

La physique à l'échelle de Planck

David Viennot – Maître de Conférences

Institut UTINAM (CNRS) / Observatoire de Besançon / UFC

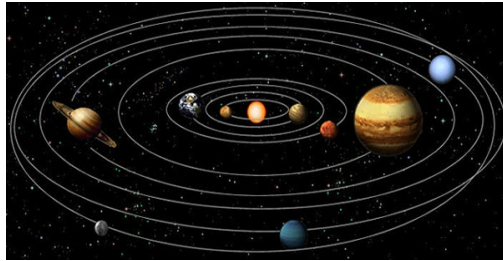
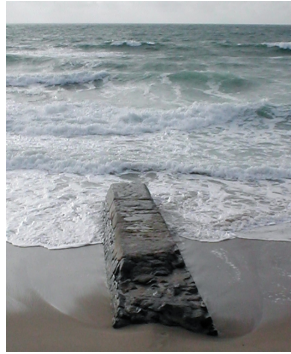
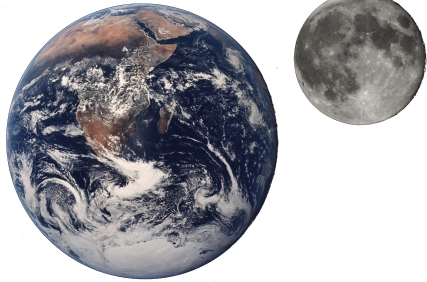




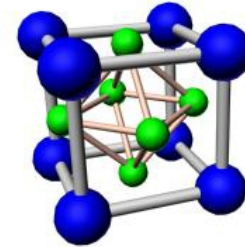
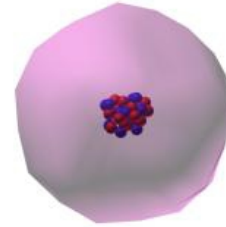
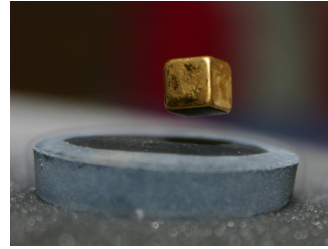
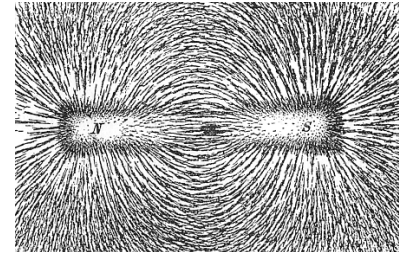
Les forces fondamentales

Les 4 interactions fondamentales

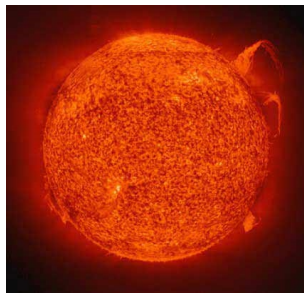
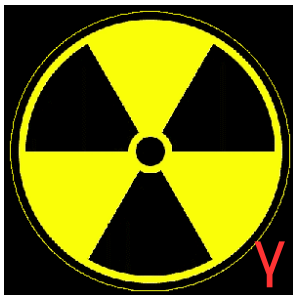
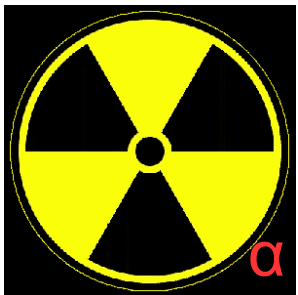
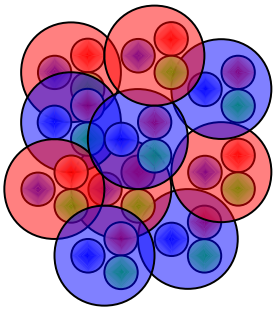
La gravitation



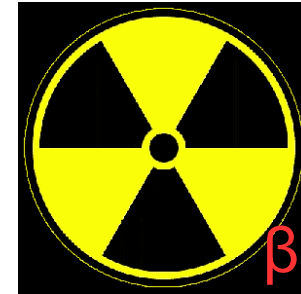
L'électromagnétisme



La force nucléaire forte



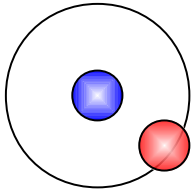
La force électro-faible



Electromagnétisme

Gravitation

atome d'Hydrogène



Charges électriques

$$p : 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$e : -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Masses

$$p : 1,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$e : 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Force d'attraction

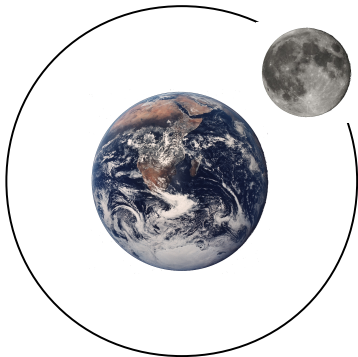
$$F_{em|e-p} = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

Force d'attraction

$$F_{g|e-p} = 3,6 \cdot 10^{-47} \text{ N}$$

$$F_{em|e-p} = 2,3 \cdot 10^{39} F_{g|e-p}$$

système Terre-Lune



Charges électriques

$$T : 0 \text{ C}$$

$$L : 0 \text{ C}$$

Masses

$$T : 5,9 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

$$L : 7,3 \cdot 10^{22} \text{ kg}$$

Force d'attraction

$$F_{em|T-L} = 0 \text{ N}$$

Force d'attraction

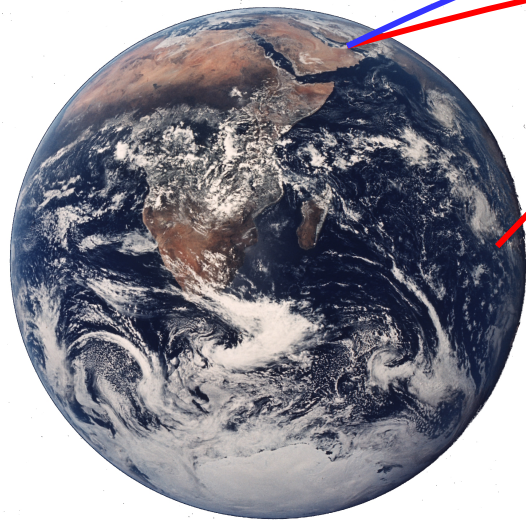
$$F_{g|T-L} = 2 \cdot 10^{20} \text{ N}$$

Interaction gravitationnelle entre particules fondamentales ???

A black hole is depicted with a dark, circular event horizon surrounded by a glowing, multi-layered accretion disk. The disk shows various colors from blue to white, indicating intense heat and light. A white rectangular box is overlaid on the center of the image, containing the text "Les trous noirs" in a bold, black, sans-serif font.

Les trous noirs

La vitesse de libération



$v < v_L$

$v > v_L$

m : masse du projectile

M : masse de la Terre

R : rayon de la Terre

Energie cinétique : $\frac{1}{2} mv^2$

Energie potentielle de pesanteur au sol : $- GmM/R$

Pour se libérer de l'attraction terrestre : $\frac{1}{2} mv^2 = GmM/R$

$$v_L = \sqrt{2GM/R}$$

$$= 11,2 \text{ km/s} = 40\,300 \text{ km/h}$$

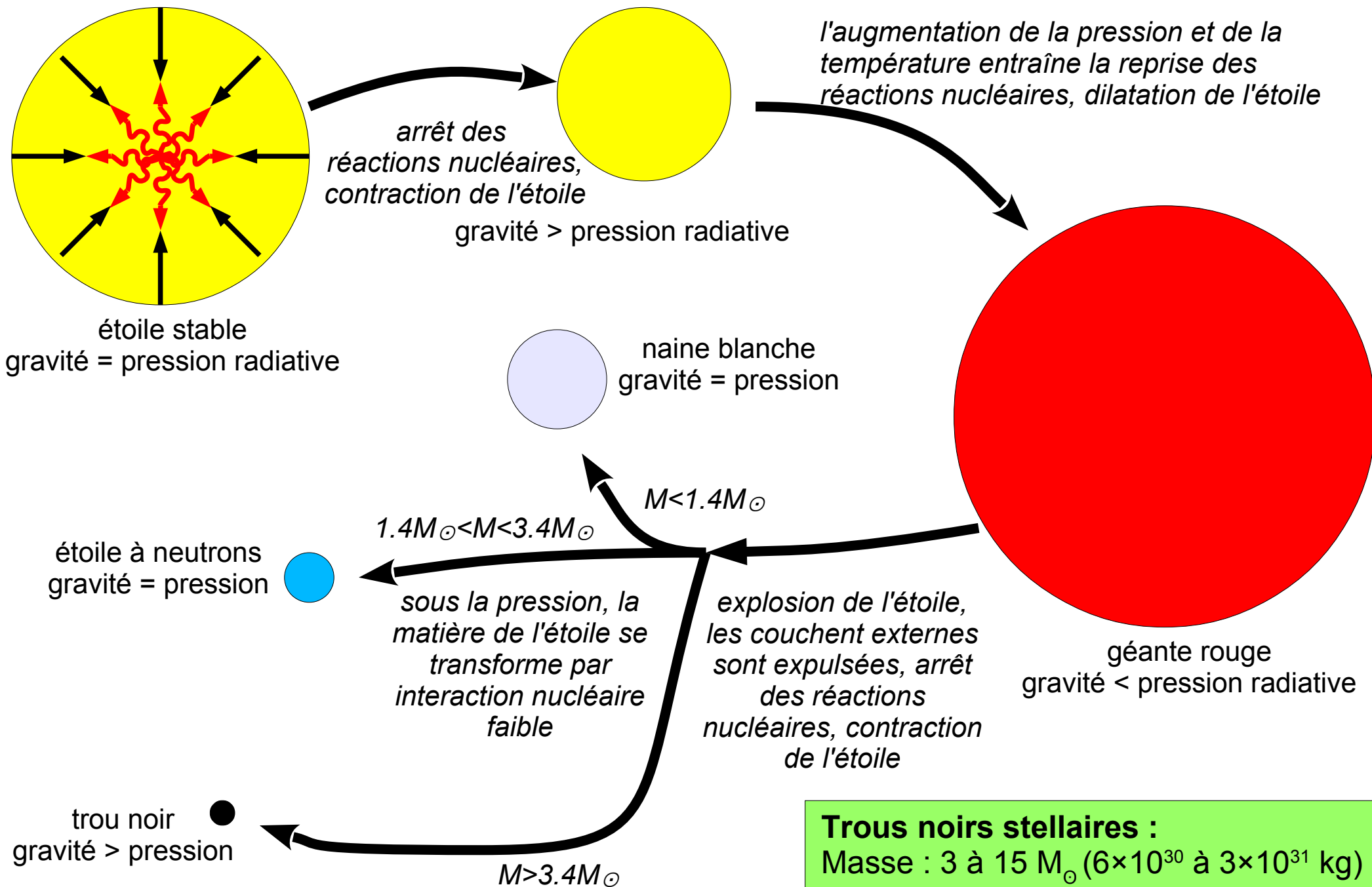
Pour un trou noir (par définition) on a :

$$M/R > c^2/(2G) \Rightarrow v_L > c = 300\,000 \text{ km/s}$$

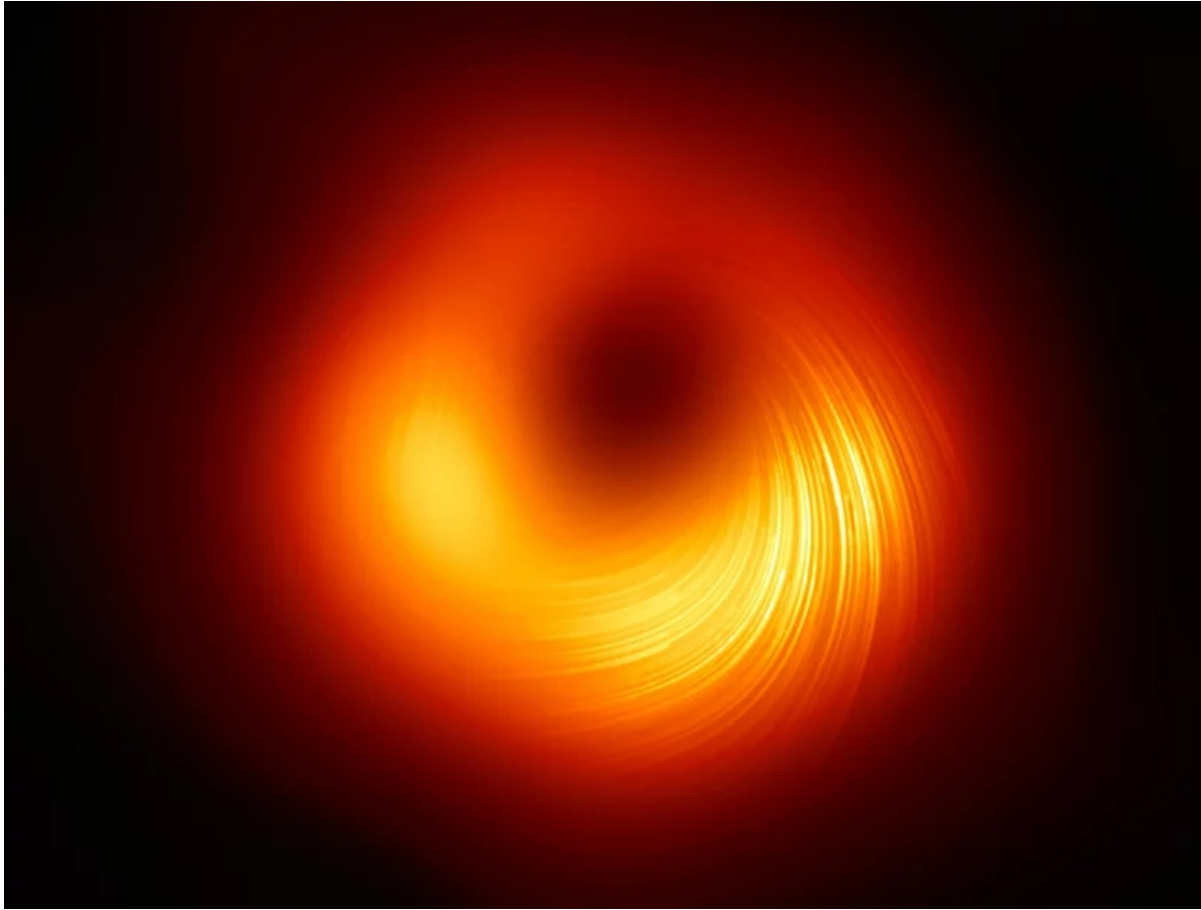
La vitesse de la lumière étant indépassable, rien ne peut se libérer de l'attraction d'un trou noir en dessous de $R_s = 3 M/M_\odot R_\odot$.



Les trous noirs stellaires : effondrements gravitationnels des étoiles



Trous noirs stellaires :
Masse : 3 à 15 M_{\odot} (6×10^{30} à 3×10^{31} kg)
Rayon : 9 km à 45 km
Densité : 2×10^9 t/cm³ à 8×10^7 t/cm³



*Trou noir supermassif au centre de la galaxie M87
(en lumière polarisée, Event Horizon Telescope, 2019)*

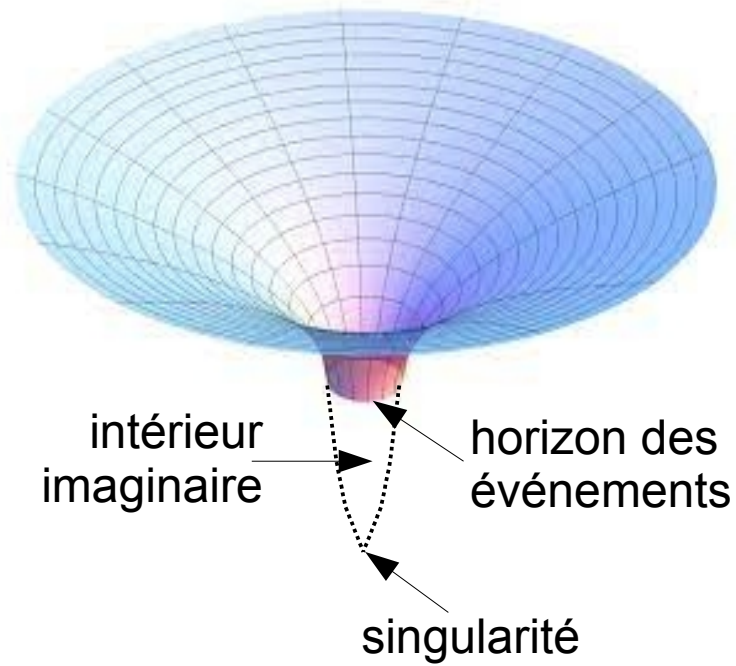
Trous noirs supermassifs:

Masse : 10^6 à $10^{11} M_{\odot}$ (2×10^{36} à 2×10^{41} kg)

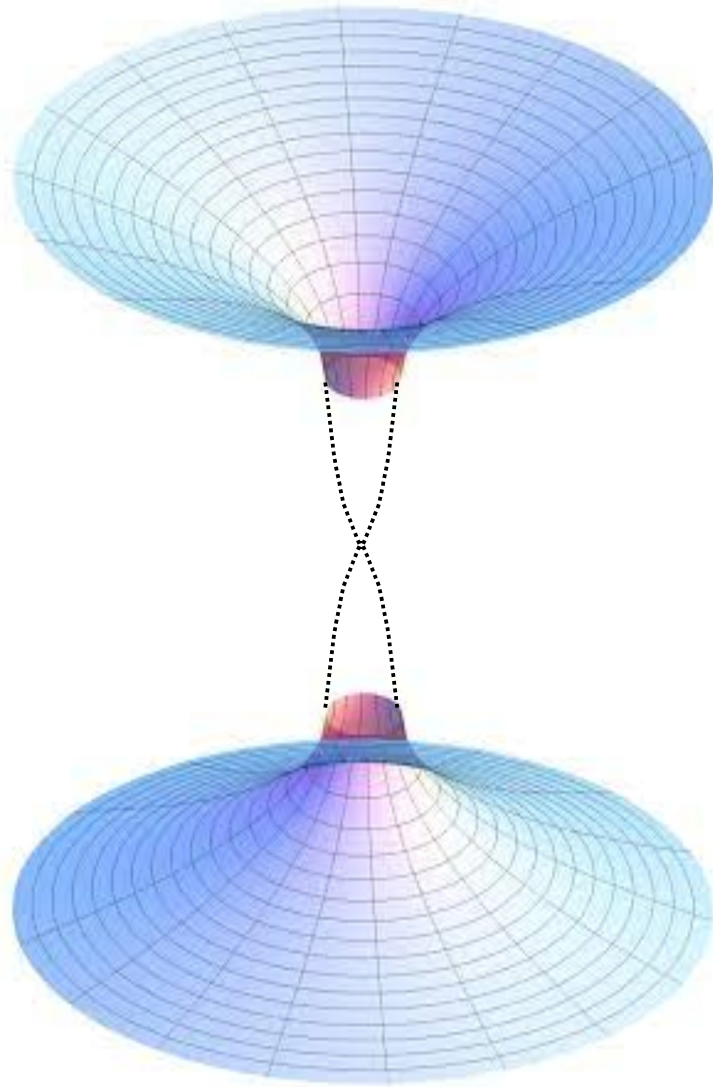
Rayon : 3×10^9 m à 3×10^{14} m (2×10^{-2} ua à 2×10^3 ua)

Densité : 18 kg/cm^3 à $1.8 \text{ } \mu\text{g/cm}^3$

Paraboloïde de Flamm (feuillelet d'espace courbe d'un trou noir)

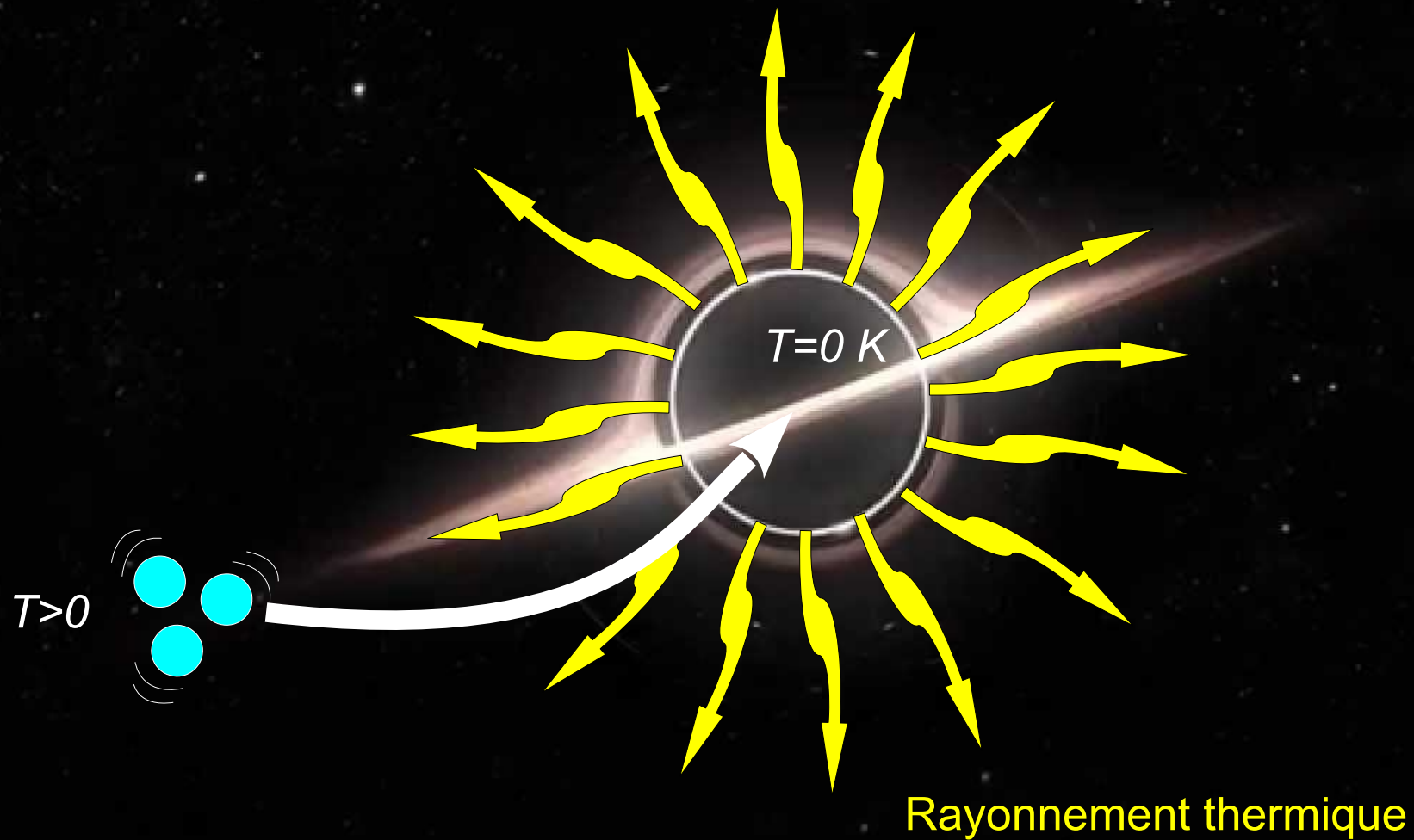


Paraboloïde de Flamm
(feuillelet d'espace courbe d'un trou noir)



(feuillelet d'espace courbe d'un trou blanc)

Le rayonnement de Hawking

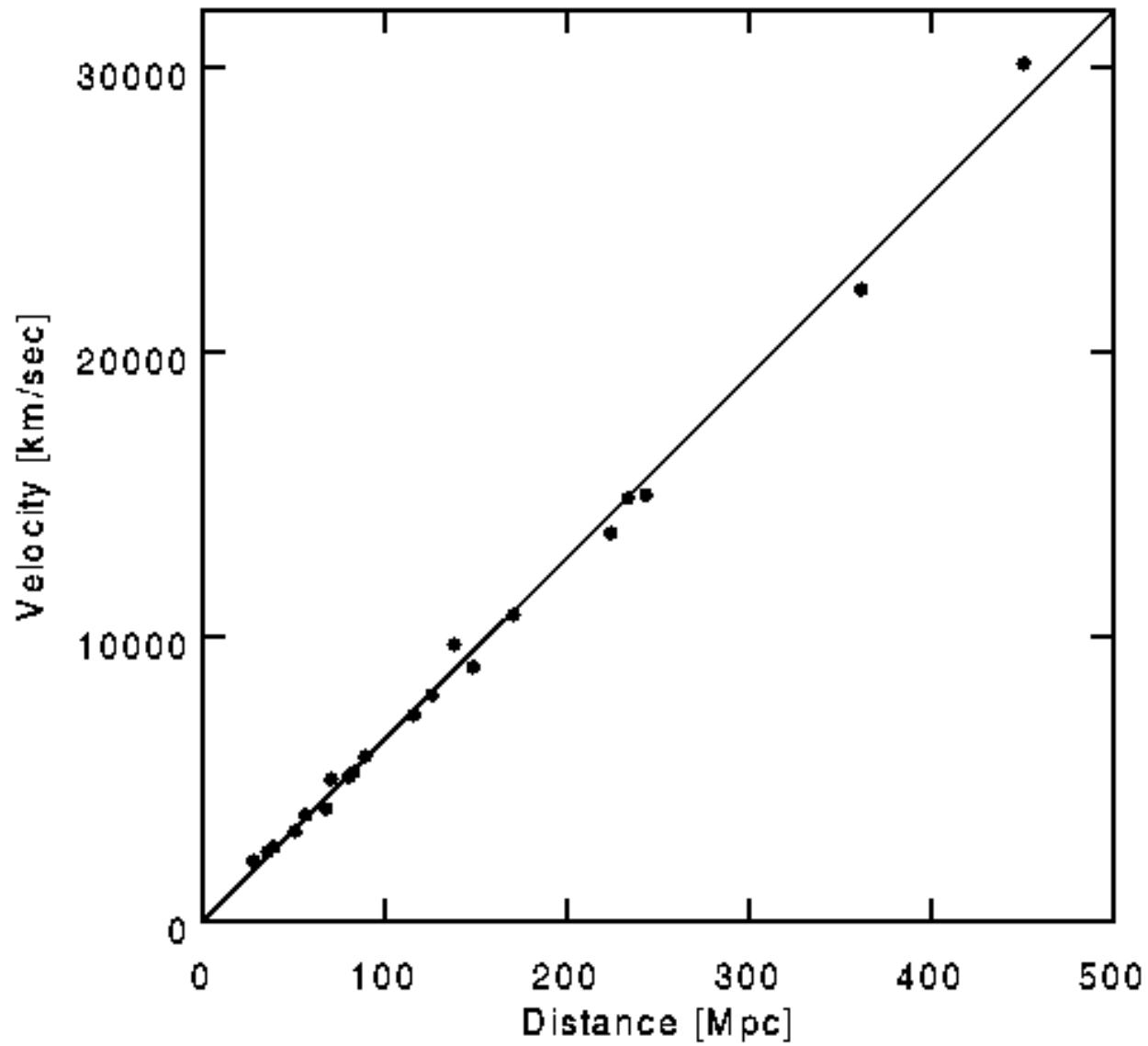


Il n'y a rien sur l'horizon.
Qu'est-ce qui s'agite pour produire un rayonnement thermique ?

A deep field of galaxies, showing a vast array of shapes and colors, including spiral, elliptical, and irregular galaxies. The background is dark, with numerous bright stars and galaxy clusters. A prominent starburst with a bright white core and blue rays is centered in the upper half. A white rectangular box is overlaid in the center, containing the text "Le Big-Bang".

Le Big-Bang

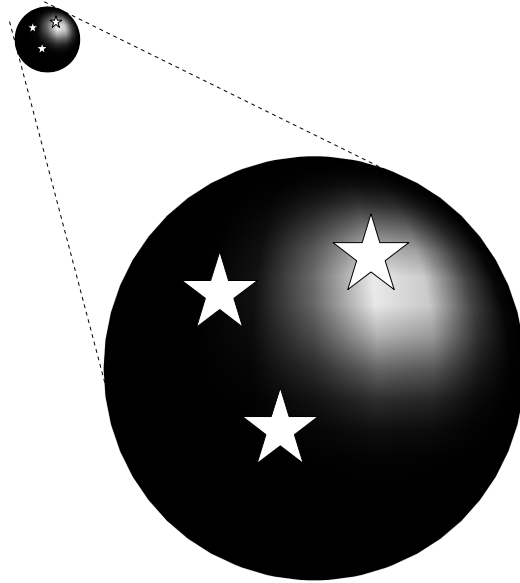
La loi de Hubble



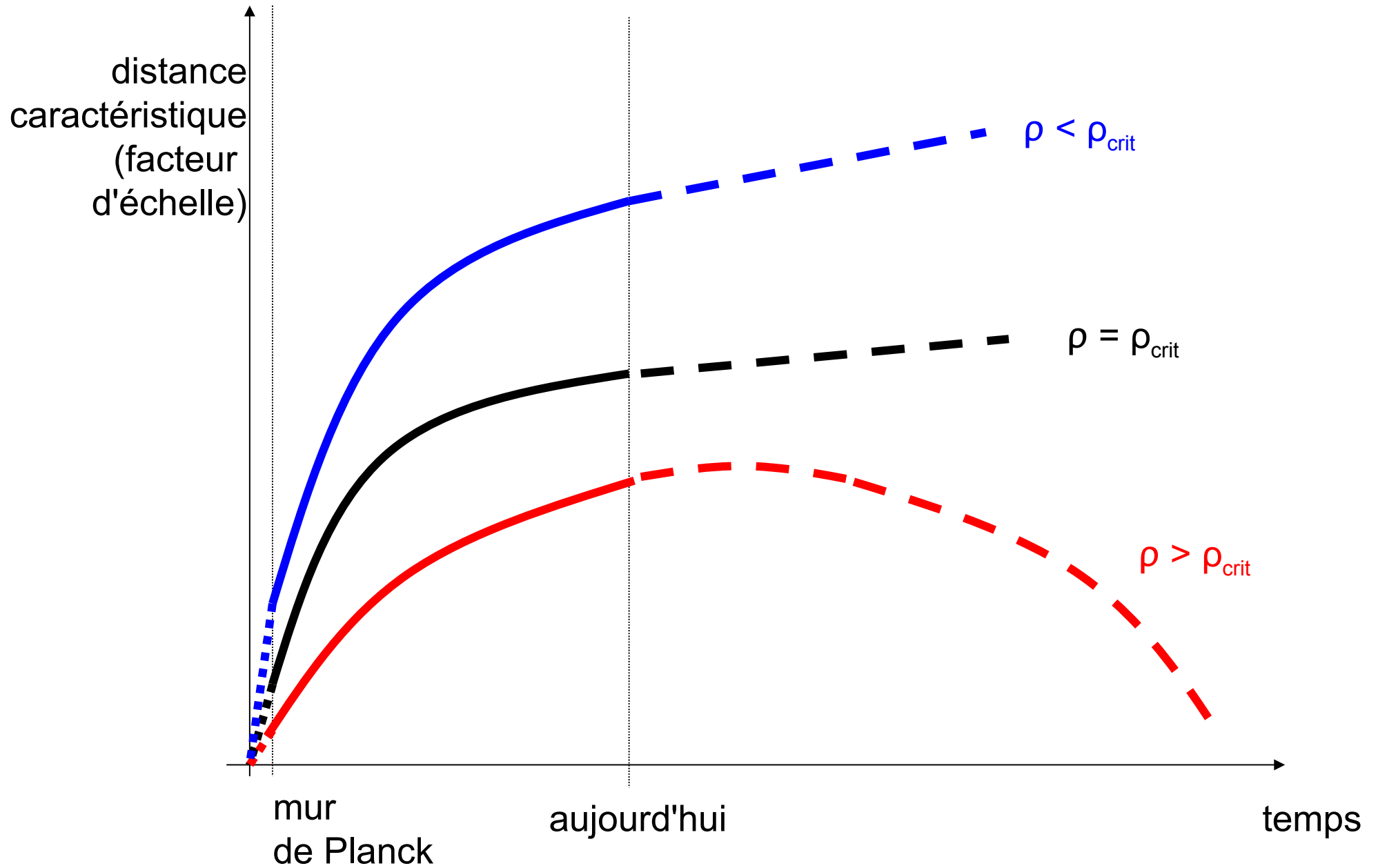
La loi de Hubble :

$$v = Hd$$

La loi de Hubble



Le modèle de Friedmann-Lemaître

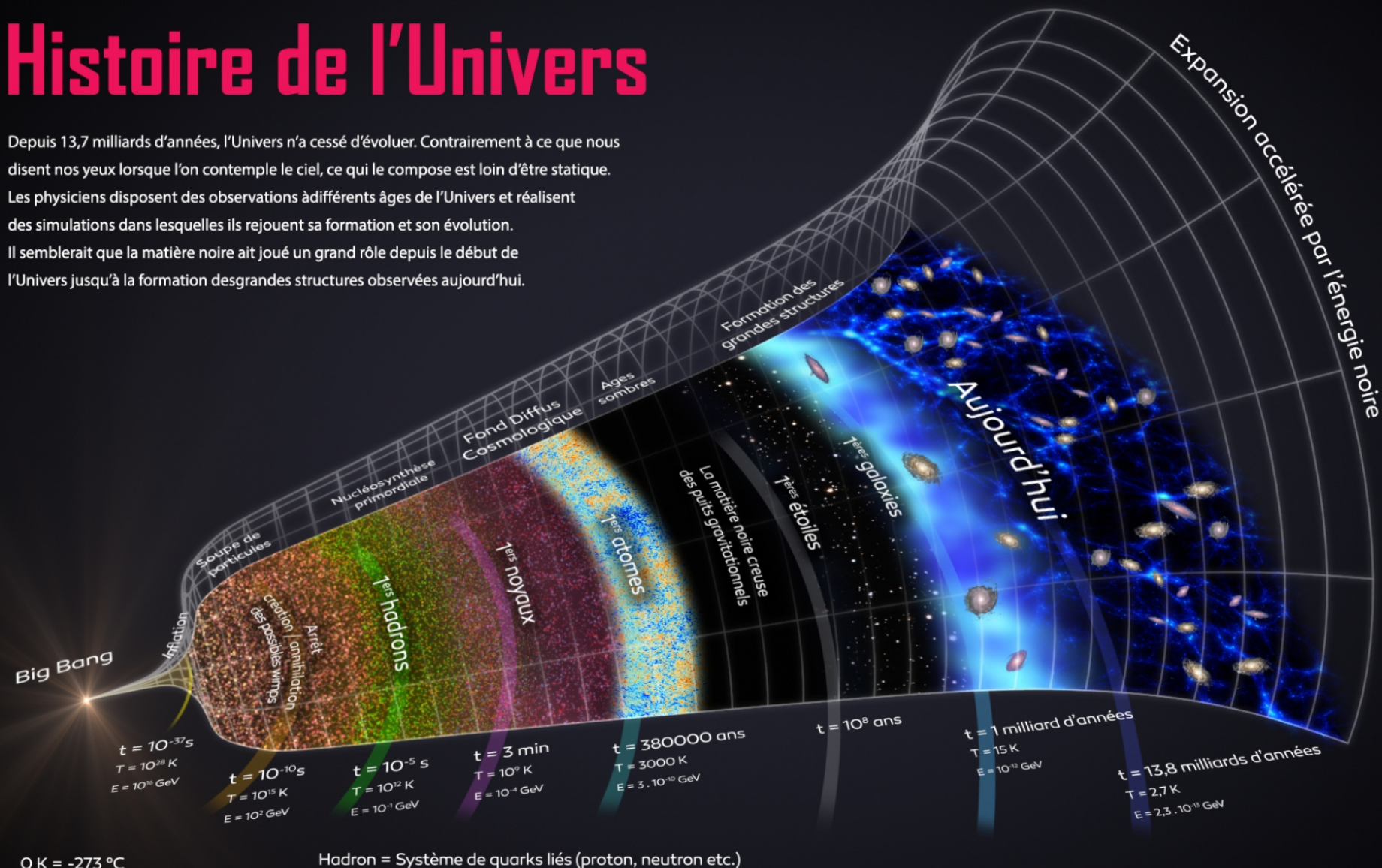


Histoire de l'Univers

Depuis 13,7 milliards d'années, l'Univers n'a cessé d'évoluer. Contrairement à ce que nous disent nos yeux lorsque l'on contemple le ciel, ce qui le compose est loin d'être statique.

Les physiciens disposent des observations à différents âges de l'Univers et réalisent des simulations dans lesquelles ils rejouent sa formation et son évolution.

Il semblerait que la matière noire ait joué un grand rôle depuis le début de l'Univers jusqu'à la formation des grandes structures observées aujourd'hui.



0 K = -273 °C

Hadron = Système de quarks liés (proton, neutron etc.)



L'échelle de Planck

$$\ell_P = \sqrt{(\hbar G/c^3)} = 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$$

$$t_P = \ell_P/c = 5,4 \times 10^{-44} \text{ s}$$

$$m_P = \sqrt{(\hbar c/G)} = 22 \text{ } \mu\text{g}$$

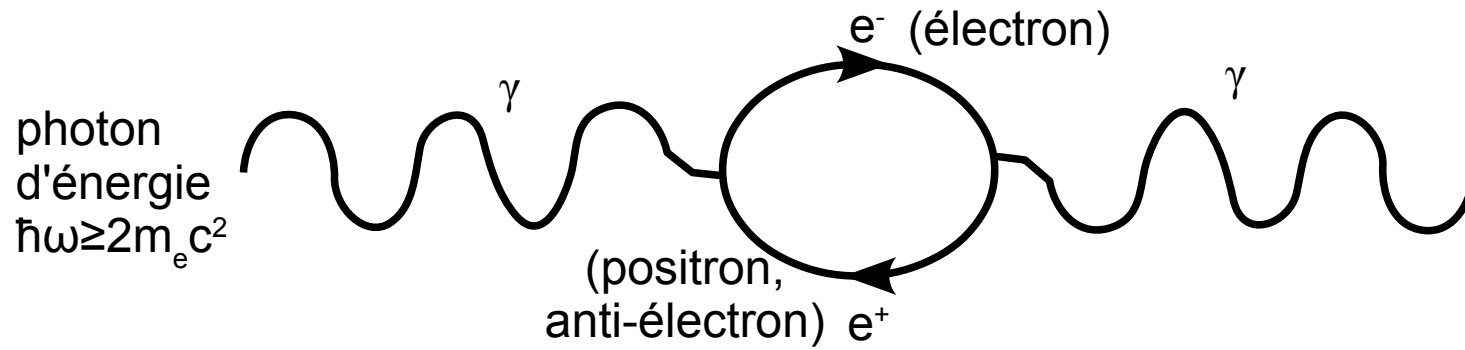
→ échelle de longueur où l'interaction gravitationnelle entre particules fondamentales devient non-négligeable.

→ échelles de longueur et de temps de « l'agitation thermique » de l'horizon des événements d'un trou noir.

→ échelle de temps de l'inflation cosmique.

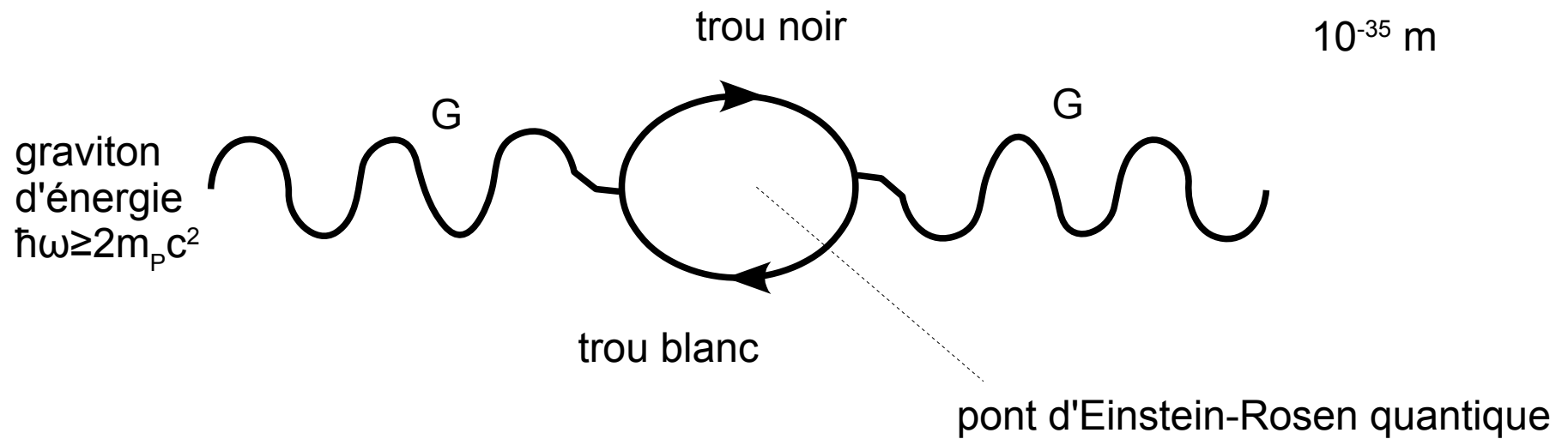
Échelle subatomique

10^{-18} m à 10^{-10} m



Échelle de Planck

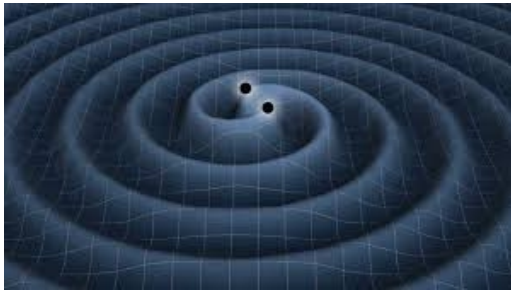
10^{-35} m



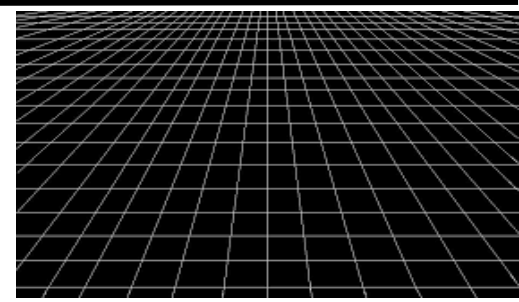
Relativité Générale

Mécanique Quantique

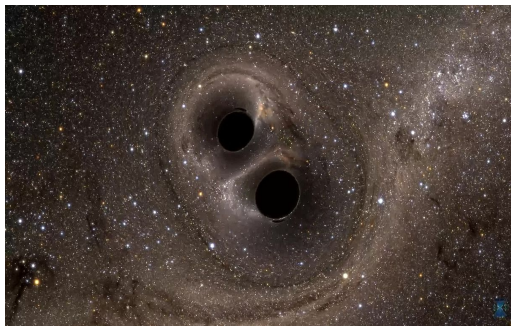
Indépendante d'arrière-fond (espace-temps dynamique)



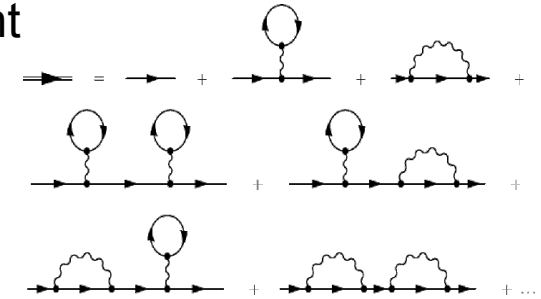
Dépendante d'un espace-temps plat en arrière-fond



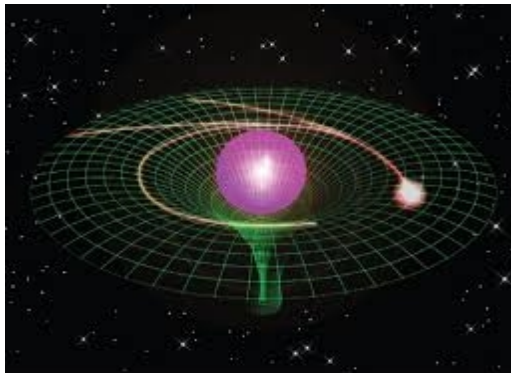
Fortement non-perturbative



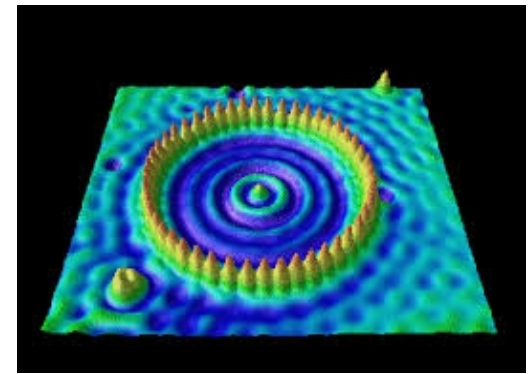
Fondamentalement perturbative renormalisable



Géométrie



Non-locale (ondulatoire)



Admet un principe d'équivalence :
Gravité \Leftrightarrow Inertie
 \Leftrightarrow Géométrie



Les interactions sont des théories de jauge : Forces = échanges de particules

