



Les trous noirs : de l'intuition initiale aux observations récentes... et au-delà...

Loïc Villain

Institut Denis Poisson [Université de Tours & CNRS (UMR 7013)]
loic.villain@univ-tours.fr

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

Trous noirs : stars récurrentes de la science-fiction...



The Black Hole (1979)



Interstellar (2014)

en raison de leur « **caractère exotique** » et de **nombreuses idées courantes**
correctes ou **erronées** qui circulent à leur sujet...

Récemment : Stars de la rubrique *Science* des informations

- ▶ **2015** : première détection directe d'**ondes gravitationnelles** émises par un **système binaire de trous noirs** (annonce : février 2016 ; **Nobel 2017**)
- ▶ **2019** : publication de la **première image de l'environnement** d'un **trou noir supermassif** (M87*)
- ▶ **2020** : prix Nobel de physique pour **Penrose, Genzel & Ghez**

Récemment : Stars de la rubrique *Science* des informations

- ▶ **2015** : première détection directe d'**ondes gravitationnelles** émises par un **système binaire de trous noirs** (annonce : février 2016 ; [Nobel 2017](#))
- ▶ **2019** : publication de la **première image de l'environnement** d'un **trou noir supermassif** (M87*)
- ▶ **2020** : prix Nobel de physique pour Penrose, Genzel & Ghez

Récemment : Stars de la rubrique *Science* des informations

- ▶ **2015** : première détection directe d'**ondes gravitationnelles** émises par un **système binaire de trous noirs** (annonce : février 2016 ; **Nobel 2017**)
- ▶ **2019** : publication de la **première image de l'environnement** d'un **trou noir supermassif** (M87*)
- ▶ **2020** : **prix Nobel de physique** pour **Penrose, Genzel & Ghez**



Récemment : Stars de la rubrique *Science* des informations

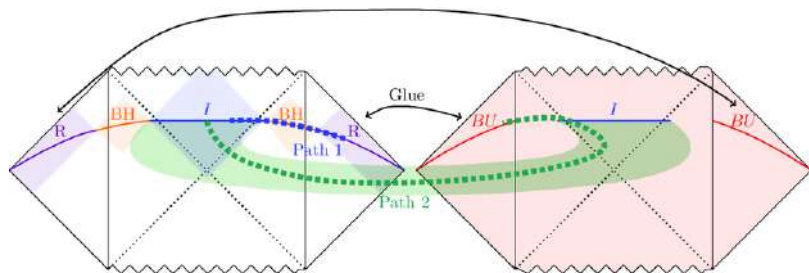
- ▶ **2015** : première détection directe d'**ondes gravitationnelles** émises par un **système binaire de trous noirs** (annonce : février 2016 ; **Nobel 2017**)
- ▶ **2019** : publication de la **première image de l'environnement** d'un **trou noir supermassif** (M87*)
- ▶ **2020** : **prix Nobel de physique** pour **Penrose, Genzel & Ghez**



⇒ **reconnaissance officielle** de leur **réalité** (par la communauté scientifique)

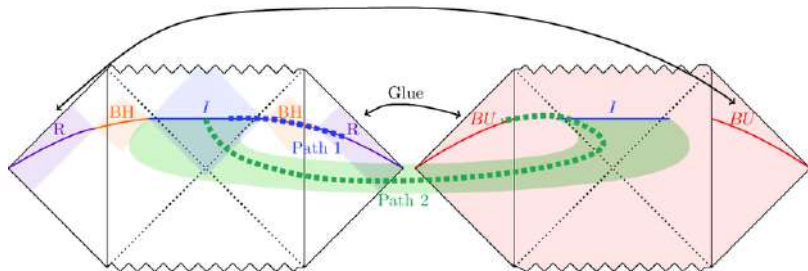
À la croisée des chemins... de la physique fondamentale...

- ▶ **trous noirs** : prédictions exotiques de la **physique théorique fondamentale**
- ▶ **physique fondamentale** : étude des **règles du jeu nommé « existence »**
⇒ **théories rigoureuses** et **mathématiques**
($\simeq$ maquettes mathématiques du monde)
- ▶ leur étude dans ce cadre nous renseigne sur « **la nature de la réalité** »
⇒ Nobel de **Penrose (mathématicien)**



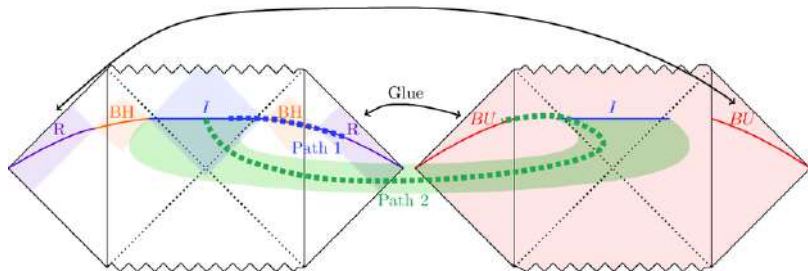
À la croisée des chemins... de la physique fondamentale...

- ▶ **trous noirs** : prédictions exotiques de la **physique théorique fondamentale**
- ▶ **physique fondamentale** : étude des **règles du jeu nommé « existence »**
⇒ **théories rigoureuses** et **mathématiques**
($\simeq$ maquettes mathématiques du monde)
- ▶ leur étude dans ce cadre nous renseigne sur « la nature de la réalité »
⇒ Nobel de **Penrose** (mathématicien)



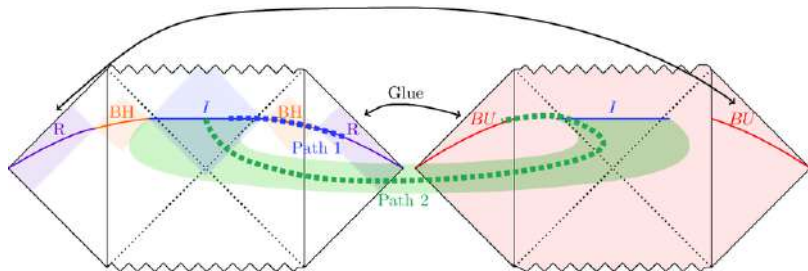
À la croisée des chemins... de la physique fondamentale...

- ▶ **trous noirs** : prédictions exotiques de la **physique théorique fondamentale**
- ▶ **physique fondamentale** : étude des **règles du jeu nommé « existence »**
⇒ **théories rigoureuses** et **mathématiques**
($\simeq$ maquettes mathématiques du monde)
- ▶ leur étude dans ce cadre nous renseigne sur « la nature de la réalité »
⇒ Nobel de **Penrose** (mathématicien)



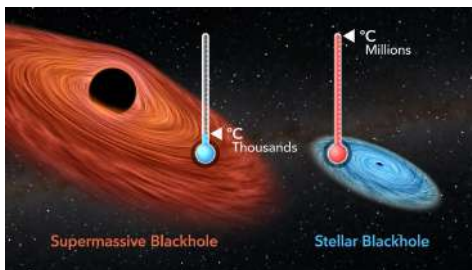
À la croisée des chemins... de la physique fondamentale...

- ▶ **trous noirs** : prédictions exotiques de la **physique théorique fondamentale**
- ▶ **physique fondamentale** : étude des **règles du jeu nommé « existence »**
⇒ **théories rigoureuses** et **mathématiques**
($\simeq$ maquettes mathématiques du monde)
- ▶ leur étude dans ce cadre nous renseigne sur « la nature de la réalité »
⇒ Nobel de **Penrose (mathématicien)**



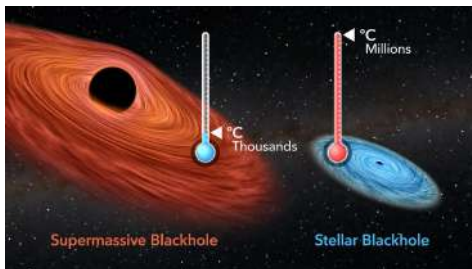
... et de l'astrophysique

- ▶ **trous noirs** : objets **célestes** exotiques
- ▶ **astrophysique** : étude de l'**Univers** et des objets qu'il contient
⇒ **modèles mathématiques**, mais **approximatifs** de « la partie en cours »
- ▶ leur étude nous renseigne sur « l'**Univers** », son contenu et leur **évolution**
⇒ Nobel de **Genzel et Ghez** (astrophysicien(ne)s)



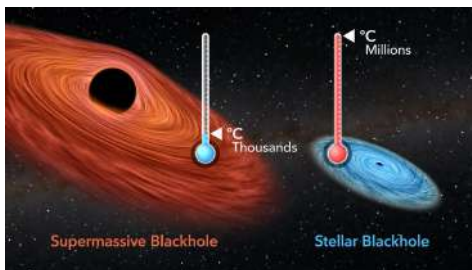
... et de l'astrophysique

- ▶ **trous noirs** : objets **célestes** exotiques
- ▶ **astrophysique** : étude de l'**Univers et des objets qu'il contient**
 - ⇒ **modèles mathématiques**, mais **approximatifs** de « la partie en cours »
- ▶ leur étude nous renseigne sur « l'Univers », son contenu et leur **évolution**
 - ⇒ Nobel de **Genzel et Ghez** (astrophysicien(ne)s)



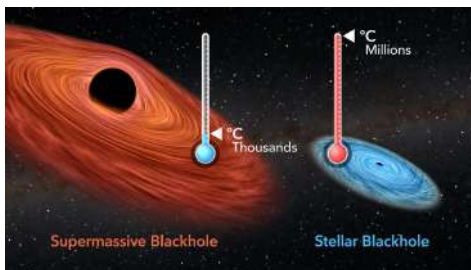
... et de l'astrophysique

- ▶ **trous noirs** : objets **célestes** exotiques
- ▶ **astrophysique** : étude de l'**Univers et des objets qu'il contient**
⇒ **modèles mathématiques**, mais **approximatifs** de « la partie en cours »
- ▶ leur étude nous renseigne sur « l'Univers », son contenu et leur **évolution**
⇒ Nobel de **Genzel et Ghez** (astrophysicien(ne)s)



... et de l'astrophysique

- ▶ **trous noirs** : objets **célestes** exotiques
- ▶ **astrophysique** : étude de l'**Univers et des objets qu'il contient**
⇒ **modèles mathématiques**, mais **approximatifs** de « la partie en cours »
- ▶ leur étude nous renseigne sur « l'Univers », son contenu et leur **évolution**
⇒ Nobel de **Genzel et Ghez (astrophysicien(ne)s)**



Point de vue de la physique fondamentale

≈ **région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir**

⇒ possède un **horizon** franchissable dans **un seul sens**

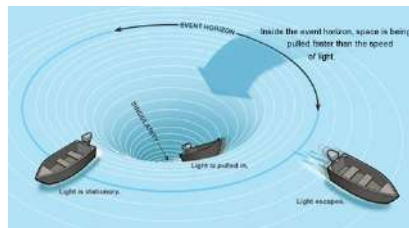
▶ prédits en **1916** par la théorie de la **relativité générale**

▶ « objets » aux **propriétés extrêmes**

⇒ existence théorique prise au sérieux à partir de l'**Âge d'or des trous noirs** (années 1960-70)

[**théorèmes mathématiques** dus à **Hawking, Penrose, etc.**]

▶ mais toujours quelques **résultats incompris ou paradoxaux** : laboratoires pour la **physique théorique moderne**



Point de vue de la physique fondamentale

≈ **région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir**

⇒ possède un **horizon** franchissable dans **un seul sens**

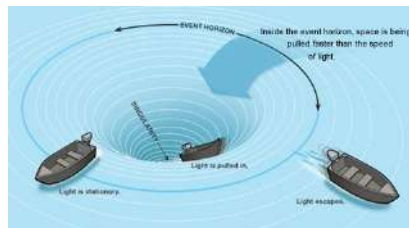
▶ prédits en **1916** par la théorie de la **relativité générale**

▶ « objets » aux **propriétés extrêmes**

⇒ existence théorique prise au sérieux à partir de l'**Âge d'or des trous noirs** (années 1960-70)

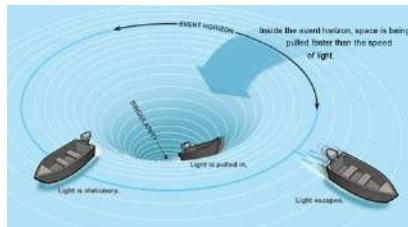
[**théorèmes mathématiques** dus à **Hawking, Penrose, etc.**]

▶ mais toujours quelques **résultats incompris ou paradoxaux** : laboratoires pour la **physique théorique moderne**



Point de vue de la physique fondamentale

- ≈ **région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir**
 - ⇒ possède un **horizon** franchissable dans **un seul sens**
- ▶ prédits en **1916** par la théorie de la **relativité générale**
- ▶ « objets » aux **propriétés extrêmes**
 - ⇒ existence théorique prise au sérieux à partir de l'**Âge d'or des trous noirs** (années 1960-70)
[théorèmes mathématiques dus à **Hawking, Penrose, etc.**]
- ▶ mais toujours quelques **résultats incompris ou paradoxaux** : laboratoires pour la **physique théorique moderne**



Point de vue de la physique fondamentale

≈ **région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir**

⇒ possède un **horizon** franchissable dans **un seul sens**

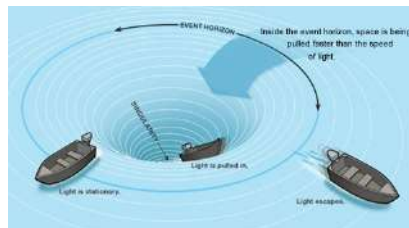
► prédits en **1916** par la théorie de la **relativité générale**

► « objets » aux **propriétés extrêmes**

⇒ existence théorique prise au sérieux à partir de l'**Âge d'or des trous noirs** (années 1960-70)

[**théorèmes mathématiques** dus à **Hawking, Penrose, etc.**]

► mais toujours quelques **résultats incompris ou paradoxaux** : laboratoires pour la **physique théorique moderne**



Point de vue de la physique fondamentale

≈ **région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir**

⇒ possède un **horizon** franchissable dans **un seul sens**

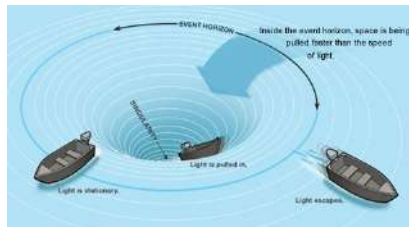
► prédits en **1916** par la théorie de la **relativité générale**

► « objets » aux **propriétés extrêmes**

⇒ existence théorique prise au sérieux à partir de l'**Âge d'or des trous noirs** (années **1960-70**)

[théorèmes mathématiques dus à Hawking, Penrose, etc.]

► mais toujours quelques **résultats incompris ou paradoxaux** : laboratoires pour la **physique théorique moderne**



Point de vue de la physique fondamentale

≈ **région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir**

⇒ possède un **horizon** franchissable dans **un seul sens**

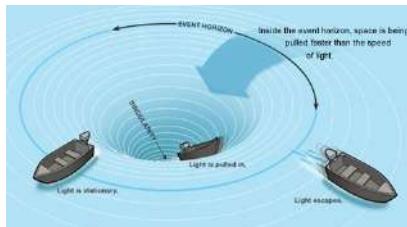
► prédits en **1916** par la théorie de la **relativité générale**

► « objets » aux **propriétés extrêmes**

⇒ existence théorique prise au sérieux à partir de l'**Âge d'or des trous noirs** (années 1960-70)

[**théorèmes mathématiques** dus à **Hawking, Penrose, etc.**]

► mais toujours quelques **résultats incompris ou paradoxaux** : laboratoires pour la **physique théorique moderne**



Point de vue de la physique fondamentale

≈ **région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir**

⇒ possède un **horizon** franchissable dans **un seul sens**

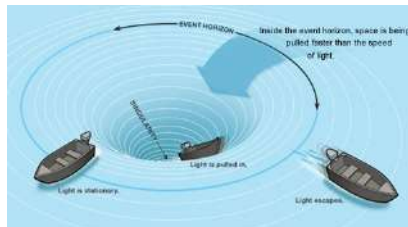
► prédits en **1916** par la théorie de la **relativité générale**

► « objets » aux **propriétés extrêmes**

⇒ existence théorique prise au sérieux à partir de l'**Âge d'or des trous noirs** (années 1960-70)

[**théorèmes mathématiques** dus à **Hawking, Penrose**, etc.]

► mais toujours quelques **résultats incompris ou paradoxaux** : laboratoires pour la **physique théorique moderne**



Point de vue astrophysique

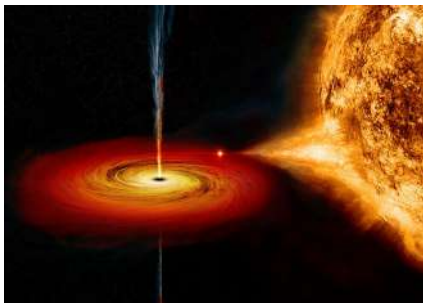
- ▶ astres étranges impliqués dans la plupart des phénomènes les plus énergétiques connus
- ▶ deux principaux types :
 - ⇒ trous noirs stellaires = cadavres des étoiles les plus massives
 - ⇒ trous noirs supermassifs au cœur des galaxies (« noyau actif de galaxie » (AGN), quasar, etc.)
- ▶ premières observations indirectes : années 1960-70
- ▶ premières observations directes : années 2010

Point de vue astrophysique

- ▶ astres étranges impliqués dans la plupart des phénomènes les plus énergétiques connus
- ▶ deux principaux types :
 - ⇒ trous noirs stellaires = cadavres des étoiles les plus massives
 - ⇒ trous noirs supermassifs au cœur des galaxies (« noyau actif de galaxie » (AGN), quasar, etc.)
- ▶ premières observations indirectes : années 1960-70
- ▶ premières observations directes : années 2010

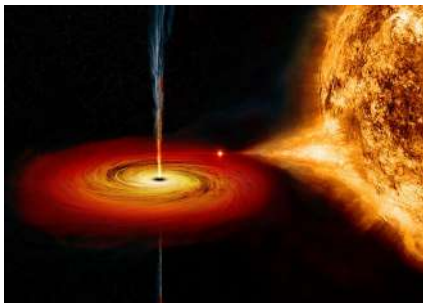
Point de vue astrophysique

- ▶ astres étranges impliqués dans la plupart des phénomènes les plus énergétiques connus
- ▶ deux principaux types :
 - ⇒ **trous noirs stellaires** = cadavres des étoiles les plus massives
 - ⇒ **trous noirs supermassifs** au cœur des galaxies (« noyau actif de galaxie » (AGN), quasar, etc.)
- ▶ premières observations indirectes : années 1960-70
- ▶ premières observations directes : années 2010



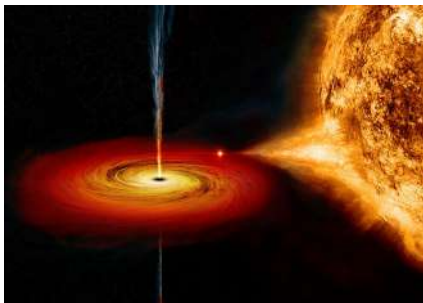
Point de vue astrophysique

- ▶ astres étranges impliqués dans la plupart des phénomènes les plus énergétiques connus
- ▶ deux principaux types :
 - ⇒ **trous noirs stellaires** = cadavres des étoiles les plus massives
 - ⇒ **trous noirs supermassifs** au cœur des galaxies (« noyau actif de galaxie » (AGN), quasar, etc.)
- ▶ premières observations indirectes : années 1960-70
- ▶ premières observations directes : années 2010



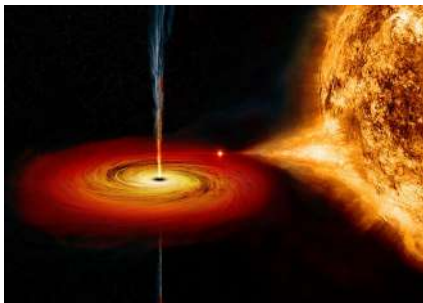
Point de vue astrophysique

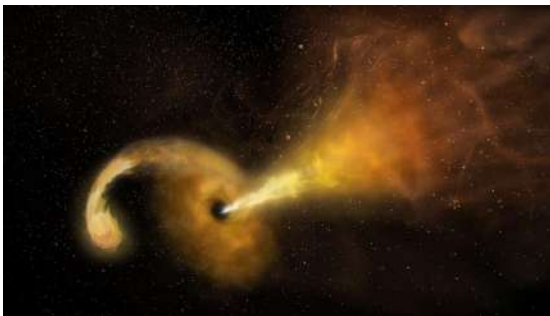
- ▶ astres étranges impliqués dans la plupart des phénomènes les plus énergétiques connus
- ▶ deux principaux types :
 - ⇒ **trous noirs stellaires** = cadavres des étoiles les plus massives
 - ⇒ **trous noirs supermassifs** au cœur des galaxies (« noyau actif de galaxie » (AGN), quasar, etc.)
- ▶ premières observations indirectes : années 1960-70
- ▶ premières observations directes : années 2010



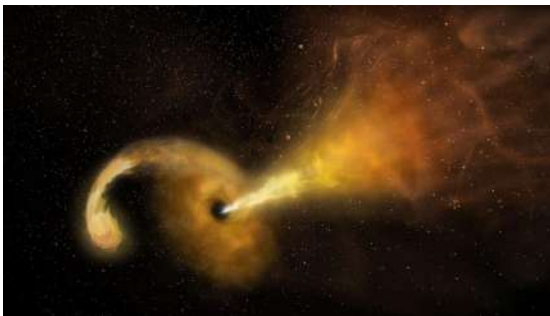
Point de vue astrophysique

- ▶ astres étranges impliqués dans la plupart des phénomènes les plus énergétiques connus
- ▶ deux principaux types :
 - ⇒ **trous noirs stellaires** = cadavres des étoiles les plus massives
 - ⇒ **trous noirs supermassifs** au cœur des galaxies (« noyau actif de galaxie » (AGN), quasar, etc.)
- ▶ premières observations indirectes : années 1960-70
- ▶ premières observations directes : années 2010





- ▶ longtemps considérés comme « **trop exotiques pour être crédibles** » par les gens qui ne les comprenaient pas
- ▶ car remise en cause de nombreuses « évidences » sur le **temps**, l'**espace**, etc.
 - ⇒ nombreux aspects **non-intuitifs**
 - ⇒ sources de fantasmes, de mythes, d'incompréhension...



- ▶ longtemps considérés comme « **trop exotiques pour être crédibles** »
par les gens qui ne les comprenaient pas (initialement : tout le monde)
- ▶ car remise en cause de nombreuses « évidences » sur le **temps**, **l'espace**, etc.
 - ⇒ nombreux aspects **non-intuitifs**
 - ⇒ sources de fantasmes, de mythes, d'incompréhension...



- ▶ longtemps considérés comme « **trop exotiques pour être crédibles** »
par les gens qui ne les comprenaient pas (initialement : tout le monde)
- ▶ car remise en cause de nombreuses « évidences » sur le **temps**, l'**espace**, etc.
 - ⇒ nombreux aspects **non-intuitifs**
 - ⇒ sources de fantasmes, de mythes, d'incompréhension...



- ▶ longtemps considérés comme « **trop exotiques pour être crédibles** »
par les gens qui ne les comprenaient pas (initialement : tout le monde)
- ▶ car remise en cause de nombreuses « évidences » sur le **temps**, l'**espace**, etc.
 - ⇒ nombreux aspects **non-intuitifs**
 - ⇒ sources de fantasmes, de mythes, d'incompréhension...



- ▶ longtemps considérés comme « **trop exotiques pour être crédibles** » par les gens qui ne les comprenaient pas (initialement : tout le monde)
- ▶ car remise en cause de nombreuses « évidences » sur le **temps**, l'**espace**, etc.
 - ⇒ nombreux aspects **non-intuitifs** (propriété de la théorie d'Einstein)
 - ⇒ sources de fantasmes, de mythes, d'incompréhension...



- ▶ longtemps considérés comme « **trop exotiques pour être crédibles** » par les gens qui ne les comprenaient pas (initialement : tout le monde)
- ▶ car remise en cause de nombreuses « évidences » sur le **temps**, l'**espace**, etc.
 - ⇒ nombreux aspects **non-intuitifs** (propriété de la théorie d'Einstein)
 - ⇒ sources de fantasmes, de mythes, d'incompréhension...

...et de questions...

... générales :

- ▶ sont-ils les **aspirateurs** de l'Univers ?
- ▶ ou des **portails** vers d'autres univers ?
- ▶ le Soleil va-t-il devenir un trou noir ? dans ce cas, qu'arrivera-t-il à la Terre ?
- ▶ les collisionneurs de particules, comme ceux du *CERN*, peuvent-ils produire des **micro-trous noirs** qui vont dévorer notre planète ?
- ▶ tout objet de **densité** suffisamment élevée devient-il un trou noir ?
- ▶ dans un trou noir, le **temps** et l'**espace** s'« **inversent** »-ils ?



...et de questions...

... générales :

- ▶ sont-ils les **aspirateurs** de l'Univers ?
- ▶ ou des **portails** vers d'autres univers ?
- ▶ le Soleil va-t-il devenir un trou noir ? dans ce cas, qu'arrivera-t-il à la Terre ?
- ▶ les collisionneurs de particules, comme ceux du *CERN*, peuvent-ils produire des **micro-trous noirs** qui vont dévorer notre planète ?
- ▶ tout objet de **densité** suffisamment élevée devient-il un trou noir ?
- ▶ dans un trou noir, le **temps** et l'**espace** s'« **inversent** »-ils ?



...et de questions...

... générales :

- ▶ sont-ils les **aspirateurs** de l'Univers ?
- ▶ ou des **portails** vers d'autres univers ?

... ou plus techniques :

- ▶ le Soleil va-t-il devenir un trou noir ? dans ce cas, qu'arrivera-t-il à la Terre ?
- ▶ les collisionneurs de particules, comme ceux du *CERN*, peuvent-ils produire des **micro-trous noirs** qui vont dévorer notre planète ?
- ▶ tout objet de **densité** suffisamment élevée devient-il un trou noir ?
- ▶ dans un trou noir, le **temps** et l'**espace** s'« **inversent** »-ils ?



...et de questions...

... générales :

- ▶ sont-ils les **aspirateurs** de l'Univers ?
- ▶ ou des **portails** vers d'autres univers ?

... ou plus techniques :

- ▶ le Soleil va-t-il devenir un trou noir ? dans ce cas, qu'arrivera-t-il à la Terre ?
- ▶ les collisionneurs de particules, comme ceux du *CERN*, peuvent-ils produire des **micro-trous noirs** qui vont dévorer notre planète ?
- ▶ tout objet de **densité** suffisamment élevée devient-il un trou noir ?
- ▶ dans un trou noir, le **temps** et l'**espace** s'« **inversent** »-ils ?



...et de questions...

... générales :

- ▶ sont-ils les **aspirateurs** de l'Univers ?
- ▶ ou des **portails** vers d'autres univers ?

... ou plus techniques :

- ▶ le Soleil va-t-il devenir un trou noir ? dans ce cas, qu'arrivera-t-il à la Terre ?
- ▶ les collisionneurs de particules, comme ceux du *CERN*, peuvent-ils produire des **micro-trous noirs** qui vont dévorer notre planète ?
- ▶ tout objet de **densité** suffisamment élevée devient-il un trou noir ?
- ▶ dans un trou noir, le **temps** et l'**espace** s'« **inversent** »-ils ?



...et de questions...

... générales :

- ▶ sont-ils les **aspirateurs** de l'Univers ?
- ▶ ou des **portails** vers d'autres univers ?

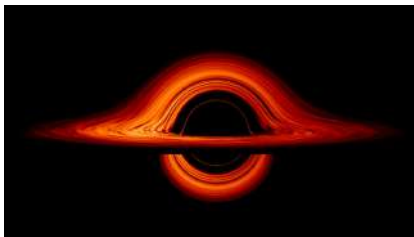
... ou plus techniques :

- ▶ le Soleil va-t-il devenir un trou noir ? dans ce cas, qu'arrivera-t-il à la Terre ?
- ▶ les collisionneurs de particules, comme ceux du *CERN*, peuvent-ils produire des **micro-trous noirs** qui vont dévorer notre planète ?
- ▶ tout objet de **densité** suffisamment élevée devient-il un trou noir ?
- ▶ dans un trou noir, le **temps** et l'**espace** s'« **inversent** »-ils ?



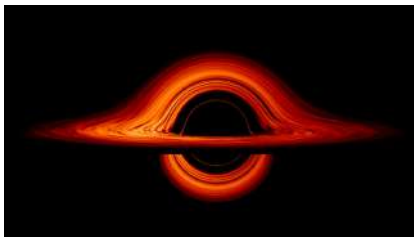
Cette conférence :

- ▶ présentation très **simplifiée** et **approximative** de **choses que l'on sait très bien** sur les trous noirs (et leur **histoire**)
- ▶ réponses (rapides) aux **questions précédentes**
- ▶ également aperçu de **questions ouvertes** et de **points incompris**
⇒ brèves références à la **recherche actuelle en physique théorique fondamentale ou astrophysique**
- ▶ si vous ne comprenez/retenez pas tout, c'est (malheureusement) normal !
(sujet très technique **abordé mathématiquement** dans **certains masters**)
- ▶ pas besoin de tout lire, **diaporama disponible ensuite** (avec bibliographie et liens internet)



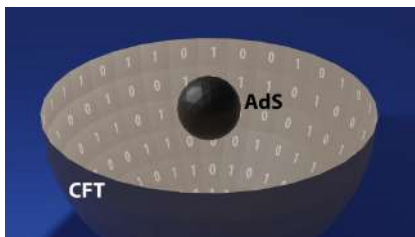
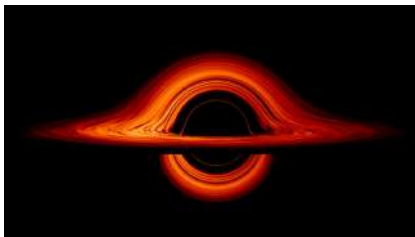
Cette conférence :

- ▶ présentation très **simplifiée** et **approximative** de **choses que l'on sait très bien** sur les trous noirs (et leur **histoire**)
- ▶ réponses (rapides) aux **questions précédentes**
- ▶ également aperçu de **questions ouvertes** et de **points incompris**
⇒ brèves références à la **recherche actuelle en physique théorique fondamentale ou astrophysique**
- ▶ si vous ne comprenez/retenez pas tout, c'est (malheureusement) normal !
(sujet très technique **abordé mathématiquement** dans **certains masters**)
- ▶ pas besoin de tout lire, **diaporama disponible ensuite** (avec bibliographie et liens internet)



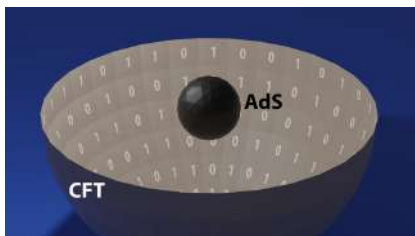
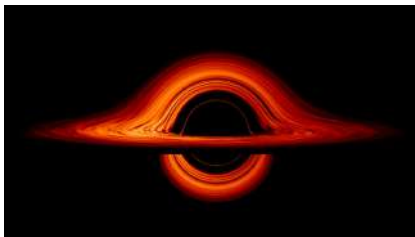
Cette conférence :

- ▶ présentation très **simplifiée** et **approximative** de **choses** que l'on sait très **bien** sur les trous noirs (et leur **histoire**)
- ▶ réponses (rapides) aux **questions précédentes**
- ▶ également aperçu de **questions ouvertes** et de **points incompris**
⇒ brèves références à la **recherche actuelle en physique théorique fondamentale ou astrophysique**
- ▶ si vous ne comprenez/retenez pas tout, c'est (malheureusement) normal !
(sujet très technique **abordé mathématiquement** dans **certains masters**)
- ▶ pas besoin de tout lire, **diaporama disponible ensuite** (avec bibliographie et liens internet)



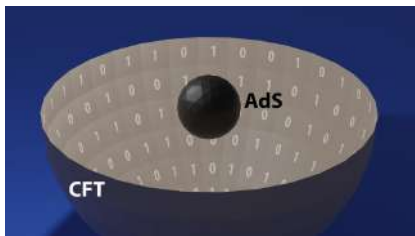
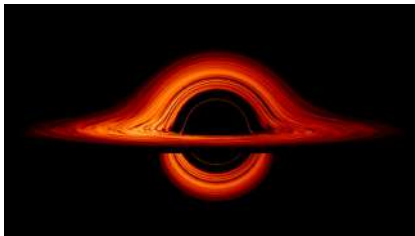
Cette conférence :

- ▶ présentation très **simplifiée** et **approximative** de **choses** que l'on sait très **bien** sur les trous noirs (et leur **histoire**)
- ▶ réponses (rapides) aux **questions précédentes**
- ▶ également aperçu de **questions ouvertes** et de **points incompris**
⇒ brèves références à la **recherche actuelle en physique théorique fondamentale ou astrophysique**
- ▶ si vous ne comprenez/reprenez pas tout, c'est (malheureusement) normal !
(sujet très technique **abordé mathématiquement** dans **certains masters**)
- ▶ pas besoin de tout lire, **diaporama disponible ensuite** (avec bibliographie et liens internet)



Cette conférence :

- ▶ présentation très **simplifiée** et **approximative** de **choses que l'on sait très bien** sur les trous noirs (et leur **histoire**)
- ▶ réponses (rapides) aux **questions précédentes**
- ▶ également aperçu de **questions ouvertes** et de **points incompris**
⇒ brèves références à la **recherche actuelle en physique théorique fondamentale ou astrophysique**
- ▶ si vous ne comprenez/reprenez pas tout, c'est (malheureusement) normal !
(sujet très technique **abordé mathématiquement** dans **certains masters**)
- ▶ pas besoin de tout lire, **diaporama disponible ensuite** (avec bibliographie et liens internet)



Plan

Préhistoire : lumière, gravitation et « astres occlus »

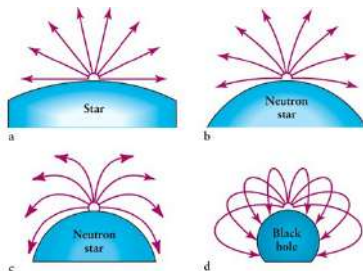
Gravitation relativiste et singularité de Schwarzschild

Âge d'or des trous noirs et principales propriétés théoriques

Mise en évidence de trous noirs astrophysiques

Observations directes récentes

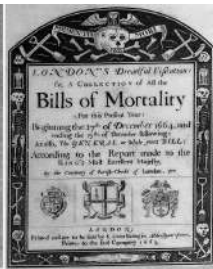
I : Préhistoire : lumière, gravitation et « astres occlus »



La Grande Peste de Londres (1665-1666)

Londres est **confinée** ; **Isaac Newton**, jeune diplômé de 23 ans, s'exile à la campagne et donne naissance à la **science moderne** :

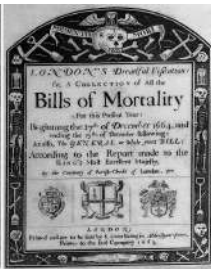
- ▶ **méthode scientifique** : la science repose sur des **expériences objectives** et des **modèles mathématiques**, pas uniquement sur des intuitions...
- ▶ **description unifiée** des mondes terrestre et céleste
⇒ **révolution intellectuelle**
- ▶ **modélisation mathématique** de l'**Univers** et des **lois** qui le gouvernent...



La Grande Peste de Londres (1665-1666)

Londres est **confinée** ; **Isaac Newton**, jeune diplômé de 23 ans, s'exile à la campagne et donne naissance à la **science moderne** :

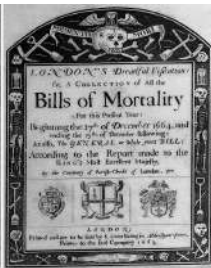
- ▶ **méthode scientifique** : la science repose sur des **expériences objectives** et des **modèles mathématiques**, pas uniquement sur des intuitions...
- ▶ **description unifiée** des mondes terrestre et céleste
⇒ **révolution intellectuelle**
- ▶ **modélisation mathématique** de l'**Univers** et des **lois** qui le gouvernent...



La Grande Peste de Londres (1665-1666)

Londres est **confinée** ; **Isaac Newton**, jeune diplômé de 23 ans, s'exile à la campagne et donne naissance à la **science moderne** :

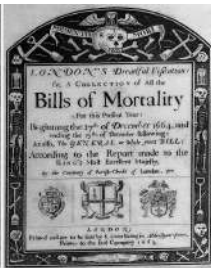
- ▶ **méthode scientifique** : la science repose sur des **expériences objectives** et des **modèles mathématiques**, pas uniquement sur des intuitions...
- ▶ **description unifiée** des mondes terrestre et céleste
⇒ **révolution intellectuelle**
- ▶ **modélisation mathématique** de l'**Univers** et des **lois** qui le gouvernent...



La Grande Peste de Londres (1665-1666)

Londres est **confinée** ; **Isaac Newton**, jeune diplômé de 23 ans, s'exile à la campagne et donne naissance à la **science moderne** :

- ▶ **méthode scientifique** : la science repose sur des **expériences objectives** et des **modèles mathématiques**, pas uniquement sur des intuitions...
- ▶ **description unifiée** des mondes terrestre et céleste
⇒ **révolution intellectuelle**
- ▶ **modélisation mathématique** de l'**Univers** et des **lois** qui le gouvernent...

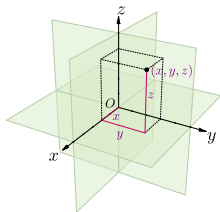


Espace et temps selon la physique newtonienne

- ▶ idée d'un **espace euclidien tridimensionnel** infini
(**scène immuable et passive**)

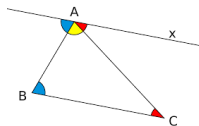
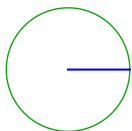
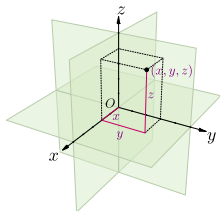
- ▶ conséquences :
 - rapport **circonférence/rayon** d'un cercle = 2π
 - somme des angles d'un triangle = 180 degrés

- ▶ postulat d'un **temps absolu et universel**
(**frise linéaire universelle**)
 $\implies$ tout le monde observe les mêmes **durées**,
ordres chronologiques, etc.



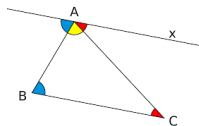
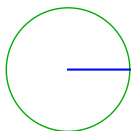
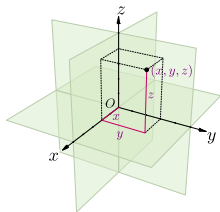
Espace et temps selon la physique newtonienne

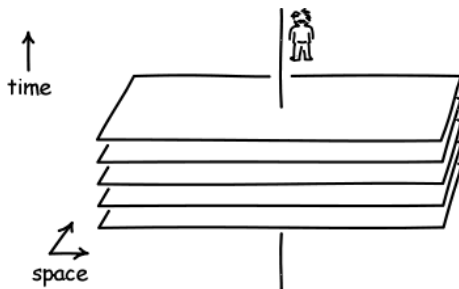
- ▶ idée d'un **espace euclidien tridimensionnel** infini
(**scène immuable et passive**)
- ▶ **conséquences** :
 - **rapport circonférence/rayon** d'un cercle = 2π
 - somme des angles d'un triangle = 180 degrés
- ▶ postulat d'un **temps absolu et universel**
(**frise linéaire universelle**)
 $\implies$ tout le monde observe les mêmes **durées**,
ordres chronologiques, etc.



Espace et temps selon la physique newtonienne

- ▶ idée d'un **espace euclidien tridimensionnel** infini
(**scène immuable et passive**)
- ▶ **conséquences** :
 - **rapport circonférence/rayon** d'un cercle = 2π
 - somme des angles d'un triangle = 180 degrés
- ▶ postulat d'un **temps absolu et universel**
(**frise linéaire universelle**)
 $\Rightarrow$ tout le monde observe les mêmes **durées**,
ordres chronologiques, etc.



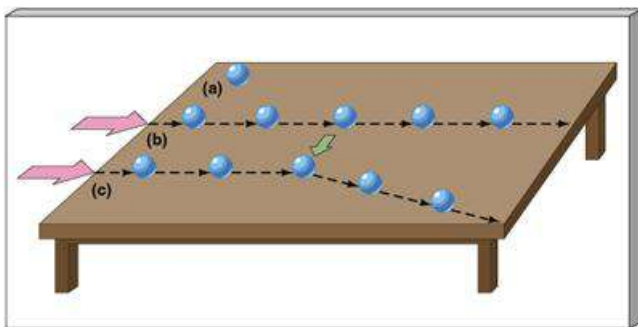


⇒ **représentations** en assez bon accord avec nos « perceptions directes/intuitives »

Mouvements des corps selon Newton

Lois de la dynamique (vers 1686) :

- ▶ **principe d'inertie** $\simeq$ tout corps sur lequel rien n'agit reste au repos (a) ou se déplace en ligne droite à vitesse constante (b)
- ▶ action d'un autre corps *via* une force (c)
 $\implies$ **modification de la trajectoire** (force $\simeq$ flèche)



Gravitation universelle (vers 1686)

- ▶ existence d'une **force attractive universelle** entre tous les **corps**
 $\implies$ toute **masse** (m_A ou m_B ici) est source d'une telle force
- ▶ action **à distance instantanée** $\implies$ « **vitesse infinie** »
- ▶ **action de même nature** exercée par la Terre sur **tous les corps proches**
 $\implies$ **poids** et **universalité de la chute libre**
 $\implies$ **principe d'inertie** (vitesse initiale) explique les différentes trajectoires



Gravitation universelle (vers 1686)

- ▶ existence d'une **force attractive universelle** entre tous les **corps**
 $\implies$ toute **masse** (m_A ou m_B ici) est source d'une telle force
- ▶ action **à distance instantanée** $\implies$ « **vitesse infinie** »
- ▶ action de même nature exercée par la Terre sur tous les corps proches
 $\implies$ poids et universalité de la chute libre
 $\implies$ **principe d'inertie** (vitesse initiale) explique les différentes trajectoires



Gravitation universelle (vers 1686)

- ▶ existence d'une **force attractive universelle** entre tous les **corps**
 $\implies$ toute **masse** (m_A ou m_B ici) est source d'une telle force
- ▶ action **à distance instantanée** $\implies$ « **vitesse infinie** »
- ▶ **action de même nature** exercée par la Terre sur **tous les corps proches**
 $\implies$ **poids** et **universalité de la chute libre**
 $\implies$ **principe d'inertie** (vitesse initiale) explique les différentes trajectoires



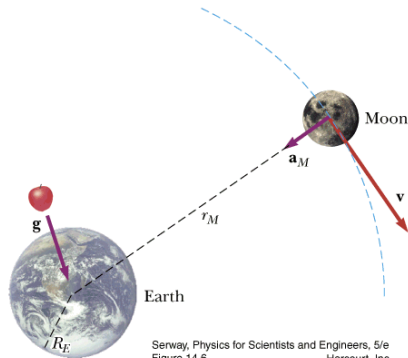
Gravitation universelle (vers 1686)

- ▶ existence d'une **force attractive universelle** entre tous les **corps**
 $\implies$ toute **masse** (m_A ou m_B ici) est source d'une telle force
- ▶ action **à distance instantanée** $\implies$ « **vitesse infinie** »
- ▶ **action de même nature** exercée par la Terre sur **tous les corps proches**
 $\implies$ **poids** et **universalité de la chute libre**
 $\implies$ **principe d'inertie** (vitesse initiale) explique les différentes trajectoires



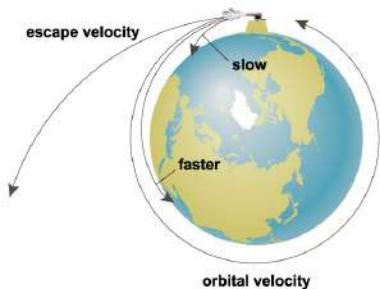
Gravitation universelle (vers 1686)

- ▶ existence d'une **force attractive universelle** entre tous les **corps**
 $\implies$ toute **masse** (m_A ou m_B ici) est source d'une telle force
- ▶ action **à distance instantanée** $\implies$ « **vitesse infinie** »
- ▶ **action de même nature** exercée par la Terre sur **tous les corps proches**
 $\implies$ **poids** et **universalité de la chute libre**
 $\implies$ **principe d'inertie** (vitesse initiale) explique les différentes trajectoires



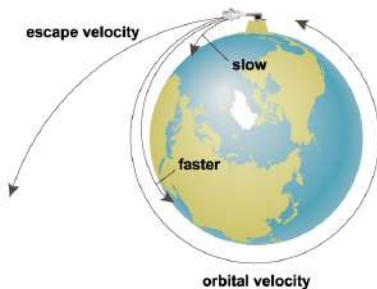
Serway, Physics for Scientists and Engineers, 5/e
 Figure 14.6
 Harcourt, Inc.

Gravitation, orbite et vitesse de libération



Gravitation, orbite et vitesse de libération

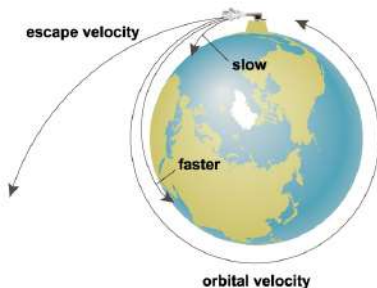
vitesse minimale pour « atteindre l'infini »
depuis la surface d'un astre de **masse** M et de **rayon** R ?



Gravitation, orbite et vitesse de libération

vitesse minimale pour « atteindre l'infini »
 depuis la surface d'un astre de **masse** M et de **rayon** R ?

$\Rightarrow v_{\text{lib}}$ proportionnelle à $\sqrt{\frac{M}{R}}$

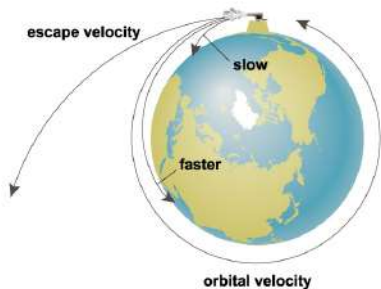


Gravitation, orbite et vitesse de libération

vitesse minimale pour « atteindre l'infini »
depuis la surface d'un astre de **masse** M et de **rayon** R ?

$\Rightarrow v_{\text{lib}}$ proportionnelle à $\sqrt{\frac{M}{R}}$

remarque : ne dépend pas de
l'objet lancé (propriété **universelle**)



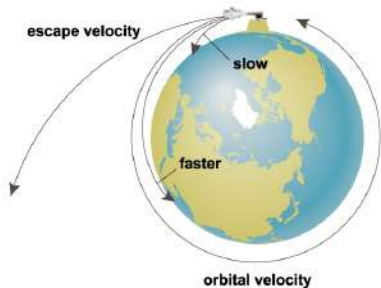
Gravitation, orbite et vitesse de libération

vitesse minimale pour « atteindre l'infini »
depuis la surface d'un astre de **masse** M et de **rayon** R ?

$\Rightarrow v_{\text{lib}}$ proportionnelle à $\sqrt{\frac{M}{R}}$

remarque : ne dépend pas de
l'objet lancé (propriété **universelle**)

$\Rightarrow \begin{cases} v_{\text{lib}} \nearrow & \text{si } M \nearrow & \text{avec } R \text{ fixé} \\ v_{\text{lib}} \nearrow & \text{si } R \searrow & \text{avec } M \text{ fixée} \end{cases}$



Gravitation, orbite et vitesse de libération

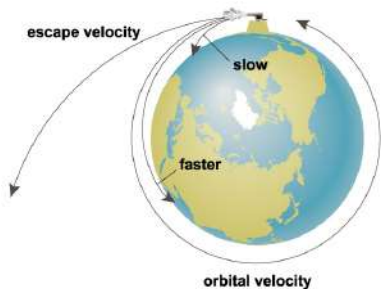
vitesse minimale pour « atteindre l'infini »
depuis la surface d'un astre de **masse** M et de **rayon** R ?

$\Rightarrow v_{\text{lib}}$ proportionnelle à $\sqrt{\frac{M}{R}}$

remarque : ne dépend pas de
l'objet lancé (propriété **universelle**)

$\Rightarrow \begin{cases} v_{\text{lib}} \nearrow & \text{si } M \nearrow & \text{avec } R \text{ fixé} \\ v_{\text{lib}} \nearrow & \text{si } R \searrow & \text{avec } M \text{ fixée} \end{cases}$

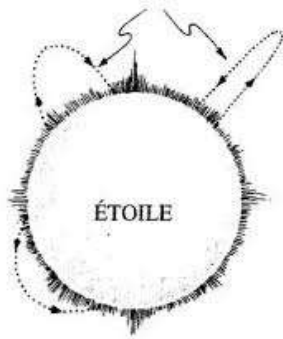
depuis la surface de la Terre :
 $\sim 40\,000 \text{ km/h}$



- ▶ **1676, Rømer, 1728 Bradley :**
vitesse de la lumière c
 $\simeq 300\,000\text{ km/s}$
- ▶ **1783, Michell :** pourrait-il exister des étoiles telles que v_{lib} supérieure à la vitesse de la lumière ?
 $\implies$ invisibles, mais effet gravitationnel observable si présence d'objets lumineux voisins
- ▶ **possibilité :** même densité que le Soleil, mais diamètre 500 fois plus grand
- ▶ **1795, Laplace :** raisonnement similaire $\implies$ « astres occlus »

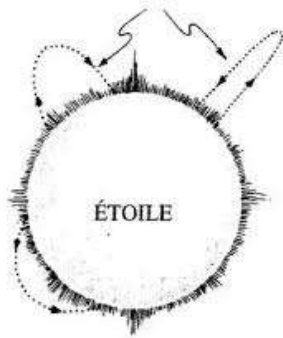
- ▶ **1676, Rømer, 1728 Bradley :**
vitesse de la lumière c
 $\simeq 300\,000\text{ km/s}$
- ▶ **1783, Michell :** pourrait-il exister des étoiles telles que v_{lib} supérieure à la vitesse de la lumière ?
 $\Rightarrow$ invisibles, mais effet gravitationnel observable si présence d'objets lumineux voisins
- ▶ **possibilité :** même densité que le Soleil, mais diamètre 500 fois plus grand
- ▶ **1795, Laplace :** raisonnement similaire $\Rightarrow$ « astres occlus »

Trajectoires des corpuscules lumineux



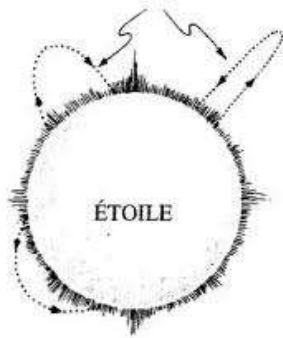
- ▶ **1676, Rømer, 1728 Bradley :**
vitesse de la lumière c
 $\simeq 300\,000\text{ km/s}$
- ▶ **1783, Michell :** pourrait-il exister des étoiles telles que v_{lib} supérieure à la vitesse de la lumière ?
 $\Rightarrow$ invisibles, mais effet gravitationnel observable si présence d'objets lumineux voisins
- ▶ possibilité : même densité que le Soleil, mais diamètre 500 fois plus grand
- ▶ **1795, Laplace :** raisonnement similaire $\Rightarrow$ « astres occlus »

Trajectoires des corpuscules lumineux



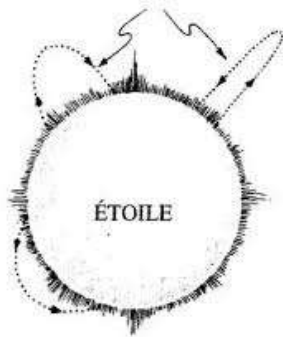
- ▶ **1676, Rømer, 1728 Bradley :**
vitesse de la lumière c
 $\simeq 300\,000\text{ km/s}$
- ▶ **1783, Michell :** pourrait-il exister des étoiles telles que v_{lib} supérieure à la vitesse de la lumière ?
 $\Rightarrow$ invisibles, mais effet gravitationnel observable si présence d'objets lumineux voisins
- ▶ **possibilité :** même densité que le Soleil, mais diamètre 500 fois plus grand
- ▶ **1795, Laplace :** raisonnement similaire $\Rightarrow$ « astres occlus »

Trajectoires des corpuscules lumineux



- ▶ **1676, Rømer, 1728 Bradley :**
vitesse de la lumière c
 $\simeq 300\,000\text{ km/s}$
- ▶ **1783, Michell :** pourrait-il exister des étoiles telles que v_{lib} supérieure à la vitesse de la lumière ?
 $\Rightarrow$ invisibles, mais effet gravitationnel observable si présence d'objets lumineux voisins
- ▶ **possibilité :** même densité que le Soleil, mais diamètre 500 fois plus grand
- ▶ **1795, Laplace :** raisonnement similaire $\Rightarrow$ « astres occlus »

Trajectoires des corpuscules lumineux



- ▶ **1676, Rømer, 1728 Bradley :**

vitesse de la lumière c

$\simeq 300\,000\text{ km/s}$

- ▶ **1783, Michell :** pourrait-il exister des étoiles telles que v_{lib} supérieure à la vitesse de la lumière ?

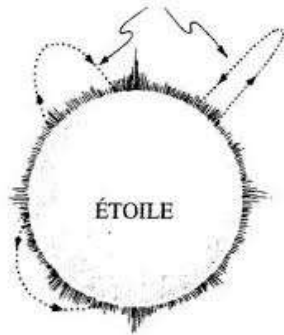
$\Rightarrow$ **invisibles**, mais **effet gravitationnel observable** si **présence d'objets lumineux voisins**

- ▶ **possibilité :** même densité que le Soleil, mais diamètre 500 fois plus grand

- ▶ **1795, Laplace :** raisonnement similaire $\Rightarrow$ « **astres occlus** »

$\Rightarrow$ **vagues ancêtres** des **trous noirs** (pas plus de détails ici)

Trajectoires des corpuscules lumineux



► **1676, Rømer, 1728 Bradley :**

vitesse de la lumière c

$\simeq 300\,000\text{ km/s}$

► **1783, Michell :** pourrait-il exister des étoiles telles que v_{lib} supérieure à la vitesse de la lumière ?

$\Rightarrow$ **invisibles**, mais **effet gravitationnel observable** si **présence d'objets lumineux voisins**

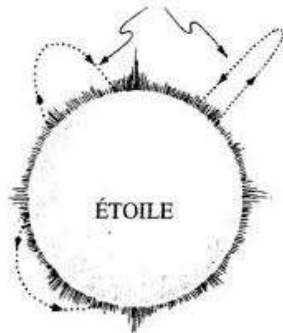
► **possibilité :** même densité que le Soleil, mais diamètre 500 fois plus grand

► **1795, Laplace :** raisonnement similaire $\Rightarrow$ « **astres occlus** »

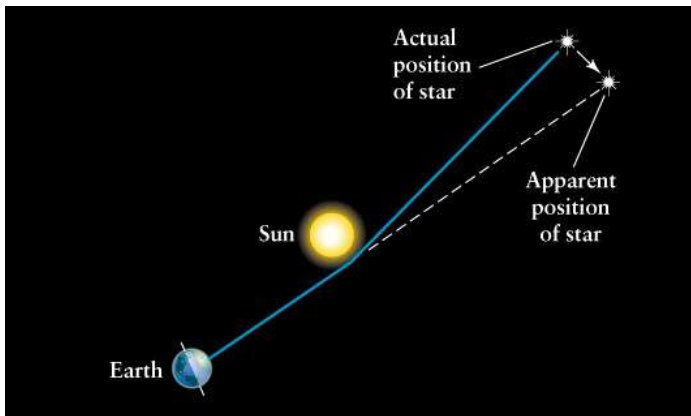
$\Rightarrow$ **vagues ancêtres** des **trous noirs** (pas plus de détails ici)

$\Rightarrow$ **semble peu réaliste** $\Rightarrow$ idée vite oubliée

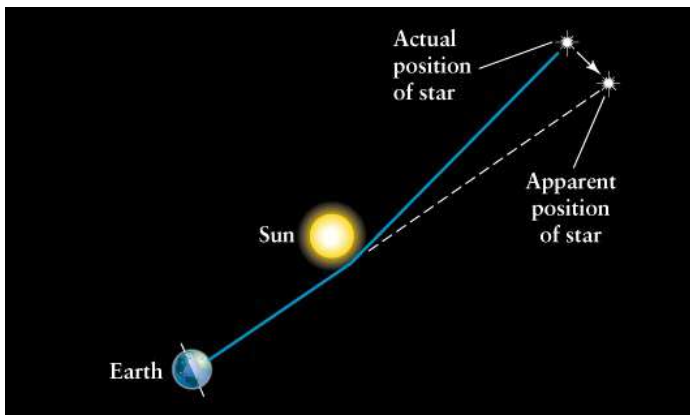
Trajectoires des corpuscules lumineux



- ▶ **1801, von Soldner** : prédiction d'une **dévi**ation gravitationnelle de la **lumière**, en particulier des rayons lumineux passant à proximité du Soleil
- ▶ effet faible, observable pour des étoiles visuellement proches du Soleil
⇒ sans intérêt ?

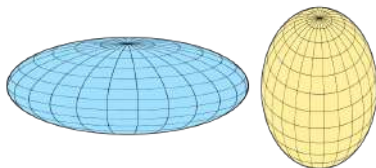


- ▶ **1801, von Soldner** : prédiction d'une **dévi**ation gravitationnelle de la **lumière**, en particulier des rayons lumineux passant à proximité du Soleil
- ▶ **effet faible**, observable pour des étoiles visuellement proches du Soleil
⇒ **sans intérêt** ?



Tests et conséquences de la gravitation universelle

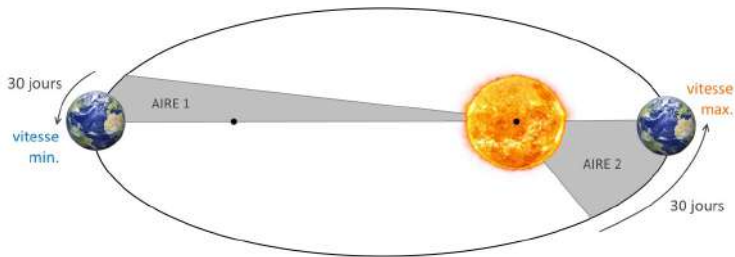
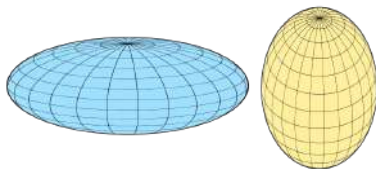
- ▶ **prédictions** : forme de la Terre, retour de la comète de **Halley**, existence de Neptune, etc.
- ▶ **explications** : lois de **Kepler**, phénomène des marées, etc.



Newton : 3^{ème} loi de Kepler permet de **peser le Soleil**

Tests et conséquences de la gravitation universelle

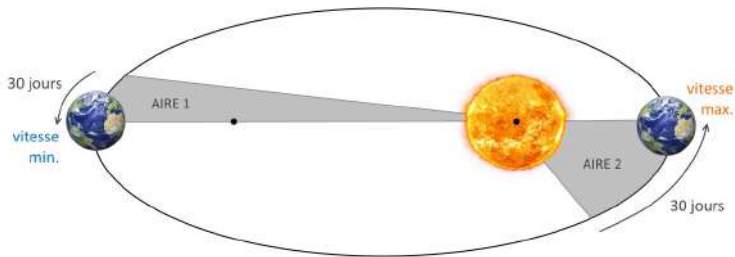
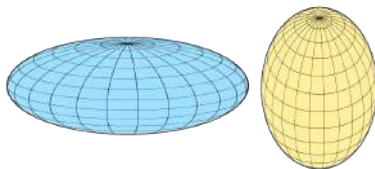
- **prédictions** : forme de la Terre, retour de la comète de **Halley**, existence de Neptune, etc.
- **explications** : lois de **Kepler**, phénomène des marées, etc.



Newton : 3^{ème} loi de Kepler permet de **peser le Soleil**

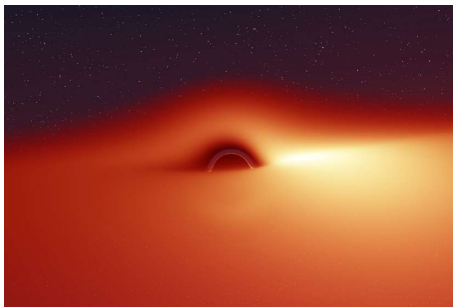
Tests et conséquences de la gravitation universelle

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



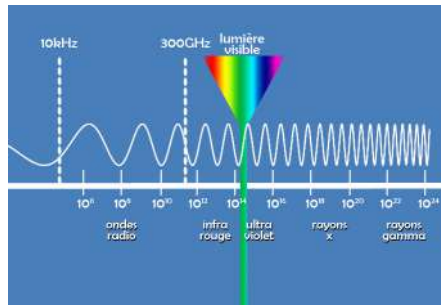
Newton : 3^{ème} loi de Kepler permet de **peser le Soleil**

II : Gravitation relativiste et singularité de Schwarzschild



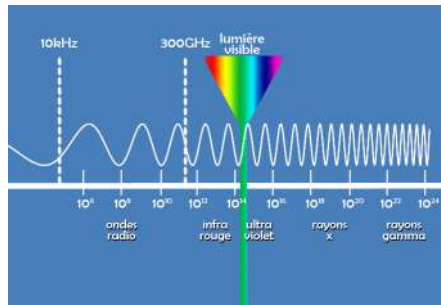
Électromagnétisme et vitesse de la lumière

- ▶ **1864, Maxwell** : théorie de l'**électromagnétisme**
 ⇒ **ondes lumineuses** = type particulier d'**ondes électromagnétiques**
- ▶ **vitesse de la lumière dépend de l'observateur** (cf. vagues depuis un navire)
- ▶ **Expériences diverses** : **invariance expérimentale de c** ...
 (exemple : **Michelson & Morley, 1887**)



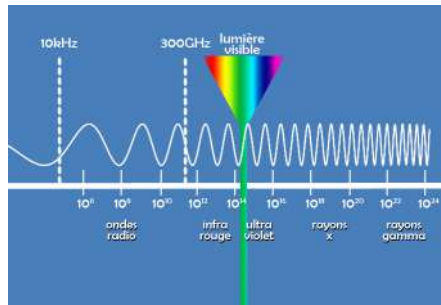
Électromagnétisme et vitesse de la lumière

- ▶ **1864, Maxwell** : théorie de l'**électromagnétisme**
 ⇒ **ondes lumineuses** = type particulier d'**ondes électromagnétiques**
- ▶ **vitesse de la lumière dépend de l'observateur** (cf. vagues depuis un navire)
- ▶ **Expériences diverses** : **invariance expérimentale de c** ...
 (exemple : **Michelson & Morley, 1887**)

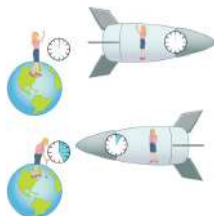
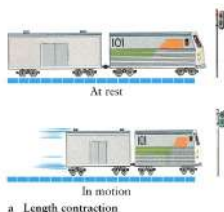


Électromagnétisme et vitesse de la lumière

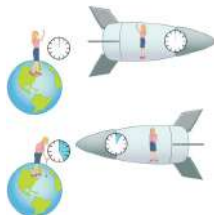
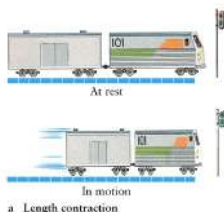
- ▶ **1864, Maxwell** : théorie de l'**électromagnétisme**
 ⇒ **ondes lumineuses** = type particulier d'**ondes électromagnétiques**
- ▶ **vitesse de la lumière dépend de l'observateur** (cf. vagues depuis un navire)
- ▶ **Expériences diverses** : **invariance expérimentale de c** ...
 (exemple : **Michelson & Morley, 1887**)



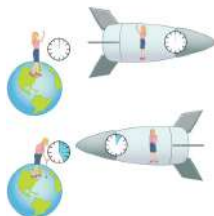
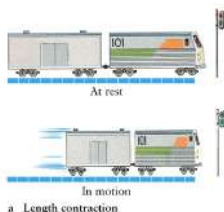
- **Lorentz, Poincaré, etc.** : besoin de revoir la **théorie de Maxwell**
 ⇒ versions modifiées et plus **compliquées** des équations newtoniennes
 (**comportement étrange** des **règles** et **horloges mobiles dans l'éther**)
- **1905, Einstein** : besoin de **modifier Newton** et non Maxwell, mais **pas d'éther**
 ⇒ nouveaux postulats sur le **temps** et l'**espace**
 ⇒ mêmes équations que Lorentz & Poincaré, mais **postulats « clairs »**
- **relativité restreinte** :
 ⇒ c est une **vitesse limite absolue/universelle** ⇒ **indépassable**
 ⇒ **durées et distances** dépendent de l'observateur (pas « **absolues** »)
 ⇒ la **masse** est l'une des formes de l'**énergie** ($E = mc^2$), etc.



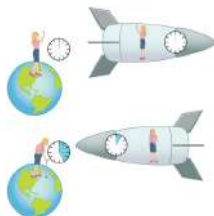
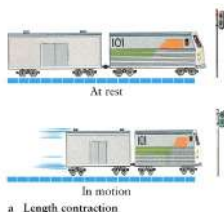
- ▶ **Lorentz, Poincaré, etc.** : besoin de revoir la **théorie de Maxwell**
 ⇒ versions modifiées et plus **compliquées** des équations newtoniennes
 (**comportement étrange** des **règles** et **horloges mobiles dans l'éther**)
- ▶ **1905, Einstein** : besoin de **modifier Newton** et non Maxwell, mais **pas d'éther**
 ⇒ nouveaux postulats sur le **temps** et l'**espace**
 ⇒ mêmes équations que Lorentz & Poincaré, mais postulats « clairs »
- ▶ **relativité restreinte** :
 ⇒ c est une **vitesse limite absolue/universelle** ⇒ **indépassable**
 ⇒ **durées** et **distances** dépendent de l'observateur (pas « absolues »)
 ⇒ la **masse** est l'une des formes de l'**énergie** ($E = mc^2$), etc.



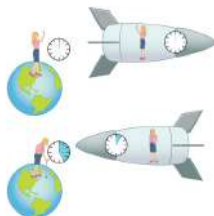
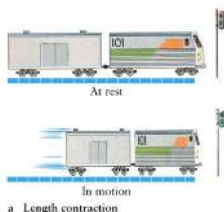
- ▶ **Lorentz, Poincaré, etc.** : besoin de revoir la **théorie de Maxwell**
 ⇒ versions modifiées et plus **compliquées** des équations newtoniennes
 (**comportement étrange** des **règles** et **horloges mobiles dans l'éther**)
- ▶ **1905, Einstein** : besoin de **modifier Newton** et non Maxwell, mais **pas d'éther**
 ⇒ nouveaux postulats sur le **temps** et l'**espace**
 ⇒ mêmes équations que Lorentz & Poincaré, mais postulats « clairs »
- ▶ **relativité restreinte** :
 ⇒ c est une **vitesse limite absolue/universelle** ⇒ **indépassable**
 ⇒ **durées et distances** dépendent de l'observateur (pas « absolues »)
 ⇒ la **masse** est l'une des formes de l'**énergie** ($E = mc^2$), etc.



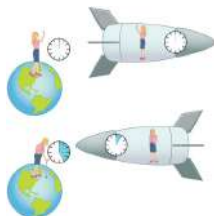
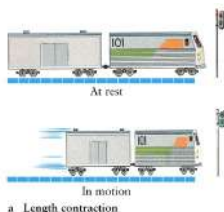
- ▶ **Lorentz, Poincaré, etc.** : besoin de revoir la **théorie de Maxwell**
 ⇒ versions modifiées et plus **compliquées** des équations newtoniennes
 (**comportement étrange** des **règles** et **horloges mobiles dans l'éther**)
- ▶ **1905, Einstein** : besoin de **modifier Newton** et non Maxwell, mais **pas d'éther**
 ⇒ nouveaux postulats sur le **temps** et l'**espace**
 ⇒ mêmes équations que Lorentz & Poincaré, mais **postulats « clairs »**
- ▶ **relativité restreinte** :
 ⇒ c est une **vitesse limite absolue/universelle** ⇒ **indépassable**
 ⇒ **durées et distances** dépendent de l'observateur (pas « **absolues** »)
 ⇒ la **masse** est l'une des formes de l'**énergie** ($E = mc^2$), etc.



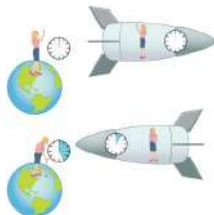
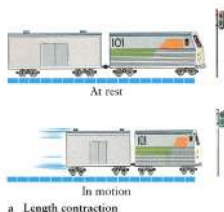
- ▶ **Lorentz, Poincaré, etc.** : besoin de revoir la **théorie de Maxwell**
 ⇒ versions modifiées et plus **compliquées** des équations newtoniennes
 (**comportement étrange** des **règles** et **horloges mobiles dans l'éther**)
- ▶ **1905, Einstein** : besoin de **modifier Newton** et non Maxwell, mais **pas d'éther**
 ⇒ nouveaux postulats sur le **temps** et l'**espace**
 ⇒ mêmes équations que Lorentz & Poincaré, mais **postulats « clairs »**
- ▶ **relativité restreinte** :
 ⇒ c est une **vitesse limite absolue/universelle** ⇒ **indépassable**
 ⇒ **durées et distances** dépendent de l'observateur (pas « **absolues** »)
 ⇒ la **masse** est l'une des formes de l'**énergie** ($E = mc^2$), etc.



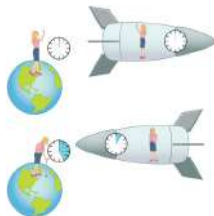
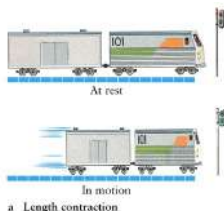
- ▶ **Lorentz, Poincaré, etc.** : besoin de revoir la **théorie de Maxwell**
 ⇒ versions modifiées et plus **compliquées** des équations newtoniennes
 (**comportement étrange** des **règles** et **horloges mobiles dans l'éther**)
- ▶ **1905, Einstein** : besoin de **modifier Newton** et non Maxwell, mais **pas d'éther**
 ⇒ nouveaux postulats sur le **temps** et l'**espace**
 ⇒ mêmes équations que Lorentz & Poincaré, mais **postulats « clairs »**
- ▶ **relativité restreinte** :
 ⇒ c est une **vitesse limite absolue/universelle** ⇒ **indépassable**
 ⇒ **durées et distances** dépendent de l'observateur (pas « **absolues** »)
 ⇒ la **masse** est l'une des formes de l'**énergie** ($E = mc^2$), etc.



- ▶ **Lorentz, Poincaré, etc.** : besoin de revoir la **théorie de Maxwell**
 - ⇒ versions modifiées et plus **compliquées** des équations newtoniennes (**comportement étrange** des **règles** et **horloges mobiles dans l'éther**)
- ▶ **1905, Einstein** : besoin de **modifier Newton** et non Maxwell, mais **pas d'éther**
 - ⇒ nouveaux postulats sur le **temps** et l'**espace**
 - ⇒ mêmes équations que Lorentz & Poincaré, mais **postulats « clairs »**
- ▶ **relativité restreinte** :
 - ⇒ c est une **vitesse limite absolue/universelle** ⇒ **indépassable**
 - ⇒ **durées et distances** dépendent de l'observateur (pas « **absolues** »)
 - ⇒ la **masse** est l'une des formes de l'**énergie** ($E = mc^2$), etc.



- ▶ **Lorentz, Poincaré, etc.** : besoin de revoir la **théorie de Maxwell**
 - ⇒ versions modifiées et plus **compliquées** des équations newtoniennes (**comportement étrange** des **règles** et **horloges mobiles dans l'éther**)
- ▶ **1905, Einstein** : besoin de **modifier Newton** et non Maxwell, mais **pas d'éther**
 - ⇒ nouveaux postulats sur le **temps** et l'**espace**
 - ⇒ mêmes équations que Lorentz & Poincaré, mais **postulats « clairs »**
- ▶ **relativité restreinte** :
 - ⇒ c est une **vitesse limite absolue/universelle** ⇒ **indépassable**
 - ⇒ **durées** et **distances** **dépendent de l'observateur** (pas « **absolues** »)
 - ⇒ la **masse** est l'une des formes de l'**énergie** ($E = mc^2$), etc.



1908, Minkowski : cadre naturel de la **relativité restreinte** = **espace-temps**

1908, Minkowski : cadre naturel de la **relativité restreinte** = **espace-temps**

⇒ il n'existe pas un **espace** et un **temps** **absolus** et **indépendants**
mais un **espace-temps absolu** (identique pour tous)

1908, Minkowski : cadre naturel de la **relativité restreinte** = **espace-temps**

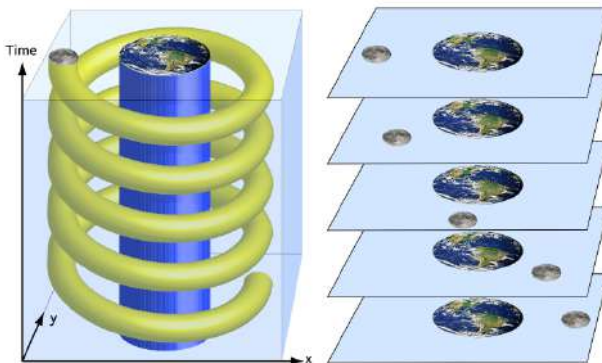
⇒ il n'existe pas un **espace** et un **temps absolus** et **indépendants**
mais un **espace-temps absolu** (identique pour tous)

relativité restreinte = **théorie géométrique de l'espace-temps** (**4 dimensions**)

1908, Minkowski : cadre naturel de la **relativité restreinte** = **espace-temps**

⇒ il n'existe pas un **espace** et un **temps** **absolus** et **indépendants**
mais un **espace-temps absolu** (identique pour tous)

relativité restreinte = **théorie géométrique de l'espace-temps** (**4 dimensions**)



espace-temps avec **2 dimensions spatiales**
(**gauche** : point de vue minkowskien ; **droite** : point de vue newtonien)

Einstein et la gravitation relativiste (1907-1915)

- ▶ besoin de modifier la théorie de la gravitation de Newton pour $vitesse \leq c$
 $\implies$ **relativité générale** (équations publiées en 1915)
- ▶ explication de l'universalité des comportements gravitationnels :
 gravitation $\sim$ manifestation de la **géométrie** de l'espace (et du temps!)
- ▶ **espace-temps** $\sim$ milieu **élastique** qui est **déformée/courbé**
- ▶ équations d'Einstein :

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}}_{\text{« géométrie de l'espace-temps »}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}}_{\text{« flux spatio-temporels d'énergie »}}$$

$\implies$ pas de « force gravitationnelle » :

orbite = « ligne droite » dans un **espace-courbe**

Einstein et la gravitation relativiste (1907-1915)

- ▶ besoin de modifier la théorie de la gravitation de Newton pour $vitesse \leq c$
 $\implies$ **relativité générale** (équations publiées en 1915)
- ▶ **explication de l'universalité des comportements gravitationnels** :
 gravitation $\sim$ manifestation de la **géométrie** de l'espace (et du temps!)
- ▶ **espace-temps** $\sim$ milieu **élastique** qui est **déformée/courbé**
- ▶ **équations d'Einstein** :

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}}_{\text{« géométrie de l'espace-temps »}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}}_{\text{« flux spatio-temporels d'énergie »}}$$

$\implies$ pas de « force gravitationnelle » :

orbite = « ligne droite » dans un espace-courbe

Einstein et la gravitation relativiste (1907-1915)

- ▶ besoin de modifier la théorie de la gravitation de Newton pour $vitesse \leq c$
 $\implies$ **relativité générale** (équations publiées en 1915)
- ▶ **explication de l'universalité des comportements gravitationnels** :
 gravitation $\sim$ manifestation de la **géométrie** de l'espace (et du temps!)
- ▶ **espace-temps** $\sim$ milieu **élastique** qui est **déformée/courbé**
- ▶ **équations d'Einstein** :

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}}_{\text{« géométrie de l'espace-temps »}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}}_{\text{« flux spatio-temporels d'énergie »}}$$

$\implies$ pas de « force gravitationnelle » :

orbite = « ligne droite » dans un espace-courbe

Einstein et la gravitation relativiste (1907-1915)

- ▶ besoin de modifier la théorie de la gravitation de Newton pour $vitesse \leq c$
 $\implies$ **relativité générale** (équations publiées en 1915)
- ▶ **explication de l'universalité des comportements gravitationnels** :
 gravitation $\sim$ manifestation de la **géométrie** de l'espace (et du temps!)
- ▶ **espace-temps** $\sim$ milieu **élastique** qui est **déformée/courbé**
- ▶ **équations d'Einstein** :

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}}_{\text{« géométrie de l'espace-temps »}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}}_{\text{« flux spatio-temporels d'énergie »}}$$

$\implies$ pas de « force gravitationnelle » :

orbite = « ligne droite » dans un espace-courbe

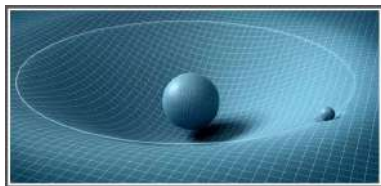
Einstein et la gravitation relativiste (1907-1915)

- ▶ besoin de modifier la théorie de la gravitation de Newton pour $vitesse \leq c$
 $\implies$ **relativité générale** (équations publiées en 1915)
- ▶ explication de l'universalité des comportements gravitationnels :
 gravitation $\sim$ manifestation de la **géométrie** de l'espace (et du temps!)
- ▶ **espace-temps** $\sim$ milieu **élastique** qui est **déformée/courbé**
- ▶ **équations d'Einstein** :

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}}_{\text{« géométrie de l'espace-temps »}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}}_{\text{« flux spatio-temporels d'énergie »}}$$

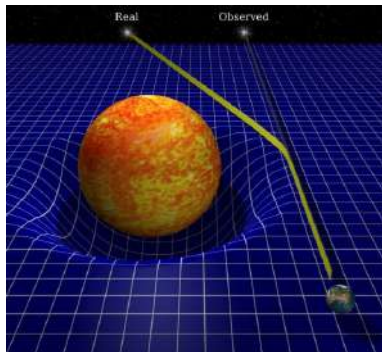
$\implies$ pas de « force gravitationnelle » :

orbite = « **ligne droite** » dans un **espace-courbe**

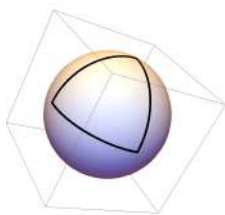


Déviations de la lumière et confirmation de la théorie

- ▶ la lumière provenant d'étoiles lointaines et passant près du Soleil est déviée
⇒ plus facile à constater pendant une **éclipse de Soleil**
- ▶ **1919, Eddington** : **vérification de la prédiction d'Einstein**
(valeur double de celle prévue par la théorie newtonienne)

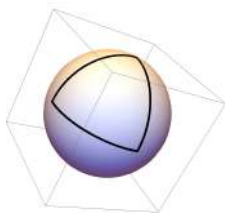


Mini-parenthèse : géométrie non-euclidienne

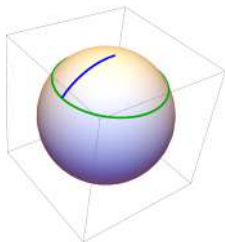


triangle tracé sur une **surface courbe** :
la somme des angles ne fait **pas 180 degrés**

Mini-parenthèse : géométrie non-euclidienne

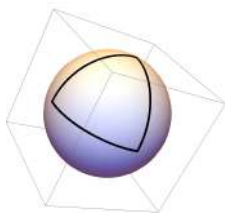


triangle tracé sur une **surface courbe** :
la somme des angles ne fait **pas 180 degrés**

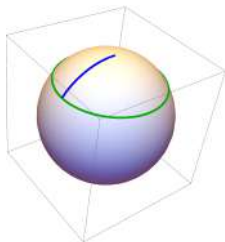


cercle tracé sur une **surface courbe** :
le rapport entre **circonférence** et **rayon** n'est **pas** 2π

Mini-parenthèse : géométrie non-euclidienne



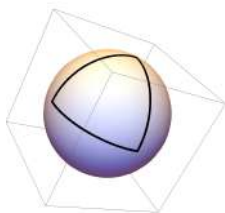
triangle tracé sur une **surface courbe** :
la somme des angles ne fait **pas 180 degrés**



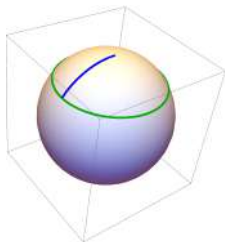
cercle tracé sur une **surface courbe** :
le rapport entre **circonférence** et **rayon** n'est **pas** 2π

⇒ **selon Einstein** : même chose, mais en 3
dimensions, pour l'espace dans lequel nous vivons

Mini-parenthèse : géométrie non-euclidienne



triangle tracé sur une **surface courbe** :
la somme des angles ne fait **pas 180 degrés**



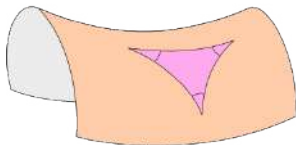
cercle tracé sur une **surface courbe** :
le rapport entre **circonférence** et **rayon** n'est **pas** 2π

$\Rightarrow$ **selon Einstein** : même chose, mais en 3
dimensions, pour l'espace dans lequel nous vivons

remarque : ici, représentation **tridimensionnelle** d'un espace **bidimensionnel**
(une surface) dont la courbure est **intrinsèque**

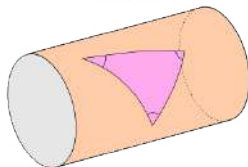
Mini-parenthèse : courbures extrinsèque et intrinsèque

Triangle angles add up to
less than 180°



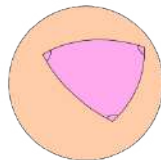
Negative Curvature

Triangle angles add up to
exactly 180°



Zero Curvature

Triangle angles add up to
more than 180°

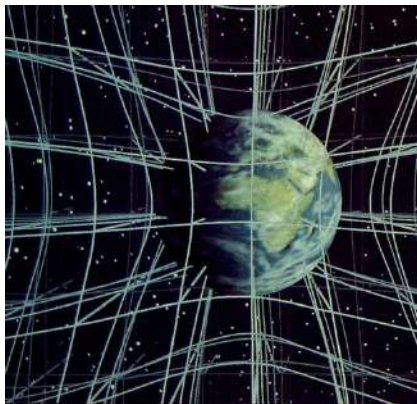


Positive Curvature

un **cylindre** est une surface **intrinsèquement plate** (= de courbure nulle) même si, visualisée comme **incluse** dans l'espace tridimensionnel, elle semble courbe :
il s'agit d'une **courbure extrinsèque**

Courbure spatio-temporelle

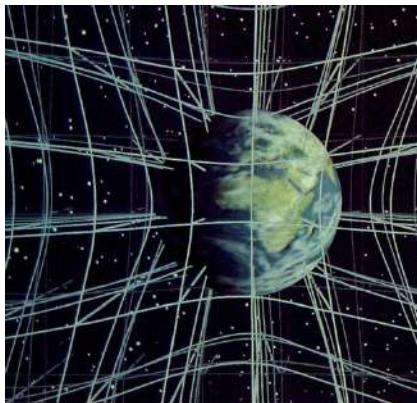
vosre tête vieillit plus vite que vos pieds (crucial pour le **GPS**)



représentation 3d schématique de la courbure temporelle provoquée par la Terre

Courbure spatio-temporelle

vosre tête vieillit plus vite que vos pieds (crucial pour le **GPS**)
⇒ le temps est une **grandeur physique locale**



représentation 3d schématique de la courbure temporelle provoquée par la Terre

Matière, masse, gravitation et énergie

Résumé partiel :

- ▶ **Newton, 1687** : matière $\sim$ masse
- ▶ **Einstein, 1905** : masse = une des formes de l'énergie ($E = mc^2$)
 $\implies$ possibilité de masse sans matière (exemple : rayonnements)
- ▶ **Einstein, 1915** : énergie = source de la gravitation

 $\implies$ « la gravitation gravite » (espace vide mais courbe possède une énergie)
 $\implies$ masse = une des manifestations possibles de la courbure
 $\implies$ possibilité de masse géométrique (sans matière)

Matière, masse, gravitation et énergie

Résumé partiel :

- ▶ **Newton, 1687** : **matière** $\sim$ **masse** (= source de la **gravitation**, avec existence d'une **énergie d'interaction gravitationnelle**)
- ▶ **Einstein, 1905** : **masse** = une des formes de l'**énergie** ($E = mc^2$)
 $\implies$ possibilité de **masse sans matière** (exemple : rayonnements)
- ▶ **Einstein, 1915** : **énergie** = source de la **gravitation**
 $\implies$ « la gravitation gravite » (**espace vide** mais courbe possède une **énergie**)
 $\implies$ **masse** = une des manifestations possibles de la **courbure**
 $\implies$ possibilité de **masse géométrique** (**sans matière**)

Matière, masse, gravitation et énergie

Résumé partiel :

- ▶ **Newton, 1687** : **matière** $\sim$ **masse** (= source de la **gravitation**, avec existence d'une **énergie d'interaction gravitationnelle**)
- ▶ **Einstein, 1905** : **masse** = une des formes de l'**énergie** ($E = mc^2$)
 $\implies$ possibilité de **masse sans matière** (exemple : rayonnements)
- ▶ **Einstein, 1915** : **énergie** = source de la **gravitation**
 $\implies$ « la gravitation gravite » (**espace vide** mais courbe possède une **énergie**)
 $\implies$ **masse** = une des manifestations possibles de la **courbure**
 $\implies$ possibilité de **masse géométrique** (**sans matière**)

Matière, masse, gravitation et énergie

Résumé partiel :

- ▶ **Newton, 1687** : **matière** $\sim$ **masse** (= source de la **gravitation**, avec existence d'une **énergie d'interaction gravitationnelle**)
- ▶ **Einstein, 1905** : **masse** = une des formes de l'**énergie** ($E = mc^2$)
 $\implies$ possibilité de **masse sans matière** (exemple : rayonnements)
- ▶ **Einstein, 1915** : **énergie** = source de la **gravitation**
 $\implies$ « la gravitation gravite » (**espace vide** mais courbe possède une **énergie**)
 $\implies$ **masse** = une des manifestations possibles de la **courbure**
 $\implies$ possibilité de **masse géométrique** (**sans matière**)

Matière, masse, gravitation et énergie

Résumé partiel :

- ▶ **Newton, 1687** : **matière** $\sim$ **masse** (= source de la **gravitation**, avec existence d'une **énergie d'interaction gravitationnelle**)
- ▶ **Einstein, 1905** : **masse** = une des formes de l'**énergie** ($E = mc^2$)
 $\implies$ possibilité de **masse sans matière** (exemple : rayonnements)
- ▶ **Einstein, 1915** : **énergie** = source de la **gravitation**
 $\implies$ « la gravitation gravite » (**espace vide** mais courbe possède une **énergie**)
 $\implies$ **masse** = une des manifestations possibles de la **courbure**
 $\implies$ possibilité de **masse géométrique** (**sans matière**)

Matière, masse, gravitation et énergie

Résumé partiel :

- ▶ **Newton, 1687** : matière $\sim$ masse (= source de la gravitation, avec existence d'une énergie d'interaction gravitationnelle)
- ▶ **Einstein, 1905** : masse = une des formes de l'énergie ($E = mc^2$)
 $\implies$ possibilité de masse sans matière (exemple : rayonnements)
- ▶ **Einstein, 1915** : énergie = source de la gravitation (= courbure spatio-temporelle) et courbure $\sim$ énergie gravitationnelle
 $\implies$ « la gravitation gravite » (espace vide mais courbe possède une énergie)
 $\implies$ masse = une des manifestations possibles de la courbure
 $\implies$ possibilité de masse géométrique (sans matière)

Matière, masse, gravitation et énergie

Résumé partiel :

- ▶ **Newton, 1687** : matière $\sim$ masse (= source de la gravitation, avec existence d'une énergie d'interaction gravitationnelle)
- ▶ **Einstein, 1905** : masse = une des formes de l'énergie ($E = mc^2$)
 $\implies$ possibilité de masse sans matière (exemple : rayonnements)
- ▶ **Einstein, 1915** : énergie = source de la gravitation (= courbure spatio-temporelle) et courbure $\sim$ énergie gravitationnelle
 $\implies$ « la gravitation gravite » (espace vide mais courbe possède une énergie)
 $\implies$ masse = une des manifestations possibles de la courbure
 $\implies$ possibilité de masse géométrique (sans matière)

Matière, masse, gravitation et énergie

Résumé partiel :

- ▶ **Newton, 1687** : matière $\sim$ masse (= source de la gravitation, avec existence d'une énergie d'interaction gravitationnelle)
- ▶ **Einstein, 1905** : masse = une des formes de l'énergie ($E = mc^2$)
 $\implies$ possibilité de masse sans matière (exemple : rayonnements)
- ▶ **Einstein, 1915** : énergie = source de la gravitation (= courbure spatio-temporelle) et courbure $\sim$ énergie gravitationnelle
 $\implies$ « la gravitation gravite » (espace vide mais courbe possède une énergie)
 $\implies$ masse = une des manifestations possibles de la courbure
 $\implies$ possibilité de masse géométrique (sans matière)

Matière, masse, gravitation et énergie

Résumé partiel :

- ▶ **Newton, 1687** : **matière** $\sim$ **masse** (= source de la **gravitation**, avec existence d'une **énergie d'interaction gravitationnelle**)
- ▶ **Einstein, 1905** : **masse** = une des formes de l'**énergie** ($E = mc^2$)
 $\implies$ possibilité de **masse sans matière** (exemple : rayonnements)
- ▶ **Einstein, 1915** : **énergie** = source de la **gravitation** (= **courbure spatio-temporelle**) **et** **courbure** $\sim$ **énergie gravitationnelle**
 $\implies$ « la gravitation gravite » (**espace vide** mais courbe possède une **énergie**)
 $\implies$ **masse** = une des manifestations possibles de la **courbure**
 $\implies$ possibilité de **masse géométrique** (**sans matière**)

Solution de Schwarzschild et singularités

- ▶ **1916, Schwarzschild** : **solution** des équations d'Einstein pour une **masse sphérique** (2 semaines après leur publication ; résultat obtenu sur le front)
- ▶ pour **masse M fixée**, termes **infinis** (= **singularités**) dans la solution si rayon R plus petit que le « **rayon de Schwarzschild R_S** »
 $\implies$ situées en $r = 0$ (cf. masse newtonienne **ponctuelle**) et en $r = R_S$
- ▶ **R_S proportionnel à M** et égal au rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- ▶ longues discussions concernant le **sens physique** du phénomène et sa pertinence dans le monde réel...
- ▶ semble d'abord **irréaliste** :
 $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 3 \text{ km} \implies$ très différent du rayon des étoiles observées (Soleil : $R_\odot \sim 750\,000 \text{ km}$)
- ▶ autre 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 pour une **masse sphérique** (2 semaines après leur publication ; résultat obtenu sur le front)
- ▶ pour **masse M fixée**, termes **infinis** (= **singularités**) dans la solution si rayon R plus petit que le « **rayon de Schwarzschild R_S** »
 ⇒ situées en $r = 0$ (cf. masse newtonienne **ponctuelle**) et en $r = R_S$
- ▶ R_S **proportionnel à M** et égal au rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- ▶ longues discussions concernant le **sens physique** du phénomène et sa pertinence dans le monde réel...
- ▶ semble d'abord **irréaliste** :
 $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 3 \text{ km} \Rightarrow$ très différent du rayon des étoiles observées (Soleil : $R_\odot \sim 750\,000 \text{ km}$)
- ▶ autre 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 pour une **masse sphérique** (2 semaines après leur publication ; résultat obtenu sur le front)
- ▶ pour **masse M fixée**, termes **infinis** (= **singularités**) dans la solution si rayon R plus petit que le « **rayon de Schwarzschild R_S** »
 $\implies$ situées en $r = 0$ (cf. masse newtonienne **ponctuelle**) et en $r = R_S$
- ▶ R_S **proportionnel à M** et égal au rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- ▶ longues discussions concernant le **sens physique** du phénomène et sa pertinence dans le monde réel...
- ▶ semble d'abord **irréaliste** :
 $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 3 \text{ km} \implies$ très différent du rayon des étoiles observées (Soleil : $R_\odot \sim 750\,000 \text{ km}$)
- ▶ autre 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 pour une **masse sphérique** (2 semaines après leur publication ; résultat obtenu sur le front)
- ▶ pour **masse M fixée**, termes **infinis** (= **singularités**) dans la solution si rayon R plus petit que le « **rayon de Schwarzschild R_S** »
 $\implies$ situées en $r = 0$ (cf. masse newtonienne **ponctuelle**) et en $r = R_S$
- ▶ **R_S proportionnel à M** et égal au rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- ▶ longues discussions concernant le **sens physique** du phénomène et sa pertinence dans le monde réel...
- ▶ semble d'abord **irréaliste** :
 $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 3 \text{ km} \implies$ très différent du rayon des étoiles observées (Soleil : $R_\odot \sim 750\,000 \text{ km}$)
- ▶ autre 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 pour une **masse sphérique** (2 semaines après leur publication ; résultat obtenu sur le front)
- ▶ pour **masse M fixée**, termes **infinis** (= **singularités**) dans la solution si rayon R plus petit que le « **rayon de Schwarzschild R_S** »
 $\implies$ situées en $r = 0$ (cf. masse newtonienne **ponctuelle**) et en $r = R_S$
- ▶ **R_S proportionnel à M** et égal au rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- ▶ longues discussions concernant le **sens physique** du phénomène et sa pertinence dans le monde réel...
- ▶ semble d'abord **irréaliste** :
 $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 3 \text{ km} \implies$ très différent du rayon des étoiles observées
 (Soleil : $R_\odot \sim 750\,000 \text{ km}$)
- ▶ autre 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 pour une **masse sphérique** (2 semaines après leur publication ; résultat obtenu sur le front)
- ▶ pour **masse M fixée**, termes **infinis** (= **singularités**) dans la solution si rayon R plus petit que le « **rayon de Schwarzschild R_S** »
 $\implies$ situées en $r = 0$ (cf. masse newtonienne **ponctuelle**) et en $r = R_S$
- ▶ **R_S proportionnel à M** et égal au rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- ▶ longues discussions concernant le **sens physique** du phénomène et sa pertinence dans le monde réel...
- ▶ semble d'abord **irréaliste** :
 $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 3 \text{ km} \implies$ très différent du rayon des étoiles observées
 (Soleil : $R_\odot \sim 750\,000 \text{ km}$)
- ▶ autre 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*)

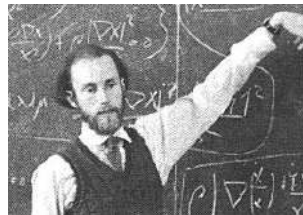
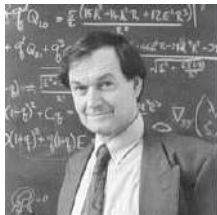
Solution de Schwarzschild et singularités

- ▶ **1916, Schwarzschild** : solution des équations d'Einstein pour une **masse sphérique** (2 semaines après leur publication ; résultat obtenu sur le front)
- ▶ pour **masse M fixée**, termes **infinis** (= **singularités**) dans la solution si rayon R plus petit que le « **rayon de Schwarzschild R_S** »
 $\implies$ situées en $r = 0$ (cf. masse newtonienne **ponctuelle**) et en $r = R_S$
- ▶ **R_S proportionnel à M** et égal au rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- ▶ longues discussions concernant le **sens physique** du phénomène et sa pertinence dans le monde réel...
- ▶ semble d'abord **irréaliste** :
 $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 3 \text{ km} \implies$ très différent du rayon des étoiles observées
 (Soleil : $R_\odot \sim 750\,000 \text{ km}$)
- ▶ autre 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 pour une **masse sphérique** (2 semaines après leur publication ; résultat obtenu sur le front)
- ▶ pour **masse M fixée**, termes **infinis** (= **singularités**) dans la solution si rayon R plus petit que le « **rayon de Schwarzschild R_S** »
 $\implies$ situées en $r = 0$ (cf. masse newtonienne **ponctuelle**) et en $r = R_S$
- ▶ **R_S proportionnel à M** et égal au rayon pour lequel $v_{\text{lib}} = c$ en physique newtonienne !
- ▶ longues discussions concernant le **sens physique** du phénomène et sa pertinence dans le monde réel...
- ▶ semble d'abord **irréaliste** :
 $R_S \approx \frac{M}{M_\odot} \times 3 \text{ km} \implies$ très différent du rayon des étoiles observées
 (Soleil : $R_\odot \sim 750\,000 \text{ km}$)
- ▶ autre 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*)

III : Âge d'or des trous noirs et principales propriétés



Mini-parenthèse historique : origine du nom

- ▶ **fin 1967** : expression **trou noir** « officialisée »
- ▶ en général attribuée à **Wheeler** qui l'a popularisée, mais apparemment rencontrée dès 1963
- ▶ possible référence au « **Trou Noir de Calcutta** », salle dans laquelle des soldats britanniques furent entassés par l'armée bengali en 1756

Mini-parenthèse historique : origine du nom

- ▶ **fin 1967** : expression **trou noir** « officialisée »
- ▶ en général attribuée à **Wheeler** qui l'a popularisée, mais apparemment rencontrée dès 1963
- ▶ possible référence au « **Trou Noir de Calcutta** », salle dans laquelle des soldats britanniques furent entassés par l'armée bengali en 1756

Mini-parenthèse historique : origine du nom

- ▶ **fin 1967** : expression **trou noir** « officialisée »
- ▶ en général attribuée à **Wheeler** qui l'a popularisée, mais apparemment rencontrée dès 1963
- ▶ possible référence au « **Trou Noir de Calcutta** », salle dans laquelle des soldats britanniques furent entassés par l'armée bengali en 1756



Trous noirs classiques

- ▶ **1958, Finkelstein** : trou noir = région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir (même pas la lumière)
- ▶ frontière = horizon du TN (sphère de rayon $R_S \implies \text{surface} = 4\pi R_S^2$)
(cf. rayon et singularité de Schwarzschild)
 $\implies$ surface proportionnelle au carré de la masse
 $\implies$ mais pas besoin de matière (trou noir peut être fait de vide)
- ▶ action gravitationnelle liée à masse et distance $\implies$ pas un aspirateur !
- ▶ **1965-1970, Hawking & Penrose** : singularité interne (en $r = 0$) inévitable, mais $r = 0$ est une « date », pas un « lieu » ($\sim$ espace interne « déchiré »)
 $\implies$ besoin d'une description quantique de la gravité (question ouverte)

Trous noirs classiques

- ▶ **1958, Finkelstein** : trou noir = région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir (même pas la lumière)
- ▶ frontière = horizon du TN (sphère de rayon $R_S \implies \text{surface} = 4\pi R_S^2$)
(cf. rayon et singularité de Schwarzschild)
 - $\implies$ surface proportionnelle au carré de la masse
 - $\implies$ mais pas besoin de matière (trou noir peut être fait de vide)
- ▶ action gravitationnelle liée à masse et distance $\implies$ pas un aspirateur !
- ▶ **1965-1970, Hawking & Penrose** : singularité interne (en $r = 0$) inévitable, mais $r = 0$ est une « date », pas un « lieu » ($\sim$ espace interne « déchiré »)
 $\implies$ besoin d'une description quantique de la gravité (question ouverte)

Trous noirs classiques

- ▶ **1958, Finkelstein** : trou noir = région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir (même pas la lumière)
- ▶ frontière = horizon du TN (sphère de rayon $R_S \implies \text{surface} = 4\pi R_S^2$)
(cf. rayon et singularité de Schwarzschild)
 $\implies$ **surface proportionnelle au carré de la masse**
 $\implies$ mais pas besoin de matière (trou noir peut être fait de vide)
- ▶ **action gravitationnelle** liée à masse et distance $\implies$ pas un aspirateur !
- ▶ **1965-1970, Hawking & Penrose** : singularité interne (en $r = 0$) inévitable, mais $r = 0$ est une « date », pas un « lieu » ($\sim$ espace interne « déchiré »)
 $\implies$ besoin d'une description quantique de la gravité (question ouverte)

Trous noirs classiques

- ▶ **1958, Finkelstein** : trou noir = région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir (même pas la lumière)
- ▶ frontière = horizon du TN (sphère de rayon $R_S \implies \text{surface} = 4\pi R_S^2$)
(cf. rayon et singularité de Schwarzschild)
 $\implies$ **surface proportionnelle au carré de la masse**
 $\implies$ mais pas besoin de matière (trou noir peut être fait de vide)
- ▶ **action gravitationnelle** liée à masse et distance $\implies$ pas un aspirateur !
- ▶ **1965-1970, Hawking & Penrose** : singularité interne (en $r = 0$) inévitable, mais $r = 0$ est une « date », pas un « lieu » ($\sim$ espace interne « déchiré »)
 $\implies$ besoin d'une description quantique de la gravité (question ouverte)

Trous noirs classiques

- ▶ **1958, Finkelstein** : trou noir = région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir (même pas la lumière)
- ▶ frontière = horizon du TN (sphère de rayon $R_S \implies \text{surface} = 4\pi R_S^2$)
(cf. rayon et singularité de Schwarzschild)
 $\implies$ surface proportionnelle au carré de la masse
 $\implies$ mais pas besoin de matière (trou noir peut être fait de vide)
- ▶ **action gravitationnelle** liée à masse et distance $\implies$ pas un aspirateur !
- ▶ **1965-1970, Hawking & Penrose** : singularité interne (en $r = 0$) inévitable, mais $r = 0$ est une « date », pas un « lieu » ($\sim$ espace interne « déchiré »)
 $\implies$ besoin d'une description quantique de la gravité (question ouverte)

Trous noirs classiques

- ▶ **1958, Finkelstein** : trou noir = région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir (même pas la lumière)
- ▶ frontière = horizon du TN (sphère de rayon $R_S \implies \text{surface} = 4\pi R_S^2$)
(cf. rayon et singularité de Schwarzschild)
 $\implies$ **surface proportionnelle au carré de la masse**
 $\implies$ mais pas besoin de matière (trou noir peut être fait de vide)
- ▶ **action gravitationnelle** liée à masse et distance $\implies$ pas un aspirateur !
- ▶ **1965-1970, Hawking & Penrose** : singularité interne (en $r = 0$) inévitable, mais $r = 0$ est une « date », pas un « lieu » ($\sim$ espace interne « déchiré »)
 $\implies$ besoin d'une description quantique de la gravité (question ouverte)

Trous noirs classiques

- ▶ **1958, Finkelstein** : trou noir = région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir (même pas la lumière)
- ▶ frontière = horizon du TN (sphère de rayon $R_S \implies \text{surface} = 4\pi R_S^2$)
(cf. rayon et singularité de Schwarzschild)
 $\implies$ **surface proportionnelle au carré de la masse**
 $\implies$ mais **pas besoin de matière** (trou noir peut être fait de **vide**)
- ▶ **action gravitationnelle** liée à masse et distance $\implies$ **pas un aspirateur !**
- ▶ **1965-1970, Hawking & Penrose** : **singularité interne** (en $r = 0$) inévitable, mais $r = 0$ est une « date », pas un « lieu » ($\sim$ **espace interne** « déchiré »)
 $\implies$ besoin d'une **description quantique de la gravité** (**question ouverte**)

Observations (extérieur) :

- ▶ espace-temps **très courbe** : **mirages gravitationnels**, etc.
- ▶ **astres invisibles**, mais **effets gravitationnels** sur corps proches (cf. Michell)

Trous noirs classiques

- ▶ **1958, Finkelstein** : trou noir = région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir (même pas la lumière)
- ▶ frontière = horizon du TN (sphère de rayon $R_S \implies \text{surface} = 4\pi R_S^2$)
(cf. rayon et singularité de Schwarzschild)
 $\implies$ surface proportionnelle au carré de la masse
 $\implies$ mais pas besoin de matière (trou noir peut être fait de vide)
- ▶ **action gravitationnelle** liée à masse et distance $\implies$ pas un aspirateur !
- ▶ **1965-1970, Hawking & Penrose** : singularité interne (en $r = 0$) inévitable, mais $r = 0$ est une « date », pas un « lieu » ($\sim$ espace interne « déchiré »)
 $\implies$ besoin d'une description quantique de la gravité (question ouverte)

Observations (extérieur) :

- ▶ espace-temps très courbe : mirages gravitationnels, etc.
- ▶ astres invisibles, mais effets gravitationnels sur corps proches (cf. Michell)



Trous noirs classiques

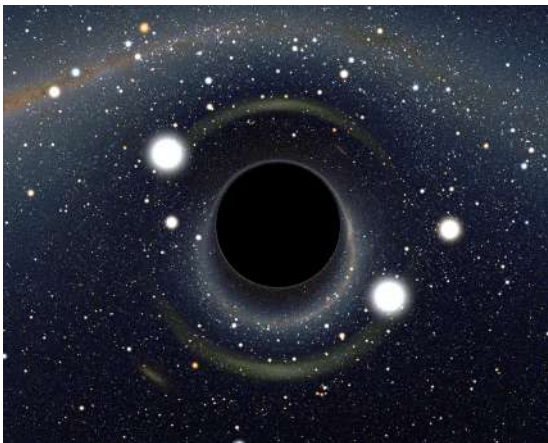
- ▶ **1958, Finkelstein** : trou noir = région de l'espace-temps dont rien ne peut sortir (même pas la lumière)
- ▶ frontière = horizon du TN (sphère de rayon $R_S \implies \text{surface} = 4\pi R_S^2$)
(cf. rayon et singularité de Schwarzschild)
 $\implies$ **surface proportionnelle au carré de la masse**
 $\implies$ mais **pas besoin de matière** (trou noir peut être fait de **vide**)
- ▶ **action gravitationnelle** liée à masse et distance $\implies$ **pas un aspirateur !**
- ▶ **1965-1970, Hawking & Penrose** : **singularité interne** (en $r = 0$) inévitable, mais $r = 0$ est une « date », pas un « lieu » ($\sim$ **espace interne** « déchiré »)
 $\implies$ besoin d'une **description quantique de la gravité** (**question ouverte**)

Observations (extérieur) :

- ▶ espace-temps **très courbe** : **mirages gravitationnels**, etc.
- ▶ **astres invisibles**, mais **effets gravitationnels** sur corps proches (cf. Michell)



Vue rapprochée d'un horizon



(simulation numérique par A. Riazuelo, IAP)

Mini-parenthèse : singularité ($r = R_S$) et représentations

- **Projection de Mercator** : comportement singulier près des pôles car coordonnées pas adaptées
- description de Schwarzschild d'un trou noir : même chose près de l'horizon (cf. infini et « inversion espace et temps » interne)



Mini-parenthèse : singularité ($r = R_S$) et représentations

- **Projection de Mercator** : comportement singulier près des pôles car coordonnées pas adaptées
- **description de Schwarzschild d'un trou noir** : même chose près de l'horizon (cf. infini et « inversion espace et temps » interne)



Mini-parenthèse : singularité ($r = R_S$) et représentations

- **Projection de Mercator** : comportement singulier près des pôles car coordonnées pas adaptées
- **description de Schwarzschild d'un trou noir** : même chose près de l'horizon (cf. infini et « inversion espace et temps » interne)



remarque : problème en partie lié au fait de représenter une surface **intrinsèquement courbe** (la Terre) sur une surface **plate** (la feuille)

Horizon : propriétés

- ▶ **pas une surface matérielle**, mais une **frontière invisible**
- ▶ **espace-temps courbe** : R_S n'est **pas** la distance centre-**horizon**
- ▶ **accélération infinie** pour rester **au repos** « sur l'horizon » $\implies$ **impossible**
- ▶ **décalage infini** entre **temps local** et « **temps lointain** »
 - $\implies$ **matière en chute libre** et **temps** semblent **gelés**, **vus de loin**
 - $\implies$ observateur éloigné : elle **ne franchit pas l'horizon**, mais devient **invisible**

Horizon : propriétés

- ▶ pas une surface matérielle, mais une **frontière invisible**
- ▶ espace-temps courbe : R_S n'est pas la distance centre-horizon
- ▶ accélération infinie pour rester au repos « sur l'horizon » $\Rightarrow$ impossible
- ▶ décalage infini entre temps local et « temps lointain »
 - $\Rightarrow$ matière en chute libre et temps semblent gelés, vus de loin
 - $\Rightarrow$ observateur éloigné : elle ne franchit pas l'horizon, mais devient invisible

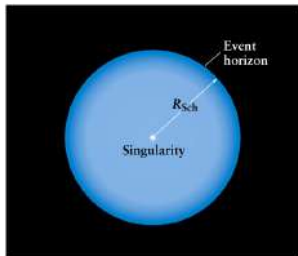


illustration incorrecte courante d'un trou noir de Schwarzschild

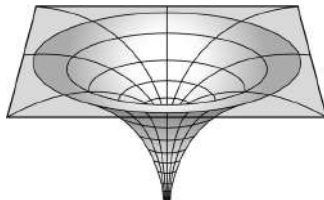


illustration en 2d du caractère non-euclidien de la géométrie (partiellement incorrecte)

Horizon : propriétés

- ▶ **pas une surface matérielle**, mais une **frontière invisible**
- ▶ **espace-temps courbe** : R_S n'est **pas** la distance centre-**horizon**
- ▶ **accélération infinie** pour rester **au repos** « sur l'horizon » $\Rightarrow$ **impossible**
- ▶ **décalage infini** entre **temps local** et « **temps lointain** »
 - $\Rightarrow$ **matière en chute libre** et **temps** semblent **gelés**, **vus de loin**
 - $\Rightarrow$ observateur éloigné : elle **ne franchit pas l'horizon**, mais devient **invisible**

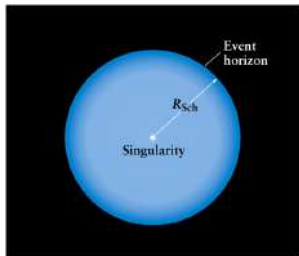


illustration incorrecte courante d'un **trou noir de Schwarzschild**

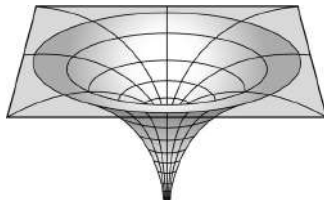


illustration en 2d du caractère **non-euclidien** de la géométrie (**partiellement incorrecte**)

Horizon : propriétés

- ▶ **pas une surface matérielle**, mais une **frontière invisible**
- ▶ **espace-temps courbe** : R_S n'est **pas** la distance centre-**horizon**
- ▶ **accélération infinie** pour rester **au repos** « sur l'horizon » $\Rightarrow$ **impossible**
- ▶ **décalage infini** entre **temps local** et « **temps lointain** »
 - $\Rightarrow$ **matière en chute libre** et **temps** semblent **gelés**, **vus de loin**
 - $\Rightarrow$ observateur éloigné : elle **ne franchit pas l'horizon**, mais devient **invisible**

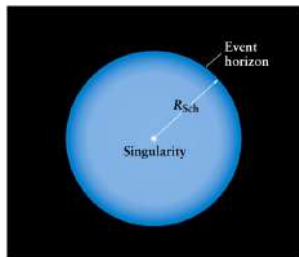


illustration incorrecte courante d'un **trou noir de Schwarzschild**

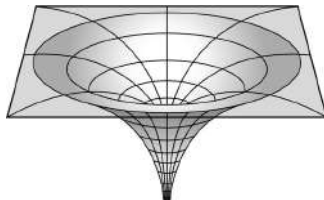


illustration en 2d du caractère **non-euclidien** de la géométrie
(**partiellement incorrecte**)

Horizon : propriétés

- ▶ pas une surface matérielle, mais une **frontière invisible**
- ▶ espace-temps courbe : R_S n'est **pas** la distance centre-horizon
- ▶ accélération infinie pour rester **au repos** « sur l'horizon » $\Rightarrow$ **impossible**
- ▶ décalage infini entre **temps local** et « **temps lointain** »
 $\Rightarrow$ **matière en chute libre** et **temps** semblent **gelés**, **vus de loin**
 $\Rightarrow$ observateur éloigné : elle **ne franchit pas l'horizon**, mais devient **invisible**

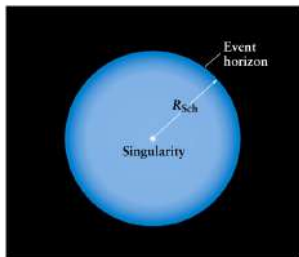


illustration incorrecte courante d'un **trou noir de Schwarzschild**

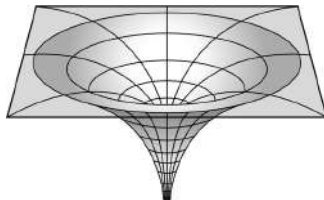


illustration en 2d du caractère **non-euclidien** de la géométrie
(**partiellement incorrecte**)

Horizon : propriétés

- ▶ **pas une surface matérielle**, mais une **frontière invisible**
- ▶ **espace-temps courbe** : R_S n'est **pas** la distance centre-**horizon**
- ▶ **accélération infinie** pour rester **au repos** « sur l'horizon » $\Rightarrow$ **impossible**
- ▶ **décalage infini** entre **temps local** et « **temps lointain** »
 - $\Rightarrow$ **matière en chute libre** et **temps** semblent **gelés**, **vus de loin**
 - $\Rightarrow$ observateur éloigné : elle **ne franchit pas l'horizon**, mais devient **invisible**

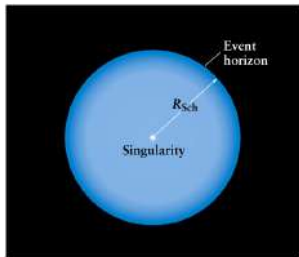


illustration incorrecte courante d'un **trou noir de Schwarzschild**

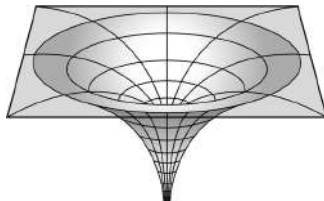


illustration en 2d du caractère **non-euclidien** de la géométrie
(**partiellement incorrecte**)

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 » où **espace et temps n'ont plus de sens** (**singularité $r = 0$**)



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 » où **espace et temps n'ont plus de sens** (**singularité $r = 0$**)



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 $\implies$ **image déformée et concentrée du reste de l'Univers** pour un **observateur « statique »**
- ▶ à l'intérieur : **courbure chaotique** et croissante $\implies$ destruction (**scénario précis inconnu !**)
- ▶ en une fraction de seconde, atteinte d'une « région » où **espace et temps n'ont plus de sens** (**singularité $r = 0$**)



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 $\implies$ **image déformée et concentrée du reste de l'Univers** pour un **observateur « statique »**
- ▶ à l'intérieur : **courbure chaotique** et croissante $\implies$ destruction (**scénario précis inconnu !**)
- ▶ en une fraction de seconde, atteinte d'une « région » où **espace et temps n'ont plus de sens** (singularité $r = 0$)



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 $\implies$ **image déformée et concentrée du reste de l'Univers** pour un **observateur « statique »**
- ▶ à l'intérieur : **courbure chaotique** et croissante $\implies$ destruction (**scénario précis inconnu !**)
- ▶ en une fraction de seconde, atteinte d'une « région » où **espace et temps n'ont plus de sens** (**singularité $r = 0$**)



Masse et « taille » des TN

- ▶ distance centre-horizon mal définie, mais circonférence $\mathcal{C}$ mesurable
 $\implies \mathcal{C} = 2\pi R_S$, avec R_S déterminé par M
- ▶ « taille » et masse reliées : pas de limites théoriques minimale ou maximale
- ▶ mais notions de volume (V) et donc de densité mal définies
 $\implies$ les trous noirs sont compacts (M/R élevé), mais pas denses (M/V)
- ▶ astrophysique : plusieurs catégories, associées à des histoires différentes

Masse et « taille » des TN

- ▶ distance centre-horizon mal définie, mais circonférence $\mathcal{C}$ mesurable
 $\implies \mathcal{C} = 2\pi R_S$, avec R_S déterminé par M
- ▶ « taille » et masse reliées : **pas de limites théoriques** minimale ou maximale
- ▶ mais notions de volume (V) et donc de densité mal définies
 $\implies$ les trous noirs sont **compacts** (M/R élevé), mais pas **denses** (M/V)
- ▶ **astrophysique** : plusieurs catégories, associées à des histoires différentes

Masse et « taille » des TN

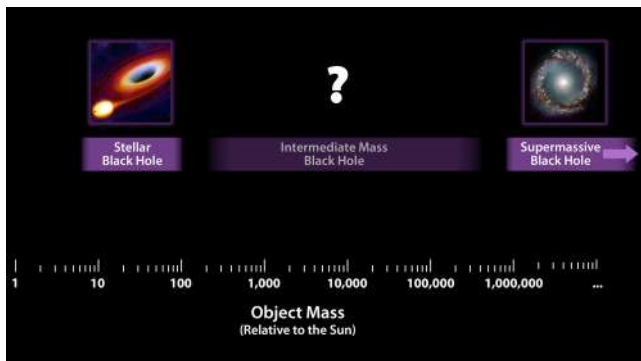
- ▶ distance centre-horizon mal définie, mais circonférence $\mathcal{C}$ mesurable
 $\implies \mathcal{C} = 2\pi R_S$, avec R_S déterminé par M
- ▶ « taille » et masse reliées : **pas de limites théoriques** minimale ou maximale
- ▶ mais notions de volume (V) et donc de densité mal définies
 $\implies$ les trous noirs sont compacts (M/R élevé), mais pas denses (M/V)
- ▶ astrophysique : plusieurs catégories, associées à des histoires différentes

Masse et « taille » des TN

- ▶ distance centre-horizon mal définie, mais circonférence $\mathcal{C}$ mesurable
 $\implies \mathcal{C} = 2\pi R_S$, avec R_S déterminé par M
- ▶ « taille » et masse reliées : **pas de limites théoriques** minimale ou maximale
- ▶ mais notions de volume (V) et donc de densité mal définies
 $\implies$ les trous noirs sont **compacts** (M/R élevé), mais pas **denses** (M/V)
- ▶ astrophysique : plusieurs catégories, associées à des histoires différentes

Masse et « taille » des TN

- ▶ distance centre-horizon mal définie, mais circonférence $\mathcal{C}$ mesurable
 $\implies \mathcal{C} = 2\pi R_S$, avec R_S déterminé par M
- ▶ « taille » et masse reliées : **pas de limites théoriques** minimale ou maximale
- ▶ mais notions de volume (V) et donc de densité mal définies
 $\implies$ les trous noirs sont **compacts** (M/R élevé), mais pas **denses** (M/V)
- ▶ **astrophysique** : plusieurs catégories, associées à des histoires différentes



- ▶ **microscopiques** : TN hypothétiques (issus de collisions à haute énergie?)
⇒ créés aussi dans l'Univers primordial?
- ▶ **stellaires** : $M \simeq 3 (?) - 40 (?) M_{\odot}$
 - origines : effondrement d'étoiles massives, ou collisions d'objets stellaires
- ▶ **supermassifs** : $M \simeq 10^4 - 10^{10} (?) M_{\odot}$ (observés au centre des galaxies)
 - origines : effondrement de nuages, et accréation d'étoiles
 - exemples : RGG 118 (2015 ; $M \simeq 50\,000 M_{\odot}$: centre d'une galaxie naine)

- ▶ **microscopiques** : TN hypothétiques (issus de collisions à haute énergie?)
⇒ créés aussi dans l'Univers primordial?
- ▶ **stellaires** : $M \simeq 3 (?) - 40 (?) M_{\odot}$
 - origines : effondrement d'étoiles massives, ou collisions d'objets stellaires
- ▶ **supermassifs** : $M \simeq 10^4 - 10^{10} (?) M_{\odot}$ (observés au centre des galaxies)
 - origines : effondrement de nuages, et accréation d'étoiles
 - exemples : RGG 118 (2015 ; $M \simeq 50\,000 M_{\odot}$: centre d'une galaxie naine)

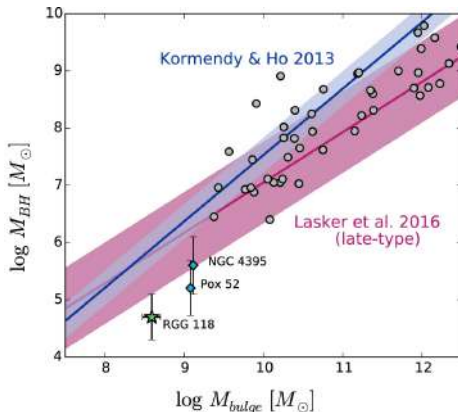
- ▶ **microscopiques** : TN hypothétiques (issus de collisions à haute énergie?)
⇒ créés aussi dans l'Univers primordial?
- ▶ **stellaires** : $M \simeq 3(?) - 40(?) M_{\odot}$
 - origines : effondrement d'étoiles massives, ou collisions d'objets stellaires
- ▶ **supermassifs** : $M \simeq 10^4 - 10^{10} (?) M_{\odot}$ (observés au centre des galaxies)
 - origines : effondrement de nuages, et accréation d'étoiles
 - exemples : RGG 118 (2015 ; $M \simeq 50\,000 M_{\odot}$: centre d'une galaxie naine)

- ▶ **microscopiques** : TN hypothétiques (issus de collisions à haute énergie?)
⇒ créés aussi dans l'Univers primordial?
- ▶ **stellaires** : $M \simeq 3(?) - 40(?) M_{\odot}$
 - **origines** : effondrement d'étoiles massives, ou collisions d'objets stellaires
- ▶ **supermassifs** : $M \simeq 10^4 - 10^{10} (?) M_{\odot}$ (observés au centre des galaxies)
 - **origines** : effondrement de nuages, et accréation d'étoiles
 - **exemples** : RGG 118 (2015 ; $M \simeq 50\,000 M_{\odot}$: centre d'une galaxie naine)

- ▶ **microscopiques** : TN hypothétiques (issus de **collisions** à haute énergie ?)
⇒ créés aussi dans l'**Univers primordial** ?
- ▶ **stellaires** : $M \simeq 3 (?) - 40 (?) M_{\odot}$
 - **origines** : **effondrement** d'étoiles massives, ou **collisions** d'objets stellaires
- ▶ **supermassifs** : $M \simeq 10^4 - 10^{10} (?) M_{\odot}$ (observés au centre des galaxies)
 - **origines** : **effondrement** de nuages, et **accrétion** d'étoiles
 - **exemples** : **RGG 118 (2015 ; $M \simeq 50\,000 M_{\odot}$: centre d'une galaxie naine)**

- ▶ **microscopiques** : TN hypothétiques (issus de collisions à haute énergie?)
⇒ créés aussi dans l'Univers primordial?
- ▶ **stellaires** : $M \simeq 3 (?) - 40 (?) M_{\odot}$
 - **origines** : effondrement d'étoiles massives, ou collisions d'objets stellaires
- ▶ **supermassifs** : $M \simeq 10^4 - 10^{10} (?) M_{\odot}$ (observés au centre des galaxies)
 - **origines** : effondrement de nuages, et accréation d'étoiles
 - **exemples** : RGG 118 (2015 ; $M \simeq 50\,000 M_{\odot}$: centre d'une galaxie naine)

- ▶ **microscopiques** : TN hypothétiques (issus de **collisions** à haute énergie?)
 $\Rightarrow$ créés aussi dans l'**Univers primordial** ?
- ▶ **stellaires** : $M \simeq 3 (?) - 40 (?) M_{\odot}$
 - **origines** : **effondrement** d'étoiles massives, ou **collisions** d'objets stellaires
- ▶ **supermassifs** : $M \simeq 10^4 - 10^{10} (?) M_{\odot}$ (observés au centre des galaxies)
 - **origines** : **effondrement** de nuages, et **accrétion** d'étoiles
 - **exemples** : **RGG 118** (2015 ; $M \simeq 50\,000 M_{\odot}$: centre d'une galaxie naine)



► **intermédiaires** : $M \simeq 10^2 - 10^4 M_{\odot}$?

- **origines** : effondrement et collisions d'étoiles massives contenues dans des amas stellaires ?
- **exemples** :
 - **HLX-1** découvert en **2012** dans ESO 243-49 ($M \simeq 20\,000 M_{\odot}$: arraché à galaxie naine ?)
 - **GW190521** : fusion, observée en **2019**, de deux TN avec $M = 65 M_{\odot}$ et $85 M_{\odot} \rightarrow M \simeq 142 M_{\odot}$

- ▶ **intermédiaires** : $M \simeq 10^2 - 10^4 M_{\odot}$?
- **origines** : **effondrement** et **collisions** d'étoiles massives contenues dans des amas stellaires ?
- **exemples** :
 - **HLX-1** découvert en **2012** dans ESO 243-49 ($M \simeq 20\,000 M_{\odot}$: arraché à galaxie naine ?)
 - **GW190521** : fusion, observée en **2019**, de deux TN avec $M = 65 M_{\odot}$ et $85 M_{\odot} \rightarrow M \simeq 142 M_{\odot}$



- ▶ **intermédiaires** : $M \simeq 10^2 - 10^4 M_{\odot}$?
- **origines** : effondrement et collisions d'étoiles massives contenues dans des amas stellaires ?
- **exemples** :
 - **HLX-1** découvert en **2012** dans ESO 243-49 ($M \simeq 20\,000 M_{\odot}$: arraché à galaxie naine ?)
 - **GW190521** : fusion, observée en **2019**, de deux TN avec $M = 65 M_{\odot}$ et $85 M_{\odot} \rightarrow M \simeq 142 M_{\odot}$



- ▶ **intermédiaires** : $M \simeq 10^2 - 10^4 M_{\odot}$?
- **origines** : effondrement et collisions d'étoiles massives contenues dans des amas stellaires ?
- **exemples** :
 - **HLX-1** découvert en **2012** dans ESO 243-49 ($M \simeq 20\,000 M_{\odot}$: arraché à galaxie naine ?)
 - **GW190521** : fusion, observée en **2019**, de deux TN avec $M = 65 M_{\odot}$ et $85 M_{\odot} \rightarrow M \simeq 142 M_{\odot}$



- ▶ **intermédiaires** : $M \simeq 10^2 - 10^4 M_{\odot}$?
- **origines** : effondrement et collisions d'étoiles massives contenues dans des amas stellaires ?
- **exemples** :
 - **HLX-1** découvert en **2012** dans ESO 243-49 ($M \simeq 20\,000 M_{\odot}$: arraché à galaxie naine ?)
 - **GW190521** : fusion, observée en **2019**, de deux TN avec $M = 65 M_{\odot}$ et $85 M_{\odot} \rightarrow M \simeq 142 M_{\odot}$



La calvitie des trous noirs

- ▶ **1918, Reissner & Nordström** : solution pour un **TN avec charge électrique**
- ▶ 1963, Kerr : **TN en rotation** (pas compris tout de suite)
- ▶ 1965, Kerr-Newman : **TN chargé en rotation**

La calvitie des trous noirs

- ▶ **1918, Reissner & Nordström** : solution pour un **TN avec charge électrique**
- ▶ **1963, Kerr** : **TN en rotation** (pas compris tout de suite)
- ▶ **1965, Kerr-Newman** : **TN chargé en rotation**

La calvitie des trous noirs

- ▶ **1918, Reissner & Nordström** : solution pour un **TN avec charge électrique**
- ▶ **1963, Kerr** : **TN en rotation** (pas compris tout de suite)
- ▶ **1965, Kerr-Newman** : **TN chargé en rotation**

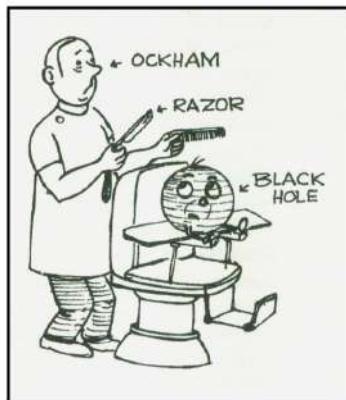
La calvitie des trous noirs

- ▶ 1918, Reissner & Nordström : solution pour un TN avec charge électrique
- ▶ 1963, Kerr : TN en rotation (pas compris tout de suite)
- ▶ 1965, Kerr-Newman : TN chargé en rotation

- ▶ **théorèmes de « calvitie »** et **d'unicité** : en relativité générale, tout TN macroscopique à l'équilibre est décrit de manière unique par **masse**, **vitesse de rotation** et **charge électrique**

⇒ **TN astrophysiques** caractérisés par **masse** et **vitesse de rotation** ? (≠ étoiles ou planètes)

⇒ existence de « **trous noirs chevelus** » ? (prédits par certains modèles théoriques alternatifs)



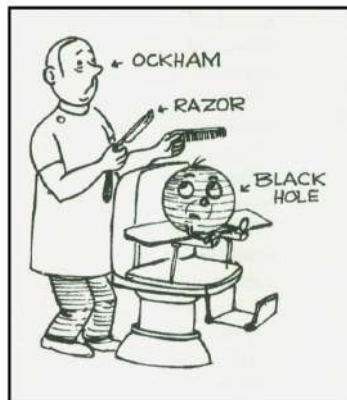
La calvitie des trous noirs

- ▶ 1918, Reissner & Nordström : solution pour un TN avec charge électrique
- ▶ 1963, Kerr : TN en rotation (pas compris tout de suite)
- ▶ 1965, Kerr-Newman : TN chargé en rotation

- ▶ **théorèmes de « calvitie »** et **d'unicité** : en relativité générale, tout TN macroscopique à l'équilibre est décrit de manière unique par **masse**, **vitesse de rotation** et **charge électrique**

⇒ **TN astrophysiques** caractérisés par **masse** et **vitesse de rotation** ? ($\neq$ étoiles ou planètes)

⇒ existence de « **trous noirs chevelus** » ? (prédits par certains modèles théoriques alternatifs)



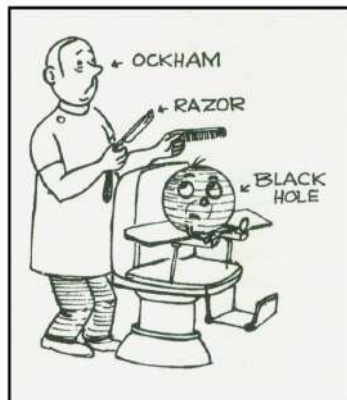
La calvitie des trous noirs

- ▶ 1918, Reissner & Nordström : solution pour un TN avec charge électrique
- ▶ 1963, Kerr : TN en rotation (pas compris tout de suite)
- ▶ 1965, Kerr-Newman : TN chargé en rotation

- ▶ **théorèmes de « calvitie »** et **d'unicité** : en relativité générale, tout TN macroscopique à l'équilibre est décrit de manière unique par **masse**, **vitesse de rotation** et **charge électrique**

⇒ **TN astrophysiques** caractérisés par **masse** et **vitesse de rotation** ? ($\neq$ étoiles ou planètes)

⇒ existence de « **trous noirs chevelus** » ? (prédits par certains modèles théoriques alternatifs)



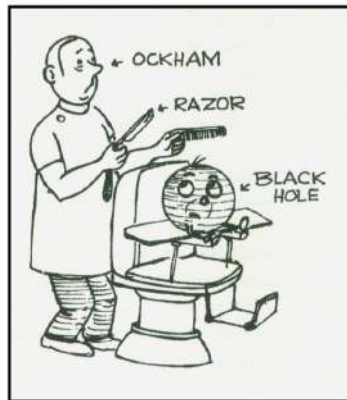
La calvitie des trous noirs

- ▶ 1918, Reissner & Nordström : solution pour un TN avec charge électrique
- ▶ 1963, Kerr : TN en rotation (pas compris tout de suite)
- ▶ 1965, Kerr-Newman : TN chargé en rotation

- ▶ **théorèmes de « calvitie »** et **d'unicité** : en relativité générale, tout TN macroscopique à l'équilibre est décrit de manière unique par **masse**, **vitesse de rotation** et **charge électrique**

⇒ **TN astrophysiques** caractérisés par **masse** et **vitesse de rotation** ? ($\neq$ étoiles ou planètes)

⇒ existence de « **trous noirs chevelus** » ? (prédits par certains modèles théoriques alternatifs) (sujet de recherche à l'**IDP**)

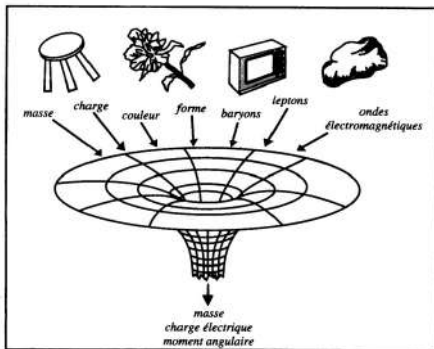


conséquences de la calvitie :

- ▶ **TN** = objets (astrophysiques) **les plus simples**
- ▶ **mémoire incomplète** (voire nulle) de ce avec quoi ils ont été produits (des protons, du porto, etc.)
⇒ **perte d'information** (?)

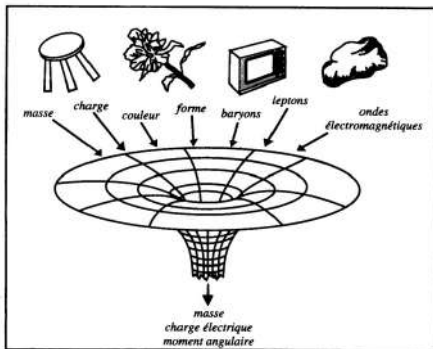
conséquences de la calvitie :

- ▶ TN = objets (astrophysiques) **les plus simples**
- ▶ **mémoire incomplète** (voire nulle) de ce avec quoi ils ont été produits (des protons, du porto, etc.)
⇒ **perte d'information** (?)



conséquences de la calvitie :

- ▶ TN = objets (astrophysiques) **les plus simples**
- ▶ **mémoire incomplète** (voire nulle) de ce avec quoi ils ont été produits (des protons, du porto, etc.)
 - ⇒ **perte d'information** (?)



Physique fondamentale : thermodynamique et information

- ▶ **1969, Hawking** : lors d'évolutions, la somme des **superficies d'horizons** ne peut qu'**augmenter**
- ▶ **1972, Bekenstein** : lien avec l'**entropie** ? ($\sim$ désordre microscopique)
- ▶ **1972, Carter, Hawking & Bardeen** : **thermodynamique des TN**
- ▶ **1974, Hawking** : rayonnement et évaporation (**effets quantiques**)
 - $\implies$ **température de Hawking** (inversement proportionnelle à M)
 - $\implies$ effet négligeable pour un TN stellaire (ou plus massif), mais pas pour un **TN microscopique** $\implies$ **aucun danger** lors de collisions au CERN
 - $\implies$ **paradoxe de l'information (quantique)** [sujet de recherche actuel]

Physique fondamentale : thermodynamique et information

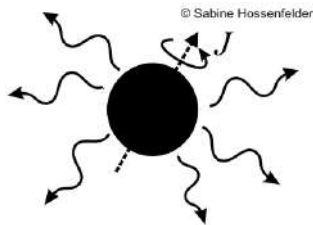
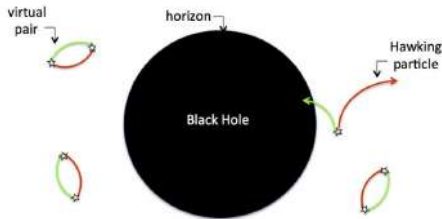
- ▶ **1969, Hawking** : lors d'évolutions, la somme des **superficies d'horizons** ne peut qu'**augmenter**
- ▶ **1972, Bekenstein** : lien avec l'**entropie** ? ($\sim$ désordre microscopique)
- ▶ **1972, Carter, Hawking & Bardeen** : **thermodynamique des TN**
- ▶ **1974, Hawking** : rayonnement et évaporation (**effets quantiques**)
 - $\implies$ **température de Hawking** (inversement proportionnelle à M)
 - $\implies$ effet négligeable pour un TN stellaire (ou plus massif), mais pas pour un **TN microscopique** $\implies$ **aucun danger** lors de collisions au CERN
 - $\implies$ **paradoxe de l'information (quantique)** [sujet de recherche actuel]

Physique fondamentale : thermodynamique et information

- ▶ **1969, Hawking** : lors d'évolutions, la somme des **superficies d'horizons** ne peut qu'**augmenter**
- ▶ **1972, Bekenstein** : lien avec l'**entropie** ? ($\sim$ désordre microscopique)
- ▶ **1972, Carter, Hawking & Bardeen** : **thermodynamique des TN**
- ▶ **1974, Hawking** : rayonnement et évaporation (**effets quantiques**)
 - $\implies$ **température de Hawking** (inversement proportionnelle à M)
 - $\implies$ effet négligeable pour un TN stellaire (ou plus massif), mais pas pour un **TN microscopique** $\implies$ **aucun danger** lors de collisions au CERN
 - $\implies$ **paradoxe de l'information (quantique)** [sujet de recherche actuel]

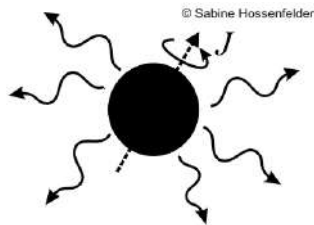
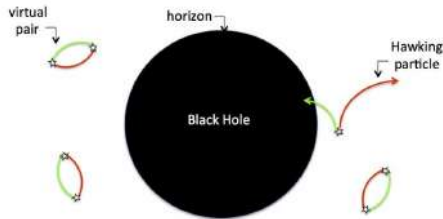
Physique fondamentale : thermodynamique et information

- ▶ **1969, Hawking** : lors d'évolutions, la somme des **superficies d'horizons** ne peut qu'**augmenter**
- ▶ **1972, Bekenstein** : lien avec l'**entropie** ? ($\sim$ désordre microscopique)
- ▶ **1972, Carter, Hawking & Bardeen** : **thermodynamique des TN**
- ▶ **1974, Hawking** : rayonnement et évaporation (**effets quantiques**)
 - $\Rightarrow$ **température de Hawking** (inversement proportionnelle à M)
 - $\Rightarrow$ effet négligeable pour un TN stellaire (ou plus massif), mais pas pour un **TN microscopique** $\Rightarrow$ **aucun danger** lors de collisions au CERN
 - $\Rightarrow$ **paradoxe de l'information (quantique)** [sujet de recherche actuel]



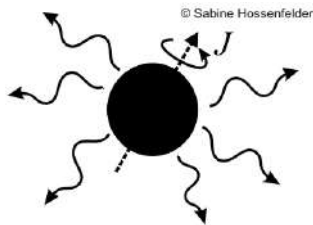
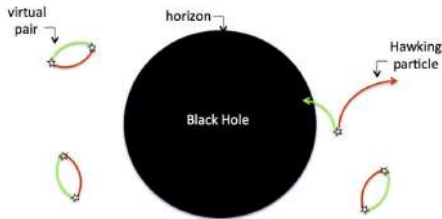
Physique fondamentale : thermodynamique et information

- ▶ **1969, Hawking** : lors d'évolutions, la somme des **surfaces d'horizons** ne peut qu'**augmenter**
- ▶ **1972, Bekenstein** : lien avec l'**entropie** ? ($\sim$ désordre microscopique)
- ▶ **1972, Carter, Hawking & Bardeen** : **thermodynamique des TN**
- ▶ **1974, Hawking** : rayonnement et évaporation (**effets quantiques**)
 - $\Rightarrow$ **température de Hawking** (inversement proportionnelle à M)
 - $\Rightarrow$ effet négligeable pour un TN stellaire (ou plus massif), mais pas pour un **TN microscopique** $\Rightarrow$ **aucun danger** lors de collisions au CERN
 - $\Rightarrow$ **paradoxe de l'information (quantique)** [sujet de recherche actuel]



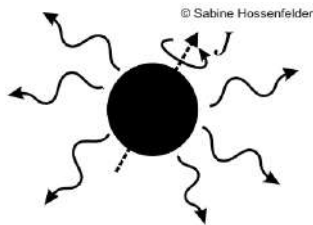
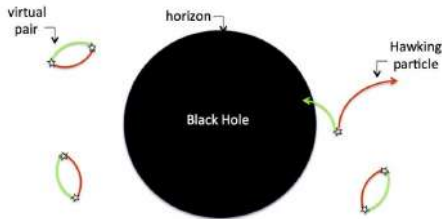
Physique fondamentale : thermodynamique et information

- ▶ **1969, Hawking** : lors d'évolutions, la somme des **surfaces d'horizons** ne peut qu'**augmenter**
- ▶ **1972, Bekenstein** : lien avec l'**entropie** ? ($\sim$ désordre microscopique)
- ▶ **1972, Carter, Hawking & Bardeen** : **thermodynamique des TN**
- ▶ **1974, Hawking** : rayonnement et évaporation (**effets quantiques**)
 - $\Rightarrow$ **température de Hawking** (inversement proportionnelle à M)
 - $\Rightarrow$ effet négligeable pour un TN stellaire (ou plus massif), mais pas pour un **TN microscopique** $\Rightarrow$ **aucun danger** lors de collisions au CERN
 - $\Rightarrow$ **paradoxe de l'information (quantique)** [sujet de recherche actuel]

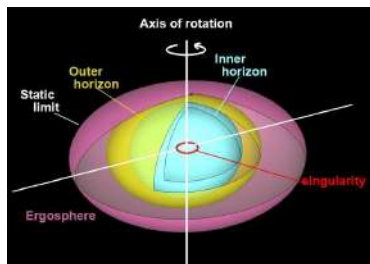


Physique fondamentale : thermodynamique et information

- ▶ **1969, Hawking** : lors d'évolutions, la somme des **surfaces d'horizons** ne peut qu'**augmenter**
- ▶ **1972, Bekenstein** : lien avec l'**entropie** ? ($\sim$ désordre microscopique)
- ▶ **1972, Carter, Hawking & Bardeen** : **thermodynamique des TN**
- ▶ **1974, Hawking** : rayonnement et évaporation (**effets quantiques**)
 - $\Rightarrow$ **température de Hawking** (inversement proportionnelle à M)
 - $\Rightarrow$ effet négligeable pour un TN stellaire (ou plus massif), mais pas pour un **TN microscopique** $\Rightarrow$ **aucun danger** lors de collisions au CERN
 - $\Rightarrow$ **paradoxe de l'information (quantique)** [sujet de recherche actuel]



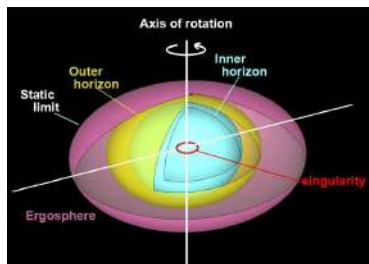
TN macroscopiques (astronomiques) en rotation



Selon la relativité générale :

- ▶ région externe : [solution de Kerr](#)
- ▶ région interne : [inconnue](#)
(solution analytique instable et irréaliste)

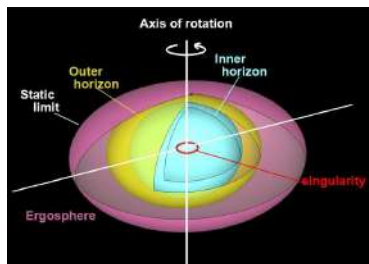
TN macroscopiques (astronomiques) en rotation



Selon la relativité générale :

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

TN macroscopiques (astronomiques) en rotation



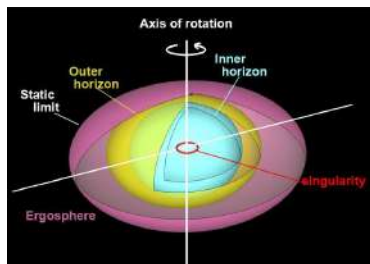
Selon la relativité générale :

- ▶ 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
⇒ influence sur les **disques d'accrétion**



TN macroscopiques (astronomiques) en rotation



Selon la relativité générale :

- ▶ 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
⇒ influence sur les **disques d'accrétion**

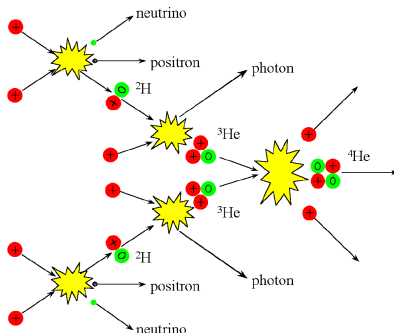


IV : Mise en évidence de trous noirs astrophysiques

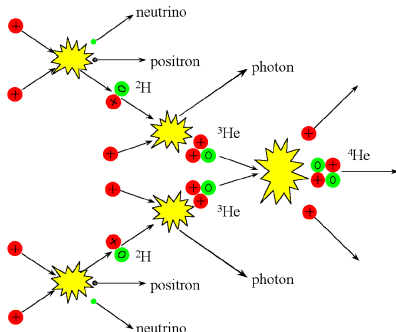


- ▶ **Début XX^{ème} siècle** : étoiles $\Rightarrow$ **fusion nucléaire** (Bethe, 1938)
- ▶ **fusion** : petits noyaux $\rightarrow$ noyaux plus gros + énergie
 $\Rightarrow$ **pression (thermique)** qui résiste à la gravité
- ▶ **étoiles peu massives (Soleil)** : pas au-delà du **carbone** $\Rightarrow$ **naine blanche**
- ▶ **étoiles massives** : noyaux atomiques de plus en plus lourds produits
 $\Rightarrow$ plus lourds vers le **cœur** (stratification, cf. eau et huile)
 $\Rightarrow$ accumulation centrale de **fer** $\sim$ **déchets nucléaires**

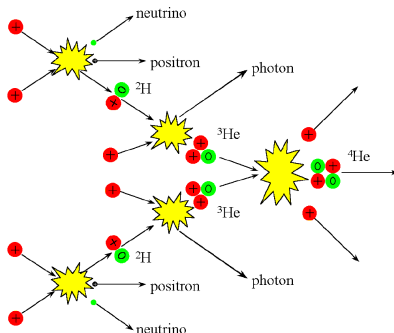
- ▶ **Début XX^{ème} siècle** : étoiles $\Rightarrow$ **fusion nucléaire** (Bethe, 1938)
- ▶ **fusion** : petits noyaux $\rightarrow$ noyaux plus gros + énergie
 $\Rightarrow$ **pression (thermique)** qui résiste à la gravité
- ▶ **étoiles peu massives (Soleil)** : pas au-delà du **carbone** $\Rightarrow$ **naine blanche**
- ▶ **étoiles massives** : noyaux atomiques de plus en plus lourds produits
 $\Rightarrow$ plus lourds vers le **cœur** (stratification, cf. eau et huile)
 $\Rightarrow$ accumulation centrale de **fer** $\sim$ **déchets nucléaires**



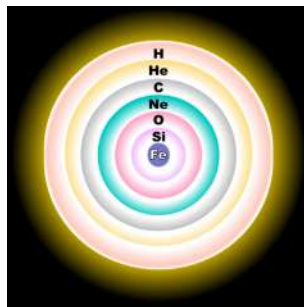
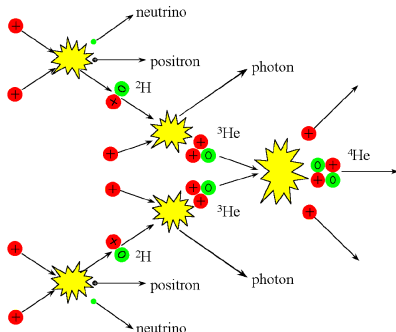
- ▶ **Début XX^{ème} siècle** : étoiles $\Rightarrow$ **fusion nucléaire** (Bethe, 1938)
- ▶ **fusion** : petits noyaux $\rightarrow$ noyaux plus gros + énergie
 $\Rightarrow$ **pression (thermique)** qui résiste à la gravité
- ▶ **étoiles peu massives (Soleil)** : pas au-delà du **carbone** $\Rightarrow$ **naine blanche**
- ▶ **étoiles massives** : noyaux atomiques de plus en plus lourds produits
 $\Rightarrow$ plus lourds vers le **cœur** (stratification, cf. eau et huile)
 $\Rightarrow$ accumulation centrale de **fer** $\sim$ **déchets nucléaires**



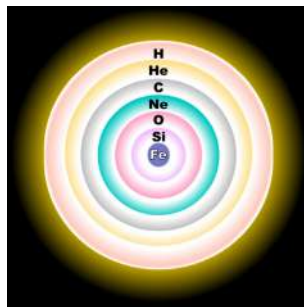
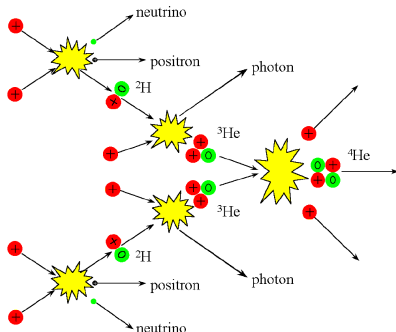
- ▶ **Début XX^{ème} siècle** : étoiles $\Rightarrow$ **fusion nucléaire** (Bethe, 1938)
- ▶ **fusion** : petits noyaux $\rightarrow$ noyaux plus gros + énergie
 $\Rightarrow$ **pression (thermique)** qui résiste à la gravité
- ▶ **étoiles peu massives (Soleil)** : pas au-delà du **carbone** $\Rightarrow$ **naine blanche**
- ▶ **étoiles massives** : noyaux atomiques de plus en plus lourds produits
 $\Rightarrow$ plus lourds vers le **cœur** (stratification, cf. eau et huile)
 $\Rightarrow$ accumulation centrale de **fer** $\sim$ **déchet nucléaire**



- ▶ **Début XX^{ème} siècle** : étoiles $\Rightarrow$ **fusion nucléaire** (Bethe, 1938)
- ▶ **fusion** : petits noyaux $\rightarrow$ noyaux plus gros + énergie
 $\Rightarrow$ **pression (thermique)** qui résiste à la gravité
- ▶ **étoiles peu massives (Soleil)** : pas au-delà du **carbone** $\Rightarrow$ **naine blanche**
- ▶ **étoiles massives** : noyaux atomiques de plus en plus lourds produits
 $\Rightarrow$ plus lourds vers le **cœur** (stratification, cf. eau et huile)
 $\Rightarrow$ accumulation centrale de **fer** $\sim$ **déchets nucléaires**



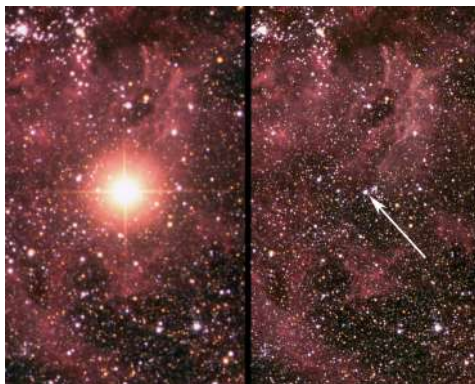
- ▶ **Début XX^{ème} siècle** : étoiles $\Rightarrow$ **fusion nucléaire** (Bethe, 1938)
- ▶ **fusion** : petits noyaux $\rightarrow$ noyaux plus gros + énergie
 $\Rightarrow$ **pression (thermique)** qui résiste à la gravité
- ▶ **étoiles peu massives (Soleil)** : pas au-delà du **carbone** $\Rightarrow$ **naine blanche**
- ▶ **étoiles massives** : noyaux atomiques de plus en plus lourds produits
 $\Rightarrow$ plus lourds vers le **cœur** (stratification, cf. eau et huile)
 $\Rightarrow$ accumulation centrale de **fer** $\sim$ **déchets nucléaires**



- ▶ quand masse du cœur de fer $\gtrsim 1,4$ masses solaires (**Chandrasekhar, 1930**)
 - ⇒ effondrement, puis rebond et expulsion des couches externes (durée : moins d'une seconde)
 - ⇒ supernova gravitationnelle (**Baade & Zwicky, 1934**)
- ▶ pendant 10 secondes : 10^{23} fois la luminosité du Soleil

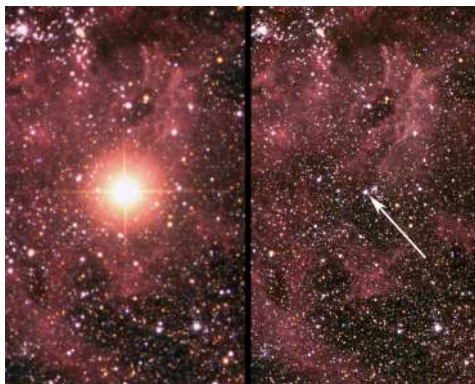
- ▶ quand masse du cœur de fer $\gtrsim 1,4$ masses solaires (**Chandrasekhar, 1930**)
 $\implies$ effondrement, puis rebond et expulsion des couches externes
 (durée : moins d'une seconde)
 $\implies$ supernova gravitationnelle (Baade & Zwicky, 1934)
- ▶ pendant 10 secondes : 10^{23} fois la luminosité du Soleil

- ▶ quand masse du cœur de fer $\gtrsim 1,4$ masses solaires (**Chandrasekhar, 1930**)
 $\implies$ effondrement, puis rebond et expulsion des couches externes
 (durée : moins d'une seconde)
 $\implies$ supernova gravitationnelle (**Baade & Zwicky, 1934**)
- ▶ pendant 10 secondes : 10^{23} fois la luminosité du Soleil



SN 1987A

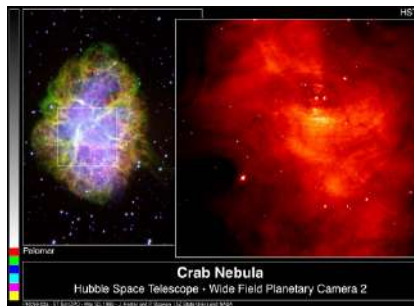
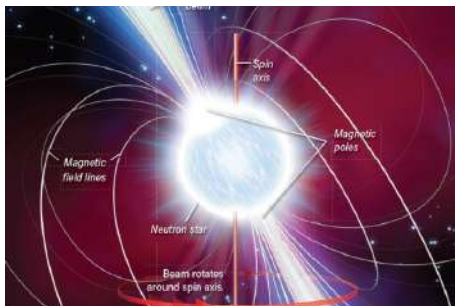
- ▶ quand masse du cœur de fer $\gtrsim 1,4$ masses solaires (**Chandrasekhar, 1930**)
 $\Rightarrow$ effondrement, puis rebond et expulsion des couches externes
 (durée : moins d'une seconde)
 $\Rightarrow$ supernova gravitationnelle (**Baade & Zwicky, 1934**)
- ▶ pendant **10 secondes** : 10^{23} fois la luminosité du Soleil



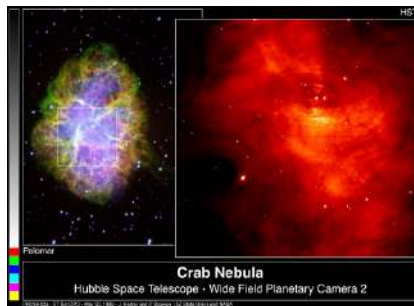
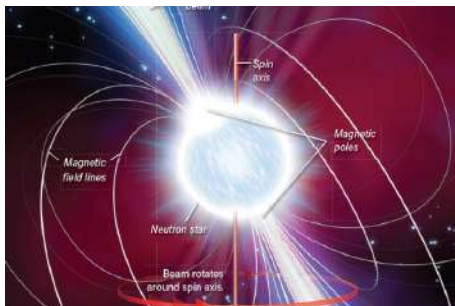
SN 1987A

- ▶ résidu central = cœur de noyaux de fer brisés + matière externe retombée
- ▶ étoile à neutrons (pulsar, 1967) si masse pas trop importante ($M_{\text{max}} \simeq 3M_{\odot}$, limite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff, 1939)
- ▶ si trop de masse : trou noir stellaire

- ▶ résidu central = cœur de noyaux de fer brisés + matière externe retombée
- ▶ étoile à neutrons (**pulsar, 1967**) si masse pas trop importante ($M_{\text{max}} \simeq 3M_{\odot}$, limite de **Tolman-Oppenheimer-Volkoff, 1939**)
- ▶ si trop de masse : trou noir stellaire

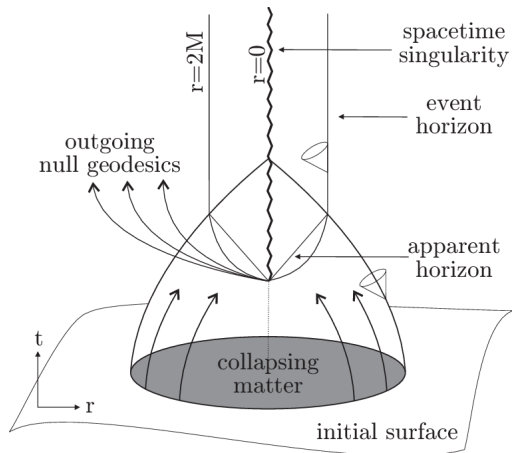


- ▶ résidu central = cœur de noyaux de fer brisés + matière externe retombée
- ▶ étoile à neutrons (**pulsar, 1967**) si masse pas trop importante ($M_{\text{max}} \simeq 3M_{\odot}$, limite de **Tolman-Oppenheimer-Volkoff, 1939**)
- ▶ si trop de masse : trou noir stellaire



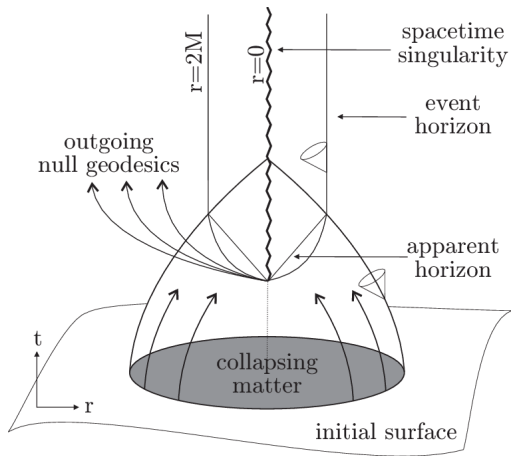
si aucune force ne parvient à résister à la gravité
(Oppenheimer & Snyder, 01/09/1939) :

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



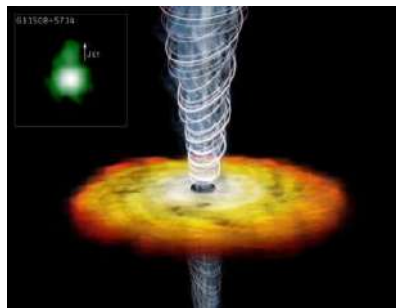
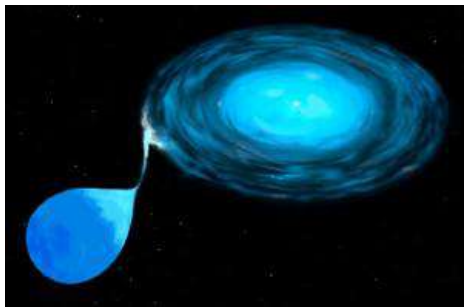
si aucune force ne parvient à résister à la gravité
(Oppenheimer & Snyder, 01/09/1939) :

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

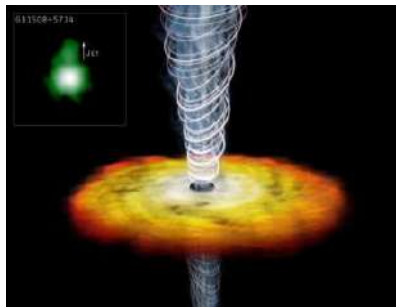
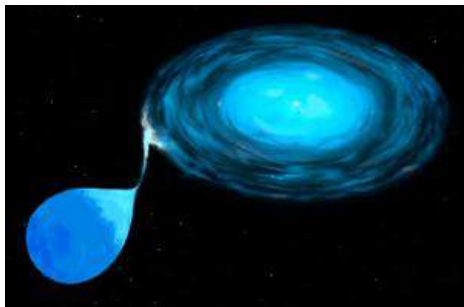


- ▶ TN : pas d'émission **directe** de lumière, mais matière autour possible
- ▶ souvent localisés dans des **systèmes binaires** $\Rightarrow$ matière en chute depuis l'astre compagnon $\Rightarrow$ **disque d'accrétion** $\Rightarrow$ matière chauffée $\Rightarrow$ **émission X** et **radio** (« binaire X »)
 - $\Rightarrow$ observation de **Cygnus X1** en **1964** ($M \simeq 15 - 21 M_{\odot}$, cf. Kepler)
 - $\Rightarrow$ première **observation indirecte** d'un **trou noir** (stellaire)

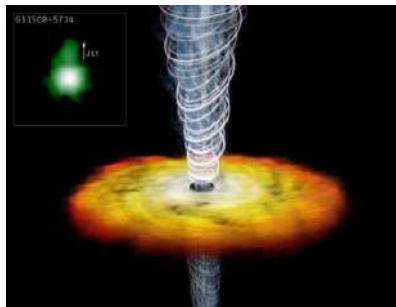
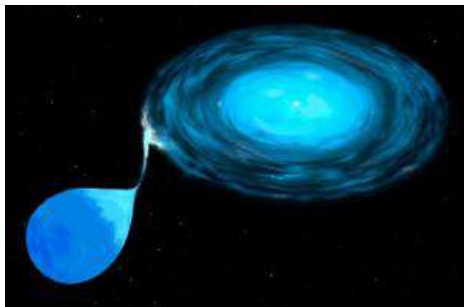
- ▶ TN : pas d'émission **directe** de lumière, mais matière autour possible
- ▶ souvent localisés dans des **systèmes binaires** $\Rightarrow$ matière en chute depuis l'astre compagnon $\Rightarrow$ **disque d'accrétion** $\Rightarrow$ matière chauffée $\Rightarrow$ **émission X** et **radio** (« binaire X »)
 - $\Rightarrow$ observation de **Cygnus X1** en **1964** ($M \simeq 15 - 21 M_{\odot}$, cf. Kepler)
 - $\Rightarrow$ première **observation indirecte** d'un **trou noir** (stellaire)



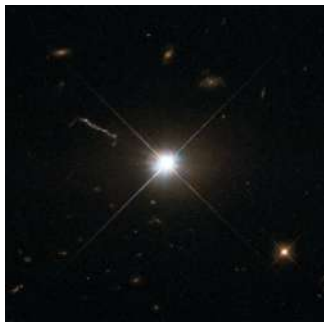
- ▶ TN : pas d'émission **directe** de lumière, mais matière autour possible
- ▶ souvent localisés dans des **systèmes binaires** $\Rightarrow$ matière en chute depuis l'astre compagnon $\Rightarrow$ **disque d'accrétion** $\Rightarrow$ matière chauffée $\Rightarrow$ **émission X** et **radio** (« binaire X »)
- $\Rightarrow$ observation de **Cygnus X1** en **1964** ($M \simeq 15 - 21 M_{\odot}$, cf. Kepler)
- $\Rightarrow$ première **observation indirecte** d'un **trou noir** (stellaire)



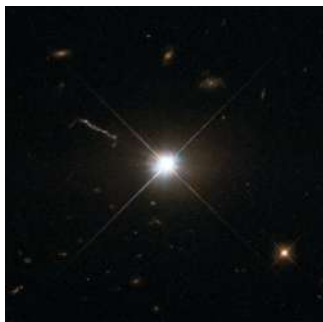
- ▶ TN : pas d'émission **directe** de lumière, mais matière autour possible
- ▶ souvent localisés dans des **systèmes binaires** $\Rightarrow$ matière en chute depuis l'astre compagnon $\Rightarrow$ **disque d'accrétion** $\Rightarrow$ matière chauffée $\Rightarrow$ **émission X** et **radio** (« binaire X »)
- $\Rightarrow$ observation de **Cygnus X1** en **1964** ($M \simeq 15 - 21 M_{\odot}$, cf. Kepler)
- $\Rightarrow$ première **observation indirecte** d'un **trou noir** (stellaire)



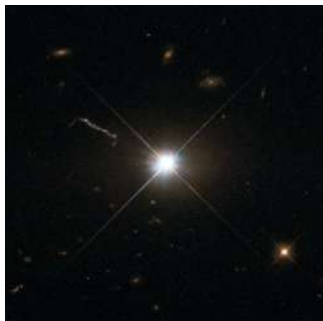
- ▶ **1963, Schmidt & Oke : 3C 273** = source radio très intense et lointaine (2,4 milliards d'années-lumière) $\Rightarrow$ **objet quasi-stellaire (quasar)**
- ▶ **1964, Salpeter & Zel'dovich** : idée théorique d'un lien avec **trou noir supermassif** doté d'un **disque d'accrétion gigantesque**
- ▶ **interprétation moderne** : cas particulier de **noyau actif de galaxie**
 $\Rightarrow$ **TN supermassifs** au **centre de la plupart des galaxies**
(très anciens ; nés par effondrement de nuages, collisions, accrétions, etc.)



- ▶ **1963, Schmidt & Oke : 3C 273** = source radio très intense et lointaine (2,4 milliards d'années-lumière) $\Rightarrow$ **objet quasi-stellaire (quasar)**
- ▶ **1964, Salpeter & Zel'dovich** : idée théorique d'un lien avec **trou noir supermassif** doté d'un **disque d'accrétion gigantesque**
- ▶ **interprétation moderne** : cas particulier de **noyau actif de galaxie**
 $\Rightarrow$ **TN supermassifs** au **centre de la plupart des galaxies**
(très anciens ; nés par effondrement de nuages, collisions, accrétions, etc.)



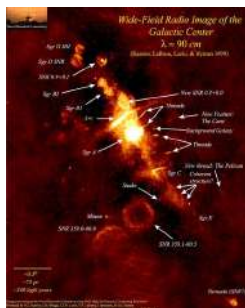
- ▶ **1963, Schmidt & Oke : 3C 273** = source radio très intense et lointaine (2,4 milliards d'années-lumière) $\Rightarrow$ **objet quasi-stellaire (quasar)**
- ▶ **1964, Salpeter & Zel'dovich** : idée théorique d'un lien avec **trou noir supermassif** doté d'un **disque d'accrétion gigantesque**
- ▶ **interprétation moderne** : cas particulier de **noyau actif de galaxie**
 $\Rightarrow$ **TN supermassifs** au **centre de la plupart des galaxies**
(très anciens ; nés par effondrement de nuages, collisions, accrétions, etc.)



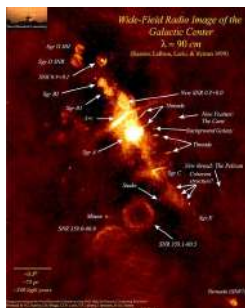
- ▶ **1974, Balick & Brown** : **source radio compacte** au centre de la Voie lactée
- ▶ **Sagittarius A^{*} (Sgr A^{*})** : $M \simeq 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $R < 120$ UA
- ▶ **début 2000** : observations du voisinage du centre de la Voie lactée
 $\implies$ étude affinée [groupes dirigés par **Genzel & Ghez**]
- ▶ **2019** : publication de la **première image** de l'environnement d'un **trou noir supermassif** (M87* par l'**Event Horizon Telescope, EHT**)
- ▶ **2022** : image de l'environnement de Sgr A^{*} par l'EHT

- ▶ **1974, Balick & Brown** : [source radio compacte](#) au centre de la Voie lactée
- ▶ **Sagittarius A*** (Sgr A*) : $M \simeq 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $R < 120$ UA
- ▶ **début 2000** : observations du voisinage du centre de la Voie lactée
⇒ étude affinée [groupes dirigés par **Genzel & Ghez**]
- ▶ **2019** : publication de la **première image** de l'environnement d'un **trou noir supermassif** (M87* par l'**Event Horizon Telescope, EHT**)
- ▶ **2022** : image de l'environnement de Sgr A* par l'EHT

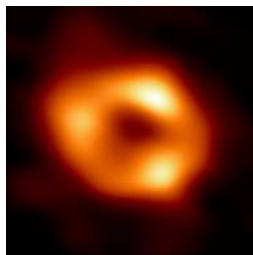
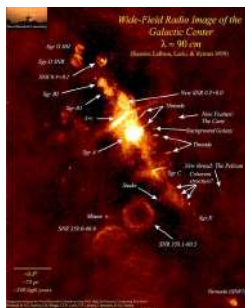
- ▶ 1974, Balick & Brown : **source radio compacte** au centre de la Voie lactée
- ▶ **Sagittarius A^{*}** (Sgr A^{*}) : $M \simeq 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $R < 120$ UA
- ▶ **début 2000** : observations du voisinage du centre de la Voie lactée
 $\implies$ étude affinée [groupes dirigés par **Genzel & Ghez**]
- ▶ 2019 : publication de la **première image** de l'environnement d'un **trou noir supermassif** (M87* par l'Event Horizon Telescope, EHT)
- ▶ 2022 : image de l'environnement de Sgr A^{*} par l'EHT



- ▶ 1974, Balick & Brown : **source radio compacte** au centre de la Voie lactée
- ▶ **Sagittarius A^{*}** (Sgr A^{*}) : $M \simeq 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $R < 120$ UA
- ▶ **début 2000** : observations du voisinage du centre de la Voie lactée
 $\implies$ étude affinée [groupes dirigés par **Genzel & Ghez**]
- ▶ **2019** : publication de la **première image** de l'environnement d'un **trou noir supermassif** (M87* par l'**Event Horizon Telescope, EHT**)
- ▶ 2022 : image de l'environnement de Sgr A^{*} par l'EHT



- ▶ 1974, Balick & Brown : **source radio compacte** au centre de la Voie lactée
- ▶ **Sagittarius A^{*}** (Sgr A^{*}) : $M \simeq 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $R < 120$ UA
- ▶ **début 2000** : observations du voisinage du centre de la Voie lactée
 $\implies$ étude affinée [groupes dirigés par **Genzel & Ghez**]
- ▶ **2019** : publication de la **première image** de l'environnement d'un **trou noir supermassif** (M87* par l'**Event Horizon Telescope, EHT**)
- ▶ **2022** : image de l'environnement de Sgr A^{*} par l'EHT



V : Observations directes



- ▶ unité adaptée aux **petits angles** : 1 **seconde d'arc** (as) = 1 degré/3600
exemple : **taille angulaire** de la Lune dans le ciel ~ 1800 secondes d'arc
- ▶ **très petits angles** : 1 μ seconde d'arc (μ as) = 1 seconde d'arc/1 000 000
- ▶ **TN supermassifs « proches »** $\sim 50 \mu$ as
 $\sim$ **orange à la surface de la Lune**
- ▶ télescopes spatiaux Hubble ou James Webb :
résolution $\sim 10\,000 \mu$ as...
 $\sim$ **trois fois un terrain de football à la surface de la Lune**

- ▶ unité adaptée aux **petits angles** : 1 **seconde d'arc** (as) = 1 degré/3600
exemple : **taille angulaire** de la Lune dans le ciel ~ 1800 secondes d'arc
- ▶ **très petits angles** : 1 μ seconde d'arc (μ as) = 1 seconde d'arc/1 000 000
- ▶ **TN supermassifs « proches »** $\sim 50 \mu$ as
 $\sim$ **orange à la surface de la Lune**
- ▶ télescopes spatiaux Hubble ou James Webb :
résolution $\sim 10\,000 \mu$ as...
 $\sim$ **trois fois un terrain de football à la surface de la Lune**

- ▶ unité adaptée aux **petits angles** : 1 **seconde d'arc** (as) = 1 degré/3600
exemple : **taille angulaire** de la Lune dans le ciel ~ 1800 secondes d'arc
- ▶ **très petits angles** : 1 μ seconde d'arc (μ as) = 1 seconde d'arc/1 000 000
- ▶ **TN supermassifs « proches »** $\sim 50 \mu$ as
 $\sim$ **orange à la surface de la Lune**
- ▶ télescopes spatiaux Hubble ou James Webb :
résolution $\sim 10\,000 \mu$ as...
 $\sim$ **trois fois un terrain de football à la surface de la Lune**

- ▶ unité adaptée aux **petits angles** : 1 **seconde d'arc** (as) = 1 degré/3600
exemple : **taille angulaire** de la Lune dans le ciel ~ 1800 secondes d'arc
- ▶ **très petits angles** : 1 μ seconde d'arc (μ as) = 1 seconde d'arc/1 000 000
- ▶ **TN supermassifs « proches »** $\sim 50 \mu$ as
 $\sim$ **orange à la surface de la Lune**
- ▶ télescopes spatiaux Hubble ou James Webb :
 résolution $\sim 10\,000 \mu$ as...
 $\sim$ **trois fois un terrain de football à la surface de la Lune**

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

- ▶ unité adaptée aux **petits angles** : 1 **seconde d'arc** (as) = 1 degré/3600
exemple : **taille angulaire** de la Lune dans le ciel ~ 1800 secondes d'arc
- ▶ **très petits angles** : 1 μ seconde d'arc (μ as) = 1 seconde d'arc/1 000 000
- ▶ **TN supermassifs « proches »** $\sim 50 \mu$ as
 $\sim$ **orange à la surface de la Lune**
- ▶ télescopes spatiaux Hubble ou James Webb :
 résolution $\sim 10\,000 \mu$ as...
 $\sim$ **trois fois un terrain de football à la surface de la Lune**

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

- ▶ unité adaptée aux **petits angles** : 1 **seconde d'arc** (as) = 1 degré/3600
exemple : **taille angulaire** de la Lune dans le ciel ~ 1800 secondes d'arc
- ▶ **très petits angles** : 1 μ seconde d'arc (μ as) = 1 seconde d'arc/1 000 000
- ▶ **TN supermassifs « proches »** $\sim 50 \mu$ as
 $\sim$ **orange à la surface de la Lune**
- ▶ télescopes spatiaux Hubble ou James Webb :
 résolution $\sim 10\,000 \mu$ as...
 $\sim$ **trois fois un terrain de football à la surface de la Lune**

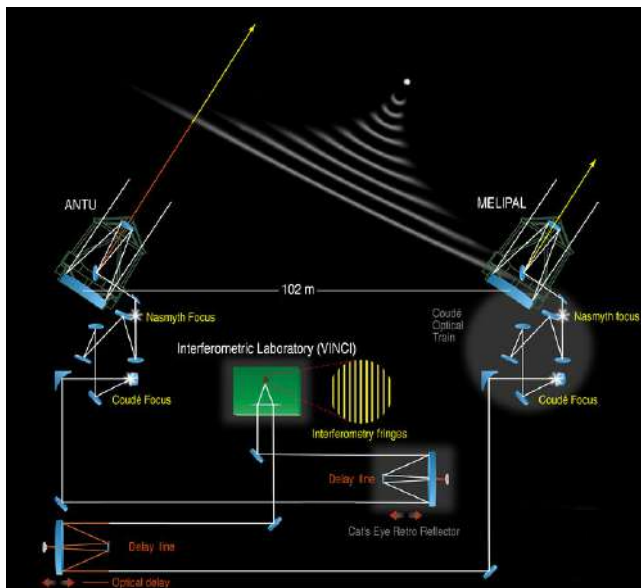
Nom	Masse ($M_{\odot}$)	Distance (10^6 al)	Diamètre apparent (μ as)
Sgr A*	$\sim 4.3 \times 10^6$	0.027	53
M87*	$\sim 3.6 \times 10^9$	55	21
TN stellaire	$\sim 3 - 40$	$\gtrsim 0.001$	$\lesssim 0.001$

Solution : interférométrie à très longue base

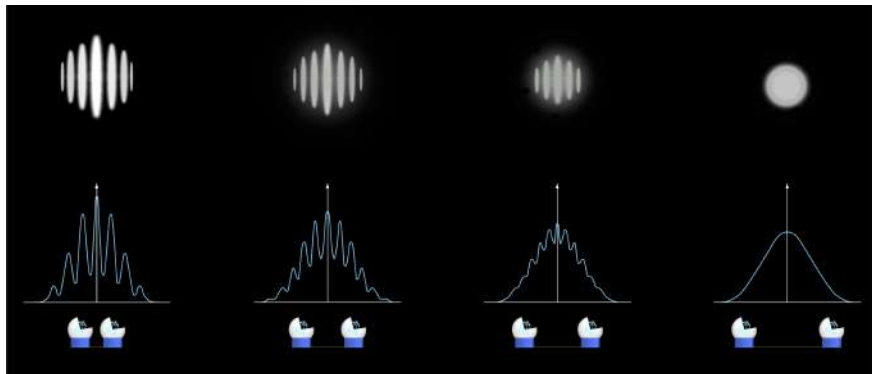


Les 8 télescopes (localisés sur 6 sites) impliqués dans la campagne d'observation d'avril 2017 du [Event Horizon Telescope \(EHT\)](#)

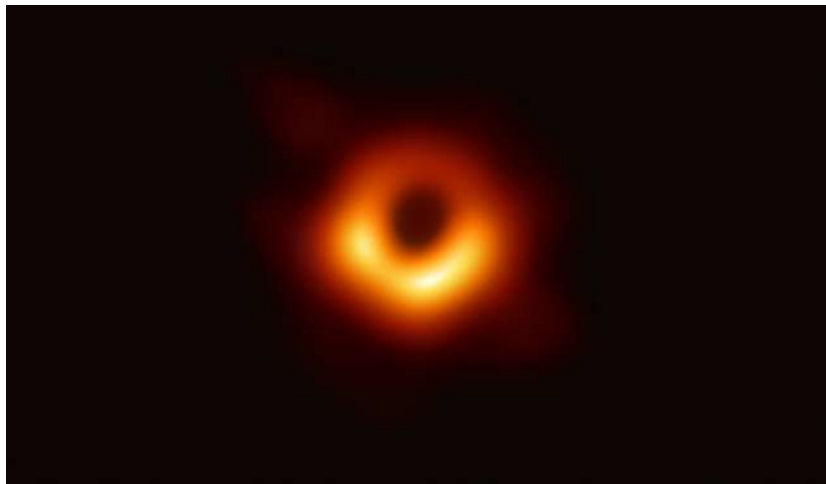
Interférométrie



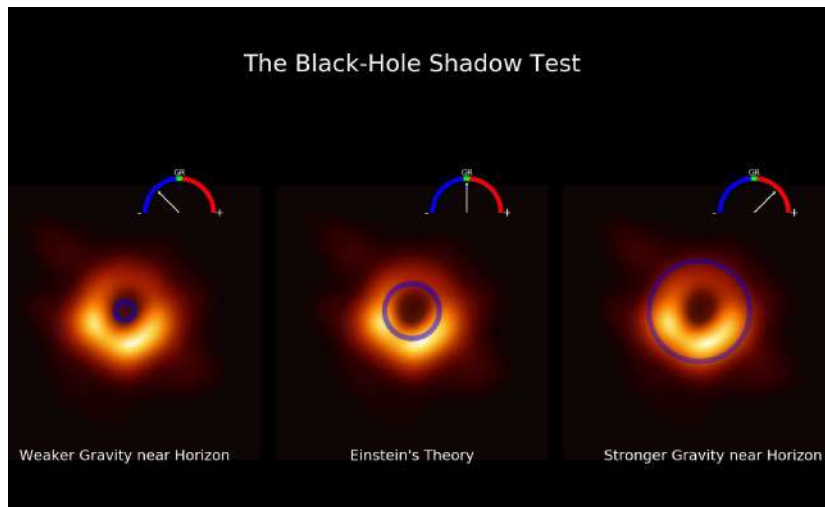
Interférométrie pour augmenter la résolution



M87* par le EHT (Avril 2019 / Septembre 2020)



Test de la relativité générale avec M87* (Octobre 2020)



mesure de la **polarisation** (mars 2021)

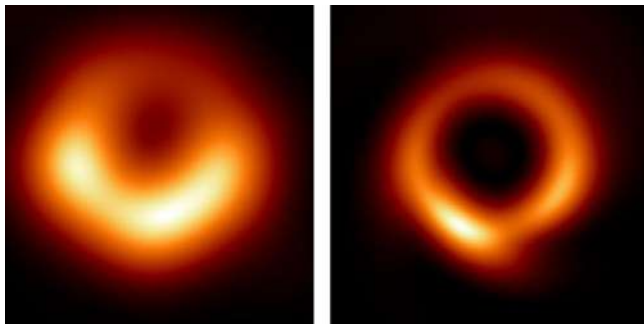
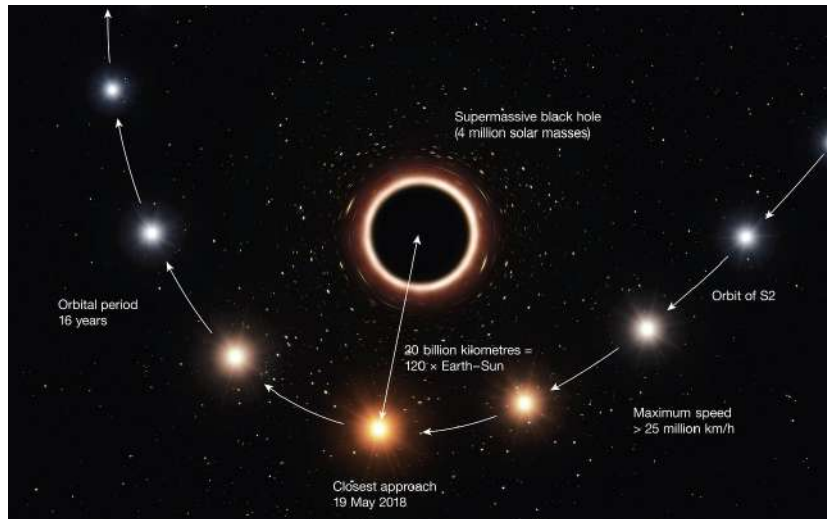
M87* par le EHT (Avril 2019 *versus* Avril 2023)

image initiale et image après analyse des données par une **IA**

Vue de l'environnement de Sgr A* par *GRAVITY* (Mai 2018)



Coalescence de trous noirs binaires et ondes gravitationnelles

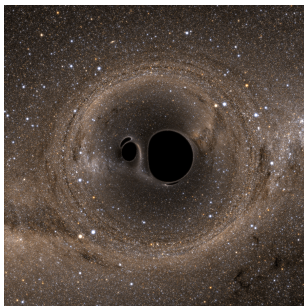
- ▶ ondes gravitationnelles (OG) $\sim$ vagues de l'espace(-temps)
- ▶ émises par des événements très énergétiques ; collisions d'objets astrophysiques compacts (TN, étoiles à neutrons, etc.) ou autres
- ▶ septembre 2015 : première détection directe par l'expérience LIGO
- ▶ remarque : plusieurs années avant les observations par l'EHT

Coalescence de trous noirs binaires et ondes gravitationnelles

- ▶ ondes gravitationnelles (OG) $\sim$ vagues de l'espace(-temps)
- ▶ émises par des **événements très énergétiques** ; collisions d'**objets astrophysiques compacts** (TN, étoiles à neutrons, etc.) ou autres
- ▶ septembre 2015 : première détection directe par l'expérience LIGO
- ▶ remarque : plusieurs années avant les observations par l'EHT

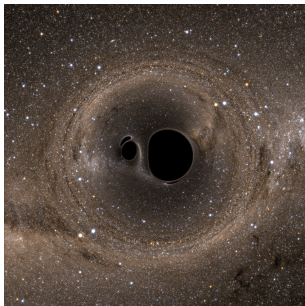
Coalescence de trous noirs binaires et ondes gravitationnelles

- ▶ ondes gravitationnelles (OG) $\sim$ vagues de l'espace(-temps)
- ▶ émises par des **événements très énergétiques** ; collisions d'**objets astrophysiques compacts** (TN, étoiles à neutrons, etc.) ou autres
- ▶ **septembre 2015** : **première détection directe** par l'expérience **LIGO**
- ▶ **remarque** : plusieurs années avant les observations par l'EHT



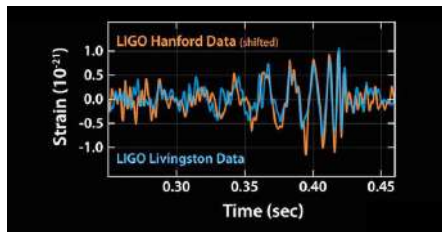
Coalescence de trous noirs binaires et ondes gravitationnelles

- ▶ ondes gravitationnelles (OG) $\sim$ vagues de l'espace(-temps)
- ▶ émises par des **événements très énergétiques** ; collisions d'**objets astrophysiques compacts** (TN, étoiles à neutrons, etc.) ou autres
- ▶ **septembre 2015** : **première détection directe** par l'expérience **LIGO**
- ▶ **remarque** : plusieurs années avant les observations par l'EHT



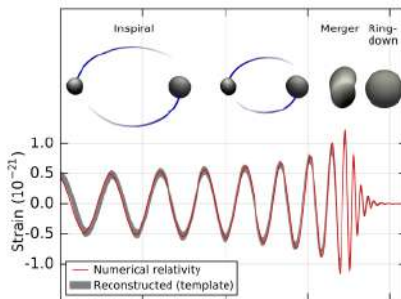
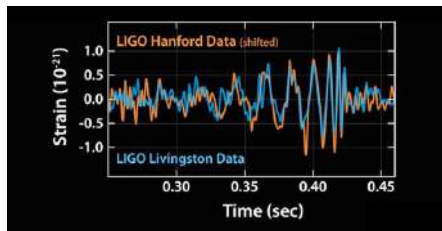
GW150914 : la première observation de la fusion de TN

- ▶ **vibration de l'espace** $\Rightarrow$ signal présenté comme un **enregistrement sonore**
- ▶ 2 TN de 36 et 29 masses solaires
- ▶ **sur Terre** : mesure d'une **variation relative** de distances $\sim$ rayon d'un noyau atomique comparé au rayon de la Terre ($\simeq 10^{-21}$)



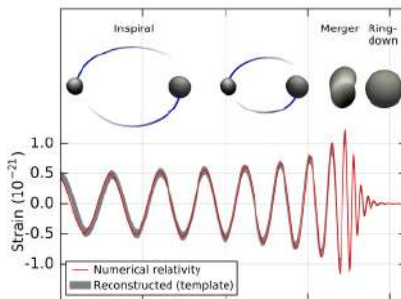
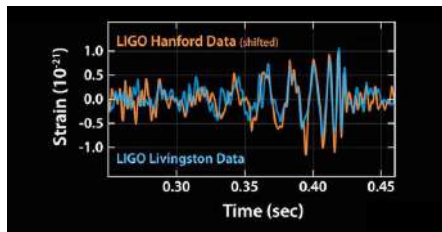
GW150914 : la première observation de la fusion de TN

- ▶ **vibration de l'espace** $\Rightarrow$ signal présenté comme un **enregistrement sonore**
- ▶ 2 TN de 36 et 29 masses solaires
- ▶ **sur Terre** : mesure d'une **variation relative** de distances $\sim$ rayon d'un noyau atomique comparé au rayon de la Terre ($\simeq 10^{-21}$)

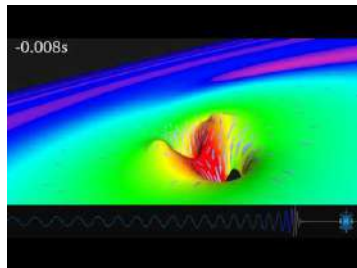


GW150914 : la première observation de la fusion de TN

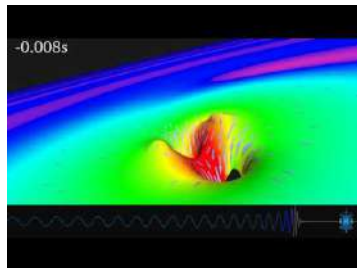
- ▶ **vibration de l'espace** $\Rightarrow$ signal présenté comme un **enregistrement sonore**
- ▶ 2 TN de 36 et 29 masses solaires
- ▶ **sur Terre** : mesure d'une **variation relative** de distances $\sim$ rayon d'un noyau atomique comparé au rayon de la Terre ($\simeq 10^{-21}$)



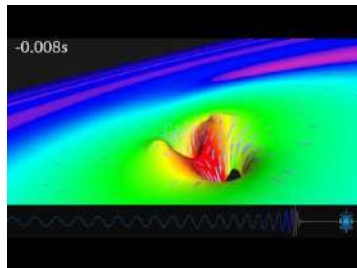
- ▶ **TN issu de la fusion** : $M \sim 62$ masses solaires
 $\Rightarrow$ 3 masses solaires émises sous la forme d'OG (= géométrie dynamique)
- ▶ luminosité à la fusion $> 10^{49}$ W
 (~ 500 milliards de fois la luminosité électromagnétique de la Voie lactée)
- ▶ analyse du signal : confirmation des prédictions de la relativité générale
 ($\sim$ TN de Kerr, avec oscillations amorties)
- ▶ par la suite : autres détecteurs en service (**Virgo**, **KAGRA**)
 $\Rightarrow$ environ 86 détections impliquant des TN (2015-2020)
- ▶ 24 mai 2023 : reprise des observations avec une plus grande « sensibilité »



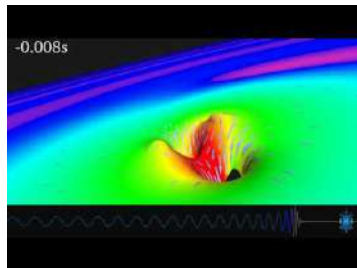
- ▶ **TN issu de la fusion** : $M \sim 62$ masses solaires
 $\implies$ 3 masses solaires émises sous la forme d'OG (= géométrie dynamique)
- ▶ **luminosité** à la fusion $> 10^{49}$ W
 (~ 500 milliards de fois la luminosité électromagnétique de la Voie lactée)
- ▶ **analyse du signal** : confirmation des prédictions de la **relativité générale**
 ($\sim$ TN de Kerr, avec oscillations amorties)
- ▶ **par la suite** : autres détecteurs en service (**Virgo, KAGRA**)
 $\implies$ environ 86 détections impliquant des TN (2015-2020)
- ▶ **24 mai 2023** : reprise des observations avec une plus grande « sensibilité »



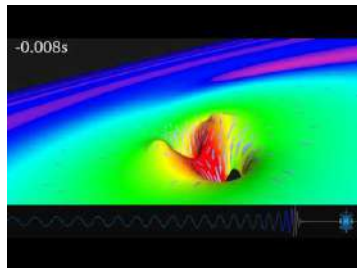
- ▶ **TN issu de la fusion** : $M \sim 62$ masses solaires
 $\Rightarrow$ 3 masses solaires émises sous la forme d'OG (= **géométrie dynamique**)
- ▶ **luminosité** à la fusion $> 10^{49}$ W
 (~ 500 milliards de fois la luminosité électromagnétique de la Voie lactée)
- ▶ **analyse du signal** : confirmation des prédictions de la **relativité générale**
 ($\sim$ **TN de Kerr**, avec **oscillations amorties**)
- ▶ **par la suite** : autres détecteurs en service (**Virgo, KAGRA**)
 $\Rightarrow$ environ 86 détections impliquant des TN (2015-2020)
- ▶ **24 mai 2023** : reprise des observations avec une plus grande « sensibilité »



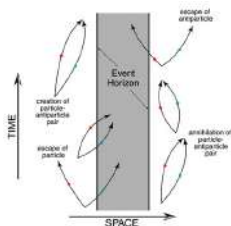
- ▶ **TN issu de la fusion** : $M \sim 62$ masses solaires
 $\Rightarrow$ 3 masses solaires émises sous la forme d'OG (= géométrie dynamique)
- ▶ **luminosité** à la fusion $> 10^{49}$ W
 (~ 500 milliards de fois la luminosité électromagnétique de la Voie lactée)
- ▶ **analyse du signal** : confirmation des prédictions de la **relativité générale**
 ($\sim$ TN de Kerr, avec oscillations amorties)
- ▶ **par la suite** : autres détecteurs en service (**Virgo, KAGRA**)
 $\Rightarrow$ environ 86 détections impliquant des TN (2015-2020)
- ▶ 24 mai 2023 : reprise des observations avec une plus grande « sensibilité »



- ▶ **TN issu de la fusion** : $M \sim 62$ masses solaires
⇒ 3 masses solaires émises sous la forme d'OG (= géométrie dynamique)
- ▶ **luminosité** à la fusion $> 10^{49}$ W
(~ 500 milliards de fois la luminosité électromagnétique de la Voie lactée)
- ▶ **analyse du signal** : confirmation des prédictions de la **relativité générale**
($\sim$ TN de Kerr, avec oscillations amorties)
- ▶ **par la suite** : autres détecteurs en service (**Virgo, KAGRA**)
⇒ environ 86 détections impliquant des TN (2015-2020)
- ▶ **24 mai 2023** : reprise des observations avec une plus grande « sensibilité »

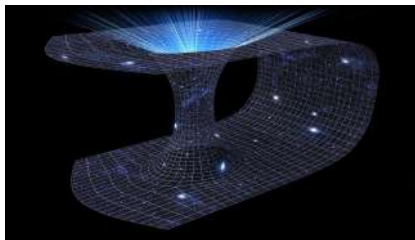


Conclusion et questions ouvertes (cf. recherche à l'IDP et ailleurs)



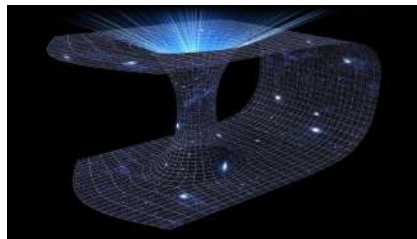
Objets « astrogéométriques » plus exotiques ?

- ▶ **relativité générale** : possibilité **théorique** de **trous blancs** et **trous de ver**
⇒ objets bien plus **spéculatifs** que les trous noirs
- ▶ pas de **scénario astrophysique réaliste** aux échelles **macroscopiques**...

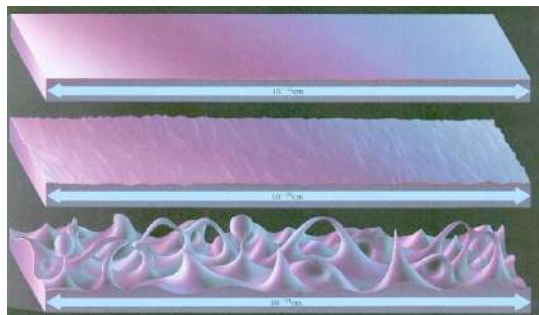


Objets « astrogéométriques » plus exotiques ?

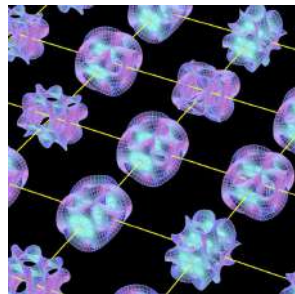
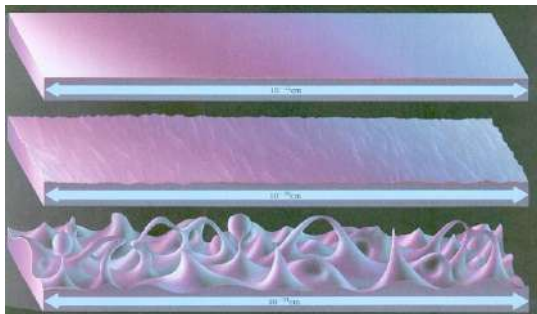
- ▶ **relativité générale** : possibilité **théorique** de **trous blancs** et **trous de ver**
⇒ objets bien plus **spéculatifs** que les trous noirs
- ▶ pas de **scénario astrophysique réaliste** aux échelles **macroscopiques**...



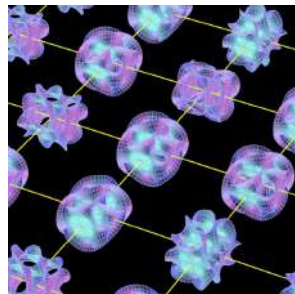
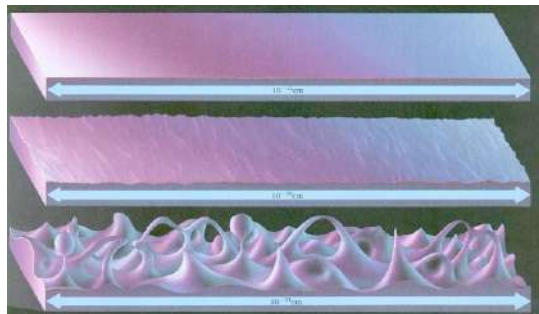
- ▶ espace-temps aux petites échelles : **gravité quantique**
 ⇒ fluctuations locales, **micro-trous blancs** et **trous de ver** (?)
- ▶ **théorie des (super)cordes** (spéculative) : **dimensions supplémentaires** ?
- ▶ théorie des cordes ⇒ $TN \sim$ « pelotes de cordes » dans un espace-temps à 10 ou 11 dimensions, mais aussi possibilité de **saturnes noirs**, etc.
- ▶ résolution du **paradoxe de l'information** :
 horizon = **frontière de l'espace-temps** (?) ⇒ **pas d'intérieur** ?



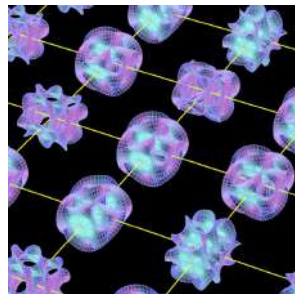
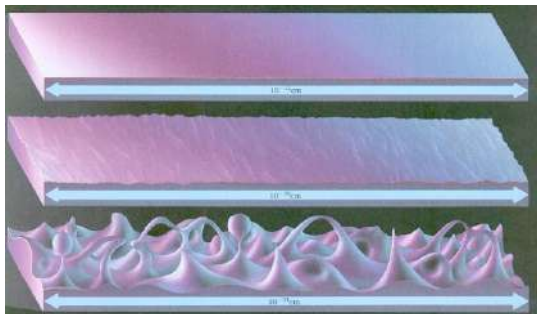
- ▶ espace-temps aux petites échelles : **gravité quantique**
 $\Rightarrow$ fluctuations locales, **micro-trous blancs** et **trous de ver** (?)
- ▶ **théorie des (super)cordes** (spéculative) : **dimensions supplémentaires** ?
- ▶ théorie des cordes $\Rightarrow$ TN $\sim$ « pelotes de cordes » dans un espace-temps à 10 ou 11 dimensions, mais aussi possibilité de **saturnes noirs**, etc.
- ▶ résolution du **paradoxe de l'information** :
horizon = **frontière de l'espace-temps** (?) $\Rightarrow$ **pas d'intérieur** ?



- ▶ espace-temps aux petites échelles : **gravité quantique**
 $\Rightarrow$ fluctuations locales, **micro-trous blancs** et **trous de ver** (?)
- ▶ **théorie des (super)cordes** (spéculative) : **dimensions supplémentaires** ?
- ▶ théorie des cordes $\Rightarrow$ TN $\sim$ « pelotes de cordes » dans un espace-temps à 10 ou 11 dimensions, mais aussi possibilité de **saturnes noirs**, etc.
- ▶ résolution du **paradoxe de l'information** :
 horizon = **frontière de l'espace-temps** (?) $\Rightarrow$ **pas d'intérieur** ?



- ▶ espace-temps aux petites échelles : **gravité quantique**
 ⇒ fluctuations locales, **micro-trous blancs** et **trous de ver** (?)
- ▶ **théorie des (super)cordes** (spéculative) : **dimensions supplémentaires** ?
- ▶ théorie des cordes ⇒ TN ~ « pelotes de cordes » dans un espace-temps à 10 ou 11 dimensions, mais aussi possibilité de **saturnes noirs**, etc.
- ▶ résolution du **paradoxe de l'information** :
 horizon = **frontière de l'espace-temps** (?) ⇒ **pas d'intérieur** ?



Physique, compréhension du monde et trous noirs

- ▶ **trous noirs** = **prédiction théorique exotique** (Michell, Laplace, Schwarzschild)
- ▶ pas pris au sérieux initialement, mais désormais **objets astrophysiques régulièrement observés**, notamment grâce à de **nombreux progrès récents expérimentaux** (interférométrie à très longue base, ondes gravitationnelles, etc.)
 - ⇒ **pas de la science-fiction !**
- ▶ sources de **questions** (et de **réponses...**) sur la **nature de l'espace-temps et de la matière**, ainsi que sur l'**évolution stellaire et galactique**
- ▶ **laboratoires naturels** pour la **physique théorique fondamentale** et l'**astrophysique**
 - ⇒ nombreuses questions ouvertes, mais progrès constants (et récents)
- ▶ illustration de la **puissances prédictive des mathématiques** :
« *la Nature parle dans le langage mathématique* » (**Galilée, 1623**)

Physique, compréhension du monde et trous noirs

- ▶ **trous noirs** = **prédiction théorique exotique** (Michell, Laplace, Schwarzschild)
- ▶ pas pris au sérieux initialement, mais désormais **objets astrophysiques régulièrement observés**, notamment grâce à de **nombreux progrès récents expérimentaux** (interférométrie à très longue base, ondes gravitationnelles, etc.)
 - ⇒ pas de la science-fiction !
- ▶ sources de **questions** (et de **réponses...**) sur la **nature de l'espace-temps et de la matière**, ainsi que sur l'**évolution stellaire et galactique**
- ▶ laboratoires naturels pour la **physique théorique fondamentale** et l'**astrophysique**
 - ⇒ nombreuses questions ouvertes, mais progrès constants (et récents)
- ▶ illustration de la **puissances prédictive des mathématiques** :
« *la Nature parle dans le langage mathématique* » (**Galilée, 1623**)

Physique, compréhension du monde et trous noirs

- ▶ **trous noirs** = **prédiction théorique exotique** (Michell, Laplace, Schwarzschild)
- ▶ pas pris au sérieux initialement, mais désormais **objets astrophysiques régulièrement observés**, notamment grâce à de **nombreux progrès récents expérimentaux** (interférométrie à très longue base, ondes gravitationnelles, etc.)
 - ⇒ **pas de la science-fiction !**
- ▶ sources de **questions** (et de **réponses...**) sur la **nature de l'espace-temps et de la matière**, ainsi que sur l'**évolution stellaire et galactique**
- ▶ laboratoires naturels pour la **physique théorique fondamentale** et l'**astrophysique**
 - ⇒ nombreuses questions ouvertes, mais progrès constants (et récents)
- ▶ illustration de la **puissances prédictive des mathématiques** :
« *la Nature parle dans le langage mathématique* » (**Galilée, 1623**)

Physique, compréhension du monde et trous noirs

- ▶ **trous noirs** = **prédiction théorique exotique** (Michell, Laplace, Schwarzschild)
- ▶ pas pris au sérieux initialement, mais désormais **objets astrophysiques régulièrement observés**, notamment grâce à de **nombreux progrès récents expérimentaux** (interférométrie à très longue base, ondes gravitationnelles, etc.)
 - ⇒ **pas de la science-fiction !**
- ▶ sources de **questions** (et de **réponses...**) sur la **nature de l'espace-temps et de la matière**, ainsi que sur l'**évolution stellaire et galactique**
- ▶ **laboratoires naturels** pour la **physique théorique fondamentale** et l'**astrophysique**
 - ⇒ nombreuses questions ouvertes, mais progrès constants (et récents)
- ▶ illustration de la **puissances prédictive des mathématiques** :
« *la Nature parle dans le langage mathématique* » (**Galilée, 1623**)

Physique, compréhension du monde et trous noirs

- ▶ **trous noirs** = **prédiction théorique exotique** (Michell, Laplace, Schwarzschild)
- ▶ pas pris au sérieux initialement, mais désormais **objets astrophysiques régulièrement observés**, notamment grâce à de **nombreux progrès récents expérimentaux** (interférométrie à très longue base, ondes gravitationnelles, etc.)
 - ⇒ **pas de la science-fiction !**
- ▶ sources de **questions** (et de **réponses...**) sur la **nature de l'espace-temps et de la matière**, ainsi que sur l'**évolution stellaire et galactique**
- ▶ **laboratoires naturels** pour la **physique théorique fondamentale** et l'**astrophysique**
 - ⇒ nombreuses questions ouvertes, mais progrès constants (et récents)
- ▶ illustration de la **puissances prédictive des mathématiques** :
« *la Nature parle dans le langage mathématique* » (**Galilée, 1623**)

Physique, compréhension du monde et trous noirs

- ▶ **trous noirs** = **prédiction théorique exotique** (Michell, Laplace, Schwarzschild)
- ▶ pas pris au sérieux initialement, mais désormais **objets astrophysiques régulièrement observés**, notamment grâce à de **nombreux progrès récents expérimentaux** (interférométrie à très longue base, ondes gravitationnelles, etc.)
 - ⇒ **pas de la science-fiction !**
- ▶ sources de **questions** (et de **réponses...**) sur la **nature de l'espace-temps et de la matière**, ainsi que sur l'**évolution stellaire et galactique**
- ▶ **laboratoires naturels** pour la **physique théorique fondamentale** et l'**astrophysique**
 - ⇒ nombreuses questions ouvertes, mais progrès constants (et récents)
- ▶ illustration de la **puissances prédictive des mathématiques** :
« *la Nature parle dans le langage mathématique* » (**Galilée, 1623**)

Quelques références (~ difficulté croissante)

- ▶ N. Deruelle & J-P. Lasota, *Les ondes gravitationnelles* (Odile Jacob, 2018)
- ▶ T. Damour, *Si Einstein m'était conté* (Flammarion, 2016)
- ▶ S. Collin-Zahn, *Des quasars aux trous noirs* (EDP Sciences, 2009)
- ▶ J. Eisenstaedt, *Einstein et la relativité générale* (CNRS Éditions, 2007)
- ▶ JP. Lasota, *La Science des trous noirs* (Odile Jacob, 2010)
- ▶ JP. Luminet, *Le destin de l'univers : Trous noirs et énergie sombre* (Fayard, 2010)
- ▶ JP. Luminet, *L'écume de l'espace-temps* (Odile Jacob, 2020)
- ▶ L. Susskind, *Trous noirs* (Folio, 2012)
- ▶ K. Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps* (Flammarion, 1997)

Quelques liens/vidéos

- ▶ **lentille gravitationnelle** :
<https://www.youtube.com/watch?v=tU0J0mfHGWw>
- ▶ **vidéo d'A. Riazuelo** : <http://www2.iap.fr/users/riazuelo/bh/index.html>
- ▶ **trou noir au centre de la Galaxie** :
<https://www.youtube.com/watch?v=duoHtJpo4GY>
- ▶ **autour de M87*** : <https://www.youtube.com/watch?v=ppJtZHFmHLA>
- ▶ **GRAVITY** :
<https://lesia.obspm.fr/Gravity-une-nouvelle-balance-pour.html>
- ▶ **présentation (en français) de GW150914** : <http://www.ligo.org/science/Publication-GW150914/science-summary-french.pdf>
- ▶ **« son gravitationnel » de GW150914** :
<https://www.youtube.com/watch?v=TWqhUANNFXw>
- ▶ **GW150914** : voir <http://www.black-holes.org/gw150914>
- ▶ **masse intermédiaire** : <https://lejournel.cnrs.fr/articles/les-trous-noirs-nouveaux-sont-arrives>