A visualization of gravitational waves, showing two black holes in the process of merging. The background is a dark blue/black space with colorful, wavy patterns representing the ripples in spacetime. The colors range from blue and green to yellow and red, indicating different intensities of the waves. The two black holes are shown as dark, rounded shapes with a colorful, glowing horizon, moving towards each other and merging into a single, larger black hole.

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

Centre Galois, le 23 Juin 2016

Brève présentation

- ▶ **enseignant-chercheur** à l'Université de Tours (**Dpt. de Physique**);
- ▶ chercheur au **Laboratoire de Mathématiques et Physique Théorique**;
- ▶ domaine : « (astro)physique relativiste » :
 - étude **théorique** de phénomènes ou objets astrophysiques dont la description nécessite le recours à la **relativité générale**;
 - exemples : **étoiles à neutrons** et **trous noirs**;
 - en particulier : propriétés macroscopiques (structure globale, oscillations, etc.) et microscopiques (superfluidité des nucléons, production de neutrinos, etc.), en lien avec l'émission d'**ondes gravitationnelles**.
- ▶ activités professionnelles hors-recherche : enseignement (du niveau L1 au niveau M2), communication scientifique (vulgarisation, etc.), tâches administratives, etc.

Physique théorique

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent ;
- ▶ trouver le **simple et universel** derrière le complexe et particulier ;
- ▶ **Galilée (1623)** : « *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.* »
- ▶ **modèles** (« cartes ») **mathématiques** qui sont confrontés avec le réel
→ **expériences** ;
- ▶ **physicien théoricien** : « inventeur », « interprète » ou « testeur » de modèles.

Physique théorique

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent ;
- ▶ trouver le **simple et universel** derrière le complexe et particulier ;
- ▶ **Galilée (1623)** : « *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.* »
- ▶ **modèles** (« cartes ») **mathématiques** qui sont confrontés avec le réel
→ **expériences** ;
- ▶ **physicien théoricien** : « inventeur », « interprète » ou « testeur » de modèles.

Physique théorique

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent ;
- ▶ trouver le **simple et universel** derrière le complexe et particulier ;
- ▶ **Galilée (1623)** : « *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.* »
- ▶ **modèles** (« cartes ») **mathématiques** qui sont confrontés avec le réel
→ **expériences** ;
- ▶ **physicien théoricien** : « inventeur », « interprète » ou « testeur » de modèles.

Physique théorique

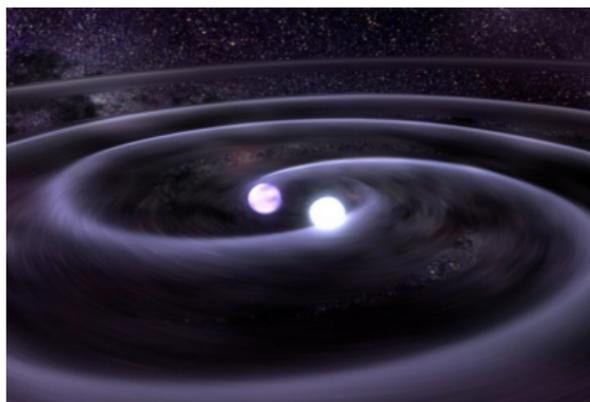
- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent ;
- ▶ trouver le **simple et universel** derrière le complexe et particulier ;
- ▶ **Galilée (1623)** : « *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.* »
- ▶ **modèles** (« cartes ») **mathématiques** qui sont confrontés avec le réel
→ **expériences** ;
- ▶ **physicien théoricien** : « inventeur », « interprète » ou « testeur » de modèles.

Physique théorique

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent ;
- ▶ trouver le **simple et universel** derrière le complexe et particulier ;
- ▶ **Galilée (1623)** : « *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.* »
- ▶ **modèles** (« cartes ») **mathématiques** qui sont confrontés avec le réel
→ **expériences** ;
- ▶ **physicien théoricien** : « inventeur », « interprète » ou « testeur » de modèles.

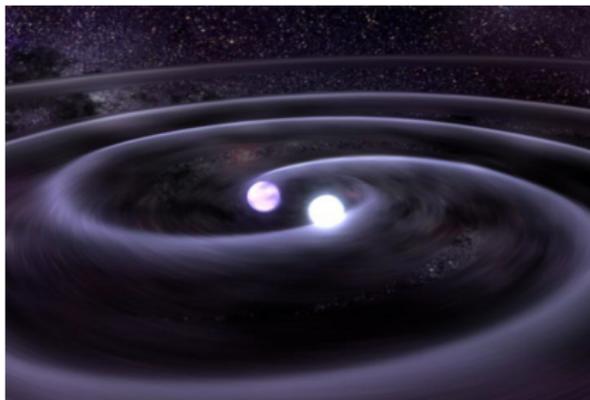
GW150914 et GW151226

- ▶ 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).



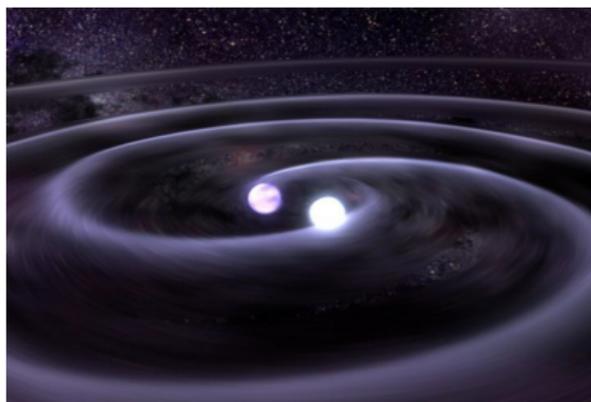
GW150914 et GW151226

- ▶ 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).



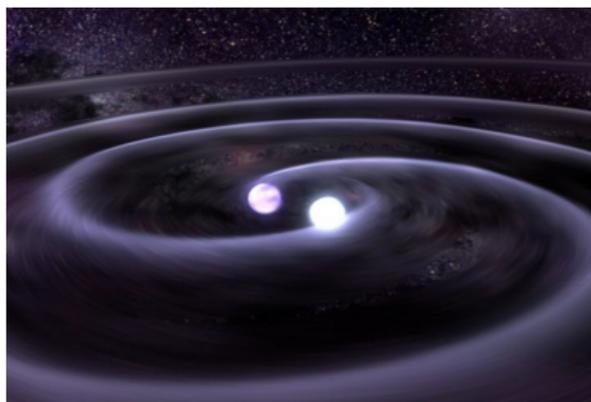
GW150914 et GW151226

- ▶ 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).



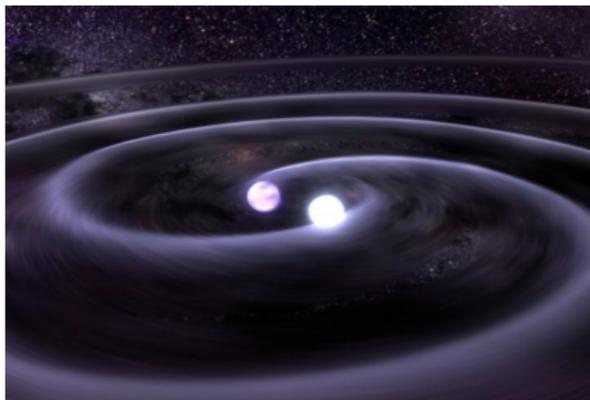
GW150914 et GW151226

- ▶ 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).



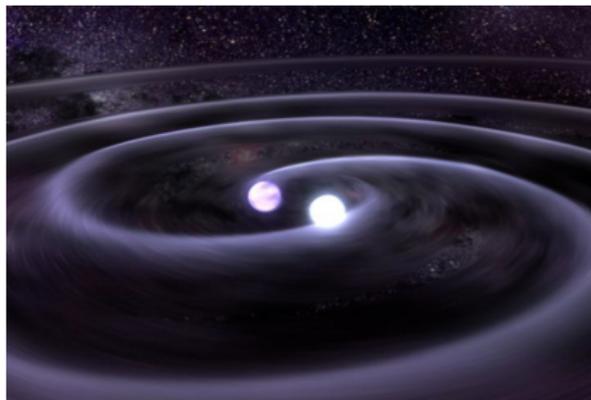
GW150914 et GW151226

- ▶ 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).



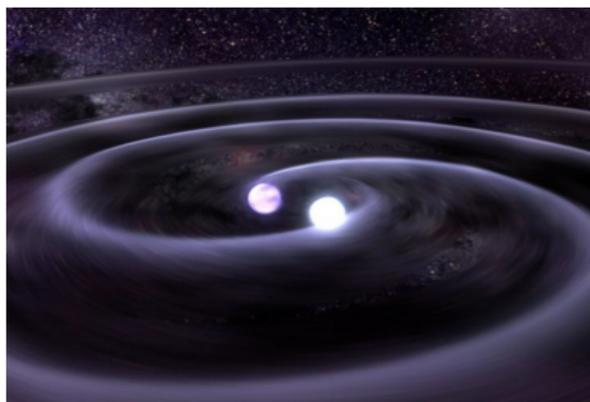
GW150914 et GW151226

- ▶ 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).



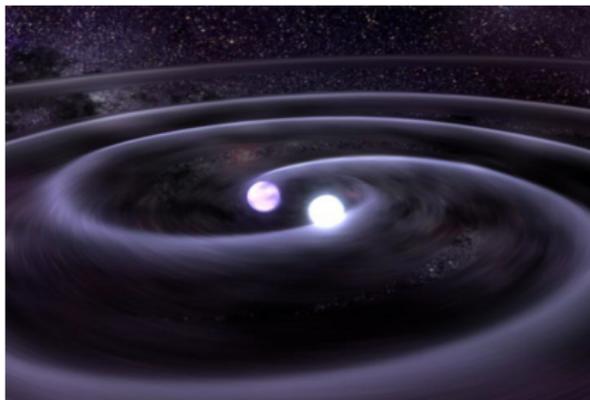
GW150914 et GW151226

- ▶ 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



Ondes ?

- ▶ **perturbations** 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 du milieu ;
- ▶ **exemples** : **vague** = onde de surface (interface eau/air) ; **son** = onde volumique de pression/densité ; **onde électromagnétique** (**lumière**, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (**non-matériels**), ...
- ▶ 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.)

Ondes ?

- ▶ **perturbations** 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 du milieu ;
- ▶ **exemples** : **vague** = onde de surface (interface eau/air) ; **son** = onde volumique de pression/densité ; **onde électromagnétique** (lumière, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (**non-matériels**), ...
- ▶ 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.)

Ondes ?

- ▶ **perturbations** 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 du milieu ;
- ▶ **exemples** : **vague** = onde de surface (interface eau/air) ; **son** = onde volumique de pression/densité ; **onde électromagnétique** (**lumière**, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (**non-matériels**), ...
- ▶ 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.)

Ondes ?

- ▶ **perturbations** 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 du milieu ;
- ▶ **exemples** : **vague** = onde de surface (interface eau/air) ; **son** = onde volumique de pression/densité ; **onde électromagnétique** (**lumière**, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (**non-matériels**), ...
- ▶ 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.)

Ondes ?

- ▶ **perturbations** 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 du milieu ;
- ▶ **exemples** : vague = onde de surface (interface eau/air) ; son = onde volumique de pression/densité ; onde électromagnétique (lumière, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (**non-matériels**), ...
- ▶ 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.)

Ondes ?

- ▶ **perturbations** 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 du milieu ;
- ▶ **exemples** : **vague** = onde de surface (interface eau/air) ; **son** = onde volumique de pression/densité ; **onde électromagnétique** (**lumière**, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (**non-matériels**), ...
- ▶ 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.)

Ondes ?

- ▶ **perturbations** 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 du milieu ;
- ▶ **exemples** : **vague** = onde de surface (interface eau/air) ; **son** = onde volumique de pression/densité ; **onde électromagnétique** (**lumière**, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (**non-matériels**), ...
- ▶ 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.)

Ondes ?

- ▶ **perturbations** 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 du milieu ;
- ▶ **exemples** : **vague** = onde de surface (interface eau/air) ; **son** = onde volumique de pression/densité ; **onde électromagnétique** (**lumière**, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (**non-matériels**), ...
- ▶ 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.)

Ondes ?

- ▶ **perturbations** 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 du milieu ;
- ▶ **exemples** : vague = onde de surface (interface eau/air) ; son = onde volumique de pression/densité ; onde électromagnétique (lumière, radio, etc.) = perturbation des champs électrique et magnétique (**non-matériels**), ...
- ▶ 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.)

Émission et détection d'ondes

- ▶ processus distincts selon la **nature physique** de l'onde et ses propriétés ;
- ▶ **interactions avec la matière** → dépôt ou retrait d'énergie :
 - ▶ à la **réception** (→ force de pression, mise en mouvement de corps, etc.) ;
 - ▶ à l'**émission** (tambour/haut-parleur \neq **antenne**/lampe électrique).

principe de l'émission d'ondes radio par une antenne dans laquelle des particules électriquement chargées sont mises en mouvement

Onde monochromatique

- ▶ ondes souvent **oscillatoires** → décrites 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);
- ▶ transport d'énergie dépend de l'**amplitude (intensité)** et de la fréquence.

Onde monochromatique

- ▶ ondes souvent **oscillatoires** → décrites 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);
- ▶ transport d'énergie dépend de l'**amplitude (intensité)** et de la fréquence.

Onde monochromatique

- ▶ ondes souvent **oscillatoires** → décrites 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);
- ▶ transport d'énergie dépend de l'**amplitude (intensité)** et de la fréquence.

Onde monochromatique

- ▶ ondes souvent **oscillatoires** → décrites 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);
- ▶ 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

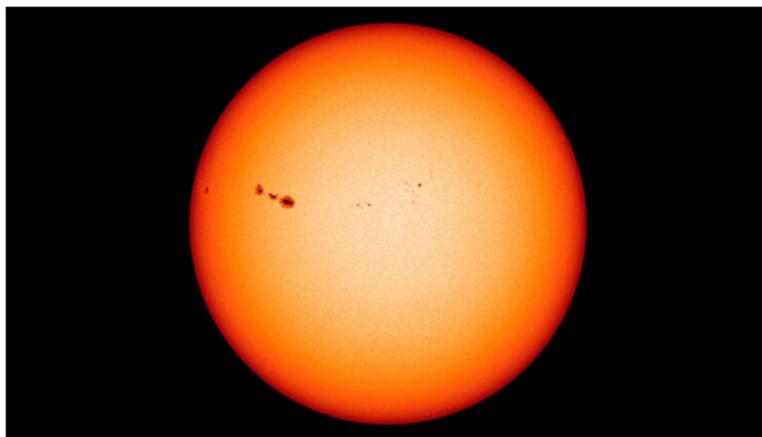
- ▶ bras d'une galaxie spirale = **région de densité plus élevée** ;
- ▶ **onde de densité** \neq rotation orbitale (différentielle) des étoiles ;
- ▶ semblable à un bouchon localisé derrière un camion.



(M101)

Héliosismologie

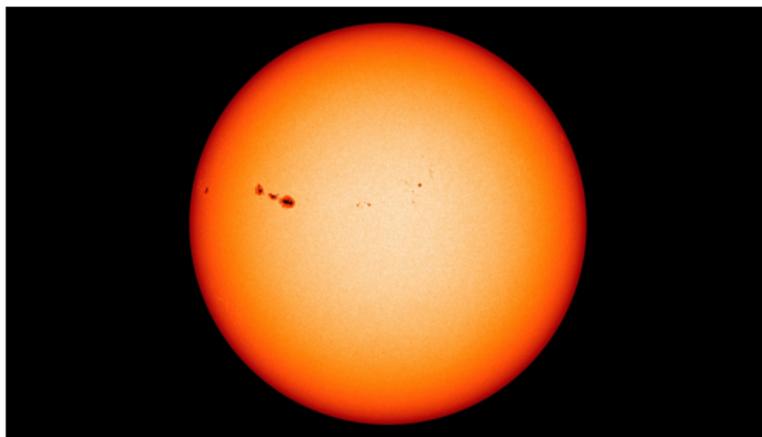
- ▶ vibrations de surface du Soleil liées aux **oscillations (de densité) internes** ;
- ▶ moyen de sonder la **structure interne** → masse du neutrino.



(le Soleil vu par SDO)

Héliosismologie

- ▶ vibrations de surface du Soleil liées aux **oscillations (de densité) internes** ;
- ▶ moyen de sonder la **structure interne** → masse du neutrino.



(le Soleil vu par SDO)

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).

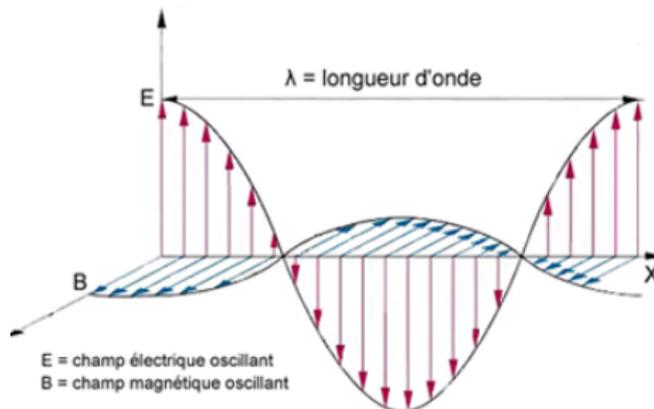
Ondes sonores usuelles

- ▶ **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).

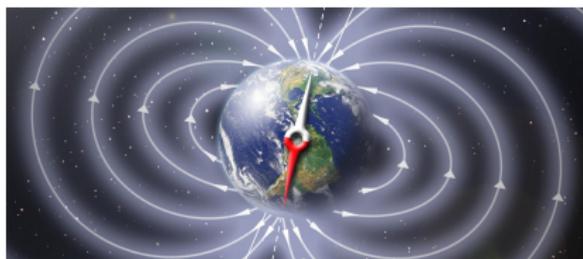
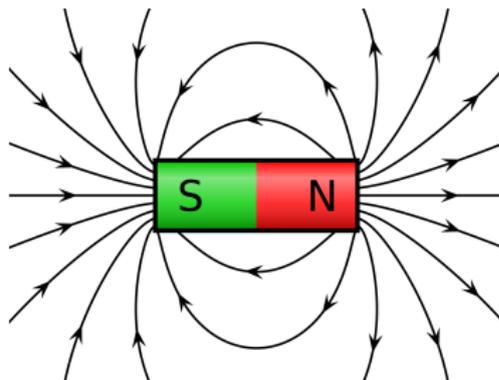
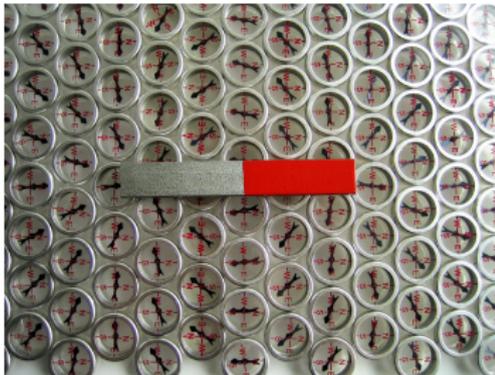
Ondes et champ électromagnétique (1)

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



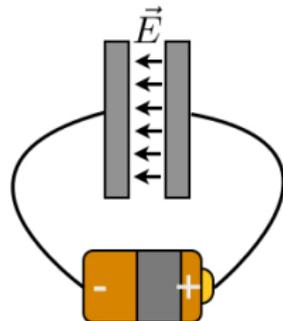
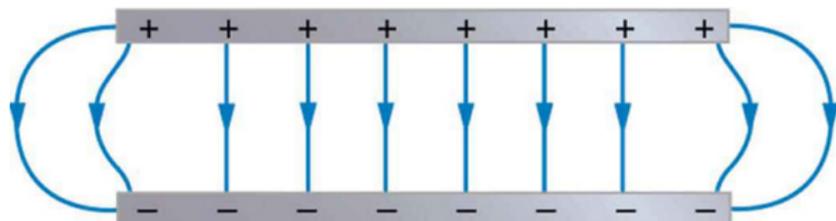
Champ magnétique

une boussole s'oriente dans la direction locale du **champ magnétique**.



Champ électrique

dans un circuit, le courant se déplace dans la direction du **champ électrique**



champ électrique entre deux plans de charges opposées
(\sim condensateur électrique).

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.

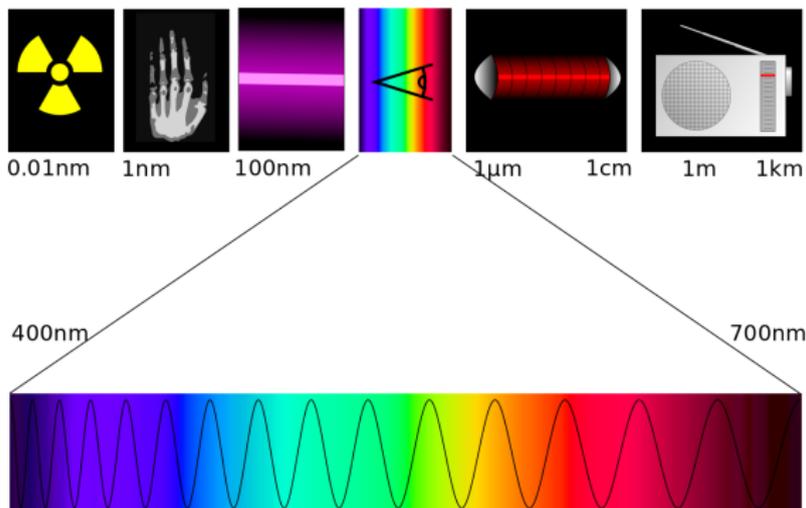
Propriétés des ondes électromagnétiques

- ▶ **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.

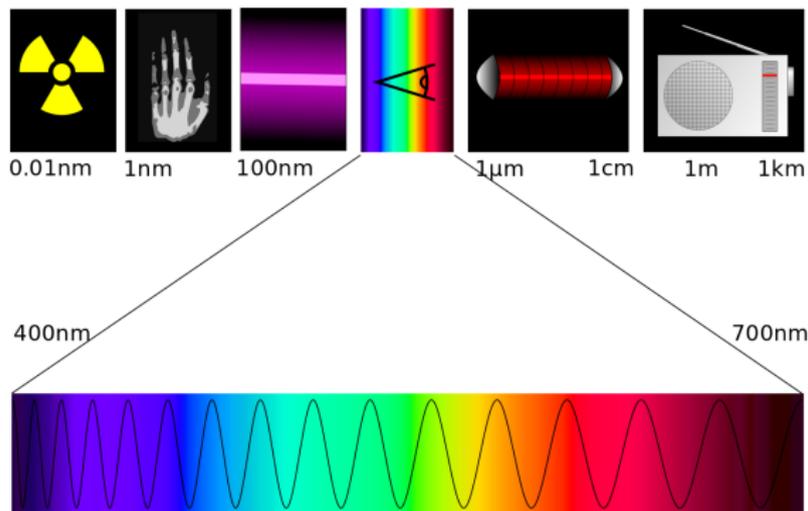
Ondes lumineuses

- ▶ **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).



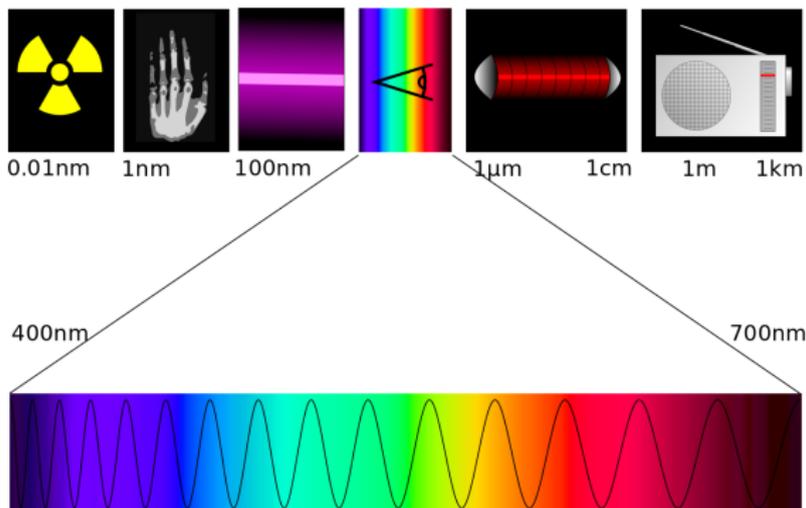
Ondes lumineuses

- ▶ **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).



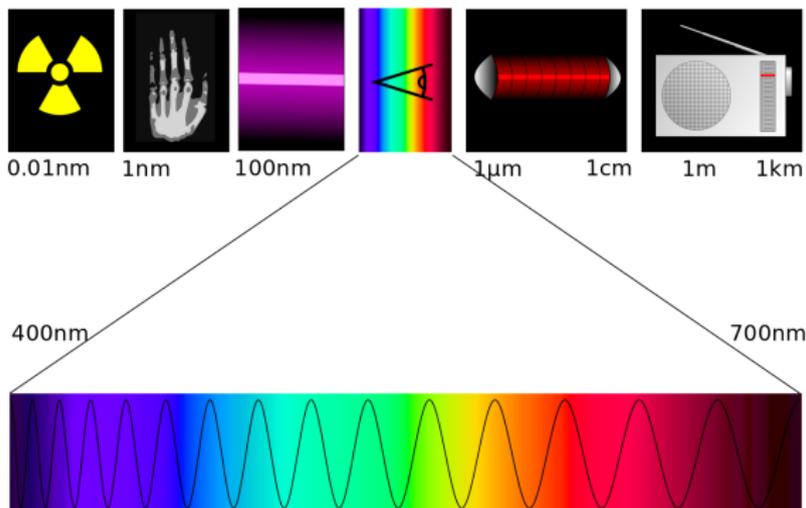
Ondes lumineuses

- ▶ 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).



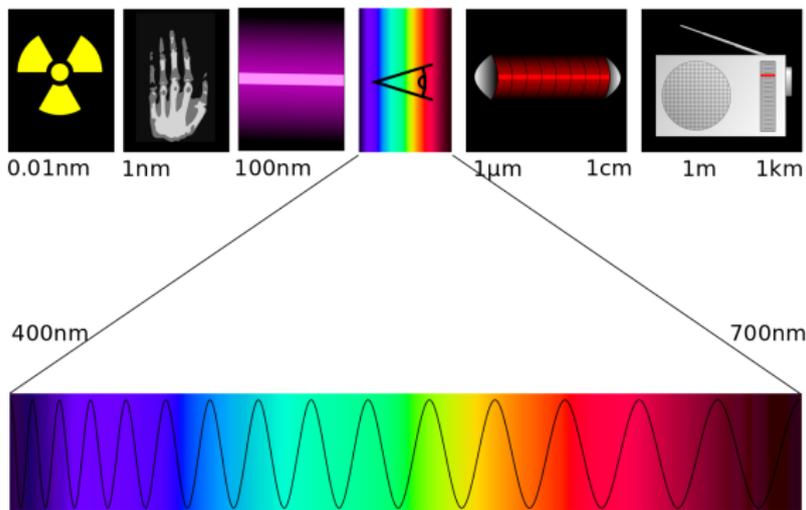
Ondes lumineuses

- ▶ 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).



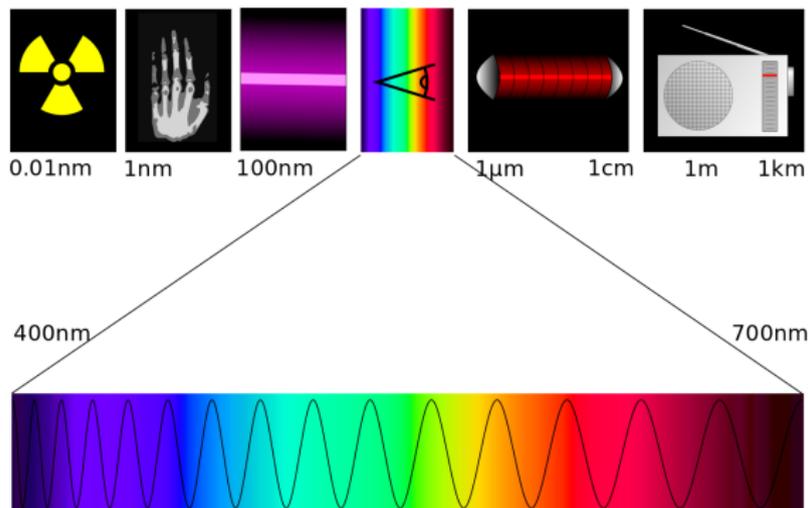
Ondes lumineuses

- ▶ 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).



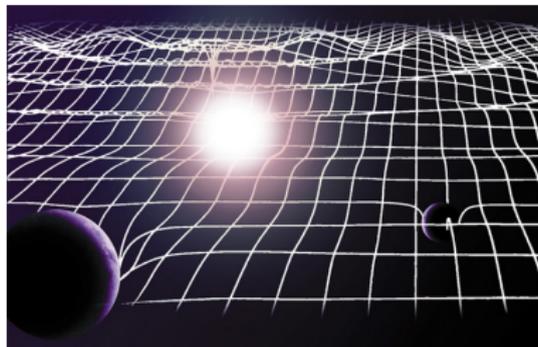
Ondes lumineuses

- ▶ 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).



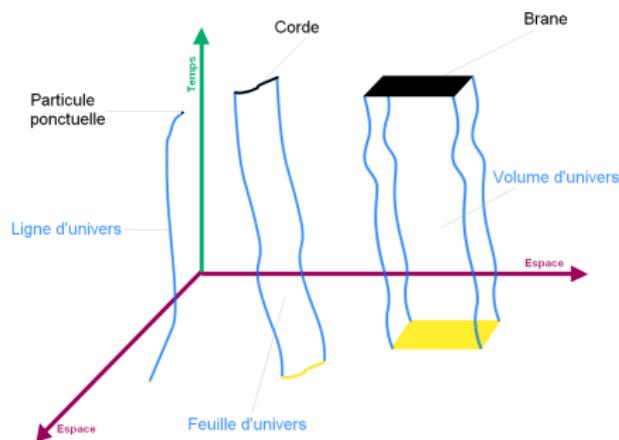
2

Ondes gravitationnelles et relativité générale



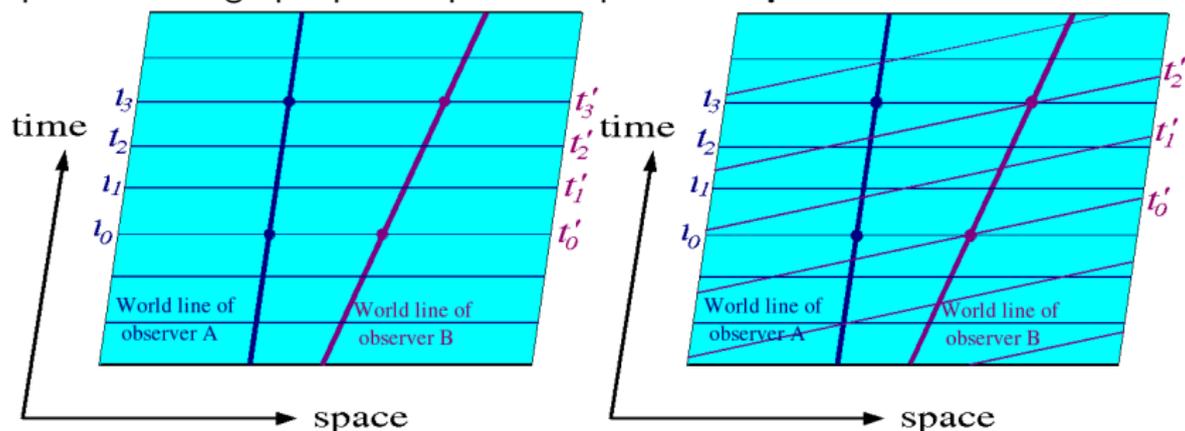
Relativité restreinte et espace-temps (1905-1907)

- ▶ 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).



Relativité des durées et diagramme d'espace-temps

Représentation graphique et spatio-temporelle du **problème des deux trains** :



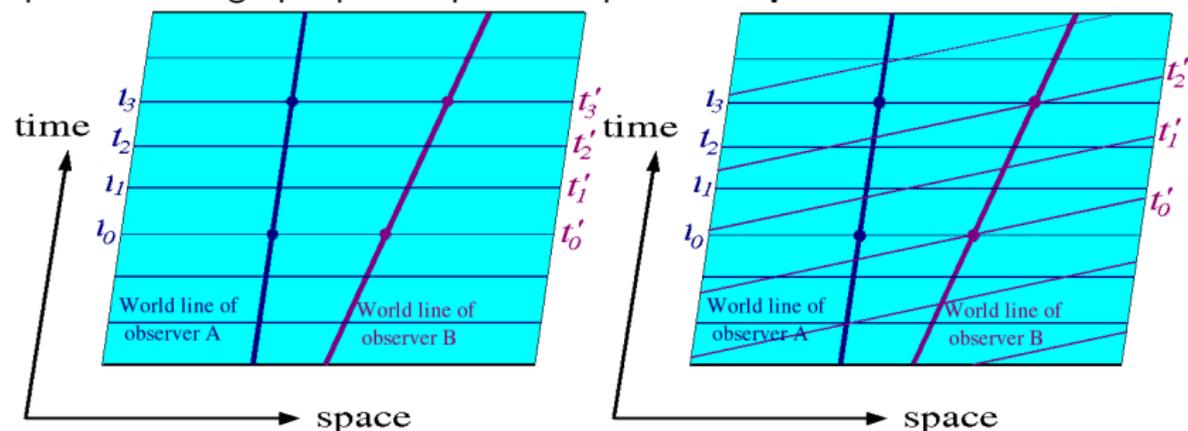
À gauche : selon Newton, tout observateur a le même temps et le même espace ; les événements simultanés (même date t) appartiennent à une même droite horizontale → il s'agit de l'espace à la date t ;

À droite : pour Minkowski, l'espace (= ensemble des événements simultanés) dépend de l'observateur → droite horizontale ou inclinée

→ la durée entre deux événements n'est pas absolue et l'ordre chronologique lui-même peut changer !

Relativité des durées et diagramme d'espace-temps

Représentation graphique et spatio-temporelle du **problème des deux trains** :

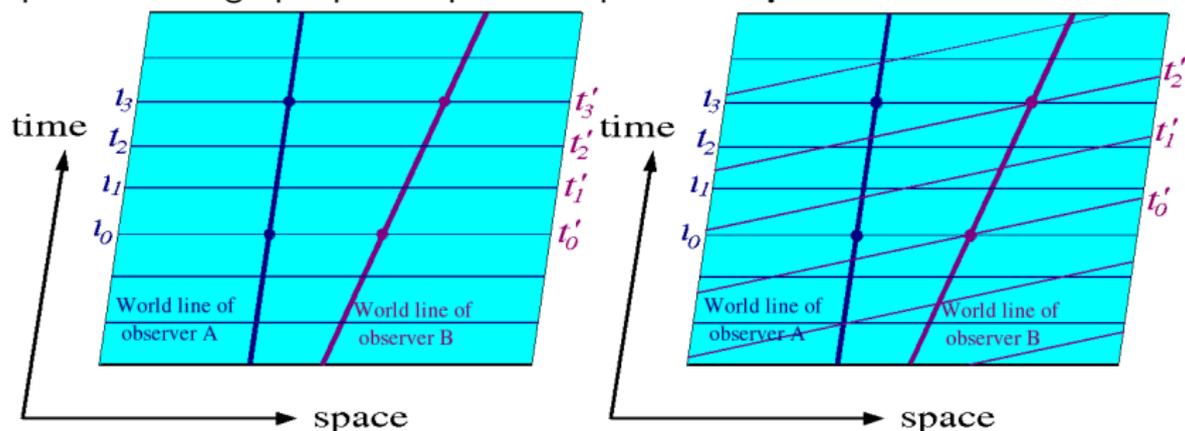


À gauche : selon **Newton**, tout observateur a le **même temps** et le **même espace** ;
 les événements simultanés (**même date t**) appartiennent à une même **droite horizontale** → il s'agit de l'espace à la date t ;

À droite : pour **Minkowski**, l'espace (= ensemble des événements simultanés)
 dépend de l'observateur → **droite horizontale ou inclinée**
 → la durée entre deux événements n'est pas absolue et l'ordre chronologique
 lui-même peut changer !

Relativité des durées et diagramme d'espace-temps

Représentation graphique et spatio-temporelle du **problème des deux trains** :

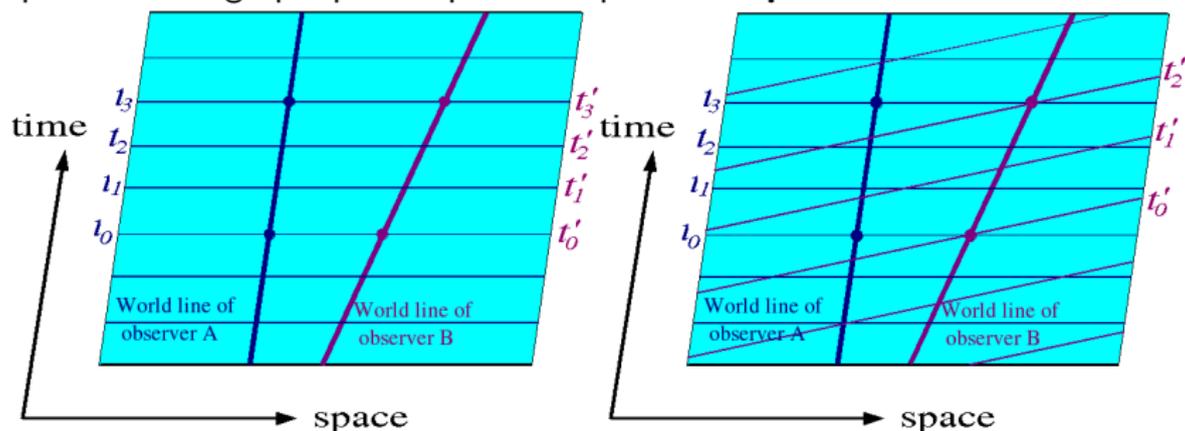


À gauche : selon **Newton**, tout observateur a le **même temps** et le **même espace** ; les événements simultanés (**même date t**) appartiennent à une même **droite horizontale** → il s'agit de l'espace à la date t ;

À droite : pour **Minkowski**, l'espace (= ensemble des événements simultanés) dépend de l'observateur → **droite horizontale ou inclinée**
 → la durée entre deux événements n'est pas absolue et l'ordre chronologique lui-même peut changer !

Relativité des durées et diagramme d'espace-temps

Représentation graphique et spatio-temporelle du **problème des deux trains** :



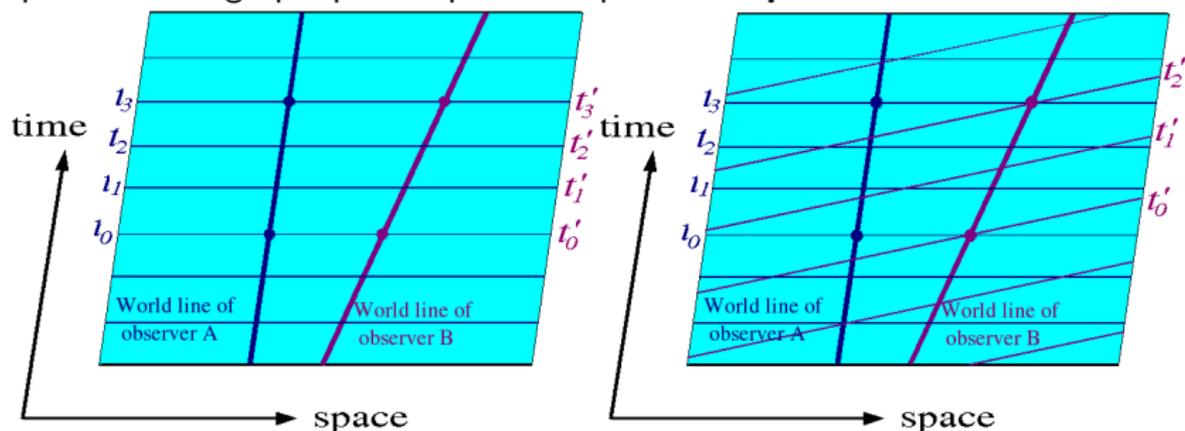
À gauche : selon **Newton**, tout observateur a le **même temps** et le **même espace** ;
 les événements simultanés (**même date t**) appartiennent à une même **droite**
horizontale → il s'agit de l'espace à la date t ;

À droite : pour **Minkowski**, l'espace (= ensemble des événements simultanés)
 dépend de l'observateur → droite horizontale ou inclinée

→ la durée entre deux événements n'est pas absolue et l'ordre chronologique
 lui-même peut changer !

Relativité des durées et diagramme d'espace-temps

Représentation graphique et spatio-temporelle du **problème des deux trains** :



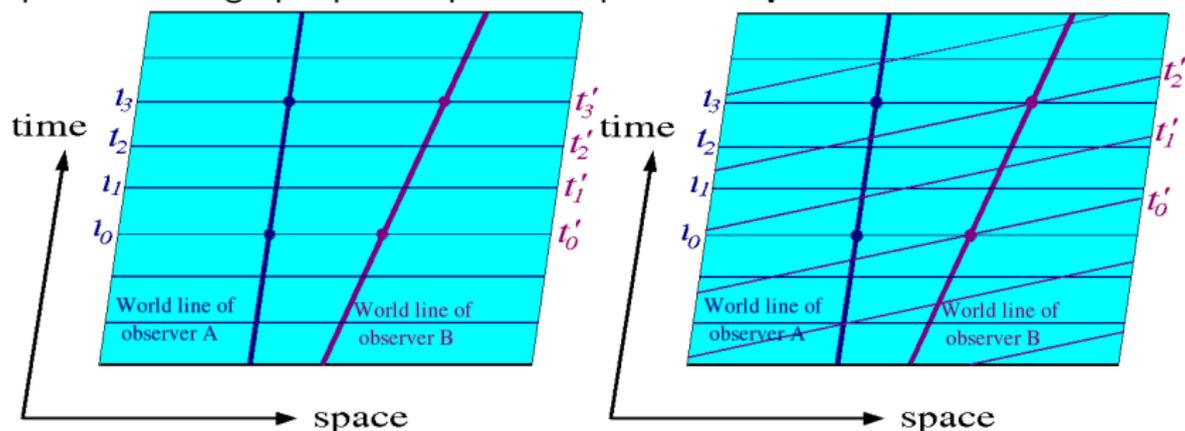
À gauche : selon **Newton**, tout observateur a le **même temps** et le **même espace** ;
 les événements simultanés (**même date t**) appartiennent à une même **droite horizontale** → il s'agit de l'espace à la date t ;

À droite : pour **Minkowski**, l'espace (= ensemble des événements simultanés)
 dépend de l'observateur → **droite horizontale ou inclinée**

→ la durée entre deux événements n'est pas absolue et l'ordre chronologique
 lui-même peut changer !

Relativité des durées et diagramme d'espace-temps

Représentation graphique et spatio-temporelle du **problème des deux trains** :

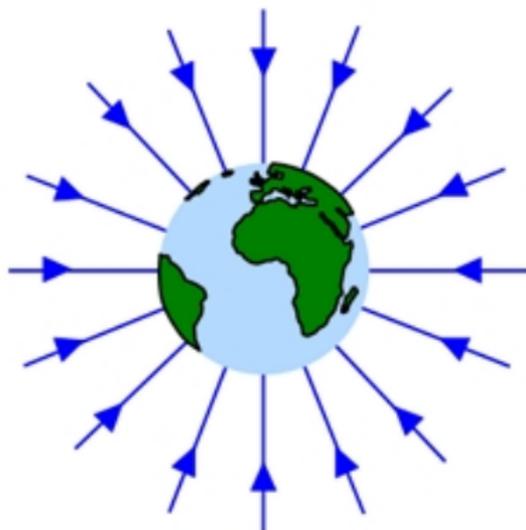


À gauche : selon **Newton**, tout observateur a le **même temps** et le **même espace** ;
 les événements simultanés (**même date t**) appartiennent à une même **droite horizontale** → il s'agit de l'espace à la date t ;

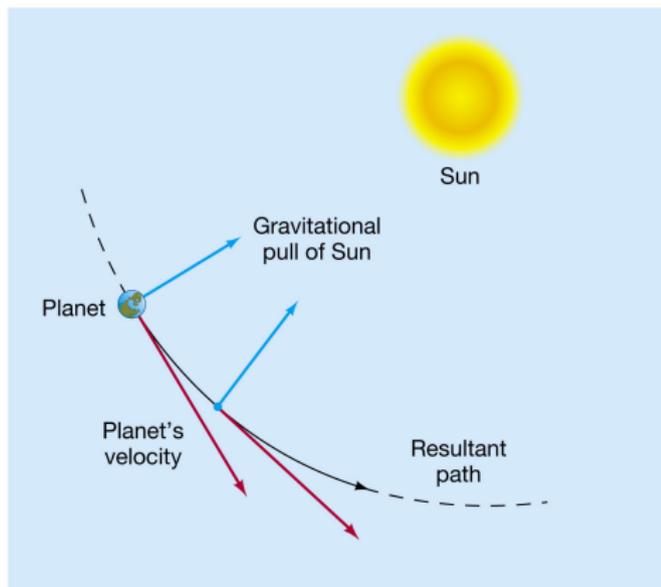
À droite : pour **Minkowski**, l'espace (= ensemble des événements simultanés)
 dépend de l'observateur → **droite horizontale ou inclinée**
 → la durée entre deux événements n'est pas absolue et l'ordre chronologique
 lui-même peut changer !

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)

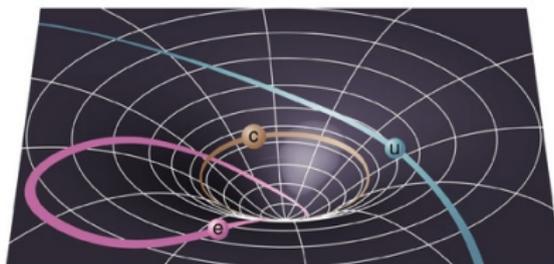


Ondes gravitationnelles

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 = \ll **lignes droites** \gg (**géodésiques**) dans un espace-temps courbe.

c circular orbit
 e elliptical orbit
 u unbound orbit



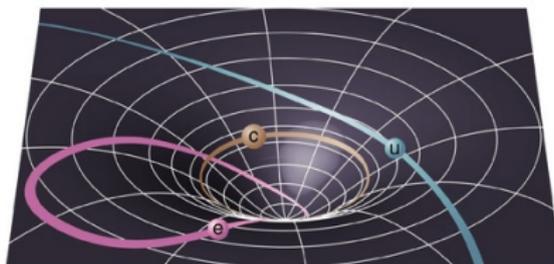
Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison-Wesley

exemples d'orbites 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 = \ll **lignes droites** \gg (**géodésiques**) dans un espace-temps courbe.

c circular orbit
e elliptical orbit
u unbound orbit



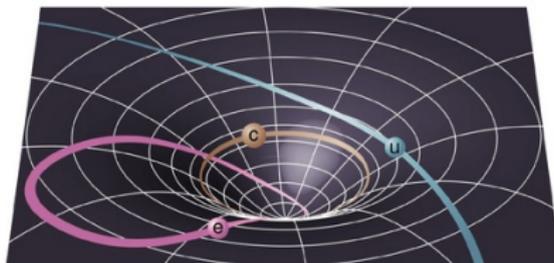
Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison-Wesley

exemples d'orbites 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 = \ll **lignes droites** \gg (**géodésiques**) dans un espace-temps courbe.

c circular orbit
e elliptical orbit
u unbound orbit

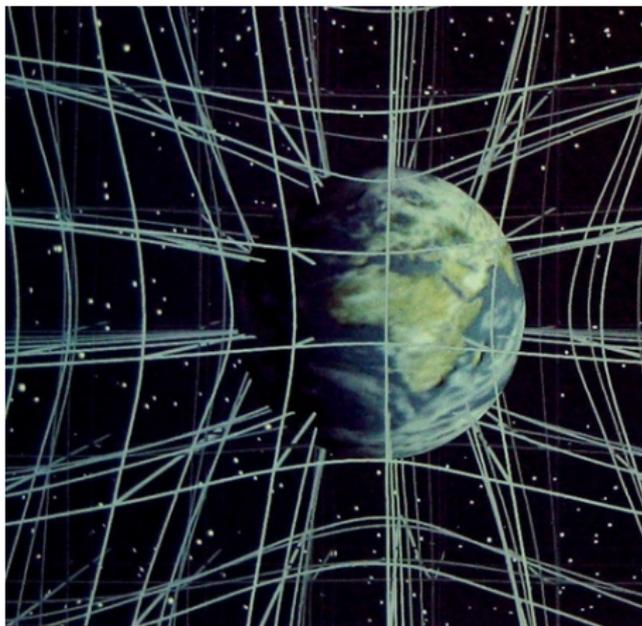


Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison-Wesley

exemples d'orbites dans un espace bidimensionnel courbe

Courbure de l'espace-temps

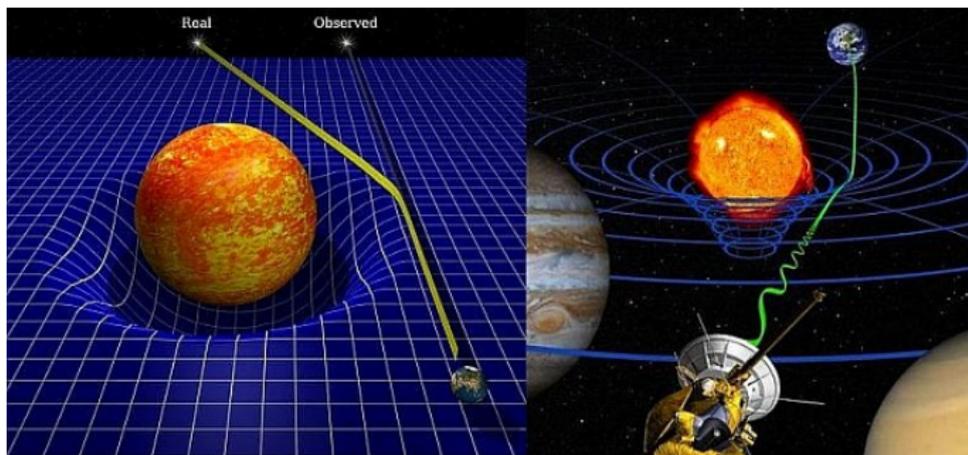
- ▶ mouvement orbital \sim courbure spatiale ;
- ▶ **courbure temporelle** : pieds vieillissent moins vite que tête (cf. **GPS**)...



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.

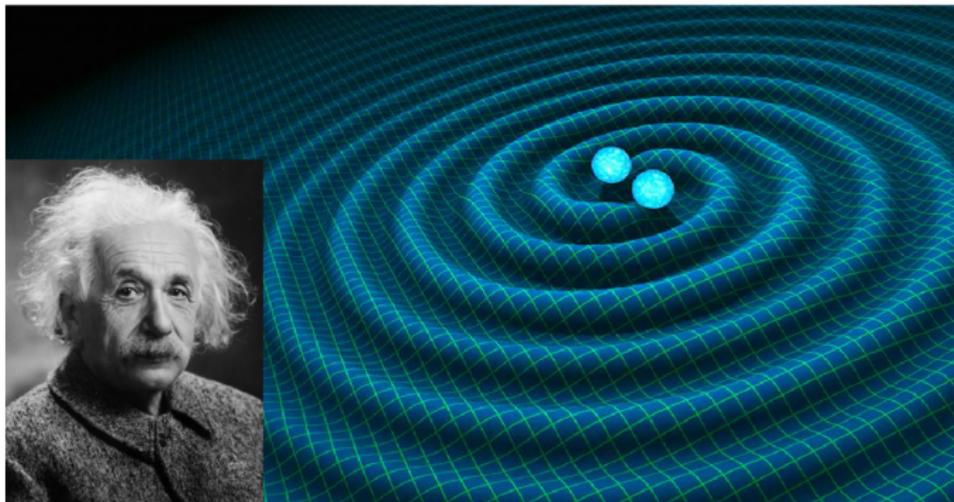


Mirage gravitationnel (images d'une galaxie lointaine)



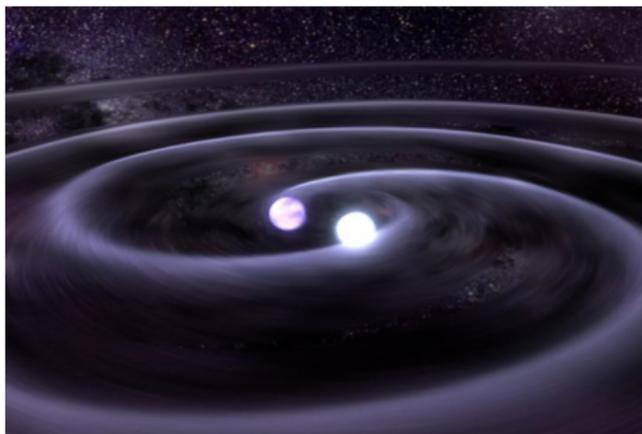
Rayonnement gravitationnel

- ▶ 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.



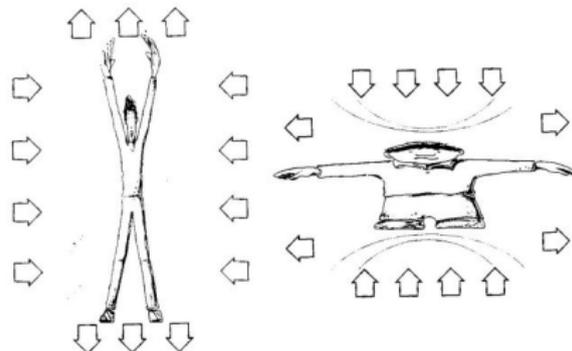
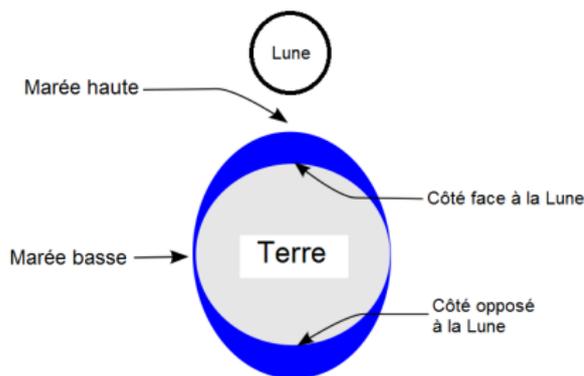
Ondes gravitationnelles

- ▶ 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.**



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).

Polarisation et direction de provenance

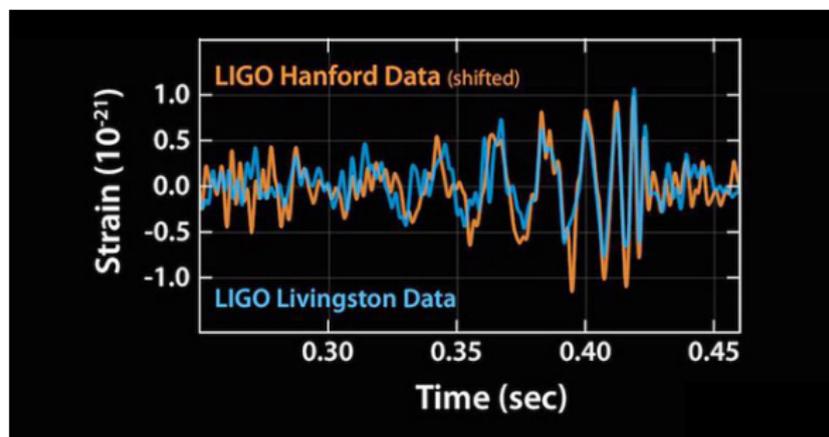
polarisation observée dépend de la source et de la direction d'observation



Analogie acoustique

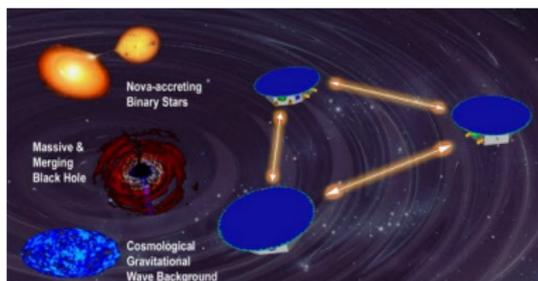
ondes observables : **longueur d'onde** \gtrsim taille de la source ou du détecteur.

- **perception non-directionnelle** ;
- **interférence** pour **sources distinctes** (= **sensibilité au bruit**) ;
- signal reçu présenté comme un **son** et non une image ;
- détecteurs \sim « **sonophone gravitationnel** ».



3

Sources d'ondes gravitationnelles

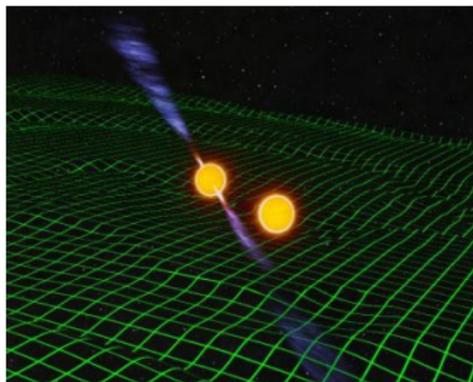


Production d'ondes gravitationnelles

Recette

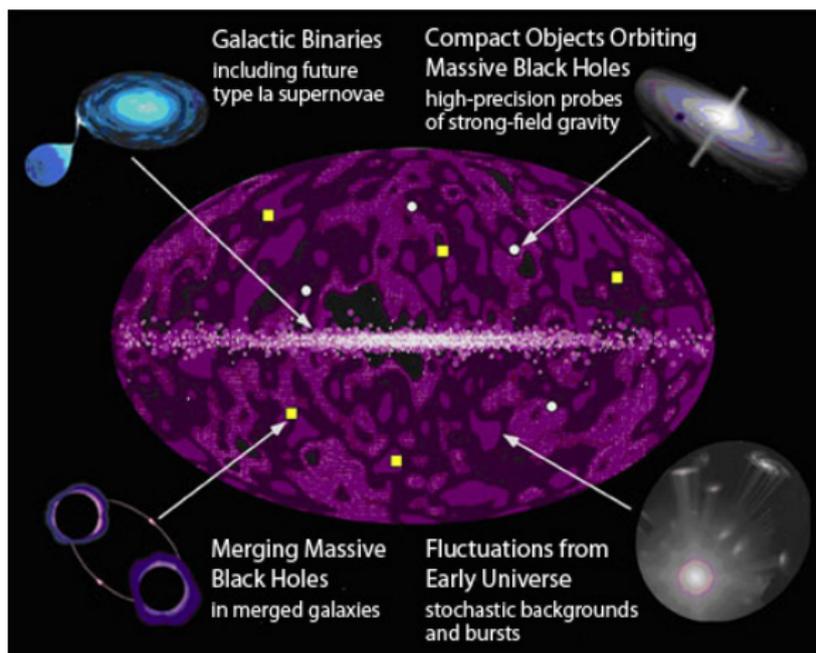
- ▶ Prendre une **grande quantité de masse** (ou d'énergie);
- ▶ La rendre la **plus compacte possible** (grand rapport masse/rayon : différent de la densité = masse/volume);
- ▶ La mettre en **mouvement cohérent** (on ne mélange pas trop!);
- ▶ Accélérer jusque des **vitesse proches de celle de la lumière**.

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



Sources astrophysiques

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



Objets astrophysiques compacts

- ▶ **objets compacts** : résidus centraux de l'**effondrement d'étoiles massives** en fin de vie ;
- ▶ naissance violente sous la forme d'une **supernova gravitationnelle** ;
- ▶ **puissance totale** 10^{45} **watts** (pendant 10 s ; 99% = neutrinos) ; puissance solaire moyenne : 10^{26} watts.



The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)

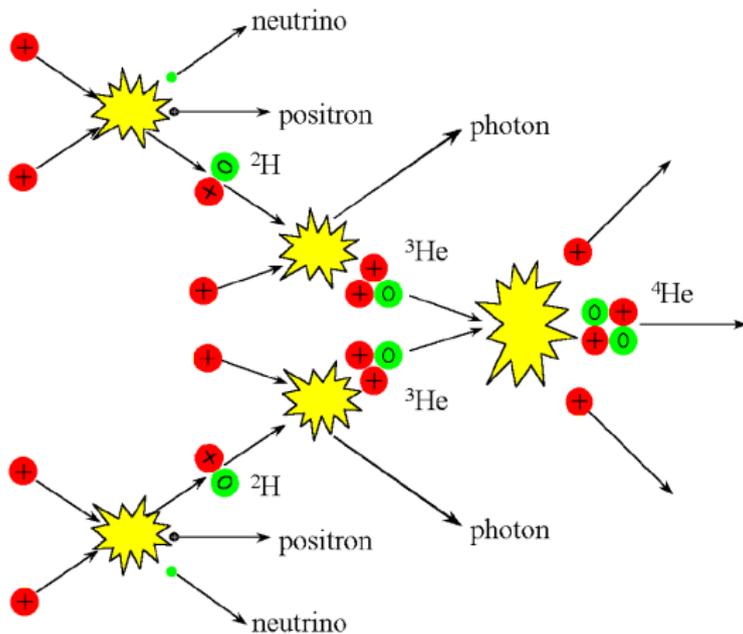
ESO PR Photo 40/99 (17 November 1999)

© European Southern Observatory



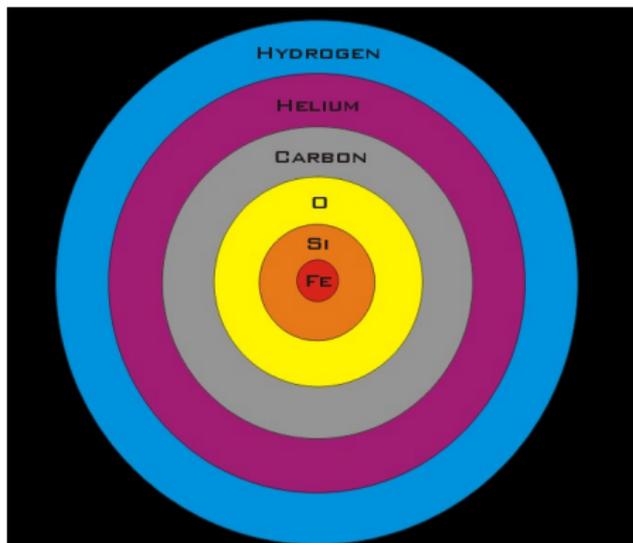
Évolution stellaire et destin des étoiles massives

- ▶ étoiles \equiv **réacteurs nucléaires à fusion** :
 - noyaux atomiques légers \rightarrow gros noyaux + énergie ;
 - énergie \rightarrow **pression qui résiste à la gravitation** (effondrement sinon).
- ▶ **fusion** car petits donnent gros ; \neq **fission** dans laquelle gros donnent petits.



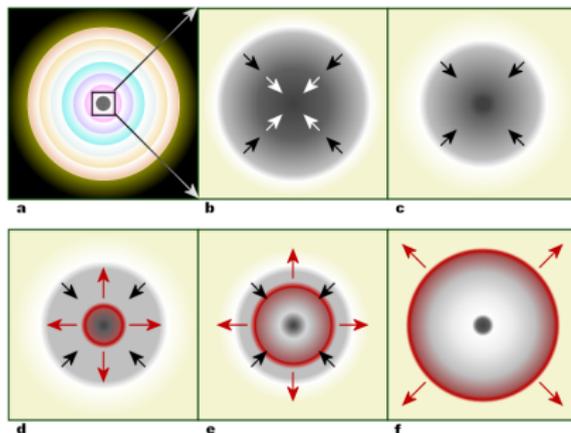
Structure en oignon

- ▶ **étoiles massives** → éléments de plus en plus lourds formés ;
- ▶ plus lourds vont au **centre** (stratification, comme pour l'eau et l'huile) ;
- ▶ plus lourd de tous, le **fer** : inerte (= **ne peut pas fusionner pour libérer de l'énergie**) → « déchet nucléaire » [résiste grâce à des effets **quantiques**].



Supernova

- ▶ avec le temps, masse du **cœur de fer** ≥ 1.4 masse solaire
→ **effondrement** sous son propre poids (**Chandrasekhar, 1930**);
 - ▶ **effondrement du cœur** rapide mais des couches externes plus lent;
 - ▶ cœur se durcit (interactions entre **neutrons** et **protons**) → **rebond** alors que l'extérieur tombe toujours → choc et **expulsion des couches externes**
- **supernova gravitationnelle** (→ **poussière d'étoile**);
- résidu central = **objet compact**.

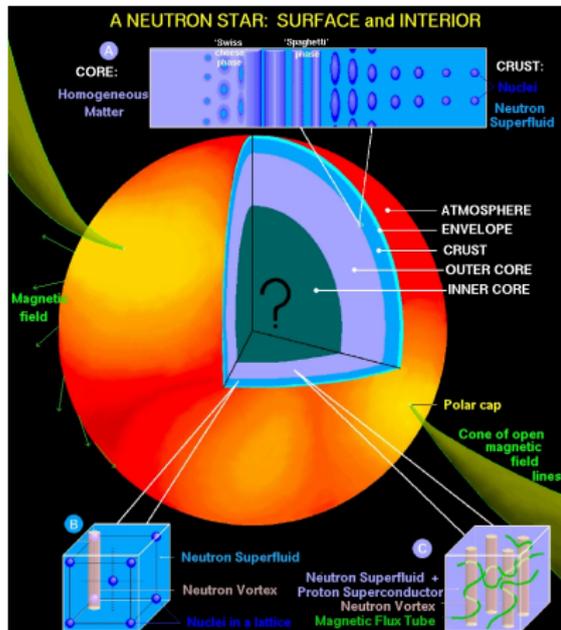


Quelques supernovæ gravitationnelles



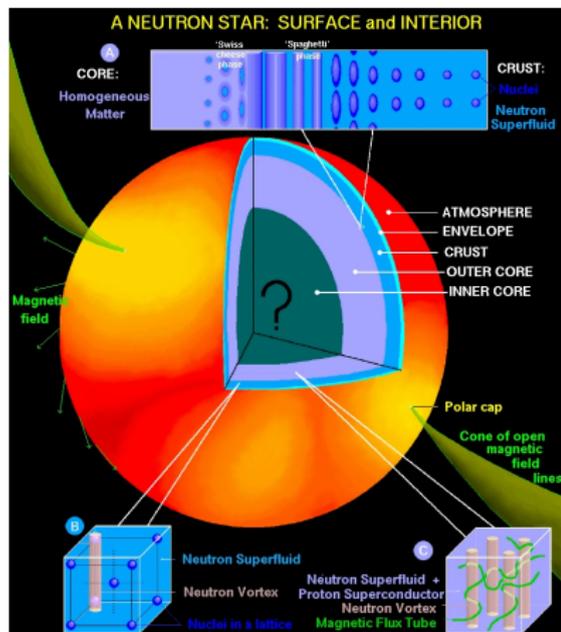
Étoiles à neutrons

- ▶ étoile progénitrice : $M \sim 8$ à $20 M_{\odot}$;
- ▶ 1 à 2 fois M_{\odot} dans une boule de 10 km de rayon (Soleil $\sim 750\,000$ km) ;
- ▶ matière dans des conditions extrêmes : 100 milliards de tonnes par litre, structure interne complexe (\neq boule de neutrons), superfluidité, champs gravitationnel et magnétique intenses, etc. ;
- ▶ observation : pulsars, sources X compactes, sursauteurs gamma mous (*soft gamma repeaters*, SGR ; magnétars), etc.



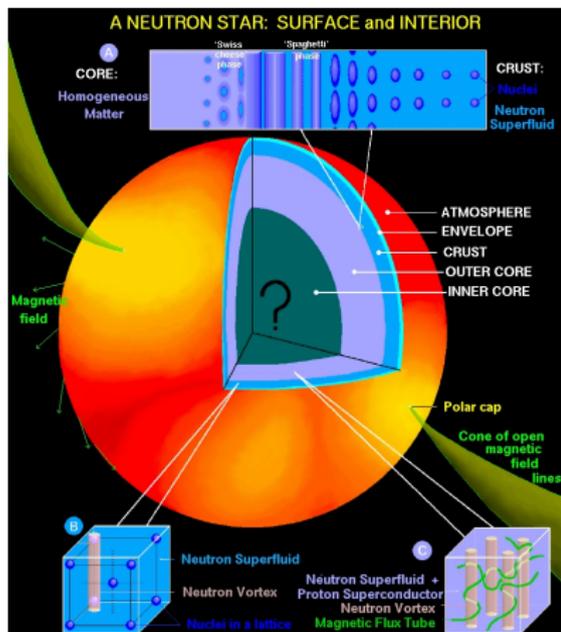
Étoiles à neutrons

- ▶ étoile progénitrice : $M \sim 8$ à $20 M_{\odot}$;
- ▶ **1 à 2 fois M_{\odot} dans une boule de 10 km de rayon** (Soleil $\sim 750\,000$ km) ;
- ▶ matière dans des **conditions extrêmes** : 100 milliards de tonnes par litre, structure interne complexe (\neq **boule de neutrons**), superfluidité, champs gravitationnel et magnétique intenses, etc. ;
- ▶ observation : **pulsars**, sources X compactes, sursauteurs gamma mous (*soft gamma repeaters*, SGR ; magnétars), etc.



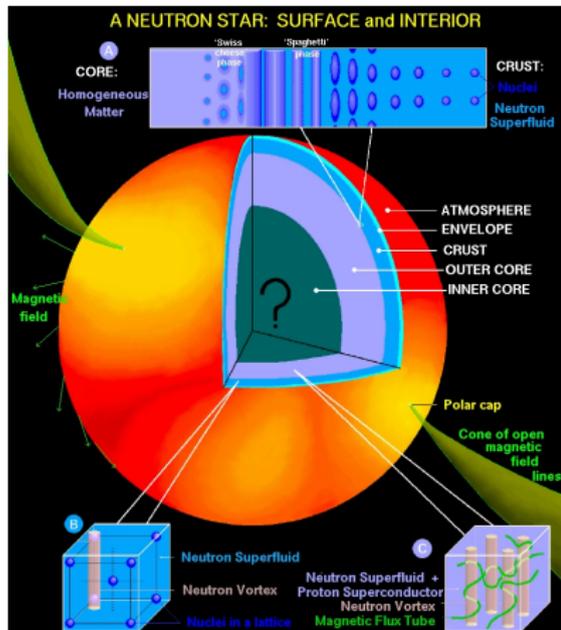
Étoiles à neutrons

- ▶ étoile progénitrice : $M \sim 8$ à $20 M_{\odot}$;
- ▶ **1 à 2 fois M_{\odot}** dans une boule de **10 km de rayon** (Soleil $\sim 750\,000$ km) ;
- ▶ matière dans des **conditions extrêmes** : 100 milliards de tonnes par litre, structure interne complexe (\neq **boule de neutrons**), superfluidité, champs gravitationnel et magnétique intenses, etc. ;
- ▶ observation : pulsars, sources X compactes, sursauteurs gamma mous (*soft gamma repeaters*, SGR ; magnétars), etc.

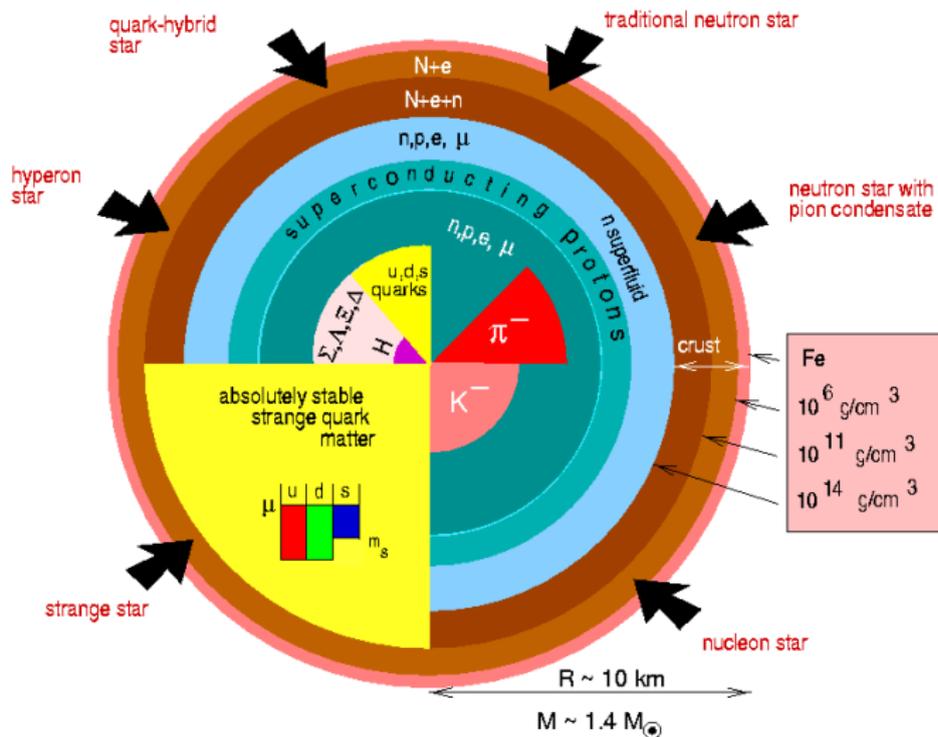


Étoiles à neutrons

- ▶ étoile progénitrice : $M \sim 8$ à $20 M_{\odot}$;
- ▶ **1 à 2 fois M_{\odot}** dans une boule de **10 km de rayon** (Soleil $\sim 750\,000$ km) ;
- ▶ matière dans des **conditions extrêmes** : 100 milliards de tonnes par litre, structure interne complexe (\neq **boule de neutrons**), superfluidité, champs gravitationnel et magnétique intenses, etc. ;
- ▶ observation : **pulsars**, sources X compactes, sursauteurs gamma mous (*soft gamma repeaters*, SGR ; magnétars), etc.



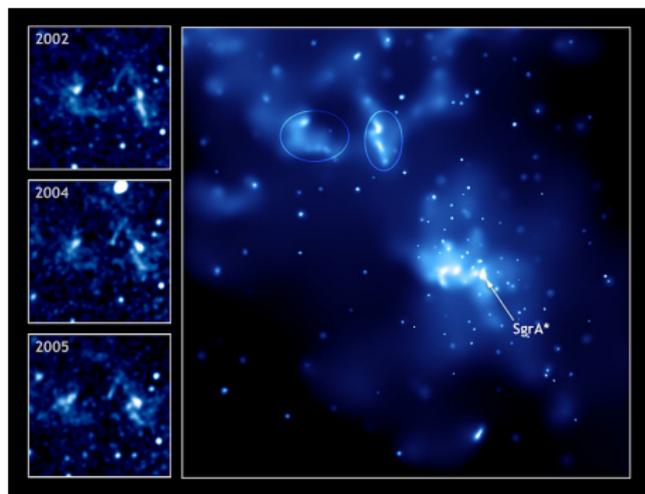
Étoile à neutrons : compositions envisagées à haute densité



Trous noirs astrophysiques

- ▶ région de l'espace-temps dont rien ne sort, **même pas la lumière** (cf. **Michell, 1783** ; **Schwarzschild, 1916**) ;
- ▶ résidu encore plus compact de l'effondrement d'une étoile massive ($M > 20 M_{\odot}$) ;
- ▶ masse du Soleil dans un « rayon » de 3 km (rayon de Schwarzschild, $R_s \propto M$) ;

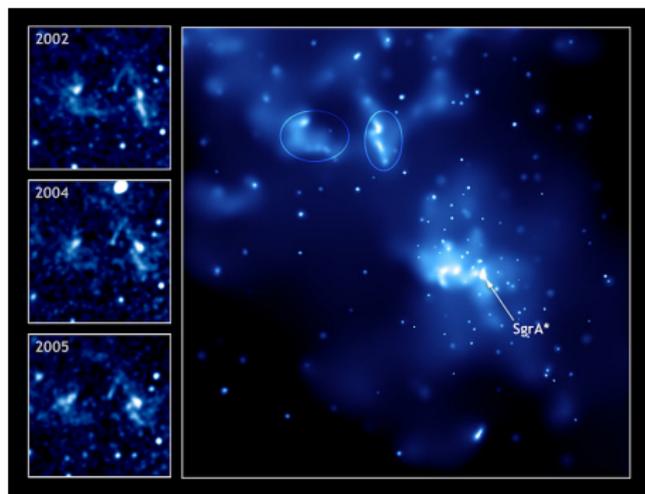
- ▶ trous noirs **supermassifs** au centre des galaxies ;
- ▶ **Sagittarius A*** :
 $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $r < 120$ UA ;
- ▶ trous noirs **primordiaux** ?



Trous noirs astrophysiques

- ▶ région de l'espace-temps dont rien ne sort, **même pas la lumière** (cf. **Michell, 1783** ; **Schwarzschild, 1916**) ;
- ▶ résidu encore plus compact de l'effondrement d'une étoile massive ($M > 20 M_{\odot}$) ;
- ▶ masse du Soleil dans un « rayon » de 3 km (rayon de Schwarzschild, $R_s \propto M$) ;

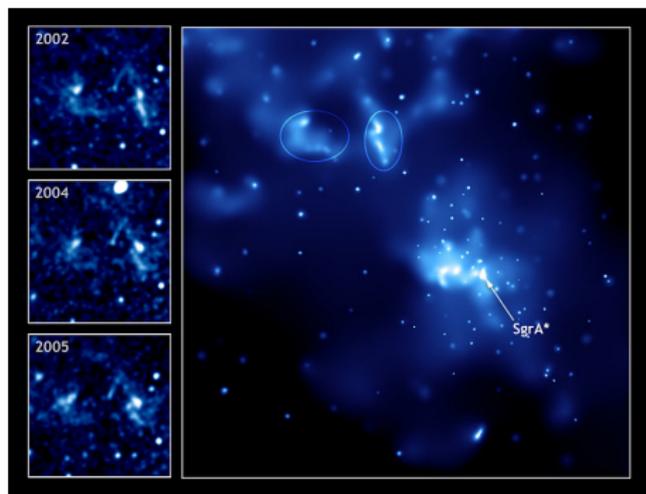
- ▶ trous noirs **supermassifs** au centre des galaxies ;
- ▶ **Sagittarius A*** :
 $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $r < 120$ UA ;
- ▶ trous noirs **primordiaux** ?



Trous noirs astrophysiques

- ▶ région de l'espace-temps dont rien ne sort, **même pas la lumière** (cf. **Michell, 1783** ; **Schwarzschild, 1916**) ;
- ▶ résidu encore plus compact de l'effondrement d'une étoile massive ($M > 20 M_{\odot}$) ;
- ▶ masse du Soleil dans un « rayon » de **3 km** (**rayon de Schwarzschild**, $R_s \propto M$) ;

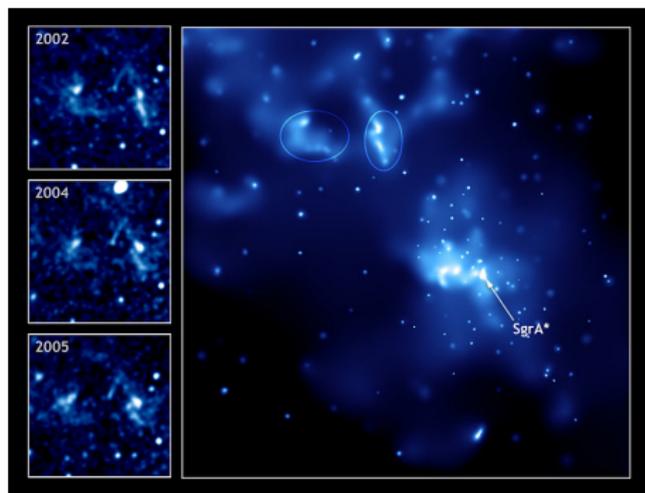
- ▶ trous noirs **supermassifs** au centre des galaxies ;
- ▶ **Sagittarius A*** :
 $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $r < 120$ UA ;
- ▶ trous noirs **primordiaux** ?



Trous noirs astrophysiques

- ▶ région de l'espace-temps dont rien ne sort, **même pas la lumière** (cf. **Michell, 1783** ; **Schwarzschild, 1916**) ;
- ▶ résidu encore plus compact de l'effondrement d'une étoile massive ($M > 20 M_{\odot}$) ;
- ▶ masse du Soleil dans un « rayon » de **3 km** (**rayon de Schwarzschild**, $R_s \propto M$) ;

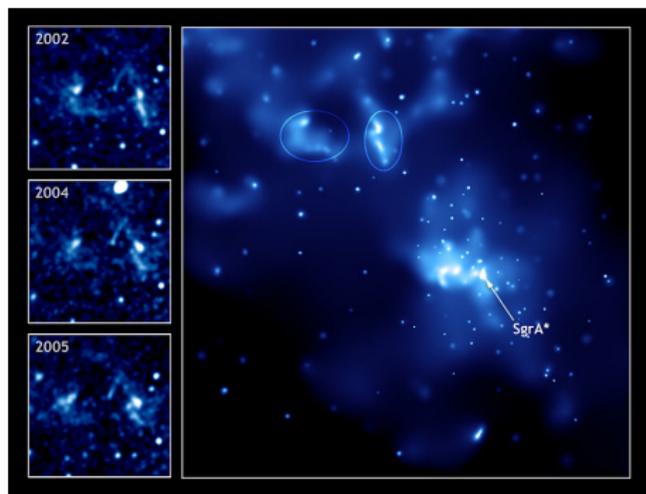
- ▶ trous noirs **supermassifs** au centre des galaxies ;
- ▶ **Sagittarius A*** :
 $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $r < 120$ UA ;
- ▶ trous noirs **primordiaux** ?



Trous noirs astrophysiques

- ▶ région de l'espace-temps dont rien ne sort, même pas la lumière (cf. **Michell, 1783** ; **Schwarzschild, 1916**) ;
- ▶ résidu encore plus compact de l'effondrement d'une étoile massive ($M > 20 M_{\odot}$) ;
- ▶ masse du Soleil dans un « rayon » de **3 km** (**rayon de Schwarzschild**, $R_s \propto M$) ;

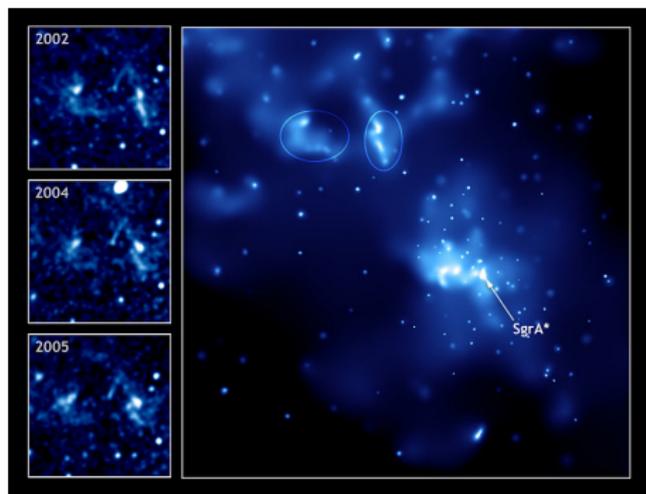
- ▶ trous noirs **supermassifs** au centre des galaxies ;
- ▶ **Sagittarius A*** :
 $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $r < 120$ UA ;
- ▶ trous noirs **primordiaux** ?



Trous noirs astrophysiques

- ▶ région de l'espace-temps dont rien ne sort, **même pas la lumière** (cf. **Michell, 1783** ; **Schwarzschild, 1916**) ;
- ▶ résidu encore plus compact de l'effondrement d'une étoile massive ($M > 20 M_{\odot}$) ;
- ▶ masse du Soleil dans un « rayon » de **3 km** (**rayon de Schwarzschild**, $R_s \propto M$) ;

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



Trous noirs et courbure de l'espace-temps

- ▶ **invisible** mais **effet gravitationnel** sur objet proche ;
 - ▶ espace-temps **extrêmement courbe** : lumière en orbite circulaire possible ;
- 
- ▶ frontière = **horizon** du trou noir (endroit vide : pas une surface matérielle) ;
 - ▶ **observateur lointain** : **matière semble gelée/temps arrêté** sur l'horizon ;
 - ▶ **rayon de Schwarzschild** \neq distance au centre ;
 - ▶ **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 ;



- ▶ frontière = **horizon** du trou noir (endroit vide : pas une surface matérielle) ;
- ▶ **observateur lointain** : **matière semble gelée/temps arrêté** sur l'horizon ;
- ▶ **rayon de Schwarzschild** \neq distance au centre ;
- ▶ **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 ;
- 
- ▶ frontière = **horizon** du trou noir (endroit vide : pas une surface matérielle) ;
 - ▶ observateur lointain : **matière semble gelée/temps arrêté** sur l'horizon ;
 - ▶ **rayon de Schwarzschild** \neq distance au centre ;
 - ▶ **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 ;
- 
- ▶ frontière = **horizon** du trou noir (endroit vide : pas une surface matérielle) ;
 - ▶ **observateur lointain** : **matière semble gelée/temps arrêté** sur l'horizon ;
 - ▶ **rayon de Schwarzschild** \neq distance au centre ;
 - ▶ **structure interne encore inconnue** (**singularité** \neq point au centre ; volume infini malgré surface finie ?).

Trous noirs et courbure de l'espace-temps

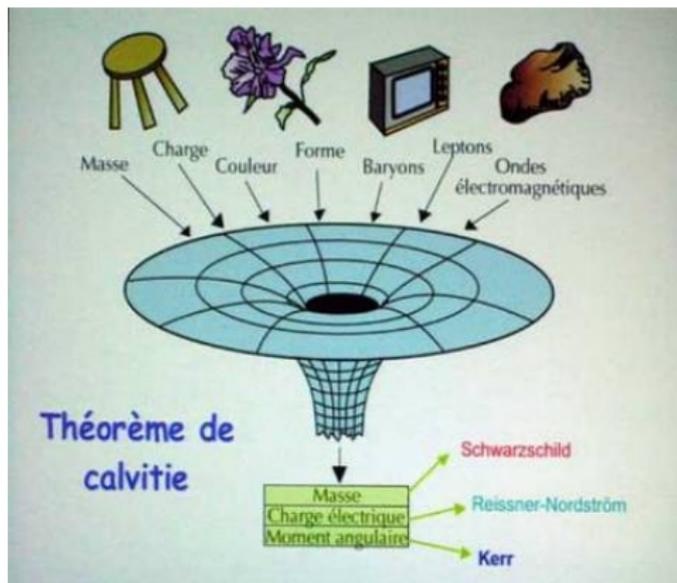
- ▶ **invisible** mais **effet gravitationnel** sur objet proche ;
 - ▶ espace-temps **extrêmement courbe** : lumière en orbite circulaire possible ;
- 
- ▶ frontière = **horizon** du trou noir (endroit vide : pas une surface matérielle) ;
 - ▶ **observateur lointain** : **matière semble gelée/temps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

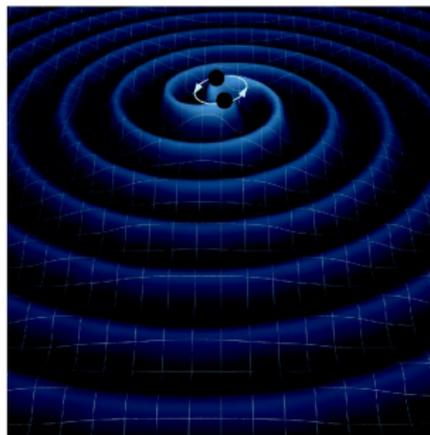
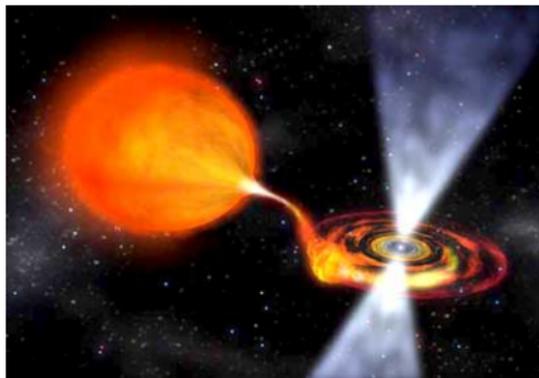
Les trous noirs sont chaudes

- ▶ **1916, Schwarzschild** : solution des équations d'Einstein (sphérique de **masse M**)
→ infini pour $R < R_s$ (?);
- ▶ **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** (en astrophysique : q négligeable).

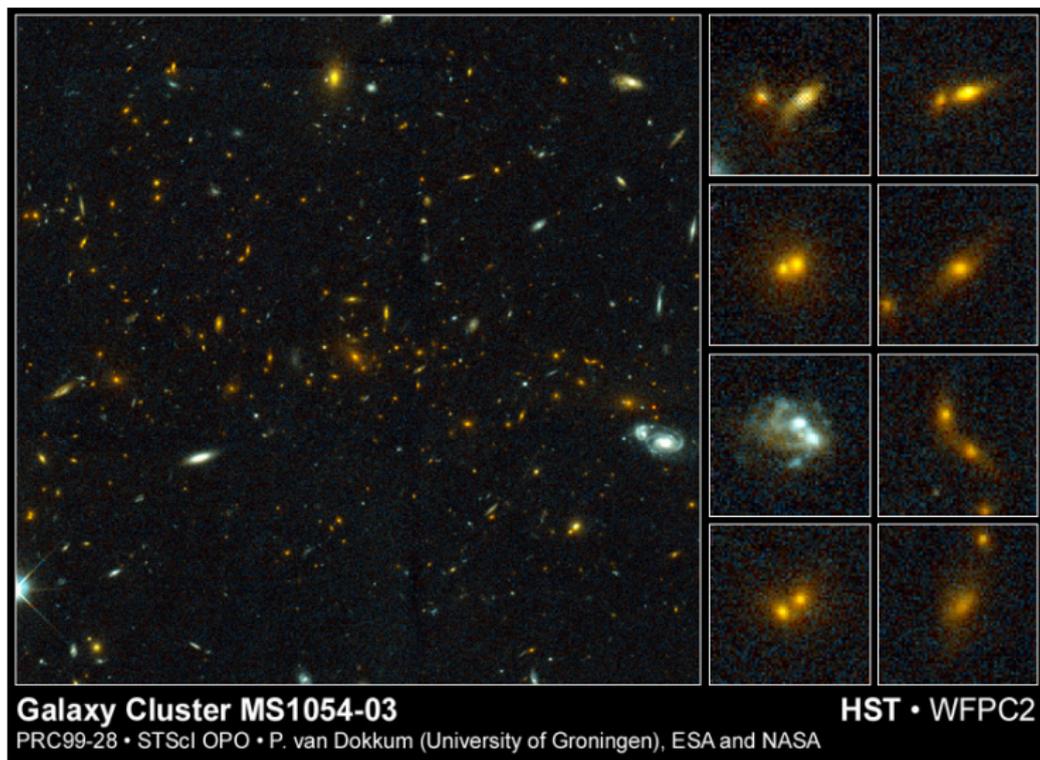


Émission d'ondes gravitationnelles par les objets compacts

- ▶ 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 stationnaire et axisymétrique)

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

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

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

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

avec

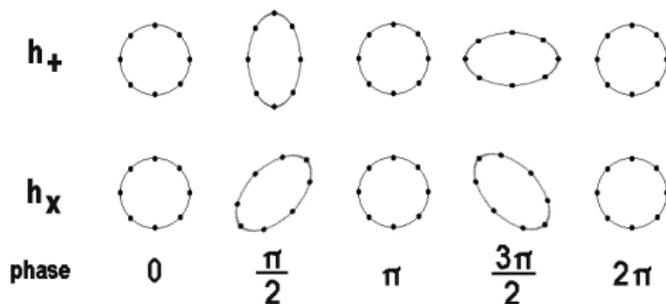
$$\Delta_2 \hat{=} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$$

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

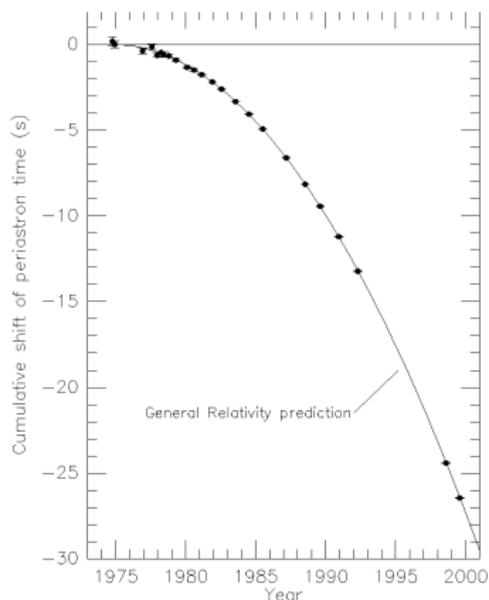
$$\tilde{\Delta}_3 \hat{=} \Delta_3 - \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \quad \text{et} \quad \partial u \partial v \hat{=} \frac{\partial u}{\partial r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} \frac{\partial v}{\partial \theta}$$

4

Détection des ondes gravitationnelles



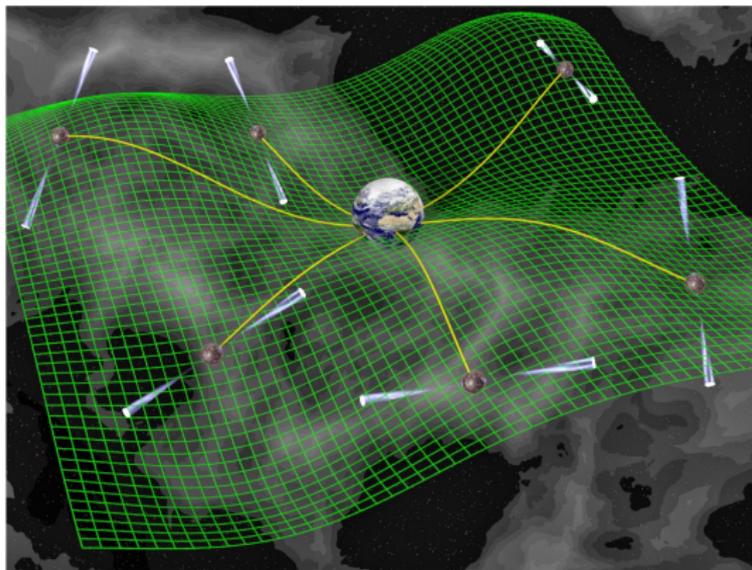
Mise en évidence indirecte des ondes gravitationnelles



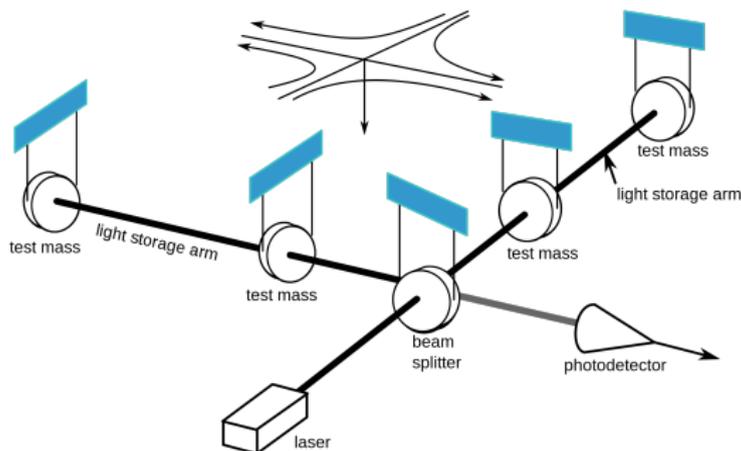
- ▶ **Hulse & Taylor, 1982** : découverte et observation précise du **pulsar binaire PSR B1913+16** (deux étoiles à neutrons) ;
- ▶ Accord parfait entre la théorie et les mesures → **prix Nobel en 1993**.

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).

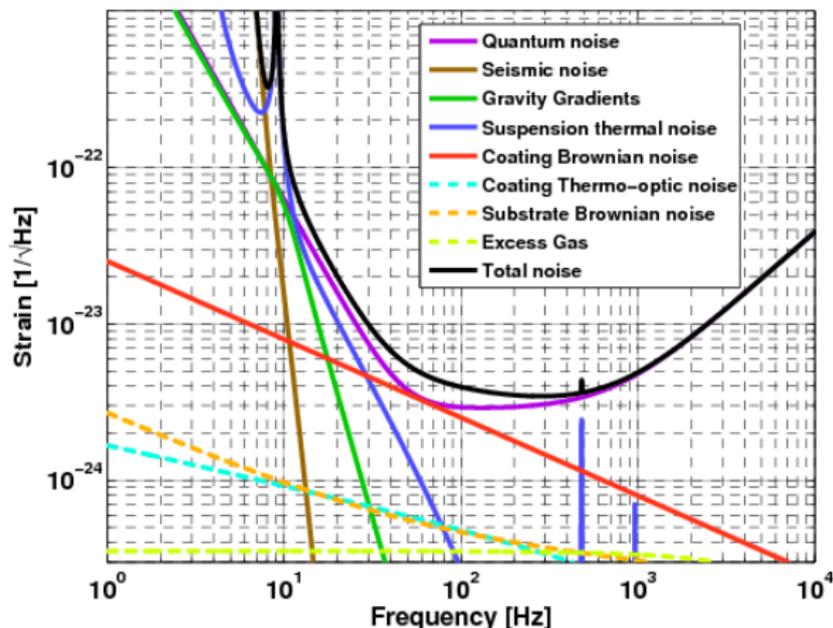


Interférométrie laser



- ▶ **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



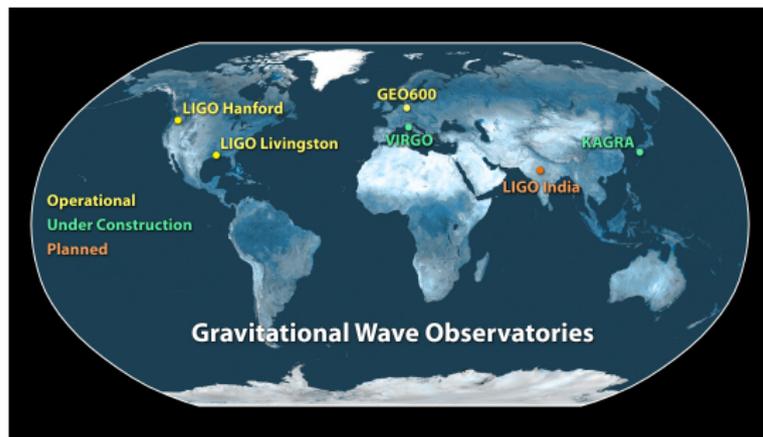
- ▶ **basses fréquences** : ondes sismiques, fluctuations thermiques, etc.
- ▶ **hautes fréquences** : fluctuations quantiques du laser, etc.

LIGO



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

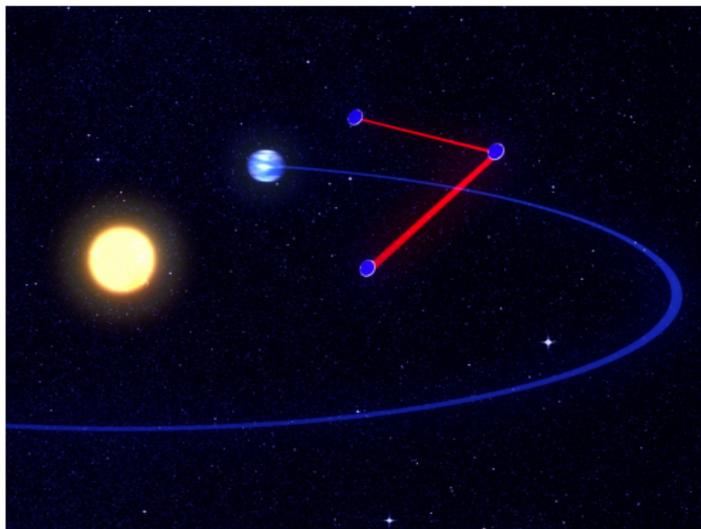
Réseau international



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.

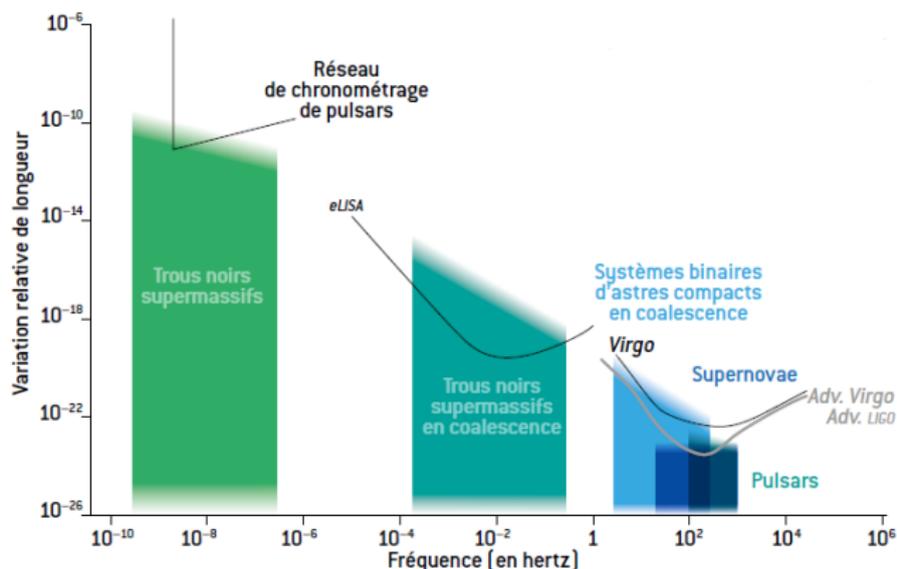
Projet eLISA



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

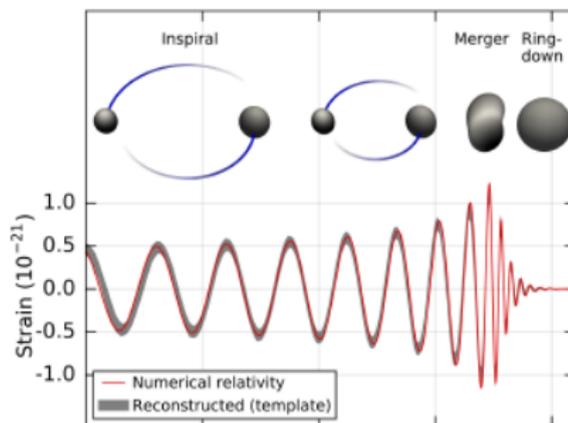
- ▶ pas de bruit sismique ;
- ▶ bras plus longs = **fréquences plus basses** ;
- ▶ binaires de **trous noirs supermassifs** avant tout ;
- ▶ 3 décembre 2015 : lancement réussi du prototype **LISA Pathfinder**.

Signaux attendus et détectabilité



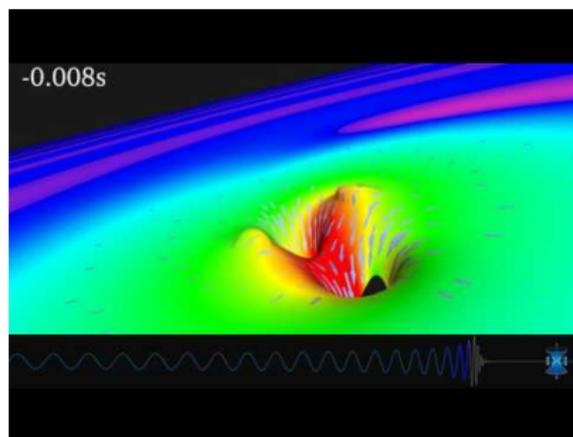
- ▶ **basses fréquences** : trous noirs supermassifs (mission spatiale eLISA ou chronométrage de pulsars) ;
- ▶ **hautes fréquences** : objets compacts stellaires (interféromètres au sol).

GW150914 : Fusion de deux trous noirs observée par LIGO



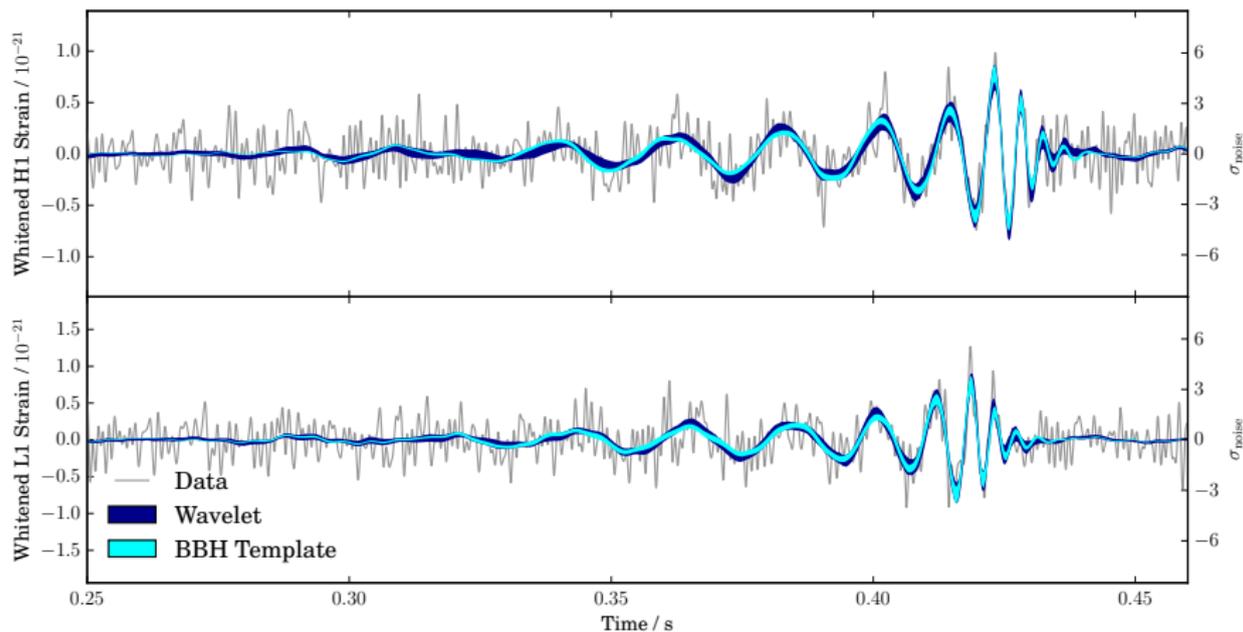
- ▶ système de deux trous noirs de **36 et 29 masses solaires** ;
- ▶ **environ 10 orbites observées** en **0,2 seconde** $\rightarrow v \sim 0,5c$ à la fusion ;
- ▶ évolution de la **fréquence du signal** : de 35 Hz jusque 150 Hz ;
- ▶ mesure sur Terre : **déformation relative** \sim un noyau atomique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

Trou noir final



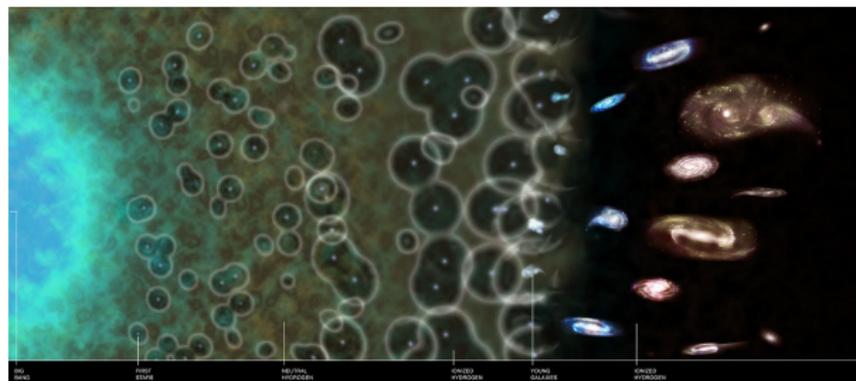
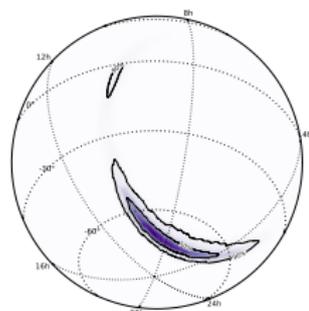
- ▶ **62 masses solaires** → **3 masses solaires rayonnées** sous forme d'ondes gravitationnelles ;
- ▶ **puissance** rayonnée au maximum $> 10^{49}$ W (~ 500 milliards de fois celle de la Voie lactée sous forme électromagnétique ; plus que l'univers observable) ;
- ▶ **oscillation amortie** : confirmation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

Comparaison théorie et expérience



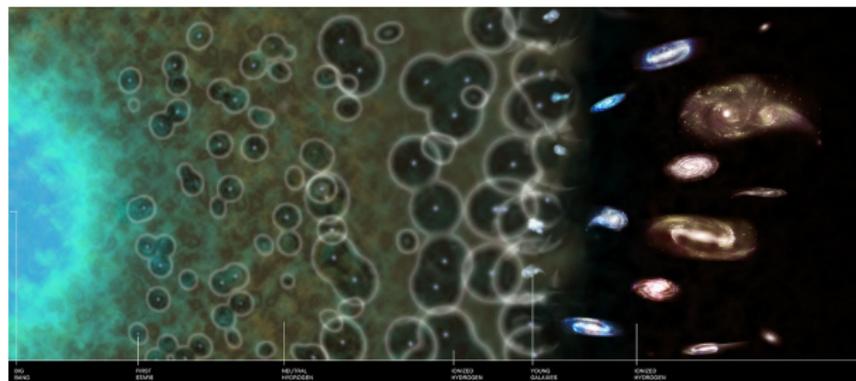
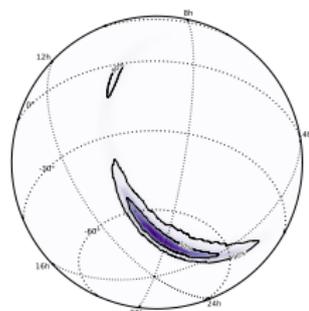
→ orbite quasi-circulaire, **pas d'eccentricité**

Conséquences astrophysiques et questions ouvertes



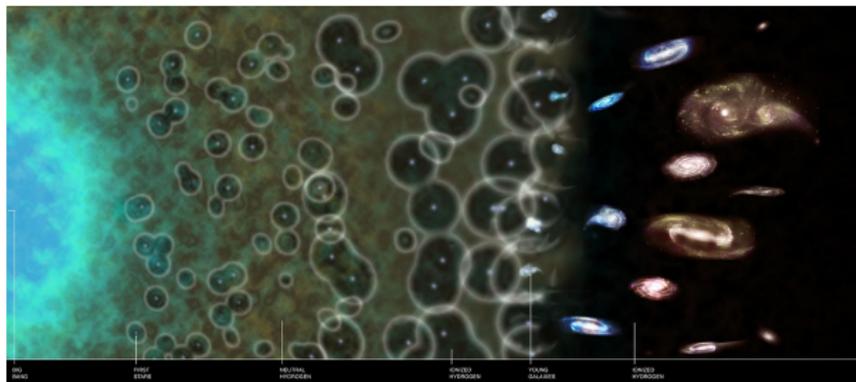
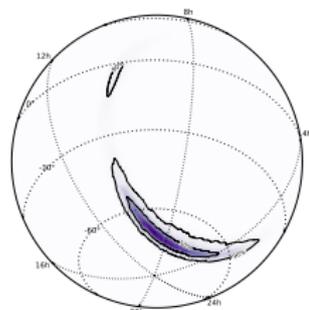
- ▶ auparavant : trous noirs observés indirectement avec masses $\lesssim 25 M_{\odot}$
 → trous noirs **massifs** plus nombreux que prévu ? (trous noirs **primordiaux** ? contribution à la **matière noire** ?) ;
- ▶ étoiles progénitrices de **faible métallicité** → **population III** ? (= première génération)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

Conséquences astrophysiques et questions ouvertes



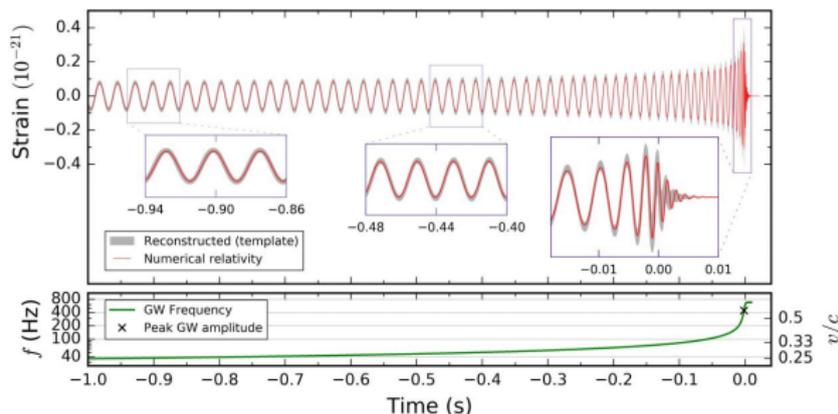
- ▶ auparavant : trous noirs observés indirectement avec masses $\lesssim 25 M_{\odot}$
 → trous noirs **massifs** plus nombreux que prévu ? (trous noirs **primordiaux** ? contribution à la **matière noire** ?) ;
- ▶ étoiles progénitrices de **faible métallicité** → **population III** ? (= première génération)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

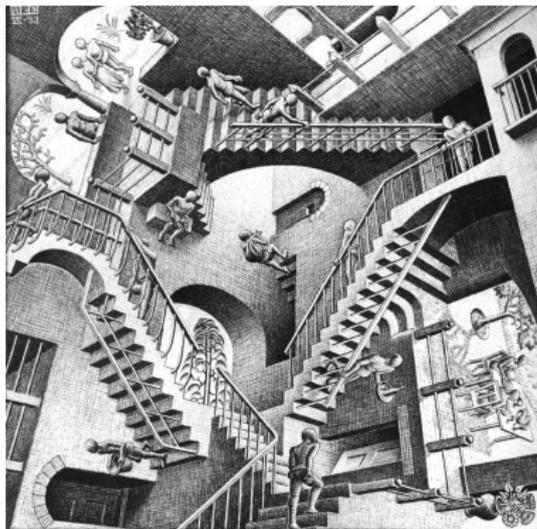
GW151226



- ▶ ~ 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).

Vidéos montrées pendant la conférence

- ▶ **p9** : bras d'une galaxie spirale et onde de densité :
https://www.youtube.com/watch?v=_GNPvYdvZAQ
- ▶ **p10** : vibrations de la surface du Soleil :
<https://nasaviz.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=11840>
- ▶ **p26** : polarisation des ondes gravitationnelles :
<https://www.youtube.com/watch?v=F4stTzxYrN0>
- ▶ **p27** : polarisation en fonction de la position par rapport au système binaire source : <https://www.youtube.com/watch?v=Y6tSFk5ESAO>
- ▶ **p28** : « son gravitationnel » de GW150914 :
<https://www.youtube.com/watch?v=TWqhUANNFXw>
- ▶ **p32** : supernova gravitationnelle en deux temps :
<https://www.youtube.com/watch?v=oaJSXi4NTB8>
- ▶ **p36** : trou noir au centre de la Galaxie :
<https://www.youtube.com/watch?v=duoHtJpo4GY>
- ▶ **p46** : onde gravitationnelle et interféromètre :
<https://www.youtube.com/watch?v=BWJJeJAUdfM>
- ▶ **p53 & 54** : voir <http://www.black-holes.org/gw150914>
- ▶ **p55** : 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](#), ~ une fois par mois le **mercredi à 12h30** ;
- ▶ Infos (programme, compléments sur les précédentes conférences) : département de physique <http://dept.phys.univ-tours.fr/> ou page des Encas (accessible depuis le site du département ou via le raccourci <http://tinyurl.com/encas>) ou encore sur Facebook : <https://www.facebook.com/EncasPhysique> ;
- ▶ **Prochain Encas** : « De la lave torrentielle au gel à cheveux : l'écoulement surprenant des fluides », le mercredi 12/10/2016, par **R. Morini**, ingénieur de recherche au GÉHCO (Tours) ;
- ▶ novembre ou décembre : grandes structures cosmologiques (**Y. Mellier**, IAP).

Sites web :

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