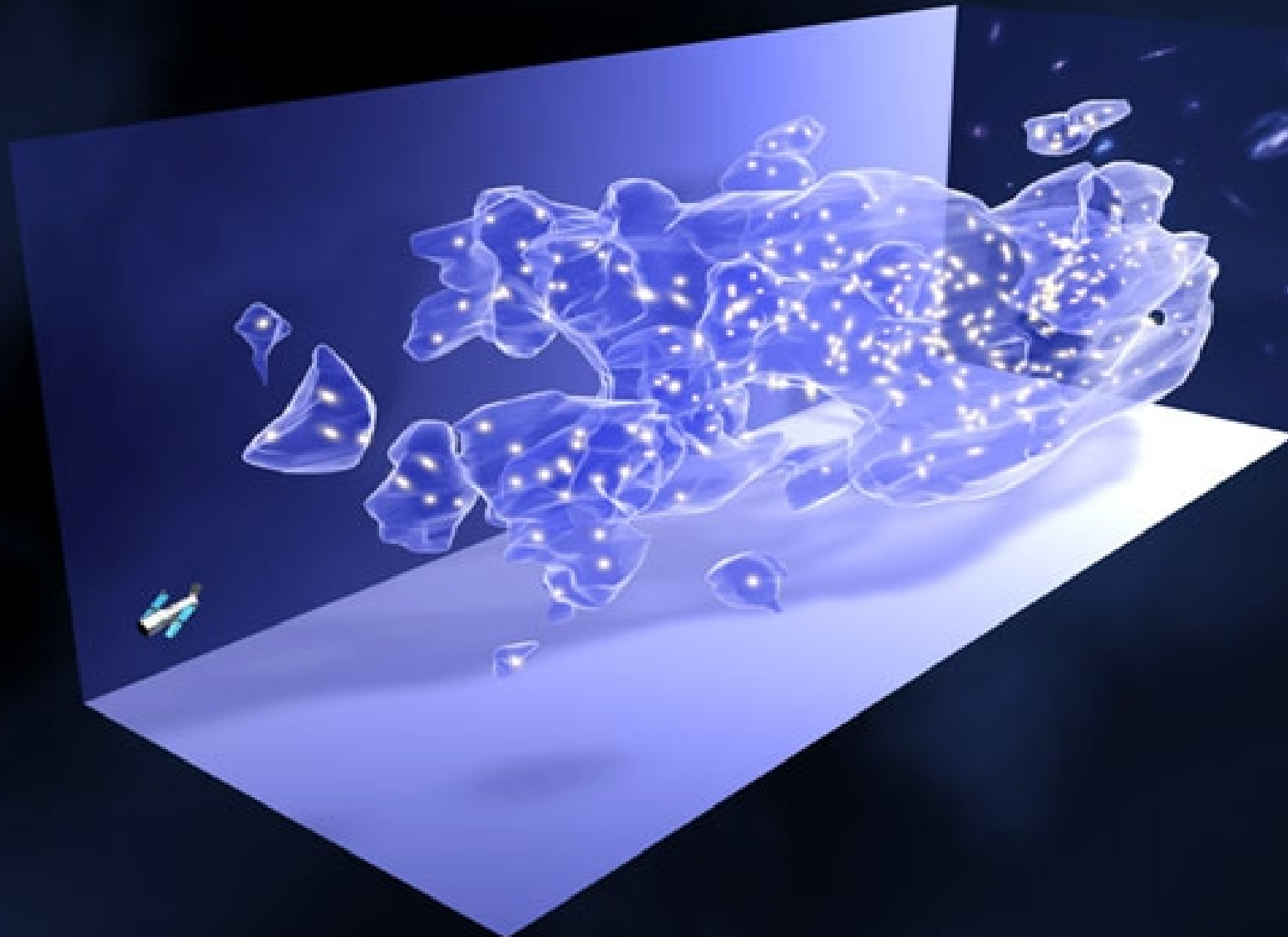


Matière et énergie sombres

Le côté obscur de l'Univers

David Viennot - Maître de Conférences

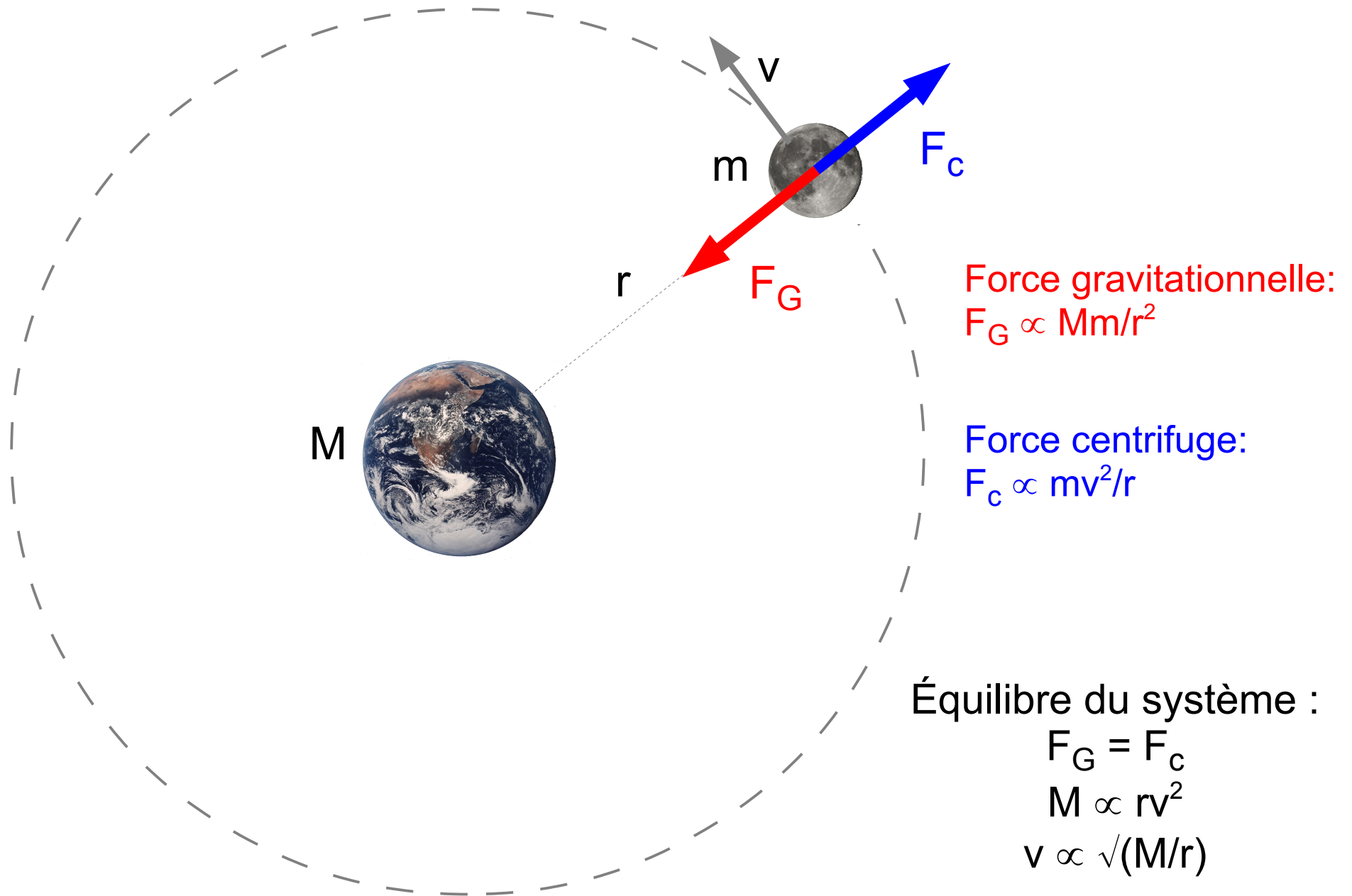
Institut UTINAM (CNRS) / Observatoire de Besançon / UFC



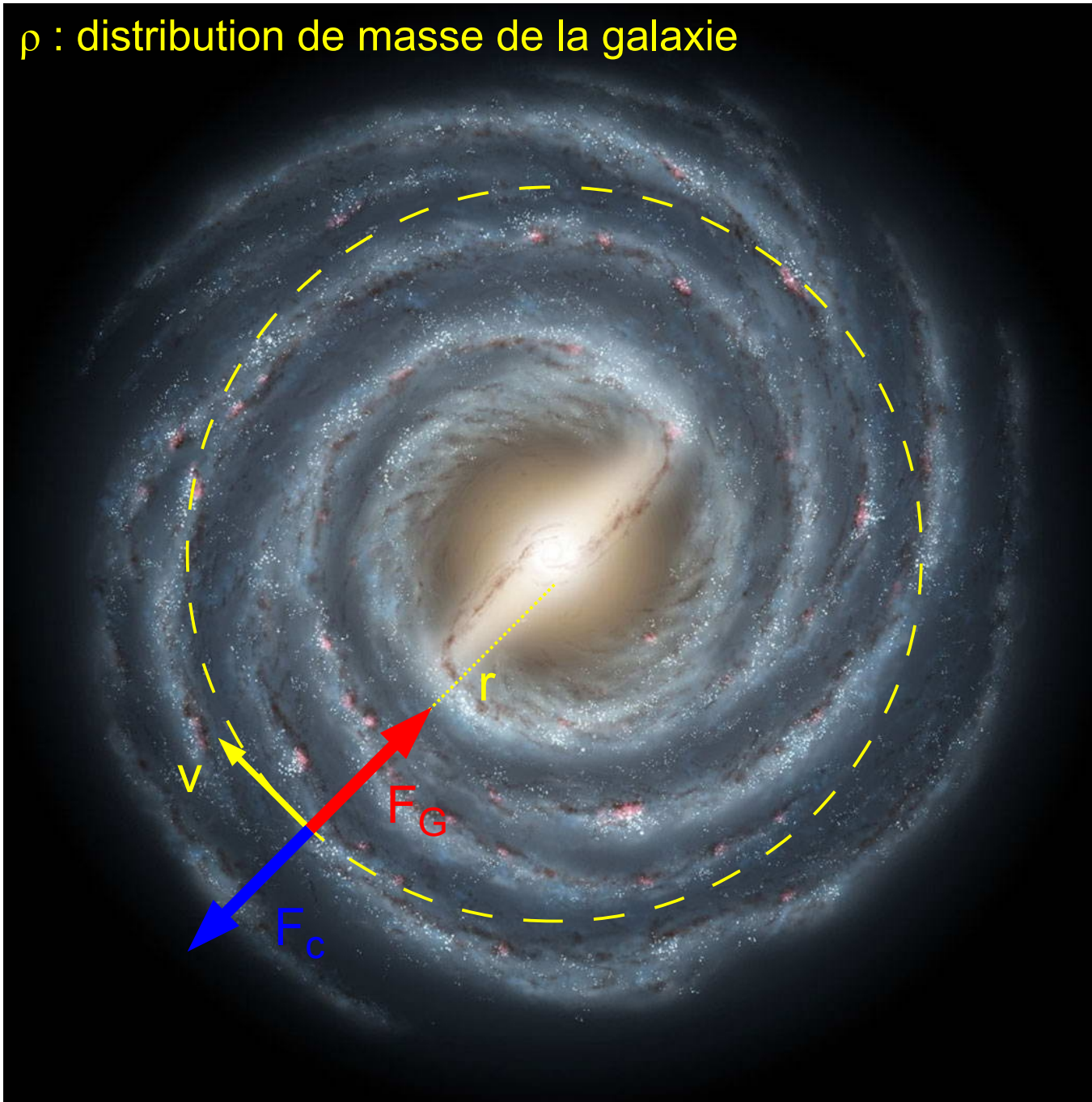
A visualization of the cosmic web, showing a complex network of glowing cyan filaments and nodes against a black background. The filaments represent the large-scale structure of the universe, with nodes indicating regions of high density.

Le côté obscur de la matière

L'équilibre force gravitationnelle vs force centrifuge



ρ : distribution de masse de la galaxie



Équilibre du système :
 $v = f(r, \rho)$

Observations de la
matière lumineuse

$\rightarrow \rho_{\text{obs}}$

$$v_{\text{th}} = f(r, \rho_{\text{obs}})$$

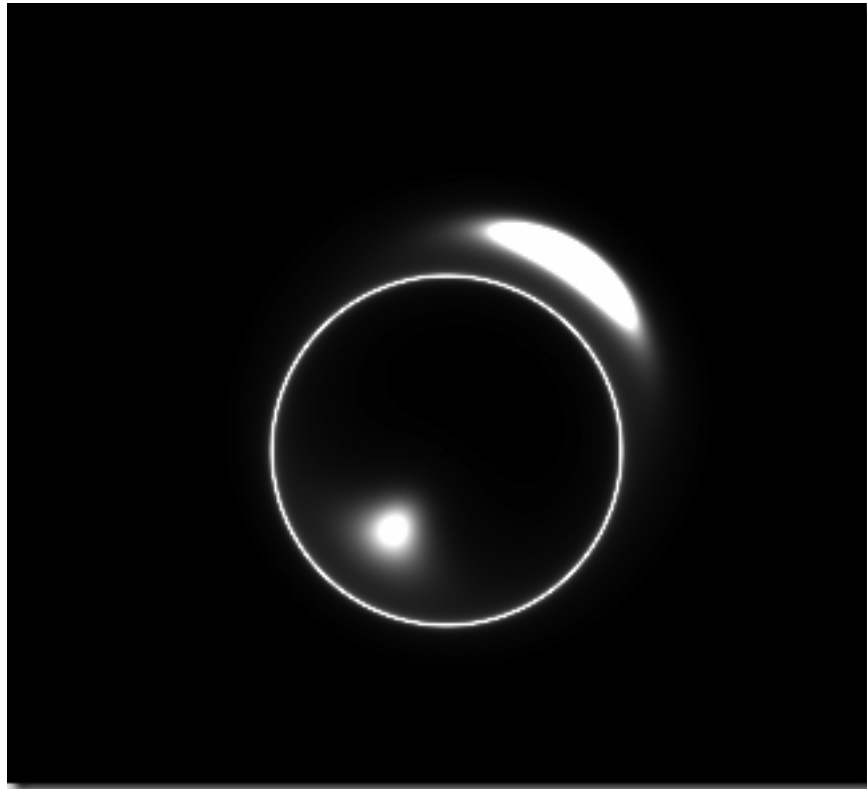
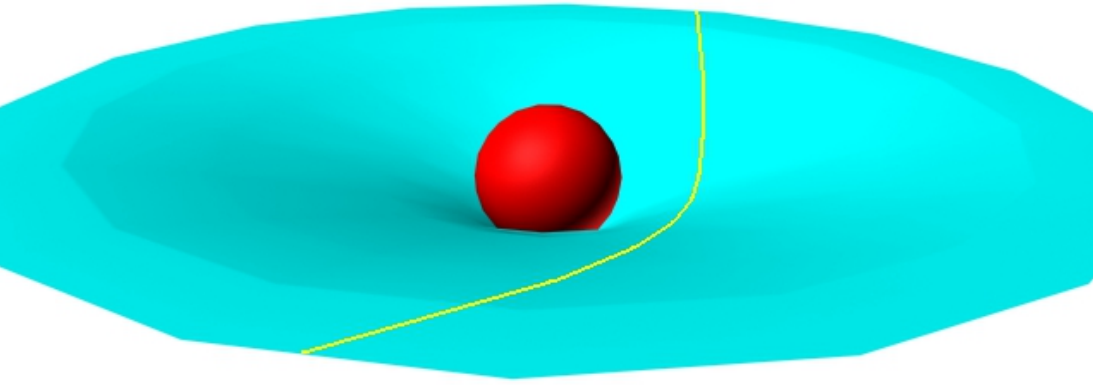
Observations de l'effet
Doppler $\rightarrow v_{\text{obs}}$

$$v_{\text{obs}} > v_{\text{th}}$$

$$\rightarrow \rho_{\text{réel}} > \rho_{\text{obs}}$$

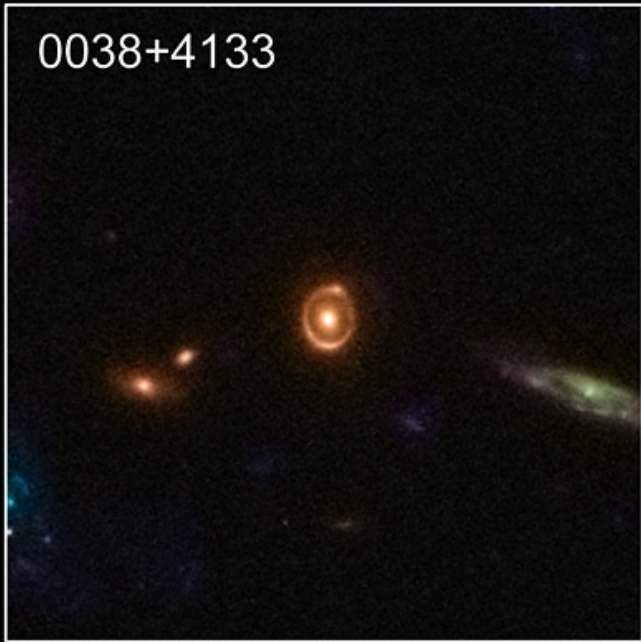
$$\rightarrow \rho_{\text{réel}} = \rho_{\text{obs}} + \rho_{\text{dark}}$$

Les lentilles gravitationnelles

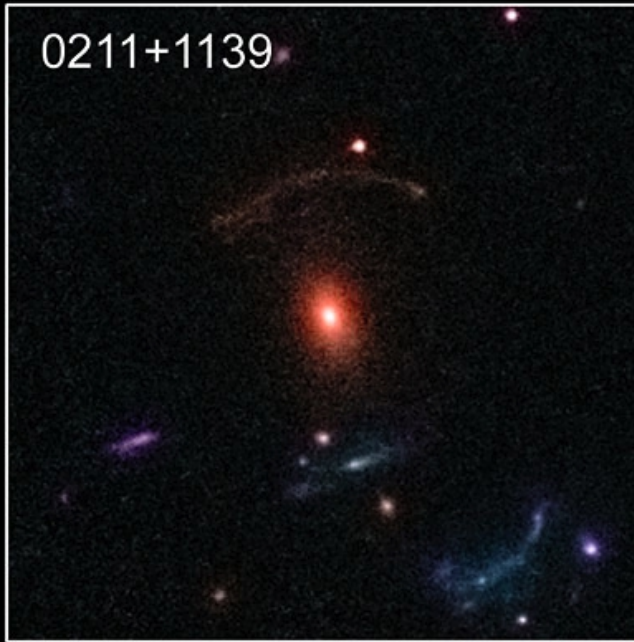


Les lentilles gravitationnelles

0038+4133



0211+1139



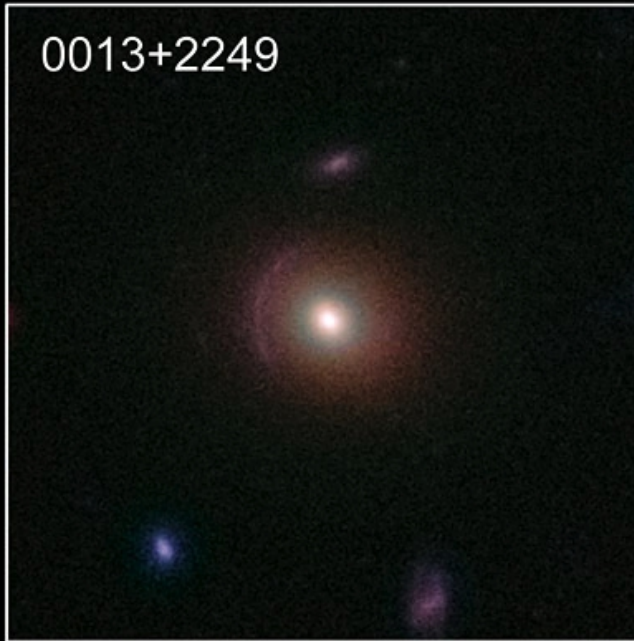
5921+0638



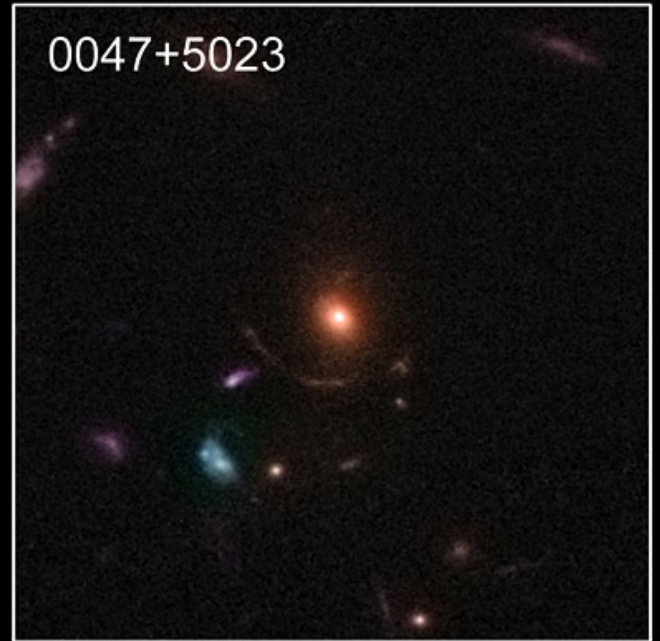
0018+3845



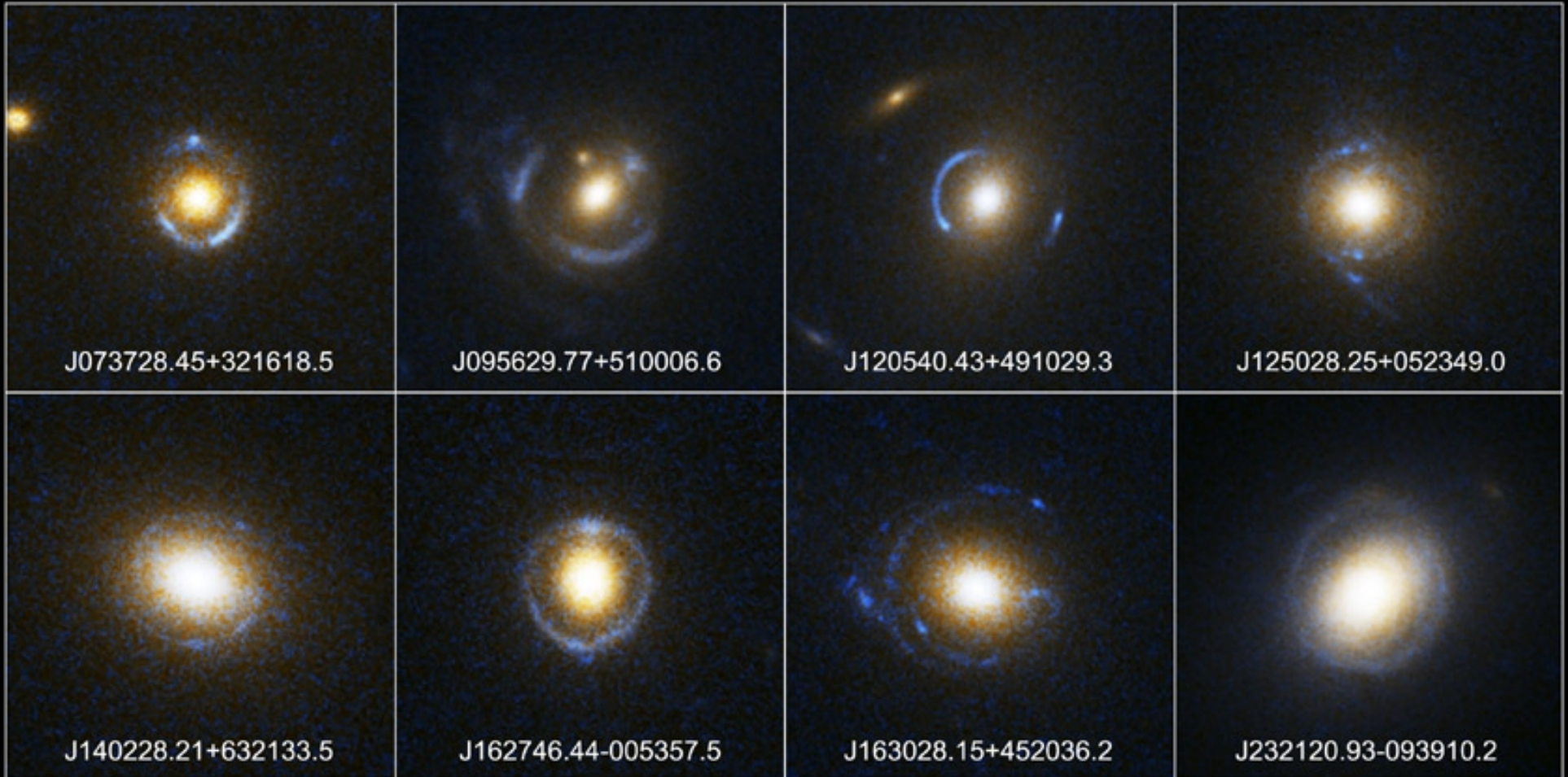
0013+2249



0047+5023



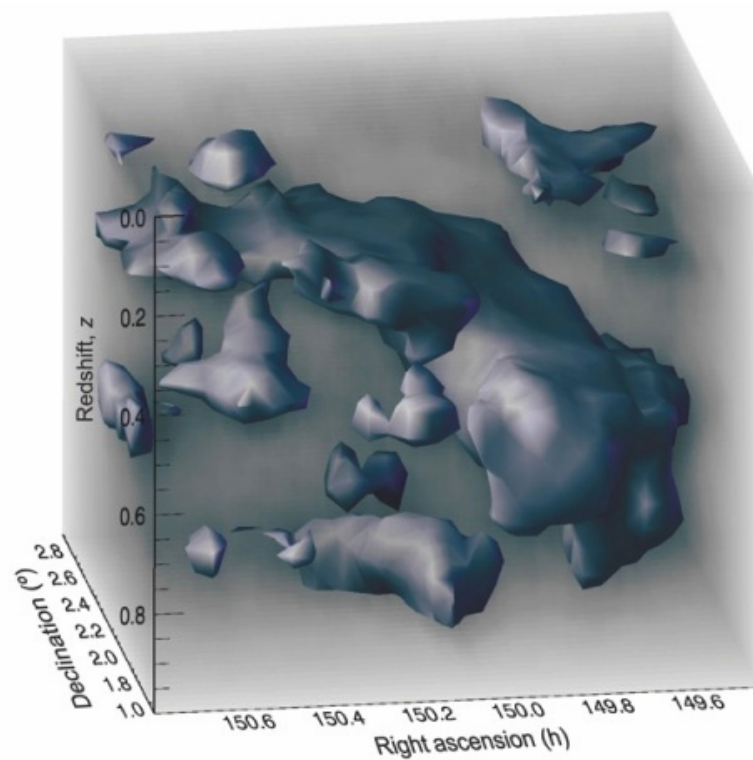
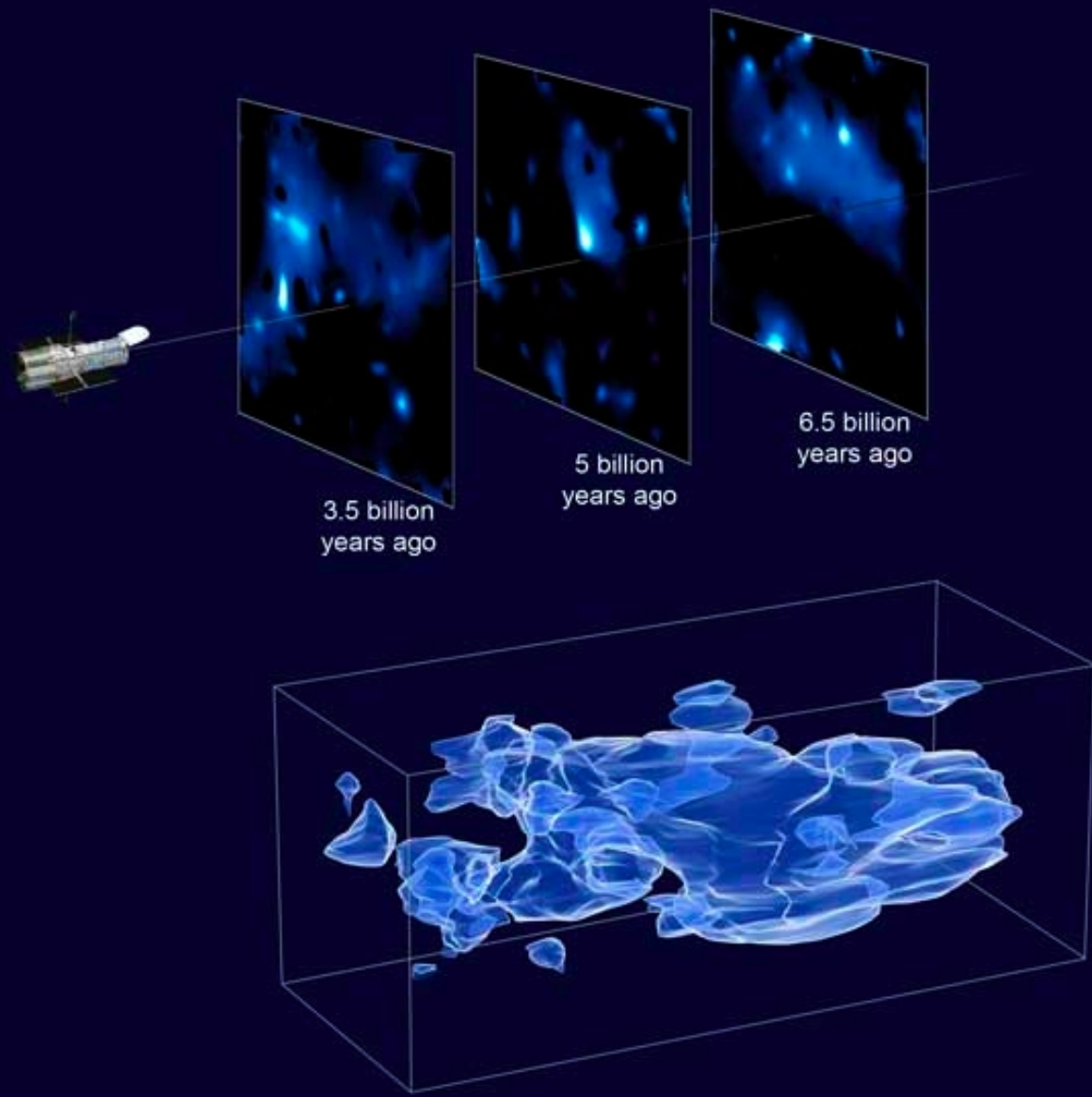
Les lentilles gravitationnelles



Einstein Ring Gravitational Lenses

Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

Cartographie 3D de la matière noire par effets de lentilles gravitationnelles



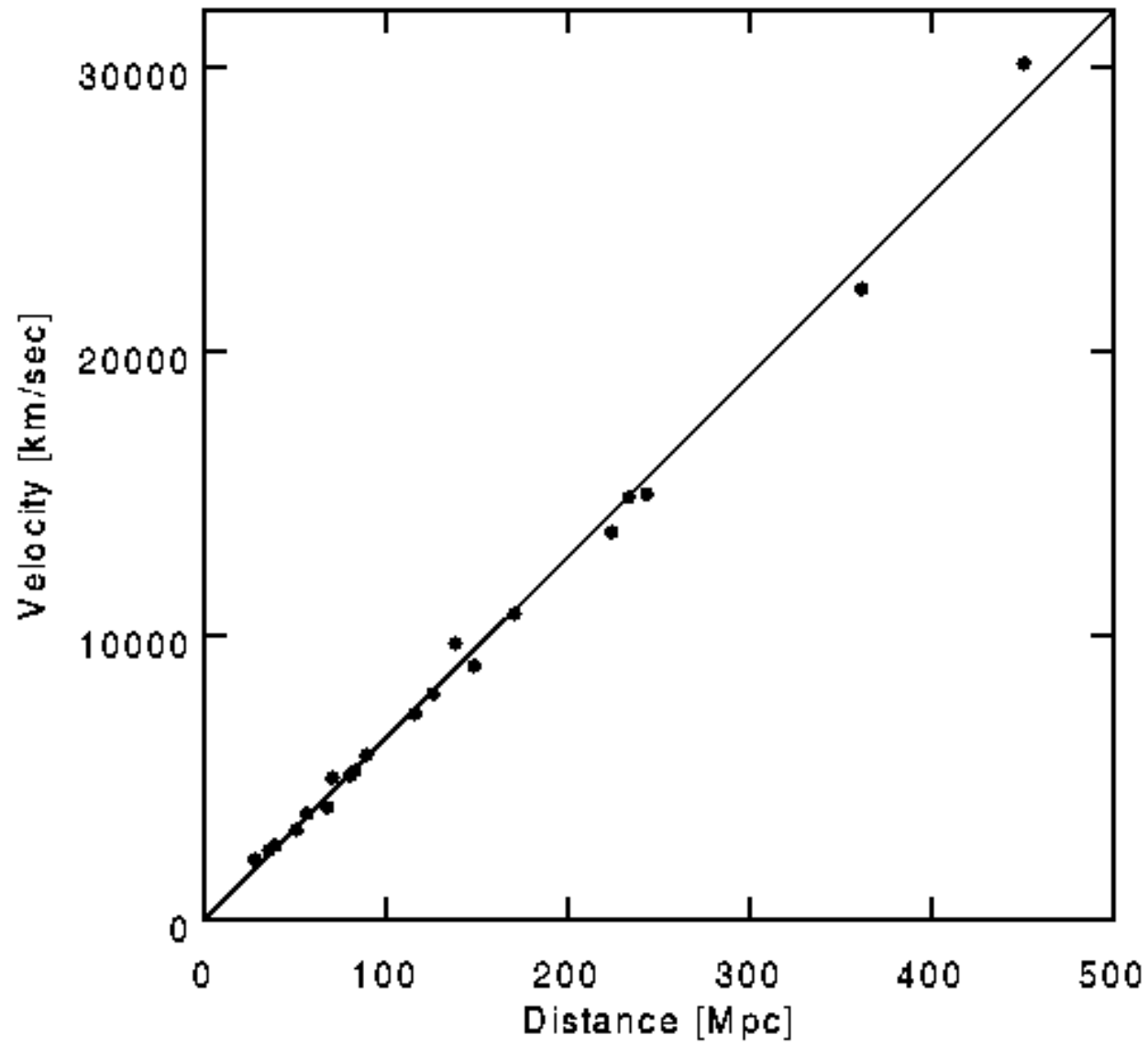
- **Trous noirs massifs :**
trous noirs stellaires ($3-15 M_{\odot}$) < trous noirs massifs < trous noirs supermassifs ($10^6-10^{11} M_{\odot}$)
théoriquement pas assez nombreux, mais...
- **Neutrinos stériles, WIMPs :**
symétrisation de la physique des particules (neutrinos droits / supersymétrie)
jamais découverts en physique des particules expérimentales à ce jour.
- **Théorie MoND (Modified Newtonian Dynamics)**
modification de la théorie de Newton aux accélérations très faibles :
 $m a = F \rightarrow m f(a) a = F$ avec $f(a) = 1$ si $a > a_0$ et f croissante de 0 à 1 sur $[0, a_0]$
 $a_0 = 1,2 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-2}$ (ajusté aux courbes de rotation galactique)

pas de preuve expérimentale à ce jour.

The background of the slide is a Cosmic Microwave Background (CMB) radiation map, showing a complex pattern of blue and white spots against a dark blue background, representing the distribution of energy in the early universe.

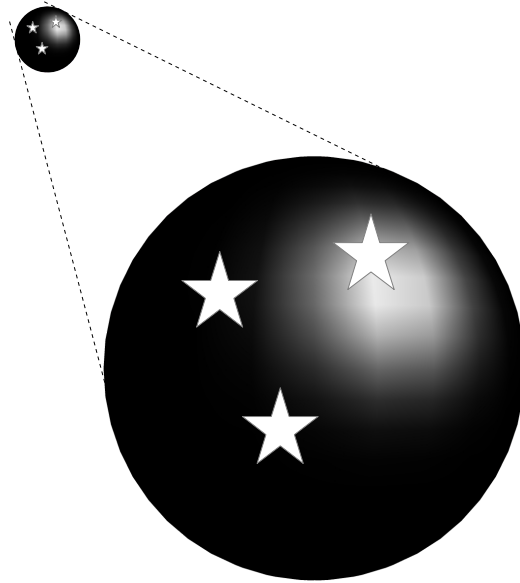
Le côté obscur de l'énergie

La loi de Hubble



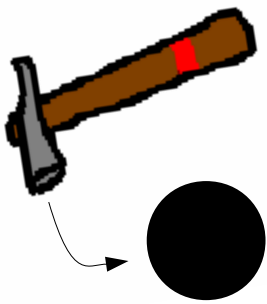
La loi de
Hubble :
 $v = Hd$

La loi de Hubble



- $t=0 \Rightarrow$ le big-bang "fournit" l'énergie pour démarrer le mouvement d'expansion ???

- $t=0 \Rightarrow$ on "fournit" l'énergie pour démarrer le mouvement.

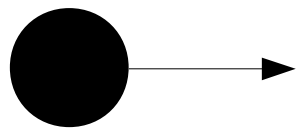
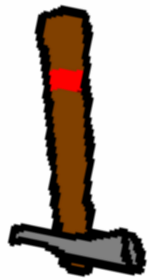


$t=0 \Rightarrow$ le big-bang "fournit" l'énergie pour démarrer le mouvement d'expansion ???

- si l'Univers avait été vide \Rightarrow expansion uniforme à vitesse constante.

$t=0 \Rightarrow$ on "fournit" l'énergie pour démarrer le mouvement.

- dans le vide \Rightarrow mouvement rectiligne uniforme



La gravité contre l'expansion

$t=0 \Rightarrow$ le big-bang "fournit" l'énergie pour démarrer le mouvement d'expansion ???

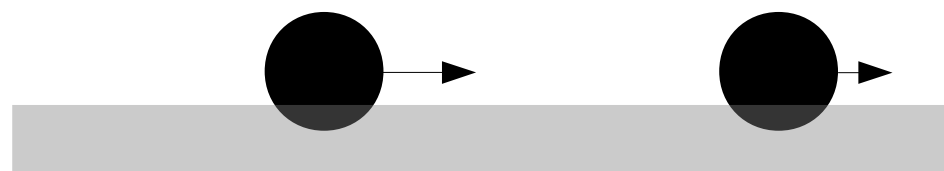
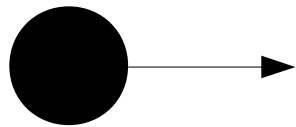
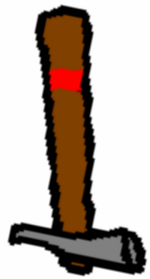
si l'Univers avait été vide \Rightarrow expansion uniforme à vitesse constante.

L'attraction gravitationnelle entre la matière, freine l'expansion.

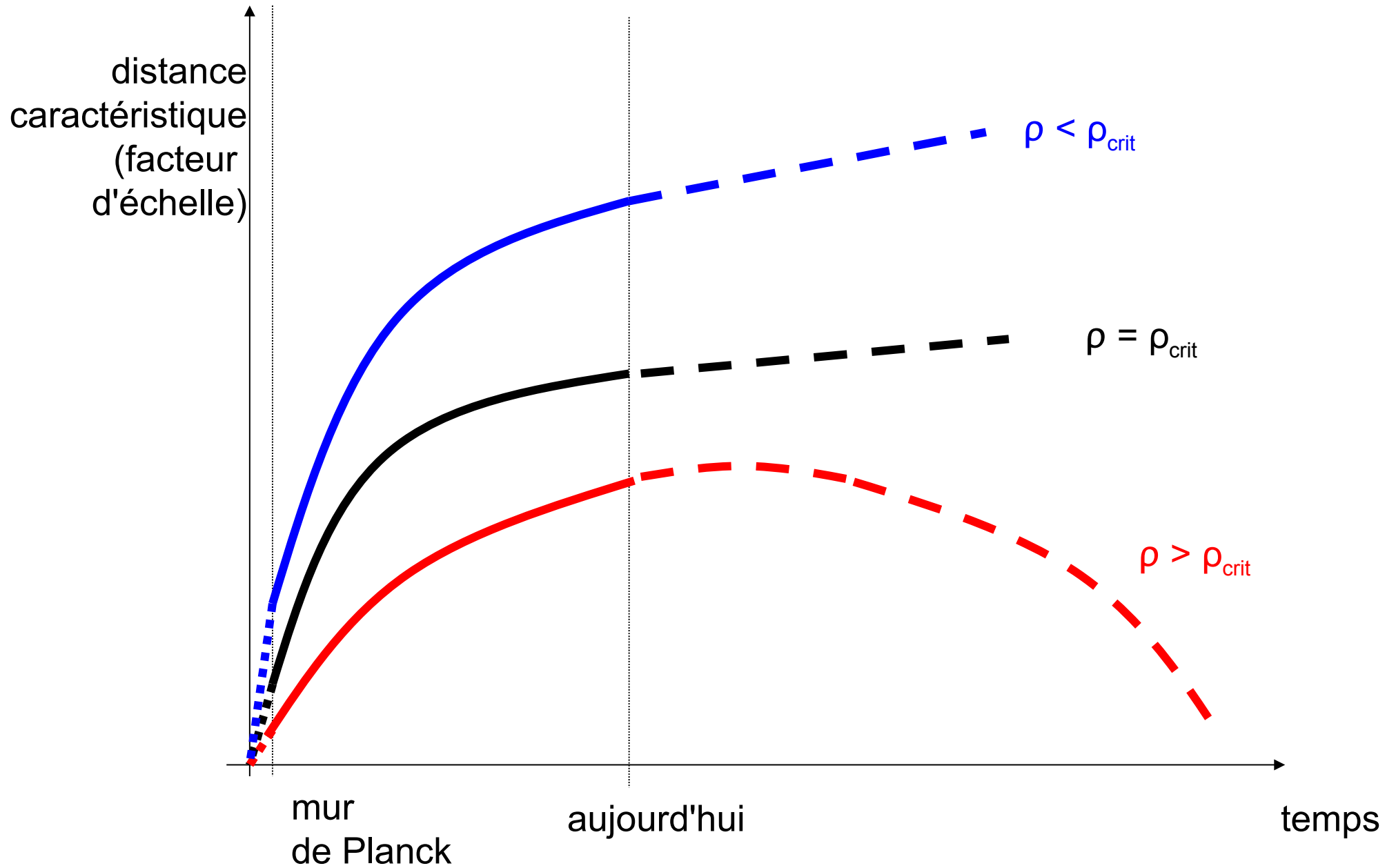
$t=0 \Rightarrow$ on "fournit" l'énergie pour démarrer le mouvement.

dans le vide \Rightarrow mouvement rectiligne uniforme

les forces de frottement freinent le mouvement.



Le modèle de Friedmann-Lemaître

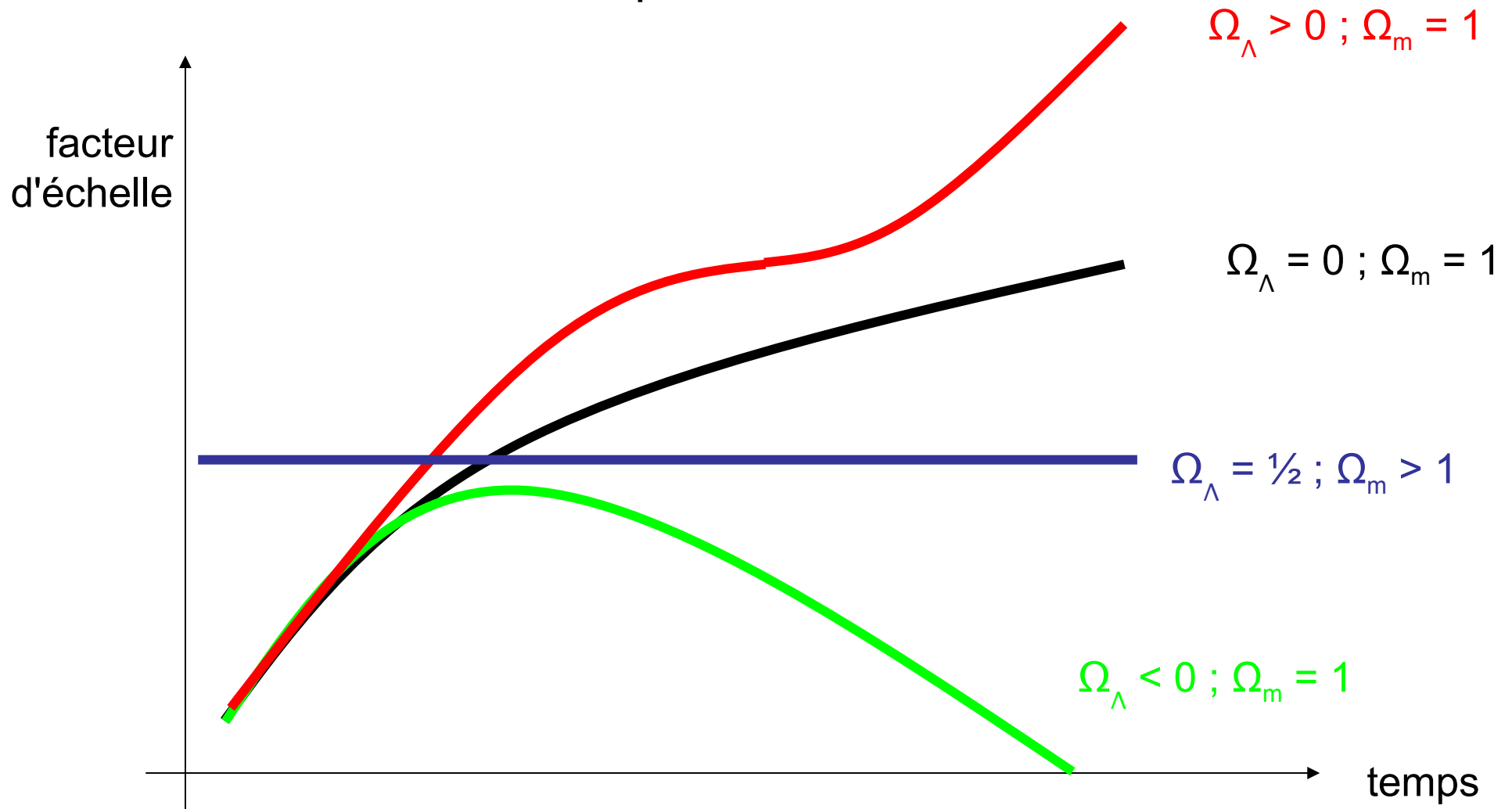


Constante cosmologique

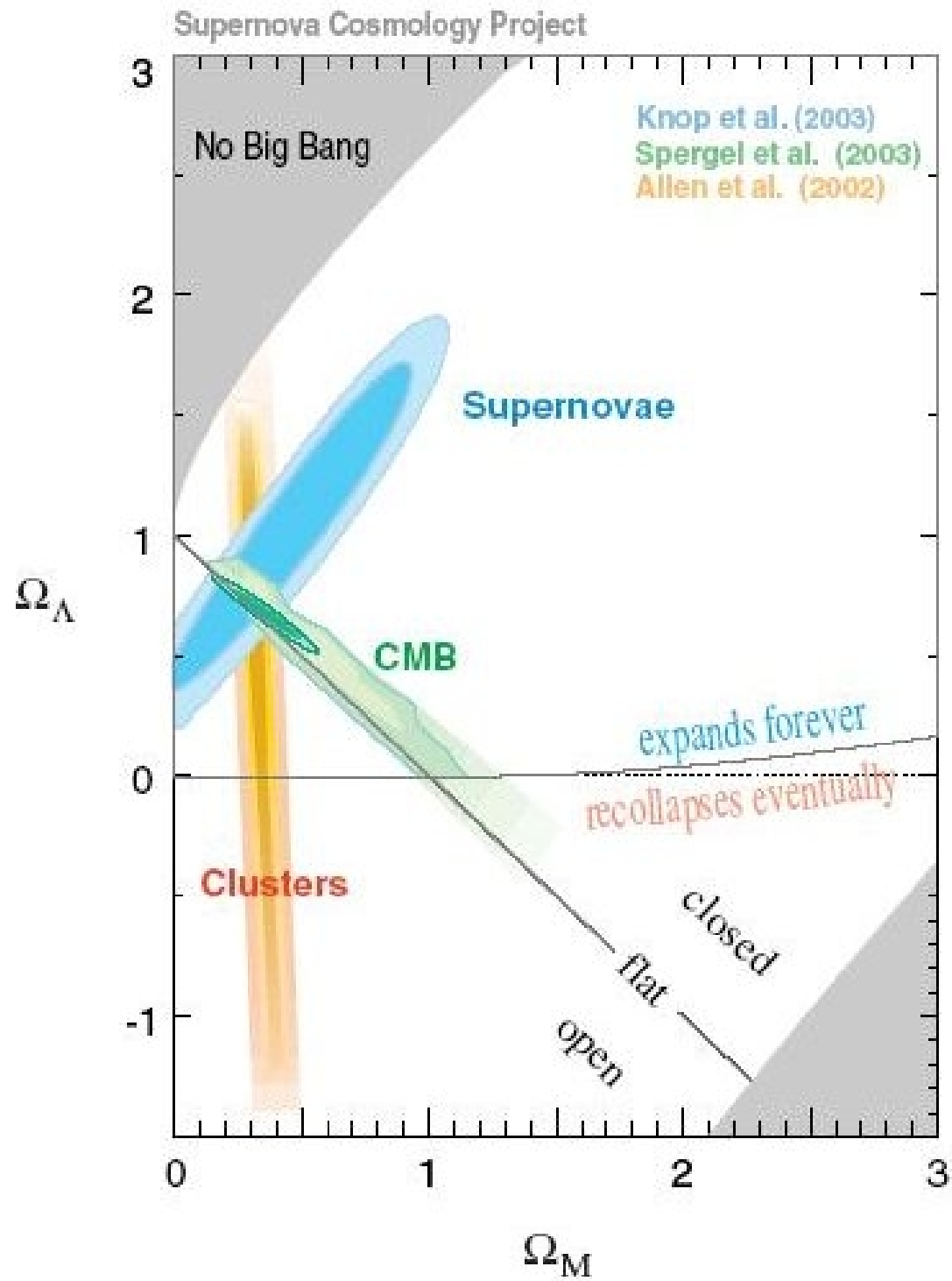
$\Lambda = 0 \rightarrow$ l'évolution de l'Univers ne dépend que de $\Omega_m = \rho/\rho_{\text{crit}}$

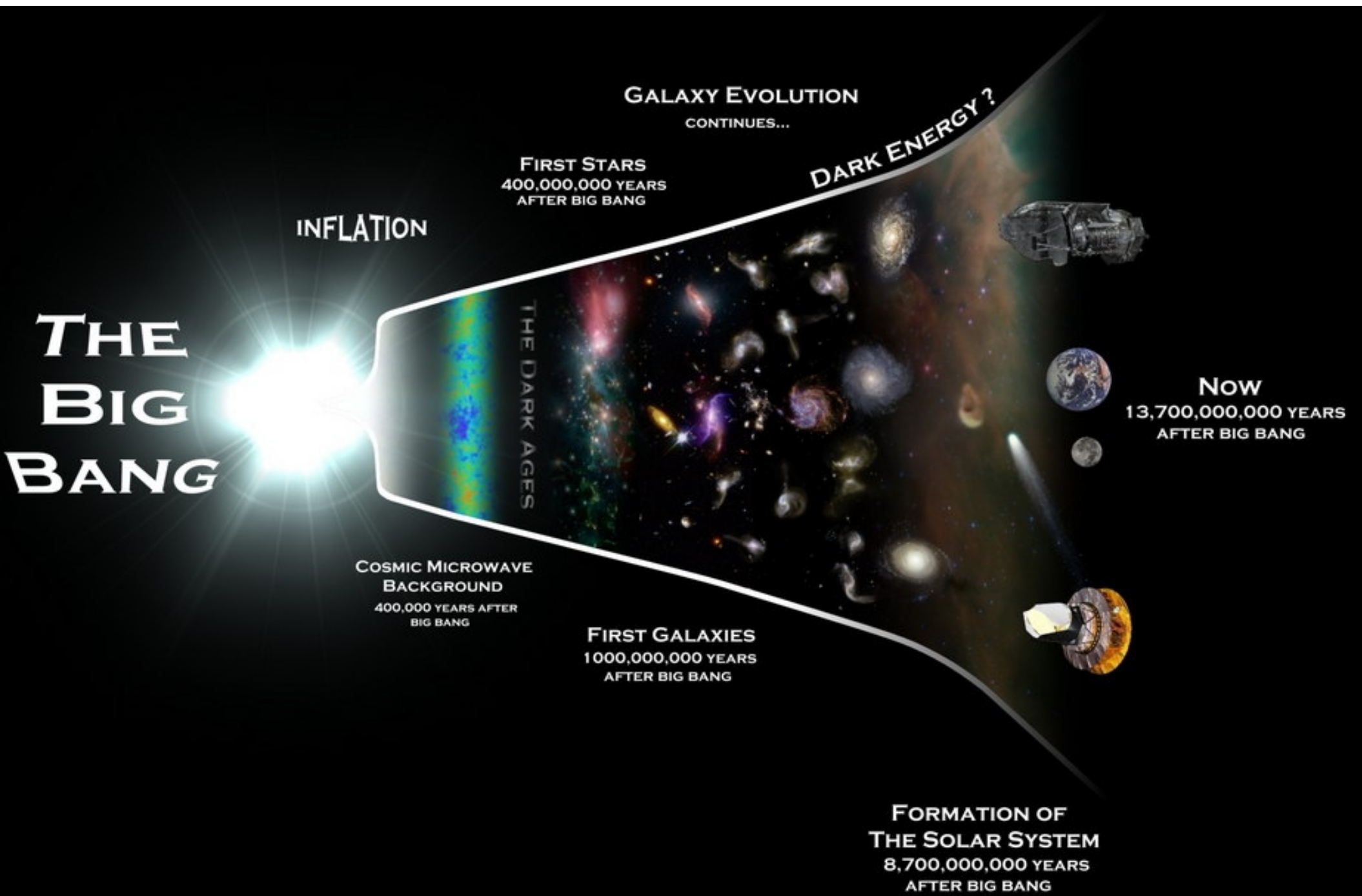
$\Lambda > 0 \rightarrow$ accélération de l'expansion

$\Lambda < 0 \rightarrow$ décélération de l'expansion



L'accélération de l'expansion





Le modèle Λ CDM

