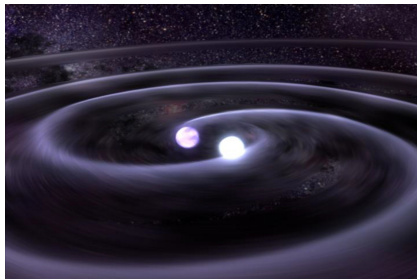
Loïc Villain

Laboratoire de Mathématiques et Physique Théorique (LMPT),
Département de Physique, Université de Tours
loic@lmpt.univ-tours.fr

Assises des Sciences-Physiques
10 Novembre 2016

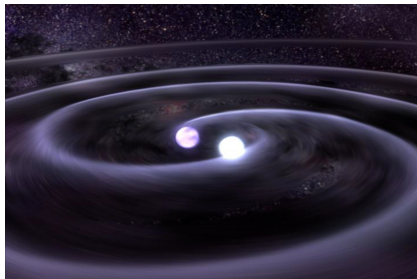
GW150914 et GW151226

- ▶ 11 février 2016 : annonce de la **détection** d'ondes gravitationnelles par l'**expérience LIGO** (États-Unis) ;
- ▶ Quelques faits remarquables :
 1. première détection directe (le 14 septembre 2015) ;
 2. près de 100 ans après la prédiction théorique de leur existence par Einstein ;
 3. 2 jours après la mise en service de la version « avancée » de l'expérience ;
 4. rendue possible par la mesure de variations de distances inférieures à la taille d'un noyau atomique ;
 5. confirmation de l'existence de systèmes binaires de trous noirs ;
 6. première observation directe de trous noirs (deuxième le 26 décembre 2015).



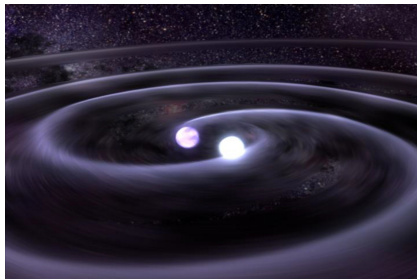
GW150914 et GW151226

- ▶ 11 février 2016 : annonce de la **détection** d'ondes gravitationnelles par l'expérience **LIGO** (États-Unis) ;
- ▶ **Quelques faits remarquables** :
 1. première détection **directe** (le 14 septembre 2015) ;
 2. près de **100 ans** après la prédiction théorique de leur existence par Einstein ;
 3. **2 jours** après la mise en service de la version « avancée » de l'expérience ;
 4. rendue possible par la mesure de variations de **distances inférieures à la taille d'un noyau atomique** ;
 5. confirmation de l'existence de **systèmes binaires** de **trous noirs** ;
 6. première **observation directe** de trous noirs (deuxième le 26 décembre 2015).



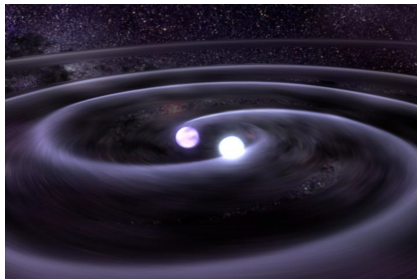
GW150914 et GW151226

- ▶ 11 février 2016 : annonce de la **détection** d'ondes gravitationnelles par l'expérience **LIGO** (États-Unis) ;
- ▶ **Quelques faits remarquables** :
 1. première détection **directe** (le **14 septembre 2015**) ;
 2. près de **100 ans** après la prédiction théorique de leur existence par Einstein ;
 3. **2 jours** après la mise en service de la version « avancée » de l'expérience ;
 4. rendue possible par la mesure de variations de **distances inférieures à la taille d'un noyau atomique** ;
 5. confirmation de l'existence de **systèmes binaires** de **trous noirs** ;
 6. première **observation directe** de trous noirs (deuxième le 26 décembre 2015).



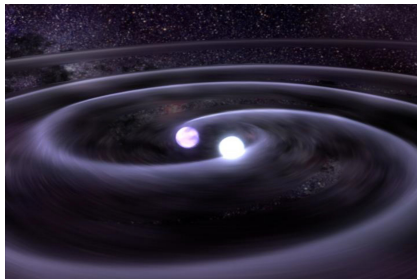
GW150914 et GW151226

- ▶ 11 février 2016 : annonce de la **détection** d'ondes gravitationnelles par l'expérience **LIGO** (États-Unis) ;
- ▶ **Quelques faits remarquables** :
 1. première détection **directe** (le **14 septembre 2015**) ;
 2. près de **100 ans** après la prédiction théorique de leur existence par Einstein ;
 3. **2 jours** après la mise en service de la version « avancée » de l'expérience ;
 4. rendue possible par la mesure de variations de **distances inférieures à la taille d'un noyau atomique** ;
 5. confirmation de l'existence de **systèmes binaires de trous noirs** ;
 6. première **observation directe** de trous noirs (deuxième le 26 décembre 2015).



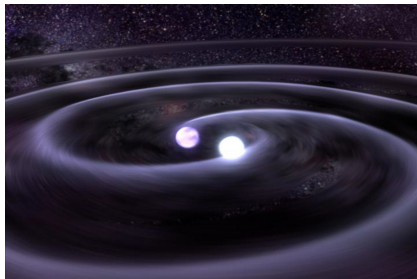
GW150914 et GW151226

- ▶ 11 février 2016 : annonce de la **détection** d'ondes gravitationnelles par l'expérience **LIGO** (États-Unis) ;
- ▶ **Quelques faits remarquables** :
 1. première détection **directe** (le **14 septembre 2015**) ;
 2. près de **100 ans** après la prédiction théorique de leur existence par Einstein ;
 3. **2 jours** après la mise en service de la version « avancée » de l'expérience ;
 4. rendue possible par la mesure de variations de **distances inférieures à la taille d'un noyau atomique** ;
 5. confirmation de l'existence de **systèmes binaires de trous noirs** ;
 6. première **observation directe** de trous noirs (deuxième le 26 décembre 2015).



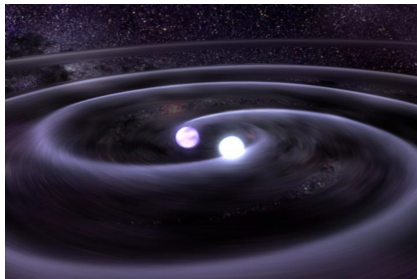
GW150914 et GW151226

- ▶ 11 février 2016 : annonce de la **détection** d'ondes gravitationnelles par l'expérience **LIGO** (États-Unis) ;
- ▶ **Quelques faits remarquables** :
 1. première détection **directe** (le **14 septembre 2015**) ;
 2. près de **100 ans** après la prédiction théorique de leur existence par Einstein ;
 3. **2 jours** après la mise en service de la version « avancée » de l'expérience ;
 4. rendue possible par la mesure de variations de **distances inférieures à la taille d'un noyau atomique** ;
 5. confirmation de l'existence de **systèmes binaires de trous noirs** ;
 6. première **observation directe** de trous noirs (deuxième le 26 décembre 2015).



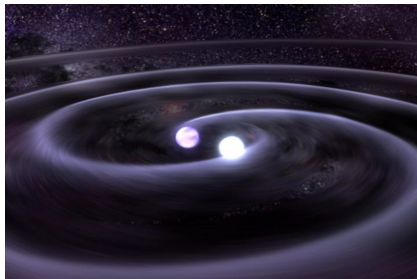
GW150914 et GW151226

- ▶ 11 février 2016 : annonce de la **détection** d'ondes gravitationnelles par l'expérience **LIGO** (États-Unis) ;
- ▶ **Quelques faits remarquables** :
 1. première détection **directe** (le **14 septembre 2015**) ;
 2. près de **100 ans** après la prédiction théorique de leur existence par Einstein ;
 3. **2 jours** après la mise en service de la version « avancée » de l'expérience ;
 4. rendue possible par la mesure de variations de **distances inférieures à la taille d'un noyau atomique** ;
 5. confirmation de l'existence de **systèmes binaires** de trous noirs ;
 6. première **observation directe** de trous noirs (deuxième le 26 décembre 2015).



GW150914 et GW151226

- ▶ 11 février 2016 : annonce de la **détection** d'ondes gravitationnelles par l'expérience **LIGO** (États-Unis) ;
- ▶ **Quelques faits remarquables** :
 1. première détection **directe** (le **14 septembre 2015**) ;
 2. près de **100 ans** après la prédiction théorique de leur existence par Einstein ;
 3. **2 jours** après la mise en service de la version « avancée » de l'expérience ;
 4. rendue possible par la mesure de variations de **distances inférieures à la taille d'un noyau atomique** ;
 5. confirmation de l'existence de **systèmes binaires** de **trous noirs** ;
 6. première **observation directe** de trous noirs (deuxième le 26 décembre 2015).



Plan

Ondes : lumière et son

Ondes gravitationnelles et relativité générale

Sources d'ondes gravitationnelles

Détection des ondes gravitationnelles

GW150914 et GW151226

Conclusion

1

Ondes : lumière et son



Onde ?

► **perturbation d'un « milieu » qui se propage de proche en proche**

- transport d'énergie ;
- pas nécessairement transport de matière ;
- milieu non-matériel possible ;
- nature **physique** de l'onde dépend de celle du milieu ;
- caractérisées par une **célérité** c (~ 330 m/s pour le son dans l'air, 300 000 km/s pour la lumière dans le vide, etc.)

► **exemples :**

1. vague = onde de surface ;
2. son = onde volumique de pression/densité ;
3. onde électromagnétique (lumière, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (non-matériels), ...

Onde ?

► **perturbation d'un « milieu » qui se propage de proche en proche**

- transport d'**énergie** ;
- pas nécessairement transport de matière ;
- milieu non-matériel possible ;
- nature **physique** de l'onde dépend de celle du milieu ;
- caractérisées par une **célérité** c (~ 330 m/s pour le son dans l'air, 300 000 km/s pour la lumière dans le vide, etc.)

► **exemples :**

1. **vague** = onde de surface ;
2. **son** = onde volumique de pression/densité ;
3. **onde électromagnétique** (lumière, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (non-matériels), ...

Onde ?

► **perturbation** d'un « **milieu** » qui **se propage de proche en proche**

- transport d'**énergie** ;
- pas nécessairement transport de matière ;
- milieu non-matériel possible ;
- nature **physique** de l'onde dépend de celle du milieu ;
- caractérisées par une **célérité** c (~ 330 m/s pour le son dans l'air, 300 000 km/s pour la lumière dans le vide, etc.)

► **exemples :**

1. **vague** = onde de surface ;
2. **son** = onde volumique de pression/densité ;
3. **onde électromagnétique** (lumière, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (non-matériels), ...

Onde ?

► **perturbation d'un « milieu » qui se propage de proche en proche**

- transport d'**énergie** ;
- pas nécessairement transport de matière ;
- milieu non-matériel possible ;
- nature **physique** de l'onde dépend de celle du milieu ;
- caractérisées par une **célérité** c (~ 330 m/s pour le son dans l'air, 300 000 km/s pour la lumière dans le vide, etc.)

► **exemples :**

1. vague = onde de surface ;
2. son = onde volumique de pression/densité ;
3. onde électromagnétique (lumière, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (non-matériels), ...

Onde ?

► **perturbation** d'un « **milieu** » qui **se propage de proche en proche**

- transport d'**énergie** ;
- pas nécessairement transport de matière ;
- milieu non-matériel possible ;
- nature **physique** de l'onde dépend de celle du milieu ;
- caractérisées par une **célérité** c (~ 330 m/s pour le son dans l'air, 300 000 km/s pour la lumière dans le vide, etc.)

► **exemples :**

1. **vague** = onde de surface ;
2. **son** = onde volumique de pression/densité ;
3. **onde électromagnétique** (lumière, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (non-matériels), ...

Onde ?

► **perturbation** d'un « **milieu** » qui **se propage de proche en proche**

- transport d'**énergie** ;
- pas nécessairement transport de matière ;
- milieu non-matériel possible ;
- nature **physique** de l'onde dépend de celle du milieu ;
- caractérisées par une **célérité** c (~ 330 m/s pour le son dans l'air, 300 000 km/s pour la lumière dans le vide, etc.)

► **exemples :**

1. **vague** = onde de surface ;
2. **son** = onde volumique de pression/densité ;
3. **onde électromagnétique** (lumière, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (non-matériels), ...

Onde ?

► **perturbation** d'un « **milieu** » qui **se propage de proche en proche**

- transport d'**énergie** ;
- pas nécessairement transport de matière ;
- milieu non-matériel possible ;
- nature **physique** de l'onde dépend de celle du milieu ;
- caractérisées par une **célérité** c (~ 330 m/s pour le son dans l'air, 300 000 km/s pour la lumière dans le vide, etc.)

► **exemples :**

1. **vague** = onde de surface ;
2. **son** = onde volumique de pression/densité ;
3. **onde électromagnétique** (**lumière**, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (**non-matériels**), ...

Onde ?

► **perturbation** d'un « **milieu** » qui **se propage de proche en proche**

- transport d'**énergie** ;
- pas nécessairement transport de matière ;
- milieu non-matériel possible ;
- nature **physique** de l'onde dépend de celle du milieu ;
- caractérisées par une **célérité** c (~ 330 m/s pour le son dans l'air, 300 000 km/s pour la lumière dans le vide, etc.)

► **exemples :**

1. **vague** = onde de surface ;
2. **son** = onde volumique de pression/densité ;
3. **onde électromagnétique** (**lumière**, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (**non-matériels**), ...

Onde ?

► **perturbation** d'un « **milieu** » qui **se propage de proche en proche**

- transport d'**énergie** ;
- pas nécessairement transport de matière ;
- milieu non-matériel possible ;
- nature **physique** de l'onde dépend de celle du milieu ;
- caractérisées par une **célérité** c (~ 330 m/s pour le son dans l'air, 300 000 km/s pour la lumière dans le vide, etc.)

► **exemples :**

1. **vague** = onde de surface ;
2. **son** = onde volumique de pression/densité ;
3. **onde électromagnétique** (**lumière**, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (**non-matériels**), ...

Onde ?

► **perturbation** d'un « **milieu** » qui **se propage de proche en proche**

- transport d'**énergie** ;
- pas nécessairement transport de matière ;
- milieu non-matériel possible ;
- nature **physique** de l'onde dépend de celle du milieu ;
- caractérisées par une **célérité** c (~ 330 m/s pour le son dans l'air, 300 000 km/s pour la lumière dans le vide, etc.)

► **exemples :**

1. **vague** = onde de surface ;
2. **son** = onde volumique de pression/densité ;
3. **onde électromagnétique** (**lumière**, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (**non-matériels**), ...

Onde monochromatique

- ▶ souvent **oscillatoire** → décrite par une **fréquence f** et une **longueur d'onde λ** (inversement proportionnelles, liées par la célérité : **$c = \lambda f$**);
- ▶ **exemples** : note musicale ou couleur pure (mais La 440 Hz \neq onde radio avec $f = 440$ Hz et $\lambda = 680$ km);
- ▶ **contre-exemple** : tsunami...
- ▶ transport d'énergie dépend de l'**amplitude (intensité)** et de la fréquence.

Onde monochromatique

- ▶ souvent **oscillatoire** → décrite par une **fréquence f** et une **longueur d'onde λ** (inversement proportionnelles, liées par la célérité : $c = \lambda f$);
- ▶ **exemples** : note musicale ou couleur pure (mais La 440 Hz \neq onde radio avec $f = 440$ Hz et $\lambda = 680$ km);
- ▶ **contre-exemple** : tsunami...
- ▶ transport d'énergie dépend de l'**amplitude (intensité)** et de la fréquence.

Onde monochromatique

- ▶ souvent **oscillatoire** → décrite par une **fréquence f** et une **longueur d'onde λ** (inversement proportionnelles, liées par la célérité : $c = \lambda f$) ;
- ▶ **exemples** : note musicale ou couleur pure (mais La 440 Hz \neq onde radio avec $f = 440$ Hz et $\lambda = 680$ km) ;
- ▶ **contre-exemple** : tsunami...
- ▶ transport d'énergie dépend de l'**amplitude (intensité)** et de la fréquence.

Onde monochromatique

- ▶ souvent **oscillatoire** → décrite par une **fréquence** f et une **longueur d'onde** λ (inversement proportionnelles, liées par la célérité : $c = \lambda f$);
- ▶ **exemples** : note musicale ou couleur pure (mais La 440 Hz \neq onde radio avec $f = 440$ Hz et $\lambda = 680$ km);
- ▶ **contre-exemple** : tsunami...
- ▶ transport d'énergie dépend de l'**amplitude (intensité)** et de la fréquence.

Onde monochromatique

- ▶ souvent **oscillatoire** → décrite par une **fréquence f** et une **longueur d'onde λ** (inversement proportionnelles, liées par la célérité : $c = \lambda f$) ;
- ▶ **exemples** : note musicale ou couleur pure (mais La 440 Hz \neq onde radio avec $f = 440$ Hz et $\lambda = 680$ km) ;
- ▶ **contre-exemple** : tsunami...
- ▶ transport d'énergie dépend de l'**amplitude (intensité)** et de la fréquence.

Propriétés des ondes sonores

- ▶ vibrations d'un **milieu matériel** ;
- ▶ ondes **scalaires** : variation d'un **nombre** (pression ou densité) ;
- ▶ ondes **longitudinales** : action de l'onde **parallèle** à la direction de propagation.

Propriétés des ondes sonores

- ▶ vibrations d'un **milieu matériel** ;
- ▶ ondes **scalaires** : variation d'un **nombre** (pression ou densité) ;
- ▶ ondes **longitudinales** : action de l'onde **parallèle** à la direction de propagation.

Propriétés des ondes sonores

- ▶ vibrations d'un **milieu matériel** ;
- ▶ ondes **scalaires** : variation d'un **nombre** (pression ou densité) ;
- ▶ ondes **longitudinales** : action de l'onde **parallèle** à la direction de propagation.

Ondes de densité et galaxies spirales

- ▶ bras d'une galaxie spirale = **région de densité plus élevée** ;
- ▶ **onde de densité** \neq rotation orbitale (différentielle) des étoiles ;
- ▶ semblable à un bouchon localisé derrière un camion.



(M101)

Ondes de densité et galaxies spirales

- ▶ bras d'une galaxie spirale = **région de densité plus élevée** ;
- ▶ **onde de densité** \neq rotation orbitale (différentielle) des étoiles ;
- ▶ semblable à un bouchon localisé derrière un camion.



(M101)

Ondes de densité et galaxies spirales

- ▶ bras d'une galaxie spirale = **région de densité plus élevée** ;
- ▶ **onde de densité** \neq rotation orbitale (différentielle) des étoiles ;
- ▶ semblable à un bouchon localisé derrière un camion.



(M101)

Ondes sonores usuelles

- ▶ longueur d'onde \gtrsim taille de la source ou détecteur (oreilles, etc.) \sim qqs cms ;
- ▶ conséquences :
 - perception non-directionnelle (deux oreilles pour localiser la source) ;
 - interférence entre signaux issus de sources distinctes (= sensibilité au bruit)

rouge = positif (bosse) ; bleu = négatif (creux).

Ondes sonores usuelles

- ▶ **longueur d'onde** \gtrsim taille de la source ou détecteur (oreilles, etc.) \sim qqs cms ;
- ▶ conséquences :
 - **perception non-directionnelle** (deux oreilles pour localiser la source) ;
 - **interférence** entre signaux issus de **sources distinctes** (= **sensibilité au bruit**)

rouge = positif (bosse) ; bleu = négatif (creux).

Ondes sonores usuelles

- ▶ **longueur d'onde** \gtrsim taille de la source ou détecteur (oreilles, etc.) \sim qqs cms ;
- ▶ conséquences :
 - **perception non-directionnelle** (deux oreilles pour localiser la source) ;
 - **interférence** entre signaux issus de **sources distinctes** (= **sensibilité au bruit**)

rouge = positif (bosse) ; bleu = négatif (creux).

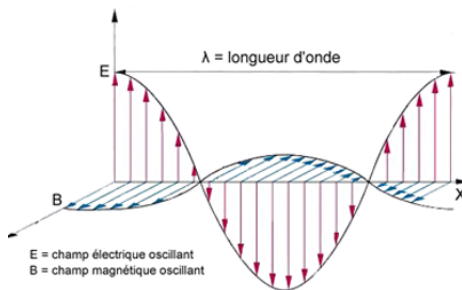
Ondes sonores usuelles

- ▶ **longueur d'onde** \gtrsim taille de la source ou détecteur (oreilles, etc.) \sim qqs cms ;
- ▶ conséquences :
 - **perception non-directionnelle** (deux oreilles pour localiser la source) ;
 - **interférence** entre signaux issus de **sources distinctes** (= **sensibilité au bruit**).

rouge = positif (bosse) ; bleu = négatif (creux).

Ondes et champ électromagnétique

- ▶ ondes électromagnétiques = vibrations du **champ électromagnétique** (= champ électrique **et** champ magnétique) ;
- ▶ champs **vectoriels** : « **flèches** » en chaque point de l'espace ;



Propriétés des ondes électromagnétiques

- ▶ **champ électromagnétique** immatériel
→ propagation dans le « **vide** » possible ;
- ▶ ondes **transverses** : flèches **perpendiculaires** à la direction de propagation
→ deux **polarisations**.

les **deux polarisations circulaires (gauche ou droite)** du champ électromagnétique.

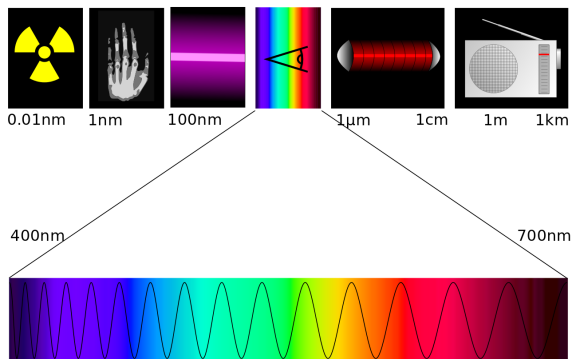
Propriétés des ondes électromagnétiques

- ▶ **champ électromagnétique** immatériel
→ propagation dans le « **vide** » possible ;
- ▶ ondes **transverses** : flèches **perpendiculaires** à la direction de propagation
→ deux **polarisations**.

les **deux polarisations circulaires (gauche ou droite)** du champ électromagnétique.

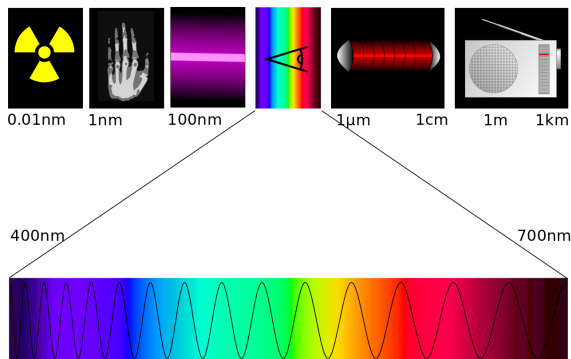
Ondes lumineuses

- ▶ **longueur d'onde** \lesssim taille de la source ou du détecteur (yeux, etc.) ;
- ▶ période temporelle \ll **temps de réaction du détecteur** ;
- ▶ succession d'**émissions brèves** par processus **quantiques/aléatoires** ;
- **sensibilité au signal moyenné** ;
- pas d'interférences entre sources distinctes (pas de « bruit lumineux ») ;
- **perception directionnelle** (localisation d'une source avec un seul œil).



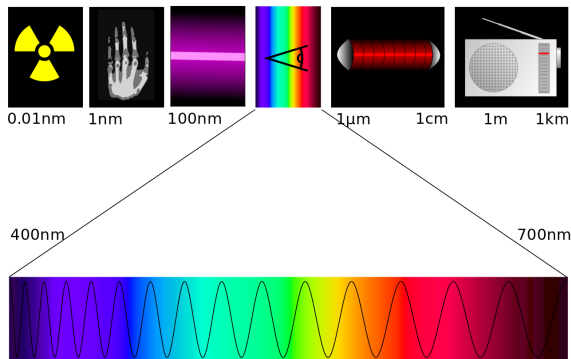
Ondes lumineuses

- ▶ **longueur d'onde** \lesssim taille de la source ou du détecteur (yeux, etc.) ;
- ▶ période temporelle \ll **temps de réaction du détecteur** ;
- ▶ succession d'**émissions brèves** par processus **quantiques/aléatoires** ;
- **sensibilité au signal moyenné** ;
- pas d'interférences entre sources distinctes (pas de « bruit lumineux ») ;
- **perception directionnelle** (localisation d'une source avec un seul œil).



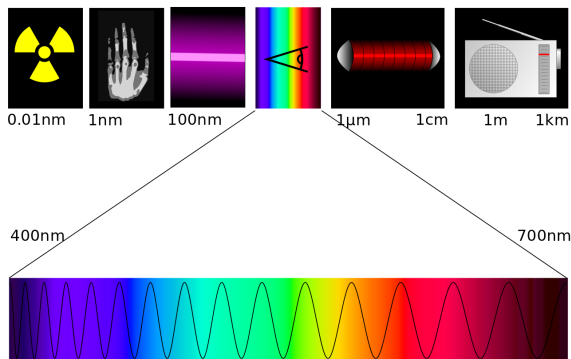
Ondes lumineuses

- ▶ **longueur d'onde** \lesssim taille de la source ou du détecteur (yeux, etc.) ;
 - ▶ période temporelle \ll **temps de réaction du détecteur** ;
 - ▶ succession d'**émissions brèves** par processus **quantiques/aléatoires** ;
- **sensibilité au signal moyenné** ;
- pas d'interférences entre sources distinctes (pas de « bruit lumineux ») ;
- **perception directionnelle** (localisation d'une source avec un seul œil).



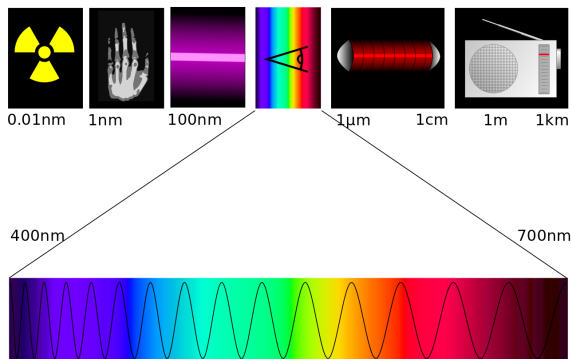
Ondes lumineuses

- ▶ **longueur d'onde** \lesssim taille de la source ou du détecteur (yeux, etc.) ;
 - ▶ période temporelle \ll **temps de réaction du détecteur** ;
 - ▶ succession d'**émissions brèves** par processus **quantiques/aléatoires** ;
- **sensibilité au signal moyenné** ;
- pas d'interférences entre sources distinctes (pas de « bruit lumineux ») ;
- **perception directionnelle** (localisation d'une source avec un seul œil).



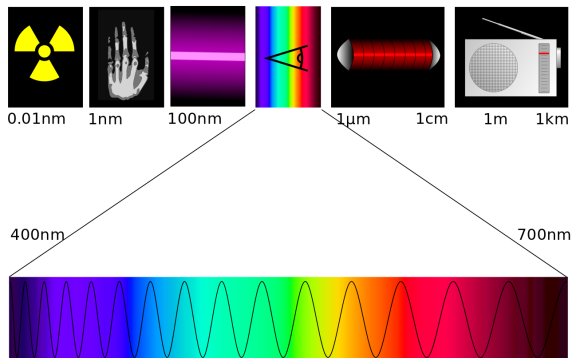
Ondes lumineuses

- ▶ **longueur d'onde** \lesssim taille de la source ou du détecteur (yeux, etc.) ;
 - ▶ période temporelle \ll **temps de réaction du détecteur** ;
 - ▶ succession d'**émissions brèves** par processus **quantiques/aléatoires** ;
- **sensibilité au signal moyenné** ;
- pas d'interférences entre sources distinctes (pas de « bruit lumineux ») ;
- **perception directionnelle** (localisation d'une source avec un seul œil).



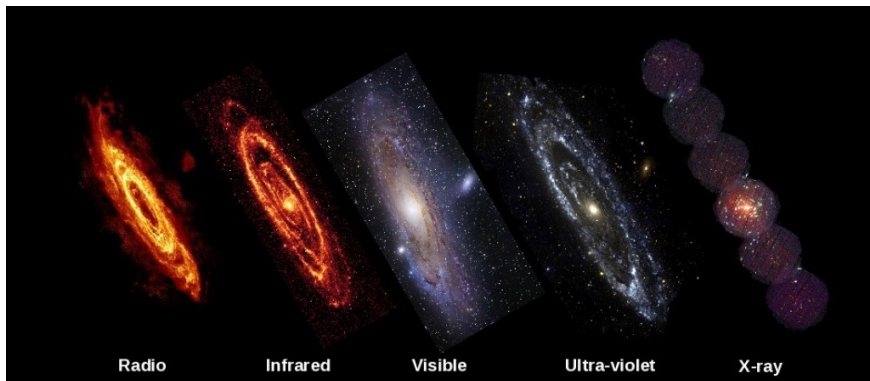
Ondes lumineuses

- ▶ **longueur d'onde** \lesssim taille de la source ou du détecteur (yeux, etc.) ;
 - ▶ période temporelle \ll **temps de réaction du détecteur** ;
 - ▶ succession d'**émissions brèves** par processus **quantiques/aléatoires** ;
- **sensibilité au signal moyenné** ;
- pas d'interférences entre sources distinctes (pas de « bruit lumineux ») ;
- **perception directionnelle** (localisation d'une source avec un seul œil).



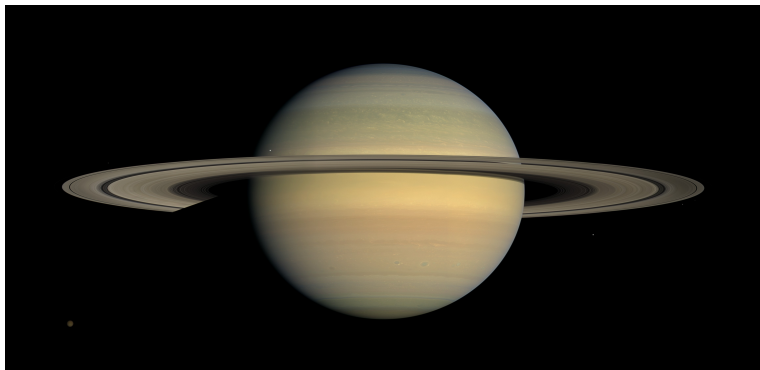
Visualisation d'autres ondes électromagnétiques

- ▶ « **lumières visible et invisible** » : on peut faire des images en **fausses couleurs** ;
- ▶ chaque image est réalisée avec un **détecteur totalement différent**...



M31/Andromède (Planck mission team ; ESA / NASA).

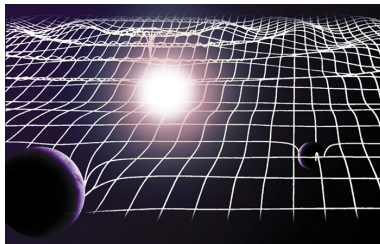
Écoute des ondes électromagnétiques de Saturne



la sonde **Cassini-Huygens** a « écouté » les **ondes radio** émises par les anneaux...
→ retranscription en **faux son**.

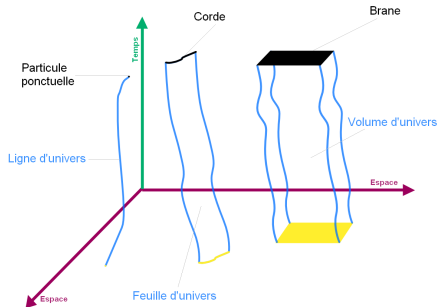
2

Ondes gravitationnelles et relativité générale



Relativité restreinte et espace-temps (1905-1907)

- ▶ vitesse **maximale** et **universelle** pour le transfert d'information (c , **vitesse de la lumière dans le vide**) ;
- ▶ $E = mc^2$: la masse est l'une des formes de l'**énergie**
→ conversion possible de matière en rayonnement et inversement
(→ source d'**énergie des étoiles**) ;
- ▶ pas d'espace ni de temps absolus : union des deux dans le concept d'**espace-temps** (Minkowski, 1907).



Espace et espace-temps

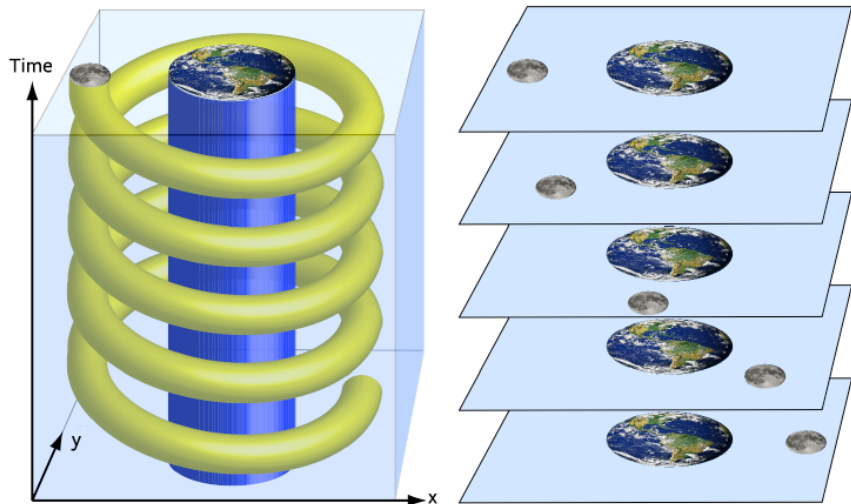
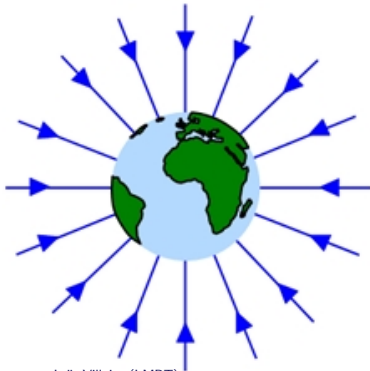


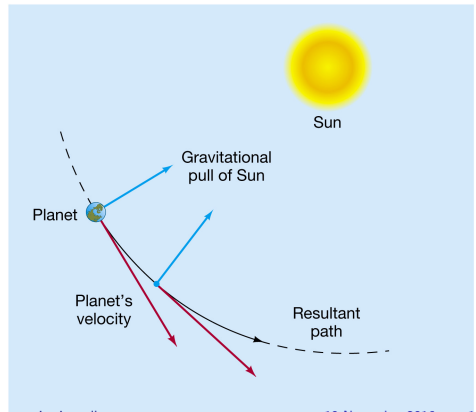
Image : Chad Hagen.

Gravitation universelle (Newton, 1687)

- ▶ **force attractive** agissant entre tous les corps → **champ gravitationnel** ;
- ▶ intensité dépend de la distance ($\propto 1/r^2$) ;
- ▶ action **instantanée** à distance ;
- ▶ **orbite** = **compromis** entre ligne droite et chute (cf. principe d'inertie) ;
- ▶ explication des lois de Kepler, des marées ; prédiction du retour de la comète de Halley, de l'existence de Neptune, etc.

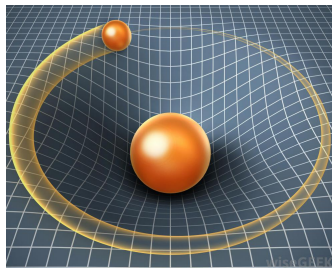


Loïc Villain (LMPT)



Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

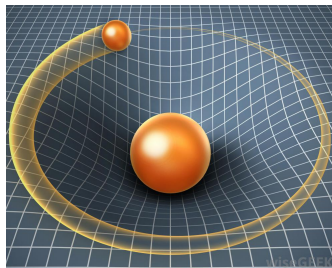
- ▶ besoin de modifier la théorie de Newton pour **action à vitesse $\leq c$** ;
- ▶ **idées** :
 - ▶ gravitation \neq force comme les autres (universalité de la chute libre) ;
 - ▶ universalité \equiv propriété de l'espace-temps lui-même ;
 - ▶ gravitation \sim courbure de l'espace-temps par la matière et l'énergie ;
 - ▶ champ gravitationnel \leftrightarrow espace-temps lui-même (\sim milieu élastique) ;
 - ▶ orbites = « lignes droites » (géodésiques) dans un espace-temps courbe.



mouvement « en ligne droite » dans un espace bidimensionnel courbe

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

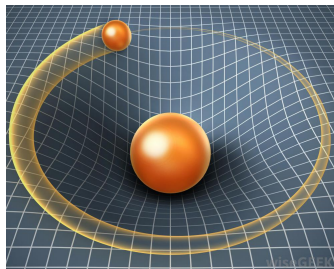
- ▶ besoin de modifier la théorie de Newton pour **action à vitesse $\leq c$** ;
- ▶ **idées** :
 - ▶ gravitation \neq force comme les autres (**universalité de la chute libre**) ;
 - ▶ universalité \equiv propriété de l'**espace-temps** lui-même ;
 - ▶ gravitation \sim **courbure** de l'espace-temps par la matière et l'**énergie** ;
 - ▶ **champ gravitationnel** \leftrightarrow espace-temps lui-même (\sim milieu élastique) ;
 - ▶ orbites = « **lignes droites** » (**géodésiques**) dans un espace-temps courbe.



mouvement « en ligne droite » dans un espace bidimensionnel courbe

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

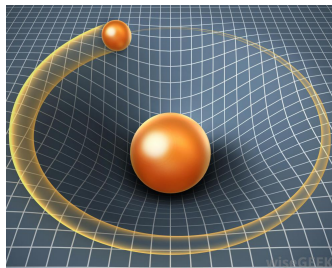
- ▶ besoin de modifier la théorie de Newton pour **action à vitesse $\leq c$** ;
- ▶ **idées** :
 - ▶ gravitation \neq force comme les autres (**universalité de la chute libre**) ;
 - ▶ universalité \equiv propriété de l'**espace-temps** lui-même ;
 - ▶ gravitation \sim **courbure** de l'espace-temps par la matière et l'**énergie** ;
 - ▶ **champ gravitationnel** \leftrightarrow espace-temps lui-même (\sim milieu élastique) ;
 - ▶ orbites = « **lignes droites** » (**géodésiques**) dans un espace-temps courbe.



mouvement « en ligne droite » dans un espace bidimensionnel courbe

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

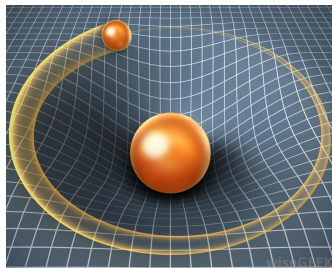
- ▶ besoin de modifier la théorie de Newton pour **action à vitesse $\leq c$** ;
- ▶ **idées** :
 - ▶ gravitation \neq force comme les autres (**universalité de la chute libre**) ;
 - ▶ universalité \equiv propriété de l'**espace-temps** lui-même ;
 - ▶ gravitation \sim **courbure** de l'espace-temps par la matière et l'**énergie** ;
 - ▶ **champ gravitationnel** \leftrightarrow espace-temps lui-même (\sim milieu élastique) ;
 - ▶ orbites = « **lignes droites** » (**géodésiques**) dans un espace-temps courbe.



mouvement « en ligne droite » dans un espace bidimensionnel courbe

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

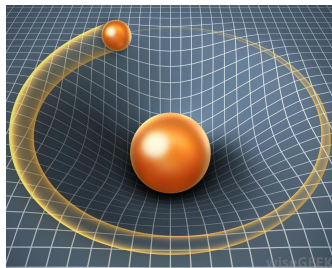
- ▶ besoin de modifier la théorie de Newton pour **action à vitesse $\leq c$** ;
- ▶ **idées** :
 - ▶ gravitation \neq force comme les autres (**universalité de la chute libre**) ;
 - ▶ universalité \equiv propriété de l'**espace-temps** lui-même ;
 - ▶ gravitation \sim **courbure** de l'espace-temps par la matière et l'**énergie** ;
 - ▶ **champ gravitationnel** \leftrightarrow espace-temps lui-même (\sim milieu élastique) ;
 - ▶ orbites = « **lignes droites** » (**géodésiques**) dans un espace-temps courbe.



mouvement « en ligne droite » dans un espace bidimensionnel courbe

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

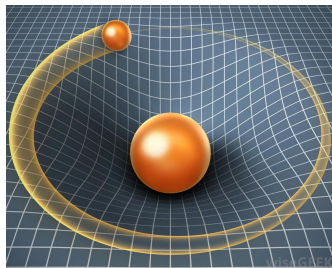
- ▶ besoin de modifier la théorie de Newton pour **action à vitesse $\leq c$** ;
- ▶ **idées** :
 - ▶ gravitation \neq force comme les autres (**universalité de la chute libre**) ;
 - ▶ universalité \equiv propriété de l'**espace-temps** lui-même ;
 - ▶ gravitation \sim **courbure** de l'espace-temps par la matière et l'**énergie** ;
 - ▶ **champ gravitationnel** \leftrightarrow espace-temps lui-même (\sim milieu **élastique**) ;
 - ▶ orbites = « **lignes droites** » (**géodésiques**) dans un espace-temps courbe.



mouvement « en ligne droite » dans un espace bidimensionnel courbe

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

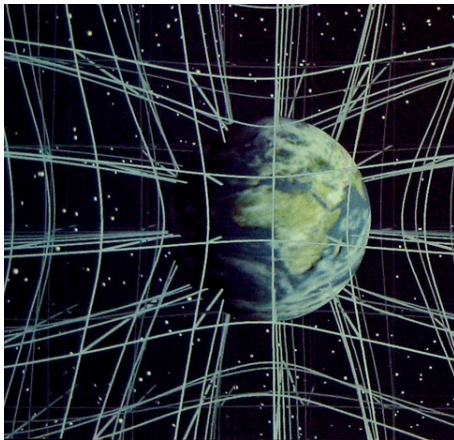
- ▶ besoin de modifier la théorie de Newton pour **action à vitesse $\leq c$** ;
- ▶ **idées** :
 - ▶ gravitation \neq force comme les autres (**universalité de la chute libre**) ;
 - ▶ universalité \equiv propriété de l'**espace-temps** lui-même ;
 - ▶ gravitation \sim **courbure** de l'espace-temps par la matière et l'**énergie** ;
 - ▶ **champ gravitationnel** \leftrightarrow espace-temps lui-même (\sim milieu **élastique**) ;
 - ▶ orbites = « **lignes droites** » (**géodésiques**) dans un espace-temps courbe.



mouvement « en ligne droite » dans un espace bidimensionnel courbe

Courbure de l'espace-temps

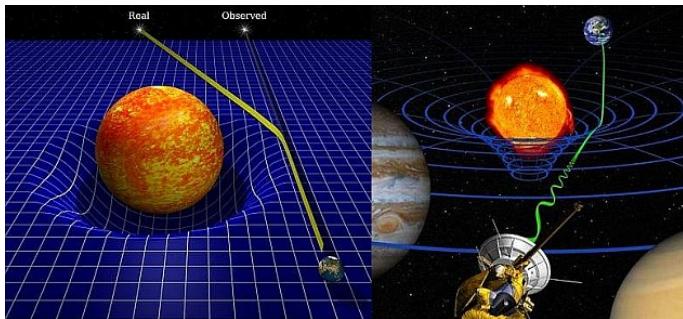
- ▶ mouvement orbital \sim courbure spatiale ;
- ▶ **courbure temporelle** : pieds vieillissent moins vite que tête (cf. **GPS**)...



visualisation tridimensionnelle de la courbure provoquée par la Terre

Tests de la relativité générale

- ▶ prévoit **lumière déviée** en passant près du Soleil
→ première vérification en 1919 durant une **éclipse** ;
- ▶ **nombreux tests plus précis depuis** : communications fréquentes avec des sondes spatiales dans le Système solaire.

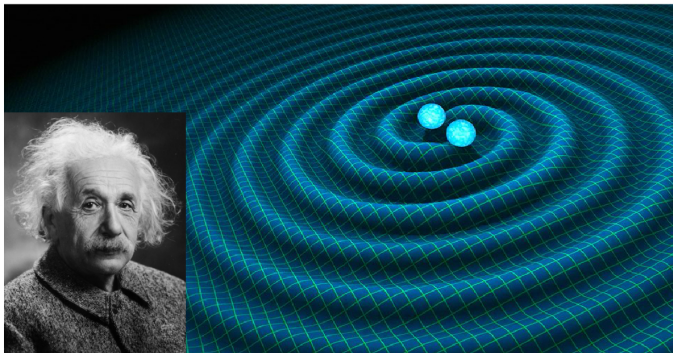


Mirage gravitationnel (images d'une galaxie lointaine)



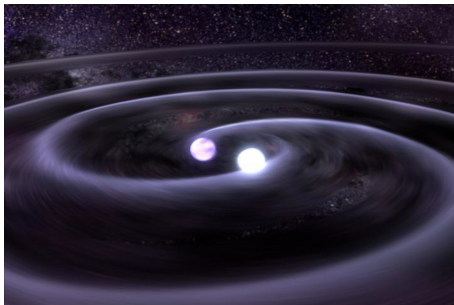
Rayonnement gravitationnel

- ▶ masses mobiles à la surface de l'eau → **vagues** qui se propagent ;
- ▶ **Einstein, 1916** : même chose avec l'espace-temps ;
- ▶ **années 1960-1970** : idée prise plus au sérieux après développements théoriques.



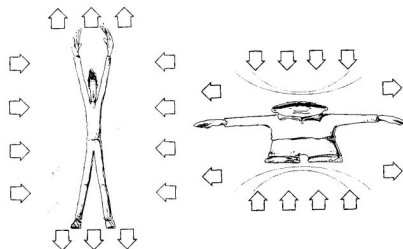
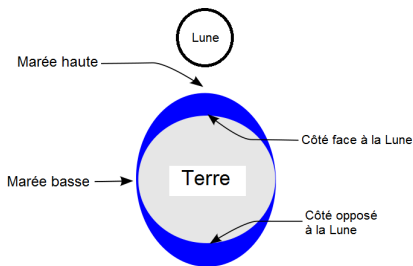
Ondes gravitationnelles

- ▶ perturbation du **champ gravitationnel** ;
- ▶ description **relativiste** → perturbation de la **géométrie de l'espace-temps** ;
- ▶ caractère universel : émises par **tous les corps** (sauf dans des circonstances très particulières), mais (la plupart du temps) en **très faible quantité** ;
- ▶ par certains aspects **analogues** aux ondes électromagnétiques, par d'autres aux ondes acoustiques.



Effet d'une onde gravitationnelle sur la matière

effet similaire aux **marées** → **expansion et compression simultanées/alternées**
 → **variations relatives** de distances.



Analogie électromagnétique

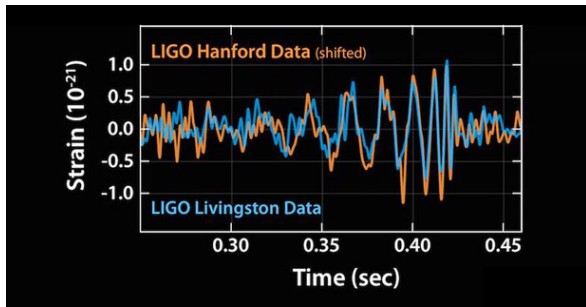
- ▶ vibrations de l'espace(-temps) → propagation à la **vitesse c dans le vide** ;
- ▶ ondes **tensorielles** : variation d'un « **tableau** » (métrique spatio-temporelle) ;
- ▶ ondes **transverses** : action de l'onde **perpendiculaire** à la direction de propagation → deux **polarisations** possibles.

déformations associées aux **deux polarisations** (dites **+** et **×**)
(onde venant vers nous).

Analogie acoustique

ondes observables : **longueur d'onde** \gtrsim taille de la source ou du détecteur.

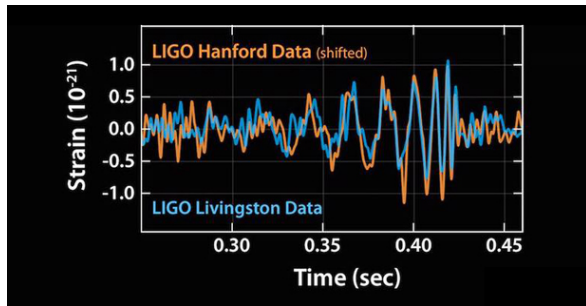
- **perception non-directionnelle** ;
- **interférence** pour **sources distinctes** (= **sensibilité au bruit**)
 - musique gravitationnelle céleste noyée dans un bruit ambiant (~ 1000 fois plus intense) ;
- signal reçu présenté comme un **son** et non une image
 - « son en fausses notes » ;
- détecteurs \sim « **sonophones gravitationnels** ».



Analogie acoustique

ondes observables : **longueur d'onde** \gtrsim taille de la source ou du détecteur.

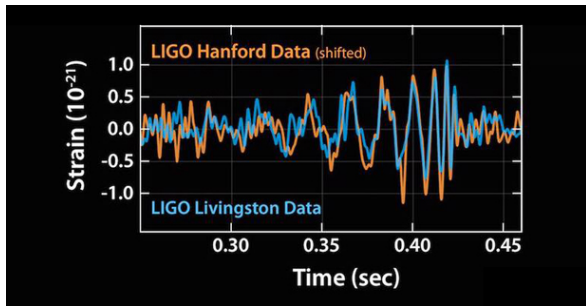
- **perception non-directionnelle** ;
- **interférence** pour **sources distinctes** (= **sensibilité au bruit**)
 - musique gravitationnelle céleste noyée dans un bruit ambiant (~ 1000 fois plus intense) ;
- signal reçu présenté comme un **son** et non une image
 - « son en fausses notes » ;
- détecteurs \sim « **sonophones gravitationnels** ».



Analogie acoustique

ondes observables : **longueur d'onde** \gtrsim taille de la source ou du détecteur.

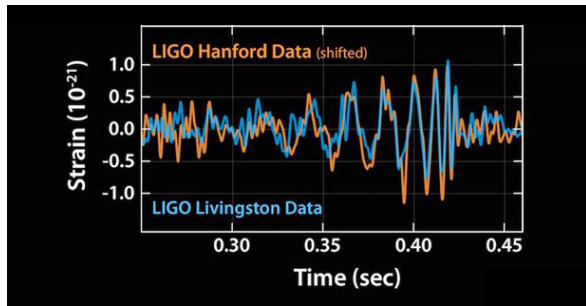
- **perception non-directionnelle** ;
- **interférence** pour **sources distinctes** (= **sensibilité au bruit**)
 - musique gravitationnelle céleste noyée dans un bruit ambiant (~ 1000 fois plus intense) ;
- signal reçu présenté comme un **son** et non une image
 - « son en fausses notes » ;
- détecteurs \sim « **sonophones gravitationnels** ».



Analogie acoustique

ondes observables : **longueur d'onde** \gtrsim taille de la source ou du détecteur.

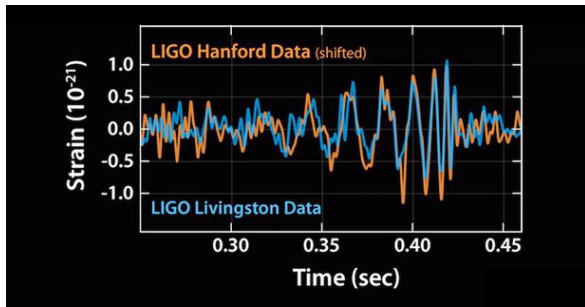
- **perception non-directionnelle** ;
- **interférence** pour **sources distinctes** (= **sensibilité au bruit**)
 - musique gravitationnelle céleste noyée dans un bruit ambiant (**~ 1000 fois plus intense**) ;
- signal reçu présenté comme un **son** et non une image
 - « **son en fausses notes** » ;
- détecteurs \sim « **sonophones gravitationnels** ».



Analogie acoustique

ondes observables : **longueur d'onde** \gtrsim taille de la source ou du détecteur.

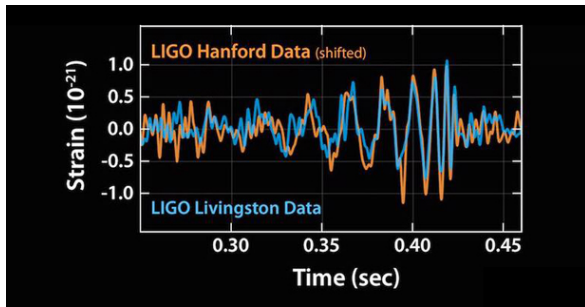
- **perception non-directionnelle** ;
- **interférence** pour **sources distinctes** (= **sensibilité au bruit**)
 - musique gravitationnelle céleste noyée dans un bruit ambiant (**~ 1000 fois plus intense**) ;
- signal reçu présenté comme un **son** et non une image
 - « **son en fausses notes** » ;
- détecteurs \sim « **sonophones gravitationnels** ».



Analogie acoustique

ondes observables : **longueur d'onde** \gtrsim taille de la source ou du détecteur.

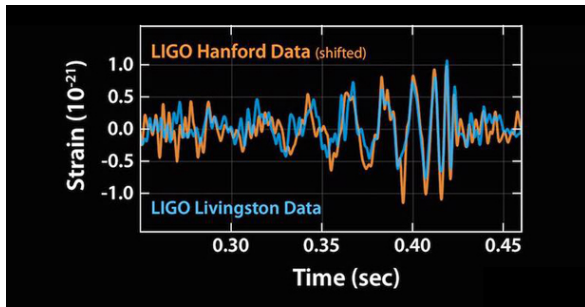
- **perception non-directionnelle** ;
- **interférence** pour **sources distinctes** (= **sensibilité au bruit**)
 - musique gravitationnelle céleste noyée dans un bruit ambiant (**~ 1000 fois plus intense**) ;
- signal reçu présenté comme un **son** et non une image
 - « **son en fausses notes** » ;
- détecteurs \sim « **sonophones gravitationnels** ».



Analogie acoustique

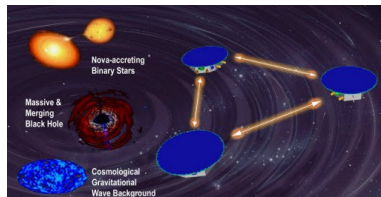
ondes observables : **longueur d'onde** \gtrsim taille de la source ou du détecteur.

- **perception non-directionnelle** ;
- **interférence** pour **sources distinctes** (= **sensibilité au bruit**)
 - musique gravitationnelle céleste noyée dans un bruit ambiant (**~ 1000 fois plus intense**) ;
- signal reçu présenté comme un **son** et non une image
 - « **son en fausses notes** » ;
- détecteurs \sim « **sonophones gravitationnels** ».



3

Sources d'ondes gravitationnelles

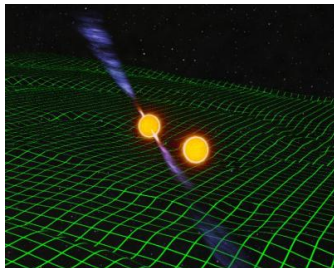


Production d'ondes gravitationnelles

Recette

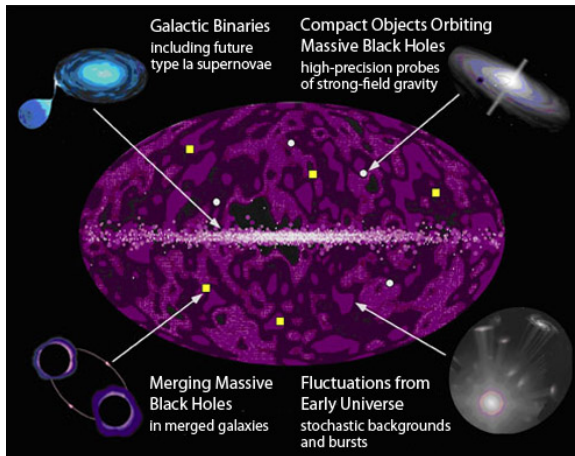
- ▶ Prendre une **grande quantité de masse** (ou d'énergie);
- ▶ La rendre la **plus compacte possible**
(grand rapport $M/R \sim$ potentiel; \neq masse volumique $= M/R^3$);
- ▶ La mettre en **mouvement cohérent** (on ne mélange pas trop!);
- ▶ Accélérer jusqu'à des **vitesse proches de celle de la lumière**.

- **impossible en laboratoire !**
- mais grandes quantités d'**ondes gravitationnelles produites grâce à des objets astrophysiques**;
- sur Terre : signaux très faibles car **sources lointaines** (**variation diamètre Terre \sim largeur atome !**)



Sources astrophysiques

- ▶ principales = **objets compacts** (trous noirs/étoiles à neutrons)
- ▶ autre : **univers primordial**



Objets astrophysiques compacts : étoiles à neutrons

- ▶ restes de l'**effondrement** d'**étoiles massives** en fin de vie ;
- ▶ naissance violente sous la forme d'une **supernova gravitationnelle** : **puissance totale** 10^{45} **watts** (puissance solaire moyenne : 10^{26} watts) ;
- ▶ une à deux fois la masse du Soleil dans une boule de 10 km de rayon (Soleil $\sim 750\,000$ km)
→ matière dans des **conditions extrêmes** (100 milliards de tonnes par litre, superfluidité, champs gravitationnel et magnétique intenses, etc.).



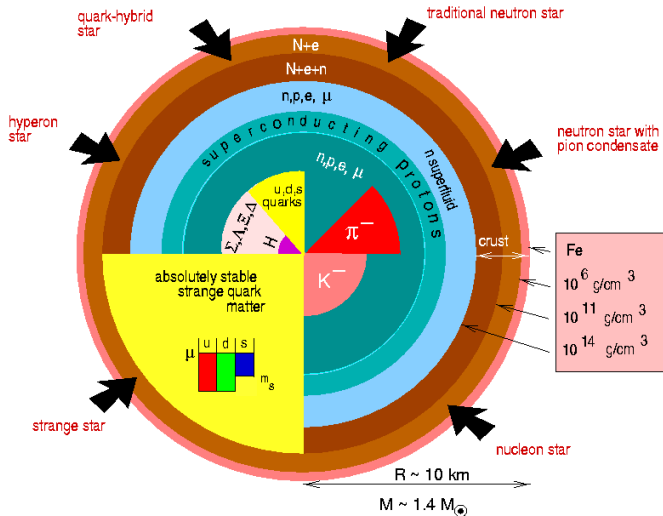
The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)

ESO PR Photo 40/99 (17 November 1999)

© European Southern Observatory



Étoile à neutrons : compositions envisagées à haute densité



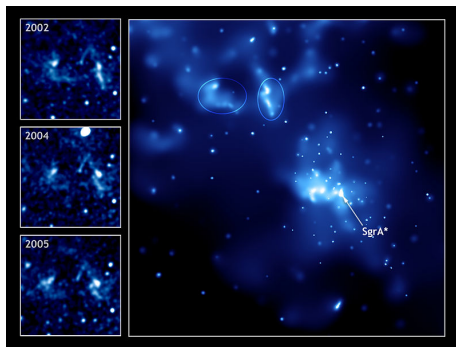
Quelques supernovæ gravitationnelles



Trous noirs astrophysiques

- ▶ **région de l'espace-temps** dont rien ne sort (même pas la lumière, cf. **Michell, 1783 ; Schwarzschild, 1916**) ;
- ▶ frontière = **horizon** du trou noir (**limite de non-retour**) ;
- ▶ cadavre encore plus compact d'une étoile très massive ($M_* > 20 M_\odot$) ;
- ▶ $M \sim M_\odot \rightarrow \ll \text{rayon} \gg \sim 3 \text{ km}$ (**rayon de Schwarzschild, $R_s \propto M$**) ;
- ▶ **Attention** : rayon = circonférence/ $2\pi \neq$ distance entre horizon et $\ll \text{centre} \gg$ (car **géométrie courbe**, etc.).

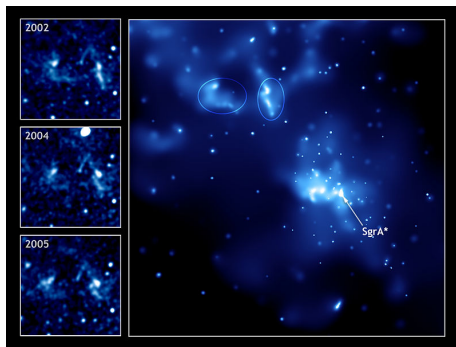
- ▶ trous noirs **supermassifs** au centre des galaxies ;
- ▶ **Sagittarius A*** :
 $M \sim 4 \times 10^6 M_\odot$, $r < 120 \text{ UA}$.



Trous noirs astrophysiques

- ▶ **région de l'espace-temps** dont rien ne sort (même pas la lumière, cf. **Michell, 1783 ; Schwarzschild, 1916**) ;
- ▶ frontière = **horizon** du trou noir (**limite de non-retour**) ;
- ▶ cadavre encore plus compact d'une étoile très massive ($M_* > 20 M_\odot$) ;
- ▶ $M \sim M_\odot \rightarrow \ll \text{rayon} \gg \sim 3 \text{ km}$ (**rayon de Schwarzschild, $R_s \propto M$**) ;
- ▶ **Attention** : rayon = circonférence/ $2\pi \neq$ distance entre horizon et $\ll \text{centre} \gg$ (car **géométrie courbe**, etc.).

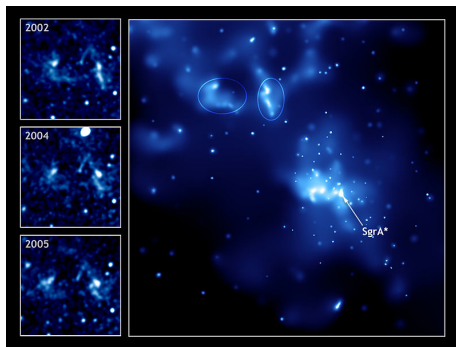
- ▶ trous noirs **supermassifs** au centre des galaxies ;
- ▶ **Sagittarius A*** :
 $M \sim 4 \times 10^6 M_\odot$, $r < 120 \text{ UA}$.



Trous noirs astrophysiques

- ▶ région de l'espace-temps dont rien ne sort (même pas la lumière, cf. **Michell, 1783 ; Schwarzschild, 1916**) ;
- ▶ frontière = **horizon** du trou noir (**limite de non-retour**) ;
- ▶ cadavre encore plus compact d'une étoile très massive ($M_{\star} > 20 M_{\odot}$) ;
- ▶ $M \sim M_{\odot} \rightarrow \ll \text{rayon} \gg \sim 3 \text{ km}$ (rayon de Schwarzschild, $R_s \propto M$) ;
- ▶ **Attention** : rayon = circonférence/ $2\pi \neq$ distance entre horizon et $\ll \text{centre} \gg$ (car **géométrie courbe**, etc.).

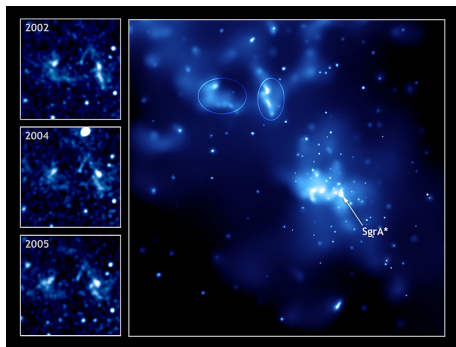
- ▶ trous noirs **supermassifs** au centre des galaxies ;
- ▶ **Sagittarius A*** :
 $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $r < 120 \text{ UA}$.



Trous noirs astrophysiques

- ▶ **région de l'espace-temps** dont rien ne sort (même pas la lumière, cf. **Michell, 1783 ; Schwarzschild, 1916**) ;
- ▶ frontière = **horizon** du trou noir (**limite de non-retour**) ;
- ▶ cadavre encore plus compact d'une étoile très massive ($M_{\star} > 20 M_{\odot}$) ;
- ▶ $M \sim M_{\odot} \rightarrow \ll \text{rayon} \gg \sim \mathbf{3 \text{ km}}$ (**rayon de Schwarzschild**, $R_s \propto M$) ;
- ▶ **Attention** : rayon = circonférence/ $2\pi \neq$ distance entre horizon et $\ll \text{centre} \gg$ (car **géométrie courbe**, etc.).

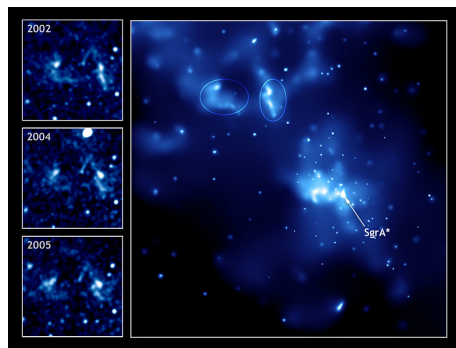
- ▶ trous noirs **supermassifs** au centre des galaxies ;
- ▶ **Sagittarius A^{*}** :
 $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $r < 120 \text{ UA}$.



Trous noirs astrophysiques

- ▶ **région de l'espace-temps** dont rien ne sort (même pas la lumière, cf. **Michell, 1783 ; Schwarzschild, 1916**) ;
- ▶ frontière = **horizon** du trou noir (**limite de non-retour**) ;
- ▶ cadavre encore plus compact d'une étoile très massive ($M_{\star} > 20 M_{\odot}$) ;
- ▶ $M \sim M_{\odot} \rightarrow \ll \text{rayon} \gg \sim 3 \text{ km}$ (**rayon de Schwarzschild**, $R_s \propto M$) ;
- ▶ **Attention** : rayon = circonférence/ $2\pi \neq$ distance entre horizon et $\ll \text{centre} \gg$ (car **géométrie courbe**, etc.).

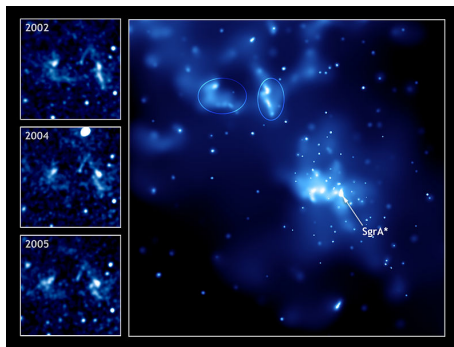
- ▶ trous noirs **supermassifs** au centre des galaxies ;
- ▶ **Sagittarius A*** :
 $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $r < 120 \text{ UA}$.



Trous noirs astrophysiques

- ▶ **région de l'espace-temps** dont rien ne sort (même pas la lumière, cf. **Michell, 1783 ; Schwarzschild, 1916**) ;
- ▶ frontière = **horizon** du trou noir (**limite de non-retour**) ;
- ▶ cadavre encore plus compact d'une étoile très massive ($M_{\star} > 20 M_{\odot}$) ;
- ▶ $M \sim M_{\odot} \rightarrow \ll \text{rayon} \gg \sim \mathbf{3 \text{ km}}$ (**rayon de Schwarzschild**, $R_s \propto M$) ;
- ▶ **Attention** : rayon = circonférence/ $2\pi \neq$ distance entre horizon et $\ll \text{centre} \gg$ (car **géométrie courbe**, etc.).

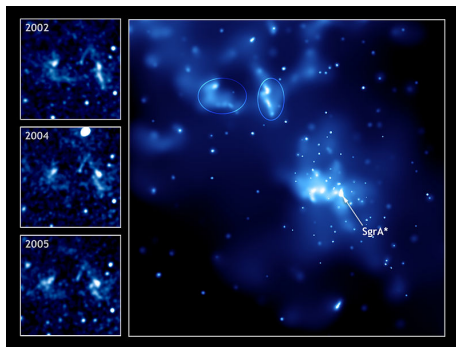
- ▶ trous noirs **supermassifs** au centre des galaxies ;
- ▶ **Sagittarius A*** :
 $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $r < 120 \text{ UA}$.




Trous noirs astrophysiques

- ▶ **région de l'espace-temps** dont rien ne sort (même pas la lumière, cf. **Michell, 1783 ; Schwarzschild, 1916**) ;
- ▶ frontière = **horizon** du trou noir (**limite de non-retour**) ;
- ▶ cadavre encore plus compact d'une étoile très massive ($M_{\star} > 20 M_{\odot}$) ;
- ▶ $M \sim M_{\odot} \rightarrow \ll \text{rayon} \gg \sim \mathbf{3 \text{ km}}$ (**rayon de Schwarzschild**, $R_s \propto M$) ;
- ▶ **Attention** : rayon = circonférence/ $2\pi \neq$ distance entre horizon et $\ll \text{centre} \gg$ (car **géométrie courbe**, etc.).


- ▶ trous noirs **supermassifs** au centre des galaxies ;
- ▶ **Sagittarius A^{*}** :
 $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $r < 120 \text{ UA}$.




Trous noirs et courbure de l'espace-temps

- ▶ **invisible** mais **effet gravitationnel** sur objet proche ;
 - ▶ espace-temps **extrêmement courbe** : lumière en orbite circulaire possible ;
- 
- An artistic rendering of a black hole. In the foreground, a bright, glowing accretion disk with concentric rings of orange and yellow light orbits a central dark region. Above and to the right, a bright, turbulent cloud of blue and green gas or plasma is being pulled towards the black hole, illustrating the extreme curvature of spacetime. The background is a dark space filled with distant stars.
- ▶ **horizon** du trou noir = endroit vide (pas une surface matérielle) ;
 - ▶ **observateur lointain** : **matière semble gelée/temps arrêté** sur l'horizon ;
 - ▶ **observateur entrant en chute libre** : **rien de spécial** sur l'horizon si trou noir gros ;
 - ▶ **structure interne encore inconnue** (**singularité** \neq point au centre ; volume infini malgré surface finie ?).


Trous noirs et courbure de l'espace-temps

- ▶ **invisible** mais **effet gravitationnel** sur objet proche ;
 - ▶ espace-temps **extrêmement courbe** : lumière en orbite circulaire possible ;
- 
- An artistic rendering of a black hole. In the foreground, a bright, glowing accretion disk with concentric rings of orange and yellow light orbits a central dark region. Above and to the right, a bright, turbulent cloud of blue and green gas or light is being pulled towards the black hole, illustrating the extreme curvature of spacetime. The background is a dark space filled with distant stars.
- ▶ **horizon** du trou noir = endroit vide (pas une surface matérielle) ;
 - ▶ **observateur lointain** : **matière semble gelée/temps arrêté** sur l'horizon ;
 - ▶ **observateur entrant en chute libre** : **rien de spécial** sur l'horizon si trou noir gros ;
 - ▶ **structure interne encore inconnue** (**singularité** \neq point au centre ; volume infini malgré surface finie ?).


Trous noirs et courbure de l'espace-temps

- ▶ **invisible** mais **effet gravitationnel** sur objet proche ;
 - ▶ espace-temps **extrêmement courbe** : lumière en orbite circulaire possible ;
- 
- An artistic rendering of a black hole. In the foreground, a bright, glowing accretion disk with concentric rings of orange and yellow light spirals into a dark central region. Above and to the right, a large, turbulent cloud of blue and green gas or dust is being pulled towards the black hole, illustrating the extreme gravitational curvature of spacetime. The background is a deep black space filled with distant stars.
- ▶ **horizon** du trou noir = endroit vide (pas une surface matérielle) ;
 - ▶ **observateur lointain** : **matière semble gelée/temps arrêté** sur l'horizon ;
 - ▶ **observateur entrant en chute libre** : **rien de spécial** sur l'horizon si trou noir gros ;
 - ▶ **structure interne encore inconnue** (**singularité** \neq point au centre ; volume infini malgré surface finie ?).


Trous noirs et courbure de l'espace-temps

- ▶ **invisible** mais **effet gravitationnel** sur objet proche ;
 - ▶ espace-temps **extrêmement courbe** : lumière en orbite circulaire possible ;
- 
- ▶ **horizon** du trou noir = endroit vide (pas une surface matérielle) ;
 - ▶ **observateur lointain** : **matière semble gelée/temps arrêté** sur l'horizon ;
 - ▶ **observateur entrant en chute libre** : **rien de spécial** sur l'horizon si trou noir gros ;
 - ▶ **structure interne encore inconnue** (**singularité** \neq point au centre ; volume infini malgré surface finie ?).

Trous noirs et courbure de l'espace-temps

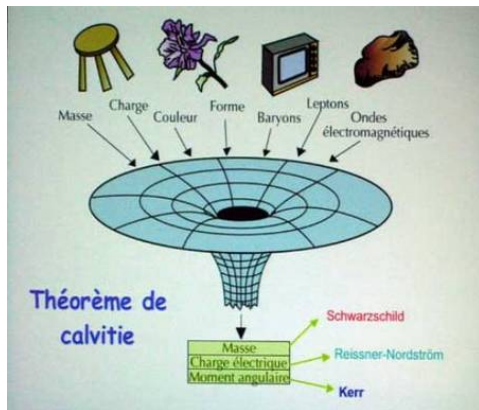
- ▶ **invisible** mais **effet gravitationnel** sur objet proche ;
 - ▶ espace-temps **extrêmement courbe** : lumière en orbite circulaire possible ;
- 
- ▶ **horizon** du trou noir = endroit vide (pas une surface matérielle) ;
 - ▶ **observateur lointain** : **matière semble gelée/temps arrêté** sur l'horizon ;
 - ▶ **observateur entrant en chute libre** : **rien de spécial** sur l'horizon si trou noir gros ;
 - ▶ **structure interne encore inconnue** (**singularité** \neq point au centre ; volume infini malgré surface finie ?).

Trous noirs et courbure de l'espace-temps

- ▶ **invisible** mais **effet gravitationnel** sur objet proche ;
 - ▶ espace-temps **extrêmement courbe** : lumière en orbite circulaire possible ;
- 
- An artistic rendering of a black hole. In the foreground, a bright, glowing accretion disk with concentric rings of orange and yellow light orbits a central dark region. Above and to the right, a bright, turbulent cloud of blue and green gas or light is being pulled towards the black hole, illustrating the extreme curvature of spacetime. The background is a dark space filled with distant stars.
- ▶ **horizon** du trou noir = endroit vide (pas une surface matérielle) ;
 - ▶ **observateur lointain** : **matière semble gelée/temps arrêté** sur l'horizon ;
 - ▶ **observateur entrant en chute libre** : **rien de spécial** sur l'horizon si trou noir gros ;
 - ▶ **structure interne encore inconnue** (**singularité** \neq point au centre ; volume infini malgré surface finie ?).

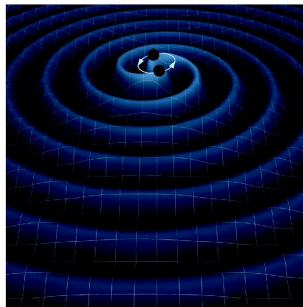
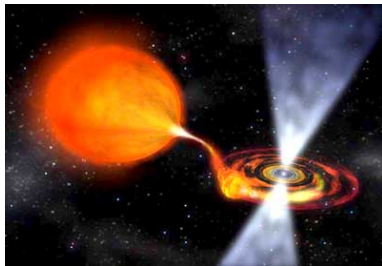
Les trous noirs sont chauves

- ▶ **1916, Schwarzschild** : solution des équations d'Einstein (sphérique de **masse M**)
- ▶ **1918, Reissner & Nordström** : solution avec **charge électrique (q)**
- ▶ **1963, Kerr** : trou noir en **rotation (Ω)**
- ▶ **Wheeler** : théorème de « calvitie » : trou noir caractérisé par **M , Ω et q** (astrophysique : q négligeable)

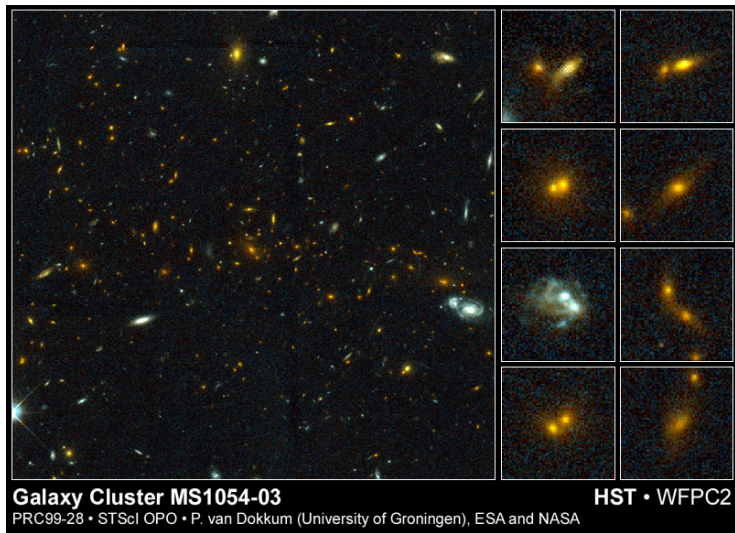


Émission d'ondes gravitationnelles par les objets compacts

- ▶ naissance violente → ondes pendant l'effondrement et juste après ;
- ▶ reste central d'une supernova → disque d'accrétion → matière qui tombe sur l'objet compact et le fait vibrer ;
- ▶ étoiles en système binaire → binaires d'objets compacts → rapprochement et fusion → trou noir et sursaut d'ondes gravitationnelles ;
- ▶ au cœur des galaxies : trou noir supermassif
→ interactions entre galaxies = interactions entre trous noirs.



Collisions de galaxies (et de trous noirs supermassifs)



Modélisation théorique

Besoin de résoudre les équations d'Einstein :

$$R_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

soit

géométrie de l'espace-temps = (évolution de la) distribution d'énergie.

Équations d'Einstein (cas simple **sans ondes**)

$$\Delta_3 \nu = 4\pi A^2 (\textcolor{red}{E} + \textcolor{red}{S}) + \frac{B^2 r^2 \sin^2 \theta}{2N^2} \partial \omega \partial \omega - \partial \nu \partial (\nu + \ln B)$$

$$\tilde{\Delta}_3 (\omega r \sin \theta) = -16\pi \frac{NA^2}{B^2} \frac{\textcolor{red}{p}_\phi}{r \sin \theta} + r \sin \theta \partial \omega \partial (\nu - 3 \ln B)$$

$$\Delta_2 [(NB - 1)r \sin \theta] = 8\pi NA^2 B r \sin \theta (\textcolor{red}{S}^r_r + \textcolor{red}{S}^\theta_\theta)$$

$$\Delta_2 (\ln A + \nu) = 8\pi A^2 \textcolor{red}{S}^\phi_\phi + \frac{3B^2 r^2 \sin^2 \theta}{4N^2} \partial \omega \partial \omega - \partial \nu \partial \nu$$

avec

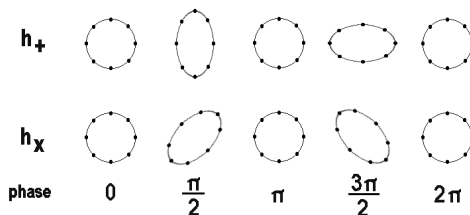
$$\Delta_2 \hat{=} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$$

$$\Delta_3 \hat{=} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2 \tan \theta} \frac{\partial}{\partial \theta}$$

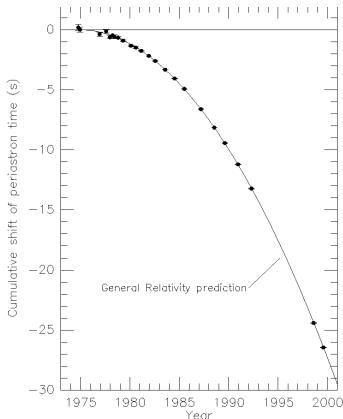
$$\tilde{\Delta}_3 \hat{=} \Delta_3 - \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \quad \text{et} \quad \partial u \partial v \hat{=} \frac{\partial u}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} \frac{\partial v}{\partial \theta}$$

4

Détection des ondes gravitationnelles



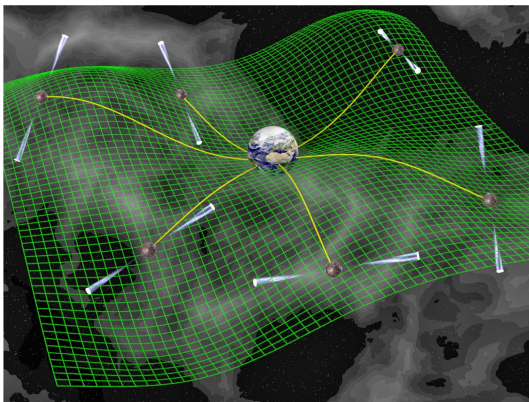
Mise en évidence indirecte des ondes gravitationnelles



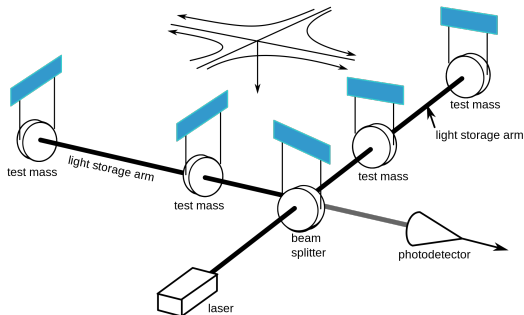
- ▶ **Hulse & Taylor, 1982** : découverte et observation précise du **pulsar binaire PSR B1913+16** (deux étoiles à neutrons) ;
- ▶ Accord parfait entre la théorie et les mesures → **prix Nobel en 1993.**

Trois méthodes de détection directe

- ▶ **amplification du signal** par détecteur résonant (\sim balançoire, instruments de musique, etc.) \rightarrow **barre résonante** (Weber, années 1960-70) ;
- ▶ **mesures de distances très précises** \rightarrow **interféromètre à laser** (années 1960-70) ;
- ▶ **chronométrie** de pulsars par un **réseau de radiotélescopes** (\sim 2010).



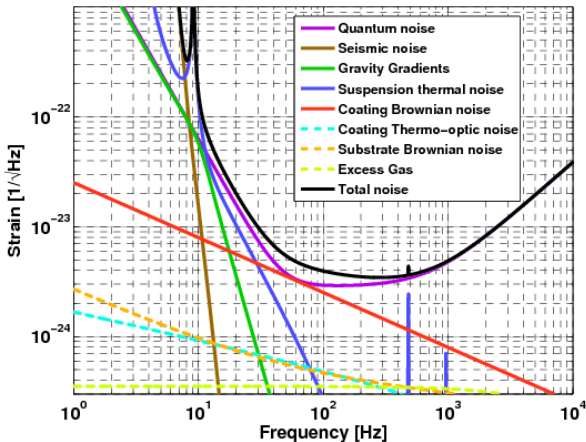
Interférométrie laser



- ▶ variations **relatives de distances** mesurées par interférométrie laser ;
- ▶ comparaison de la longueur de deux « **bras** » **orthogonaux** de plusieurs kilomètres de long (**interféromètre de Michelson**) ;
- ▶ premiers détecteurs opérationnels au début des années 2000 → **défi technologique** (miroirs sans défauts, système d'amortissement, faisceaux laser sous vide, etc.) ;
- ▶ **pas de détection** avec la première génération...

Sources de bruit pour un interféromètre

bruit = **fluctuations** de distances ou de l'outil de mesure



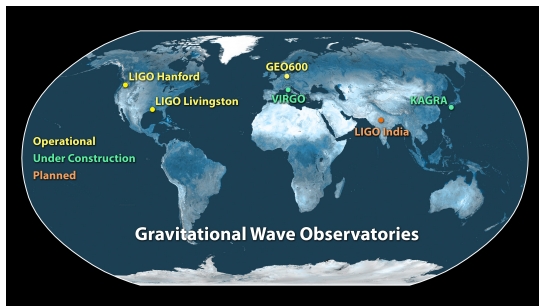
- **basses fréquences** : ondes sismiques, fluctuations thermiques, etc.
- **hautes fréquences** : fluctuations quantiques du laser, etc.

LIGO



- ▶ expérience aux États-Unis ;
- ▶ deux interféromètres aux bras de 4 km (séparés de 3000 km) ;
- ▶ **versions avancées** en service depuis septembre 2015.

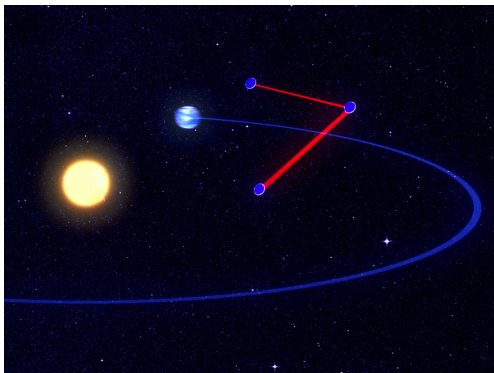
Réseau international



Interféromètres au sol

- **Virgo** : un interféromètre (3 km) près de Pise (Italie) ; collaboration France, Italie puis Pays-Bas, Pologne et Hongrie (version avancée en service en 2016) ;
- Autres : **GEO600** (prototype, Allemagne) ; **KAGRA** (en construction, Japon) ; **LIGO India** (projet, Inde) ; **Einstein Telescope** (projet sous-terrain européen), etc.

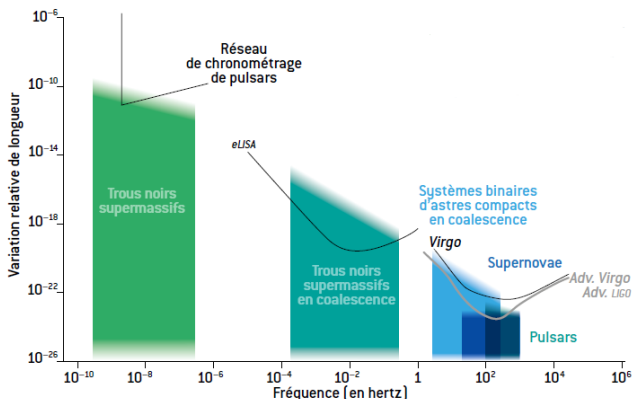
Projet eLISA



Orbite du projet eLISA
(prévu pour 2034, bras de 1 million de km)

- ▶ pas de bruit sismique ;
- ▶ bras plus longs = **fréquences plus basses** ;
- ▶ binaires de **trous noirs supermassifs** avant tout ;
- ▶ 3 décembre 2015 : lancement réussi du prototype **LISA Pathfinder**.

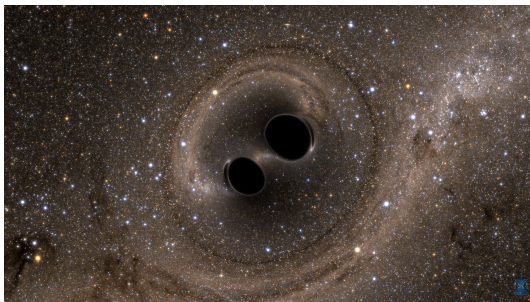
Signaux attendus et détectabilité



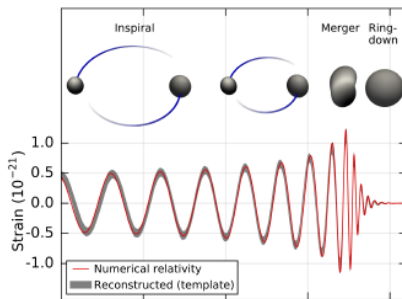
- **basses fréquences** : trous noirs supermassifs (mission spatiale eLISA ou chronométrage de pulsars) ;
- **hautes fréquences** : objets compacts stellaires (interféromètres au sol).

5

GW150914 et GW151226

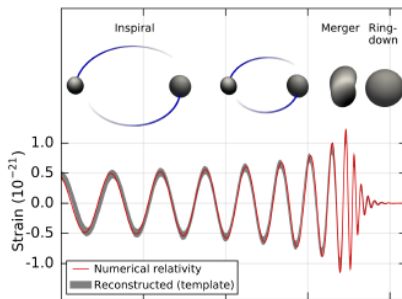


GW150914 : Fusion de deux trous noirs observée par LIGO



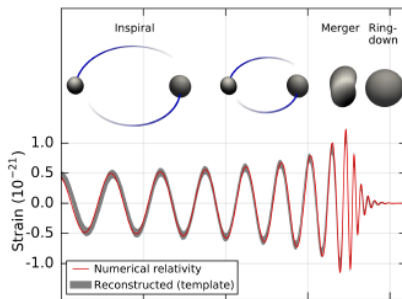
- ▶ « entendu » sans besoin de filtrer le bruit !
- ▶ système de deux trous noirs de 36 et 29 masses solaires ;
- ▶ environ 10 orbites observées en 0,2 seconde $\rightarrow v \sim 0,5 c$ à la fusion ;
- ▶ évolution de la fréquence du signal : de 35 Hz jusque 150 Hz ;
- ▶ mesure sur Terre : **déformation relative** \sim un noyau atomique pour le diamètre de la Terre (10^{-21}) ;
- ▶ source à environ 1,3 milliard d'années-lumière de la Terre.

GW150914 : Fusion de deux trous noirs observée par LIGO



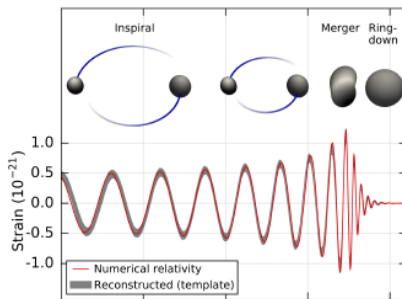
- ▶ « entendu » **sans besoin de filtrer le bruit !**
- ▶ système de deux trous noirs de **36 et 29 masses solaires** ;
- ▶ **environ 10 orbites observées** en **0,2 seconde** $\rightarrow v \sim 0,5 c$ à la fusion ;
- ▶ évolution de la **fréquence du signal** : de 35 Hz jusque 150 Hz ;
- ▶ mesure sur Terre : **déformation relative** \sim un noyau atomique pour le diamètre de la Terre (10^{-21}) ;
- ▶ source à **environ 1,3 milliard d'années-lumière** de la Terre.

GW150914 : Fusion de deux trous noirs observée par LIGO



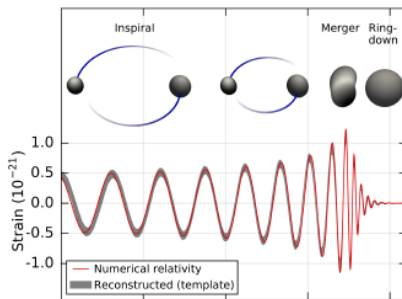
- ▶ « entendu » **sans besoin de filtrer le bruit !**
- ▶ système de deux trous noirs de **36 et 29 masses solaires** ;
- ▶ **environ 10 orbites observées** en **0,2 seconde** → $v \sim 0,5c$ à la fusion ;
- ▶ évolution de la **fréquence du signal** : de 35 Hz jusque 150 Hz ;
- ▶ mesure sur Terre : **déformation relative** \sim un noyau atomique pour le diamètre de la Terre (10^{-21}) ;
- ▶ source à **environ 1,3 milliard d'années-lumière** de la Terre.

GW150914 : Fusion de deux trous noirs observée par LIGO



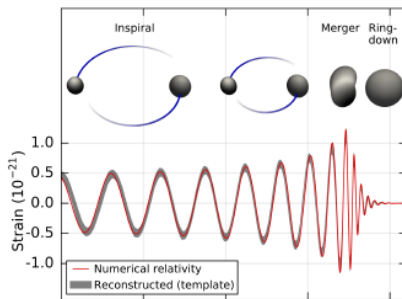
- ▶ « entendu » sans besoin de filtrer le bruit !
- ▶ système de deux trous noirs de 36 et 29 masses solaires ;
- ▶ environ 10 orbites observées en 0,2 seconde $\rightarrow v \sim 0,5c$ à la fusion ;
- ▶ évolution de la fréquence du signal : de 35 Hz jusque 150 Hz ;
- ▶ mesure sur Terre : **déformation relative** \sim un noyau atomique pour le diamètre de la Terre (10^{-21}) ;
- ▶ source à environ 1,3 milliard d'années-lumière de la Terre.

GW150914 : Fusion de deux trous noirs observée par LIGO



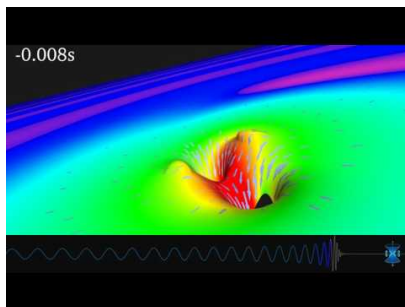
- ▶ « entendu » sans besoin de filtrer le bruit !
- ▶ système de deux trous noirs de 36 et 29 masses solaires ;
- ▶ environ 10 orbites observées en 0,2 seconde $\rightarrow v \sim 0,5c$ à la fusion ;
- ▶ évolution de la fréquence du signal : de 35 Hz jusque 150 Hz ;
- ▶ mesure sur Terre : **déformation relative** \sim un noyau atomique pour le diamètre de la Terre (10^{-21}) ;
- ▶ source à environ 1,3 milliard d'années-lumière de la Terre.

GW150914 : Fusion de deux trous noirs observée par LIGO



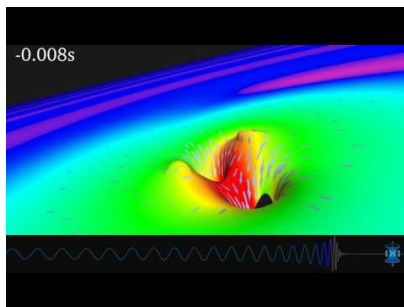
- ▶ « entendu » sans besoin de filtrer le bruit !
- ▶ système de deux trous noirs de 36 et 29 masses solaires ;
- ▶ environ 10 orbites observées en 0,2 seconde $\rightarrow v \sim 0,5c$ à la fusion ;
- ▶ évolution de la fréquence du signal : de 35 Hz jusque 150 Hz ;
- ▶ mesure sur Terre : **déformation relative** \sim un noyau atomique pour le diamètre de la Terre (10^{-21}) ;
- ▶ source à environ 1,3 milliard d'années-lumière de la Terre.

Trou noir final



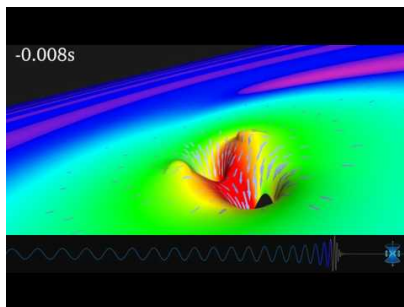
- ▶ **62 masses solaires** → **3 masses solaires rayonnées** sous forme d'ondes gravitationnelles ;
- ▶ **puissance** rayonnée au maximum $> 10^{49}$ W (~ 500 milliards de fois celle de la Voie lactée sous forme électromagnétique ; plus que l'univers observable) ;
- ▶ **oscillation amortie** : confirmation de la relativité générale (**trou noir de Kerr**).

Trou noir final



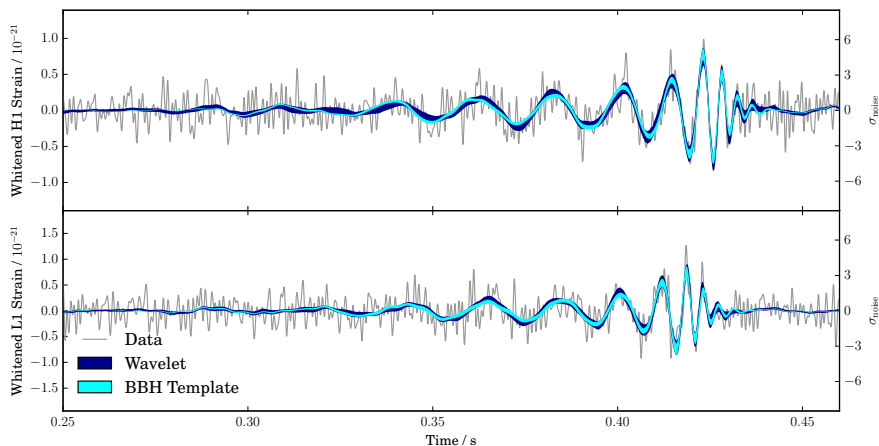
- ▶ **62 masses solaires** → **3 masses solaires rayonnées** sous forme d'ondes gravitationnelles ;
- ▶ **puissance** rayonnée au maximum $> 10^{49}$ W (~ 500 milliards de fois celle de la Voie lactée sous forme électromagnétique ; plus que l'univers observable) ;
- ▶ **oscillation amortie** : confirmation de la relativité générale (**trou noir de Kerr**).

Trou noir final



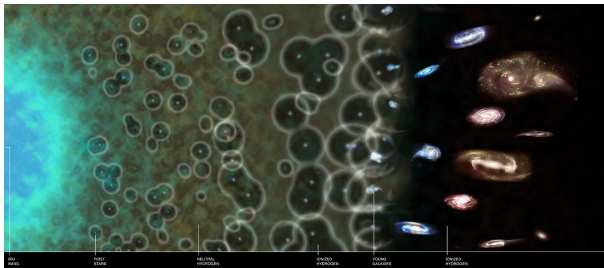
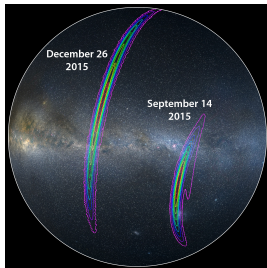
- ▶ **62 masses solaires** → **3 masses solaires rayonnées** sous forme d'ondes gravitationnelles ;
- ▶ **puissance** rayonnée au maximum $> 10^{49} \text{ W}$ (~ 500 milliards de fois celle de la Voie lactée sous forme électromagnétique ; plus que l'univers observable) ;
- ▶ **oscillation amortie** : confirmation de la relativité générale (**trou noir de Kerr**).

Comparaison théorie et expérience



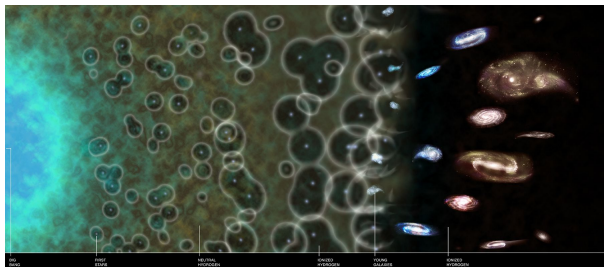
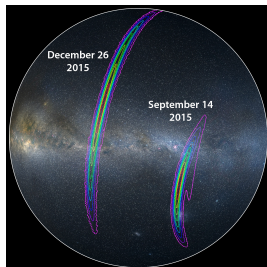
→ orbite quasi-circulaire, **pas d'eccentricité**

Conséquences astrophysiques et questions ouvertes



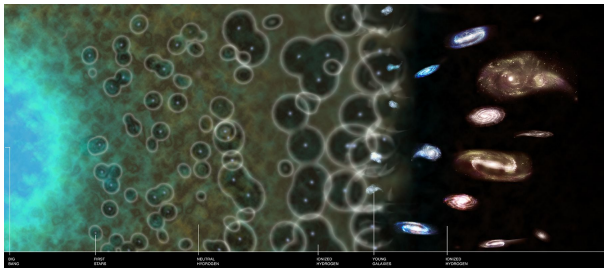
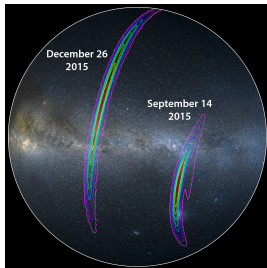
- ▶ auparavant : trous noirs observés indirectement avec masses $\lesssim 25 M_{\odot}$
→ trous noirs **massifs** plus nombreux que prévu ? (trous noirs **primordiaux** ? contribution à la **matière noire** ?) ;
- ▶ étoiles progénitrices de **faible métallicité** → **population III** ? (= première génération) ;
- ▶ **position peu précise** car deux détecteurs quasi-parallèles.

Conséquences astrophysiques et questions ouvertes



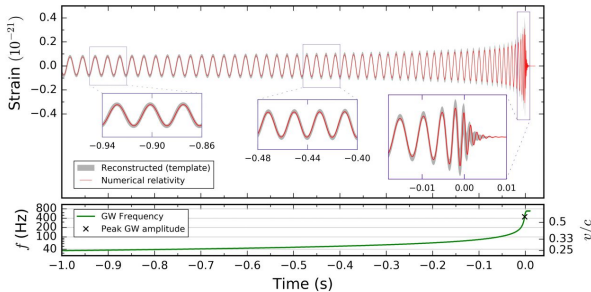
- ▶ auparavant : trous noirs observés indirectement avec masses $\lesssim 25 M_{\odot}$
→ trous noirs **massifs** plus nombreux que prévu ? (trous noirs **primordiaux** ? contribution à la **matière noire** ?) ;
- ▶ étoiles progénitrices de **faible métallicité** → **population III** ? (= première génération) ;
- ▶ **position peu précise** car deux détecteurs quasi-parallèles.

Conséquences astrophysiques et questions ouvertes



- ▶ auparavant : trous noirs observés indirectement avec masses $\lesssim 25 M_{\odot}$
→ trous noirs **massifs** plus nombreux que prévu ? (trous noirs **primordiaux** ? contribution à la **matière noire** ?) ;
- ▶ étoiles progénitrices de **faible métallicité** → **population III** ? (= première génération) ;
- ▶ **position peu précise** car deux détecteurs quasi-parallèles.

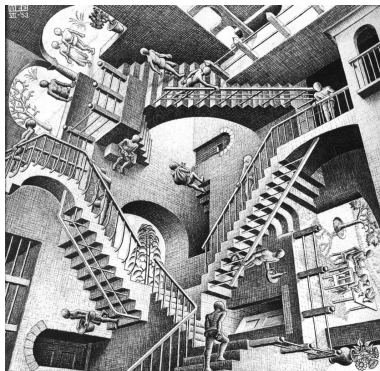
GW151226



- ▶ ~ 14 et 8 masses solaires $\rightarrow \sim 1$ masse solaire rayonnée sous forme d'ondes gravitationnelles ;
- ▶ source à 1,4 milliards d'années-lumière ;
- ▶ signal plus long mais plus faible : 27 orbites en une seconde ;
- ▶ fréquence : de 35 à 450 Hz
 \rightarrow preuve de l'existence de trous noirs stellaires.

Conclusion

Une nouvelle « fenêtre » sur l'Univers



À l'écoute de l'Univers

- ▶ **ondes gravitationnelles** détectées près de **100 ans** après leur prédiction théorique ;
- ▶ observation de GW150914 : démonstration directe de l'existence des **trous noirs**, **test de la relativité générale** ;
- ▶ futur proche : **autres détecteurs** en service, **sensibilité de LIGO augmentée** → nombreuses autres détections à venir (estimation : **plusieurs dizaines par an**) ;
- ▶ nouvel outil pour étudier les **sources d'ondes gravitationnelles** mais aussi leur milieu de propagation → intérieur des **étoiles à neutrons**, physique des trous noirs, « **premiers instants** » de l'Univers, **intimité de l'espace-temps** (théories au-delà de la relativité générale : autres polarisations ?), etc.
- ▶ également : observation de l'Univers en **neutrinos** et en **rayons cosmiques** ; du **voisinage de l'horizon** de Sgr A* en IR (*Event Horizon Telescope* : interférométrie à très longue base), etc.

Quelques liens/références

- ▶ <http://www.black-holes.org/gw150914> : vidéos ;
- ▶ <http://www.soundsofspacetime.org/> : sons artificiels d'ondes gravitationnelles ;
- ▶ <http://www.ligo.org/science/Publication-GW150914/science-summary-french.pdf> : présentation de GW150914 ;
- ▶ magazines scientifiques récents : Ciel & Espace, Pour La Science, etc.
- ▶ D. Buskulic et L. Villain, *À l'écoute des ondes gravitationnelles*, Pour la Science, 457, novembre 2015 : article vulgarisé (écrit avant l'annonce de la détection) ;
- ▶ D. Kennefick, *Traveling at the Speed of Thought : Einstein and the Quest for Gravitational Waves* (Princeton University Press, 2007).

Dossiers vulgarisés sur la relativité :

- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier509-1.php> : relativité restreinte ;
- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier510-1.php> : relativité générale.

Vidéos montrées pendant la conférence

- ▶ bras d'une galaxie spirale et onde de densité :
https://www.youtube.com/watch?v=_GNPvYdvZAQ
- ▶ musique des anneaux de Saturne :
<https://www.youtube.com/watch?v=38pJhxCzR-I>
- ▶ polarisation des ondes gravitationnelles :
<https://www.youtube.com/watch?v=F4stTzxYrN0>
- ▶ « son gravitationnel » de GW150914 :
<https://www.youtube.com/watch?v=TWqhUANNFXw>
- ▶ supernova gravitationnelle en deux temps :
<https://www.youtube.com/watch?v=oajSXi4NTB8>
- ▶ trou noir au centre de la Galaxie :
<https://www.youtube.com/watch?v=duoHtJpo4GY>
- ▶ onde gravitationnelle et interféromètre :
<https://www.youtube.com/watch?v=BWJJeJAUdfM>
- ▶ **GW150914** : voir <http://www.black-holes.org/gw150914>
- ▶ sons disponibles sur <http://www.soundsofspacetime.org/>
- ▶ **GW151226** : voir <http://apod.nasa.gov/apod/ap160615.html>

Publicité

- ▶ Conférences vulgarisées de physique (« **Encas de physique** ») : campus Grandmont de l'Université de Tours, le [mercredi à 12h30](#) ;
- ▶ Infos (programme, compléments sur les précédentes conférences) : département de physique <http://dept.phys.univ-tours.fr/> ou via le raccourci <http://tinyurl.com/encas> ou encore sur Facebook : <https://www.facebook.com/EncasPhysique> ;
- ▶ **Prochain Encas** : « **Climat : pourquoi ça chauffe ?** », le [mercredi 16/11/2016](#), par **Y. Fouquart** (Lab. Optique Atmosphérique, Univ. de Lille, ex-membre du Comité Scientifique du Programme Mondial de Recherches sur le Climat) ;
- ▶ **Ateliers de Thélème** : [travaux pratiques pour le grand public](#) (microbes, génétique, archéologie, etc.), en soirée (19h30 - 21h30) <http://www.lmpt.univ-tours.fr/~loic/ateliers.html>.