

# MYSTÉRIEUX TROUS NOIRS

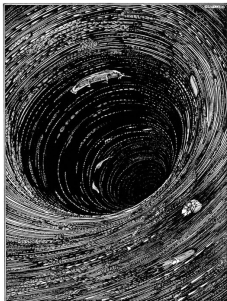
Pierre Vanhove



Commission de Cosmologie  
Société astronomique de France  
Paris, France, 13 octobre 2018

# 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)

# TROUS NOIRS CLASSIQUES



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

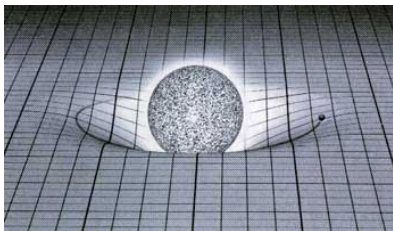
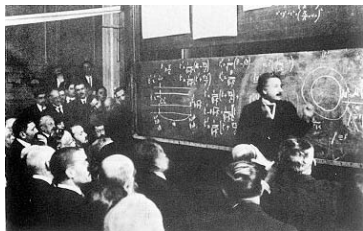
$$r_S = \frac{2GM}{c^2}$$

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 :

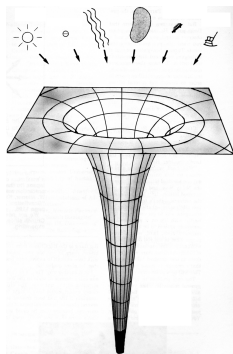
la gravitation résulte de la déformation de l'espace-temps

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

# 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  $M$
  - Moments angulaires  $\vec{J}$
  - Charges électriques  $\vec{Q}$
- ▶ 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

# 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.)

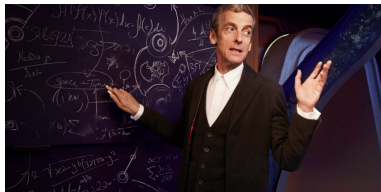
There arises the question whether it is possible to build up a field containing such singularities with the help of actual gravitating masses, or whether such regions with vanishing  $g_{tt}$  do not exist in cases which have physical reality. Schwarzschild himself investigated the gravitational field 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, *Annals 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

# LES TROUS NOIRS : LE TEST ULTIME DE LA RELATIVITÉ



*DOCTOR : Short version. Because of the black hole, time is moving faster at this end of the ship than the other. It's all about gravity. Gravity slows down time.*

*(World Enough And Time- Doctor Who, episode 275a)*

La théorie d'Einstein est très bien confirmée en champ faible autour de la Terre et dans le système solaire mais on a peu de test en champ fort proche d'un trou noir



# COMBIEN DE TROUS NOIRS ?

SCIENCE NEWS LETTER for January 18, 1964

ASTRONOMY

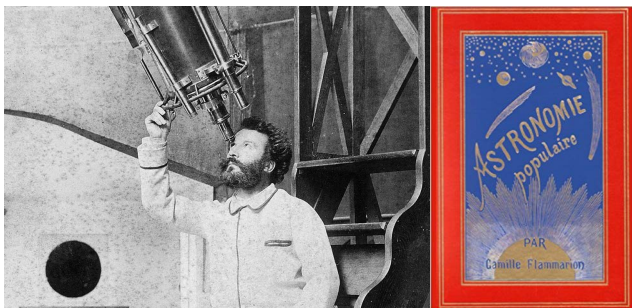
## "Black Holes" in Space

The heavy densely packed dying stars that speckle space may help determine how matter behaves when enclosed in its own gravitational field—By Ann Ewing

▶ SPACE may be peppered with "black holes." Modern tools, such as telescopes on an orbiting space platform, may be used to detect such black holes and to help determine their nature.

- ▶ On estime à 100 millions de trou noir d'une masse solaire dans notre galaxie
- ▶ La région de l'Univers visible de la Terre contient environ 100 milliard de galaxies
- ▶ On estime a 100 milliard le nombre de trou noir supermassifs (millions ou de milliard de masse solaire) dans l'univers
- ▶ Le trou noir connu le plus proche est à 1600 années lumières de la Terre

# CAMILLE FLAMMARION « ASTRONOMIE POPULAIRE »

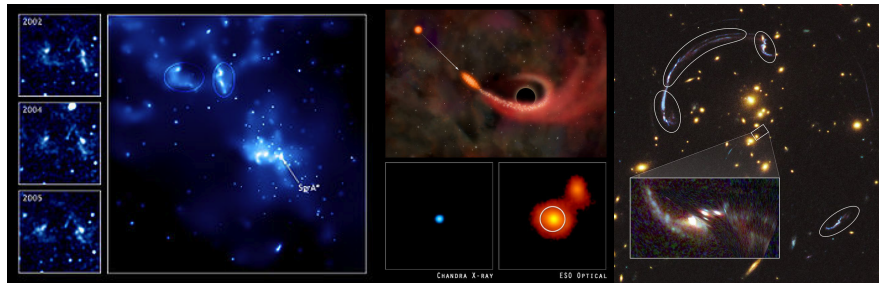


*Aucune étoile ne se présente comme offrant la prépondérance suffisante pour service de soleil central, et, d'autre part, si ce soleil central était obscur (ce qu'il serait difficile d'admettre) les mouvements des étoiles autour de lui devraient se traduire pour nous par une certaine régularité dans les mouvements propres. (p821)*

# VOIR LES TROUS NOIRS

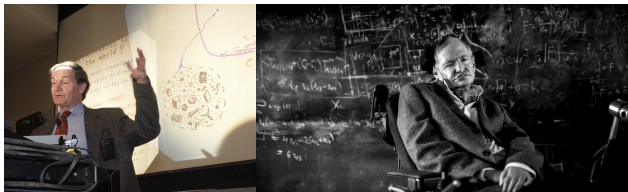
*Sagittarius A\** au centre de notre galaxie d'une masse

$$M_{\bullet} = 4.1 \cdot 10^6 M_{\odot}$$



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

# AIRE D'UN TROU NOIR

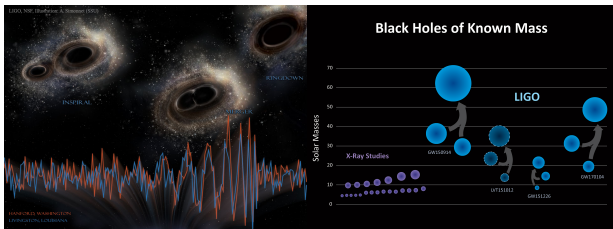


En 1971 et 1972, Stephen Hawking prouvé que l'aire d'un trou noir ne peut pas décroître sous l'hypothèse d'absence de singularité nue (censure cosmique de Penrose)

Pour un trou noir de masse de Schwarzschild  $M_{\bullet}$  l'aire est

$$A = \frac{16\pi G^2}{c^4} M_{\bullet}^2$$

# ENTENDRE LES TROUS NOIRS



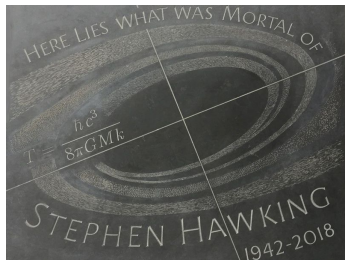
- ▶ Première détection de la dynamique des trous noirs
- ▶ Origine de ces trous noirs binaires ?
- ▶ Hawking : augmentation de l'aire du trou noir  $\Delta A \geq 0$ 
  - Observation des ondes gravitationnelles

$$A(BH) = 62^2 \geq A(BH_1) = 36^2 + A(BH_2) = 29^2$$

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

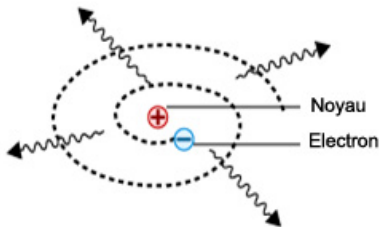
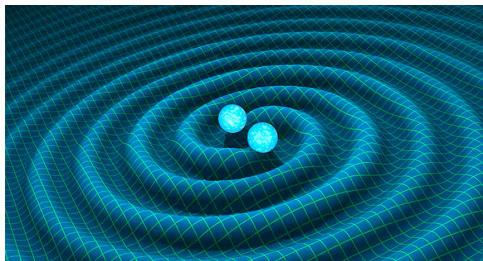
# Deuxième partie II

## TROUS NOIRS QUANTIQUES



*There Are No Black Holes (Stephen Hawking)*

# GRAVITÉ ET MÉCANIQUE QUANTIQUE

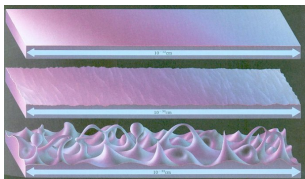


En 1916 Einstein écrit

*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



- ▶ Classique : rayon de Schwarzschild des trous noirs

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

- ▶ Quantique : longueur d'onde de Compton

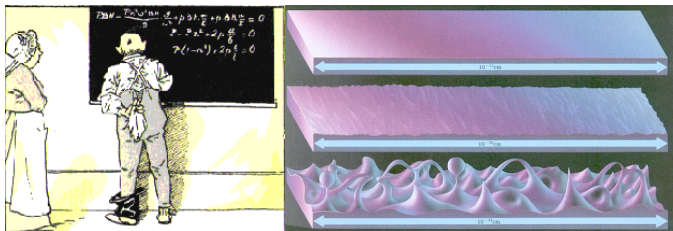
$$\lambda = \frac{\hbar}{Mc}$$

- ▶ Gravité quantique : longueur de Planck

$$r_S \times \lambda = 2\ell_P^2 = 2\frac{G\hbar}{c^3}$$



# GRAVITÉ CLASSIQUE ET QUANTIQUE



Le rayon gravitationnel critique est égal à l'échelle quantique

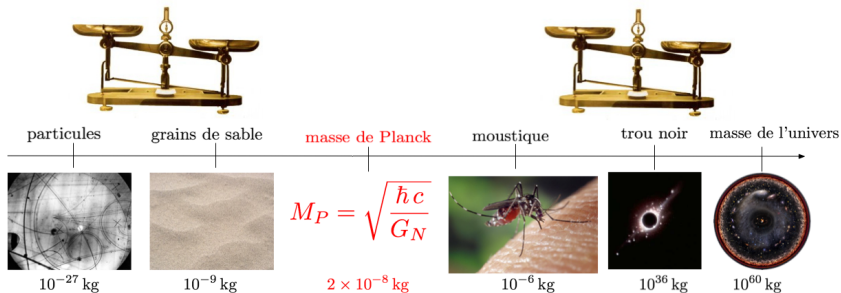
$$\frac{2GM_p}{c^2} = r_S = 2\lambda = \frac{2\hbar}{M_p c}$$

pour une masse dite de Planck

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

les tailles sont données par la longueur de Planck

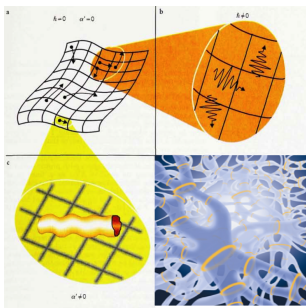
$$r_S = 2\lambda = \ell_p \simeq 10^{-35} \text{ m}$$



Les particules élémentaires sont trop légères en comparaison avec la masse de Planck

Les objets macroscopiques sont beaucoup plus lourds que la masse de Planck

# GRAVITATION ET MÉCANIQUE QUANTIQUE

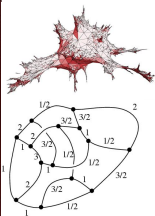
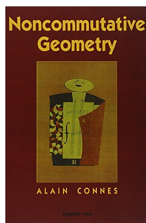


Faut-il modifier la théorie de la gravitation pour l'accorder avec la mécanique quantique ?

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

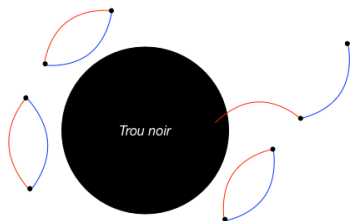
La théorie des cordes est nécessaire pour la cohérence mathématique de leurs contributions aux amplitudes



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

Selon Hawking un trou noir émet un rayonnement quantique en affectant les fluctuations du vide quantique au voisinage de son horizon



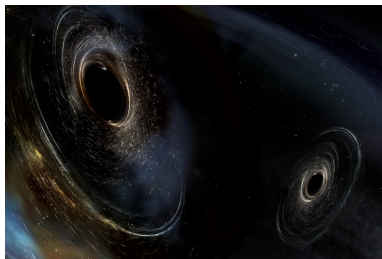
Rayonnement uniforme de type corps noirs avec la température caractéristique

$$T_{BH} = \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B GM \bullet}$$

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

Pouvons-nous observer des micro-trous noirs et le rayonnement de Hawking?

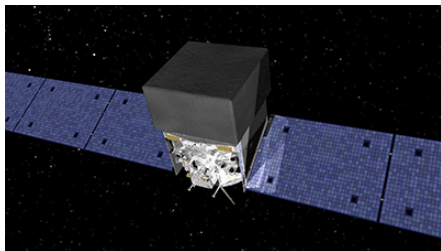
# TROUS NOIRS MICROSCOPIQUES



- ▶ Créés dans l'univers primordial ou juste après
- ▶ Candidats possibles pour la matière noire
- ▶ Évaporation d'un trou noir en un temps  $\tau = \left(\frac{M_{\bullet}}{M_p}\right)^3 t_p$ 
  - ▶ Masse de Planck  $M_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \simeq 2 \times 10^{-8} \text{ kg}$
  - ▶ temps de Planck  $t_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \simeq 10^{-43} \text{ s}$
  - ▶  $\tau$  est de l'âge de l'univers si  $M_{\bullet} \simeq 10^{-18} M_{\odot} \simeq 10^{12} \text{ kg}$

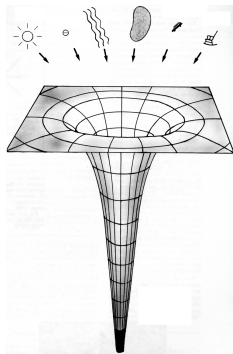


## Search for Gamma-Ray Emission from Local Primordial Black Holes with the *Fermi* Large Area Telescope



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.

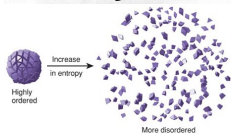
# ENTROPIE DES TROUS NOIRS : IRRÉVERSIBILITÉ



Un trou noir absorbe tout et n'émet rien. Le détail de ce qui est absorbé disparaît puisque le trou noir n'est caractérisé que par sa masse, sa charge et son moment angulaire

C'est en contradiction avec les règles élémentaires du renversement du temps de la mécanique quantique  $A + B \rightarrow C \Leftrightarrow C \rightarrow A + B$

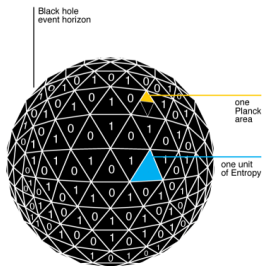
L'irréversibilité du monde macroscopique est mesurée par l'entropie du système  $S = k_B \log \Omega$  où  $\Omega$  est le nombre de configurations microscopiques



Le second principe de la thermodynamique établit l'irréversibilité des phénomènes physiques : croissance de l'entropie  $\Delta S \geq 0$

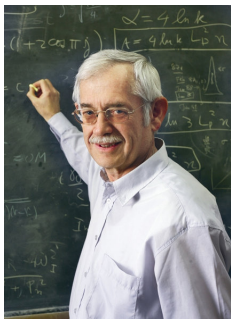


# ENTROPIE DES TROUS NOIRS : IRRÉVERSIBILITÉ



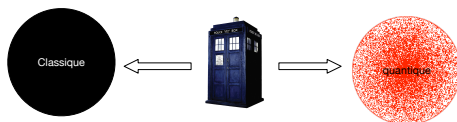
D'après Hawking un trou noir est un système quantique comme les autres

L'irréversibilité classique du trou noir est juste celle thermodynamique d'un système macroscopique



L'entropie des trous noirs, suggérée par Jacob Bekenstein, permet de réconcilier le conflit entre l'irréversibilité classique et quantique des trous noirs

# ENTROPIE DES TROUS NOIRS : IRRÉVERSIBILITÉ



La température de Hawking permet de déterminer l'entropie

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

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

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

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

# CALCULS MICROSCOPIQUES CORDISTES

Les degrés de liberté microscopiques peuvent être décrits comme

- ▶ des excitations de cordes fondamentales
- ▶ des degrés de libertés de branes et de cordes
- ▶ Degrés de liberté quantiques à l'échelle de l'horizon

La fonction d'entropie microcanonique du trou noir

$$S_{micro}(M, \vec{J}, \vec{Q}) = S_{BH}(M, \vec{J}, \vec{Q}) + \log A \times C(\vec{J}, \vec{Q}) + \dots$$

Ces deux contributions sont universelles : elles dépendent que des degrés de liberté de basse énergie

Reproduire ces résultats d'un calcul microscopique contraint fortement la théorie de gravité quantique

# LE PARADOXE DE L'INFORMATION QUANTIQUE

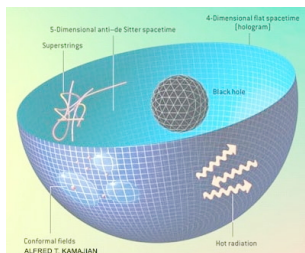
Un trou noir s'évapore. Que devient l'information quantique ?

- ? Disparaît avec le trou noir ?
  - ☹ *Ça viole les règles de la mécanique quantique*
- ? Si elle est émise dans la radiation d'Hawking comment est-elle sortie du trou noir ?
  - ☹ Deux copies de l'information en dehors et dans le trou noir ? *Ça viole les règles de la mécanique quantique*

Le paradoxe repose l'hypothèse que la région autour de l'horizon du trou noir est le vide quantique

- 🔗 Le dernier article d'Hawking développe l'idée que les trous noirs sont entourés de cheveux (radiation) quantiques  
« Black hole and soft hair » (3/10/2018)

En 1997 Juan Maldacena propose la **correspondance AdS/CFT**



La physique gravitationnelle quantique (cordiste) dans l'intérieur de l'espace courbe est équivalente à une physique quantique unitaire sans gravitation sur le bord

La correspondance AdS/CFT donne une résolution formelle du paradoxe de l'information quantique sans violer la mécanique quantique

# RÉSOLUTION DU PARADOXE DE L'INFORMATION ?

En 2005 Hawking admet que l'information n'est pas perdue et qu'il faut modifier la relativité générale mais pas la mécanique quantique



# RÉSOLUTION DU PARADOXE DE L'INFORMATION ?

En 2005 Hawking admet que l'information n'est pas perdue et qu'il faut modifier la relativité générale mais pas la mécanique quantique

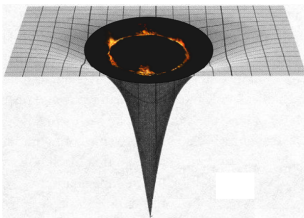


*Des mots, des mots, des mots, des mots. (Hamlet, Shakespeare)*

- ☒ Comment AdS/CFT résout le paradoxe ?
- ☒ Que se passe-t-il à l'horizon ?
- ☒ Quel est *précisément* le mécanisme d'évaporation ?

# UN DRAME QUANTIQUE : LE MUR DE FEU

Il n'est pas possible d'expliquer l'évaporation d'Hawking sans des modifications importantes de la structure de l'horizon



Almheiri, Marolf, Polchinski et Sully ont remarqué que la présence d'une structure à l'horizon du trou noir est incompatible avec la géométrie classique du trou noir : **mur de feu**  
Un observateur qui traverse lentement l'horizon du trou noir est grillé par les degrés de liberté quantique de haute énergie

Cette proposition nécessite une modification radicale de la géométrie des trous noirs



# QUE CHANGER ? RELATIVITÉ OU MÉCANIQUE QUANTIQUE ?

## EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Quelques pistes pour résoudre le paradoxe de l'information



Structure à l'horizon donné par des états cordistes



pont de Einstein-Rosen = Einstein-Podolsky-Rosen



Introduction d'opérateur qui dépend de l'observateur  
(violation subtile de la mécanique quantique)

L'intérieur du trou noir est un modèle pour la cosmologie.  
Résoudre ces questions permettra de progresser sur des  
questions fondamentales de cosmologie primordiale

# LES TROUS NOIRS : LA THÉORIE POUSSÉE À SA LIMITE



Stephen Hawking a profondément changé la manière de penser les trous noirs et notre Univers

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)*