

MYSTÉRIEUX TROUS NOIRS

Pierre Vanhove



Colloque de l'orme
CEA Saclay
18 avril 2019

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 ténèbreuse, l'espace qu'ils épanchent dans le temps.

Pascal Quignard (La barque silencieuse Chap XXV Extase et enstase)

ÉTOILES NOIRES



En 1676 Ole Rømer propose que la lumière a une vitesse finie



En 1784 le révérend John Michell propose que d'un objet très massif la lumière ne peut pas s'échapper. Les considérations théoriques de Michell sont largement ignorées



En 1796 Pierre-Simon de Laplace redécouvre cette idée

RAYON GRAVITATIONNEL CLASSIQUE

Si la lumière a une vitesse finie c alors la vitesse de libération de l'attraction gravitationnelle est

$$\frac{m_i c^2}{2} = \frac{G m_g M}{r} \Leftrightarrow r = \frac{2GM}{c^2} \frac{m_g}{m_i}$$

L'égalité entre masse inerte m_i et masse grave m_g donne le rayon de Schwarzschild d'un trou noir

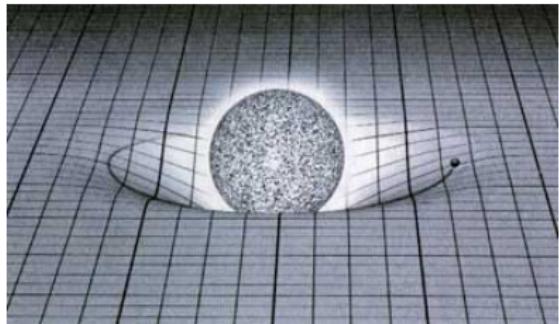
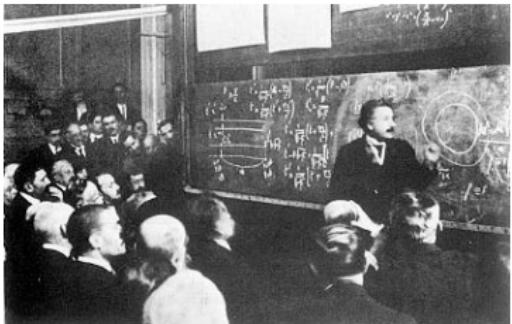
$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Résultat correct mais justification incorrecte

Le trou noir retombe donc dans l'obscurité durant plus d'un siècle jusqu'à la découverte de la relativité générale par Albert Einstein

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 courbé par la matière

TROUS NOIRS MATHÉMATIQUES

Solutions aux équation d'Einstein dans le vide avec les caractéristiques



En 1916, Karl Schwarzschild : une masse M_\bullet



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

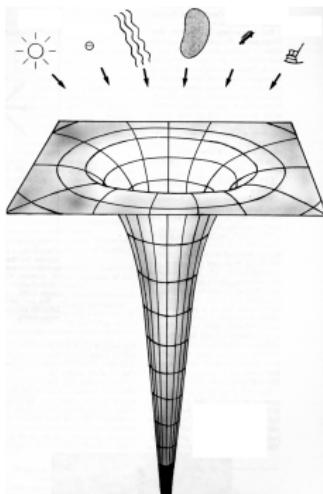


En 1963 Roy Kerr : masse M_\bullet , moment angulaire \vec{J}

LES OBJETS MACROSCOPIQUES LES PLUS PARFAITS



The most perfect macroscopic objects there are in the universe : the only elements in their construction are our concepts of space and time (S. Chandrasekhar)



- ▶ Caractérisés par la géométrie extérieure
 - Masse M_\bullet
 - Moments angulaires \vec{J}
 - Charges électriques \vec{Q}
- ▶ Absorbent toute la matière et toute l'énergie
 - On ne peut pas écranter leur attraction
- ▶ Singularité au centre du trou noir cachée par un horizon des événements

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_{tt} 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_{tt} 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

- ▶ La singularité des trous noirs est-elle réelles ou fictive ?
- ▶ Comment la matière peut-elle créer un trou noir ?
- ▶ En 1939 Einstein argumente que les trous noirs sont *incompatible* avec la réalité *physique* de sa théorie de la gravitation (Einstein, Annal of Mathematics 40 4 (1939) 922-936)

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

COMBIEN DE TROUS NOIRS ?

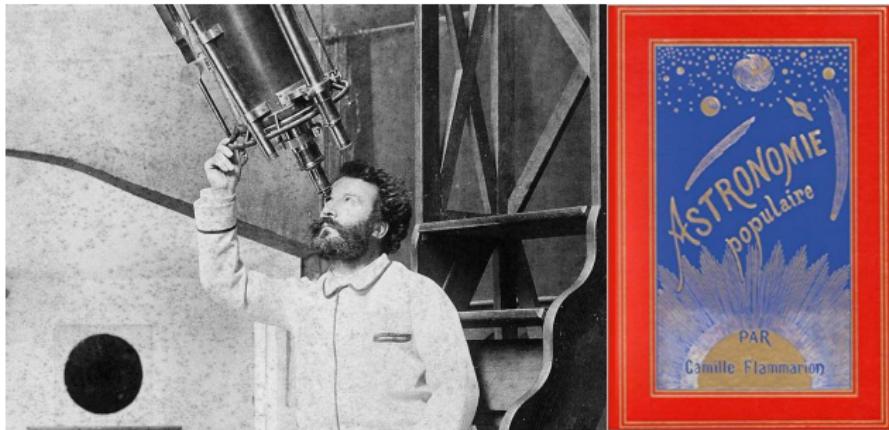
SCIENCE NEWS LETTER *for January 18, 1964*

ASTRONOMY

"Black Holes" in Space

- ▶ Plus de 100 millions de trous noirs d'une masse solaire dans notre galaxie
- ▶ Au moins 100 milliard de trous noirs supermassifs (millions ou de milliard 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 milliard de masse solaire
- ▶ Le trou noir connu le plus proche connu V4641 Sgr est à 1600 années lumières de la Terre

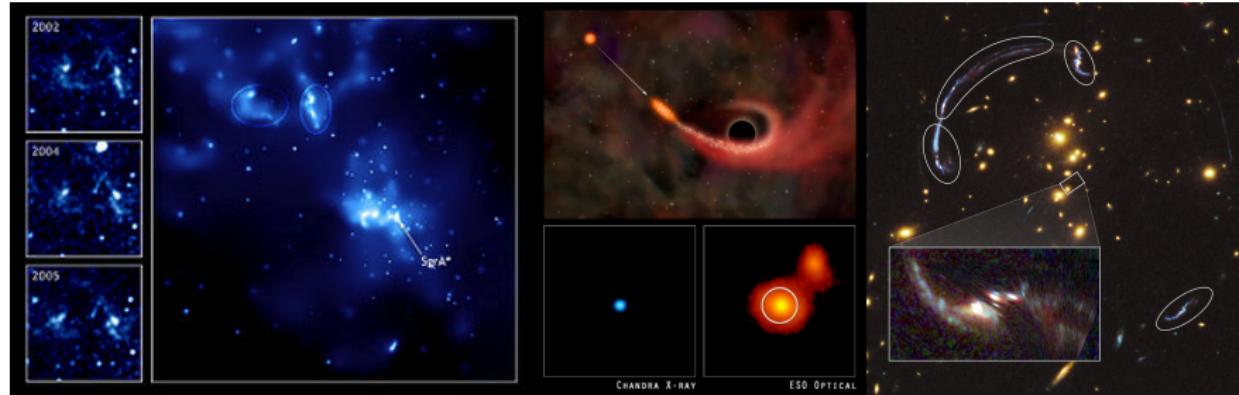
CAMILLE FLAMMARION « ASTRONOMIE POPULAIRE »



Aucune étoile ne se présente comme offrant la prépondérance suffisante pour service de soleil central, et, d'autre part, 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. (pg21)

VOIR LES TROUS NOIRS

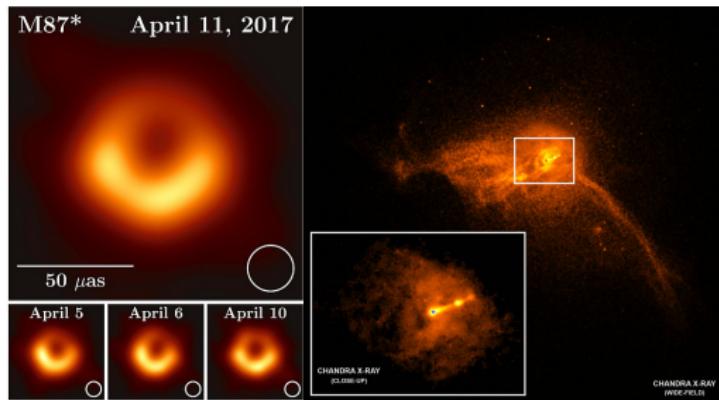
Sagittarius A* au centre de notre galaxie d'une masse
 $M_\bullet = 4.1 \times 10^6 M_\odot$



Vu en observant la matière attirée par le trou noir ou par la déformation des étoiles et effet de lentilles gravitationnelles

VOIR LES TROUS NOIRS

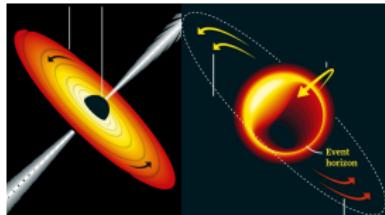
Le 10 avril 2019 la collaboration « Event Horizon Telescope » a publié la photographie de « l'ombre » du trou noir au centre de la galaxie Messier 87 dans la constellation de la Vierge



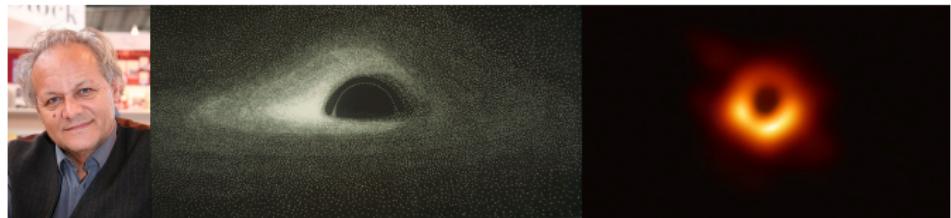
- ▶ Masse de 6.5 milliard de masses solaires
- ▶ Distance 55 million d'années lumières

VOIR LES TROUS NOIRS

Disque d'accrétion entourant l'horizon du trou noir



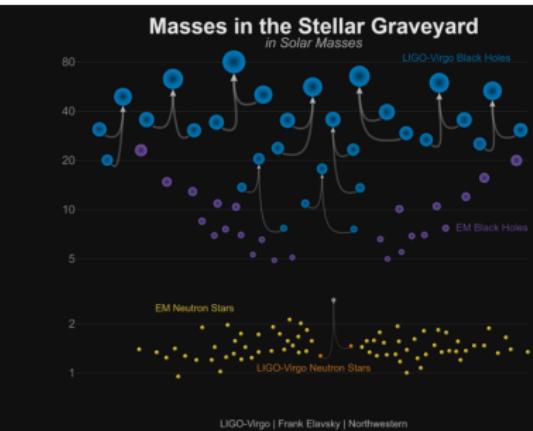
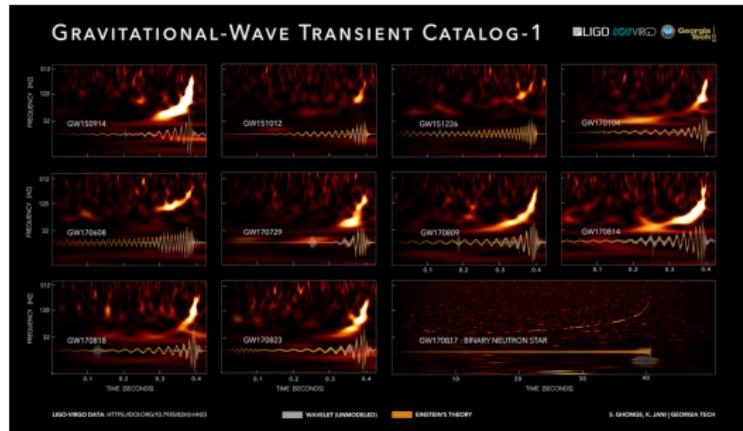
Calculé pour la première fois par Jean-Pierre Luminet en 1979.
Cette image est apparue dans le film Interstellar



La forme de l'orbite est compatible avec la théorie d'Einstein et sa déformation indique que le trou noir est en rotation dans la sens horaire : c'est un trou noir de Kerr

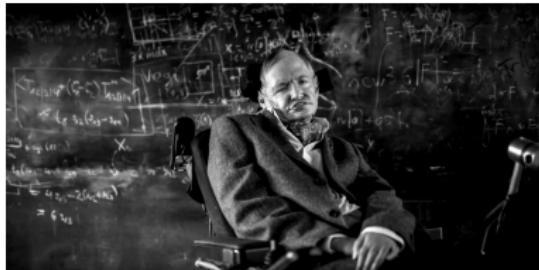
ENTENDRE LES TROUS NOIRS

Depuis le 14 septembre 2015 les collaborations LIGO/VIRGO ont détecté 10 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

AIRE D'UN TROU NOIR



En 1971 et 1972, Stephen Hawking prouvé que l'aire d'un trou noir classique ne peut pas décroître

Trou noir de Schwarzschild $A_{Schw} = \frac{16\pi G^2}{c^4} M_\bullet^2$

- Observation des ondes gravitationnelles [GW150914]

$$A_{Schw}(BH) = 62^2 \geq A_{Schw}(BH_1) = 36^2 + A_{Schw}(BH_2) = 29^2$$

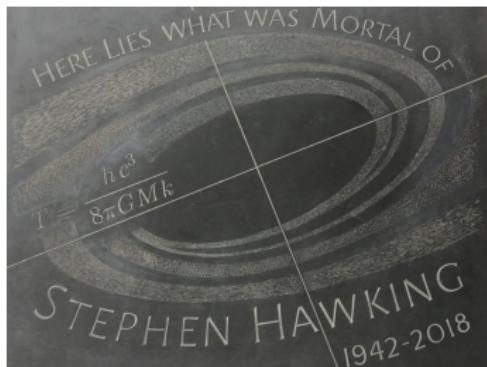
- Énergie onde émise $36 + 29 - 62 = 3M_\odot c^2$



(c) A Sky Full of Ghosts - DeLuce Art

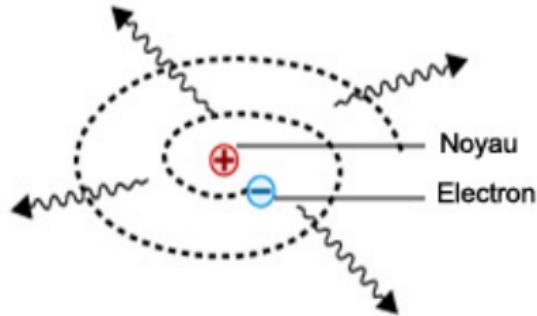
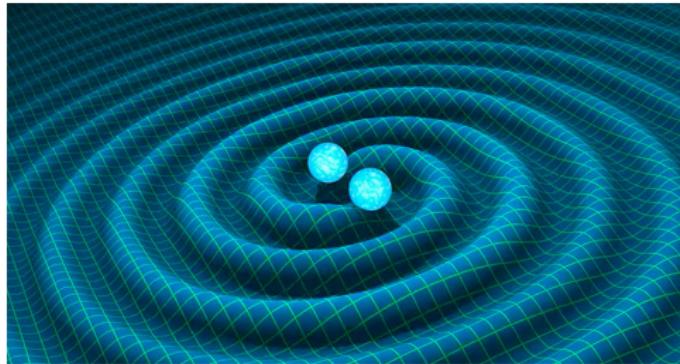
Deuxième partie II

TROUS NOIRS QUANTIQUES



There Are No Black Holes (Stephen Hawking)

GRAVITÉ ET MÉCANIQUE QUANTIQUE

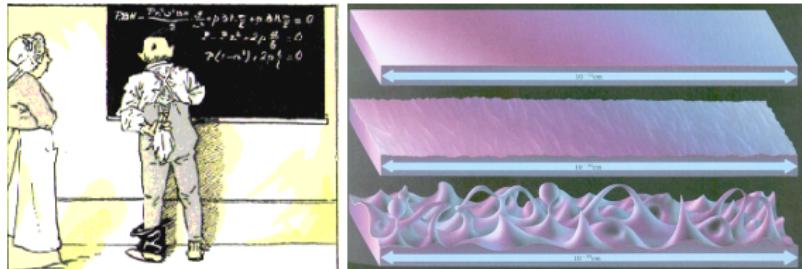


En 1916 Einstein écrit

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

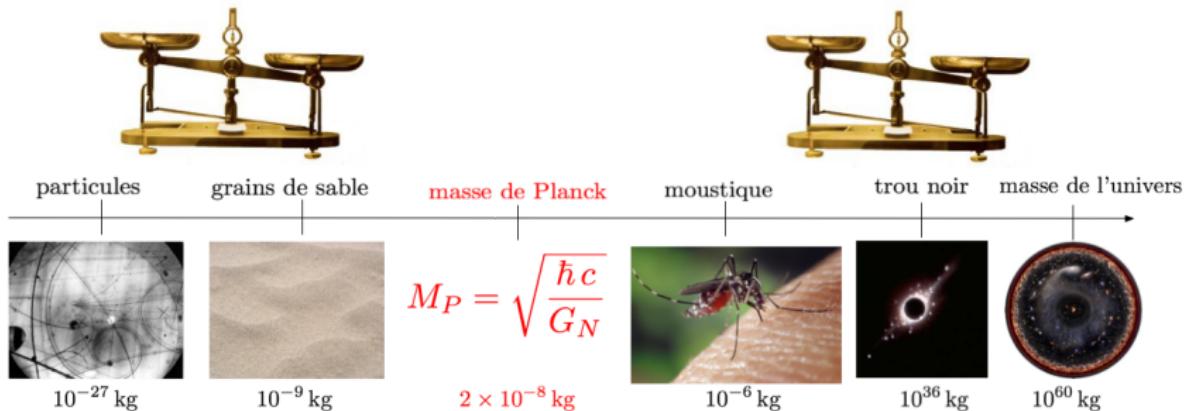
$$r_S = \frac{2GM}{c^2}$$

- ▶ Résolution spatiale **quantique** minimale

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

- ▶ Gravité quantique :

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



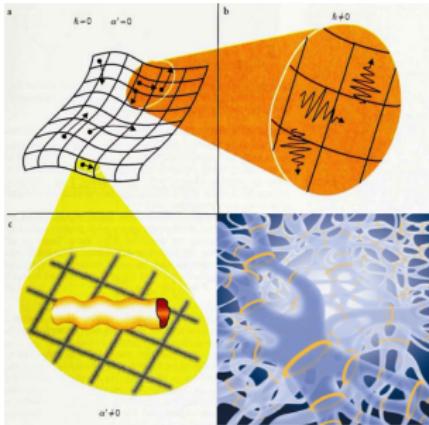
Objet microscopique de taille la longueur de Planck

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

et de masse de Planck

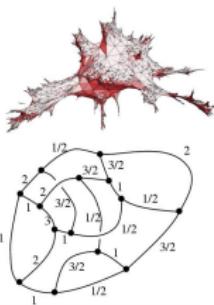
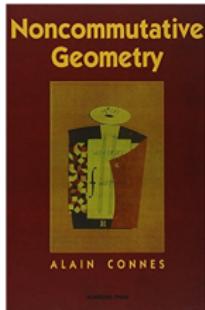
$$M_P = \sqrt{\frac{c\hbar}{G}} = 2.1 \times 10^{-8} \text{ kg}$$

GRAVITATION ET MÉCANIQUE QUANTIQUE



Faut-il modifier la théorie de la gravitation pour l'accorder avec la mécanique quantique?

C'est ce que fait la théorie des cordes



Faut-il préserver la gravitation d'Einstein et modifier les règles de quantification?

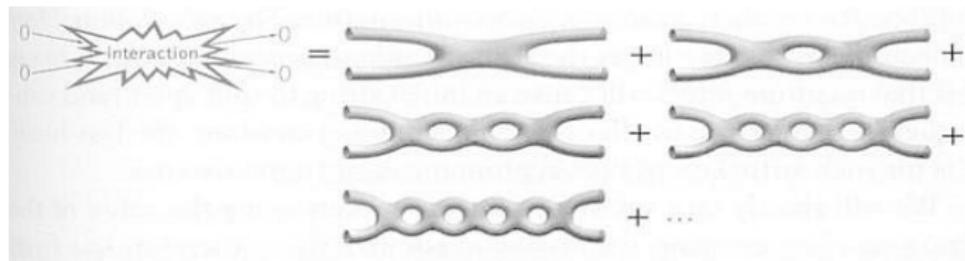
C'est la philosophie de la gravitation quantique à boucles, les triangulations dynamiques causales, la géométrie non-commutative, etc.

PRODUCTION DE TROUS NOIRS QUANTIQUES

La diffusion de particules très énergétiques produit des trous noirs

Les trous noirs microscopiques sont nécessaires à la cohérence mathématique de la gravitation quantique

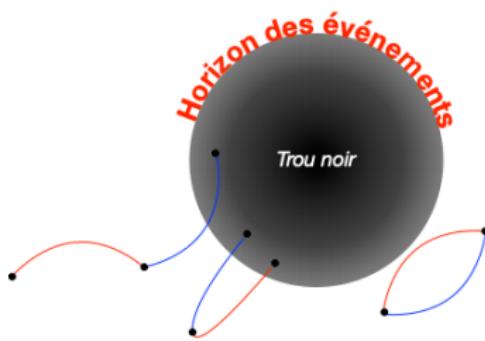
La théorie des cordes est nécessaire pour la cohérence mathématique de leurs contributions aux amplitudes



La diffusion à très haute énergie des cordes est l'expérience de pensée idéale pour étudier les questions fondamentales de l'unification de la gravitation avec la mécanique quantique

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

$$T_{BH} = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M_\odot}$$

$$T_{BH} = 6.17 \times 10^{-8} \frac{M_\odot}{M_\odot} \text{ Kelvin}$$

Plus le trou noir est petit plus il rayonne

Temps d'évaporation d'un trou noir

$$\tau = \left(\frac{M_\odot}{10^{12} \text{kg}} \right)^3 13.8 \text{ milliard d'années}$$

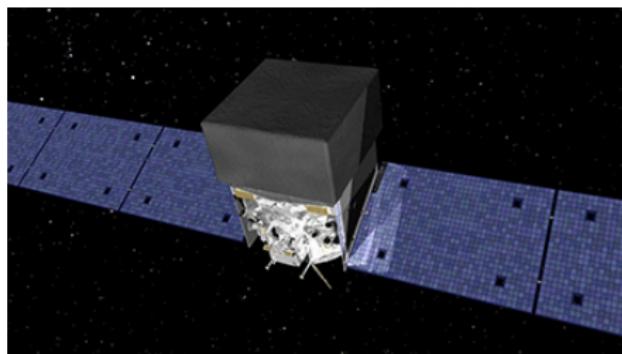
PHYSIQUE DES TROUS NOIRS MICROSCOPIQUES

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

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaac7b>

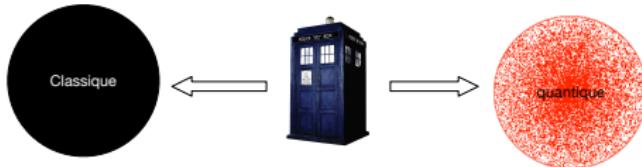


Search for Gamma-Ray Emission from Local Primordial Black Holes with the *Fermi* Large Area Telescope



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

$$dS_{Schw} = \frac{d(Mc^2)}{T_{BH}} = d\left(\frac{k_B}{4\ell_P^2}\left(\frac{16\pi G^2 M^2}{c^4}\right)\right)$$

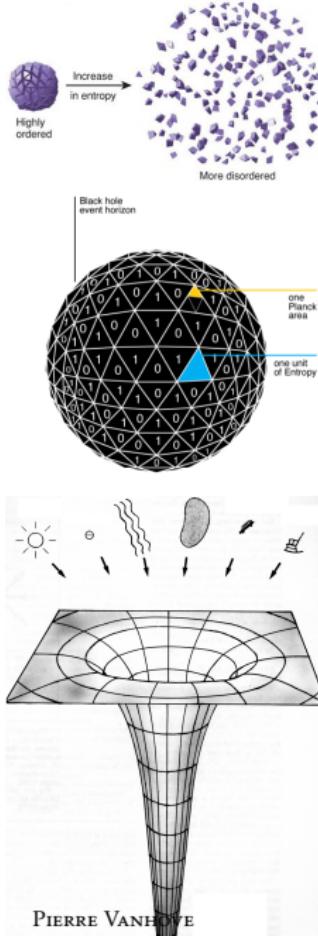
$$S_{BH} = \frac{k_B A}{4\ell_P^2}; \quad \ell_P^2 = \frac{G\hbar}{c^3} = (1.6 \times 10^{-35} \text{ m})^2$$

Le second principe de la thermodynamique établit
l'irréversibilité des phénomènes :

- ▶ l'entropie augmente $\Delta S \geq 0$
- ▶ Augmentation de l'aire du trou noir $\Delta A \geq 0$
 - Observation des ondes gravitationnelles

$$S_{BH} + S_{GW} \simeq S_{BH} \geq S_{BH_1} + S_{BH_2} \implies A(BH) \stackrel{=62^2}{\geq} A(BH_1) \stackrel{=36^2}{\geq} A(BH_2) \stackrel{=29^2}{\geq}$$

ENTROPIE DES TROUS NOIRS



L'entropie compte nombre d'état (de configurations) d'un système selon la formule Boltzman

$$S = k_B \log \Omega$$

Pour un trou noir l'entropie est énorme

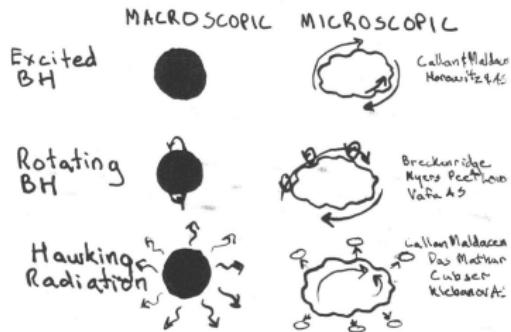
$$S_{BH} = \frac{k_B A}{4\ell_P^2} \simeq \begin{cases} 10^{77} \text{ pour } M_\bullet = M_\odot \\ 10^{90} \text{ pour le trou noir Sagittaire A*} \end{cases}$$

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

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

L'entropie d'un trou noir de masse solaire beaucoup plus grande que celle du Soleil

CALCULS MICROSCOPIQUES EN THÉORIE DES CORDES



En 1995 Strominger et Vafa calcul d'états microscopiques

$$S_{\text{micro}} = k_B \log \Omega_{\text{micro}} \simeq k_B 2\pi \sqrt{\text{charges}} \simeq \frac{k_B \text{Aire}}{4\ell_P^2}$$

L'entropie quantique des trous noirs fait intervenir les corrections quantiques à l'horizon du trou noir

$$S_{\text{micro}}(M, \vec{J}, \vec{Q}) = S_{BH}(M, \vec{J}, \vec{Q}) + \text{corrections}$$

Ces corrections quantiques à l'entropie microcanonique reproduisent le calcul macroscopique thermodynamique

PARADOXES DE L'ÉVAPORATION DES TROUS NOIRS

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

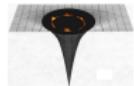
- ?
- Si le trou s'évapore son entropie décroît
 - ⌚ Ça viole le second principe de la thermodynamique
- ?
- Si le trou noir disparaît totalement après l'évaporation
 - ⌚ Ça viole les règles de la mécanique quantique
- ?
- Si le trou noir ne disparaît pas totalement
 - ⌚ Configuration instable quantiquement : 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

QUE CHANGER ? RELATIVITÉ OU MÉCANIQUE QUANTIQUE ?

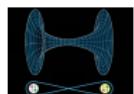
Quelques pistes pour résoudre le paradoxe de l'information



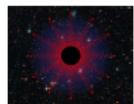
Intérieur du trou noir donné par une « pelote » de cordes
(Mathur; Bena-Warner)



Mur de feu à l'horizon Un observateur qui traverse l'horizon est grillé par les degrés de liberté quantique de haute énergie (Almheiri, Marolf, Polchinski et Sully)



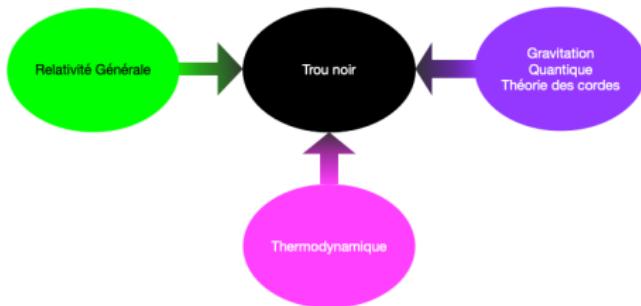
Intrication quantique : pont de Einstein-Rosen =
Einstein-Podolsky-Rosen (Maldacena, Susskind)



Cheveux quantiques : Stephen Hawking, Malcolm Perry

and Andrew Strominger ont proposé que l'information est préservée en dehors du trou noir contenue dans son champ gravitationnel. Le 3/10/2018, article (posthume)
« Black hole and soft hair » [arXiv :1810.01847]

LES TROUS NOIRS : LA THÉORIE POUSSÉE À SA LIMITÉ

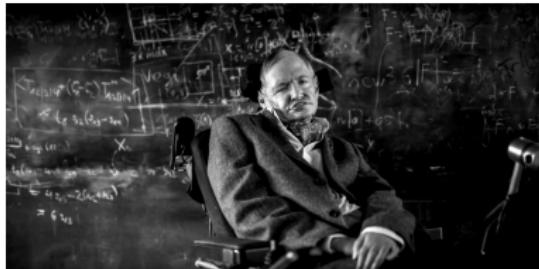


Le « halo quantique » de Hawking-Perry-Strominger peut déformer les rayons lumineux passant près du trou noir. Ainsi des distorsions de l'image du trou noir M87* sur plusieurs jours pourraient être observées et confirmer cette hypothèse.

Ces observations donneraient des informations importantes sur la physique quantique des trous noirs.

Si on n'observe rien alors il faudra penser à des scénarios plus exotiques

STEPHEN HAWKING (1942-2018)



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 3300 années lumières

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