

MYSTÉRIEUX TROUS NOIRS

Pierre Vanhove

IPHT
Saclay

Cycle de conférences inter-lycées Briand-Senghor
Lycée Léopold Senghor, Evreux
12 janvier 2023

Première partie I

TROUS NOIRS CLASSIQUES



Les physiciens disent des trous noirs qu'à force de se concentrer dans le ciel nocturne, il leur arrive d'enrouler, dans la substance ténébreuse, l'espace qu'ils épanchent dans le temps.

Pascal Quignard

(La barque silencieuse Chap XXV Extase et enstase)

VITESSE DE LA LUMIÈRE



Galilée (1564-1642) semble avoir été le premier à penser que la lumière à une vitesse finie et le premier à essayer de la mesurer



En 1676 Ole Rømer (1644-1710) constate que la période de Io, une lune de Jupiter, dépend de la position de la Terre, en contradiction avec les lois de Kepler. Il comprit alors qu'il fallait tenir compte du temps de parcours de la lumière entre Io et la Terre.

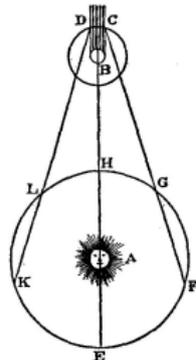
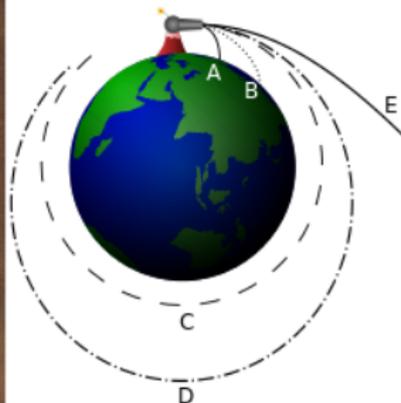
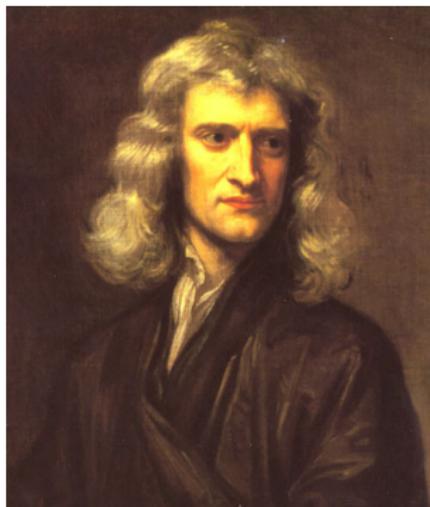


Fig. 70.



La vitesse estimée par Rømer est de 298 000 km/s alors que la valeur actuelle est fixée à 299 792 km/s.

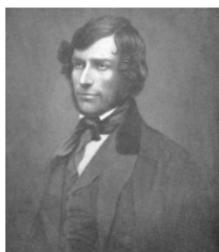
VITESSE DE LIBÉRATION



Newton explique que selon la vitesse de lancée d'un objet depuis la Terre soit 1) retombe sur Terre, 2) se place en orbite autour de la Terre, 3) s'éloigne indéfiniment de la Terre.

$$\frac{mv^2}{2} \geq \frac{G_N mM}{r} \Leftrightarrow v^2 \geq v_{\text{Libération}}^2 = \frac{2G_N M}{r} \quad v_{\text{Libération}}^{\text{Terre}} \simeq 11 \text{ km/s}$$

ÉTOILE NOIRE

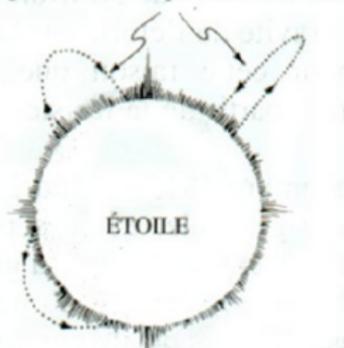


En 1784 le révérend John Michell propose donc que d'un objet très massif la lumière ne peut pas s'échapper

$$\frac{2G_N M}{r} \geq c^2$$

Ses considérations seront largement ignorées.

Trajectoires des corpuscules lumineux



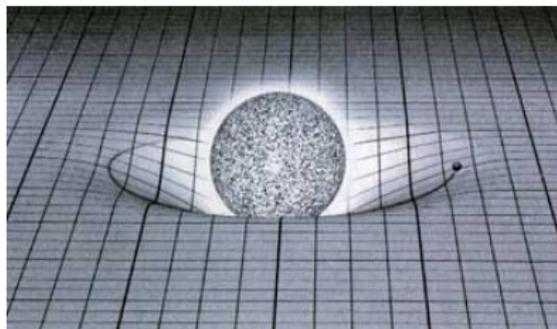
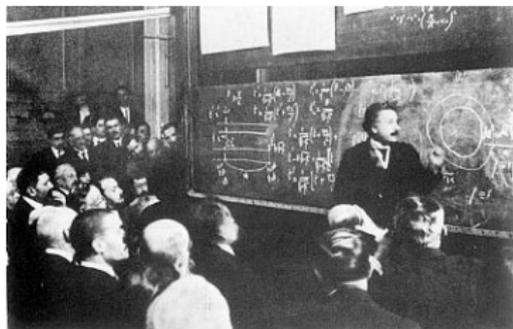
« Un astre lumineux, de la même densité que la Terre, et dont le diamètre serait 250 fois plus grand que le Soleil, ne permettrait, en vertu de son attraction, à aucun de ses rayons de parvenir jusqu'à nous. Il est dès lors possible que les plus grands corps lumineux de l'univers puissent, par cette cause, être invisibles. »

Pour une vitesse de libération égale à la vitesse de la lumière on trouve le rayon critique d'un trou noir

$$r_S = \frac{2G_N M}{c^2}$$

LA GRAVITATION EST LA COURBURE DE L'ESPACE-TEMPS

Le 25 novembre 1915, Einstein formule la relativité générale

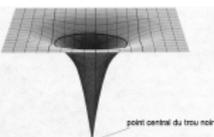


L'espace tout entier est la scène du champ gravitationnel :

la gravitation résulte de la déformation de l'espace-temps

un corps n'est pas attiré par un autre corps mais se déplace librement dans un espace-temps courbe

TROUS NOIRS MATHÉMATIQUES



Solutions mathématiques « exotiques » aux équations d'Einstein sont rapidement trouvées



En 1916, Karl Schwarzschild : une masse M_{\bullet}



Hans Reissner (1916) et Gunnar Nordström (1918) :
une masse M_{\bullet} et une charge électrique Q

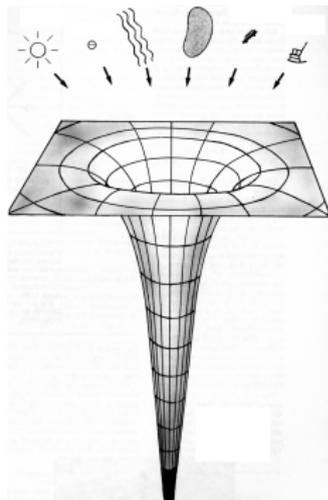


En 1963 Roy Kerr : masse M_{\bullet} , moment angulaire \vec{J}

LES OBJETS MACROSCOPIQUES LES PLUS PARFAITS



Les trous noirs de la nature sont les objets macroscopiques les plus parfaits qui soient dans l'univers : les seuls éléments de leur construction sont nos concepts d'espace et de temps. (S. Chandrasekhar)



Théorème de la calvitie : les trous noirs sont



caractérisés par la géométrie extérieure

- Masse M
- Moments angulaires \vec{J}
- Charge électrique \vec{Q}



Absorbent toute la matière et toute énergie

- On ne peut pas écranter leur attraction



Singularité au centre du trou noir cachée par un horizon des événements (hypothèse de la censure cosmique)

EINSTEIN DOUTE DE LA RÉALITÉ DES TROUS NOIRS

ON A STATIONARY SYSTEM WITH SPHERICAL SYMMETRY CONSISTING OF MANY GRAVITATING MASSES

BY ALBERT EINSTEIN

(Received May 10, 1939)

If one considers Schwarzschild's solution of the static gravitational field of spherical symmetry

$$(1) \quad ds^2 = -\left(1 + \frac{\mu}{2r}\right)^4 (dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2) + \left(\frac{1 - \frac{\mu}{2r}}{1 + \frac{\mu}{2r}}\right)^2 dt^2$$

sents the gravitating mass.)

There arises the question whether it is possible to build up a field containing such singularities with the help of actual gravitating masses, or whether such regions with vanishing g_{44} do not exist in cases which have physical reality. Schwarzschild himself investigated the gravitational field which is produced by an incompressible liquid. He found that in this case, too, there appears a region with vanishing g_{44} if only, with given density of the liquid, the radius of the field-producing sphere is chosen large enough.

This argument, however, is not convincing; the concept of an incompressible liquid is not compatible with relativity theory as elastic waves would have to travel with infinite velocity. It would be necessary, therefore, to introduce a compressible liquid whose equation of state excludes the possibility of sound

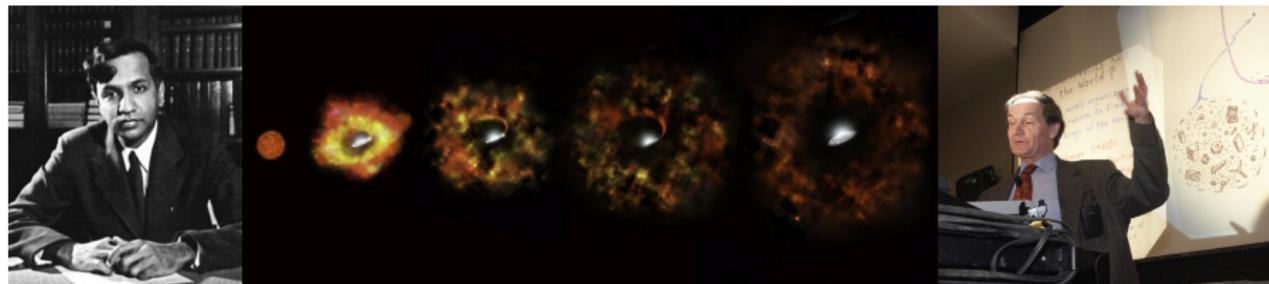
A. Einstein, Annal of Mathematics 40 4 (1939)

922-936

- ? La singularité des trous noirs est-elle réelle ou fictive?
- ? Comment la matière peut-elle créer un trou noir?
- ☹ En 1939 Einstein argumente que les trous noirs sont *incompatibles* avec la réalité *physique* de sa théorie de la gravitation

Il faudra attendre les années 1950 avec les travaux de Robert Oppenheimer et de John Wheeler pour que les trous noirs soient considérés comme des objets astrophysiques présents dans l'Univers et observables

FORMATION DES TROUS NOIRS : EFFONDREMENT D'ÉTOILES



Subrahmanyan Chandrasekhar (Nobel 1983) et Roger Penrose (Nobel 2020) expliquent que des étoiles suffisamment massives en fin de vie, ayant épuisées leur carburant nucléaire, devaient s'effondrer gravitationnellement sur elles-mêmes pour devenir une singularité de l'espace-temps c'est-à-dire de concentrer en un point une densité infinie où l'espace, le temps et les lois connues de la physique s'anéantissent

FORMATION DES TROUS NOIRS : TROUS NOIRS PRIMORDIAUX

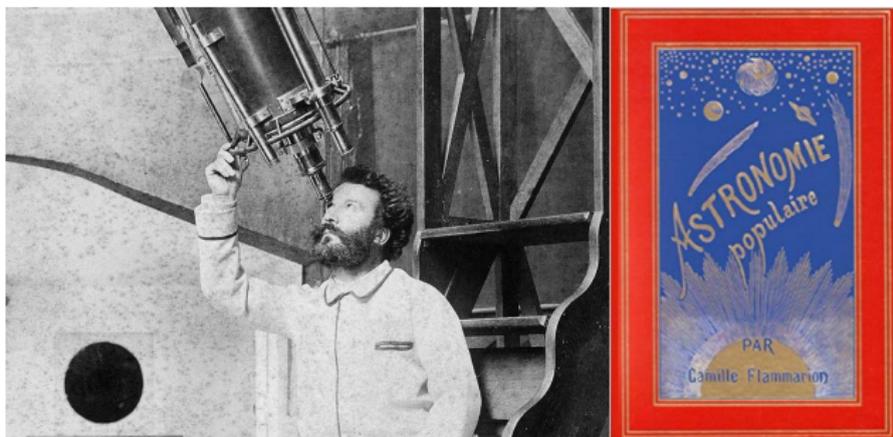


En 1966 par Yakov Zel'dovich et Igor Novikov suggèrent qu'à l'époque de l'univers primordial, après le Big Bang, dans les régions extrêmement denses se forment des trous noirs primordiaux.

Ces trous noirs pourraient être à l'origine des trous noirs supermassif aujourd'hui observés.

En 1971 Stephen Hawking publie la première théorie détaillée sur l'origine de tels trous noirs.

CAMILLE FLAMMARION « ASTRONOMIE POPULAIRE »



[...] si ce soleil central était obscur (ce qu'il serait difficile d'admettre) les mouvements des étoiles autour de lui devraient se traduire pour nous par une certaine régularité dans les mouvements propres. (p821)

VOIR LES TROUS NOIRS

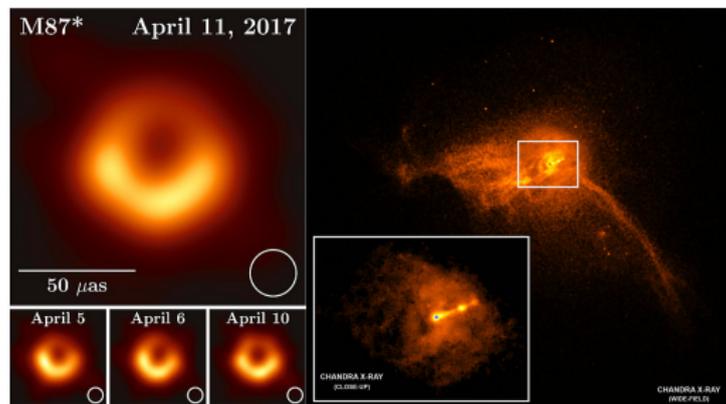
*Sagittarius A** au centre de notre galaxie d'une masse
 $M_{\bullet} = 4,152$ millions M_{\odot} , $R_{\bullet} = 12,264$ millions km $\simeq 18 R_{\odot}$



Premièrement détecté en 13 et 15 février 1974 par ses émissions radio, la présence d'un trou noir supermassif au centre de notre galaxie s'est imposée jusqu'aux images obtenues par la collaboration « Event Horizon Telescope »

VOIR LES TROUS NOIRS

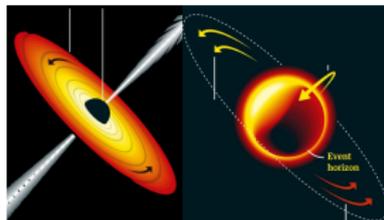
Le 10 avril 2019 la collaboration « Event Horizon Telescope » a publié la photographie de « l'ombre » du trou noir au centre de la galaxie Messier 87 dans la constellation de la Vierge



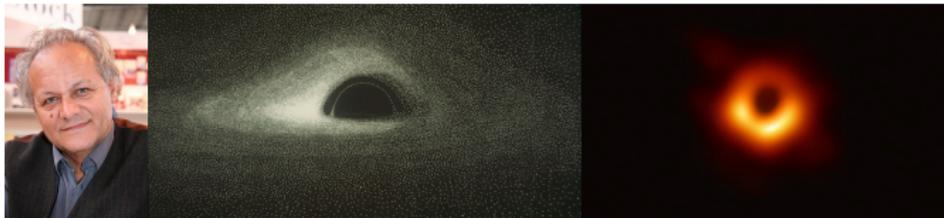
- ▶ Masse $M_{\bullet} = 6,5$ milliards M_{\odot} , Rayon $R_{\bullet} = 54\,571 R_{\odot}$
- ▶ Distance 55 millions d'années lumières

VOIR LES TROUS NOIRS

Disque d'accrétion entourant l'horizon du trou noir



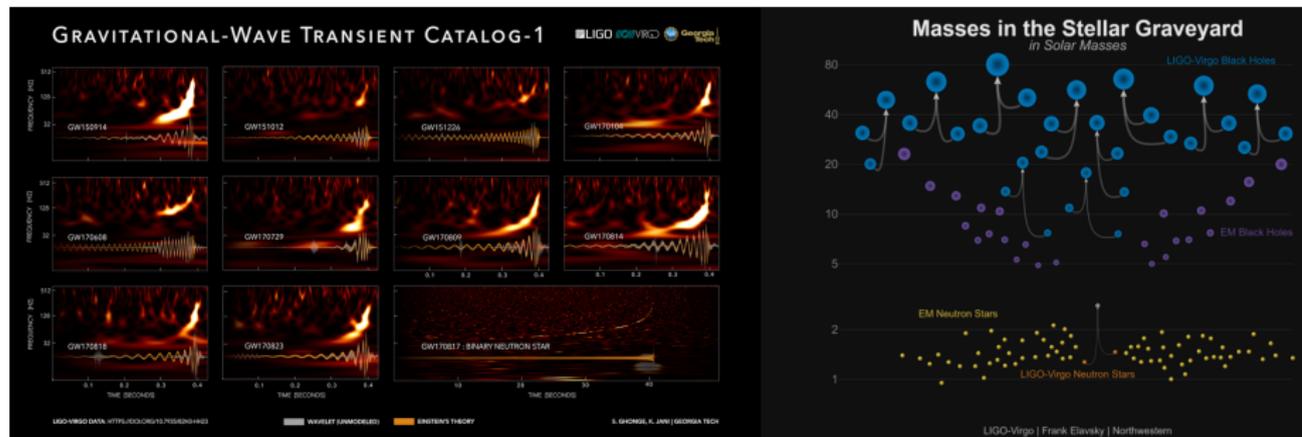
Calculée pour la première fois par Jean-Pierre Luminet en 1979, cette image est apparue dans le film Interstellar



Le trou noir M87* est en rotation : c'est un trou noir de Kerr
SgrA* serait aussi un trou noir de Kerr mais sa vitesse de rotation est faible

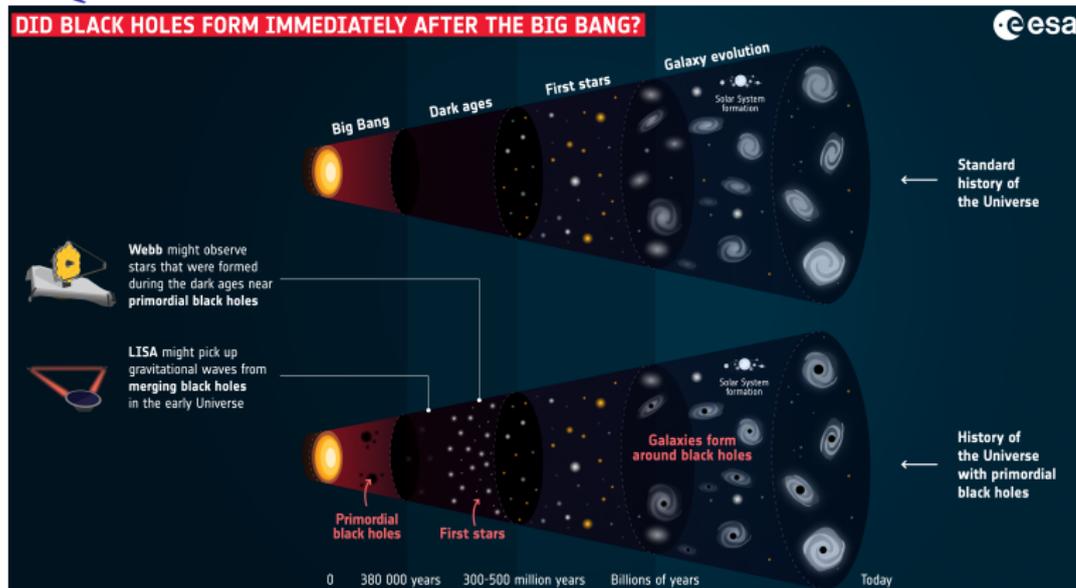
ENTENDRE LES TROUS NOIRS

Depuis le 14 septembre 2015 les collaborations LIGO/VIRGO ont détecté 90 signaux d'ondes gravitationnelles du à la coalescence de deux trous noirs



- ▶ Première détection de la dynamique des trous noirs
- ▶ Trous noirs de masse entre 6 et 40 masses solaires
- ▶ D'ici 5 ans on espère une détection par mois voir par semaine

POURQUOI EST-CE IMPORTANT ?



L'Univers pourrait être rempli de trous noirs, catalysant la formation des étoiles et créant des systèmes solaires et des galaxies sur des milliards d'années.

Si les premières étoiles se sont effectivement formées autour des trous noirs primordiaux, elles existeraient plus tôt dans l'Univers que prévu par le modèle "standard".

COMBIEN DE TROUS NOIRS ?

SCIENCE NEWS LETTER for January 18, 1964

ASTRONOMY

"Black Holes" in Space

Bien qu'Einstein doutait de la réalité des trous noirs de nombreuses détections directes et indirectes confirment leur présence dans notre Univers observable

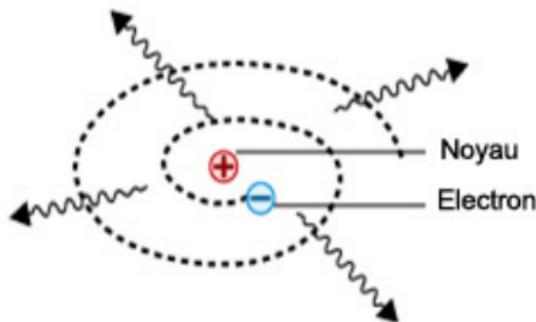
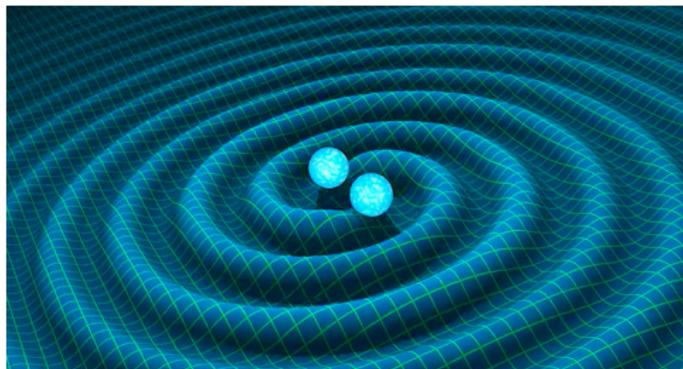
- ▶ Plus de 100 millions de trous noirs d'une masse solaire dans notre galaxie
- ▶ Au moins 100 milliards de trous noirs supermassifs (millions ou de milliards de masses solaires) dans l'univers
- ▶ Chaque seconde un trou noir est formé dans une supernovæ
- ▶ Le trou noir le plus gros est dans la galaxie NGC4889 : sa masse est 21 milliards de masse solaire
- ▶ Le trou noir connu le plus proche connu 1A 0620-00 est à 3500 années lumières de la Terre

Deuxième partie II

TROUS NOIRS QUANTIQUES



GRAVITÉ ET MÉCANIQUE QUANTIQUE

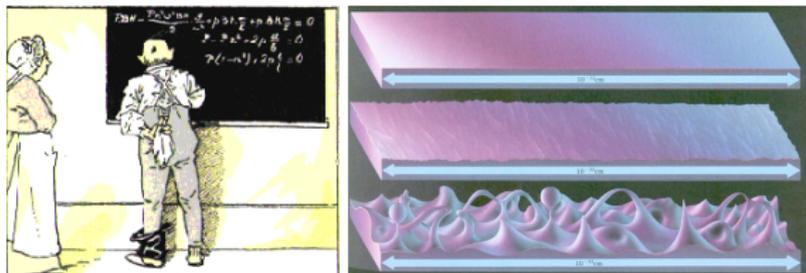


En 1916 Einstein écrit

À cause des mouvements intra-atomiques, l'atome doit rayonner (...) de l'énergie gravitationnelle, même en très faibles quantités.

Comme cela ne peut être le cas dans la nature, il apparaît alors que la théorie quantique doit modifier (...) la nouvelle théorie de la gravitation.

ÉCHELLES DE LA GRAVITATION CLASSIQUE ET QUANTIQUE



- ▶ Rayon de **classique** d'un trou noir

$$r_S = \frac{2G_N M_\bullet}{c^2}$$

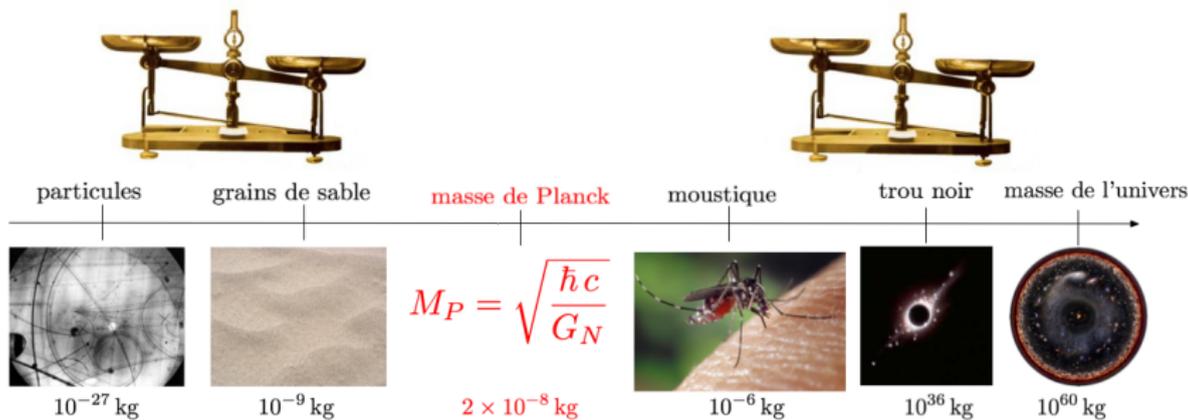
- ▶ Résolution spatiale **quantique** minimale (principe d'Heisenberg)

$$2|\Delta x| \geq \lambda = \frac{\hbar}{Mc}$$

- ▶ Gravité quantique : masse de Planck

$$\frac{2GM_p}{c^2} = r_S = 2\lambda = \frac{2\hbar}{M_p c} \implies M_p^2 = \frac{\hbar c}{G_N}$$

Nous avons vu que les trous noirs sont caractérisés par une masse M_{\bullet} , une charge Q_{\bullet} et un spin J_{\bullet} comme des particules.



Objet microscopique de taille la longueur de Planck

$$r_S = 2\lambda = \ell_P \simeq 1.6 \times 10^{-35} \text{ m}$$

et de masse de Planck

$$M_P = \sqrt{\frac{c\hbar}{G_N}} = 2.1 \times 10^{-8} \text{ kg}$$

TROUS NOIRS QUANTIQUES

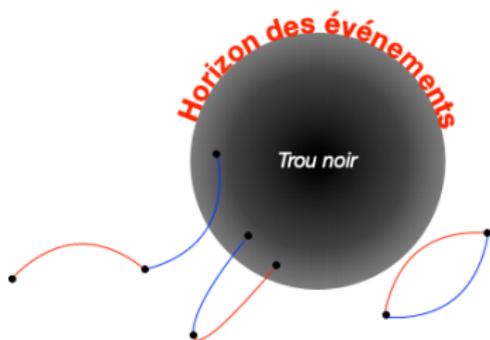
Les trous noirs sont des prédictions de la théorie classique de la gravitation mais comprendre leur vraie nature nécessite la mécanique quantique

- 💡 Des effets de gravitation quantiques peuvent être à l'origine des trous noirs primordiaux microscopiques qui grossiraient avec le temps
- 💡 Les trous noirs quantiques sont nécessaires à la cohérence mathématiques des théories de gravitation quantique
- ? Les trous noirs stellaires se forment par effondrement gravitationnel mais que devient la matière qui s'est effondrée?
- ? Quelles sont les lois de la physique à la singularité au centre du trou noir?

ÉVAPORATION QUANTIQUE D'HAWKING

En 1975 Hawking découvre qu'un trou noir émet un rayonnement **quantique** au voisinage de son **horizon des événements**

Rayonnement uniforme de type corps noirs avec la température caractéristique



$$T_{BH} = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G_N M_{\bullet}} = 6.17 \times 10^{-8} \frac{M_{\odot}}{M_{\bullet}} \text{ Kelvin}$$

Temps d'évaporation

$$\tau = \left(\frac{M_{\bullet}}{10^{12} \text{ kg}} \right)^3 \underbrace{13.8 \text{ milliard d'années}}_{\text{Âge univers}}$$

Masse Soleil : $M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ — $x^{\circ} \text{ C} = -273,15^{\circ} \text{ C} + x \text{ K}$

Plus le trou noir est petit plus il rayonne et plus il s'évapore vite

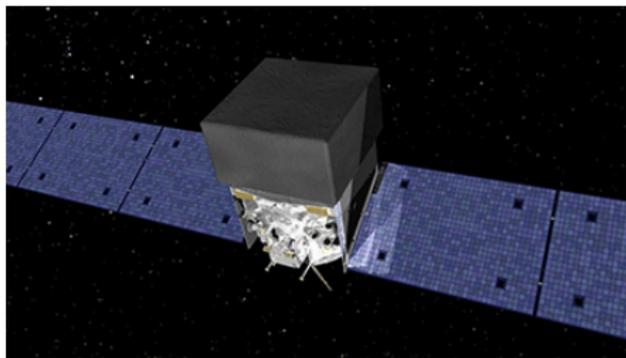
ÉVAPORATION QUANTIQUE D'HAWKING

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 857:49 (11pp), 2018 April 10
© 2018. The American Astronomical Society. All rights reserved.

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aac7b>

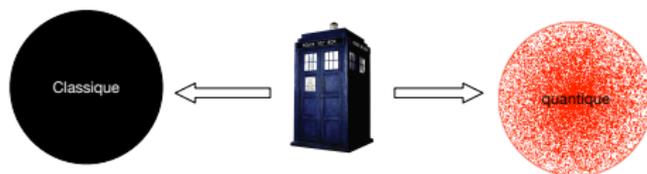


Search for Gamma-Ray Emission from Local Primordial Black Holes with the *Fermi* Large Area Telescope



Le télescope spatial Fermi destiné à l'astronomie gamma, lancé le 11 juin 2008, recherche des preuves observationnelles de l'existence et de l'évaporation des trous noirs primordiaux, en observant des sursauts gamma associés à leur fin de vie.

ENTROPIE DES TROUS NOIRS : IRRÉVERSIBILITÉ



La température de Hawking permet de déterminer l'entropie

$$dS_{Schw} = \frac{d(Mc^2)}{T_{BH}} \implies S_{BH} = \frac{k_B A}{4\ell_P^2}; \quad \ell_P^2 = \frac{G\hbar}{c^3} = (1.6 \times 10^{-35} \text{m})^2$$

i Irréversibilité thermodynamique : l'entropie augmente

$$\Delta S \geq 0 \implies \Delta A \geq 0$$

Pour les trous noirs $A \sim M^2$

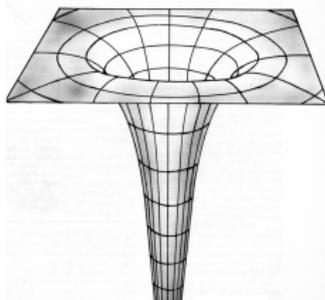
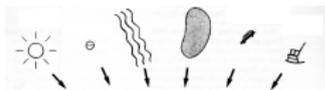
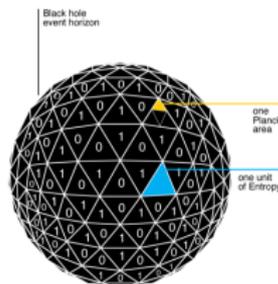
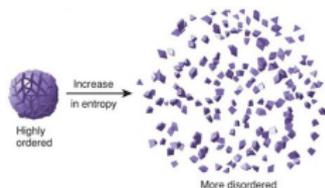
😊 Observation des ondes gravitationnelles

$$\underbrace{36}_{M_{BH_1}} + \underbrace{29}_{M_{BH_1}} = \underbrace{62}_{M_{BH_3}} + \underbrace{3}_{GW}$$

$$S_{BH} + S_{GW} \geq S_{BH_1} + S_{BH_2} \implies A(BH) \geq A(BH_1) + A(BH_2)$$

$\quad \quad \quad = 62^2 \quad \quad \quad = 36^2 \quad \quad \quad = 29^2$

ENTROPIE DES TROUS NOIRS



L'entropie mesure la désorganisation $S = k_B \log \Omega$

- ▶ Un système parfaitement ordonné à une configuration $\Omega = 1$ donc $S = 0$
- ▶ Un jeu de carte mélangé a $\Omega = 52! \approx 8 \times 10^{67}$ soit $S \approx 156.36 \times k_B$

Pour un trou noir l'entropie est énorme

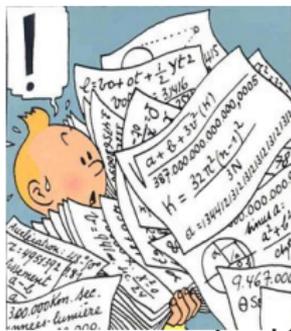
$$S_{BH} = \frac{k_B A}{4\ell_P^2} \simeq \begin{cases} 10^{77} k_B \text{ pour } M_{\bullet} = M_{\odot} \\ 10^{90} k_B \text{ pour le trou noir Sagittaire A}^* \end{cases}$$

L'entropie du Soleil $S_{\odot} \approx 10^{56} k_B$

Un trou noir classique n'a qu'un seul état

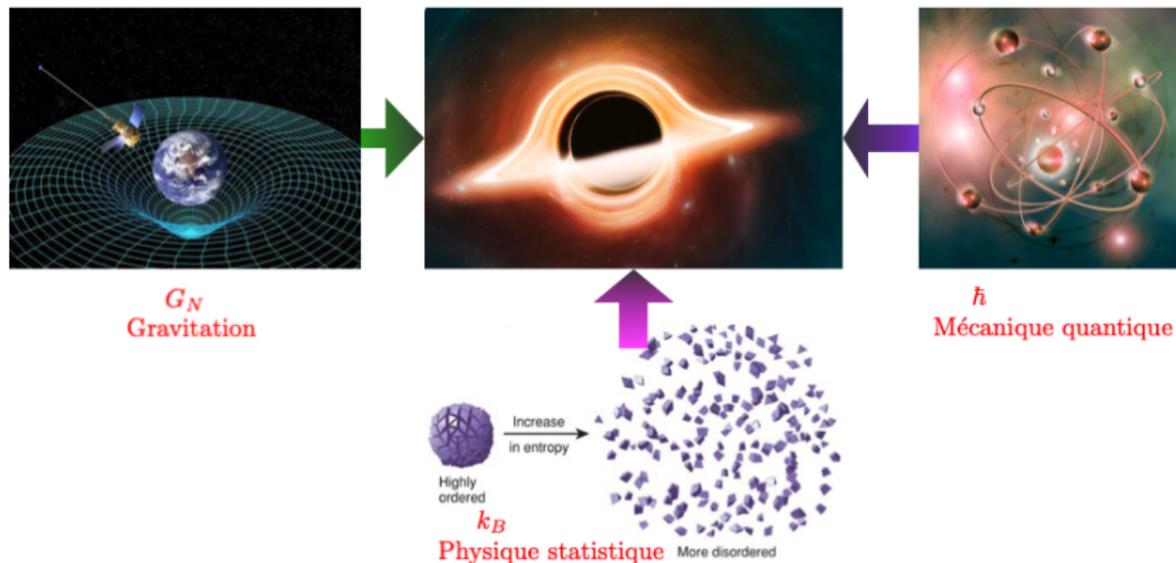
$$\Omega_{classique} = 1 \iff S_{classique} = 0$$

PARADOXES DE L'ÉVAPORATION DES TROUS NOIRS



- ? Si le trou s'évapore son entropie décroît
☹️ *Ça viole le second principe de la thermodynamique*
- ? Si le trou noir disparaît totalement après l'évaporation
☹️ *Ça viole les règles de la mécanique quantique*
- ? Si le trou noir ne disparaît pas totalement
☹️ *Configuration instable quantiquement : contraire à l'observation*
- ? Comment la radiation d'Hawking sort-elle du trou noir?
 - ☹️ Signaux sortant du trou noir : interdit par causalité
 - ☹️ Deux copies de l'information en dehors et dans le trou noir? *Ça viole les règles de la mécanique quantique*

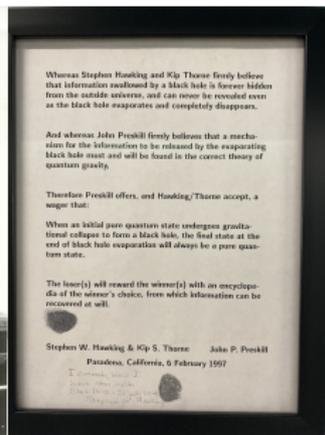
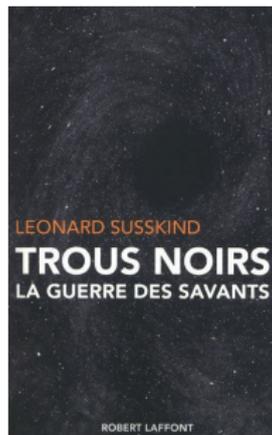
LES TROUS NOIRS : LA THÉORIE POUSSÉE À SA LIMITE



La physique des trous noirs pousse les limites de notre compréhension de la gravitation G_N , de la mécanique quantique \hbar et de la thermodynamique k_B

LA GUERRE DES TROUS NOIRS

Ces paradoxes ont engendré « la guerre des trous noirs » où des scientifiques opposent avec véhémence leur point de vue



En 2004 Hawking a concédé son pari fait en 1997 avec John Preskill, en reconnaissant que la radiation d'Hawking peut venir de l'intérieur du trou noir et donc permettre de retrouver l'information sur la formation du trou noir

Kip Thorne (Nobel 2017) n'a pas concédé le pari estimant que le raisonnement d'Hawking doit être confirmé

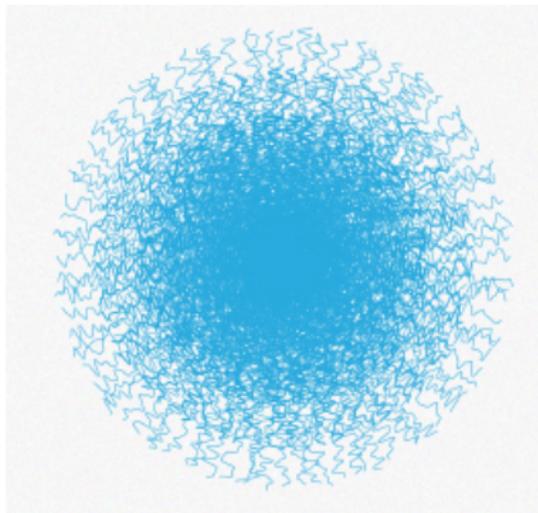


Si les trous noirs s'évaporent à cause des effet quantiques alors il ne sont plus noirs

« The absence of event horizons mean that there are no black holes – in the sense of regimes from which light can't escape to infinity. » (Stephen Hawking)

QUE CHANGER ? RELATIVITÉ OU MÉCANIQUE QUANTIQUE ?

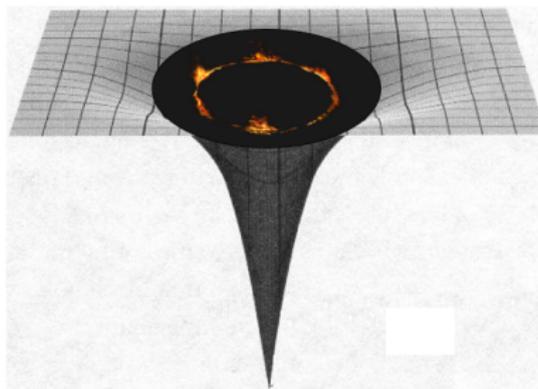
Diverses approches sont proposées pour résoudre le paradoxe de l'information. Pour l'instant il n'y a pas encore de consensus sur la résolution du paradoxe de l'information des trous noirs



Pelote de cordes : Intérieur du trou noir donné par une « pelote » de cordes : pas d'horizon et pas de singularité

QUE CHANGER ? RELATIVITÉ OU MÉCANIQUE QUANTIQUE ?

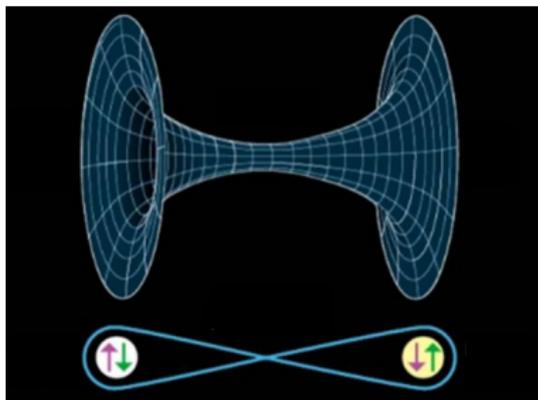
Diverses approches sont proposées pour résoudre le paradoxe de l'information. Pour l'instant il n'y a pas encore de consensus sur la résolution du paradoxe de l'information des trous noirs



Mur de feu à l'horizon : Un observateur qui traverse l'horizon est grillé par les degrés de liberté quantique de haute énergie : préserve l'information quantique sur l'horizon mais viole la relativité

QUE CHANGER ? RELATIVITÉ OU MÉCANIQUE QUANTIQUE ?

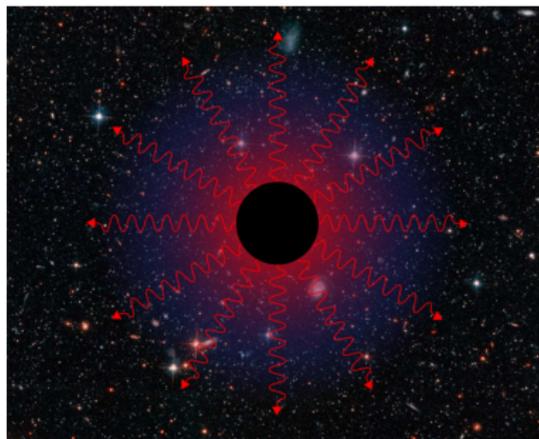
Diverses approches sont proposées pour résoudre le paradoxe de l'information. Pour l'instant il n'y a pas encore de consensus sur la résolution du paradoxe de l'information des trous noirs



Intrication quantique et trou de vers : l'information est échangée entre un trou noir et un trou blanc

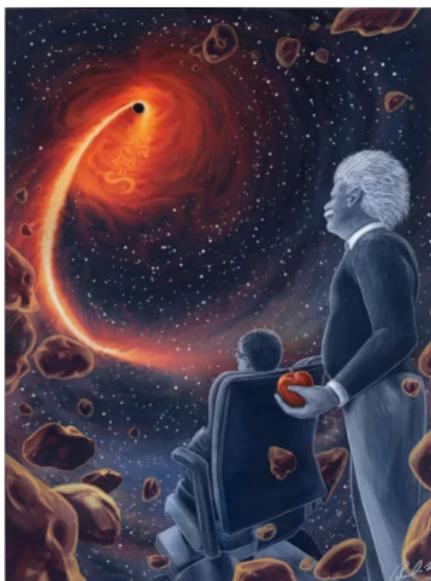
QUE CHANGER ? RELATIVITÉ OU MÉCANIQUE QUANTIQUE ?

Diverses approches sont proposées pour résoudre le paradoxe de l'information. Pour l'instant il n'y a pas encore de consensus sur la résolution du paradoxe de l'information des trous noirs

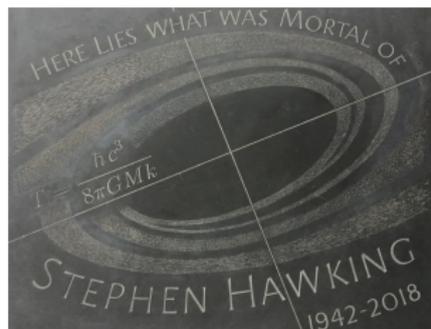


Cheveux quantiques : dans ses derniers travaux Stephen Hawking (avec Malcolm Perry and Andrew Strominger) a proposé que l'information est préservée et contenue dans des « cheveux gravitationnels quantiques » entourants le trou noir

STEPHEN HAWKING (1942-2018)



(c) A Sky Full of Ghosts - DeLuce Art



Stephen Hawking a profondément changé la manière de penser les trous noirs, notre Univers et la nature de l'espace-temps. Un message d'espoir de Stephen Hawking a été envoyé vers le trou noir $1A0620 - 00$ de $6.6M_{\odot}$ situé à 3500 années lumières.

We remember Isaac Newton for answers, we remember Hawking for questions. (Kip Thorne)