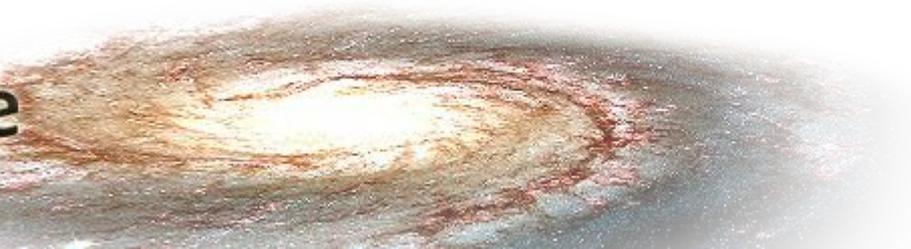


La relativité intriquée

Olivier Minazzoli
26 Mars 2022



Observatoire
de la CÔTE d'AZUR



- La Relativité Générale colle à un nombre considérable d'observations diverses (du fond diffus cosmologique au système de navigation GPS).

Cependant:

- Existence d'une preuve formelle de sa limite.
- Ne satisfait pas l'un des trois principes fondateurs d'Einstein pour « une théorie satisfaisante de la relativité ».

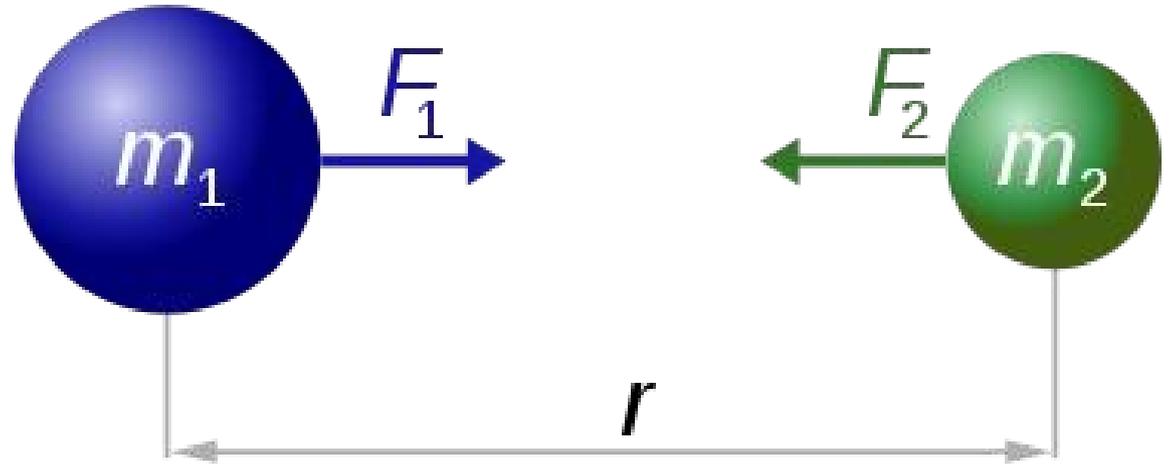
Aussi:

- Matière noire, énergie noire, difficultés au niveau quantique: autant d'indices potentiels de son inadéquation (ou pas...).

Plan

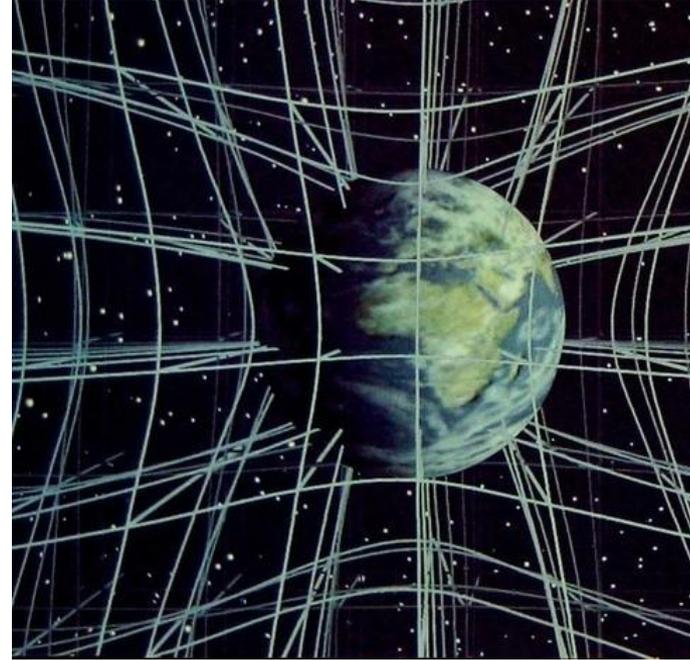
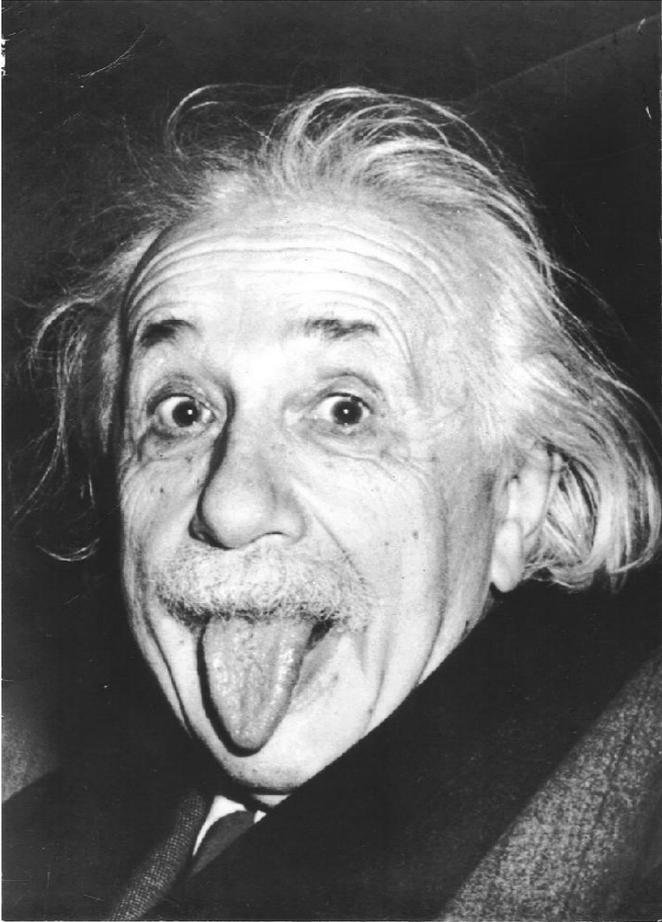
- La relativité générale
 - Ses plus grands succès
 - Ses principaux problèmes
- La relativité intriquée
 - Premiers résultats
 - Son potentiel

La gravitation de Newton



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

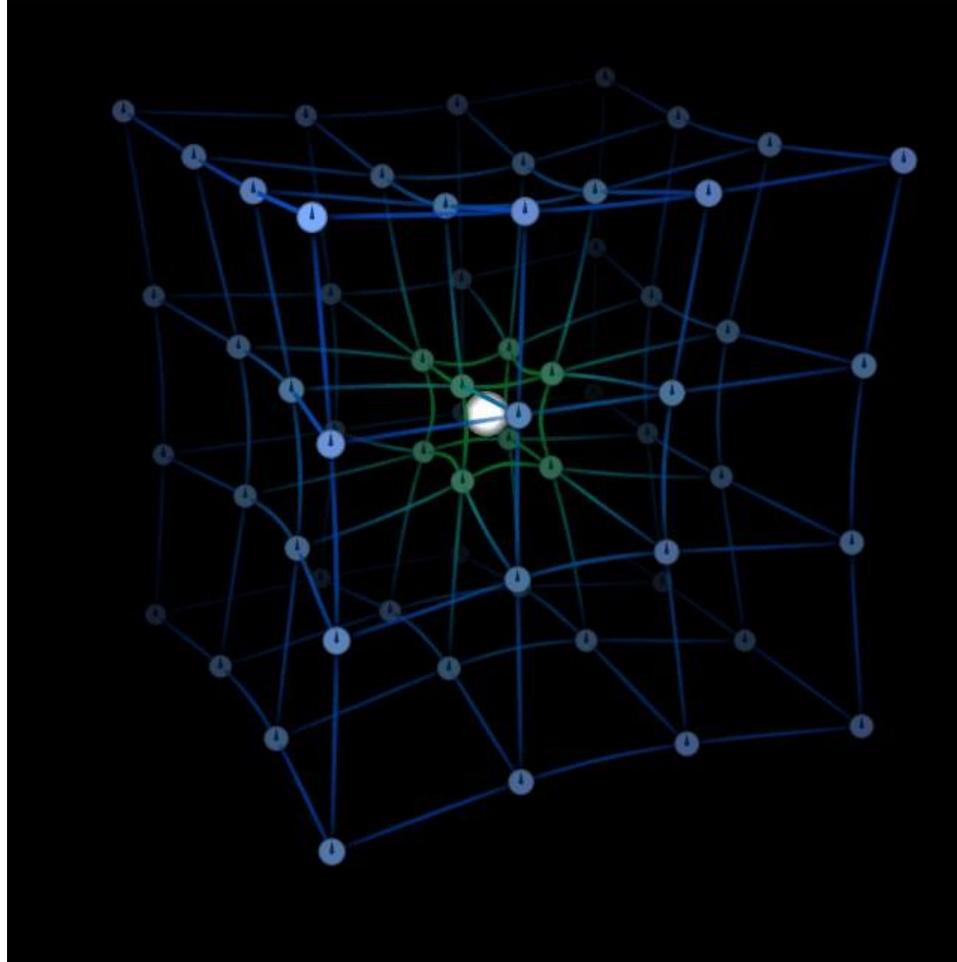
La relativité Générale



Équation d'Einstein :

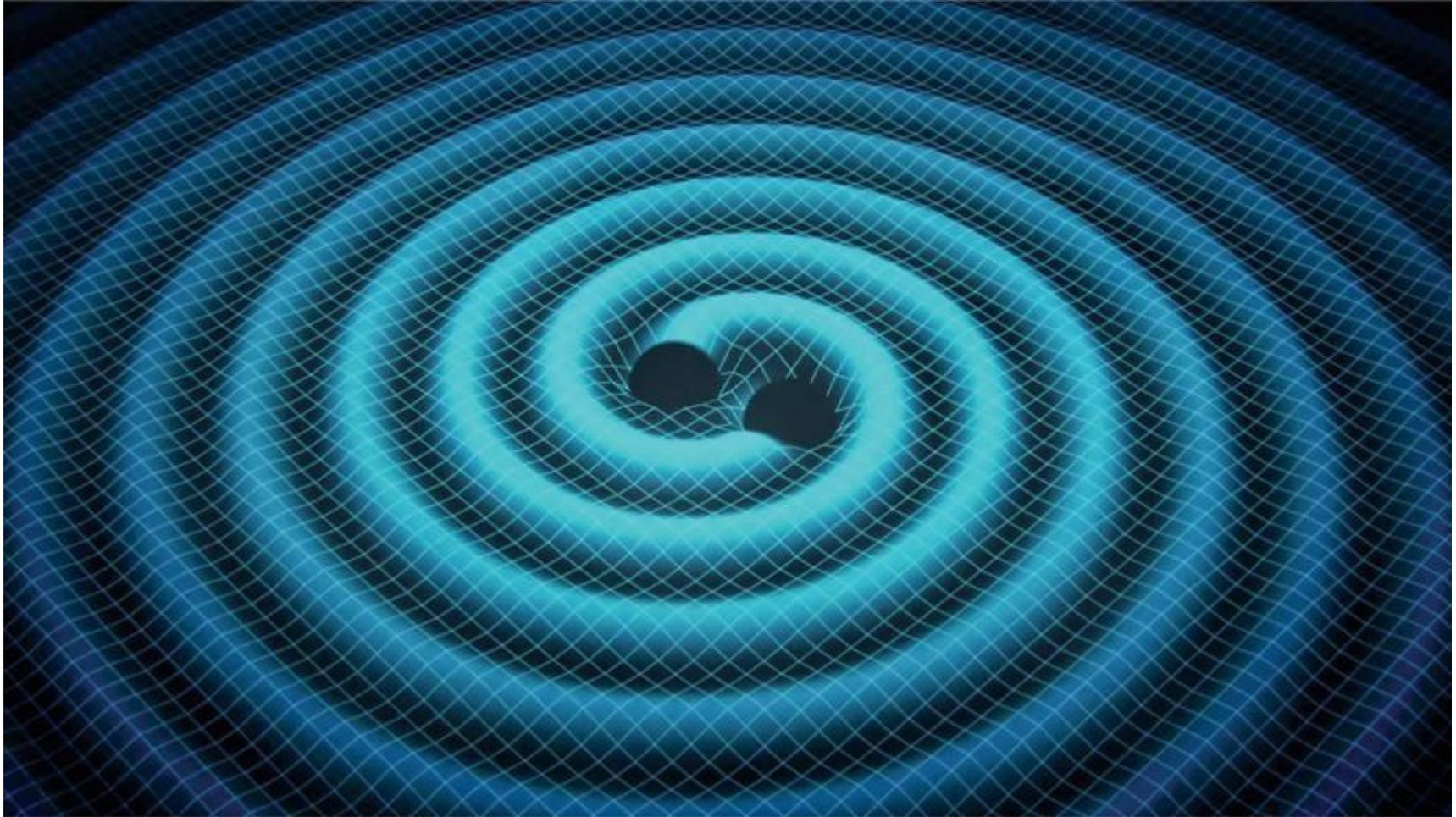
Courbure = Matière

La matière courbe l'espace-temps

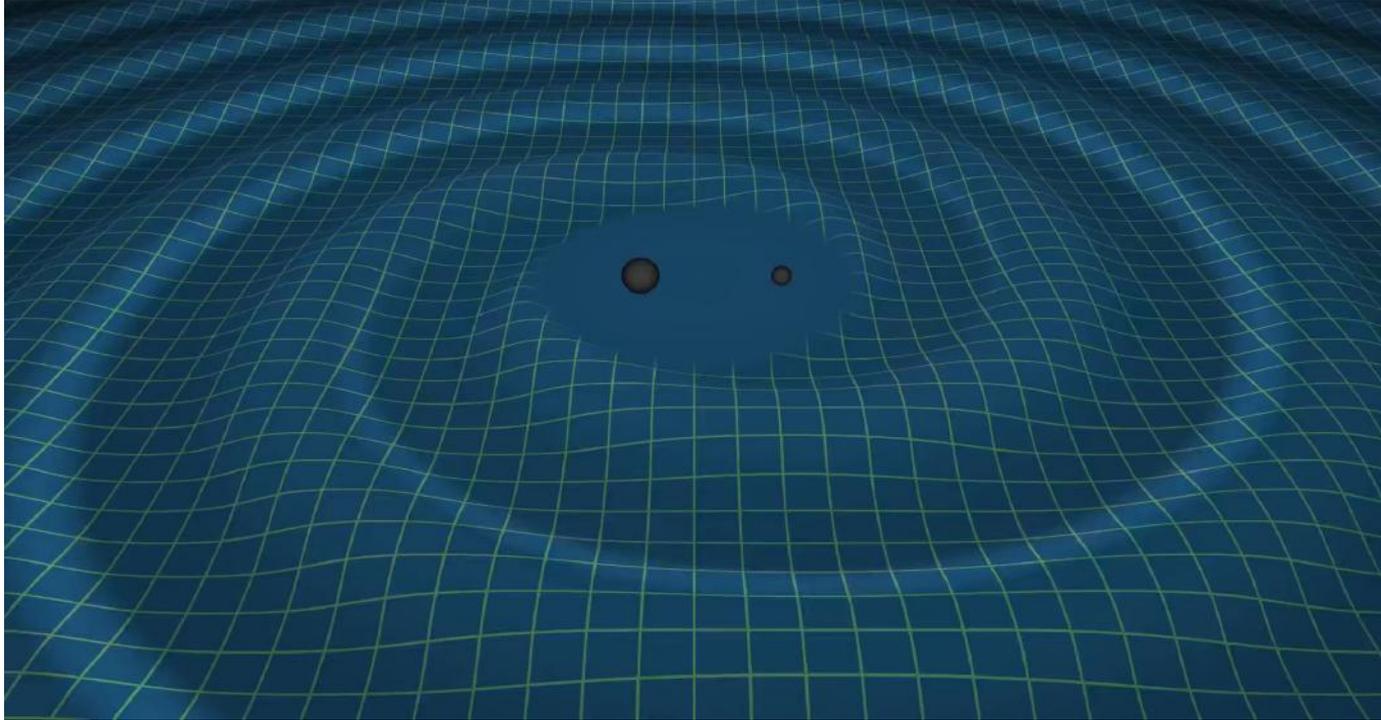


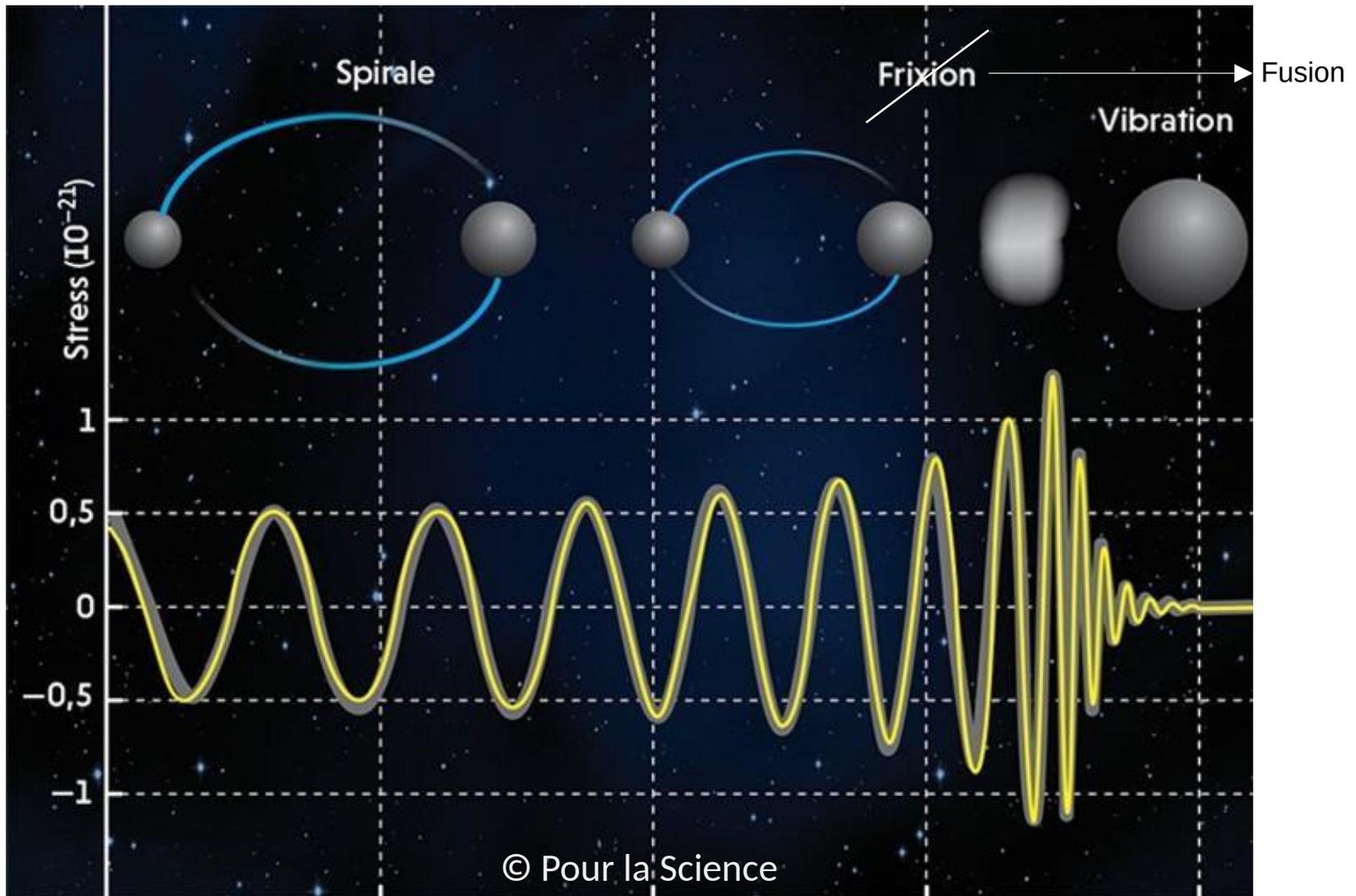
Les ondes gravitationnelles

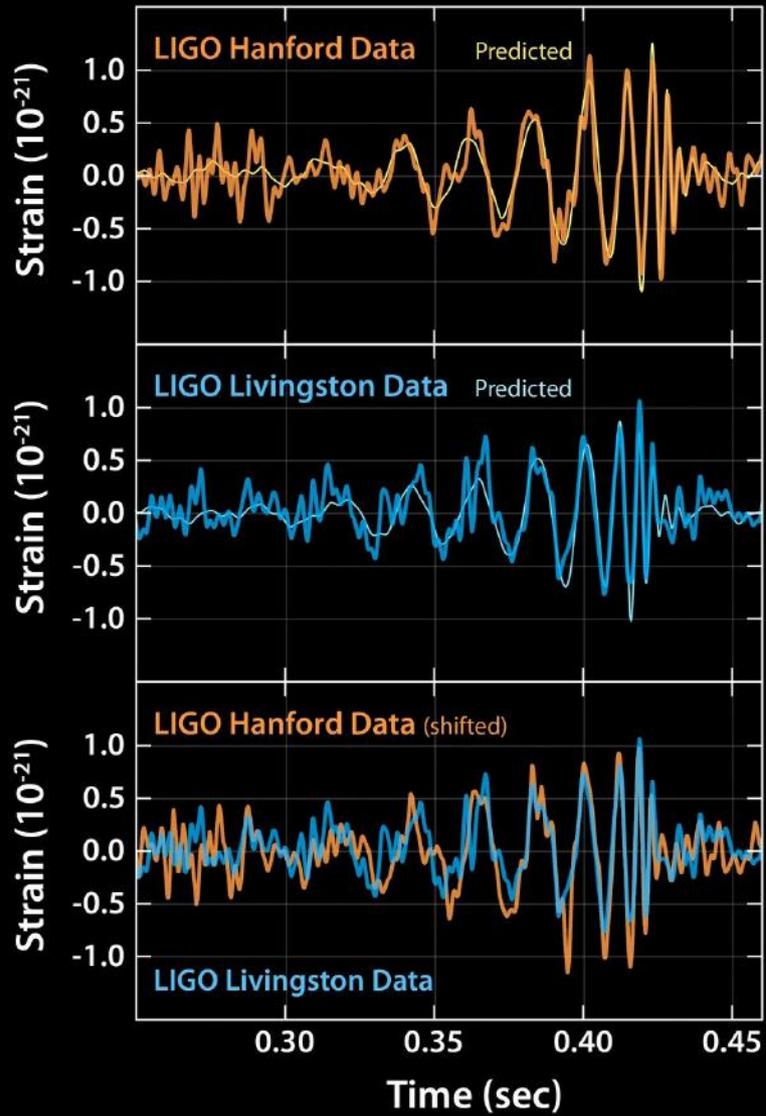
Le mouvement génère des ondes d'espace-temps



Le mouvement génère des ondes d'espace-temps





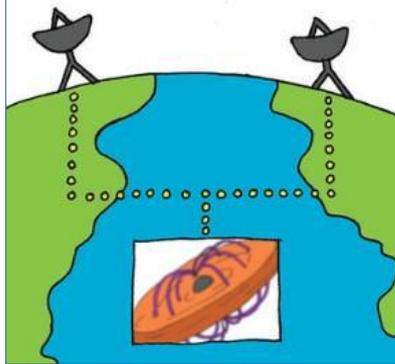


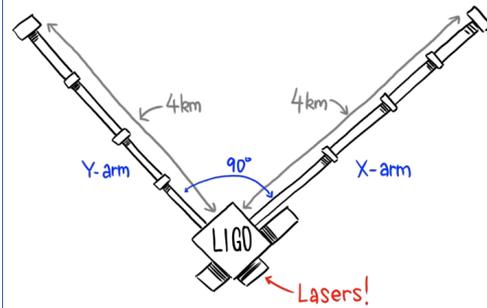
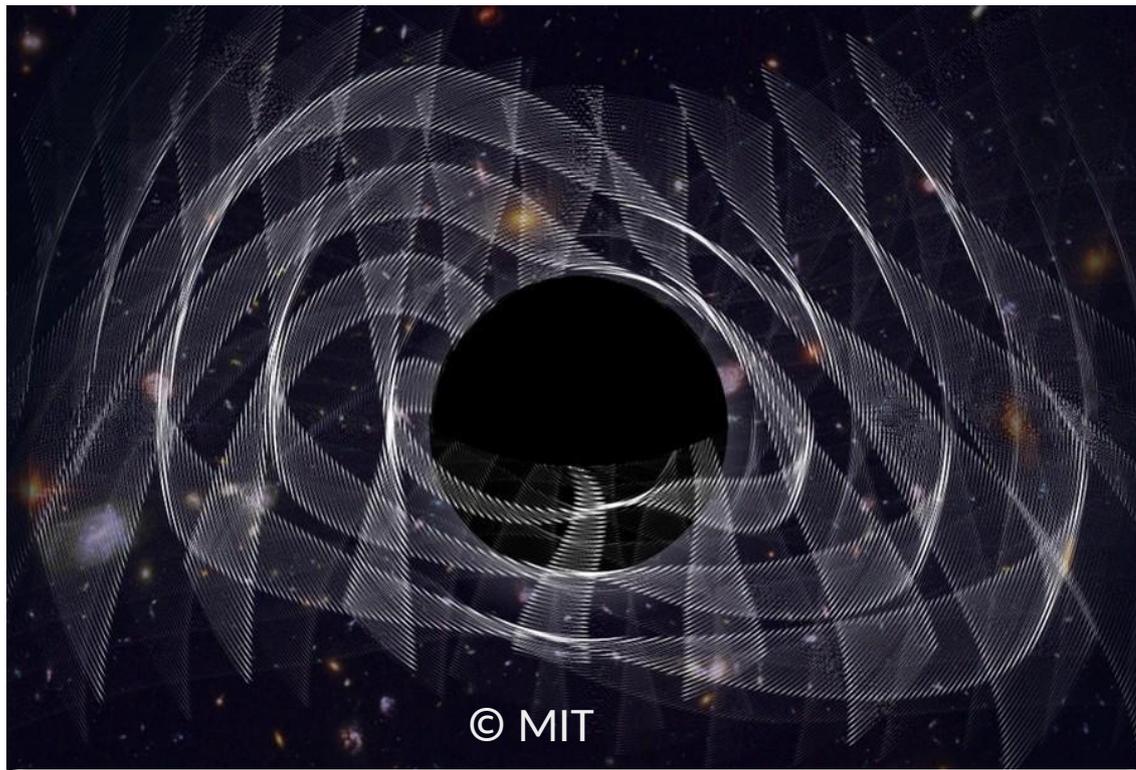
Les trous noirs

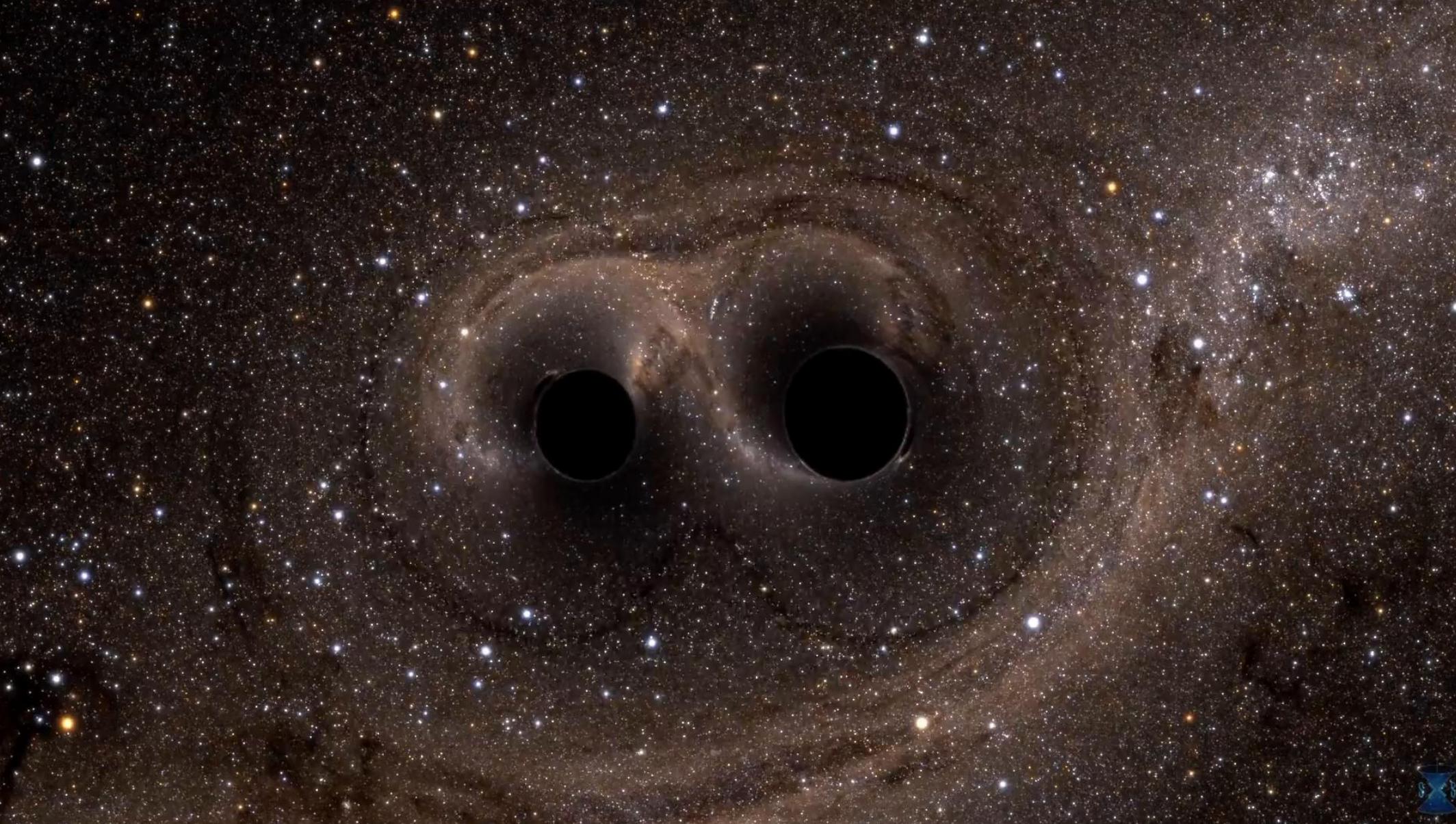


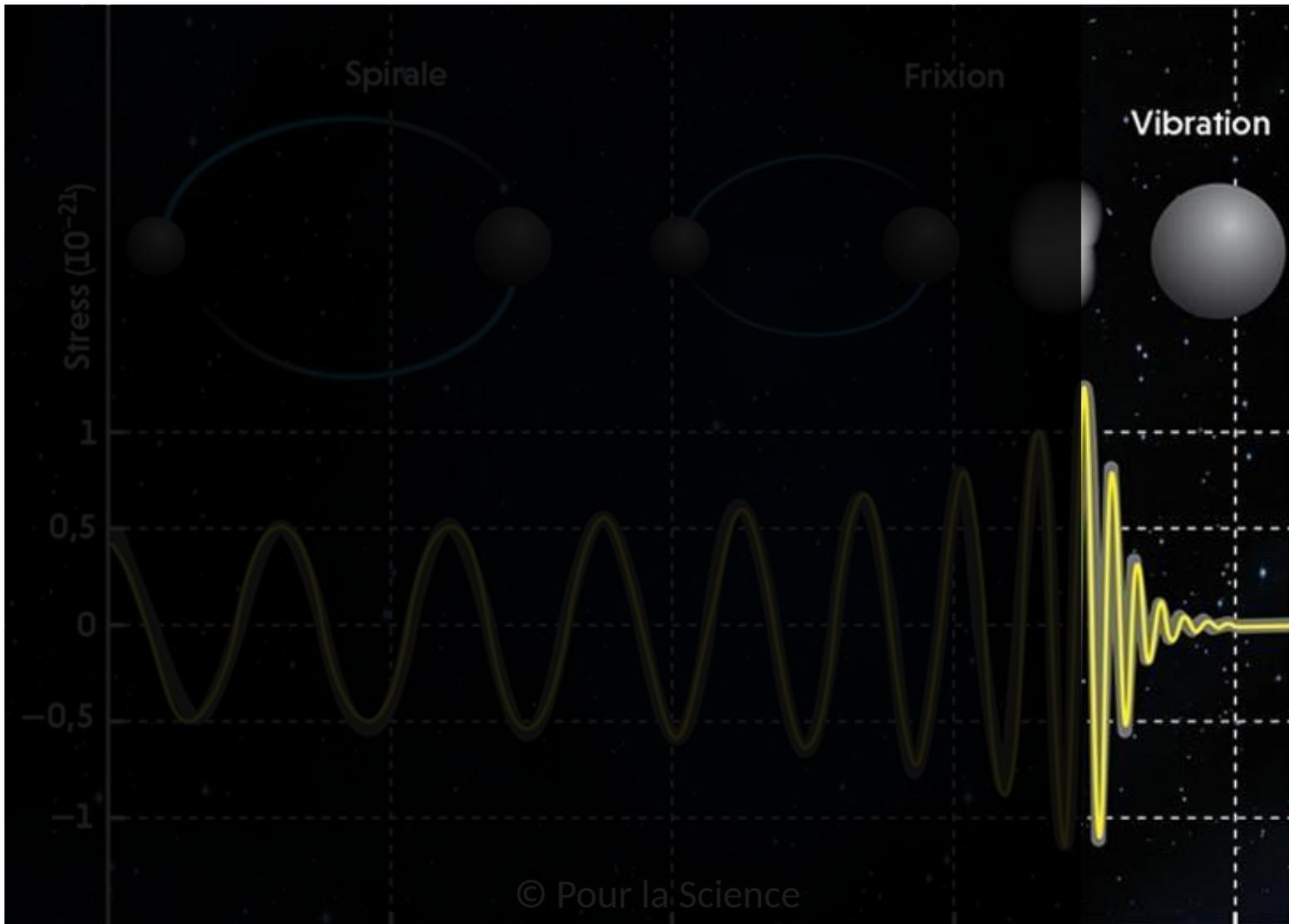
M87*

© Event Horizon Telescope



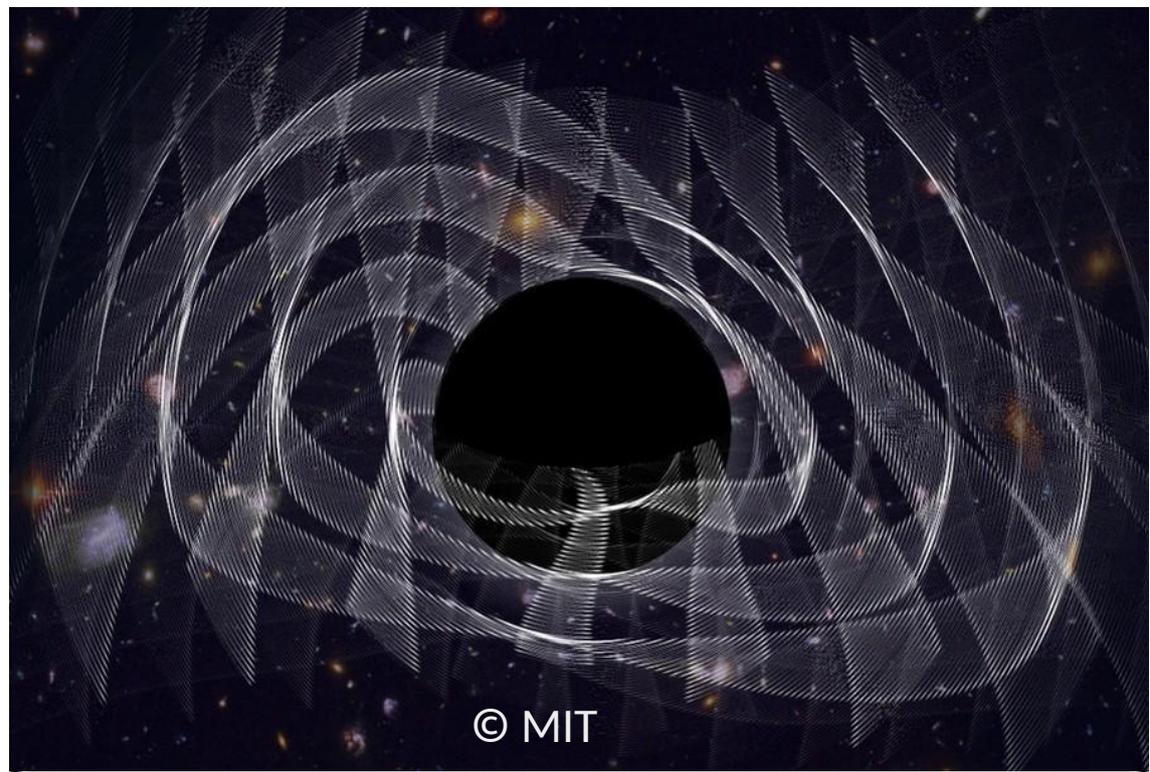




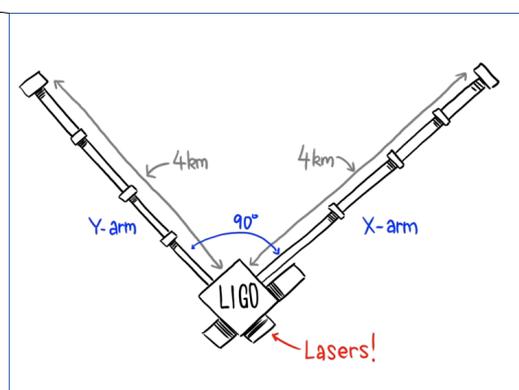
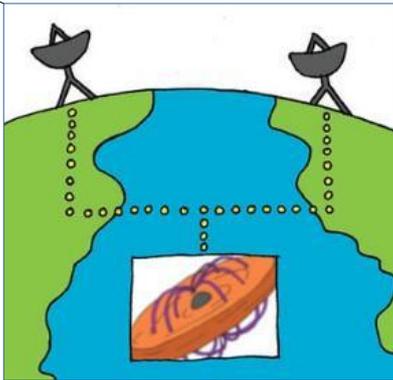


M87*

© Event Horizon Telescope

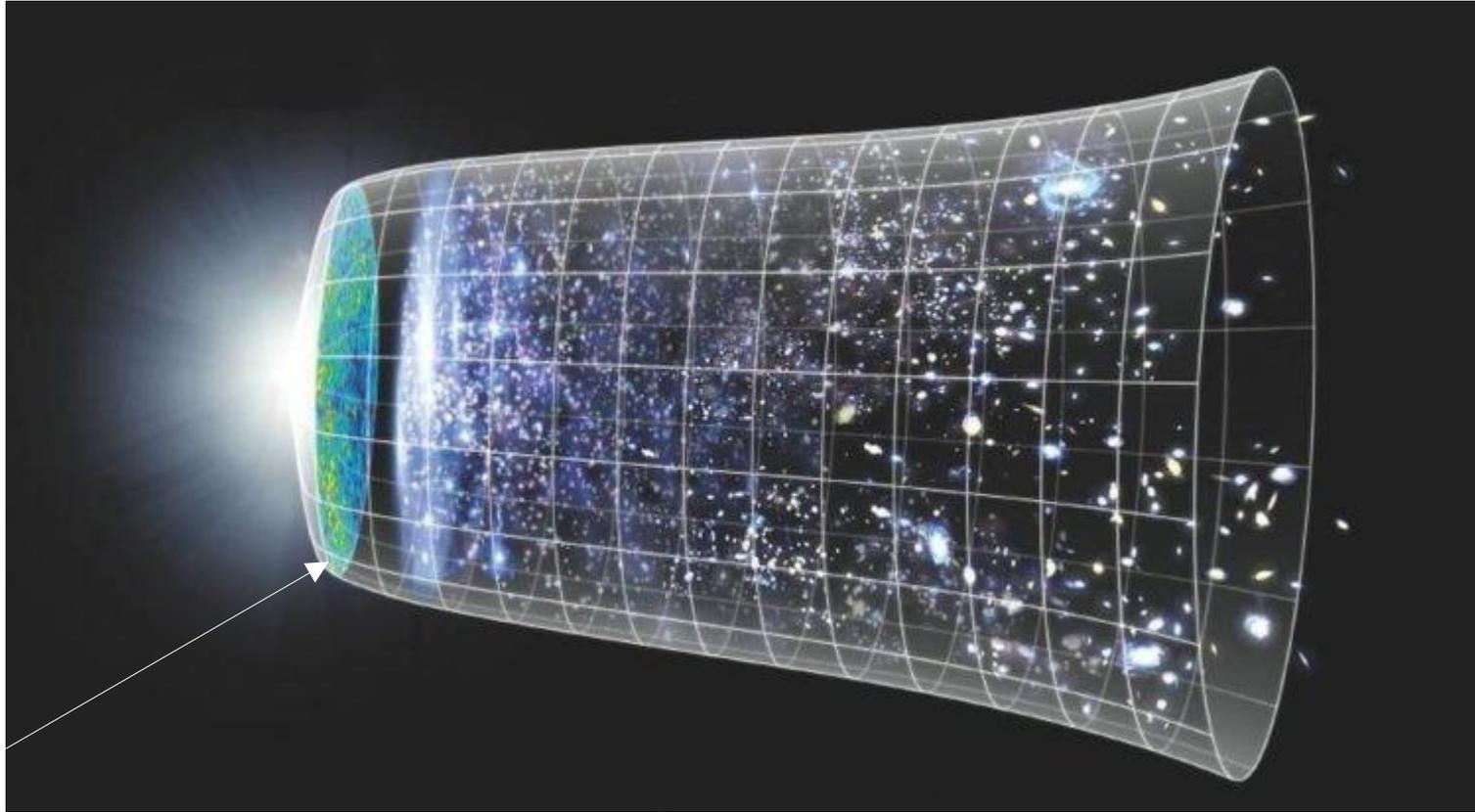


© MIT



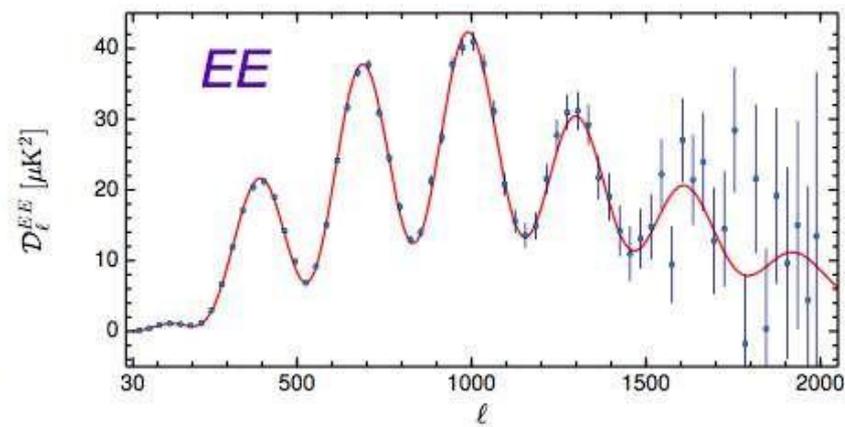
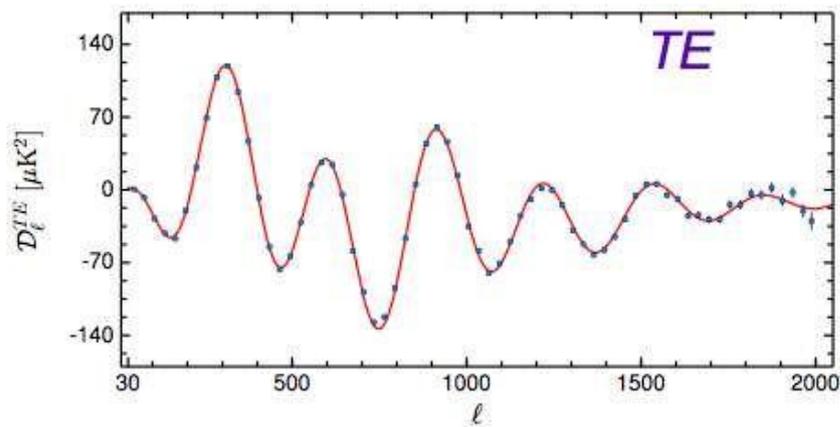
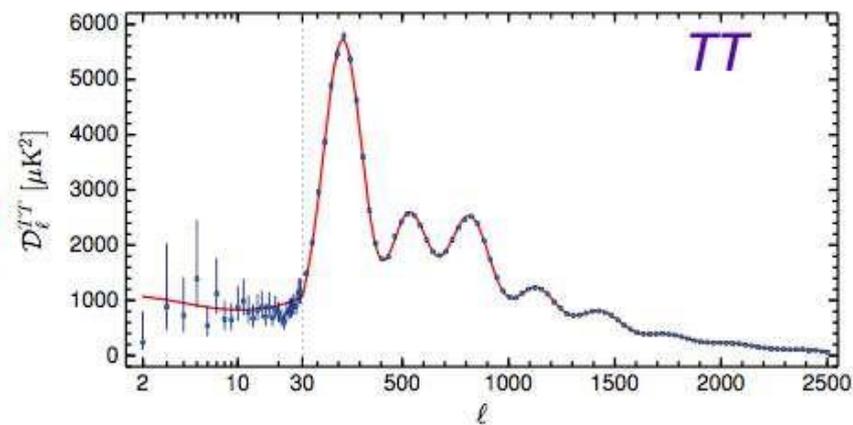
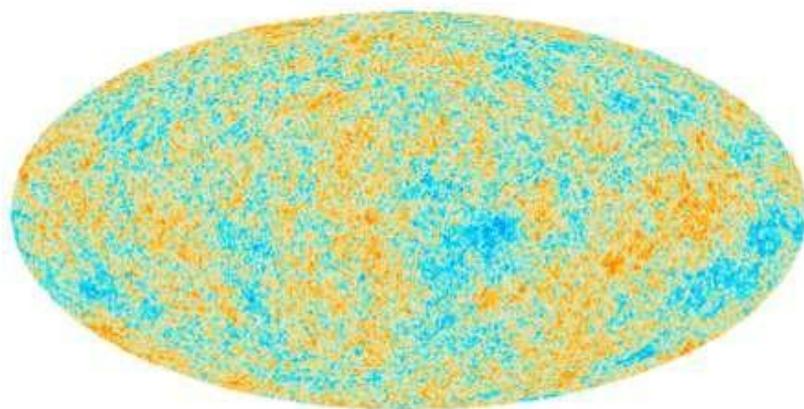
Le fond diffus cosmologique

Fond diffus
cosmologique



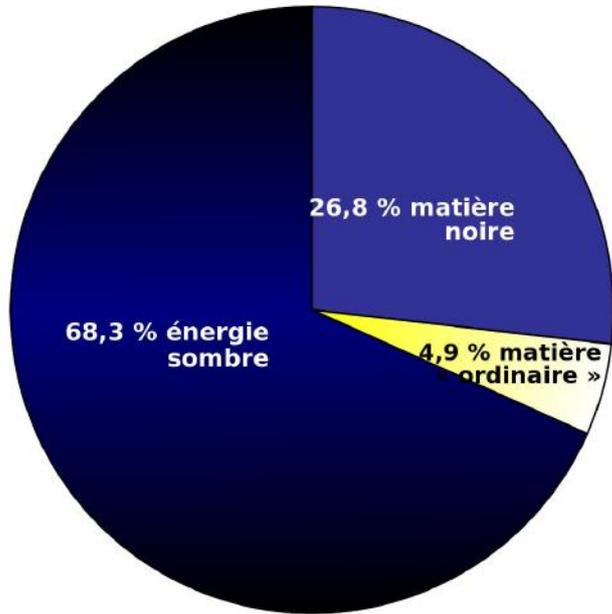
→ t

Le rayonnement fossile mesuré par Planck



Les problèmes de la relativité générale

Matière et énergie noire?



© Wikipedia/Planck

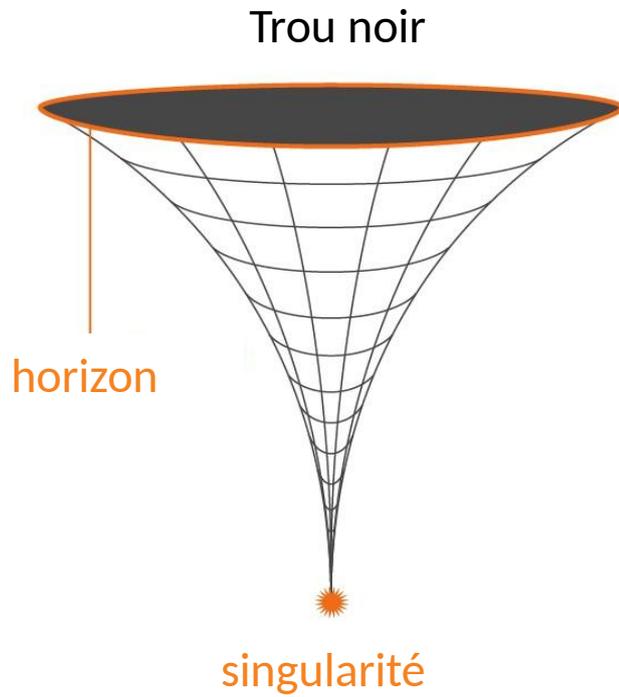


Le problème des singularités

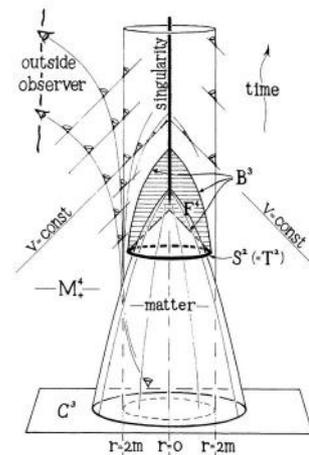


© CNN

Prix Nobel de Physique 2020 à Roger Penrose: « Pour la découverte que la formation des trous noirs était une prédiction robuste de la relativité générale »



© Quanta Magazine



Le(s) problème(s) de la gravitation quantique

Le principe de Heisenberg et les propriétés des trous noirs en RG semble indiquer une perte de sens à la notion d'espace-temps aux échelles les plus petites

$$\Delta X \Delta P \geq \frac{\hbar}{2}$$

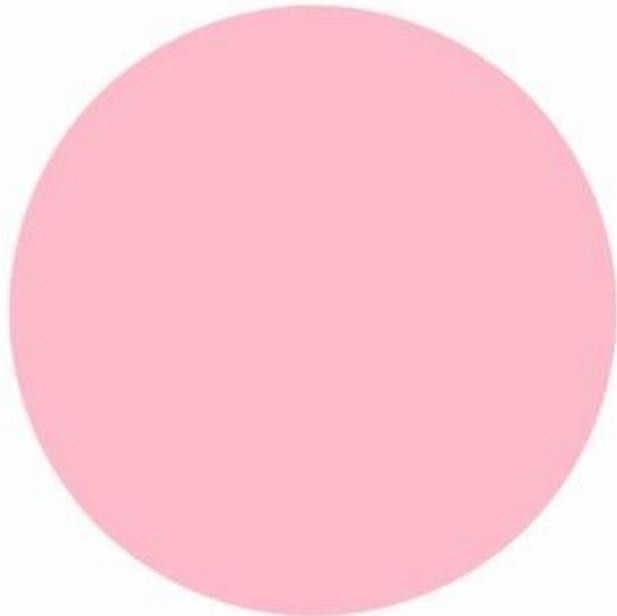
$$\Delta T \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}$$

Inégalités de Heisenberg

$$l_{TN} = 2 G E / c^4$$

Taille d'un trou noir

ΔP



ΔX

Heisenberg

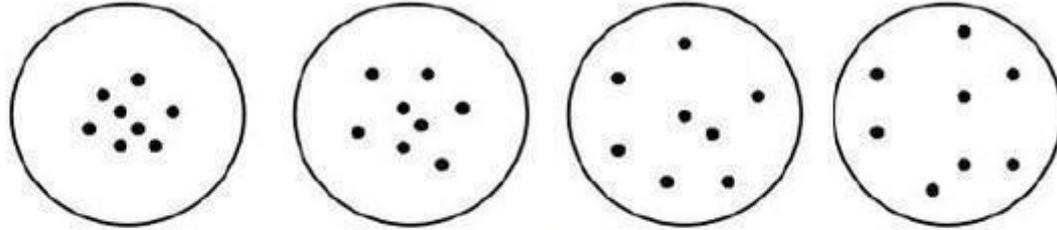
$$\Delta X \Delta P \geq \frac{\hbar}{c^2}$$

Le problème de la faible entropie initiale du modèle du big bang chaud

Augmentation de l'entropie



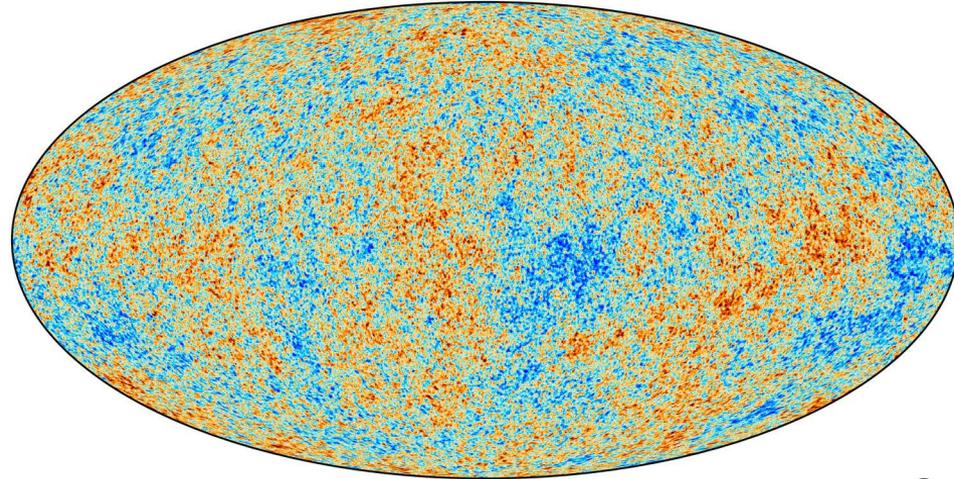
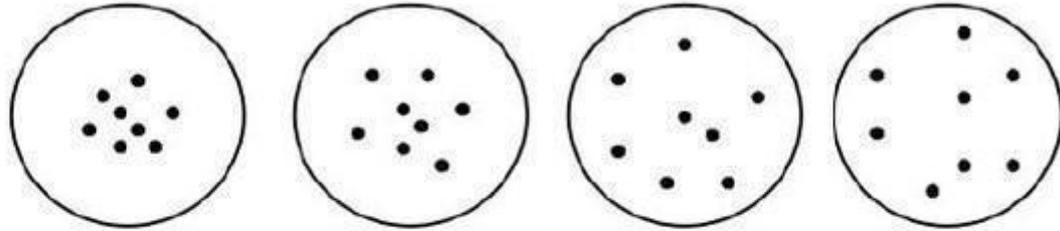
Forces répulsives



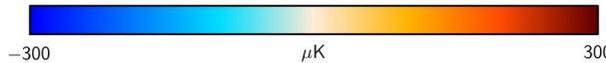
Augmentation de l'entropie



Forces répulsives



$$\frac{\Delta T}{T} \sim 0.0001$$

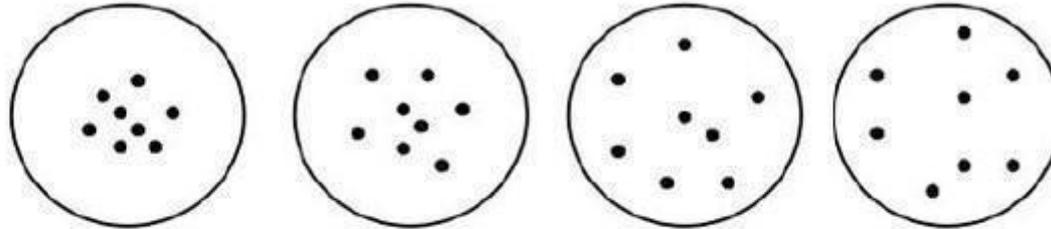


© ESA/Planck
Collaboration

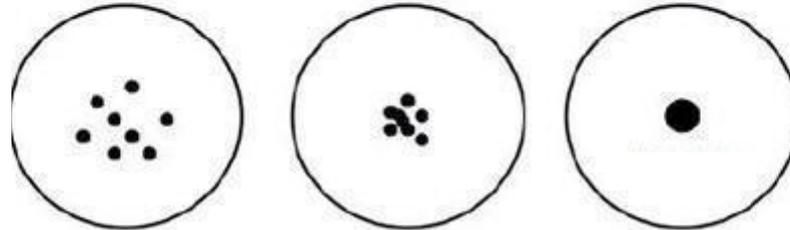
Augmentation de l'entropie



Forces répulsives

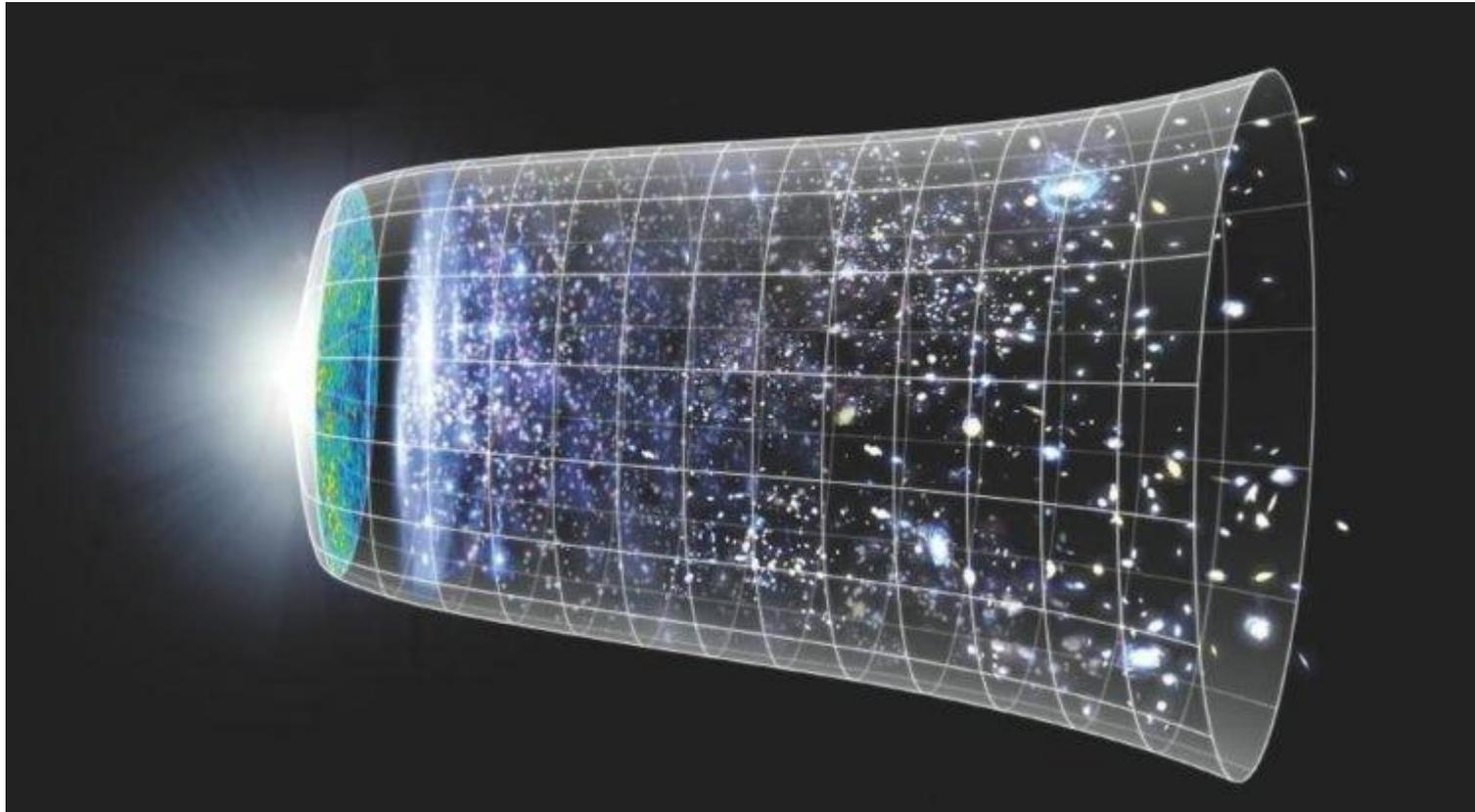


Forces attractives



Pourquoi l'entropie de l'univers primordiale semble si faible? et pourquoi une telle différence entre la matière et la gravitation?

Le problème de l'inflation



Le problème conceptuel des solutions du vide de la relativité générale

3ième principe fondateur de la relativité d'Einstein: le Principe de Mach

« L'espace temps est complètement déterminé par le tenseur énergie-impulsion de la matière. [...] Il ne peut donc pas y avoir d'espace-temps sans matière. » A. Einstein

Aussi appelé, **principe de la relativité de l'inertie**

« Si la solution de de Sitter était valide, cela montrerait que l'introduction de la constante cosmologique ne permet pas d'accomplir le but pour lequel je l'ai introduite. Car, de mon point de vue, la théorie générale de la relativité est satisfaisante seulement si les qualités physiques de l'espace sont totalement déterminés par la matière » A. Einstein

La relativité intriquée*

une simple redéfinition du lien entre la matière et l'espace-temps

*a priori : aucun rapport avec intrication quantique

La relativité intriquée

une simple redéfinition du lien entre la matière et l'espace-temps

Relativité Générale

$$S = \frac{1}{c} \int \sqrt{-g} d^4x \left(\frac{R}{2\kappa} + \mathcal{L}_m \right)$$

κ : constante

R : Courbure de l'espace-temps

\mathcal{L}_m : Matière

En cours d'évaluation!

La relativité intriquée possède la relativité générale comme limite dans certaines situations génériques

Exemple: la théorie converge vers la relativité générale avec l'expansion de l'univers pour de la matière composée d'astres, de matière noire et de radiation électromagnétique.

Satisfait le 3ième principe d'Einstein contrairement à la relativité générale

Relativité Générale

$$S = \frac{1}{c} \int \sqrt{-g} d^4x \left(\frac{R}{2\kappa} + \mathcal{L}_m \right)$$

Relativité Intriquée

$$S = \frac{1}{c} \int \sqrt{-g} d^4x \left(-\frac{\xi}{2} \frac{\mathcal{L}_m^2}{R} \right)$$

Premiers résultats

- Système solaire
- Étoiles à neutrons
- Trous noirs
- Ondes gravitationnelles
- **Cosmologie**

Physics Letters B 751 (2015) 576–578

Contents lists available at ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb

Merging matter and geometry in the same Lagrangian

Hendrik Ludwig^{a,b,c}, Olivier Minazzoli^{d,c,e,*}, Salvatore Capozziello^{f,g,h}

CrossMark

PHYSICAL REVIEW D **98**, 124020 (2018)

Rethinking the link between matter and geometry

PHYSICAL REVIEW D **103**, 024034 (2021)

Compact objects in entangled relativity

IOP Publishing Classical and Quantum Gravity
Class. Quantum Grav. **38** (2021) 137003 (7pp) <https://doi.org/10.1088/1361-6382/ac0589>

Note

De Sitter space-times in entangled relativity

Eur. Phys. J. C (2021) 81:640
<https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09441-w>

Regular Article - Theoretical Physics

THE EUROPEAN
PHYSICAL JOURNAL C



Charged black hole and radiating solutions in entangled relativity



Son potentiel

Transition de phase: gravitation répulsive à haute énergie?

Gravitation répulsive?

Relativité Intriquée

$$S = \frac{1}{c} \int \sqrt{-g} d^4x \left(-\frac{\xi}{2} \frac{\mathcal{L}_m^2}{R} \right)$$

ξ : constante

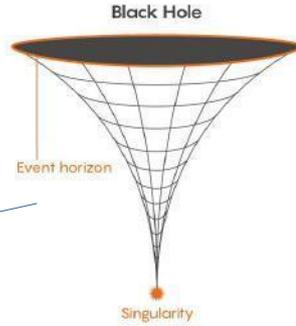
R : Courbure de l'espace-temps

\mathcal{L}_m : Matière

Gravitation répulsive à haute énergie:

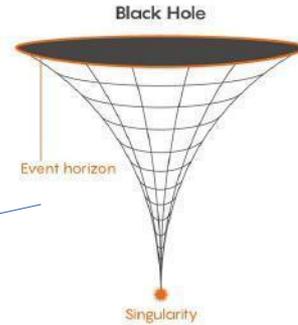
Une solution potentielle à 4 problèmes

- Les singularités (trous noir et big bang)



Gravitation répulsive à haute énergie: Une solution potentielle à 4 problèmes

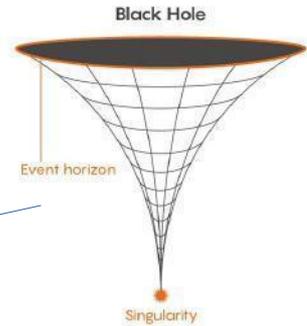
- Les singularités (trous noir et big bang)
- Le sens opérationnel de l'ET à l'échelle de Planck



Gravitation répulsive à haute énergie:

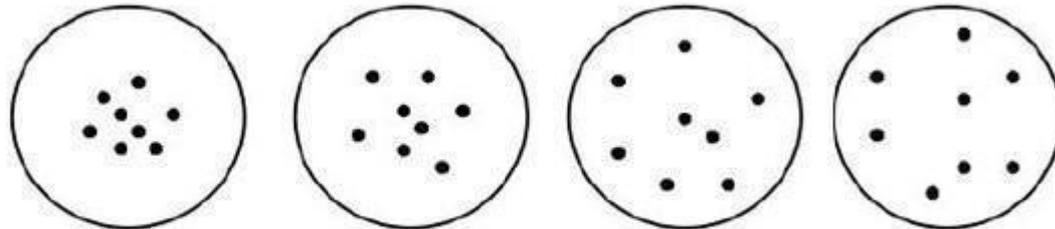
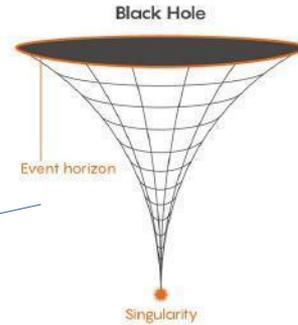
Une solution potentielle à 4 problèmes

- Les singularités (trous noir et big bang)
- Le sens opérationnel de l'ET à l'échelle de Planck
- L'inflation



Gravitation répulsive à haute énergie: Une solution potentielle à 4 problèmes

- Les singularités (trous noir et big bang)
- Le sens opérationnel de l'ET à l'échelle de Planck
- L'inflation
- Faible entropie univers primordial



Quels sont les paramètres « libres » de la théorie?

Une constante sans conséquence classique

Relativité Générale

$$S = \frac{1}{c} \int \sqrt{-g} d^4x \left(\frac{R}{2\kappa} + \mathcal{L}_m \right)$$

κ : constante

Relativité Intriquée

$$S = \frac{1}{c} \int \sqrt{-g} d^4x \frac{\xi}{\kappa} \left(\frac{R}{2\kappa} + \mathcal{L}_m \right)$$

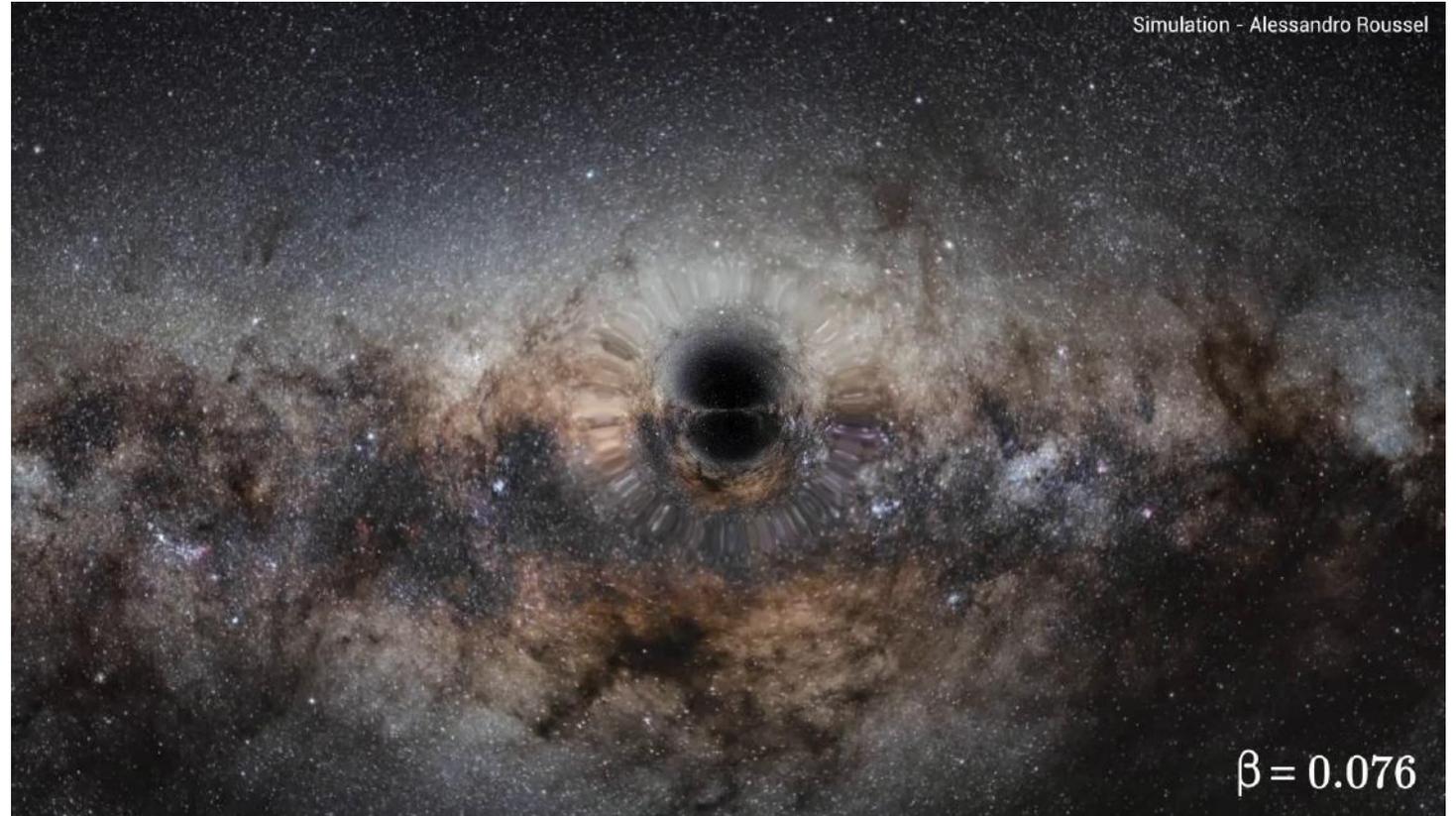
$\mathcal{L}_m \neq \emptyset$ κ : champ ξ : constante

Conclusion

- La relativité intriquée
 - possède la RG comme limite
 - semble produire de bonnes prédictions
 - ne peut être définie en l'absence de matière, tel qu'originellement souhaité par Einstein
 - n'a pas de paramètre libre (au niveau classique)
 - La constante de Newton devient un champ
 - pourrait résoudre certains problèmes connus de la RG

Mais son évaluation ne fait que commencer et il est tout à fait possible (même très probable), à ce stade, qu'elle ne colle pas avec les lois observées de la nature!

Merci!



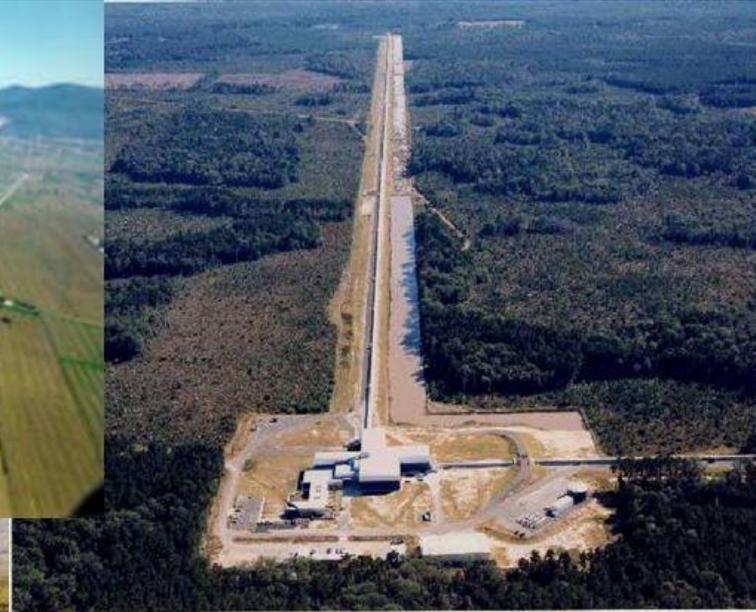
Simulations de lentilles gravitationnelles en *relativité intriquée*

Les détecteurs : LIGO et Virgo

Italie :
3 km



Louisiane :
4 km

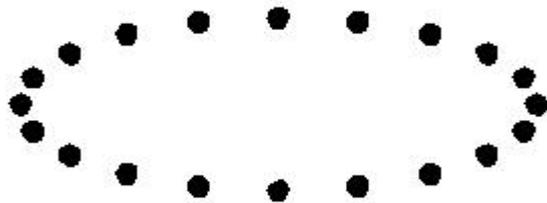


Washington :
4 km



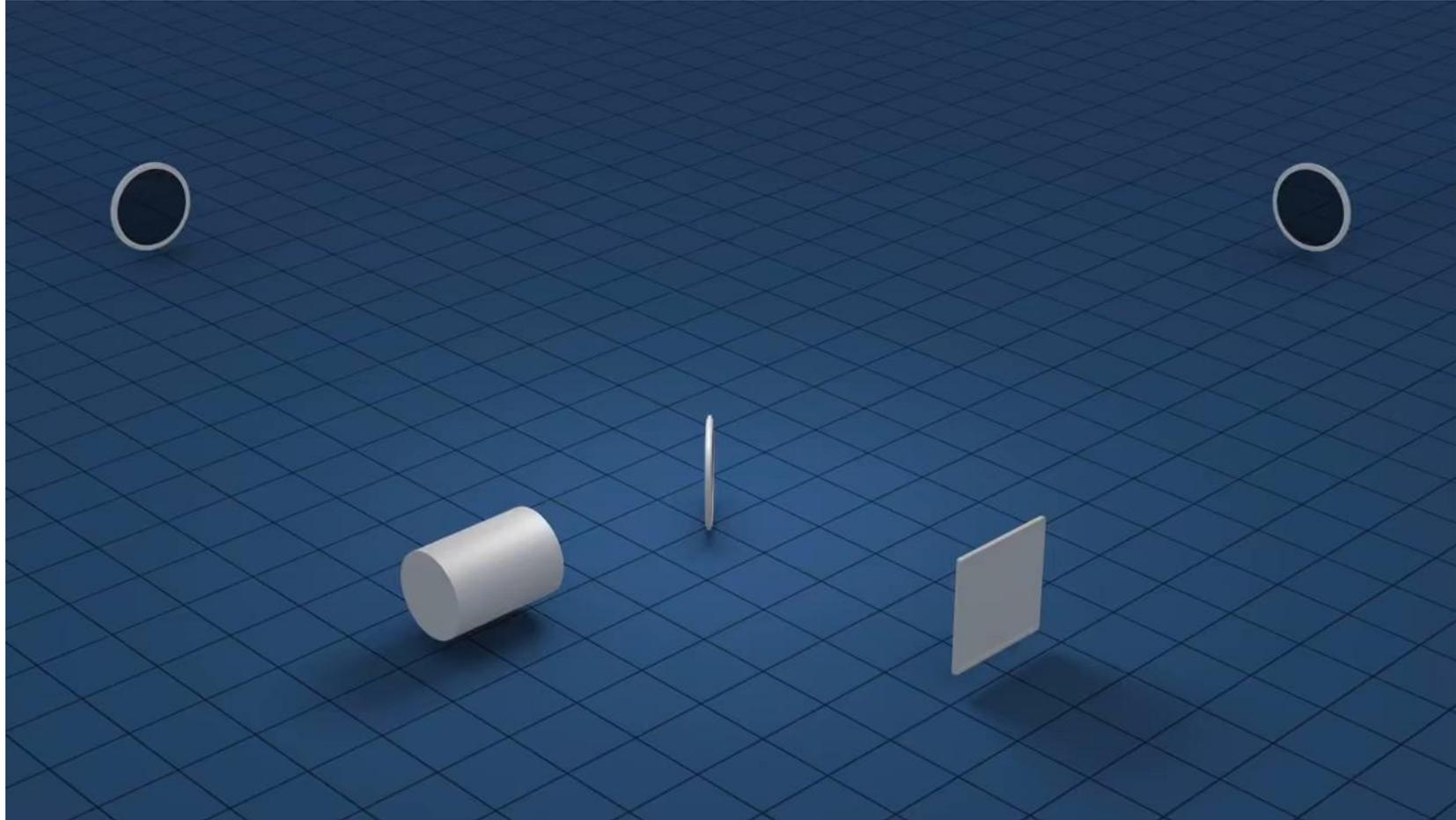
Principe des détecteurs

Une onde gravitationnelle passe et modifie la position relative des points de l'espace



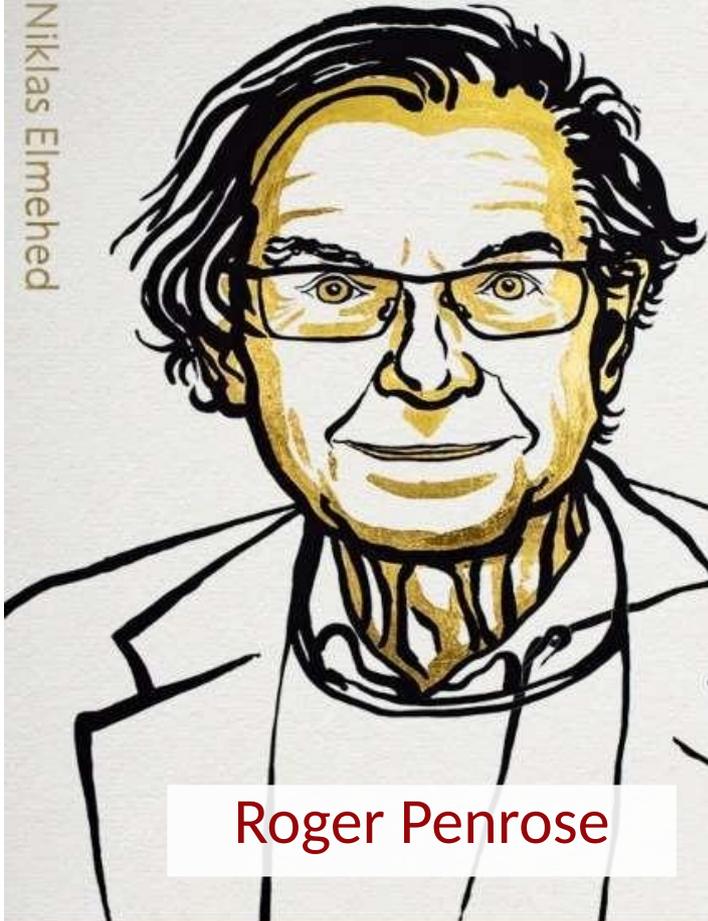
Il faut mesurer cette variation de distance
→ interféromètre de Michelson

Principe des détecteurs : interféromètre de Michelson



Prix Nobel de Physique 2020

Illustrations: Niklas Elmehed



Roger Penrose

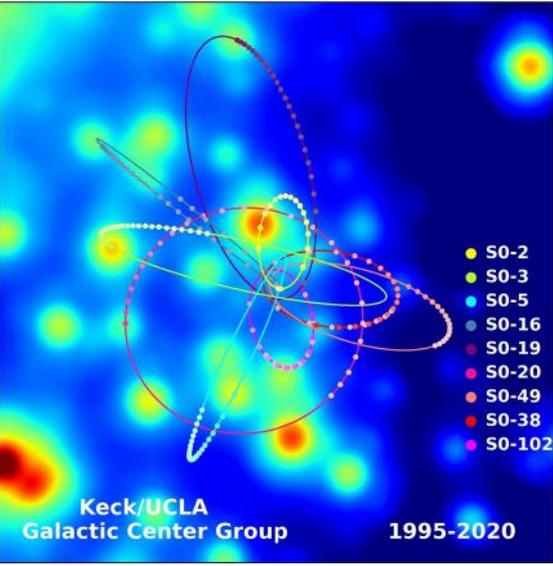


Reinhard Genzel

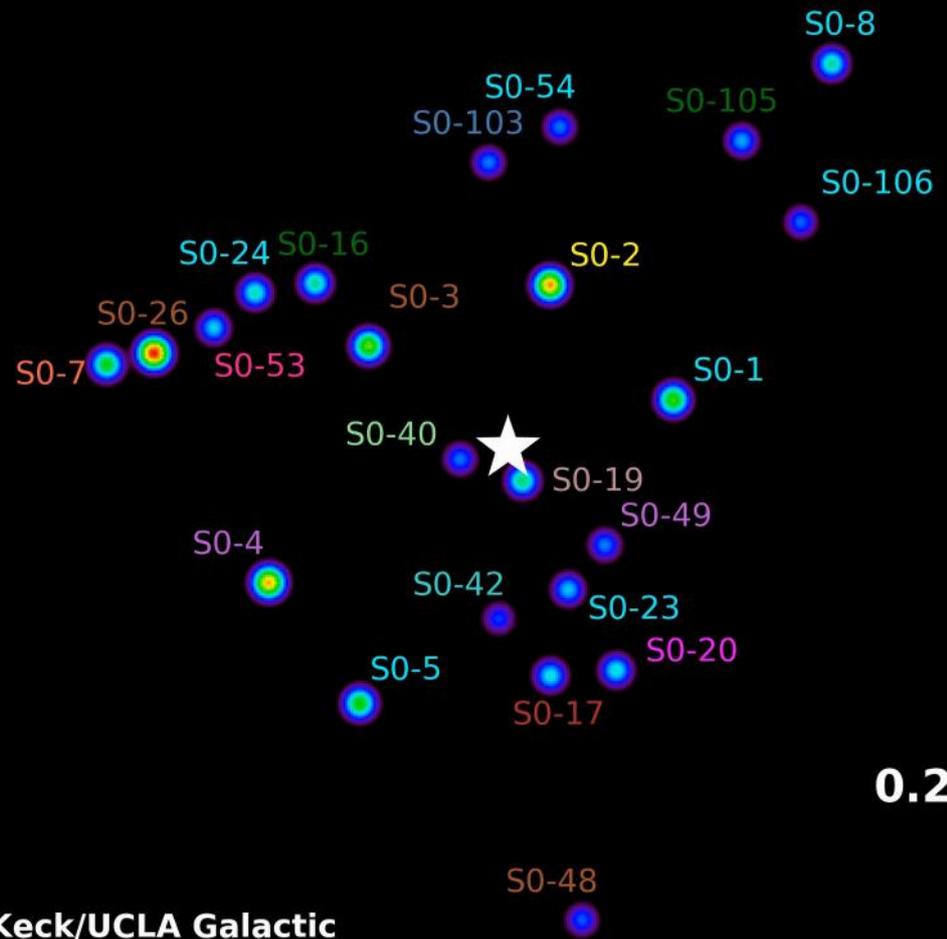


Andrea Ghez

« Pour la découverte d'un objet compact supermassif au centre de notre galaxie »



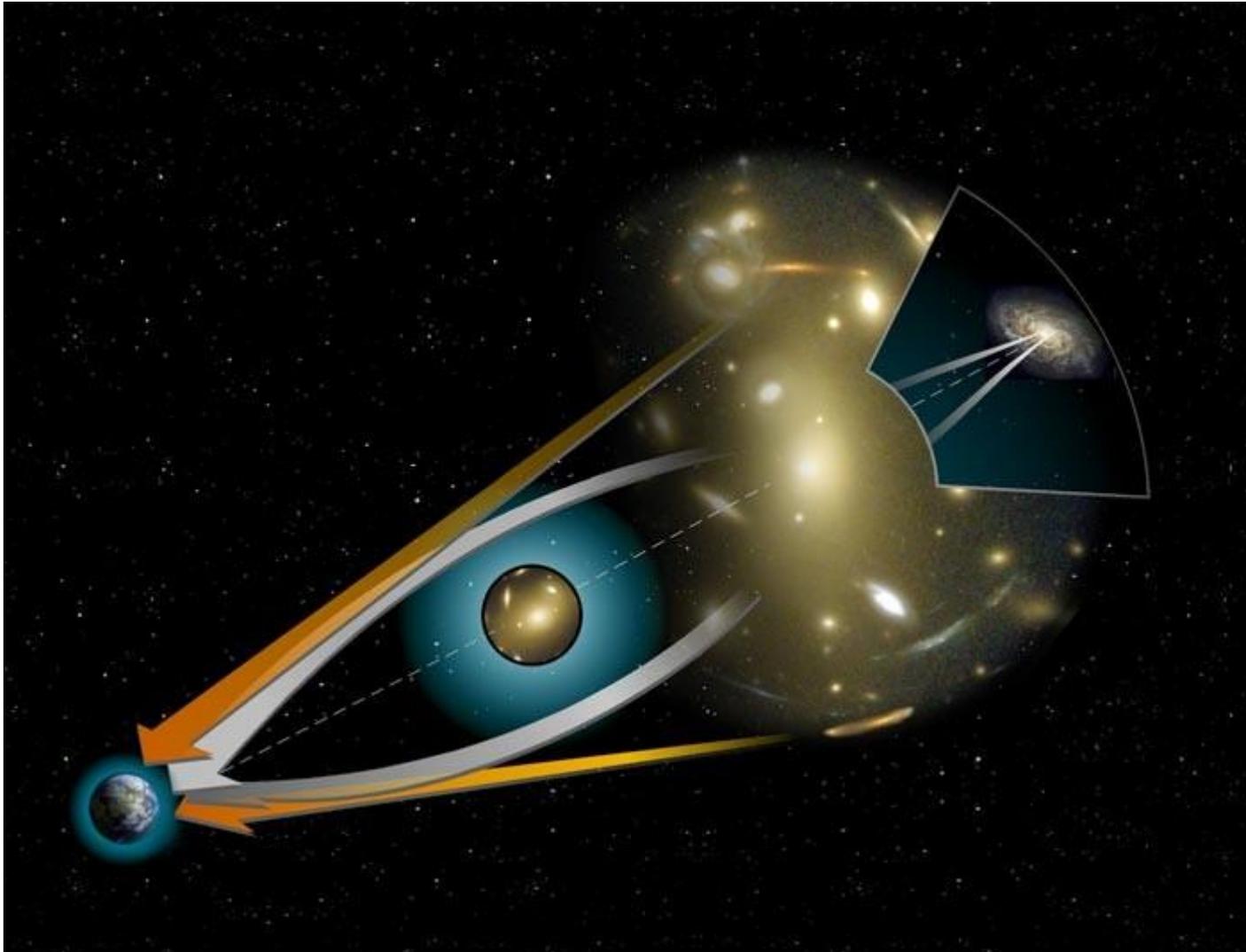
1995.5

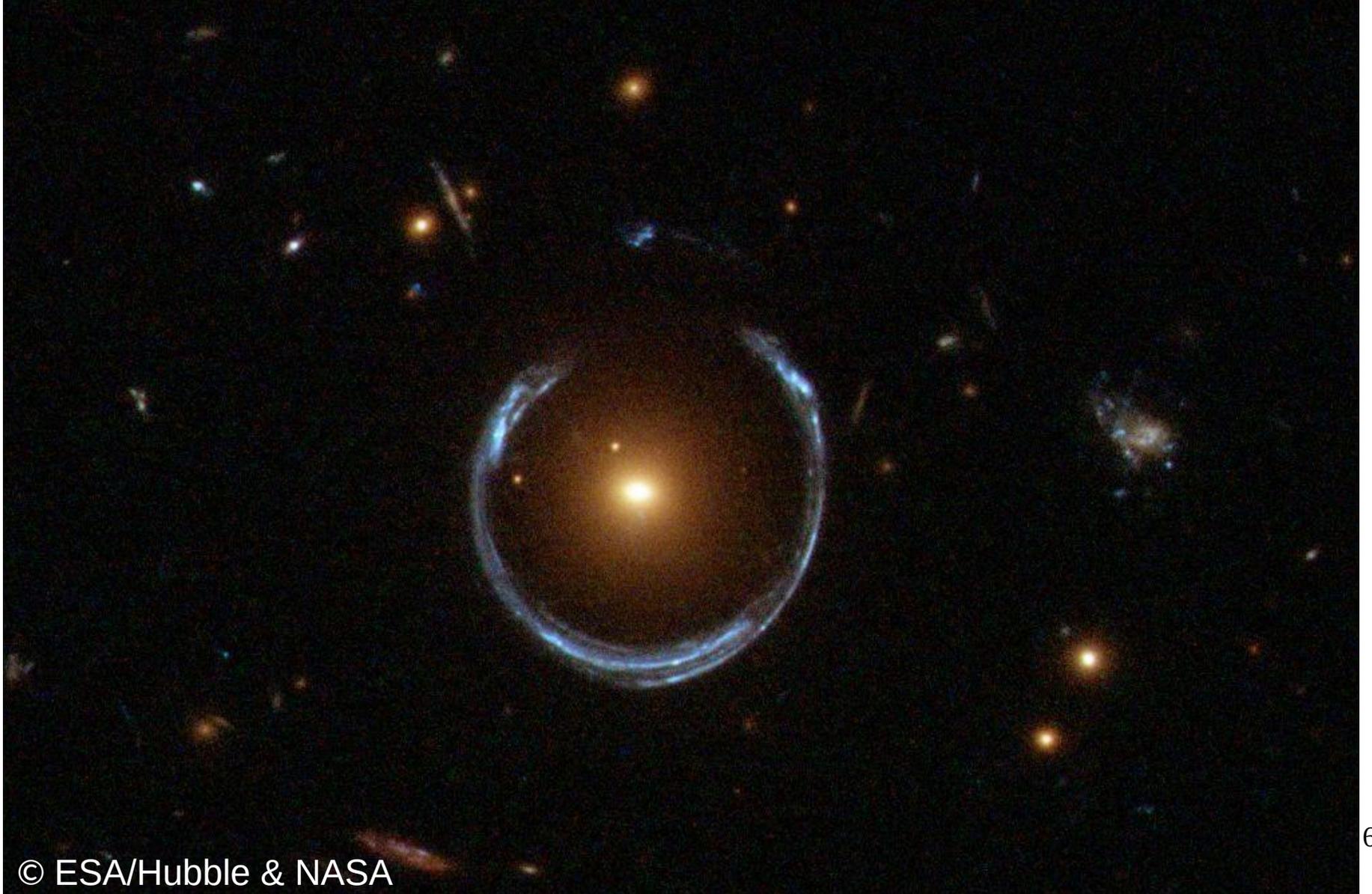


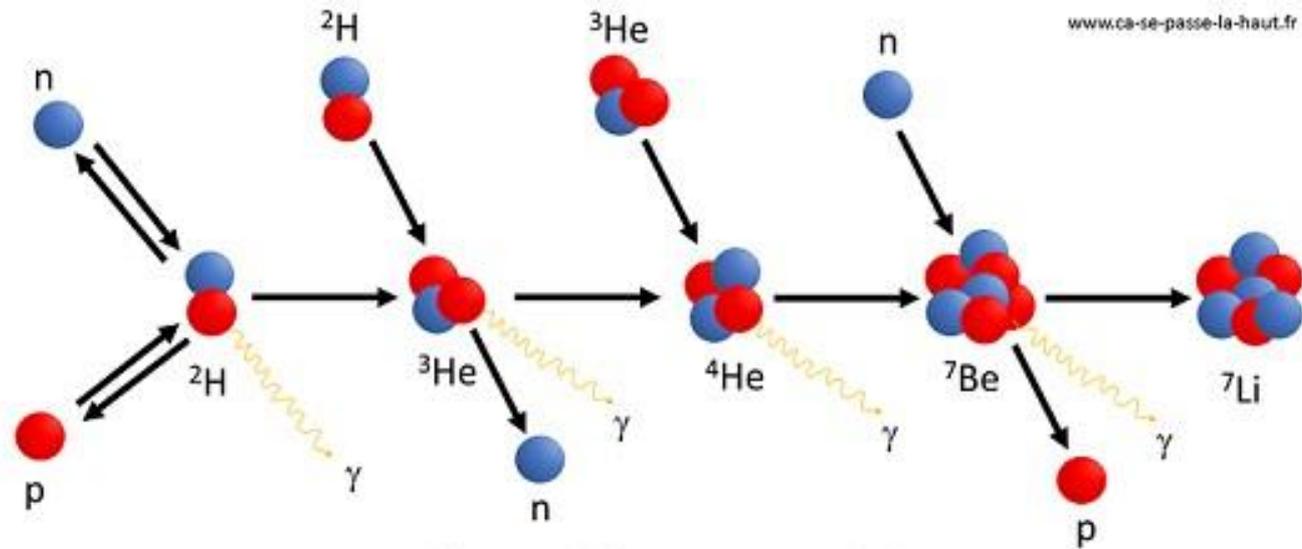
0.24"

Keck/UCLA Galactic
Center Group

Les lentilles gravitationnelles

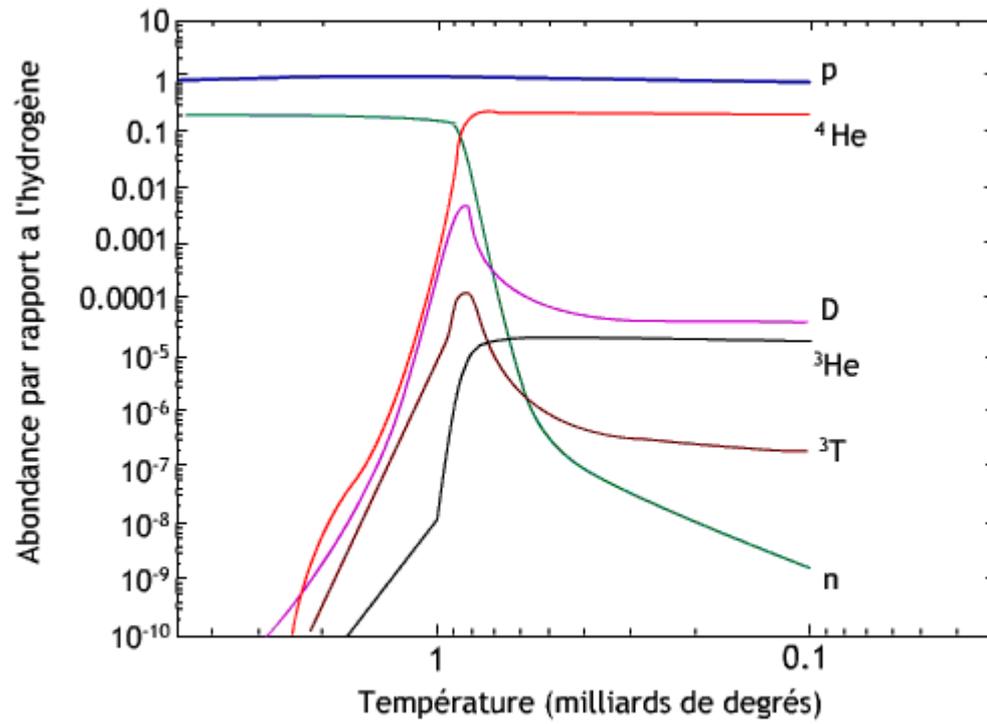






Nucléosynthèse primordiale

© www.ca-se-passe-la-haut.fr



© E. Vangioni-Flam, IAP

