Les trous noirs : de l'idée théorique aux observations actuelles... et au-delà...

Loïc Villain

Institut Denis Poisson (IDP), Université de Tours
loic@lmpt.univ-tours.fr

Image : Jean-Alain Marck, Paris-Meudon Observatory, 1992

Êtres mythologiques

- nom accrocheur (inventé vers **1967**)
- vedettes de la **SF**
- effrayants et captivants : **aspirateurs** de l'Univers ? le Soleil peut-il devenir un trou noir ? que se passe-t-il si on tombe dedans ?

Objets astrophysiques « ordinaires »

- inévitable destin des étoiles les plus massives
- présents au cœur des galaxies
- observés : *indirectement* depuis quelques décennies, *directement* depuis peu

Laboratoires pour la physique théorique

- les comprendre implique maîtriser quasiment tous les domaines de la physique et en particulier la nature de l'espace-temps
- au cœur de la physique des hautes énergies moderne

Êtres mythologiques

- nom accrocheur (inventé vers **1967**)
- vedettes de la **SF**
- effrayants et captivants : **aspirateurs** de l'Univers ? le Soleil peut-il devenir un trou noir ? que se passe-t-il si on tombe dedans ?

Objets astrophysiques « ordinaires »

- inévitable destin des étoiles les plus massives
- présents au cœur des galaxies
- observés : *indirectement* depuis quelques décennies, *directement* depuis peu

Laboratoires pour la physique théorique

- les comprendre implique maîtriser quasiment tous les domaines de la physique et en particulier la nature de l'espace-temps
- au cœur de la physique des hautes énergies moderne

Êtres mythologiques

- nom accrocheur (inventé vers **1967**)
- vedettes de la **SF**
- effrayants et captivants : **aspirateurs** de l'Univers ? le Soleil peut-il devenir un trou noir ? que se passe-t-il si on tombe dedans ?

Objets astrophysiques « ordinaires »

- inévitable destin des étoiles les plus massives
- présents au cœur des galaxies
- observés : *indirectement* depuis quelques décennies, *directement* depuis peu

Laboratoires pour la physique théorique

- les comprendre implique maîtriser quasiment tous les domaines de la physique et en particulier la nature de l'espace-temps
- au cœur de la physique des hautes énergies moderne

Êtres mythologiques

- nom accrocheur (inventé vers **1967**)
- vedettes de la **SF**
- effrayants et captivants : **aspirateurs** de l'Univers ? le Soleil peut-il devenir un trou noir ? que se passe-t-il si on tombe dedans ?

Objets astrophysiques « ordinaires »

- inévitable destin des étoiles les plus massives
- présents au cœur des galaxies
- observés : *indirectement* depuis quelques décennies, *directement* depuis peu

Laboratoires pour la physique théorique

- les comprendre implique maîtriser quasiment tous les domaines de la physique et en particulier la nature de l'espace-temps
- au cœur de la physique des hautes énergies moderne

Êtres mythologiques

- nom accrocheur (inventé vers **1967**)
- vedettes de la **SF**
- effrayants et captivants : **aspirateurs** de l'Univers ? le Soleil peut-il devenir un trou noir ? que se passe-t-il si on tombe dedans ?

Objets astrophysiques « ordinaires »

- inévitable destin des étoiles les plus massives
- présents au cœur des galaxies
- observés : *indirectement* depuis quelques décennies, *directement* depuis peu

Laboratoires pour la physique théorique

- les comprendre implique maîtriser quasiment tous les domaines de la physique et en particulier la nature de l'espace-temps
- au cœur de la physique des hautes énergies moderne

Êtres mythologiques

- nom accrocheur (inventé vers **1967**)
- vedettes de la **SF**
- effrayants et captivants : **aspirateurs** de l'Univers ? le Soleil peut-il devenir un trou noir ? que se passe-t-il si on tombe dedans ?

Objets astrophysiques « ordinaires »

- inévitable destin des étoiles les plus massives
- présents au cœur des galaxies
- observés : *indirectement* depuis quelques décennies, *directement* depuis peu

Laboratoires pour la physique théorique

- les comprendre implique maîtriser quasiment tous les domaines de la physique et en particulier la nature de l'espace-temps
- au cœur de la physique des hautes énergies moderne

Êtres mythologiques

- nom accrocheur (inventé vers **1967**)
- vedettes de la **SF**
- effrayants et captivants : **aspirateurs** de l'Univers ? le Soleil peut-il devenir un trou noir ? que se passe-t-il si on tombe dedans ?

Objets astrophysiques « ordinaires »

- inévitable destin des étoiles les plus massives
- présents au cœur des galaxies
- observés : *indirectement* depuis quelques décennies, *directement* depuis peu

Laboratoires pour la physique théorique

- les comprendre implique maîtriser quasiment tous les domaines de la physique et en particulier la nature de l'espace-temps
- au cœur de la physique des hautes énergies moderne

Êtres mythologiques

- nom accrocheur (inventé vers **1967**)
- vedettes de la **SF**
- effrayants et captivants : **aspirateurs** de l'Univers ? le Soleil peut-il devenir un trou noir ? que se passe-t-il si on tombe dedans ?

Objets astrophysiques « ordinaires »

- inévitable destin des étoiles les plus massives
- présents au cœur des galaxies
- observés : *indirectement* depuis quelques décennies, *directement* depuis peu

Laboratoires pour la physique théorique

- les comprendre implique maîtriser quasiment tous les domaines de la physique et en particulier la nature de l'espace-temps
- au cœur de la physique des hautes énergies moderne

Les trous noirs : des cadavres stellaires exotiques

- cadavres : restes d'étoiles **massives**
  - étoile progénitrice : masse au moins égale à **10 masses solaires** ($M_\odot$)
  - résidu central d'une **supernova gravitationnelle**
- exotique : propriétés extrêmes parfois **exagérées** (trous noirs $\neq$ aspirateurs cosmiques)
- inclus dans la catégorie des objets astrophysiques compacts :
  - rapport masse/taille élevé ($\neq$ **masse volumique** ou densité)
  - relativité générale joue un rôle-clef dans leurs propriétés

La nébuleuse du Crabe :

en radio (VLA)

en infrarouge (Spitzer)

dans le visible (Hubble)

en ultraviolet (XMM-Newton)

et en X (Chandra)

Les trous noirs : des cadavres stellaires exotiques

- cadavres : restes d'étoiles **massives**
  - étoile progénitrice : masse au moins égale à **10 masses solaires** ($M_\odot$)
  - résidu central d'une **supernova gravitationnelle**
- exotique : propriétés extrêmes parfois **exagérées** (trous noirs $\neq$ aspirateurs cosmiques)
- inclus dans la catégorie des objets astrophysiques compacts :
  - rapport masse/taille élevé ($\neq$ **masse volumique** ou densité)
  - relativité générale joue un rôle-clef dans leurs propriétés

La nébuleuse du Crabe :

en radio (VLA)

en infrarouge (Spitzer)

dans le visible (Hubble)

en ultraviolet (XMM-Newton)

et en X (Chandra)

Les trous noirs : des cadavres stellaires exotiques

- cadavres : restes d'étoiles **massives**
  - étoile progénitrice : masse au moins égale à **10 masses solaires** ($M_\odot$)
  - résidu central d'une **supernova gravitationnelle**
- exotique : propriétés extrêmes parfois **exagérées** (trous noirs $\neq$ aspirateurs cosmiques)
- inclus dans la catégorie des objets astrophysiques compacts :
  - rapport masse/taille élevé ($\neq$ **masse volumique** ou densité)
  - relativité générale joue un rôle-clef dans leurs propriétés

La nébuleuse du Crabe :

en radio (VLA)

en infrarouge (Spitzer)

dans le visible (Hubble)

en ultraviolet (XMM-Newton)

et en X (Chandra)

Les trous noirs : des cadavres stellaires exotiques

- cadavres : restes d'étoiles **massives**
  - étoile progénitrice : masse au moins égale à **10 masses solaires** ($M_\odot$)
  - résidu central d'une **supernova gravitationnelle**
- exotique : propriétés extrêmes parfois **exagérées** (trous noirs $\neq$ aspirateurs cosmiques)
- inclus dans la catégorie des objets astrophysiques compacts :
  - rapport masse/taille élevé ($\neq$ **masse volumique** ou densité)
  - relativité générale joue un rôle-clef dans leurs propriétés

La nébuleuse du Crabe :

en radio (VLA)

en infrarouge (Spitzer)

dans le visible (Hubble)

en ultraviolet (XMM-Newton)

et en X (Chandra)

Les trous noirs : des cadavres stellaires exotiques

- cadavres : restes d'étoiles **massives**
  - étoile progénitrice : masse au moins égale à **10 masses solaires** ($M_\odot$)
  - résidu central d'une **supernova gravitationnelle**
- exotique : propriétés extrêmes parfois **exagérées** (trous noirs $\neq$ aspirateurs cosmiques)
- inclus dans la catégorie des objets astrophysiques compacts :
  - rapport masse/taille élevé ($\neq$ **masse volumique** ou **densité**)
  - relativité générale joue un rôle-clef dans leurs propriétés

La nébuleuse du Crabe :

en radio (VLA)

en infrarouge (Spitzer)

dans le visible (Hubble)

en ultraviolet (XMM-Newton)

et en X (Chandra)

Les trous noirs : des cadavres stellaires exotiques

- cadavres : restes d'étoiles **massives**
  - étoile progénitrice : masse au moins égale à **10 masses solaires** ($M_\odot$)
  - résidu central d'une **supernova gravitationnelle**
- exotique : propriétés extrêmes parfois **exagérées** (trous noirs $\neq$ aspirateurs cosmiques)
- inclus dans la catégorie des objets astrophysiques compacts :
  - rapport masse/taille élevé ($\neq$ **masse volumique** ou **densité**)
  - relativité générale joue un rôle-clef dans leurs propriétés

La nébuleuse du Crabe :

en radio (VLA)

en infrarouge (Spitzer)

dans le visible (Hubble)

en ultraviolet (XMM-Newton)

et en X (Chandra)

Les trous noirs : des cadavres stellaires exotiques

- cadavres : restes d'étoiles **massives**
  - étoile progénitrice : masse au moins égale à **10 masses solaires** ($M_\odot$)
  - résidu central d'une **supernova gravitationnelle**
- exotique : propriétés extrêmes parfois **exagérées** (trous noirs $\neq$ aspirateurs cosmiques)
- inclus dans la catégorie des objets astrophysiques compacts :
  - rapport masse/taille élevé ($\neq$ **masse volumique** ou **densité**)
  - relativité générale joue un rôle-clef dans leurs propriétés

La nébuleuse du Crabe :

en radio (VLA)

en infrarouge (Spitzer)

dans le visible (Hubble)

en ultraviolet (XMM-Newton)

et en X (Chandra)

Outline

Prélude : lumière et gravitation

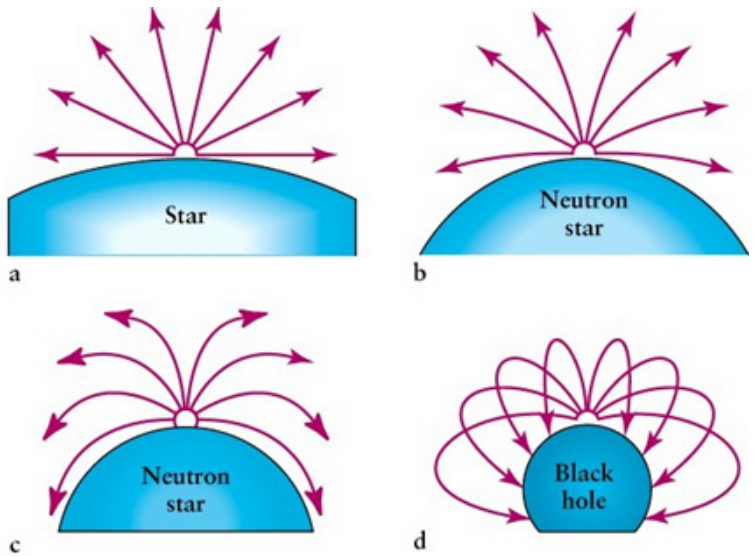
La découverte des objets astrophysiques compacts

Évolution stellaire et naissance d'objets compacts

Trous noirs

Conclusion

I : lumière et gravitation

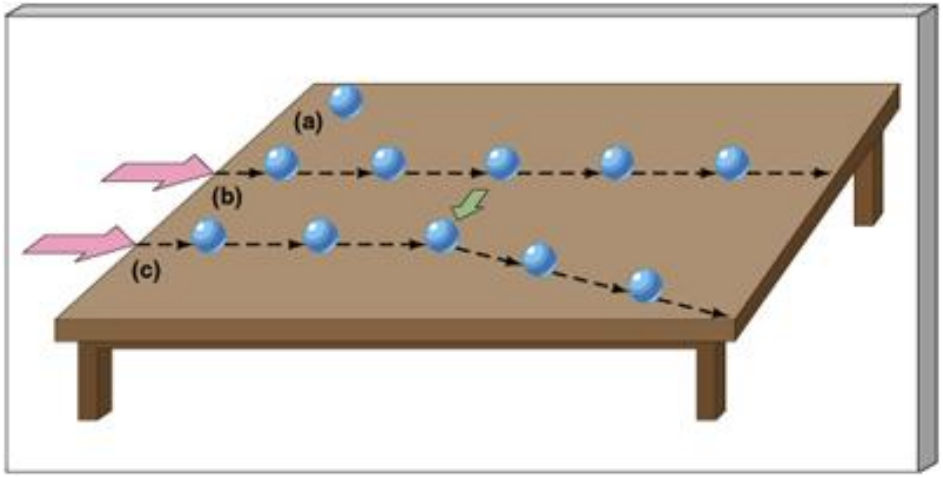


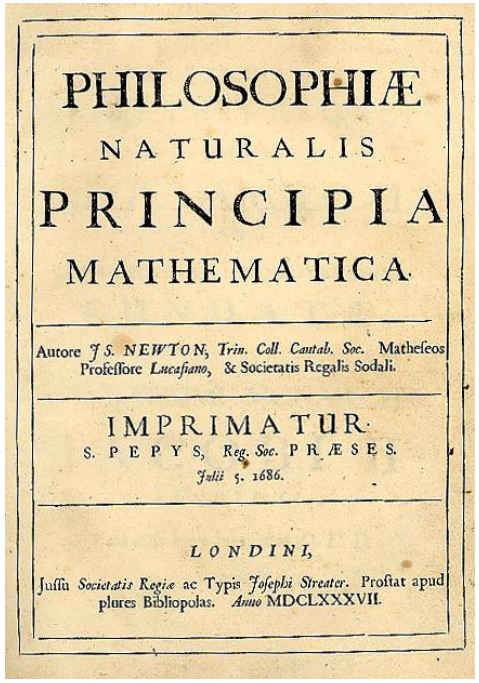
Newton (1642 – 1727) et la dynamique : les Principia

Père de la dynamique (étude des causes du changement dans le mouvement des corps), nombreuses contributions importantes à divers domaines, premier **physicien moderne** $\Longrightarrow$ étudie le mouvement de corpuscules

Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (1686) :

[1] Principe d'inertie : tout corps reste au repos ou bouge à vitesse constante le long d'une trajectoire rectiligne, à moins qu'une force n'agisse sur lui.




PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA

Autore *J. S. NEWTON*, *Trin. Coll. Cantab. Soc.* Matheseos Professore *Lucasiano*, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR
S. PEPYS, *Reg. Soc.* PRÆSES.
Julii 5. 1686.

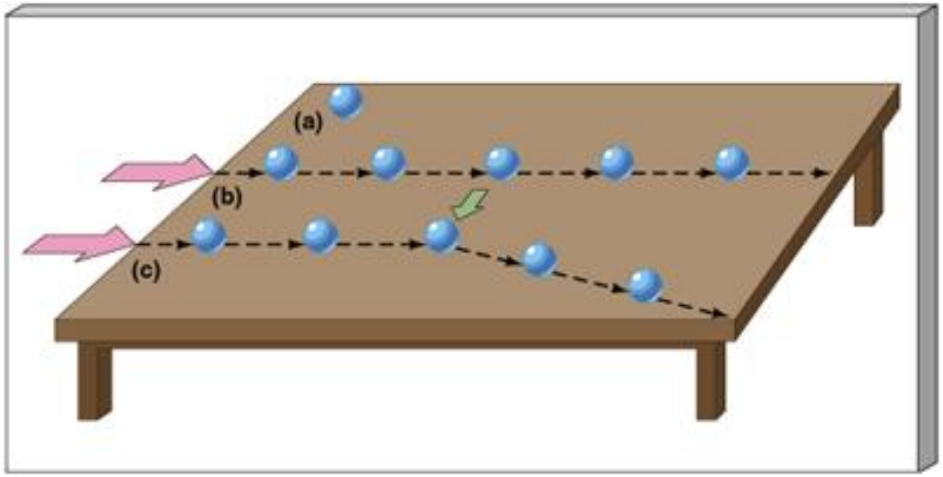
LONDINI,
Jussu *Societatis Regiæ* ac Typis *Josephi Streater*. Prostat apud plures Bibliopolas. *Anno* MDCLXXXVII.

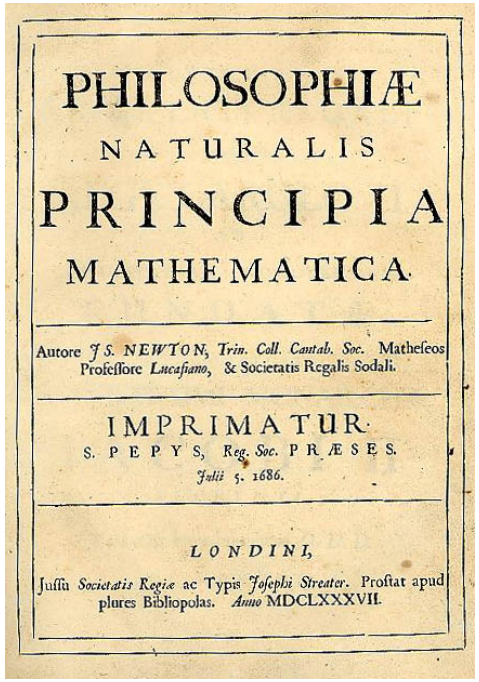
Newton (1642 – 1727) et la dynamique : les Principia

Père de la dynamique (étude des causes du changement dans le mouvement des corps), nombreuses contributions importantes à divers domaines, premier **physicien moderne** $\Longrightarrow$ étudie le mouvement de corpuscules

Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (1686) :

[1] Principe d'inertie : tout corps reste au repos ou bouge à vitesse constante le long d'une trajectoire rectiligne, à moins qu'une force n'agisse sur lui.




PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA

Autore *J. S. NEWTON*, *Trin. Coll. Cantab. Soc.* Matheseos Professore *Lucasiano*, & Societatis Regalis Sodali.

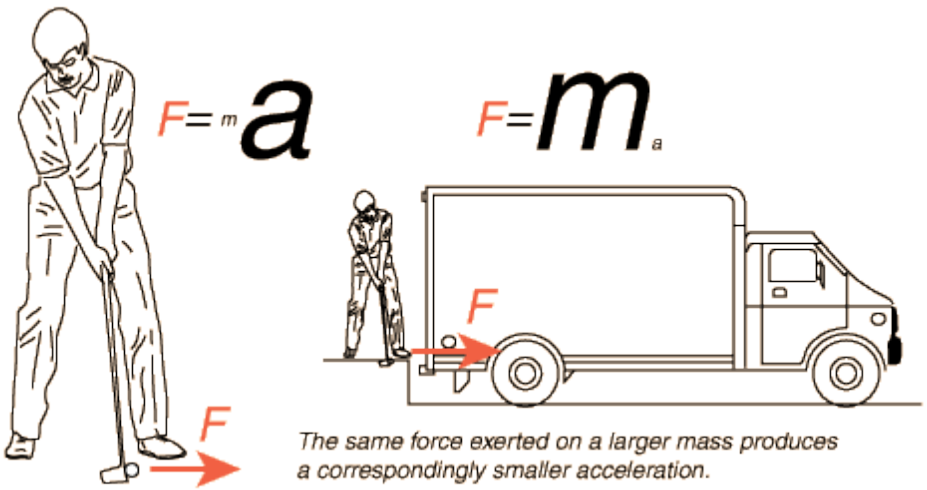
IMPRIMATUR
S. PEPYS, *Reg. Soc.* PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu *Societatis Regiæ* ac Typis *Josephi Streater*. Prostat apud plures Bibliopolas. *Anno* MDCLXXXVII.

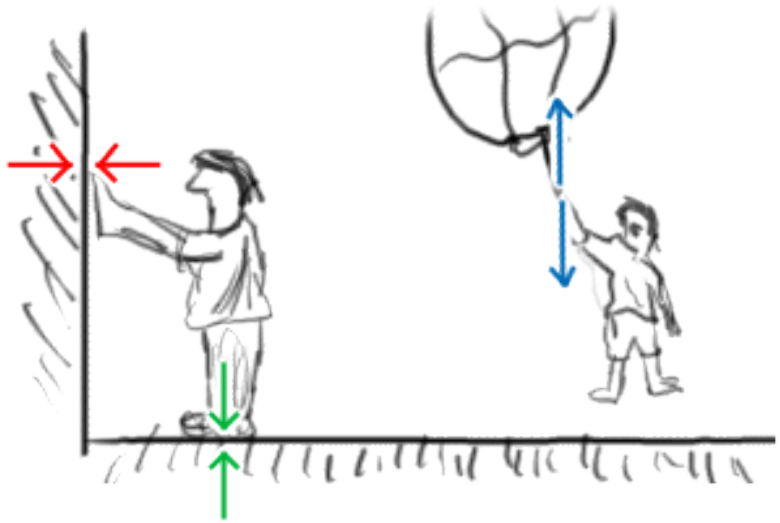
Principe fondamental de la dynamique

Lois de la dynamique :

[2] Force = **masse** × **accélération**



La même force exercée peut résulter en des **accélérations** très différentes selon la **masse**

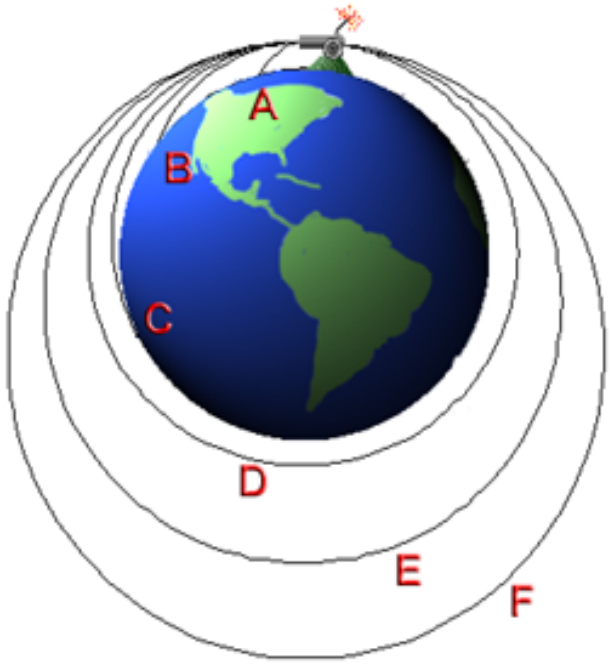


[3] Principe d'action/réaction

Gravitation universelle (1687)

Principia

- existence d'une force gravitationnelle universelle entre masses
- **même action** de la Terre sur une **pomme** ou sur la **Lune**



Gravitation avant Newton

- **séparation** de nature entre mondes **sublunaire** et **céleste**
- lois de Kepler : description **globale** du mouvement des planètes

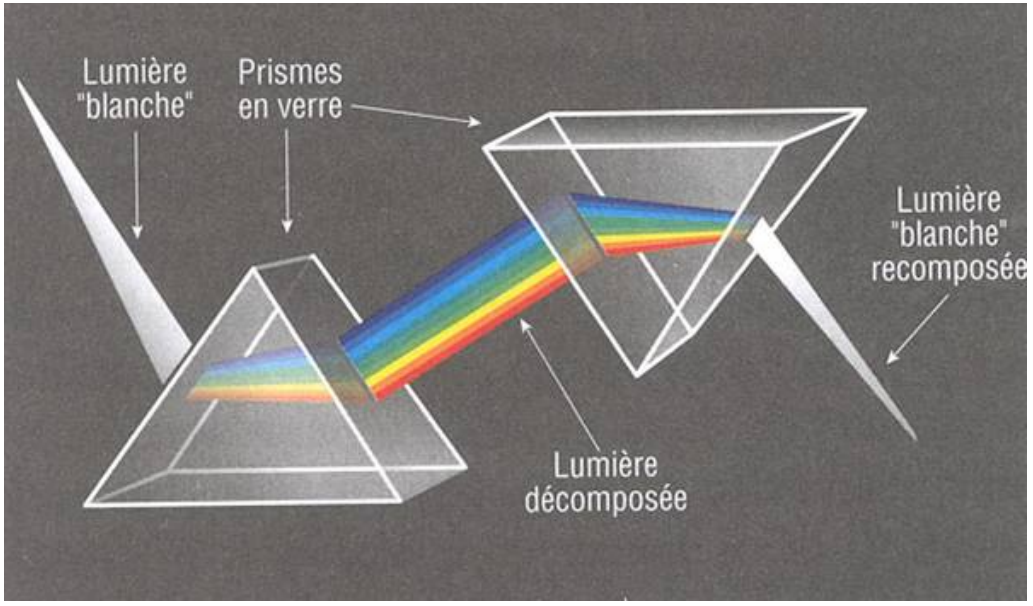
Tests et conséquences

- **explications** : lois de Kepler, phénomène des marées, etc.
- **prédictions** : forme de la Terre, retour de la comète de Halley, Neptune, etc.

Newton et l'optique

1669 : lumière blanche composée $\Longrightarrow$ notion de spectre

- **1704** : modélisation corpusculaire
- couleur différente $\leftrightarrow$ particules de vitesse différente
- réfraction due à une « force réfringente » qui agit près de la surface

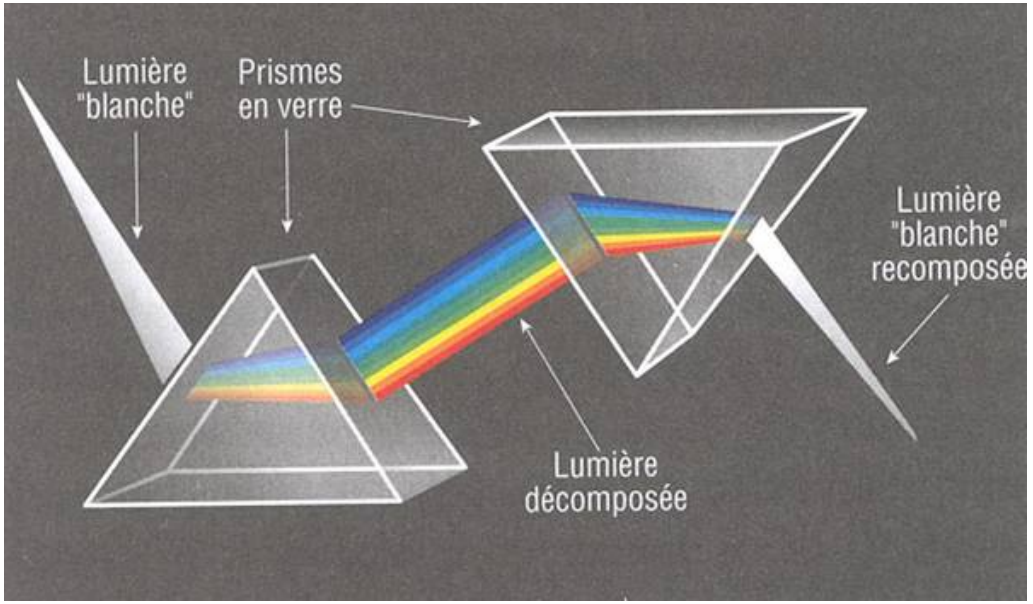


modèle(s) de Newton de l'optique : la lumière se comporte « comme » les objets matériels, mais vitesse élevée

Newton et l'optique

1669 : lumière blanche composée $\Longrightarrow$ notion de spectre

- **1704** : modélisation corpusculaire
- couleur différente $\leftrightarrow$ particules de vitesse différente
- réfraction due à une « force réfringente » qui agit près de la surface

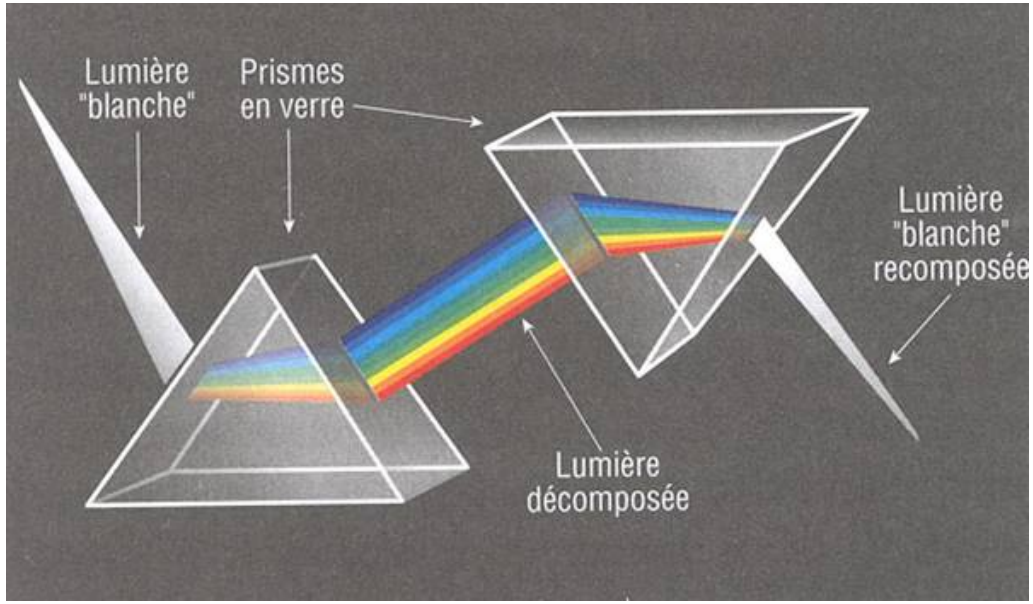


modèle(s) de Newton de l'optique : la lumière se comporte « comme » les objets matériels, mais vitesse élevée

Newton et l'optique

1669 : lumière blanche composée $\Longrightarrow$ notion de spectre

- **1704** : modélisation corpusculaire
- couleur différente $\leftrightarrow$ particules de vitesse différente
- réfraction due à une « force réfringente » qui agit près de la surface

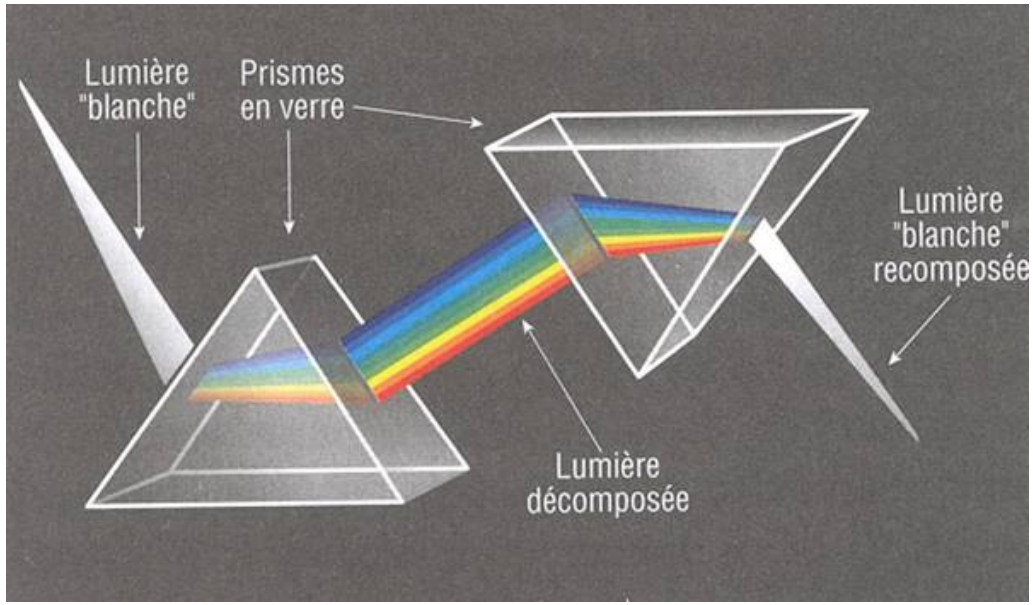


modèle(s) de Newton de l'optique : la lumière se comporte « comme » les objets matériels, mais vitesse élevée

Newton et l'optique

1669 : lumière blanche composée $\Longrightarrow$ notion de spectre

- **1704** : modélisation corpusculaire
- couleur différente $\leftrightarrow$ particules de vitesse différente
- réfraction due à une « force réfringente » qui agit près de la surface

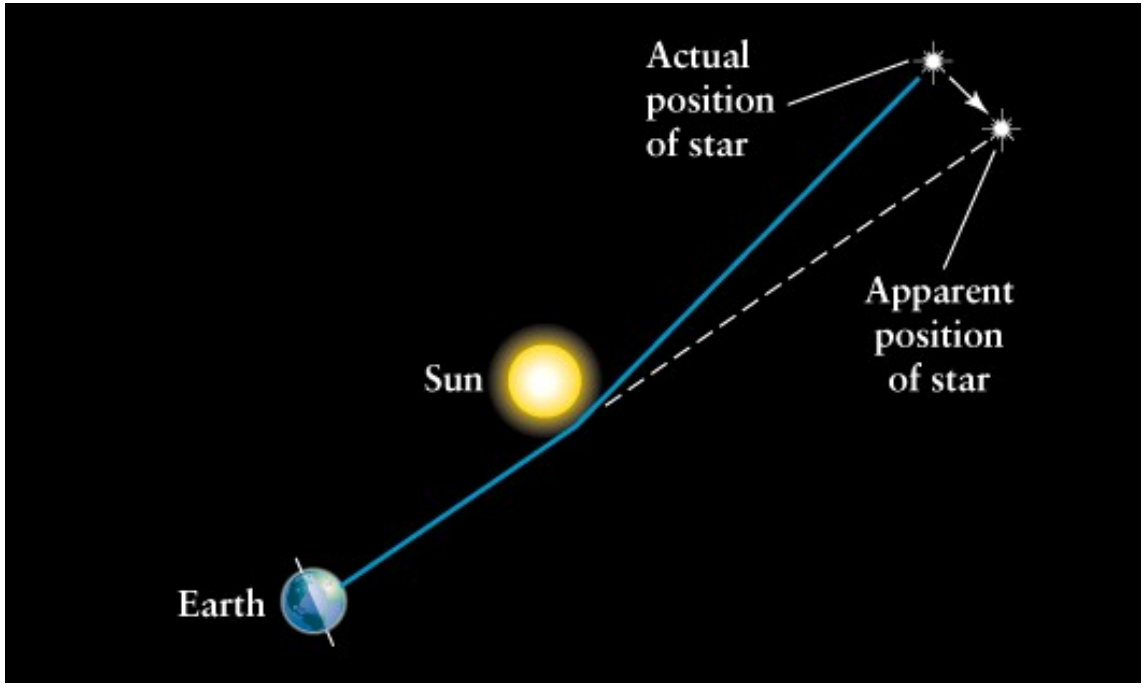


modèle(s) de Newton de l'optique : la lumière se comporte « comme » les objets matériels, mais vitesse élevée

Déviation et ralentissement de la lumière

- **1783, Michell** : action de la gravitation sur les corpuscules lumineux
  → ralentissement de la lumière émise

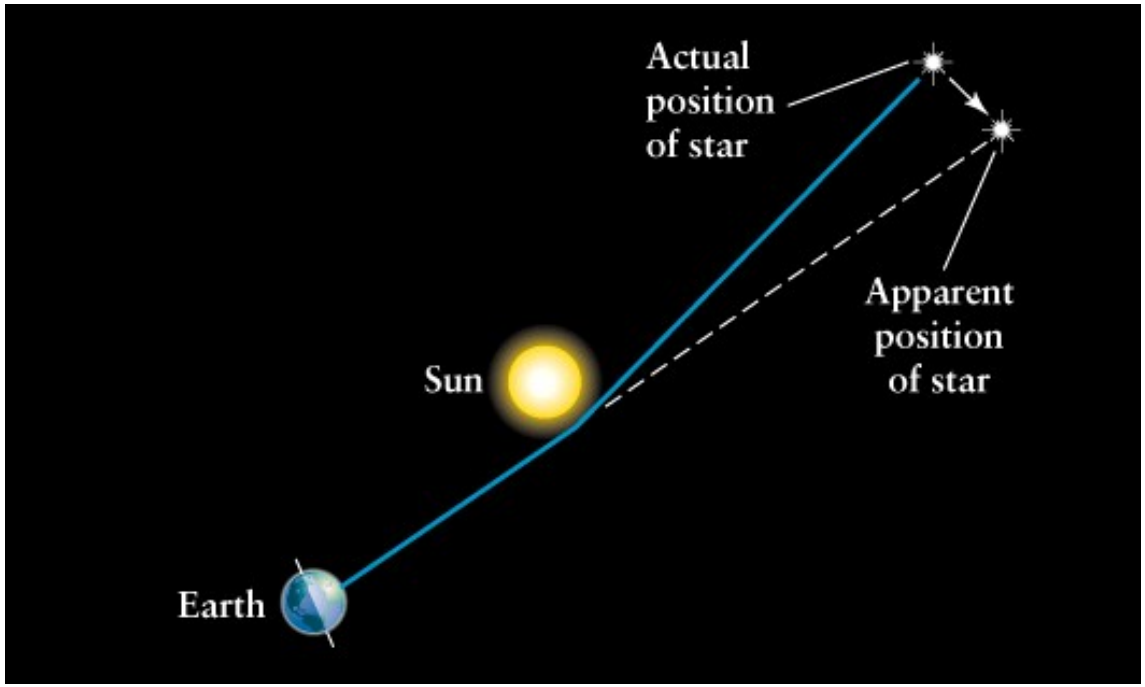
- **1801, von Soldner** : déviation gravitationnelle de la lumière
- les rayons lumineux proches du Soleil sont "réfractés"
- **effet faible**, observable pour des étoiles visuellement proches du Soleil → **sans intérêt** ?



Déviation et ralentissement de la lumière

- **1783, Michell** : action de la gravitation sur les corpuscules lumineux
  $\rightarrow$ ralentissement de la lumière émise

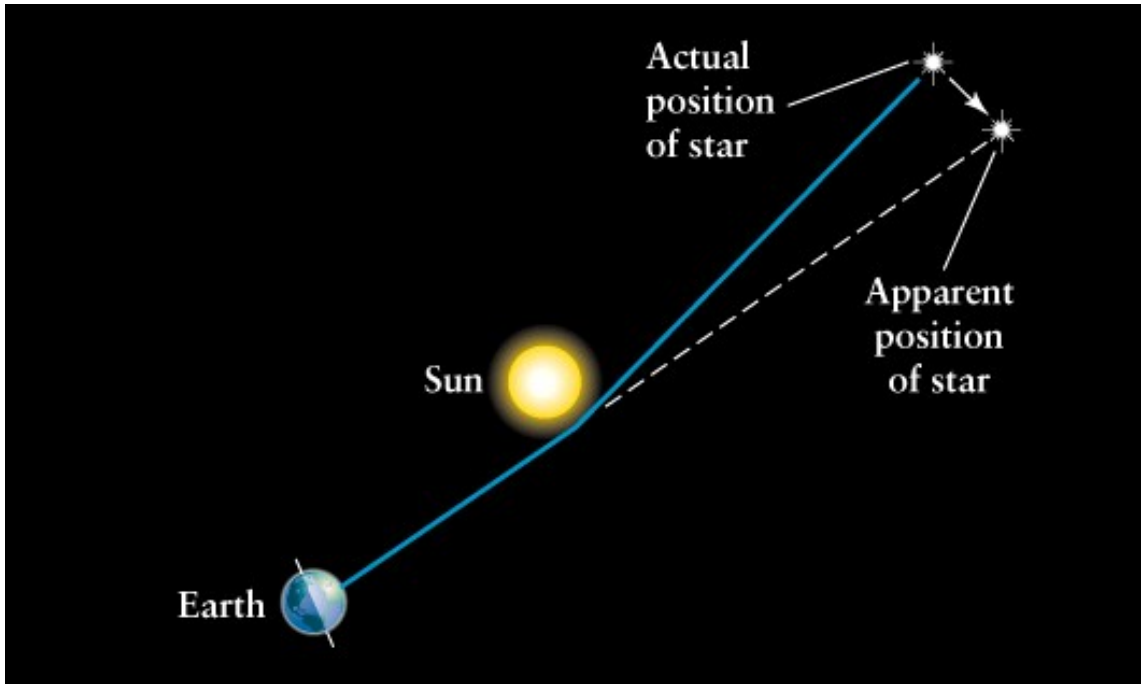
- **1801, von Soldner** : déviation gravitationnelle de la lumière
- les rayons lumineux proches du Soleil sont "réfractés"
- **effet faible**, observable pour des étoiles visuellement proches du Soleil $\rightarrow$ **sans intérêt** ?



Déviation et ralentissement de la lumière

- **1783, Michell** : action de la gravitation sur les corpuscules lumineux
  $\rightarrow$ ralentissement de la lumière émise

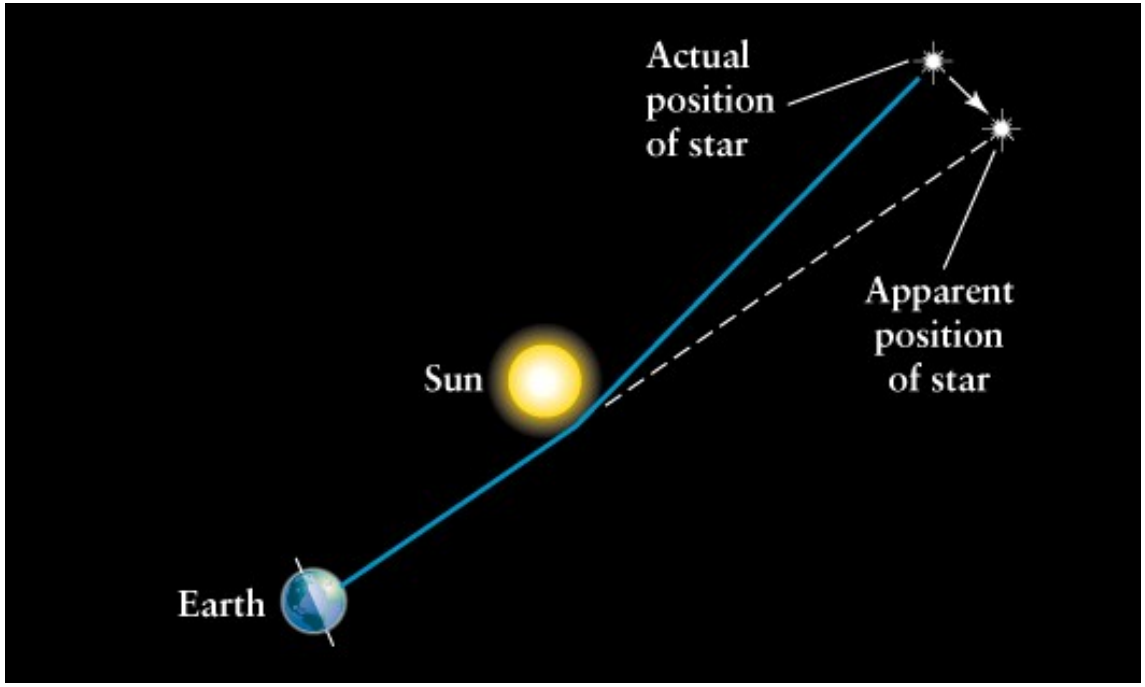
- **1801, von Soldner** : déviation gravitationnelle de la lumière
- les rayons lumineux proches du Soleil sont "réfractés"
- **effet faible**, observable pour des étoiles visuellement proches du Soleil $\rightarrow$ **sans intérêt** ?



Déviation et ralentissement de la lumière

- **1783, Michell** : action de la gravitation sur les corpuscules lumineux
  $\rightarrow$ ralentissement de la lumière émise

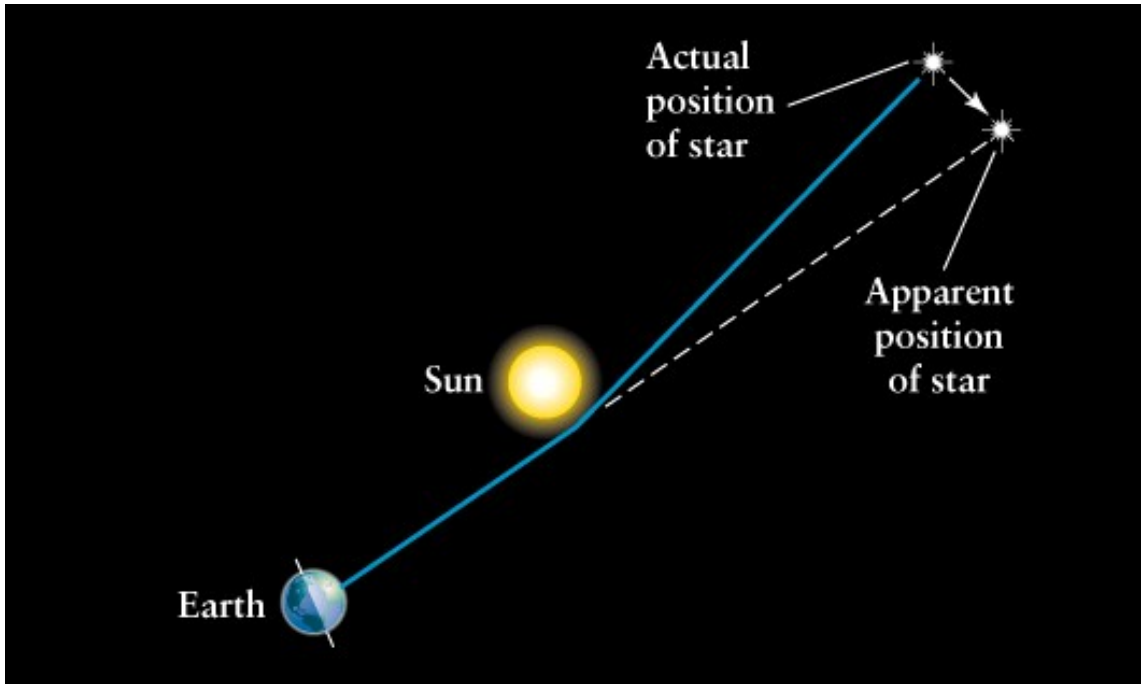
- **1801, von Soldner** : déviation gravitationnelle de la lumière
- les rayons lumineux proches du Soleil sont "réfractés"
- **effet faible**, observable pour des étoiles visuellement proches du Soleil $\rightarrow$ **sans intérêt** ?



Déviation et ralentissement de la lumière

- **1783, Michell** : action de la gravitation sur les corpuscules lumineux
  $\rightarrow$ ralentissement de la lumière émise

- **1801, von Soldner** : déviation gravitationnelle de la lumière
- les rayons lumineux proches du Soleil sont "réfractés"
- **effet faible**, observable pour des étoiles visuellement proches du Soleil $\rightarrow$ **sans intérêt** ?

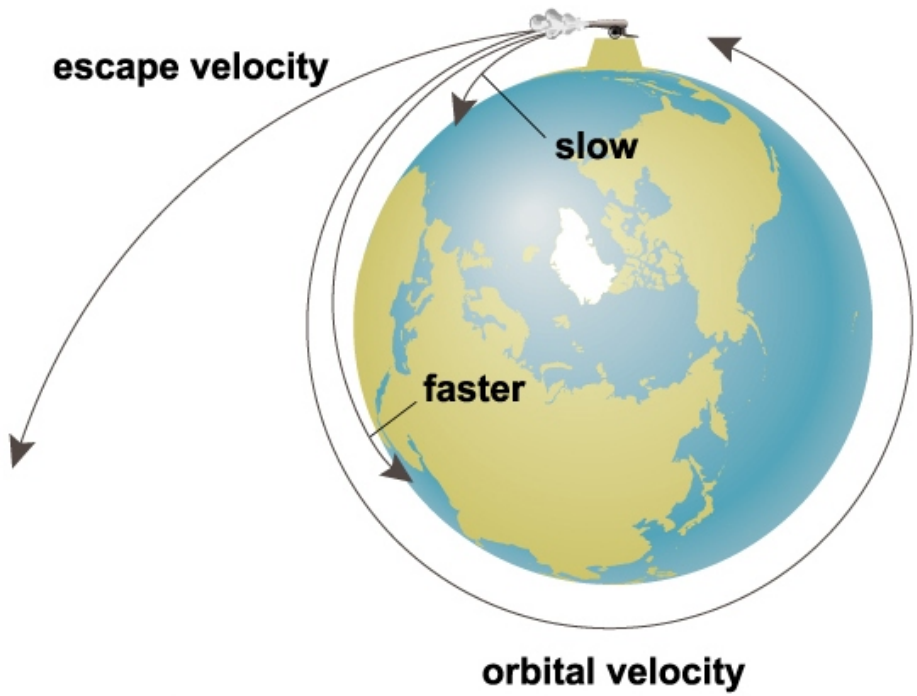


Vitesse de libération et astres occlus

$$v_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2\,G\,M}{R}}$$

v_{lib} ↗ si la masse de l'étoile (M) ↗, ou si son rayon (R) ↘

- **1783, Michell** : ∃ étoiles telles que $v_{\text{lib}} > c$?
  → invisibles, mais effet gravitationnel observable si présence d'objets lumineux voisins
- possibilité : même densité que le Soleil, mais diamètre 500 fois plus grand (**Michell, 1783**)

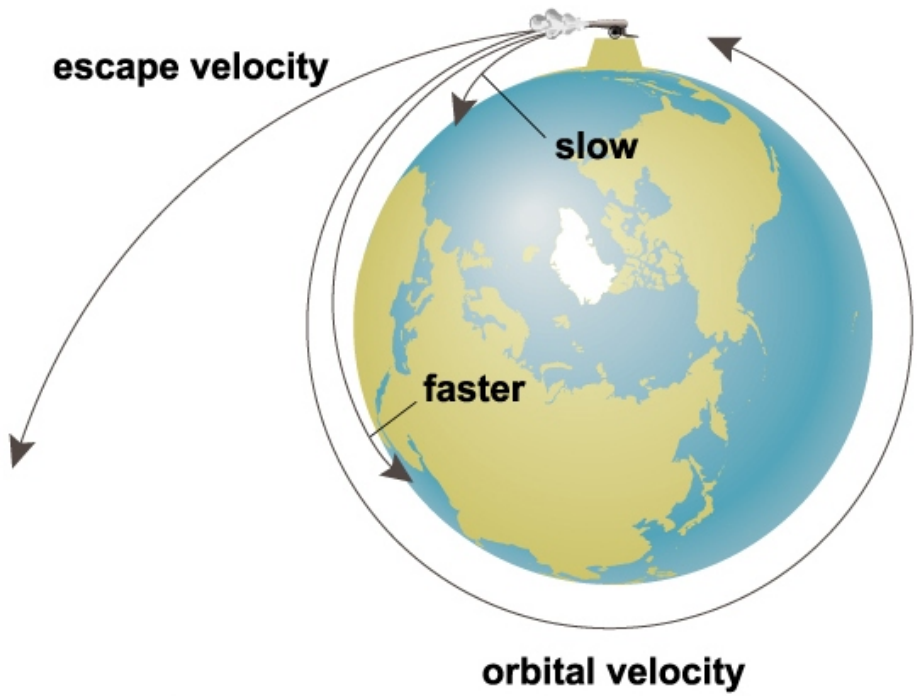


Vitesse de libération et astres occlus

$$v_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2\,G\,M}{R}}$$

$v_{\text{lib}} \nearrow$ si la masse de l'étoile $(M) \nearrow$, ou si son rayon $(R) \searrow$

- **1783, Michell** : $\exists$ étoiles telles que $v_{\text{lib}} > c$?
  $\rightarrow$ invisibles, mais effet gravitationnel observable si présence d'objets lumineux voisins
- possibilité : même densité que le Soleil, mais diamètre 500 fois plus grand (**Michell, 1783**)

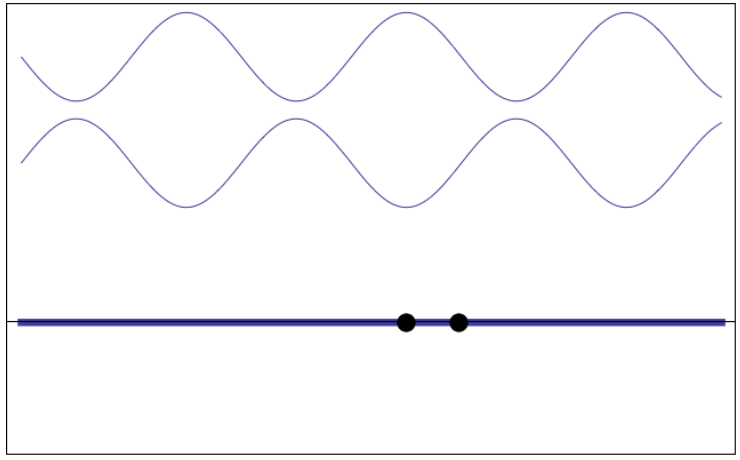


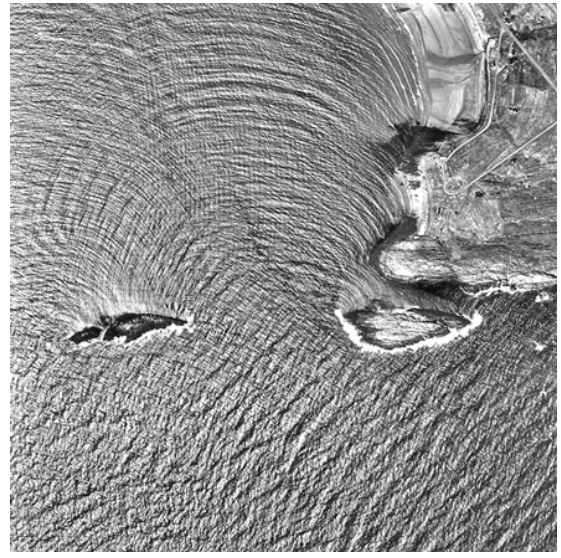
Optique ondulatoire

- **1678-1690, Huygens** : modèle ondulatoire de la lumière (inspiré par les ondes sonores)

  $\longrightarrow$ lumière = vibration d'un éther lumineux
- difficulté à s'imposer face à la **théorie de Newton**
- mais, plus tard, succès majeurs : **Young (1801)**, **Fresnel (1818)**

  $\longrightarrow$ explication des interférences et de la diffraction





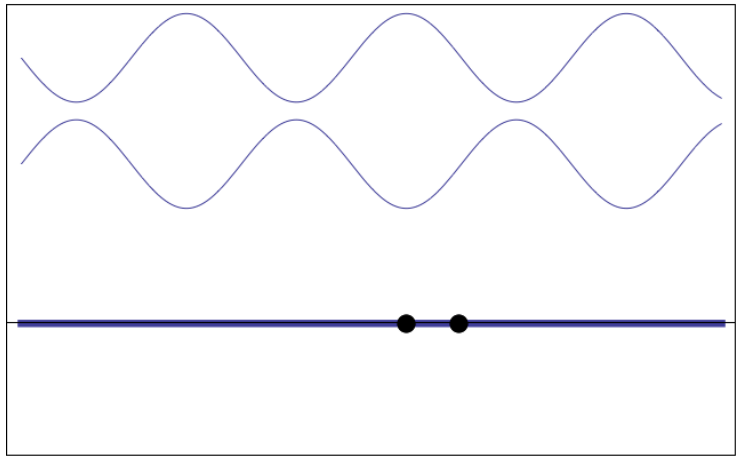
$\Longrightarrow$ **conséquences de l'optique corpusculaire quasiment oubliées**

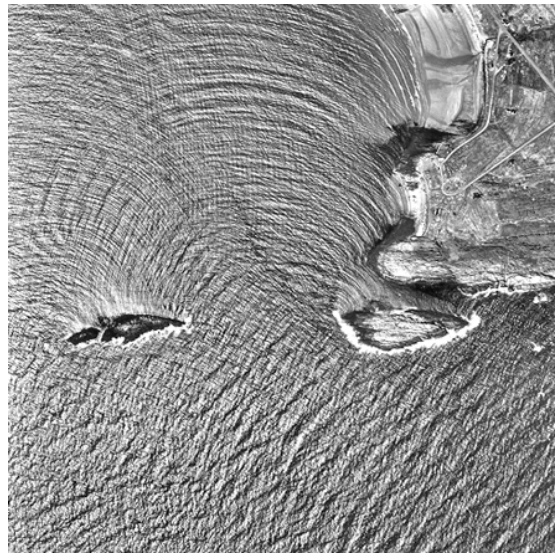
Optique ondulatoire

- **1678-1690, Huygens** : modèle ondulatoire de la lumière (inspiré par les ondes sonores)

  $\rightarrow$ lumière = vibration d'un éther lumineux
- difficulté à s'imposer face à la **théorie de Newton**
- mais, plus tard, succès majeurs : **Young (1801)**, **Fresnel (1818)**

  $\rightarrow$ explication des interférences et de la diffraction





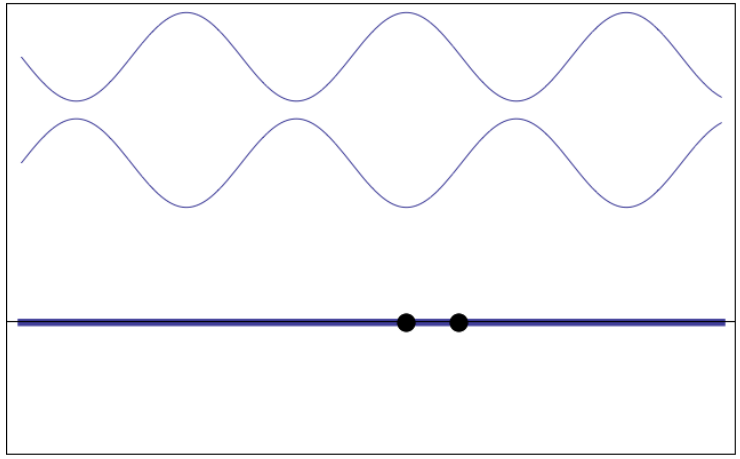
$\Longrightarrow$ **conséquences de l'optique corpusculaire quasiment oubliées**

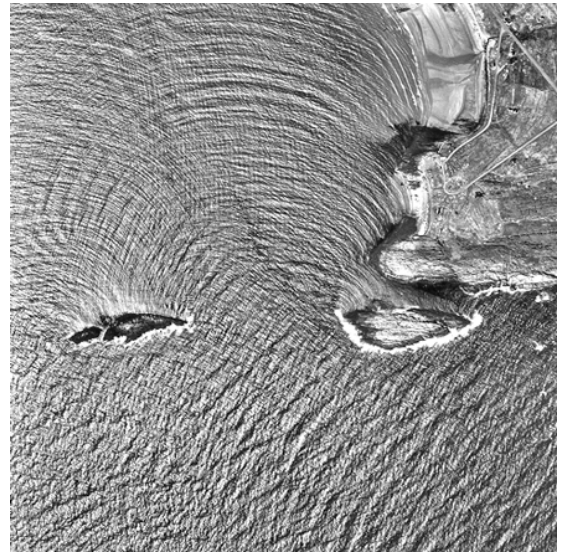
Optique ondulatoire

- **1678-1690, Huygens** : modèle ondulatoire de la lumière (inspiré par les ondes sonores)

  $\rightarrow$ lumière = vibration d'un éther lumineux
- difficulté à s'imposer face à la **théorie de Newton**
- mais, plus tard, succès majeurs : **Young (1801)**, **Fresnel (1818)**

  $\rightarrow$ explication des interférences et de la diffraction





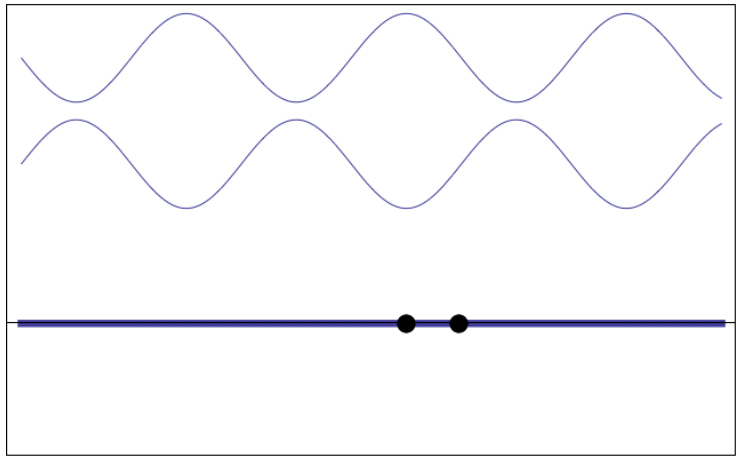
$\Longrightarrow$ **conséquences de l'optique corpusculaire quasiment oubliées**

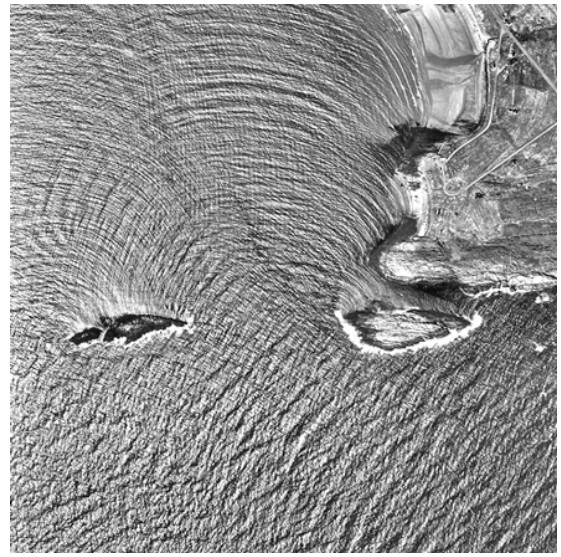
Optique ondulatoire

- **1678-1690, Huygens** : modèle ondulatoire de la lumière (inspiré par les ondes sonores)

  $\rightarrow$ lumière = vibration d'un éther lumineux
- difficulté à s'imposer face à la **théorie de Newton**
- mais, plus tard, succès majeurs : **Young (1801)**, **Fresnel (1818)**

  $\rightarrow$ explication des interférences et de la diffraction





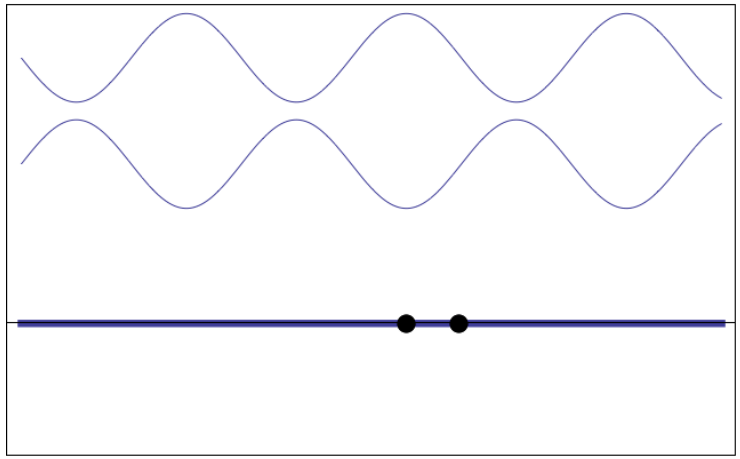
$\Longrightarrow$ conséquences de l'optique corpusculaire quasiment oubliées

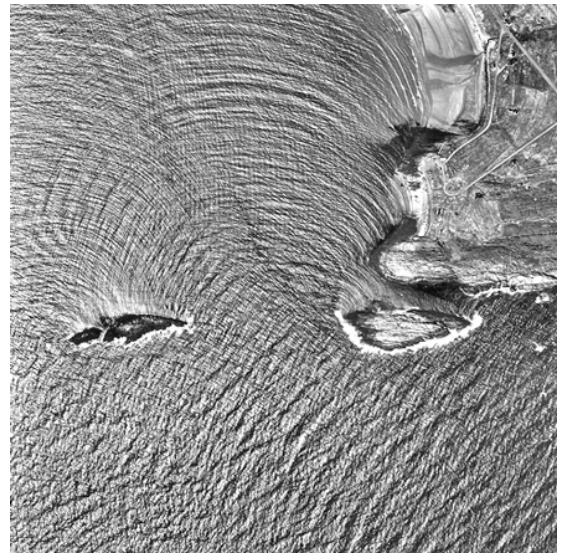
Optique ondulatoire

- **1678-1690, Huygens** : modèle ondulatoire de la lumière (inspiré par les ondes sonores)

  $\rightarrow$ lumière = vibration d'un éther lumineux
- difficulté à s'imposer face à la **théorie de Newton**
- mais, plus tard, succès majeurs : **Young (1801)**, **Fresnel (1818)**

  $\rightarrow$ explication des interférences et de la diffraction





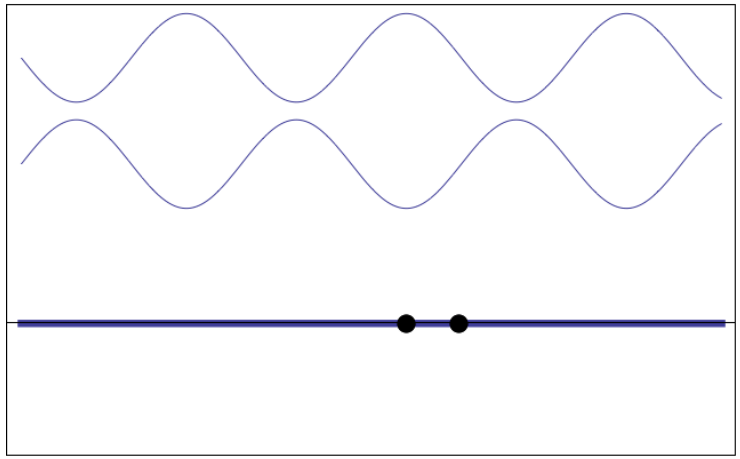
$\Longrightarrow$ conséquences de l'optique corpusculaire quasiment oubliées

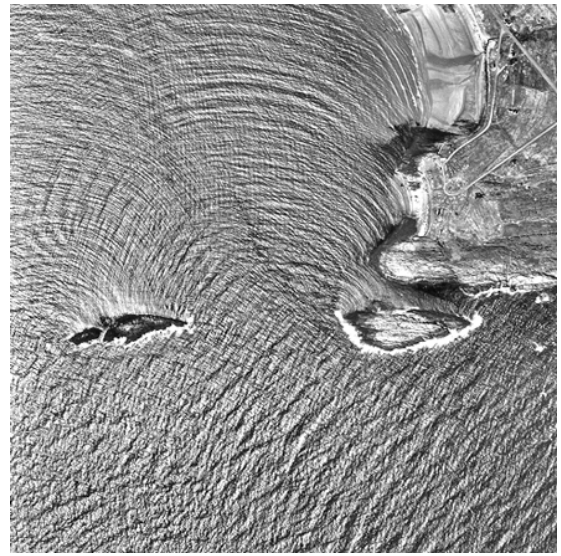
Optique ondulatoire

- **1678-1690, Huygens** : modèle ondulatoire de la lumière (inspiré par les ondes sonores)

  $\rightarrow$ lumière = vibration d'un éther lumineux
- difficulté à s'imposer face à la **théorie de Newton**
- mais, plus tard, succès majeurs : **Young (1801)**, **Fresnel (1818)**

  $\rightarrow$ explication des interférences et de la diffraction

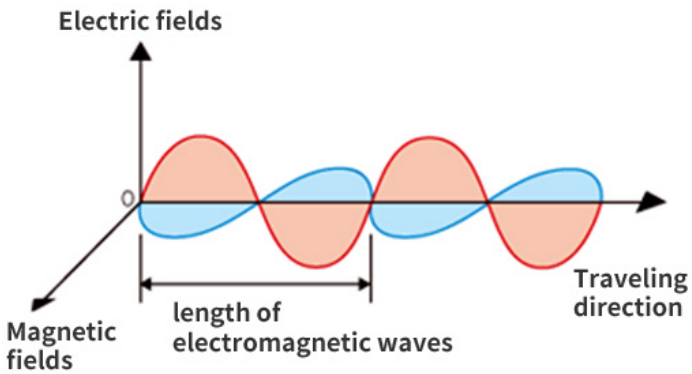


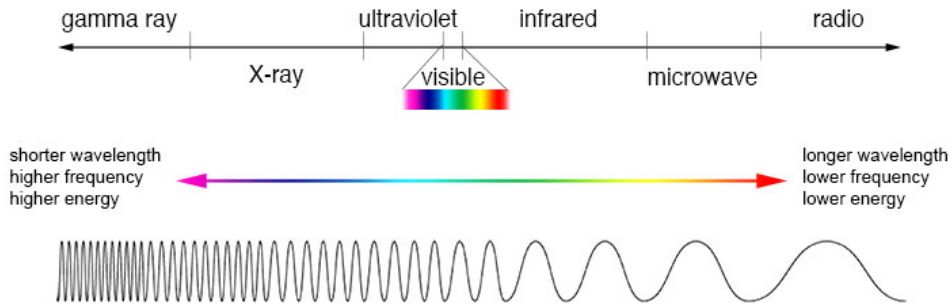


$\Longrightarrow$ **conséquences de l'optique corpusculaire quasiment oubliées**

Électromagnétisme et vitesse de la lumière

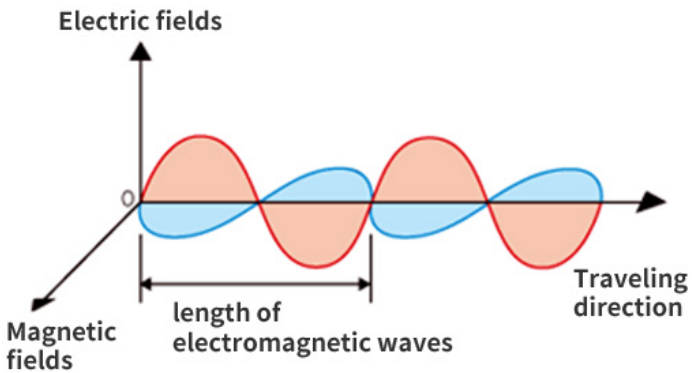
- **1864, Maxwell** : théorie de l'électromagnétisme
  $\Longrightarrow$ ondes lumineuses = type particulier d'ondes électromagnétiques
- vitesse de la lumière : valeur fixe par rapport à l'éther, $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, doit **dépendre du référentiel** (*cf.* vagues vues depuis un navire)
- **1887, Michelson & Morley** : invariance expérimentale de c ...

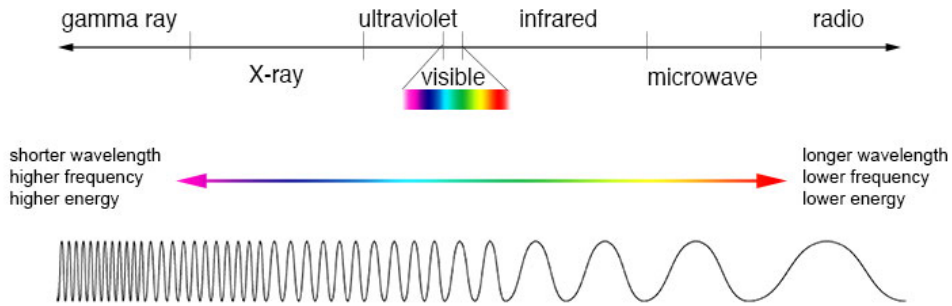




Électromagnétisme et vitesse de la lumière

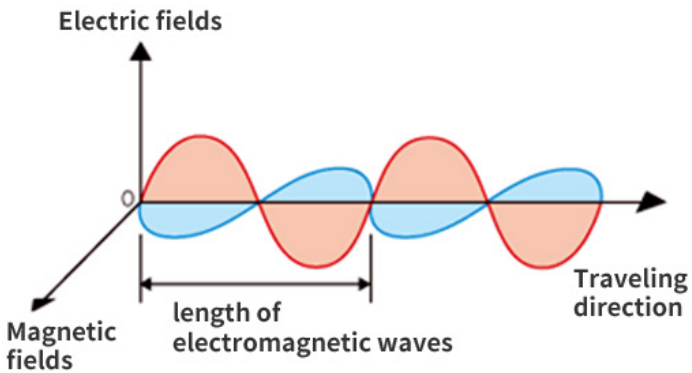
- **1864, Maxwell** : théorie de l'électromagnétisme
  $\Longrightarrow$ ondes lumineuses = type particulier d'ondes électromagnétiques
- vitesse de la lumière : valeur fixe par rapport à l'éther, $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, doit **dépendre du référentiel** (*cf.* vagues vues depuis un navire)
- **1887, Michelson & Morley** : invariance expérimentale de c ...

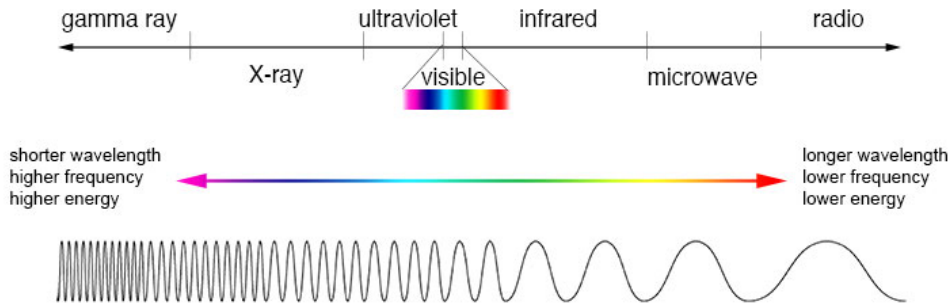




Électromagnétisme et vitesse de la lumière

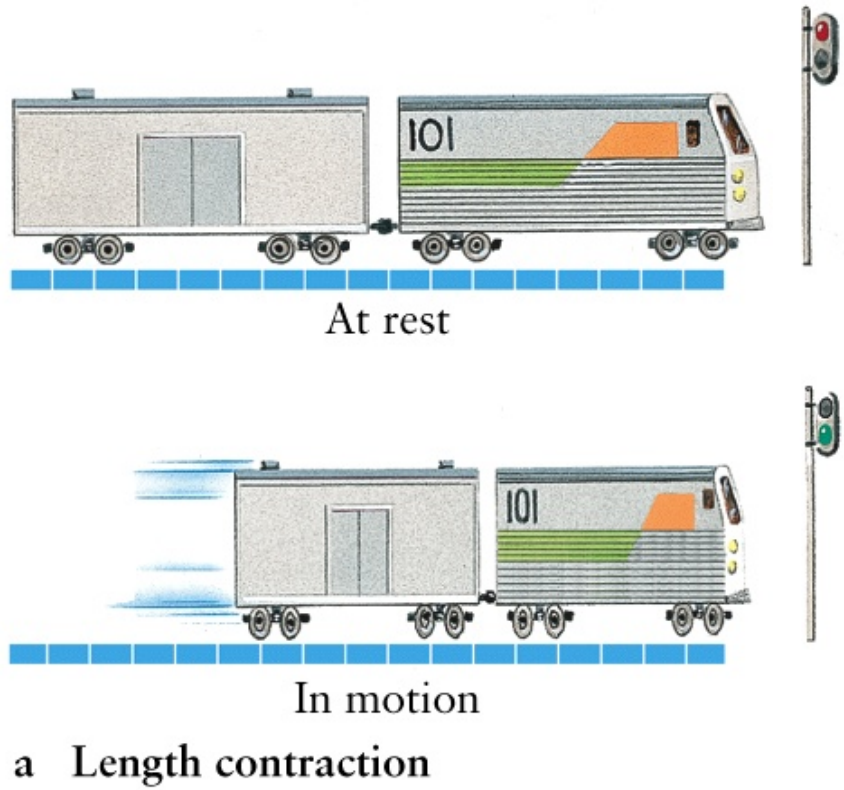
- **1864, Maxwell** : théorie de l'électromagnétisme
  $\Longrightarrow$ ondes lumineuses = type particulier d'ondes électromagnétiques
- vitesse de la lumière : valeur fixe par rapport à l'éther, $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, doit **dépendre du référentiel** (*cf.* vagues vues depuis un navire)
- **1887, Michelson & Morley** : invariance expérimentale de c ...





Électromagnétisme et relativité restreinte

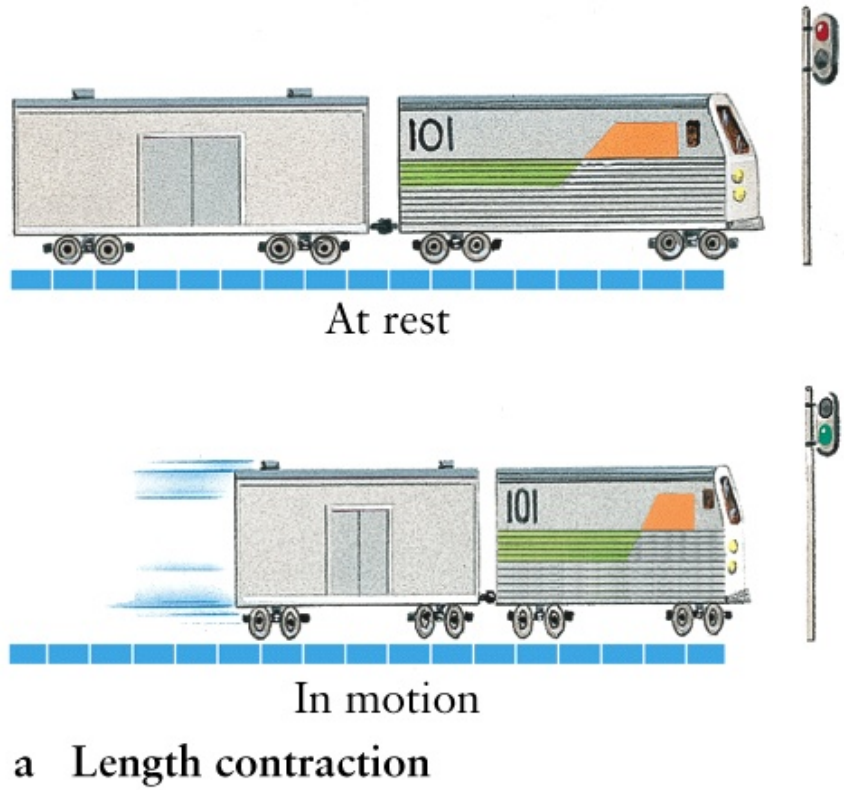
- **Lorentz, Poincaré (etc.)** : besoin de modifier la théorie de Maxwell
  $\rightarrow$ contraction des longueurs, dilatation temporelle, etc.
- **1905, Einstein** : besoin de modifier la mécanique de Newton
  $\rightarrow$ temps et espace sont relatifs,
  $\rightarrow$ c est une vitesse limite absolue,
  $\rightarrow$ la masse est l'une des formes de l'énergie ($E = mc^2$), etc.



a Length contraction

Électromagnétisme et relativité restreinte

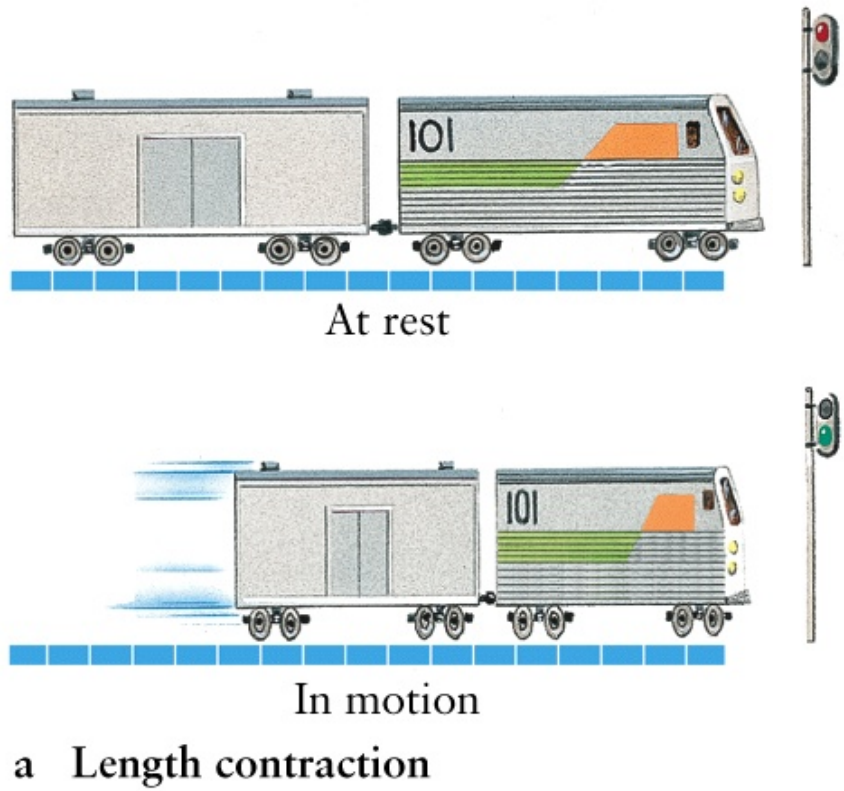
- **Lorentz, Poincaré (etc.)** : besoin de modifier la théorie de Maxwell
  $\rightarrow$ contraction des longueurs, dilatation temporelle, etc.
- **1905, Einstein** : besoin de modifier la mécanique de Newton
  $\rightarrow$ temps et espace sont relatifs,
  $\rightarrow$ c est une vitesse limite absolue,
  $\rightarrow$ la masse est l'une des formes de l'énergie ($E = mc^2$), etc.



a Length contraction

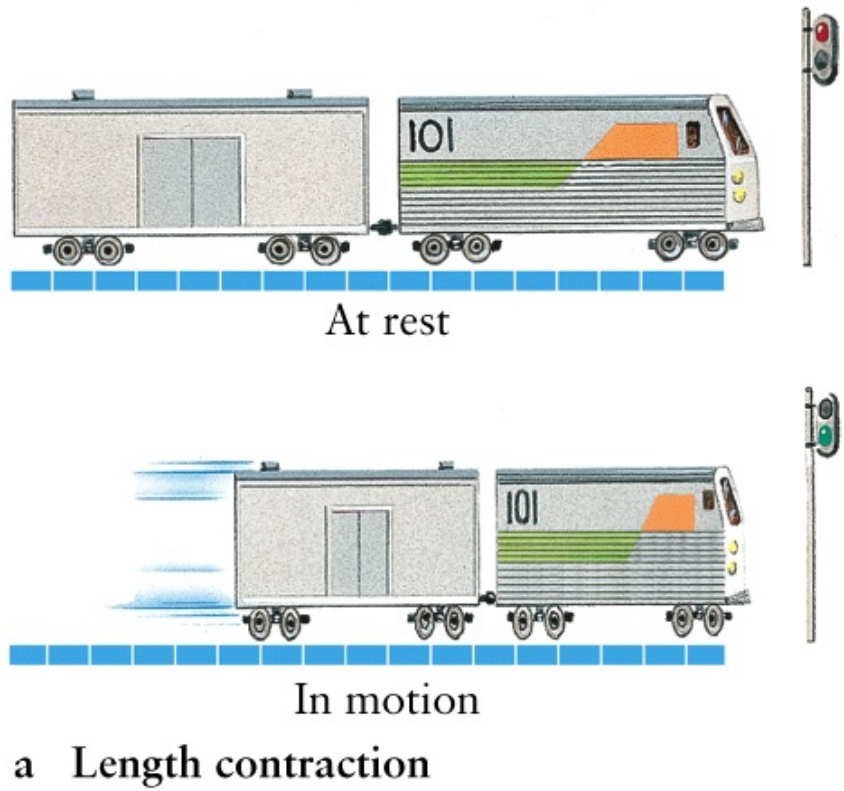
Électromagnétisme et relativité restreinte

- **Lorentz, Poincaré (etc.)** : besoin de modifier la théorie de Maxwell
  $\rightarrow$ contraction des longueurs, dilatation temporelle, etc.
- **1905, Einstein** : besoin de modifier la mécanique de Newton
  $\rightarrow$ temps et espace sont relatifs,
  $\rightarrow$ c est une vitesse limite absolue,
  $\rightarrow$ la masse est l'une des formes de l'énergie ($E = mc^2$), etc.



Électromagnétisme et relativité restreinte

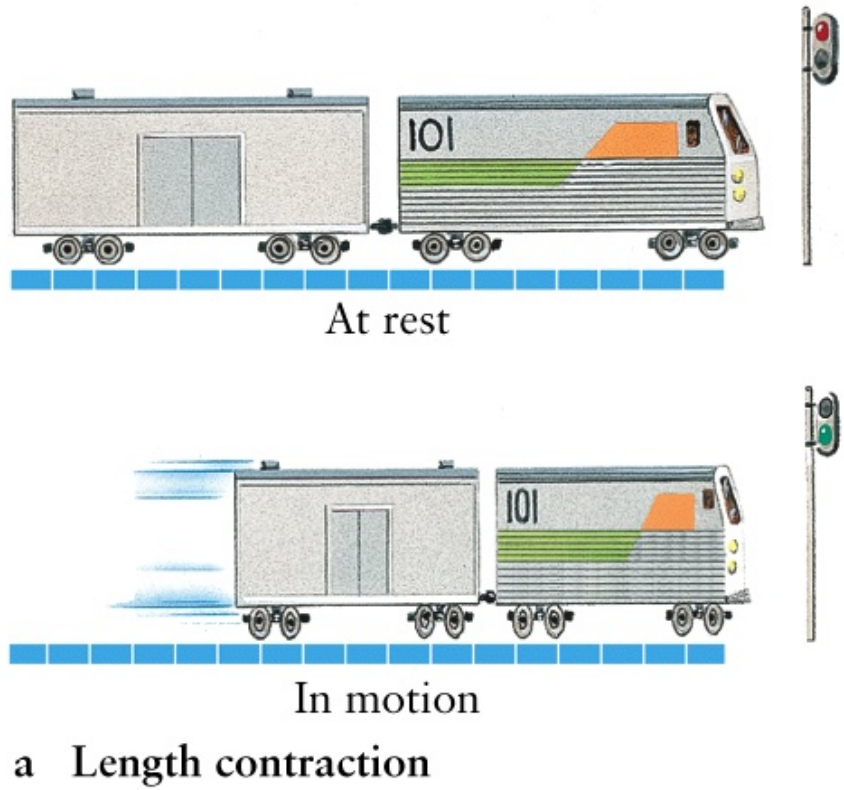
- **Lorentz, Poincaré (etc.)** : besoin de modifier la théorie de Maxwell
  $\rightarrow$ contraction des longueurs, dilatation temporelle, etc.
- **1905, Einstein** : besoin de modifier la mécanique de Newton
  $\rightarrow$ temps et espace sont relatifs,
  $\rightarrow$ c est une vitesse limite absolue,
  $\rightarrow$ la masse est l'une des formes de l'énergie ($E = mc^2$), etc.



a Length contraction

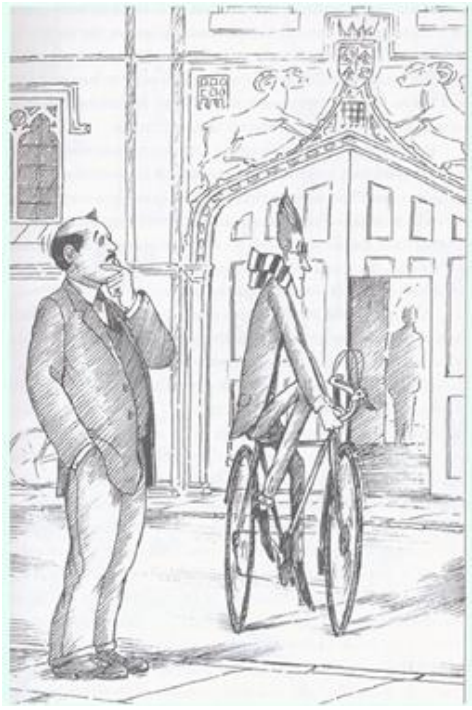
Électromagnétisme et relativité restreinte

- **Lorentz, Poincaré (etc.)** : besoin de modifier la théorie de Maxwell
  $\rightarrow$ contraction des longueurs, dilatation temporelle, etc.
- **1905, Einstein** : besoin de modifier la mécanique de Newton
  $\rightarrow$ temps et espace sont relatifs,
  $\rightarrow$ c est une vitesse limite absolue,
  $\rightarrow$ la masse est l'une des formes de l'énergie ($E = mc^2$), etc.



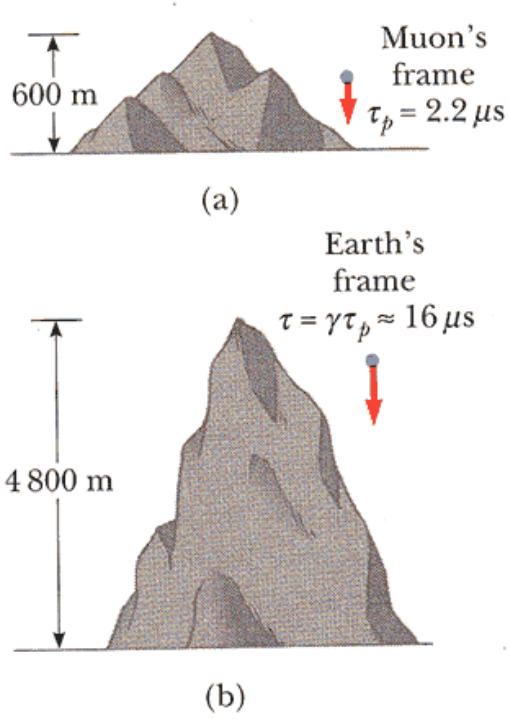
a Length contraction

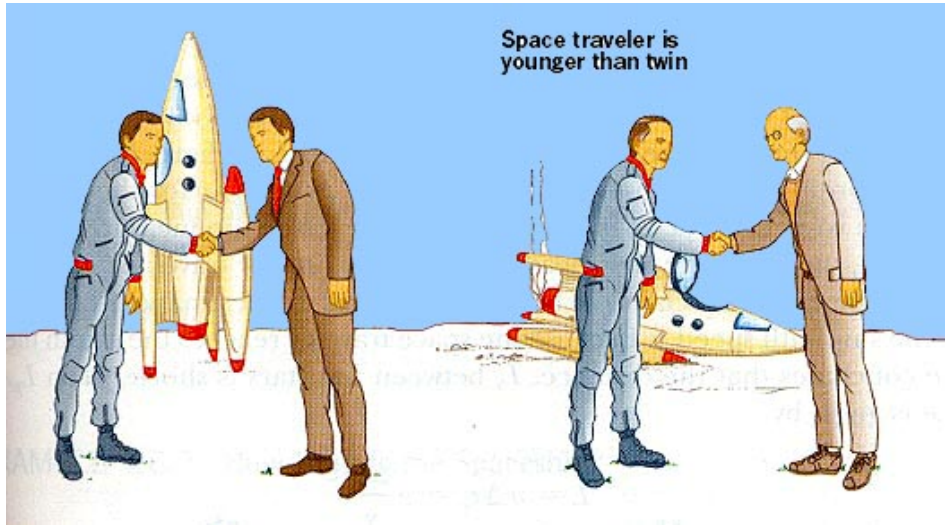
Conséquences directes du principe de relativité (1905)



Contraction des longueurs symétriques car **mouvement relatif**

Vérifications expérimentales

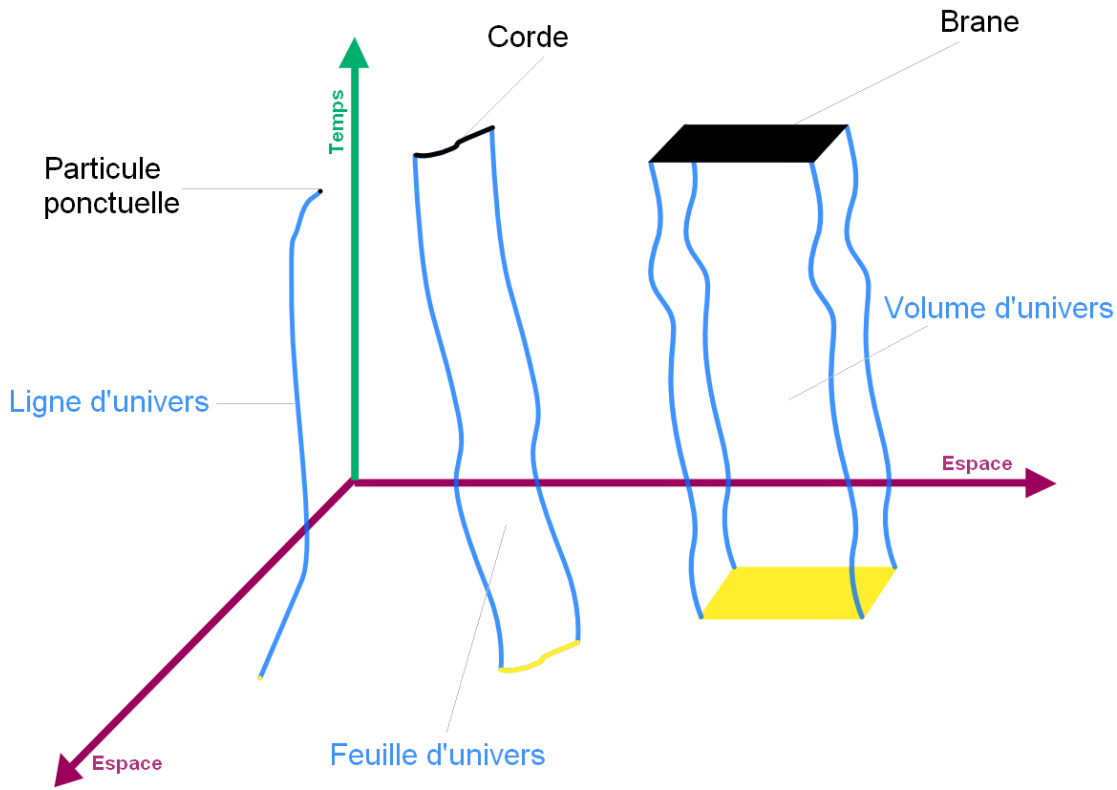




- dilatation temporelle : **collisionneurs de particules** (CERN, etc.), rayons cosmiques, etc.
- horloges atomiques (avions autour de la Terre) : **paradoxe des jumeaux** de Langevin (pas de symétrie car accélération pour demi-tour).

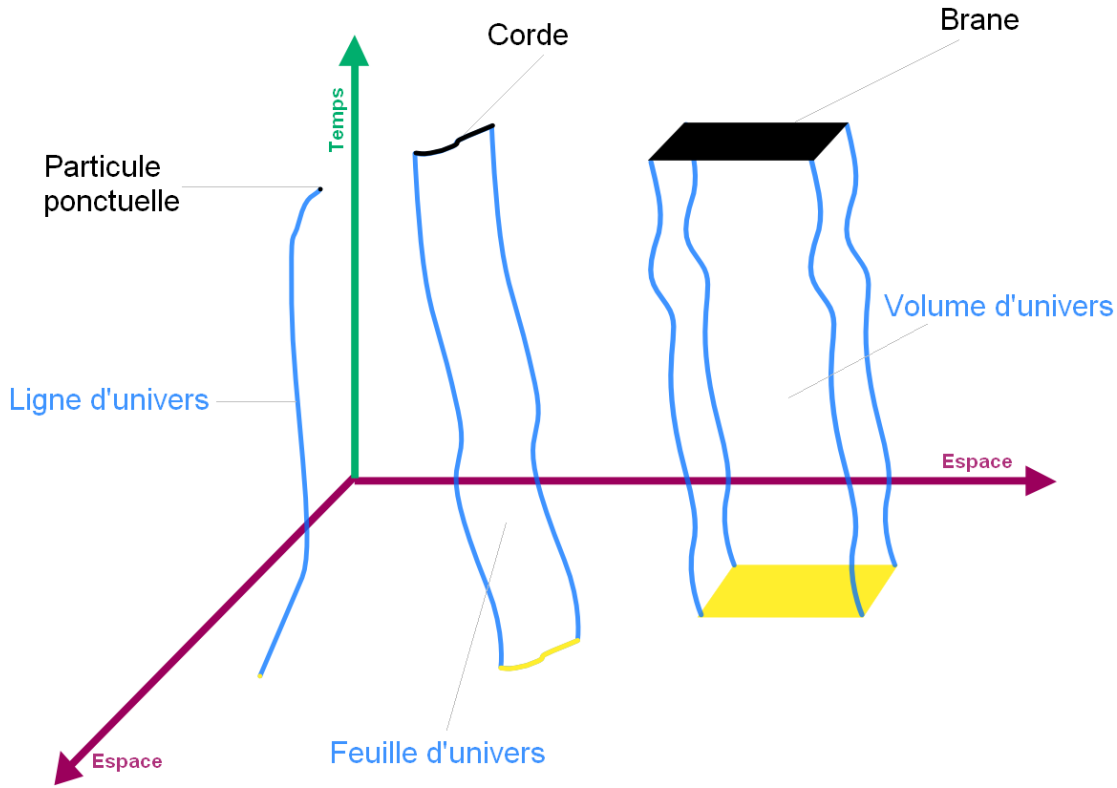
Relativité restreinte et espace-temps [Minkowski (1908)]

- relativité restreinte = théorie géométrique de l'espace-temps (**4 dimensions**) ;
- points = **événements** (quelque part à un instant donné) ;



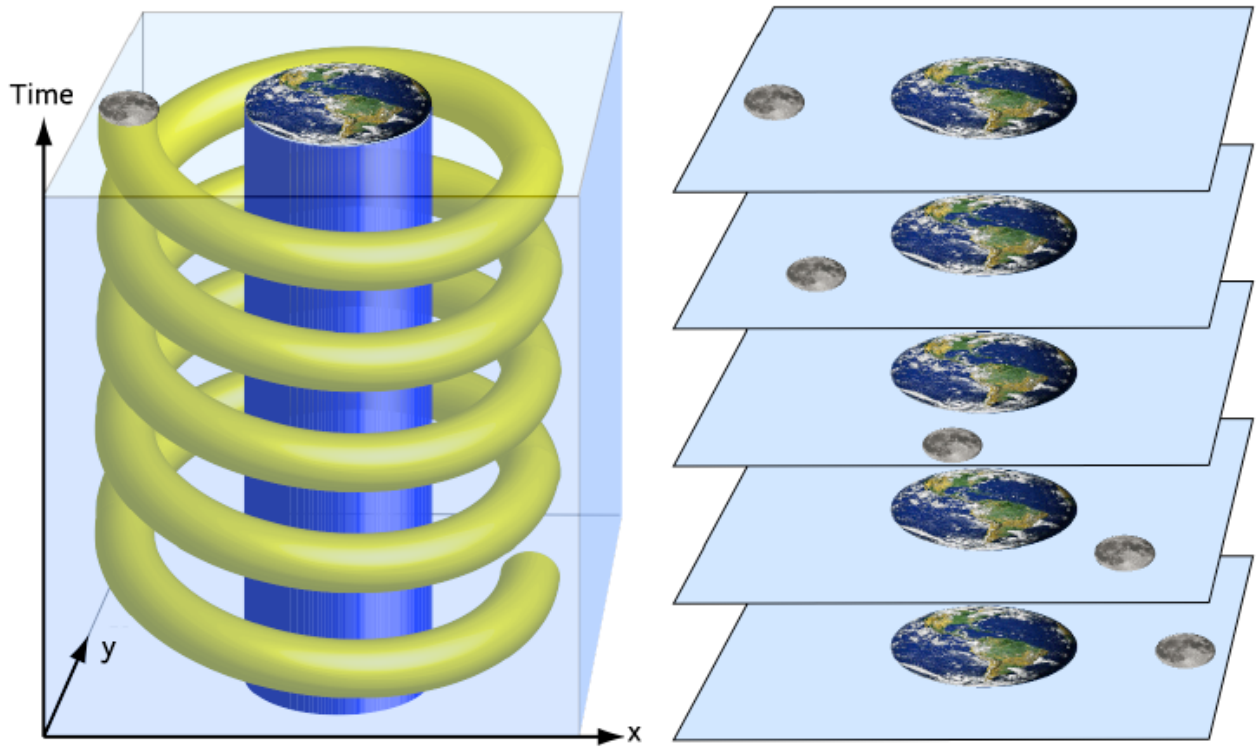
Relativité restreinte et espace-temps [Minkowski (1908)]

- relativité restreinte = théorie géométrique de l'espace-temps (**4 dimensions**) ;
- points = **événements** (quelque part à un instant donné) ;



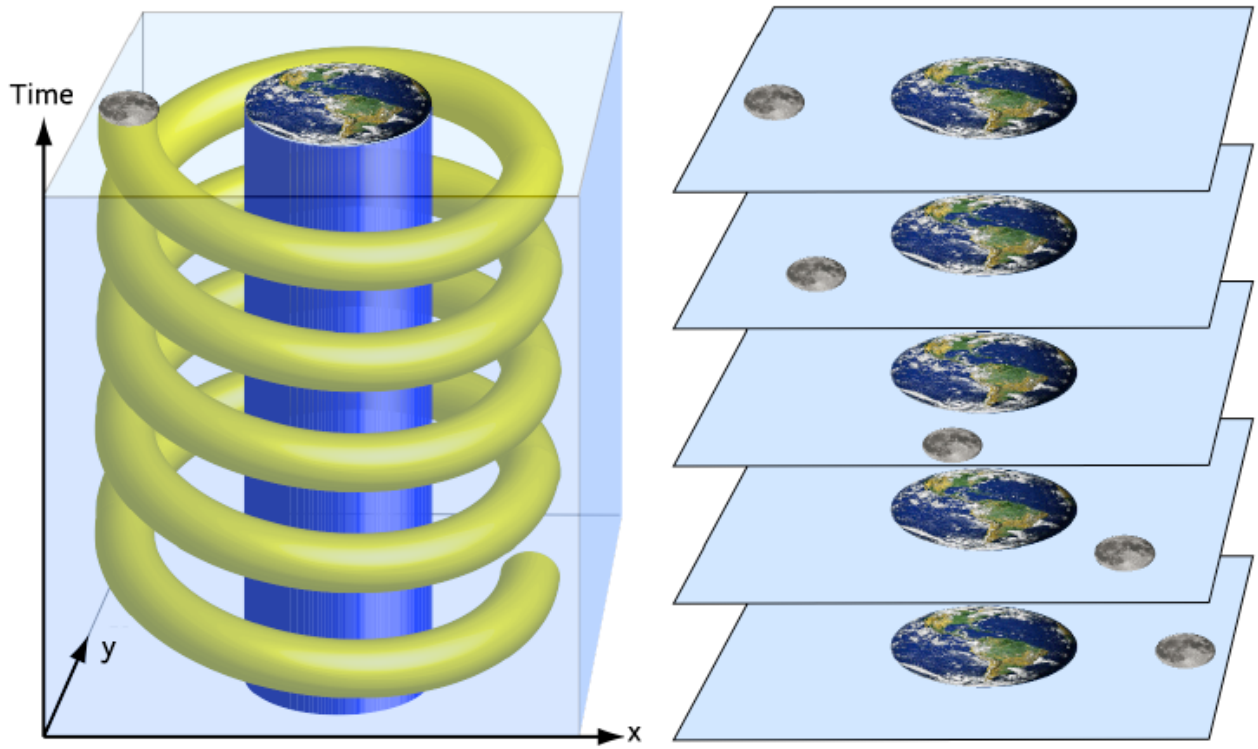
Espace et espace-temps

- **présent** = tranche (tridimensionnelle) de l'espace-temps (= ensemble d'événements simultanés, pas un point d'une ligne) ;
- **temps** = arrangement ordonné **partiel** des événements.



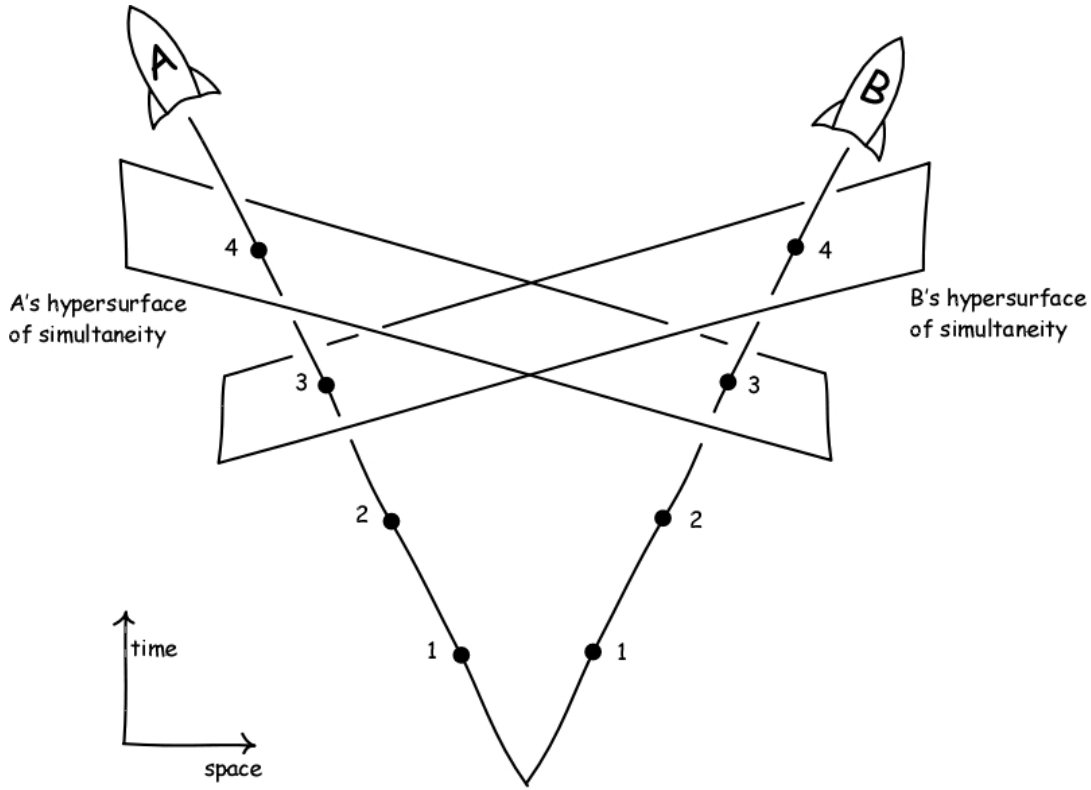
Espace et espace-temps

- **présent** = tranche (tridimensionnelle) de l'espace-temps (= ensemble d'événements simultanés, pas un point d'une ligne) ;
- **temps** = arrangement ordonné **partiel** des événements.



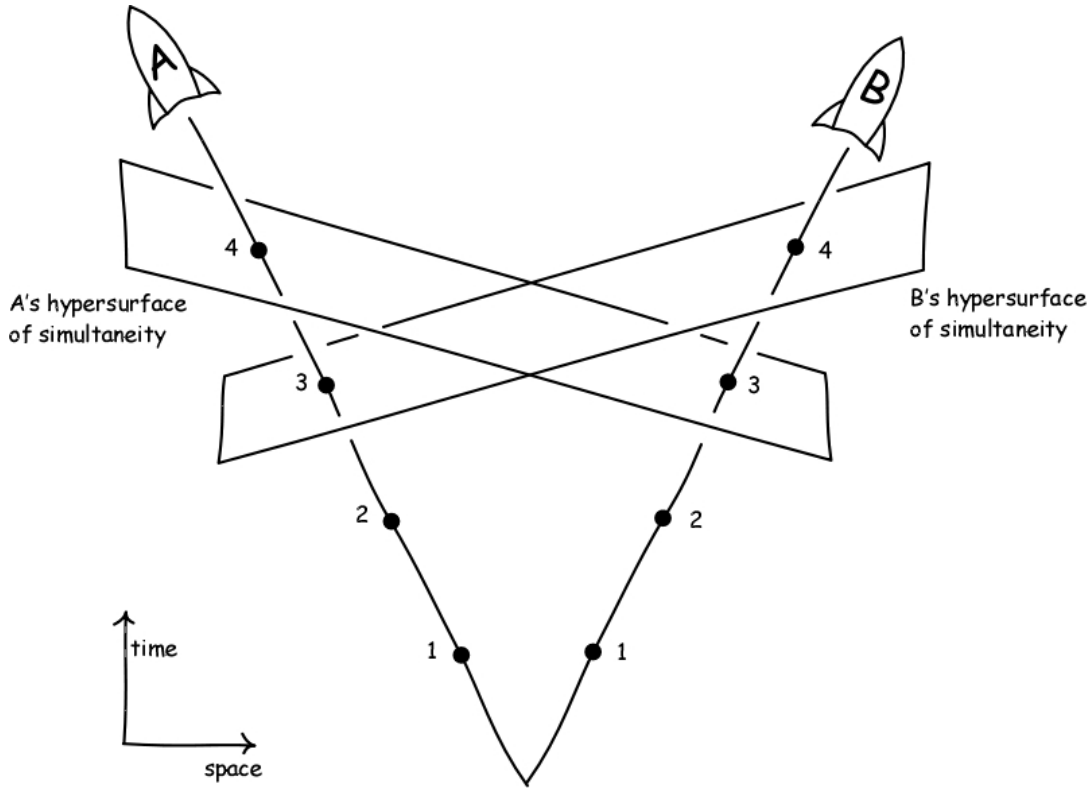
Relativité du temps et de l'espace

- **relativité de la simultanéité** $\leftrightarrow$ relativité du découpage en tranches spatiales (= en moments présents) ;
- **contraction et dilatation** de Lorentz $\equiv$ perspective spatio-temporelle ;
- « vitesse de la lumière » = « constante géométrique » $\rightarrow$ vitesse maximale pour l'information et vitesse de toute particule sans masse (**pas uniquement la lumière**).



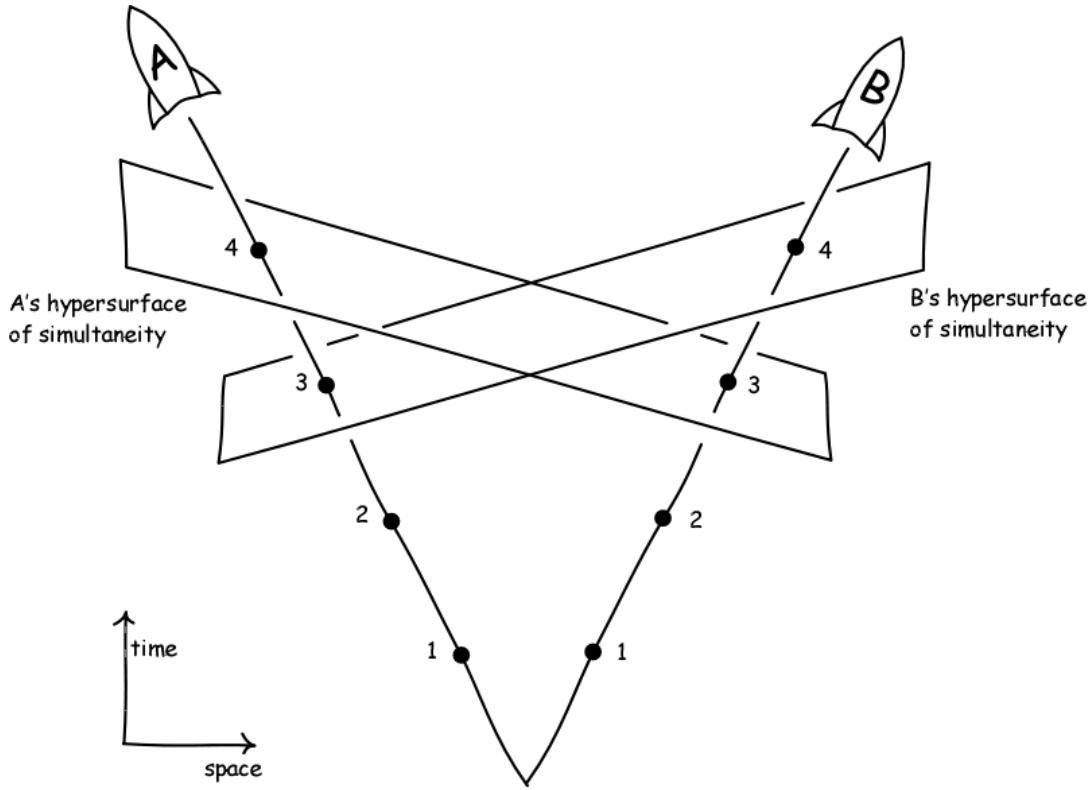
Relativité du temps et de l'espace

- **relativité de la simultanéité** $\leftrightarrow$ relativité du découpage en tranches spatiales (= en moments présents) ;
- **contraction et dilatation** de Lorentz $\equiv$ perspective spatio-temporelle ;
- « vitesse de la lumière » = « constante géométrique » $\rightarrow$ vitesse maximale pour l'information et vitesse de toute particule sans masse (**pas uniquement la lumière**).



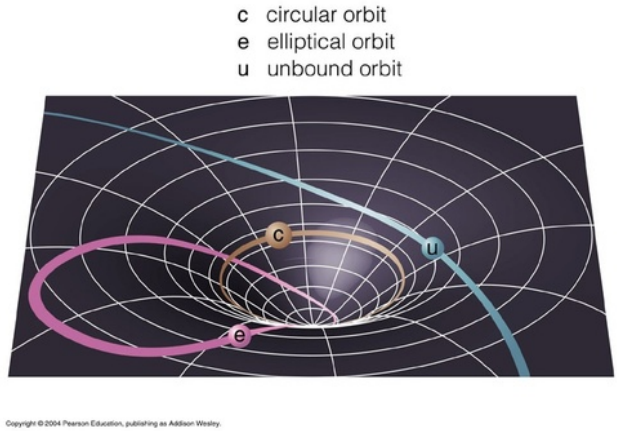
Relativité du temps et de l'espace

- **relativité de la simultanéité** $\leftrightarrow$ relativité du découpage en tranches spatiales (= en moments présents) ;
- **contraction et dilatation** de Lorentz $\equiv$ perspective spatio-temporelle ;
- « vitesse de la lumière » = « constante géométrique » $\rightarrow$ vitesse maximale pour l'information et vitesse de toute particule sans masse (**pas uniquement la lumière**).



Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

- besoin de modifier la gravitation de Newton pour propagation 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 des planètes = "**lignes droites**" (géodésiques) dans un espace-temps courbe
- **équations de la relativité générale (RG) publiées en 1915**
- prédiction de la **déviation de la lumière** ; observée par Eddington en 1919

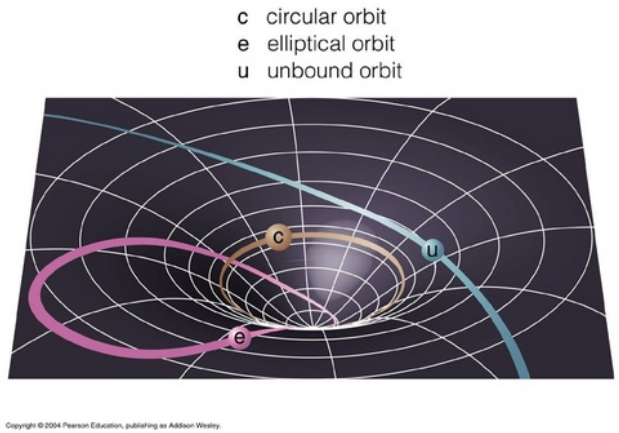


Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

exemples d'orbites dans un espace courbe **bidimensionnel**

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

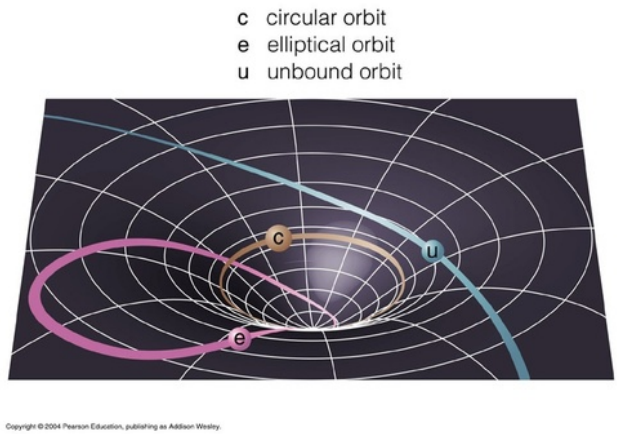
- besoin de modifier la gravitation de Newton pour propagation à vitesse $\leq c$
- **idées** :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre)
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ?
  - gravitation $\sim$ courbure de l'espace-temps par la matière et l'**énergie**
  - **champ gravitationnel** $\leftrightarrow$ espace-temps lui-même ($\sim$ milieu **élastique**)
  - orbites des planètes = "**lignes droites**" (géodésiques) dans un espace-temps courbe
- **équations de la relativité générale (RG) publiées en 1915**
- prédiction de la **déviation de la lumière** ; observée par Eddington en 1919



exemples d'orbites dans un espace courbe **bidimensionnel**

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

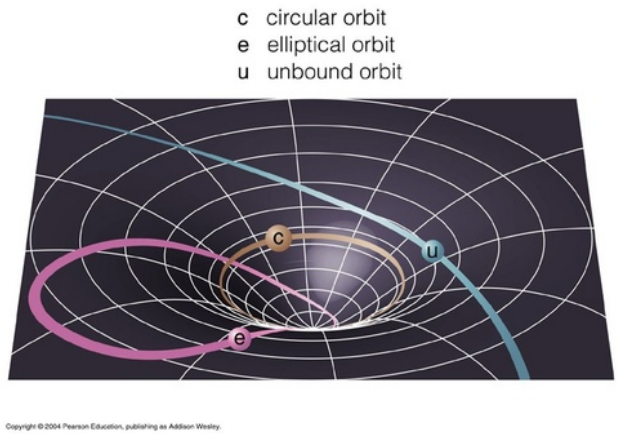
- besoin de modifier la gravitation de Newton pour propagation à vitesse $\leq c$
- **idées** :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre)
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ?
  - gravitation $\sim$ courbure de l'espace-temps par la matière et l'**énergie**
  - **champ gravitationnel** $\leftrightarrow$ espace-temps lui-même ($\sim$ milieu **élastique**)
  - orbites des planètes = "**lignes droites**" (géodésiques) dans un espace-temps courbe
- **équations de la relativité générale (RG) publiées en 1915**
- prédiction de la **déviation de la lumière** ; observée par Eddington en 1919



exemples d'orbites dans un espace courbe **bidimensionnel**

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

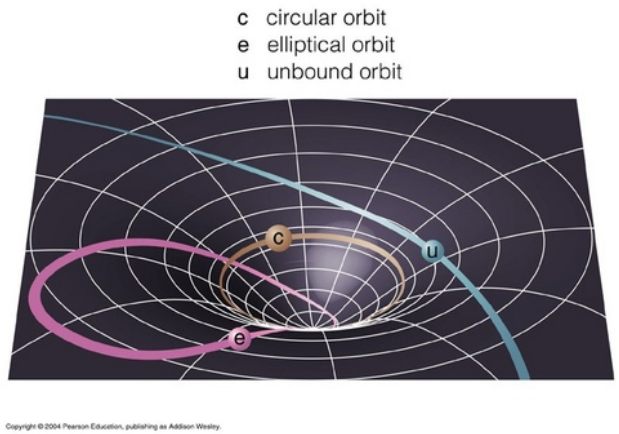
- besoin de modifier la gravitation de Newton pour propagation à vitesse $\leq c$
- **idées** :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre)
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ?
  - gravitation $\sim$ courbure de l'espace-temps par la matière et l'**énergie**
  - **champ gravitationnel** $\leftrightarrow$ espace-temps lui-même ($\sim$ milieu **élastique**)
  - orbites des planètes = "**lignes droites**" (géodésiques) dans un espace-temps courbe
- **équations de la relativité générale (RG) publiées en 1915**
- prédiction de la **déviation de la lumière** ; observée par Eddington en 1919



exemples d'orbites dans un espace courbe **bidimensionnel**

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

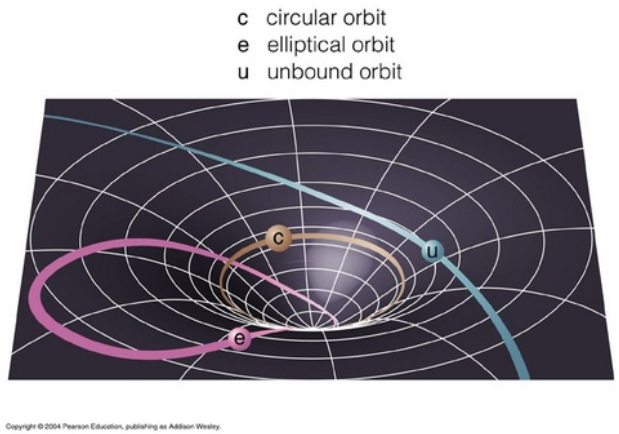
- besoin de modifier la gravitation de Newton pour propagation à vitesse $\leq c$
- **idées** :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre)
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ?
  - gravitation $\sim$ courbure de l'espace-temps par la matière et l'**énergie**
  - **champ gravitationnel** $\leftrightarrow$ espace-temps lui-même ($\sim$ milieu **élastique**)
  - orbites des planètes = "**lignes droites**" (géodésiques) dans un espace-temps courbe
- **équations de la relativité générale (RG) publiées en 1915**
- prédiction de la **déviation de la lumière** ; observée par Eddington en 1919



exemples d'orbites dans un espace courbe **bidimensionnel**

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

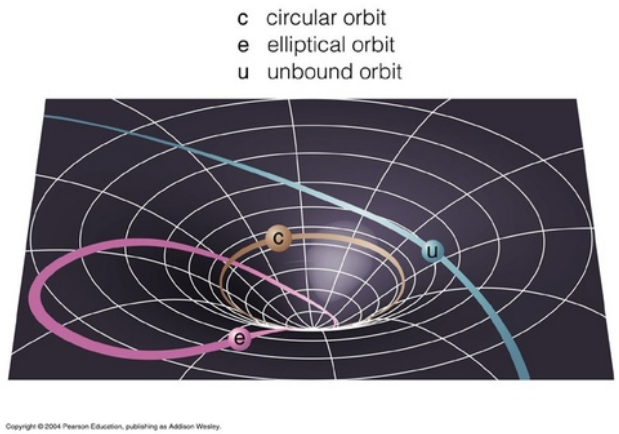
- besoin de modifier la gravitation de Newton pour propagation à vitesse $\leq c$
- **idées** :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre)
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ?
  - gravitation $\sim$ courbure de l'espace-temps par la matière et l'**énergie**
  - **champ gravitationnel** $\leftrightarrow$ espace-temps lui-même ($\sim$ milieu **élastique**)
  - orbites des planètes = "**lignes droites**" (géodésiques) dans un espace-temps courbe
- **équations de la relativité générale (RG) publiées en 1915**
- prédiction de la **déviation de la lumière** ; observée par Eddington en 1919



exemples d'orbites dans un espace courbe **bidimensionnel**

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

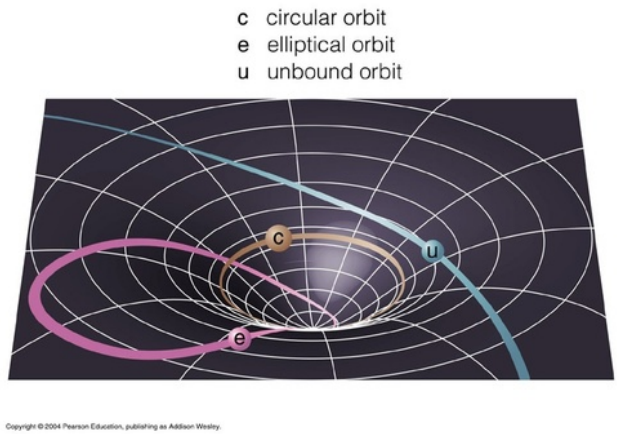
- besoin de modifier la gravitation de Newton pour propagation à vitesse $\leq c$
- **idées** :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre)
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ?
  - gravitation $\sim$ courbure de l'espace-temps par la matière et l'**énergie**
  - **champ gravitationnel** $\leftrightarrow$ espace-temps lui-même ($\sim$ milieu **élastique**)
  - orbites des planètes = "**lignes droites**" (géodésiques) dans un espace-temps courbe
- **équations de la relativité générale (RG) publiées en 1915**
- prédiction de la **déviation de la lumière** ; observée par Eddington en 1919



exemples d'orbites dans un espace courbe **bidimensionnel**

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

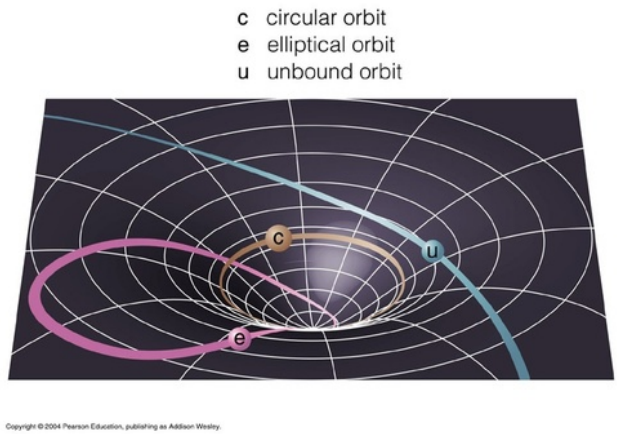
- besoin de modifier la gravitation de Newton pour propagation à vitesse $\leq c$
- **idées** :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre)
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ?
  - gravitation $\sim$ courbure de l'espace-temps par la matière et l'**énergie**
  - **champ gravitationnel** $\leftrightarrow$ espace-temps lui-même ($\sim$ milieu **élastique**)
  - orbites des planètes = "**lignes droites**" (géodésiques) dans un espace-temps courbe
- **équations de la relativité générale (RG) publiées en 1915**
- prédiction de la **déviation de la lumière** ; observée par Eddington en 1919



exemples d'orbites dans un espace courbe **bidimensionnel**

Gravitation relativiste (Einstein, 1907-1915)

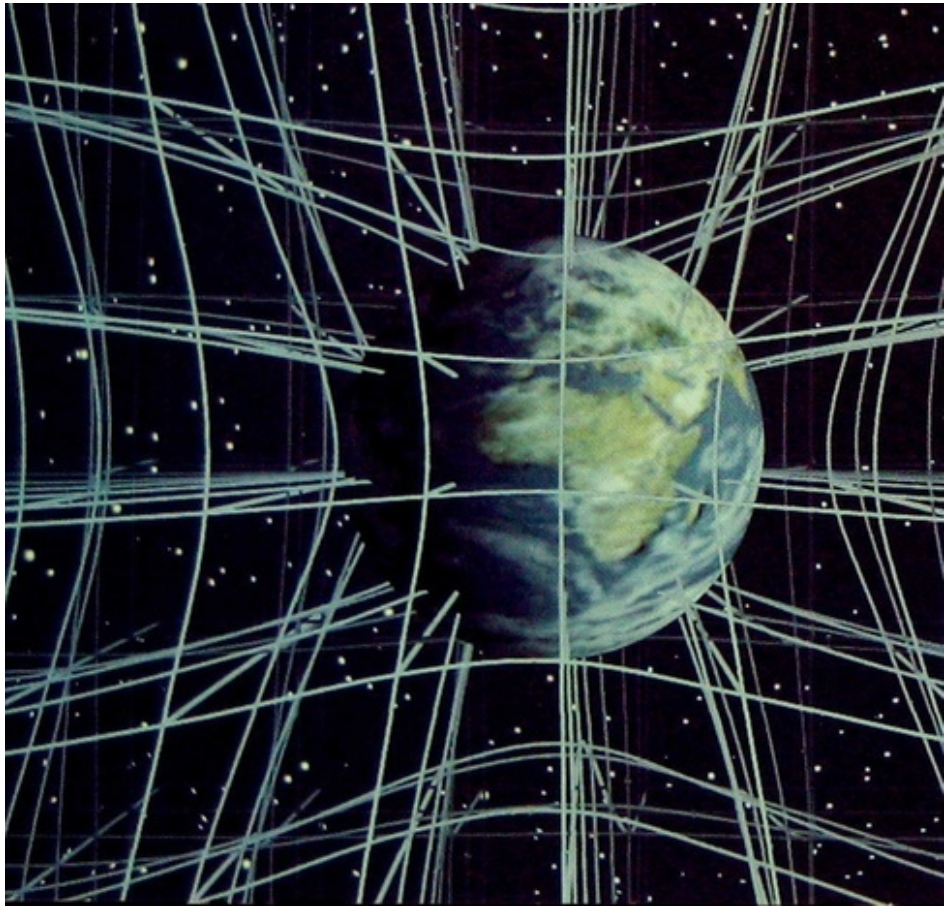
- besoin de modifier la gravitation de Newton pour propagation à vitesse $\leq c$
- **idées** :
  - gravitation $\neq$ force comme les autres (universalité de la chute libre)
  - universalité $\equiv$ propriété de l'espace-temps lui-même ?
  - gravitation $\sim$ courbure de l'espace-temps par la matière et l'**énergie**
  - **champ gravitationnel** $\leftrightarrow$ espace-temps lui-même ($\sim$ milieu **élastique**)
  - orbites des planètes = "**lignes droites**" (géodésiques) dans un espace-temps courbe
- **équations de la relativité générale (RG) publiées en 1915**
- prédiction de la **déviation de la lumière** ; observée par Eddington en 1919



exemples d'orbites dans un espace courbe **bidimensionnel**

Courbure spatio-temporelle

courbure du temps : votre tête vieillit plus vite que vos pieds (crucial pour le **GPS**)



représentation tridimensionnelle de la courbure provoquée par la Terre

Solution de Schwarzschild et singularités

- **1916, Schwarzschild** : solution des équations d'Einstein (espace-temps associé à une masse sphérique)
- pour une masse M donnée, terme infini (= singularité) dans la solution si rayon R plus petit que le "rayon de Schwarzschild"

$$R_S = \frac{2\,G\,M}{c^2}$$

- $R_S =$ rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- longues discussions concernant le sens physique du phénomène et sa "réalité"...
- semble d'abord irréaliste :
  $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 2950\,\text{m} \rightarrow$ très différent du rayon des étoiles observées...
- exemple : rayon de Schwarzschild de la Terre = 9 mm...
- véritable compréhension dans les années 1960 (meilleure maîtrise de la *géométrie différentielle des variétés pseudo-riemanniennes*)

Solution de Schwarzschild et singularités

- **1916, Schwarzschild** : solution des équations d'Einstein (espace-temps associé à une masse sphérique)
- pour une masse M donnée, terme infini (= singularité) dans la solution si rayon R plus petit que le "rayon de Schwarzschild"

$$R_S = \frac{2\,G\,M}{c^2}$$

- R_S = rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- longues discussions concernant le sens physique du phénomène et sa "réalité"...
- semble d'abord irréaliste :
  $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 2950\,\text{m} \rightarrow$ très différent du rayon des étoiles observées...
- exemple : rayon de Schwarzschild de la Terre = 9 mm...
- véritable compréhension dans les années 1960 (meilleure maîtrise de la *géométrie différentielle des variétés pseudo-riemanniennes*)

Solution de Schwarzschild et singularités

- **1916, Schwarzschild** : solution des équations d'Einstein (espace-temps associé à une masse sphérique)
- pour une masse M donnée, terme infini ($=$ singularité) dans la solution si rayon R plus petit que le "rayon de Schwarzschild"

$$R_S = \frac{2\,G\,M}{c^2}$$

- $R_S =$ rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- longues discussions concernant le sens physique du phénomène et sa "réalité"...
- semble d'abord irréaliste :
  $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 2950\,\text{m} \rightarrow$ très différent du rayon des étoiles observées...
- exemple : rayon de Schwarzschild de la Terre $=$ 9 mm...
- véritable compréhension dans les années 1960 (meilleure maîtrise de la *géométrie différentielle des variétés pseudo-riemanniennes*)

Solution de Schwarzschild et singularités

- **1916, Schwarzschild** : solution des équations d'Einstein (espace-temps associé à une masse sphérique)
- pour une masse M donnée, terme infini (= singularité) dans la solution si rayon R plus petit que le "rayon de Schwarzschild"

$$R_S = \frac{2\,G\,M}{c^2}$$

- R_S = rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- longues discussions concernant le sens physique du phénomène et sa "réalité"...
- semble d'abord irréaliste : $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 2950\,\text{m} \rightarrow$ très différent du rayon des étoiles observées...
- exemple : rayon de Schwarzschild de la Terre = 9 mm...
- véritable compréhension dans les années 1960 (meilleure maîtrise de la *géométrie différentielle des variétés pseudo-riemanniennes*)

Solution de Schwarzschild et singularités

- **1916, Schwarzschild** : solution des équations d'Einstein (espace-temps associé à une masse sphérique)
- pour une masse M donnée, terme infini (= singularité) dans la solution si rayon R plus petit que le "rayon de Schwarzschild"

$$R_S = \frac{2\,G\,M}{c^2}$$

- R_S = rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- longues discussions concernant le sens physique du phénomène et sa "réalité"...
- semble d'abord irréaliste :
  $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 2950\,\text{m} \rightarrow$ très différent du rayon des étoiles observées...
- exemple : rayon de Schwarzschild de la Terre = 9 mm...
- véritable compréhension dans les années 1960 (meilleure maîtrise de la *géométrie différentielle des variétés pseudo-riemanniennes*)

Solution de Schwarzschild et singularités

- **1916, Schwarzschild** : solution des équations d'Einstein (espace-temps associé à une masse sphérique)
- pour une masse M donnée, terme infini (= singularité) dans la solution si rayon R plus petit que le "rayon de Schwarzschild"

$$R_S = \frac{2\,G\,M}{c^2}$$

- R_S = rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- longues discussions concernant le sens physique du phénomène et sa "réalité"...
- semble d'abord irréaliste :
  $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 2950\,\text{m} \rightarrow$ très différent du rayon des étoiles observées...
- exemple : rayon de Schwarzschild de la Terre = 9 mm...
- véritable compréhension dans les années 1960 (meilleure maîtrise de la *géométrie différentielle des variétés pseudo-riemanniennes*)

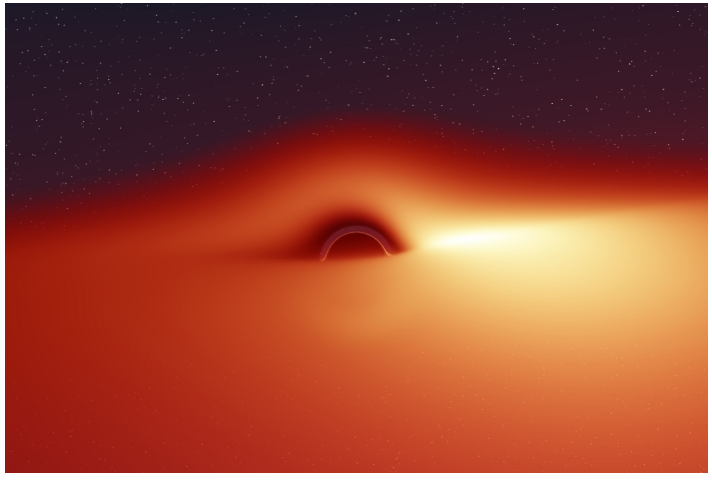
Solution de Schwarzschild et singularités

- **1916, Schwarzschild** : solution des équations d'Einstein (espace-temps associé à une masse sphérique)
- pour une masse M donnée, terme infini (= singularité) dans la solution si rayon R plus petit que le "rayon de Schwarzschild"

$$R_S = \frac{2\,G\,M}{c^2}$$

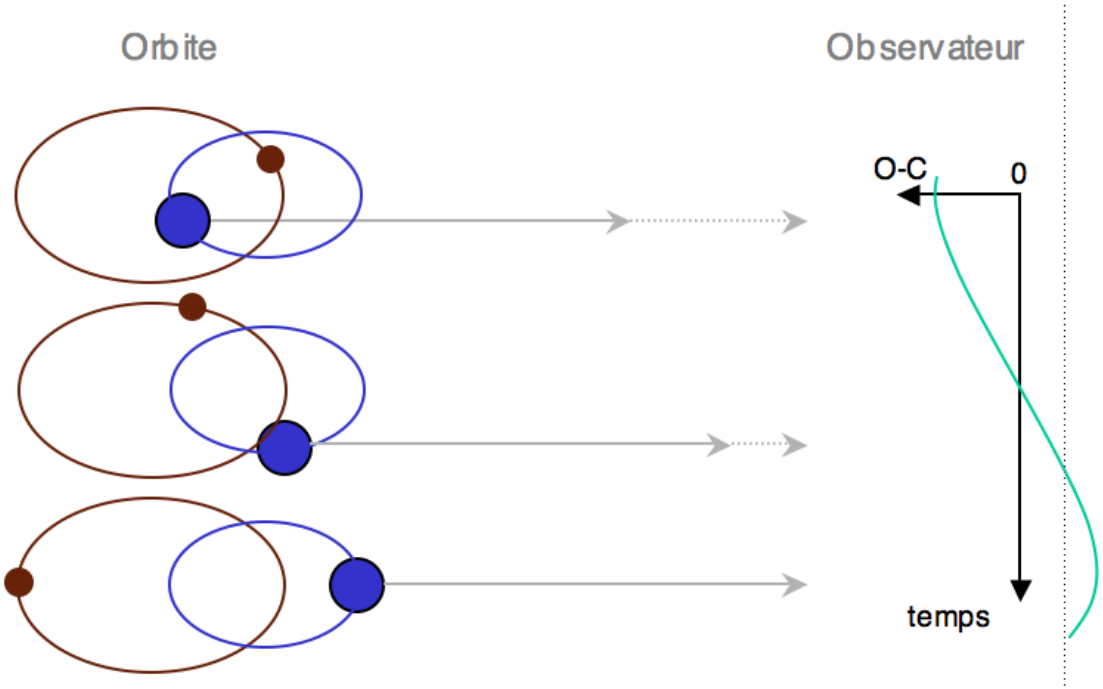
- R_S = rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- longues discussions concernant le sens physique du phénomène et sa "réalité"...
- semble d'abord irréaliste :
  $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 2950\,\text{m} \rightarrow$ très différent du rayon des étoiles observées...
- exemple : rayon de Schwarzschild de la Terre = 9 mm...
- véritable compréhension dans les années 1960 (meilleure maîtrise de la *géométrie différentielle des variétés pseudo-riemanniennes*)

II : La découverte des objets astrophysiques compacts



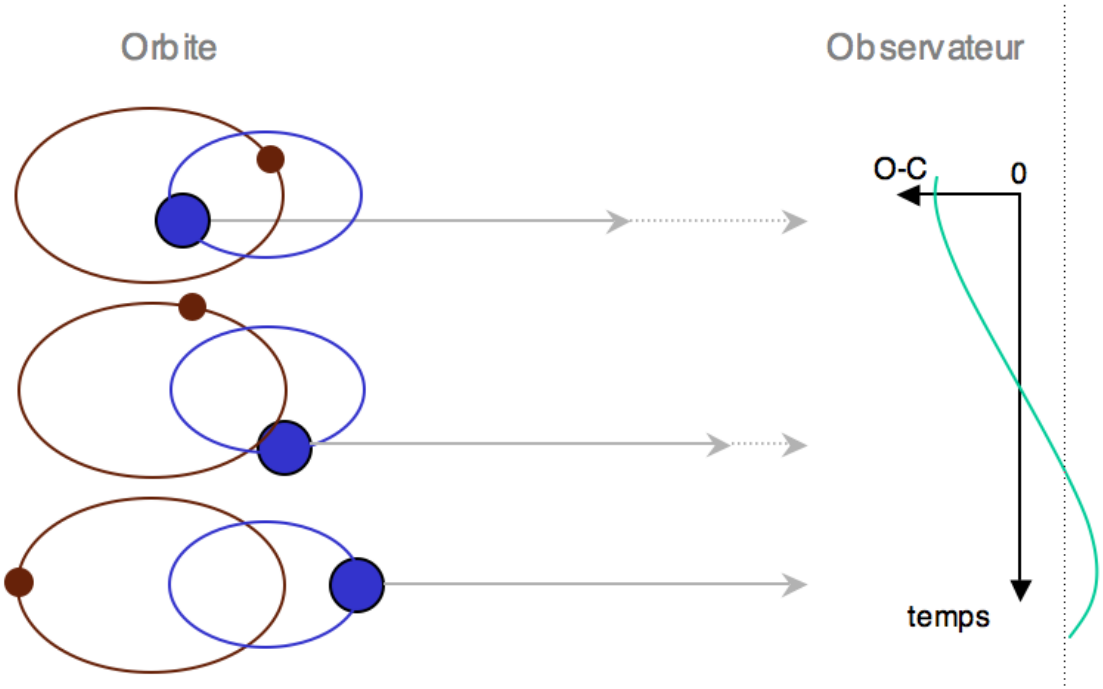
Premier pas : les systèmes binaires

- **1717, Halley** : Sirius a une **"trajectoire oscillante"**
  $\rightarrow$ pas compris dans un premier temps...
- **1783, Herschel** : découverte d'un système (stellaire) binaire (40 Eridani : en fait, système triple !)
- environ 50% des étoiles visibles à l'œil nu dans des systèmes multiples ?



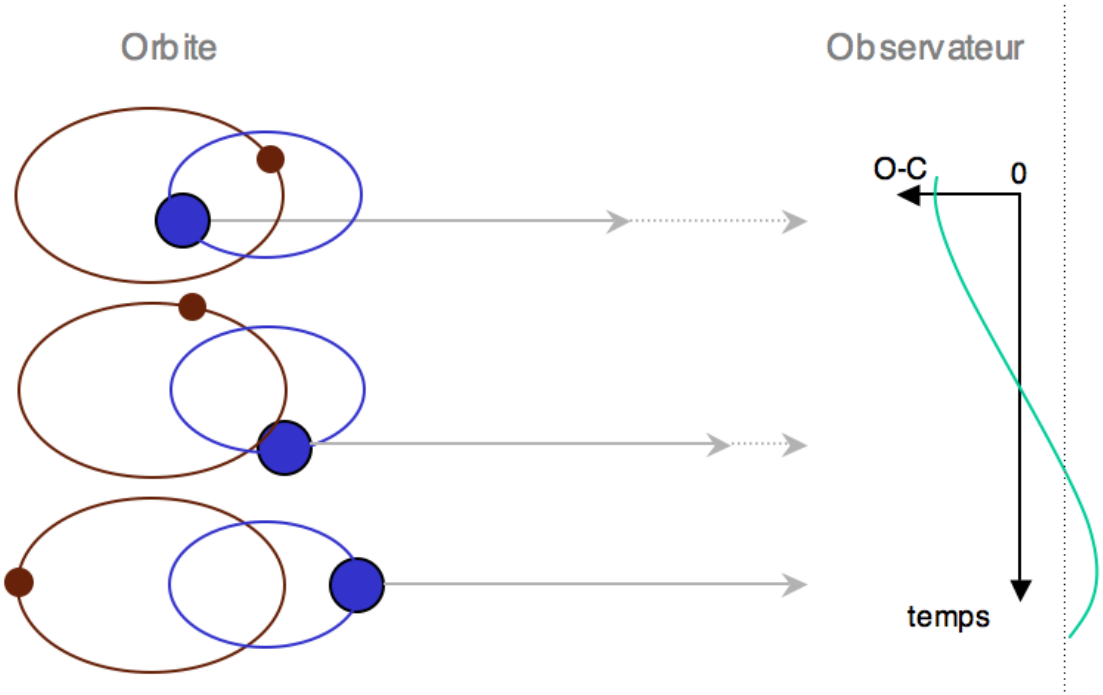
Premier pas : les systèmes binaires

- **1717, Halley** : Sirius a une **"trajectoire oscillante"**
  $\rightarrow$ pas compris dans un premier temps...
- **1783, Herschel** : découverte d'un système (stellaire) binaire (40 Eridani : en fait, système triple !)
- environ 50% des étoiles visibles à l'œil nu dans des systèmes multiples ?



Premier pas : les systèmes binaires

- **1717, Halley** : Sirius a une **"trajectoire oscillante"**
  $\rightarrow$ pas compris dans un premier temps...
- **1783, Herschel** : découverte d'un système (stellaire) binaire (40 Eridani : en fait, système triple !)
- environ 50% des étoiles visibles à l'œil nu dans des systèmes multiples ?



Second pas : la reconnaissance des naines blanches

- **1844, Bessel** : mouvement de Sirius A dû à un compagnon invisible
- **1862** : observation de Sirius B, étoile très peu lumineuse (**naine blanche, NB**)
- **1915** : découverte de sa haute température (= forte émissivité) par analyse spectrale
  $\rightarrow$ étoile très petite ($\sim$ taille de la Terre)
  $\rightarrow$ masse volumique $\sim$ 1 tonne par centimètre cube (10^6 fois la densité du Soleil !)

Second pas : la reconnaissance des naines blanches

- **1844, Bessel** : mouvement de Sirius A dû à un compagnon invisible
- **1862** : observation de Sirius B, étoile très peu lumineuse (**naine blanche, NB**)
- **1915** : découverte de sa haute température (= forte émissivité) par analyse spectrale
  → étoile très petite ($\sim$ taille de la Terre)
  → masse volumique $\sim$ 1 tonne par centimètre cube (10^6 fois la densité du Soleil !)

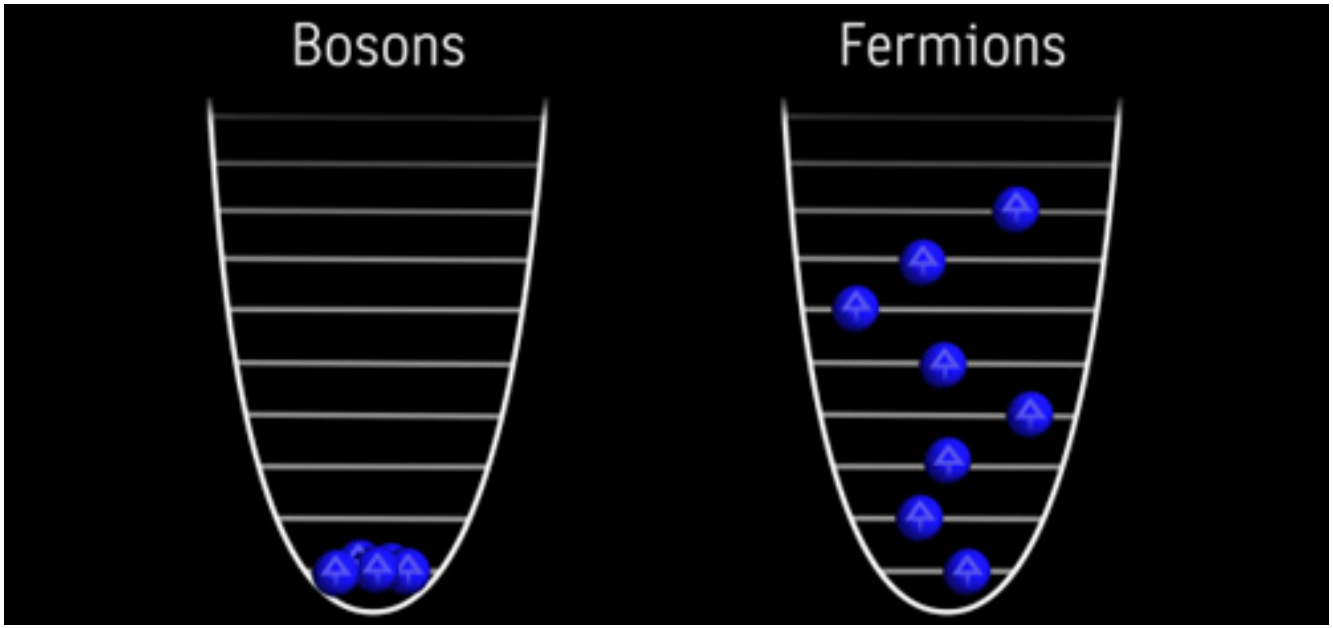
Second pas : la reconnaissance des naines blanches

- **1844, Bessel** : mouvement de Sirius A dû à un compagnon invisible
- **1862** : observation de Sirius B, étoile très peu lumineuse (**naine blanche, NB**)
- **1915** : découverte de sa haute température (= forte émissivité) par analyse spectrale
  $\rightarrow$ étoile très petite ($\sim$ taille de la Terre)
  $\rightarrow$ masse volumique $\sim$ 1 tonne par centimètre cube (10^6 fois la densité du Soleil !)

Troisième pas : la compréhension des naines blanches

- **1924, Eddington** : RG prédit un décalage spectral gravitationnel de la lumière émise par une NB (effet Einstein)
- **1925, Adams** : effectivement observé
- **1926, Fowler** : densité rendue possible grâce à la physique quantique et le principe d'exclusion de Pauli (1925)

$\Longrightarrow$ la pression quantique des électrons résiste à la gravité

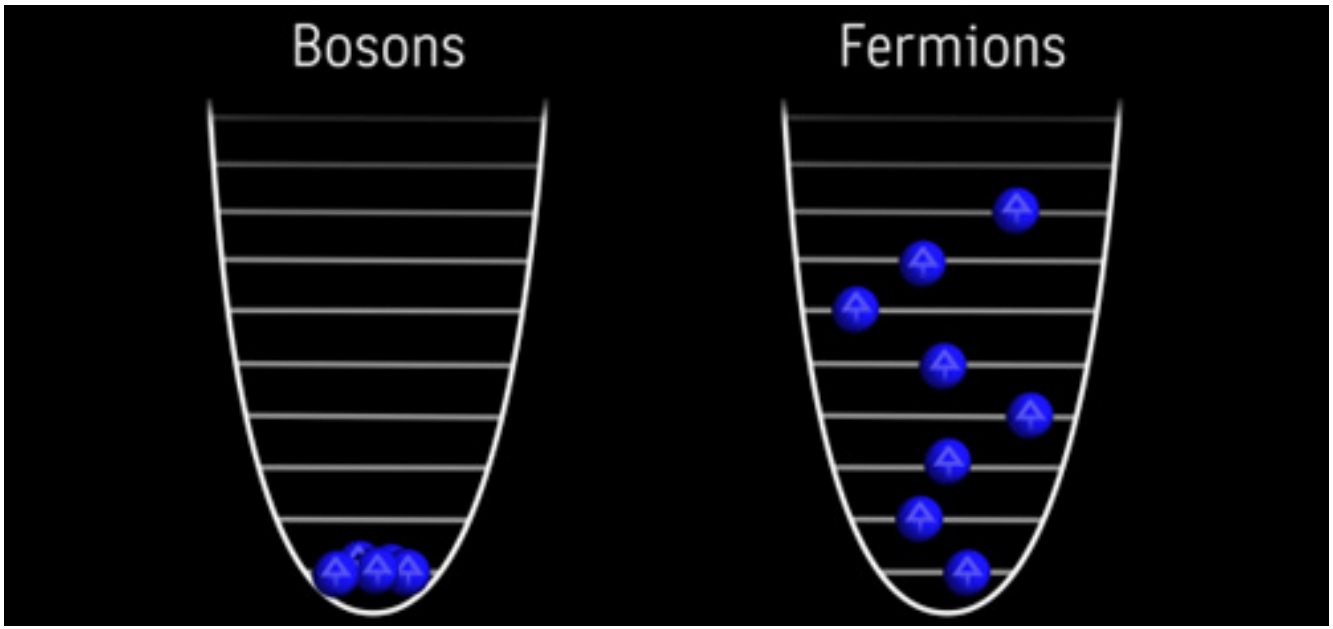


(a) bosons et (b) fermions à "basse" température

Troisième pas : la compréhension des naines blanches

- **1924, Eddington** : RG prédit un décalage spectral gravitationnel de la lumière émise par une NB (effet Einstein)
- **1925, Adams** : effectivement observé
- **1926, Fowler** : densité rendue possible grâce à la physique quantique et le principe d'exclusion de Pauli (1925)

$\Longrightarrow$ la pression quantique des électrons résiste à la gravité

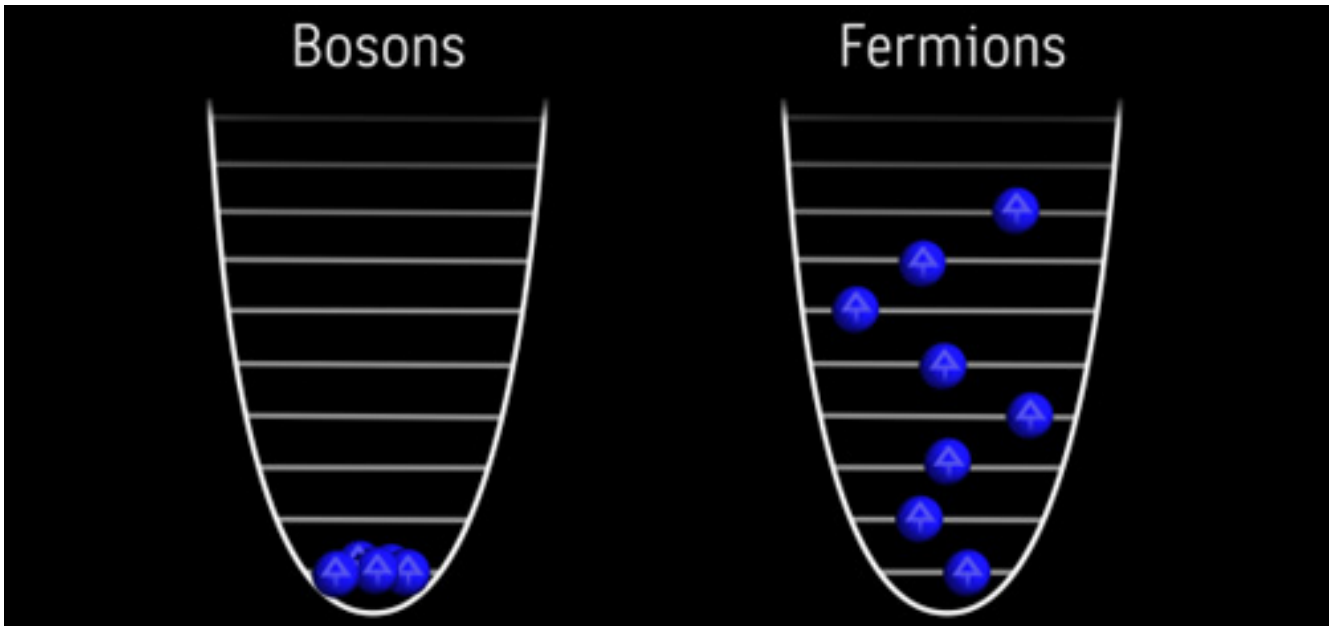


(a) bosons et (b) fermions à "basse" température

Troisième pas : la compréhension des naines blanches

- **1924, Eddington** : RG prédit un décalage spectral gravitationnel de la lumière émise par une NB (effet Einstein)
- **1925, Adams** : effectivement observé
- **1926, Fowler** : densité rendue possible grâce à la physique quantique et le principe d'exclusion de Pauli (1925)

$\Longrightarrow$ la pression quantique des électrons résiste à la gravité

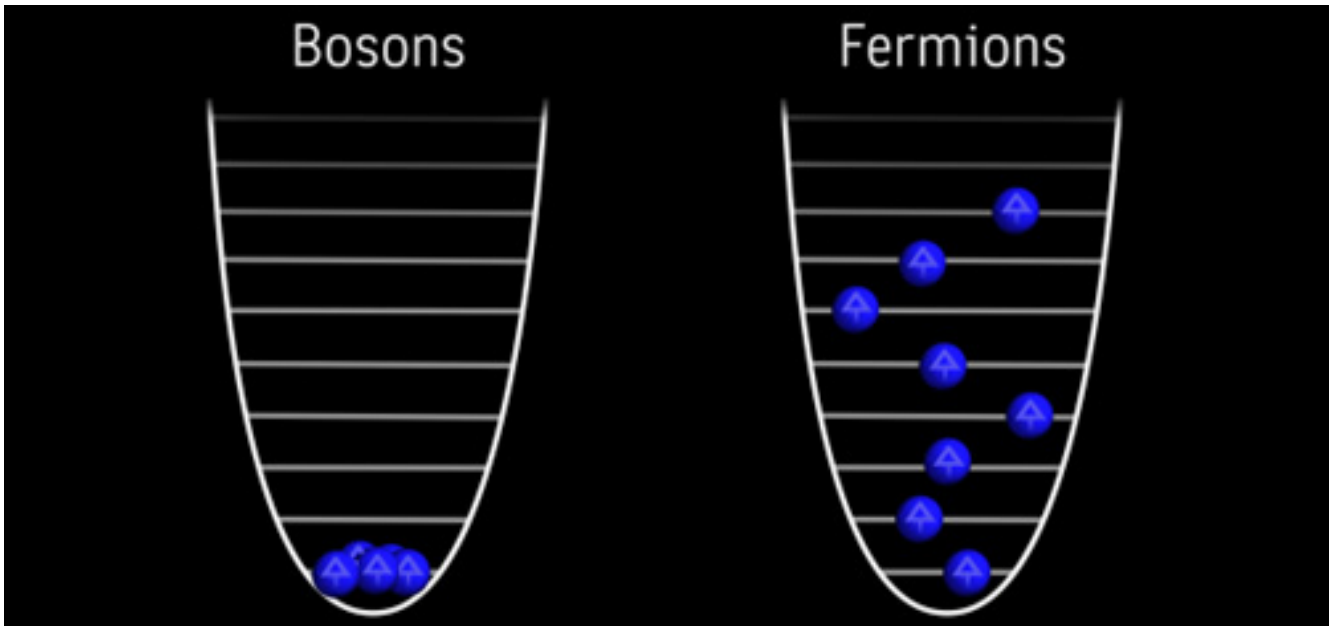


(a) bosons et (b) fermions à "basse" température

Troisième pas : la compréhension des naines blanches

- **1924, Eddington** : RG prédit un décalage spectral gravitationnel de la lumière émise par une NB (effet Einstein)
- **1925, Adams** : effectivement observé
- **1926, Fowler** : densité rendue possible grâce à la physique quantique et le principe d'exclusion de Pauli (1925)

  $\Longrightarrow$ la pression quantique des électrons résiste à la gravité



(a) bosons et (b) fermions à "basse" température

Quatrième pas : supernovæ, pulsars, etc.

- **1932, Chadwick** : découverte du neutron
- **1934, Yukawa** : théorie des noyaux atomiques et de leur structure
- **1934, Baade & Zwicky** : lien entre supernovæ et "étoiles à neutrons" (EN) ?
- **1939, Oppenheimer & Snyder** : simulations numériques d'un effondrement stellaire
  $\rightarrow$ apparition d'un "astre occlus"
- **1965** observation de Cygnus X-1 (étoile + source X)
- **1967, Bell & Hewish** : découverte du premier pulsar (taille $\sim$ 10 km)
  $\rightarrow$ masse volumique $\sim 10^8$ tonne par cm^3

The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)

ESO PR Photo 40f/99 (17 November 1999)

© European Southern Observatory

astres occlus et EN sérieusement envisagés comme les résidus de l'effondrement d'étoiles massives $\rightarrow$ **"âge d'or" des trous noirs** (1960-70)

Quatrième pas : supernovæ, pulsars, etc.

- **1932, Chadwick** : découverte du neutron
- **1934, Yukawa** : théorie des noyaux atomiques et de leur structure
- **1934, Baade & Zwicky** : lien entre supernovæ et "étoiles à neutrons" (EN) ?
- **1939, Oppenheimer & Snyder** : simulations numériques d'un effondrement stellaire
  $\rightarrow$ apparition d'un "astre occlus"
- **1965** observation de Cygnus X-1 (étoile + source X)
- **1967, Bell & Hewish** : découverte du premier pulsar (taille $\sim$ 10 km)
  $\rightarrow$ masse volumique $\sim 10^8$ tonne par cm^3

The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)

ESO PR Photo 40f/99 (17 November 1999)

© European Southern Observatory

astres occlus et EN sérieusement envisagés comme les résidus de l'effondrement d'étoiles massives $\rightarrow$ **"âge d'or" des trous noirs** (1960-70)

Quatrième pas : supernovæ, pulsars, etc.

- **1932, Chadwick** : découverte du neutron
- **1934, Yukawa** : théorie des noyaux atomiques et de leur structure
- **1934, Baade & Zwicky** : lien entre supernovæ et "étoiles à neutrons" (EN) ?
- **1939, Oppenheimer & Snyder** : simulations numériques d'un effondrement stellaire
  $\rightarrow$ apparition d'un "astre occlus"
- **1965** observation de Cygnus X-1 (étoile + source X)
- **1967, Bell & Hewish** : découverte du premier pulsar (taille $\sim$ 10 km)
  $\rightarrow$ masse volumique $\sim 10^8$ tonne par cm^3

The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)

ESO PR Photo 40f/99 (17 November 1999)

© European Southern Observatory

astres occlus et EN sérieusement envisagés comme les résidus de l'effondrement d'étoiles massives $\rightarrow$ **"âge d'or" des trous noirs** (1960-70)

Quatrième pas : supernovæ, pulsars, etc.

- **1932, Chadwick** : découverte du neutron
- **1934, Yukawa** : théorie des noyaux atomiques et de leur structure
- **1934, Baade & Zwicky** : lien entre supernovæ et "étoiles à neutrons" (EN) ?
- **1939, Oppenheimer & Snyder** : simulations numériques d'un effondrement stellaire
  $\rightarrow$ apparition d'un "astre occlus"
- **1965** observation de Cygnus X-1 (étoile + source X)
- **1967, Bell & Hewish** : découverte du premier pulsar (taille $\sim$ 10 km)
  $\rightarrow$ masse volumique $\sim 10^8$ tonne par cm^3

astres occlus et EN sérieusement envisagés comme les résidus de l'effondrement d'étoiles massives $\rightarrow$ **"âge d'or" des trous noirs** (1960-70)

Quatrième pas : supernovæ, pulsars, etc.

- **1932, Chadwick** : découverte du neutron
- **1934, Yukawa** : théorie des noyaux atomiques et de leur structure
- **1934, Baade & Zwicky** : lien entre supernovæ et "étoiles à neutrons" (EN) ?
- **1939, Oppenheimer & Snyder** : simulations numériques d'un effondrement stellaire
  $\rightarrow$ apparition d'un "astre occlus"
- **1965** observation de Cygnus X-1 (étoile + source X)
- **1967, Bell & Hewish** : découverte du premier pulsar (taille $\sim$ 10 km)
  $\rightarrow$ masse volumique $\sim 10^8$ tonne par cm^3

The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)

ESO PR Photo 40f/99 (17 November 1999)

© European Southern Observatory

astres occlus et EN sérieusement envisagés comme les résidus de l'effondrement d'étoiles massives $\rightarrow$ **"âge d'or" des trous noirs** (1960-70)

Quatrième pas : supernovæ, pulsars, etc.

- **1932, Chadwick** : découverte du neutron
- **1934, Yukawa** : théorie des noyaux atomiques et de leur structure
- **1934, Baade & Zwicky** : lien entre supernovæ et "étoiles à neutrons" (EN) ?
- **1939, Oppenheimer & Snyder** : simulations numériques d'un effondrement stellaire
  $\rightarrow$ apparition d'un "astre occlus"
- **1965** observation de Cygnus X-1 (étoile + source X)
- **1967, Bell & Hewish** : découverte du premier pulsar (taille $\sim$ 10 km)
  $\rightarrow$ masse volumique $\sim 10^8$ tonne par cm^3

astres occlus et EN sérieusement envisagés comme les résidus de l'effondrement d'étoiles massives $\rightarrow$ **"âge d'or" des trous noirs** (1960-70)

Quatrième pas : supernovæ, pulsars, etc.

- **1932, Chadwick** : découverte du neutron
- **1934, Yukawa** : théorie des noyaux atomiques et de leur structure
- **1934, Baade & Zwicky** : lien entre supernovæ et "étoiles à neutrons" (EN) ?
- **1939, Oppenheimer & Snyder** : simulations numériques d'un effondrement stellaire
  $\rightarrow$ apparition d'un "astre occlus"
- **1965** observation de Cygnus X-1 (étoile + source X)
- **1967, Bell & Hewish** : découverte du premier pulsar (taille $\sim$ 10 km)
  $\rightarrow$ masse volumique $\sim 10^8$ tonne par cm^3

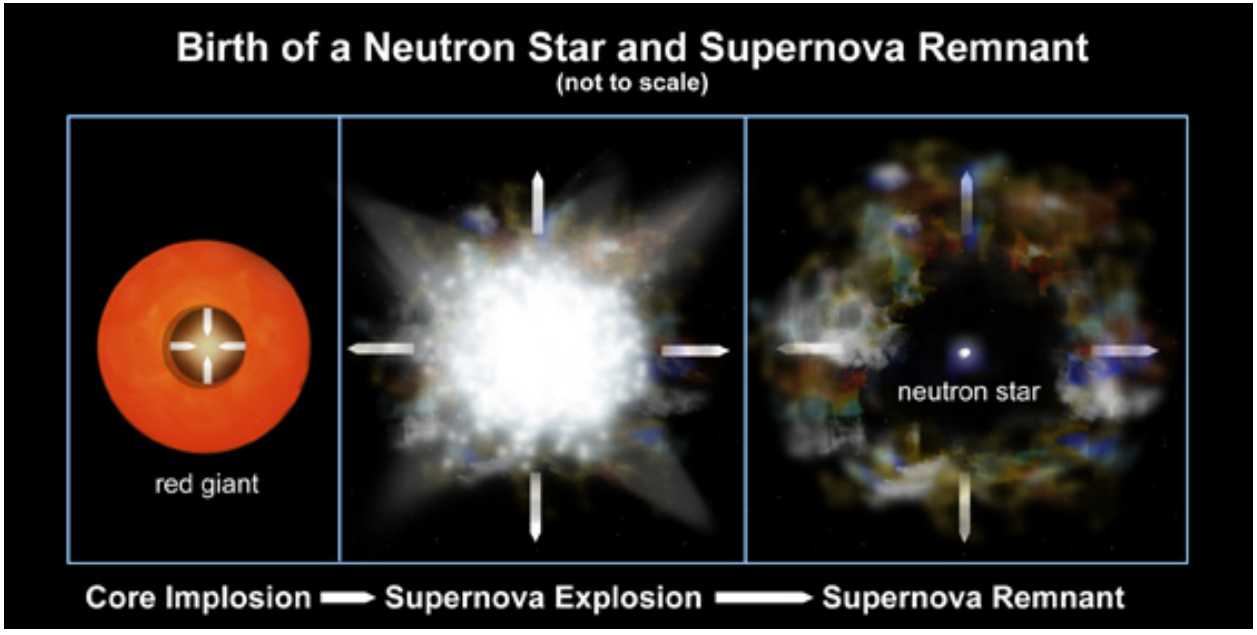
The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)

ESO PR Photo 40f/99 (17 November 1999)

© European Southern Observatory

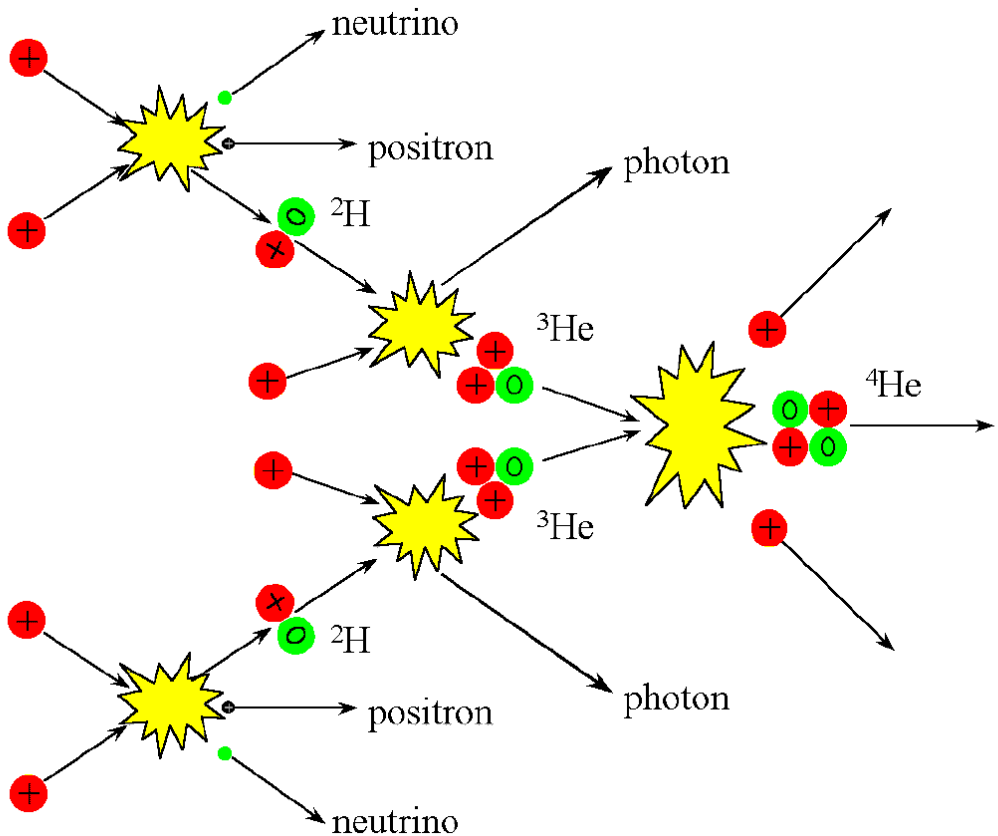
astres occlus et EN sérieusement envisagés comme les résidus de l'effondrement d'étoiles massives $\rightarrow$ **"âge d'or" des trous noirs** (1960-70)

III : Évolution stellaire et naissance d'objets compacts

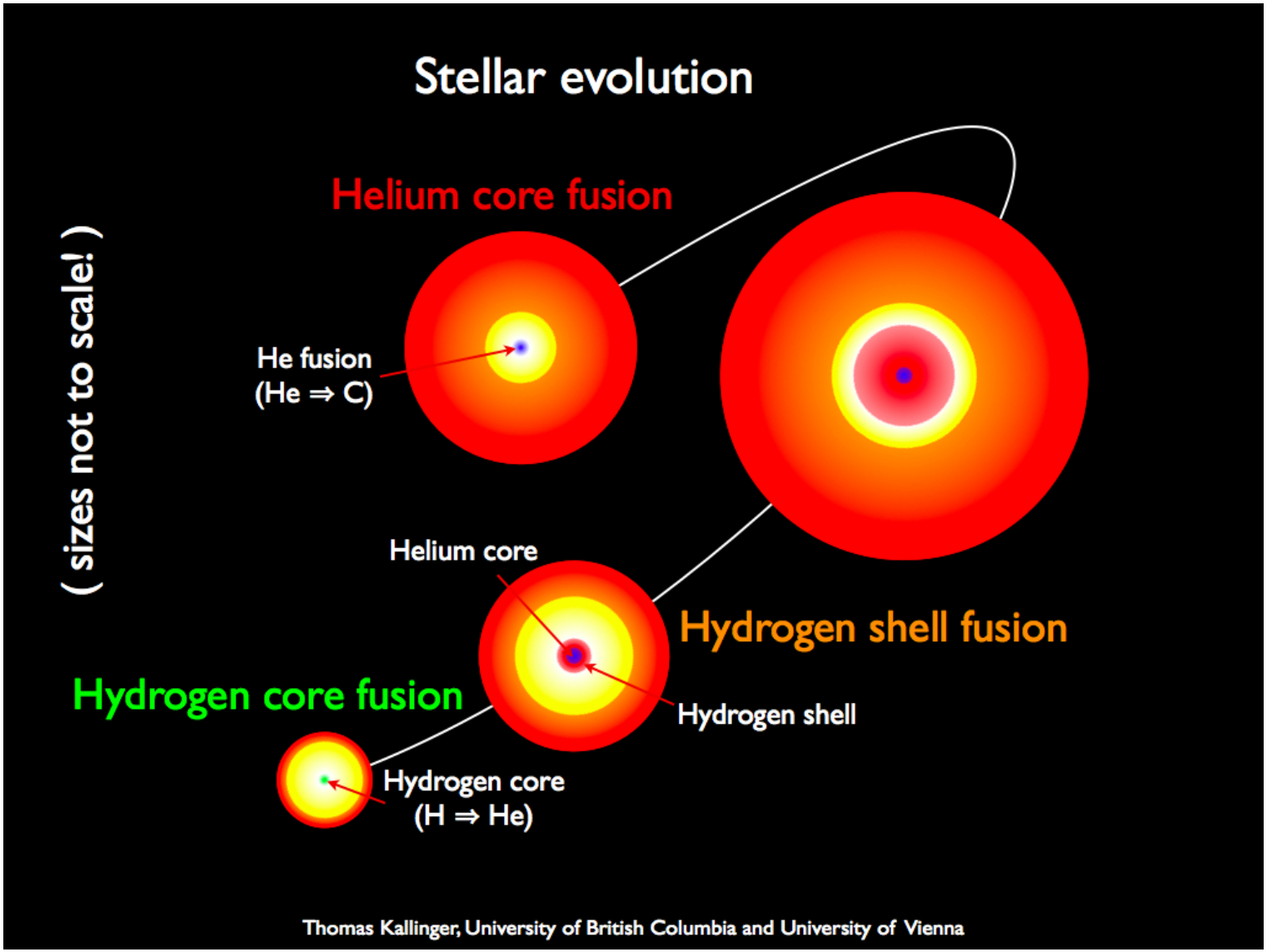


Évolution stellaire et destin des étoiles

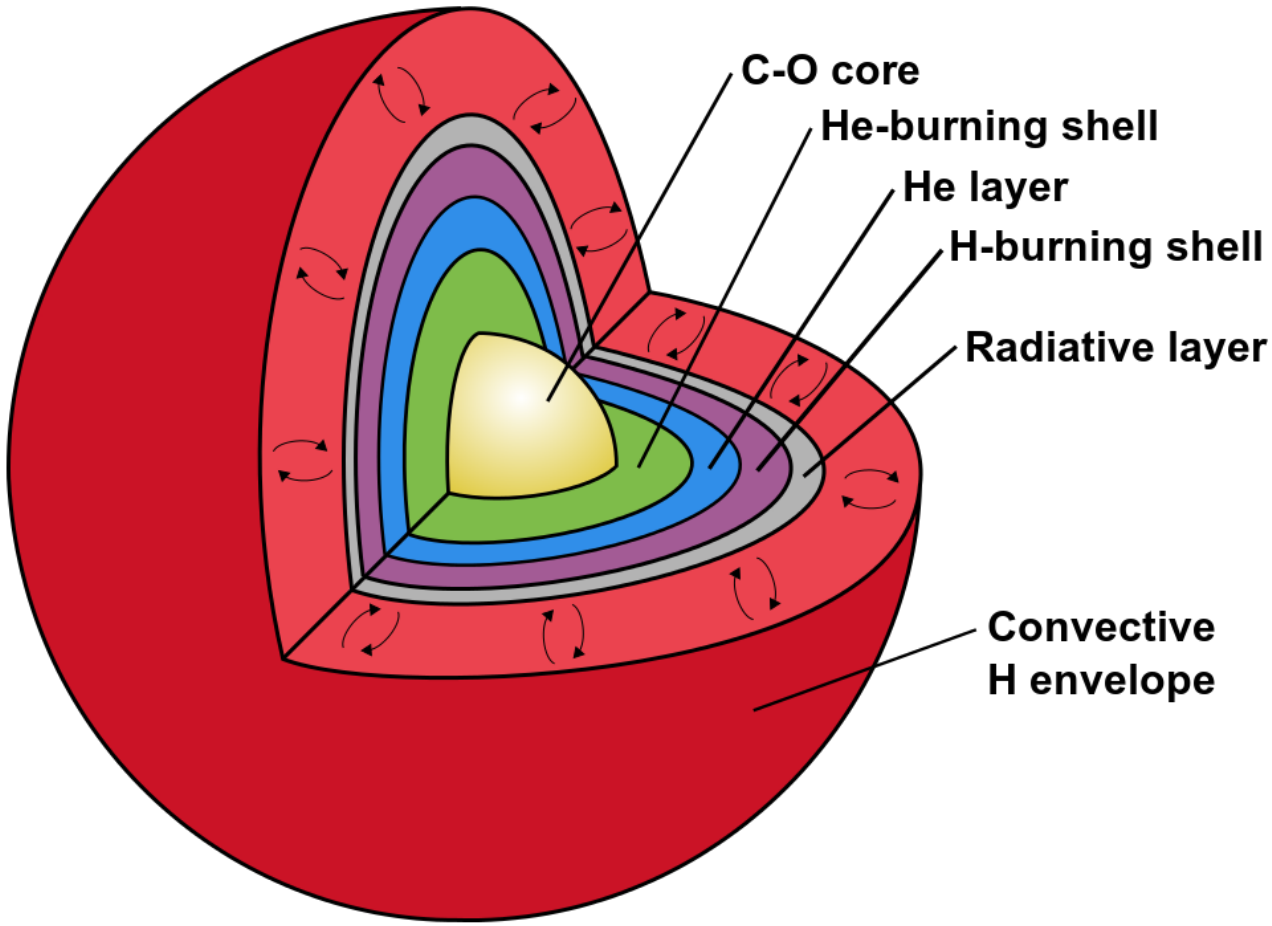
- étoiles $\equiv$ réacteurs à fusion nucléaire
- petits noyaux (H) $\rightarrow$ noyaux plus gros (He) + énergie
  $\Longrightarrow$ pression qui résiste à la gravité



Fusion en couches

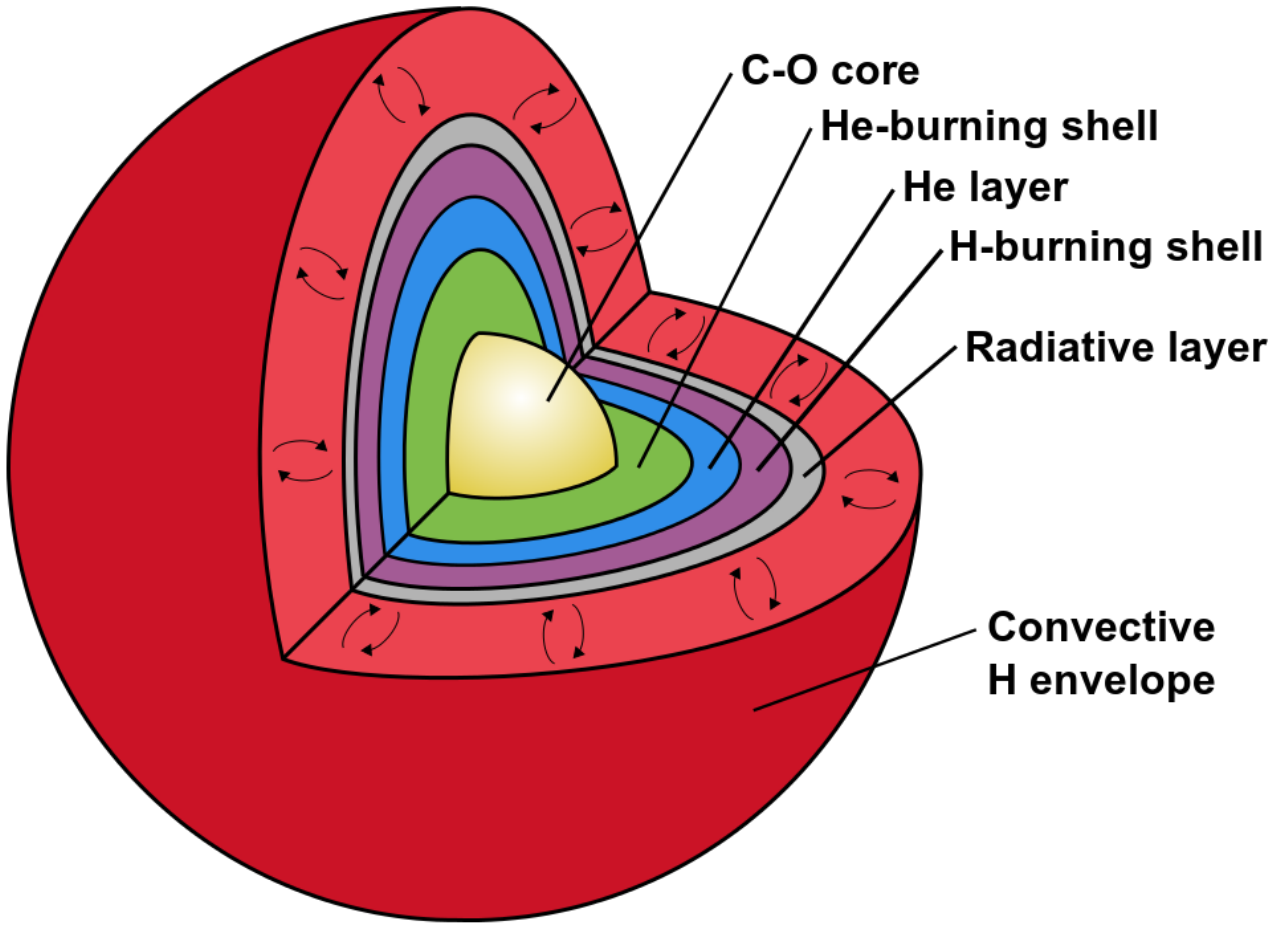


Fusion dans une étoile du type solaire



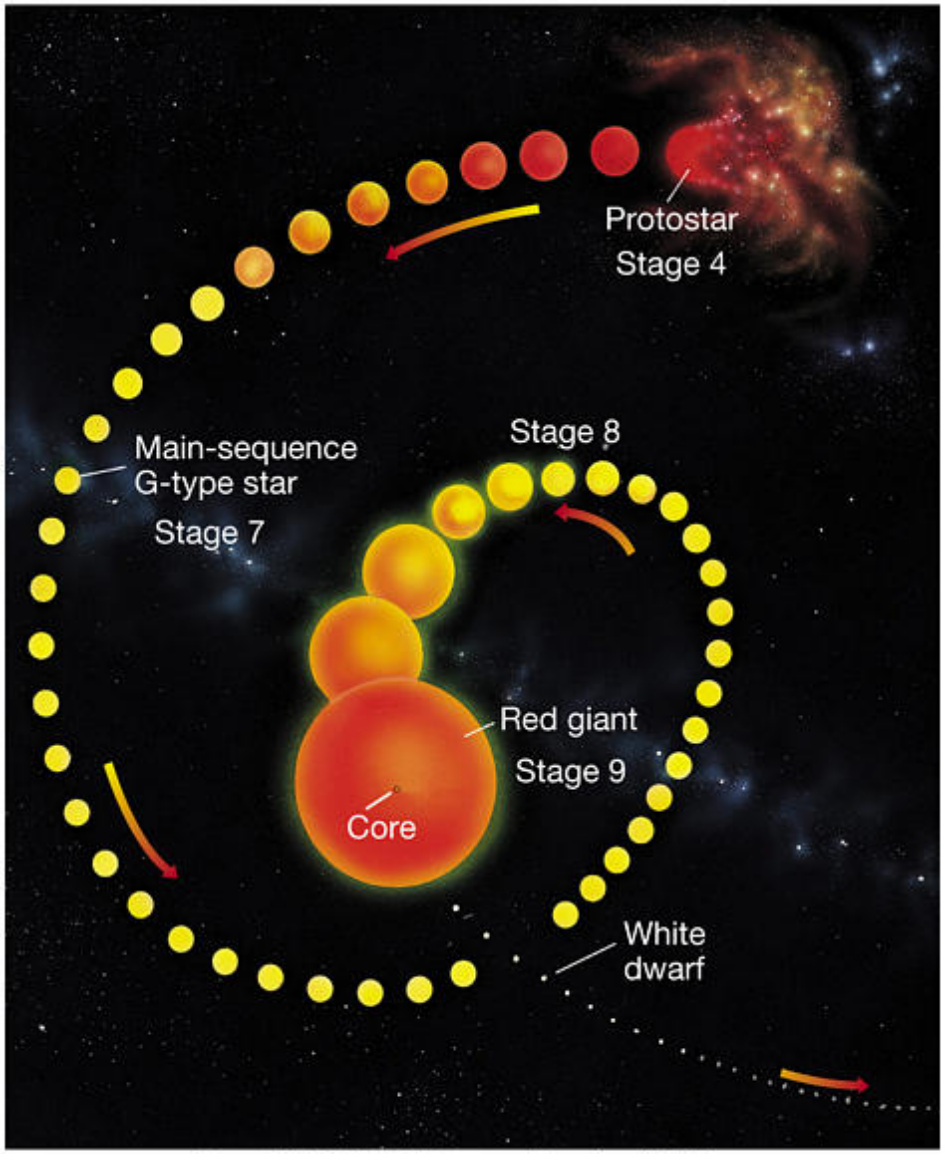
stratification selon la densité

Fusion dans une étoile du type solaire



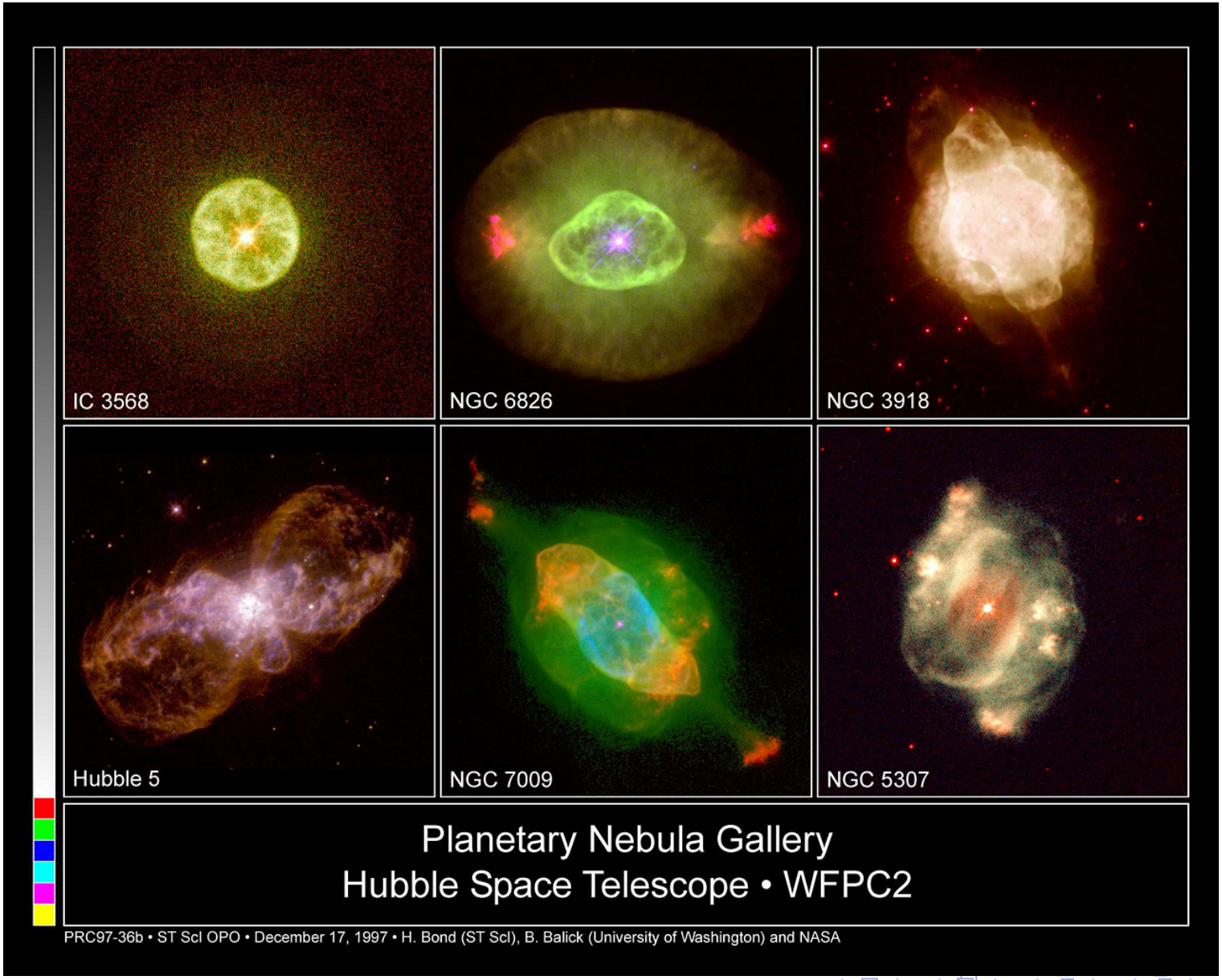
stratification selon la densité

Évolution d'une étoile de type solaire

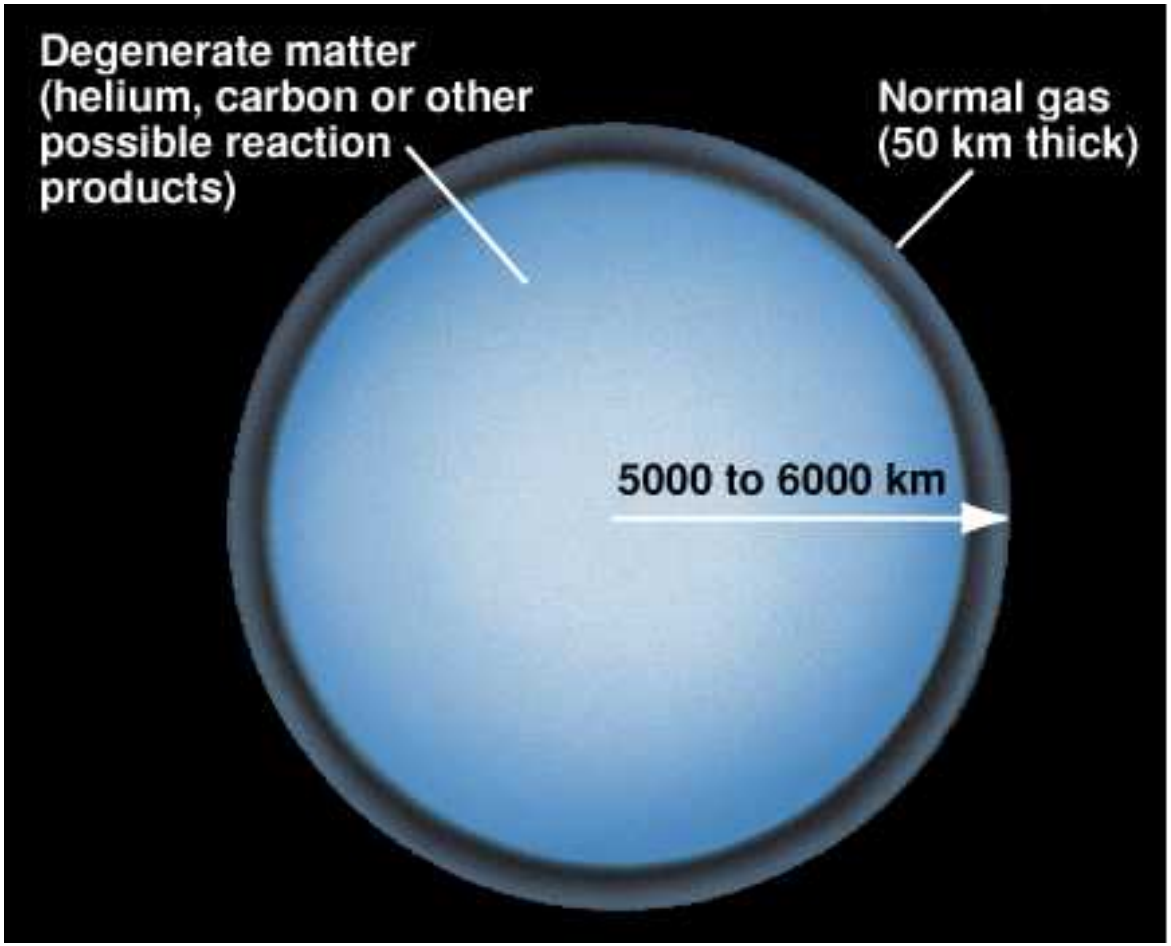


Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Nébuleuses planétaires vues par le télescope spatial Hubble

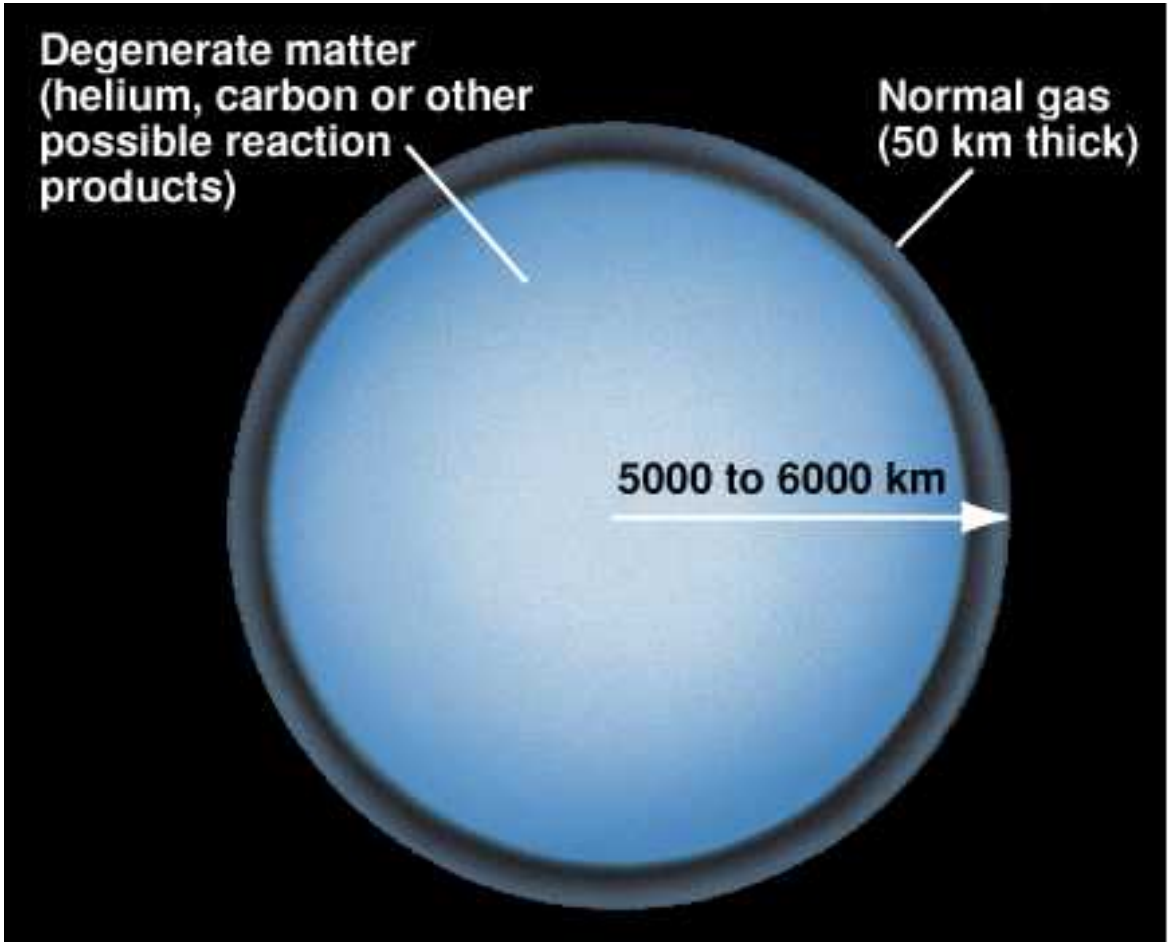


Structure d'une naine blanche



pas de fusion nucléaire : pression quantique des électrons

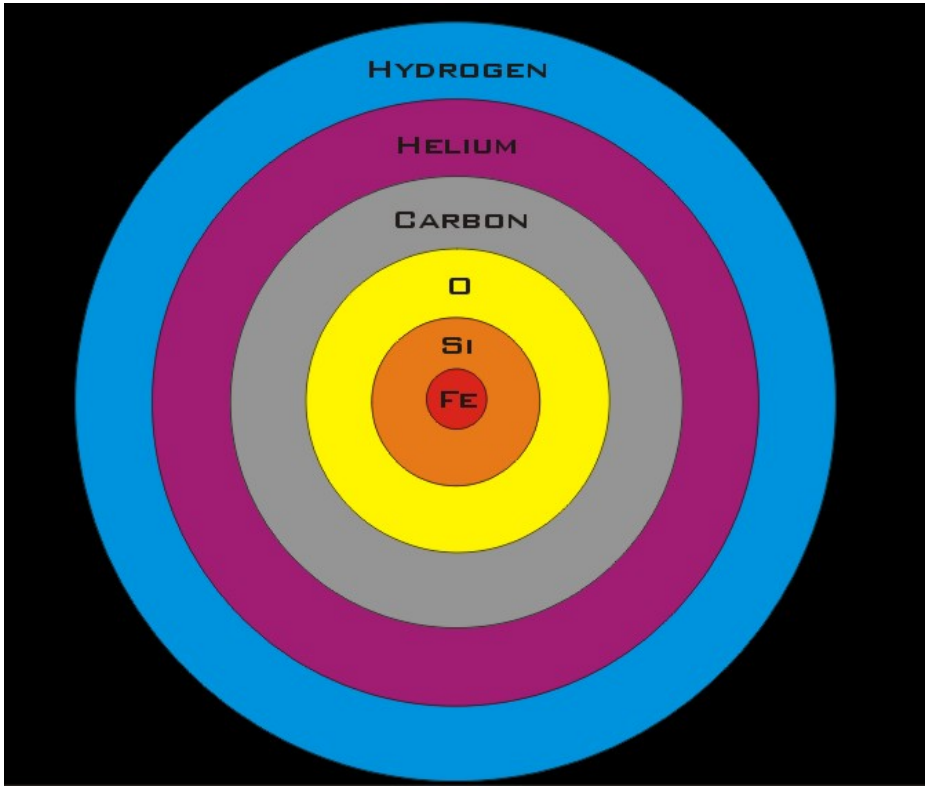
Structure d'une naine blanche



pas de fusion nucléaire : pression quantique des électrons

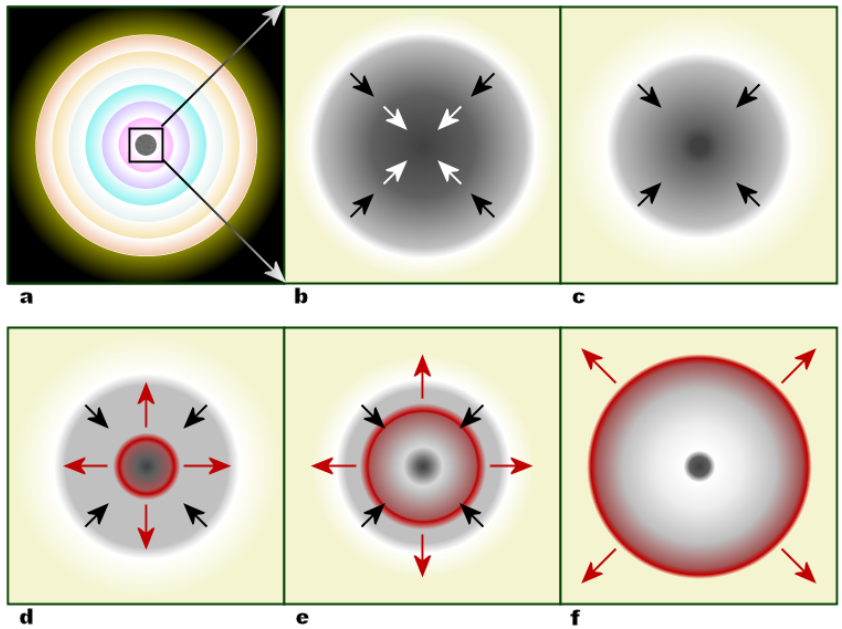
Structure en oignon d'une étoile massive

- dans les étoiles massives, noyaux de plus en plus lourds produits
- plus lourds vers le cœur (stratification, cf. eau et huile)
- le plus lourd de tous est le fer : noyau inerte ($\sim$ **déchet nucléaire**)

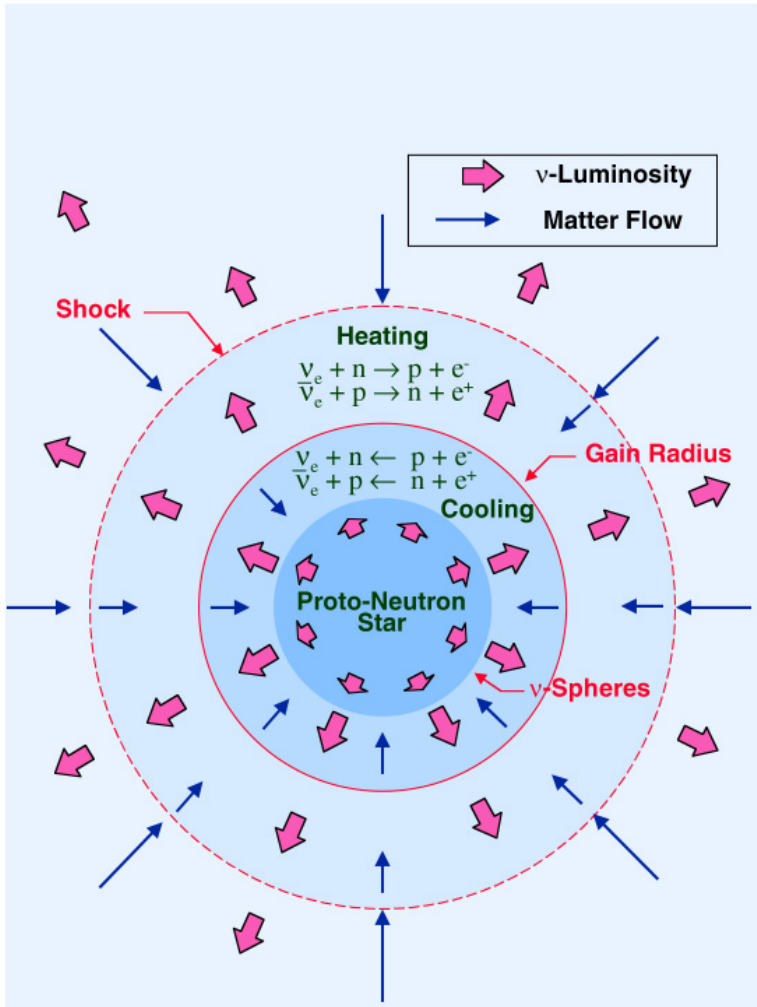


Supernova

- pression quantique des électrons dans le cœur de fer résiste à la gravitation
- quand masse du cœur de fer $\gtrsim 1.4$ masses solaires $\rightarrow$ effondrement (**1930, Chandrasekhar** : "masse de Chandrasekhar")
- cœur de fer s'effondre et couches externes suivent **plus lentement** $\rightarrow$ cœur se **durcit** en raison d'interactions entre neutrons et protons $\rightarrow$ rebond alors que les couches externes chutent encore $\rightarrow$ choc et expulsion des couches externes $\rightarrow$ supernova gravitationnelle

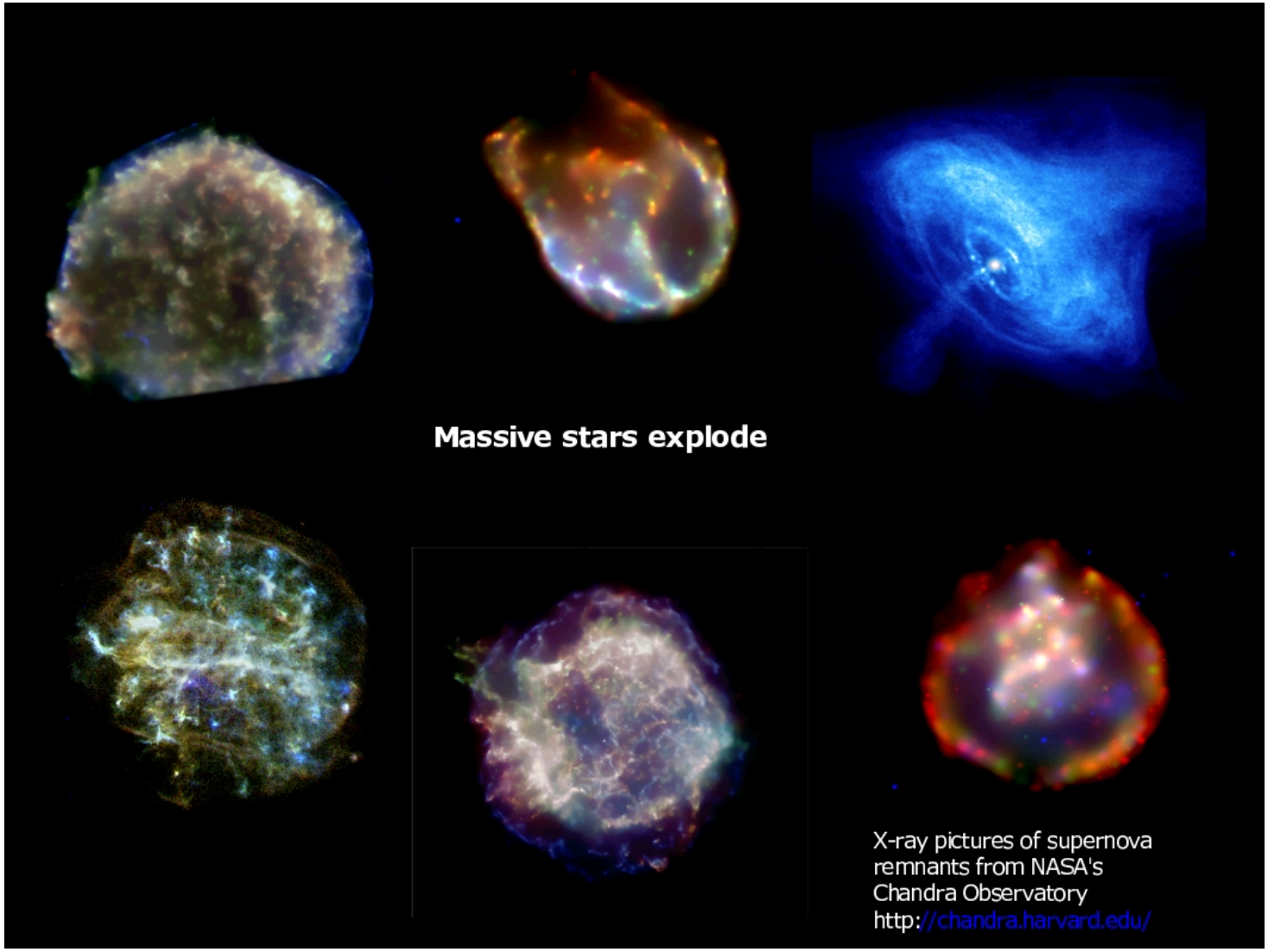


Supernovæ et neutrinos (99 % de l'énergie émise)



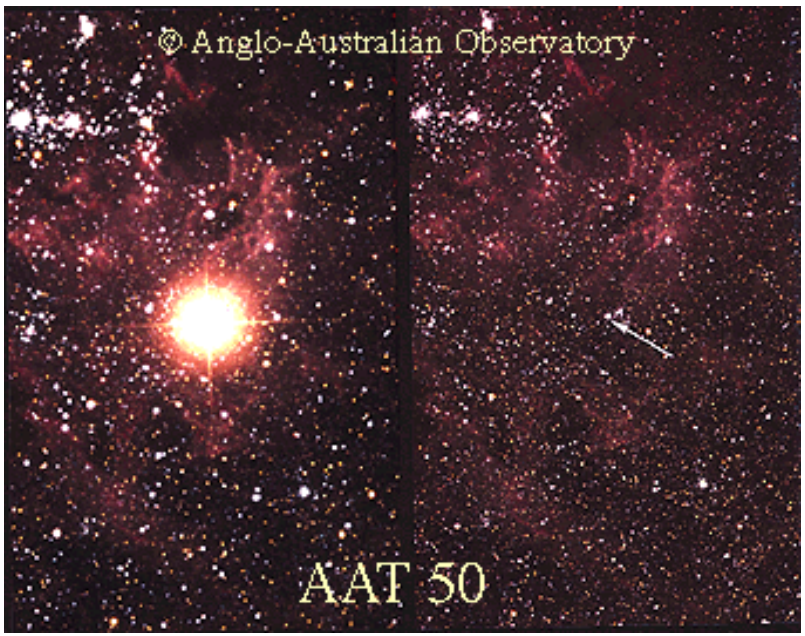
pendant **10 secondes** : 10^{23} fois la luminosité du Soleil
(mais énergie électromagnétique $\sim$ 1 % du total)

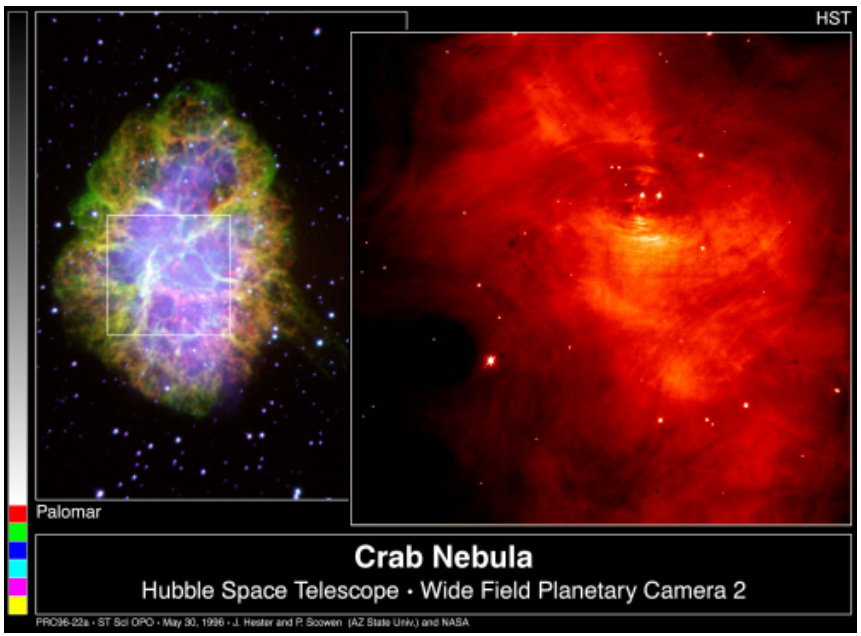
Images de supernovæ



Résidu central

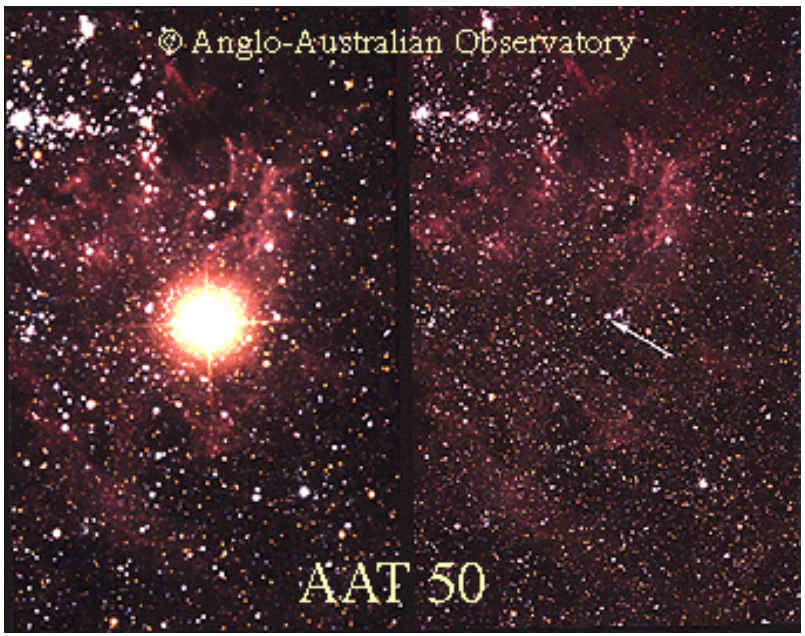
- résidu central = cœur de noyaux de fer brisés + matière externe retombée
- noyaux brisés → plasma dense et chaud de protons, neutrons, électrons et neutrinos
- soupe très dense et chaude : $T \geq 10^{10}$ K (balle de tennis $\sim 10^{13}$ kg)
- rayon initial $\sim$ 100 km → contraction en moins d'une minute, rayon $\sim$ 10 km → étoile à neutrons ou trou noir si trop de masse

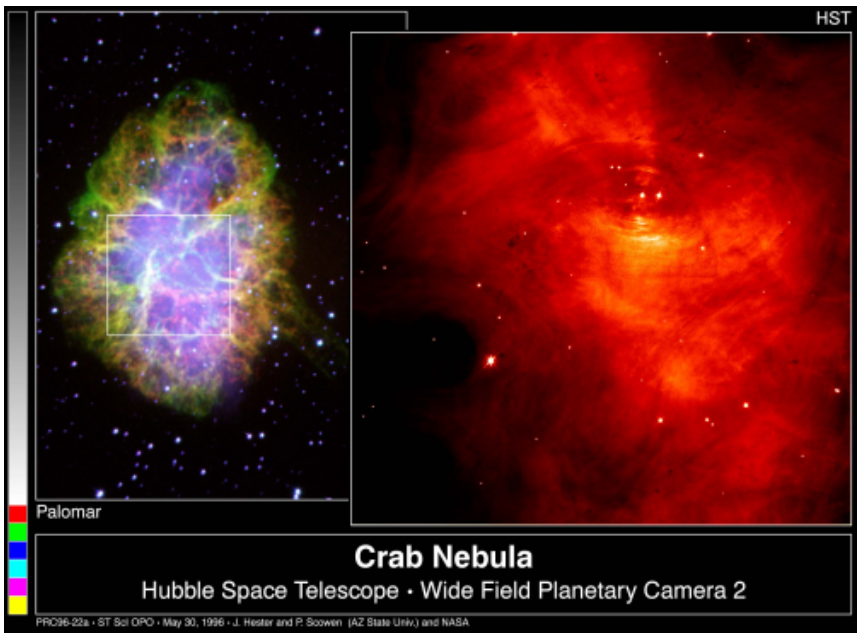




Résidu central

- résidu central = cœur de noyaux de fer brisés + matière externe retombée
- noyaux brisés → plasma dense et chaud de protons, neutrons, électrons et neutrinos
- soupe très dense et chaude : $T \geq 10^{10}$ K (balle de tennis $\sim 10^{13}$ kg)
- rayon initial $\sim$ 100 km → contraction en moins d'une minute, rayon $\sim$ 10 km → étoile à neutrons ou trou noir si trop de masse

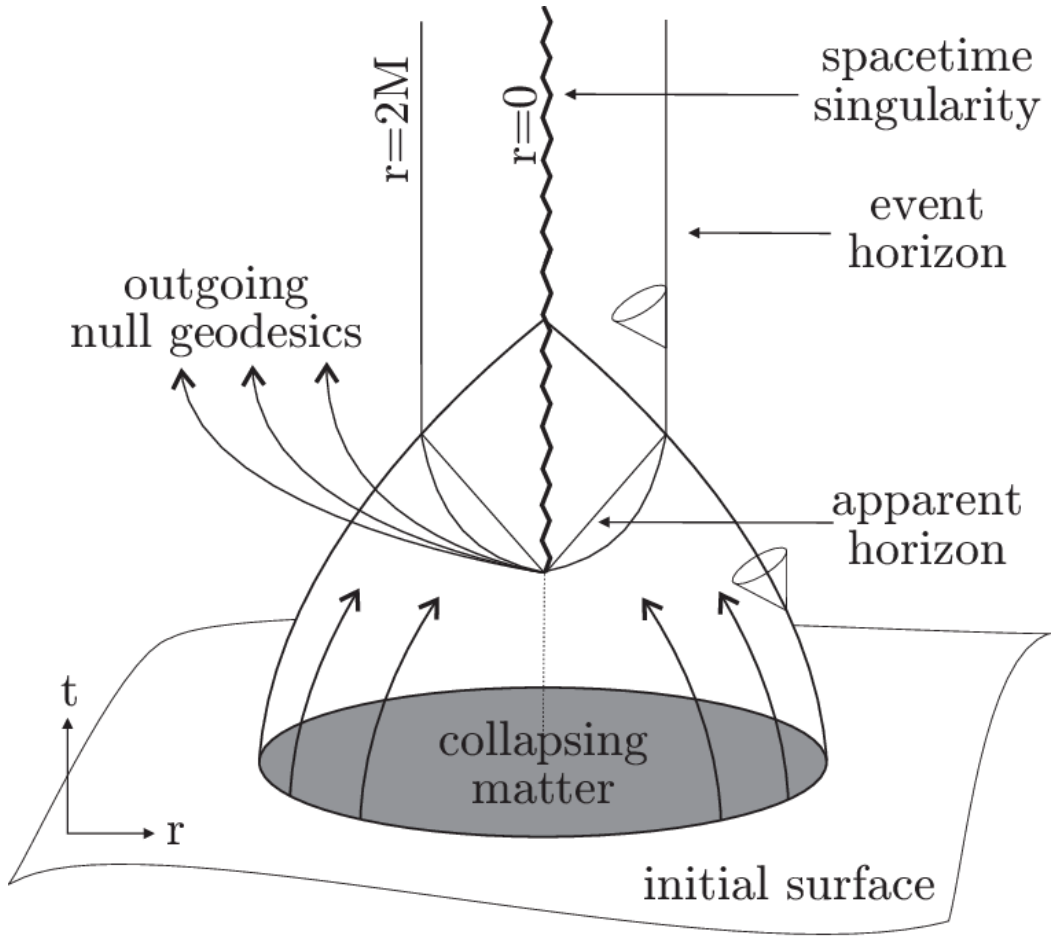




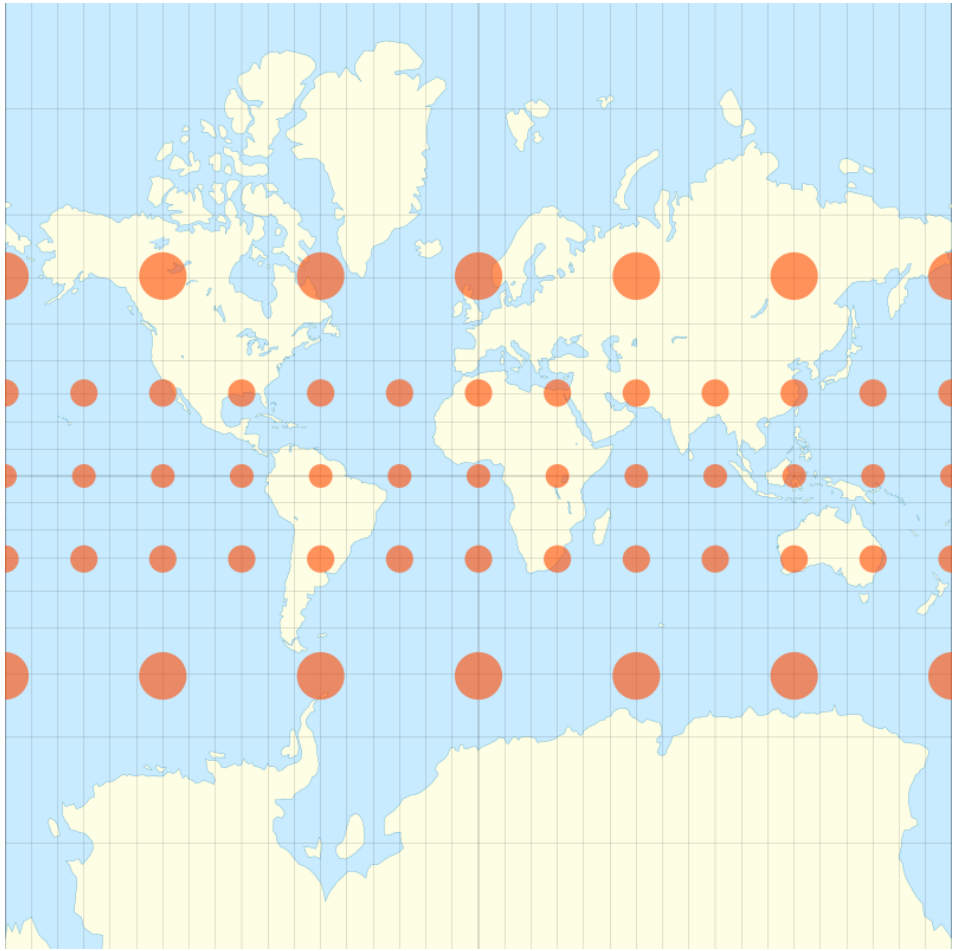
Formation d'un horizon et naissance d'un trou noir

si aucune force ne peut résister à la gravité

- formation d'un horizon dont même la lumière ne peut s'échapper
- effondrement "rapide" et "apparition" d'une singularité interne ($\neq$ point)



Effondrement gravitationnel et coordonnées



Projection de Mercator et illustration du **comportement singulier** de certains systèmes de coordonnées

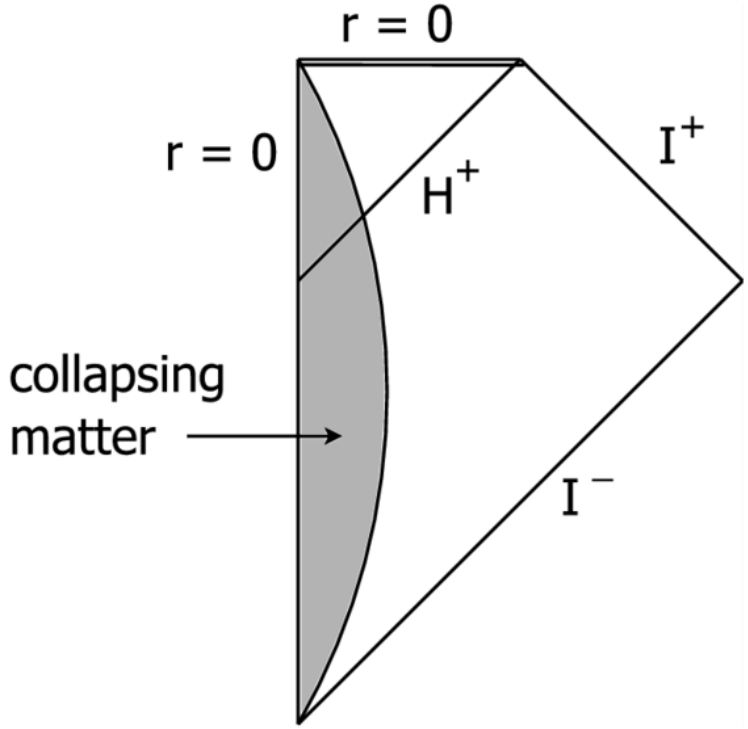
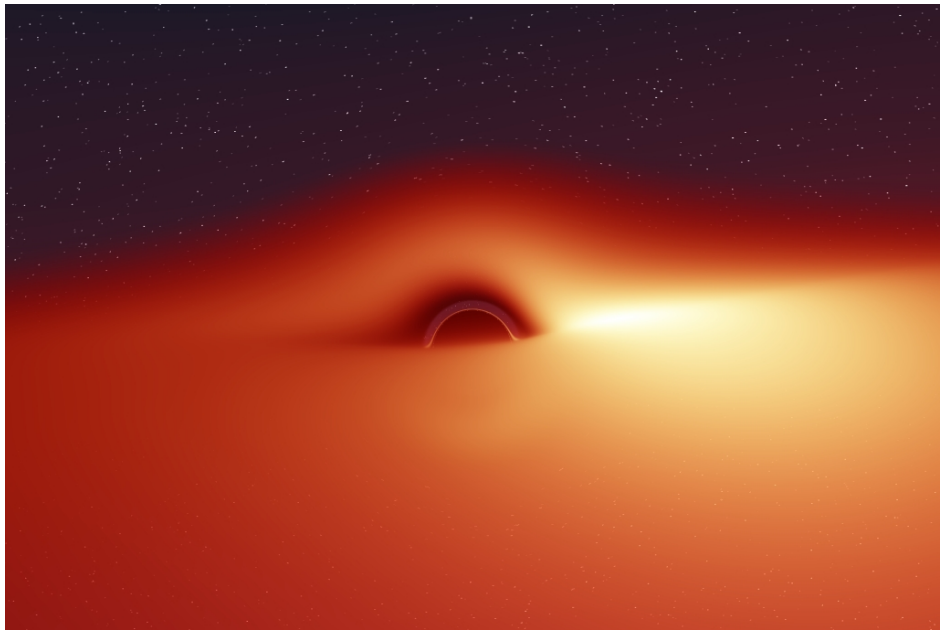
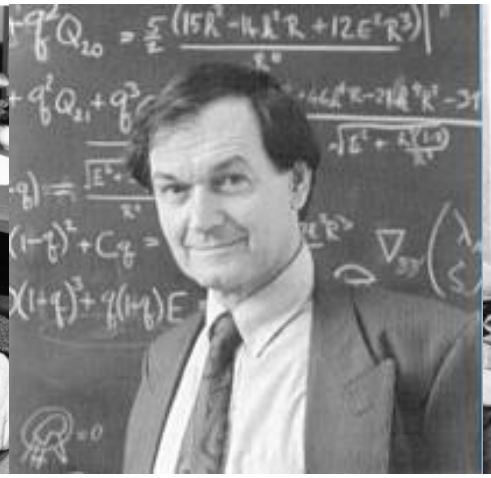


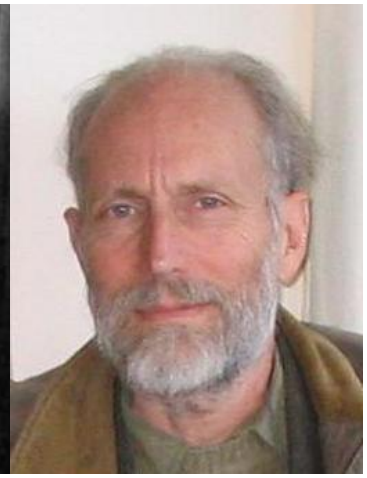
Diagramme de Penrose-Carter d'un effondrement gravitationnel stellaire sphérique

IV : Trous noirs



IV A : Trous noirs macroscopiques

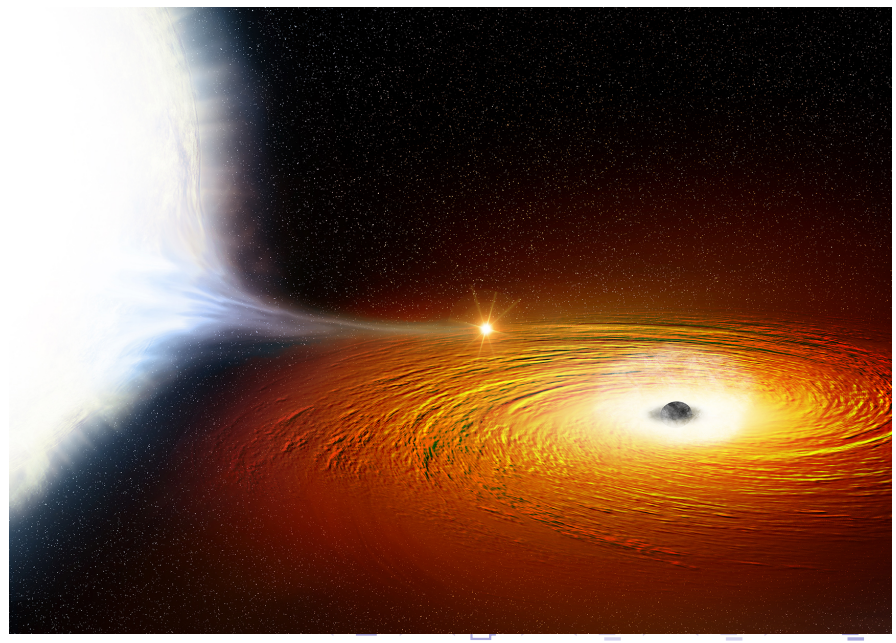




Trous noirs classiques

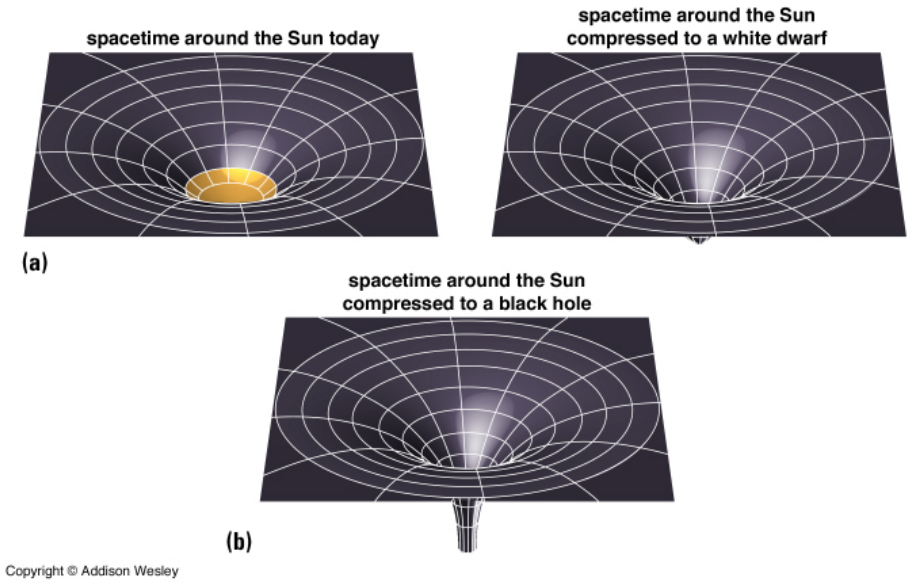
- trou noir = région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir (même pas la lumière)
- frontière = horizon du TN (surface = $4\pi R_S^2$)
  (cf. rayon et singularité de Schwarzschild)
- **1967, Wheeler** invente le terme "trou noir"
- **1965-1970, Hawking** & **Penrose** : singularité **interne** inévitable
  $\rightarrow$ besoin d'une description quantique de la gravité

- espace-temps très courbe : orbite circulaire pas toujours possible pour particules massives ; sphère de photons, etc.
- **invisibles** mais effets gravitationnels sur corps proches (prédiction de Michell)



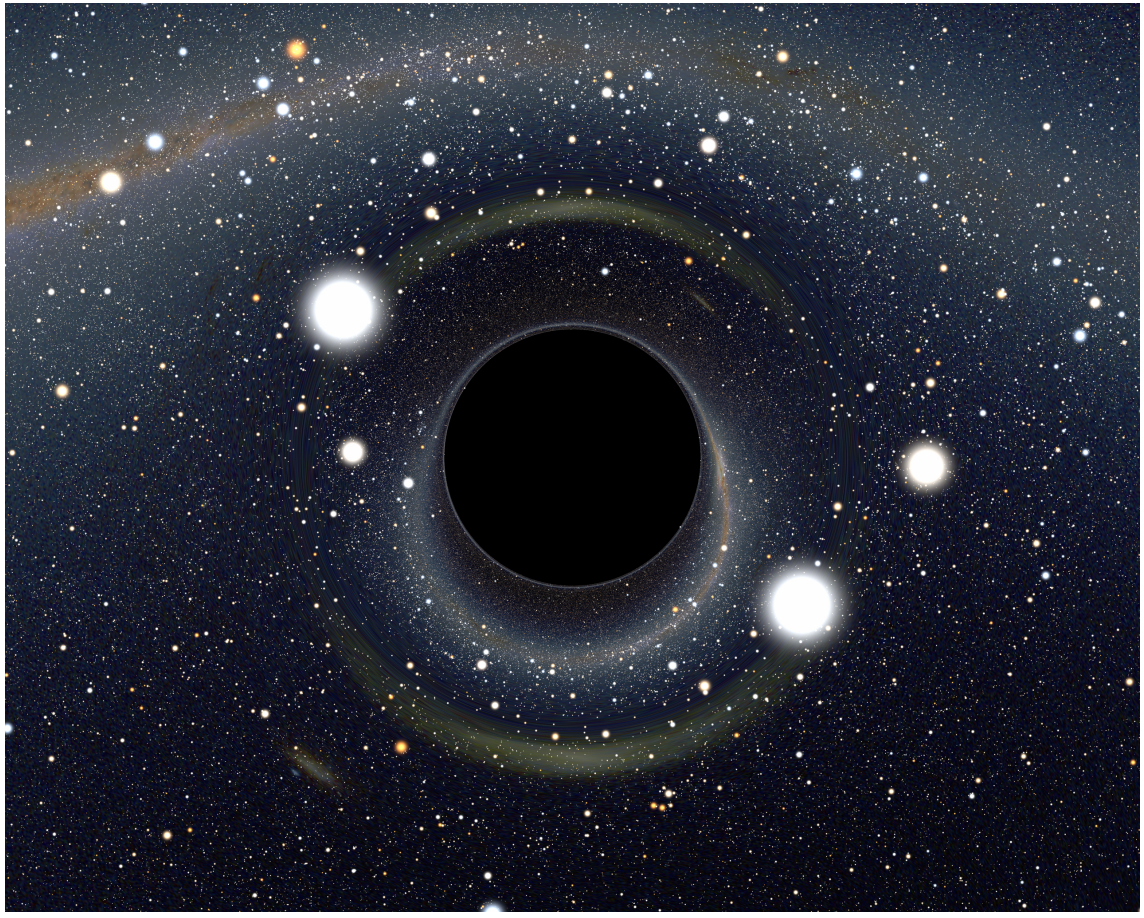
Horizon : propriétés

- **pas une surface matérielle**
- espace-temps très courbe : R_S n'est **pas** la distance entre le centre du TN et l'horizon
- **accélération infinie** pour rester **au repos** sur l'horizon
- **décalage spectral infini** pour un observateur lointain : matière en chute libre et temps semblent gelés



un observateur distant ne voit jamais la matière en chute libre franchir l'horizon, mais elle devient invisible

Vue rapprochée d'un horizon



(simulation numérique par A. Riazuelo, IAP)

Près de l'horizon et au-delà...

- même après l'avoir traversé, l'horizon semble **en bas** pour un observateur en chute libre
- si TN très massif, **pas de sensation particulière** pour un observateur en chute libre ; mais spaghettification par les effets de marée si TN pas très massif
- **accélération infinie** pour rester au niveau de l'horizon $\rightarrow$ image déformée et concentrée du reste de l'Univers pour un observateur statique
- à l'intérieur : **courbure chaotique** et croissante $\rightarrow$ destruction (scénario précis inconnu !)
- en une fraction de seconde, atteinte d'une "région" (**singularité**) où espace et temps n'ont plus de sens

Près de l'horizon et au-delà...

- même après l'avoir traversé, l'horizon semble **en bas** pour un observateur en chute libre
- si TN très massif, **pas de sensation particulière** pour un observateur en chute libre ; mais spaghettification par les effets de marée si TN pas très massif
- **accélération infinie** pour rester au niveau de l'horizon $\rightarrow$ image déformée et concentrée du reste de l'Univers pour un observateur statique
- à l'intérieur : **courbure chaotique** et croissante $\rightarrow$ destruction (scénario précis inconnu !)
- en une fraction de seconde, atteinte d'une "région" (**singularité**) où espace et temps n'ont plus de sens

Près de l'horizon et au-delà...

- même après l'avoir traversé, l'horizon semble **en bas** pour un observateur en chute libre
- si TN très massif, **pas de sensation particulière** pour un observateur en chute libre ; mais spaghettification par les effets de marée si TN pas très massif
- **accélération infinie** pour rester au niveau de l'horizon $\rightarrow$ image déformée et concentrée du reste de l'Univers pour un observateur statique
- à l'intérieur : **courbure chaotique** et croissante $\rightarrow$ destruction (scénario précis inconnu !)
- en une fraction de seconde, atteinte d'une "région" (**singularité**) où espace et temps n'ont plus de sens

Près de l'horizon et au-delà...

- même après l'avoir traversé, l'horizon semble **en bas** pour un observateur en chute libre
- si TN très massif, **pas de sensation particulière** pour un observateur en chute libre ; mais spaghettification par les effets de marée si TN pas très massif
- **accélération infinie** pour rester au niveau de l'horizon $\rightarrow$ image déformée et concentrée du reste de l'Univers pour un observateur statique
- à l'intérieur : **courbure chaotique** et croissante $\rightarrow$ destruction (scénario précis inconnu !)
- en une fraction de seconde, atteinte d'une "région" (**singularité**) où espace et temps n'ont plus de sens

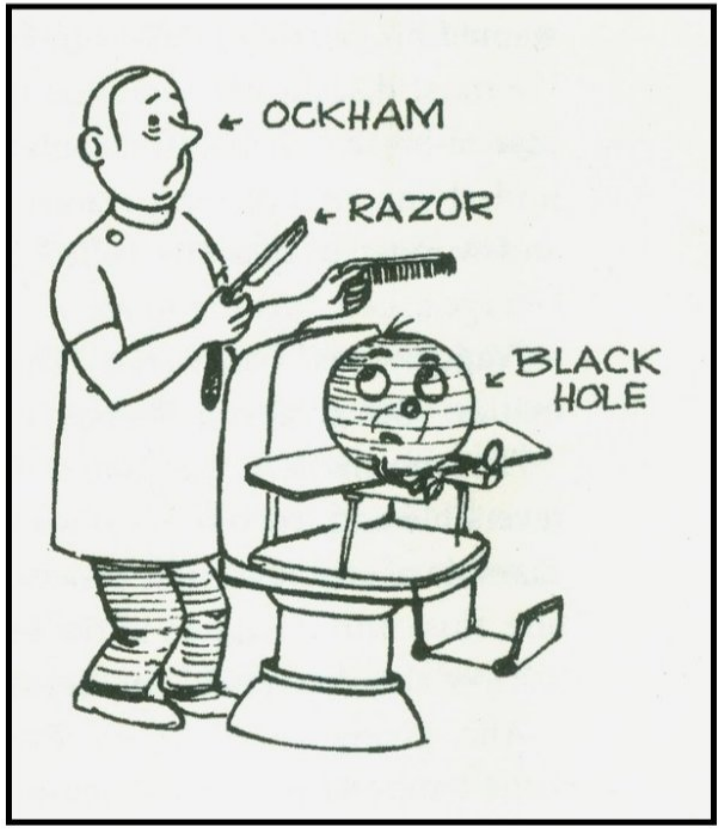
Près de l'horizon et au-delà...

- même après l'avoir traversé, l'horizon semble **en bas** pour un observateur en chute libre
- si TN très massif, **pas de sensation particulière** pour un observateur en chute libre ; mais spaghettification par les effets de marée si TN pas très massif
- **accélération infinie** pour rester au niveau de l'horizon $\rightarrow$ image déformée et concentrée du reste de l'Univers pour un observateur statique
- à l'intérieur : **courbure chaotique** et croissante $\rightarrow$ destruction (scénario précis inconnu !)
- en une fraction de seconde, atteinte d'une "région" (**singularité**) où espace et temps n'ont plus de sens

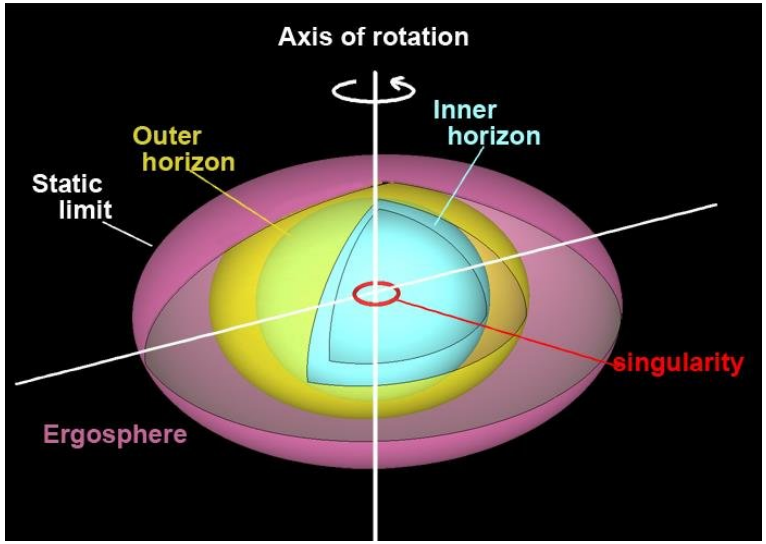
La calvitie des TN

- **1918, Reissner** $\&$ **Nordström** : solution décrivant un TN électriquement chargé (q)
- **1963, Kerr** : TN en rotation (Ω)
- **1965, Kerr-Newman** : TN chargé en rotation (Ω, q)

"théorème de calvitie" (Wheeler) :
en RG, les TN macroscopiques à l'équilibre sont décrits de manière unique par M, Ω et q
$\rightarrow$ **TN astrophysiques** caractérisés par M et Ω ?

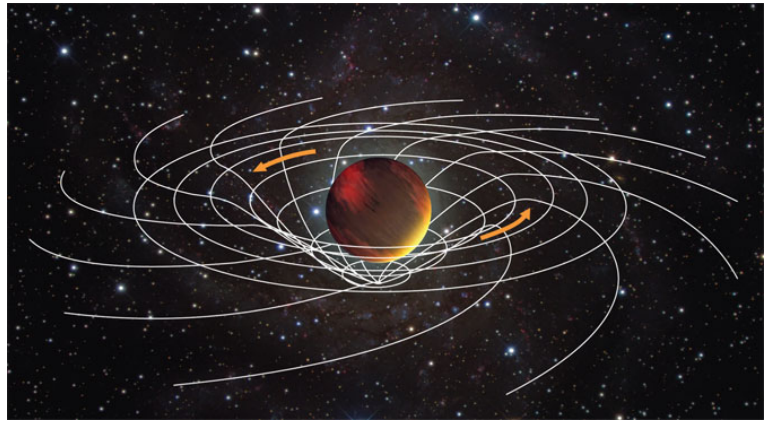


TN en rotation

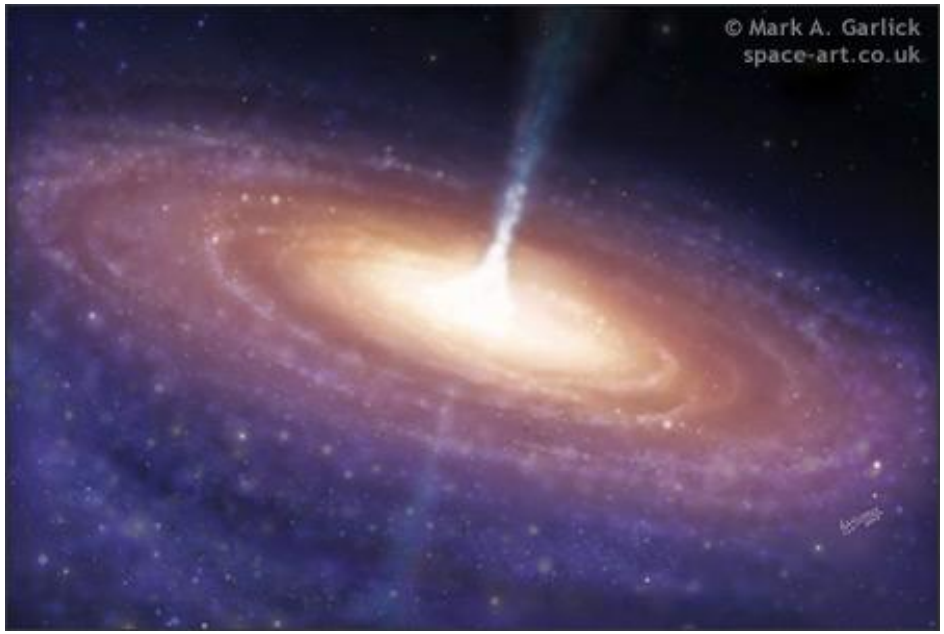


- région externe : solution de Kerr
- région interne : inconnue (solution analytique instable et **irréaliste**)

- entraînement des référentiels : effet Lense-Thirring (cf. Gravity Probe B autour de la Terre en 2004-2005)
- ergorégion dans laquelle rien ne peut rester au repos par rapport à l'infini $\rightarrow$ influence sur les **disques d'accrétion**

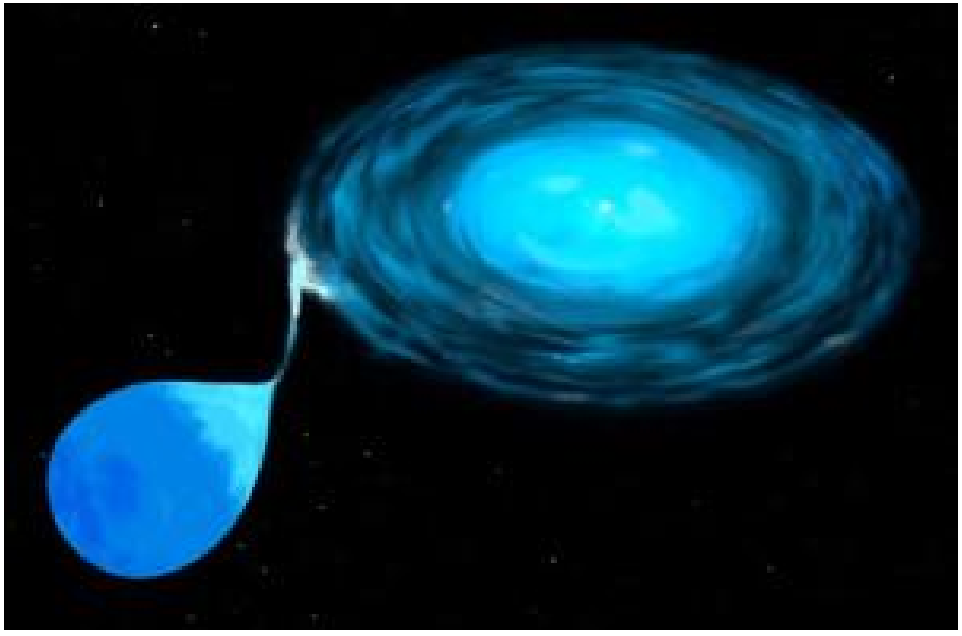


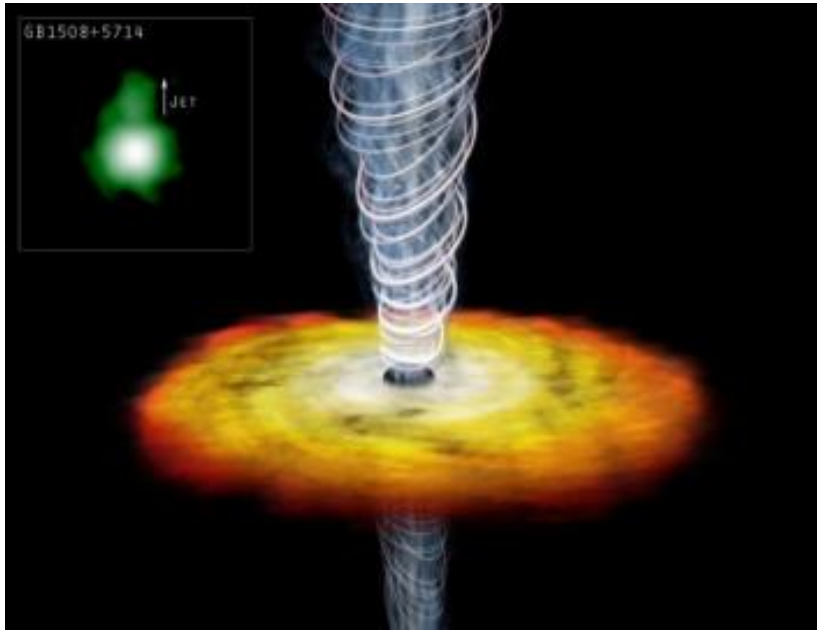
IV B : Trous noirs astrophysiques



Observations indirectes de TN

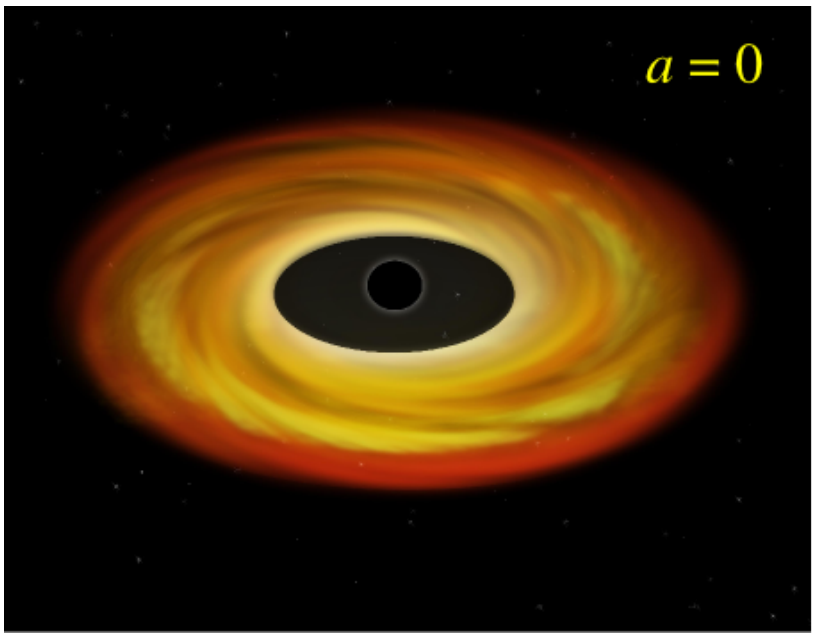
- TN : pas d'émission **directe** de lumière, mais matière autour possible
- souvent localisés dans des systèmes binaires → matière en chute depuis l'astre compagnon → disque d'accrétion → matière chauffée → émission X et radio
- même scénario si objet central = EN et pas TN

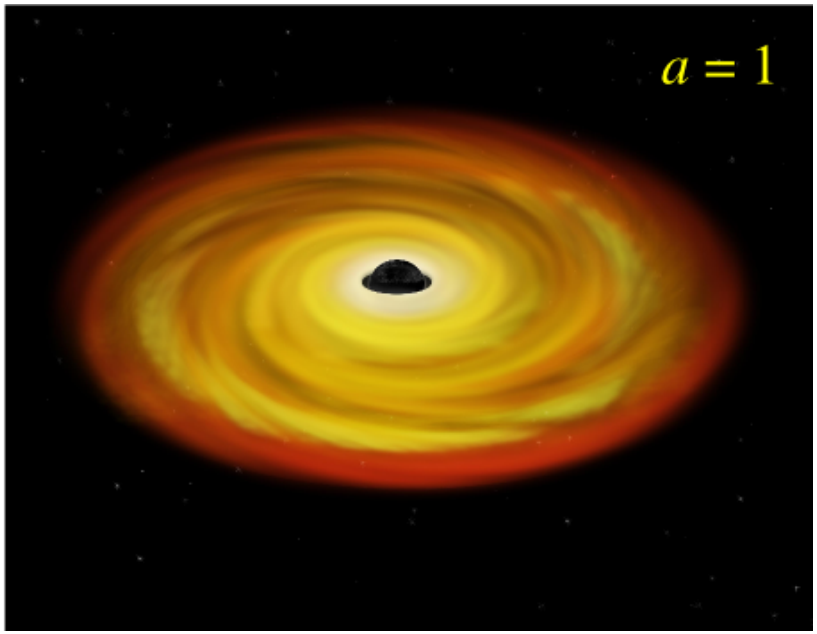




Disque d'accrétion et TN

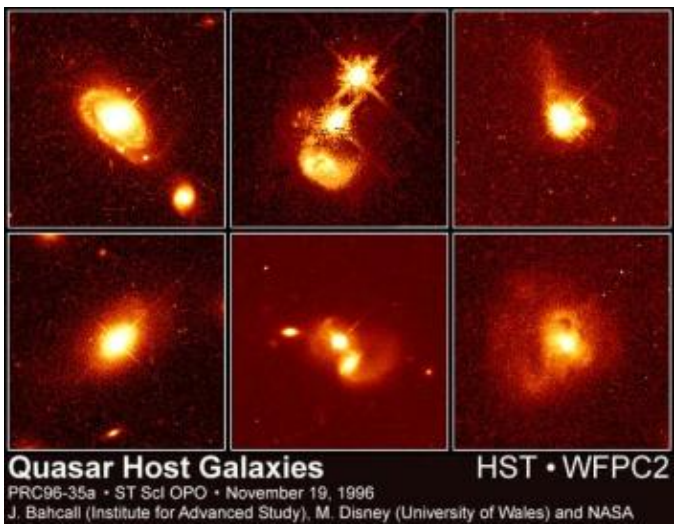
- limite interne liée à l'orbite circulaire stable la plus proche
- sa position dépend de l'**objet central** (nature, masse, vitesse de rotation)



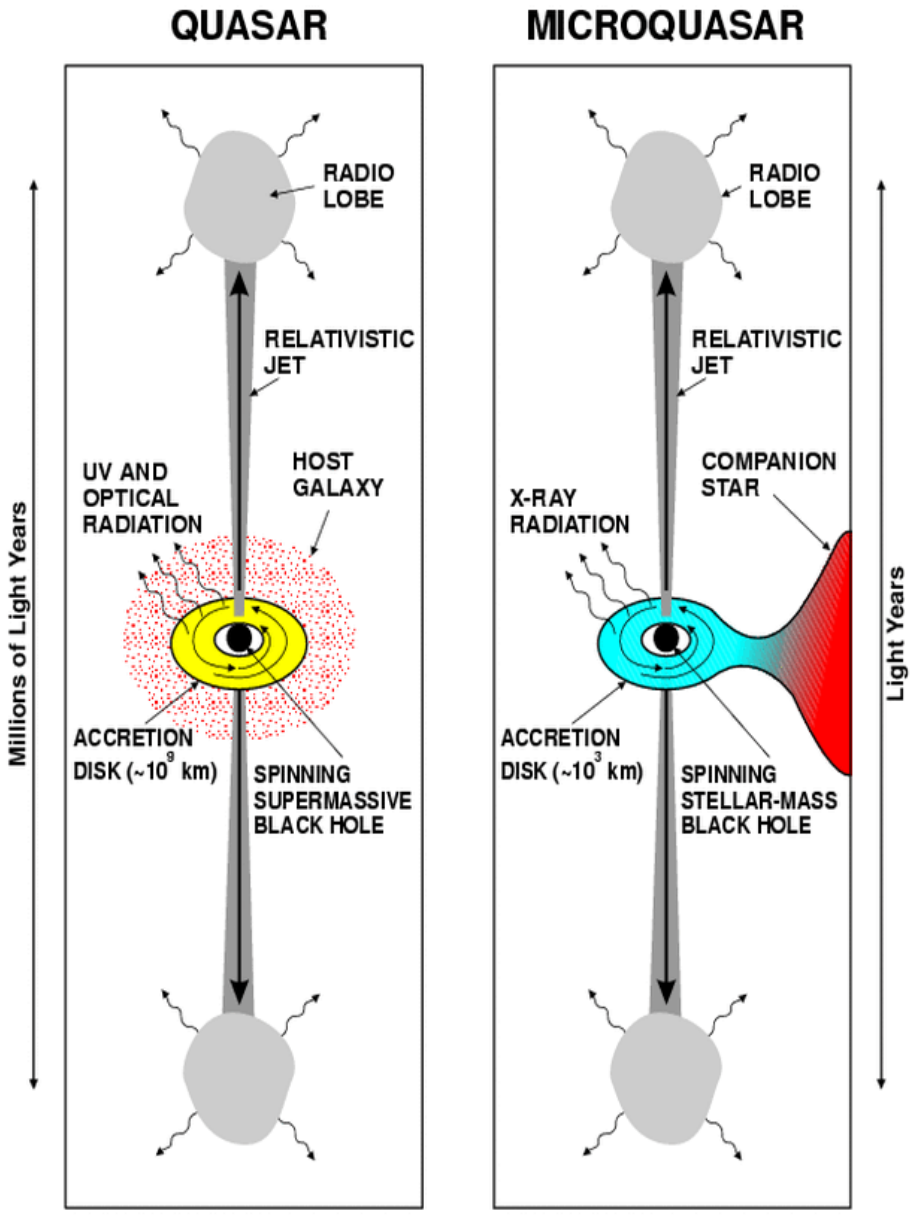


TN supermassifs et quasars

- scénario similaire pour TN supermassifs : plusieurs milliards de masses solaires
- TN supermassif au centre de la plupart des galaxies (même la Voie lactée)
  $\rightarrow$ **Sagittarius A*** : $M \sim 4 \times 10^6 M_\odot$, r < 120 UA ;
- accrétion d'étoiles $\rightarrow$ observation de "quasars" : objet très lointains (distances cosmologiques) et une luminosité très élevée (spectre similaire à celui d'une étoile)



Microquasars versus quasars

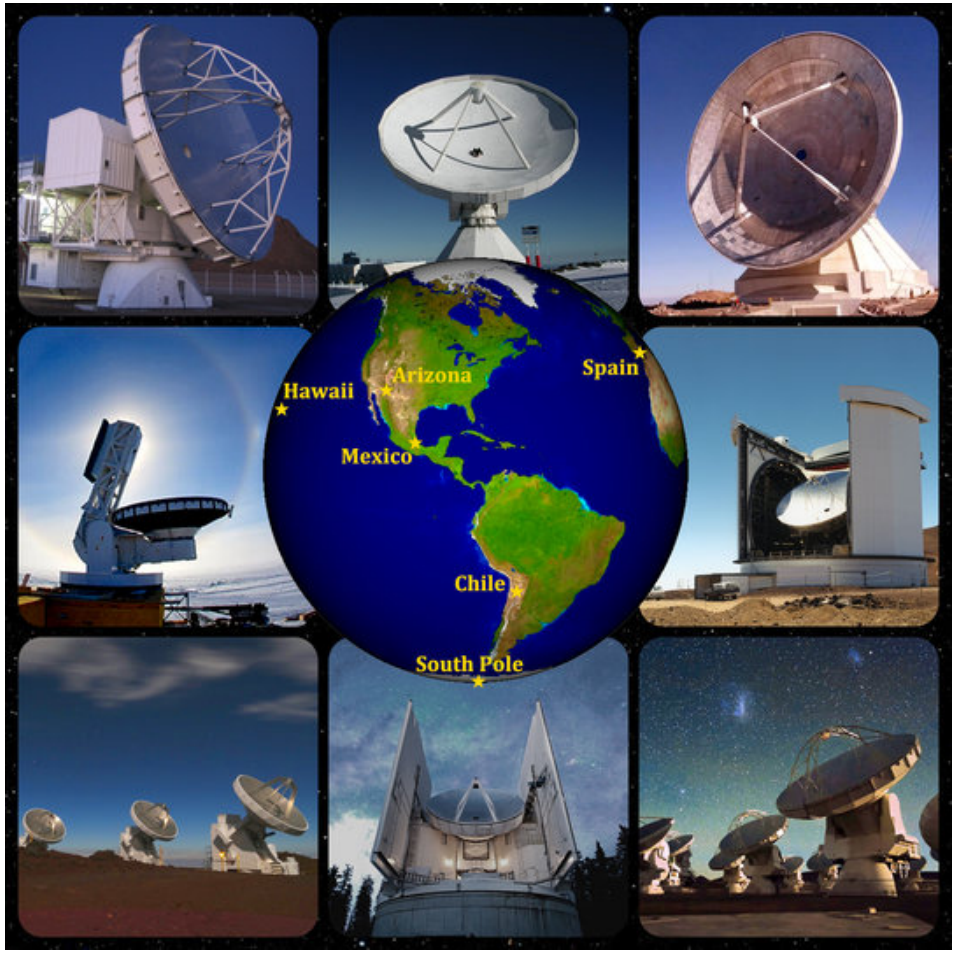


Observation rapprochée ?

- taille angulaire de TN supermassifs "proches" $\sim 50\,\mu$secondes d'arc ;
- télescope spatial Hubble : résolution $\sim 10^5\,\mu$secondes d'arc...

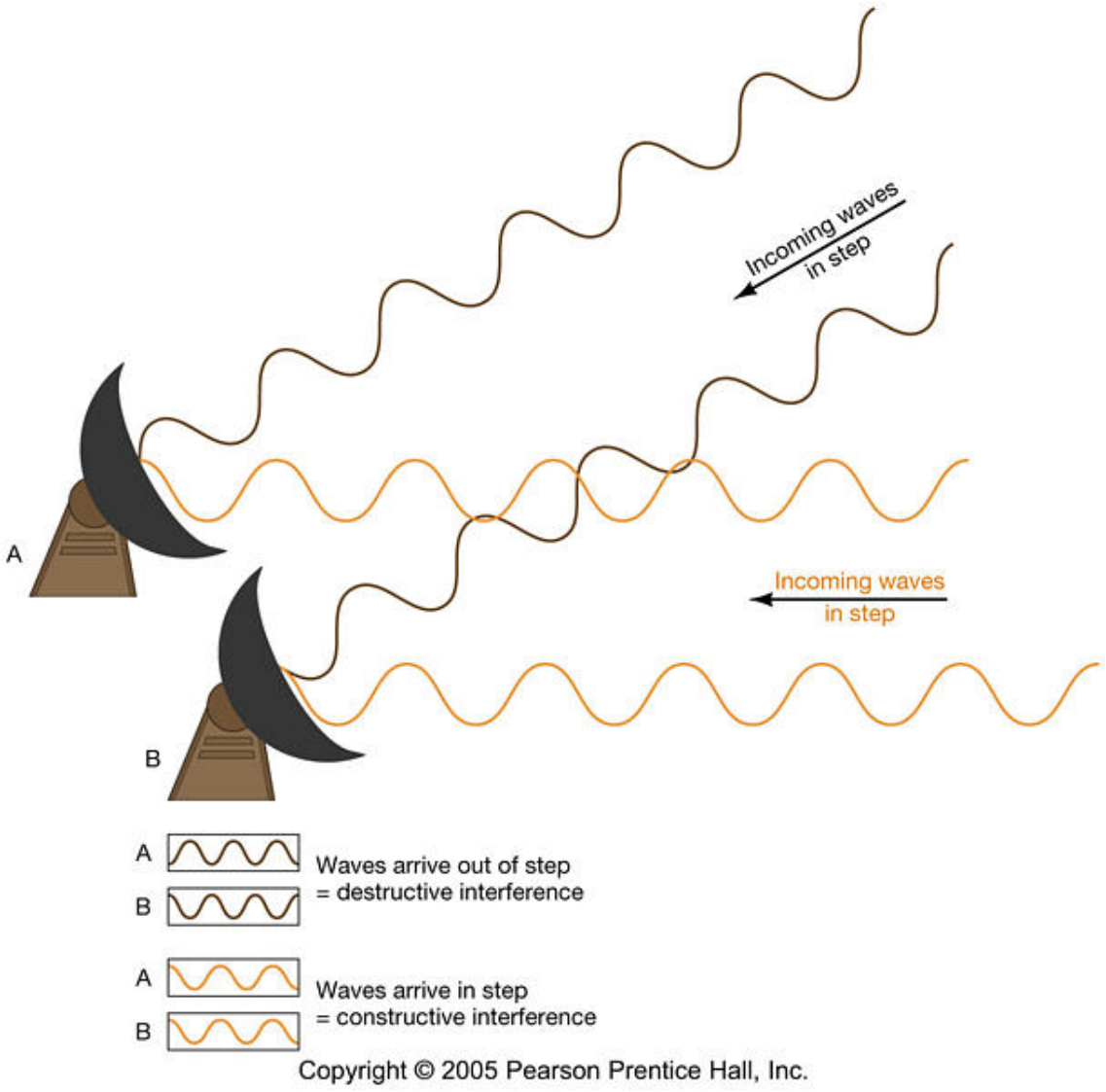
Nom	Masse ($M_\odot$)	Distance (10^6 al)	Diamètre apparent (10^{-6} ")
Sgr A*	$\sim 4.3 \times 10^6$	0.027	53
M87	$\sim 3.6 \times 10^9$	55	21

Solution : interférométrie à très longue base

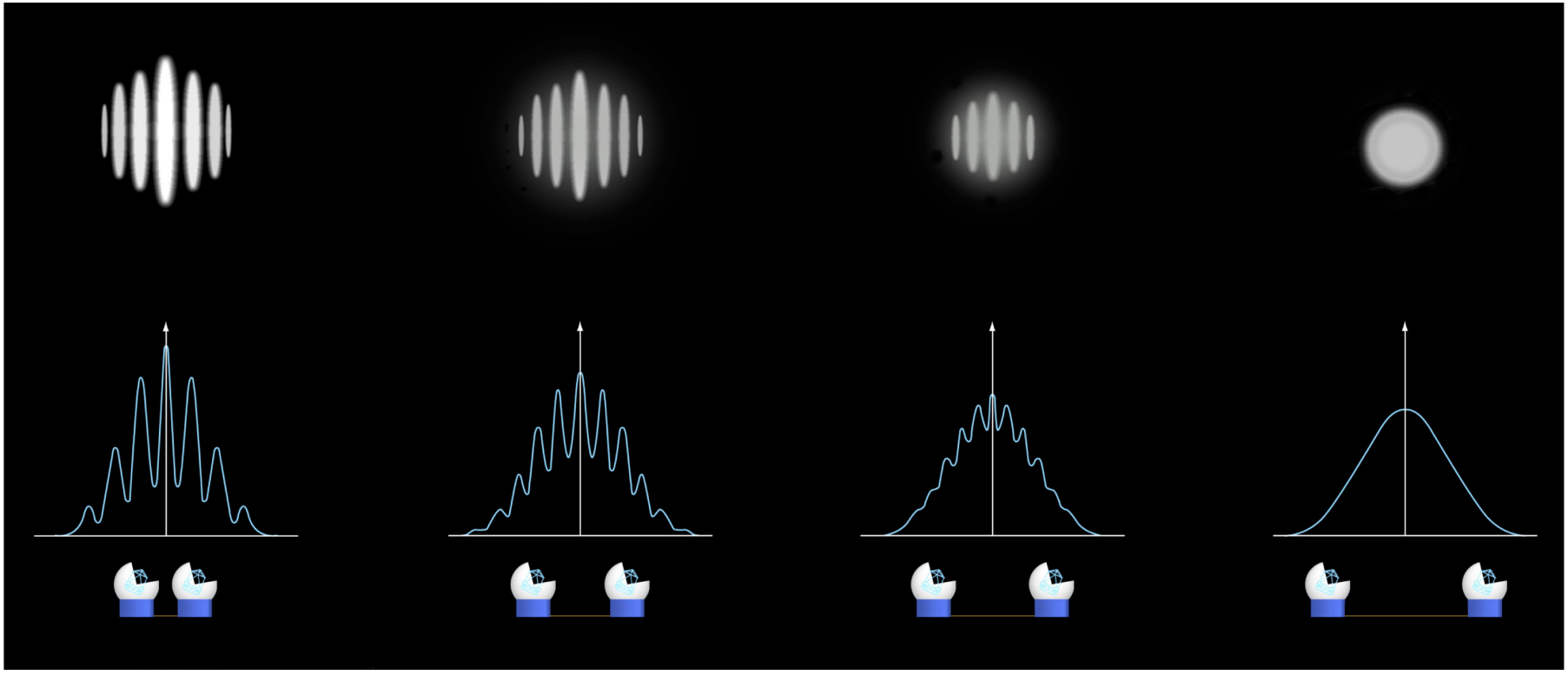


Les 8 télescopes (localisés sur 6 sites) impliqués dans la campagne d'observation d'avril 2017 du Event Horizon Telescope (EHT)

Interférométrie

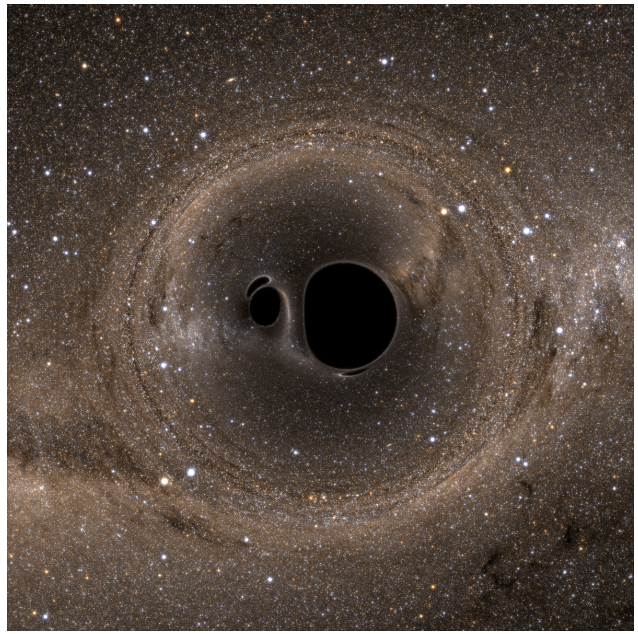


Interférométrie pour augmenter la résolution



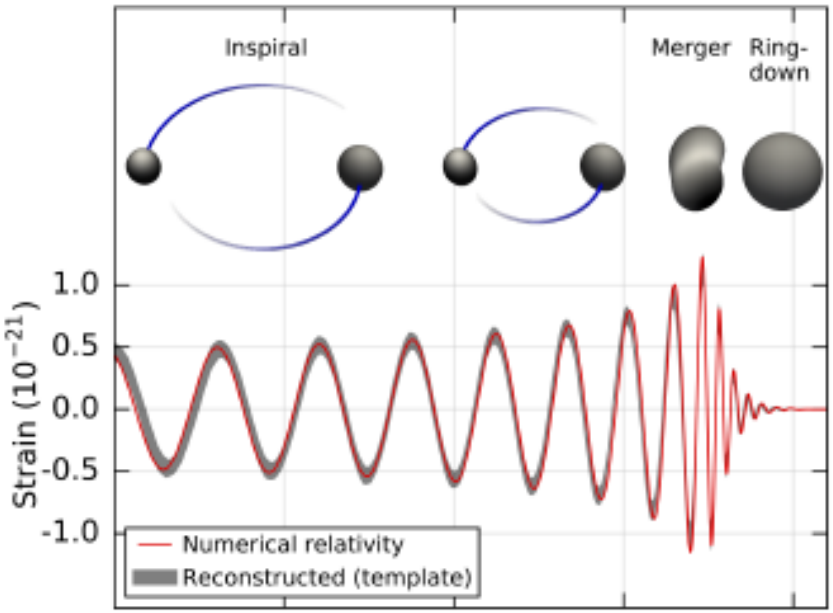
M87 par le EHT (Avril 2019)

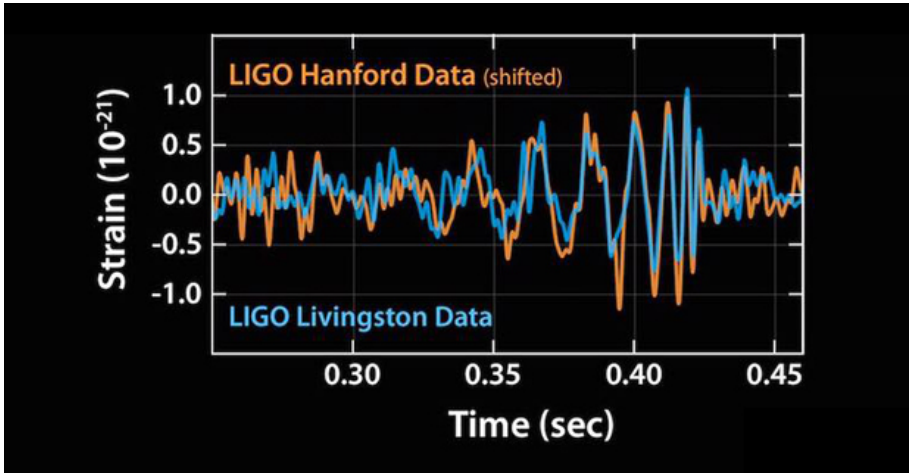
Coalescence de trous noirs binaires et ondes gravitationnelles



- ondes gravitationnelles (OG) = vagues de l'espace(-temps)
- émises par des **événements très énergétiques** (Univers primordial, collisions d'**objets compacts**, etc.)
- première détection directe : **septembre 2015** (LIGO)

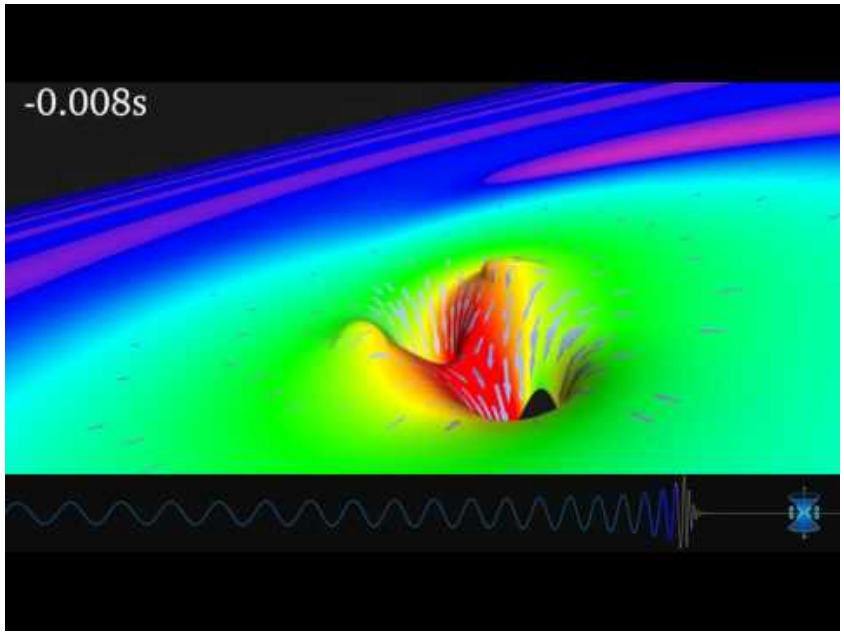
GW150914 : la première observation de la fusion de TN



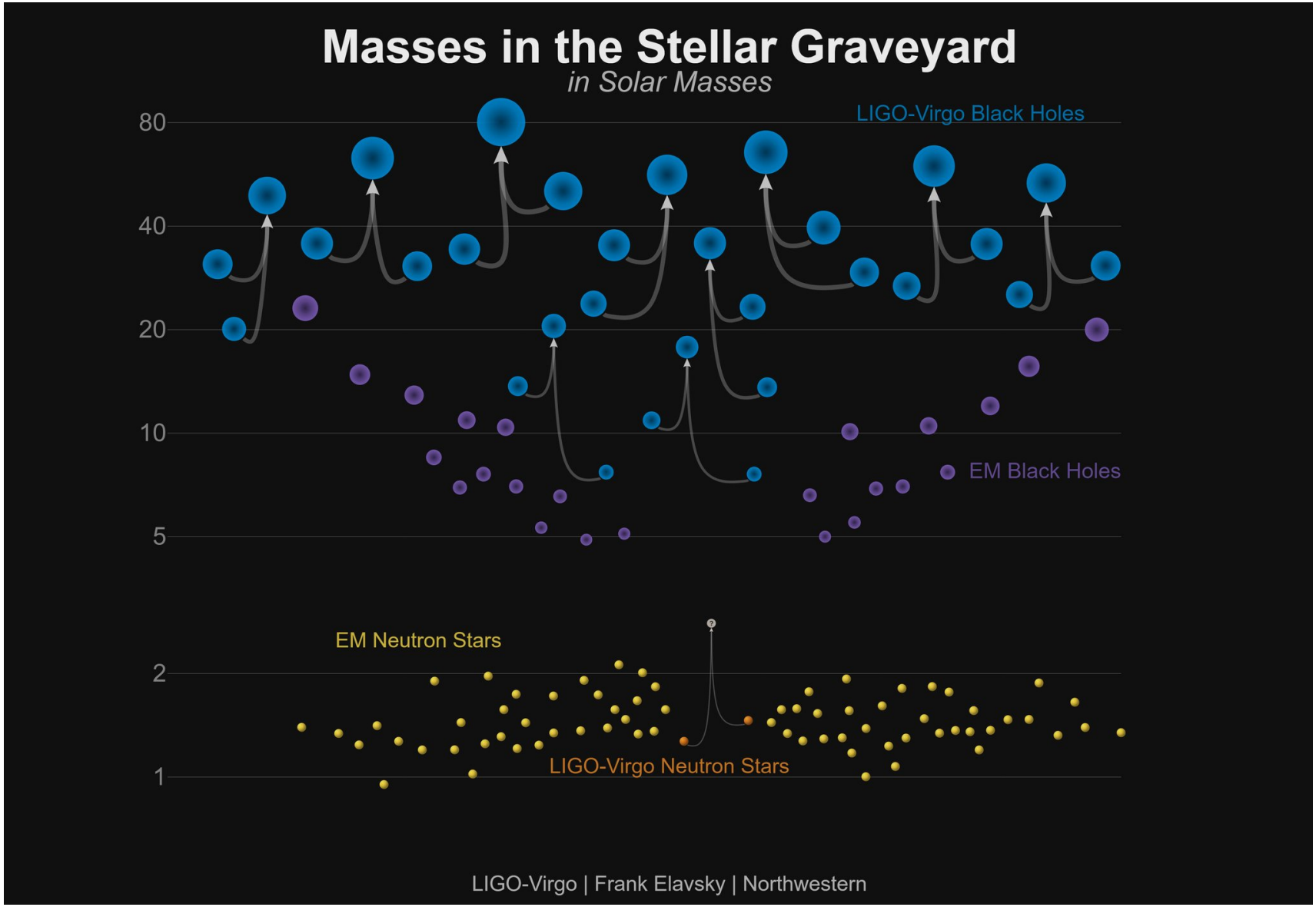


- 2 TN de 36 et 29 masses solaires
- $\sim$ 10 orbites observées en 0,2 seconde $\rightarrow v \sim 0,5\,c$ à la fusion
- fréquence du signal : de 35 Hz à 150 Hz
- sur Terre : **déformation relative** de distances $\sim$ rayon d'un noyau comparé au rayon de la Terre (10^{-21})

TN final

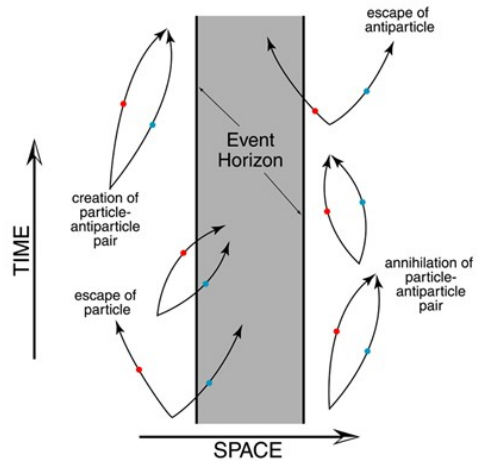


- **62 masses solaires** $\rightarrow$ 3 masses solaires émises sous la forme d'OG
- luminosité à la fusion $> 10^{49}$ W ($\sim$ 500 milliards de fois la luminosité électromagnétique de la Voie lactée)
- oscillations amorties : confirmation de la RG (**trou noir de Kerr**)



collaborations LIGO & Virgo, Novembre 2018

IV C : Trous noirs quantiques



Thermodynamiques des trous noirs

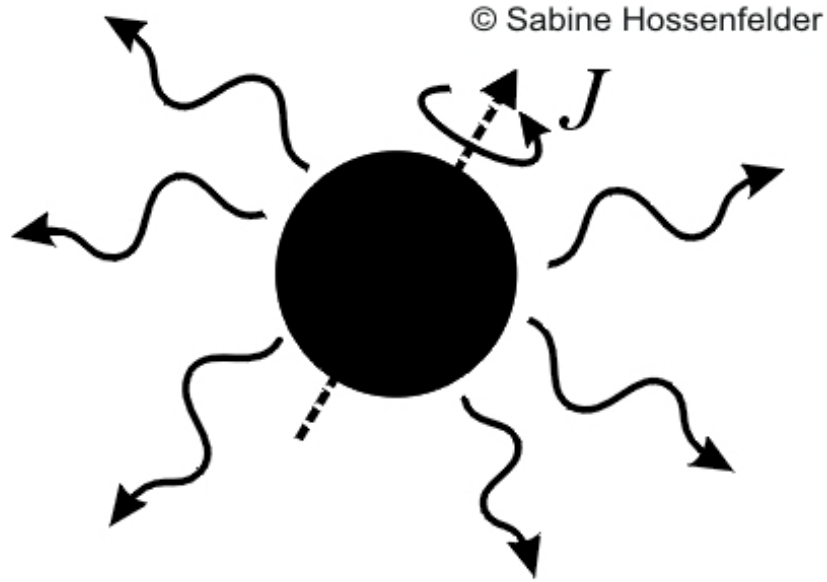
- **1969, Hawking** : la superficie de l'horizon ne peut qu'augmenter
- **1972, Bekenstein** : lien entre superficie de l'horizon et entropie (désordre microscopique ?) $\rightarrow$ second principe généralisé
- **1972, Carter, Hawking** & **Bardeen** : thermodynamique des TN (ex. : capacité calorifique négative)

- **1974, Hawking** : rayonnement et évaporation (effets quantiques)

  $\rightarrow$ température de Hawking :

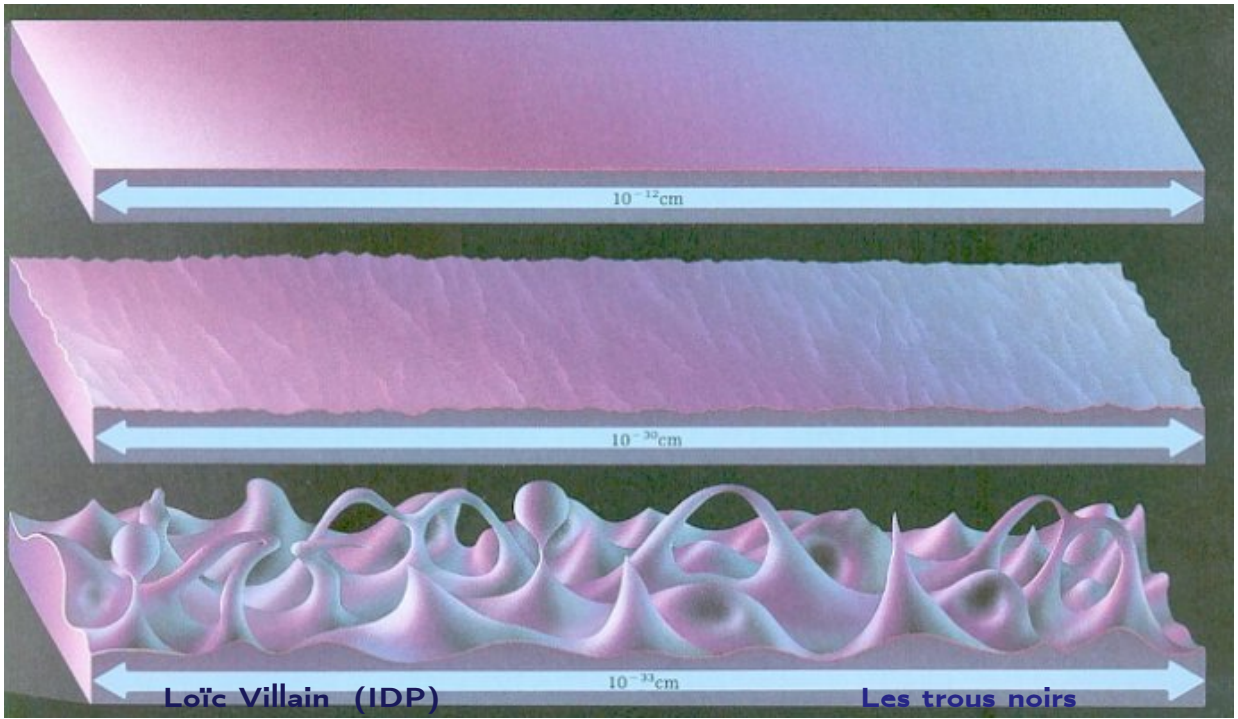
$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_b}$$

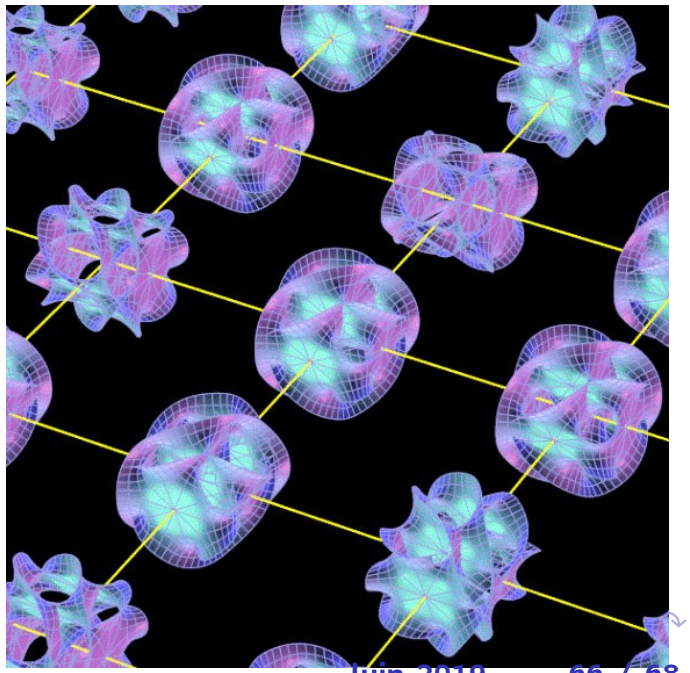
  $\rightarrow$ négligeable pour un TN stellaire (ou plus massif), mais pas pour un TN microscopique



Gravité quantique et TN

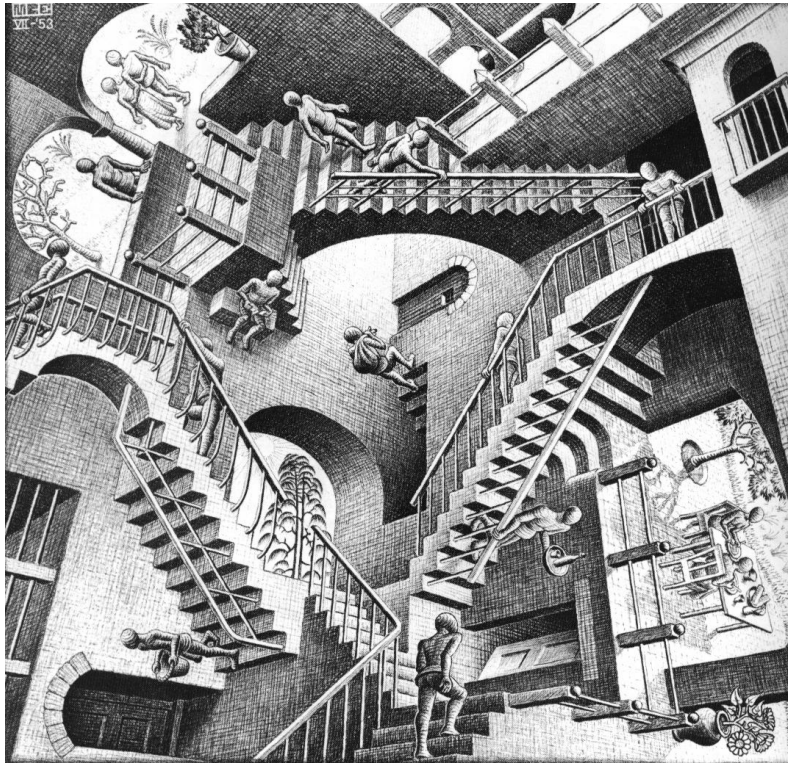
- Espace-temps aux petites échelles : fluctuations quantiques → micro-trous blancs et trous de ver
- gravité quantique : théorie des (super)cordes (spéculative) → dimensions supplémentaires ?
- théorie des cordes → TN = "pelotes de cordes" dans un espace-temps à 11 ou 12 dimensions, mais aussi possibilité de saturnes noirs, etc.
- horizon = frontière de l'espace-temps : **pas d'intérieur ?**
- TN microscopiques ?





Conclusion

Des cadavres très vivants...



Physique, compréhension du monde et trous noirs

- trous noirs = prédiction théorique (Michell, Schwarzschild) ;
- objets astrophysiques observés même si pas pris au sérieux initialement ;
- sources de questions sur la nature de l'espace-temps ;
- laboratoires naturels pour la physique théorique et l'astrophysique ;
- illustration de la puissances prédictive des mathématiques (Galilée : la Nature parle dans le « langage mathématique »).

il reste beaucoup à découvrir/comprendre pour les **générations suivantes** !

Physique, compréhension du monde et trous noirs

- trous noirs = prédiction théorique (Michell, Schwarzschild) ;
- objets astrophysiques observés même si pas pris au sérieux initialement ;
- sources de questions sur la nature de l'espace-temps ;
- laboratoires naturels pour la physique théorique et l'astrophysique ;
- illustration de la puissances prédictive des mathématiques (Galilée : la Nature parle dans le « langage mathématique »).

il reste beaucoup à découvrir/comprendre pour les **générations suivantes** !