

Effondrement gravitationnel, trous noirs, et nouvelle physique

Astroparticle Symposium
Orsay 2023

Alejandro Perez
Centre de Physique Théorique,
Marseille.

PREMIÈRE PARTIE

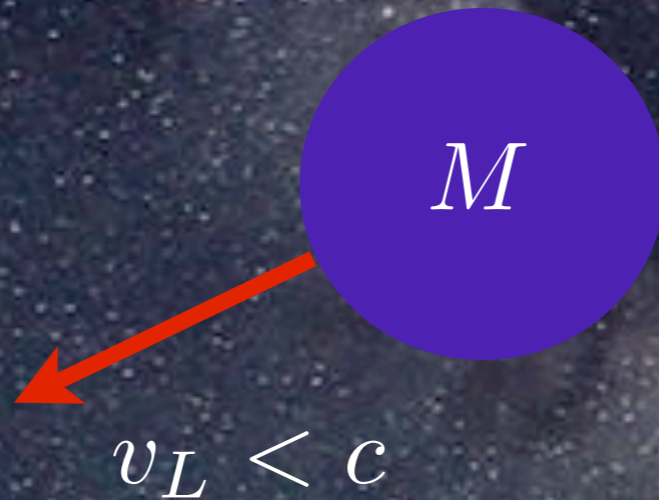
Qu'est-ce qu'un **Trou Noir**
en **Relativité Générale** ?

Les trous noirs et la fin du temps en relativité générale

Intuition Newtonienne

gravitation toujours attractive+vitesse de tout corps matériel inférieure à la vitesse de la lumière

$$v_L = \sqrt{\frac{2MG}{r}}$$



John Michell (1783)
Dark Stars

En augmentant M on peut rendre la vitesse de libération v_L proche de c

La relativité générale

844 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 25. November 1915

Die Feldgleichungen der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

In zwei vor kurzem erschienenen Mitteilungen¹ habe ich gezeigt, wie man zu Feldgleichungen der Gravitation gelangen kann, die dem Postulat allgemeiner Relativität entsprechen, d. h. die in ihrer allgemeinen Fassung beliebigen Substitutionen der Raumzeitvariablen gegenüber kovariant sind.

Der Entwicklungsgang war dabei folgender. Zunächst fand ich Gleichungen, welche die NEWTONSCHE Theorie als Näherung enthalten

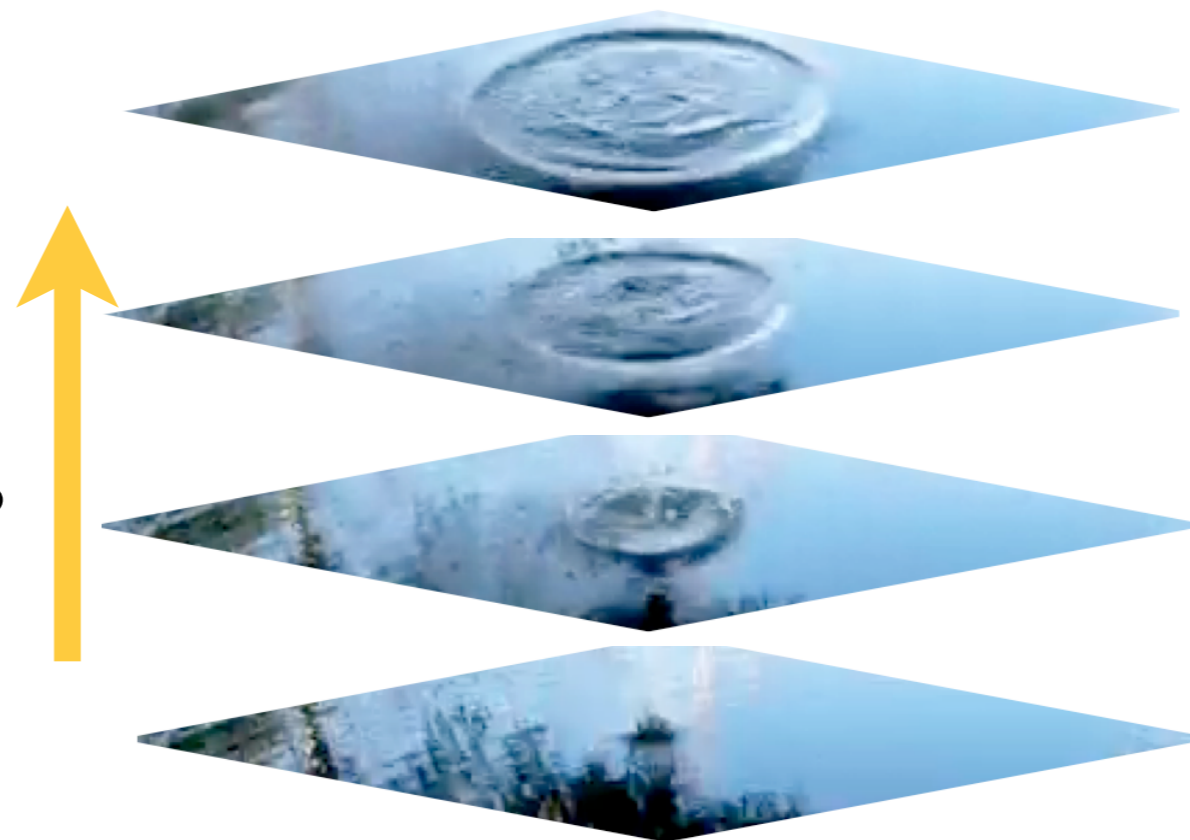
La relativité générale: une théorie de l'espace et du temps



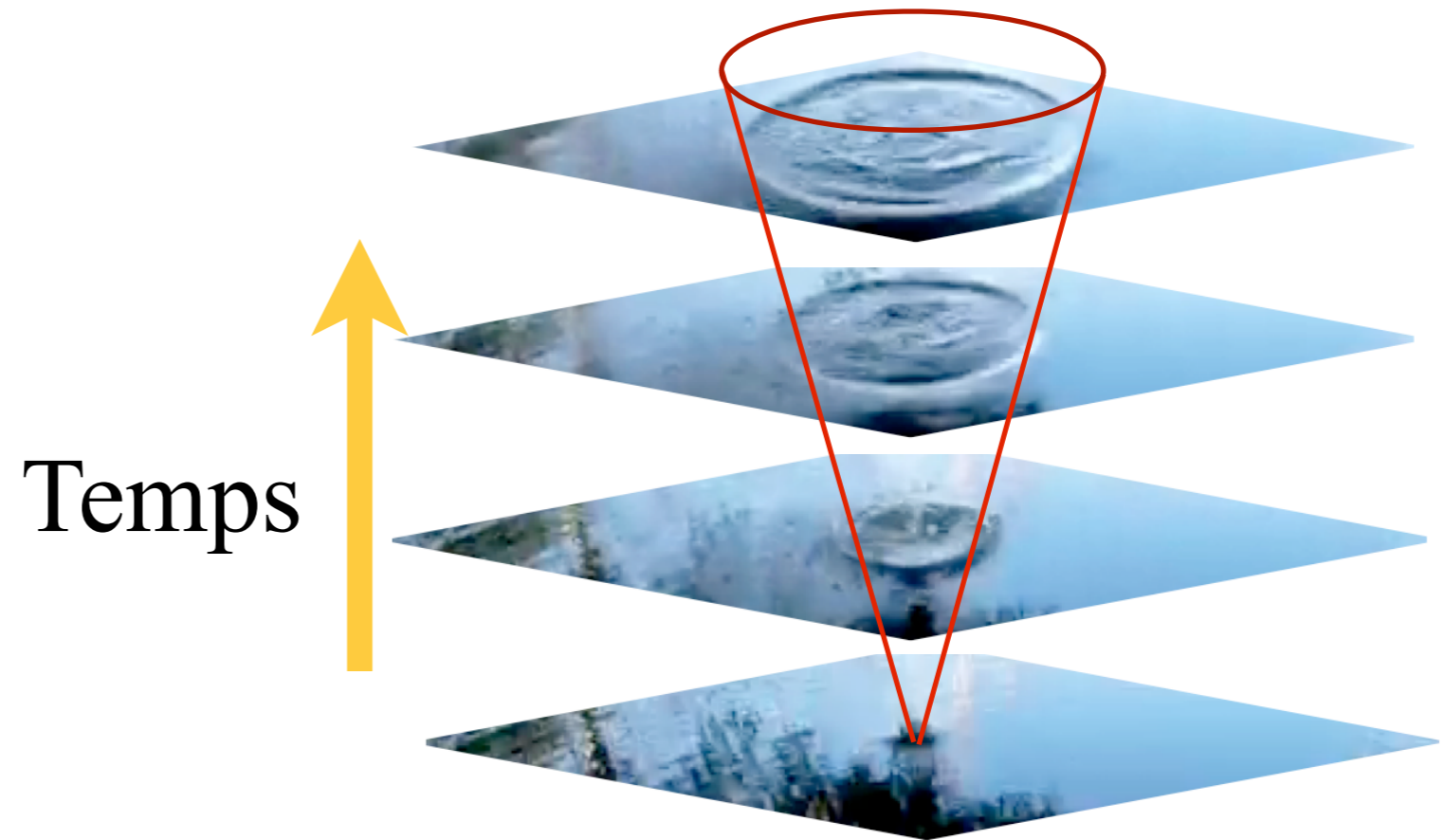
Diagrammes d'espace-temps



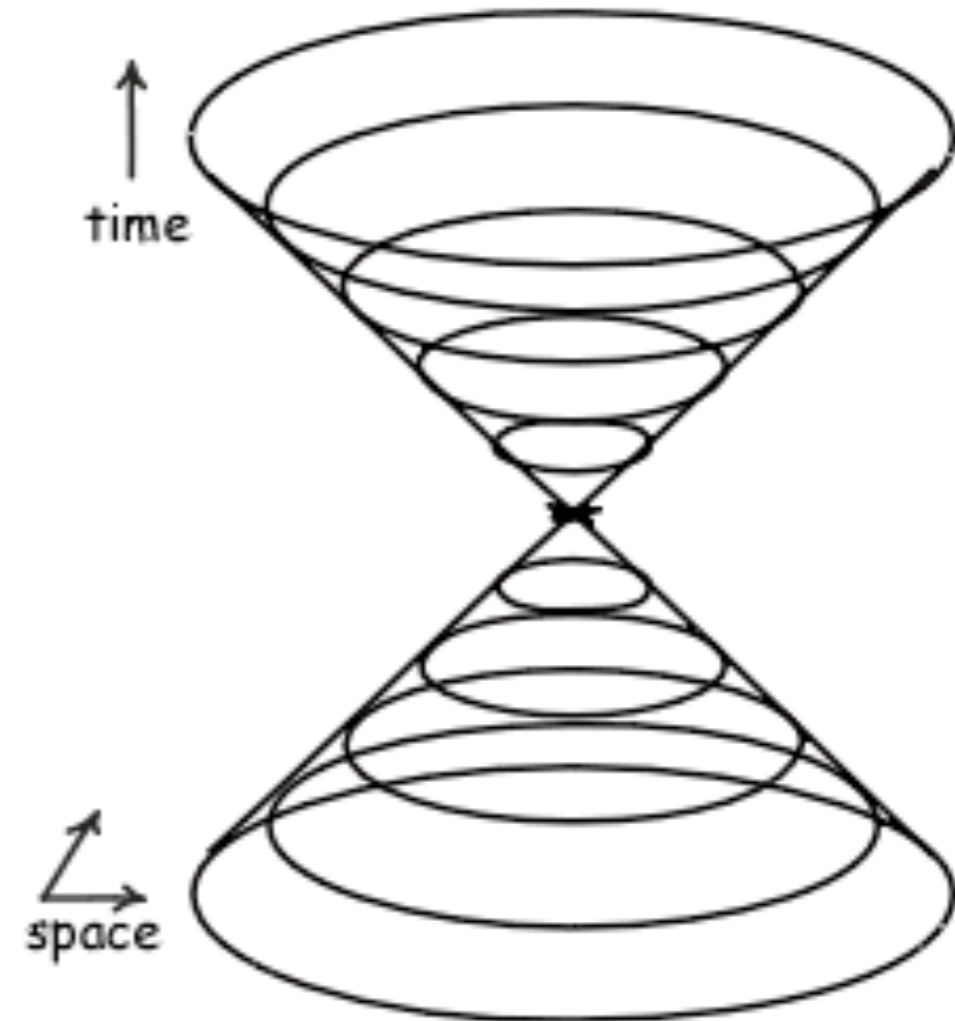
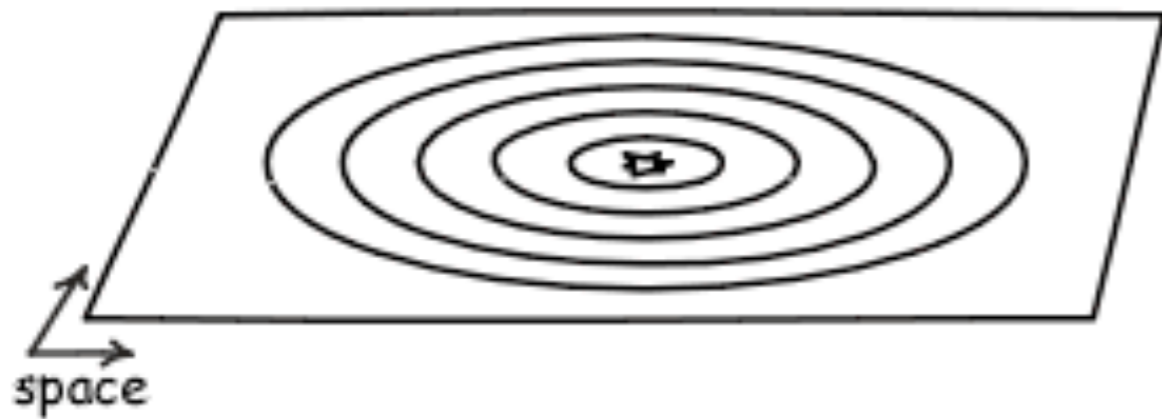
Temps



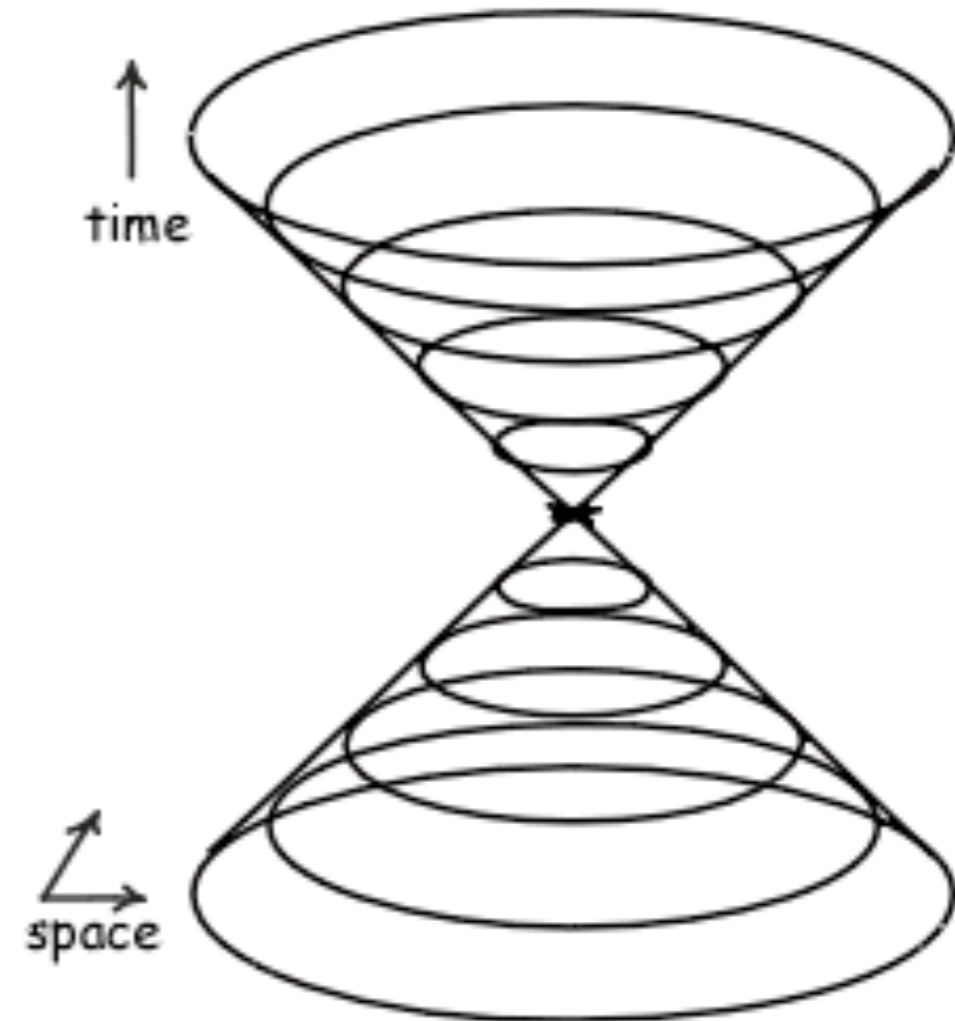
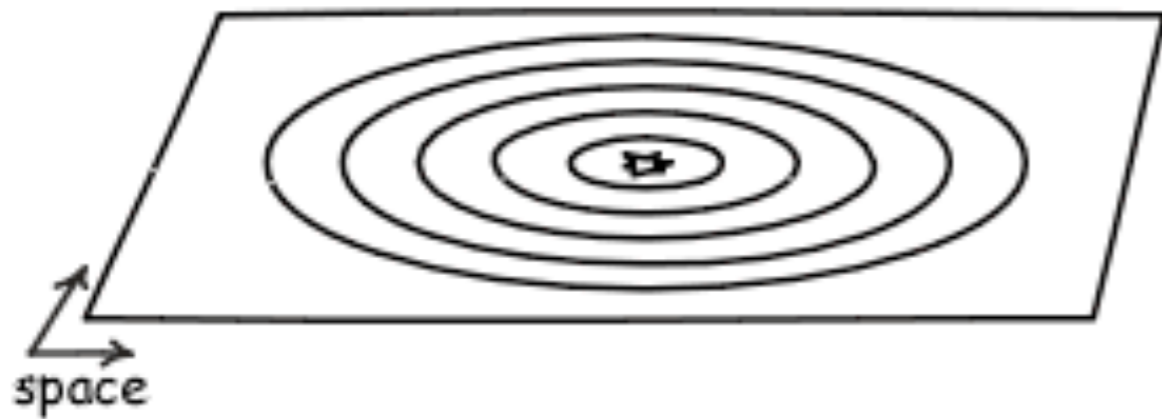
Diagrammes d'espace-temps



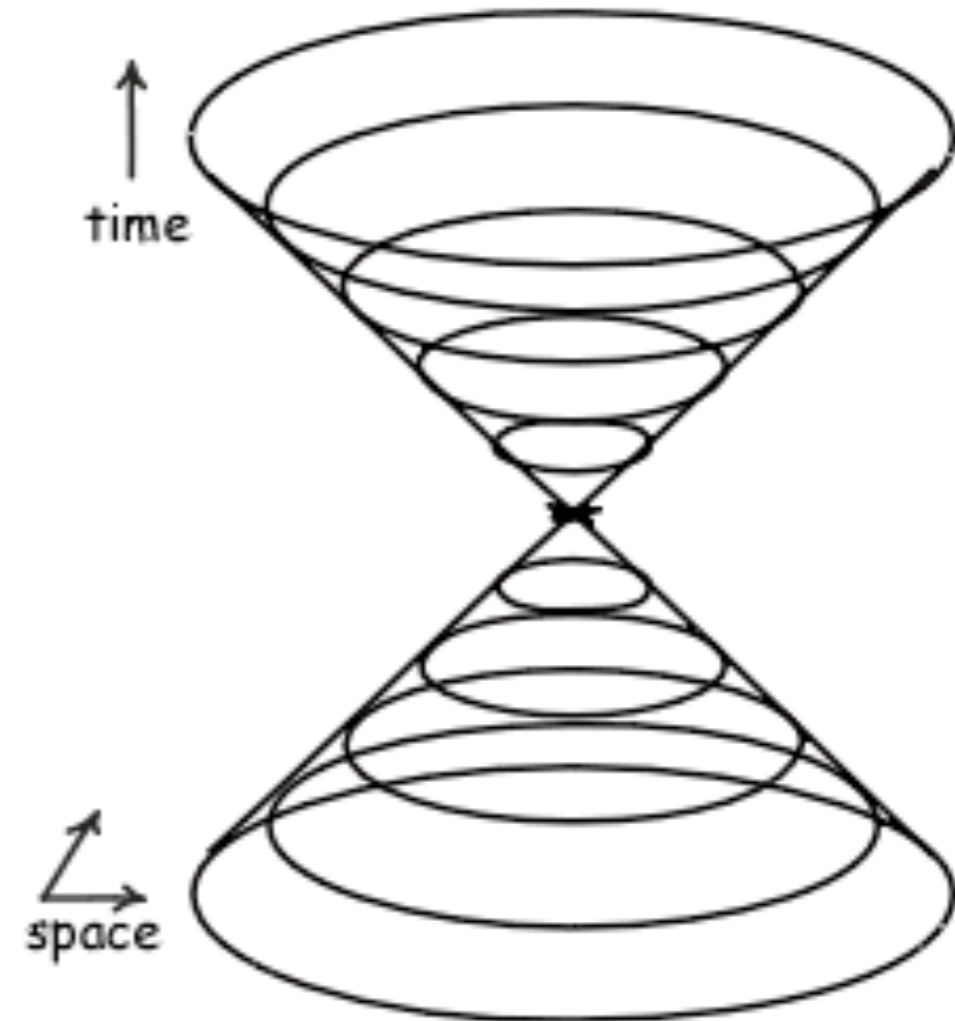
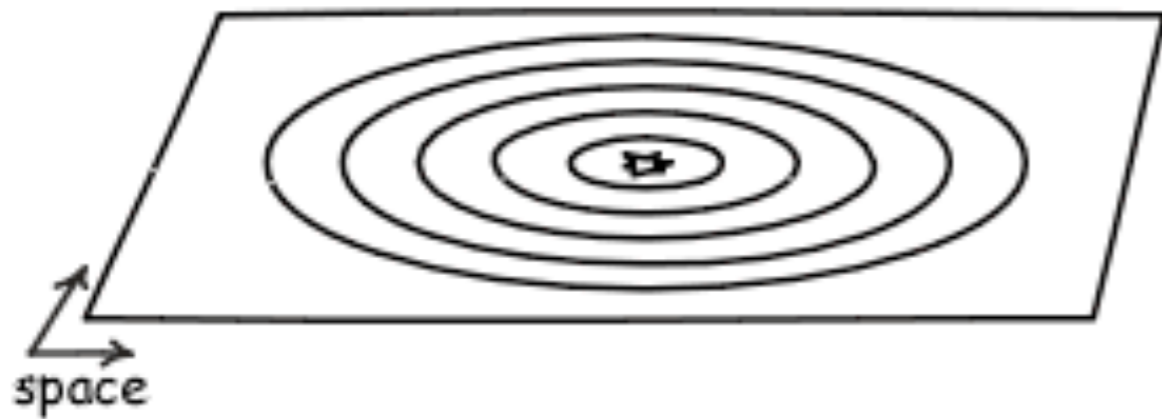
Diagrammes d'espace-temps: le cône de lumière

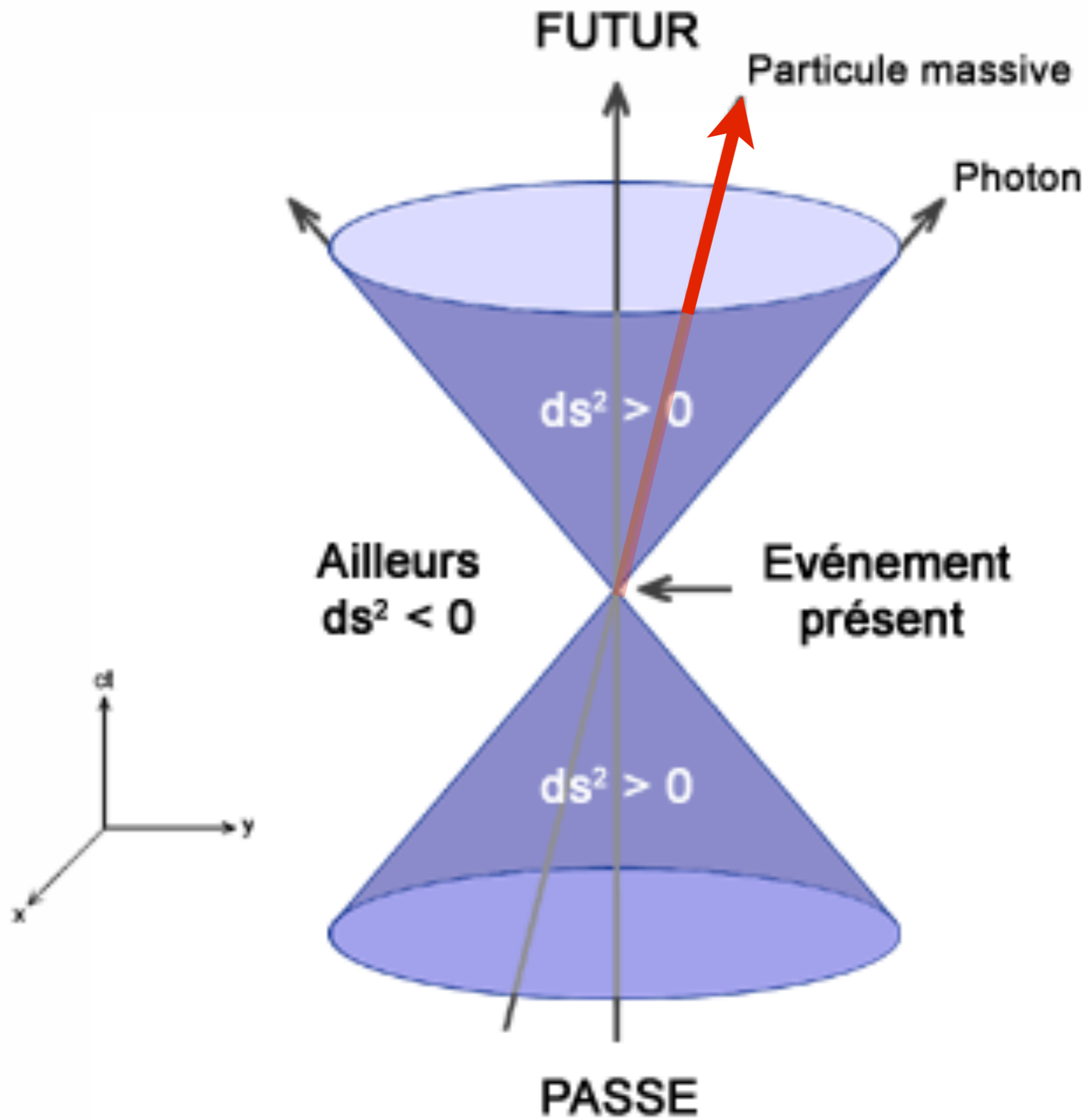


Diagrammes d'espace-temps: le cône de lumière

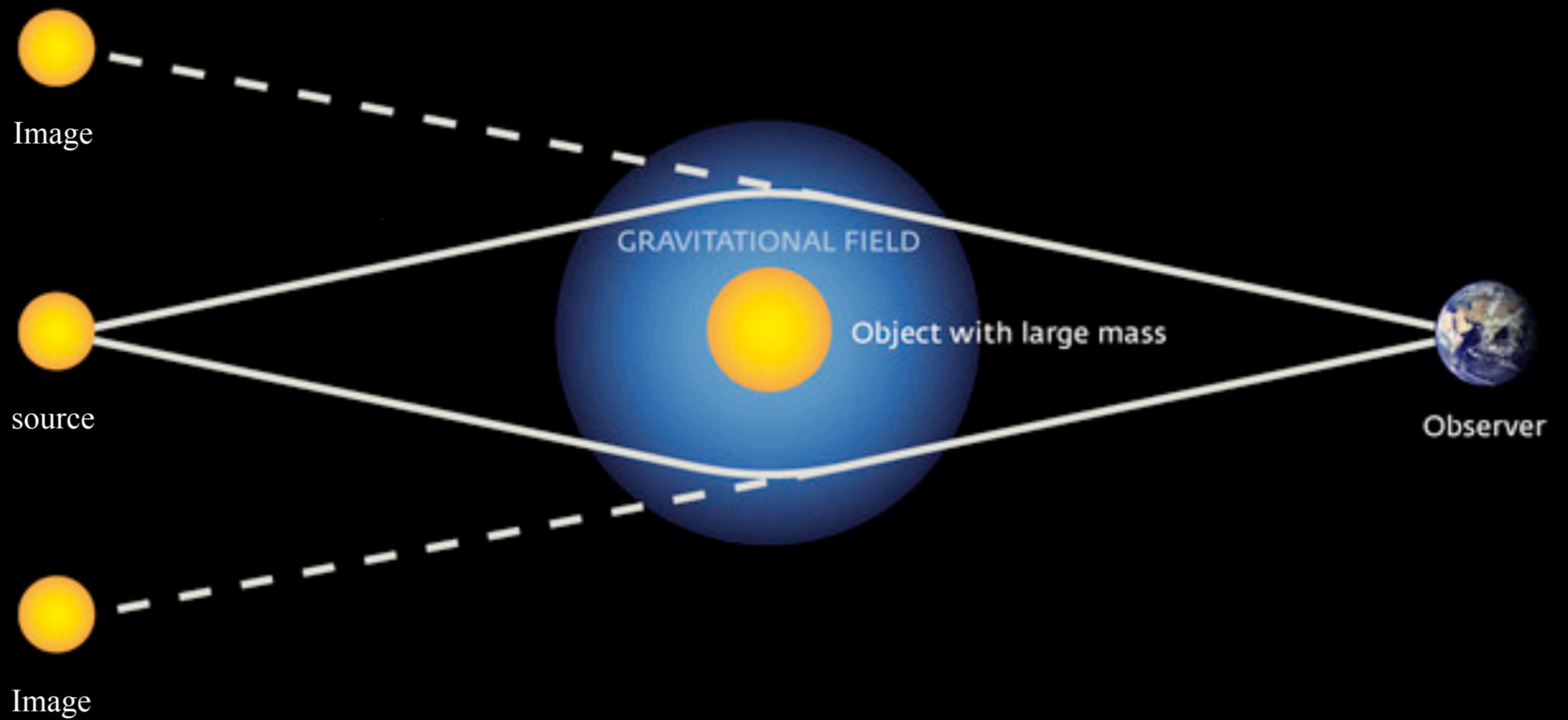


Diagrammes d'espace-temps: le cône de lumière





Le cône de lumière est modifié par la gravitation



**Le cône de lumière est modifié
par la gravitation**



Le cône de lumière est modifié par la gravitation

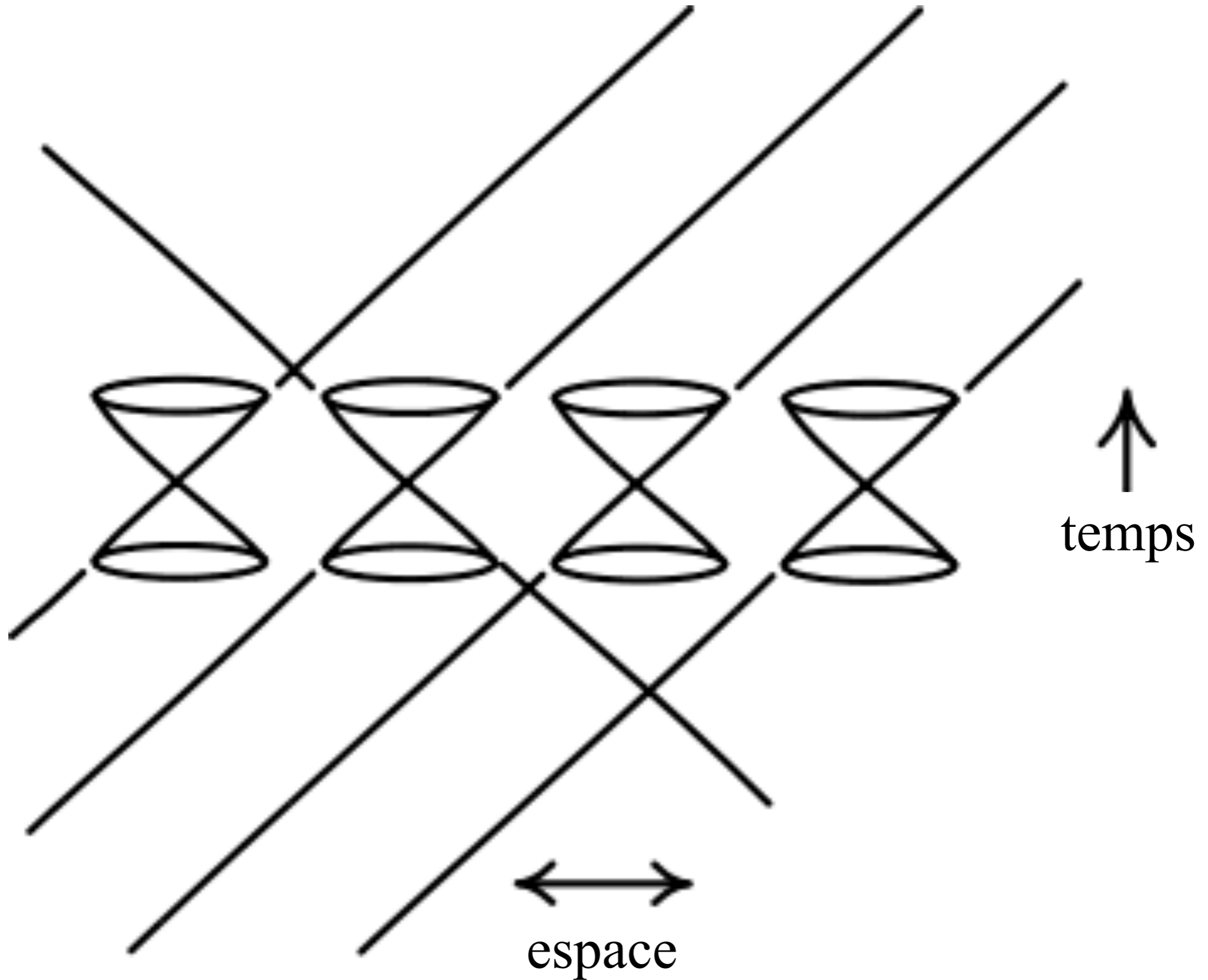


**Le cône de lumière est modifié
par la gravitation**



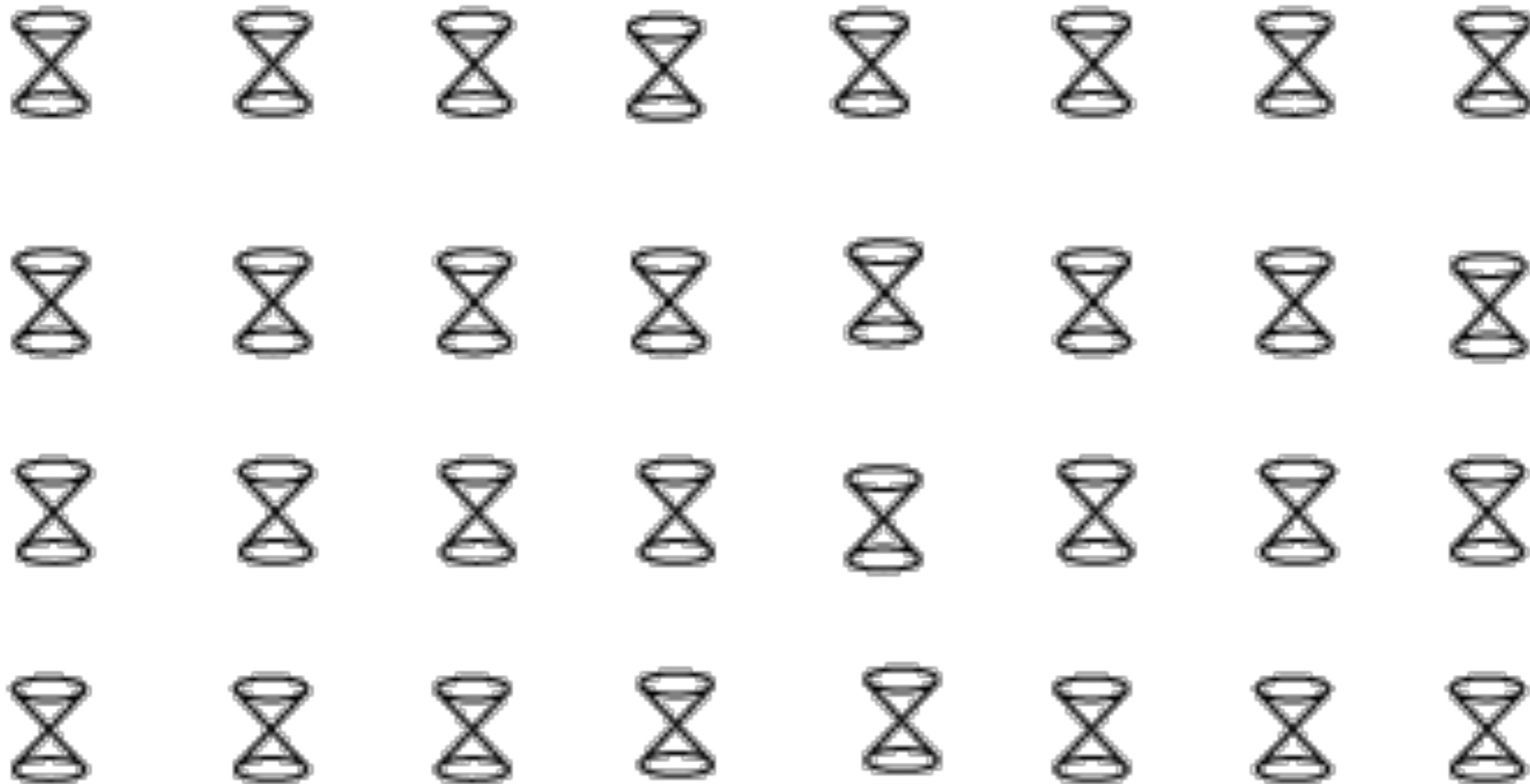


Cônes de lumière dans un espace-temps plat



Cônes de lumière dans un espace-temps plat

temps

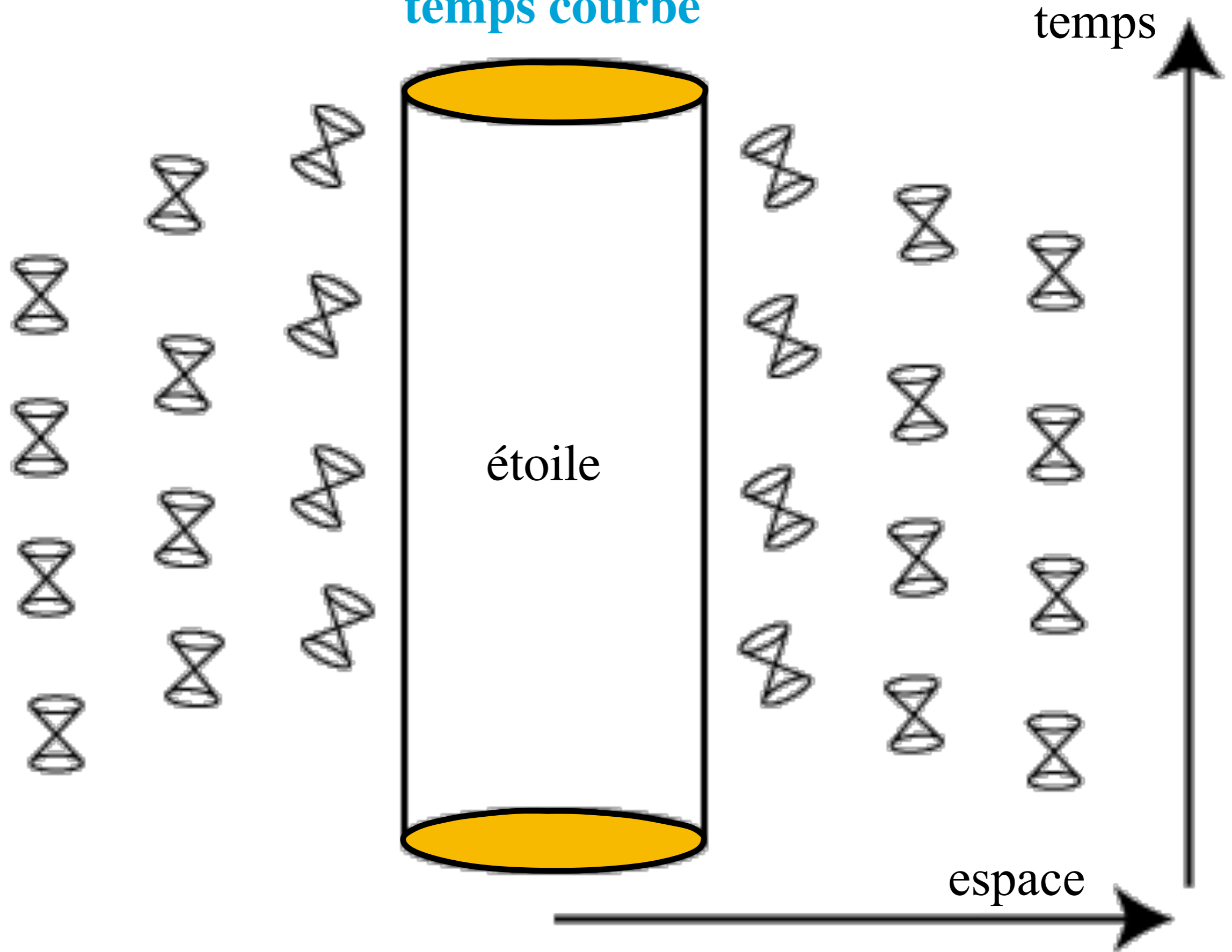


espace

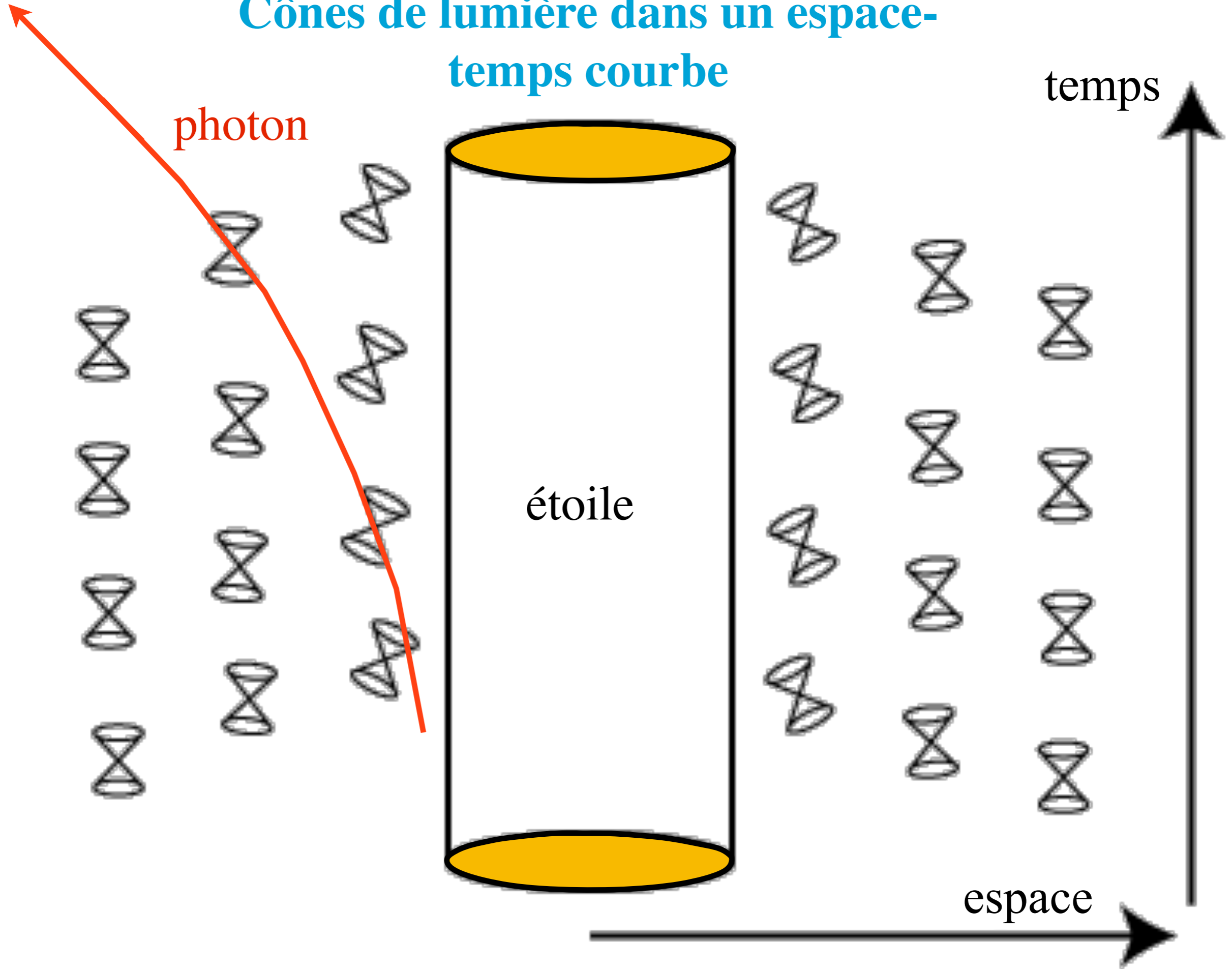
Cônes de lumière dans un espace-temps courbe



Cônes de lumière dans un espace-temps courbe



Cônes de lumière dans un espace-temps courbe

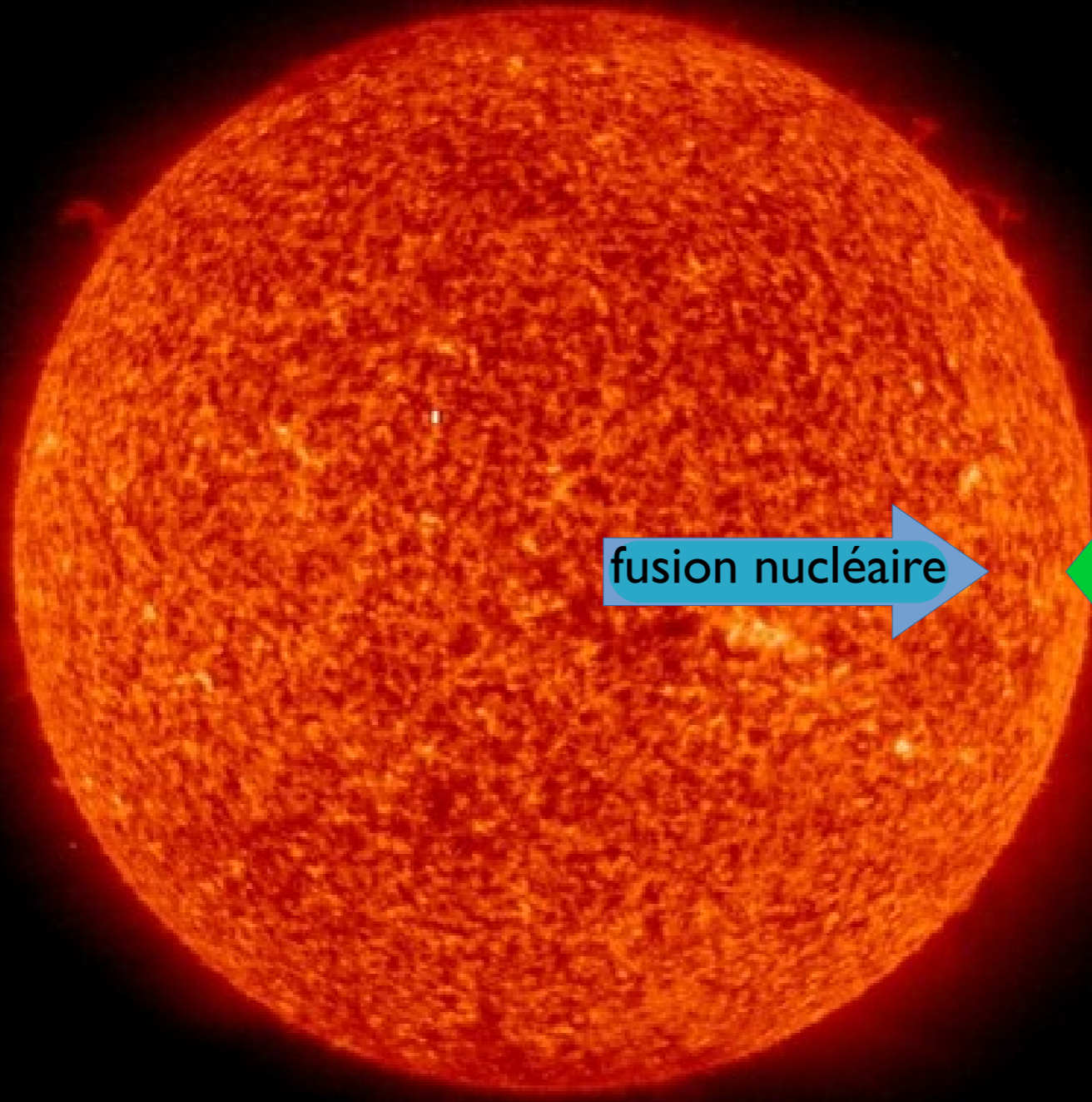


photon

étoile

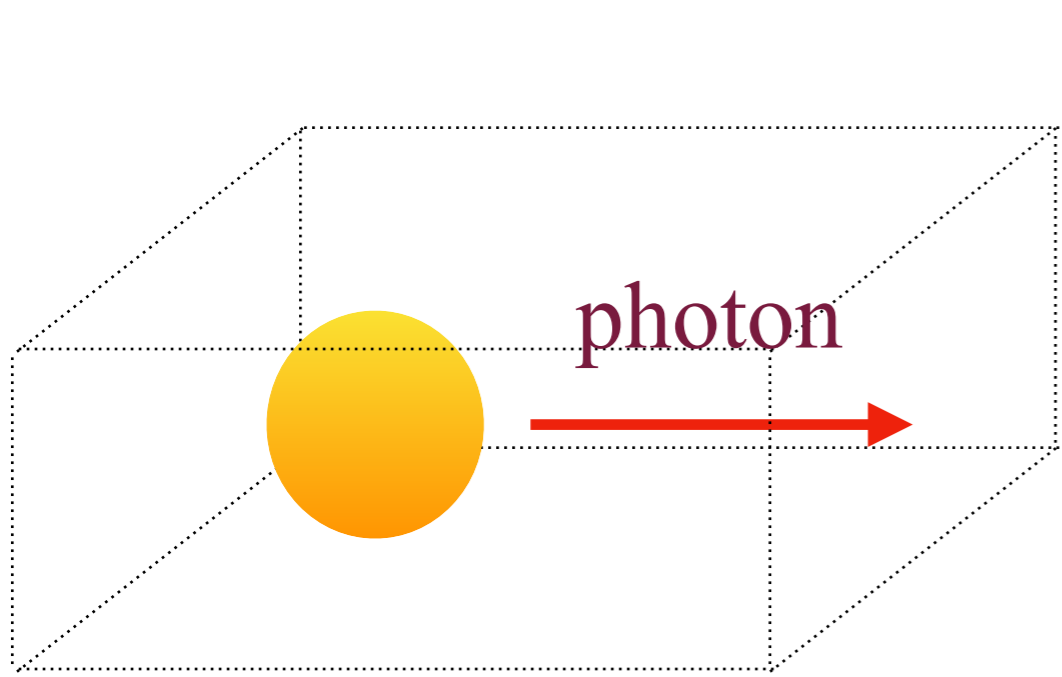
temps

espace

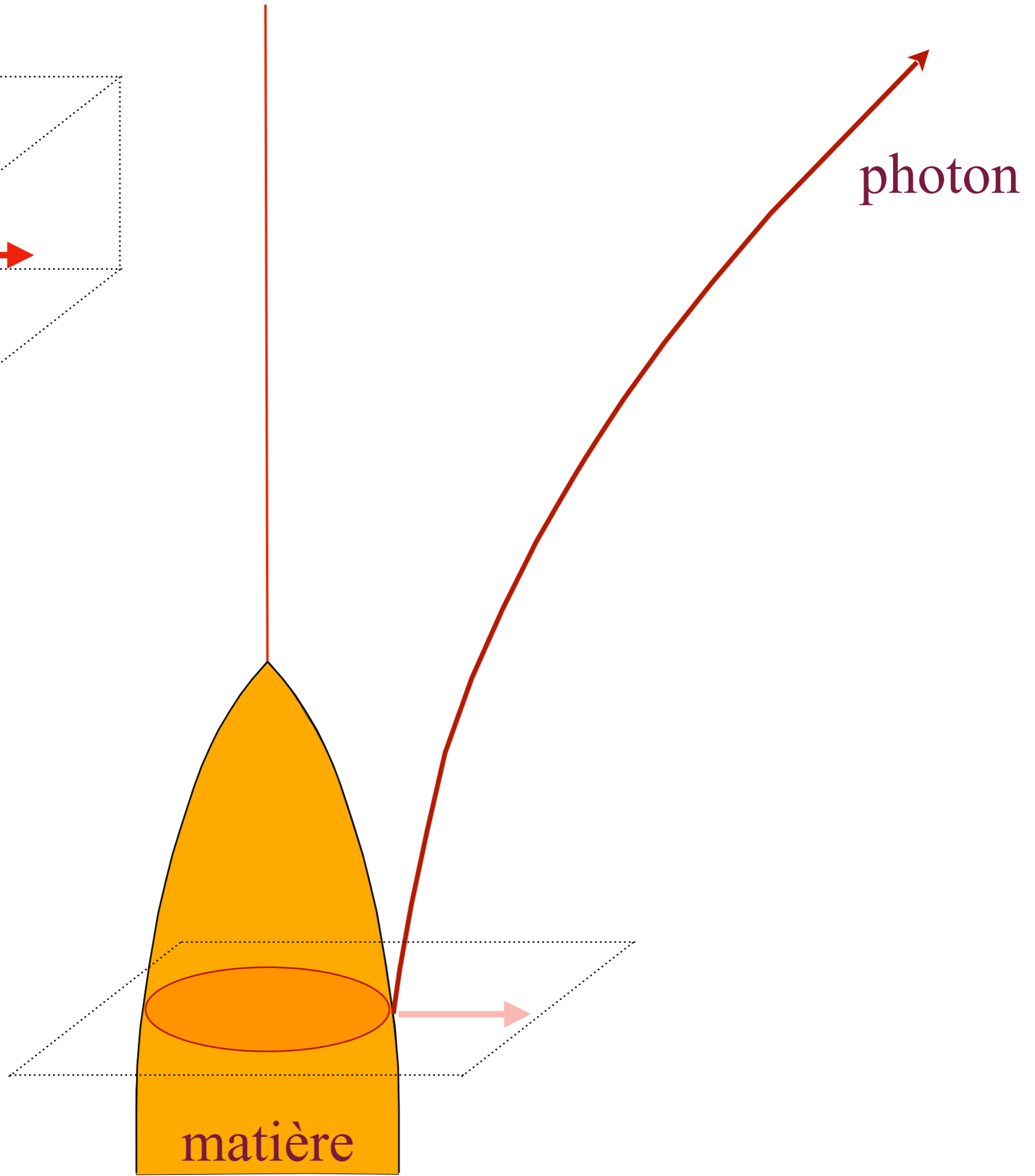


fusion nucléaire

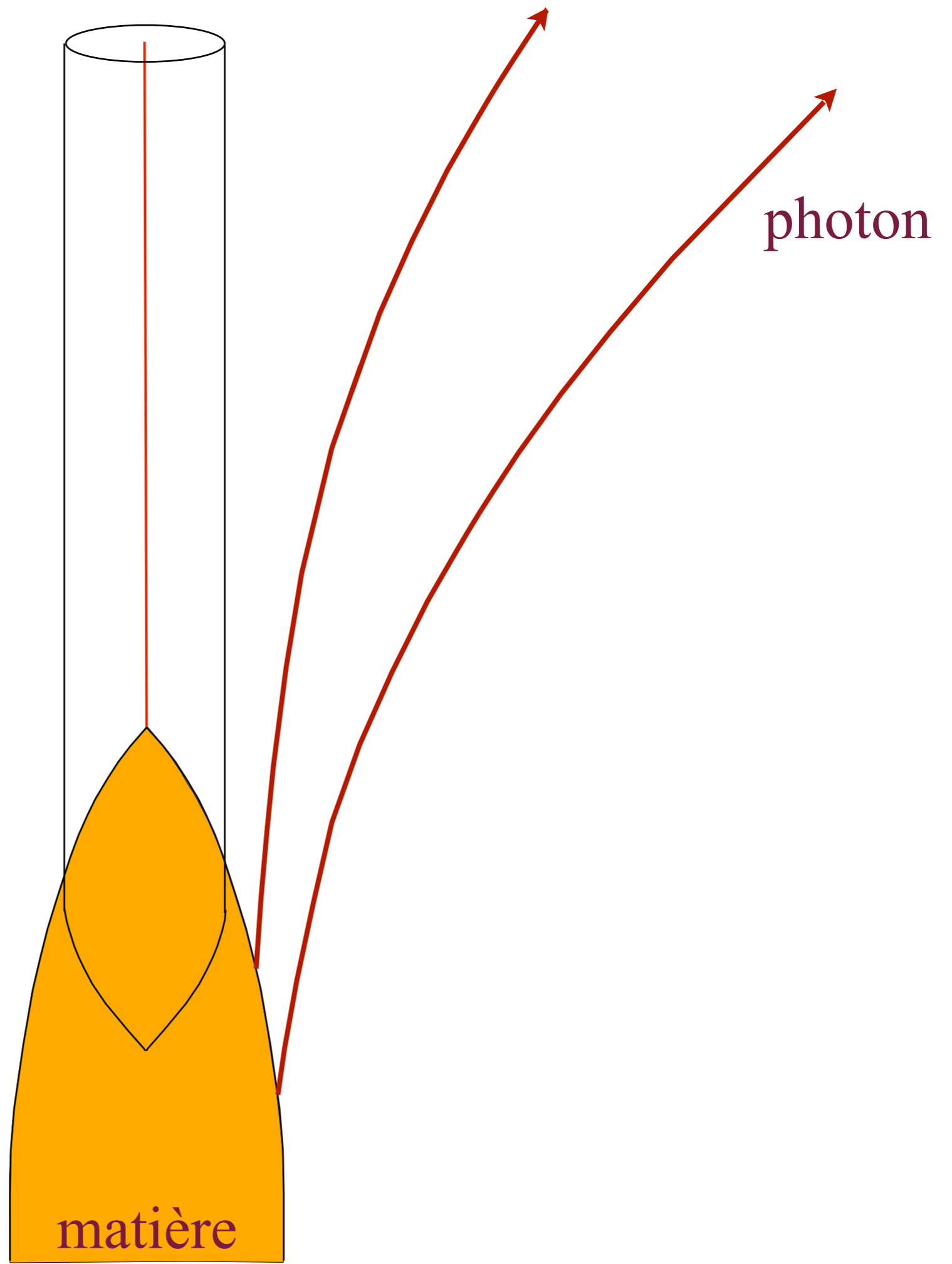
gravité



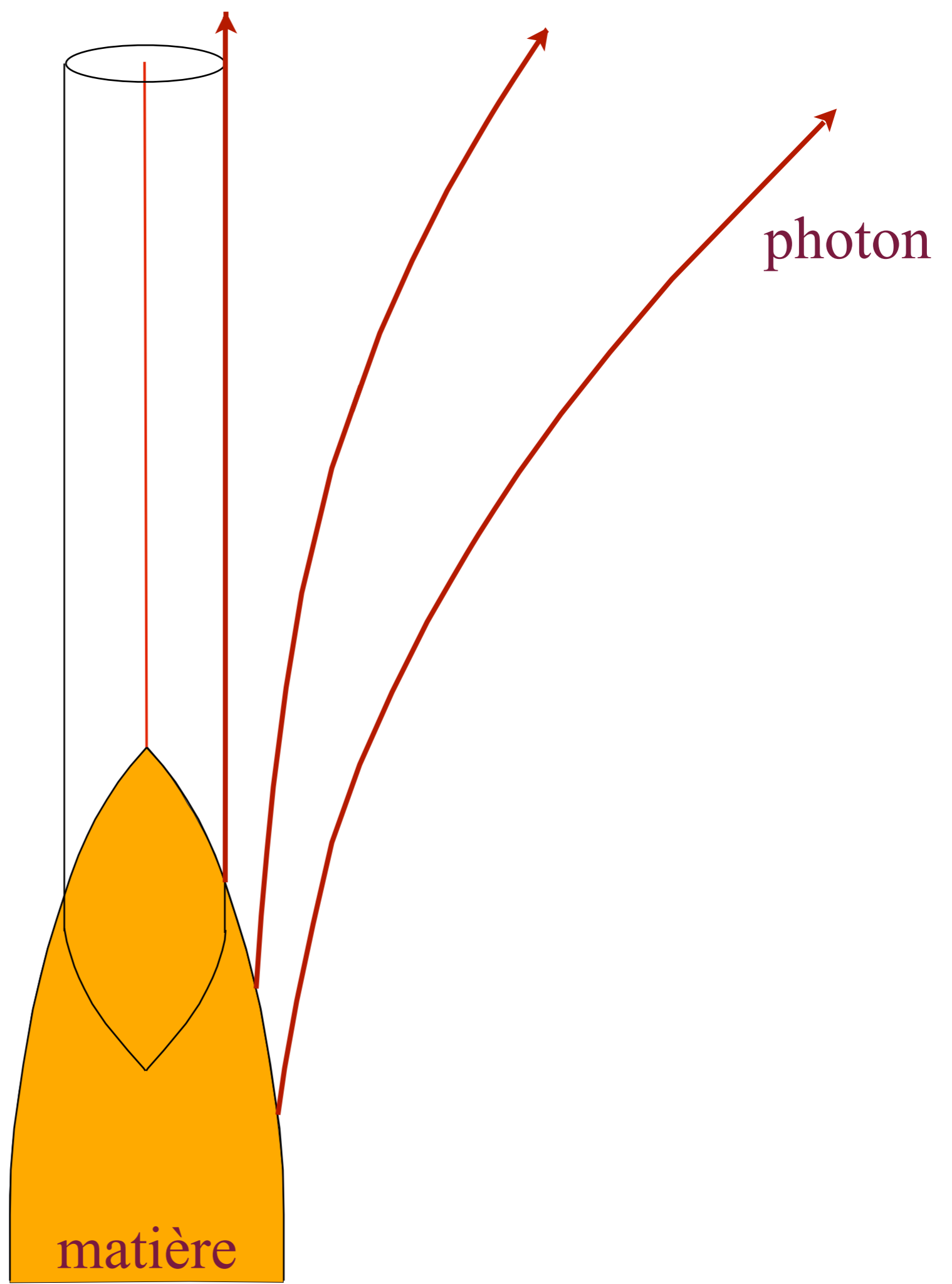
**Espace-temps de
l'effondrement
gravitationnel**



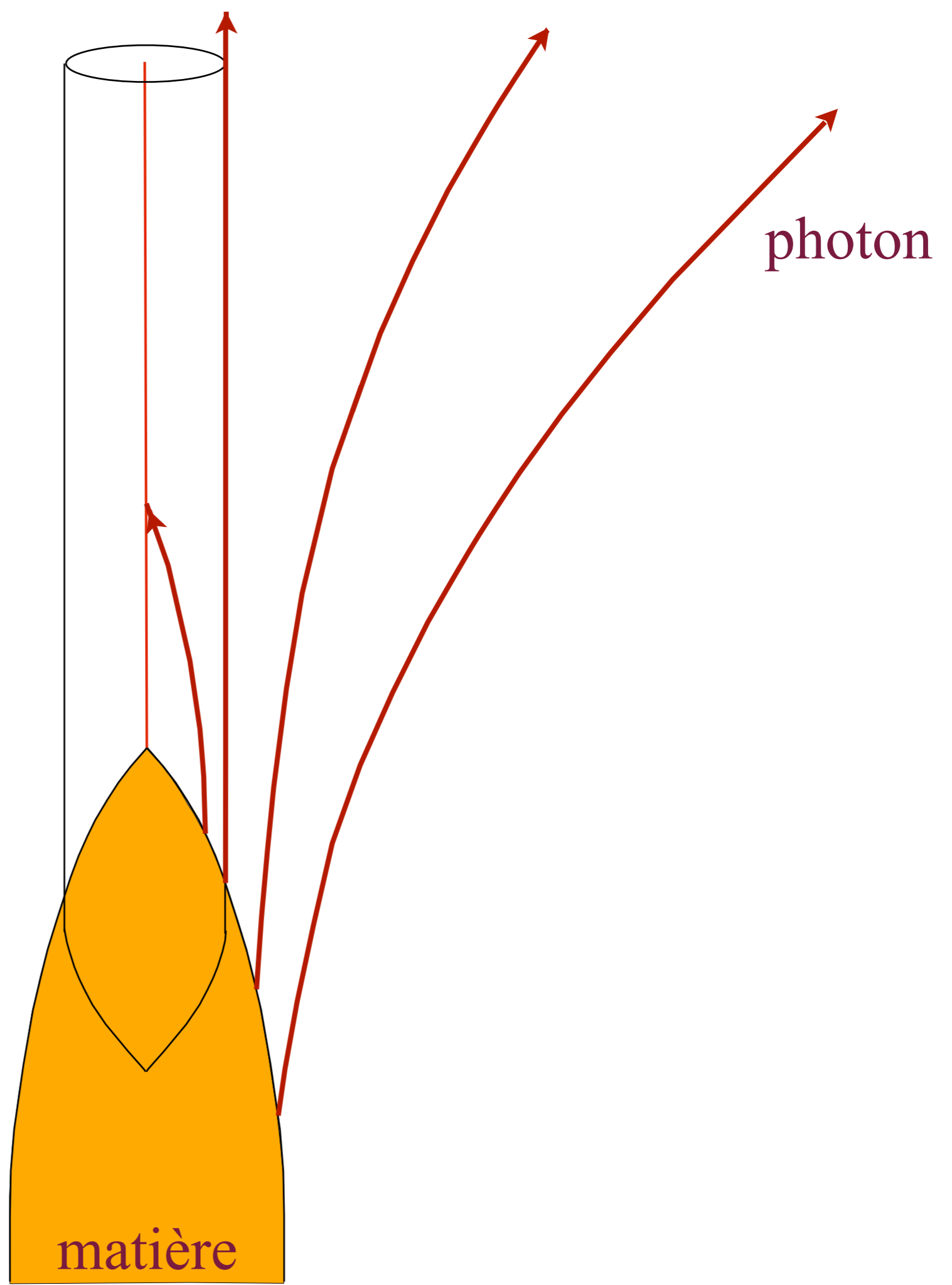
**Espace-temps de
l'effondrement
gravitationnel :**
structure des cônes
de lumière.



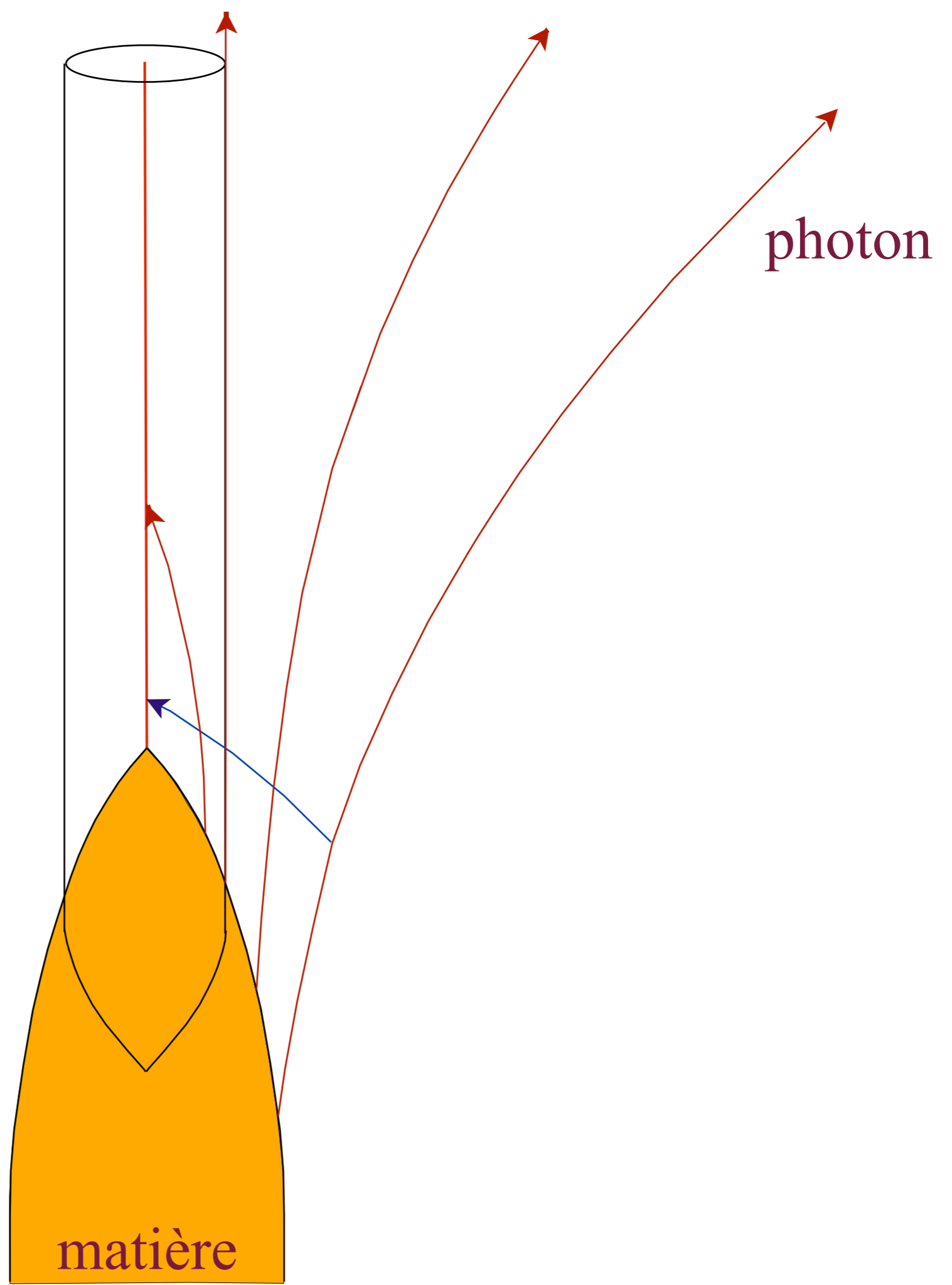
**Espace-temps de
l'effondrement
gravitationnel :**
structure des cônes
de lumière.



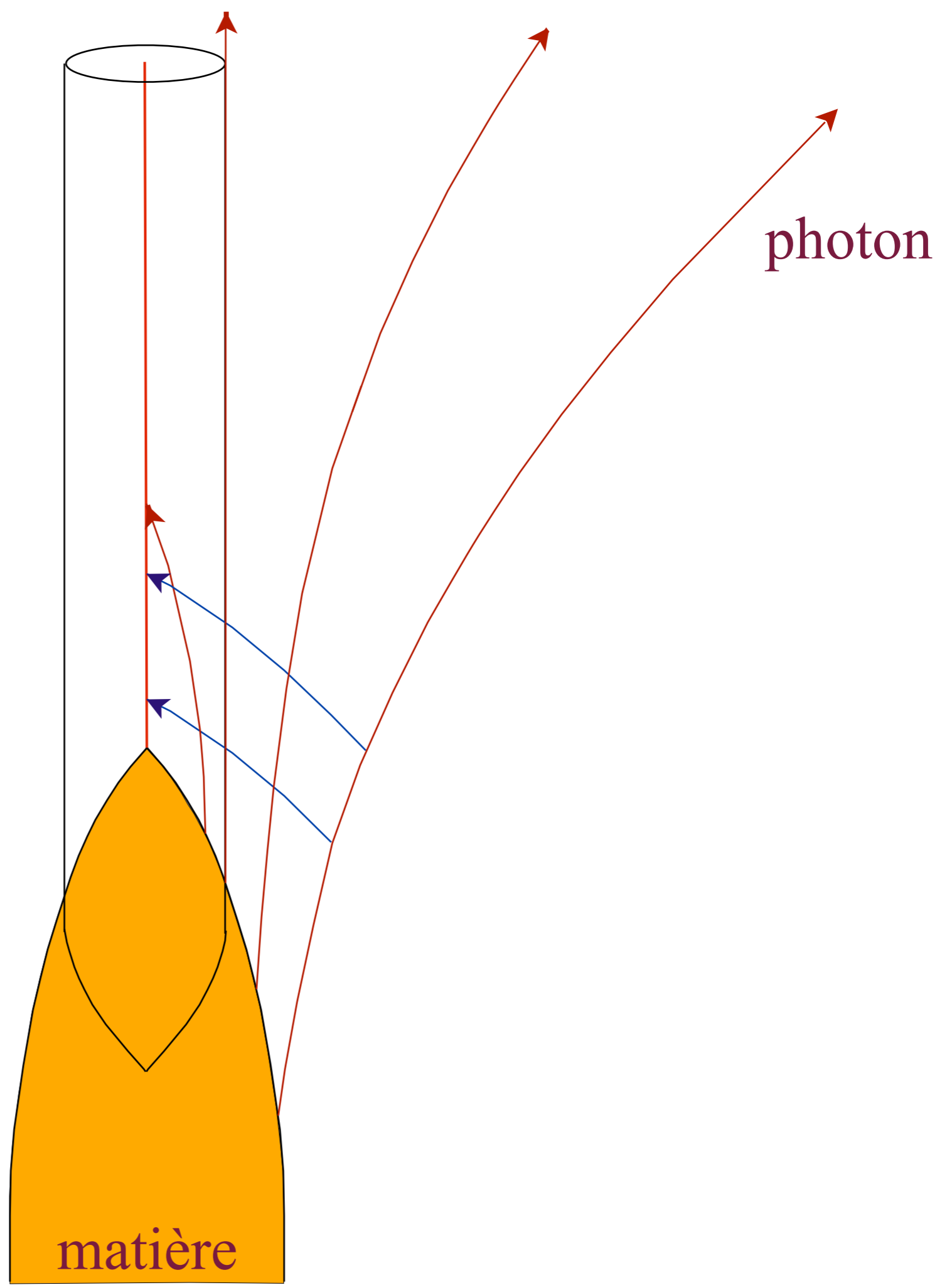
**Espace-temps de
l'effondrement
gravitationnel :**
structure des cônes
de lumière.



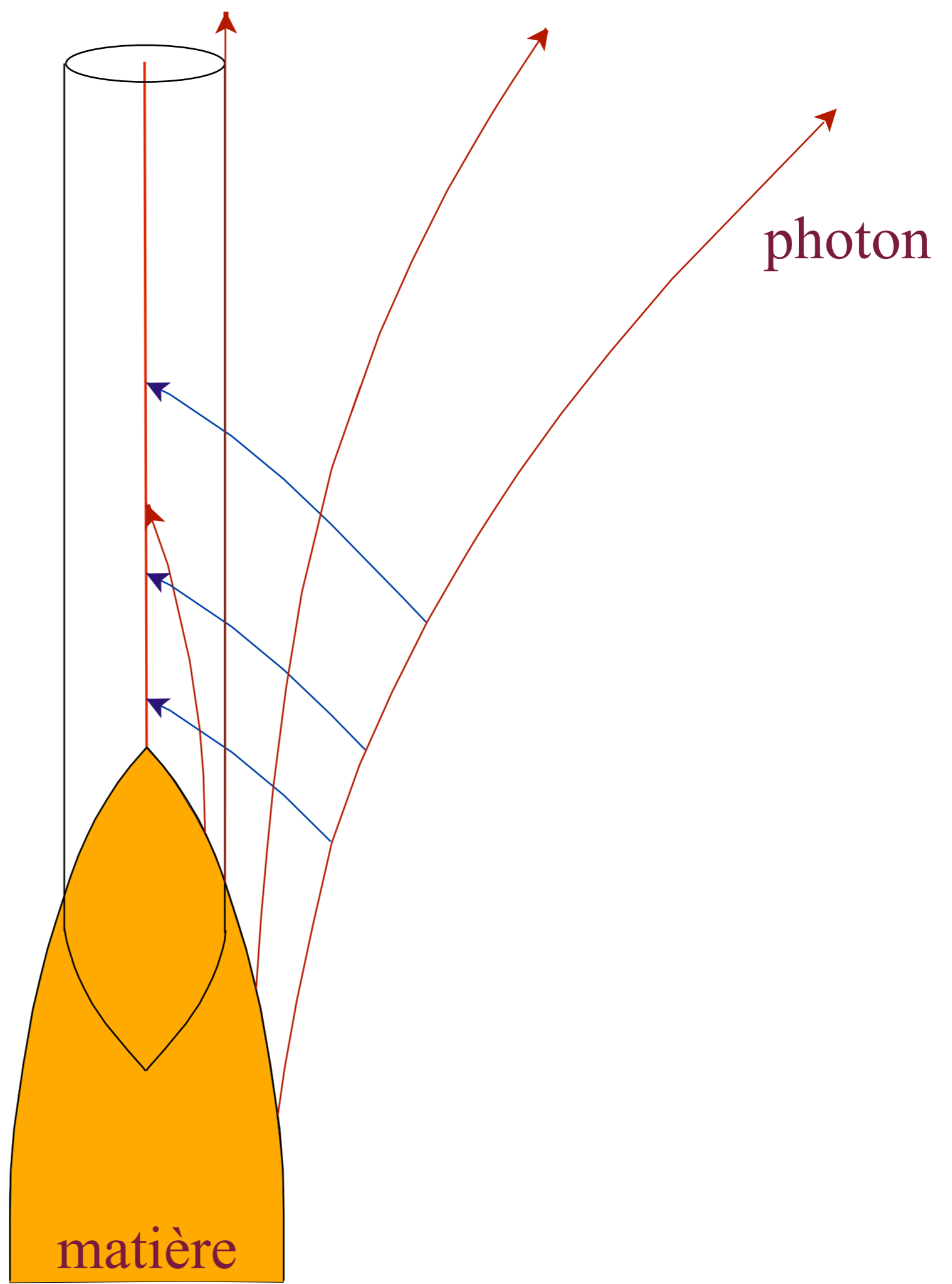
**Espace-temps de
l'effondrement
gravitationnel :**
structure des cônes
de lumière.



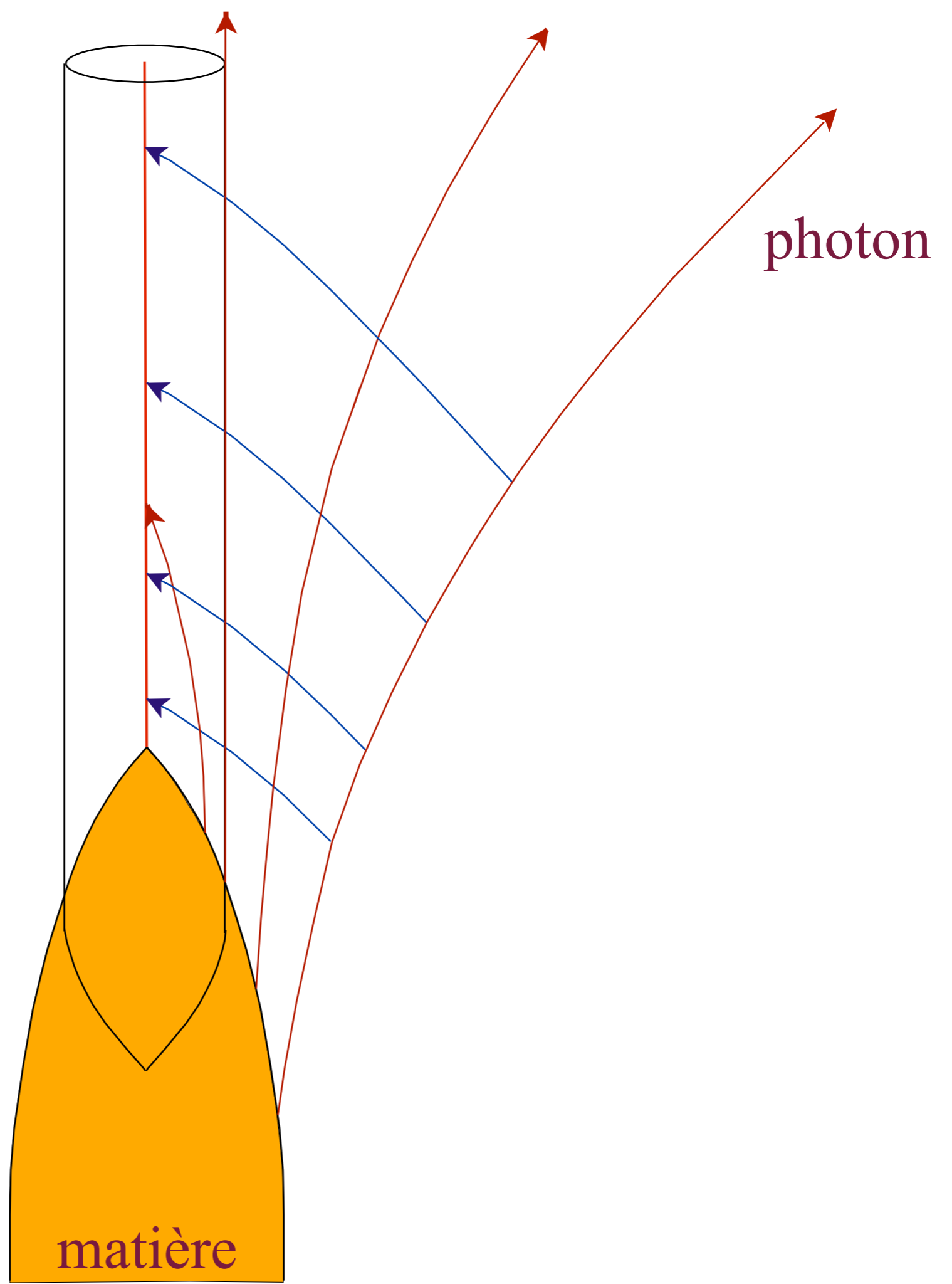
**Espace-temps de
l'effondrement
gravitationnel :**
structure des cônes
de lumière.



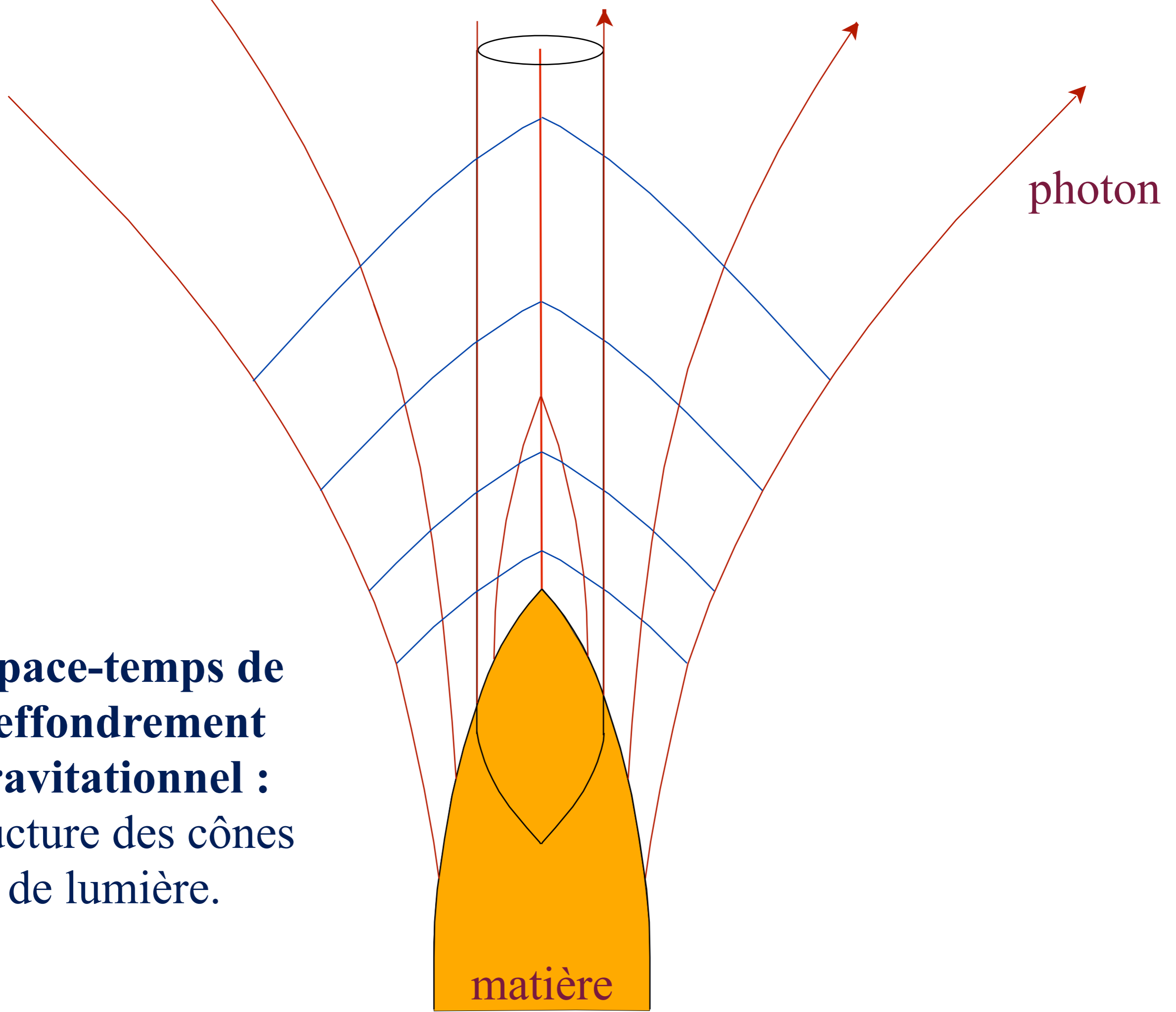
**Espace-temps de
l'effondrement
gravitationnel :**
structure des cônes
de lumière.



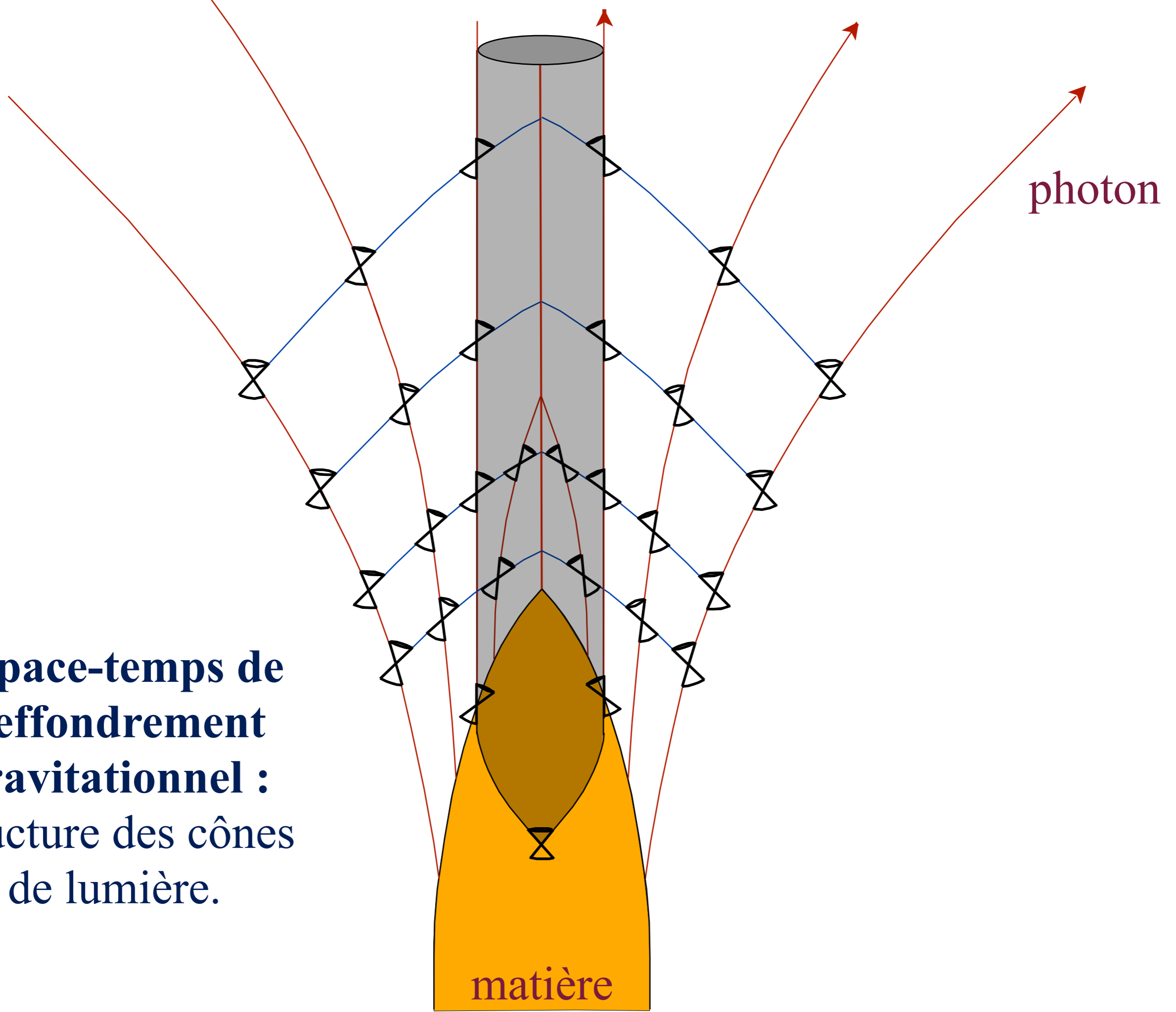
**Espace-temps de
l'effondrement
gravitationnel :**
structure des cônes
de lumière.



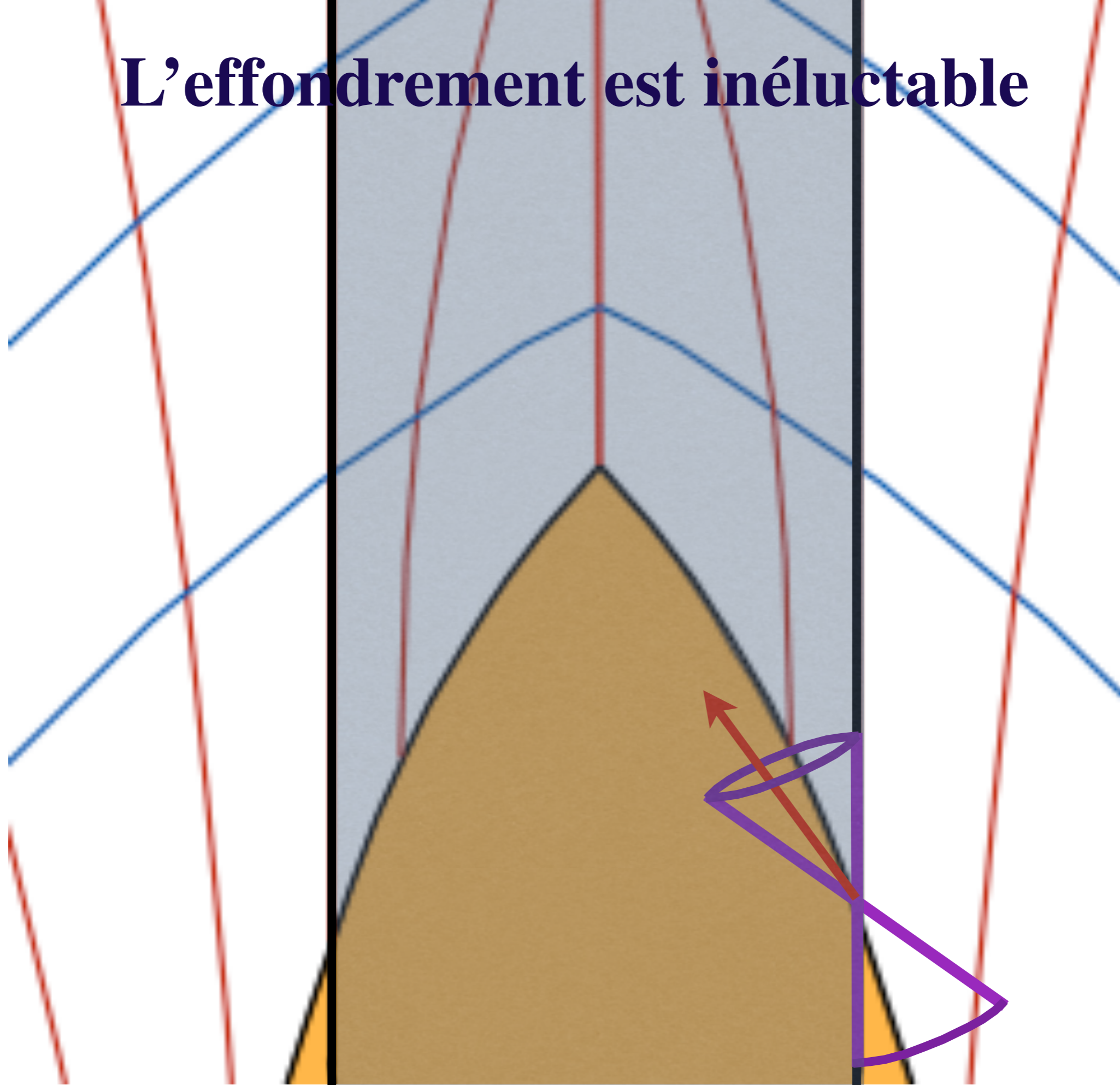
**Espace-temps de
l'effondrement
gravitationnel :**
structure des cônes
de lumière.



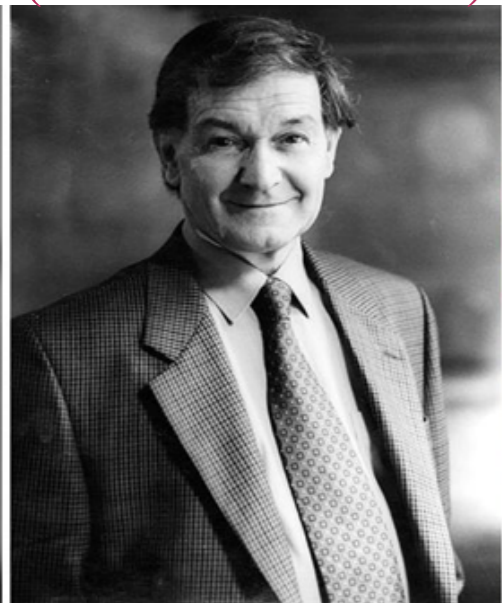
**Espace-temps de
l'effondrement
gravitationnel :**
structure des cônes
de lumière.



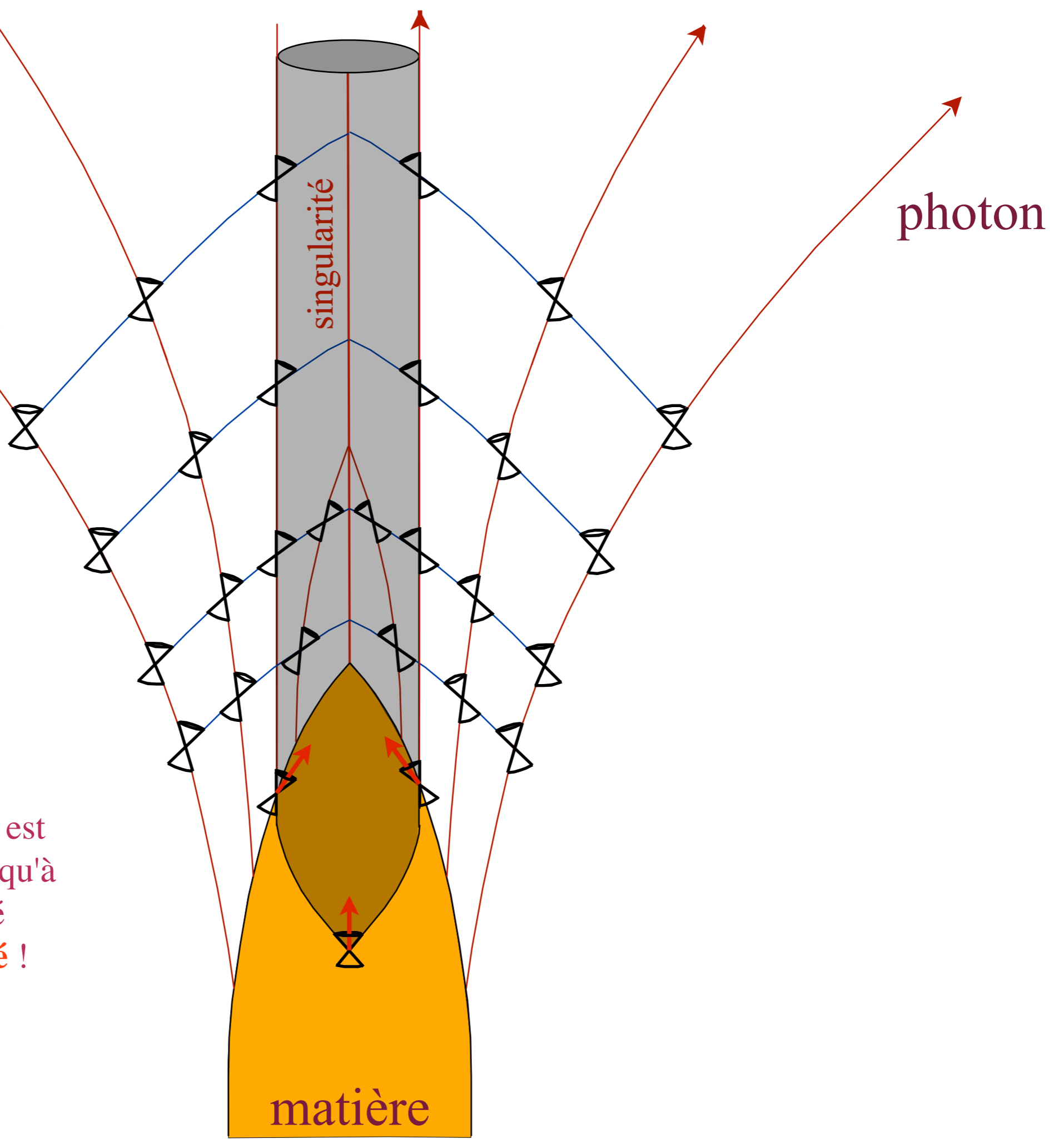
L'effondrement est inéluctable



Théorèmes de Singularités
Roger Penrose
(Prix Nobel 2020)

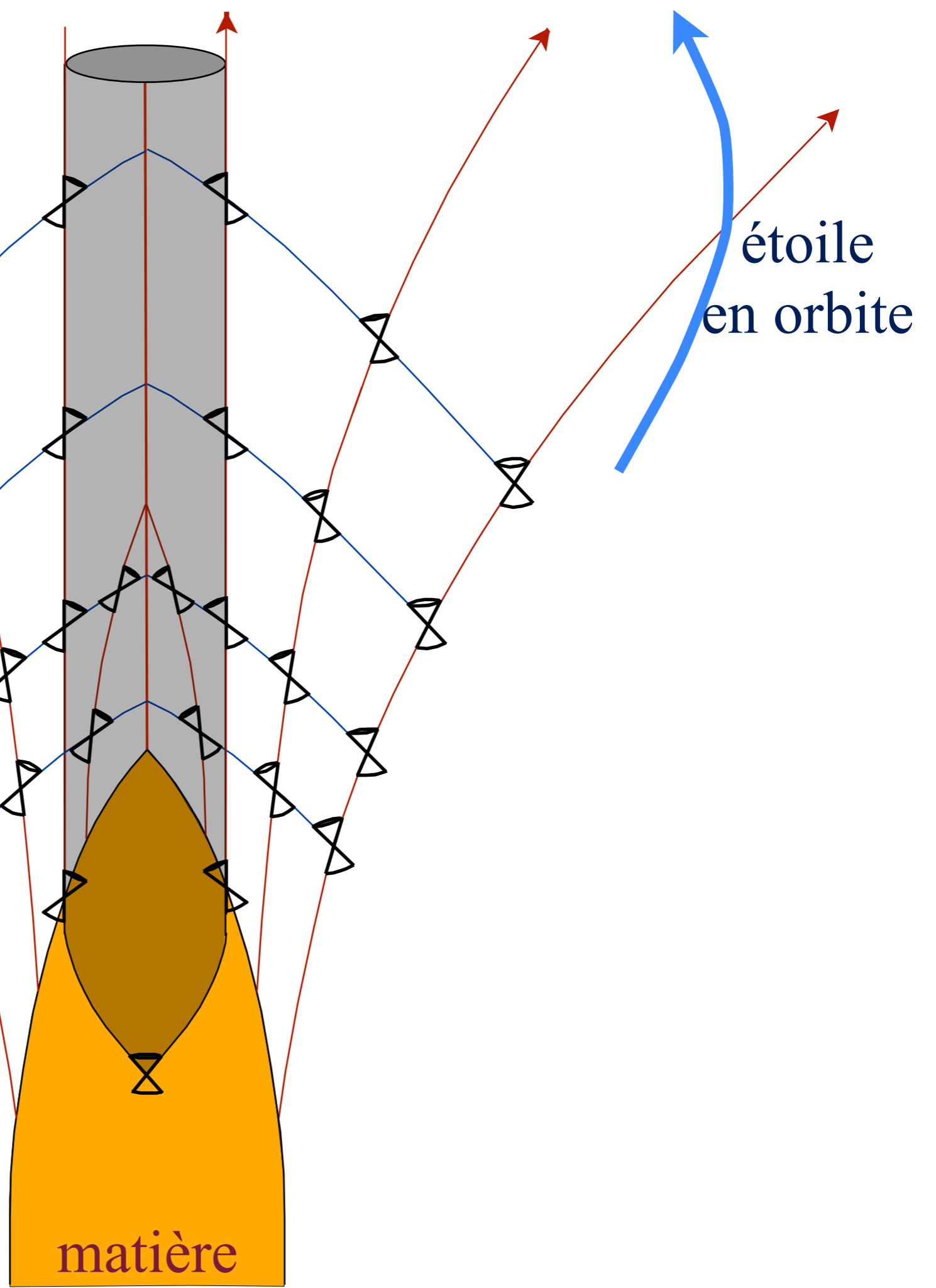


Toute la matière de l'étoile est compressée sans limite jusqu'à devenir un point de densité infinie, appelée **singularité** !

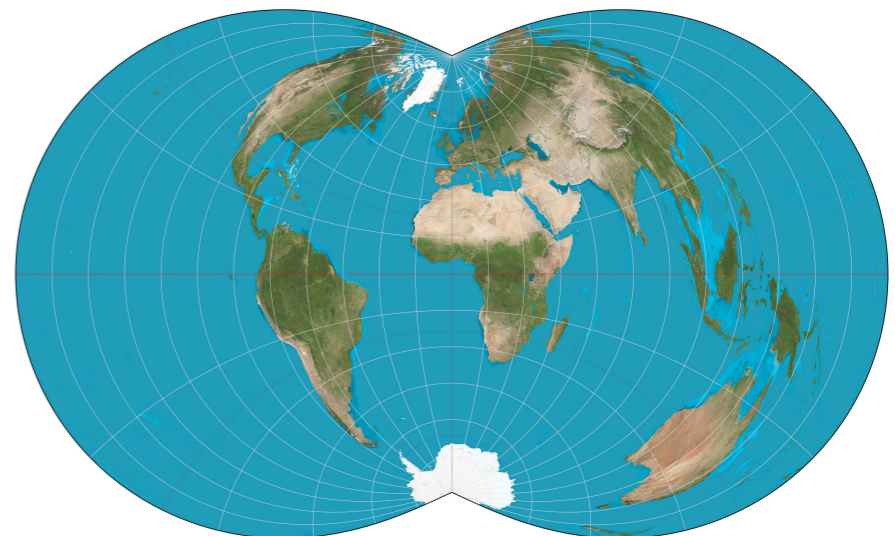
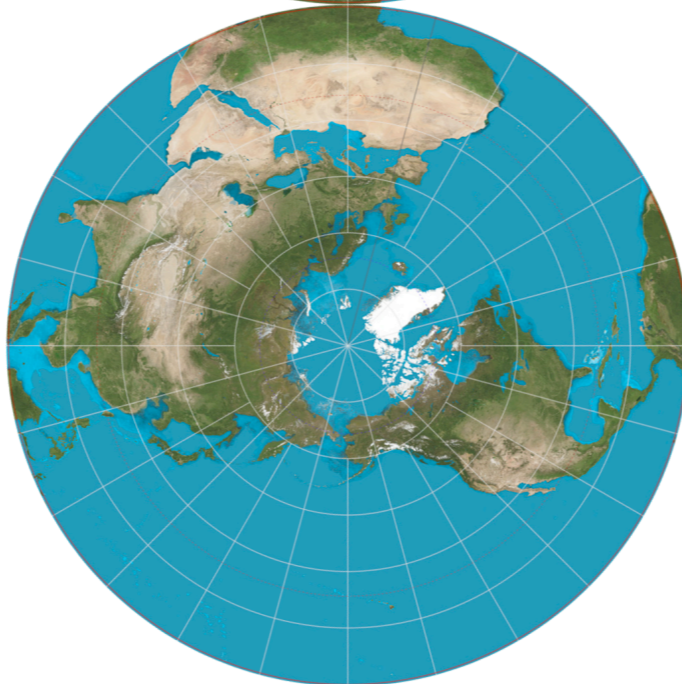
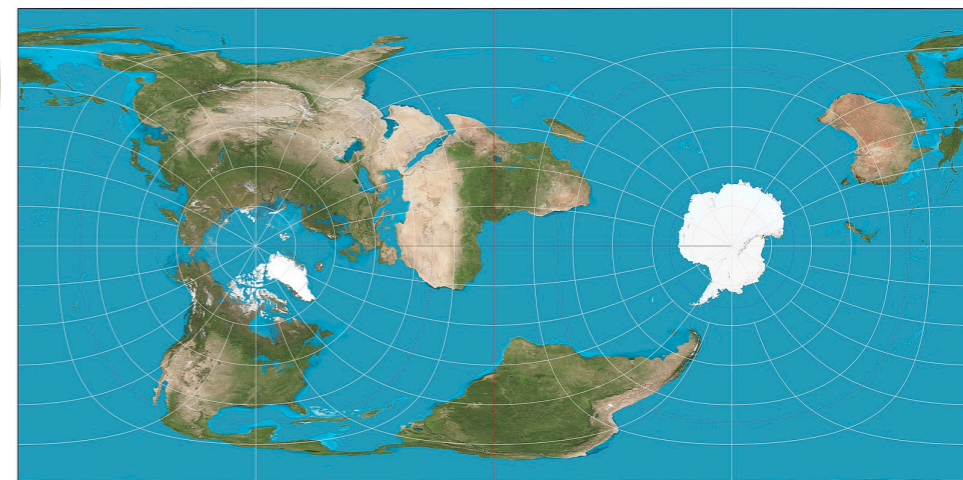
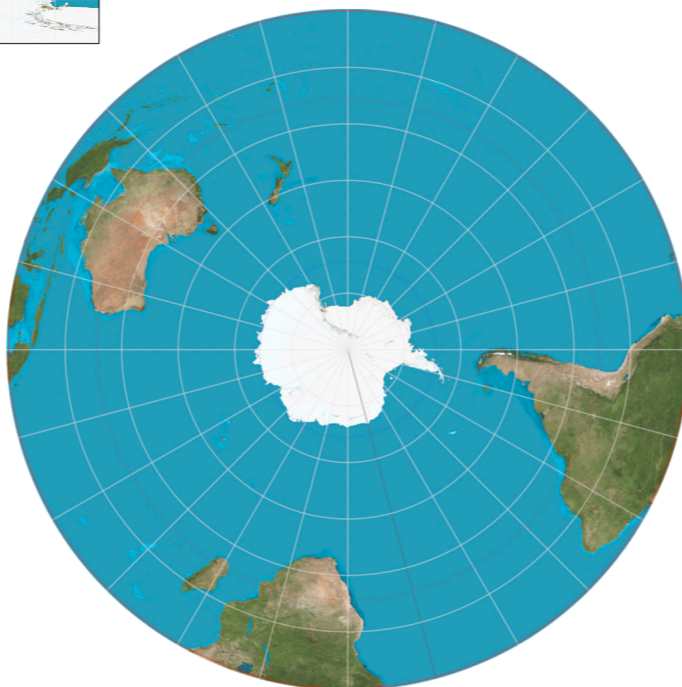
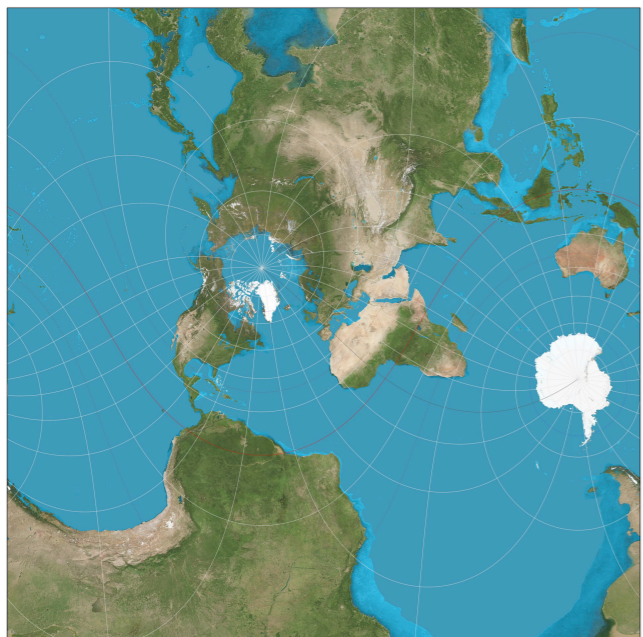
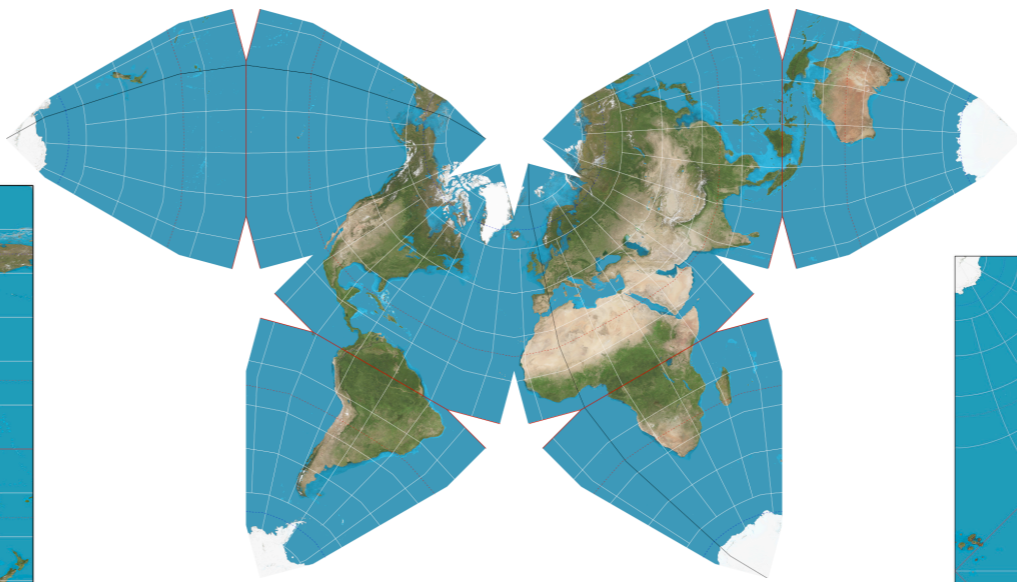
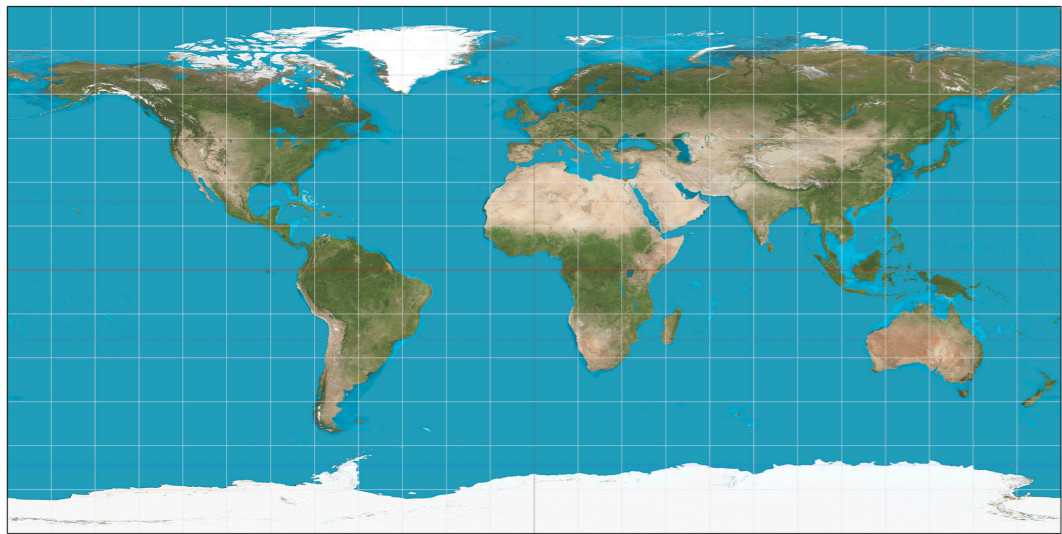


Autour de quoi
tournent les étoiles en
orbite autour d'un trou
noir ?

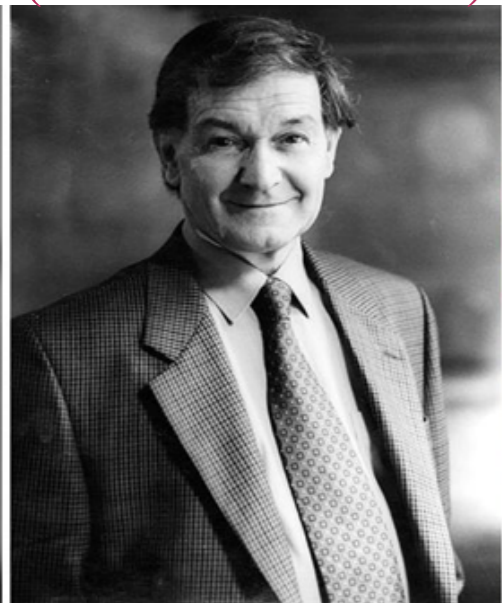
*Elles sont gravitationnellement
liées à la "mémoire de la présence"
de l'étoile qui n'est plus.*



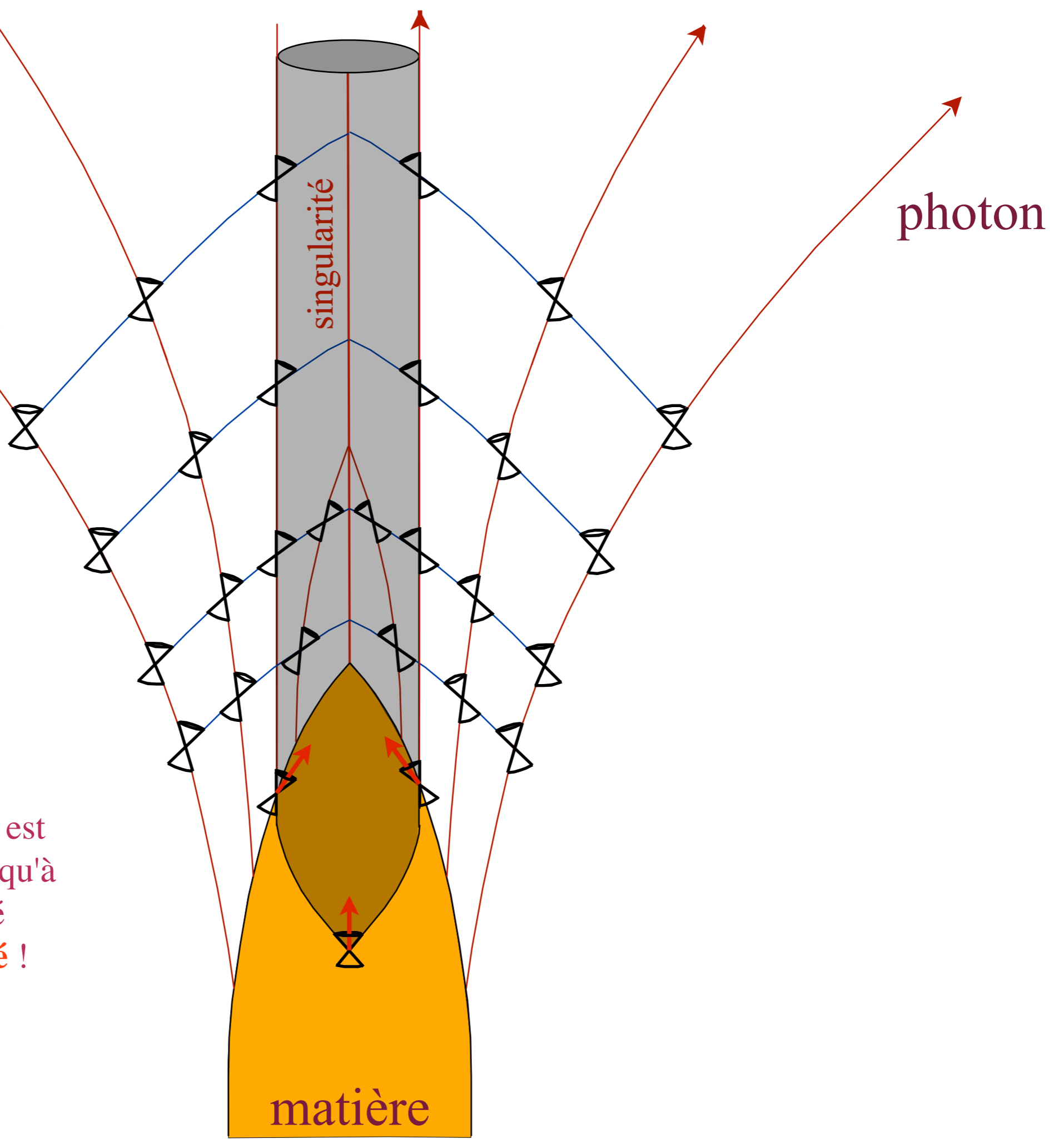
matière



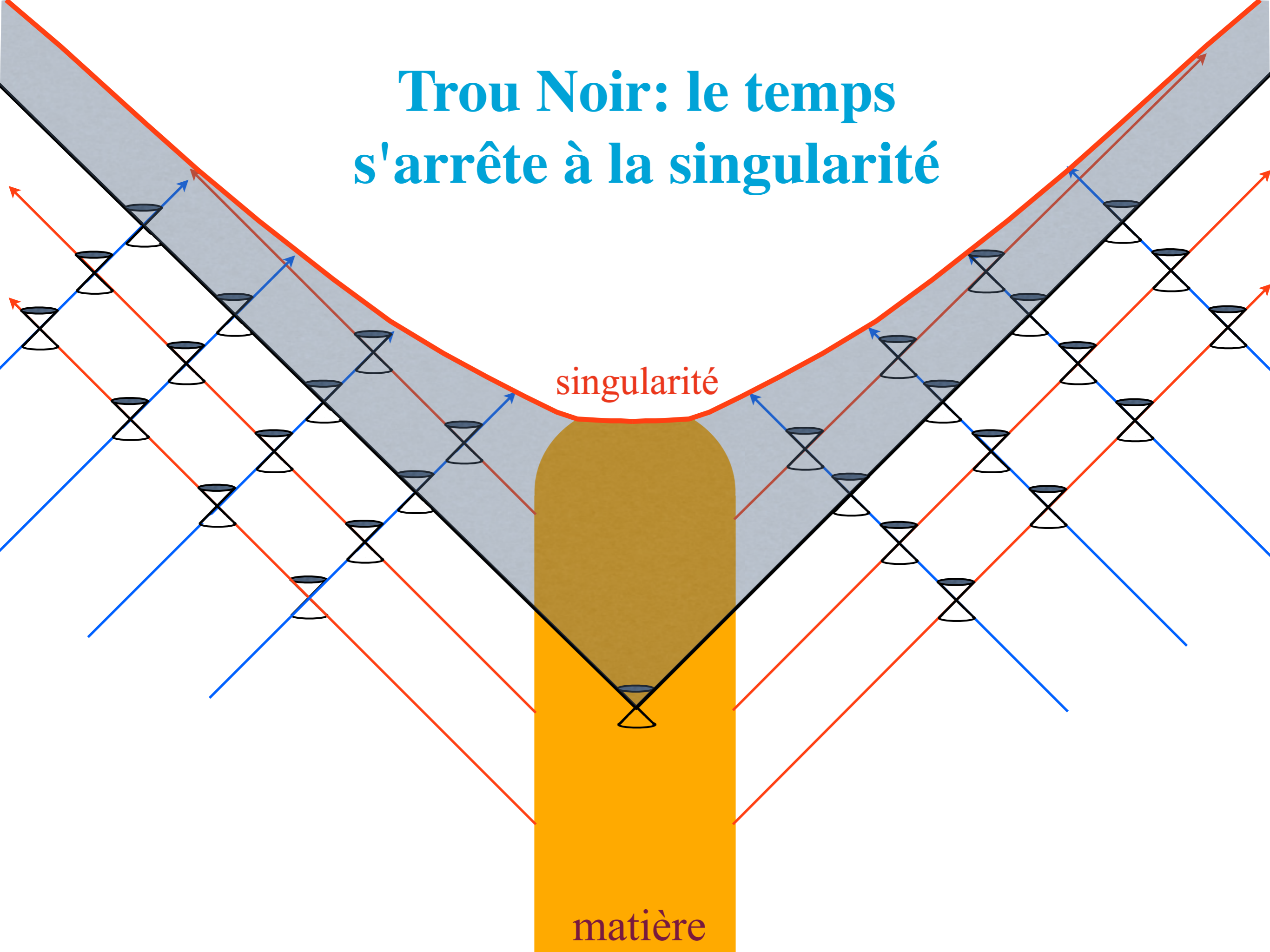
Théorèmes de Singularités
Roger Penrose
(Prix Nobel 2020)



Toute la matière de l'étoile est compressée sans limite jusqu'à devenir un point de densité infinie, appelée **singularité** !



Trou Noir: le temps s'arrête à la singularité

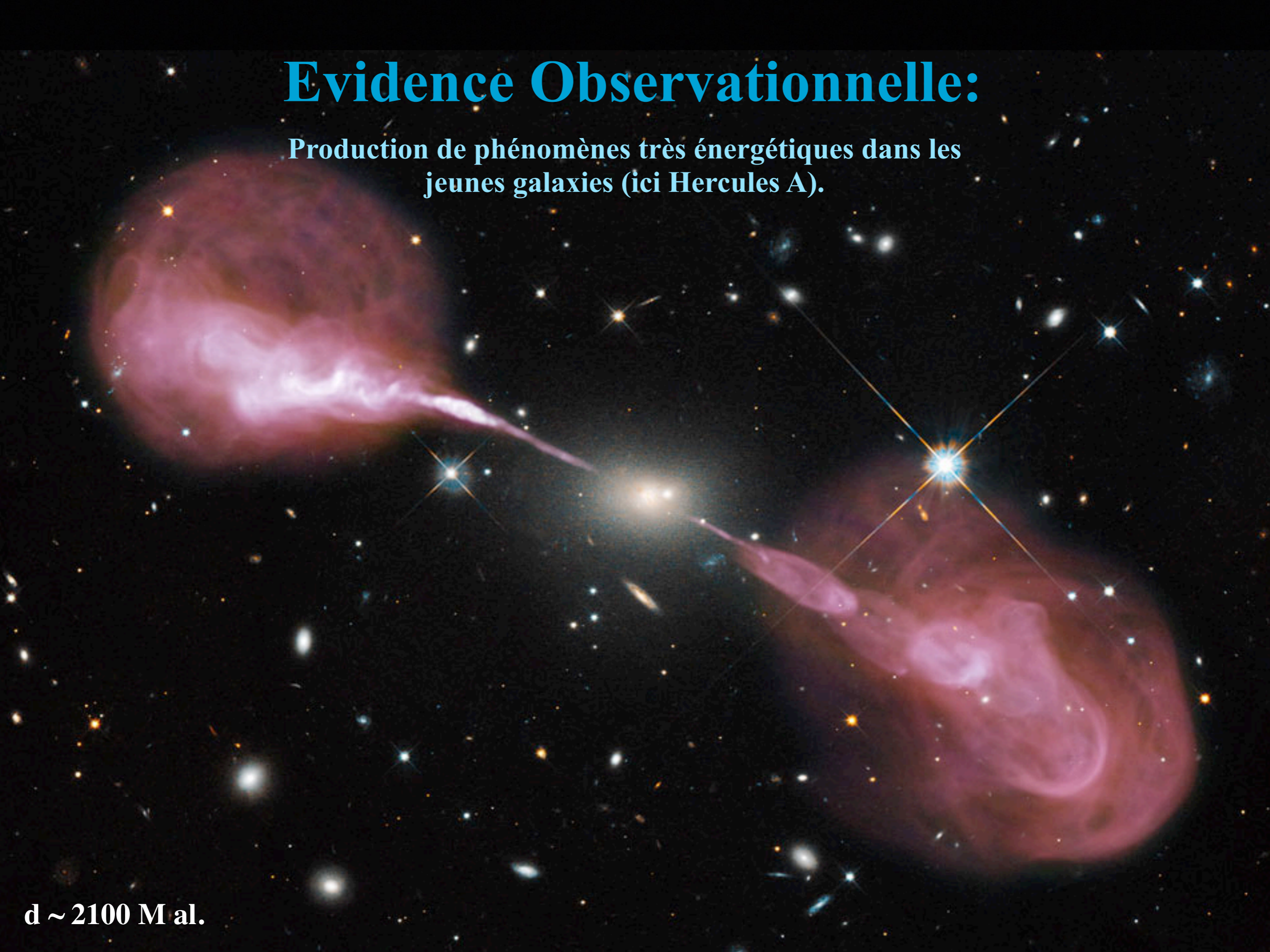


singularité

matière

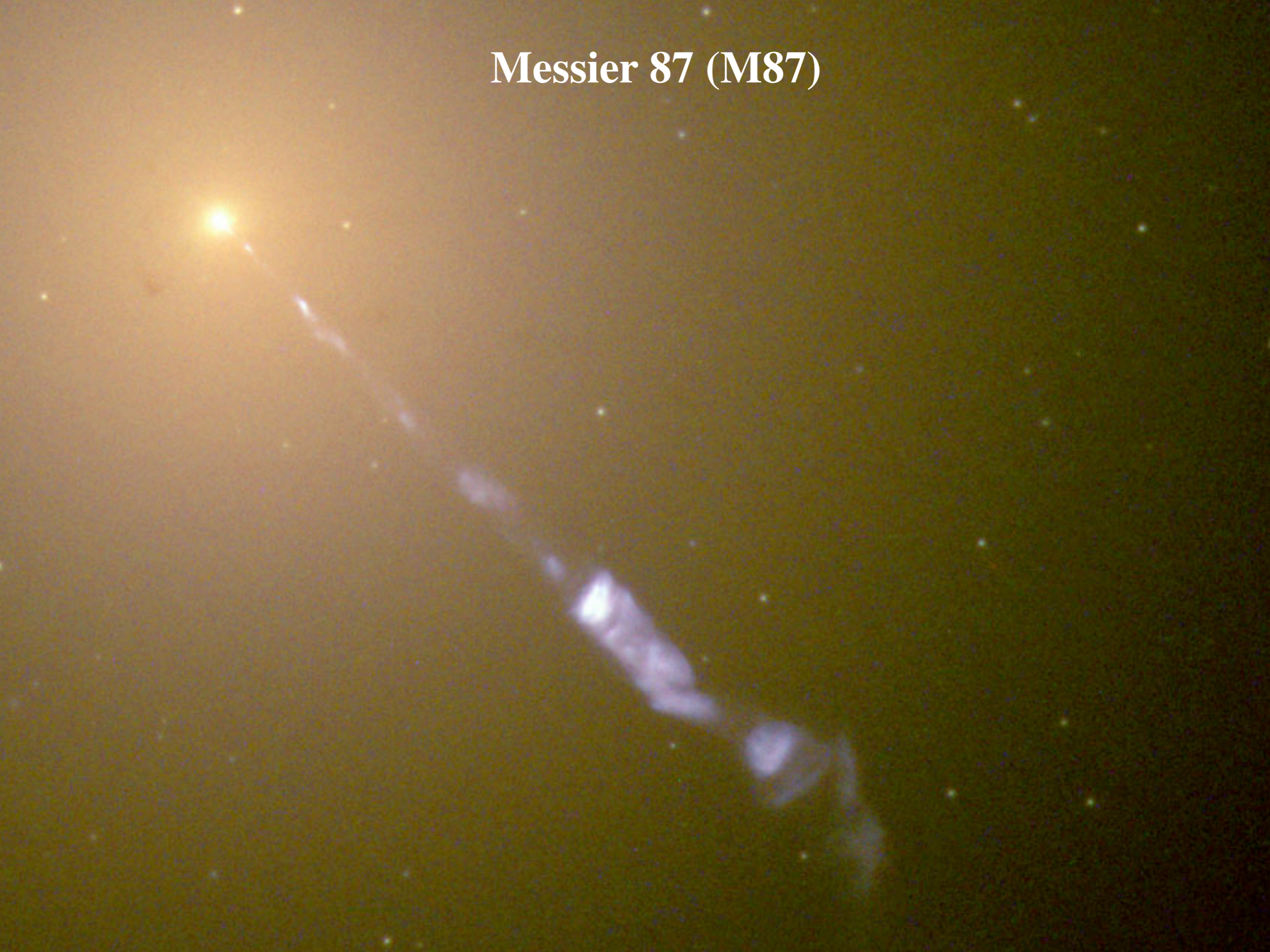
Evidence Observationnelle:

Production de phénomènes très énergétiques dans les jeunes galaxies (ici Hercules A).



d ~ 2100 M al.

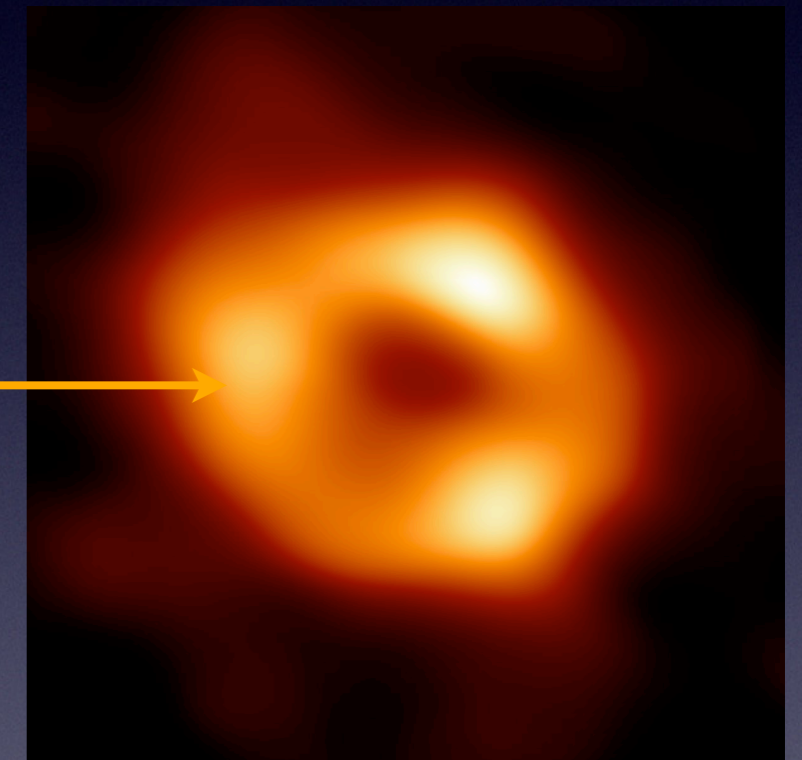
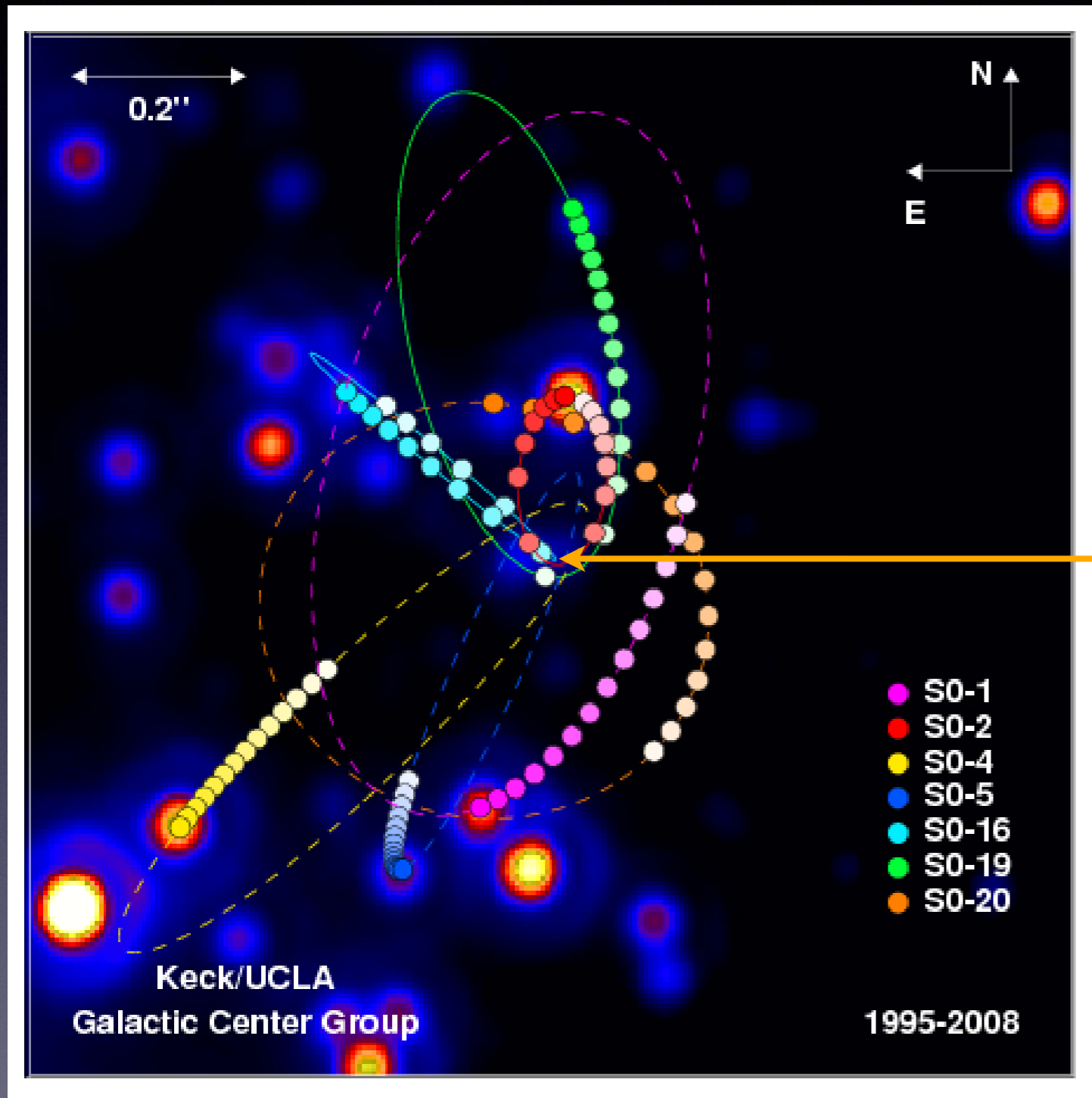
Messier 87 (M87)





Evidence Observationnelle:

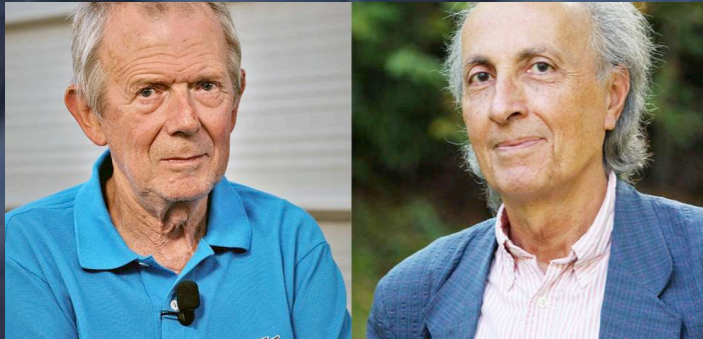
Observation directe des ses manifestations gravitationnelles.



Event Horizon Telescope

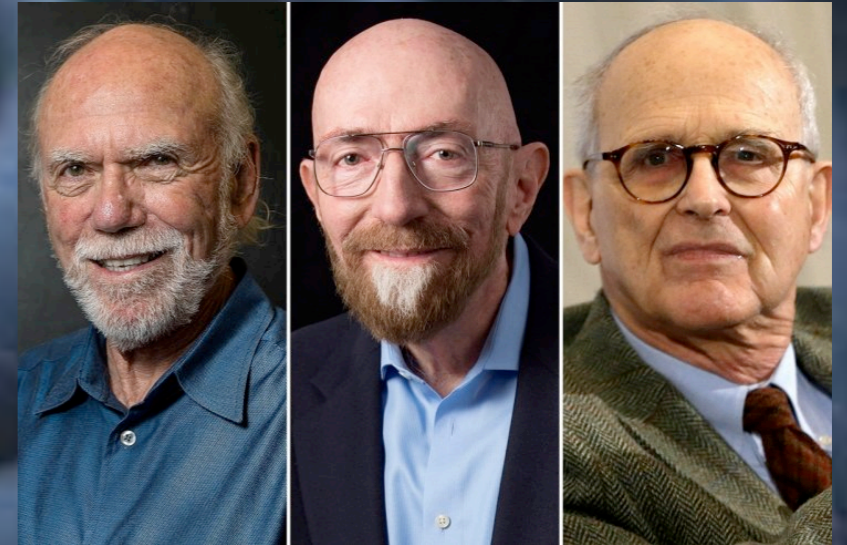
Observation d'Ondes gravitationnelles

Médailleurs d'or
du CNRS 2017



Alain Brillet et Thibault Damour

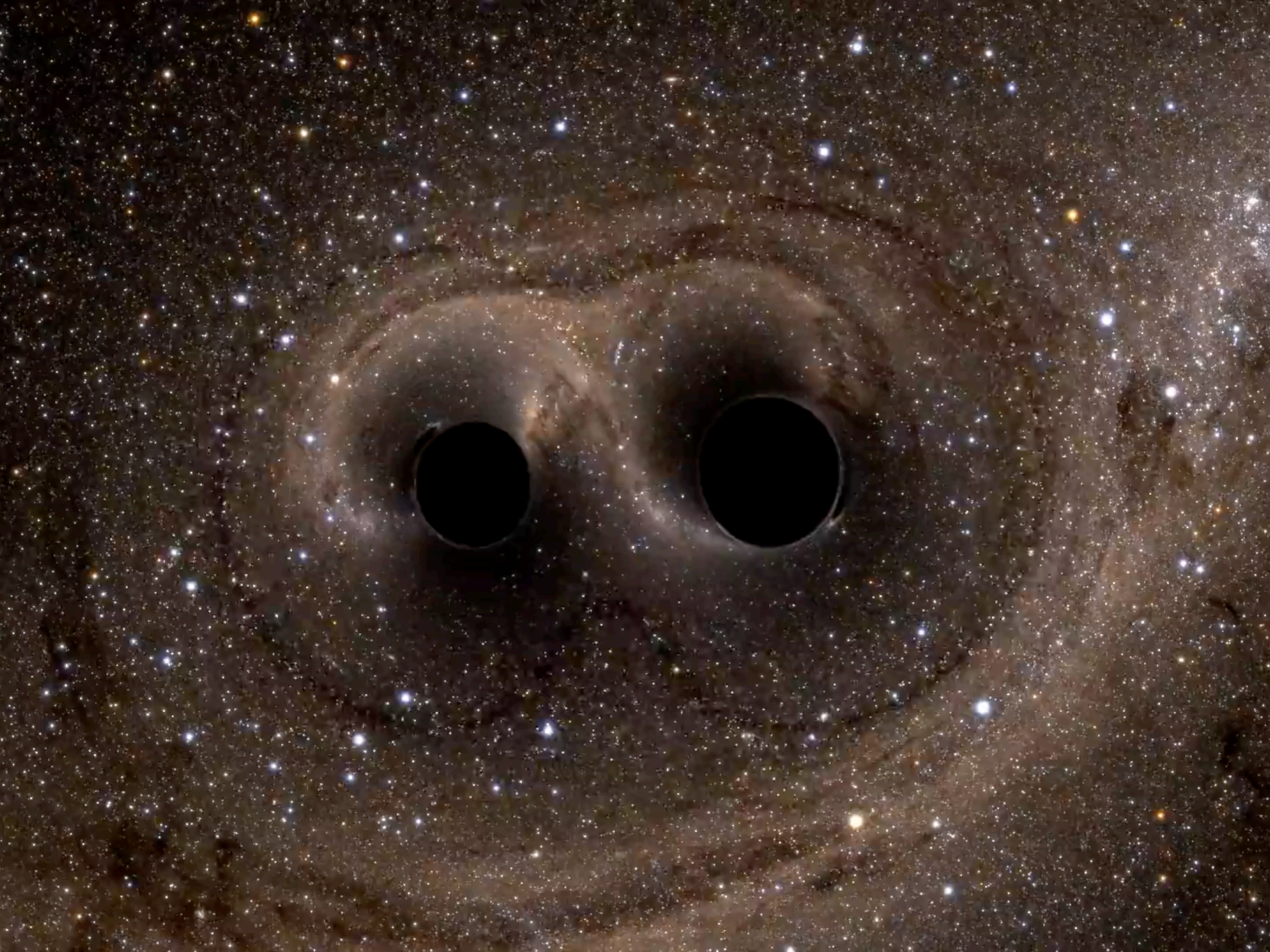
Prix Nobel 2017



Barry Barish
Kip Thorne
Rainer Weiss

LIGO-VIRGO Collaboration



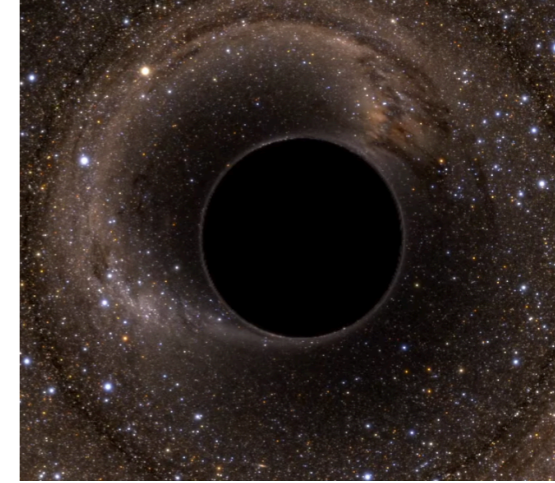


DEUXIÈME PARTIE

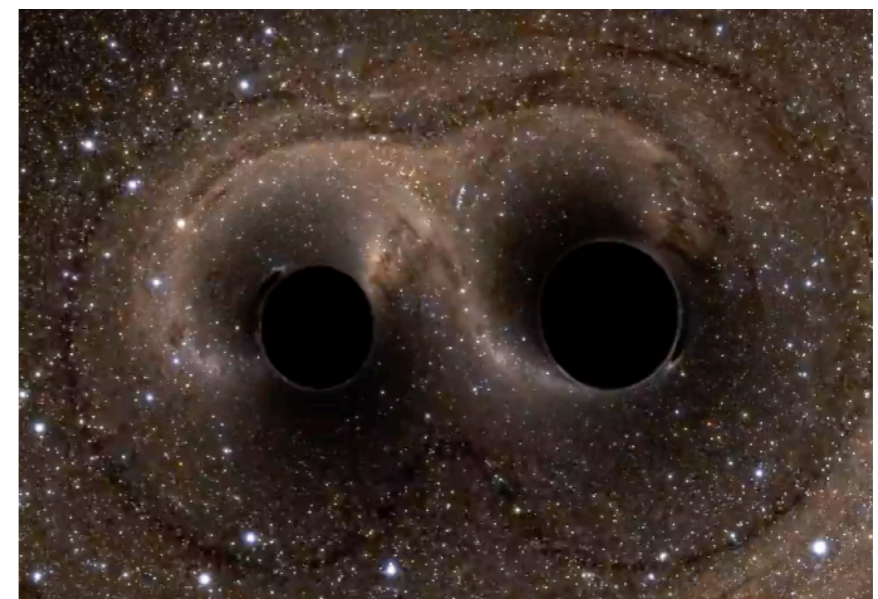
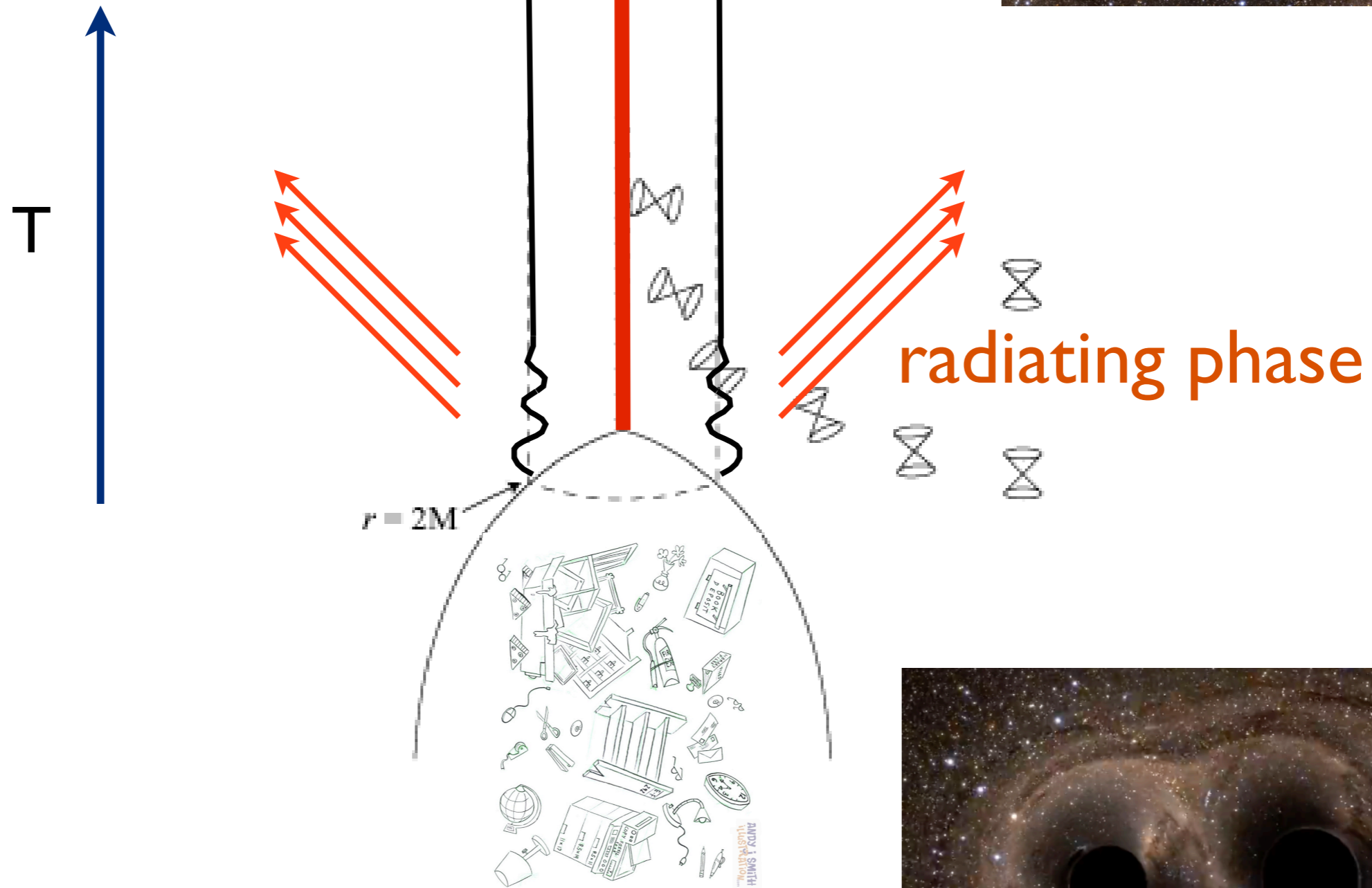
Les Trous Noirs et la nouvelle Physique

La singularité est-elle vraiment la fin des temps?

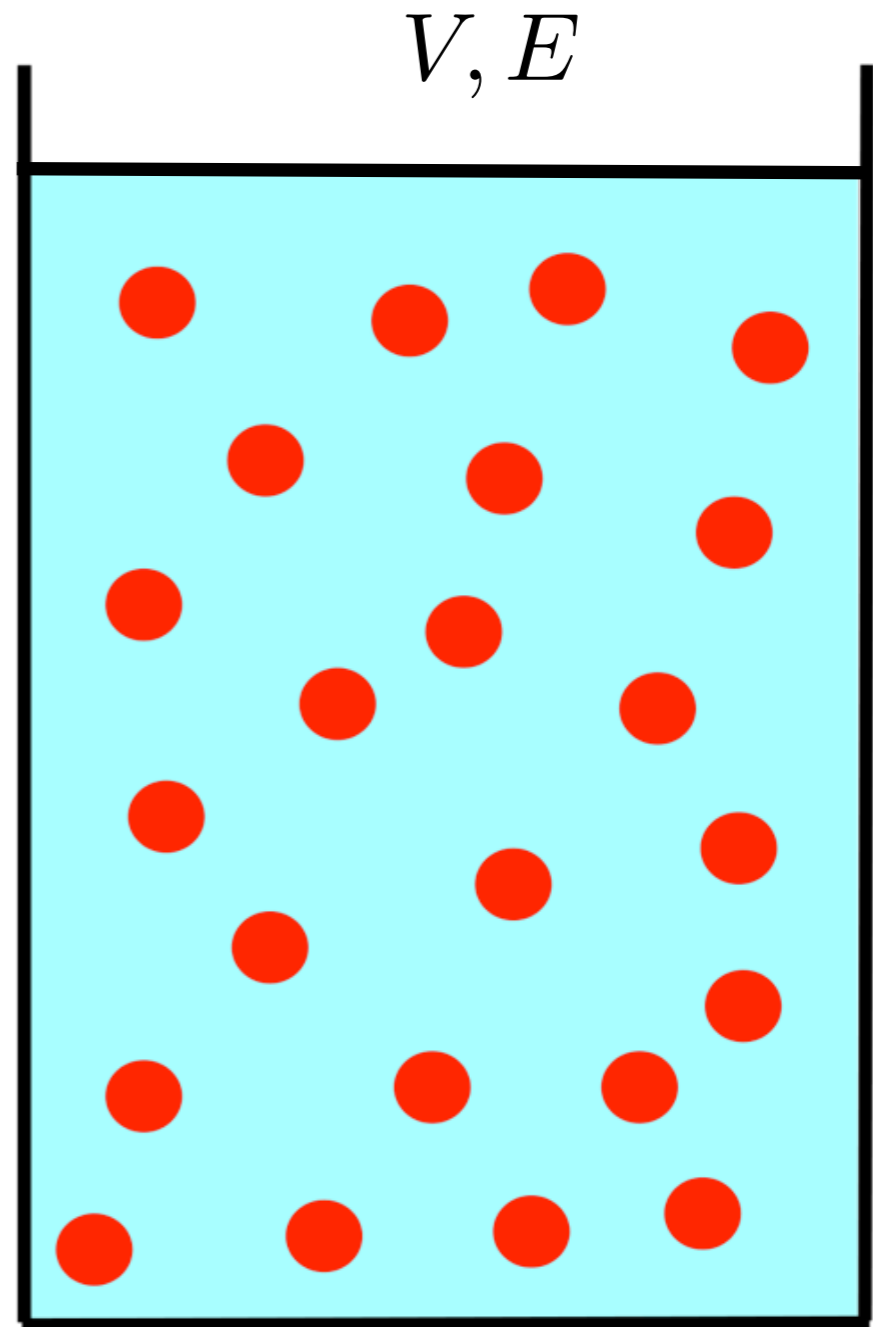
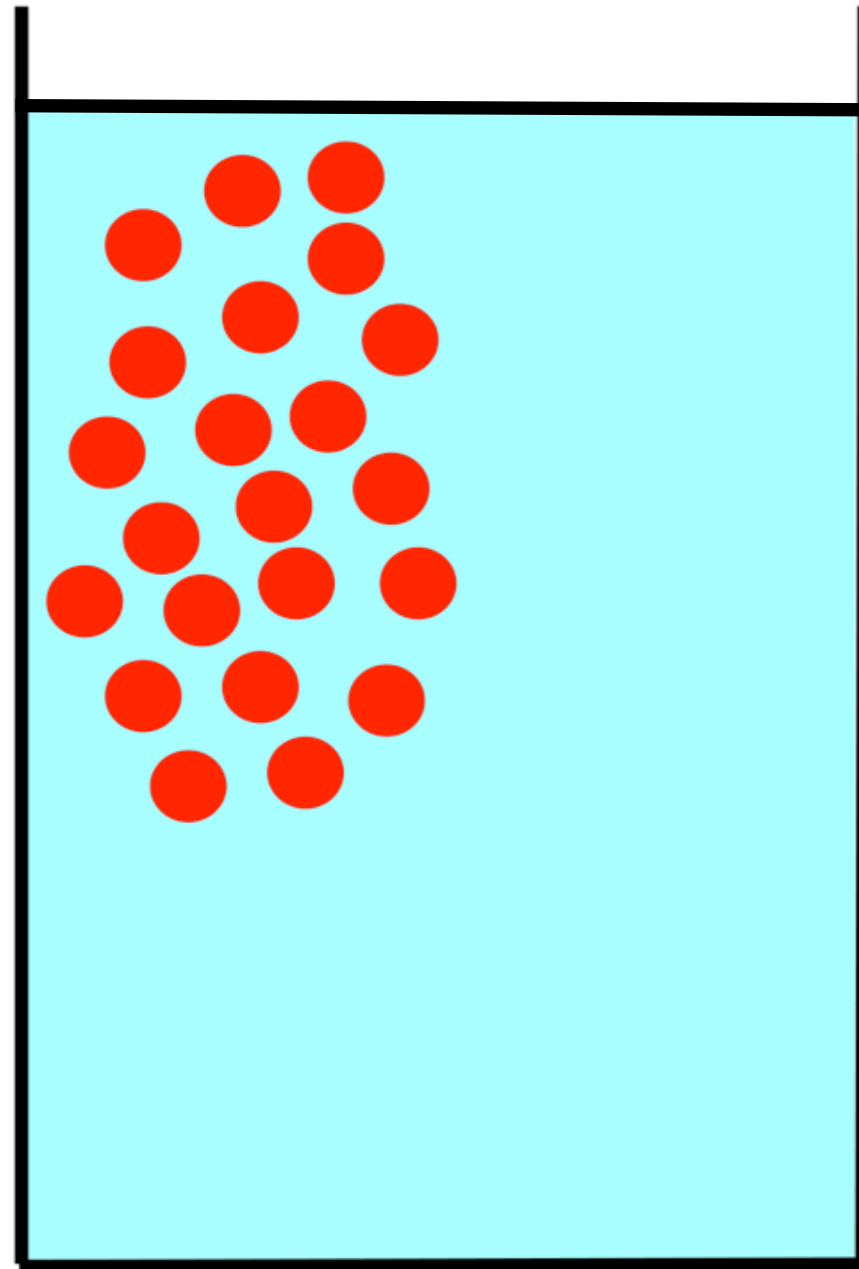
Les trous noirs stationnaires sont **chauves**: vus de l'extérieur, ils ne gardent pas de traces de ce qu'ils a formé.



M, J



Comme dans un système
thermodynamique



Première loi de la Thermodynamique:

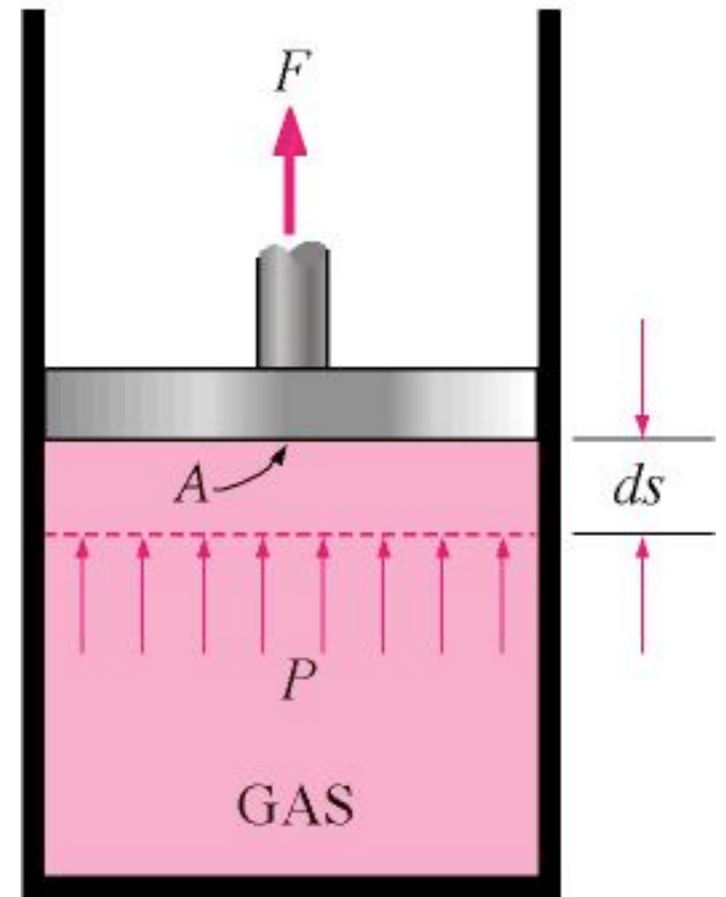
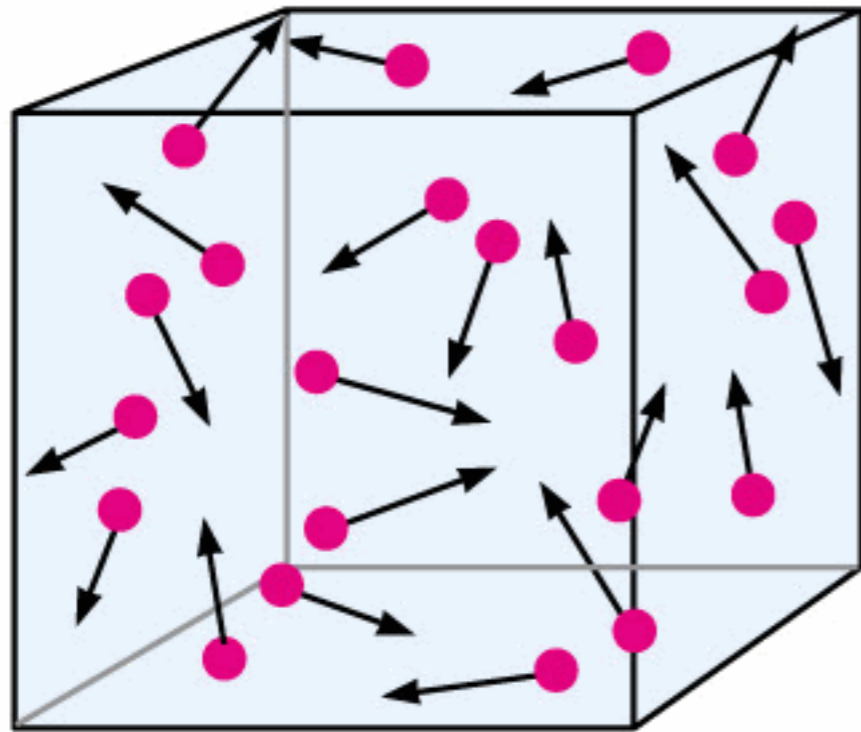
Energie

$$\Delta E = T\Delta S + \Delta W$$

Travail

Chaleur:

“désordre moléculaire”

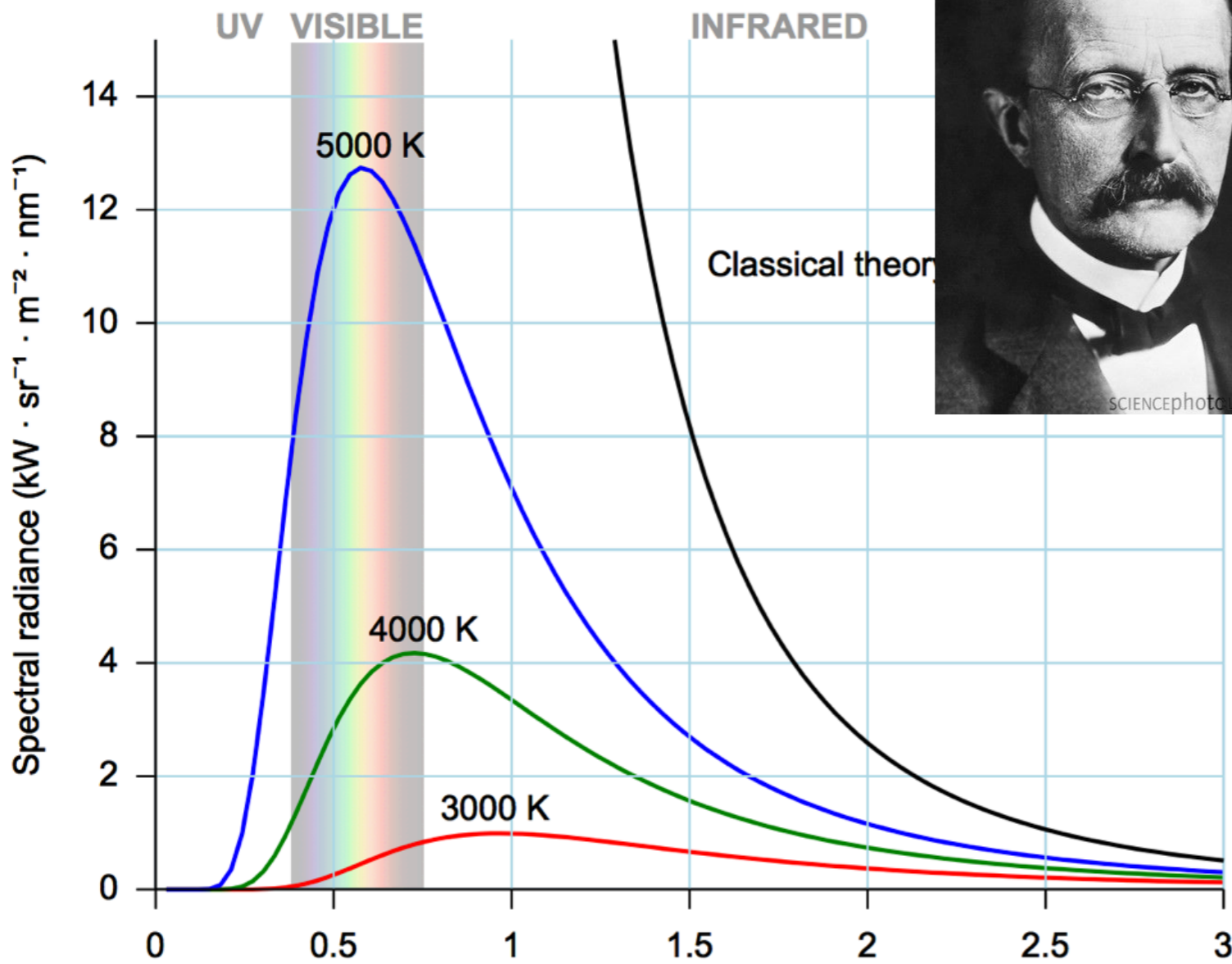
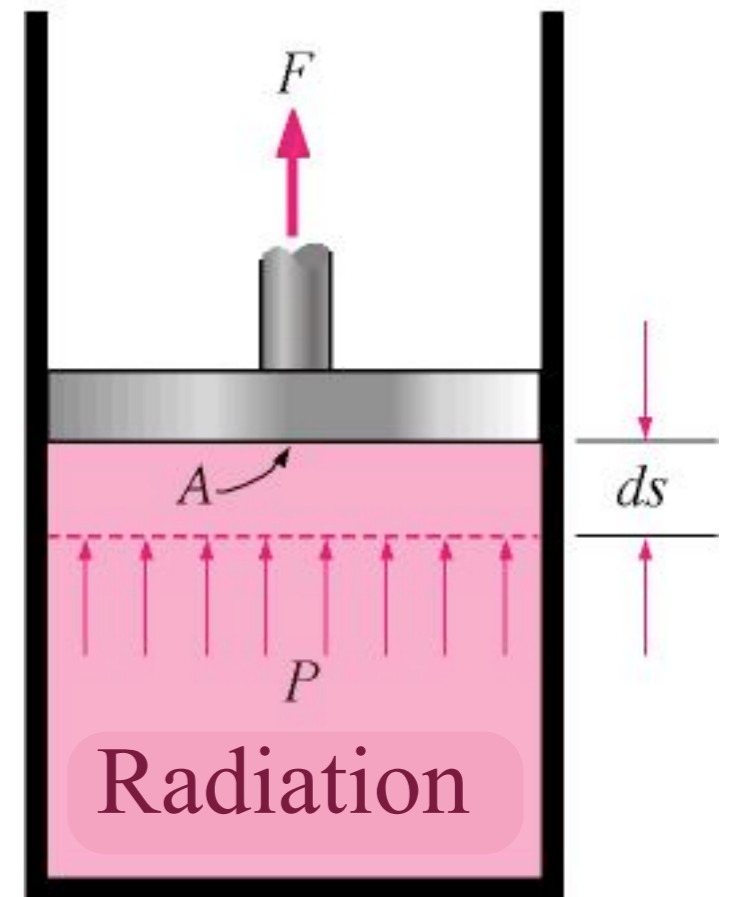


Seconde loi de la Thermodynamique:

$$\Delta S_{Tot} \geq 0$$

Le désordre ne peut qu'augmenter

$$\Delta E = T\Delta S + \Delta W$$



Hypothèse Quantique: La Lumière est faite de particules!

$$\epsilon = \hbar\omega \quad \rightsquigarrow$$



Mécanique Quantique

Première loi de la Thermodynamique:

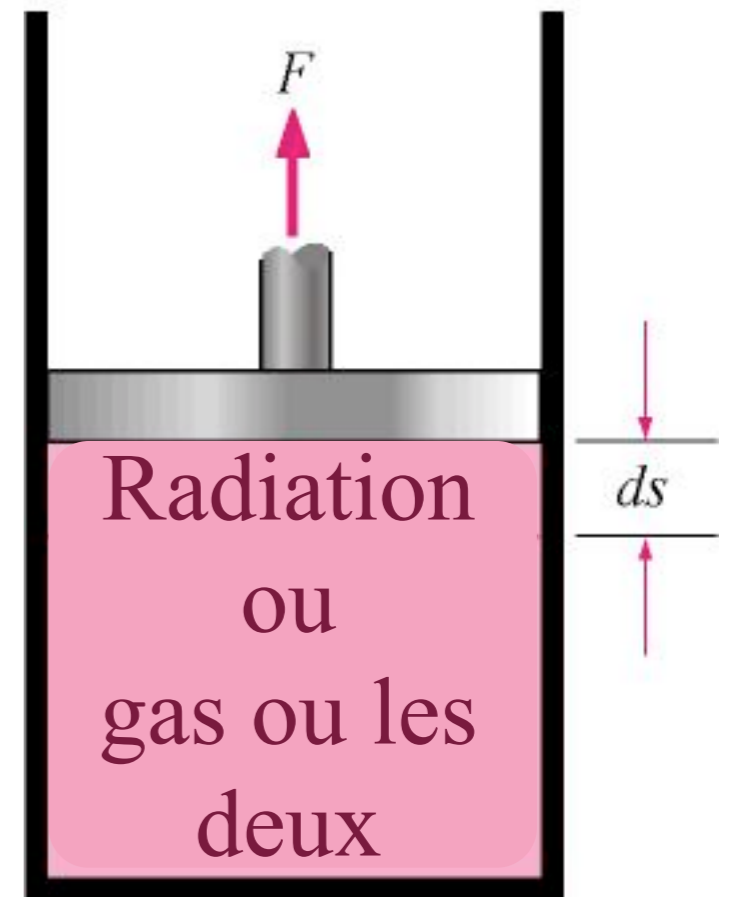
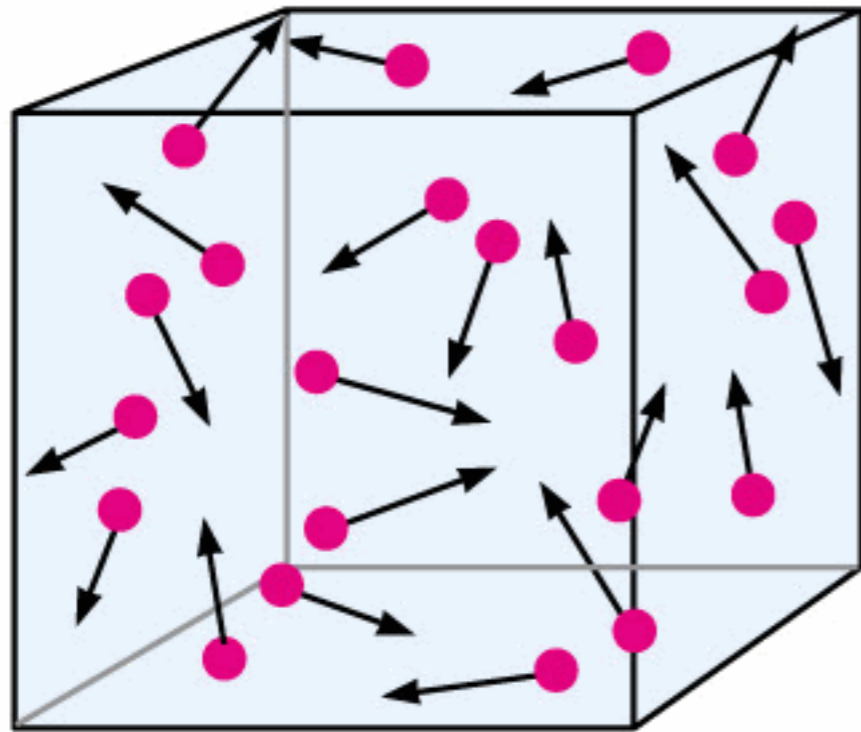
Energie

$$\Delta E = T\Delta S + \Delta W$$

Travail

Chaleur:

“désordre microscopique”



Seconde loi de la Thermodynamique:

$$\Delta S_{Tot} \geq 0$$

Le désordre ne peut qu'augmenter

$$M + \Delta M, J + \Delta J$$



**Première loi des
Energie Trous Noirs: Travail**

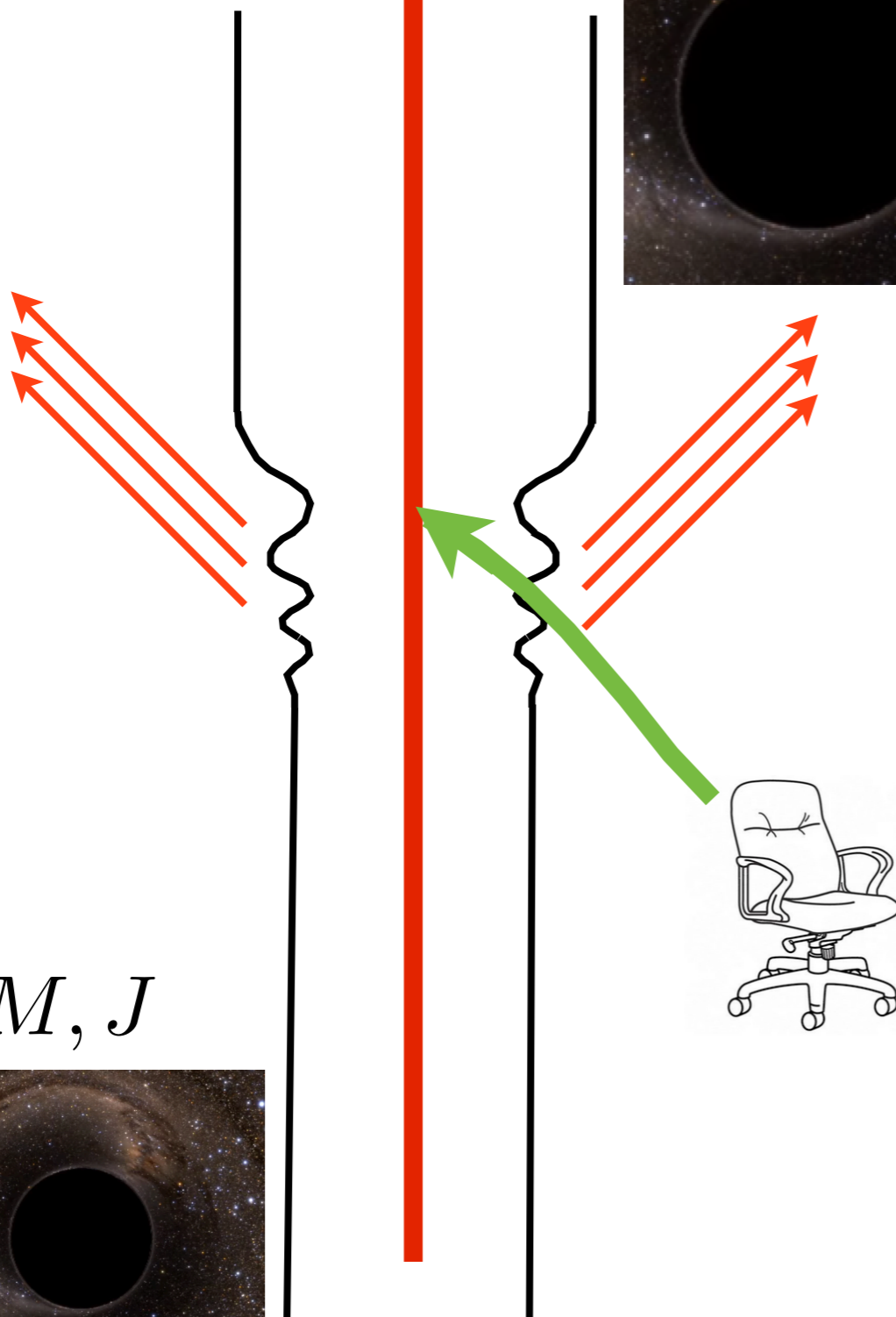
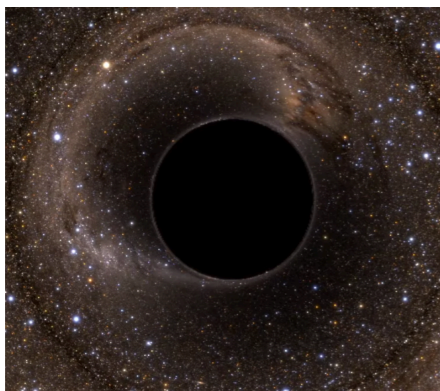
$$\Delta M = \frac{1}{8\pi M} \Delta A + \Delta W$$

Les équations d'Einstein
donnent deux relations qui
ressemblent celles de la
thermodynamique

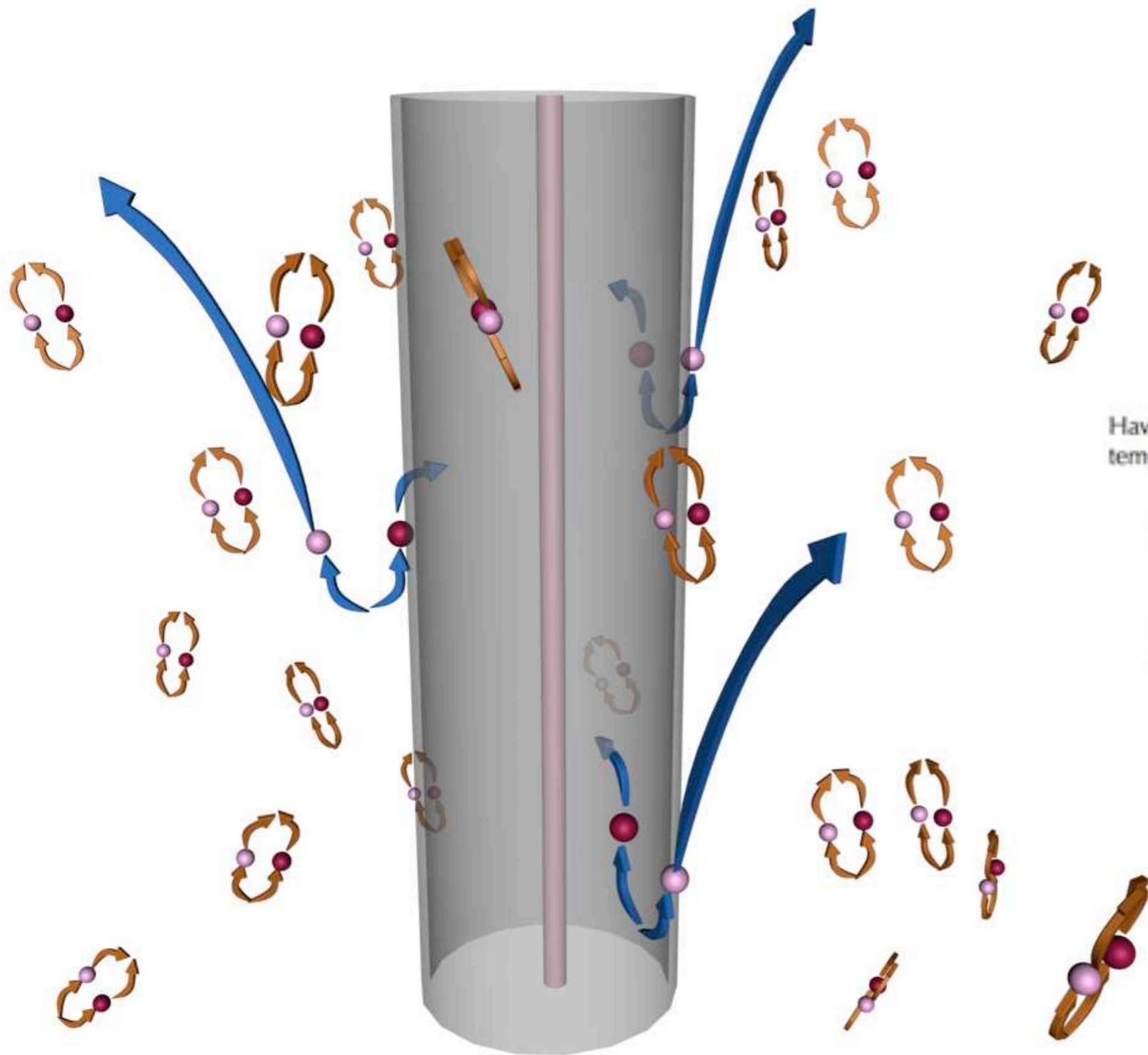
**Seconde loi des
Trous Noirs:**

$$\Delta A \geq 0$$

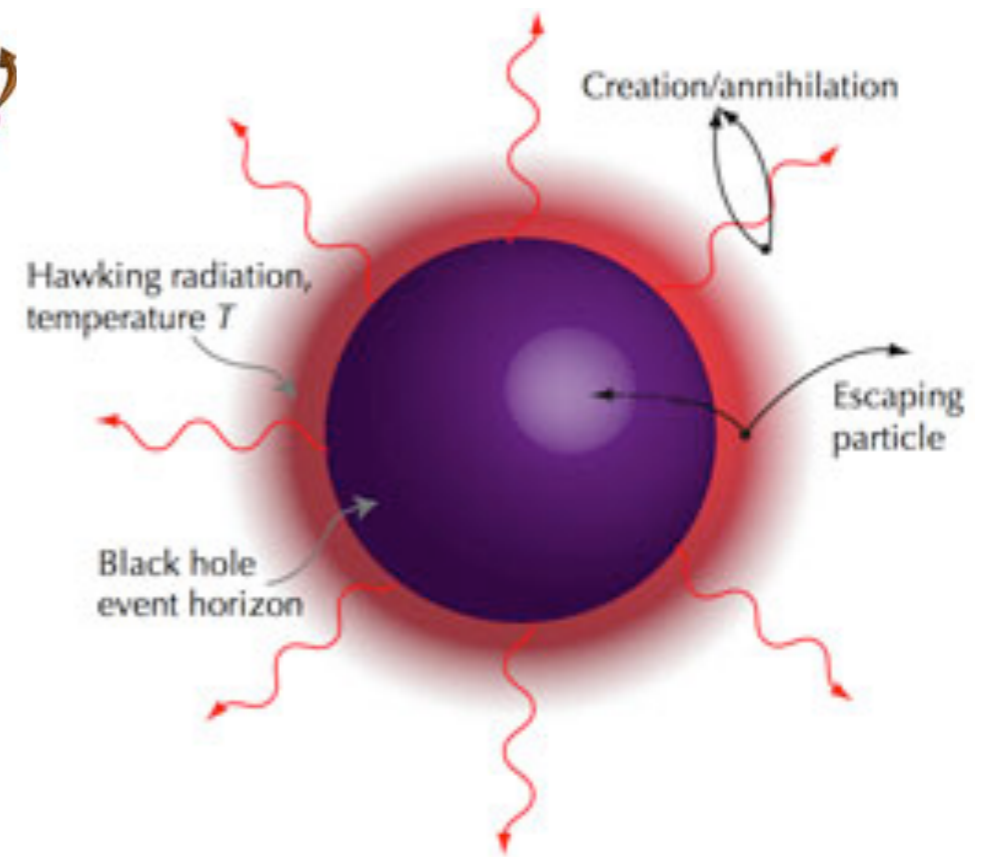
$$M, J$$



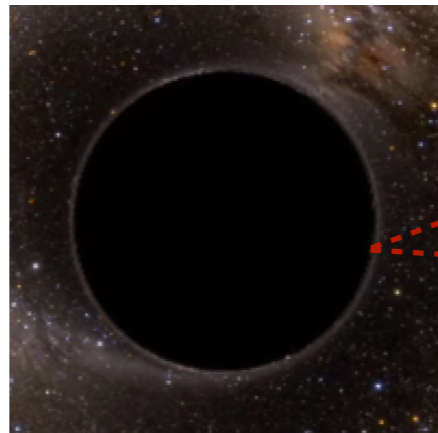
Les fluctuations quantiques du vide à l'extérieur du trou noir produisent radiation thermique (Hawking)



$$T = \frac{c^3 \hbar}{G} \frac{1}{8\pi M}$$



$$M + \Delta M, J + \Delta J$$



Chaleur:

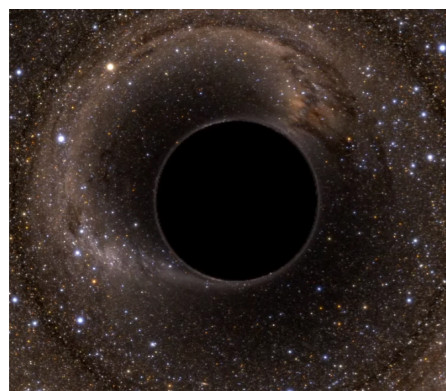
“désordre microscopique”

$$\underbrace{\Delta M}_{\Delta E} = \underbrace{\frac{c^3 \hbar}{G}}_T \underbrace{\frac{1}{8\pi M}}_{\Delta S} \underbrace{\frac{\Delta A}{4G\hbar c^{-3}}}_{\Delta S} + \Delta W$$

$$\Delta E = T\Delta S + \Delta W$$



$$M, J$$



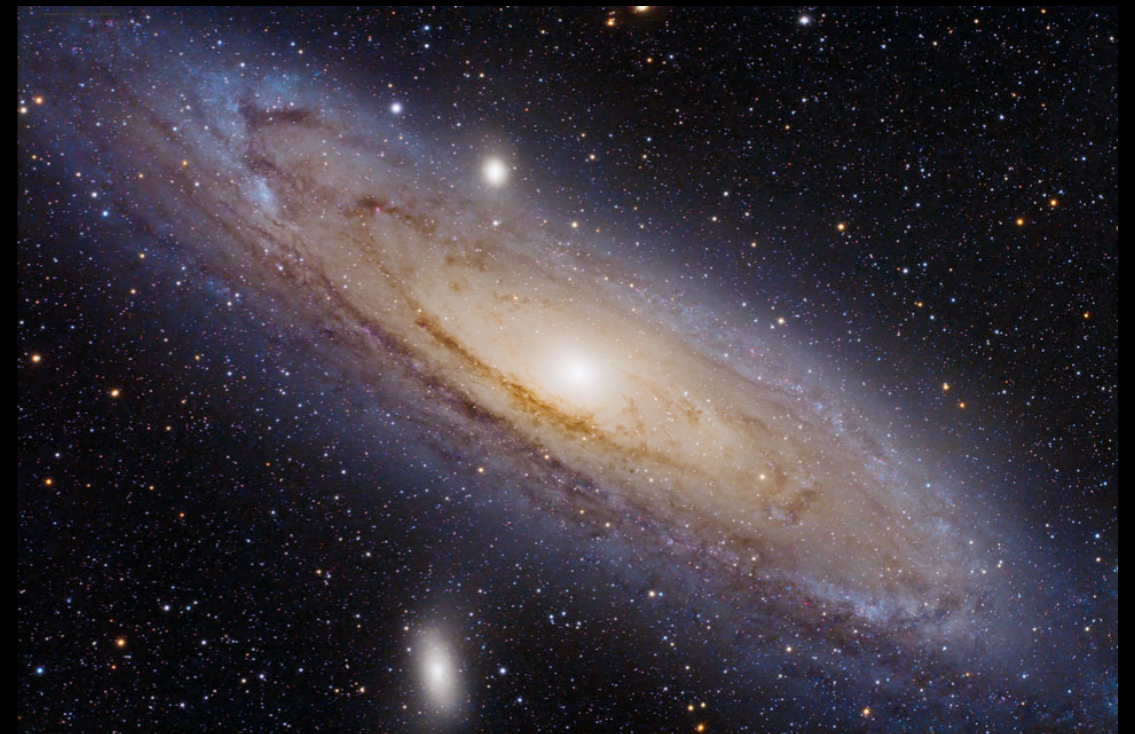
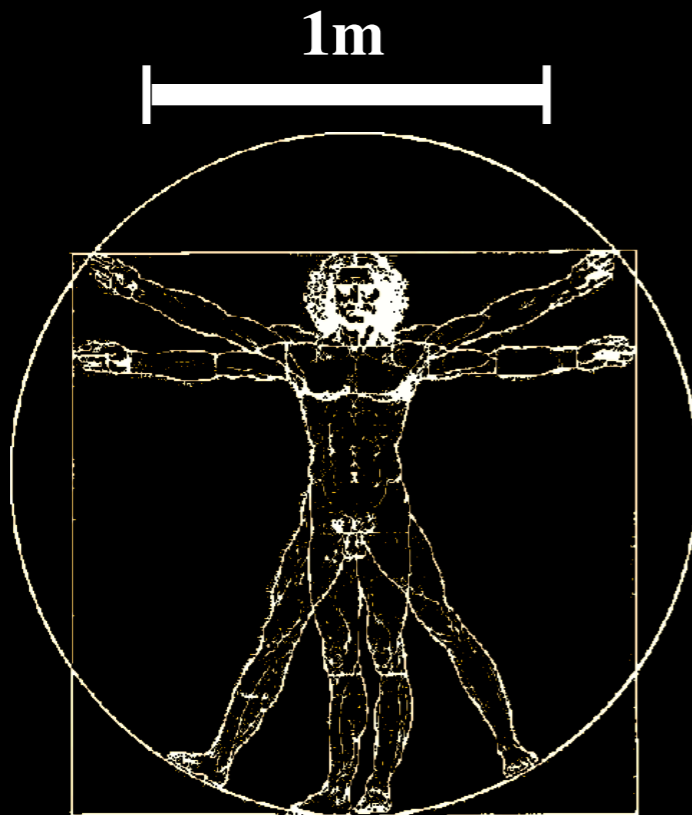
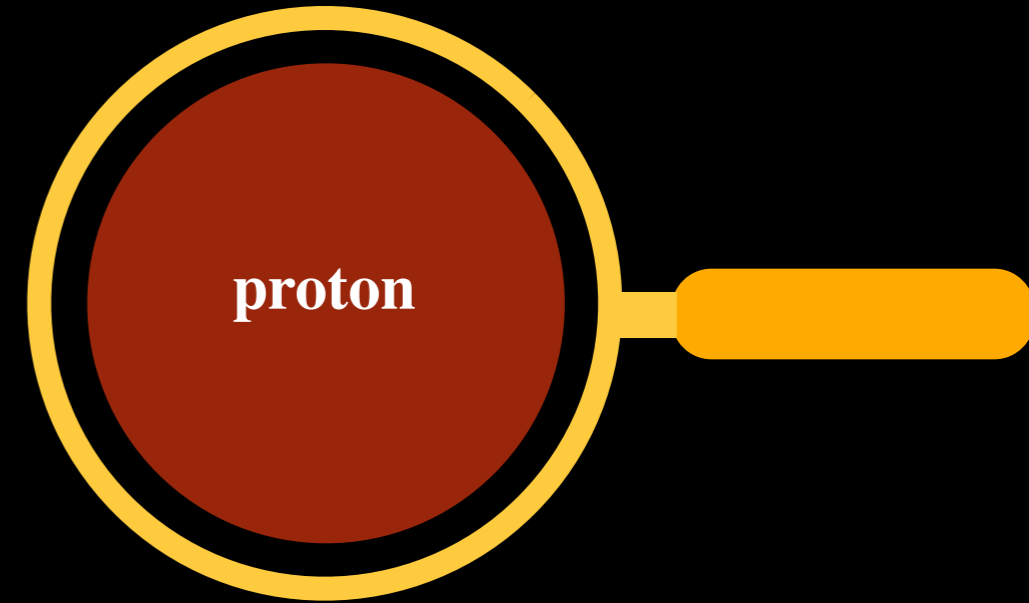
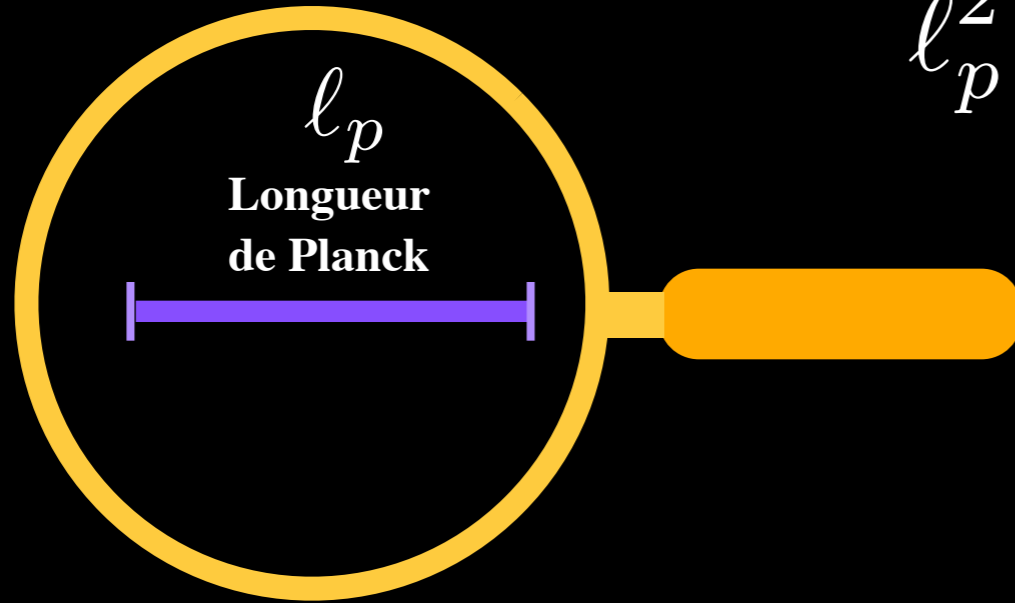
Entropie de Trous Noirs
(l'espace serait fait “d'atomes”)

$$S = \frac{A}{4\ell_p^2}$$

$$\ell_p^2 = \frac{G\hbar}{c^3}$$

Nouvelle physique à l'échelle de Planck

$$\ell_p^2 = \frac{G\hbar}{c^3}$$

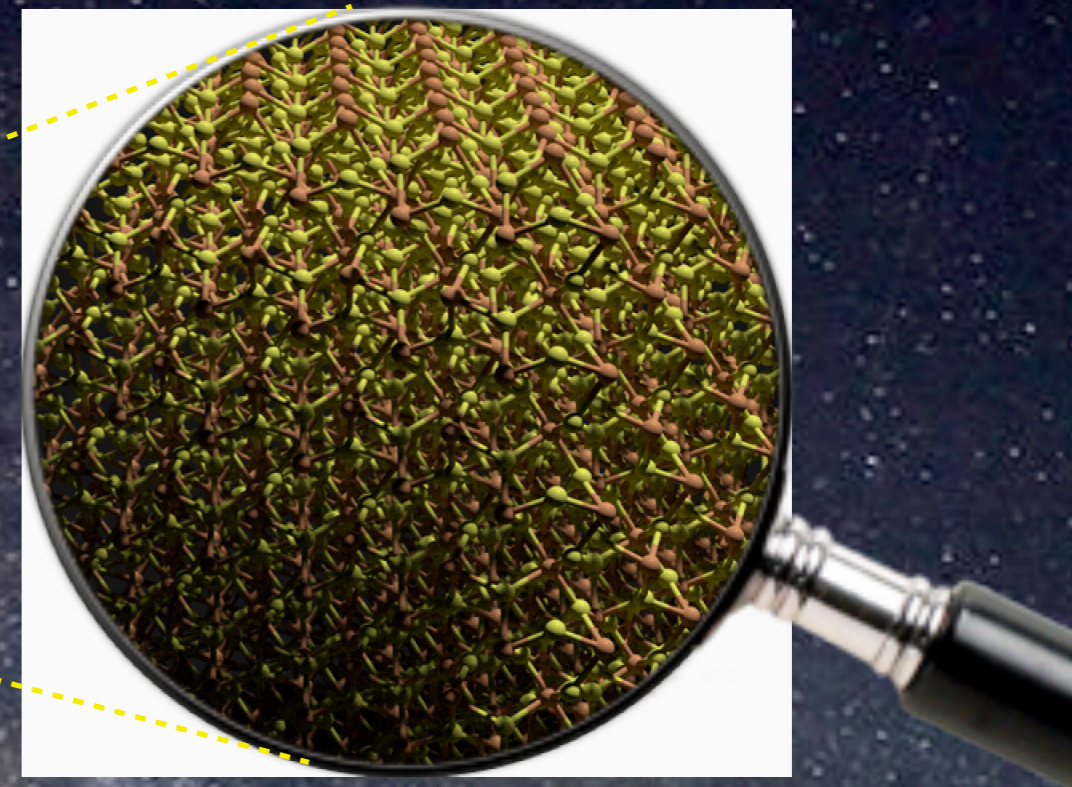
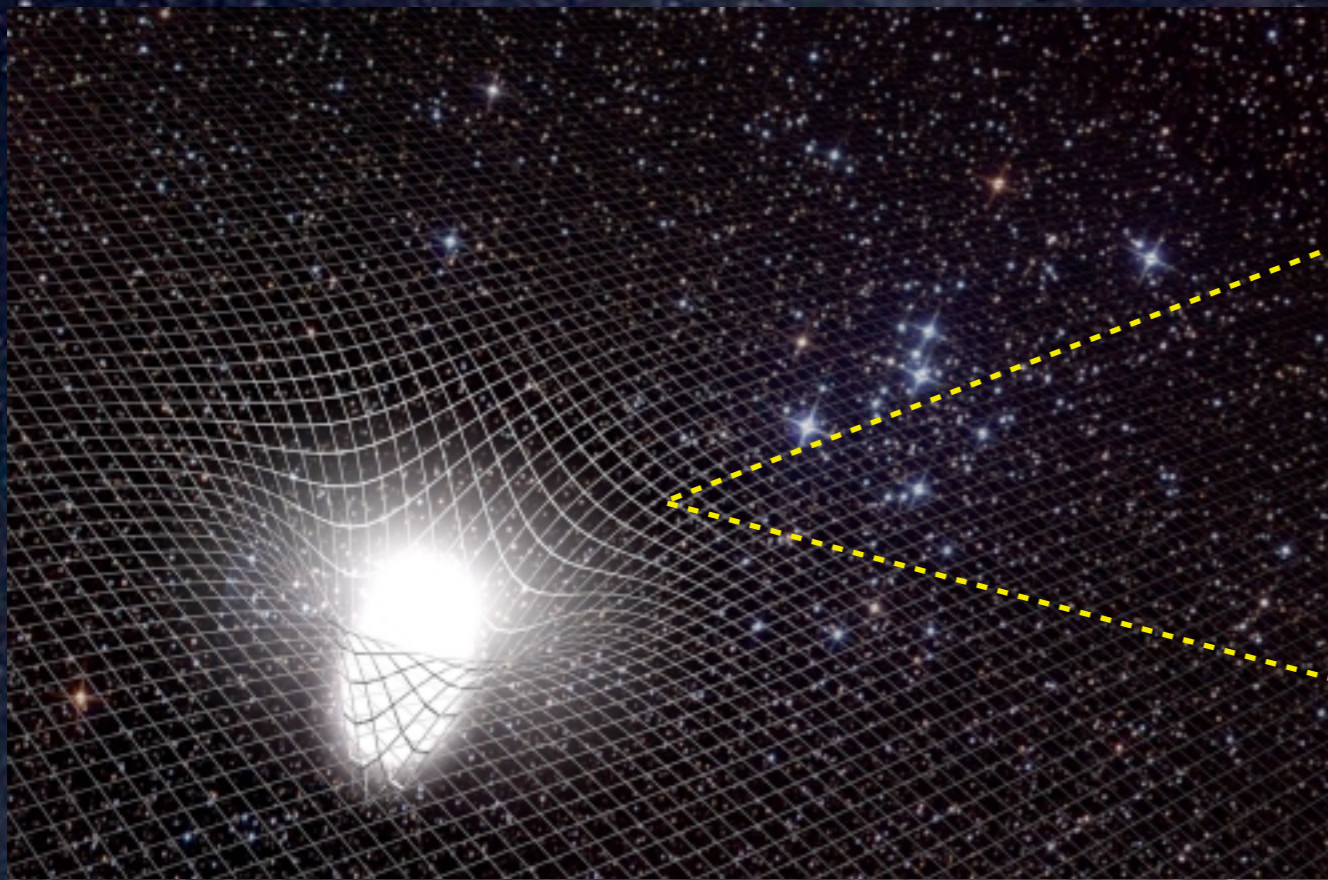




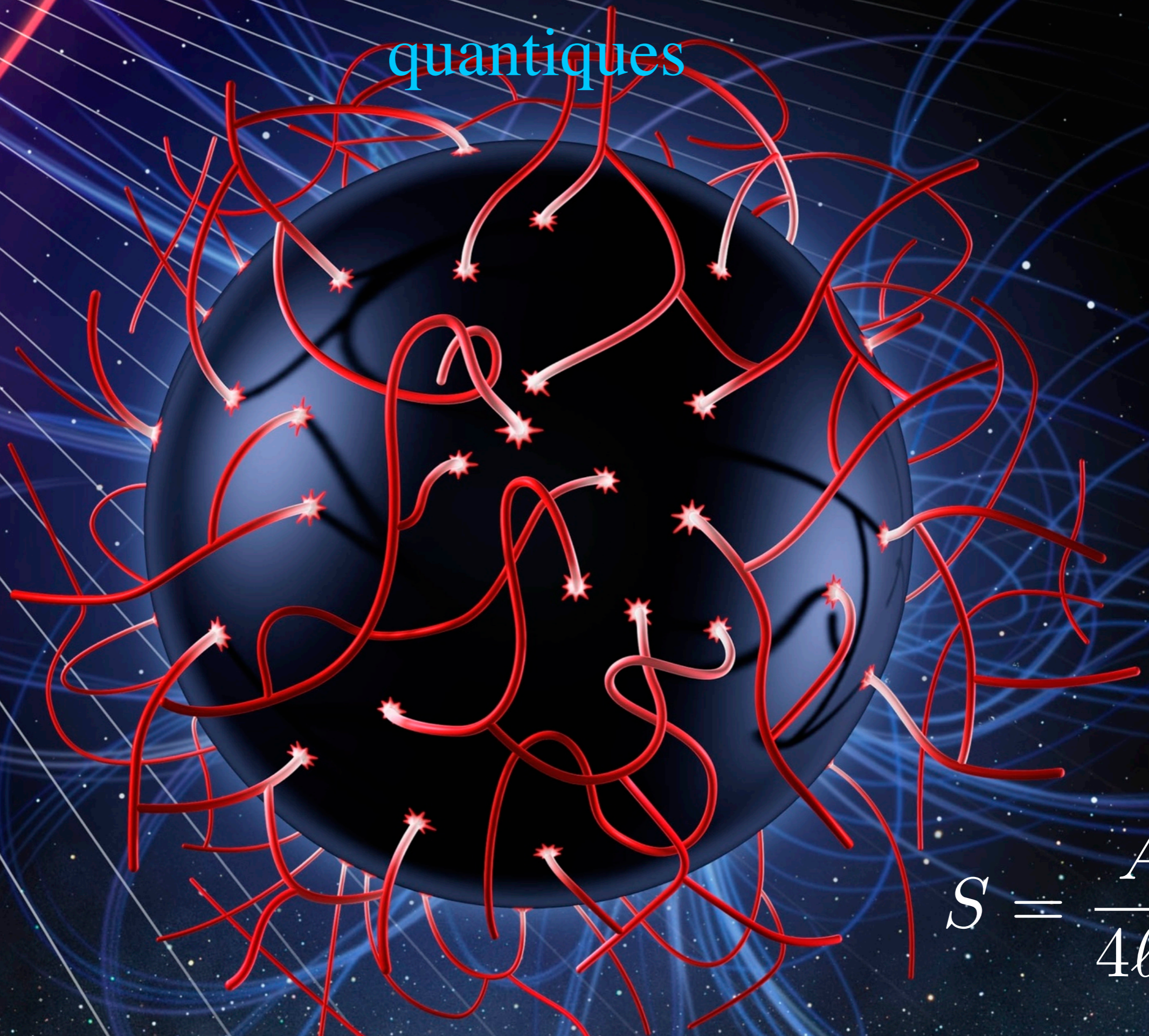
$2.5 \times 10^6 ly$



L'espace serait atomistique en gravitation quantique

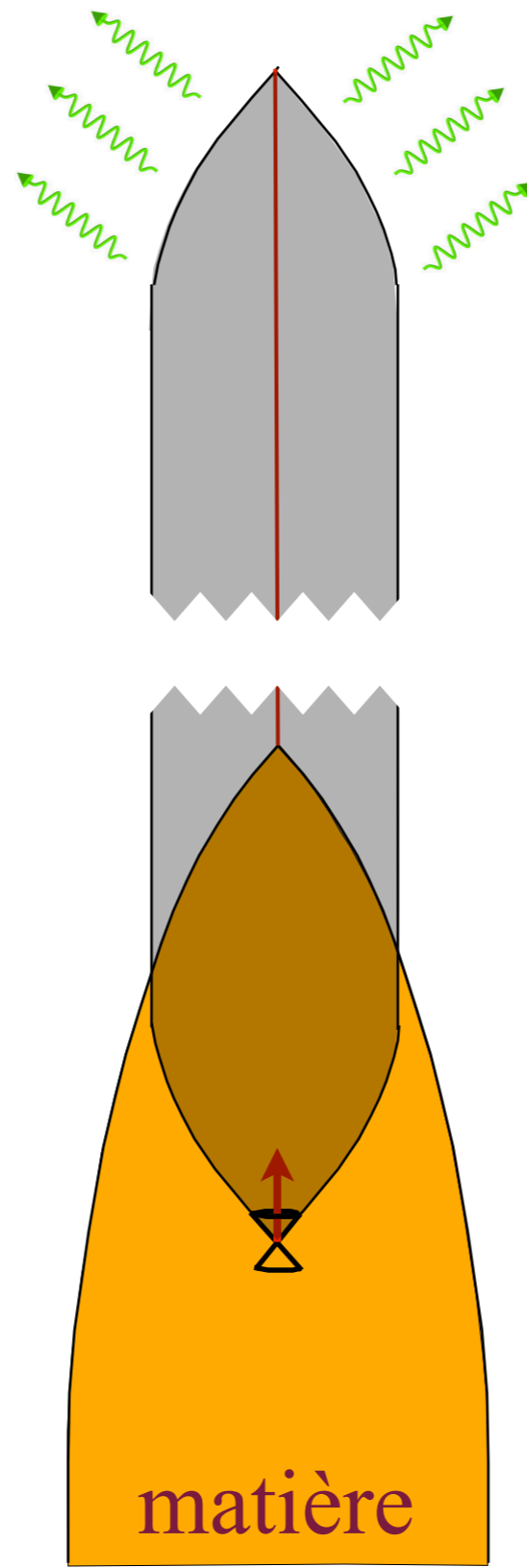


Les Trous Noirs ont des cheveux quantiques



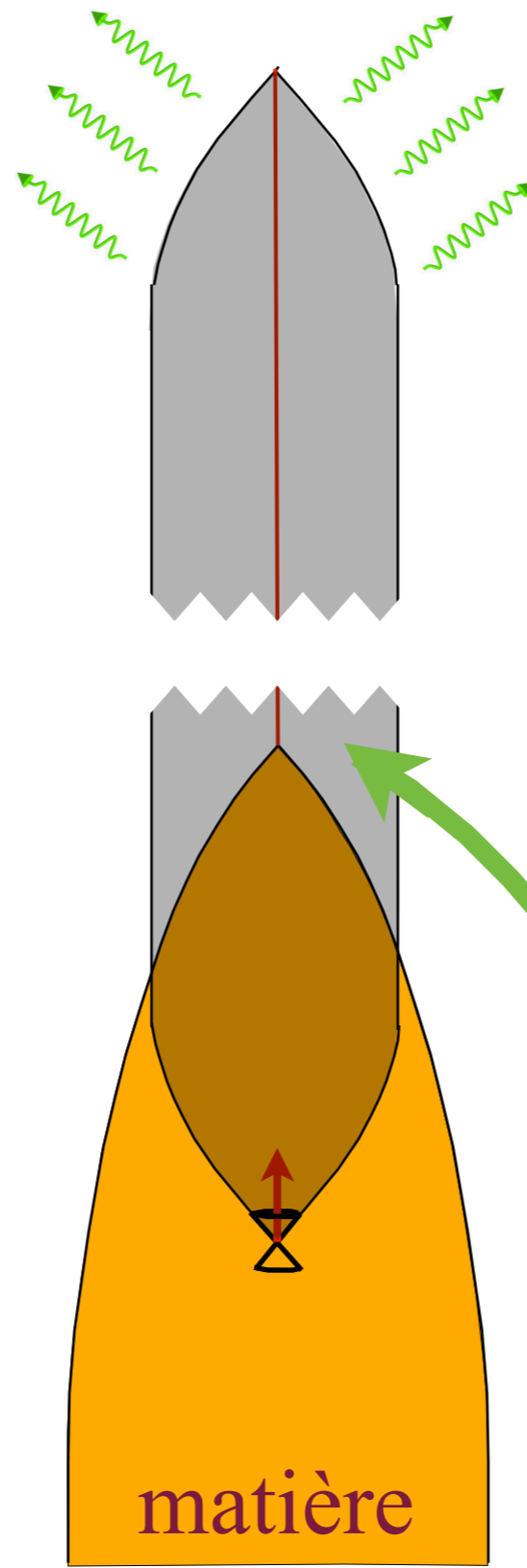
$$S = \frac{A}{4\ell_p^2}$$

Les trous noirs s'évaporent



Les trous noirs semblent détruire de l'information

Radiation thermique
ne contenant pas
d'information



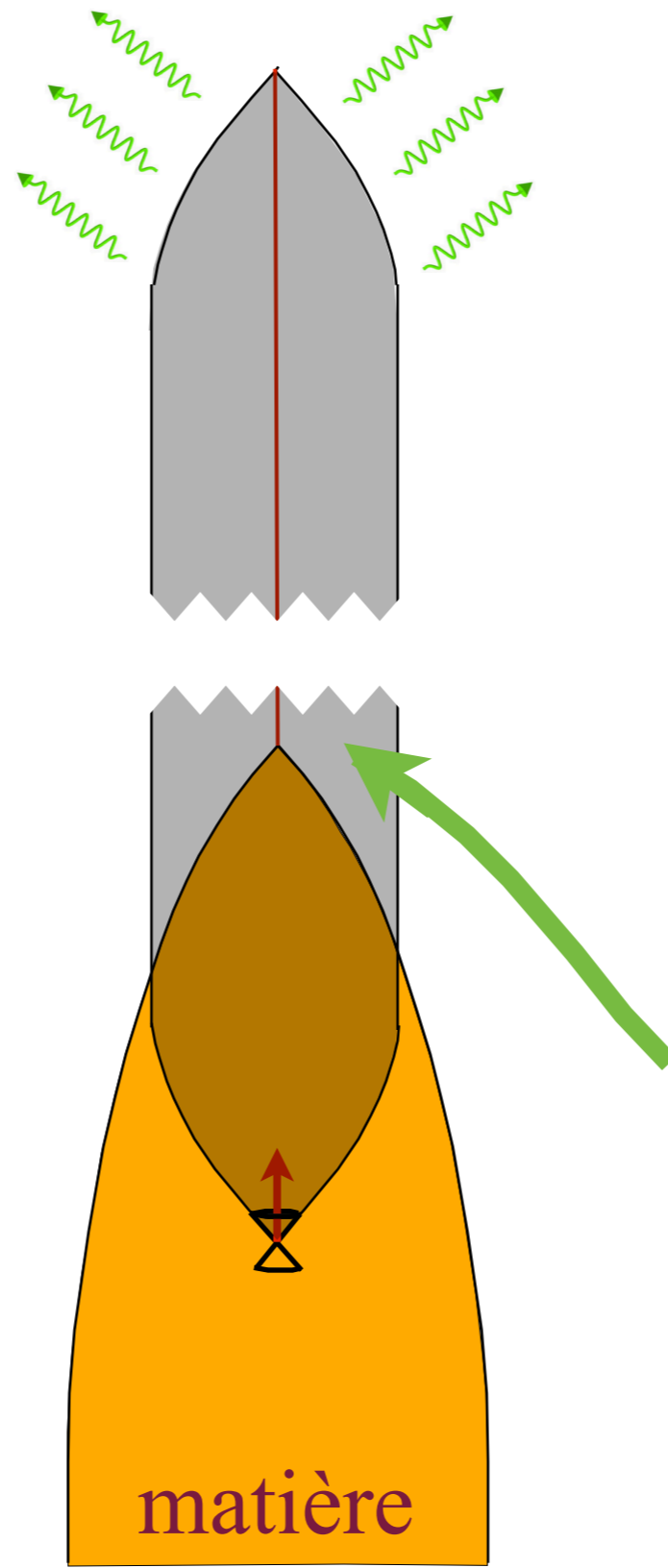
matière



Complexité initiale
dans la matière

Les trous noirs semblent détruire de l'information

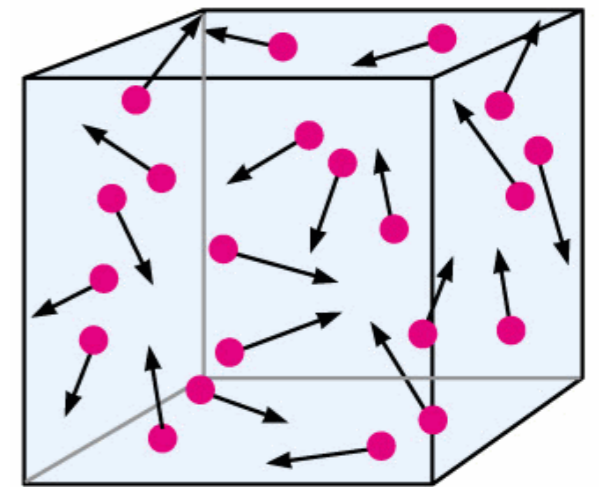
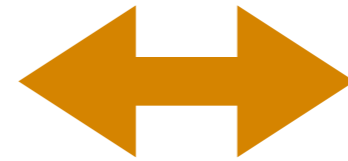
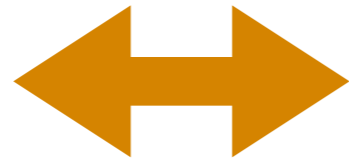
Radiation thermique
ne contenant pas
d'information



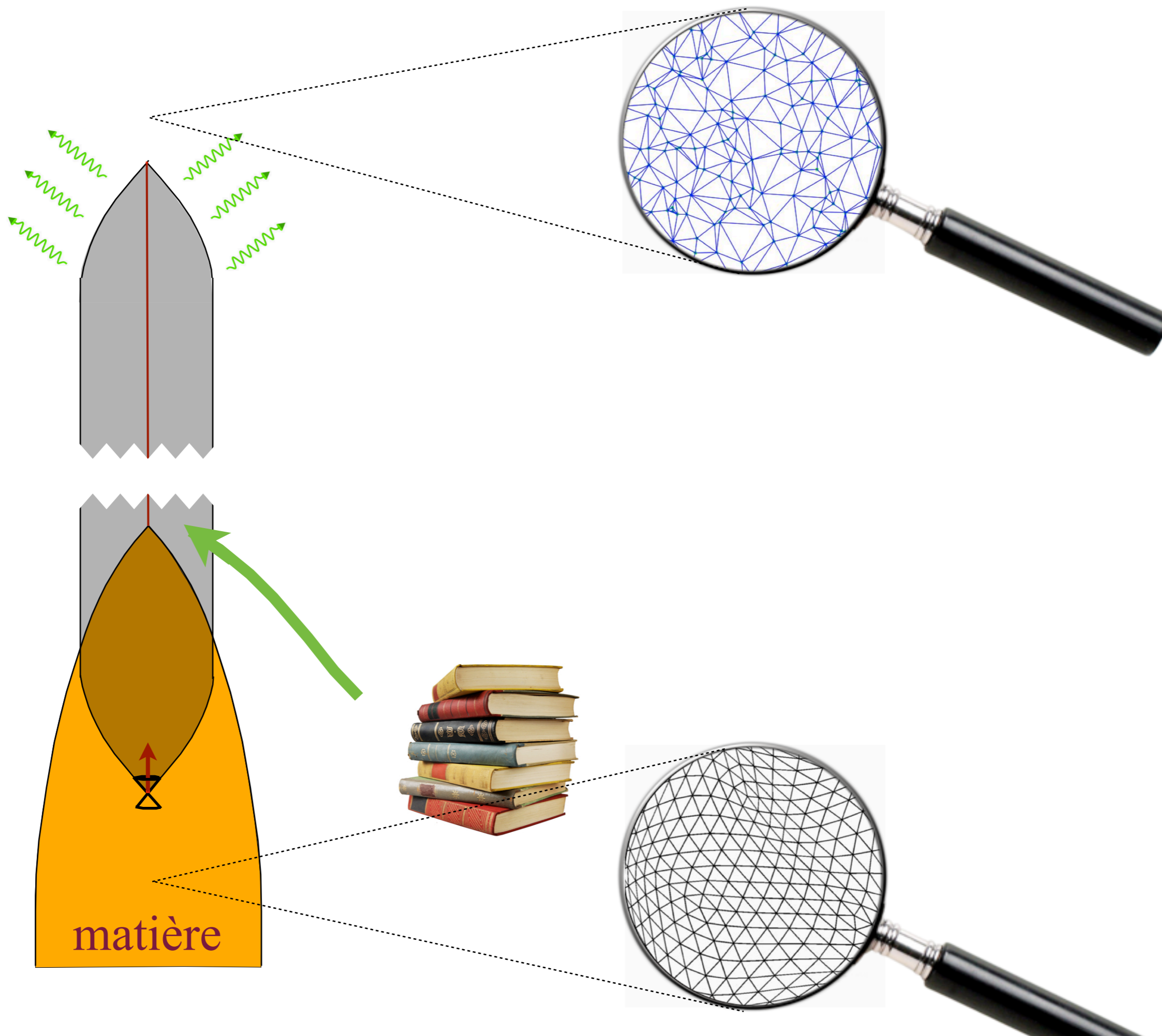
Complexité initiale
dans la matière

matière

Thermodynamique: il y a aussi des phénomènes qui semblent détruire de l'information

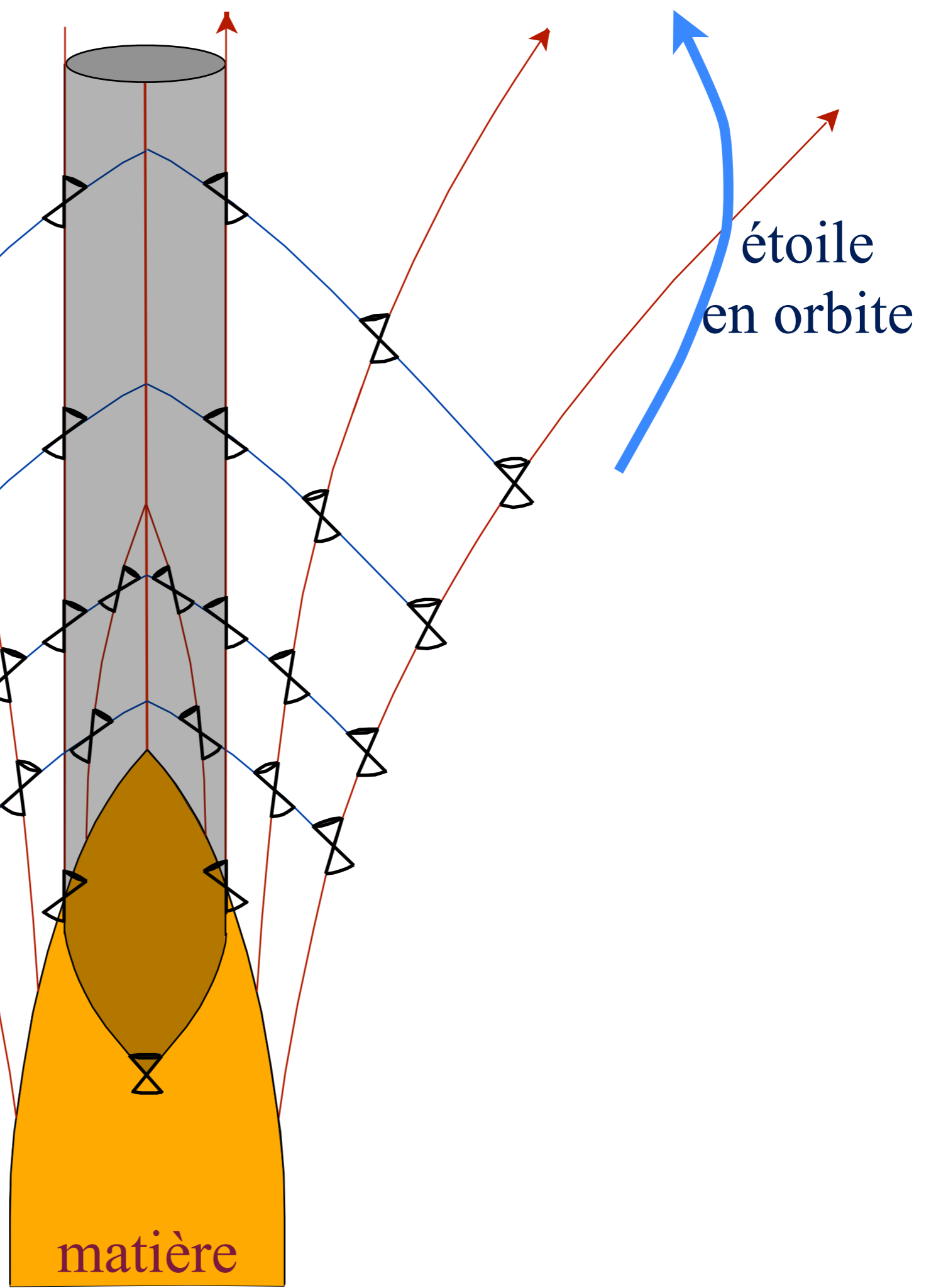


Fondamentalement l'information n'est pas perdue mais juste cachée dans le désordre moléculaire

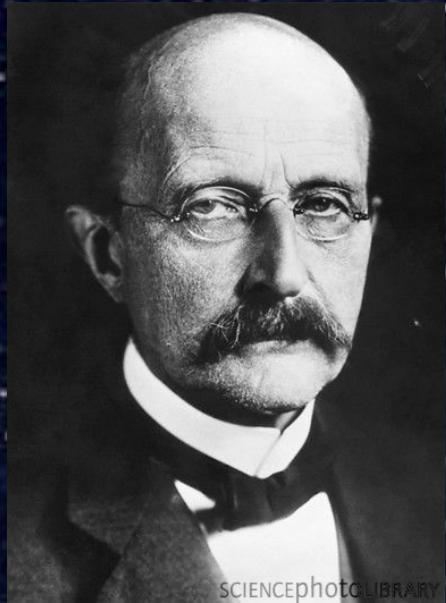


Autour de quoi
tournent les étoiles en
orbite autour d'un trou
noir ?

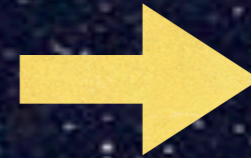
*Elles sont gravitationnellement
liées à la "mémoire de la présence"
de l'étoile qui n'est plus.*



Thermodynamique de la matière



Hypothèse Quantique : La
Lumière est faite de
particules !



Mécanique quantique

Thermodynamique des Trous Noirs

L'espace-temps est
fait d'atomes



Prédiction de la
gravitation
quantique



Indices pour
trouver un théorie
unifiant la
mécanique
quantique et la
gravitation

A deep field galaxy image showing a vast field of galaxies in various colors (white, yellow, orange, red) and shapes (spiral, elliptical, irregular). The image is overlaid with a grid of thin blue lines. A prominent bright star with a four-pointed diffraction pattern is located at the center of the grid. The text "Merci Beaucoup" is written in a blue, serif font across the middle of the image.

Merci Beaucoup