

# Trous noirs dans la Théorie des Cordes

Iosif Bena  
DSM / IPhT

# Pourquoi on étudie les Trous Noirs

- Ils existent dans la nature:

- **Systemes binaires**

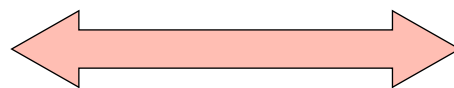
$M \sim 1 - 10 M_{\odot}$

- **Centre des galaxies**

$M \sim 1\,000\,000\,000 M_{\odot}$



Mécanique  
Quantique



Relativité  
Générale

Grand Conflit

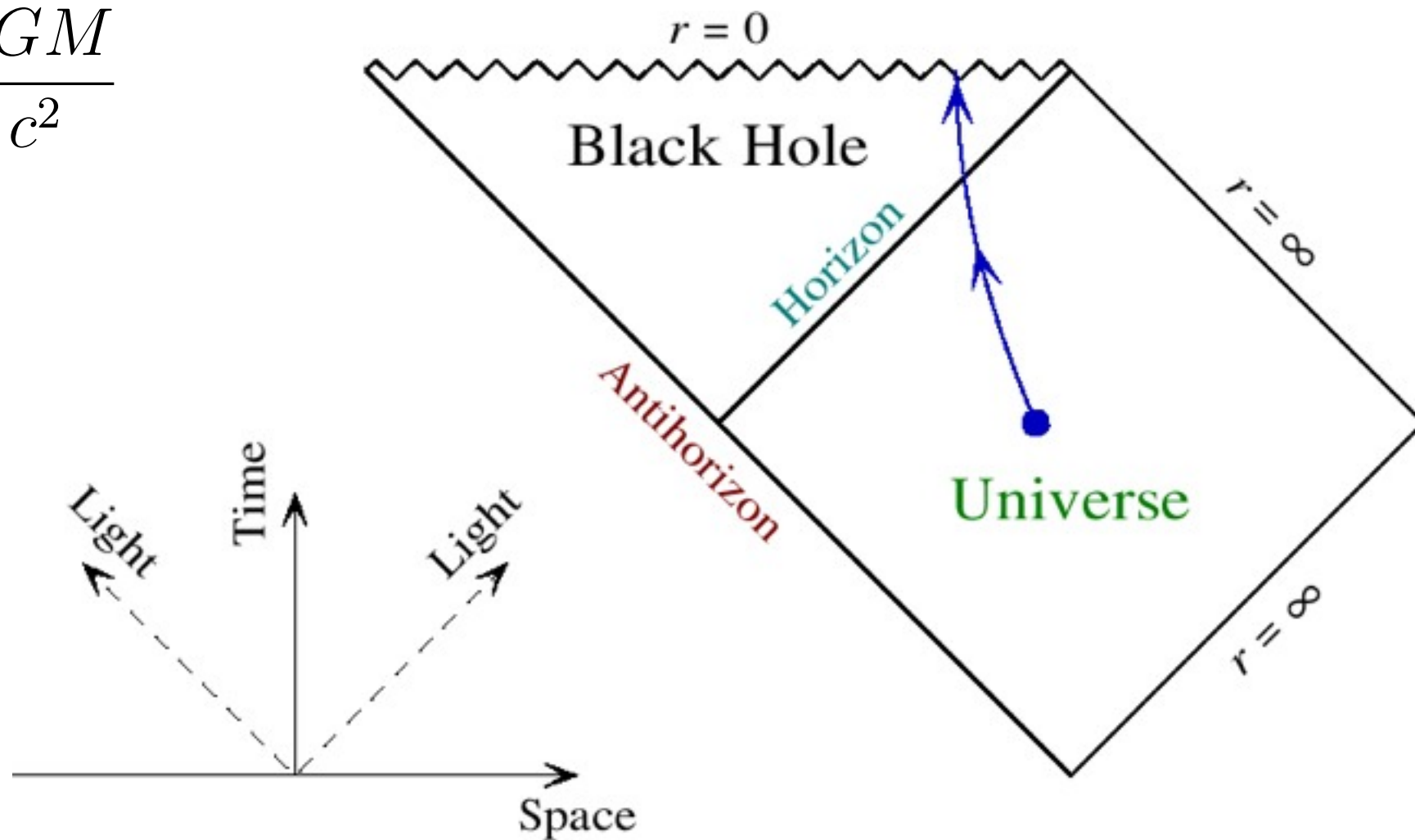
# Relativité Générale

- Les trous noirs sont produits par l'effondrement gravitationnel
- Ils ont une **singularité centrale**, et un **horizon**
- Chaque objet **y compris la lumière** qui passe l'horizon ne peut pas ressortir
- Les trous noirs n'ont pas la **mémoire** des objets qui les ont formés

# Trou Noir de Schwarzschild

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{r_s}{r} \right) dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{r_s}{r}} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2$$

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

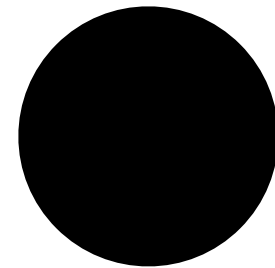


# Relativité Générale

L'information jetée dans un trou noir est perdue !!!

Les seuls caractéristiques d'un trou noir sont:

- la masse
- le moment cinétique
- la charge

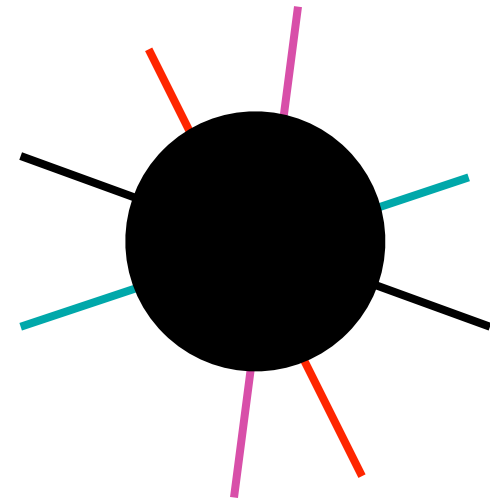


# Relativité Générale

L'information jetée dans un trou noir est perdue !!!

Les seuls caractéristiques d'un trou noir sont:

- la masse
- le moment cinétique
- la charge



# Relativité Générale

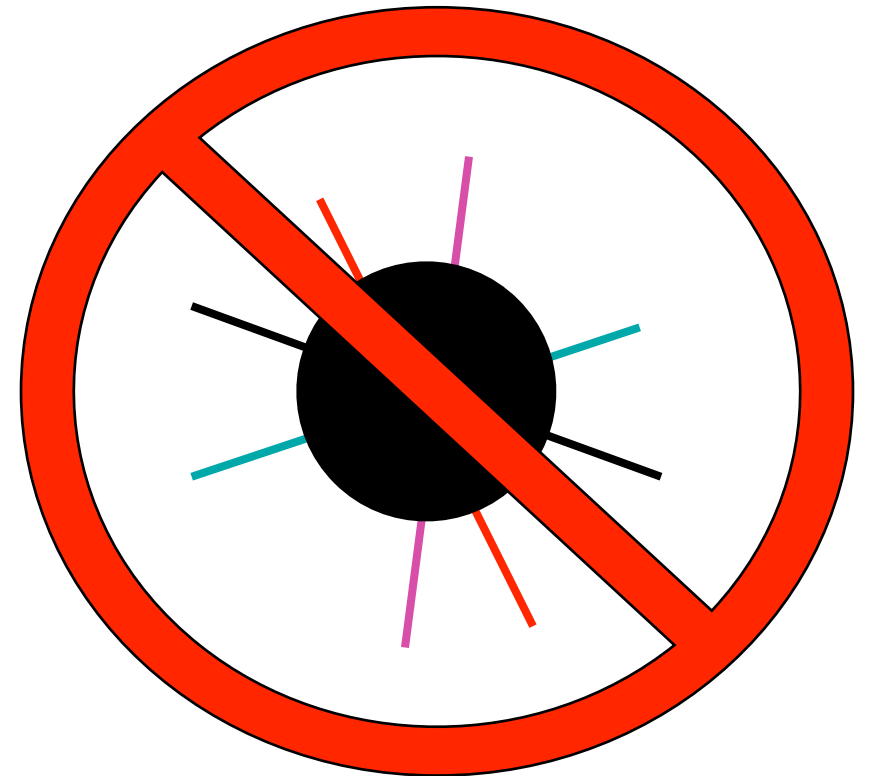
L'information jetée dans un trou noir est perdue !!!

Les **seuls caractéristiques** d'un trou noir sont:

- la masse
- le moment cinétique
- la charge

J.A. Wheeler:

**Les trous noirs n'ont pas de chevelure !**  
(Black holes have no hair)



# Relativité Générale

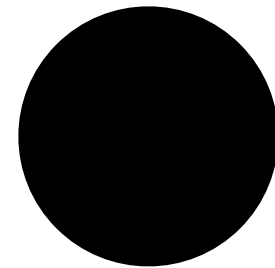
L'information jetée dans un trou noir est perdue !!!

Les seuls caractéristiques d'un trou noir sont:

- la masse
- le moment cinétique
- la charge

J.A. Wheeler:

Les trous noirs n'ont pas de chevelure !  
(Black holes have no hair)



Impossible de distinguer entre des trous noirs formés par l'effondrement de

matière

antimatière

éléphants

physiciens



# Mécanique Quantique:

Physique déterminé par fonction d'onde:  $\Psi$

$$\Psi(t) = e^{-i\hat{H}t} \Psi(0)$$

$\hat{H} = \text{Hermitien} \Rightarrow$

L'évolution de  $\Psi$  est unitaire:

L'information n'est jamais perdue !!!

# Mécanique Quantique:

Bekenstein, Hawking:

On peut associer à un trou noir une **entropie** et une **température**:

$$S_{BH} = \frac{A}{4l_P^2} \quad l_P = \sqrt{G\hbar/c^3} = 1.6 \times 10^{-35} \text{ m}$$

$$T_{BH} = 6.17 \times 10^{-8} \left( \frac{M_{sun}}{M_{BH}} \right) K$$

$S \sim 10^{77}$  trou noir de  $M_\odot$

$S \sim 10^{90}$  trou noir au cœur de la Voie lactée

Trous noirs sont des objets **thermodynamiques**

- 1)  $dE = T dS + \Omega dJ + V dQ$
- 2)  $\Delta S > 0$

E. Verlinde: l'inverse aussi  
**thermodynamique**  $\rightarrow$  **gravité**

# Le plus grand problème

Trou noir de Schwarzschild avec  $S \sim 10^{90}$

Mécanique  
Quantique:



$$e^{10^{90}} = e^{100000000 \dots 00000}$$

états

Théorie de la  
Relativité Générale:

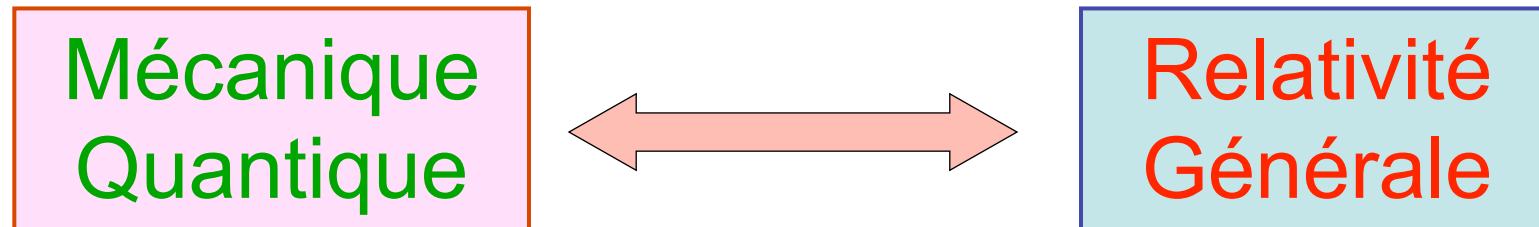


1

état

## paradoxe de l'information

# Trous Noirs



**QUESTION: Où sont les états d'un trou noir ?**

On a besoin d'une **théorie quantique de la gravitation**

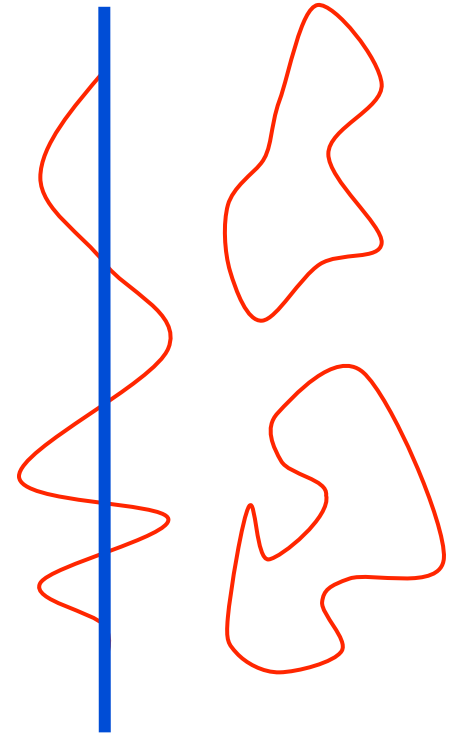
La seule théorie quantique dans laquelle on peut construire et étudier des trous noirs est la **Théorie des Cordes**

Pour l'instant les autres théories sont dans une étape plutôt embryonnaire

# La Théorie des Cordes

- 10 dimensions
- Cordes, membranes (D-branes)
- On construit *beaucoup* de trous noirs en assemblant des D-branes
- Enumération de micro-états →  
l'entropie de Bekenstein-Hawking !!!

Strominger et Vafa (96) + 1000 autres articles



- Le plus simple trou noir:

**D1** branes (cordes), **D5** branes, impulsion **P**

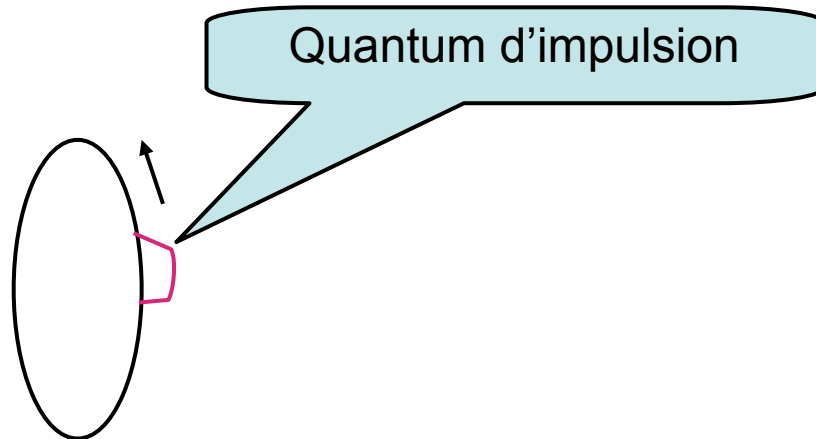
une D1 brane,  $2\pi R$



Quantum d'impulsion

$$\delta P = 1/R$$

$2\pi R$



Quantum d'impulsion

- Le plus simple trou noir:

**D1** branes (cordes), **D5** branes, impulsion **P**

une D1 brane,  $2\pi R$

$N_1$  D1 branes,  $2\pi R$

1 D1 brane,  $2\pi N_1 R$

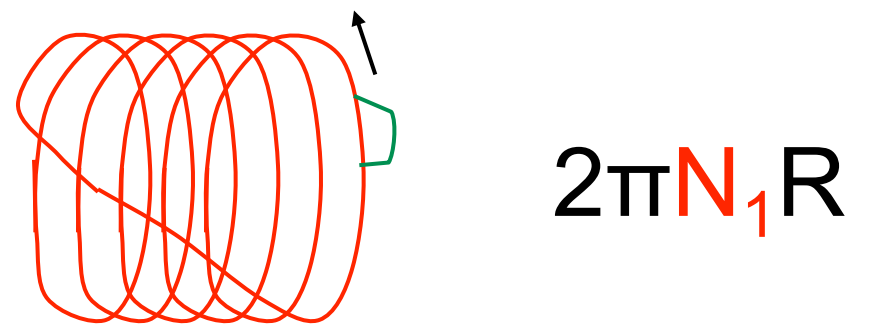
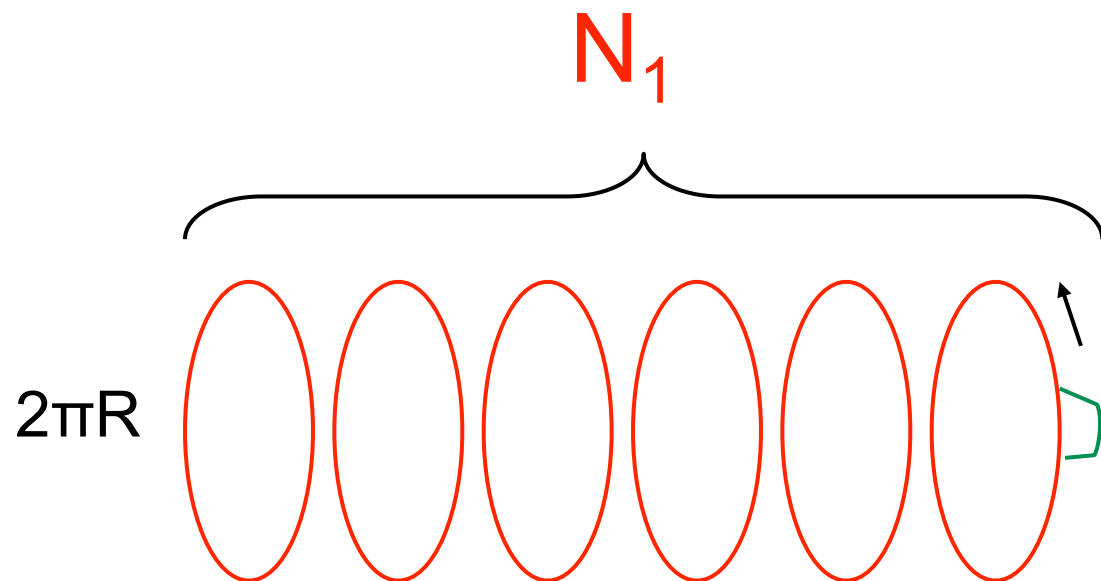


$$\delta P = 1/R$$



$$\delta P = 1/N_1 R$$

Quantum d'impulsion



- Le plus simple trou noir:

**D1** branes (cordes), **D5** branes, impulsion **P**

une D1 brane,  $2\pi R$

$N_1$  D1 branes,  $2\pi R$

1 D1 brane,  $2\pi N_1 R$

$N_1$  D1 +  $N_5$  D5 branes

corde effective,  $2\pi N_1 N_5 R$



$$\delta P = 1/R$$

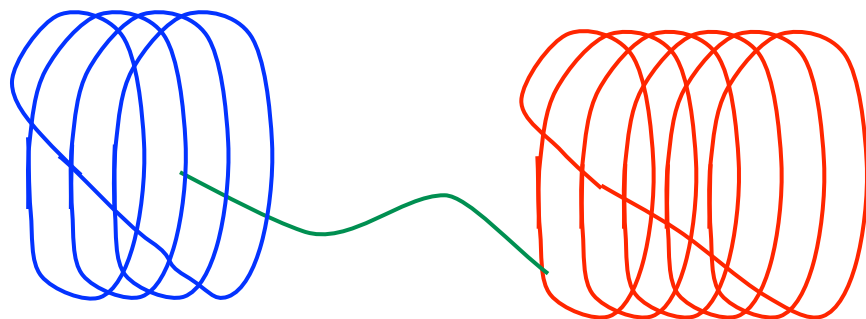


$$\delta P = 1/N_1 R$$



$$\delta P = 1/N_1 N_5 R$$

Quantum d'impulsion





# Énumération des micro-états

- Impulsion totale  $N_P / R$  portée par des quanta de  $1 / N_1 N_5 R$
  - Total =  $N_1 N_5 N_P$  quanta
  - Etats  $\Leftrightarrow$  partitions de  $N_1 N_5 N_P$
  - Combien d'états (partitions) ?
    - $N_1 N_5 N_P = 2$  : (1,1) (2)
    - $N_1 N_5 N_P = 3$  : (1,1,1) (2,1) (3)
    - $N_1 N_5 N_P = 5$  : (1,1,1,1,1) (1,1,1,2) (1,1,3) (1,4) (5) (1,2,2) (2,3)
- $N_1 N_5 N_P$  quanta:  $e^S$  états,  $S_{\text{MICRO}} = 2\pi(N_1 N_5 N_P)^{1/2}$

# L'entropie Bekenstein-Hawking

$$ds^2 = - (Z_1 Z_5 Z_P)^{-\frac{2}{3}} dt^2 + (Z_1 Z_5 Z_P)^{\frac{1}{3}} (dr^2 + r^2 d\Omega_3^2)$$

$$Z_1 = 1 + \frac{r_1^2}{r^2}, \quad Z_5 = 1 + \frac{r_5^2}{r^2}, \quad Z_P = 1 + \frac{r_P^2}{r^2}$$

$$r_1^2 = \frac{g_s N_1 l_s^6}{V}, \quad r_5^2 = g_s N_5 l_s^2, \quad r_P^2 = \frac{g_s^2 N_P l_s^8}{R^2 V}$$

- Horizon à  $r = 0$

$$S_{BH} = \frac{A}{4l_P^2} = 2\pi (N_1 N_5 N_P)^{1/2} = S_{\text{MICRO}} !!!$$

Trous noirs plus compliqués → fonctions hypergeometriques ...

# Micro-états énumérés à **couplage faible**

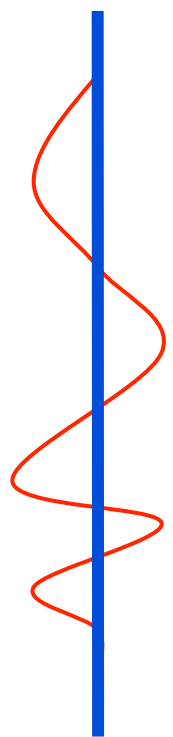
Strominger et Vafa

Les trous noirs n'existent qu'à **couplage fort**



## QUESTION:

Que deviennent les micro-états à **couplage fort** ?



Susskind  
Horowitz Polchinski  
Veneziano Damour

# Micro-états énumérés à **couplage faible**

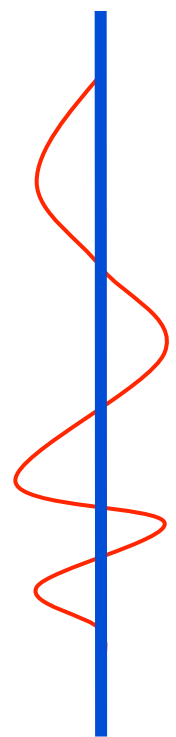
Strominger et Vafa

Les trous noirs n'existent qu'à **couplage fort**



## QUESTION:

Que deviennent les micro-états à **couplage fort** ?



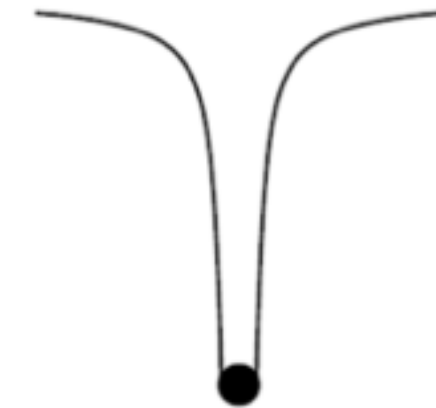
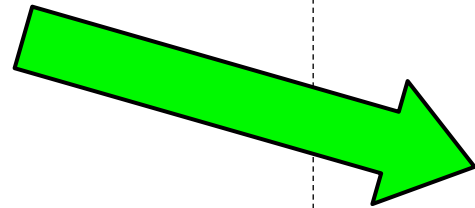
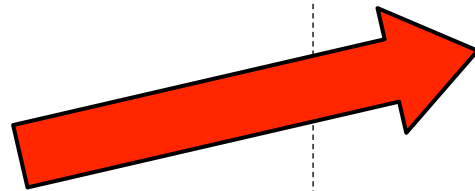
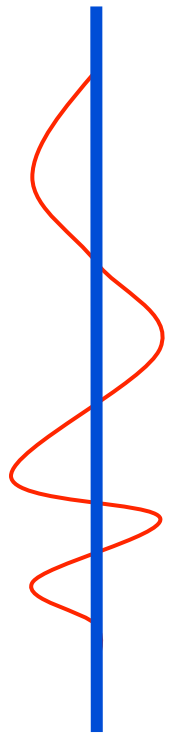
Même géométrie que  
le trou noir à distance



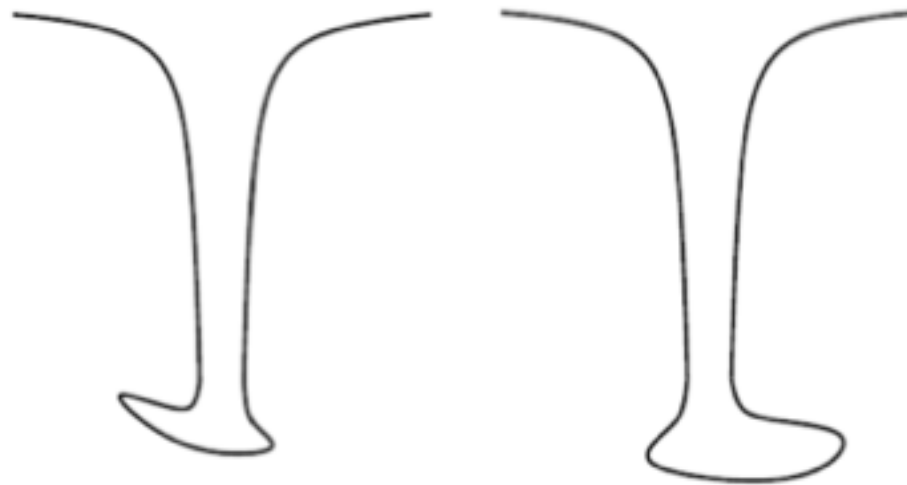
**Horizon** → **région complètement régulière**

Bena, Warner  
Giusto, Mathur, Saxena  
Berglund, Gimon, Levi

Deux possibilités:



Trou noir classique

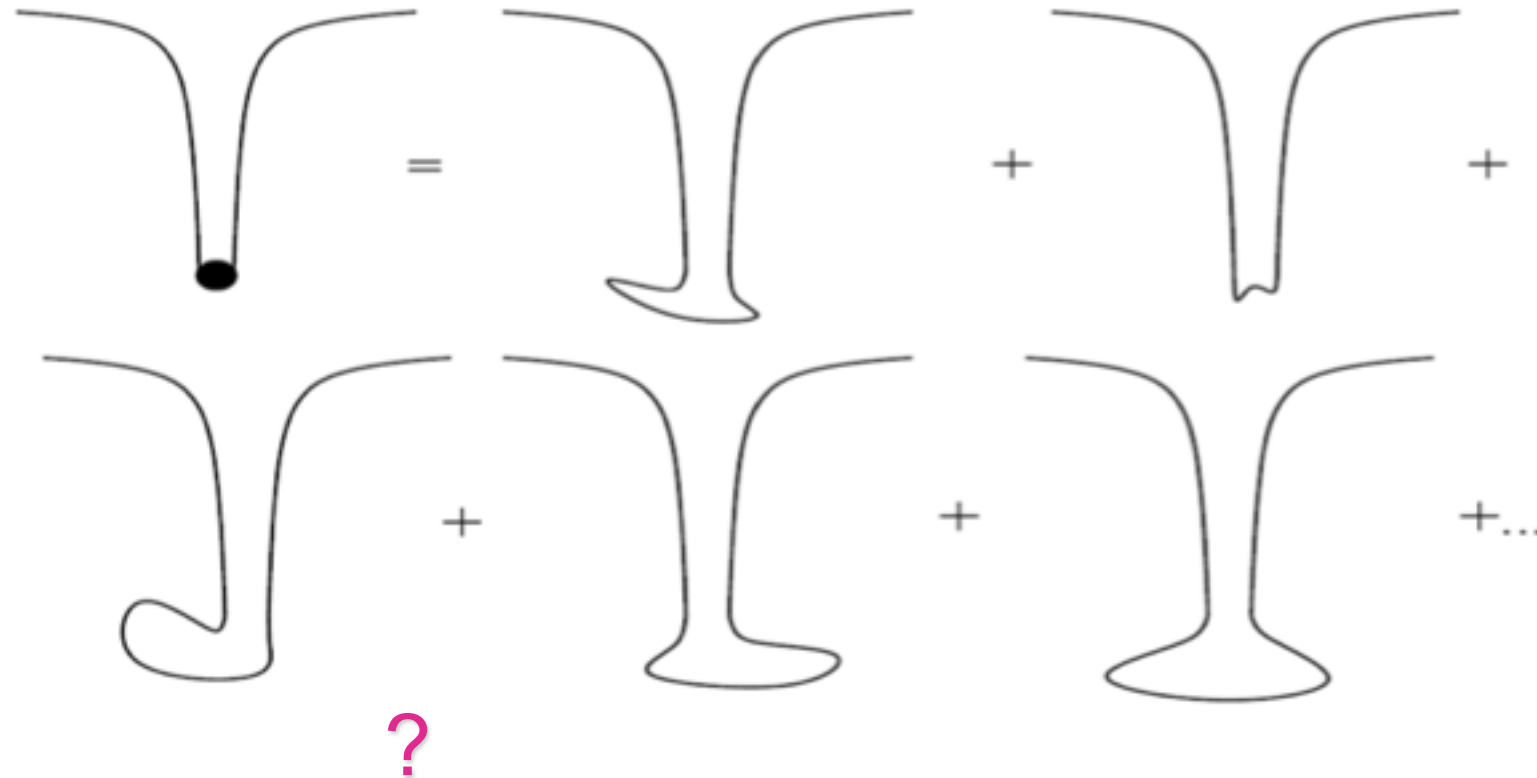


Géométries de micro-états

Couplage  
faible

Couplage fort

**GRANDE QUESTION:** *Tous* les micro-états d'un trou noir sont-ils des géométries sans horizon ?



Trou noir = ensemble d'un grand nombre de géométries

Pas d'horizon  $\Rightarrow$  l'information n'est jamais perdue

Ça résout le paradoxe de l'information !!!

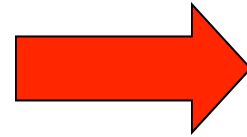
## Thermodynamique

(Air = gaz parfait)

$$P V = n R T$$

$$dE = T dS + P dV$$

Utile pour la  
météorologie



## Mécanique Statistique

(Gaz -- molécules)

$e^S$  micro-états

micro-états **génériques**

micro-états **non-génériques**

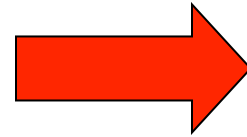
**Mouvement Brownien**  
Condensation Bose-Einstein

## Thermodynamique

(Air = gaz parfait)

$$P V = n R T$$

$$dE = T dS + P dV$$



## Mécanique Statistique

(Gaz -- molécules)

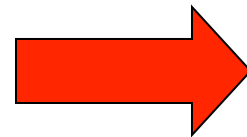
$e^S$  micro-états

micro-états **génériques**

micro-états **non-génériques**

## Thermodynamique

Trou Noir



## Physique Statistique

Géométries de micro-états

**Physique à distance**  
Lentille gravitationnelle

**Physique à l'horizon**  
Perte d'information



# Modification Fondamentale de notre Compréhension des Trous Noirs

- Le trou noir classique donne qu'une description **thermodynamique** de la physique.
- Cette description n'est plus valable à l'échelle de l'horizon. Description **statistique** – **micro-états**.
- Il n'y a pas d'espace-temps à l'intérieur du trou noir. **Superposition quantique** de géométries de micro-états
- La gravitation classique devient invalide **à l'horizon** - **nouveaux degrés de liberté de petite masse**

Autres théories quantiques  
de la gravitation

# Géométries de micro-états

- Ou est la charge ?

$$\mathcal{L} = q A_0$$

$$\mathcal{L} = \dots + A_0 F_{12} F_{34} + \dots$$

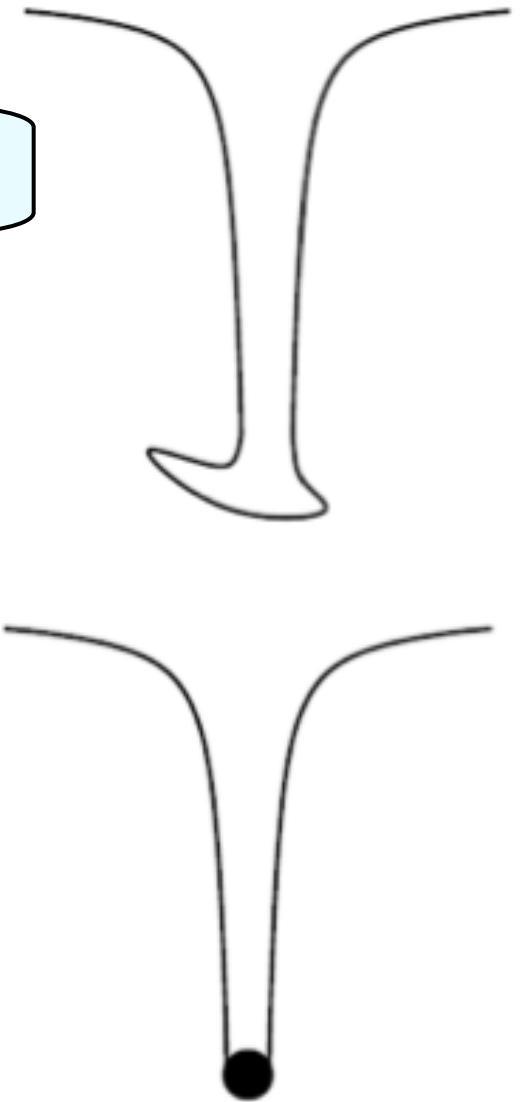
magnétique

- Ou est la masse ?

$$\mathcal{E} = m c^2 = \dots + F_{12} F^{12} + \dots$$

- Ou est le moment cinétique ?

$$\mathbf{J} = \mathbf{E} \times \mathbf{B} = \dots + F_{01} F_{12} + \dots$$



# Nouveaux degrés de liberté de petite masse

$N_1$  D1 branes

$$\delta m \sim 1 / N_1$$

$N_1$  D1 branes +

$N_5$  D5 branes

$$\delta m \sim 1 / N_1 N_5$$

$N_1$  D1 branes +

$N_5$  D5 branes +

$N_p$  quanta d'impulsion

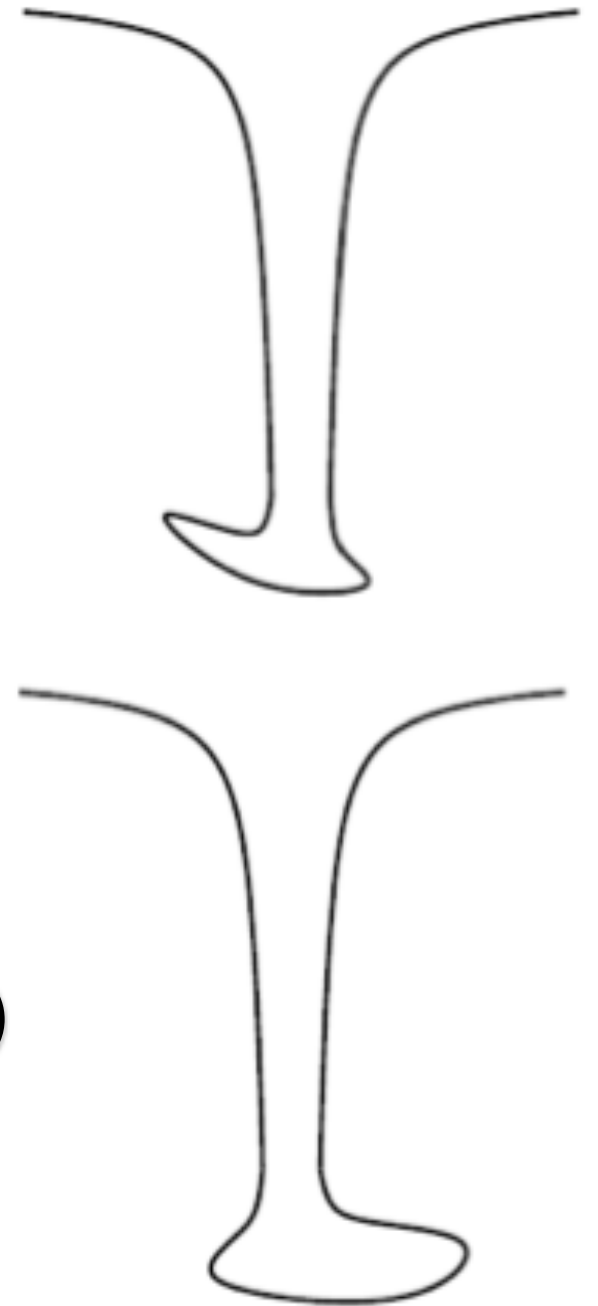
$$\delta m \sim 1 / N_1 N_5 N_p$$

$$\delta R \sim 1 / \delta m \sim N_1 N_5 N_p \quad \text{échelle d'horizon}$$

# Modification Fondamentale de notre Compréhension des Trous Noirs

## Comment peut-on la démontrer ?

- Construire géométries de micro-états
- Déterminées par des **fonctions arbitraires !** ( $\infty$  paramètres)
- **Enumérer** les géométries
- Trouver les micro-états **génériques** (utilisant la correspondance **AdS-CFT**)
- Utiliser la physique de la **QCD** (+ **AdS-CFT**)



# Comment peut-on l'observer ?

Mais pourquoi l'observer ?

N'est-il pas vrai que:

1. Les cordistes sont arrogants
2. Ils travaillent seulement sur des choses abstraites et compliquées:
3. Ils ne s'intéressent pas aux observations
4. Si l'Univers n'est pas décrit par leur théorie, tant pis pour l'Univers !



# Non, ce n'est pas vrai !!!

1. Les cordistes sont quand même arrogants
2. Ils ne travaillent **seulement** sur des choses abstraites
3. Ils commencent à s'intéresser aux observations
4. Si l'Univers n'est pas décrit par leur théorie, tant pis pour l'Univers !



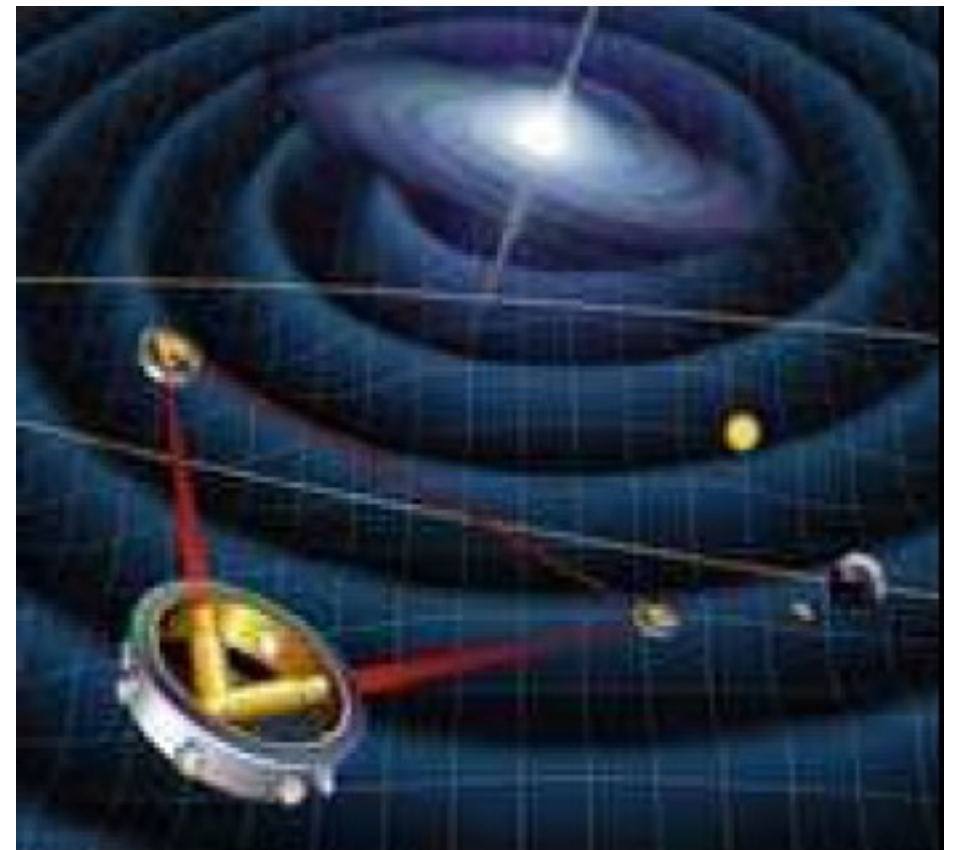
# Comment peut-on l'observer ?

## Caractéristique universelle :

- **Degrés de liberté de petite masse à l'horizon.**
- **Toute** expérience faite **près de l'horizon** d'un trou noir peut les observer.
- Un peu difficile d'aller là-bas ...

Collision des trous noirs:  
**Ondes gravitationnelles** émises  
près de l'horizon

**LISA:**



# Comment peut-on l'observer ?

## Caractéristique universelle :

- **Degrés de liberté de petite masse à l'horizon.**
- **Toute** expérience faite **près de l'horizon** d'un trou noir peut les observer.
- Un peu difficile d'aller là-bas ...

## LHC: Trous Noirs Micro-états

Spectre continu  
désintégration démocratique  
(82% hadrons, 18% leptons)

Spectre continu  
désintégration non-démocratique ?





# Résumé

- Trous noirs → conflit entre la **Théorie de la Relativité Générale** et la **Mécanique Quantique**
- La **Théorie des Cordes** peut énumérer les micro-états
  - Explique l'entropie de Bekenstein-Hawking
  - **Succes extraordinaire** (hypergeometrique = hypergeometrique)
- **Récemment**
  - Trou noir = **approximation thermodynamique** de la physique
  - Superposition quantique de géométries de micro-états ⇒
  - Pas d'espace-temps à l'intérieur du trou noir !!!
  - **Invalidation de la gravitation classique à l'horizon**
- **Directions futures:**
  - Construction + énumération → démonstration (80% → 100 %)
  - Conséquences expérimentales ? (**LISA** , **LHC**)