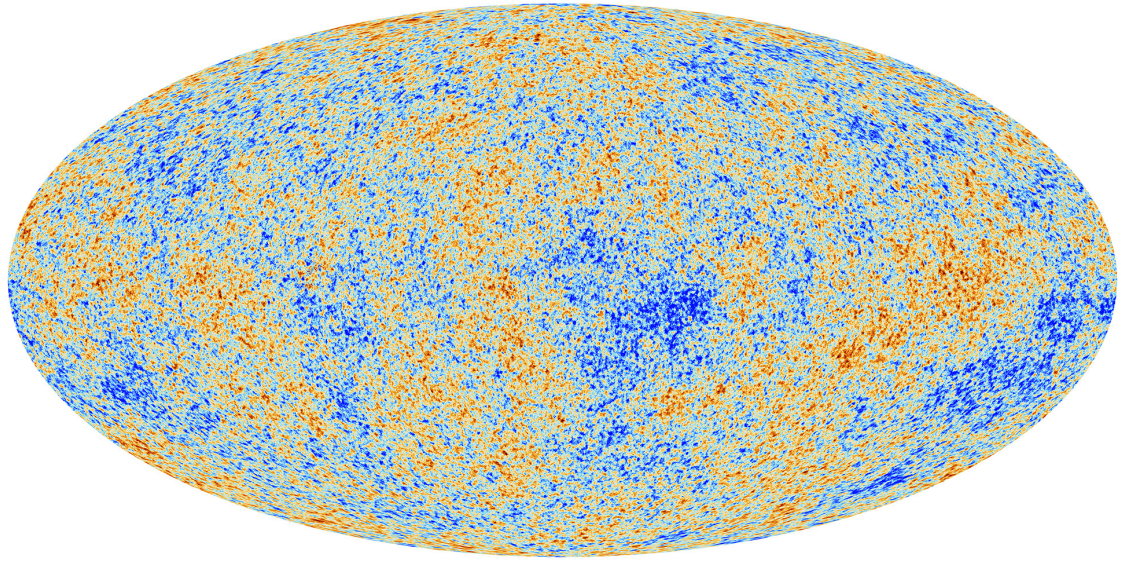
Un Univers de musique

Loïc Villain

Institut Denis Poisson, Université de Tours
loic@univ-tours.fr

Centre Galois



Brève présentation

- **enseignant-chercheur** à l'Université de Tours (**dpt. de physique**) ;
- chercheur à l'**Institut Denis Poisson** ;
- 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**.

Physique et cartographie du monde

- **Physique** : tentative de compréhension du monde (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des lois qui le gouvernent ;
- construction de modèles ($\sim$ **cartes**) et confrontation avec le réel (**science expérimentale**) ;
- trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier.
- **Galilée (1564–1642)** : (le livre de la Nature) « *est écrit en langue mathématique (...).* »

Pas de véritable physique (ou même de science) sans **outils mathématiques**.

Physique et cartographie du monde

- **Physique** : tentative de compréhension du monde (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des lois qui le gouvernent ;
- construction de modèles ($\sim$ **cartes**) et confrontation avec le réel (**science expérimentale**) ;
- trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier.
- **Galilée (1564–1642)** : (le livre de la Nature) « *est écrit en langue mathématique (...).* »

Pas de véritable physique (ou même de science) sans **outils mathématiques**.

Physique et cartographie du monde

- **Physique** : tentative de compréhension du monde (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des lois qui le gouvernent ;
- construction de modèles ($\sim$ **cartes**) et confrontation avec le réel (**science expérimentale**) ;
- trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier.
- **Galilée (1564–1642)** : (le livre de la Nature) « *est écrit en langue mathématique (...).* »

Pas de véritable physique (ou même de science) sans **outils mathématiques**.

Physique et cartographie du monde

- **Physique** : tentative de compréhension du monde (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des lois qui le gouvernent ;
- construction de modèles ($\sim$ **cartes**) et confrontation avec le réel (**science expérimentale**) ;
- trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier.
- **Galilée (1564–1642)** : (le livre de la Nature) *« est écrit en langue mathématique (...). »*

Pas de véritable physique (ou même de science) sans **outils mathématiques**.

Physique et cartographie du monde

- **Physique** : tentative de compréhension du monde (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des lois qui le gouvernent ;
- construction de modèles ($\sim$ **cartes**) et confrontation avec le réel (**science expérimentale**) ;
- trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier.
- **Galilée (1564–1642)** : (le livre de la Nature) « *est écrit en langue mathématique (...).* »

Pas de véritable physique (ou même de science) sans **outils mathématiques**.

Physique et cartographie du monde

- **Physique** : tentative de compréhension du monde (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des lois qui le gouvernent ;
- construction de modèles ($\sim$ **cartes**) et confrontation avec le réel (**science expérimentale**) ;
- trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier.
- **Galilée (1564–1642)** : (le livre de la Nature) « *est écrit en langue mathématique (...).* »

Pas de véritable physique (ou même de science) sans **outils mathématiques**.

Musique et écoute...

Acteurs :

1. récepteur (oreille) : aspects **subjectifs** liés à l'observateur, à l'appareil de détection, etc. $\rightarrow$ **moins important ici** ;
2. source sonore/émetteur (diapason)
3. milieu de propagation déformable (air) $\rightarrow$ presque le plus important pour la physique...

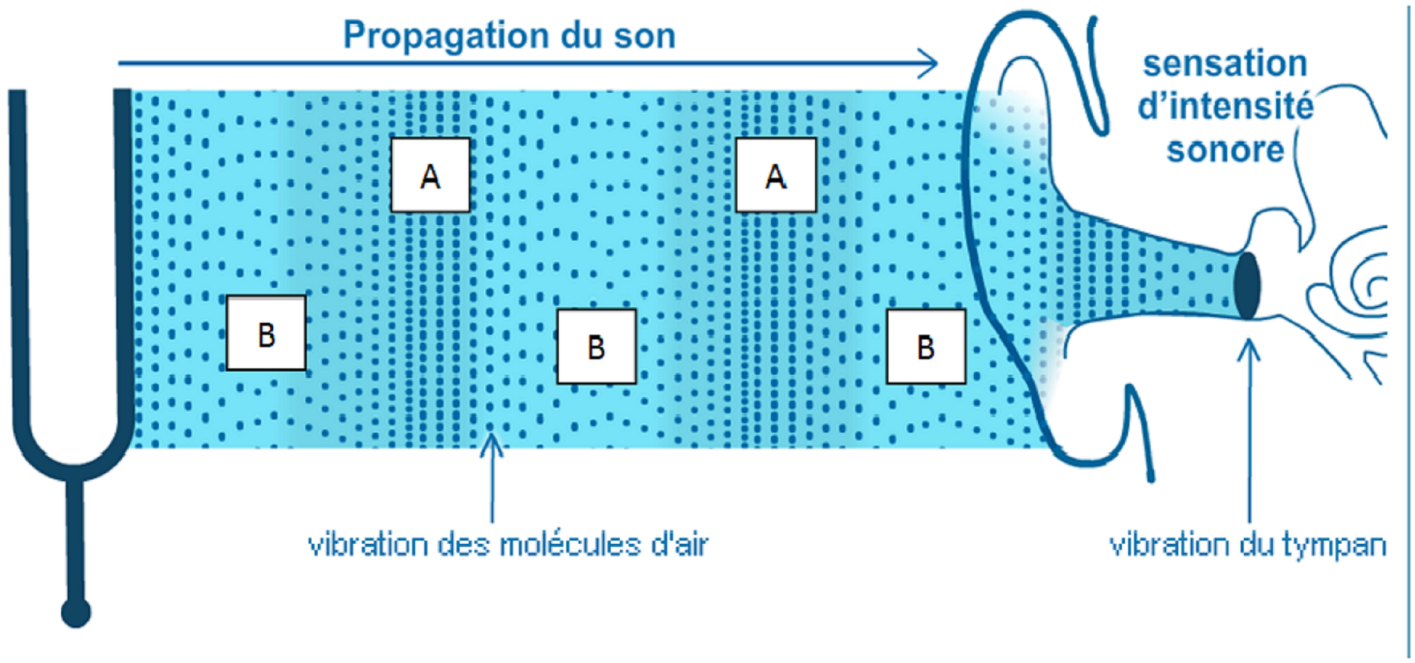


Image venant du site : bruit.seine-et-marne.fr

Musique et écoute...

Acteurs :

1. récepteur (oreille) : aspects **subjectifs** liés à l'observateur, à l'appareil de détection, etc. $\rightarrow$ **moins important ici** ;
2. source sonore/émetteur (diapason)
3. milieu de propagation déformable (air) $\rightarrow$ presque le plus important pour la physique...

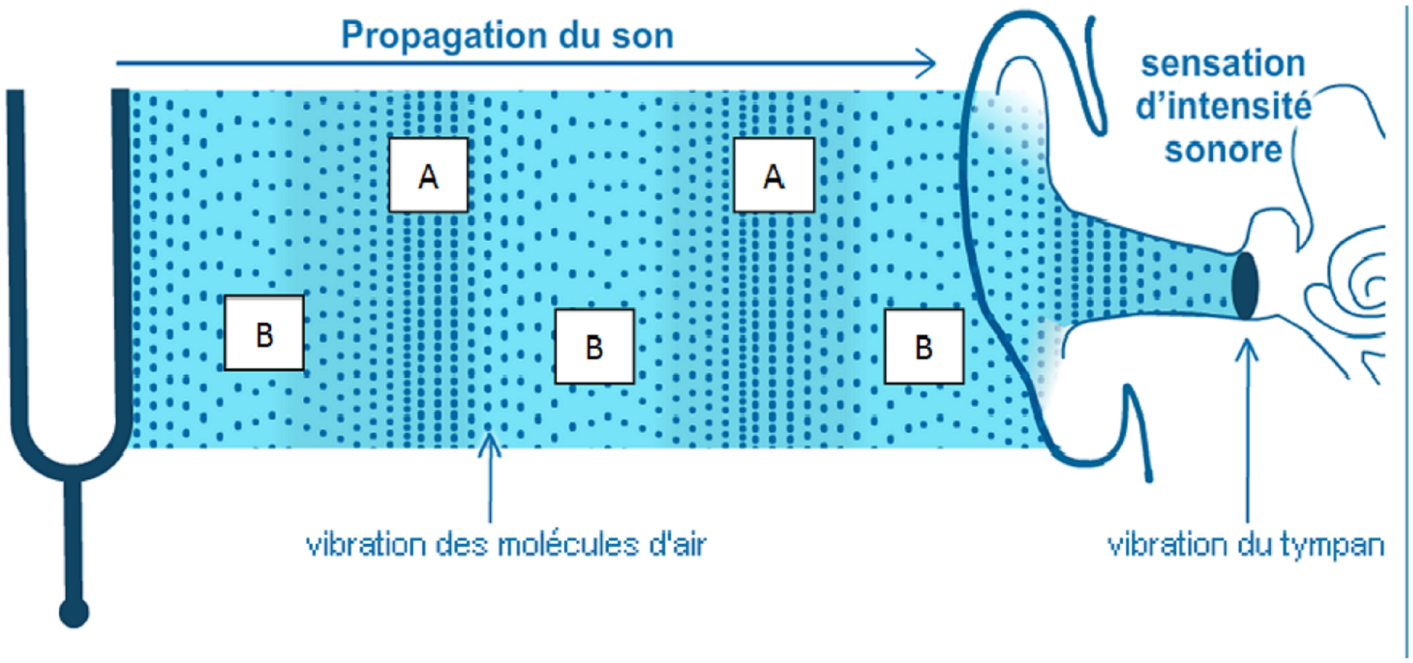


Image venant du site : bruit.seine-et-marne.fr

Musique et écoute...

Acteurs :

1. récepteur (oreille) : aspects **subjectifs** liés à l'observateur, à l'appareil de détection, etc. → **moins important ici** ;
2. source sonore/émetteur (diapason)
3. milieu de propagation déformable (air) → presque le plus important pour la physique...

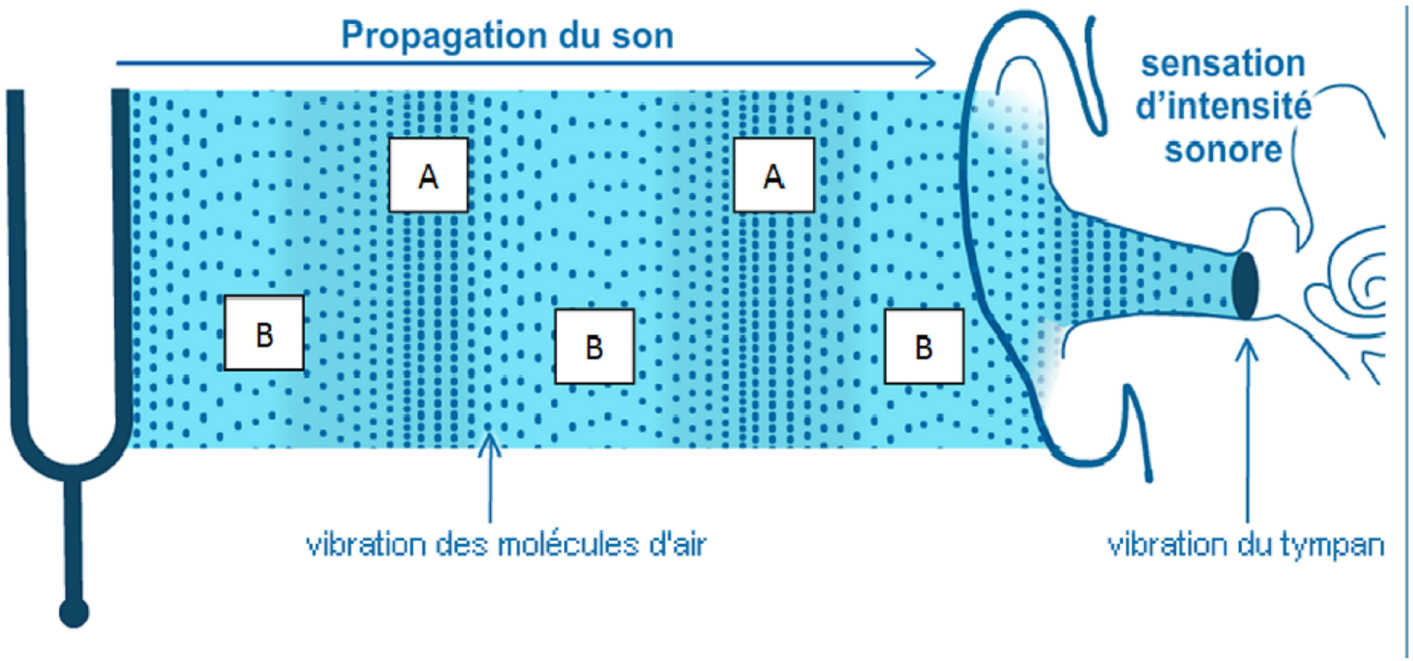


Image venant du site : bruit.seine-et-marne.fr

Musique et écoute...

Acteurs :

1. récepteur (oreille) : aspects **subjectifs** liés à l'observateur, à l'appareil de détection, etc. $\rightarrow$ **moins important ici** ;
2. source sonore/émetteur (diapason)
3. milieu de propagation déformable (air) $\rightarrow$ presque le plus important pour la physique...

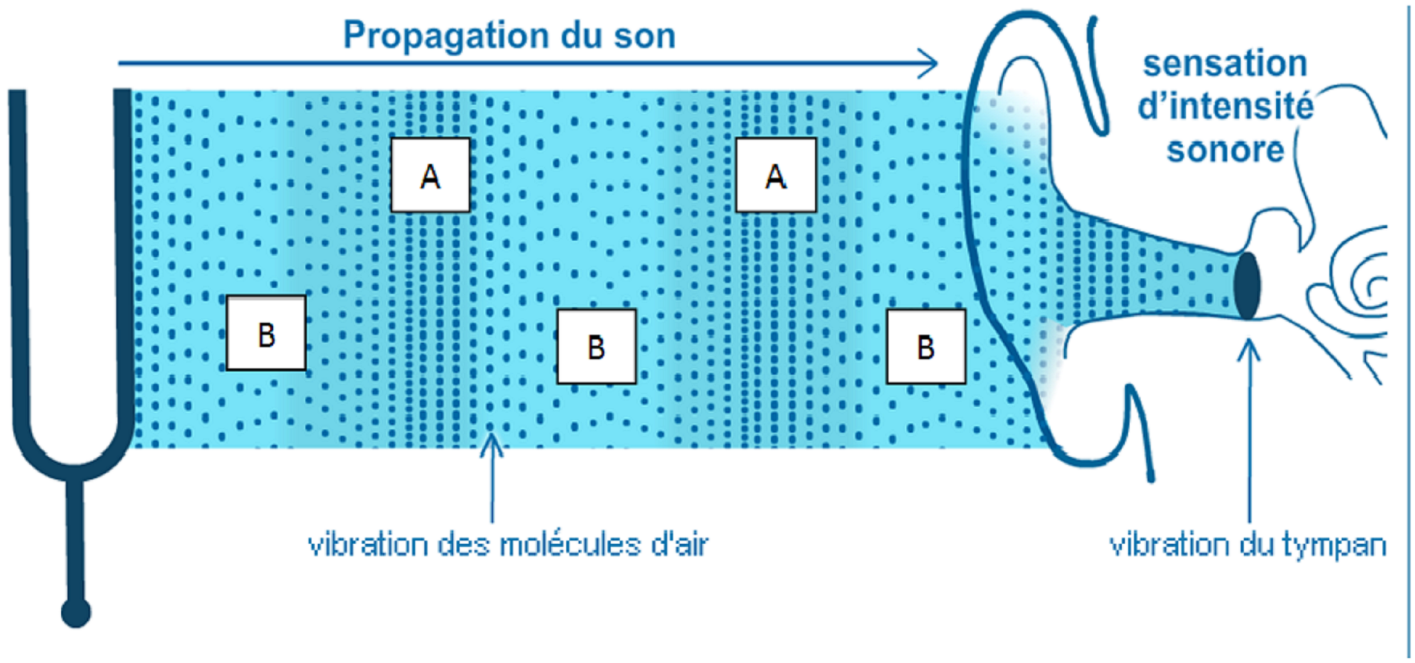


Image venant du site : bruit.seine-et-marne.fr

Musique et écoute...

Acteurs :

1. récepteur (oreille) : aspects **subjectifs** liés à l'observateur, à l'appareil de détection, etc. $\rightarrow$ **moins important ici** ;
2. source sonore/émetteur (diapason)
3. milieu de propagation déformable (air) $\rightarrow$ presque le plus important pour la physique...

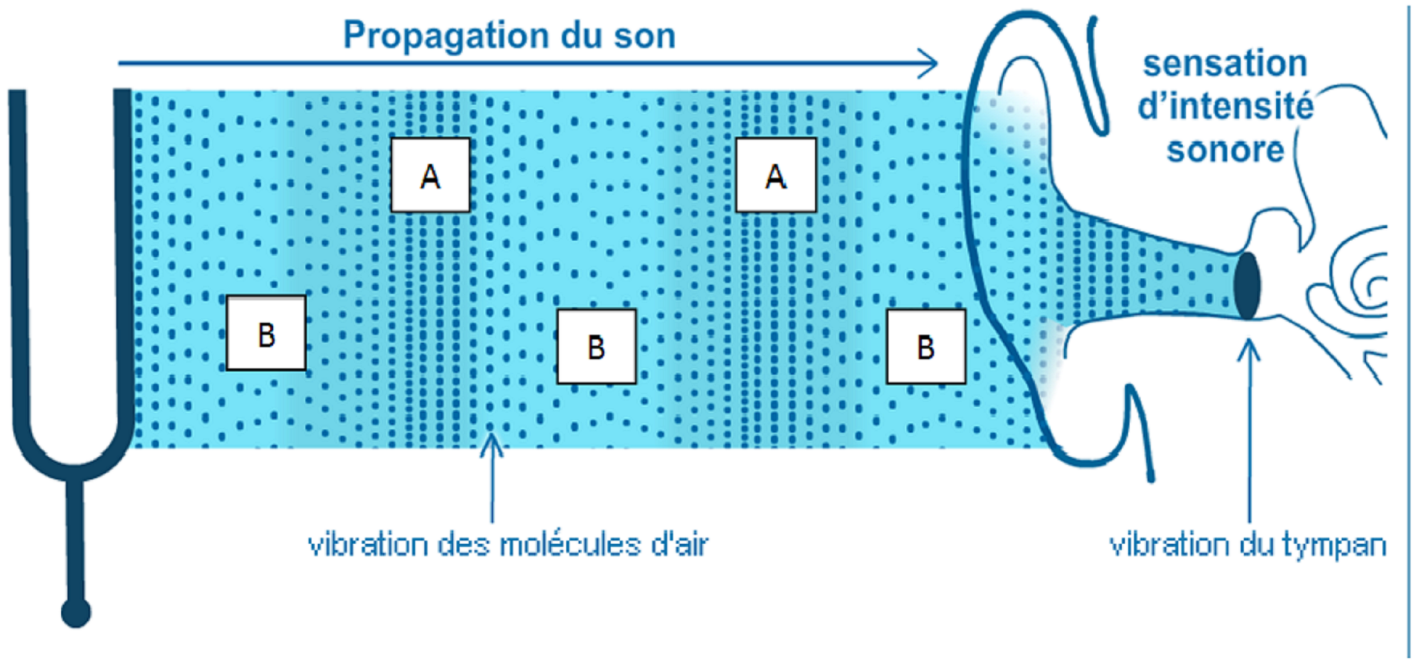


Image venant du site : bruit.seine-et-marne.fr

Musique et écoute...

Acteurs :

1. récepteur (oreille) : aspects **subjectifs** liés à l'observateur, à l'appareil de détection, etc. $\rightarrow$ **moins important ici** ;
2. source sonore/émetteur (diapason)
3. milieu de propagation déformable (air) $\rightarrow$ presque le plus important pour la physique...

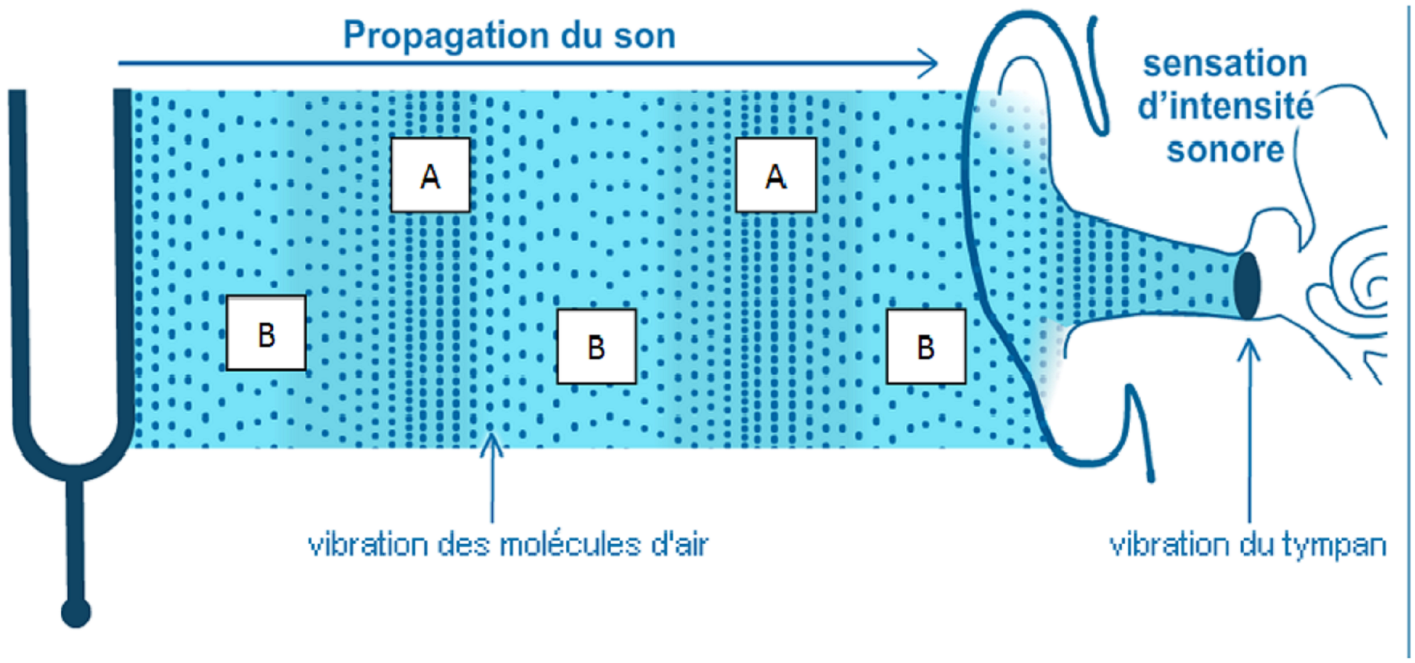


Image venant du site : bruit.seine-et-marne.fr

Musique et écoute...

Acteurs :

1. récepteur (oreille) : aspects **subjectifs** liés à l'observateur, à l'appareil de détection, etc. $\rightarrow$ **moins important ici** ;
2. source sonore/émetteur (diapason)
3. milieu de propagation déformable (air) $\rightarrow$ presque le plus important pour la physique...

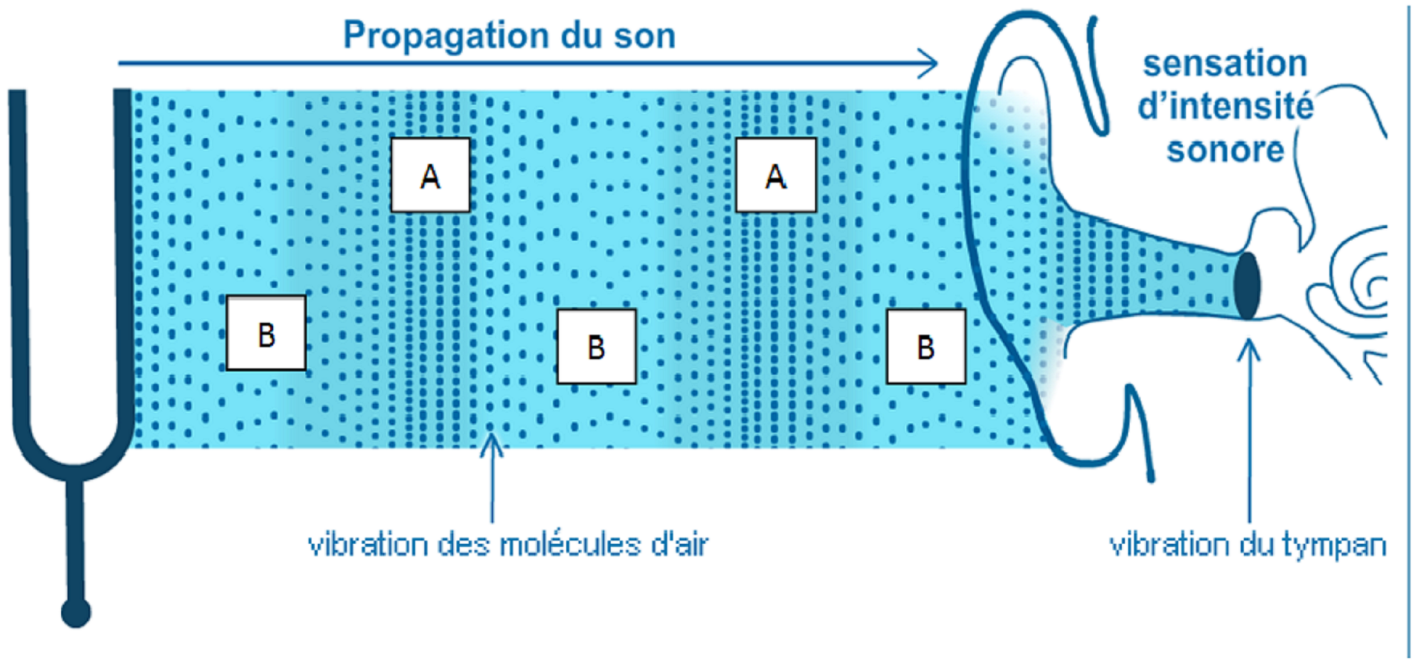
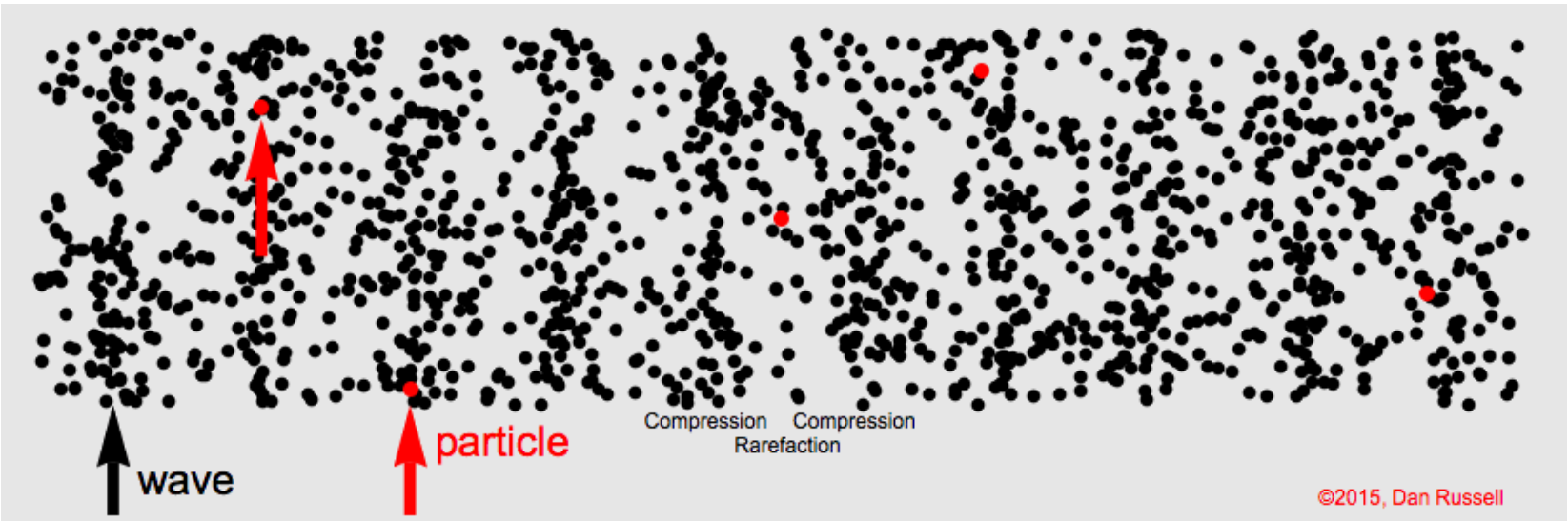


Image venant du site : bruit.seine-et-marne.fr

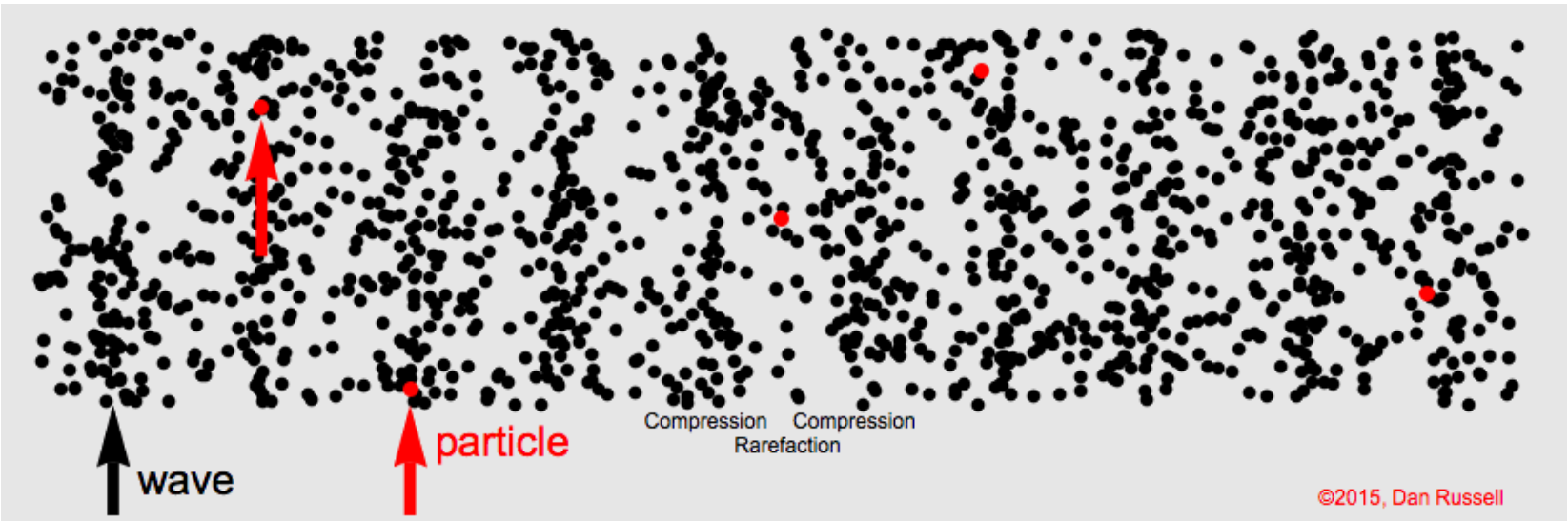
Son

- exemple d'onde de **compression**/de densité
  $\longrightarrow$ perturbation d'un **milieu déformable** dont les constituants sont **légèrement** déplacés ;
- transport d'énergie (gauche vers la droite), mais pas nécessairement de **matière** (déplacement moyen nul des particules) ;
- pas de son sans **milieu matériel**.



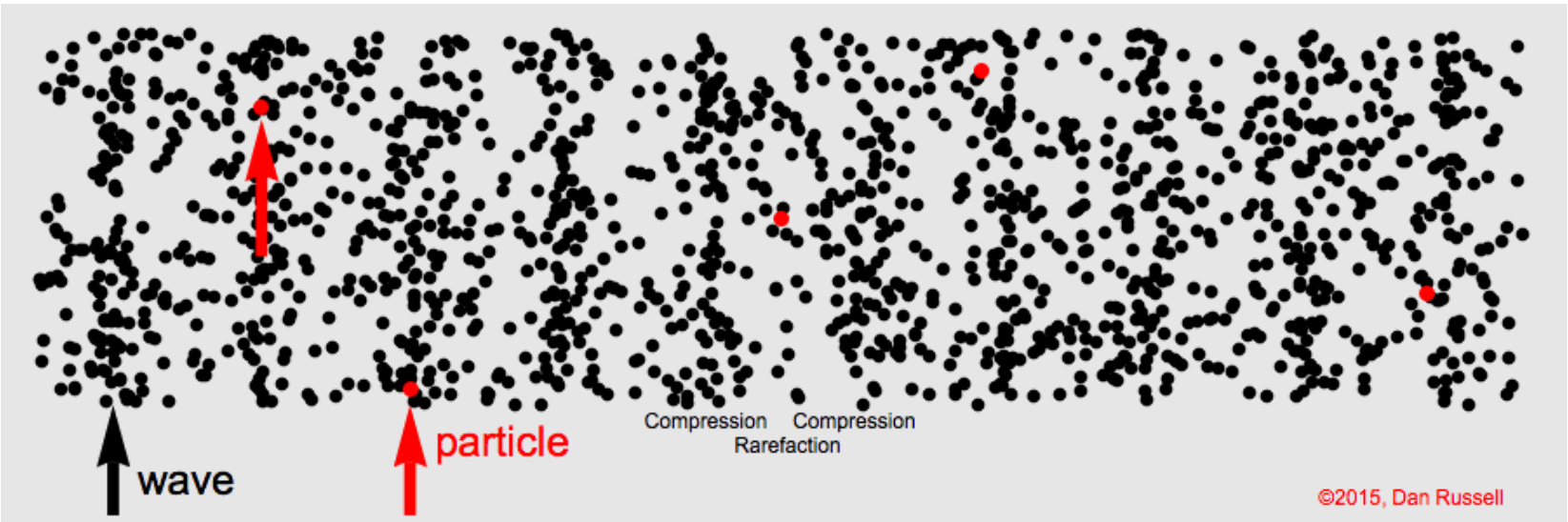
Son

- exemple d'onde de **compression**/de densité
  $\rightarrow$ perturbation d'un **milieu déformable** dont les constituants sont **légèrement** déplacés ;
- transport d'énergie (gauche vers la droite), mais pas nécessairement de **matière** (déplacement moyen nul des particules) ;
- pas de son sans **milieu matériel**.



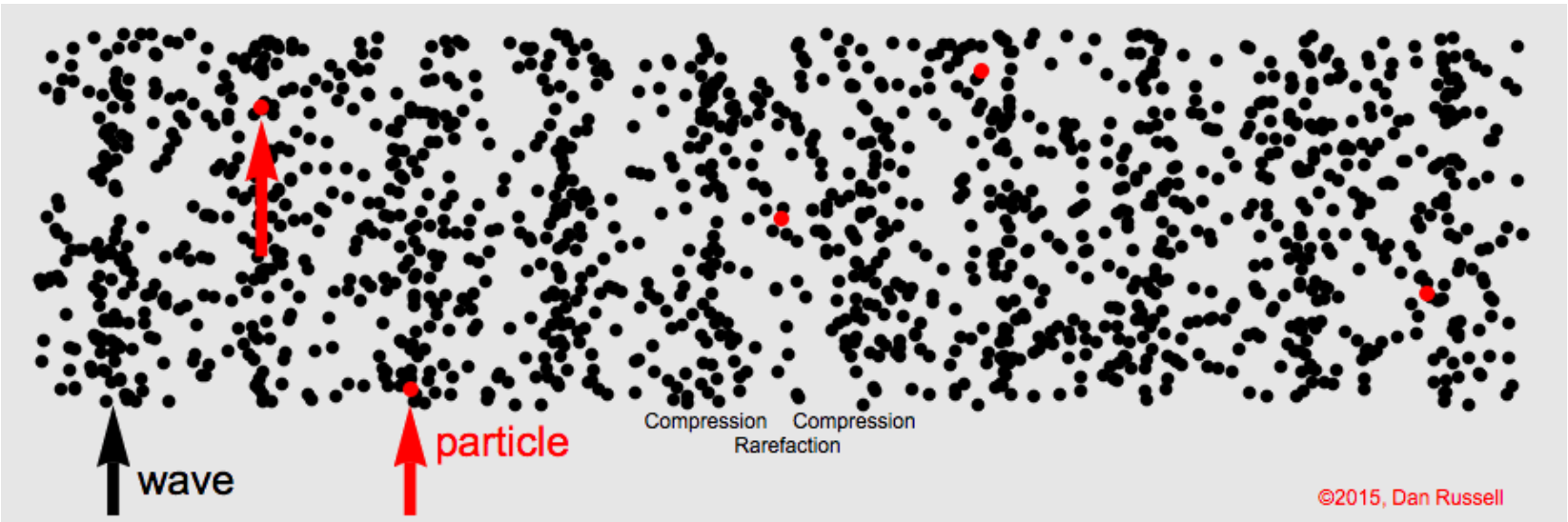
Son

- exemple d'onde de **compression**/de densité
  $\rightarrow$ perturbation d'un **milieu déformable** dont les constituants sont **légèrement** déplacés ;
- transport d'énergie (gauche vers la droite), mais pas nécessairement de **matière** (déplacement moyen nul des particules) ;
- pas de son sans **milieu matériel**.



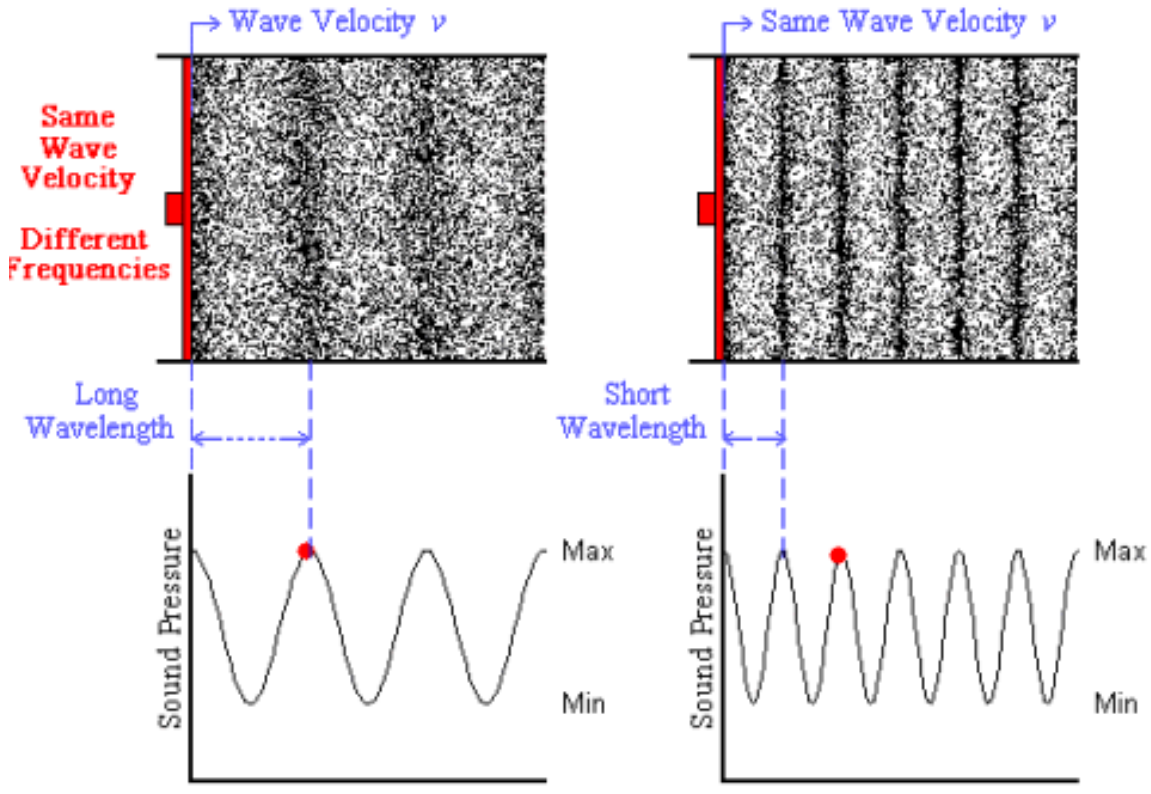
Son

- exemple d'onde de **compression**/de densité
  $\rightarrow$ perturbation d'un **milieu déformable** dont les constituants sont **légèrement** déplacés ;
- transport d'énergie (gauche vers la droite), mais pas nécessairement de **matière** (déplacement moyen nul des particules) ;
- pas de son sans **milieu matériel**.



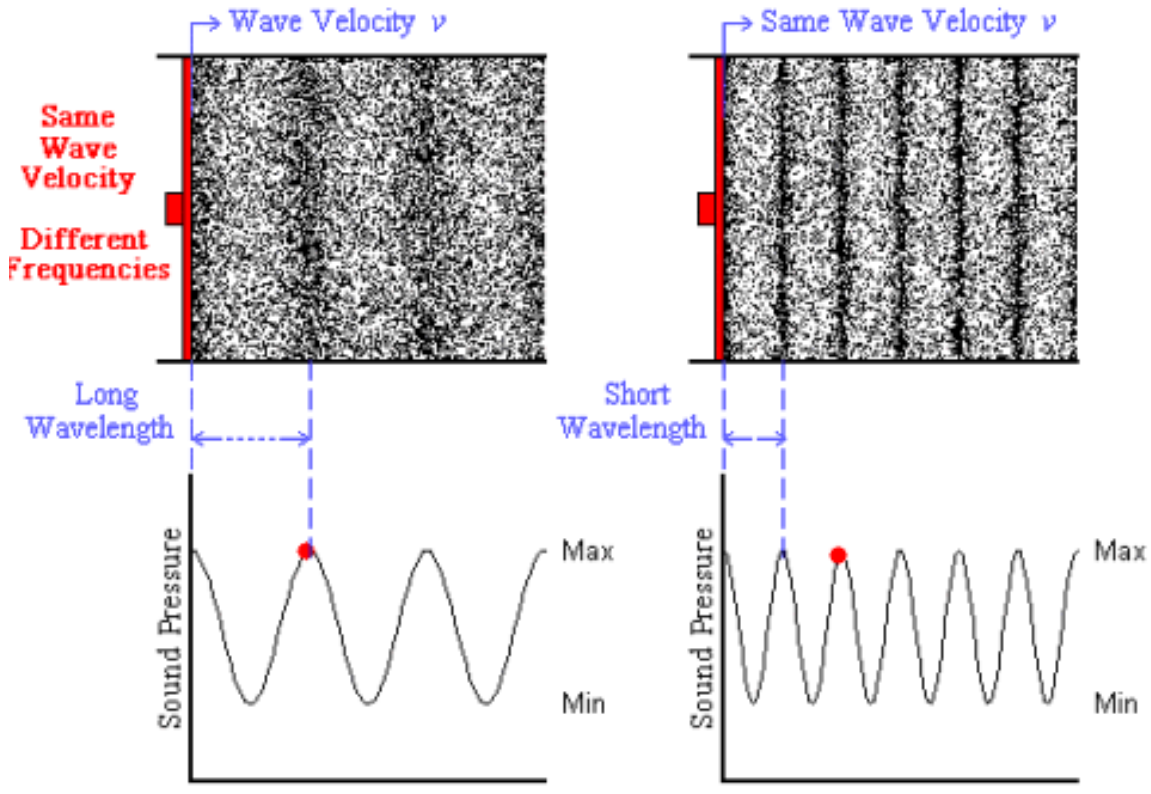
Son pur

- fréquence f = nombre de répétitions par seconde → **fréquence plus élevée** à droite (son plus **aigu**) ;
- distance entre deux maxima = longueur d'onde λ → **longueur d'onde plus petite** à droite ;
- liées par la célérité : $c = \lambda f$ → **même célérité** (son dans l'air ~ 330 m/s) ;
- **son quelconque** : mélange avec $\lambda \sim 2$ cm $- 20$ m ; $f \sim 20$ Hz $- 20$ kHz.



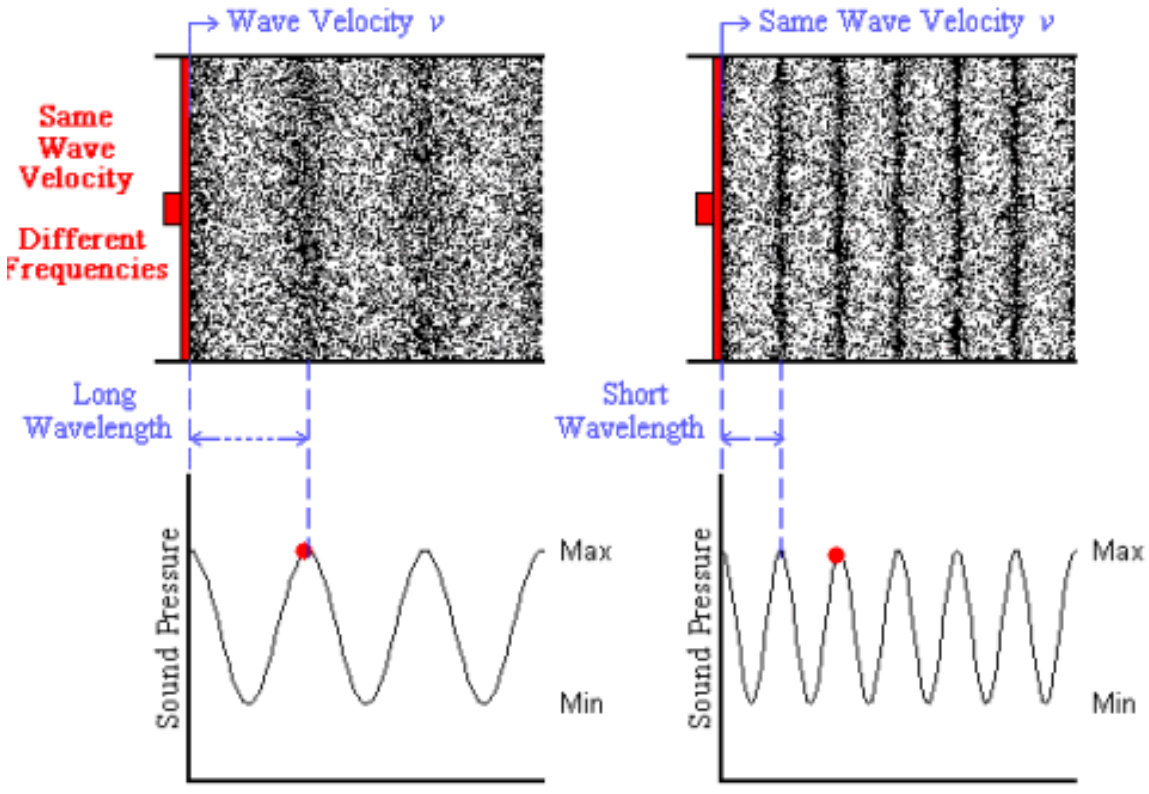
Son pur

- fréquence f = nombre de répétitions par seconde $\rightarrow$ **fréquence plus élevée** à droite (son plus **aigu**) ;
- distance entre deux maxima = longueur d'onde λ $\rightarrow$ **longueur d'onde plus petite** à droite ;
- liées par la célérité : $c = \lambda f$ $\rightarrow$ **même célérité** (son dans l'air ~ 330 m/s) ;
- **son quelconque** : mélange avec $\lambda \sim 2$ cm $-$ 20 m ; $f \sim 20$ Hz $-$ 20 kHz.



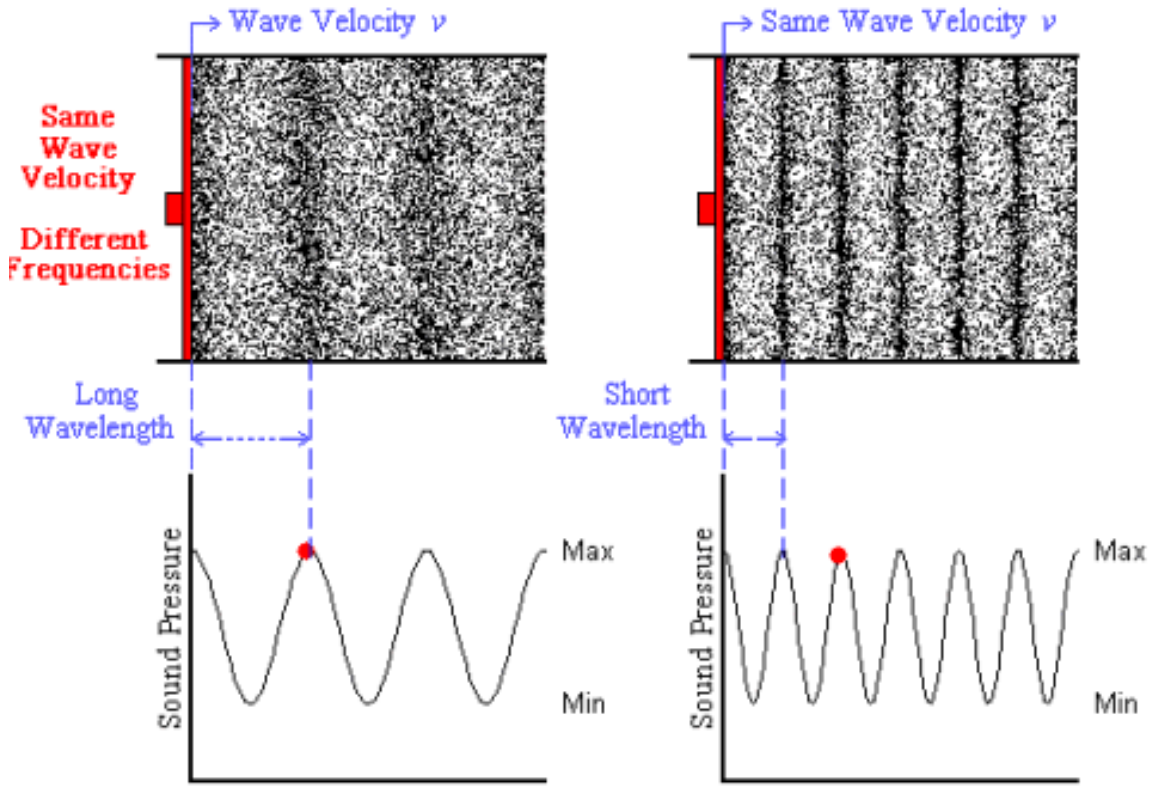
Son pur

- fréquence f = nombre de répétitions par seconde $\rightarrow$ **fréquence plus élevée** à droite (son plus **aigu**) ;
- distance entre deux maxima = longueur d'onde λ $\rightarrow$ **longueur d'onde plus petite** à droite ;
- liées par la célérité : $c = \lambda f$ $\rightarrow$ **même célérité** (son dans l'air ~ 330 m/s) ;
- **son quelconque** : mélange avec $\lambda \sim 2$ cm $-$ 20 m ; $f \sim 20$ Hz $-$ 20 kHz.



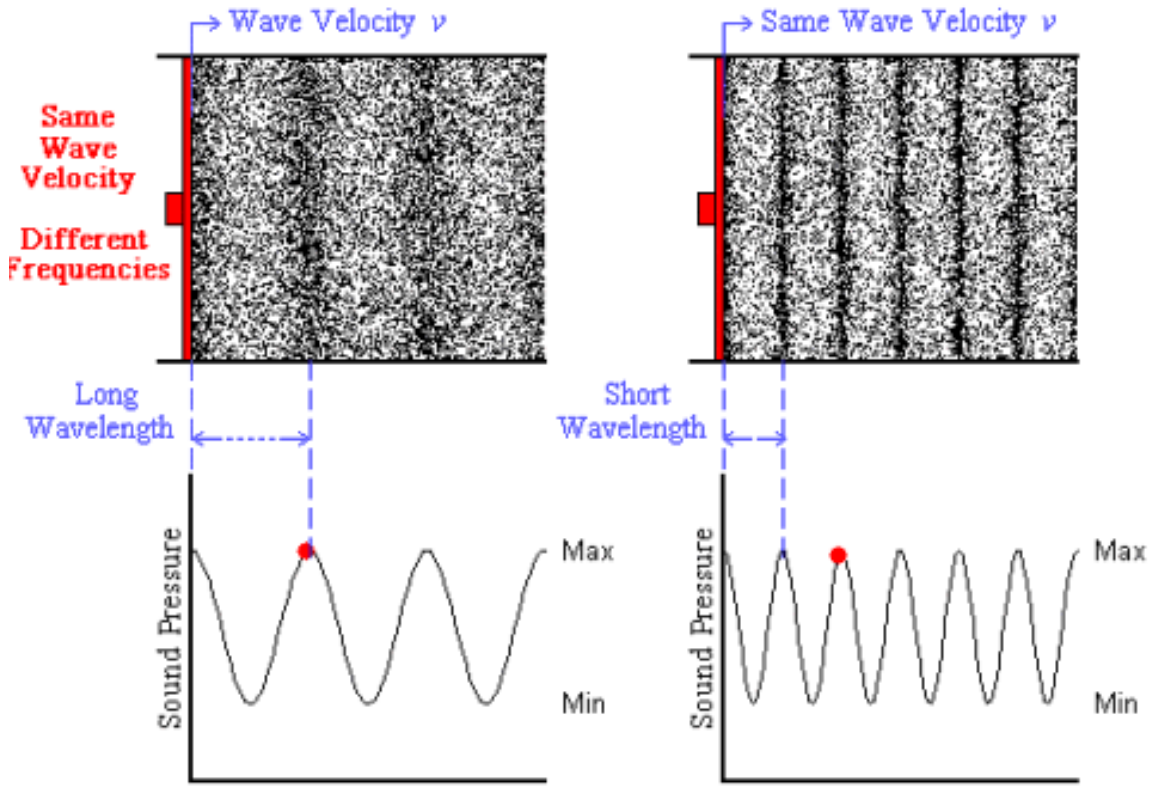
Son pur

- fréquence f = nombre de répétitions par seconde $\rightarrow$ **fréquence plus élevée** à droite (son plus **aigu**) ;
- distance entre deux maxima = longueur d'onde λ $\rightarrow$ **longueur d'onde plus petite** à droite ;
- liées par la célérité : $c = \lambda f$ $\rightarrow$ **même célérité** (son dans l'air ~ 330 m/s) ;
- **son quelconque** : mélange avec $\lambda \sim 2$ cm $-$ 20 m ; $f \sim 20$ Hz $-$ 20 kHz.



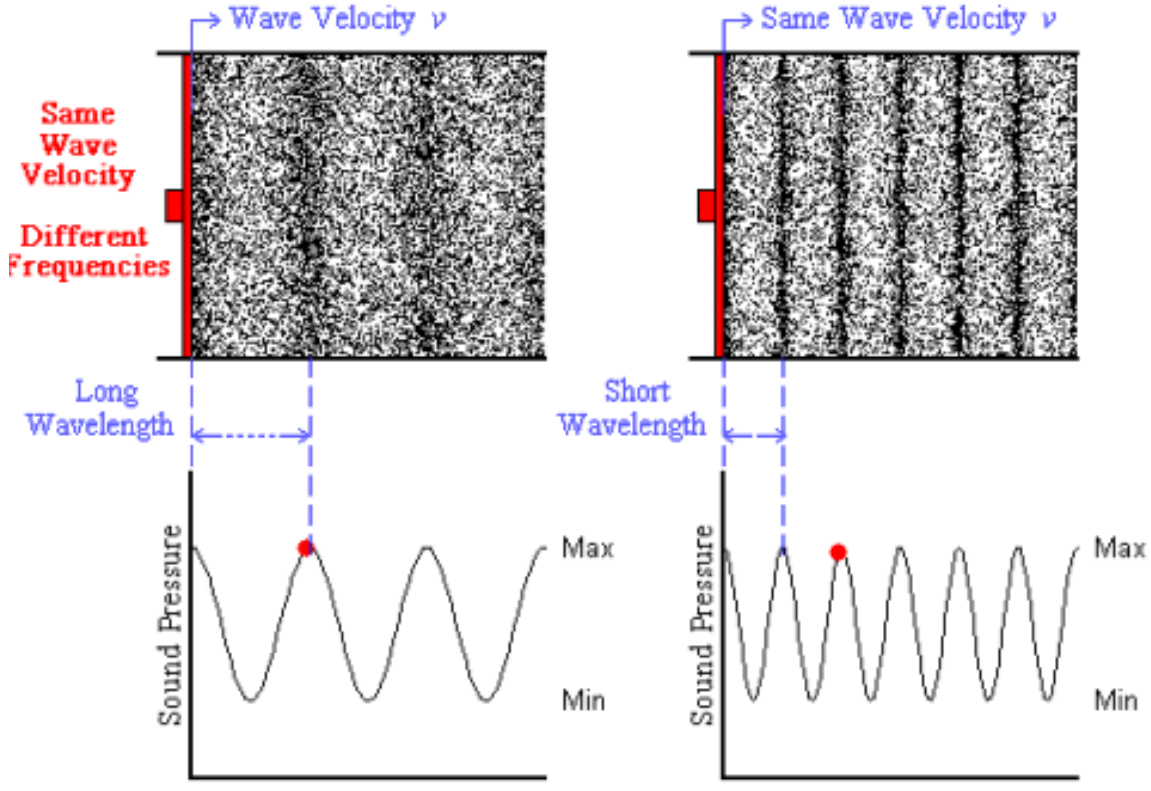
Son pur

- fréquence f = nombre de répétitions par seconde $\rightarrow$ **fréquence plus élevée** à droite (son plus **aigu**) ;
- distance entre deux maxima = longueur d'onde λ $\rightarrow$ **longueur d'onde plus petite** à droite ;
- liées par la célérité : $c = \lambda f$ $\rightarrow$ **même célérité** (son dans l'air ~ 330 m/s) ;
- **son quelconque** : mélange avec $\lambda \sim 2$ cm $-$ 20 m ; $f \sim 20$ Hz $-$ 20 kHz.



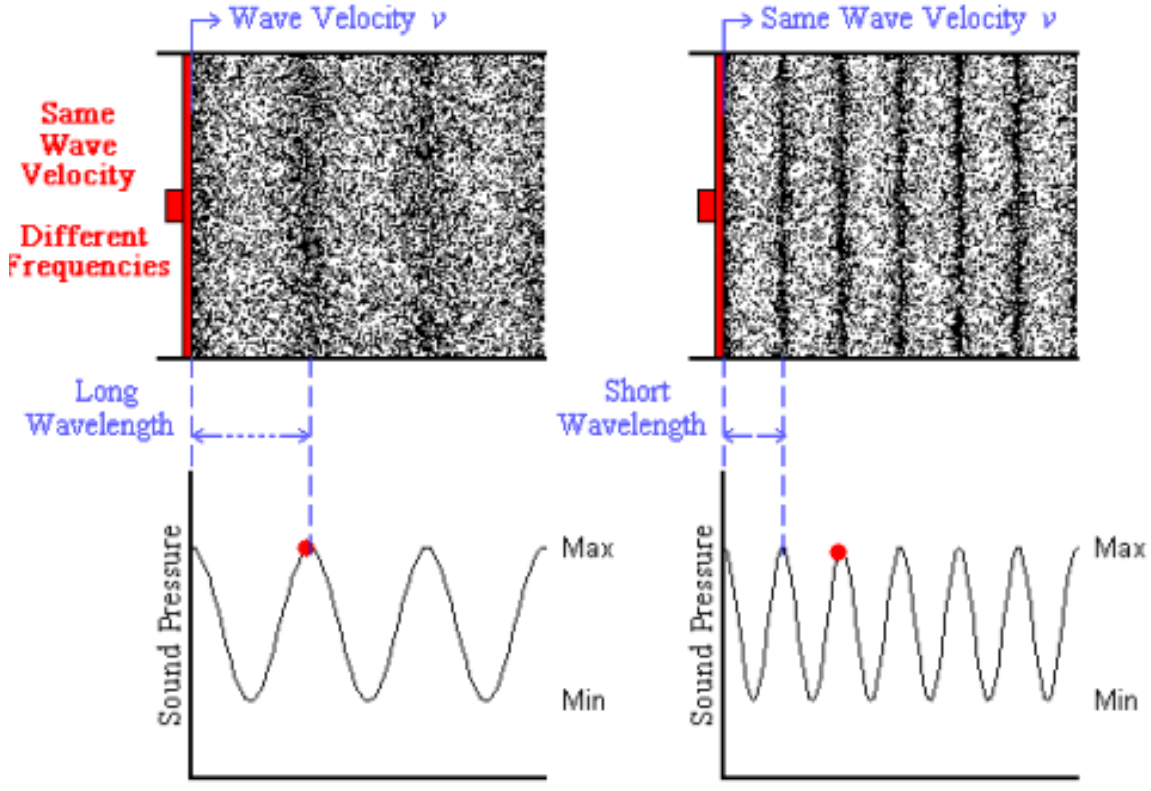
Son pur

- fréquence f = nombre de répétitions par seconde $\rightarrow$ **fréquence plus élevée** à droite (son plus **aigu**) ;
- distance entre deux maxima = longueur d'onde λ $\rightarrow$ **longueur d'onde plus petite** à droite ;
- liées par la célérité : $c = \lambda f$ $\rightarrow$ **même célérité** (son dans l'air $\sim$ 330 m/s) ;
- **son quelconque** : mélange avec $\lambda \sim 2$ cm $-$ 20 m ; $f \sim 20$ Hz $-$ 20 kHz.



Son pur

- fréquence f = nombre de répétitions par seconde $\rightarrow$ **fréquence plus élevée** à droite (son plus **aigu**) ;
- distance entre deux maxima = longueur d'onde λ $\rightarrow$ **longueur d'onde plus petite** à droite ;
- liées par la célérité : $c = \lambda f$ $\rightarrow$ **même célérité** (son dans l'air ~ 330 m/s) ;
- **son quelconque** : mélange avec $\lambda \sim 2$ cm $- 20$ m ; $f \sim 20$ Hz $- 20$ kHz.



... de l'Univers ?

- l'Univers : tout ce qui existe...
- **caractéristique** : matière concentrée en planètes, étoiles, etc., séparées par du **vide** (moins d'un atome par mètre cube en moyenne)...



... de l'Univers ?

- l'Univers : tout ce qui existe...
- **caractéristique** : matière concentrée en planètes, étoiles, etc., séparées par du **vide** (moins d'un atome par mètre cube en moyenne)...



... de l'Univers ?

- l'Univers : tout ce qui existe...
- **caractéristique** : matière concentrée en planètes, étoiles, etc., séparées par du **vide** (moins d'un atome par mètre cube en moyenne)...





« **Dans l'espace, personne ne vous entendra crier...** » (*Alien*)

→ pas (vraiment) de son dans l'Univers...



« **Dans l'espace, personne ne vous entendra crier...** » (*Alien*)

→ pas (vraiment) de son dans l'Univers...



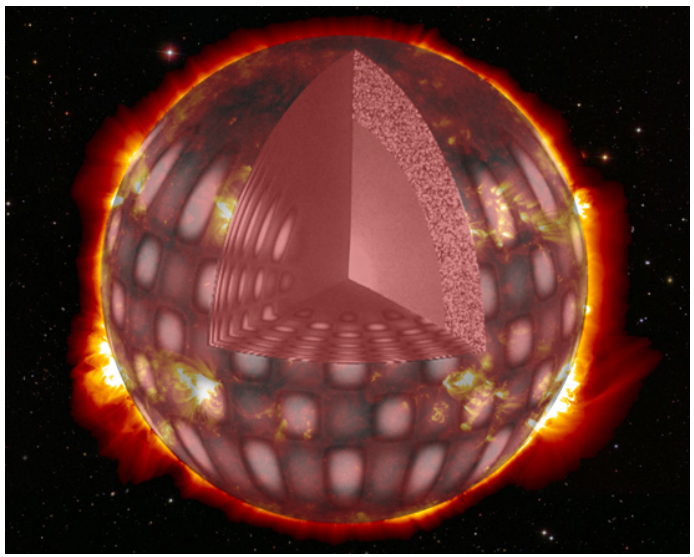
...mais on peut vous voir crier (image issue de *Psycho*).

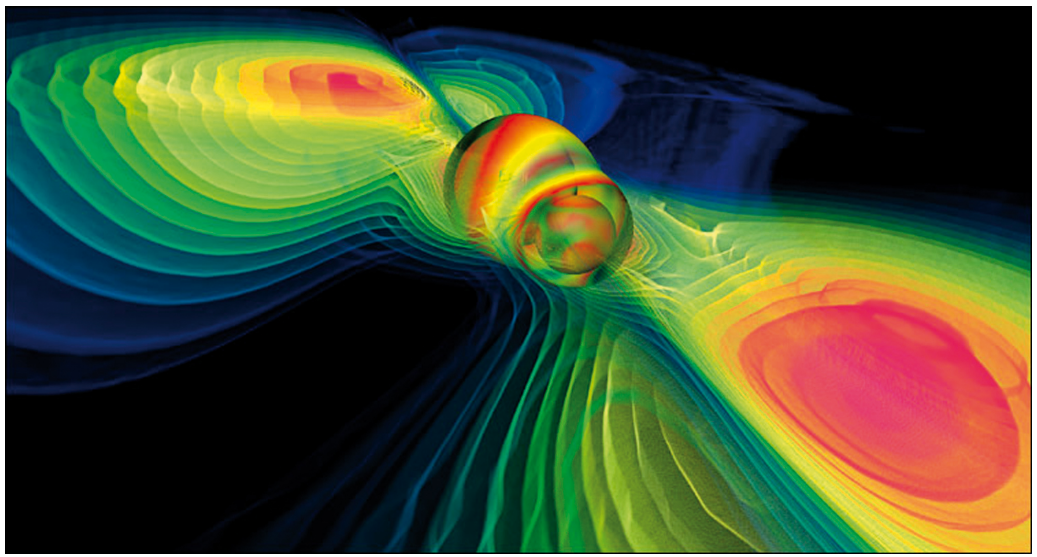


...mais on peut vous voir crier (image issue de *Psycho*).

Cette conférence

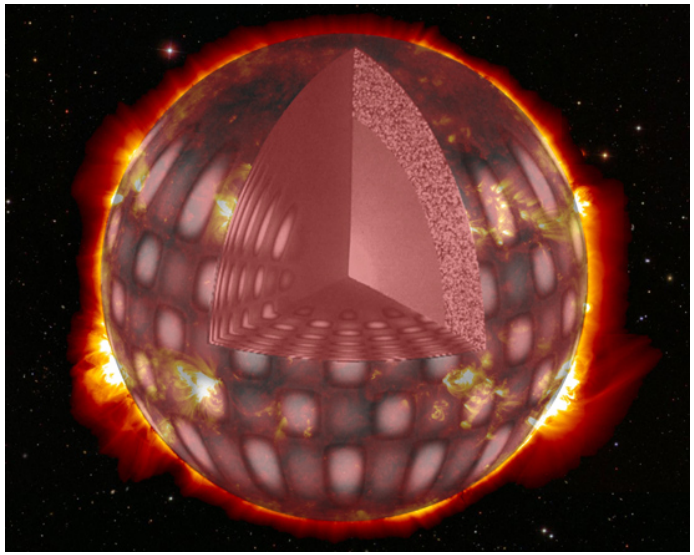
- exemples d'ondes/d'oscillations analogues aux ondes sonores dans divers « objets » astrophysiques ou cosmologiques (longueurs d'onde, célérité, etc., variables)... → **observées grâce à la « lumière »** ;
- ondes gravitationnelles : **vibrations de l'espace** détectées pour la première fois en **septembre 2015** ;
- **principe général** : décomposer un « **son** » en « **notes élémentaires** » qui caractérisent la source et/ou le milieu.

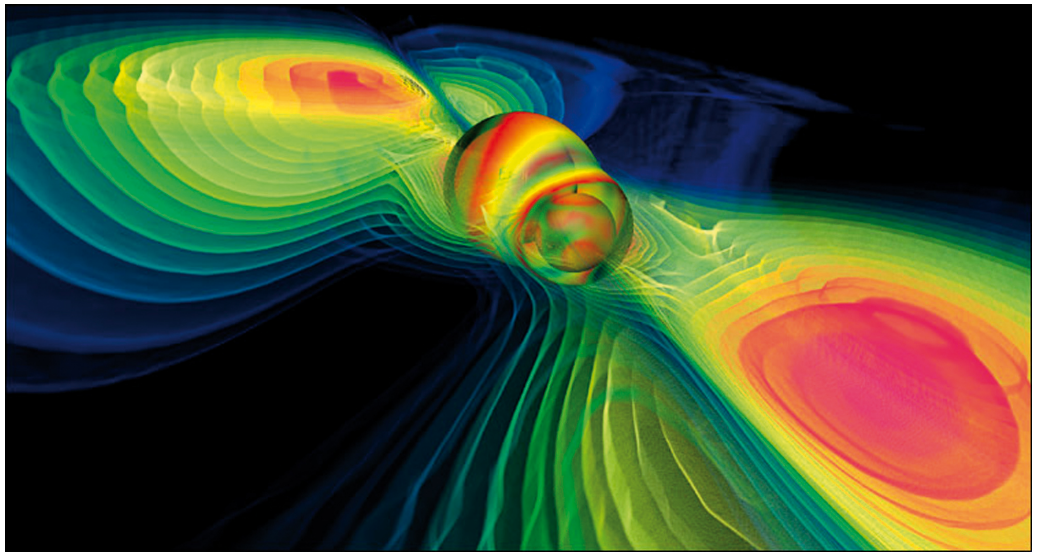




Cette conférence

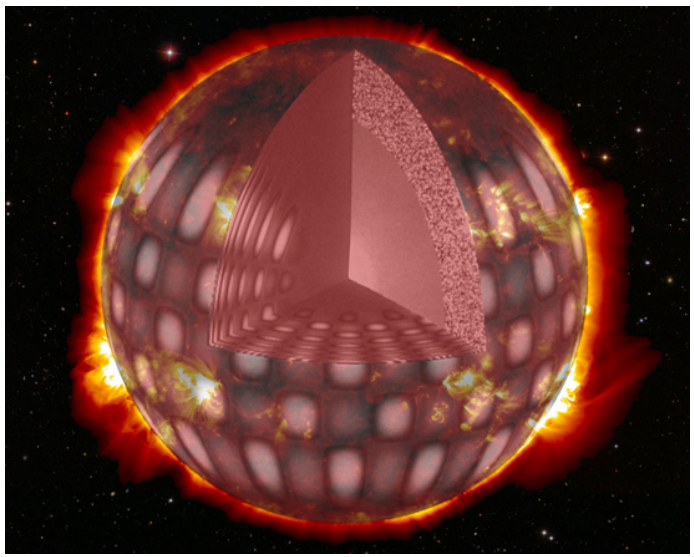
- exemples d'ondes/d'oscillations analogues aux ondes sonores dans divers « objets » astrophysiques ou cosmologiques (longueurs d'onde, célérité, etc., variables)... → **observées grâce à la « lumière »** ;
- **ondes gravitationnelles** : **vibrations de l'espace** détectées pour la première fois en **septembre 2015** ;
- **principe général** : décomposer un « **son** » en « **notes élémentaires** » qui caractérisent la source et/ou le milieu.

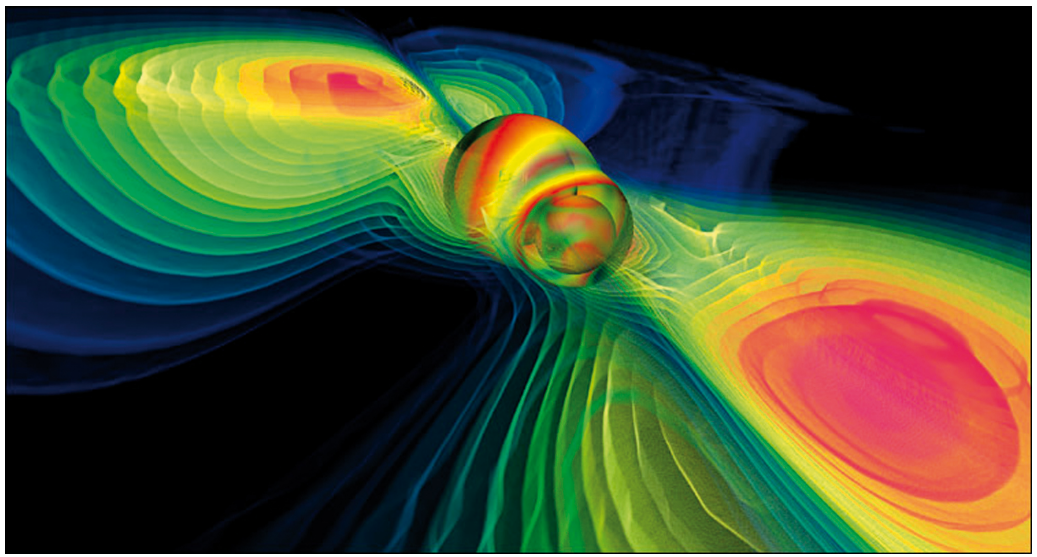




Cette conférence

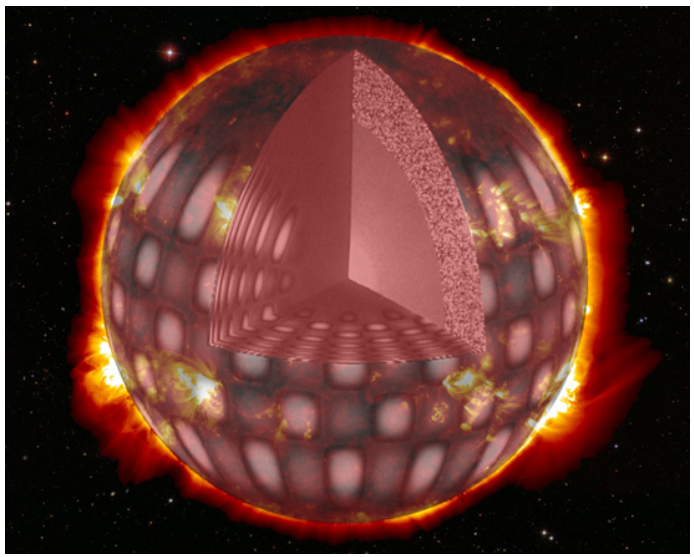
- exemples d'ondes/d'oscillations analogues aux ondes sonores dans divers « objets » astrophysiques ou cosmologiques (longueurs d'onde, célérité, etc., variables)... → **observées grâce à la « lumière »** ;
- ondes gravitationnelles : **vibrations de l'espace** détectées pour la première fois en **septembre 2015** ;
- **principe général** : décomposer un « **son** » en « **notes élémentaires** » qui caractérisent la source et/ou le milieu.

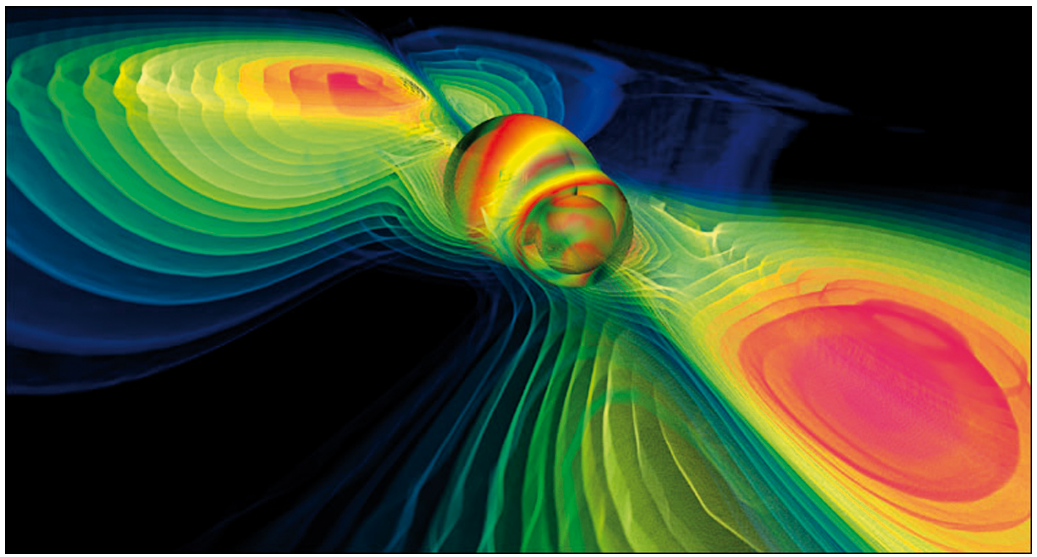




Cette conférence

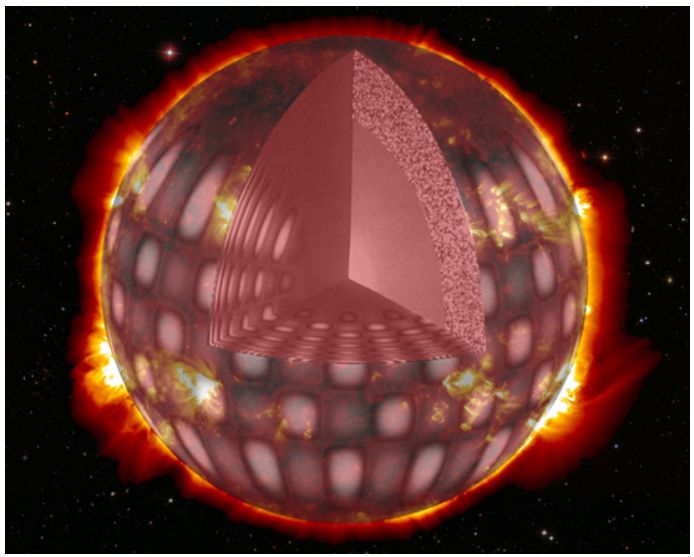
- exemples d'ondes/d'oscillations analogues aux ondes sonores dans divers « objets » astrophysiques ou cosmologiques (longueurs d'onde, célérité, etc., variables)... → **observées grâce à la « lumière »** ;
- ondes gravitationnelles : **vibrations de l'espace** détectées pour la première fois en **septembre 2015** ;
- **principe général** : décomposer un « **son** » en « **notes élémentaires** » qui caractérisent la source et/ou le milieu.

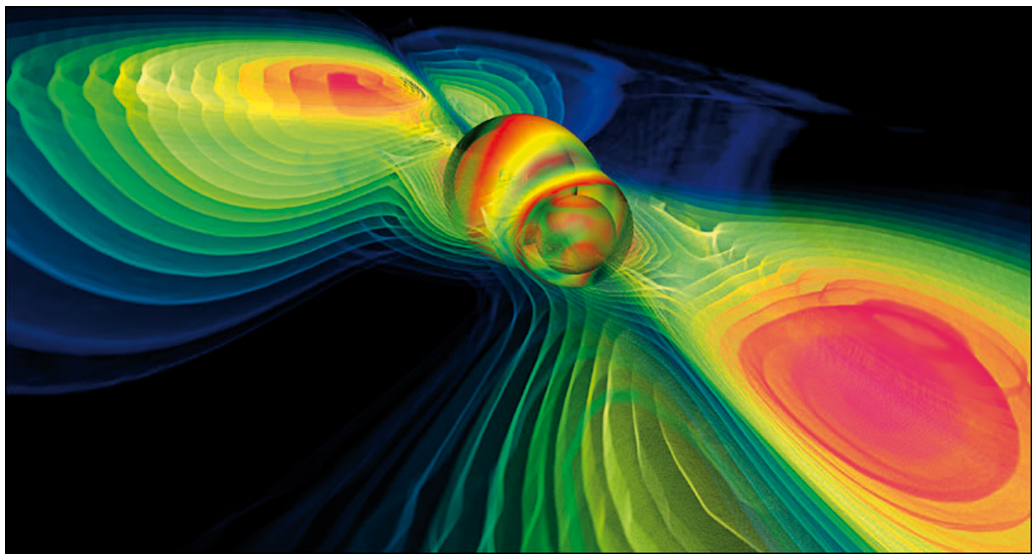




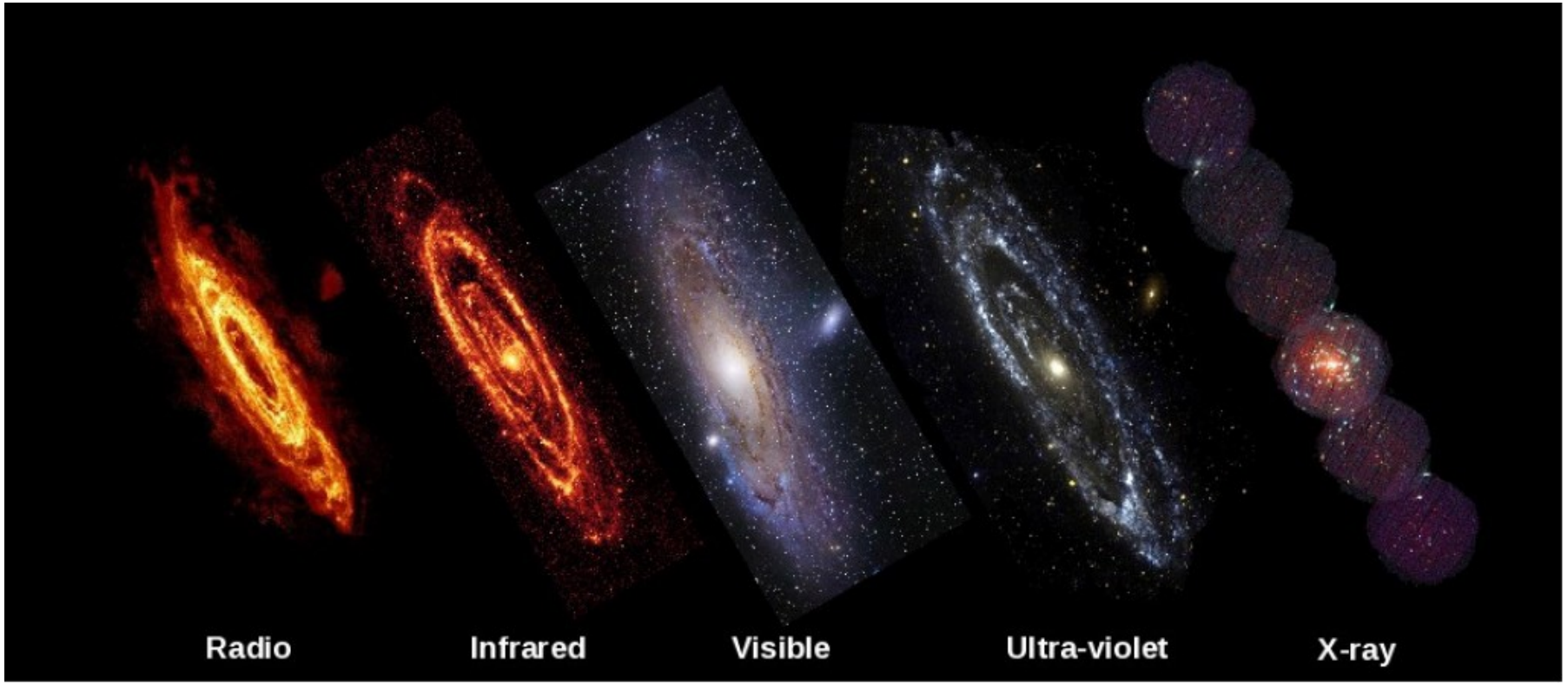
Cette conférence

- exemples d'ondes/d'oscillations analogues aux ondes sonores dans divers « objets » astrophysiques ou cosmologiques (longueurs d'onde, célérité, etc., variables)... $\rightarrow$ **observées grâce à la « lumière »** ;
- ondes gravitationnelles : **vibrations de l'espace** détectées pour la première fois en **septembre 2015** ;
- **principe général** : décomposer un « **son** » en « **notes élémentaires** » qui caractérisent la source et/ou le milieu.





Exemple de thème pas abordé : **images visible et invisible**...



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

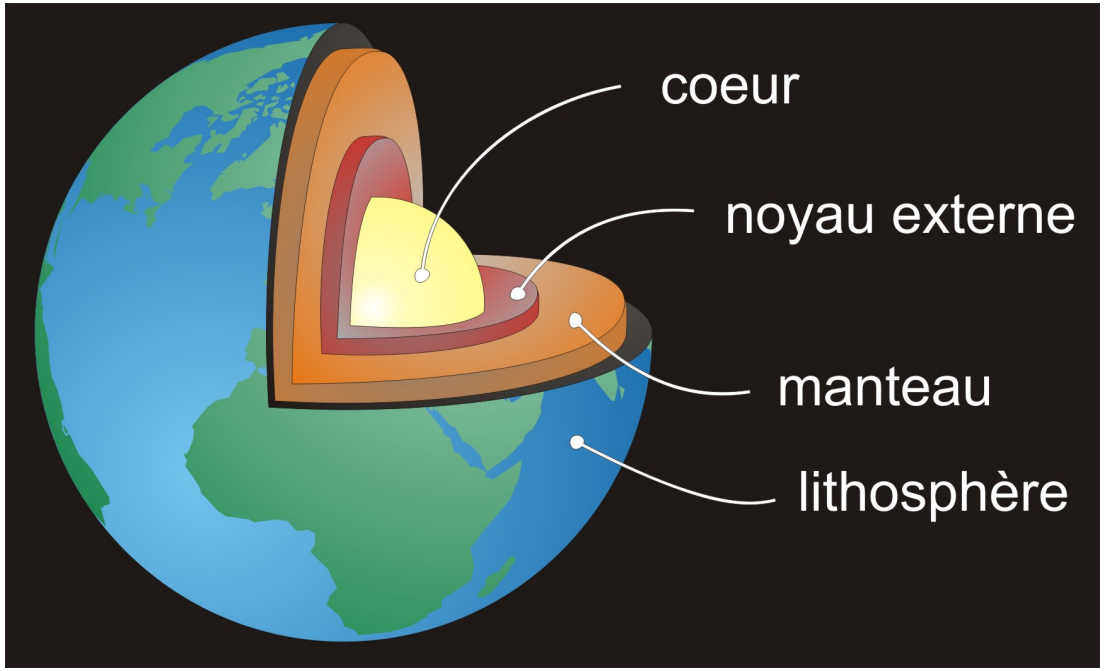
1

À l'échelle des planètes



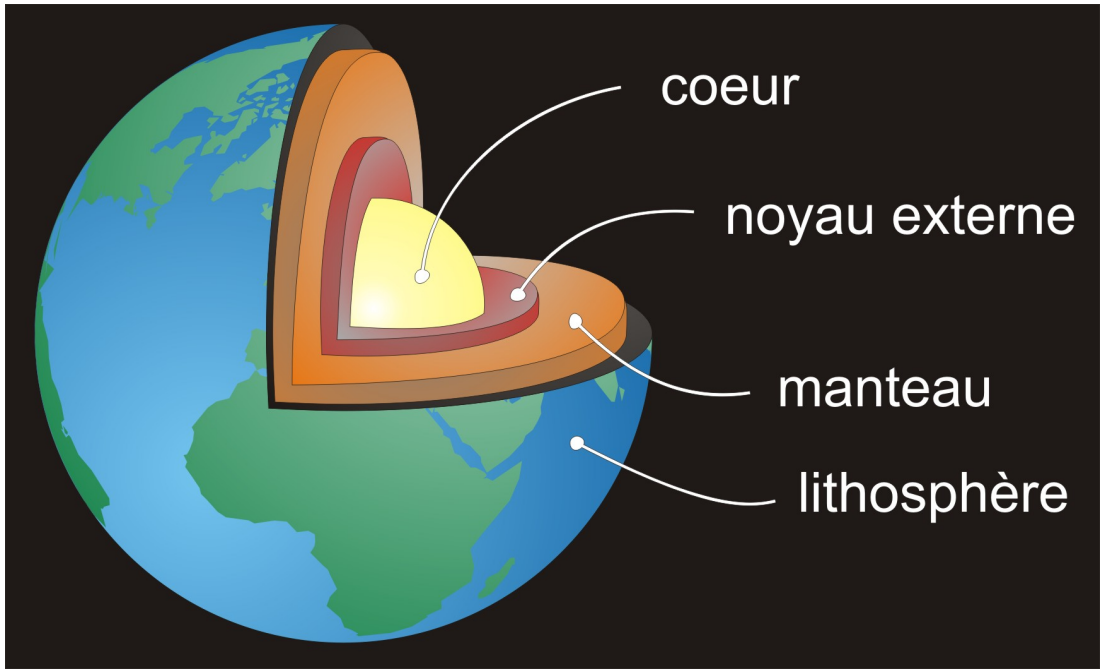
Structure interne de la Terre

- Terre : écorce (rigide) sur manteau (solide visqueux) entourant le noyau externe (liquide) et le cœur (solide) ;
- **rayon $\sim$ 6400 km** ; forages : $\sim$ 12 km de profondeur ;
- connaissances acquises par « **écoute** » **des ondes sismiques**.



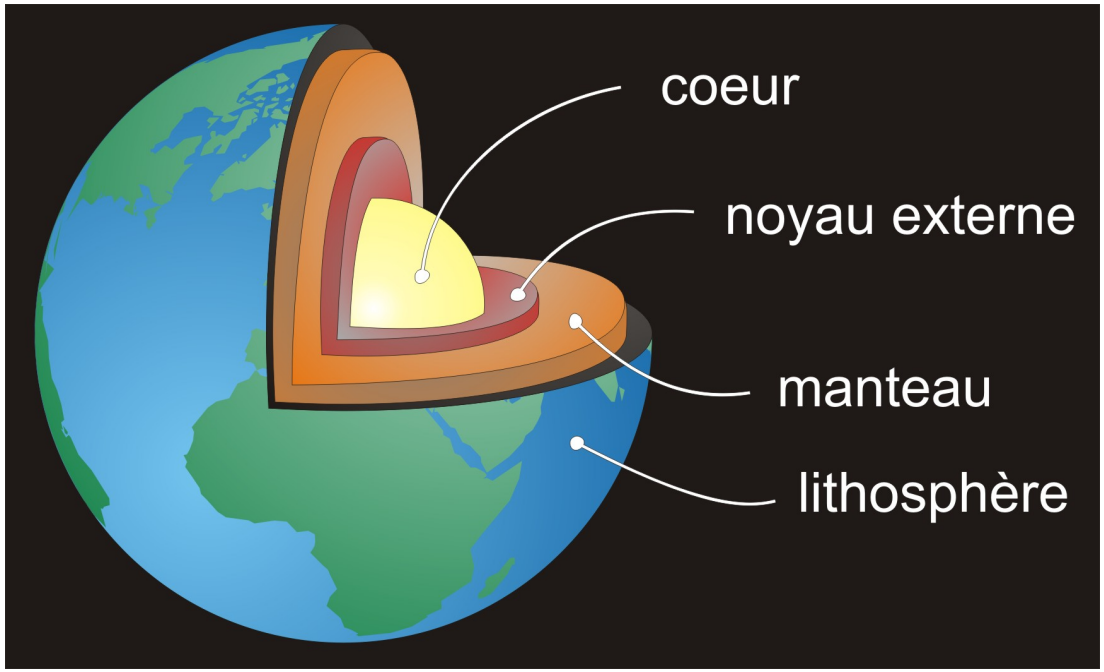
Structure interne de la Terre

- Terre : écorce (rigide) sur manteau (solide visqueux) entourant le noyau externe (liquide) et le cœur (solide) ;
- **rayon** $\sim$ **6400 km** ; forages : $\sim$ 12 km de profondeur ;
- connaissances acquises par « **écoute** » **des ondes sismiques**.



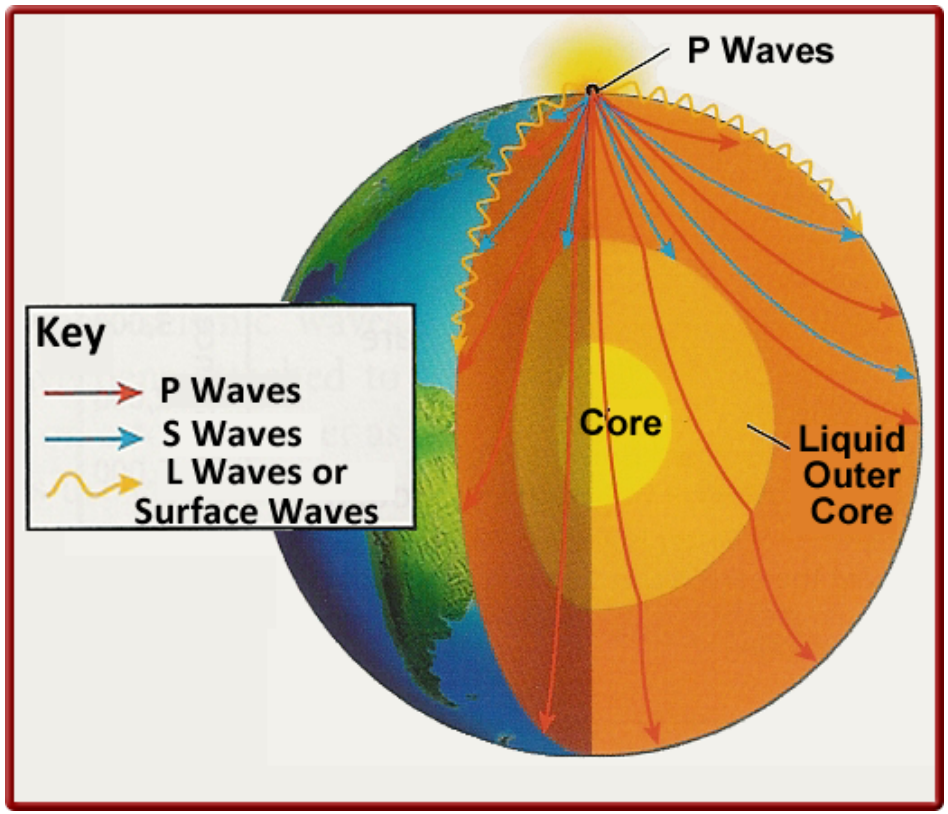
Structure interne de la Terre

- Terre : écorce (rigide) sur manteau (solide visqueux) entourant le noyau externe (liquide) et le cœur (solide) ;
- **rayon** $\sim$ **6400 km** ; forages : $\sim$ 12 km de profondeur ;
- connaissances acquises par **« écoute » des ondes sismiques**.



Ondes sismiques terrestres

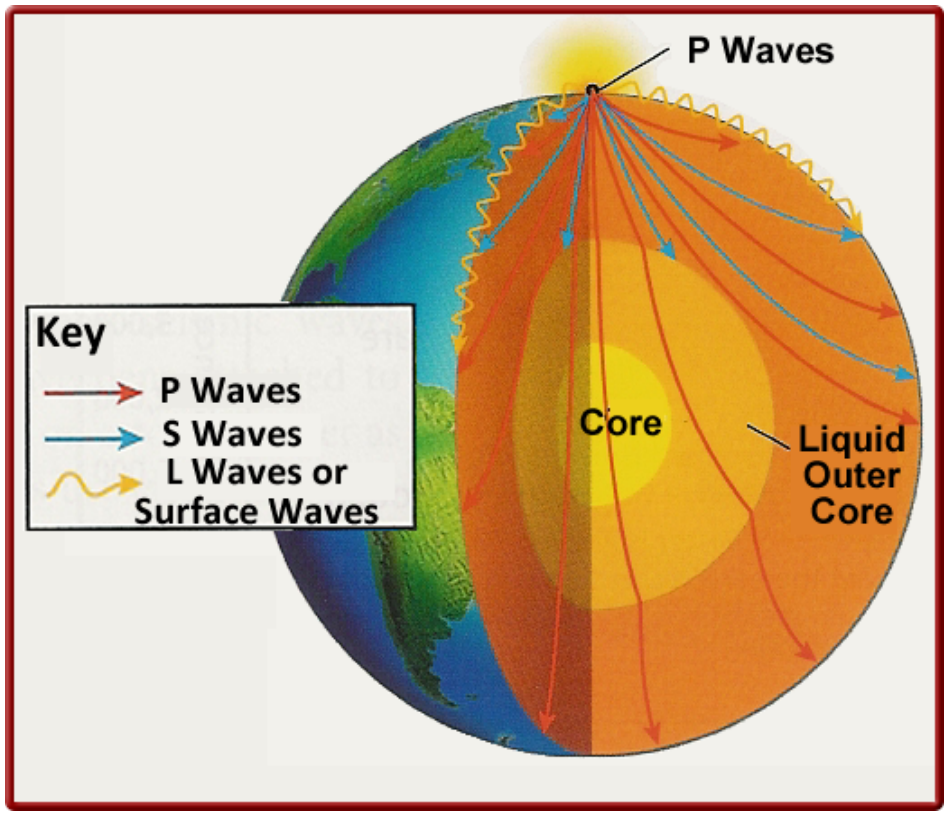
- $f \sim 0,1 - 10$ Hz ; $\lambda \sim 600\ \mathrm{m} - 60$ km ; $c \sim 2 - 10$ km/s ;
- ondes P(rimaires) $\sim$ son (longitudinales) $\rightarrow$ dans les solides ou les fluides ;
- ondes S(econdaires) $\neq$ son (transverses) $\rightarrow$ pas dans les liquides ;
- ondes de surface aussi ($\sim$ vagues).



$\rightarrow$ plusieurs **vagues**

Ondes sismiques terrestres

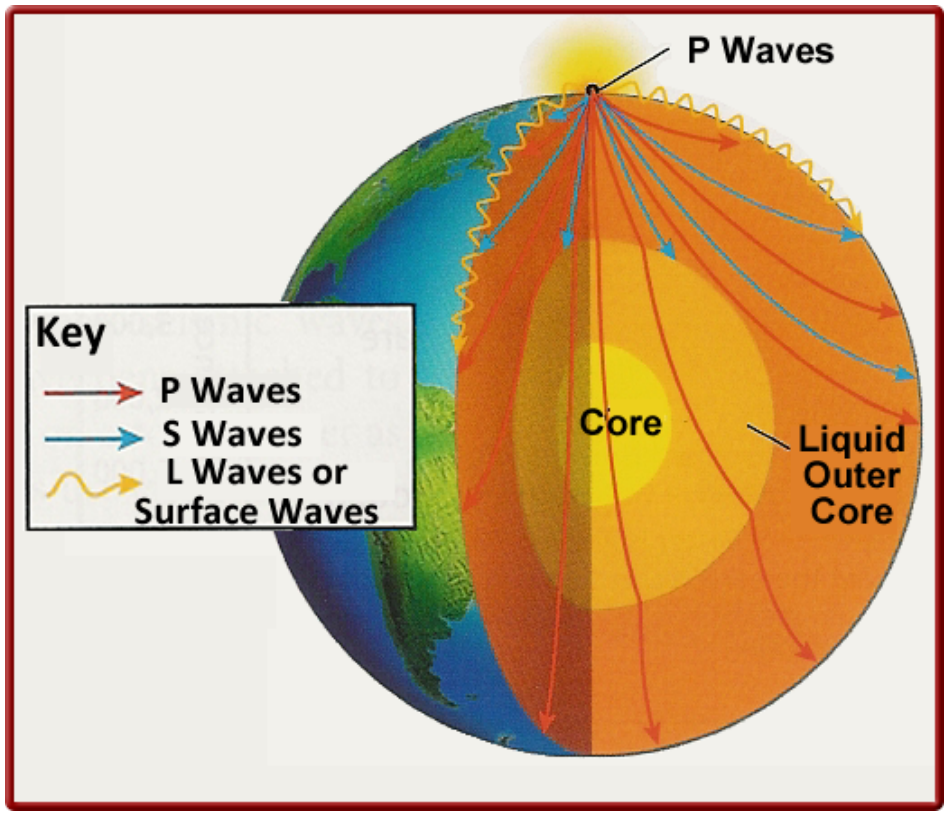
- $f \sim 0,1 - 10$ Hz ; $\lambda \sim 600\ \mathrm{m} - 60$ km ; $c \sim 2 - 10$ km/s ;
- ondes P(rimaires) $\sim$ son (longitudinales) $\rightarrow$ dans les solides ou les fluides ;
- ondes S(econdaires) $\neq$ son (transverses) $\rightarrow$ pas dans les liquides ;
- ondes de surface aussi ($\sim$ vagues).



$\rightarrow$ plusieurs **vagues**

Ondes sismiques terrestres

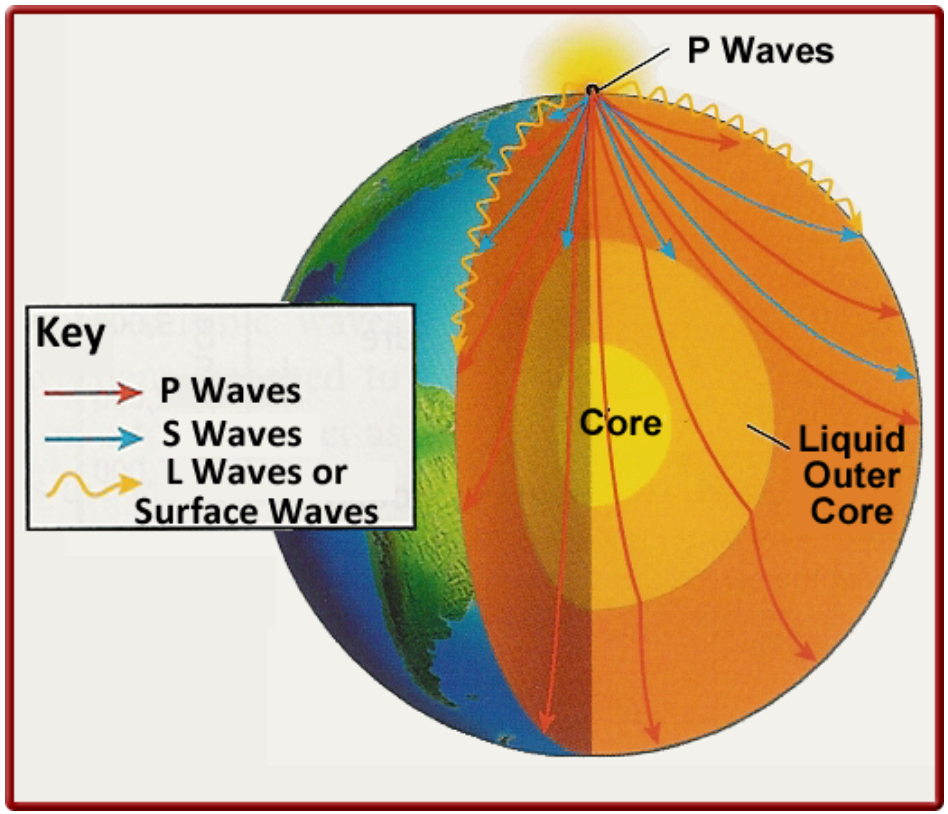
- $f \sim 0,1 - 10$ Hz ; $\lambda \sim 600\ \mathrm{m} - 60$ km ; $c \sim 2 - 10$ km/s ;
- ondes P(rimaires) $\sim$ son (longitudinales) $\rightarrow$ dans les solides ou les fluides ;
- ondes S(econdaires) $\neq$ son (transverses) $\rightarrow$ pas dans les liquides ;
- ondes de surface aussi ($\sim$ vagues).



$\rightarrow$ plusieurs **vagues**

Ondes sismiques terrestres

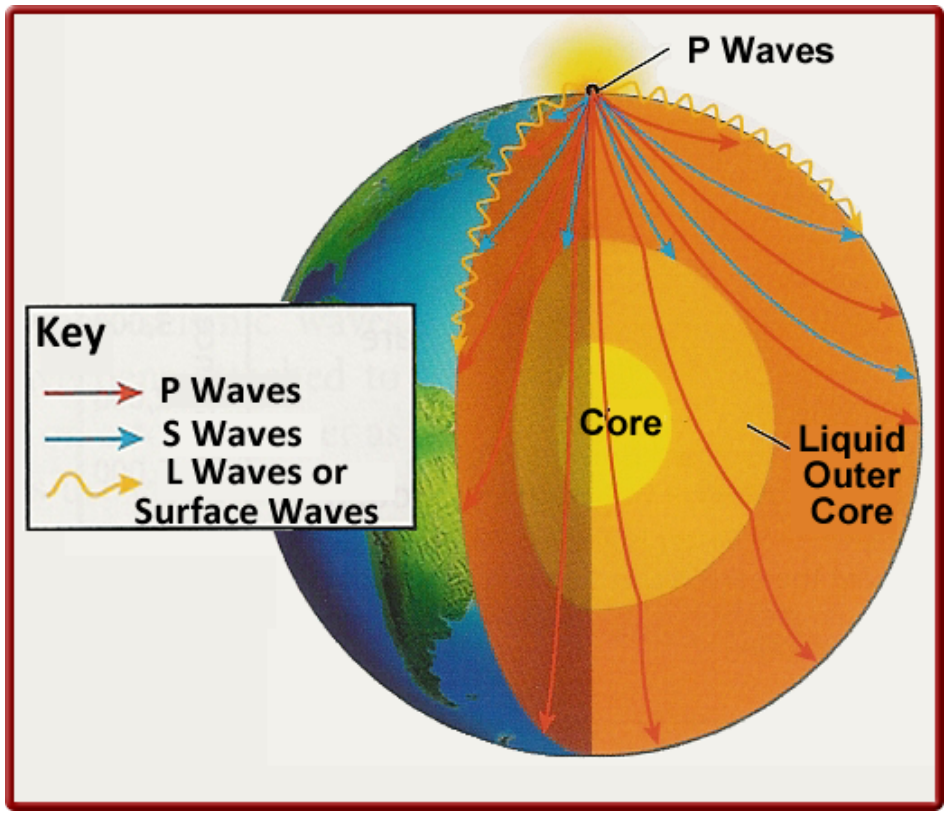
- $f \sim 0,1 - 10$ Hz ; $\lambda \sim 600\ \mathrm{m} - 60$ km ; $c \sim 2 - 10$ km/s ;
- ondes P(rimaires) $\sim$ son (longitudinales) $\rightarrow$ dans les solides ou les fluides ;
- ondes S(econdaires) $\neq$ son (transverses) $\rightarrow$ pas dans les liquides ;
- ondes de surface aussi ($\sim$ vagues).



$\rightarrow$ plusieurs **vagues**

Ondes sismiques terrestres

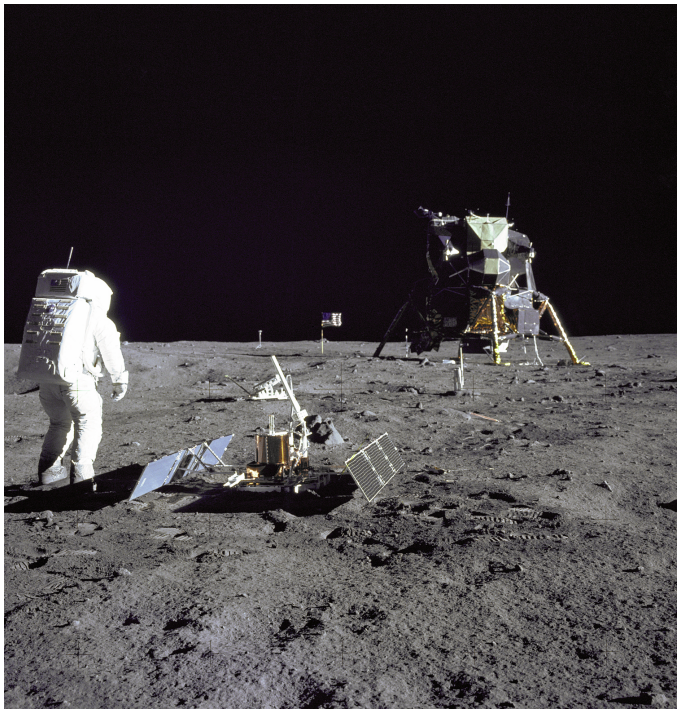
- $f \sim 0,1 - 10$ Hz ; $\lambda \sim 600\ \mathrm{m} - 60$ km ; $c \sim 2 - 10$ km/s ;
- ondes P(rimaires) $\sim$ son (longitudinales) $\rightarrow$ dans les solides ou les fluides ;
- ondes S(econdaires) $\neq$ son (transverses) $\rightarrow$ pas dans les liquides ;
- ondes de surface aussi ($\sim$ vagues).

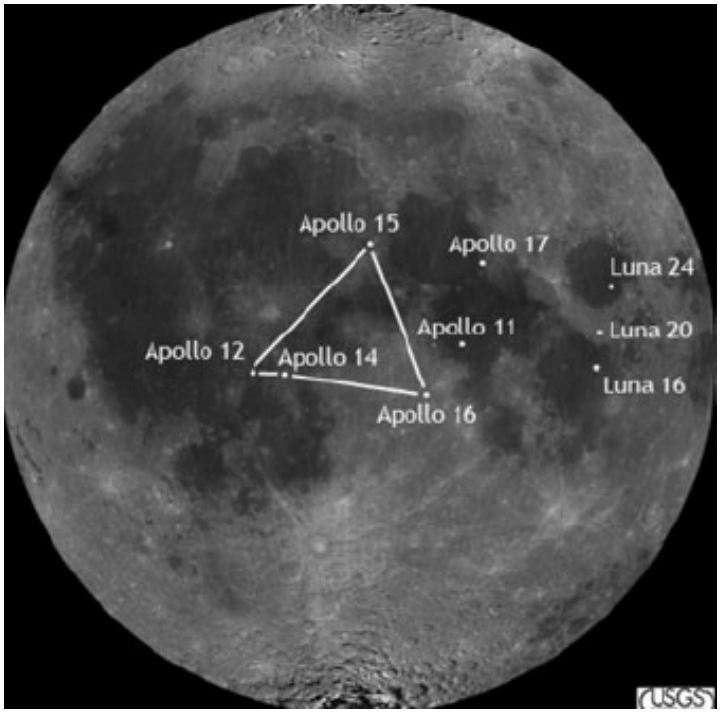


$\rightarrow$ plusieurs **vagues**

Ondes sismiques extra-terrestres : Lune

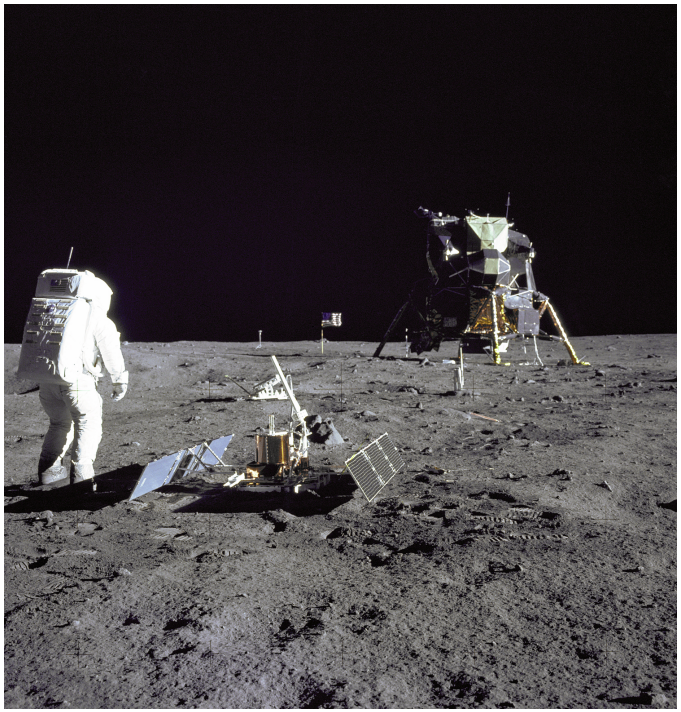
- sismographes (missions Apollo) : tremblements (ondes P) de **longue durée** ($>$ 10 mins) car roches « sèches » (> 12000 événements de 1969 à 1977) ;
- **sources** : attraction de la Terre ($\sim$ marées océaniques terrestres), chute de météorites, différence de température jour/nuit (125 °C/-175 °C) et glissements de terrain (?) ;
- existence d'un noyau : question encore ouverte...

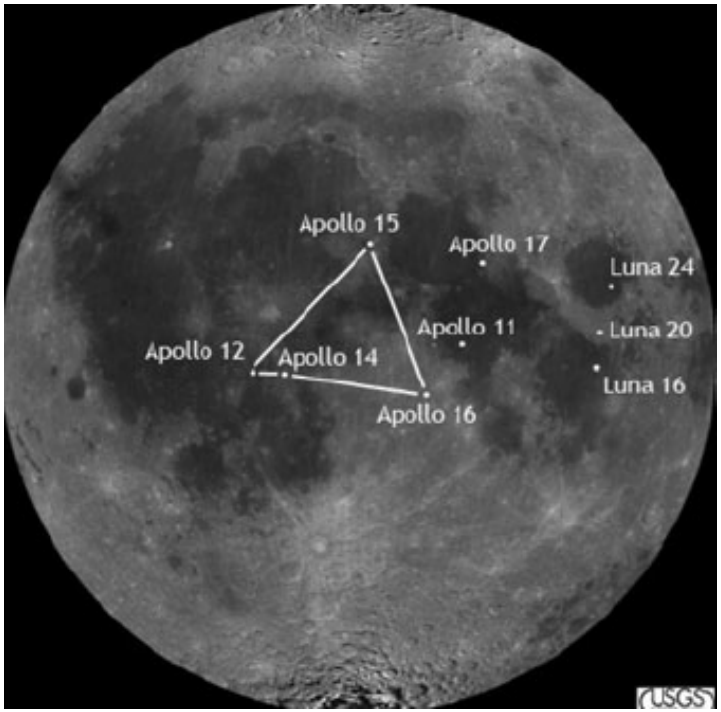




Ondes sismiques extra-terrestres : Lune

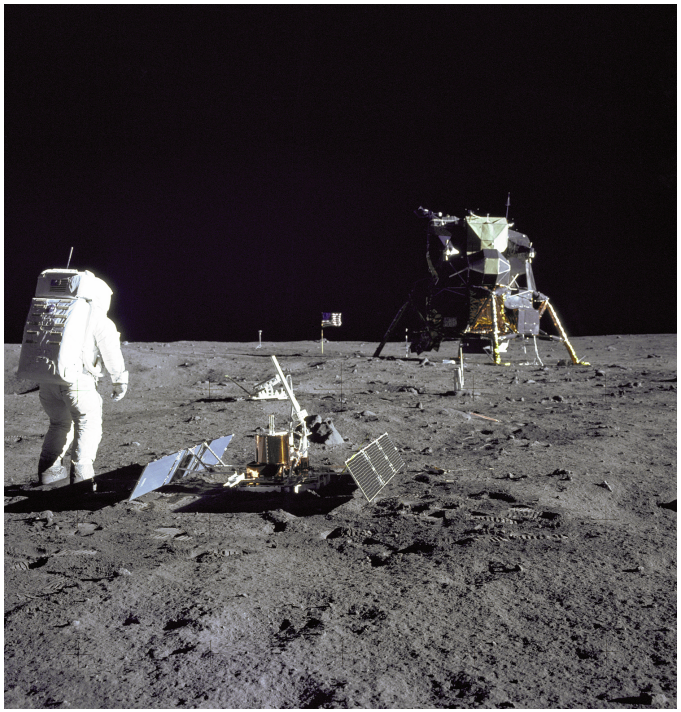
- sismographes (missions Apollo) : tremblements (ondes P) de **longue durée** ($>$ 10 mins) car roches « sèches » (> 12000 événements de 1969 à 1977) ;
- **sources** : attraction de la Terre ($\sim$ marées océaniques terrestres), chute de météorites, différence de température jour/nuit (125 °C/-175 °C) et glissements de terrain (?) ;
- existence d'un noyau : question encore ouverte...

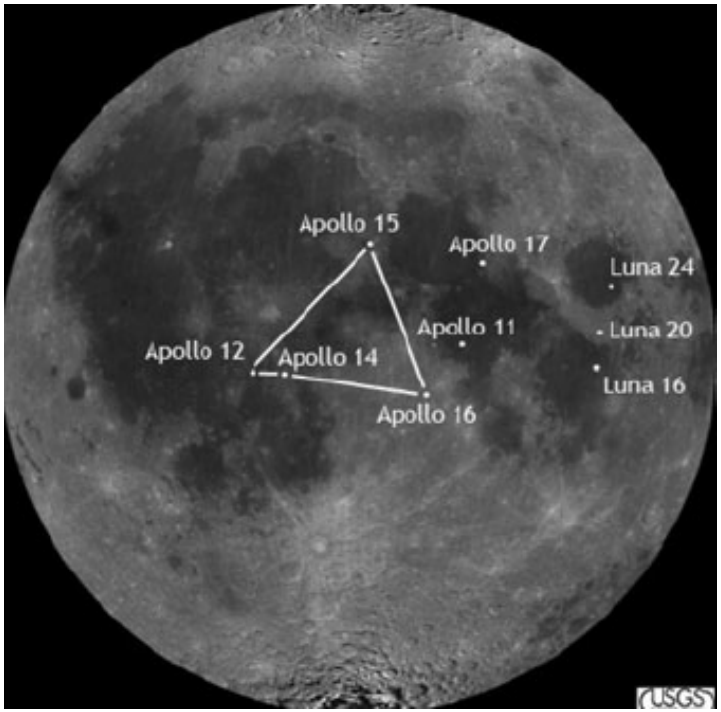




Ondes sismiques extra-terrestres : Lune

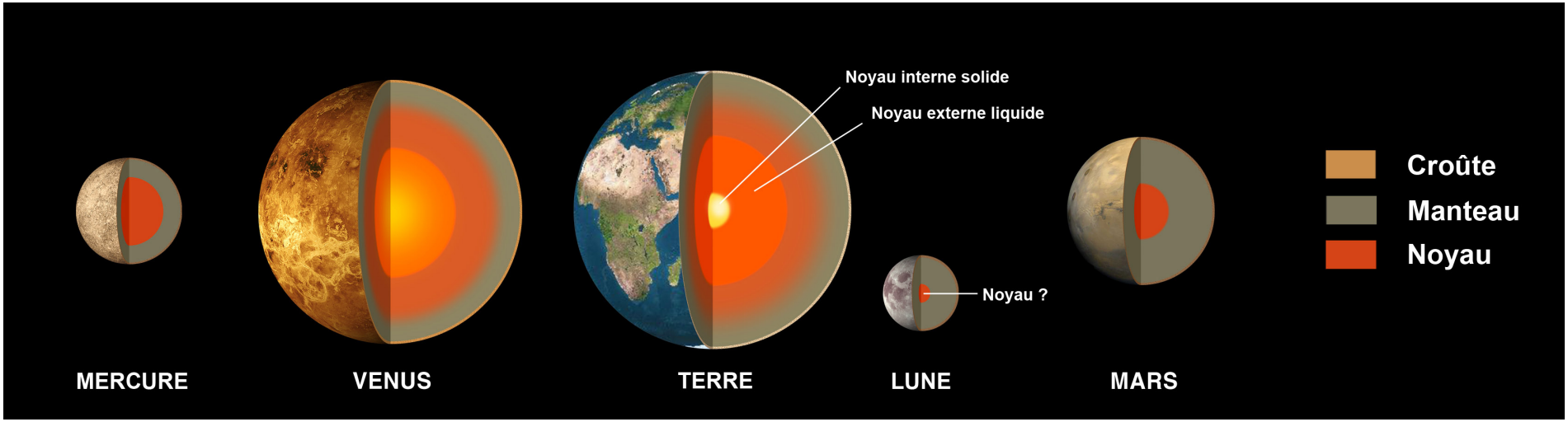
- sismographes (missions Apollo) : tremblements (ondes P) de **longue durée** ($>$ 10 mins) car roches « sèches » (> 12000 événements de 1969 à 1977) ;
- **sources** : attraction de la Terre ($\sim$ marées océaniques terrestres), chute de météorites, différence de température jour/nuit (125 °C/-175 °C) et glissements de terrain (?) ;
- existence d'un noyau : question encore ouverte...





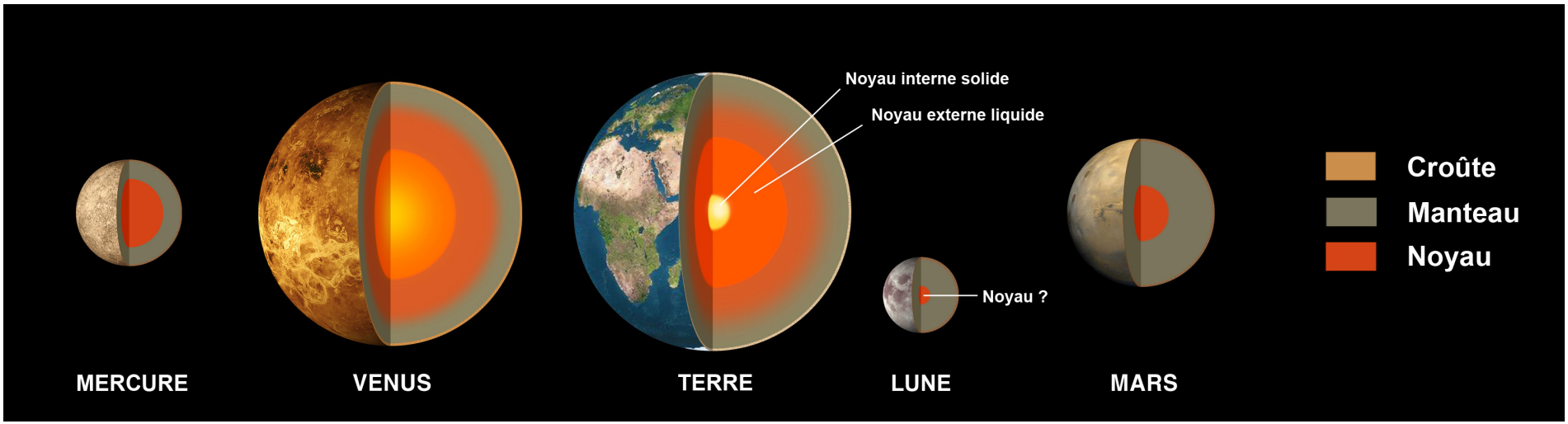
Ondes sismiques extra-terrestres : planètes telluriques

- **autres planètes** : Vénus entièrement fondue ? Mars complètement solide et froide ?
- pas encore d'observations → **missions à venir ?**



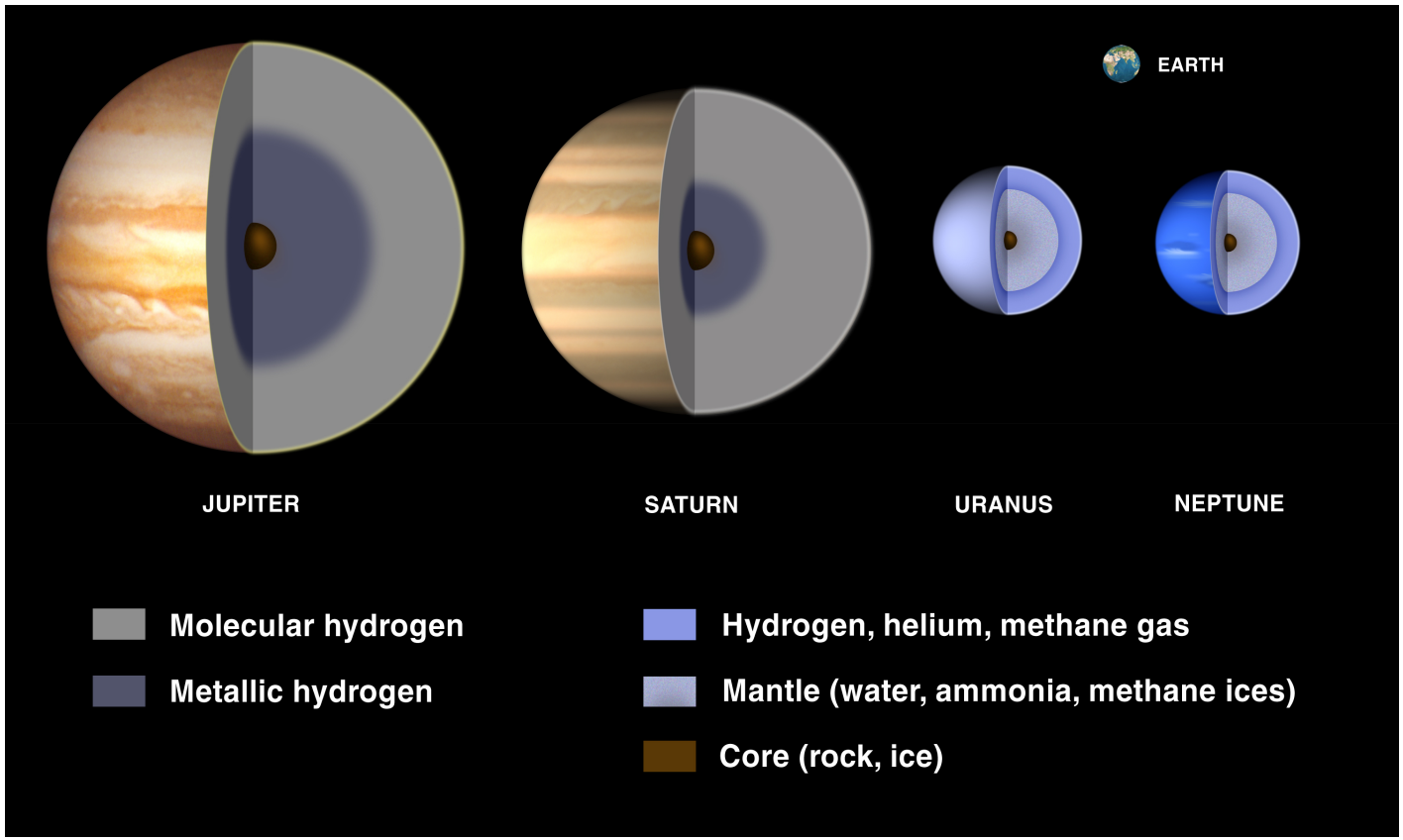
Ondes sismiques extra-terrestres : planètes telluriques

- **autres planètes** : Vénus entièrement fondue ? Mars complètement solide et froide ?
- pas encore d'observations $\rightarrow$ **missions à venir ?**



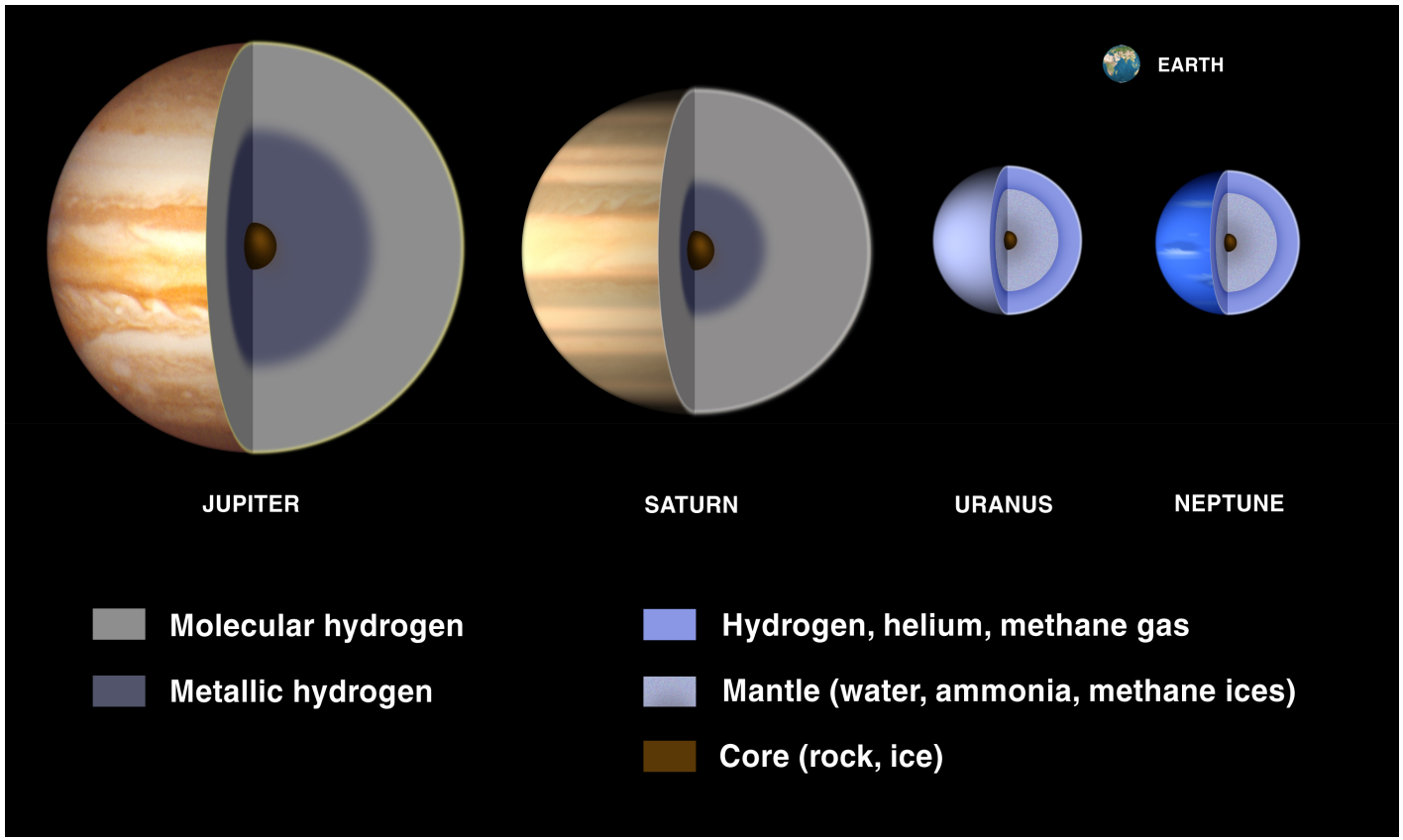
Planètes géantes

- planètes aux couches externes gazeuses avec **cœur rocheux** (?) ;
- **composition interne mal connue** et probablement exotique → hydrogène métallique, etc.
- ondes internes très différentes...



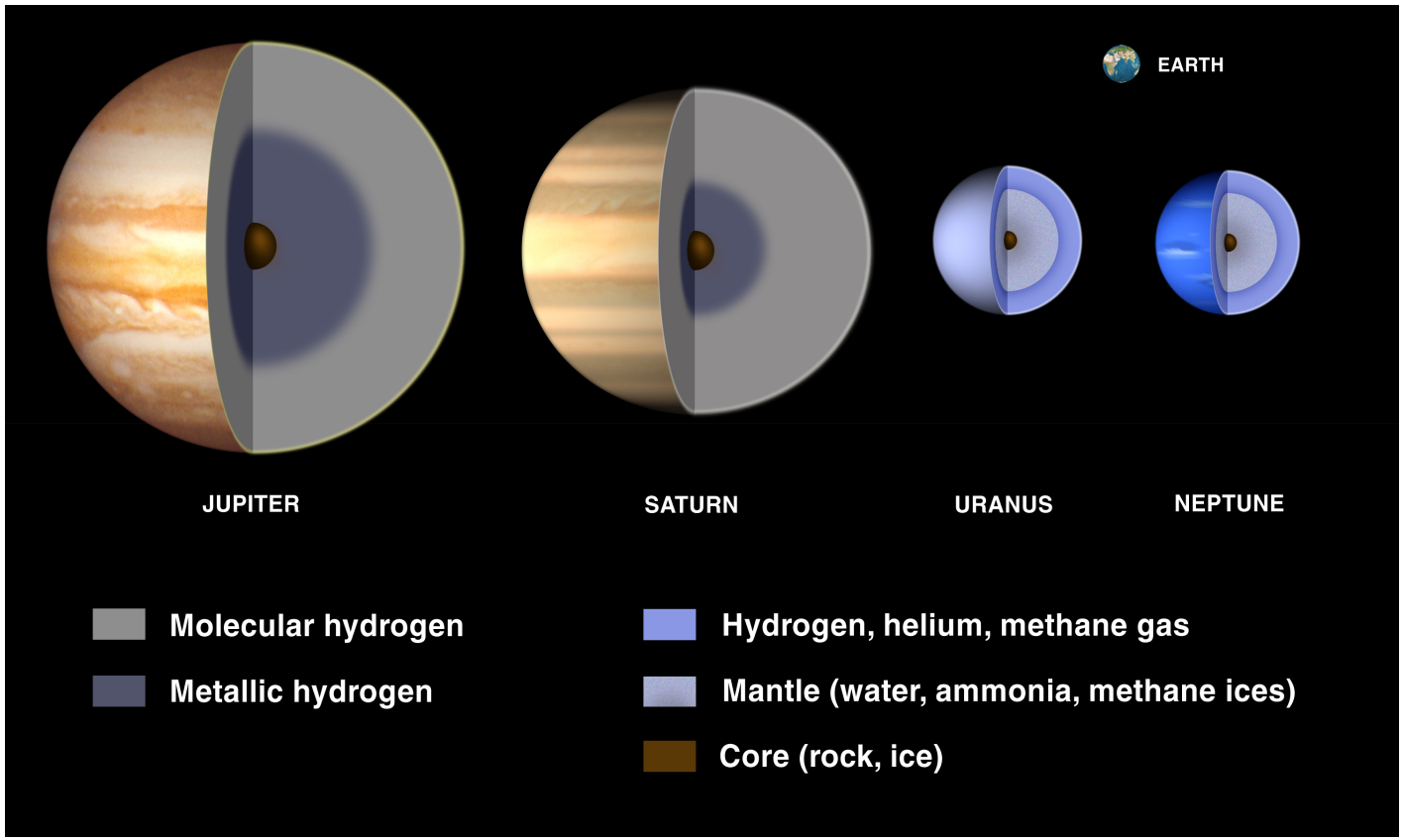
Planètes géantes

- planètes aux couches externes gazeuses avec **cœur rocheux** (?) ;
- **composition interne mal connue** et probablement exotique → hydrogène métallique, etc.
- ondes internes très différentes...



Planètes géantes

- planètes aux couches externes gazeuses avec **cœur rocheux** (?) ;
- **composition interne mal connue** et probablement exotique → hydrogène métallique, etc.
- ondes internes très différentes...



Jupiter

- oscillations radiales observées en 2011
- expérience **SYMPA** (équipe française) située aux Canaries ;
- $f \sim 0,001$ Hz ; $c \sim 40$ cm/s ; durée ~ 10 jours.



Crédit figure : P. Gaulme.

Jupiter

- oscillations radiales observées en 2011
- expérience **SYMPA** (équipe française) située aux Canaries ;
- $f \sim 0,001$ Hz ; $c \sim 40$ cm/s ; durée ~ 10 jours.



Crédit figure : P. Gaulme.

Jupiter

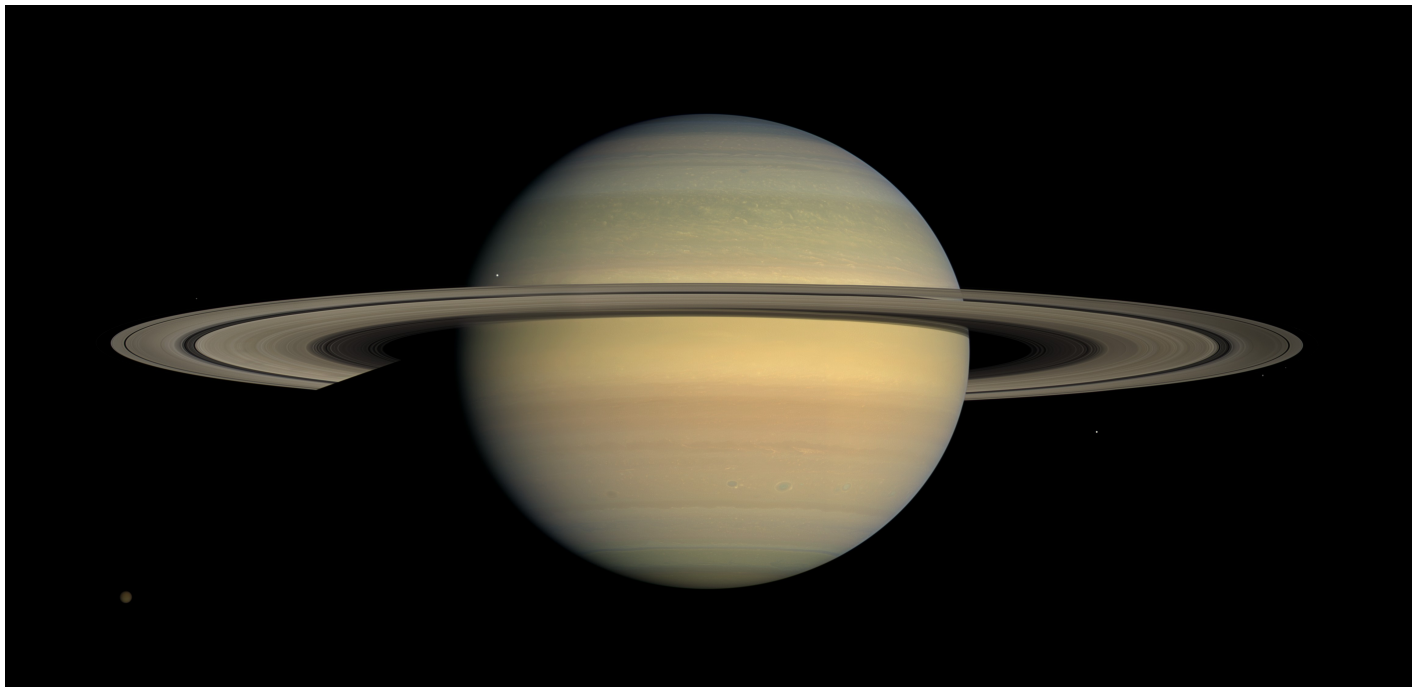
- oscillations radiales observées en 2011
- expérience **SYMPA** (équipe française) située aux Canaries ;
- $f \sim 0,001$ Hz ; $c \sim 40$ cm/s ; durée ~ 10 jours.



Crédit figure : P. Gaulme.

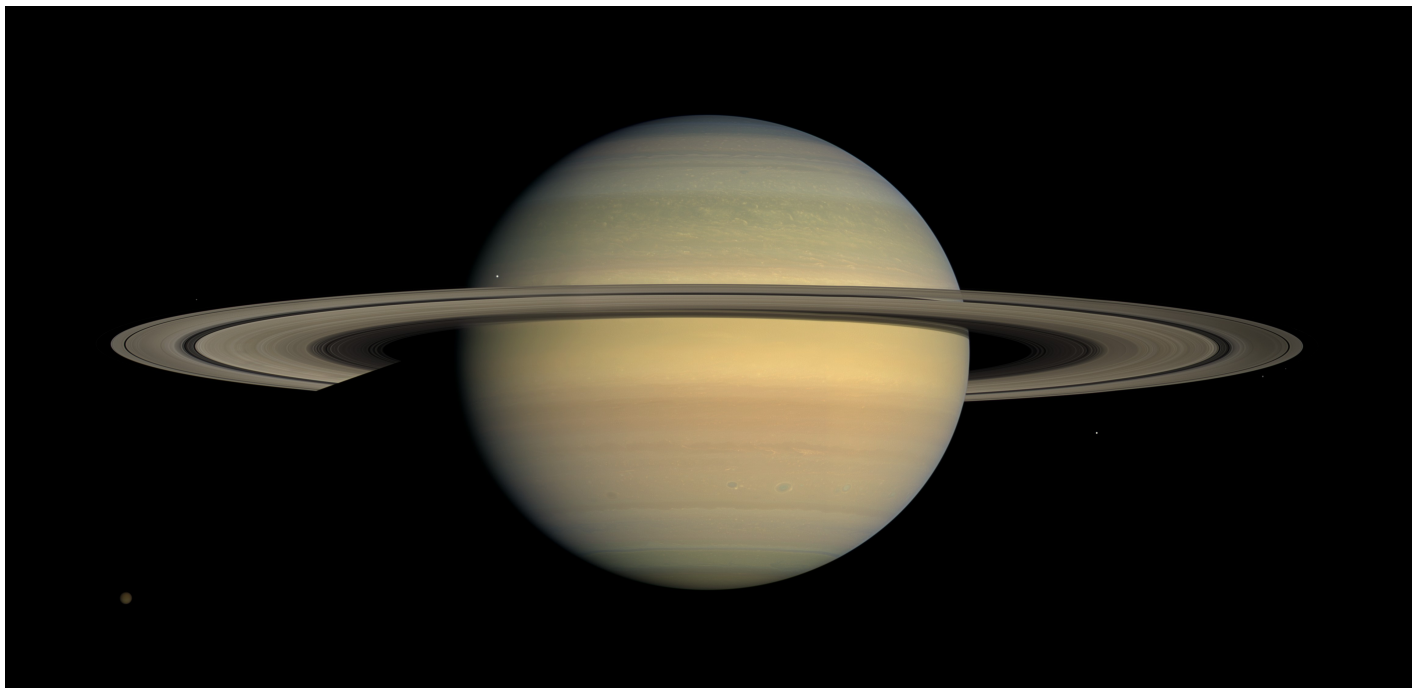
Saturne

- connue pour ses anneaux (diamètre $\sim$ 360 000 km ; épaisseur $\sim$ 10 m) ;
- oscillations (200 km d'amplitude) observées en **2007** par la sonde **Cassini-Huygens** (durée vidéo $\sim$ 9 h) ;
- écoute des ondes radio émises...



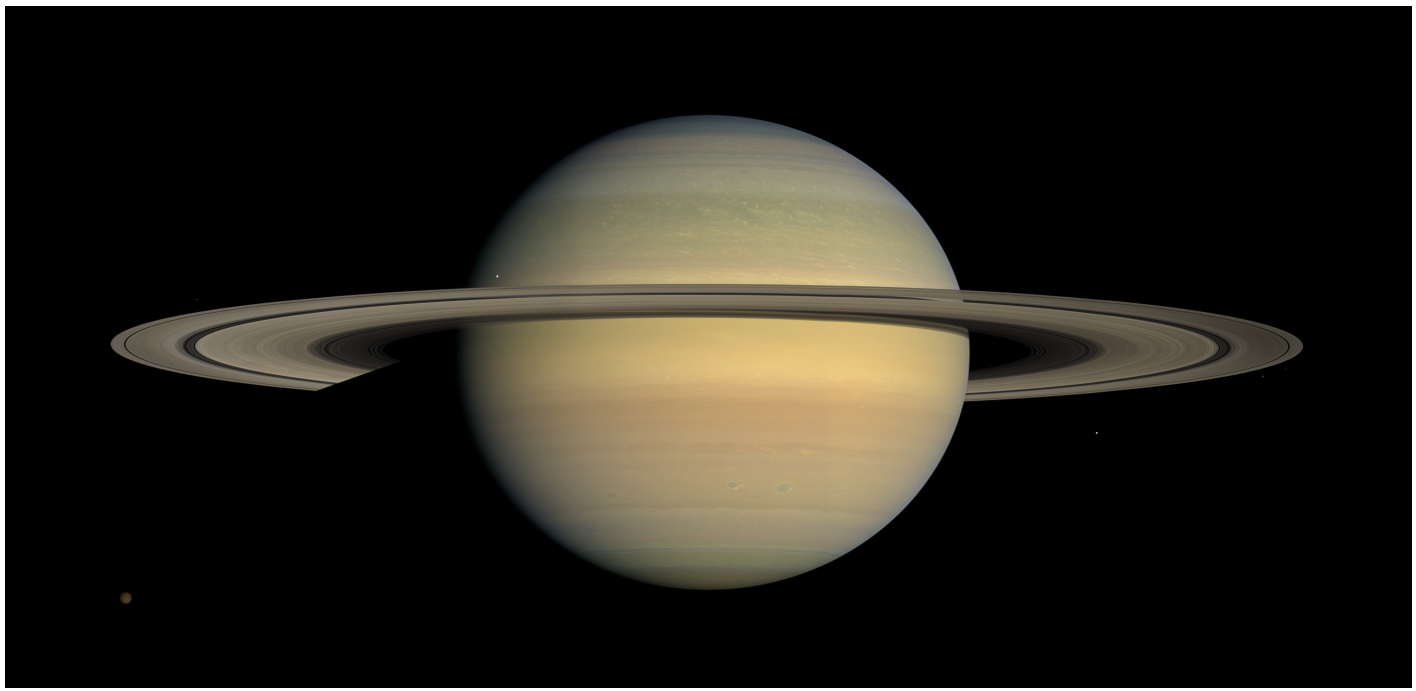
Saturne

- connue pour ses anneaux (diamètre $\sim$ 360 000 km ; épaisseur $\sim$ 10 m) ;
- oscillations (200 km d'amplitude) observées en **2007** par la sonde **Cassini-Huygens** (durée vidéo $\sim$ 9 h) ;
- écoute des ondes radio émises...

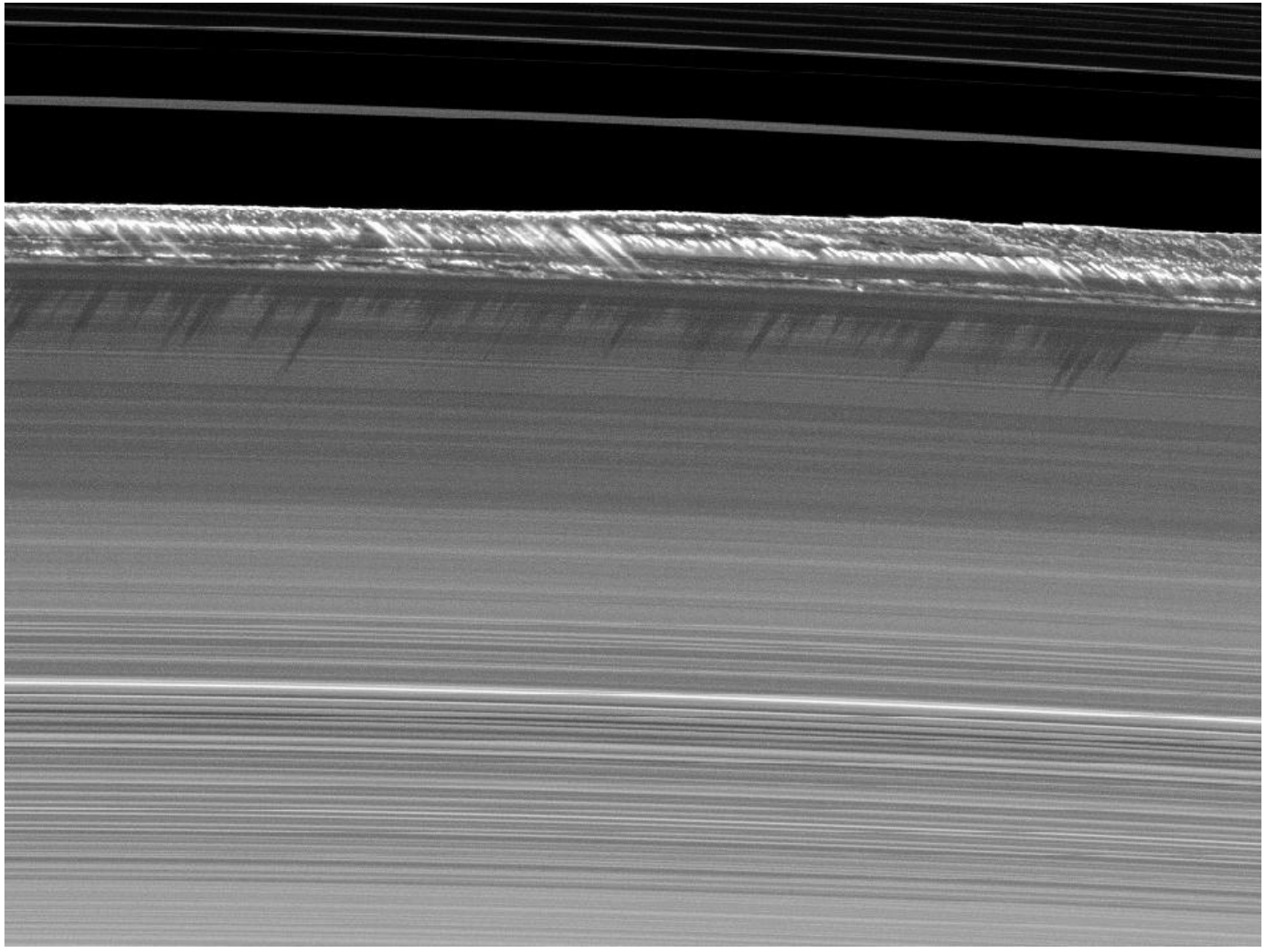


Saturne

- connue pour ses anneaux (diamètre $\sim$ 360 000 km ; épaisseur $\sim$ 10 m) ;
- oscillations (200 km d'amplitude) observées en **2007** par la sonde **Cassini-Huygens** (durée vidéo $\sim$ 9 h) ;
- écoute des ondes radio émises...



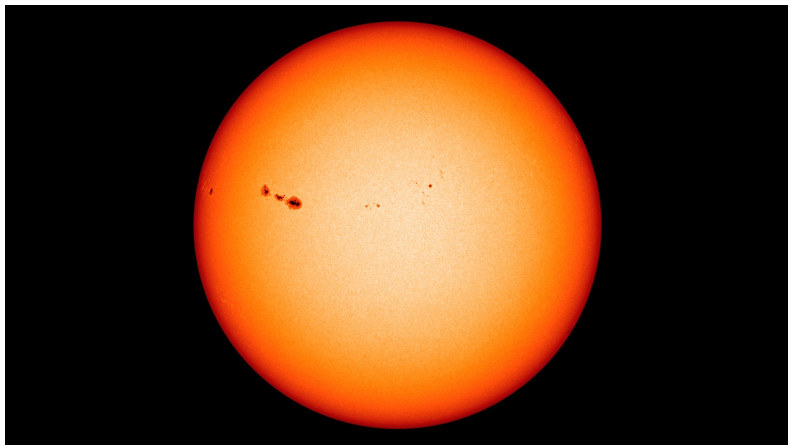
Zoom sur les anneaux (Cassini-Huygens 2009)



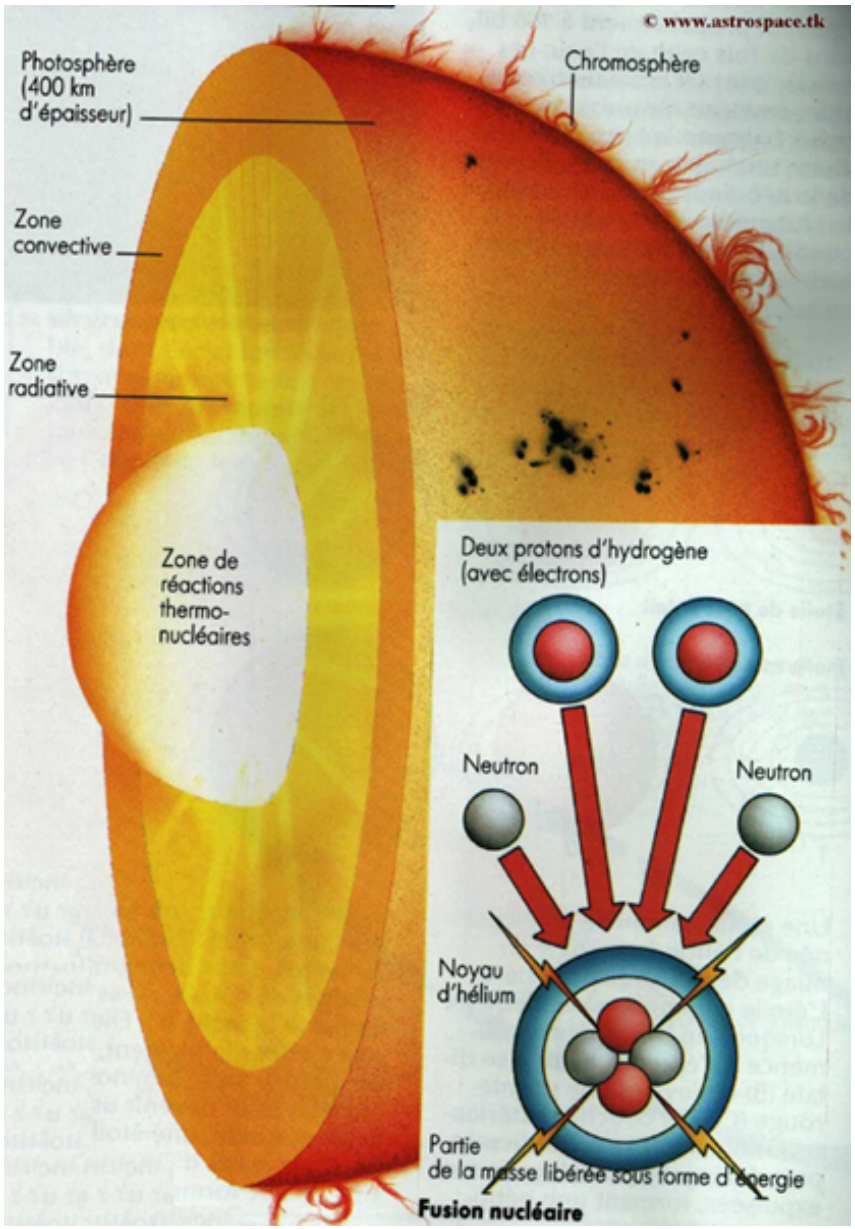
épaisseur des anneaux $\sim$ 10 m ; **hauteur** des pics $\sim$ 2,5 km.

2

Soleil et autres étoiles



Le Soleil



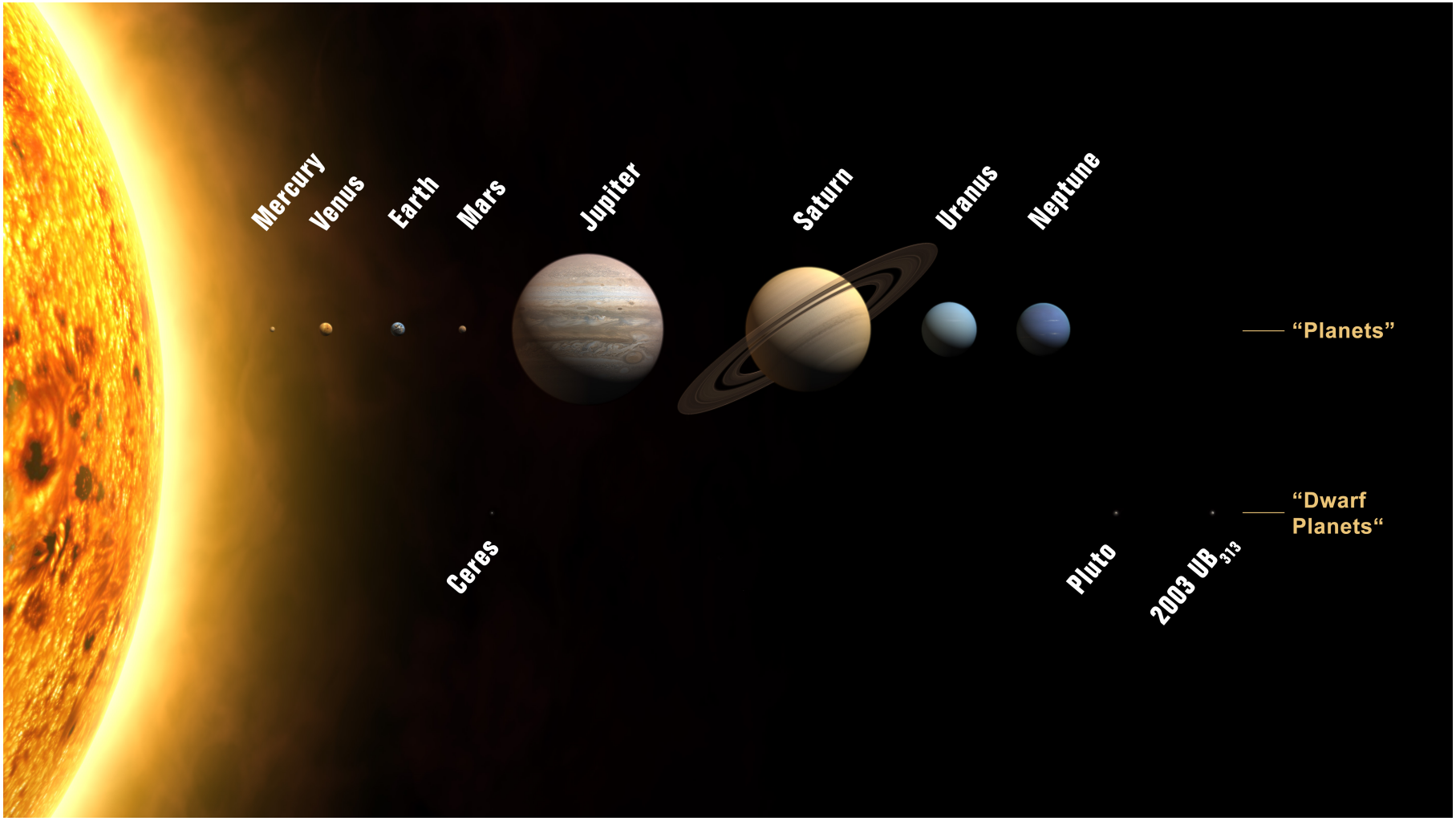
Étoile :

- fusion nucléaire au centre ;
- composition variable mais fluide.

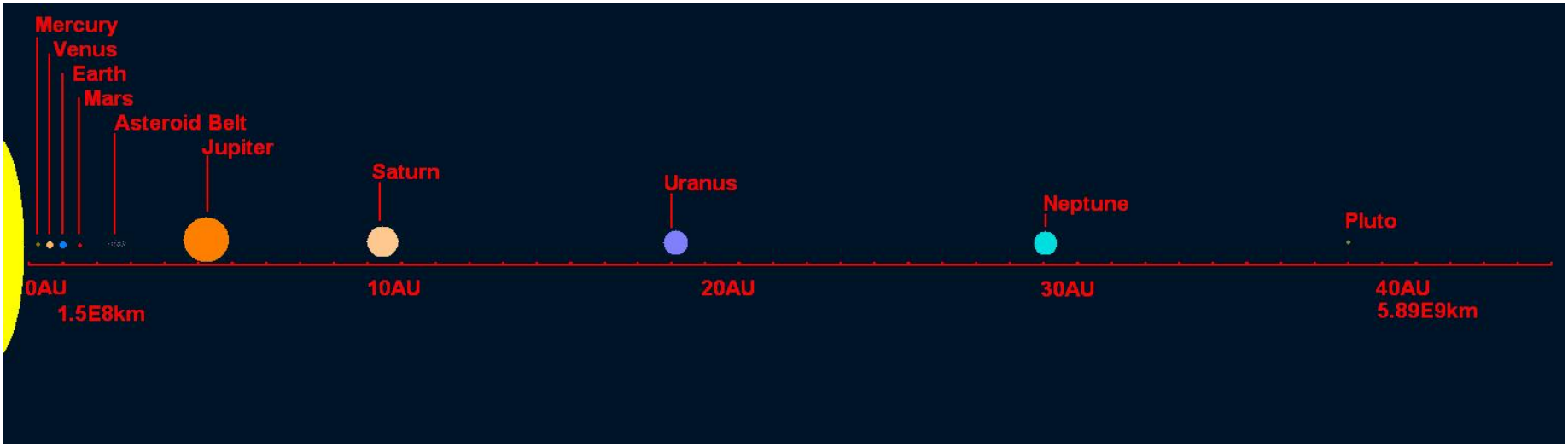
Soleil :

- rayon $\sim 7 \times 10^5$ km (~ 100 $R_\oplus$) ;
- masse $\sim 2 \times 10^{30}$ kg
  ($= 1\ M_\odot \sim 333\,000\ M_\oplus$).

Soleil et Système Solaire : tailles



Soleil et Système Solaire : distances

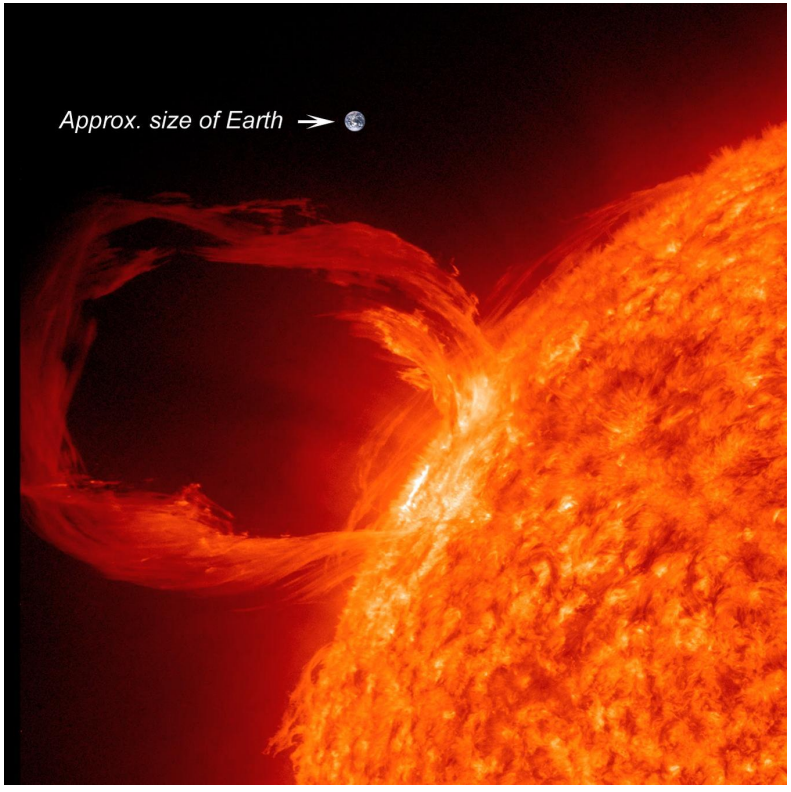


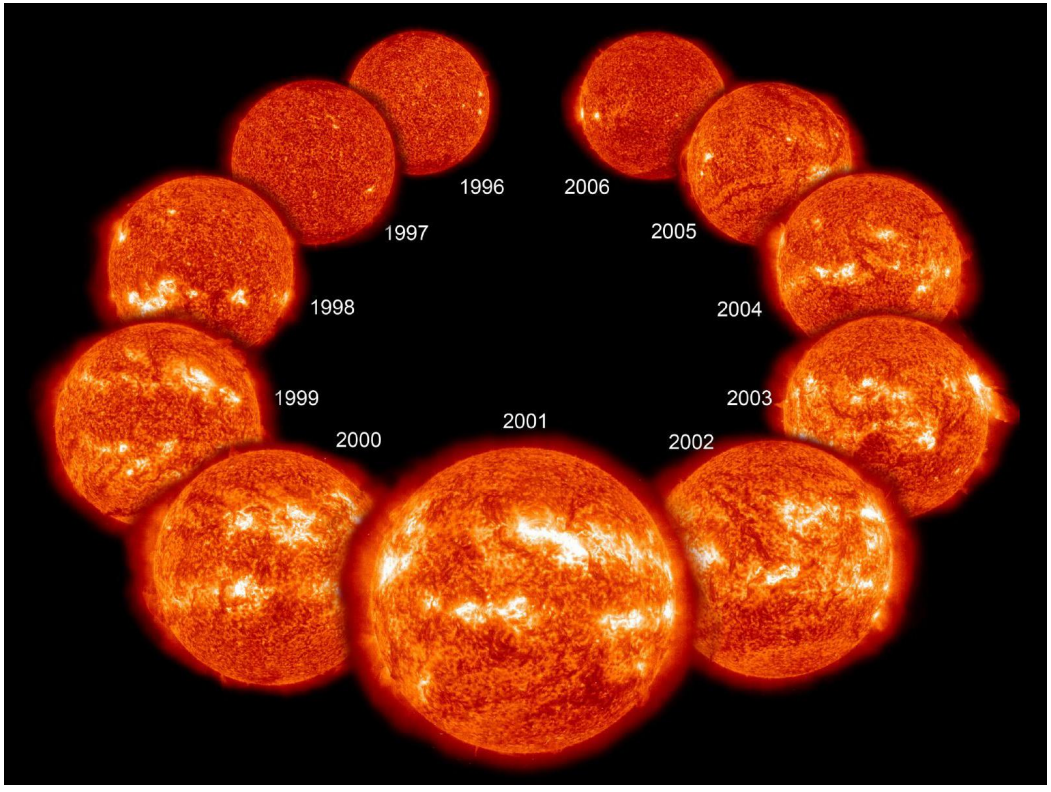
Distance Terre–Soleil : 1 Unité Astronomique (UA)

1 UA $\sim 150 \times 10^6$ km (499 secondes-lumière $\sim 15.9 \times 10^{-6}$ al)

Rappel : diamètre du Soleil $\sim 1.4 \times 10^6$ km ~ 0.01 UA.

Activités solaires

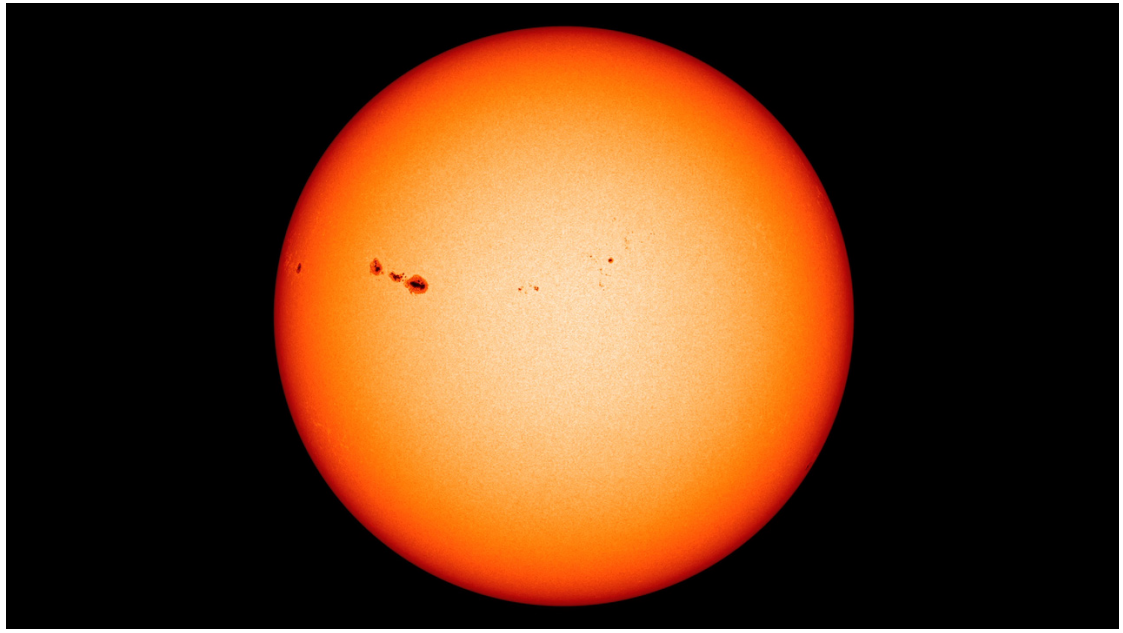




Le Soleil éjecte régulièrement de la matière dans l'espace
(cycles de 11 ans pour les principaux ; photo de gauche : Terre à l'échelle)

Héliosismologie

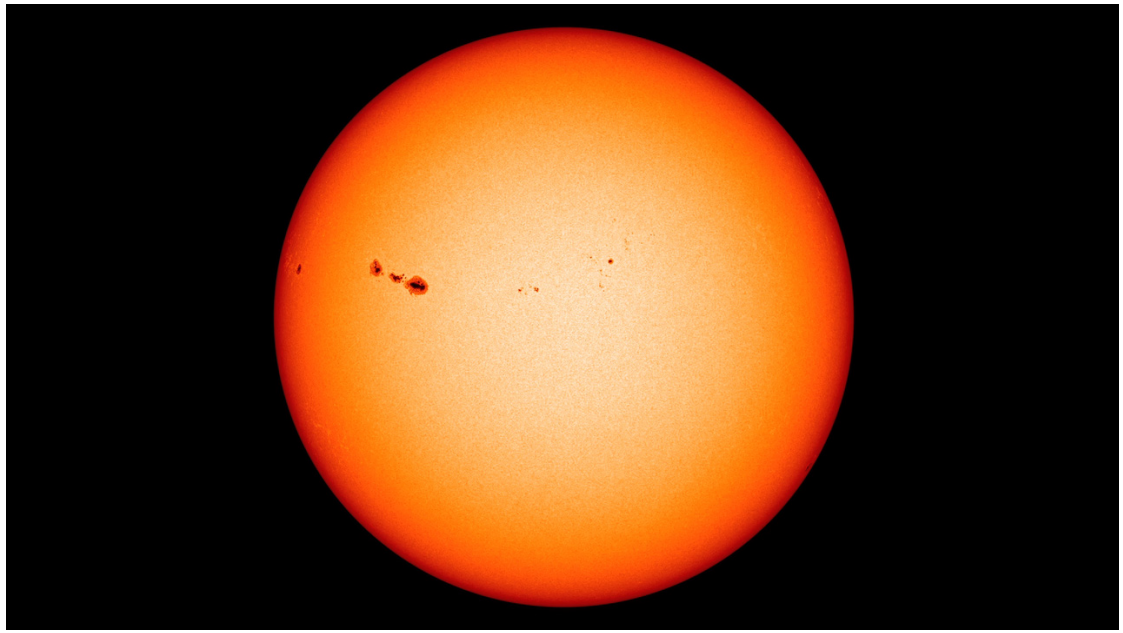
- vibrations de surface liées aux **oscillations internes** ($f \sim$ quelques mHz) ;
- moyen de sonder la **structure interne**.



(le Soleil vu par SDO)

Héliosismologie

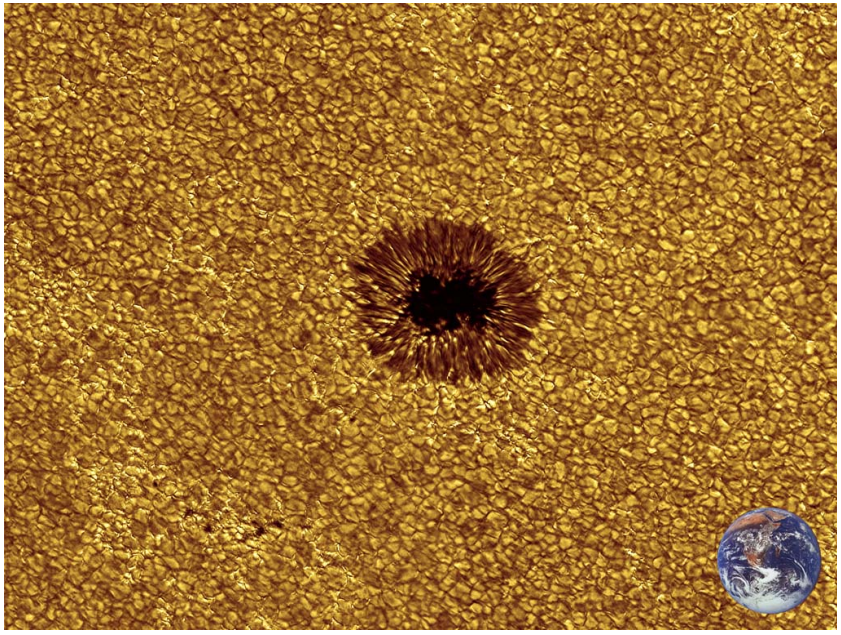
- vibrations de surface liées aux **oscillations internes** ($f \sim$ quelques mHz) ;
- moyen de sonder la **structure interne**.

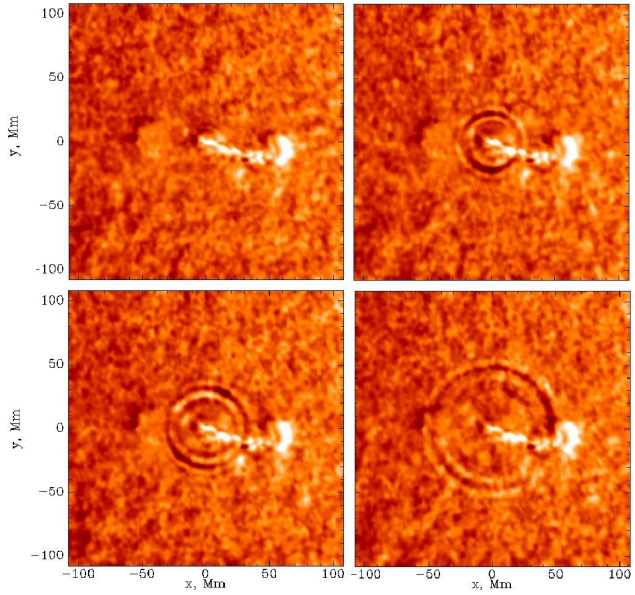


(le Soleil vu par SDO)

Structure interne du Soleil

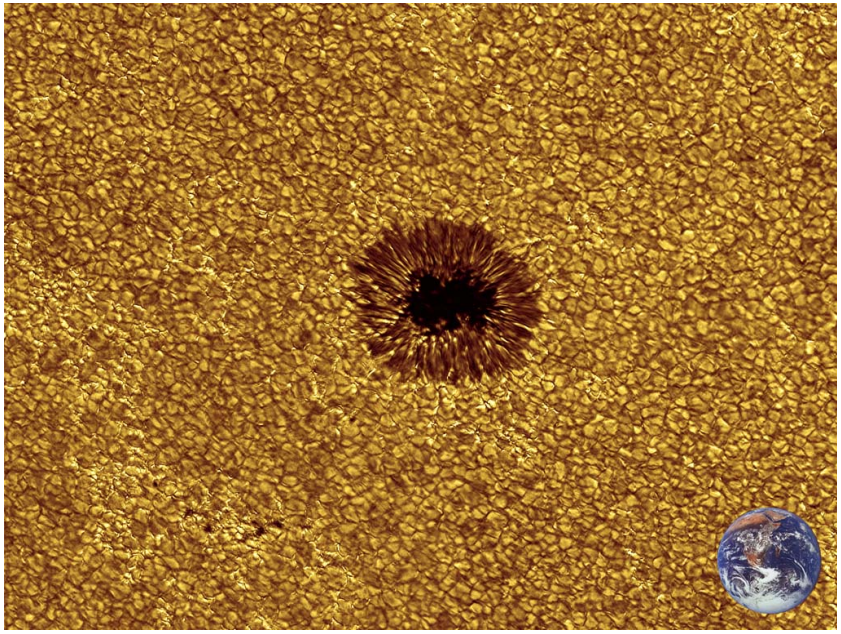
- (assez) bien connue grâce à l'héliosismologie (SDO, etc.) ;
- étude de la « gamme solaire » ;
- mise en évidence de la masse du neutrino...

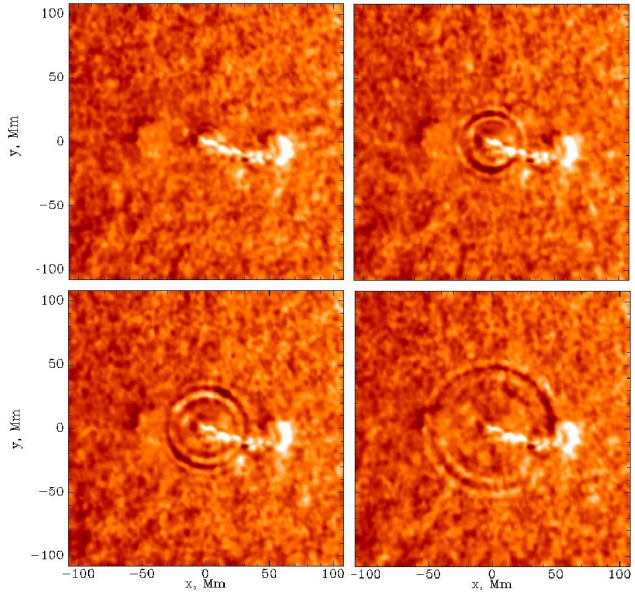




Structure interne du Soleil

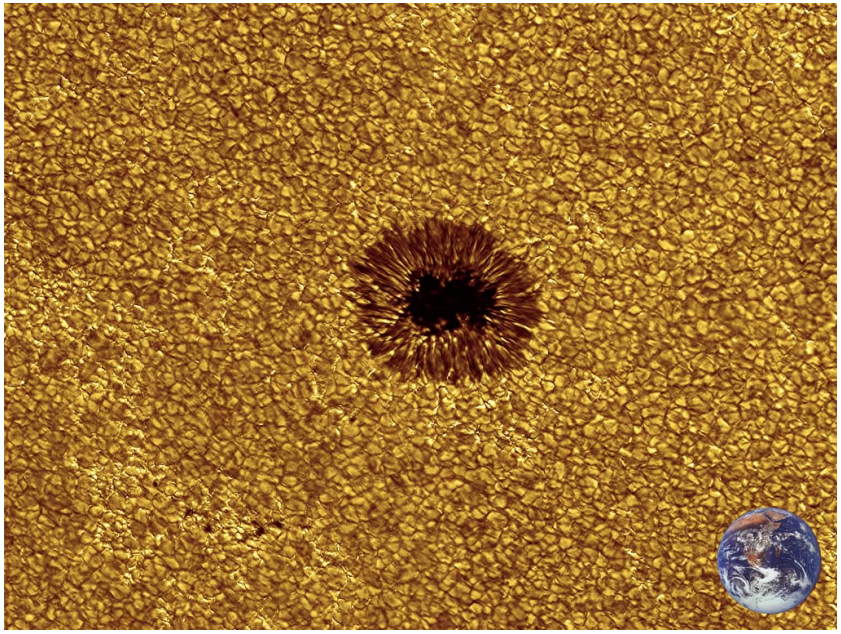
- (assez) bien connue grâce à l'héliosismologie (SDO, etc.) ;
- étude de la « gamme solaire » ;
- mise en évidence de la masse du neutrino...

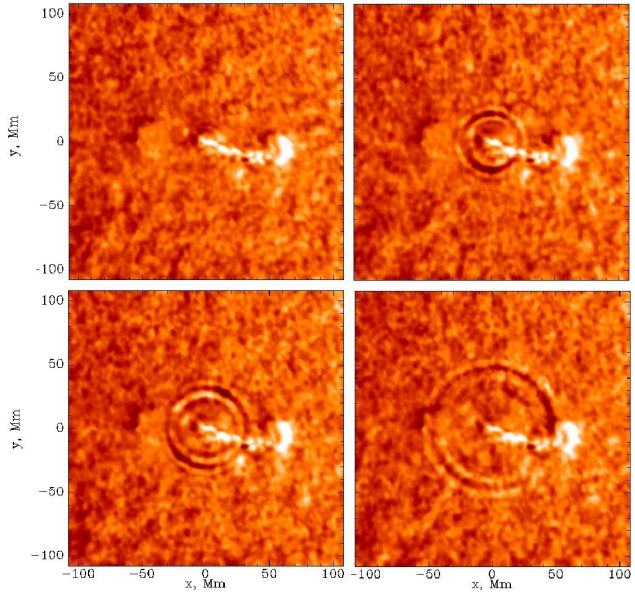




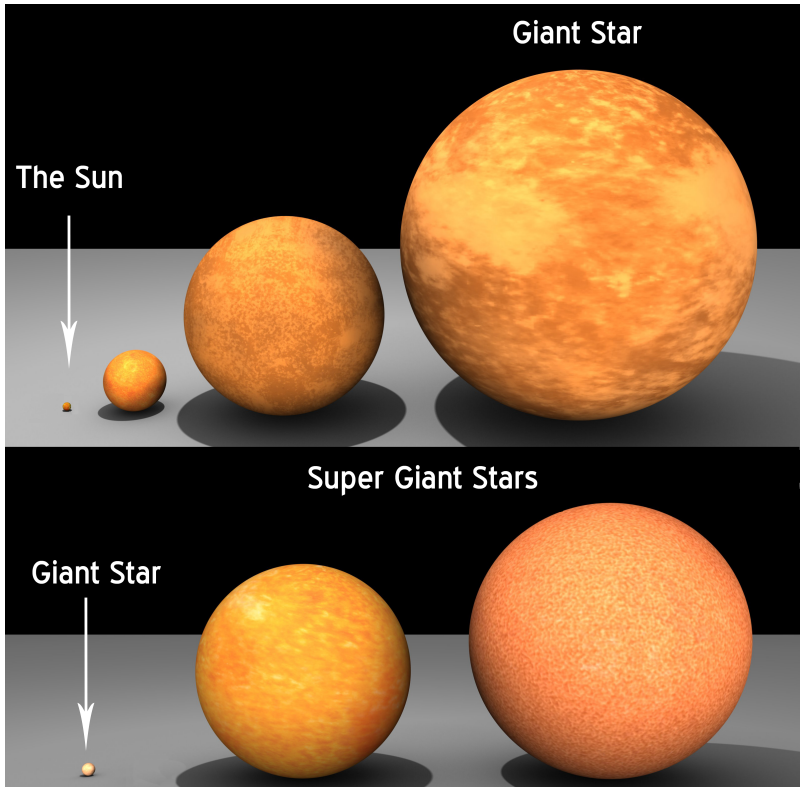
Structure interne du Soleil

- (assez) bien connue grâce à l'héliosismologie (SDO, etc.) ;
- étude de la « gamme solaire » ;
- mise en évidence de la masse du neutrino...





Autres types d'étoiles



Regard rapproché sur d'autres étoiles...

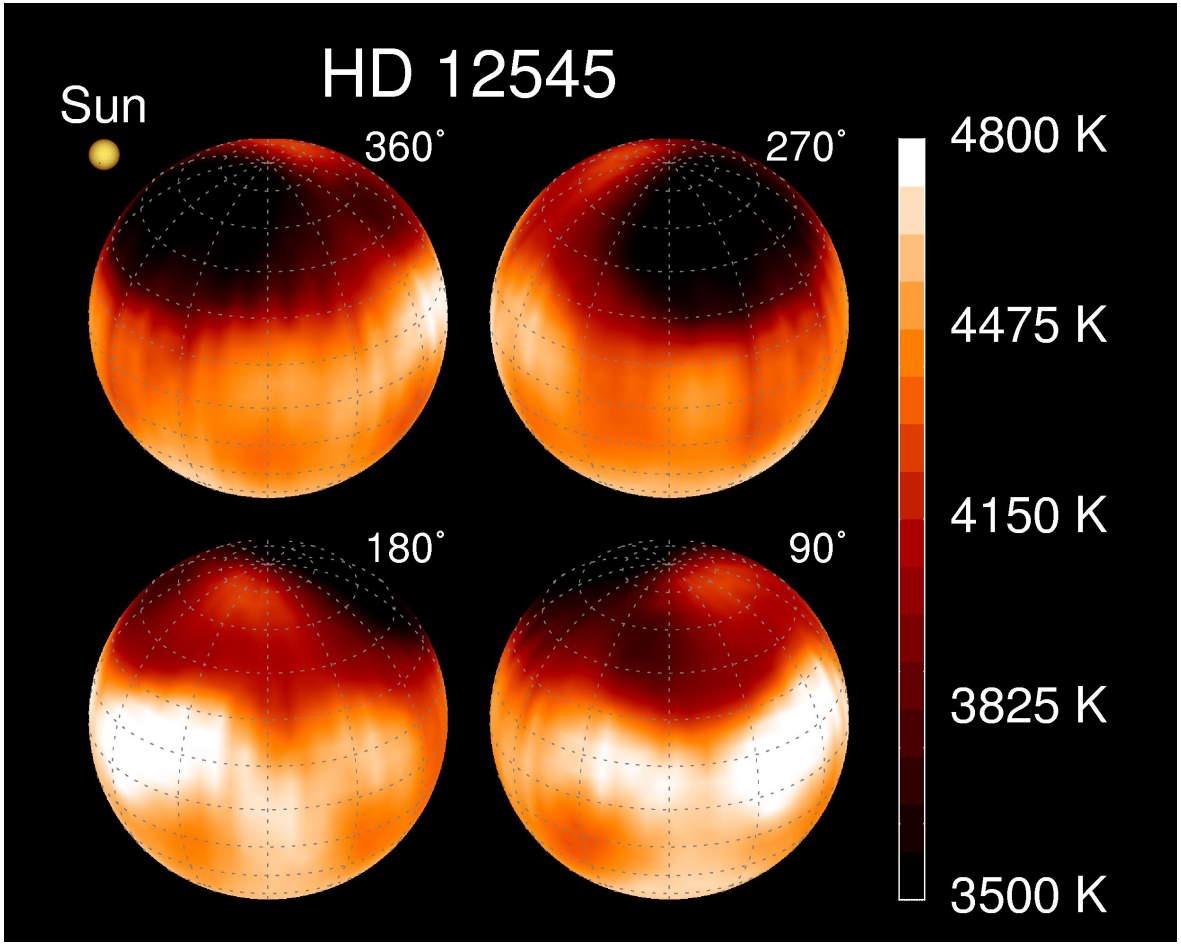


Image : K.Strassmeier, Vienna, NOAO/AURA/NSF.

Astérosismologie

- **nombreuses étoiles étudiées** (CoRoT, Kepler, etc.) ;
- mise en évidence de cycles magnétiques différents, amélioration de la compréhension de la **fusion dans les géantes**, etc.

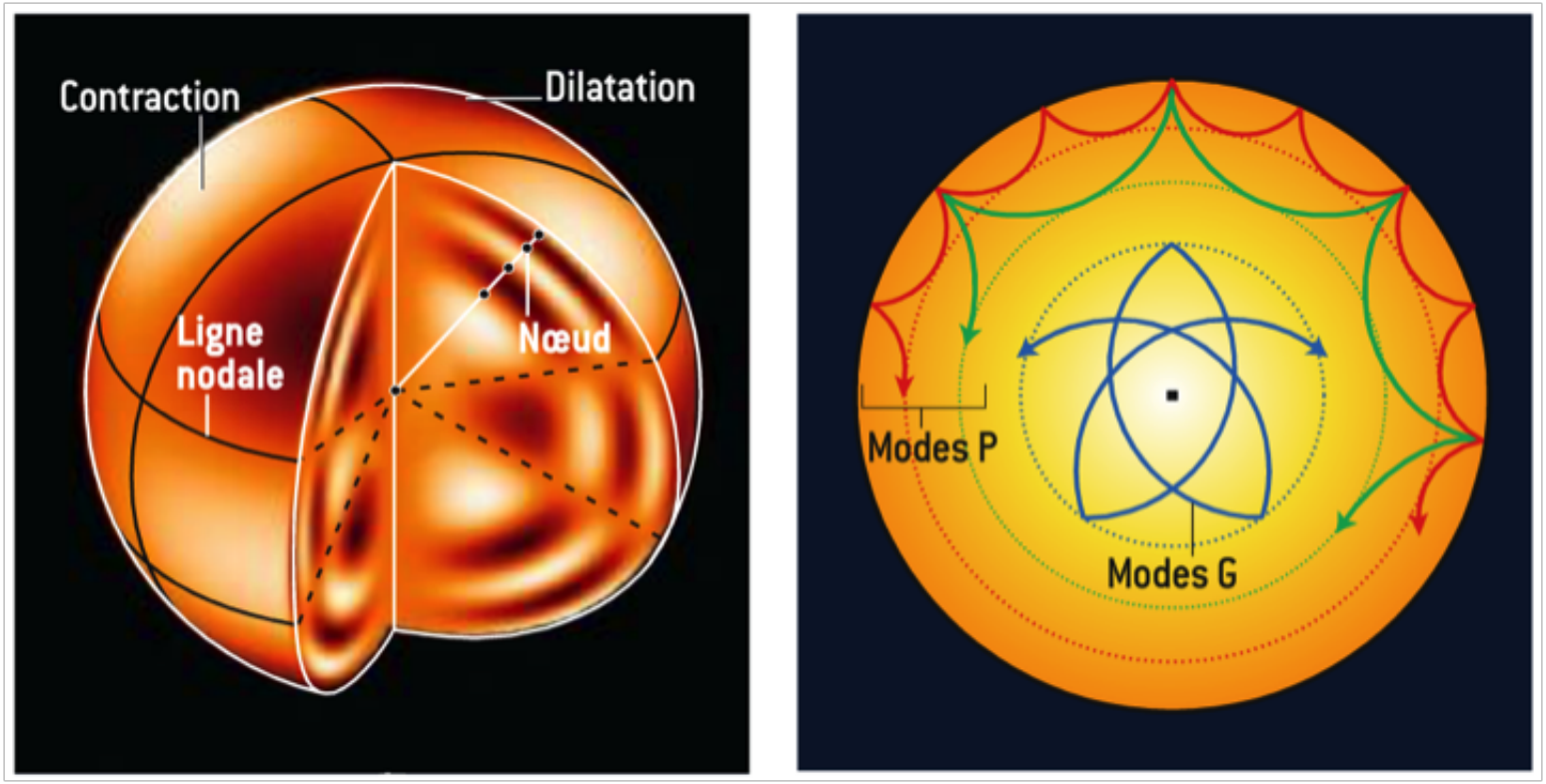


Image : B. Beirens.

Astérosismologie

- **nombreuses étoiles étudiées** (CoRoT, Kepler, etc.) ;
- mise en évidence de cycles magnétiques différents, amélioration de la compréhension de la **fusion dans les géantes**, etc.

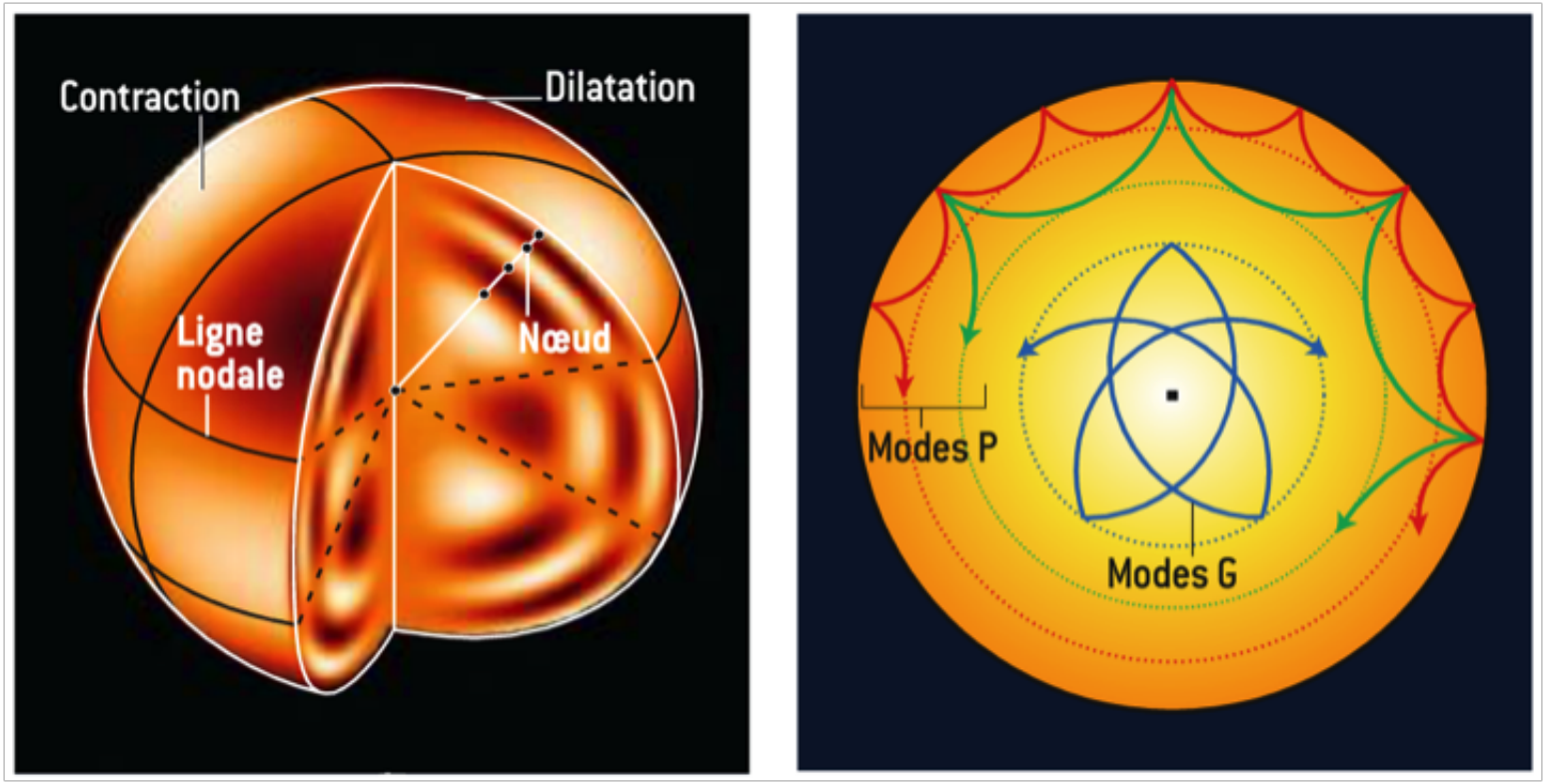


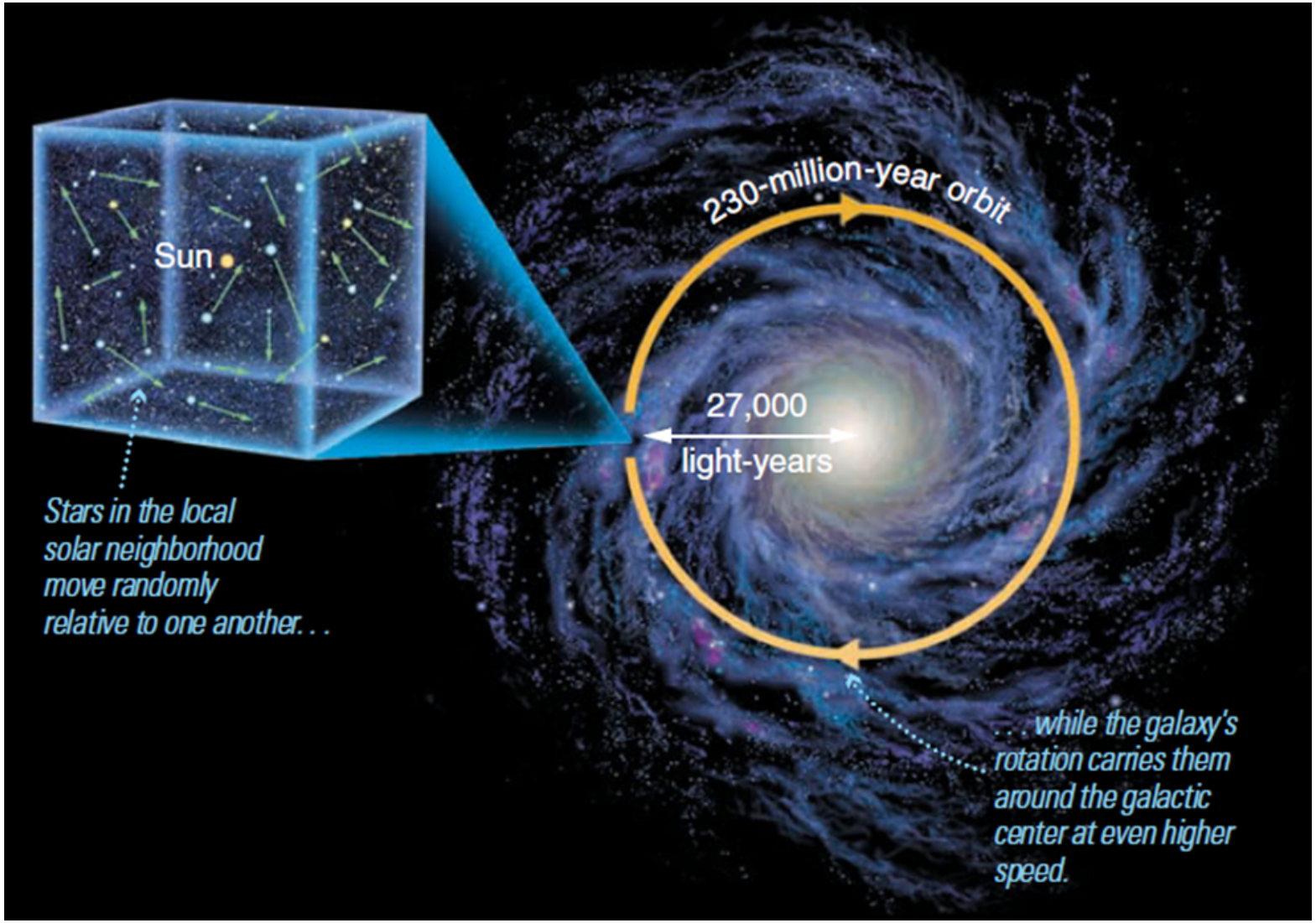
Image : B. Beirens.

3

Galaxies et Univers



Le Soleil dans la Voie lactée



Ondes de densité et galaxies spirales

- bras d'une galaxie spirale = **région de densité plus élevée** ;
- **onde de densité** $\neq$ rotation (différentielle) des étoiles...
- $f < 0,000\,000\,001$ Hz (période $\sim$ 100 millions d'années ; $c \sim 200$ km/s).



(M101)

Ondes de densité et galaxies spirales

- bras d'une galaxie spirale = **région de densité plus élevée** ;
- **onde de densité** $\neq$ rotation (différentielle) des étoiles...
- $f < 0,000\,000\,001$ Hz (période $\sim$ 100 millions d'années ; $c \sim 200$ km/s).



(M101)

Ondes de densité et galaxies spirales

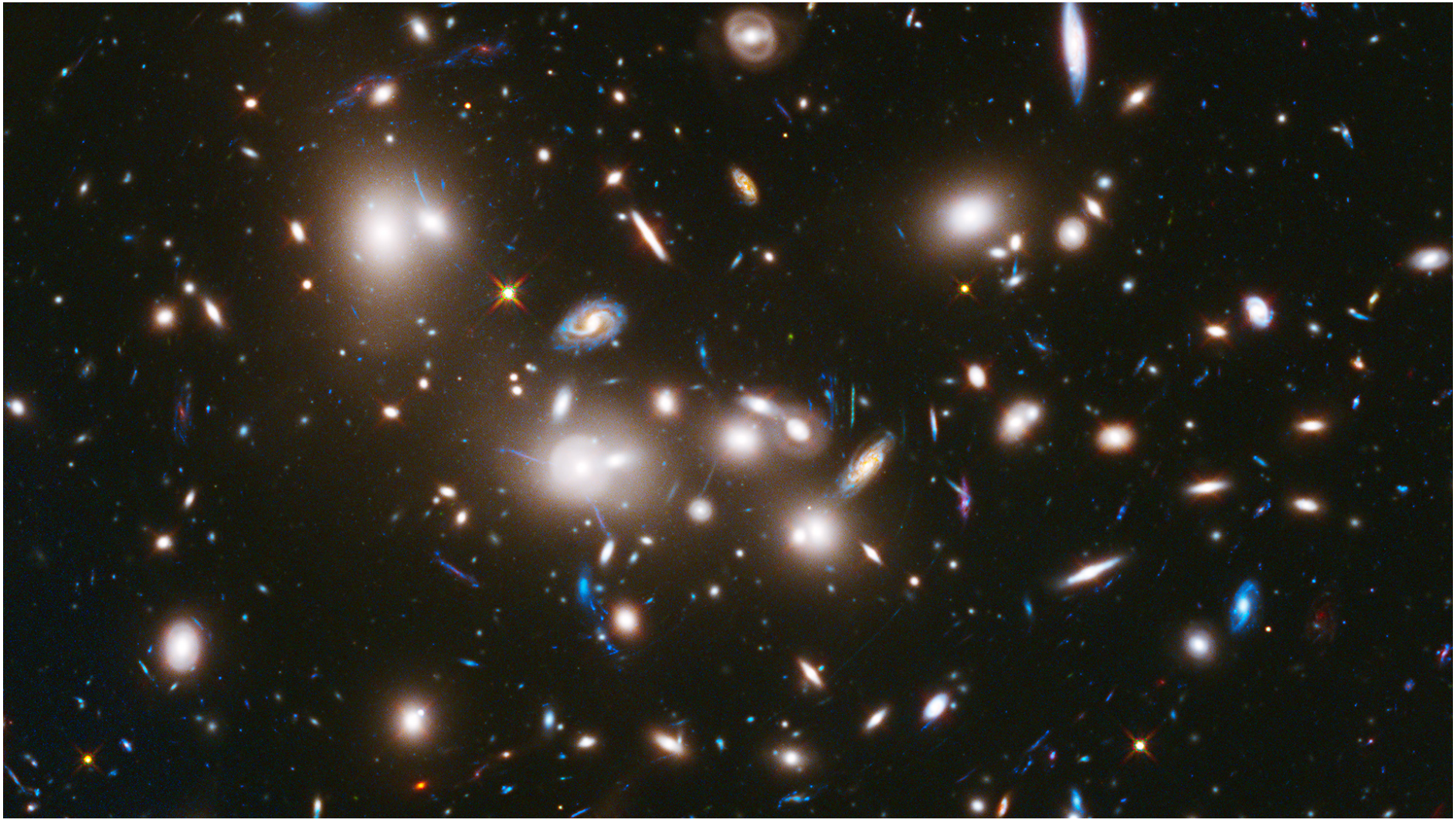
- bras d'une galaxie spirale = **région de densité plus élevée** ;
- **onde de densité** $\neq$ rotation (différentielle) des étoiles...
- $f < 0,000\,000\,001$ Hz (période $\sim$ 100 millions d'années ; $c \sim 200$ km/s).



(M101)

Cosmologie : étude de l'objet « Univers »

Univers $\neq$ univers **observable** $\sim 2\,000\,000\,000\,000$ galaxies (2×10^{12})



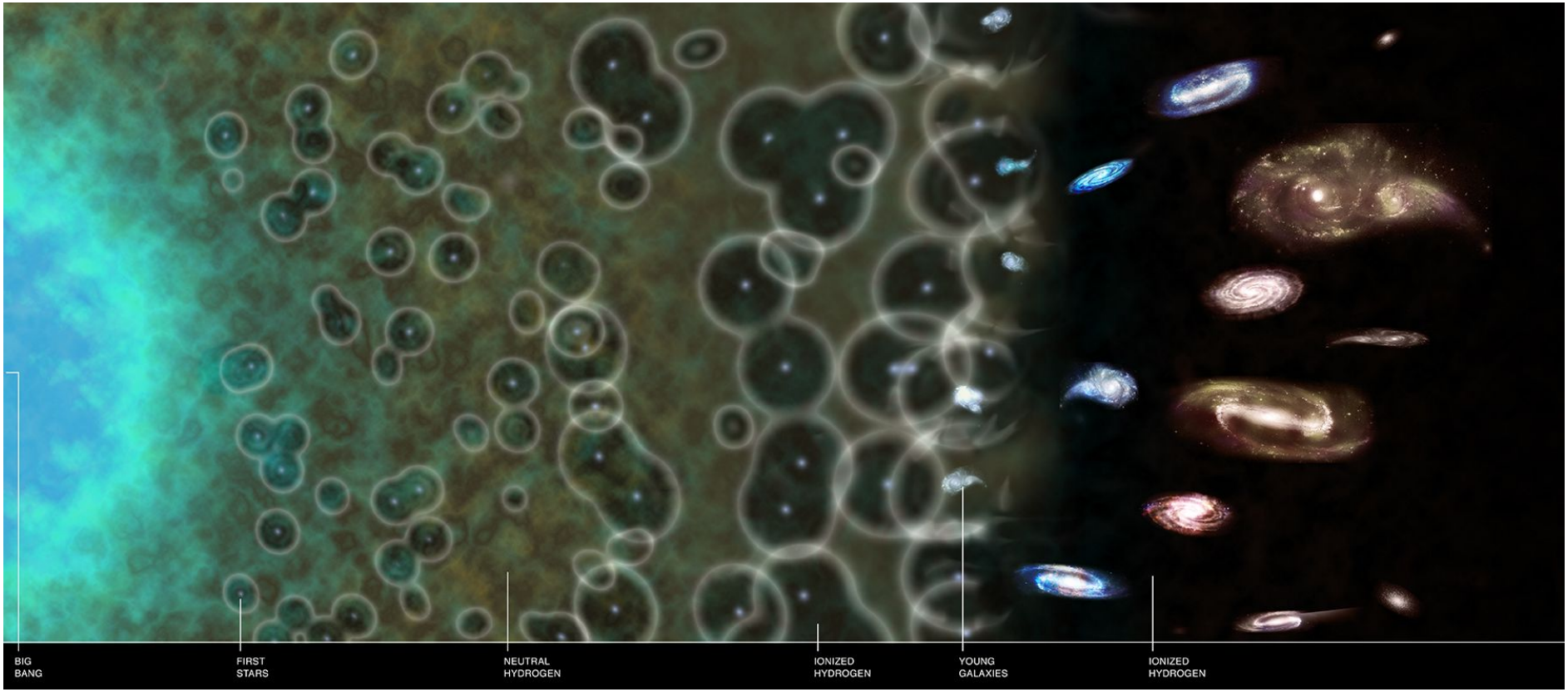
Cosmologie : étude de l'objet « Univers »

précision de la fraction du ciel visible sur la photo précédente (Hubble)



Un univers en évolution

- l'Univers a une histoire, il évolue
- la matière telle qu'on la connait existe depuis environ 13,7 milliards d'années (3 générations d'étoiles ?)



Soupe primordiale chaude et opaque

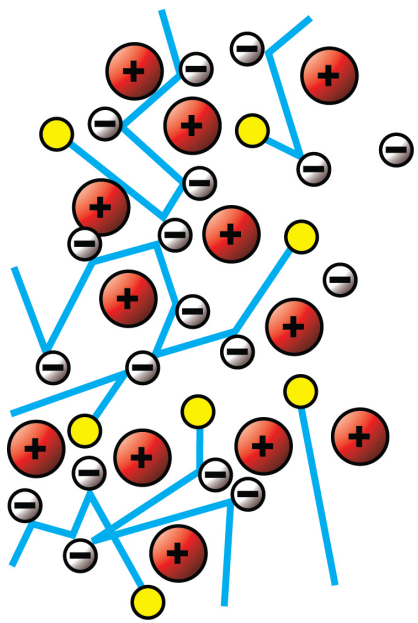
- **1948, Alpher, (Bethe) et Gamow** : étude de la « soupe primordiale » opaque et naissance des premiers atomes (calculs de **physique nucléaire**)
- expansion $\Longrightarrow$ refroidissement $\Longrightarrow$ soupe opaque avant la « **recombinaison** »
- regarder loin = voir le passé (vitesse de la lumière finie) $\Longrightarrow$ « frontière » au-delà de laquelle on ne voit plus (moment de la transparence) $\Longrightarrow$ univers observable sphérique et fini

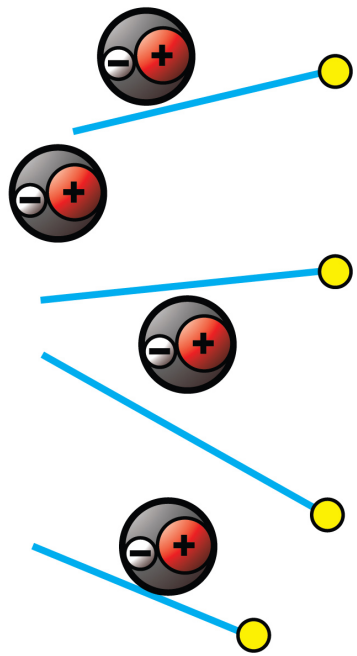
Soupe primordiale chaude et opaque

- **1948, Alpher, (Bethe) et Gamow** : étude de la « soupe primordiale » opaque et naissance des premiers atomes (calculs de **physique nucléaire**)
- expansion $\Longrightarrow$ refroidissement $\Longrightarrow$ soupe opaque avant la « **recombinaison** »
- regarder loin = voir le passé (vitesse de la lumière finie) $\Longrightarrow$ « frontière » au-delà de laquelle on ne voit plus (moment de la transparence) $\Longrightarrow$ univers observable sphérique et fini

Soupe primordiale chaude et opaque

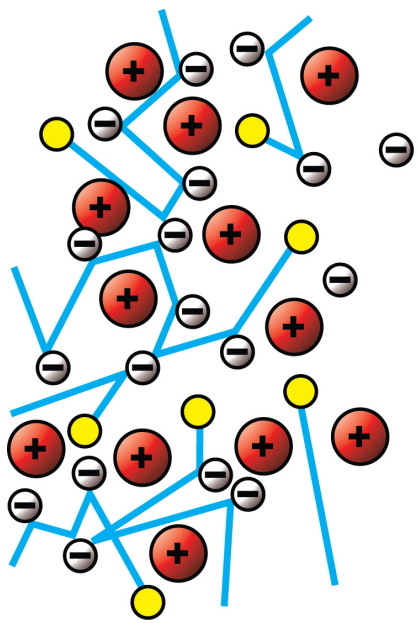
- **1948, Alpher, (Bethe) et Gamow** : étude de la « soupe primordiale » opaque et naissance des premiers atomes (calculs de **physique nucléaire**)
- expansion $\Longrightarrow$ refroidissement $\Longrightarrow$ soupe opaque avant la « **recombinaison** »
- regarder loin = voir le passé (vitesse de la lumière finie) $\Longrightarrow$ « frontière » au-delà de laquelle on ne voit plus (moment de la transparence) $\Longrightarrow$ univers observable sphérique et fini

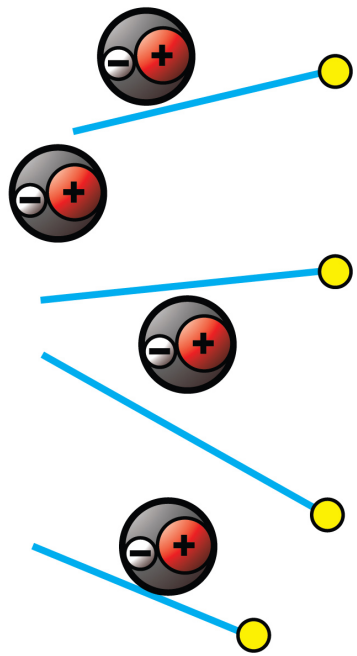




Soupe primordiale chaude et opaque

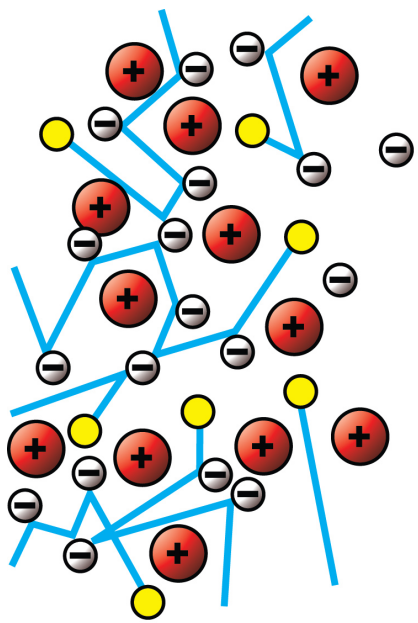
- **1948, Alpher, (Bethe) et Gamow** : étude de la « soupe primordiale » opaque et naissance des premiers atomes (calculs de **physique nucléaire**)
- expansion $\Longrightarrow$ refroidissement $\Longrightarrow$ soupe opaque avant la « **recombinaison** »
- regarder loin = voir le passé (vitesse de la lumière finie) $\Longrightarrow$ « frontière » au-delà de laquelle on ne voit plus (moment de la transparence) $\Longrightarrow$ univers observable sphérique et fini

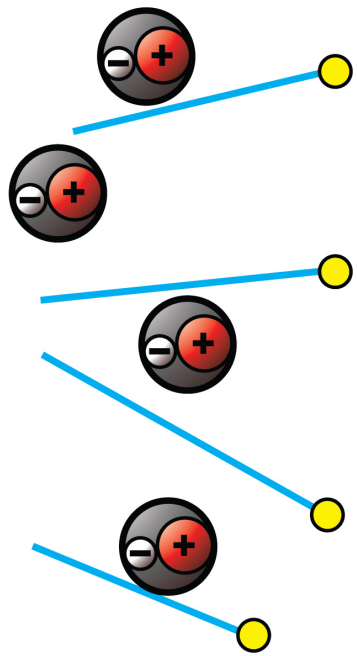




Soupe primordiale chaude et opaque

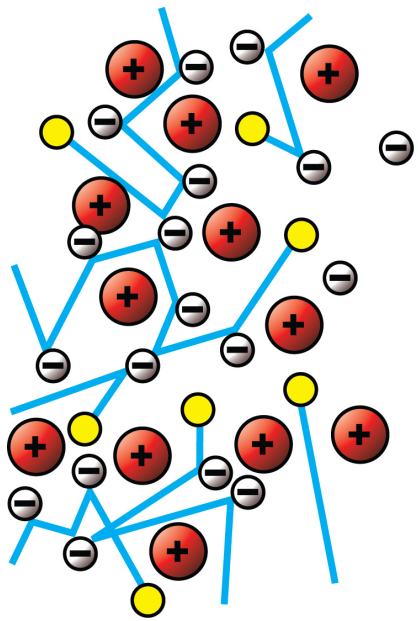
- **1948, Alpher, (Bethe) et Gamow** : étude de la « soupe primordiale » opaque et naissance des premiers atomes (calculs de **physique nucléaire**)
- expansion $\Longrightarrow$ refroidissement $\Longrightarrow$ soupe opaque avant la « **recombinaison** »
- regarder loin = voir le passé (vitesse de la lumière finie) $\Longrightarrow$ « frontière » au-delà de laquelle on ne voit plus (moment de la transparence) $\Longrightarrow$ univers observable sphérique et fini

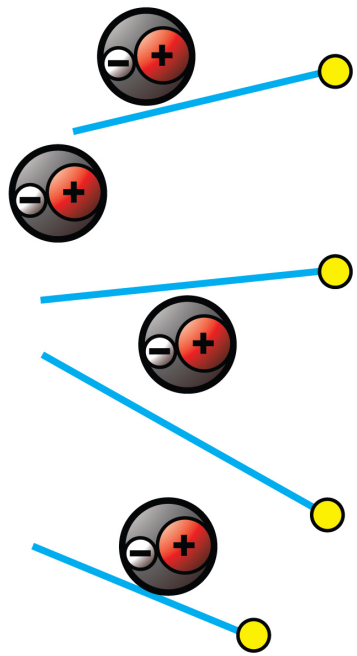




Soupe primordiale chaude et opaque

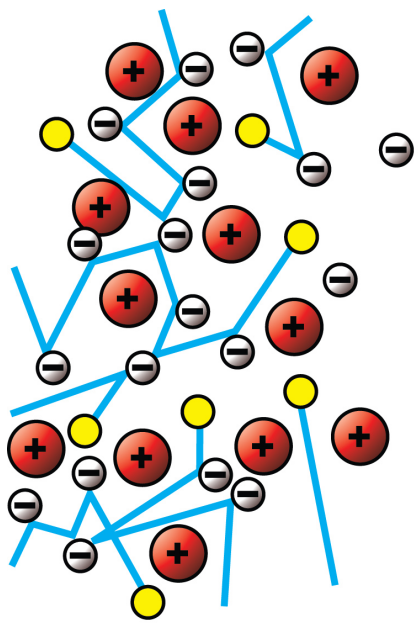
- **1948, Alpher, (Bethe) et Gamow** : étude de la « soupe primordiale » opaque et naissance des premiers atomes (calculs de **physique nucléaire**)
- expansion $\Longrightarrow$ refroidissement $\Longrightarrow$ soupe opaque avant la « **recombinaison** »
- regarder loin = voir le passé (vitesse de la lumière finie) $\Longrightarrow$ « frontière » au-delà de laquelle on ne voit plus (moment de la transparence) $\Longrightarrow$ univers observable sphérique et fini

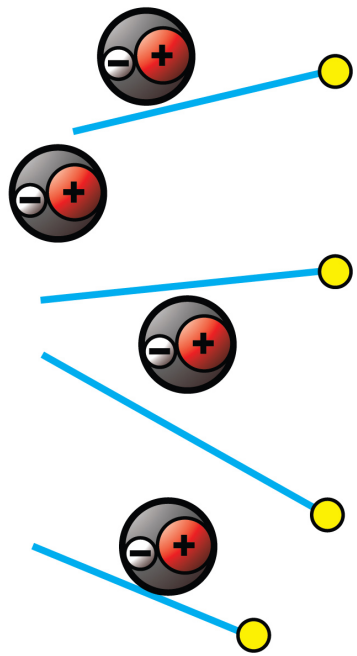




Soupe primordiale chaude et opaque

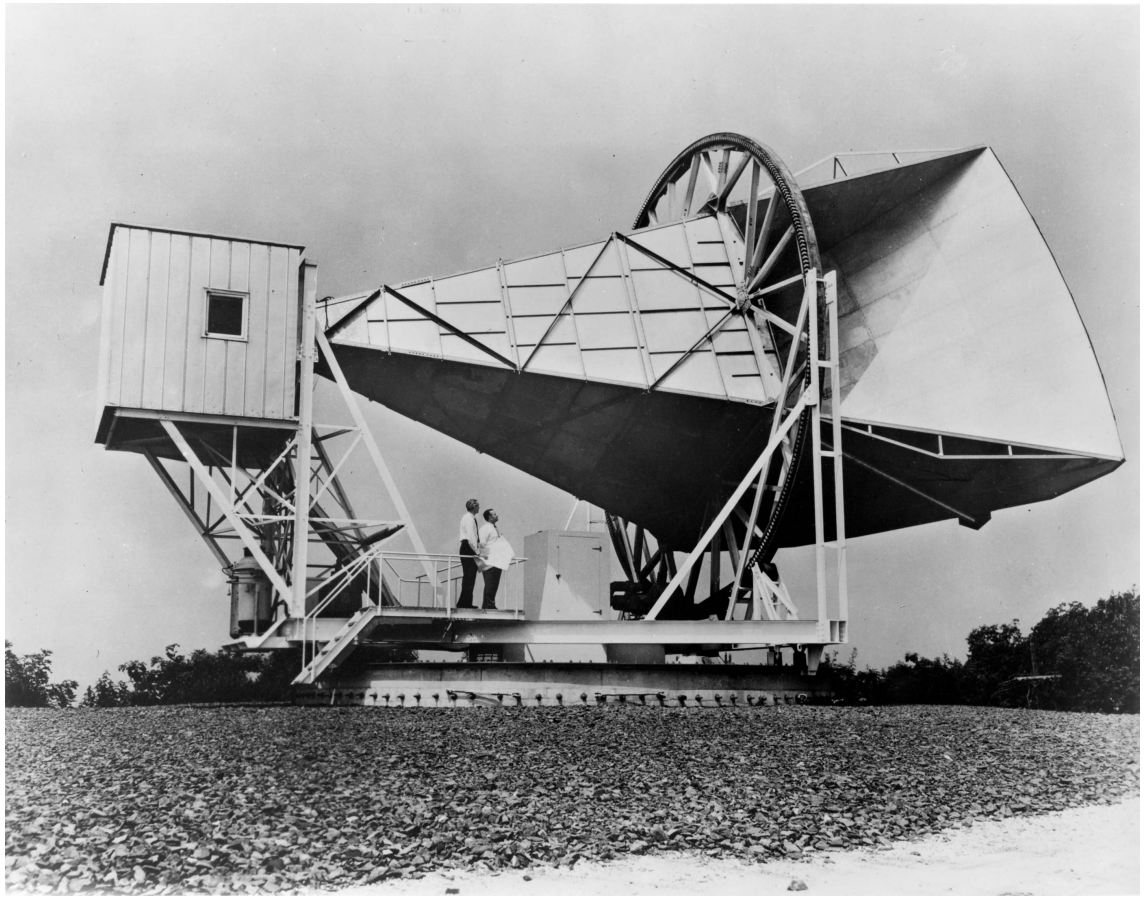
- **1948, Alpher, (Bethe) et Gamow** : étude de la « soupe primordiale » opaque et naissance des premiers atomes (calculs de **physique nucléaire**)
- expansion $\Longrightarrow$ refroidissement $\Longrightarrow$ soupe opaque avant la « **recombinaison** »
- regarder loin = voir le passé (vitesse de la lumière finie) $\Longrightarrow$ « frontière » au-delà de laquelle on ne voit plus (moment de la transparence) $\Longrightarrow$ univers observable sphérique et fini



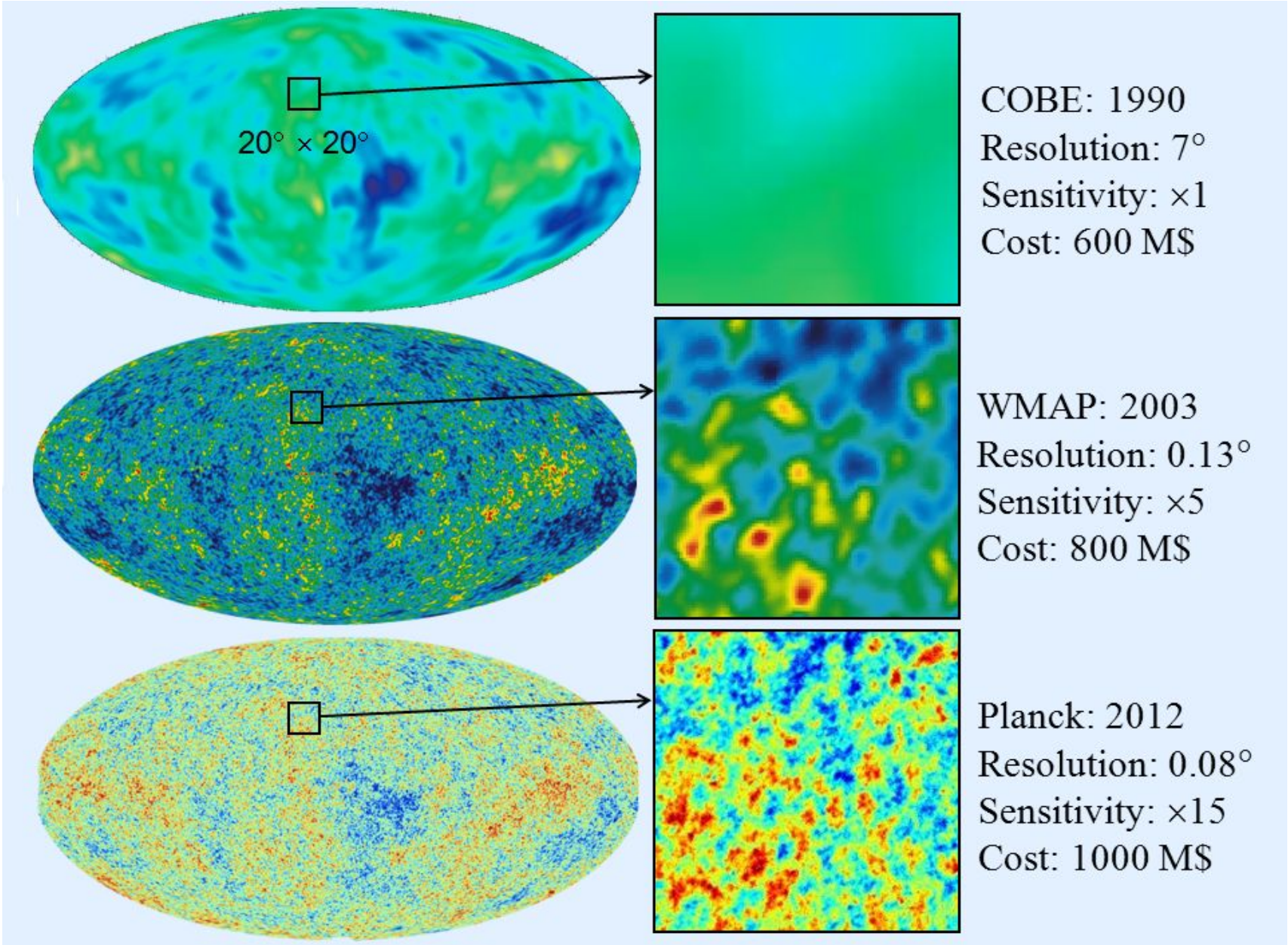


Observation de l'univers primordial

- lumière émise à la recombinaison : rayonnement de fond cosmologique (CMB, cosmic microwave background)
- **1964, Penzias et Wilson** : observation faite par hasard d'un rayonnement de fond micro-onde homogène $\Longrightarrow$ relique du passé dense et chaud de l'Univers

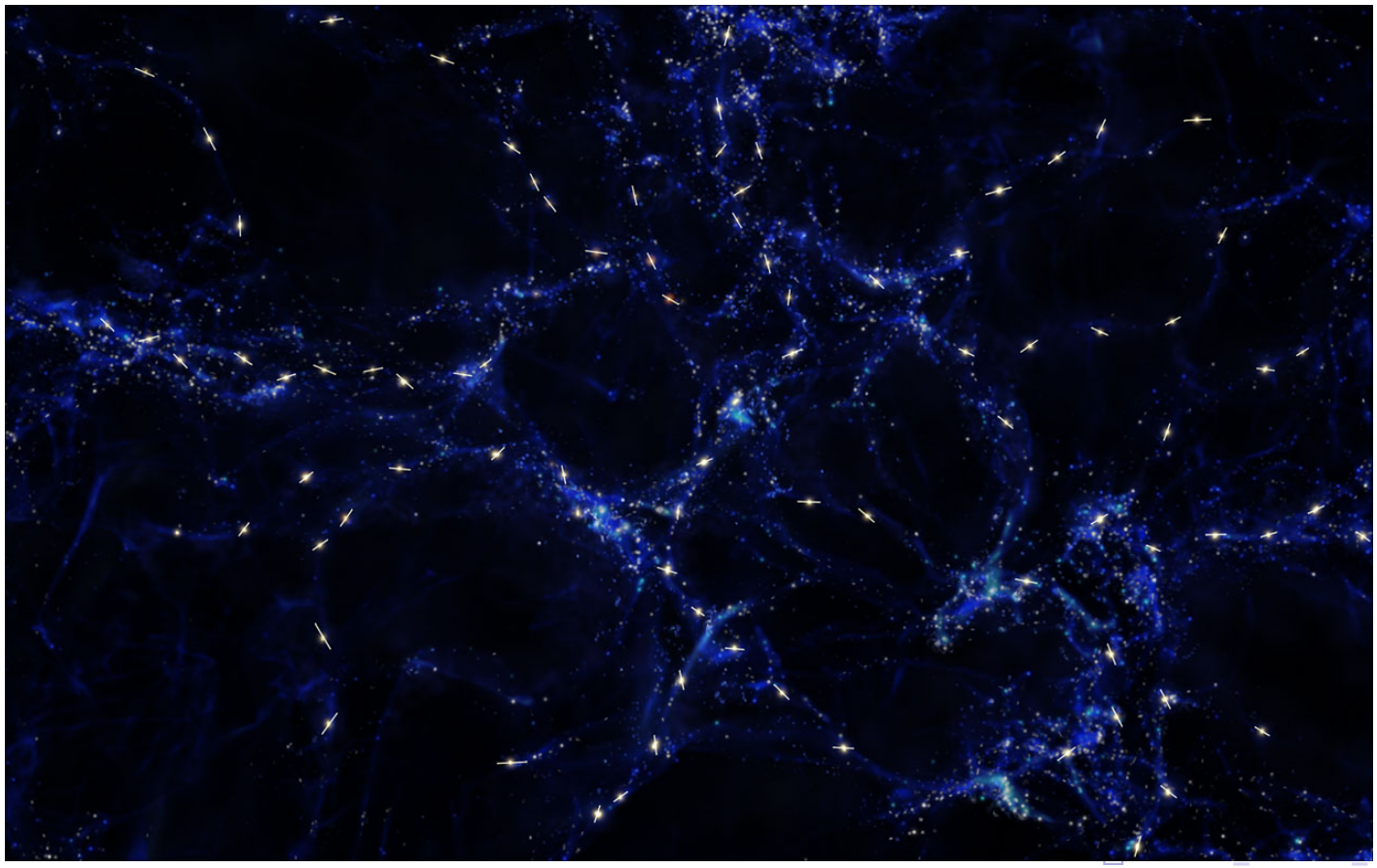


Analyse fine du rayonnement de fond



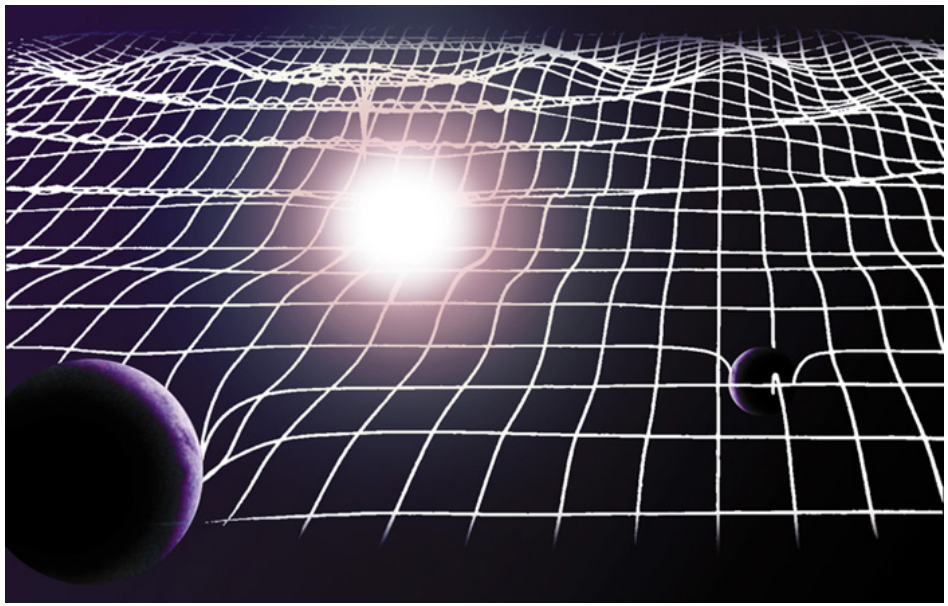
Du plus petit au plus grand...

- « grandes structures » (amas de galaxies, etc.) : bouillonnements de la soupe primordiale et d'ondes acoustiques étirées par l'expansion de l'Univers...
- **avant expansion** : $f < 0,000\,000\,000\,001$ Hz
  ($c \sim 200\,000$ km/s $\rightarrow \lambda \sim 10\,000$ années-lumière) ;
- **après expansion** : $\lambda \sim 500\,000\,000$ al.



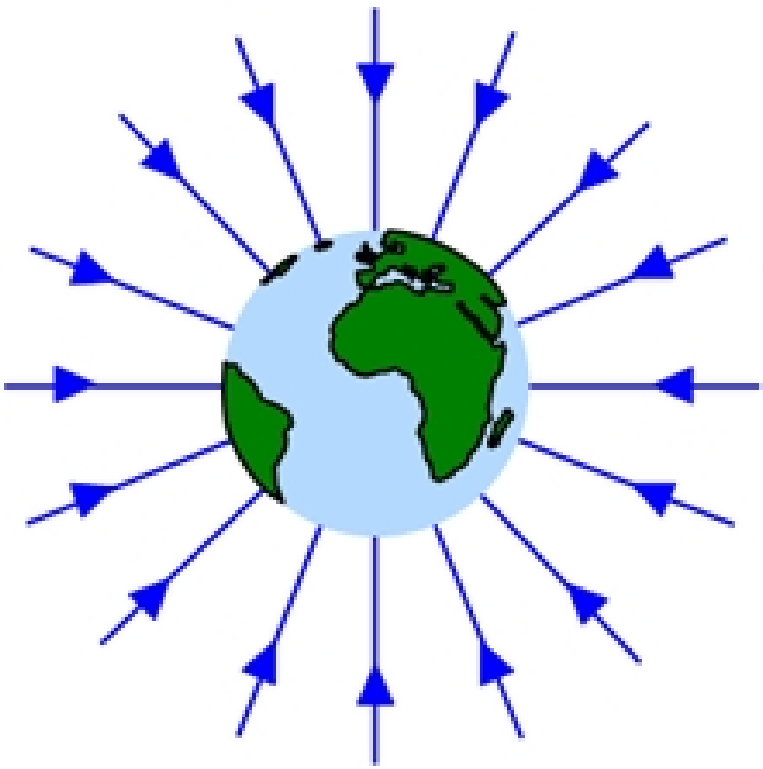
4

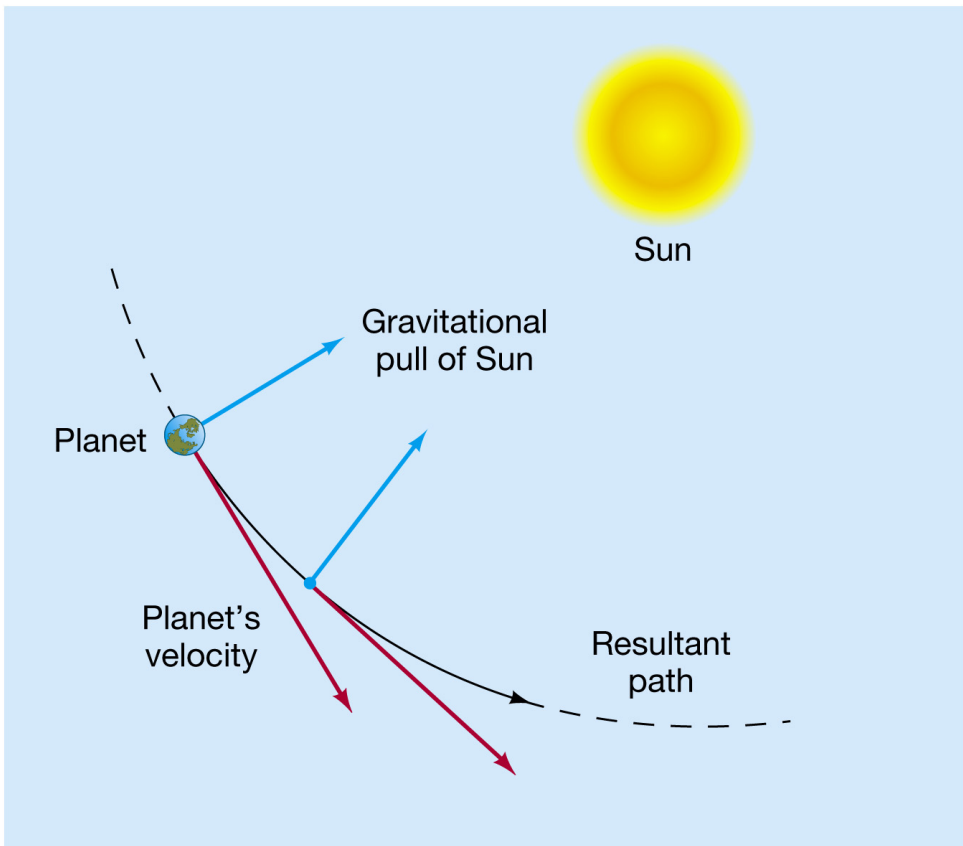
Ondes gravitationnelles



Gravitation universelle (Newton, 1687)

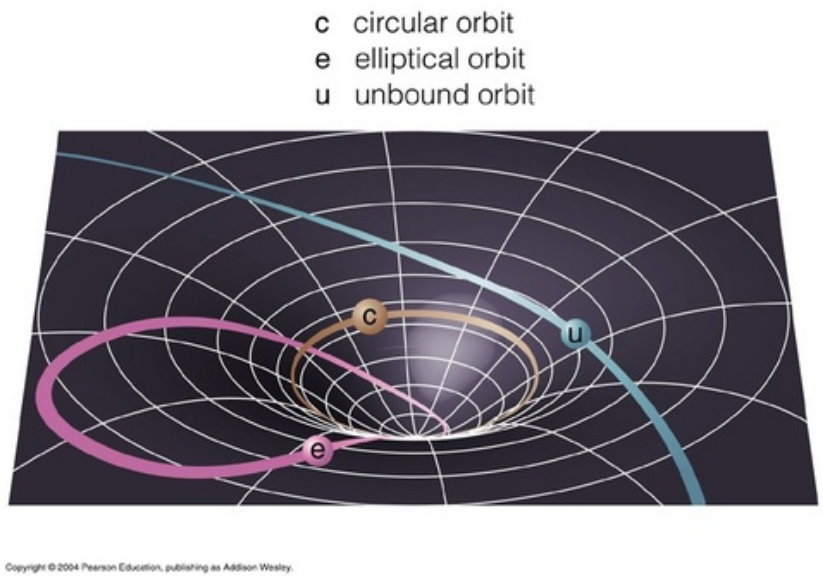
- force attractive agissant entre tous les corps $\rightarrow$ **champ gravitationnel** ;
- action instantanée à distance ;
- **orbite** = **compromis** entre ligne droite et chute (cf. principe d'inertie) ;
- **explication** des lois de Kepler, des marées ; **prédiction** du retour de la comète de Halley,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





Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

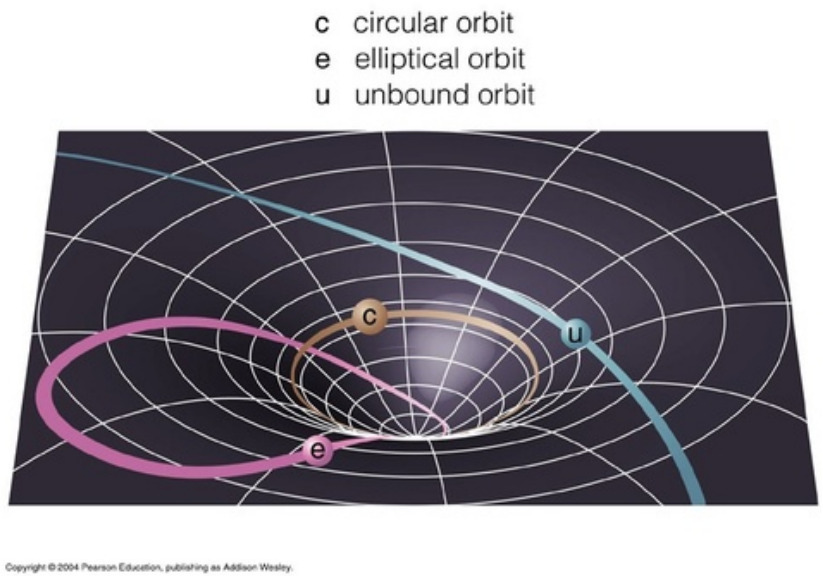
- besoin de modifier la théorie de Newton pour action à vitesse $\leq c$ (imposé par la **relativité restreinte**) ;
- idées :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre) ;
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ;
  - gravitation $\sim$ courbure 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.



exemples d'orbites dans un espace bidimensionnel courbe

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

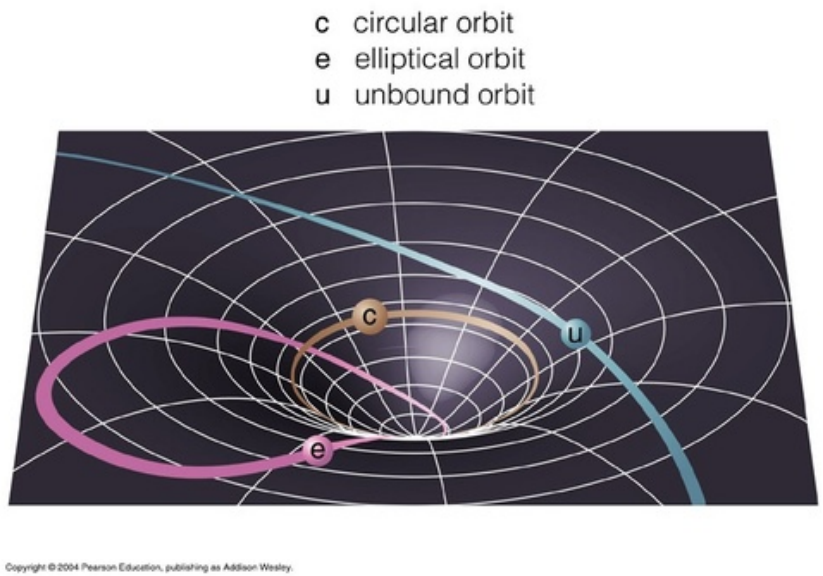
- besoin de modifier la théorie de Newton pour action à vitesse $\leq c$ (imposé par la **relativité restreinte**) ;
- **idées** :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre) ;
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ;
  - gravitation $\sim$ courbure 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.



exemples d'orbites dans un espace bidimensionnel courbe

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

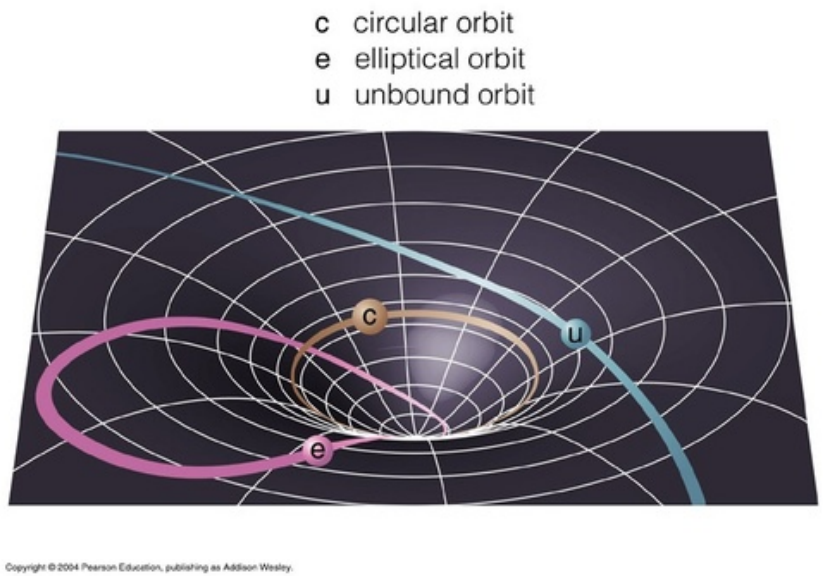
- besoin de modifier la théorie de Newton pour action à vitesse $\leq c$ (imposé par la **relativité restreinte**) ;
- **idées** :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre) ;
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ;
  - gravitation $\sim$ courbure 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.



exemples d'orbites dans un espace bidimensionnel courbe

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

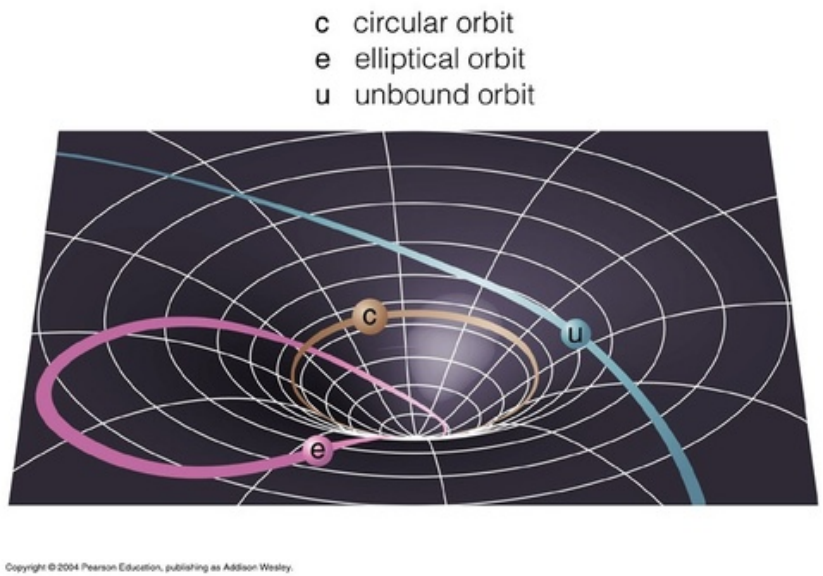
- besoin de modifier la théorie de Newton pour action à vitesse $\leq c$ (imposé par la **relativité restreinte**) ;
- **idées** :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre) ;
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ;
  - gravitation $\sim$ courbure 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.



exemples d'orbites dans un espace bidimensionnel courbe

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

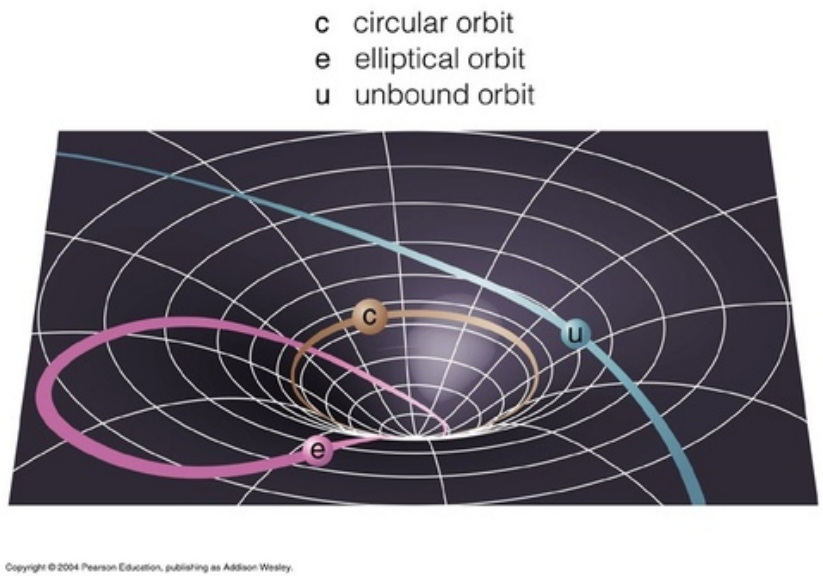
- besoin de modifier la théorie de Newton pour action à vitesse $\leq c$ (imposé par la **relativité restreinte**) ;
- **idées** :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre) ;
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ;
  - gravitation $\sim$ courbure 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.



exemples d'orbites dans un espace bidimensionnel courbe

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

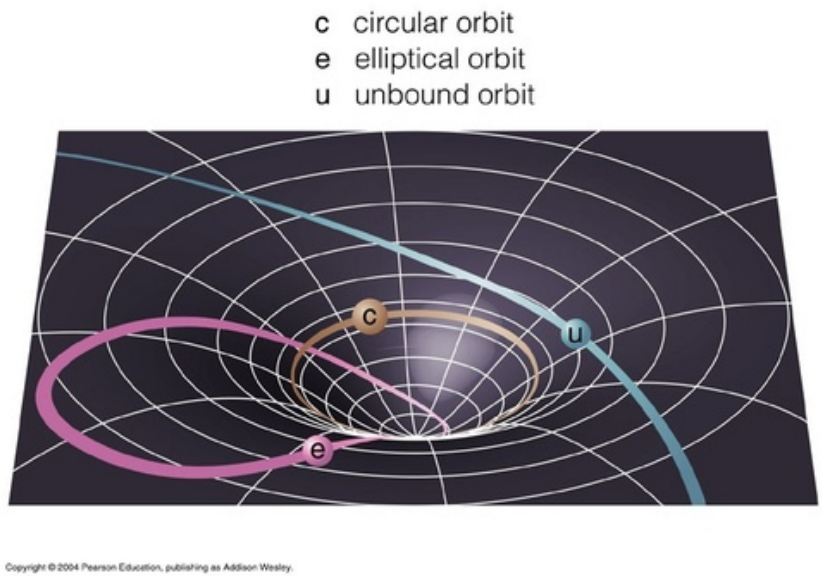
- besoin de modifier la théorie de Newton pour action à vitesse $\leq c$ (imposé par la **relativité restreinte**) ;
- **idées** :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre) ;
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ;
  - gravitation $\sim$ courbure 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.



exemples d'orbites dans un espace bidimensionnel courbe

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

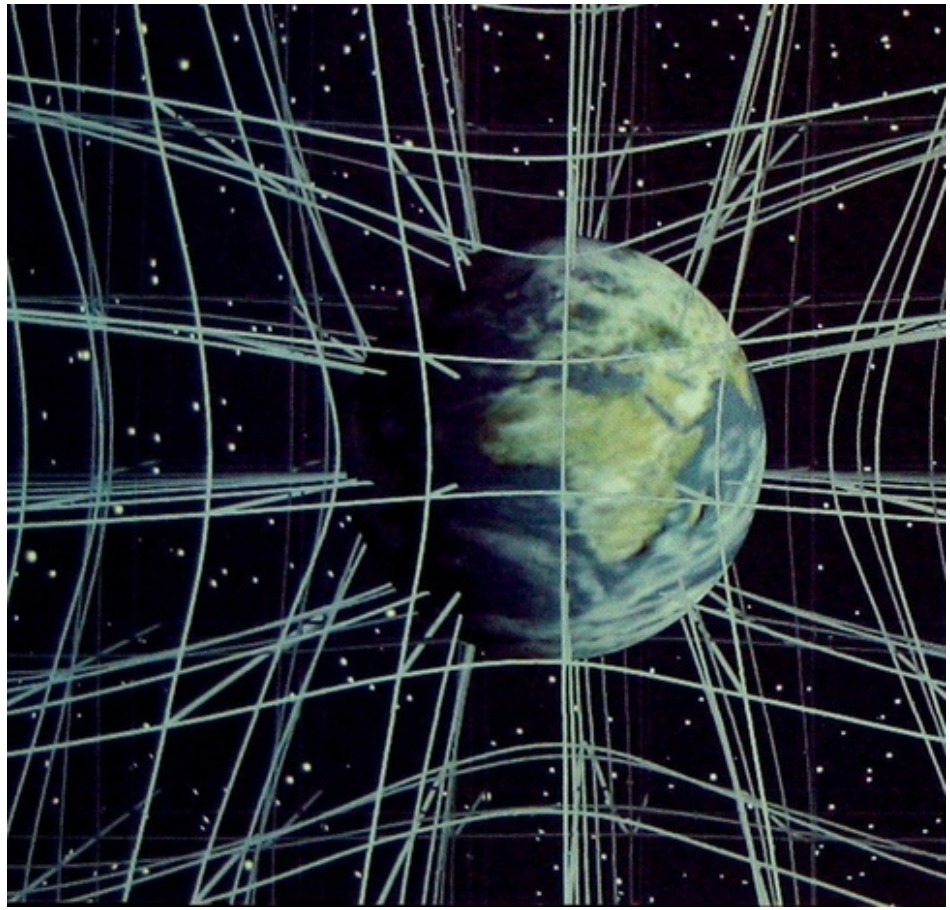
- besoin de modifier la théorie de Newton pour action à vitesse $\leq c$ (imposé par la **relativité restreinte**) ;
- **idées** :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre) ;
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ;
  - gravitation $\sim$ courbure 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.



exemples d'orbites dans un espace bidimensionnel courbe

Courbure de l'espace-temps

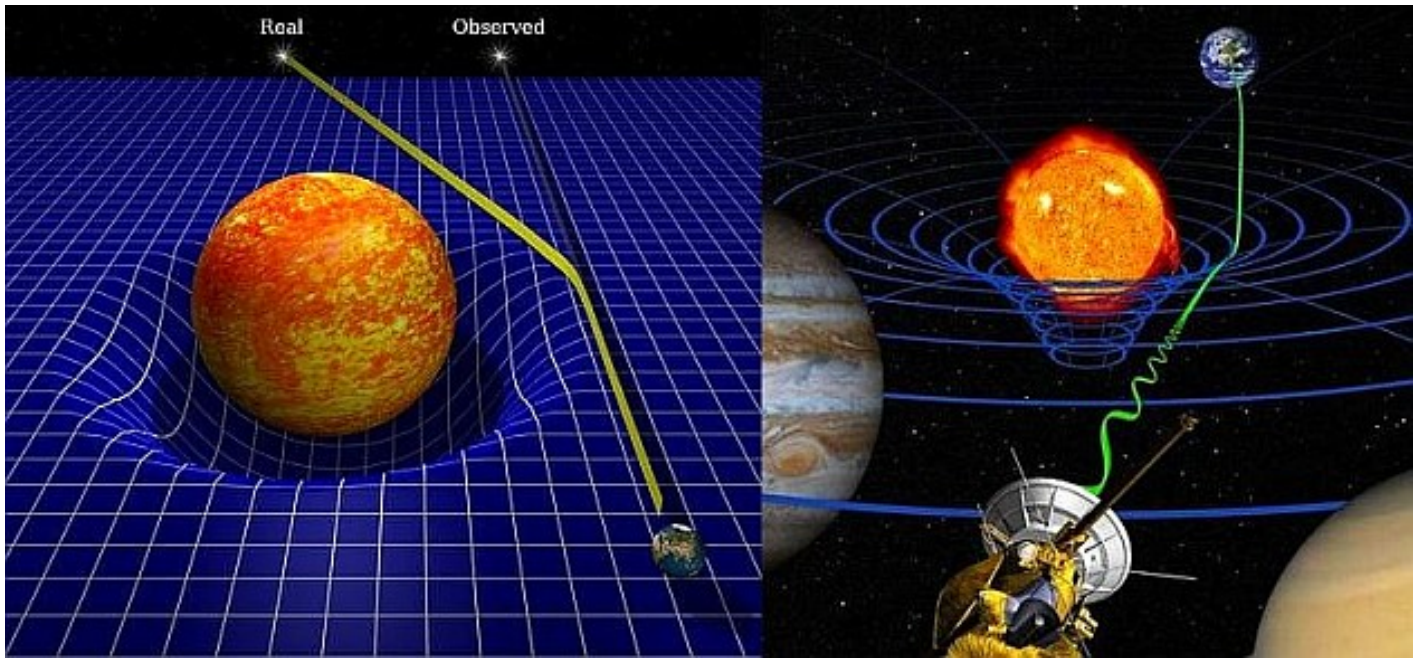
courbure temporelle : pieds vieillissent moins vite que tête (cf. **GPS**)...



visualisation tridimensionnelle de la courbure provoquée par la Terre

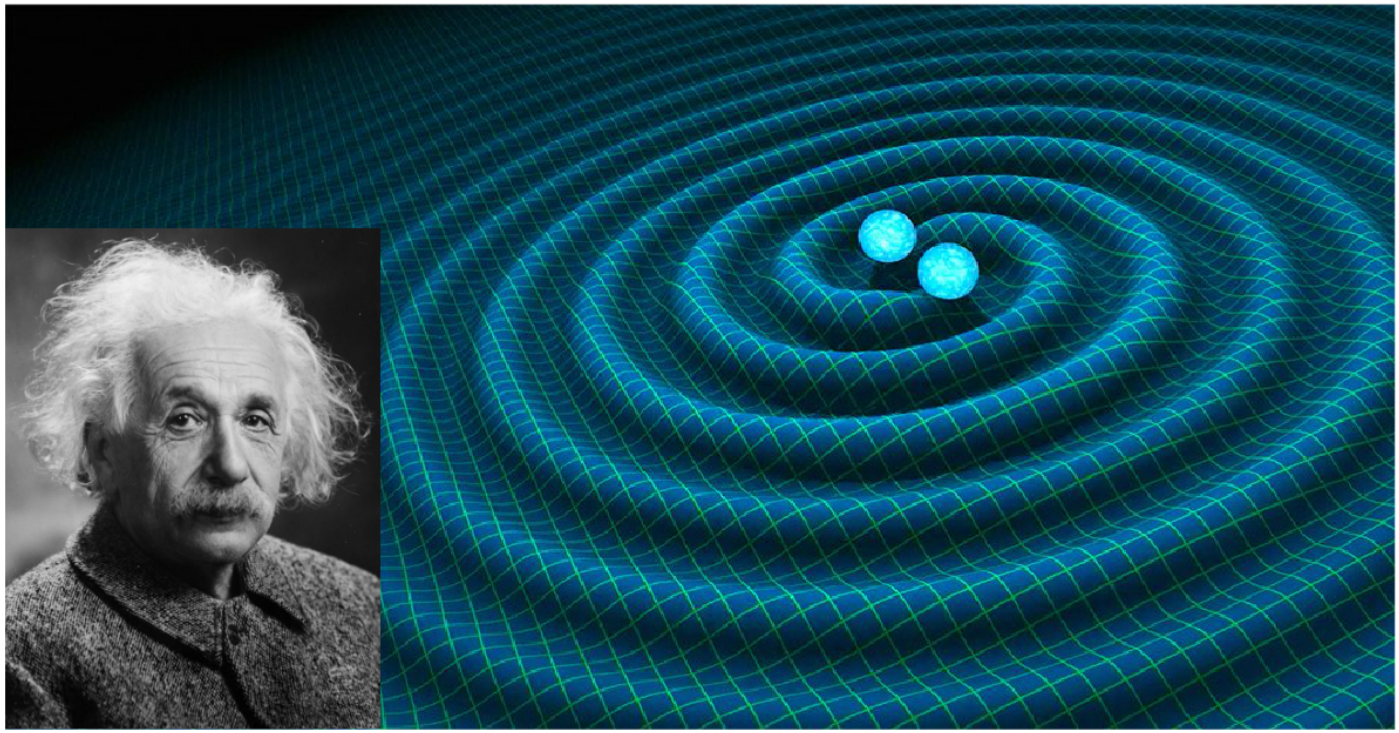
Tests de la relativité générale

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

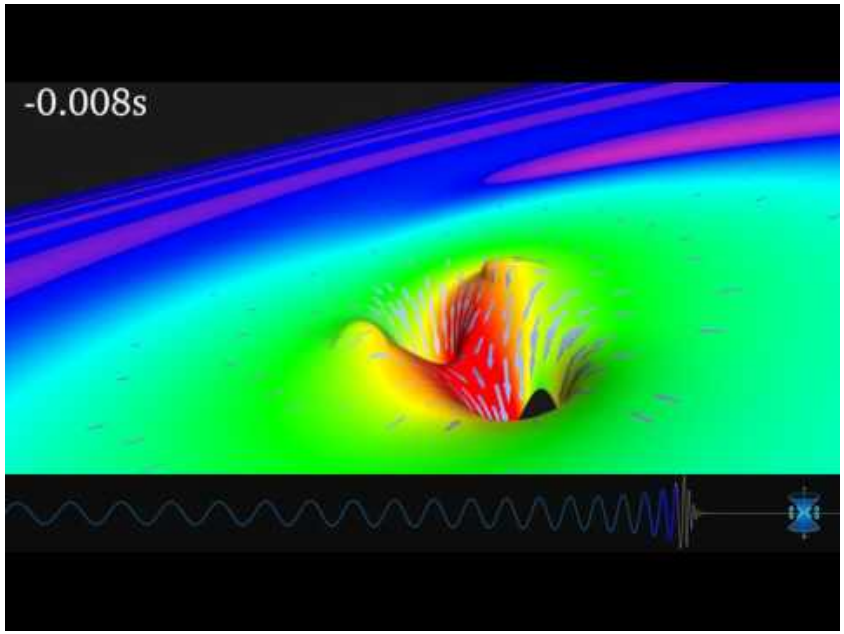


Rayonnement gravitationnel

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



Fusion de trous noirs et ondes gravitationnelles



- ondes gravitationnelles = vibrations de l'espace(-temps) ;
- émises par des événements violents (Univers primordial, fusion de **trous noirs**, etc.) ;
- première détection : **septembre 2015** (LIGO, États-Unis).

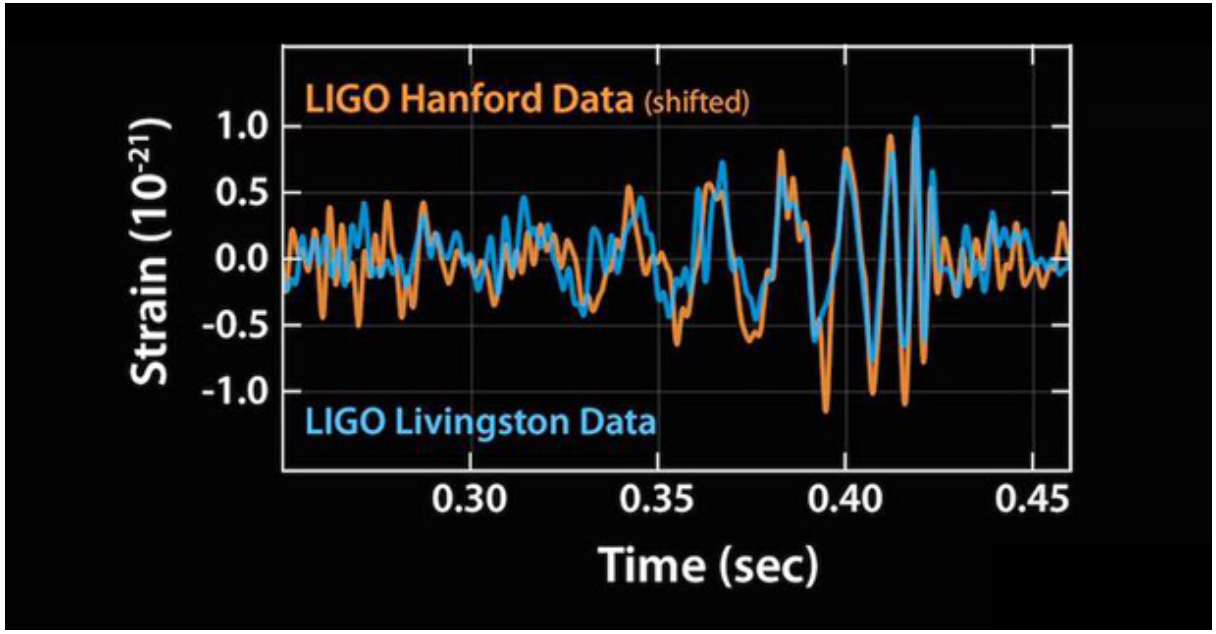
Analogie acoustique

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

$\rightarrow$ **perception non-directionnelle** ;

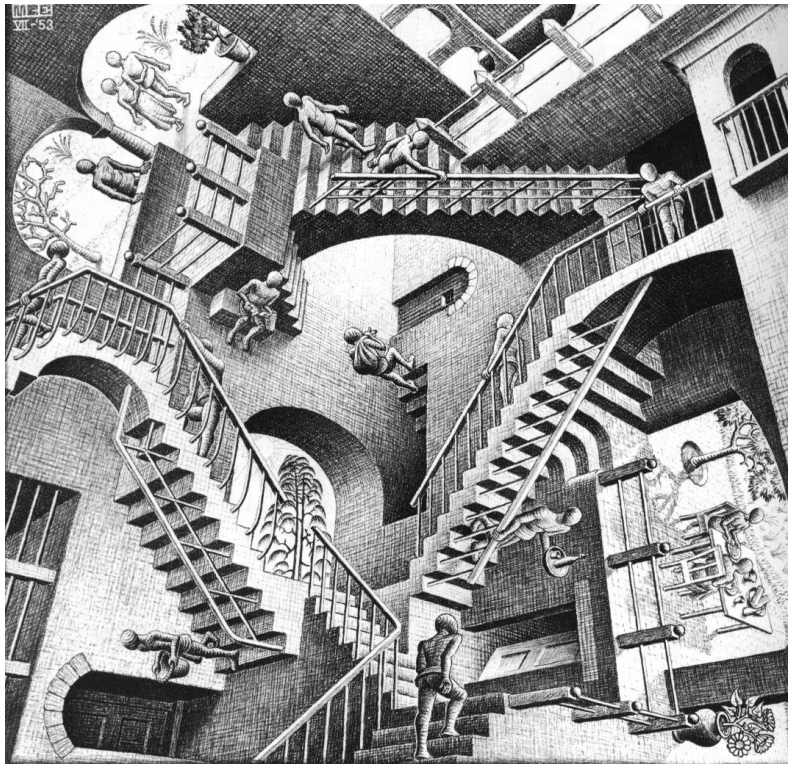
$\rightarrow$ signal reçu présenté comme un **son** et non une image ;

$\rightarrow$ détecteurs $\sim$ « sonophones gravitationnels ».



Conclusion

Écouter l'Univers...



Un Univers musical...

- Univers presque vide de matière → pas d'ondes sonores usuelles ($\lambda \sim$ cm) ;
- ondes de densité aux échelles cosmologiques ($\lambda \sim$ milliard d'années-lumière → amas de galaxies) ou galactiques (bras spiraux, $\lambda \sim$ 10 000 al) ;
- ondes gravitationnelles détectées près de **100 ans** après leur prédiction théorique → vibrations de l'espace-temps ;
- oscillations de divers objets astronomiques (étoiles, planètes, satellites, anneaux, etc.) à différentes échelles → ondes électromagnétiques traduites en sons (ex. : rayonnement radio) ;
- **Exemples non mentionnés ici** : vibrations de la soupe primordiale (rayonnement de fond cosmologique), rotation des pulsars ($\sim$ cadavres d'étoiles), radio-galaxies, etc. ;
- liens très forts entre oscillations aux échelles astronomiques/cosmologiques et physique subatomique

→ principe du paquet cadeau que l'on secoue avant de l'ouvrir...

Un Univers musical...

- Univers presque vide de matière $\rightarrow$ pas d'ondes sonores usuelles ($\lambda \sim$ cm) ;
- ondes de densité aux échelles cosmologiques ($\lambda \sim$ milliard d'années-lumière $\rightarrow$ amas de galaxies) ou galactiques (bras spiraux, $\lambda \sim$ 10 000 al) ;
- ondes gravitationnelles détectées près de **100 ans** après leur prédiction théorique $\rightarrow$ vibrations de l'espace-temps ;
- oscillations de divers objets astronomiques (étoiles, planètes, satellites, anneaux, etc.) à différentes échelles $\rightarrow$ ondes électromagnétiques traduites en sons (ex. : rayonnement radio) ;
- **Exemples non mentionnés ici** : vibrations de la soupe primordiale (rayonnement de fond cosmologique), rotation des pulsars ($\sim$ cadavres d'étoiles), radio-galaxies, etc. ;
- liens très forts entre oscillations aux échelles astronomiques/cosmologiques et physique subatomique

$\rightarrow$ principe du paquet cadeau que l'on secoue avant de l'ouvrir...

Un Univers musical...

- Univers presque vide de matière $\rightarrow$ pas d'ondes sonores usuelles ($\lambda \sim$ cm) ;
- ondes de densité aux échelles cosmologiques ($\lambda \sim$ milliard d'années-lumière $\rightarrow$ amas de galaxies) ou galactiques (bras spiraux, $\lambda \sim$ 10 000 al) ;
- ondes gravitationnelles détectées près de **100 ans** après leur prédiction théorique $\rightarrow$ vibrations de l'espace-temps ;
- oscillations de divers objets astronomiques (étoiles, planètes, satellites, anneaux, etc.) à différentes échelles $\rightarrow$ ondes électromagnétiques traduites en sons (ex. : rayonnement radio) ;
- **Exemples non mentionnés ici** : vibrations de la soupe primordiale (rayonnement de fond cosmologique), rotation des pulsars ($\sim$ cadavres d'étoiles), radio-galaxies, etc. ;
- liens très forts entre oscillations aux échelles astronomiques/cosmologiques et physique subatomique

$\rightarrow$ principe du paquet cadeau que l'on secoue avant de l'ouvrir...

Un Univers musical...

- Univers presque vide de matière $\rightarrow$ pas d'ondes sonores usuelles ($\lambda \sim$ cm) ;
- ondes de densité aux échelles cosmologiques ($\lambda \sim$ milliard d'années-lumière $\rightarrow$ amas de galaxies) ou galactiques (bras spiraux, $\lambda \sim$ 10 000 al) ;
- ondes gravitationnelles détectées près de **100 ans** après leur prédiction théorique $\rightarrow$ vibrations de l'espace-temps ;
- oscillations de divers objets astronomiques (étoiles, planètes, satellites, anneaux, etc.) à différentes échelles $\rightarrow$ ondes électromagnétiques traduites en sons (ex. : rayonnement radio) ;
- **Exemples non mentionnés ici** : vibrations de la soupe primordiale (rayonnement de fond cosmologique), rotation des pulsars ($\sim$ cadavres d'étoiles), radio-galaxies, etc. ;
- liens très forts entre oscillations aux échelles astronomiques/cosmologiques et physique subatomique

$\rightarrow$ principe du paquet cadeau que l'on secoue avant de l'ouvrir...

Un Univers musical...

- Univers presque vide de matière $\rightarrow$ pas d'ondes sonores usuelles ($\lambda \sim$ cm) ;
- ondes de densité aux échelles cosmologiques ($\lambda \sim$ milliard d'années-lumière $\rightarrow$ amas de galaxies) ou galactiques (bras spiraux, $\lambda \sim$ 10 000 al) ;
- ondes gravitationnelles détectées près de **100 ans** après leur prédiction théorique $\rightarrow$ vibrations de l'espace-temps ;
- oscillations de divers objets astronomiques (étoiles, planètes, satellites, anneaux, etc.) à différentes échelles $\rightarrow$ ondes électromagnétiques traduites en sons (ex. : rayonnement radio) ;
- **Exemples non mentionnés ici** : vibrations de la soupe primordiale (rayonnement de fond cosmologique), rotation des pulsars ($\sim$ cadavres d'étoiles), radio-galaxies, etc. ;
- liens très forts entre oscillations aux échelles astronomiques/cosmologiques et physique subatomique

$\rightarrow$ principe du paquet cadeau que l'on secoue avant de l'ouvrir...

Un Univers musical...

- Univers presque vide de matière $\rightarrow$ pas d'ondes sonores usuelles ($\lambda \sim$ cm) ;
- ondes de densité aux échelles cosmologiques ($\lambda \sim$ milliard d'années-lumière $\rightarrow$ amas de galaxies) ou galactiques (bras spiraux, $\lambda \sim$ 10 000 al) ;
- ondes gravitationnelles détectées près de **100 ans** après leur prédiction théorique $\rightarrow$ vibrations de l'espace-temps ;
- oscillations de divers objets astronomiques (étoiles, planètes, satellites, anneaux, etc.) à différentes échelles $\rightarrow$ ondes électromagnétiques traduites en sons (ex. : rayonnement radio) ;
- **Exemples non mentionnés ici** : vibrations de la soupe primordiale (rayonnement de fond cosmologique), rotation des pulsars ($\sim$ cadavres d'étoiles), radio-galaxies, etc. ;
- liens très forts entre oscillations aux échelles astronomiques/cosmologiques et physique subatomique

$\rightarrow$ principe du paquet cadeau que l'on secoue avant de l'ouvrir...

Un Univers musical...

- Univers presque vide de matière $\rightarrow$ pas d'ondes sonores usuelles ($\lambda \sim$ cm) ;
- ondes de densité aux échelles cosmologiques ($\lambda \sim$ milliard d'années-lumière $\rightarrow$ amas de galaxies) ou galactiques (bras spiraux, $\lambda \sim$ 10 000 al) ;
- ondes gravitationnelles détectées près de **100 ans** après leur prédiction théorique $\rightarrow$ vibrations de l'espace-temps ;
- oscillations de divers objets astronomiques (étoiles, planètes, satellites, anneaux, etc.) à différentes échelles $\rightarrow$ ondes électromagnétiques traduites en sons (ex. : rayonnement radio) ;
- **Exemples non mentionnés ici** : vibrations de la soupe primordiale (rayonnement de fond cosmologique), rotation des pulsars ($\sim$ cadavres d'étoiles), radio-galaxies, etc. ;
- liens très forts entre oscillations aux échelles astronomiques/cosmologiques et physique subatomique

$\rightarrow$ principe du paquet cadeau que l'on secoue avant de l'ouvrir...