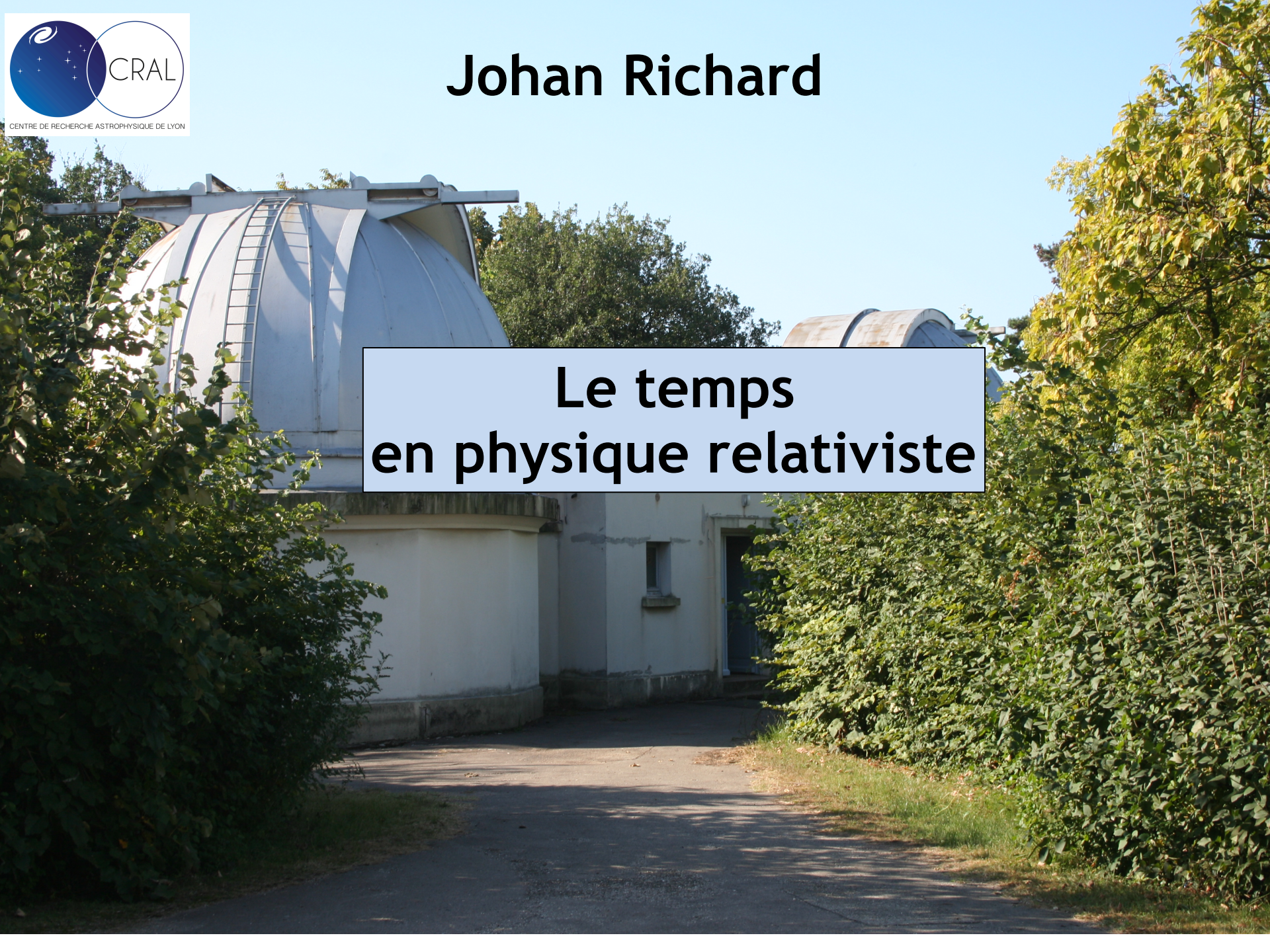


# Johan Richard

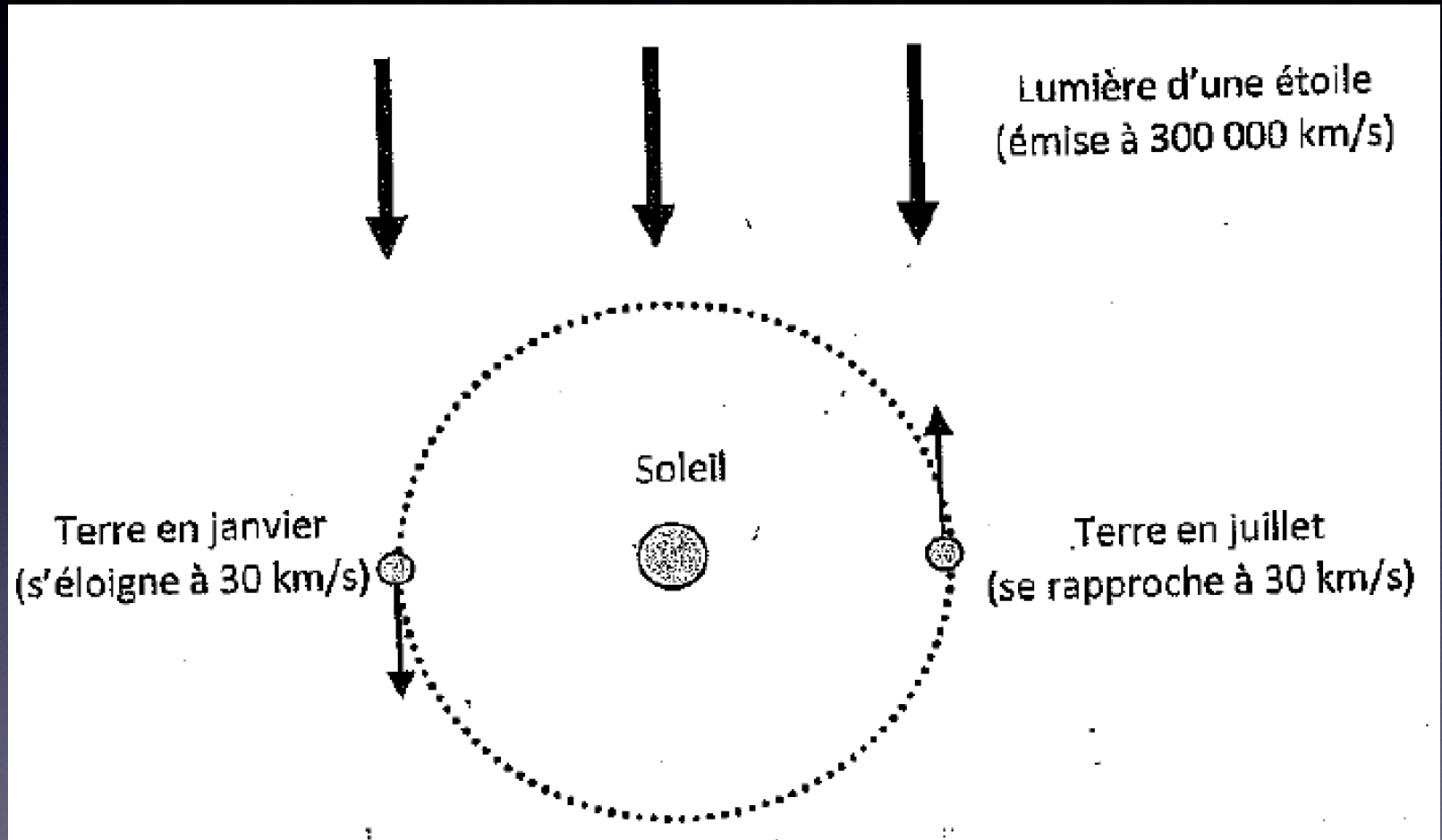


## Le temps en physique relativiste

# Physique “classique”

- En physique classique, l'espace et le temps sont a priori complètement séparables. Il y a un temps (donc des durées) ainsi que des distances ‘absolues’.
- Le temps évolue de façon continue, à la même “vitesse” pour tous les observateurs.
- Il est possible de définir des durées aussi minuscules / infinitésimales soient elles.

# La lumière et la composition des vitesses



La vitesse de la lumière mesurée est identique à tout moment

# Relativité Restreinte

- Un observateur ne 'perçoit' pas un mouvement à vitesse constante. Comment conserver les lois de la physique entre deux référentiels en mouvement ?
- Pour deux observateurs en mouvement l'un par rapport à l'autre les durées sont relatives ?
- Pour deux observateurs en mouvement l'un par rapport à l'autre les distances sont relatives ?
- Les deux à la fois ?

# Relativité Restreinte

$$L = \frac{L_p}{\gamma}$$

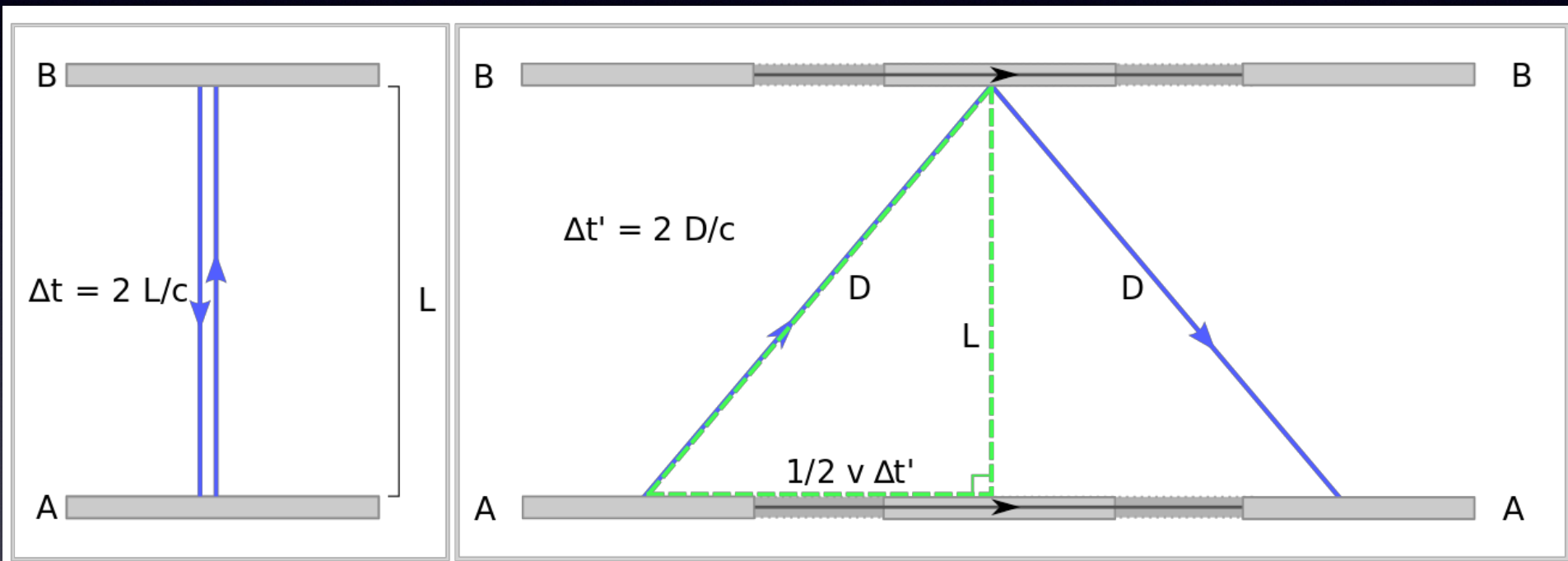
$$T = \gamma T_p$$

$L_p$ : longueur propre (mesurée dans un référentiel où l'objet est au repos) => longueur maximale

$T_p$ : Temps propre : intervalle de temps entre deux événements se produisant au même endroit.

# Ralentissement du temps

Horloges en mouvement:



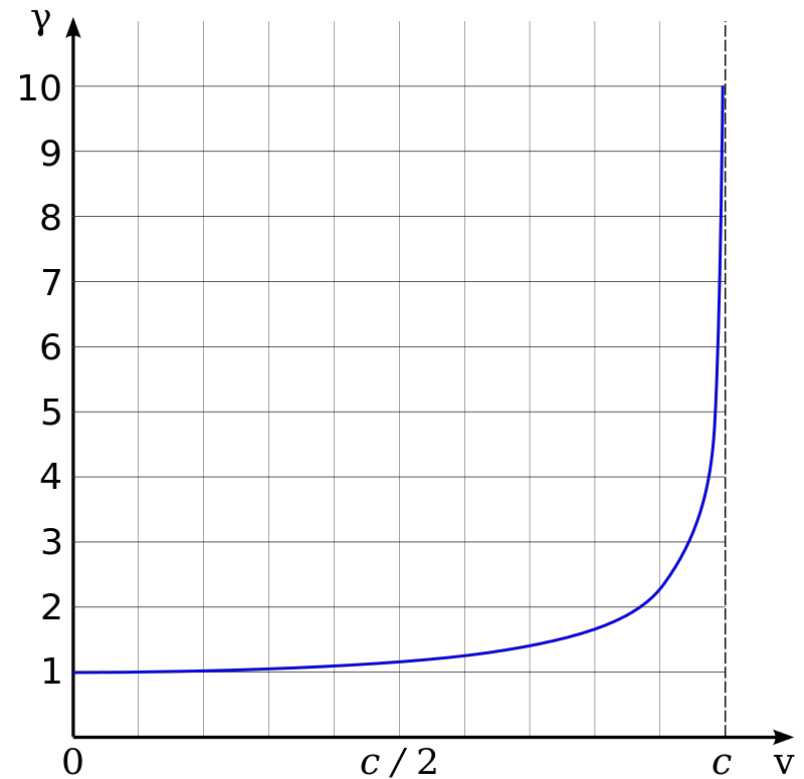
# Le facteur gamma

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Il est impossible d'avoir des vitesses  
supraluminiques...

# Le facteur gamma

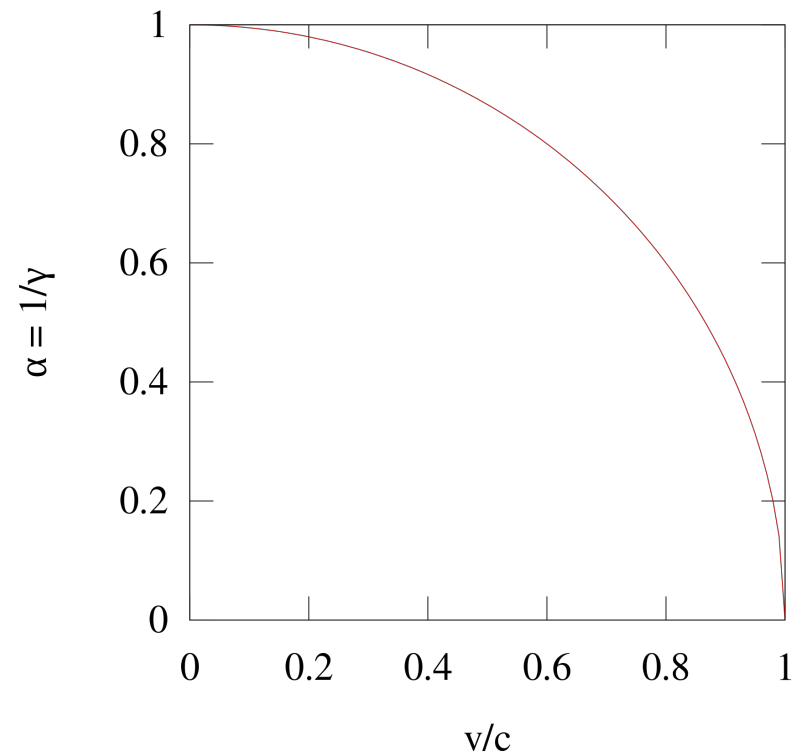
Speed (units of c)	Lorentz factor	Reciprocal
$\beta = v/c$	$\gamma$	$1/\gamma$
0.000	1.000	1.000
0.050	1.001	0.999
0.100	1.005	0.995
0.150	1.011	0.989
0.200	1.021	0.980
0.250	1.033	0.968
0.300	1.048	0.954
0.400	1.091	0.917
0.500	1.155	0.866
0.600	1.250	0.800
0.700	1.400	0.714
0.750	1.512	0.661
0.800	1.667	0.600
0.866	2.000	0.500
0.900	2.294	0.436
0.990	7.089	0.141
0.999	22.366	0.045
0.99995	100.00	0.010



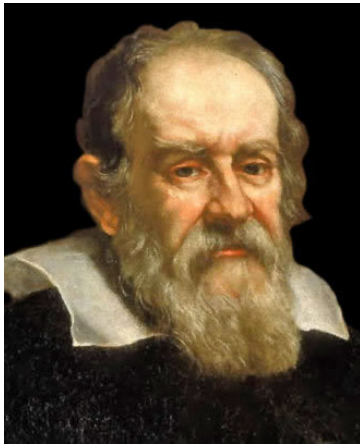


# Le facteur gamma

Speed (units of c)	Lorentz factor	Reciprocal
$\beta = v/c$	$\gamma$	$1/\gamma$
0.000	1.000	1.000
0.050	1.001	0.999
0.100	1.005	0.995
0.150	1.011	0.989
0.200	1.021	0.980
0.250	1.033	0.968
0.300	1.048	0.954
0.400	1.091	0.917
0.500	1.155	0.866
0.600	1.250	0.800
0.700	1.400	0.714
0.750	1.512	0.661
0.800	1.667	0.600
0.866	2.000	0.500
0.900	2.294	0.436
0.990	7.089	0.141
0.999	22.366	0.045
0.99995	100.00	0.010



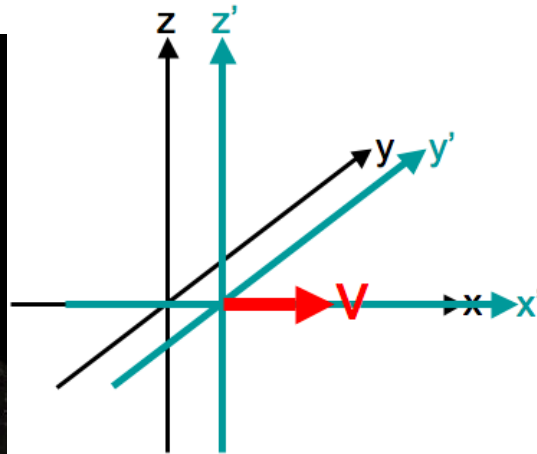
# Transformations de Lorentz



$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$



$$t' = \gamma \left( t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

$$x' = \gamma (x - vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

# Composition des vitesses

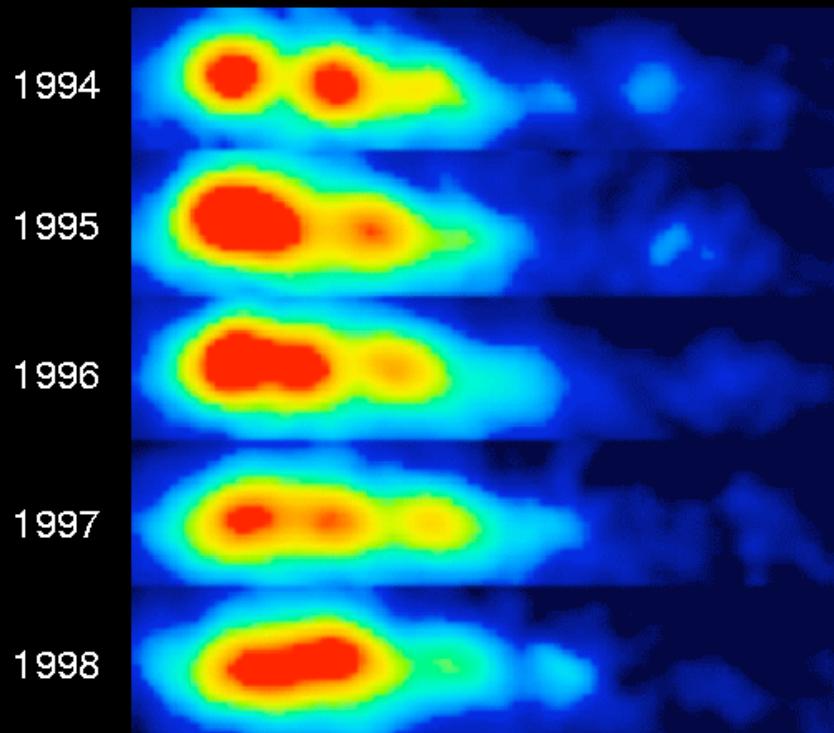
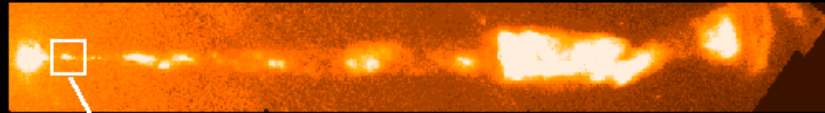
$$dx = \gamma(dx' + vdt') = \gamma(v'_x + v) dt'$$

$$dt = \gamma\left(dt' + \frac{vdx'}{c^2}\right) = \gamma\left(1 + \frac{vv'_x}{c^2}\right) dt'$$

avec  $v_x = dx/dt$  vitesse dans R  
 $v'_x = dx'/dt'$  vitesse dans R'

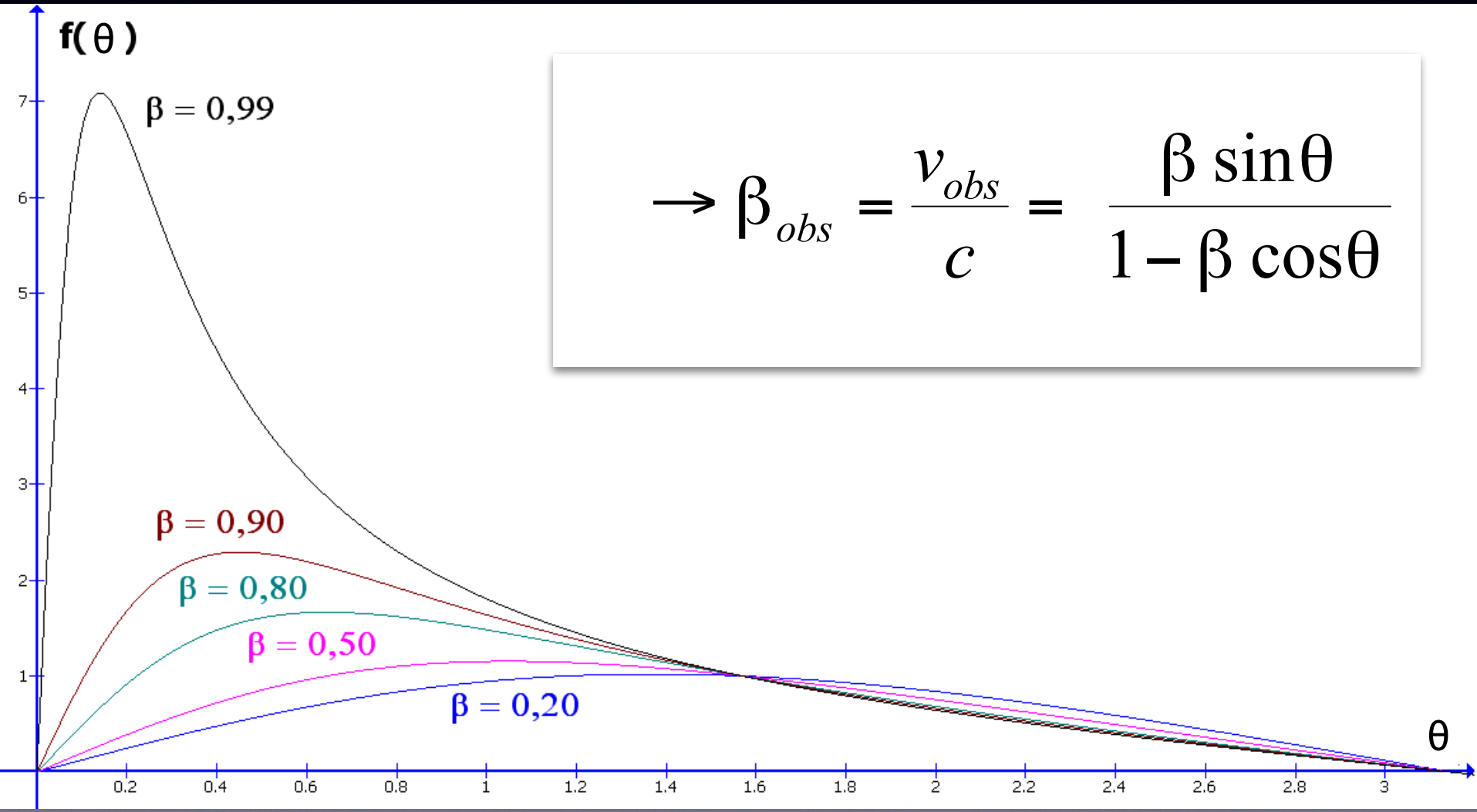
$$\mathbf{v}_x = \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{\mathbf{v} + \mathbf{v}'_x}{1 + \frac{v\mathbf{v}'_x}{c^2}}$$

# Illusions: vitesses supraluminiques



— 24 light yrs

# Illusions: vitesses supraluminiques



# Bizarreries

- La dilatation des durées et la contraction des longueurs ne sont pas dues à des 'illusions d'optique'. Exemple: les muons.
- A cause des effets de dilatation des durées et de contraction des longueurs, on peut inverser l'ordre de deux évènements suivant le référentiel d'observation !
- Autre exemple : une boîte à la fois ouverte et fermée !

# Relativité Générale

La théorie de la relativité d'Einstein de 1905 est restreinte aux référentiels galiléens.

Deux problèmes restaient à résoudre :

- Comment traiter les cas de référentiels accélérés ?
- Comment se comporte la gravitation ?

# Accélération

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\gamma\vec{v})}{dt} = m\gamma\vec{a} + m\vec{v}\frac{d\gamma}{dt}$$

v faible : F entraîne une augmentation de la vitesse spatiale

v élevé : F entraîne une augmentation de gamma, la 'vitesse temporelle'



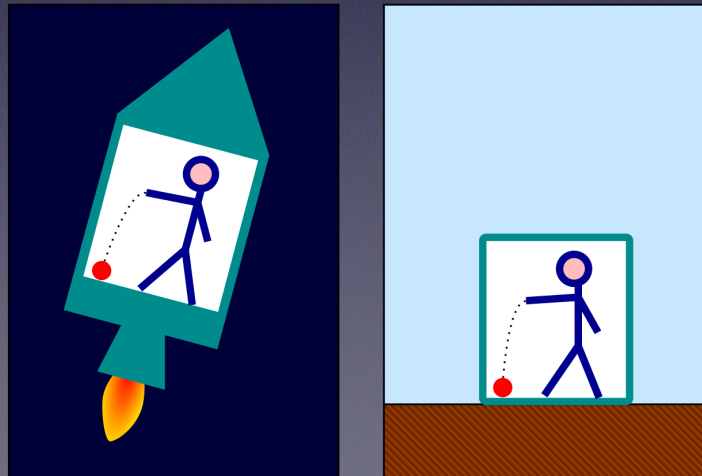
# Energie cinétique

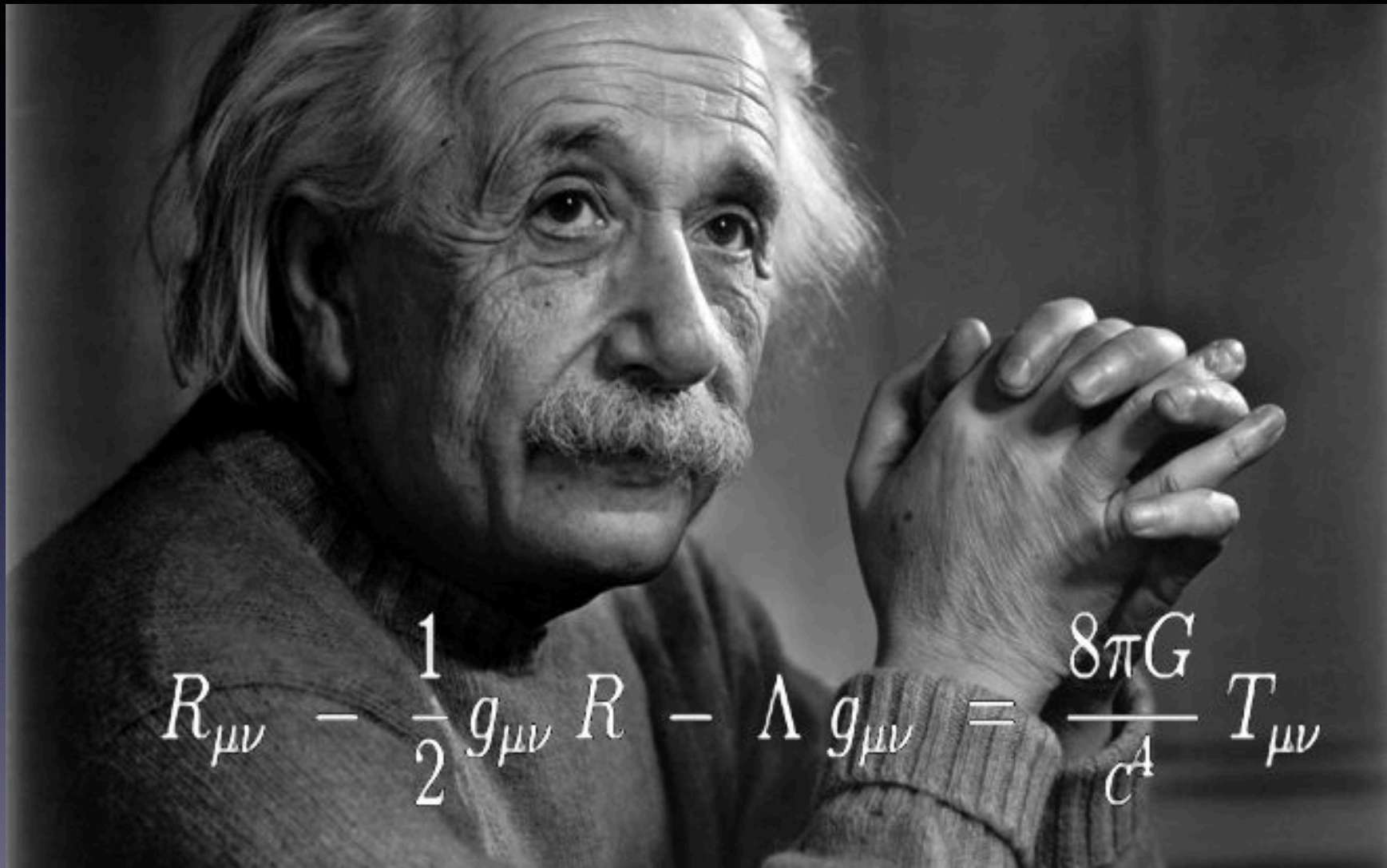
$$K = (\gamma - 1)m_0c^2 = E - m_0c^2 ,$$

$$m = \gamma(\mathbf{v})m_0$$

# Accélération et gravité

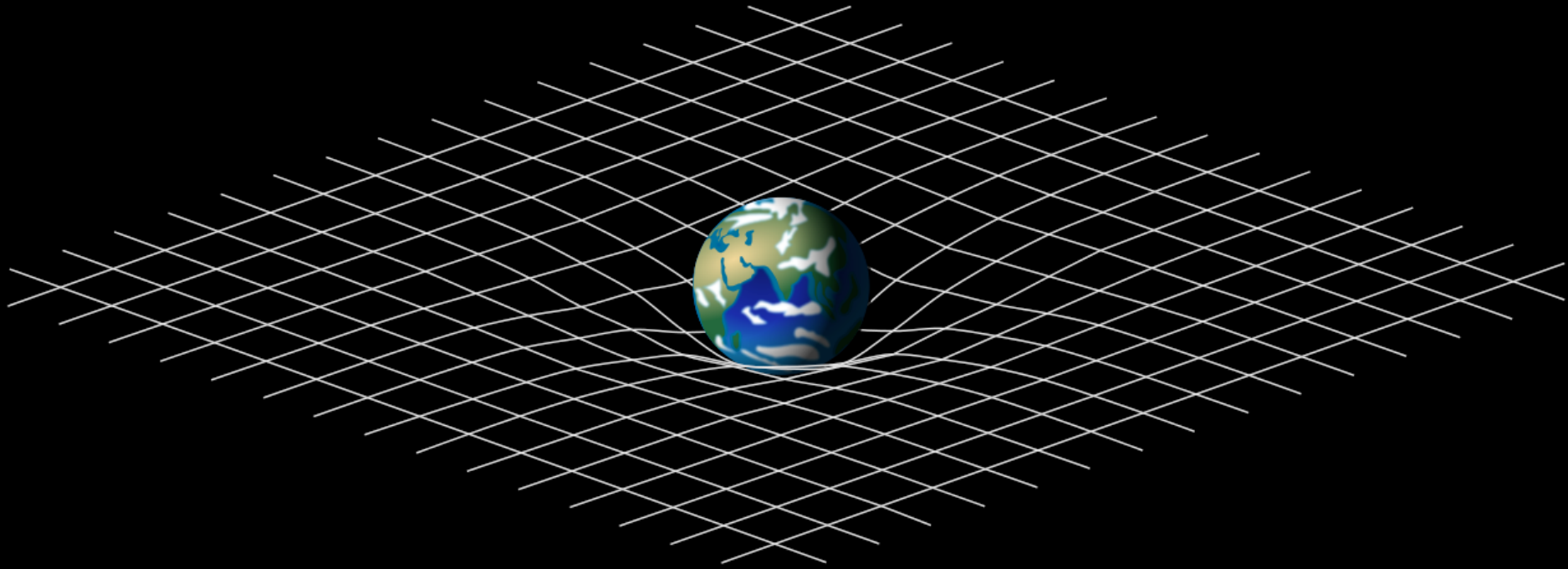
- Principe d'équivalence : il n'y a pas lieu de distinguer la masse inertielle et la masse pesante.
- Un astronaute accéléré à  $1g$  ne peut pas faire la différence avec une fusée restée sur Terre !





$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R - \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

# Relativité Générale



# Relativité Générale

- Les lois de la physique sont les mêmes pour tous les observateurs, même en mouvement et en accélération les uns par rapport aux autres.
- Conséquence: les mesures de longueur, d'intervalle de temps, et de vitesse ne sont pas les mêmes suivant le référentiel de l'observateur.
- La gravitation n'est pas une force, mais la manifestation de la courbure de l'espace.

# Effets gravitationnels

- L'espace, mais aussi le temps, sont distordus à proximité d'une masse.
- Le temps s'écoule différemment entre deux points à des potentiels gravitationnels différents (plus lentement dans un champ gravitationnel fort).
- 'Décalage vers le rouge' gravitationnel : la fréquence de la lumière émise dans un champ gravitationnel diminue pour un observateur extérieur, à la manière de l'effet Doppler.

# Trous noirs







# Interstellar: entre science et création artistique



Christopher Nolan

Pour les besoins du film,  
simulations précises de  
l'observation d'un trou noir  
supermassif



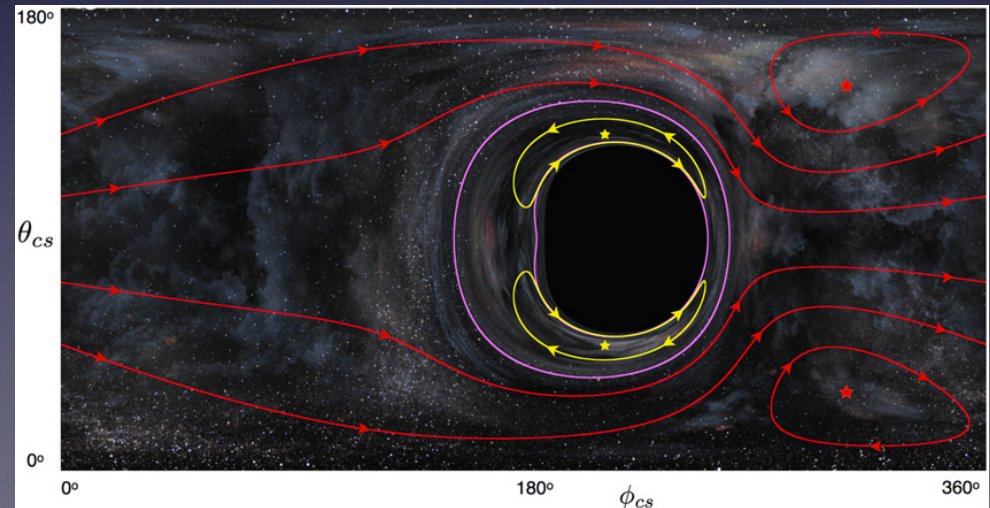
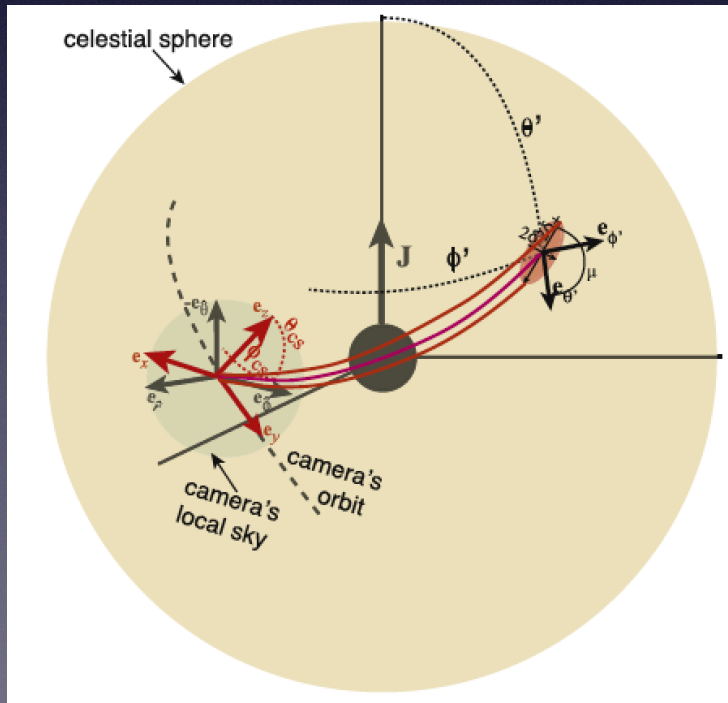
Kip Thorne

Cependant... beaucoup  
d'effets visuels ont été  
volontairement supprimés!

# Interstellar: entre art et recherche scientifique

## Gravitational lensing by spinning black holes in astrophysics, and in the movie *Interstellar*

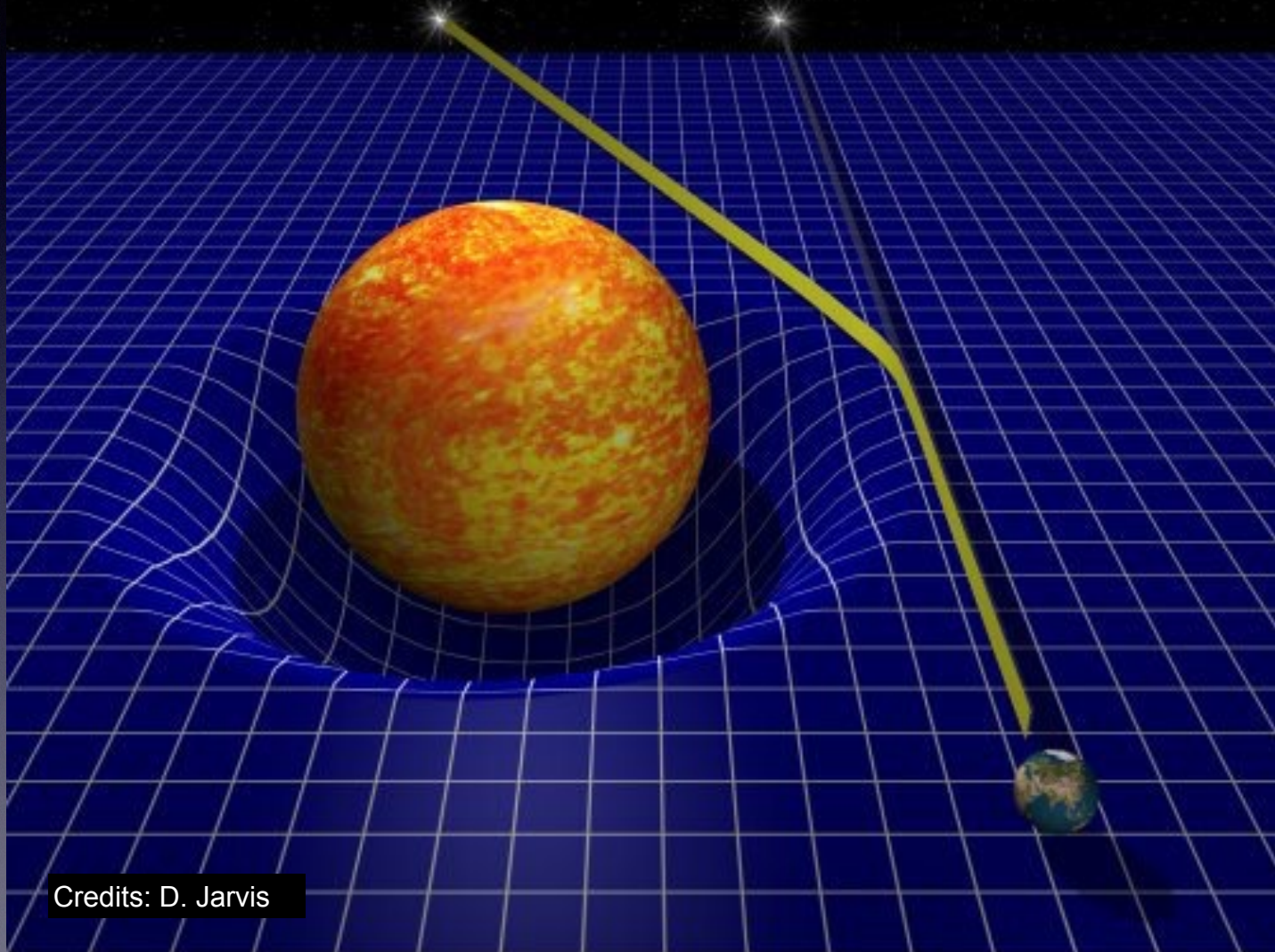
Oliver James<sup>1,\*</sup>, Eugénie von Tunzelmann<sup>1</sup>,  
Paul Franklin<sup>1</sup> and Kip S Thorne<sup>2</sup>



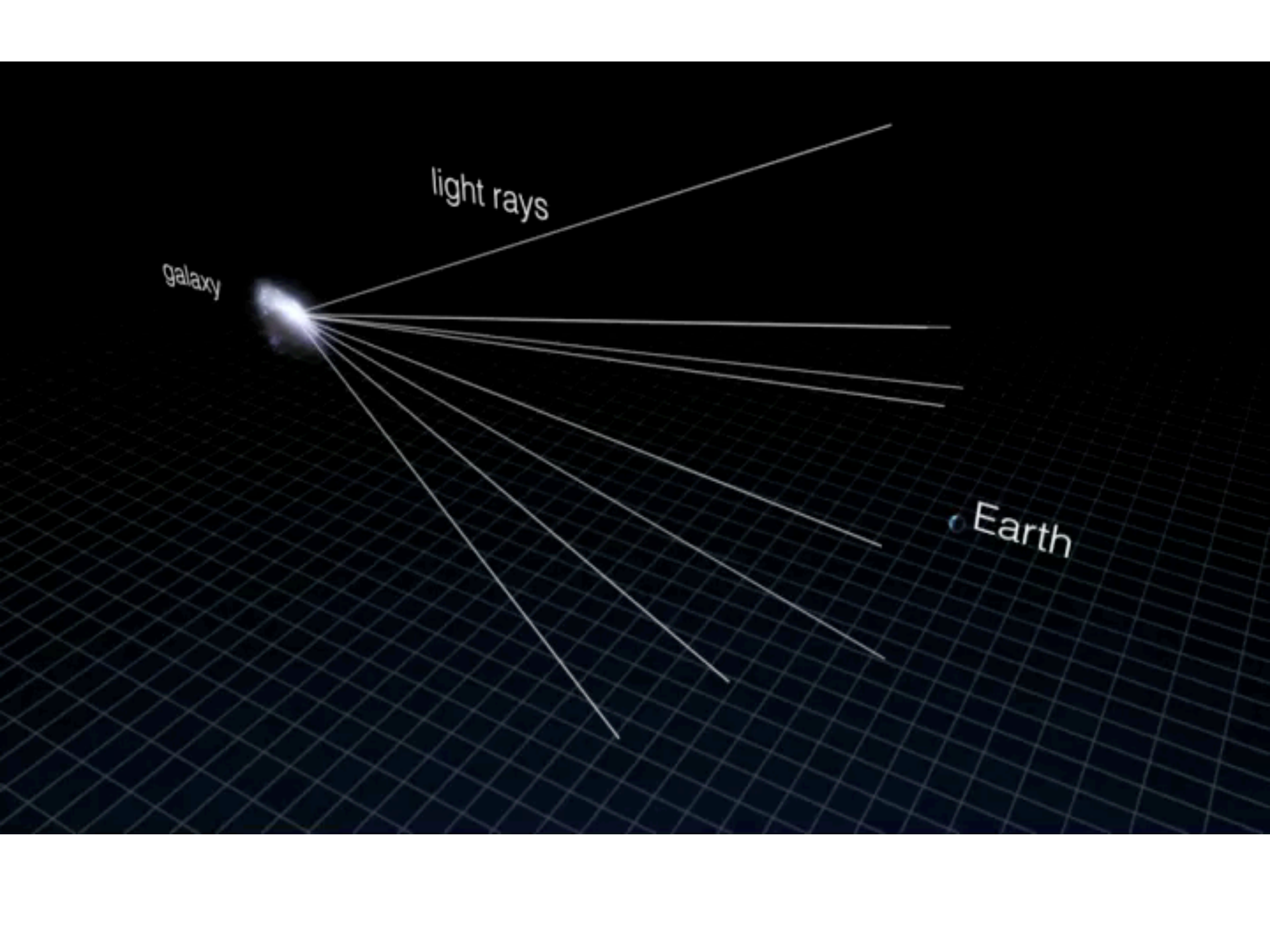
# Relativité Générale

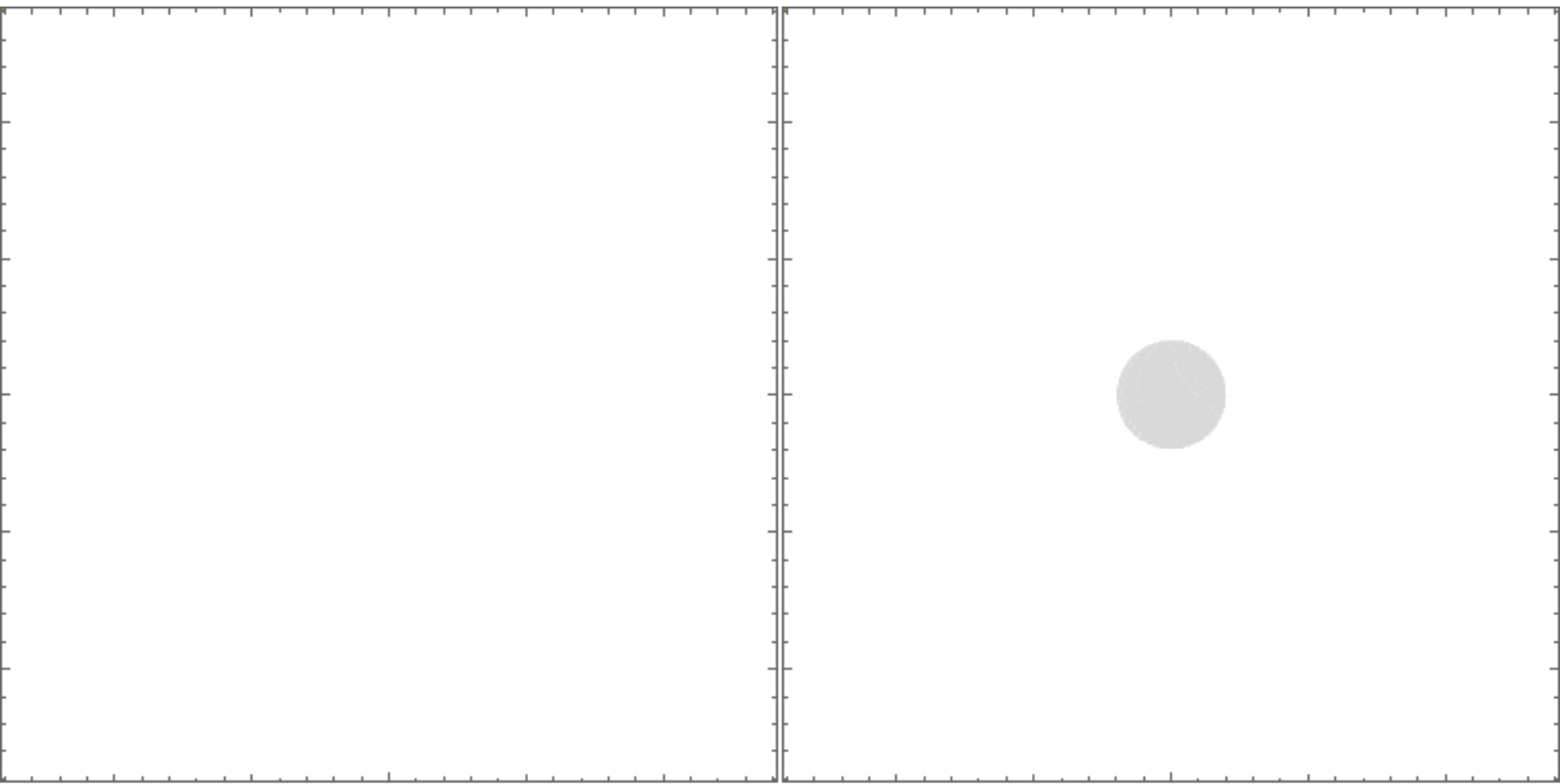
Position réelle

Position observée



Credits: D. Jarvis

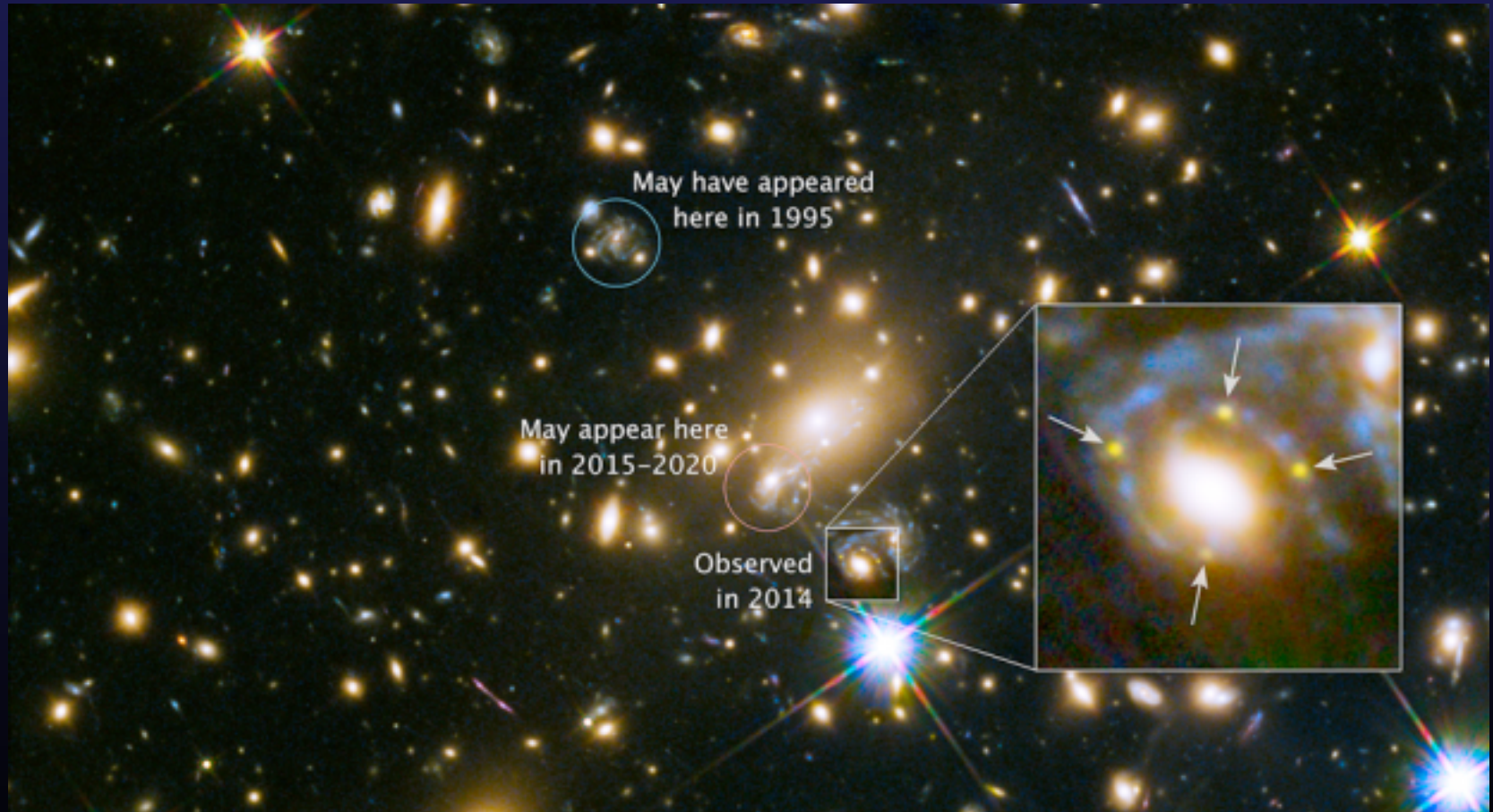




$t = 0.000 \text{ GN/c}^3$

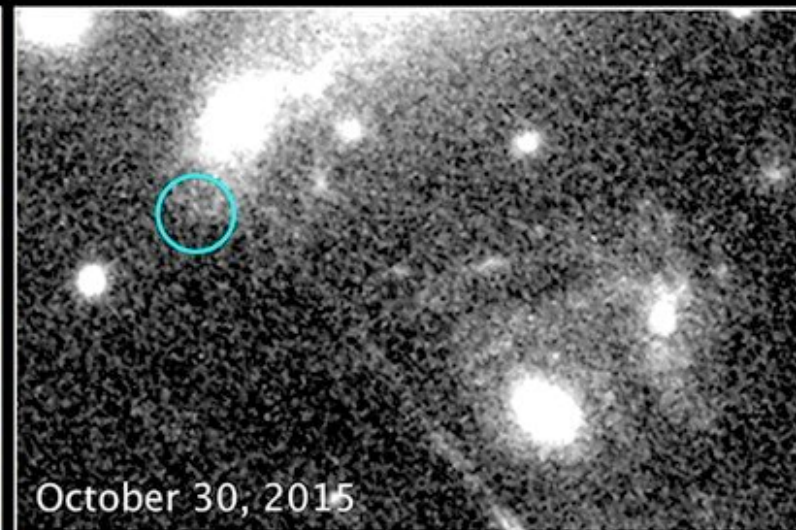
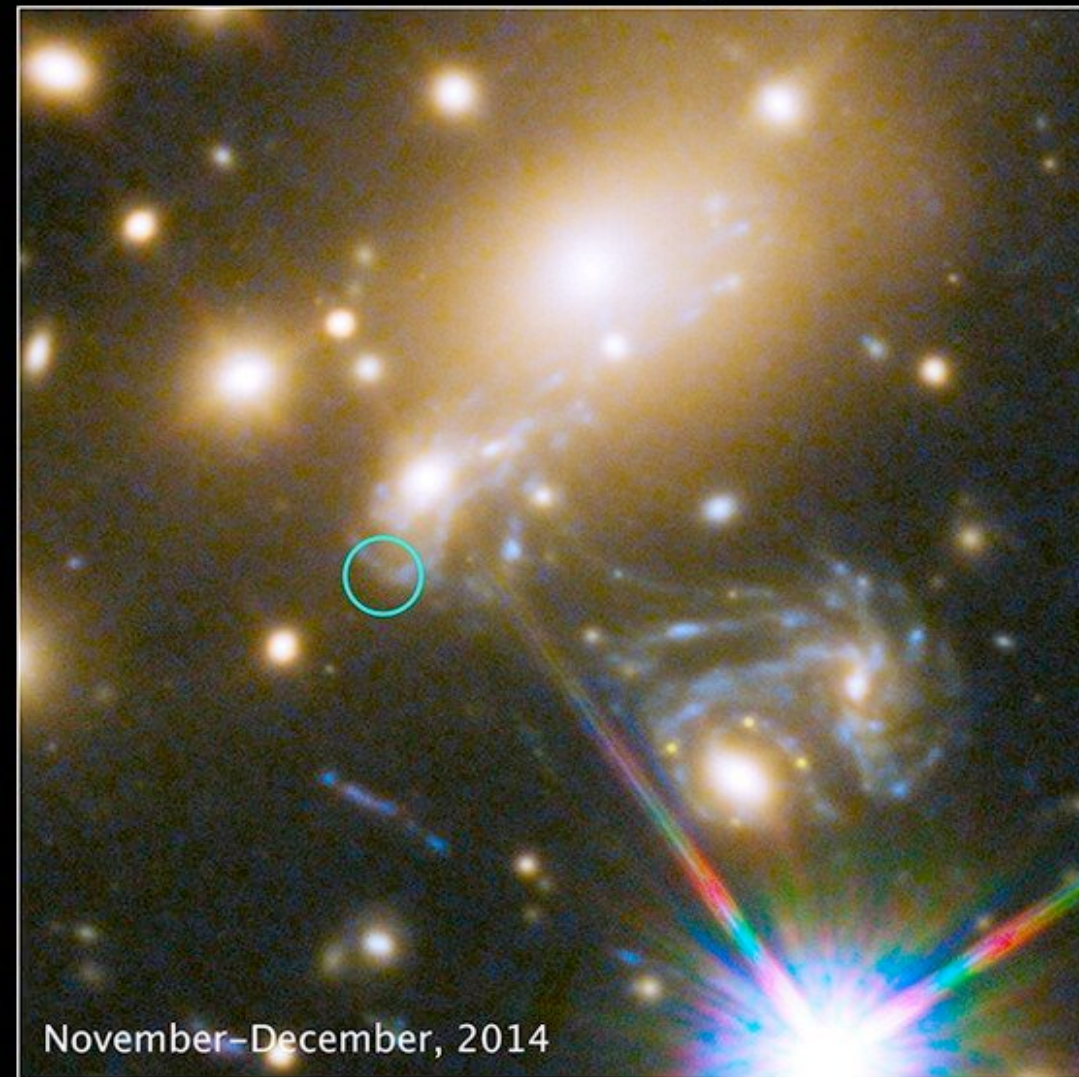
yukterez

# Décalage temporel

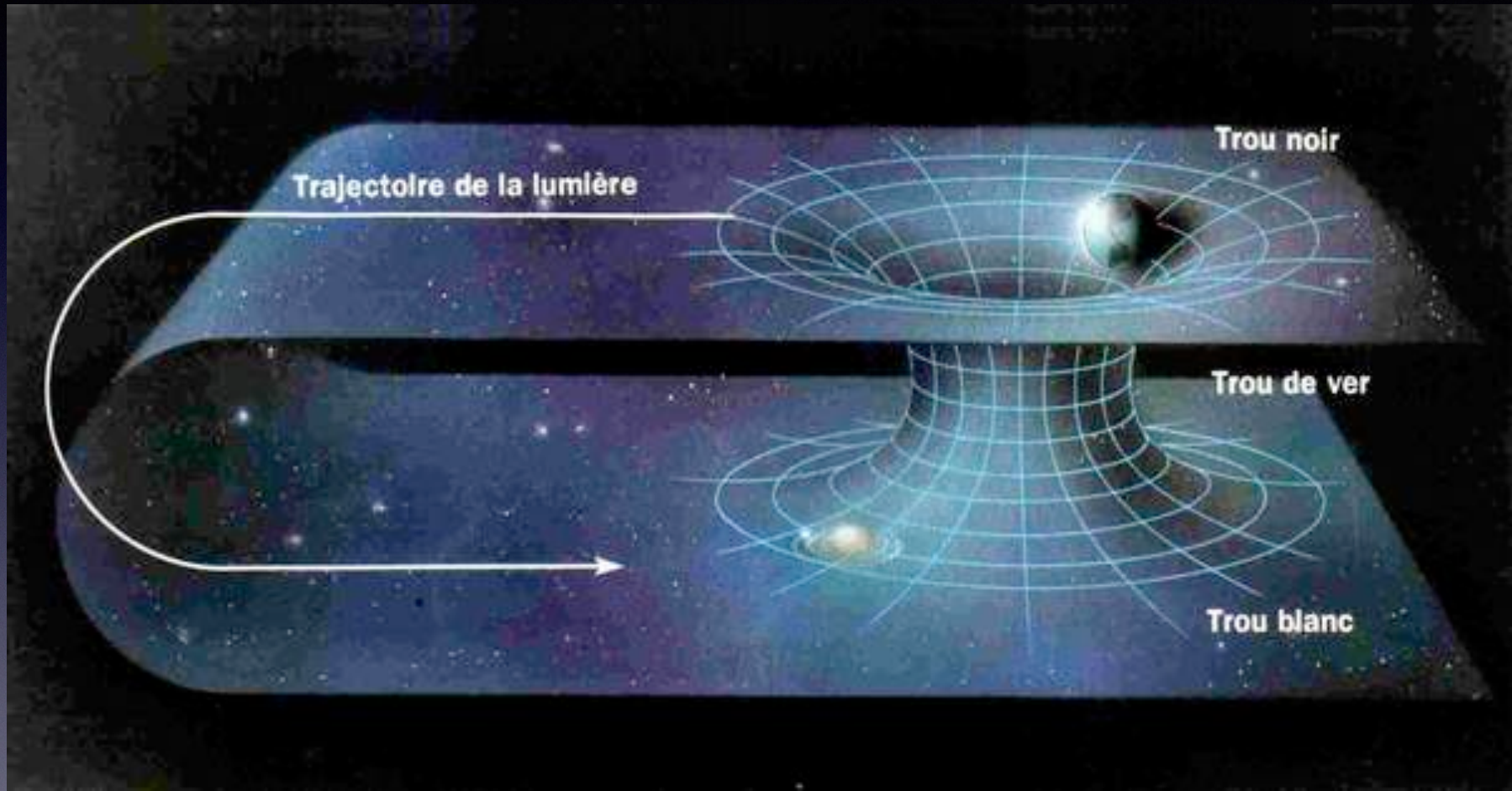


# Décalage temporel

Supernova Refsdal • Galaxy Cluster MACS J1149.5+2223 • *HST* WFC3 ACS



# Fontaine blanche, trou de ver



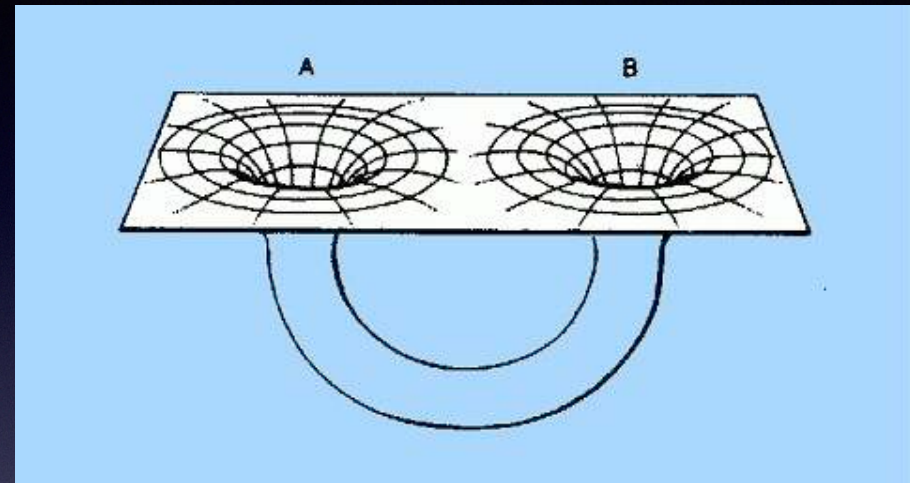


# Fontaine blanche, trou de ver

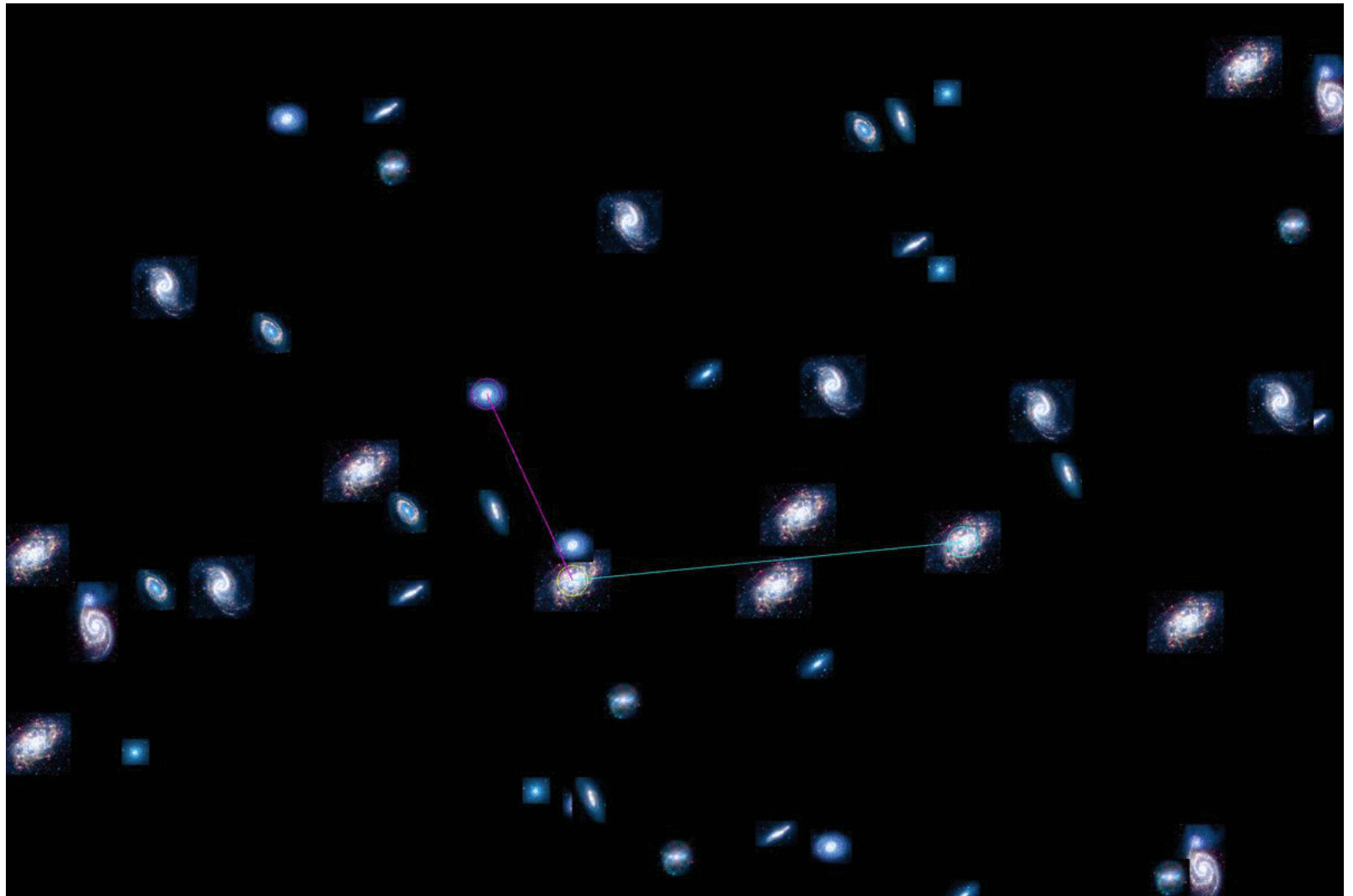


# Voyage spatio-temporel

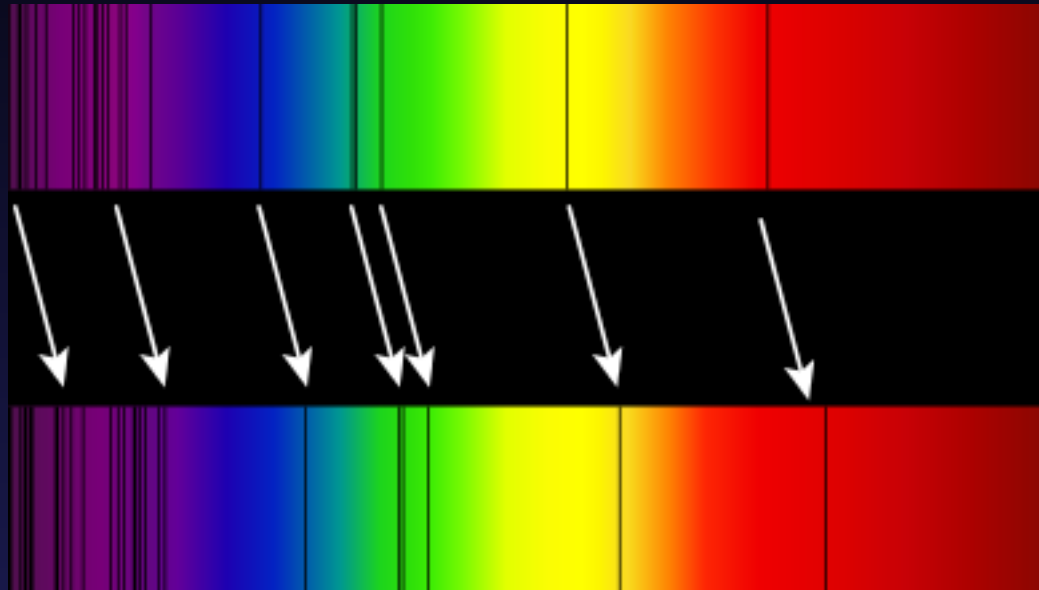
Ponts de Einstein-Rosen:



- Problèmes de taille et de singularité
- Effets de marée
- Paradoxes / effets de causalité
- Non impossible dans les équations!

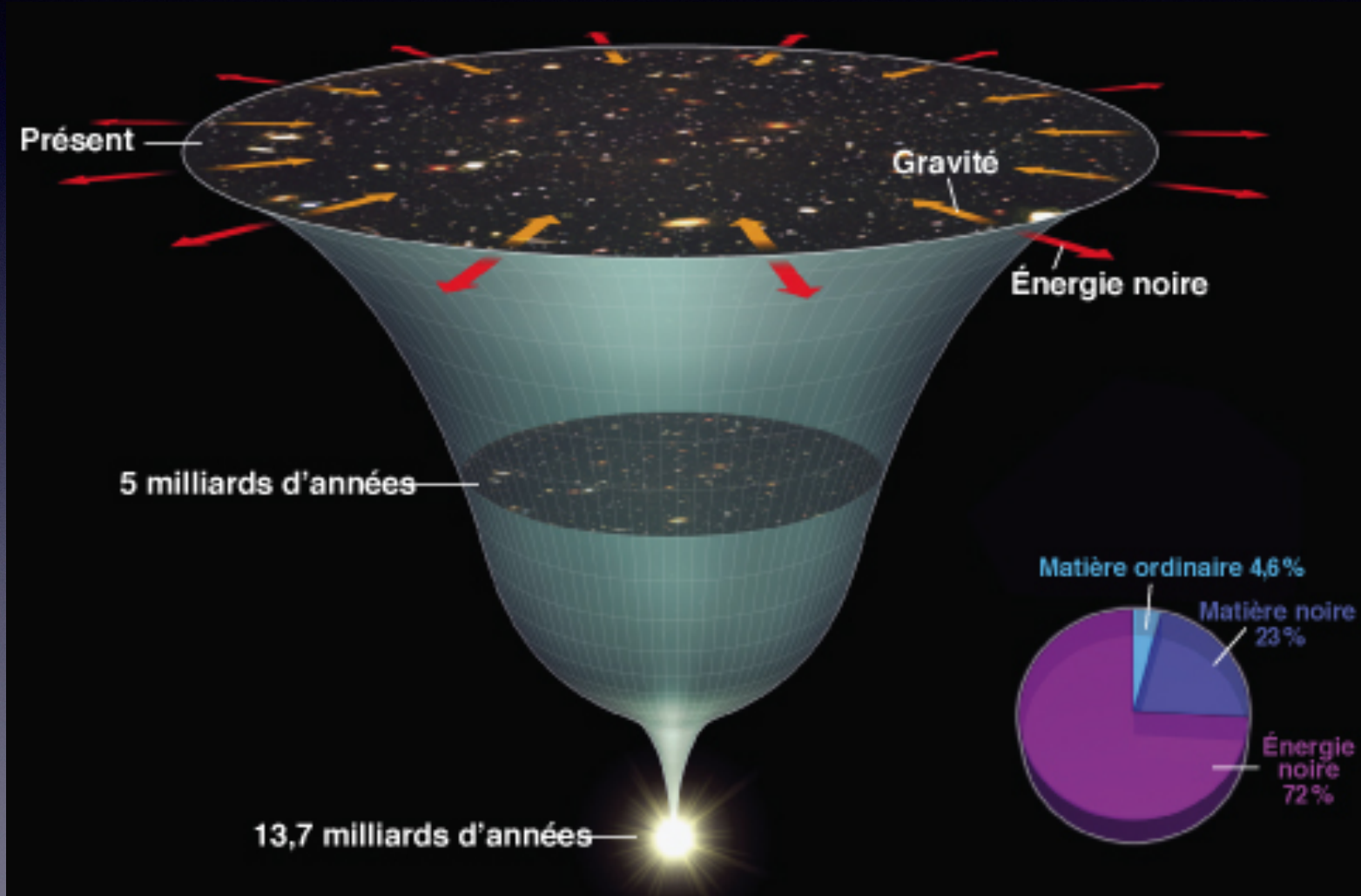


# Signature dans la lumière



**Edwin Hubble (1929):**  
La lumière des galaxies distantes semble  
systématiquement décalée vers le rouge

# Temps et expansion de l'Univers



# Temps et expansion de l'Univers

