

# TROUS NOIRS QUANTIQUES

Pierre Vanhove

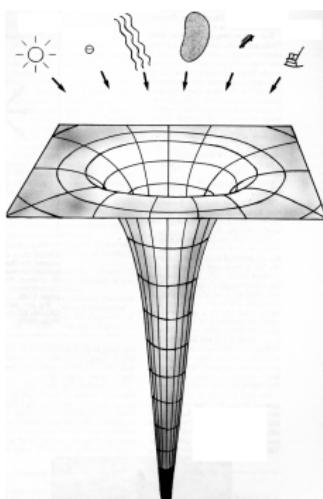


Les trous noirs : leur nature, et leur rôle en physique et en astrophysique

Institut de France, Académie des sciences, Paris, France

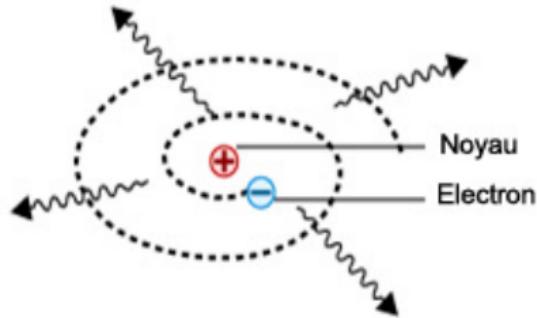
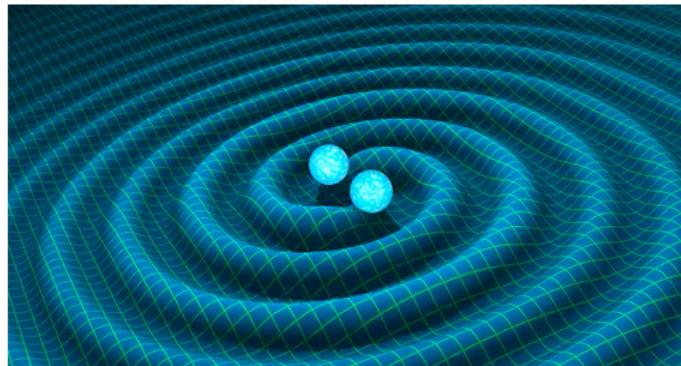
# TROUS NOIRS CLASSIQUES

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

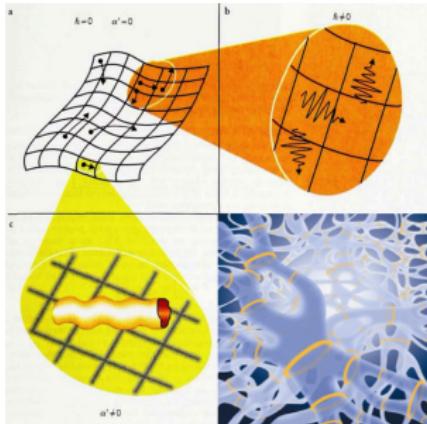
# GRAVITÉ ET MÉCANIQUE QUANTIQUE



En 1916 Einstein écrit

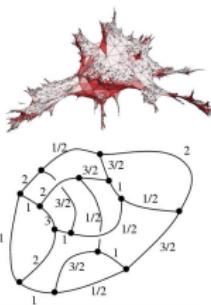
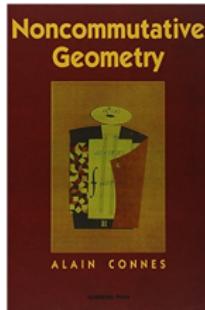
À cause des mouvements intra-atomiques, l'atome doit rayonner (...) de l'énergie gravitationnelle, même en très faibles quantités.  
Comme cela ne peut être le cas dans la nature, il apparaît alors que la théorie quantique doit modifier (...) la nouvelle théorie de la gravitation.

# 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 ?

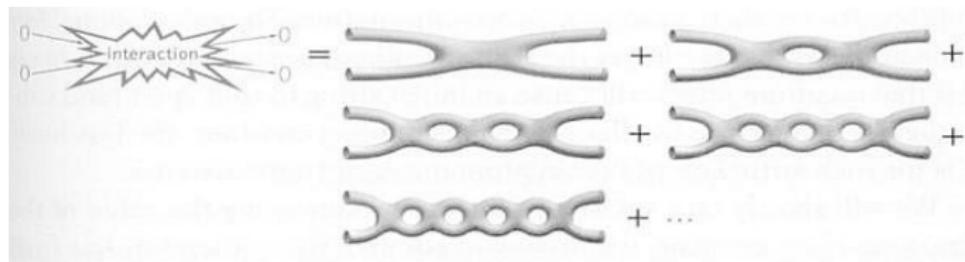
C'est la philosophie de la gravitation quantique à boucles, les triangulations dynamiques causales, la géométrie non-commutative, etc.

# PRODUCTION DE TROUS NOIRS QUANTIQUES

La diffusion de particules très énergétiques produit des trous noirs [Amati, Ciafaloni and Veneziano; 't Hooft ]

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

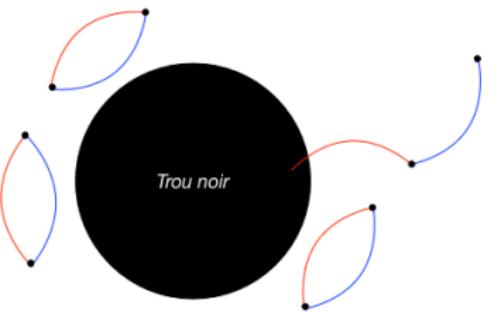
Leurs contributions aux amplitudes de supergravité impliquent la théorie des cordes [Green, Vanhove, Russo; Green, Ooguri, Schwarz]



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 quantiques au voisinage de son horizon



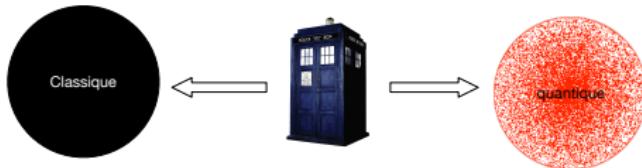
La température du corps noirs

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

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

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

# ENTROPIE DES TROUS NOIRS : IRRÉVERSIBILITÉ



L'entropie des trous noirs a été suggérée par Jacob Bekenstein

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

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

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 [LIGO/VIRGO]

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

# CALCULS MICROSCOPIQUES CORDISTES

Les degrés de liberté microscopiques peuvent être décrits comme

- ▶ des excitations de cordes fondamentales [Sen]
- ▶ des degrés de libertés de branes et de cordes [Strominger, Vafa]
- ▶ Degrés de liberté quantiques à l'échelle de l'horizon (Fuzzball) [Lunin, Mathur; Bena, Warner]

La fonction d'entropie microcanonique du trou noir

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

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 ?

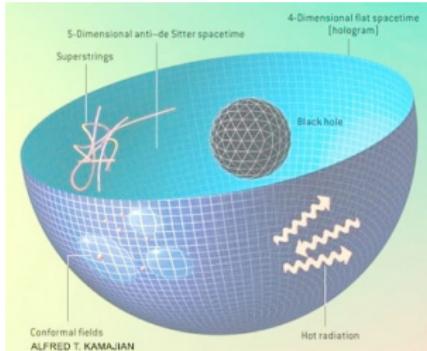
- ? Disparaît avec le trou noir?
  - ⌚ Ça viole les règles de la mécanique quantique
- ? Si elle est émise dans la radiation d'Hawking comment est-elle sortie du trou noir?
  - ⌚ Deux copies de l'information en dehors et dans le trou noir? Ça viole les règles de la mécanique quantique

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

- ⌚ Hawking pensait la mécanique quantique incomplète

# AdS/CFT

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

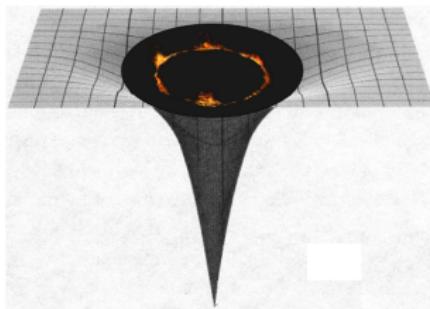


Des mots, des mots, des mots, des mots. (Hamlet, Shakespeare)

- Q&A Comment AdS/CFT résout le paradoxe ?
- Q&A Que se passe-t-il à l'horizon ?
- Q&A 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 [Mathur]



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

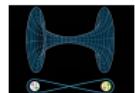
# QUE CHANGER ? RELATIVITÉ OU MÉCANIQUE QUANTIQUE ?

## EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Quelques pistes pour résoudre le paradoxe de l'information



Structure à l'horizon donné par des états cordistes  
(Fuzzball, Firewall) [Mathur; Bena, Warner; AMPS]



pont de Einstein-Rosen = Einstein-Podolsky-Rosen [Maldacena, Susskind]



Introduction d'opérateur qui dépendent de l'observateur  
(violation subtile de la mécanique quantique) [Papadodimas, Raju]

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