

Un peu de Science pour comprendre le monde moderne

Les 2 infinis

Bernard Remaud

bernard.remaud@univ-nantes.fr
<https://www.un-peu-de-physique.fr>



La chaîne YouTube



Le blog

Ch 3b

L'espace-temps

Notre univers

1

Cette œuvre est sous licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 4.0 International.

L'arpentage de l'Univers

Conséquence de la relativité restreinte

Effet Doppler relativiste

$$\lambda_{recu} = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} \lambda_{emis} = (1 + z) \lambda_{emis}$$

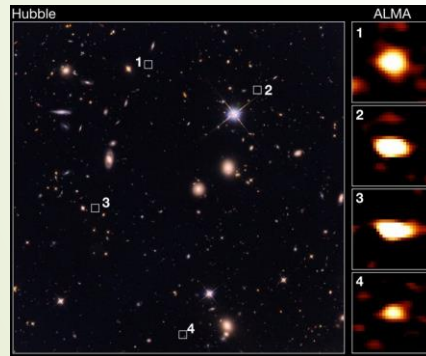
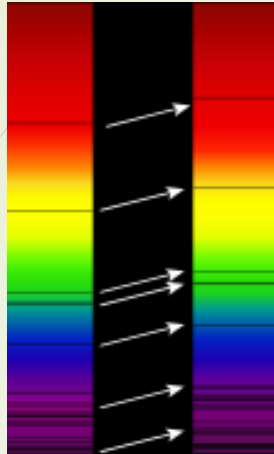
λ_{emis} longueur d'onde émise par la source

$\lambda_{reçu}$ longueur d'onde mesurée à la réception

Par convention, $v > 0$, la source s'éloigne du récepteur, sinon $v < 0$.

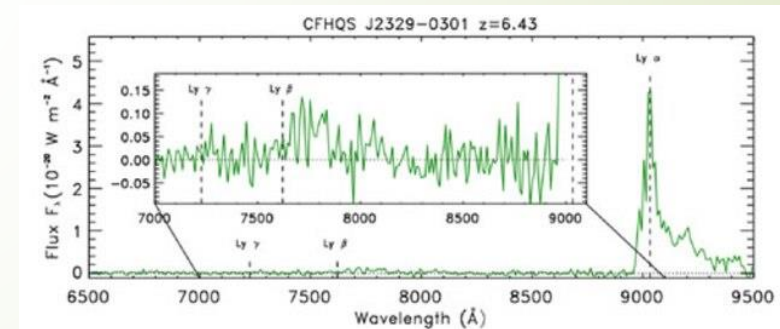
Si la source s'éloigne de l'observateur, il y a un décalage vers les grandes longueurs d'onde (vers le rouge) de la lumière reçue

Décalage vers le rouge
Wikipédia – By Georg Wiora - CC BY-SA 3.0



by ESA/Hubble & NASA –Public domain

Un record ?
 $z=6,45$

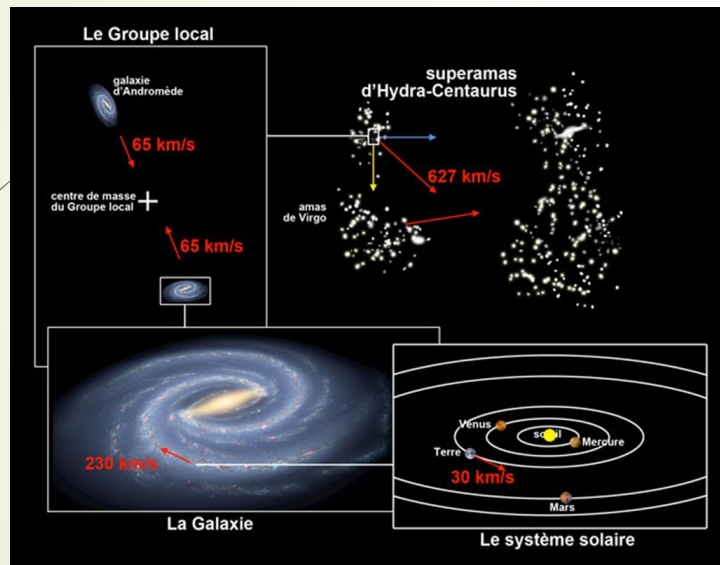


International Gemini Observatory/NOIRLab/NSF/AURA
CC A 4.0

Les « chandelles » standard du cosmos : les céphéides

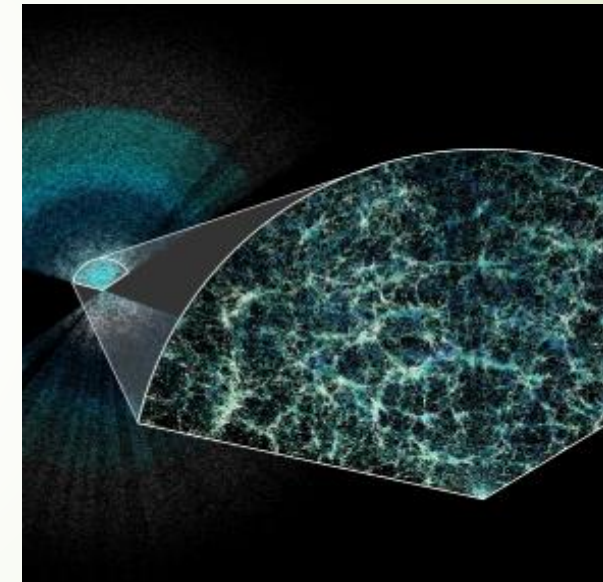
Étoiles de luminosité variable selon une période qui est lié à leur luminosité absolue
(Henrietta Leavitt, dans les années 1910-1920)

Loi de Hubble, reliant vitesse d'expansion et distance (voir plus loin)



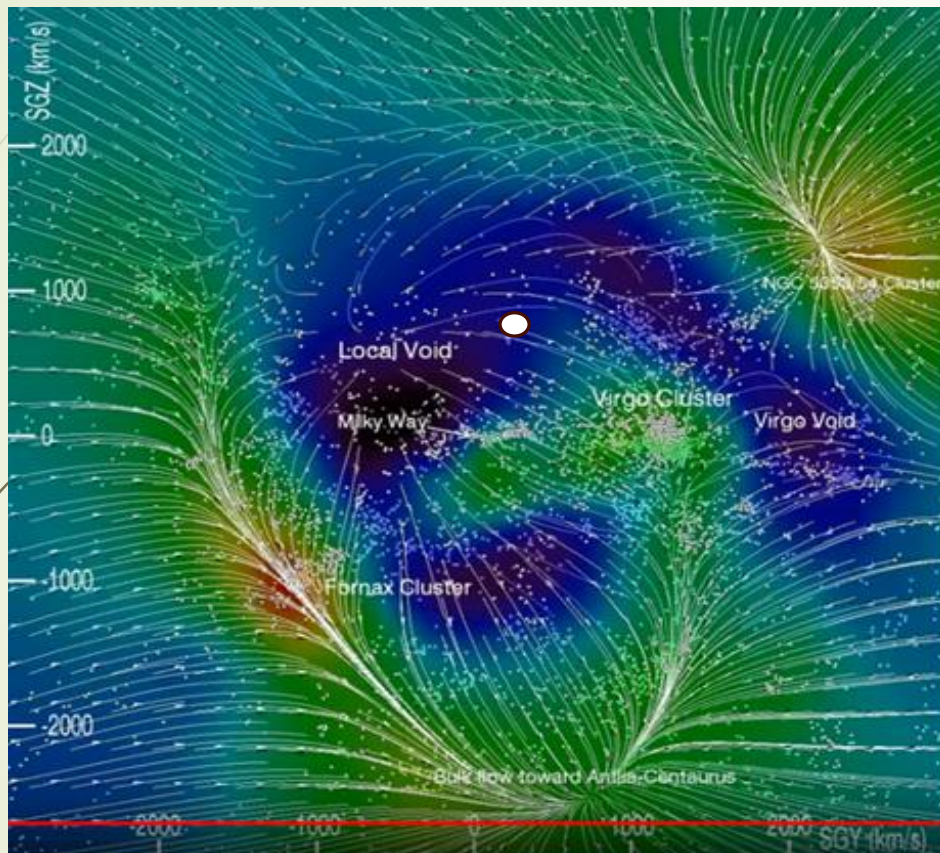
Vitesse de la Terre par rapport aux structures de l'Univers

By Astrophysique sur mesure /Gilles Bessou



Carte 3D de l'Univers proche

by Claire Lamman/[DESI collaboration](#)



Notre place dans l'univers

Crédit : H. Courtois, D. Pomarède/planetastronomy.com

Crédit : H. Courtois, D. Pomarède ; SDvision



En résumé

6

- Grâce à l'effet Doppler relativiste et à des « chandelles » (céphéides) de référence, il est désormais possible d'arpenter l'univers de manière précise

Les trous noirs

La courbure de l'espace-temps près d'un corps de grande masse



De l'espace plat

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dl^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2) \text{ à l'infini}$$

À l'espace courbe de la relativité générale (**direction radiale**)

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{r_s}{r}}, \text{ avec } r_s = \frac{2Gm}{c^2}$$

- r est un paramètre de type distance, qui n'est pas identique à une distance mesurée
- r_s est le rayon de Schwarzschild, qui n'est pas le rayon du corps.

Que se passe-t-il si $r \rightarrow r_s$?

Singularité dans la métrique ?

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dl^2}{1 - \frac{r_s}{r}}$$

r_s est l'**horizon** des événements.

Pas singularité physique :

$$(t, r) \rightarrow (v, r) \text{ avec } v = ct + r + r_s \ln \left| \frac{r}{r_s} - 1 \right|, \text{ (Eddington-Finkelstein)}$$

On obtient une métrique qui n'a aucune singularité autour de r_s (sauf $r = 0$)

$$c^2 ds^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) dv^2 - 2dv dr \text{ (direction radiale)}$$

Les horloges ralentissent indéfiniment en se rapprochant de la limite r_s (pour un observateur lointain) :

$$t_0 = t_f \sqrt{1 - \frac{r_s}{r}}$$

Si $r \rightarrow r_s$ alors $t_0 \rightarrow 0$

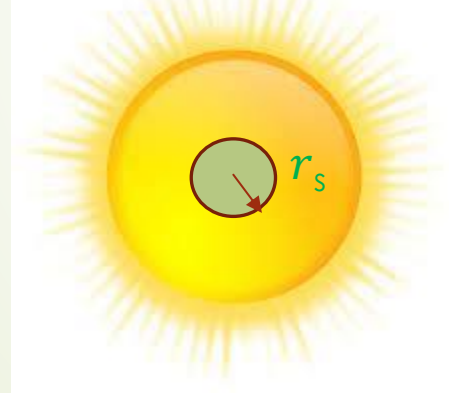
À des distances proches du rayon de Schwarzschild r_s , le **temps se fige** (pour un observateur extérieur), la courbure de l'espace est infinie (**rayon de courbure infiniment petit**).

Dans la plupart des cas (Terre, Soleil, ...), la limite de Schwarzschild est virtuelle : elle est à l'intérieur de l'astre.

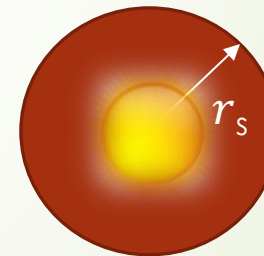
A l'extérieur de l'astre, l'espace est courbe et dévie la lumière (sans la capturer).

Si la densité d'énergie devient très, très grande, ou si la masse devient très grande : le rayon de Schwarzschild est extérieur à l'astre → un trou noir

Un astre ordinaire – le soleil



Un trou noir



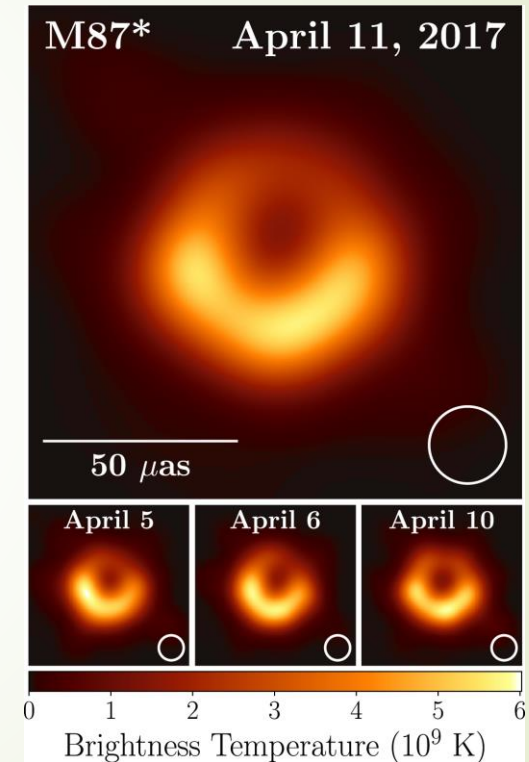
Si la densité d'énergie devient très, très grande, ou si la masse devient très grande : la **courbure** de l'espace peut devenir **infinie**



Dossier trou noir : fr.u-paris.fr/

2017 – première « **observation** » d'un trou noir »
Transposition dans le visible des signaux « **radio** » obtenus, par interférométrie de plusieurs observatoires répartis sur la Terre.

Les fausses couleurs donnent des **échelles de la température** du disque d'accrétion



Visualisation du trou noir M87*
By The Event Horizon Telescope Collaboration CC A 4.0

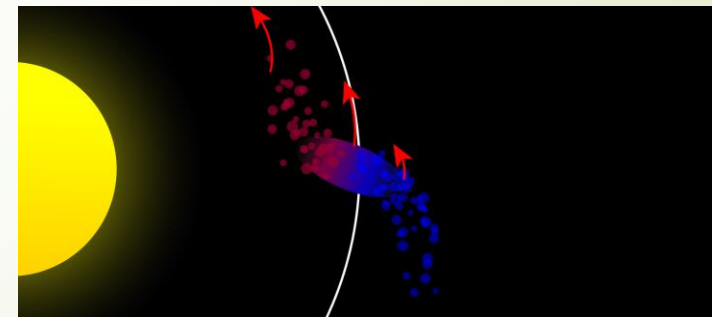
La limite (ou horizon) de Schwarzschild $r_s = \frac{2Gm}{c^2}$

- Vitesse d'échappement (ou de libération) **plus grande que c** , la vitesse de la lumière. Toute matière, énergie ou information passant la limite r_s devient **inaccessible à tout observateur extérieur**.
- Ce n'est **pas une discontinuité physique** : permutation du rôle des variables d'espace et de temps

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{r_s}{r}}$$

- **Prolongement analytique** : métrique de Kruskal- Szekeres → trou blanc

Le problème majeur au voisinage de r_s : **effet de marée (limite de Roche)**



Spaghettification près d'un trou noir
Theresa Knott at the English Wikipedia CC A SA 3.0

Un trou noir est un corps « simple », 3 paramètres :

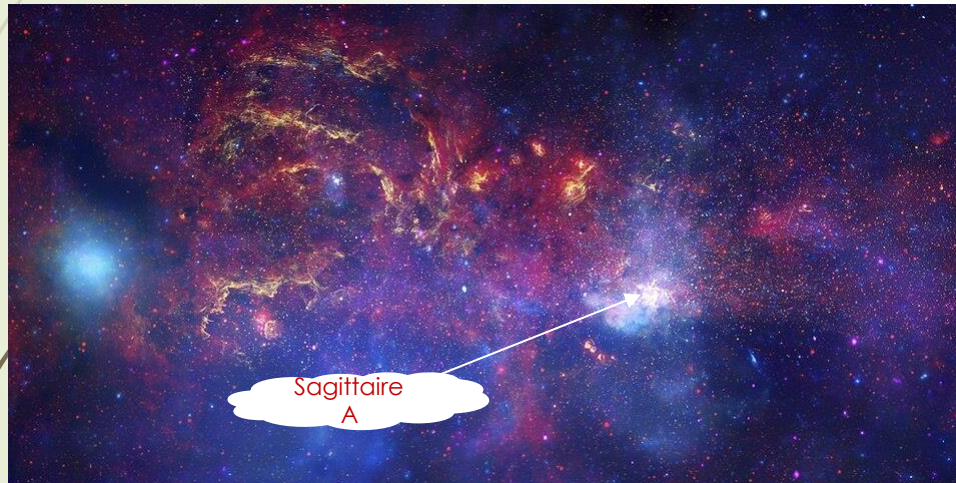
- Sa masse
- Son moment angulaire (il tourne)
- Sa charge électrique (éventuellement)

Et si la Terre ou le Soleil devenait un trou noir...

Objet céleste	Masse	Rayon réel	Rayon de Schwarzschild
Terre	$6 \cdot 10^{24}\text{kg}$	6 000 km	0,9 cm
Soleil	$2 \cdot 10^{30}\text{kg}$	70 000 km	3 km

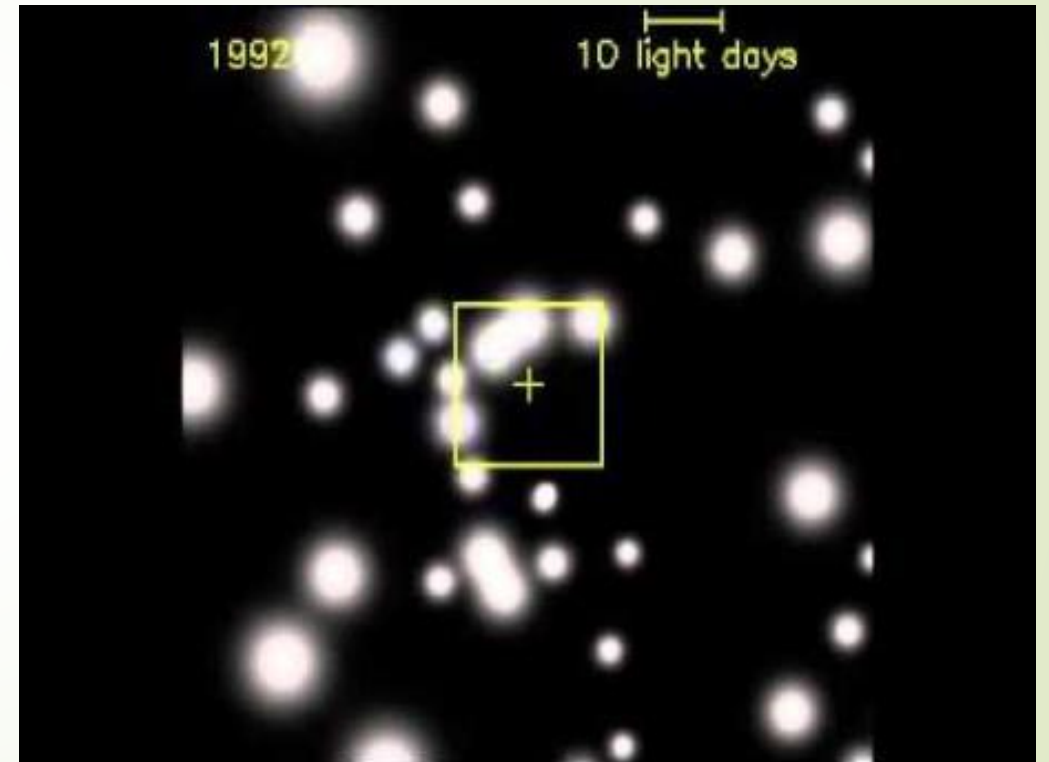
Si le soleil était un trou noir, rien ne serait changé pour l'**orbite** de la Terre (sauf l'éclairement)

Au centre de notre Voie Lactée, un immense trou noir
4 millions de fois la masse du Soleil



Région centrale de la Voie Lactée

Crédit NASA/JPL-Caltech/ESA/CXC/STScI – public domain



Trou Noir de la Voie lactée

youtube.com/u_gggKHvfGw

La fabrique des trous noirs :

- **Les trous noirs stellaires** (effondrement sur elles-mêmes des étoiles massives) de 5 à quelques dizaines de masses solaires. **Ils sont très denses.**
- **Les trous noir (super) massifs** du million à plusieurs dizaines de milliards de masse solaires. La majeure des galaxies en a un à leur centre. **Très peu denses (densité de l'eau)**
- **Les trous noirs primordiaux** (hypothétiques) formés à **la genèse de l'univers.**

Type de trou noir	Masse (soleil)	Rayon de Schwarzschild	Masse volumique
Terre	$3 \cdot 10^{-6}$	0,9 cm	$1,5 \cdot 10^{30} \text{ kg/m}^3$
Soleil	1	3 km	$1,7 \cdot 10^{19} \text{ kg/m}^3$
Trou noir stellaire	10^2	300 km	$1,7 \cdot 10^{15} \text{ kg/m}^3$
Trou noir massif	10^9	$3 \cdot 10^9 \text{ km}$	17 kg/m^3

Pour passer plus de 30 minutes autour d'un trou noir

6' Le trou noir de la voie lactée

20'50 la courbure de l'espace

24', 26:30, 28', 29:30, orbite autour d'un trou noir



youtube.com/GWRzVyX53ZU

Les trous noirs et l'entropie ?

Les trous noirs violent-ils le principe de croissance globale de l'entropie de l'Univers

L'entropie d'un trou noir (Bekenstein-Hawking)

$$S = \frac{\pi}{2} k_B \frac{c^3}{hG} A$$

Une des plus belles formules de la physique

L'entropie est proportionnelle à l'aire de la sphère de rayon $r_s = \frac{2Gm}{c^2}$ (Schwarzschild)
donc proportionnelle au carré de la masse

Dans un processus d'absorption de matière ou de fusion de 2 trous noirs : l'entropie croît.

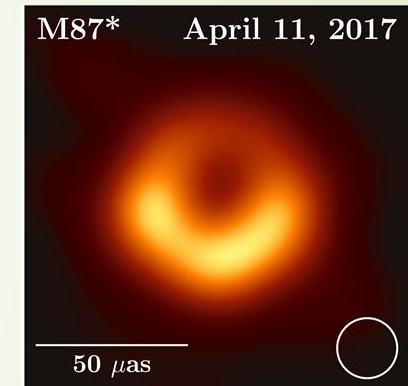
Dans un trou noir isolé, l'entropie est-elle constante ?

$$T = \frac{hc^3}{16\pi^2 k_B G M} \quad (\text{Température de Hawking})$$

C'est très froid : un trou noir de masse solaire $T \rightarrow 0,12 \mu\text{K}$ ($0,12 \cdot 10^{-6} \text{ K}$)

Donc un trou noir rayonne, et s'évapore en libérant son entropie (multipliée par 7)
Wikipédia

Comprendre le monde ... les deux infinis



By The Event Horizon Telescope
Collaboration CC A 4.0

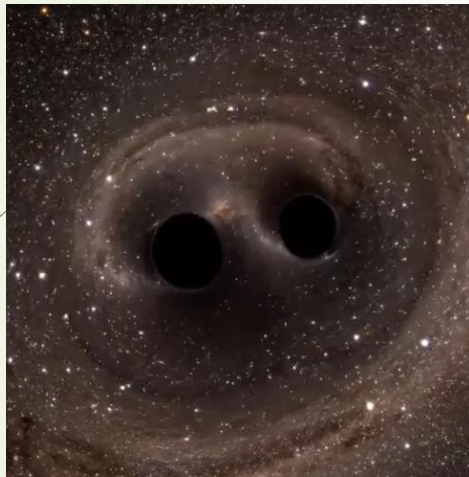
Vrai ou faux

- 1 - Les trous noirs sont extrêmement denses
- 2 - L'attraction (gravitationnelle) d'un trou noir est énorme
- 3 - La vitesse de libération (nécessaire pour échapper à l'attraction) d'un trou noir est infinie
- 4 - La limite de Schwarzschild est un mur infranchissable
- 5 - Les trous noirs ne meurent jamais
- 6 - Les trous noirs sont indétectables
- 7 - Les trous noirs aspirent toute la matière qui les entoure
- 8 - Les lois de thermodynamique ne s'appliquent pas aux trous noirs
- 9 - L'entropie d'un trou noir est très basse
- 10 - Si l'on tombait dans un trou noir, à la limite de Schwarzschild, on reverrait toute notre vie en un éclair

Les réponses la fin de la représentation

- Grâce à l'effet Doppler relativiste et à des « chandelles » (céphéides) de référence, il est désormais possible d'arpenter l'univers de manière précise
- Les trous noirs sont les manifestations ultimes de la courbure de l'espace-temps près des objets (très) massifs

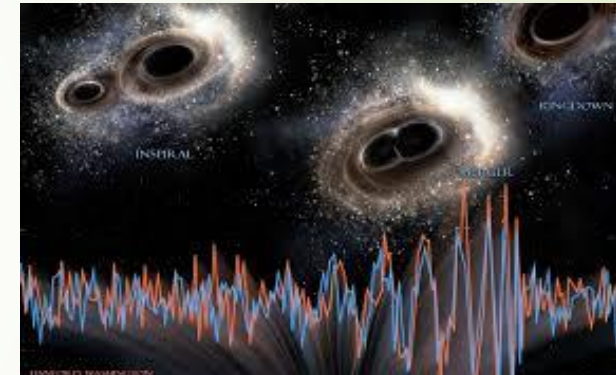
Selon la Relativité Générale : *de même que les ondes électromagnétiques (voir cours sur les ondes, lumière, ondes radio, rayons X, etc.) sont produites par les particules chargées accélérées, les ondes gravitationnelles seraient produites par des masses accélérées et se propageraient à la vitesse de la lumière dans le vide* (Wikipedia).



Fusion de deux trous noirs (simulation)

Vidéo - TrustMyScience.com – source laboratoire Logo

Lorsque 2 trous noirs fusionnent : ils déforment l'espace-temps et émettent un train d'ondes gravitationnelles (Mode quadripolaire)



Comparaison expérience-théorie du signal

Futura-Sciences.com © Ligo, nsf, Aurore Simonnet

Première observation en 2015

- Fusion de 2 trous noirs à plus d'un milliard d'années-lumière.
- L'énergie dissipée : plusieurs masses solaires



Observatoire d'ondes gravitationnelles - Virgo
(Europe – Italie)

The Virgo Collaboration – Public domain

Effet (exagéré) des ondes gravitationnelles

LIGO Lab Caltech : MIT



Les sources des ondes, observées jusqu'ici, sont très éloignées, leurs effets sont minimes.

Un cercle de la taille de la Terre subirait une déformation d'environ 10^{-18} m, soit mille fois plus petite qu'un atome (Wikipedia)

- Grâce à l'effet Doppler relativiste et à des « chandelles » (céphéides) de référence, il est désormais possible d'arpenter l'univers de manière précise
- Les trous noirs sont les manifestations ultimes de la courbure de l'espace-temps près des objets (très) massifs
- Les interactions violentes (collision, fusion) entre objets massifs –comme les trous noirs– est à l'origine d'ondes gravitationnelles, prévues par la théorie d'Einstein et désormais, observées expérimentalement.

L'Univers en équations

De l'équation d'Einstein découlent des modèles d'évolution d'Univers

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

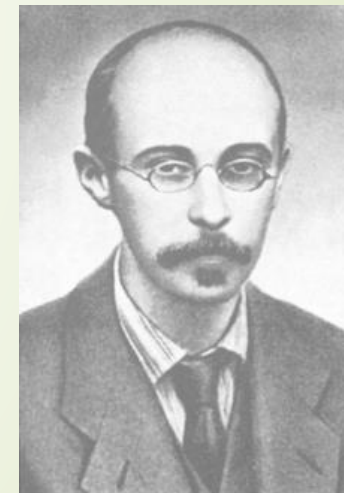
Λ est une constante (introduite par Einstein) qui conditionne la stabilité de l'univers (stable, en expansion perpétuelle ou cyclique)

L'équation d'Einstein définit les propriétés de l'Univers à l'échelle locale

Hypothèse : l'Univers est homogène et isotrope

→ Équations de Friedmann-Lemaître pour l'Univers

Équations décrivant l'évolution au cours du temps de la courbure globale de l'Univers et donc son histoire



Alexander Friedmann
Wikipédia- Public domain

De l'équation d'Einstein découlent des modèles d'évolution d'Univers

Comportement monotone d'un univers homogène au cours du temps

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 dl^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

$a(t)$ est le facteur d'échelle cosmologique :

$a(t) > 0$ univers en expansion, $a(t) < 0$ en compression, $a(t) = 0$ stable

La « constante » de Hubble $H_0 = \frac{1}{a(t)} \frac{da(t)}{dt} \Rightarrow a(t) = a(t_0) e^{H_0(t-t_0)}$, si H_0 est constant

Actuellement, $H_0 \simeq 70 \text{ km.s}^{-1}/\text{Mpc}$, soit environ $21,5 \cdot 10^{-6} \text{ km.s}^{-1}/\text{al}$ (al=année-lumière)

H_0 détermine la vitesse d'éloignement réciproque, actuelle, de 2 objets cosmologiques (galaxies) de distance relative d : $v = H_0 d$.

Ainsi, la galaxie d'Andromède est située à 2,5 millions d'années-lumière de la Voie Lactée : elles s'éloignent l'une de l'autre à 54 km/s ; vitesse qui se conjugue avec leur mouvement local (selon lequel elles se rapprochent)



Équation d'Einstein → Équation(s) de Friedmann

$$H^2 + \frac{K c^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho(a)$$

Taux d'expansion de
l'univers (constante
de Hubble)

Courbure **moyenne**
de l'univers (C^{te}
cosmologique)

Densité **moyenne**
d'énergie de l'univers

Cas particuliers :

- Énergie noire (ni matière, ni radiation)
- Univers de poussière (matière)
- Univers de radiations

$$\frac{a(t)}{a_0} \simeq e^{H_0(t-t_0)}$$

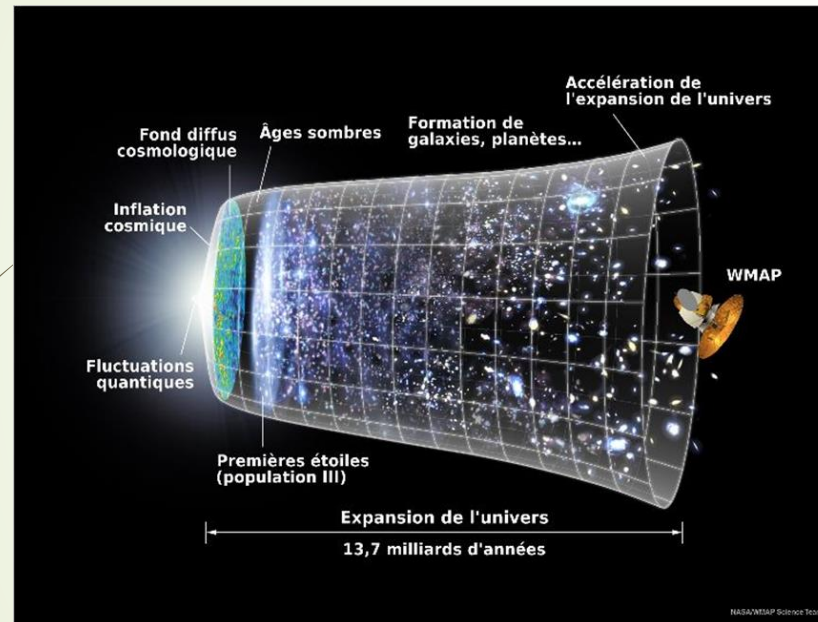
$$\frac{a(t)}{a_0} \simeq \left(\frac{t}{t_0}\right)^{\frac{2}{3}}$$

$$\frac{a(t)}{a_0} \simeq \left(\frac{t}{t_0}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Suivant les différents stades de l'évolution de l'Univers, la « constante » de Hubble a évolué ; actuellement elle semble dominée par l'énergie noire. (Wikipédia)

- Grâce à l'effet Doppler relativiste et à des « chandelles » (céphéides) de référence, il est désormais possible d'arpenter l'univers de manière précise
- Les trous noirs sont les manifestations ultimes de la courbure de l'espace-temps près des objets (très) massifs
- Les interactions violentes (collision, fusion) entre objets massifs –comme les trous noirs– est à l'origine d'ondes gravitationnelles, prévues par la théorie d'Einstein et désormais, observées expérimentalement.
- Avec l'hypothèse de l'uniformité et de l'isotropie cosmologique, il est possible de déduire de l'équation d'Einstein, l'équation d'état de l'Univers reliant sa densité, sa courbure moyenne et son taux d'expansion

D'après les données actuelles, l'Univers a une « origine » : extrêmement dense et chaud, il y a 13,4 milliards d'années

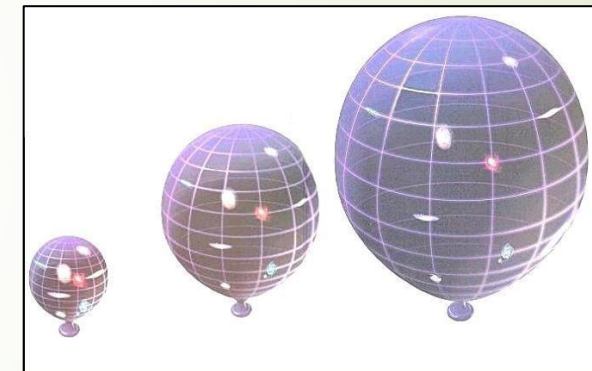


Visualisation de l'expansion de l'Univers

Wikipédia – domaine public

Une expansion de l'espace-temps c'est la **métrique qui change**

(Big bang à 2 dimensions : image d'un ballon que l'on gonfle)



Expansion d'un univers à 2 dimensions

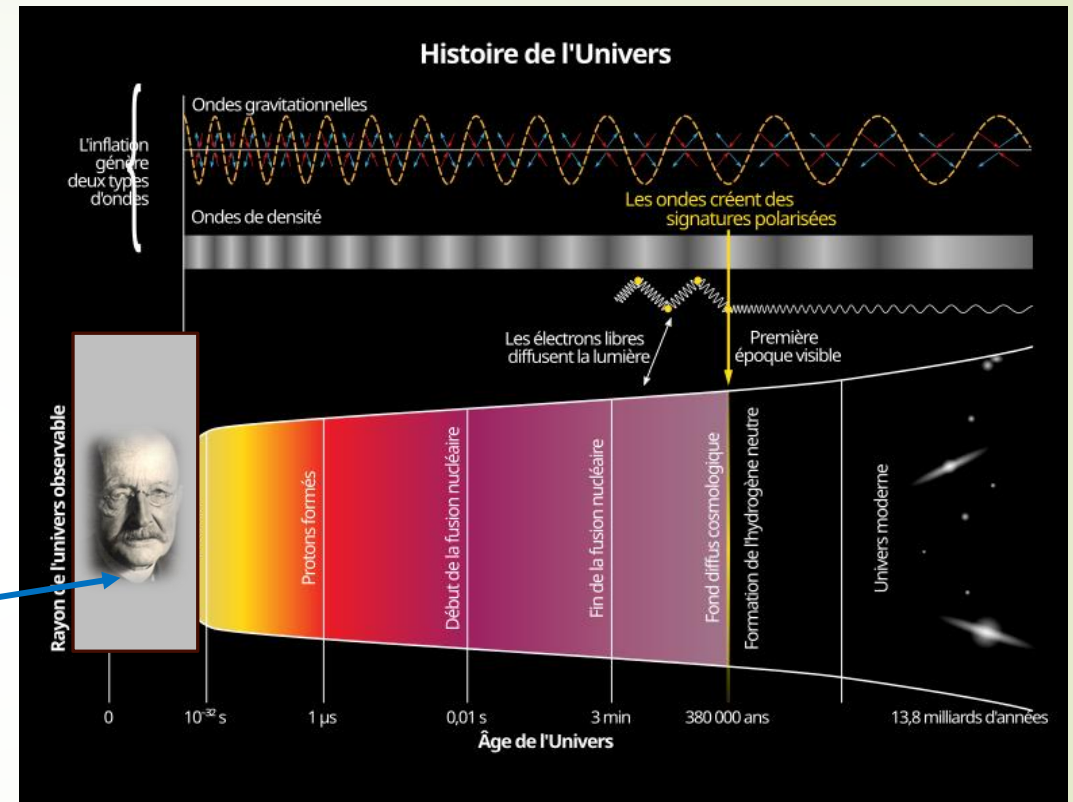
Observatoire de Paris -Crédit : James N. Imamura of U. of Oregon

Voir aussi la [vidéo](#) du CEA sur l'histoire de l'Univers

Le début de cette histoire est masqué – actuellement – par les limites de nos modèles

Quantique $\leftrightarrow$ Relativité

« Mur » de Planck
 $t < 10^{-42}$ sec
 $T \approx 2 \cdot 10^{28}$ K(elvin)
 $L \approx 1,6 \cdot 10^{-36}$ m



Frise de l'histoire de l'Univers

Wikipédia, National Science Foundation – CC A SA 3.0
 Et Max Planck – Public domain

Échelle de temps propre : extraordinairement ralenti par rapport à une « horloge » externe.

- Grâce à l'effet Doppler relativiste et à des « chandelles » (céphéides) de référence, il est désormais possible d'arpenter l'univers de manière précise
- Les trous noirs sont les manifestations ultimes de la courbure de l'espace-temps près des objets (très) massifs
- Les interactions violentes (collision, fusion) entre objets massifs –comme les trous noirs– est à l'origine d'ondes gravitationnelles, prévues par la théorie d'Einstein et désormais, observées expérimentalement.
- Avec l'hypothèse de l'uniformité et de l'isotropie cosmologique, il est possible de déduire de l'équation d'Einstein, l'équation d'état de l'Univers reliant sa densité, sa courbure moyenne et son taux d'expansion
- Ces équations sont à la base du modèle dit du « Big Bang », modèle décrivant l'évolution de l'Univers à partir d'une phase extrêmement dense et chaude

- Grâce à l'effet Doppler relativiste et à des « chandelles » (céphéides) de référence, il est désormais possible d'arpenter l'univers de manière précise
- Les trous noirs sont les manifestations ultimes de la courbure de l'espace-temps près des objets (très) massifs
- Les interactions violentes (collision, fusion) entre objets massifs –comme les trous noirs– est à l'origine d'ondes gravitationnelles, prévues par la théorie d'Einstein et désormais, observées expérimentalement.
- Avec l'hypothèse de l'uniformité et de l'isotropie cosmologique, il est possible de déduire de l'équation d'Einstein, l'équation d'état de l'Univers reliant sa densité, sa courbure moyenne et son taux d'expansion
- Ces équations sont à la base du modèle dit du « Big Bang », modèle décrivant l'évolution de l'Univers à partir d'une phase extrêmement dense et chaude
- L'ère de Planck définit l'étape de l'évolution initiale de l'univers pendant lesquelles les théories physiques actuelles ne s'appliquent pas.

L'entropie de l'Univers était initialement très basse (valeur ?)

Ses principales composantes sont :

- Les trous noirs super massifs (SMBH)
- Les trous noirs stellaires
- Les photons et neutrinos
- La matière noire (CDM)
- Les gravitons (?)
- La matière interstellaire (ISM) ou intergalactique (IGM)
- La matière des étoiles

Mise à part l'entropie des trous noirs et de la matière stellaire l'entropie est relativement stable depuis les premiers instants de l'univers.

Entropie des trous noirs (échelle gauche)

Entropie des gaz, des étoiles et de la matière noire

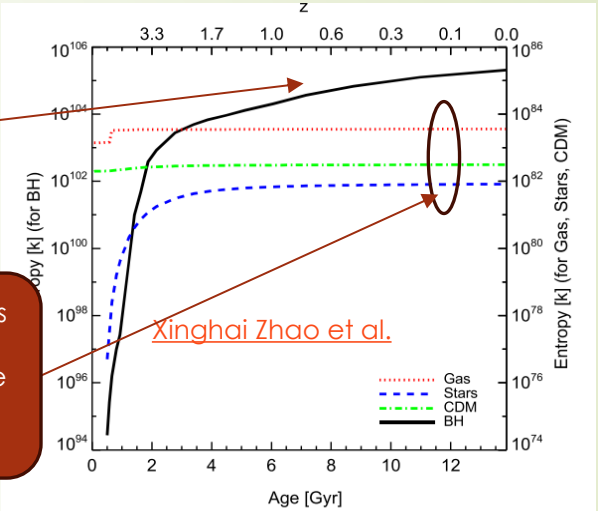
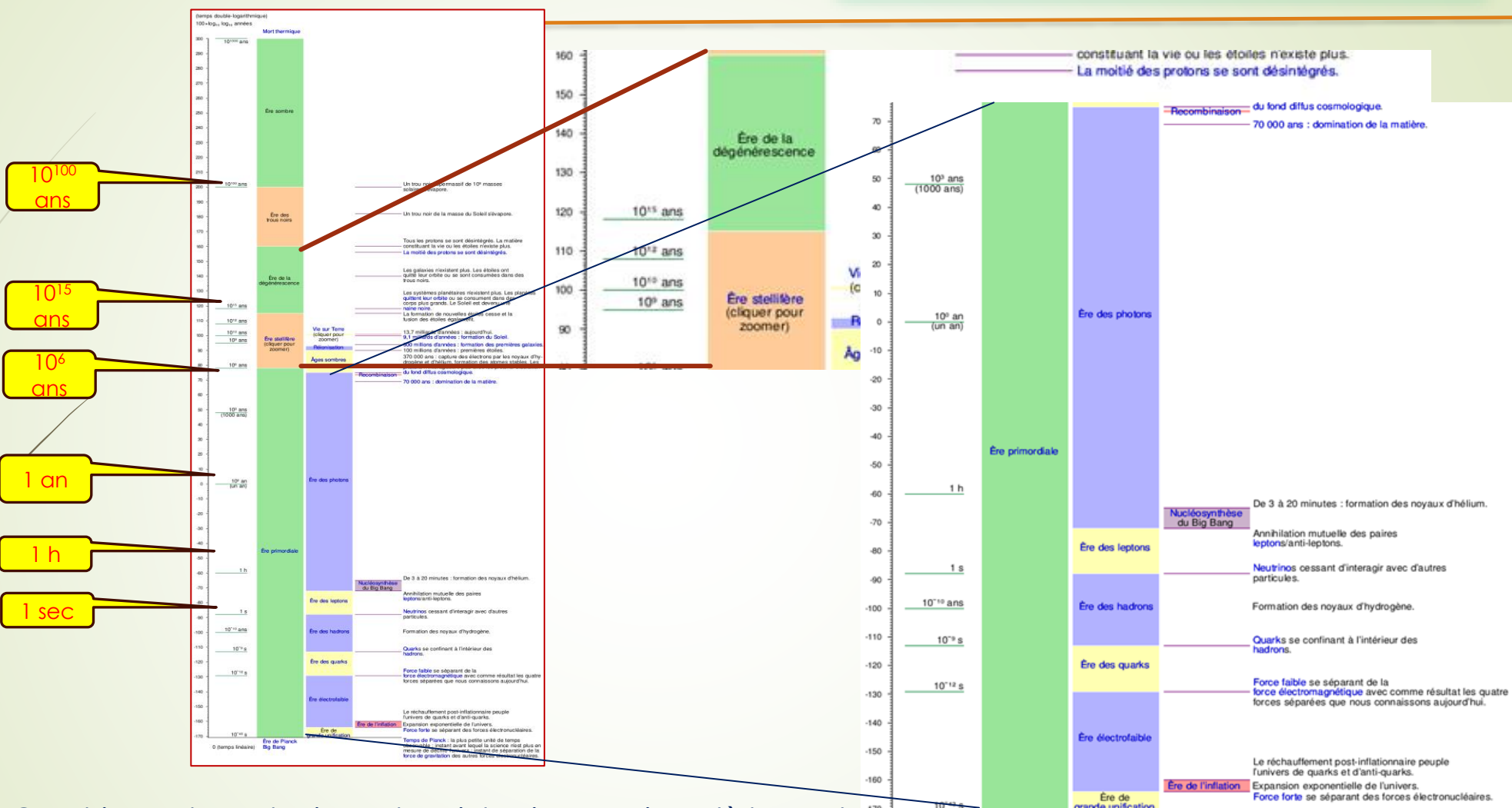


Figure 3. The evolution history of the entropy of the gas, stars, DM and BHs in the Universe. Note the different scales on the left and right axes. The left y-axis corresponds to the BH entropy, while the right y-axis corresponds to the gas, star and DM entropy.

Dans les systèmes fermés, la flèche du temps est liée à la croissance de l'entropie. Si l'univers a une histoire, elle est liée à croissance de son entropie

C.A. Egan et al.

CURRENT ENTROPY OF THE OBSERVABLE UNIVERSE (SCHEME 1)		
Component	Entropy Density $s [k m^{-3}]$	Entropy $S [k]$
SMBHs	$8.4^{+8.2}_{-4.7} \times 10^{23}$	$3.1^{+3.0}_{-1.7} \times 10^{104}$
Stellar BHs ($2.5 - 15 M_{\odot}$)	$1.6 \times 10^{17+0.6}_{-1.2}$	$5.9 \times 10^{97+0.6}_{-1.2}$
Photons	$1.478 \pm 0.003 \times 10^9$	$5.40 \pm 0.15 \times 10^{89}$
Relic Neutrinos	$1.411 \pm 0.014 \times 10^9$	$5.16 \pm 0.15 \times 10^{89}$
WIMP Dark Matter	$5 \times 10^{7 \pm 1}$	$2 \times 10^{88 \pm 1}$
Relic Gravitons	$1.7 \times 10^{7+0.2}_{-2.5}$	$6.2 \times 10^{87+0.2}_{-2.5}$
ISM and IGM	20 ± 15	$7.1 \pm 5.6 \times 10^{81}$
Stars	0.26 ± 0.12	$9.5 \pm 4.5 \times 10^{80}$
Total	$8.4^{+8.2}_{-4.7} \times 10^{23}$	$3.1^{+3.0}_{-1.7} \times 10^{104}$



Graphique chronologique depuis le Big Bang jusqu'à la mort thermique de l'Univers - Wikipédia

Diagramme illustrant l'histoire de l'Univers, montrant l'expansion et les événements clés :

- Rayon de l'univers observable** (axe vertical) : Indique la portée de l'observation.
- Âge de l'univers** (axe horizontal) : Mesure le temps écoulé depuis le début.
- Événements clés :**
 - Big Bang** : Le début de l'Univers.
 - Inflation** : Phase d'expansion extrêmement rapide.
 - Fluctuations quantiques** : Perturbations initiales.
 - Preuves témoins** : Évidence de l'expansion.
 - Début de la fusion nucléaire** : Formation des premiers éléments.
 - Fin de la fusion nucléaire** : Arrêt de la synthèse.
 - Ère d'effluents cosmologiques** : Période de refroidissement.
 - Formation de l'hydrogène neutre** : L'Univers devient transparent.
 - Première époque visible** : Le début de la formation des structures.
 - Univers moderne** : L'Univers actuel.
- Échelle de temps :** 0, 10^{-35} s, 1 μ s, 0,01 s, 3 min, 380 000 ans, 13,8 milliards d'années.

Ère stellifère
($\rightarrow 10^{12}$ ans)

Ère dégénérée
(→ 10^{100} ans ?)

Ère des trous noirs
(→ 10^{1000} ans ?)

Ère noire

Ère stellifère (10^{12} ans)

- Ère dégénérée (10^{100} ans ?)

- Ère des trous noirs

- ## Ère noire

- Univers de photons très dilués et très froids

L'univers observable :

- Âge env. 13,8 Milliards d'années
- Rayon env. 46,5 milliards d'années-lumière (actuellement)
- Se vide. Actuellement : les objets les plus lointains s'éloignent avec une vitesse de $3,4c$ (vitesse de la lumière)

Quel futur pour une
vie organisée et
consciente ?

INTERVIEWS FROM THE VAULT October 12, 2017

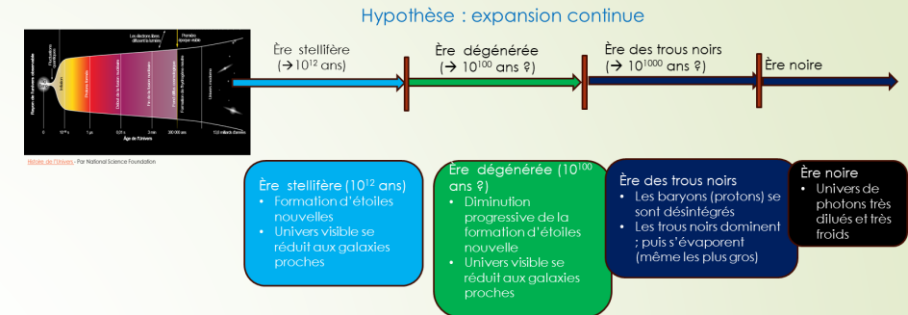
FREEMAN DYSON ON THE FUTURE OF THE UNIVERSE

0 Shares    



Omni Magazine_Oct 2017

CATEGORIES
Select Category ▼



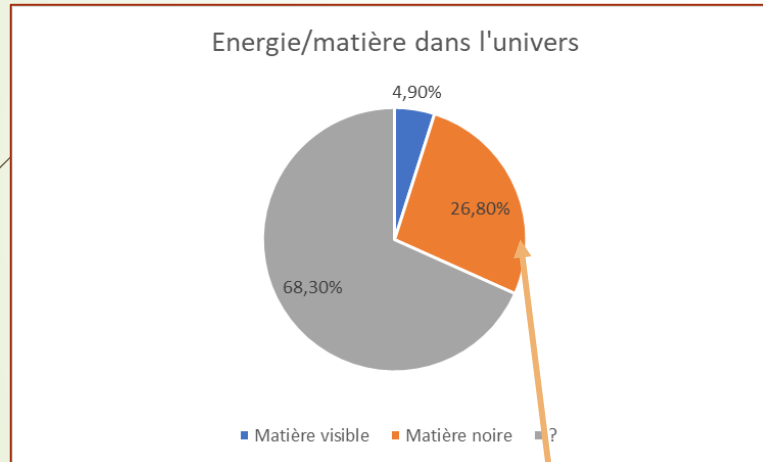
« À mesure que l'Univers évolue, les systèmes vivants gèleront ou friront et la conscience survivra sous la forme d'un nuage géant. »

(Freeman Dyson – [Omni Magazine](#)_Oct 2017)

- Grâce à l'effet doppler relativiste et à des « chandelles » (céphéides) de référence, il est désormais possible d'arpenter l'univers de manière précise
- Les trous noirs sont les manifestations ultimes de la courbure de l'espace-temps près des objets (très) massifs
- Les interactions violentes (collision, fusion) entre objets massifs –comme les trous noirs– est à l'origine d'ondes gravitationnelles, prévues par la théorie d'Einstein et désormais, observées expérimentalement.
- Avec l'hypothèse de l'uniformité et de l'isotropie cosmologique, il est possible de déduire de l'équation d'Einstein, l'équation d'état de l'Univers reliant sa densité, sa courbure moyenne et son taux d'expansion
- Ces équations sont à la base du modèle dit du « Big Bang », modèle décrivant l'évolution de l'Univers à partir d'une phase extrêmement dense et chaude
- L'ère de Planck définit l'étape de l'évolution initiale de l'univers pendant lesquelles les théories physiques actuelles ne s'appliquent pas.
- Le scénario actuel le plus probable du futur de l'Univers, soutenu par le principe de croissance de l'entropie, est une mort thermique, sous forme d'un gaz très dilué et très froid de photons, la matière ayant disparue.

La masse de la matière **observable** (par les ondes électromagnétiques et les ondes gravitationnelles) est très insuffisante pour expliquer :

- La rotation des galaxies
- La masse des galaxies,
- la courbure de certaines zones de l'espace



Matière noire :
Observable seulement par ses
effets gravitationnels

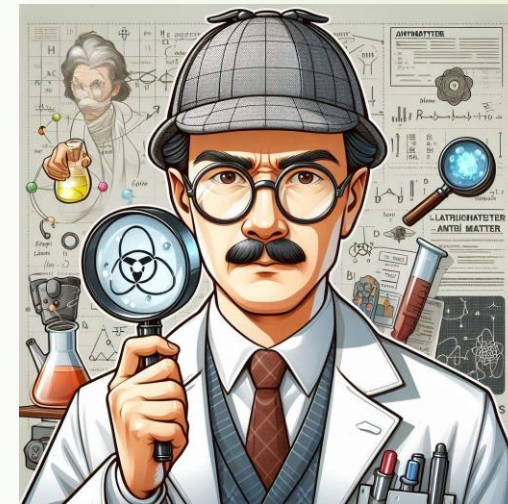


Image générée par IA

Mais où est passée l'**antimatière** ?
Tous les modèles prédisent que matière et
antimatière étaient en quantités égales au
début de l'univers

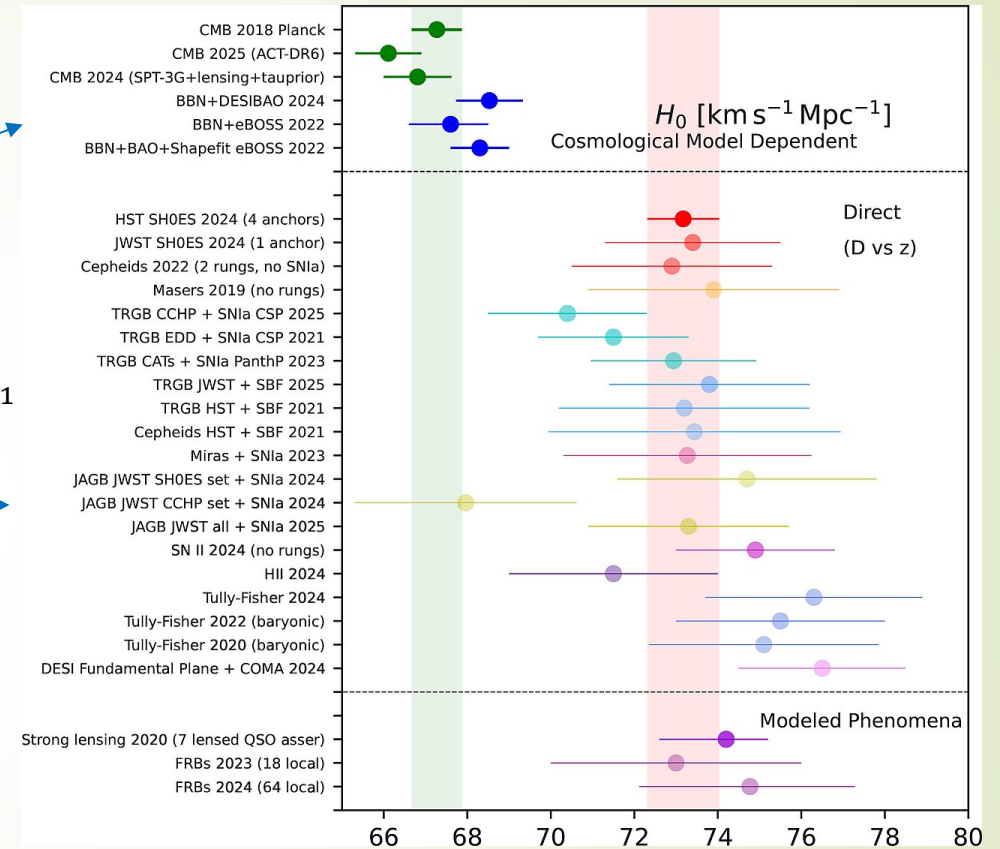
La « tension » de Hubble

Deux valeurs incompatibles :

- Planck – fond diffus $H_0 \cong 67 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$
- DESI – étoiles Céphéides $H_0 = 76,5 \pm 2,2 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$

Univers non homogène - non isotrope ?
Energie « noire » variable au cours du temps

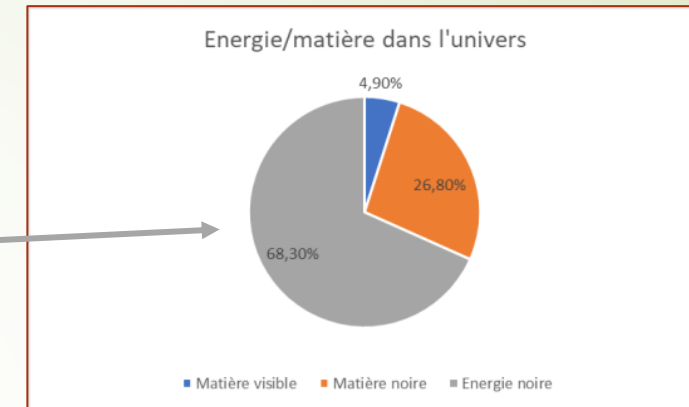
...



By Jackson Levi Said - Own work, CC BY 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=181463941>

Pourquoi l'expansion de l'univers s'accélère-t-elle ?

Explication actuelle : Énergie noire comme moteur de cette expansion



Quelle est l'origine de l'inflation initiale de l'espace-temps ?

Quelle est la nature de cette singularité initiale (que l'on nomme big-bang) ?



?????

Nécessité de « marier » les 2 théories Relativité et Mécanique Quantique

Quel est l'avenir de l'univers ?
Mort thermique après avoir atteint
son entropie maximale ?



Le principe de la croissance de
l'entropie s'applique-t-il à
l'échelle de l'Univers ?



L'hypothèse des multi-univers
Pourquoi n'y aurait-il qu'un seul
univers ?



Comprendre le monde ... les deux infinis

Document T. Lombry
<http://www.astrosurf.com/>

- Grâce à l'effet doppler relativiste et à des « chandelles » (céphéides) de référence, il est désormais possible d'arpenter l'univers de manière précise
- Les trous noirs sont les manifestations ultimes de la courbure de l'espace-temps près des objets (très) massifs
- Les interactions violentes (collision, fusion) entre objets massifs –comme les trous noirs– est à l'origine d'ondes gravitationnelles, prévues par la théorie d'Einstein et désormais, observées expérimentalement.
- Avec l'hypothèse de l'uniformité et de l'isotropie cosmologique, il est possible de déduire de l'équation d'Einstein, l'équation d'état de l'Univers reliant sa densité, sa courbure moyenne et son taux d'expansion
- Ces équations sont à la base du modèle dit du « Big Bang », modèle décrivant l'évolution de l'Univers à partir d'une phase extrêmement dense et chaude
- L'ère de Planck définit l'étape de l'évolution initiale de l'univers pendant lesquelles les théories physiques actuelles ne s'appliquent pas.
- Le scénario actuel le plus probable du futur de l'Univers, soutenu par le principe de croissance de l'entropie, est une mort thermique, sous forme d'un gaz très dilué et très froid de photons, la matière ayant disparue.
- Ils restent de nombreux problèmes ouverts comme la disparition de l'antimatière, la nature de la matière noire et l'origine de l'énergie noire.

1. Physique fondamentale

- **Unification de la relativité générale et de la mécanique quantique** : La gravité quantique reste insaisissable. Des théories comme la gravité quantique à boucles et la théorie des cordes proposent des pistes, mais aucune n'a été vérifiée expérimentalement.
- **Nature de la matière noire et de l'énergie noire** : Plus de 95 % de l'univers est constitué de ces composantes inconnues, et aucun candidat solide n'a encore été détecté.
- **Problème de la mesure en mécanique quantique** : L'effondrement de la fonction d'onde et l'interprétation de la mécanique quantique restent des énigmes ouvertes.

2. Mathématiques

- ...

3. Informatique et intelligence artificielle

- **Fiabilité et explicabilité de l'IA** : Les algorithmes d'IA sont puissants mais souvent opaques. Comprendre et contrôler leurs décisions reste un défi.
- **Ordinateurs quantiques à grande échelle** : La suprématie quantique a été démontrée pour des cas spécifiques, mais construire un ordinateur quantique universel stable demeure un obstacle majeur (correction d'erreurs quantiques, stabilité des qubits).

4. Sciences des matériaux et énergie

- **Fusion nucléaire contrôlée** : La fusion est toujours en attente d'être une source d'énergie viable et commercialement exploitable. ITER et d'autres projets avancent lentement.
- **Supraconductivité à température ambiante** : Bien qu'un matériau ait été découvert en 2020, il nécessite une pression extrême, ce qui limite ses applications.

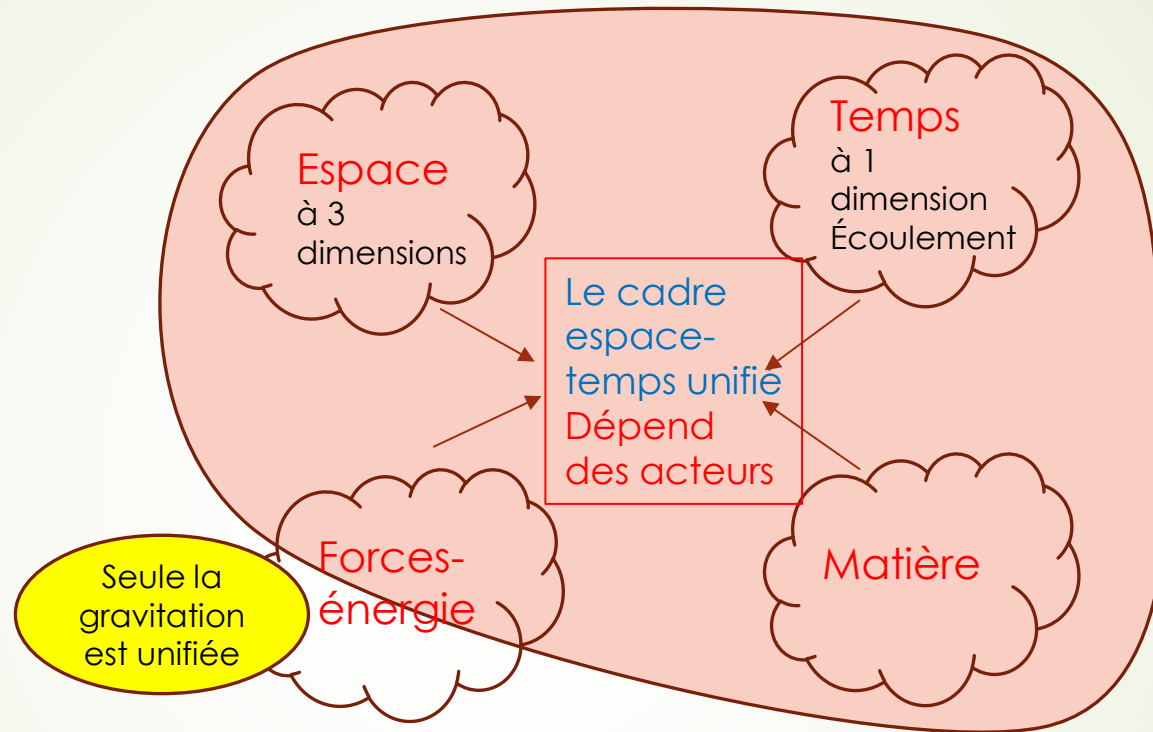
5. Biologie et neurosciences

- **Conscience et origine du libre arbitre** : La compréhension de la conscience reste un défi majeur pour les neurosciences et la philosophie de l'esprit.
- **Vie extraterrestre** : Aucune preuve formelle malgré la découverte de nombreuses exoplanètes habitables et la recherche d'indices biochimiques.

La Mécanique Quantique et la Relativité : 2 théories (**paradigmes**) établies au début du XX^{ème} siècle, qui ont :

- Bouleversé notre vision du monde (toutes les 2)
- Révolutionné notre vie quotidienne (surtout la mécanique quantique)

Un **paradigme** est une représentation du monde



Actuellement, la **gravitation** domine l'Univers, ce n'était pas le cas dans sa phase initiale dense et chaude

→ Nécessité d'unifier les autres forces (e-m, nucléaire,...)

→ **Nécessité de fondre la Relativité Générale et la Physique Quantique dans un même formalisme.**

Comprendre le monde ... les deux infinis

Le quizz des trous noirs

- 1 - Les trous noirs sont extrêmement denses
- 2 - L'attraction (gravitationnelle) d'un trou noir est énorme
- 3 - La vitesse de libération (nécessaire pour échapper à l'attraction) d'un trou noir est infinie
- 4 - La limite de Schwarzschild est un mur infranchissable
- 5 - Les trous noirs ne meurent jamais
- 6 - Les trous noirs sont indétectables
- 7 - Les trous noirs aspirent toute la matière qui les entoure
- 8 - Les lois de thermodynamique ne s'appliquent pas aux trous noirs
- 9 - L'entropie d'un trou noir est très basse
- 10 - Si l'on tombait dans un trou noir, à la limite de Schwarzschild, on reverrait toute notre vie en un éclair

Le quizz des trous noirs (1)

Rappel - Le rayon de Schwarzschild d'un trou noir de masse M est :

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

G est la constante de gravitation : approx. $6,7 \cdot 10^{-11}$ en unités standards

C la vitesse de la lumière : approx $3 \cdot 10^8$ m/s

Les trous noirs sont extrêmement denses

VRAI pour les « petits » **FAUX** pour les gros

Si on définit la densité d d'un trou noir (ce qui est discutable), par sa masse M divisée par le volume de la sphère de rayon r_s

$$d = \frac{3}{8\pi G} \left(\frac{c}{r_s} \right)^2$$

Elle décroît comme le carré du rayon (ou de la masse) du trou noir

Soit de l'ordre de 10^{12} kg/cm³ pour les trous noirs stellaires

Mais 3 kg/cm³ pour un trou noir galactique comme celui au centre de la Voie lactée; voire beaucoup moins pour les giga-trous noirs galactiques (densité de l'air ou de l'eau)

Le quizz des trous noirs (2)

L'attraction (gravitationnelle) d'un trou noir est énorme

VRAI/FAUX

Les lois de la pesanteur s'appliquent comme pour tout corps ayant une masse.

A la limite de Schwarzschild, la pesanteur (petit g , telle que $P=mg$) est :

$$g = \frac{c^2}{2 r_s}$$

Pour un trou noir de la taille du rayon l'orbite de Jupiter ($7,8 \cdot 10^{11}$ km, on obtient $g \approx 6 \cdot 10^4 \text{ m/s}^2$, soit 6 000 fois la pesanteur terrestre. Pour un trou noir de la taille du soleil ($7 \cdot 10^8$ km, on obtient $g \approx 6 \cdot 10^7 \text{ m/s}^2$, soit 6 000 000 fois la pesanteur terrestre.

Mais ce qui compte est la variation de la pesanteur (le gradient)

$\nabla g = -\frac{c^2}{2 r_s^2}$, qui est à l'origine de la désagrégation de la matière proche du trou noir (différence de gravitation entre les extrémités du corps en approche)

Le quizz des trous noirs (3)

La vitesse de libération (nécessaire pour échapper à l'attraction) d'un trou noir est infinie

Faux (ou presque)

La vitesse de libération (vitesse à donner à un projectile pour qu'il ne retombe pas, qu'il échappe à l'attraction d'un corps de masse M et de rayon r) est connue depuis Newton

$$v_L = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

A la limite de Schwarzschild est:

$$v_L = c$$

Ceci exprime le fait qu'à l'intérieur de la limite r_s aucune matière, aucune lumière, aucune information ne peut s'échapper du trou noir

La limite de Schwarzschild un mur infranchissable

Faux

La singularité de Schwarzschild est une propriété de la formulation choisie ; ce n'est pas une singularité physique, elle disparaît par un changement de coordonnées (coordonnées de Kruskal)

La vraie singularité apparaît au centre du trou noir (non tournant)

Il est peu probable qu'un être vivant survive à l'approche d'un trou noir.

Les trous noirs ne meurent jamais

Faux

S. Hawking a montré que les trous noirs ont une température effective

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M} = 0,12 \frac{M_\odot}{M} (10^{-6} \text{K})$$

Température extrêmement faible, mais qui est source de rayonnement, selon la loi du corps noir. Un trou noir perd donc de l'énergie, donc s'évapore (mais à des échelles de temps inimaginables 10^{100} années).

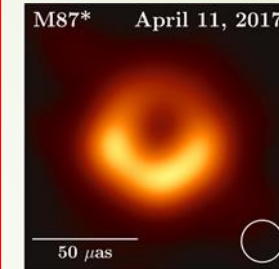
Le quizz des trous noirs (6 & 7)

Les trous noirs sont indétectables

Faux

Leur rayonnement de corps noir est quasi indétectable. Mais la matière dans le voisinage d'un trou noir est soumise à des gradients de pesanteur (effets de marée) et à des frottements/chocs, qui la **désagrège et l'échauffe**.

Ce **disque d'accrétion** émet des ondes électromagnétiques (**radio, visibles ou X**) qui sont observables



Les trous noirs aspirent toute la matière qui les entoure

Faux

Les lois de la gravité ne diffèrent pas pour un trou noir ou un astre ordinaire.

Si le Soleil devenait subitement un trou noir (de 3 km de rayon), les trajectoires de la Terre et des planètes ne seraient pas modifiées.

Les lois de thermodynamique ne s'appliquent pas aux trous noirs

Faux

- L'énergie est conservée (1^{er} principe)
- L'entropie S d'un trou noir est calculable (théorie de S. Hawking, en discussion)

$$S = \frac{1}{4} k_B \frac{c^3}{\hbar G} A_s$$

où A_s est l'aire de la sphère dont le rayon est le rayon de Schwarzschild

$$A_s = 4\pi r_s^2.$$

- Le rayonnement de Hawking contribue à augmenter l'entropie de l'environnement.
- Si 2 trous noirs fusionnent, l'aire du trou résultant est supérieure à la somme des aires des 2 trous et une grande quantité d'énergie est dissipée sous forme d'ondes gravitationnelles : l'entropie croît.

La croissance de l'entropie est vérifiée (2^{ème} principe)

Note : la formule de Hawking pour S est remarquable, car elle implique les 4 constantes fondamentales de l'Univers : constante de Boltzmann k_B , vitesse de la lumière c , constante de Planck $\hbar$ et constante de gravitation G .

L'entropie d'un trou noir est très basse

Faux

Quand on calcule l'entropie d'un gaz, elle est maximum quand le gaz est uniformément réparti ; donc effectivement, si les molécules du gaz sont confinées dans une petite portion du volume, l'entropie est très basse ; car les chocs entre les molécules agissent comme une force répulsive qui tend à les répartir dans tout le volume disponible (pression positive)

Ce raisonnement n'est plus valable pour les systèmes dominés par la gravitation qui est attractive ; la création d'étoiles, de galaxies, de trous noirs à partir de poussières de matière éparses constitue une augmentation de l'entropie (pression négative)

Sources (univers visible)	Entropie (approx. multiple de k_B)
Trous noirs massifs (centre des galaxies)	$3 \cdot 10^{104}$
Photons (étoiles et fond diffus cosmologique)	$5 \cdot 10^{89}$
Étoiles	$1 \cdot 10^{81}$

Les trous noirs sont les sources principales d'entropie dans l'univers actuel

Source : A Larger Estimate of the Entropy of the Universe
[Chas A. Egan, Charles H. Lineweaver](https://arxiv.org/abs/0909.3983)
<https://arxiv.org/abs/0909.3983>

Si l'on tombait dans un trou noir, à la limite de Schwarzschild, on reverrait toute notre vie en un éclair

Faux

Supposons que nous soyons en **chute libre** vers le trou noir, notre montre indique le temps t_s .

L'horloge de référence situé très loin indique le temps $t_0 \gg t_s$

$$t_s = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{r_s}{r}}}$$

Notre temps est donc ralenti par rapport à celui du reste de l'Univers.

Exemple : un trou noir de $r_s = 10^9 m$ (approx. taille du soleil);

A 10 cm de la surface de Schwarzschild : $t_s = 10^5 t_0$; 1 seconde près du trou noir équivaut à près de 3 heures au loin

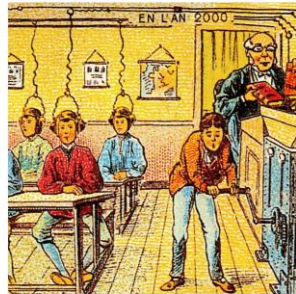
A 10 microns de la surface de Schwarzschild : $t_s = 10^7 t_0$; 1 seconde près du trou noir équivaut à près d'une année au loin.

A l'entrée dans la surface de Schwarzschild, le temps lointain est infiniment accéléré ; tout le futur de l'Univers apparaîtra condensé en un seul flash lumineux

Pour toute demande d'information complémentaire,
écrire à :



Des vidéo conférences sur la chaîne YouTube : [la Science de Bernie – Saison 3](#)



Des podcasts sur Spotify
[La science de Bernie](#)

Mon blog <https://un-peu-de-physique.fr/>
Des cours, des ressources...

