

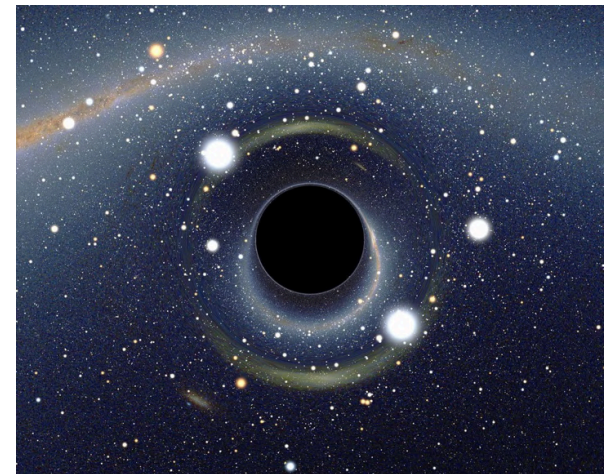


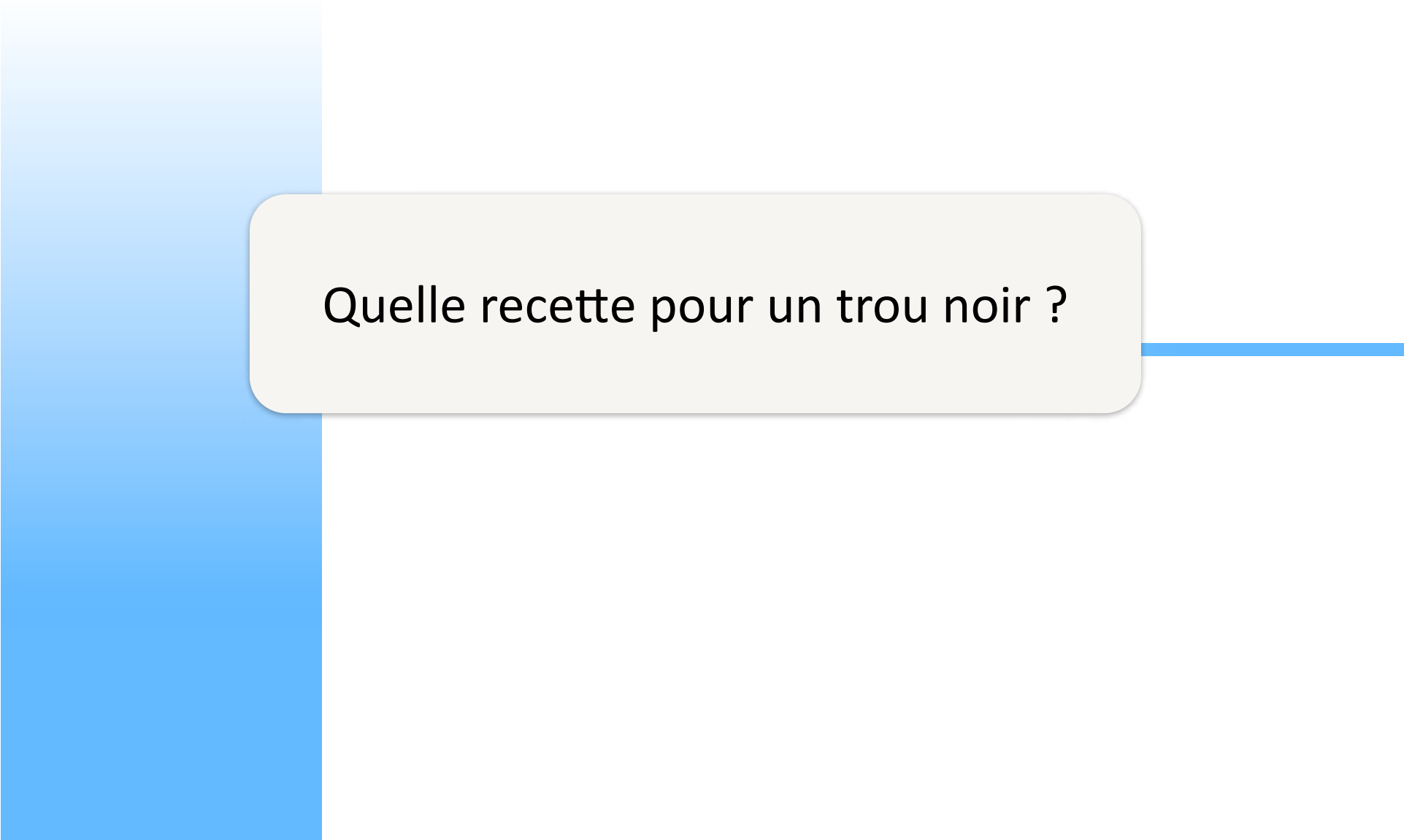
# Un trou noir dans ma baignoire ?

P. Adroguer

Professeur de physique chimie en TSI

Lycée Gustave Eiffel





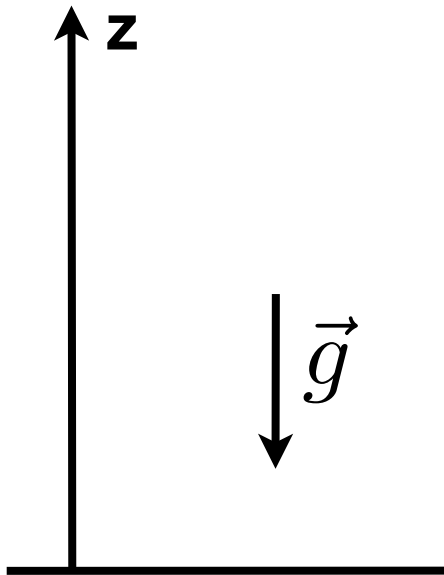
Quelle recette pour un trou noir ?

## A propos de la chute des corps



Galilée (1597) :  
Sur Terre : poids

$$\vec{P} = m\vec{g} = -mg\vec{u}_z$$



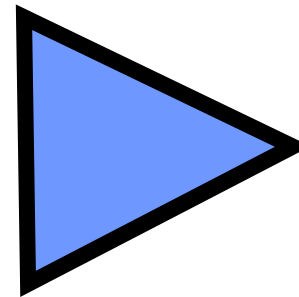
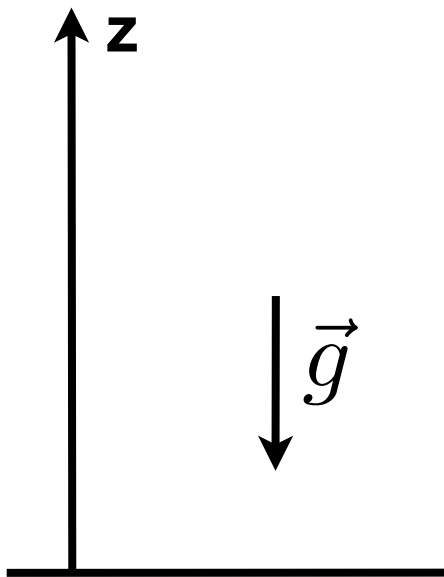
## A propos de la chute des corps



Galilée (1597) :  
Sur Terre : poids  $\vec{P} = m\vec{g} = -mg\vec{u}_z$

$$m\vec{a} = \vec{P} \iff \vec{a} = \vec{g}$$

Change la vitesse de la même manière pour tous les corps.



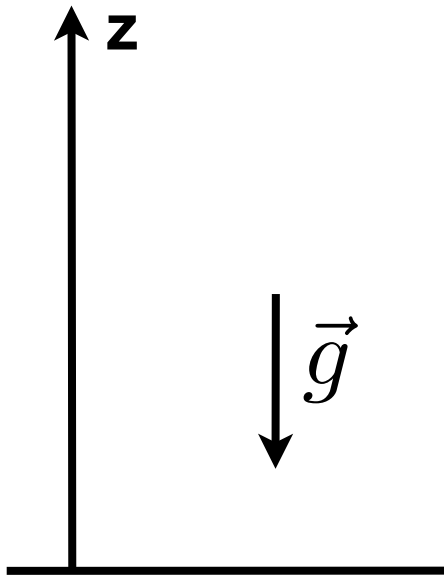


## A propos de la chute des corps



Galilée (1597) :  
Sur Terre : poids  $\vec{P} = m\vec{g} = -mg\vec{u}_z$

Change la vitesse de la même manière pour  
tous les corps.



Altitude maximale atteinte dépend que de la  
vitesse initiale verticale

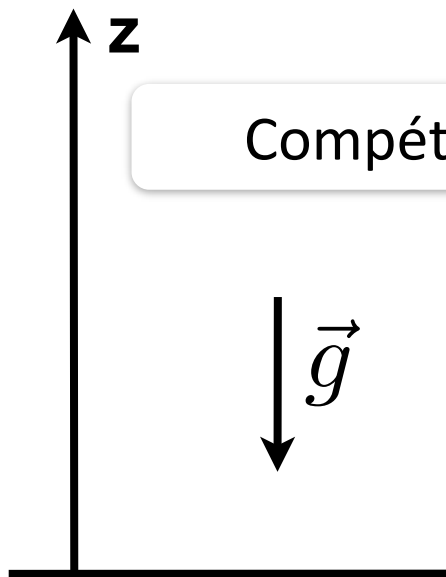


## A propos de la chute des corps



Galilée (1597) :  
Sur Terre : poids  $\vec{P} = m\vec{g} = -mg\vec{u}_z$

Change la vitesse de la même manière pour tous les corps.



Compétition entre énergie potentielle et énergie cinétique

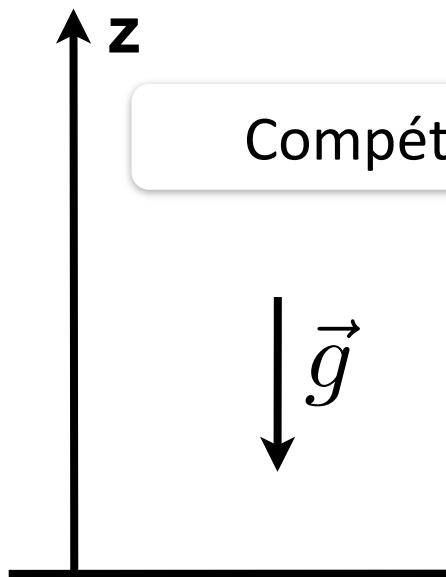
$$E_p = mgh \qquad E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

## A propos de la chute des corps



Galilée (1597) :  
Sur Terre : poids  $\vec{P} = m\vec{g} = -mg\vec{u}_z$

Change la vitesse de la même manière pour tous les corps.



Compétition entre énergie potentielle et énergie cinétique

$$E_p = mgh \quad E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

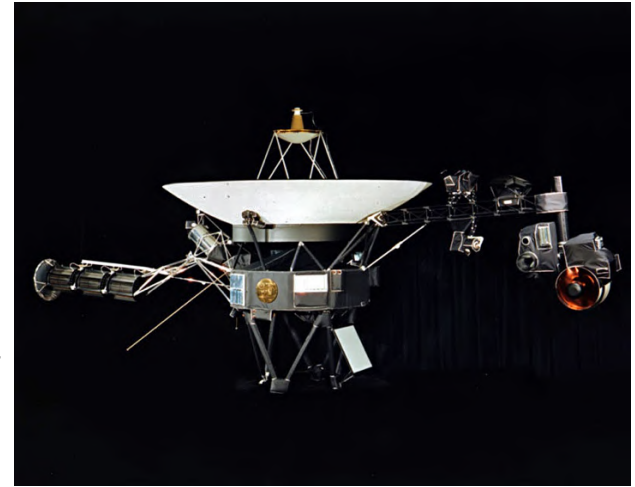
$$\text{Altitude maximale atteinte : } h = \frac{v^2}{2g}$$



## Valable dans l'espace ?

Objet envoyé le plus « haut » : sonde Voyager 1 (800 kg) à une distance de plus de 21 milliards de kilomètres

Energie potentielle :  $E_p = mgh \simeq 10^{15} \text{ J}$



## Valable dans l'espace ?

Objet envoyé le plus « haut » : sonde Voyager 1 (800 kg) à une distance de plus de 21 milliards de kilomètres

Energie potentielle :  $E_p = mgh \simeq 10^{15} \text{ J}$

= 25 000 TEP = 16 Hiroshima !!!



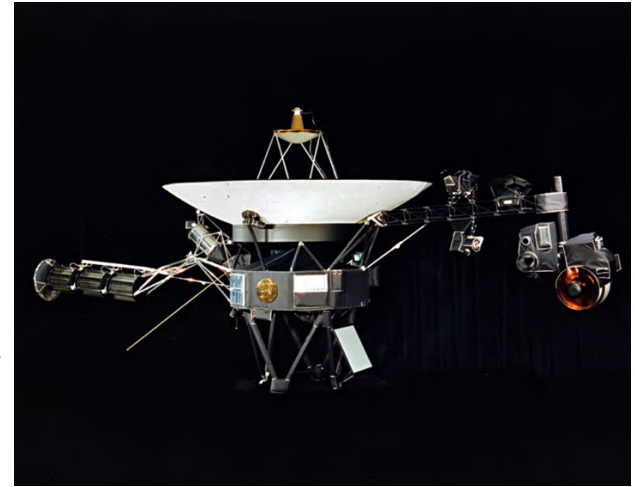
## Valable dans l'espace ?

Objet envoyé le plus « haut » : sonde Voyager 1 (800 kg) à une distance de plus de 21 milliards de kilomètres

Energie potentielle :  $E_p = mgh \simeq 10^{15} \text{ J}$

= 25 000 TEP = 16 Hiroshima !!!

Autre problème : pas besoin d'énergie maintenant pour qu'elle continue à s'éloigner...



La forme retenue pour l'énergie potentielle n'est pas la bonne

## Un peu de gravitation universelle...



Newton (1684) : pour un astre de masse  $M$   
et de rayon  $R$

$$\text{Poids : } \vec{P} = -mg\vec{u}_z \longrightarrow \vec{F} = -m \frac{GM}{(R+h)^2} \vec{u}_z$$

## Un peu de gravitation universelle...



Newton (1684) : pour un astre de masse  $M$   
et de rayon  $R$

$$\text{Poids : } \vec{P} = -mg\vec{u}_z \longrightarrow \vec{F} = -m \frac{GM}{(R+h)^2} \vec{u}_z$$

$$\text{Energie : } E_p = mgh \longrightarrow E_p = -m \frac{GM}{R+h}$$

## Un peu de gravitation universelle...



Newton (1684) : pour un astre de masse  $M$  et de rayon  $R$

$$\text{Poids : } \vec{P} = -mg\vec{u}_z \longrightarrow \vec{F} = -m \frac{GM}{(R+h)^2} \vec{u}_z$$

$$\text{Energie : } E_p = mgh \longrightarrow E_p = -m \frac{GM}{R+h}$$

Au sol :

$$E_p = -m \frac{MG}{R} \quad E_c = \frac{1}{2}mv^2$$



# Un peu de gravitation universelle...



Newton (1684) : pour un astre de masse  $M$  et de rayon  $R$

$$\text{Poids : } \vec{P} = -mg\vec{u}_z \longrightarrow \vec{F} = -m \frac{GM}{(R+h)^2} \vec{u}_z$$

$$\text{Energie : } E_p = mgh \longrightarrow E_p = -m \frac{GM}{R+h}$$

$$\text{Au sol : } E_p = -m \frac{MG}{R} \quad E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\text{Dans l'espace : } E_p \rightarrow 0 \quad E_c \geq 0$$

# Un peu de gravitation universelle...



Newton (1684) : pour un astre de masse  $M$  et de rayon  $R$

$$\text{Poids : } \vec{P} = -mg\vec{u}_z \longrightarrow \vec{F} = -m \frac{GM}{(R+h)^2} \vec{u}_z$$

$$\text{Energie : } E_p = mgh \longrightarrow E_p = -m \frac{GM}{R+h}$$

Au sol :

$$E_p = -m \frac{MG}{R} \quad E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Dans l'espace :

$$E_p \rightarrow 0 \quad E_c \geq 0$$

Vitesse de libération :  $v_l = \sqrt{\frac{2MG}{R}}$  sur Terre  $\approx 11$  km/s

## Et de relativité restreinte !



Einstein (1905) : impossible de dépasser la vitesse de la lumière  $c$ .

$$v_l = \sqrt{\frac{2MG}{R}}$$

Si  $v_l \geq c$ , rien ne peut s'échapper, pas même la lumière !

Trou noir = astre «massif et petit»



## Quelques propriétés des trous noirs

## Le rayon de Schwarzschild = l'horizon

---

Einstein (1915) : relativité générale. Cadre adapté à la description de la gravitation. Masse courbe l'espace-temps.

## Le rayon de Schwarzschild = l'horizon



Einstein (1915) : relativité générale. Cadre adapté à la description de la gravitation. Masse courbe l'espace-temps.

Schwarzschild (1916) : Premier à donner une solution (astre sphérique, sans rotation).

Rayon de Schwarzschild :  $R_S = \frac{2MG}{c^2}$

$$\left( v_l = \sqrt{\frac{2MG}{R_S}} = c \right)$$



## Le rayon de Schwarzschild = l'horizon



Einstein (1915) : relativité générale. Cadre adapté à la description de la gravitation. Masse courbe l'espace-temps.

Schwarzschild (1916) : Premier à donner une solution (astre sphérique, sans rotation).

$$\text{Rayon de Schwarzschild : } R_S = \frac{2MG}{c^2}$$

Terre  $\approx$  9 mm

Soleil  $\approx$  3 km

Sagittarius A  $\approx$  17 soleils

Si rayon de l'astre plus petit que rayon de Schwarzschild :  
trou noir

# Les mécanismes de formation

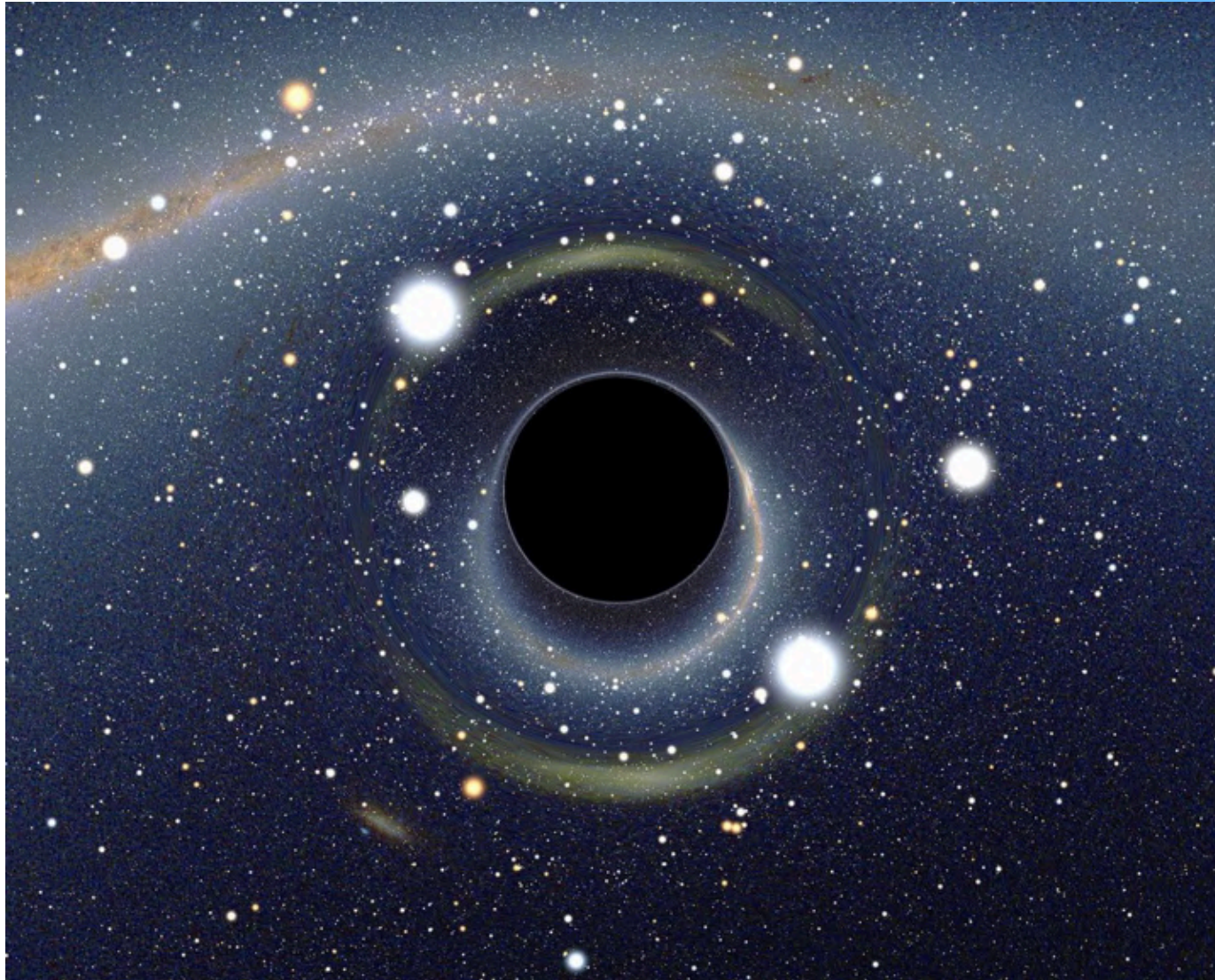
---

2 grands types :

- trous noirs stellaires : effondrement de supernovæ (minimum 3 masses solaires)
- trous noirs supermassifs : accrétion de matière aux centres des galaxies (Sgr A\*)

Dans les deux cas : gravitation plus forte que toutes les autres forces (contrairement aux planètes, étoiles ou étoiles à neutron)

A quoi ça ressemble ?



Un trou noir dans ma baignoire ?

Mars 2019

23

## Ca «aspire» la matière ?

---

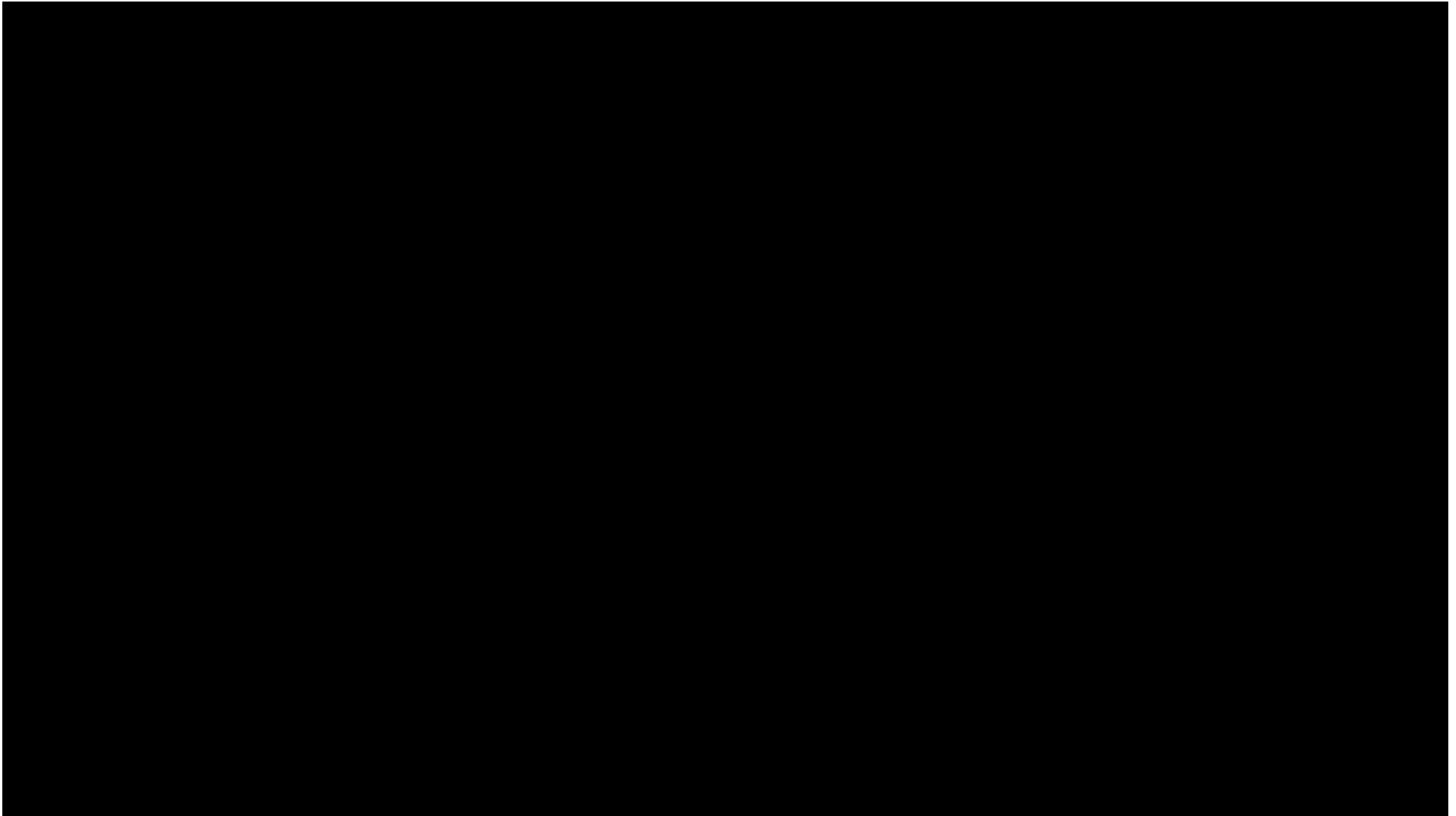
Trou noir = masse concentrée, pas de changement pour objets éloignés.

Si Soleil = trou noir de même masse, pas de changement pour la Terre.

Planète ou étoile à proximité tombe dessus.

# Ca «aspire» la matière ?

---



## Et si je tombe dedans ?

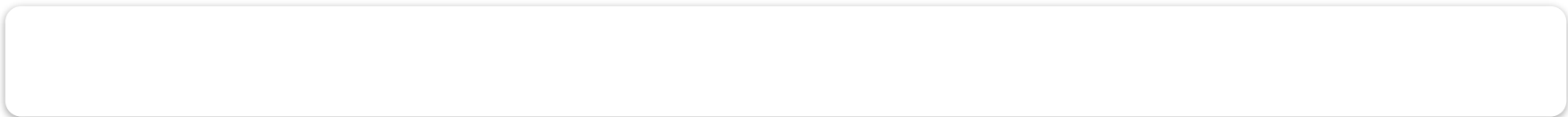


Effets de marée : plus d'attraction sur les pieds que sur la tête : spaghettification.

Pour trou noir stellaire, avant l'horizon.

Pour trou noir supermassif, après.

Observateur extérieur : temps semble figé, immobilité





## Et si je tombe dedans ?



Effets de marée : plus d'attraction sur les pieds que sur la tête : spaghettification.

Pour trou noir stellaire, avant l'horizon.

Pour trou noir supermassif, après.

Observateur extérieur : temps semble figé, immobilité

Pas une expérience agréable



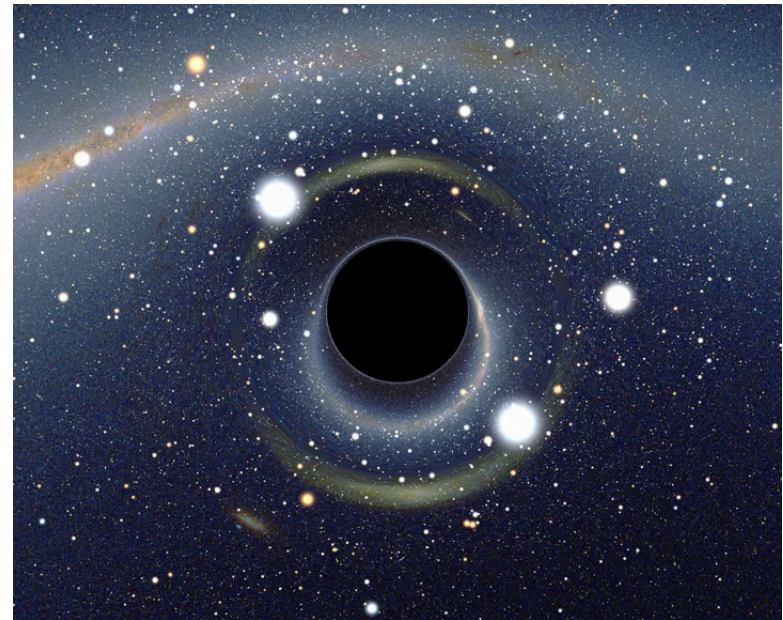
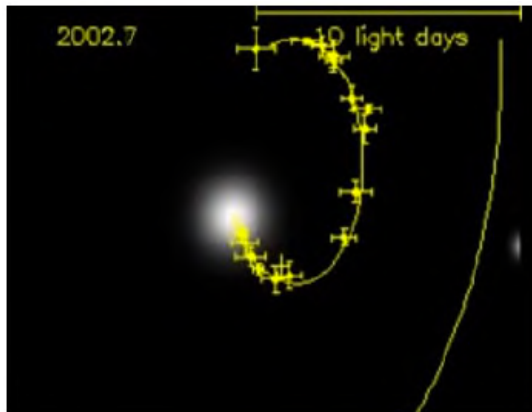
Ca existe ?

## Observations indirectes

Impossible à observer directement (pas de lumière qui en sort).

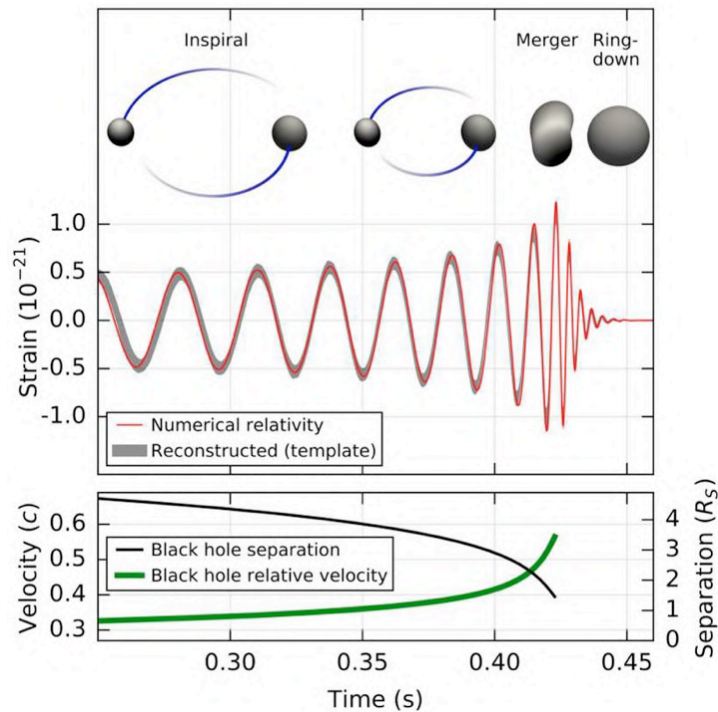
Possibilité d'observer les effets gravitationnels :

- mouvement des étoiles autour ;
- courbure des rayons lumineux (lentilles gravitationnelles).



Trou noir seule explication connue à ce jour

# Ondes gravitationnelles !



Einstein (1915) : relativité générale.  
Cadre adapté à la description de la gravitation.  
Masse courbe l'espace-temps.

Si masse en mouvement, variation de la déformation : ondes gravitationnelles.

Observées pour la première fois en 2015.

Conférence de Mr Vaupré

Seule explication connue : fusion de trous noirs



Rien ne peut s'échapper ?

# Rayonnement Hawking



Trou noir : objet macroscopique défini uniquement par quelques paramètres (masse, surface, moment cinétique, charge électrique).  
Bekenstein (1973) : surface  $\approx$  entropie

# Rayonnement Hawking



Trou noir : objet macroscopique défini uniquement par quelques paramètres (masse, surface, moment cinétique, charge électrique).  
Bekenstein (1973) : surface  $\approx$  entropie

Si entropie, système thermodynamique = température donc rayonnement.

# Rayonnement Hawking



Trou noir : objet macroscopique défini uniquement par quelques paramètres (masse, surface, moment cinétique, charge électrique).  
Bekenstein (1973) : surface  $\approx$  entropie

Si entropie, système thermodynamique = température donc rayonnement.

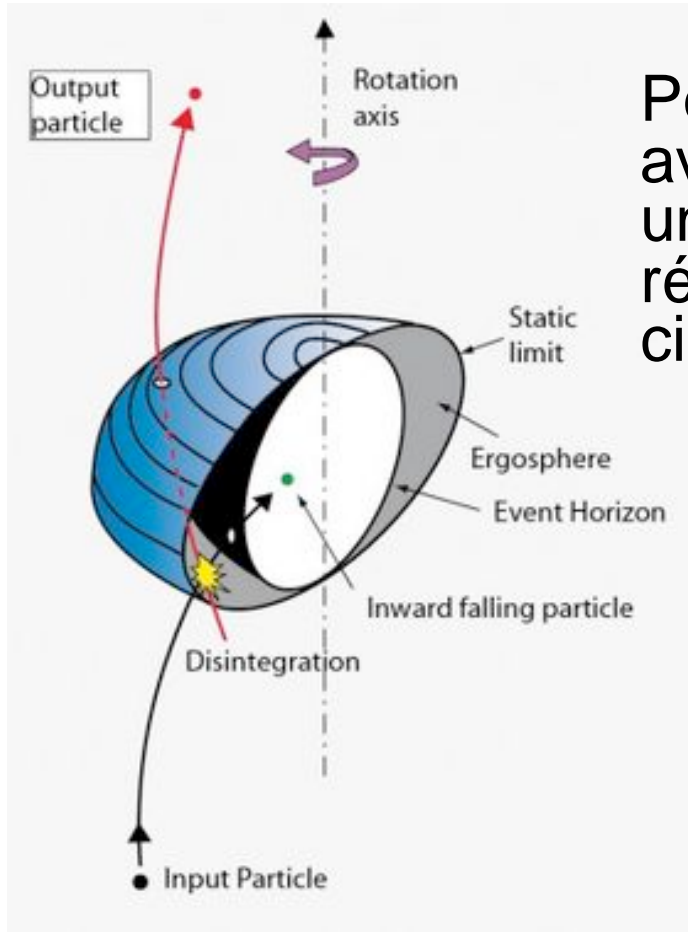
Température très faible (environ microkelvin)

Hawking (1974) : Causé par effets quantiques proche de l'horizon

Rayonnement indétectable...



# Superradiance



Penrose (1969) : si on envoie un système avec une trajectoire bien déterminée dans un trou noir en rotation, on peut en récupérer une partie qui a une énergie cinétique plus grande.

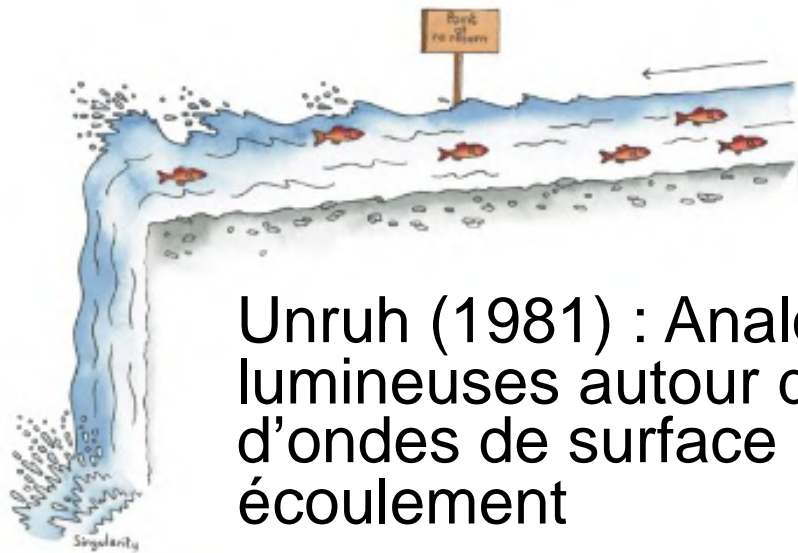


## Superradiance



Gravitation analogue

## Idée de principe

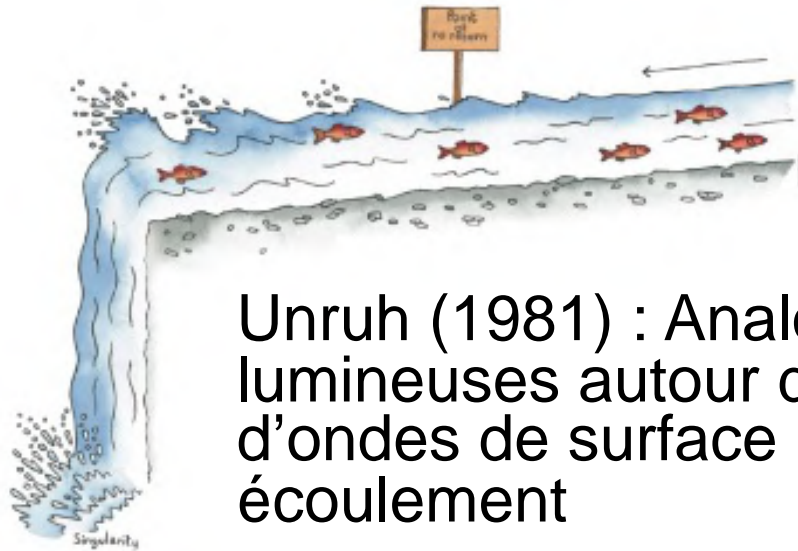


Unruh (1981) : Analogie entre propagation d'ondes lumineuses autour d'un trou noir et propagation d'ondes de surface (ou de son) dans un fluide en écoulement

# Idée de principe



# Idée de principe



Unruh (1981) : Analogie entre propagation d'ondes lumineuses autour d'un trou noir et propagation d'ondes de surface (ou de son) dans un fluide en écoulement

$$(\partial_t + \vec{\nabla} \cdot \vec{v}) \frac{\rho}{c^2} (\partial_t + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \phi - \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{\nabla} \phi = 0 \quad \partial_\mu \sqrt{|g|} g^{\mu\nu} \partial_\nu \phi = 0$$

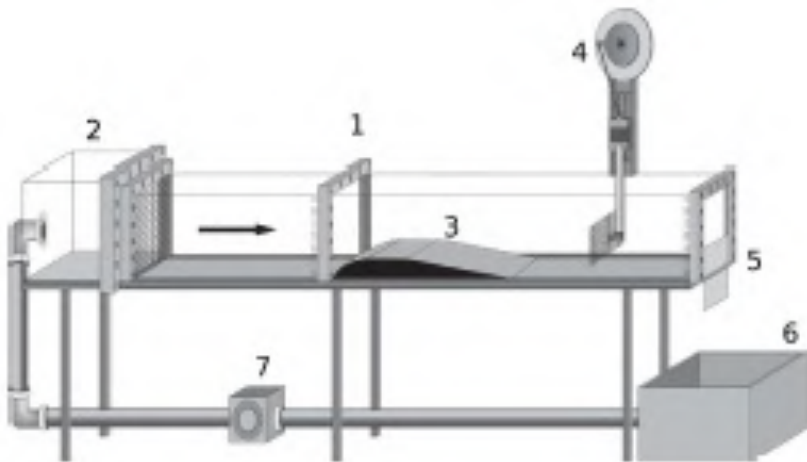
Possibilité de faire des expériences en laboratoire !  
Analogie des trous noirs dans les écoulements

# Réalisations expérimentales

Rayonnement Hawking :

dur à mettre en évidence expérimentalement car rayonnement très faible

Weinfurtner *et al.* 2010 : Trou blanc (symétrique d'un trou noir)

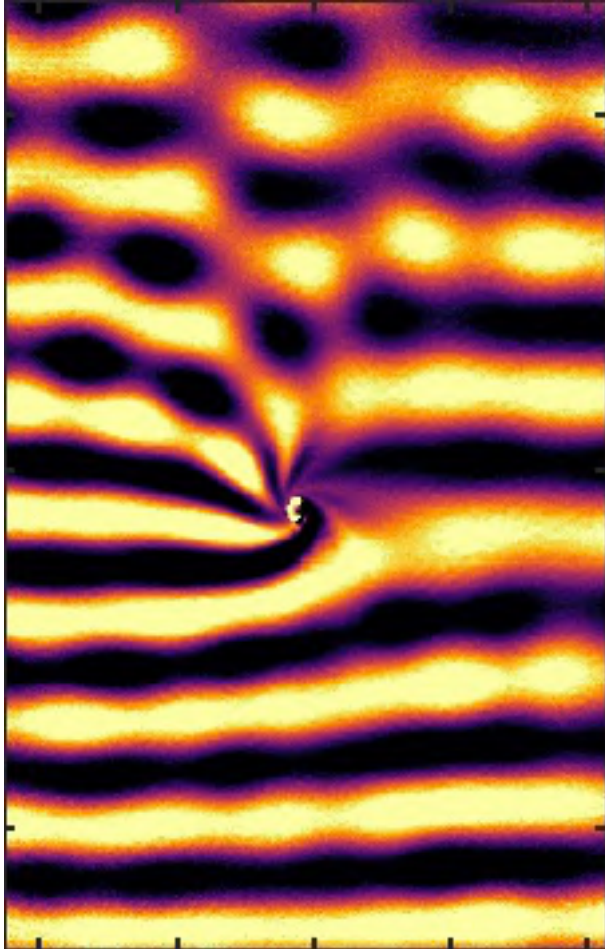


Steinhauer 2016 (dans condensat de Bose-Einstein)

Euvé *et al.* 2016 (analogue d'un trou blanc + corrélations)

Travaux en cours

## Réalisations expérimentales



### Superradiance

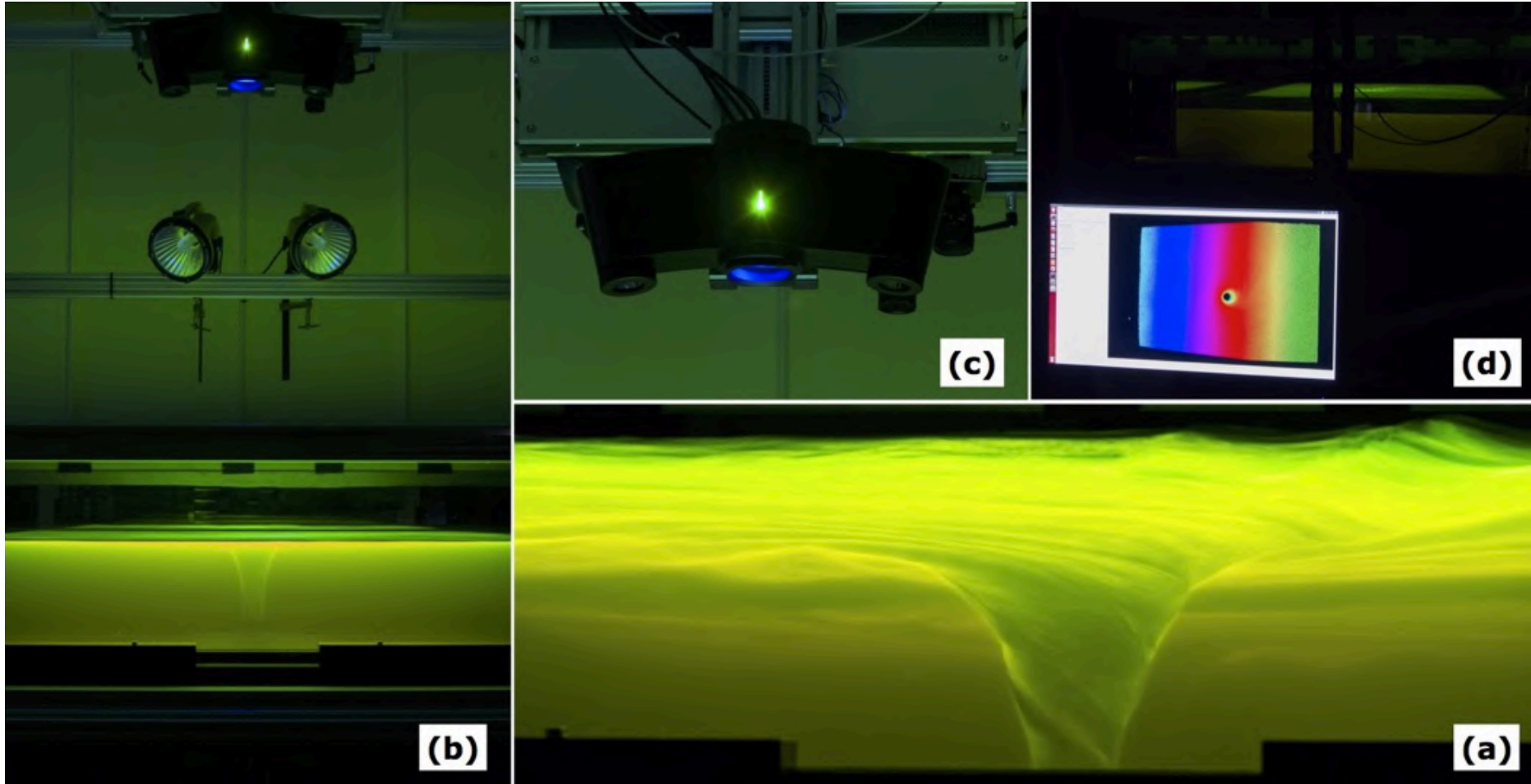
On envoie une onde plane sur un «trou noir» en rotation

Traitement : on décompose l'onde plane en somme de modes «tournants» (ondes azimuthales) selon leur moment cinétique (analogue de TF)

On regarde alors l'énergie transportée par chaque mode avant et après le passage dans le trou noir.

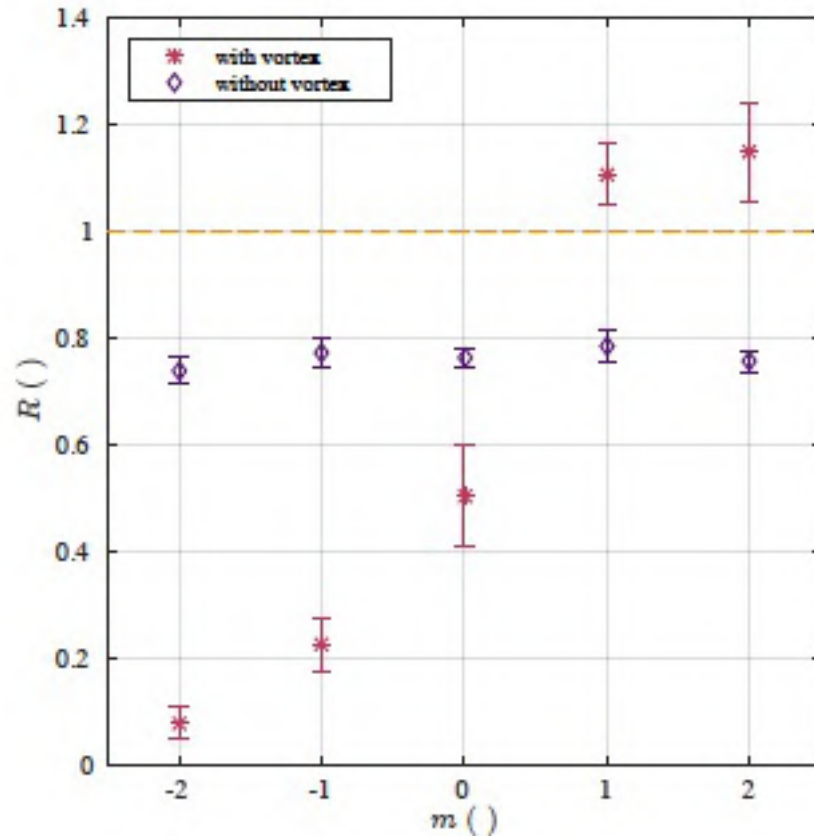


# Dispositif expérimental





# Résultats

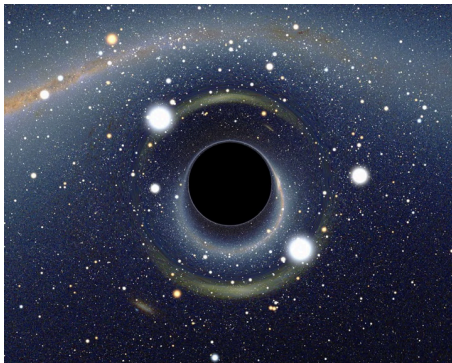


Modes 1 et 2 gagnent de l'énergie en présence du vortex

Superradiance observée !

# Conclusion

Les trous noirs sont des objets fascinants

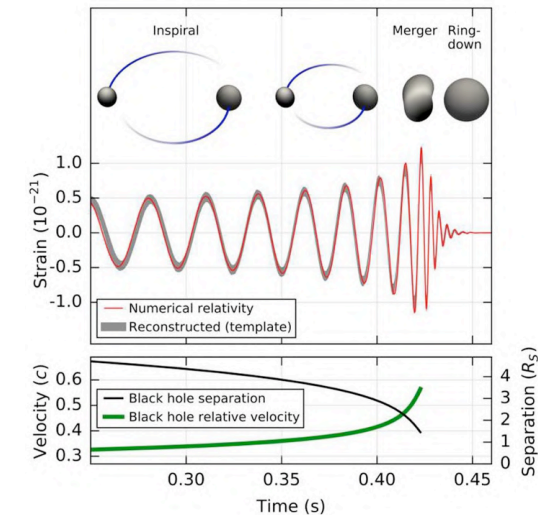
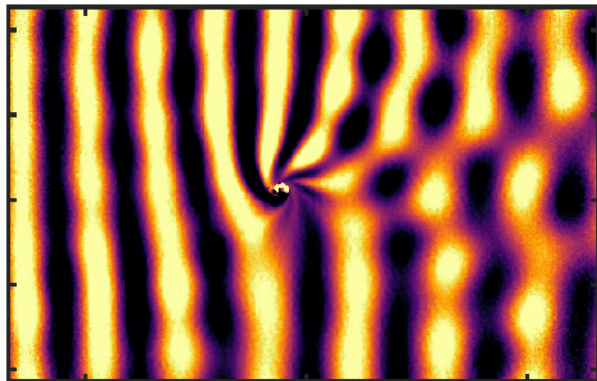


Objets très massifs et petits

- courbure de l'espace temps
- lumière piégée

Ils existent

- lentilles gravitationnelles
- Ondes gravitationnelles



Possibilité de faire des expériences sur Terre grâce à la gravitation analogue

- Rayonnement Hawking
- Superradiance

" Les trous noirs de la nature sont les objets macroscopiques les plus parfaits de l'Univers. "

Subrahmanyan Chandrasekhar

Sources :

- «50 clés pour comprendre l'Univers», G. Sparrow, Dunod
- «Les trous noirs acoustiques», Pour la science, n° 295, Mai 2002
- «Les trous noirs. A la poursuite de l'invisible», A. Riazuelo, Vuibert
- Rotational superradiant scattering in a vortex flow, Nature Physics Juin 2017
- The four laws of black holes mechanics, Bardeen, Carter & Hawking
- Vidéos : NASA

Remerciements : Dr. A. Coutant