Une physique au delà des modèles Standards

Yann Mambrini
Directeur de Recherche au CNRS
Scientifique Associé au CERN
Membre de l'Académie des Sciences de Lorraine

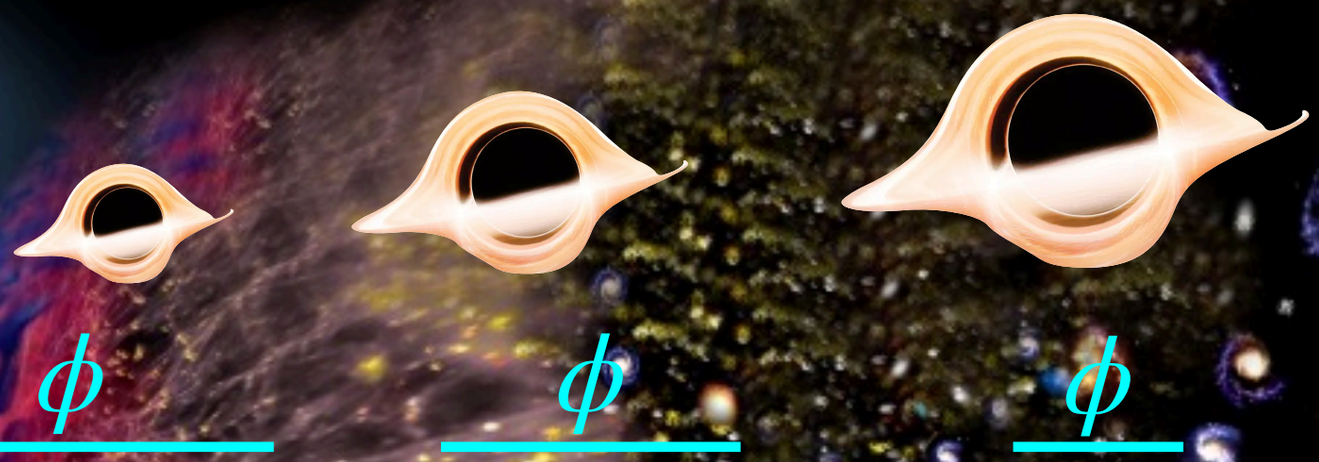
Conférence Société Française de Physique + G.S. Paris-Sacay, 3 décembre 2025

Une physique au delà des modèles Standards

Yann Mambrini
Directeur de Recherche au CNRS
Scientifique Associé au CERN
Membre de l'Académie des Sciences de Lorraine

Conférence Société Française de Physique + G.S. Paris-Sacay, 3 décembre 2025

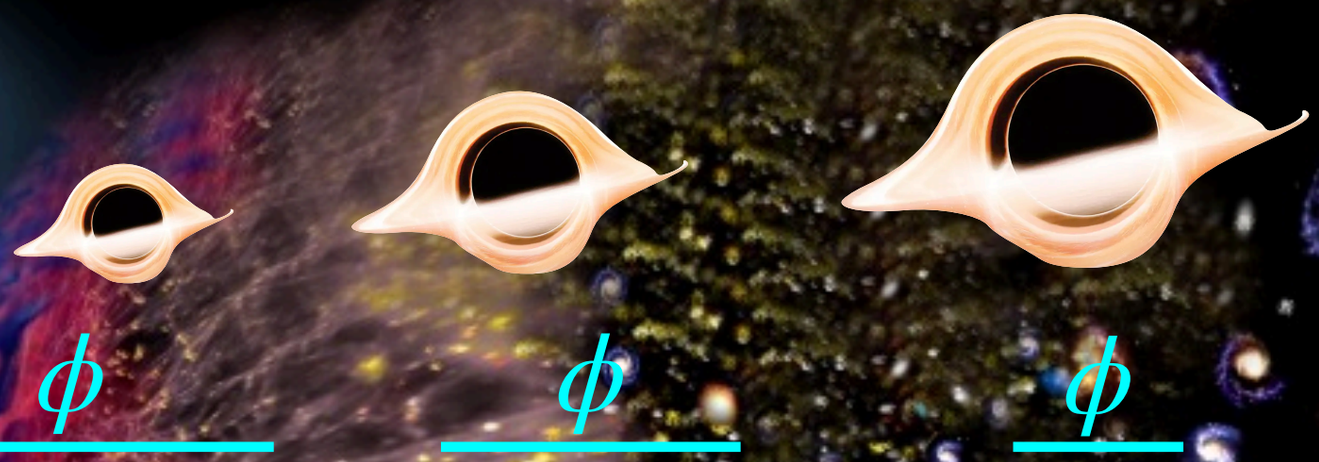
Une physique au delà des modèles Standards



Yann Mambrini, IJCLab, Université Paris-Saclay

Conférence Société Française de Physique + G.S. Paris-Sacay, 3 décembre 2025

Une physique au delà des modèles Standards



Yann Mambrini, IJCLab, Université Paris-Saclay

Conférence Société Française de Physique + G.S. Paris-Sacay, 3 décembre 2025

Yann Mambrini

LA NOUVELLE PHYSIQUE

PRIX LOURRIENNE

2024

Le prix littéraire au service des Sciences

SCIENCES

YANN MAMBRINI

LA NOUVELLE PHYSIQUE

COMPRENDRE LES LOIS ULTIMES DU COSMOS



ESPACES libres

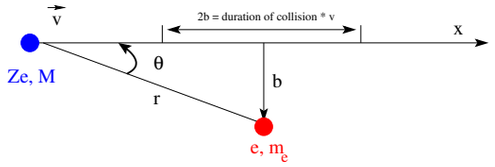


Fig. 5.9 Interaction of a high energy particle of charge Ze with an electron at rest.

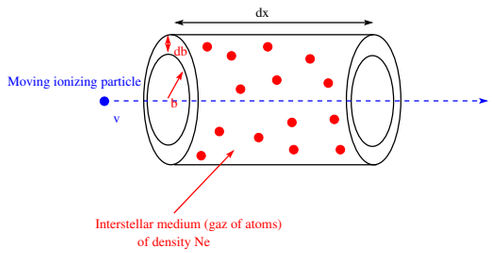


Fig. 5.10 Moving particle in an interstellar medium of density N_e.

distance at which the influence of the traveling particle on the electron is negligible. It corresponds roughly to the time when the orbital period is lower than the typical interaction time. In other words, if the electron takes more time to move around the nucleus than to interact with the moving particle, the electromagnetic influence of the later becomes weak. If one write τ the interacting time and ν_0 the frequency of the rotating electron in the atom ($\nu_0 = \omega_0/2\pi$), it corresponds to

$$\tau \simeq \frac{2b}{v} < \frac{1}{\nu_0} \Rightarrow b < \frac{v}{2\nu_0} = b_{max} \tag{5.37}$$

The lower limit b_{min} can be obtained if we suppose, by a quantum treatment and the application of the uncertainty principle, that the maximum energy transfer is $\Delta p_{max} = 2m_e v$ (because as we discussed earlier, the maximum velocity transferred to the electron is $2v$) from $\Delta p \Delta x \gtrsim \hbar$ (Heisenberg principle) we have $\Delta x \gtrsim \hbar/2m_e v$. We can then write

The two parts of the Lagrangian one needs to compute the scalar annihilation of Dark Matter $SS \to h \to \bar{f}f$ are (see B.235)[9]

$$\mathcal{L}_{HSS} = -\lambda_{HS}\frac{M_W}{2g}hSS \;\to C_{HSS} = -i\frac{\lambda_{HS}M_W}{g}$$
$$\text{and}\quad \mathcal{L}_{Hff} = -\frac{gm_f}{2M_W}h\bar{f}f \;\to C_{Hff} = -i\frac{gm_f}{2M_W} \tag{B.145}$$

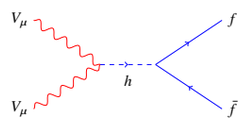
which gives

$$|\mathcal{M}|^2 = \frac{\lambda_{HS}^2 m_f^2 (s/2 - 2m_f^2)}{(s - M_H^2)^2 + \Gamma_H^2 M_H^2} \tag{B.146}$$

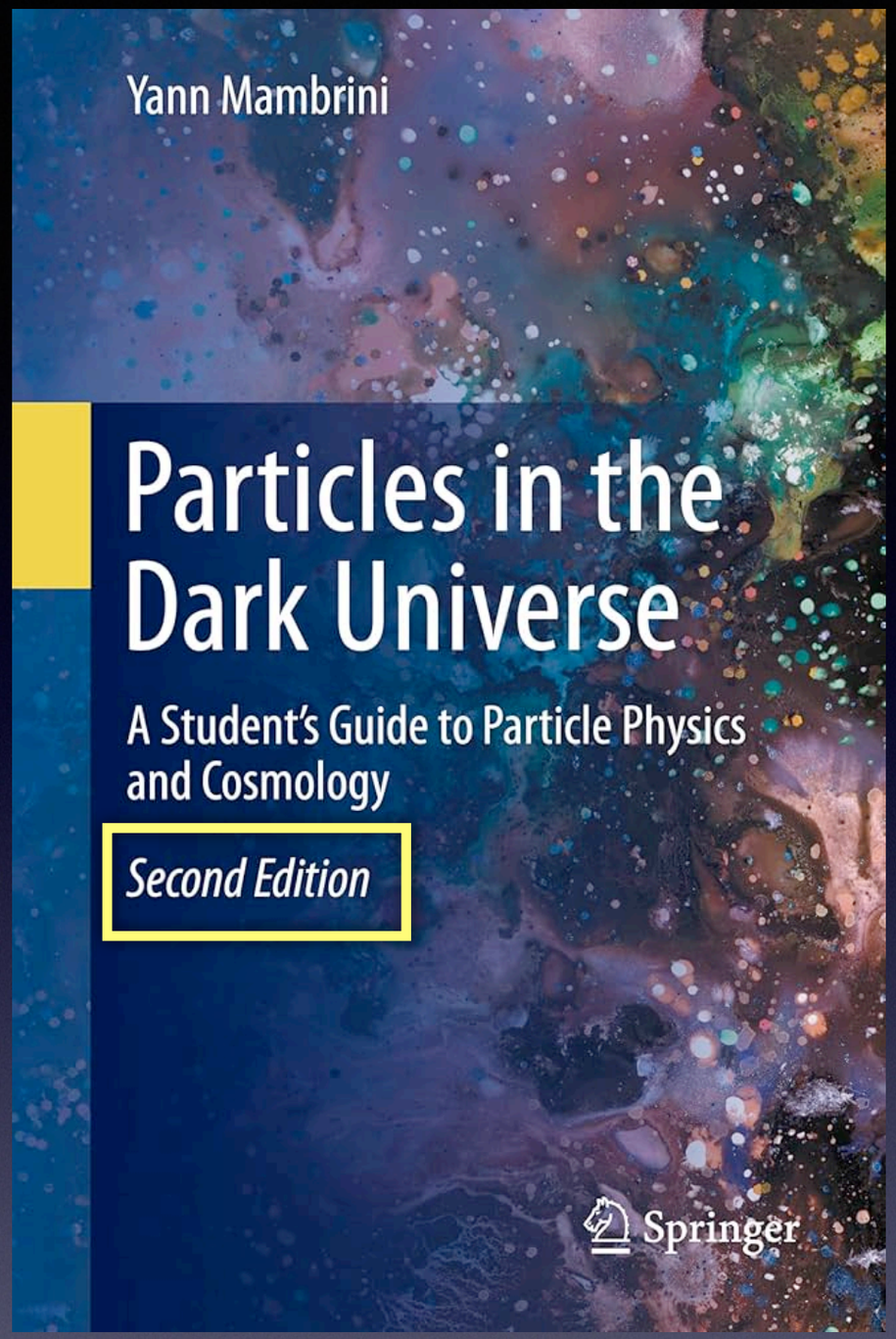
Γ_H being the width of the Higgs boson (including its own decay into SS, see next section). When ones implement this value of $|\mathcal{M}|^2$ into Eq.(B.111) one obtains after simplification

$$\langle\sigma v\rangle^S_{f\bar{f}} = \frac{|\mathcal{M}|^2}{8\pi s}\sqrt{1 - \frac{m_f^2}{M_S^2}} = \frac{\lambda_{HS}^2(M_S^2 - m_f^2)m_f^2}{16\pi M_S^2(4M_S^2 - M_H^2)^2}\sqrt{1 - \frac{m_f^2}{M_S^2}}. \tag{B.147}$$

B.4.4.11 Annihilation in the case of vectorial Dark Matter to pairs of fermions



One can compute this annihilation cross section by the normal procedure or noticing that a neutral vectorial dark matter of spin 1 corresponds to 3 degrees of freedom. After averaging on the spin one can then write $\langle\sigma v\rangle^V = \frac{3}{3\times3}\langle\sigma v\rangle^S = \frac{1}{3}\langle\sigma v\rangle^S$. The academical computation for $V_\mu(p_1)V_\mu(p_2) \to f\bar{f}$ gives



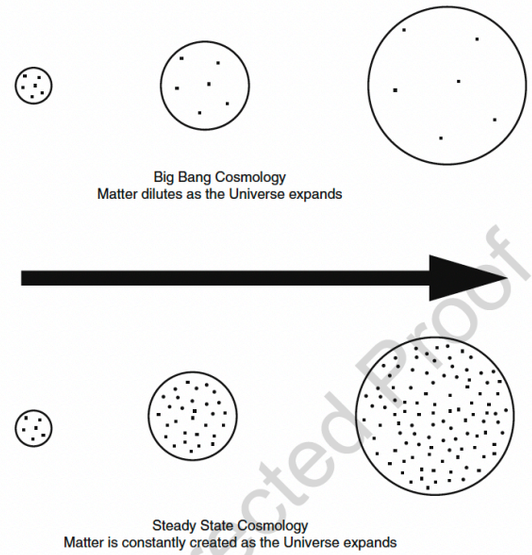


Fig. 2.9 Difference between the Steady State and the Big Bang cosmology

with

$$H_0^2 = \frac{\rho_m}{3M_P^2}\,. \tag{2.123}$$

and z the redshift being defined by Eq. (2.23). Evolution is therefore similar in every way to a de Sitter type Universe, but with a constant density of matter. It is therefore not possible to distinguish these two models by the flow of a source L_0 at $r = R_0\chi$, which will be redshifted in the same way in both cases

$$L = \frac{L_0}{4\pi r^2(1+z)^2}\,. \tag{2.124}$$

On the other hand, *the number of sources* is completely different, since in the case of the steady state, the density remaining constant, the number of sources decreases in the past (for a smaller volume, fewer sources) whereas for Big Bang type models,

Uncorrected Proof

650+ pages, from inflation to dark matter detection.

2nd edition (+ PBH + unification + history of cosmological models…)

All what is needed to compute cross-sections, relic abundance, and retrace the history of a Dark Universe.

Preface and forewords by K. Olive, J. Peebles and J. Silk

Based (mainly) on

M. R. Haque, E. Kpatcha, D. Maity and **Y.M.**, ``Primordial black hole versus inflaton,"
Phys. Rev. D **109** (2024) no.2, 023521 [arXiv:2309.06505 [hep-ph]].

M. Riajul Haque, E. Kpatcha, D. Maity and **Y.M.**, ``Primordial black hole reheating,"
Phys. Rev. D **108** (2023) no.6, 063523 [arXiv:2305.10518 [hep-ph]].

B. Barman, S. Jyoti Das, M. R. Haque and **Y.M.**, ``Leptogenesis, primordial gravitational waves, and PBH-induced reheating,"
[arXiv:2403.05626 [hep-ph]].

M. Gross, E. Kpatcha, **Y.M.**, M. Olea-Romacho and R. Roshan ``GW induced by PBH during reheating"
[arXiv:2409.xxxxx [hep-ph]].

M. R. Haque, S. Maity, D. Maity and **Y.M.** ``Quantum effects on the evaporation of PBHs: contributions to dark matter,"
JCAP **07** (2024), 002 [arXiv:2404.16815 [hep-ph]].

And

G. Choi, M. A. G. Garcia, W. Ke, Y. Mambrini, K. A. Olive and S. Verner,
``Inflaton Production of Scalar Dark Matter through Fluctuations and Scattering,'' [arXiv:2406.06696 [hep-ph]].

M. A. G. Garcia, M. Gross, Y. Mambrini, K. A. Olive, M. Pierre and J. H. Yoon,
``Effects of fragmentation on post-inflationary reheating,'' JCAP **12** (2023), 028

Y. Mambrini and K. A. Olive, Phys. Rev. D **103** (2021) no.11, 115009 [arXiv:2102.06214]

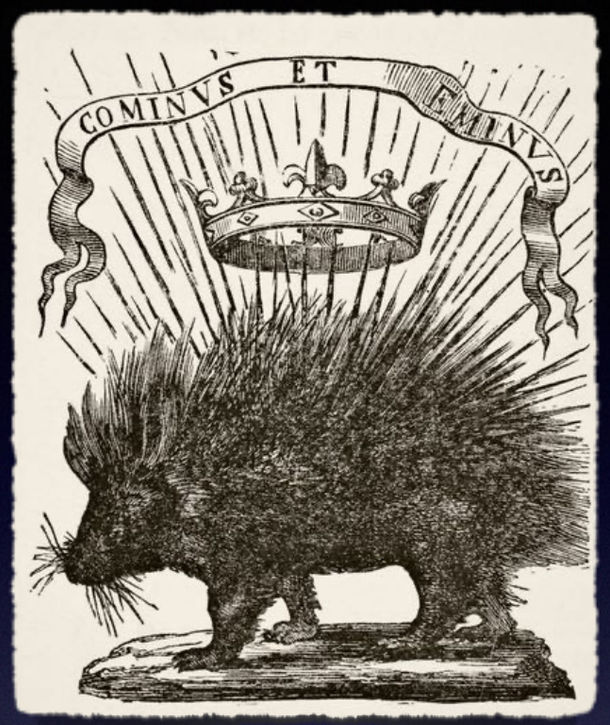
S. Clery, Y. Mambrini, K. A. Olive and S. Verner, Phys. Rev. D **105** (2022) no.7, 075005 ; [arXiv:2112.15214]

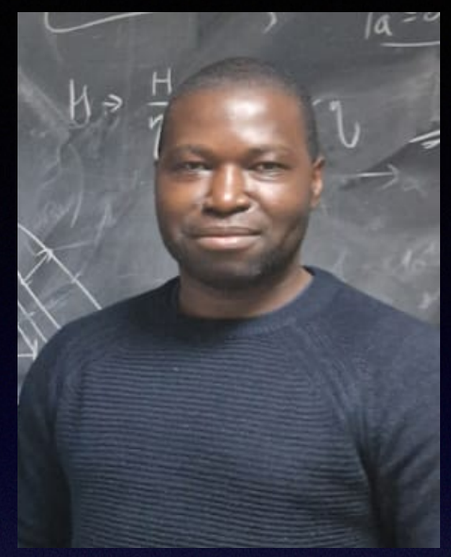
R. T. Co, Y. Mambrini and K. A. Olive, ``Inflationary Gravitational Leptogenesis,'' ; [arXiv:2205.01689 [hep-ph]].

students/postdocs :



Simon Clery
(TUM, Munchen)





Essodjolo Kpatcha
(IJCLab, Paris-Saclay)



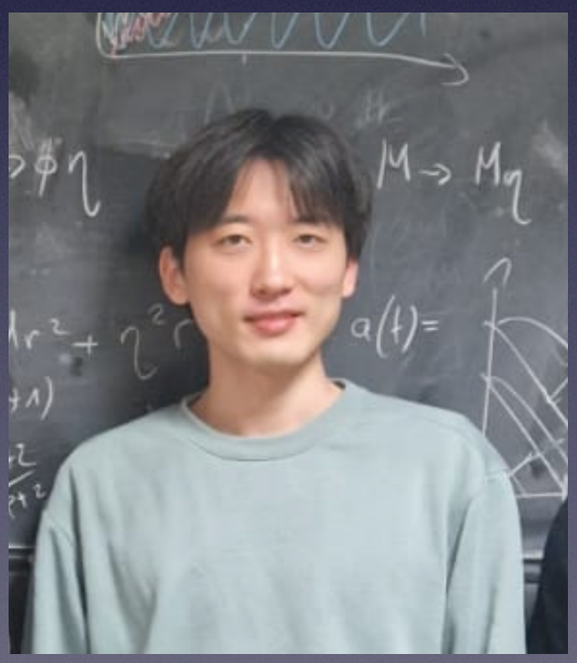
Riajul Haque
(IIT, Chennai)



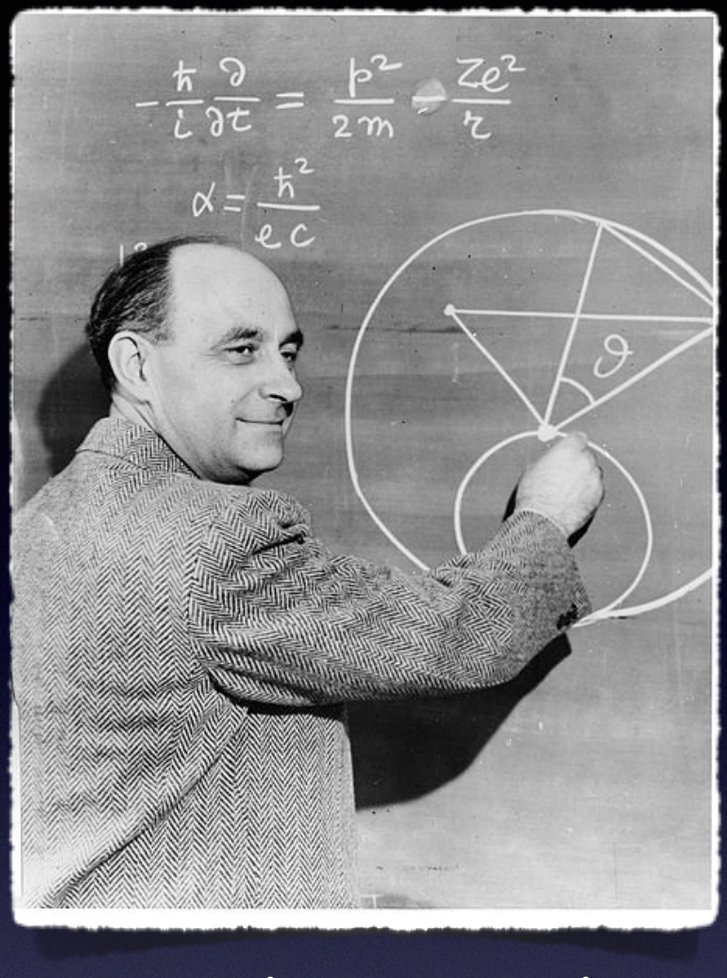
Mathieu Gross
(Paris-Saclay)



Mathias Pierre
(DESY)



Jong-Hyun Yoon
(CNU, Daejon)



Enrico Fermi

« Never underestimate the joy people derive from hearing something they already know.»

« Ne sous-estimez jamais la joie que les gens éprouvent à entendre quelque chose qu'ils savent déjà.»



Ludwig Boltzmann

« Available energy is the main object at stake in the struggle for existence and the evolution of the world. »

« L'énergie disponible est l'enjeu principal dans la lutte pour l'existence et l'évolution du monde.»

L'histoire de l'Univers n'est qu'une série de *transitions de phase*

Chaque phase étant caractérisé par sa *température*

et sa *pression*

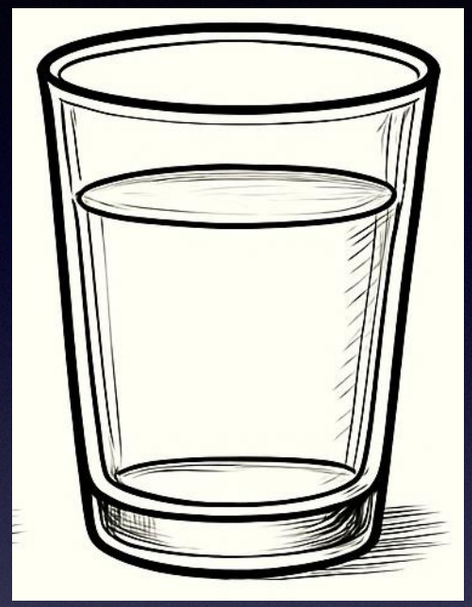
L'histoire de l'Univers n'est qu'une série de *transitions de phase*

Chaque phase étant caractérisé par sa *température* et sa *pression*

Eau :



glace



liquide



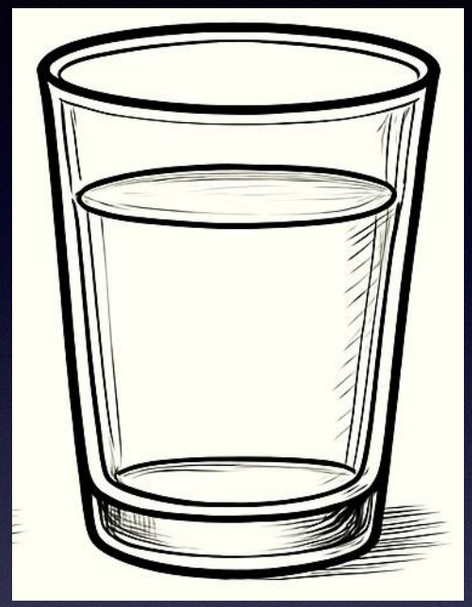
vapeur

L'histoire de l'Univers n'est qu'une série de *transitions de phase*

Chaque phase étant caractérisé par sa *température* et sa *pression*

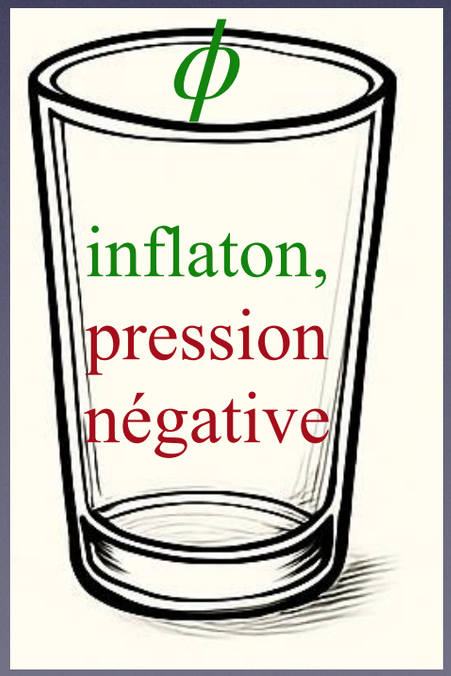
Eau :

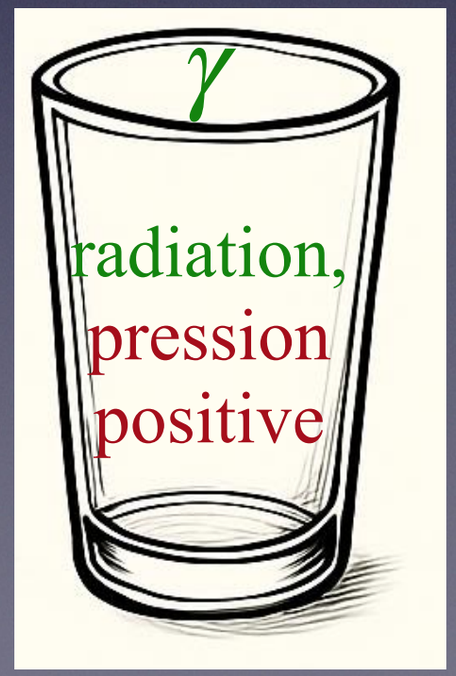


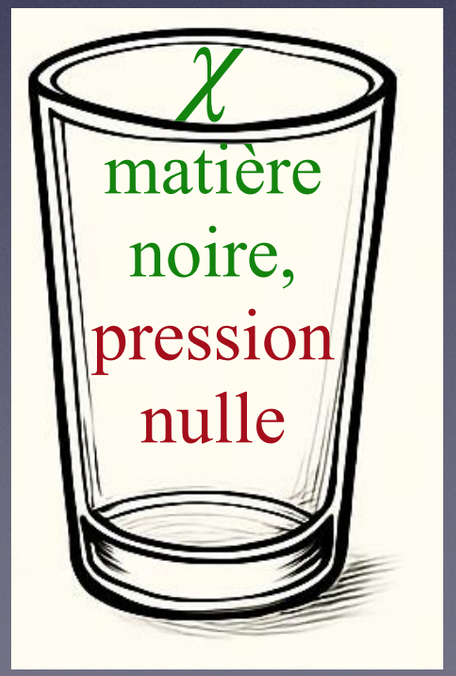


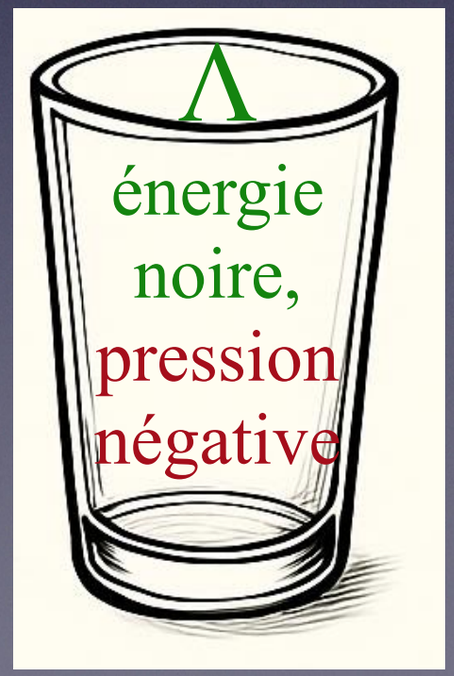


Univers :

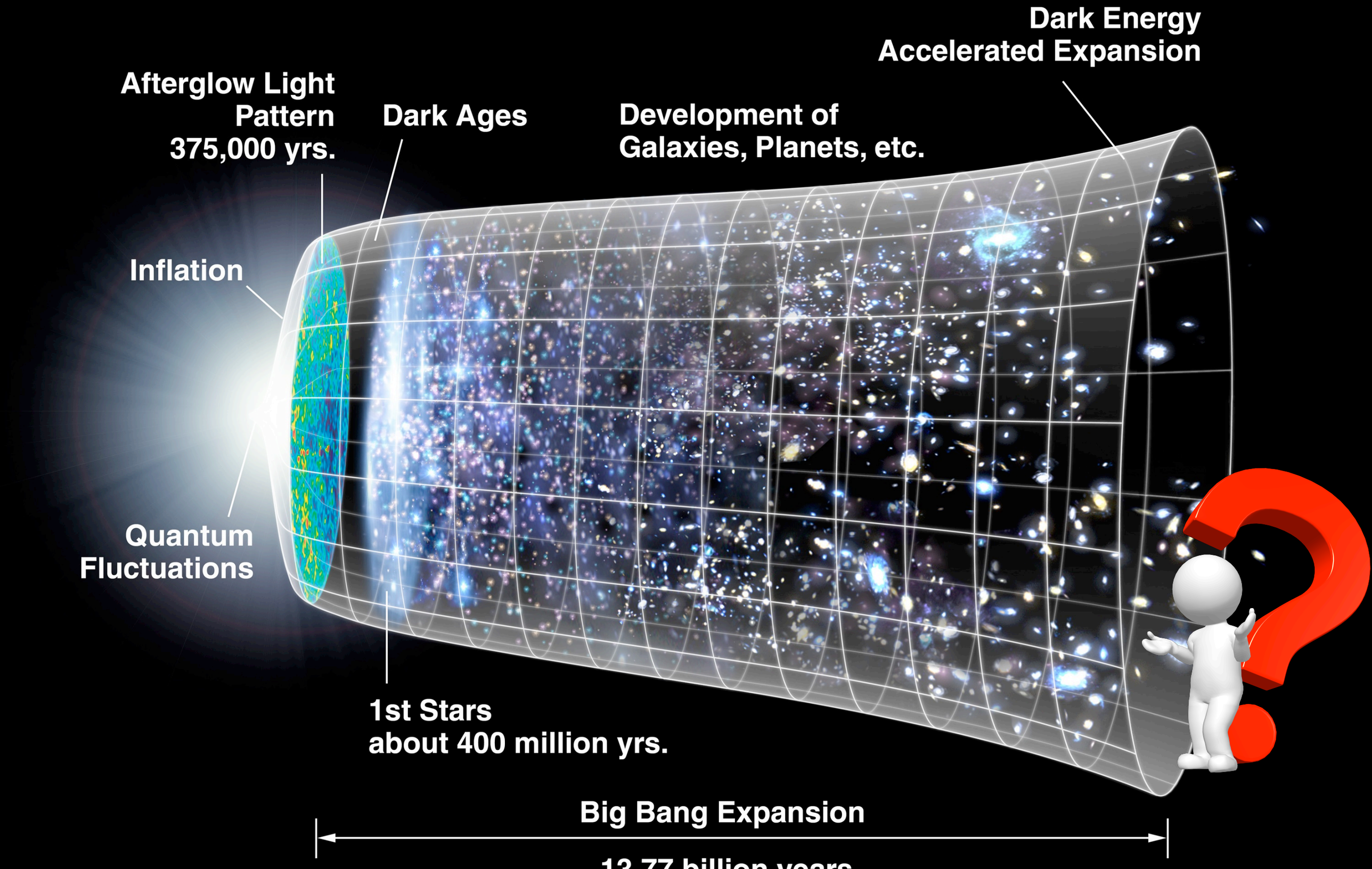








L'Univers, *combiné avec les données des accélérateurs*, est un laboratoire pour la nouvelle physique



L'audience étant hétérogène,
la présentation sera un mélange de :

Découvertes et concepts récents (<30 yrs),

Frequently asked questions (FAQ)

et

Perspectives historiques.

Plan

Chapitre I : « Et fiat inflation »

Chapitre II : Cette mystérieuse matière noire

Chapitre III : La force de la gravité

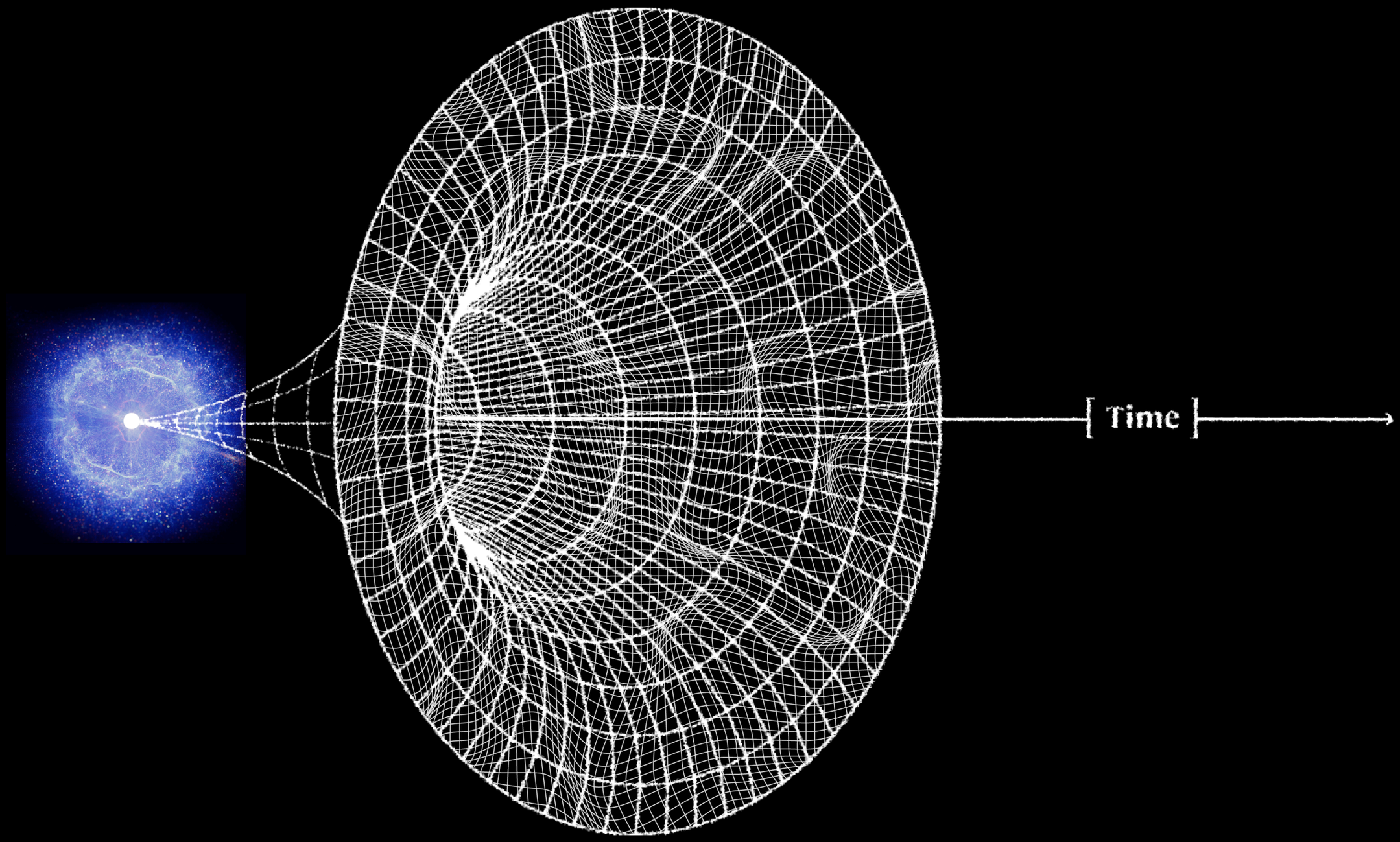
Chapitre IV : Curieuse énergie noire

Conclusion

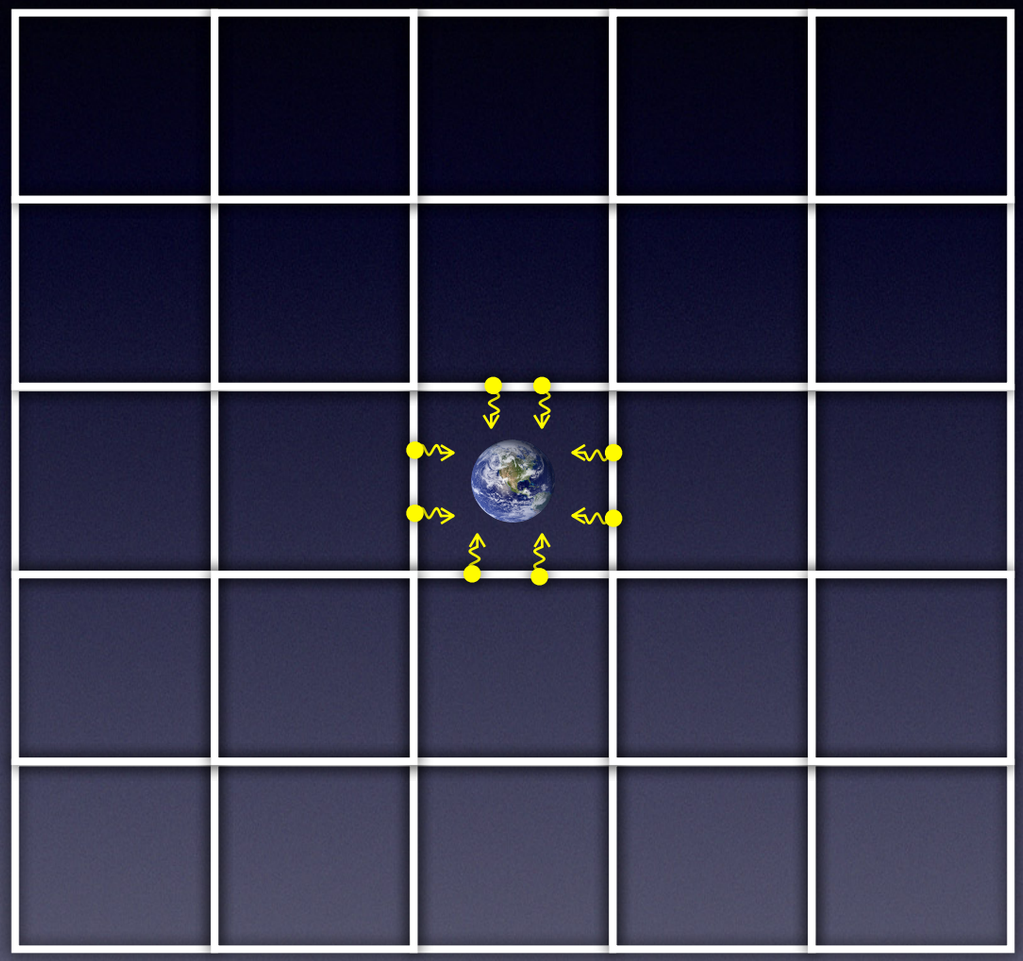
Une vision moderne du Big Bang

Chapitre I : « Et fiat inflation »

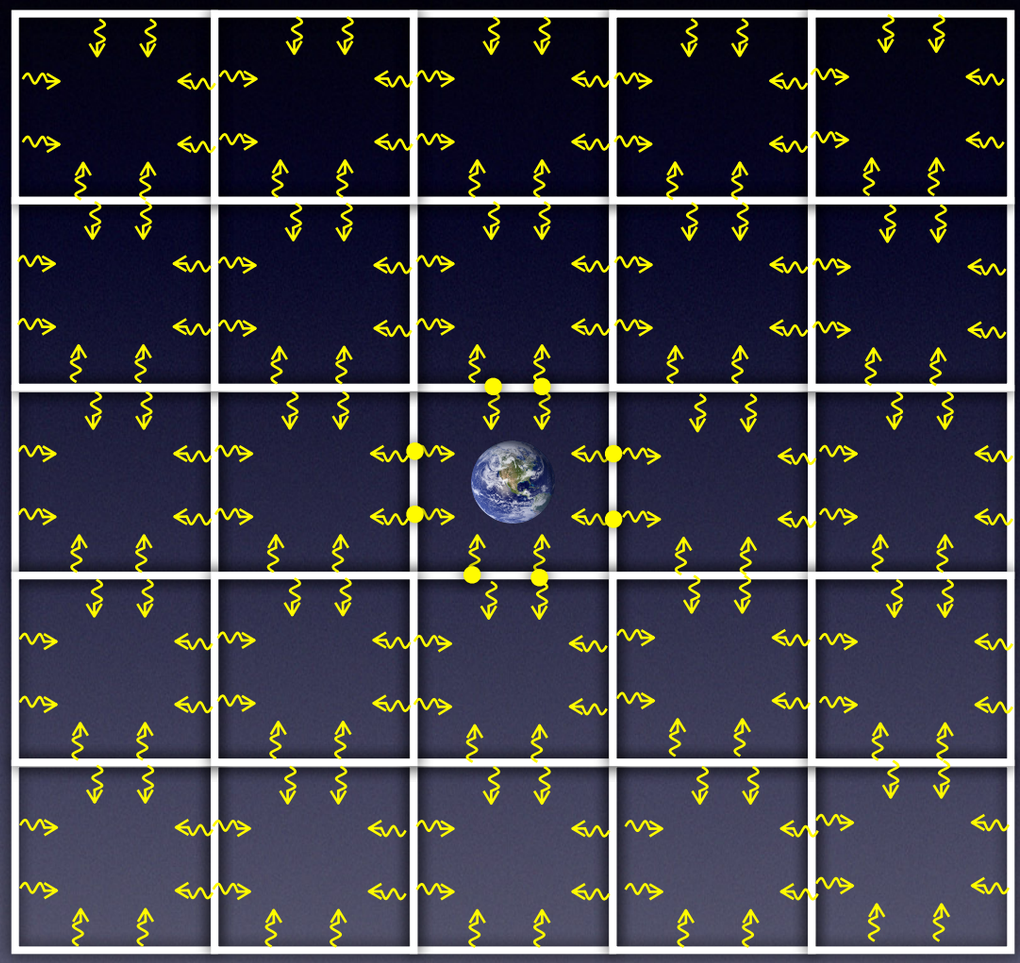
Où l'auditeur croisera un étrange champ homogène (inflaton)
à *pression négative*, des mécanismes non perturbatifs, de la fragmentation
de condensats, l'apparition de l'espace, et les *premières lueurs*



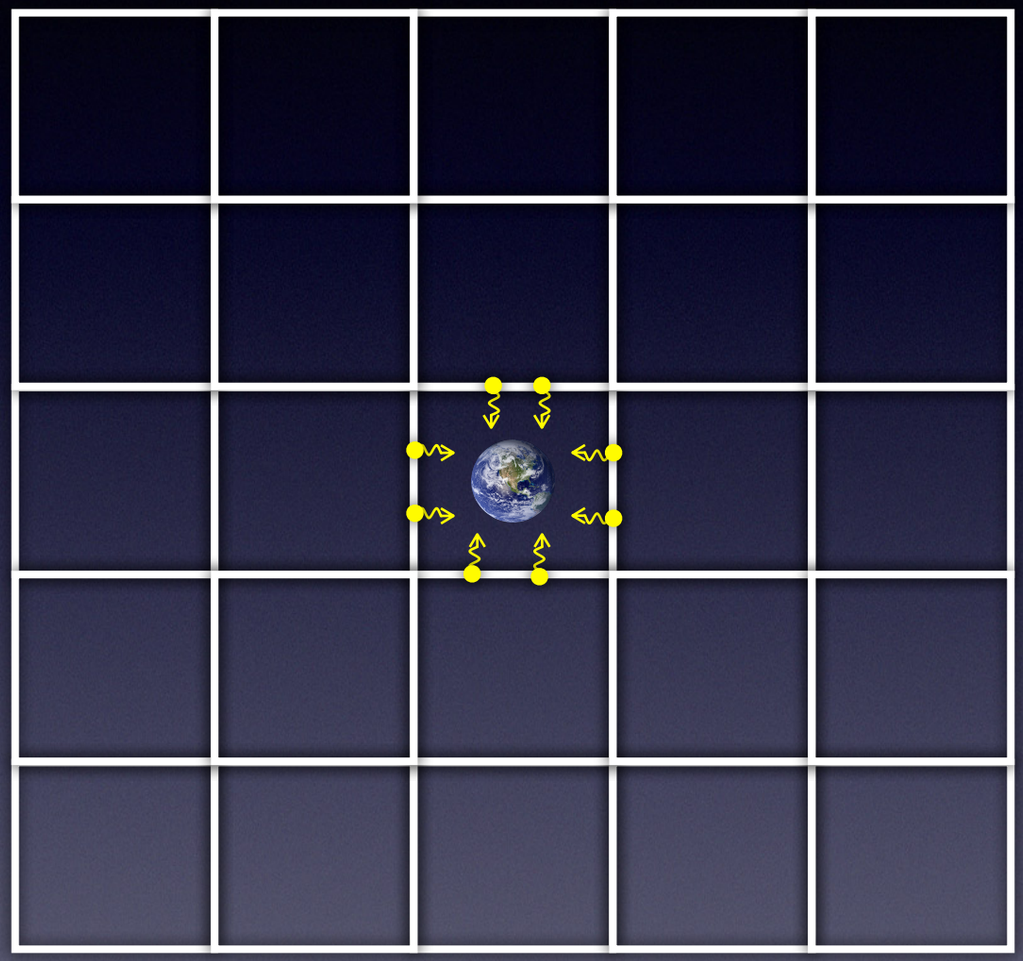
380 000 ans après le Big Bang



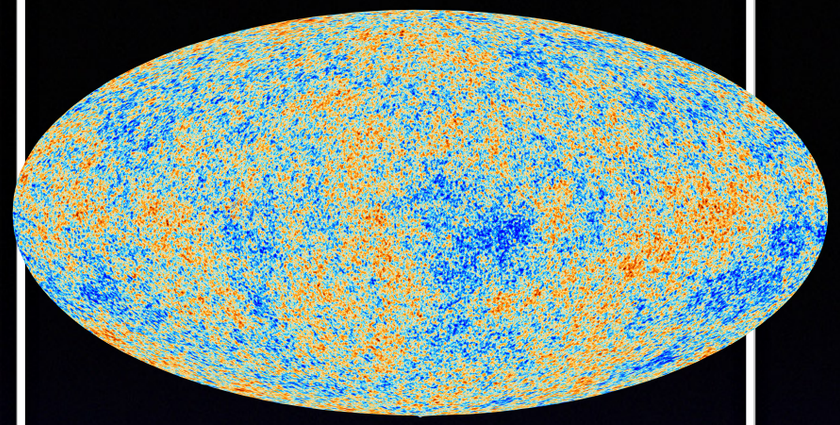
380 000 ans après le Big Bang



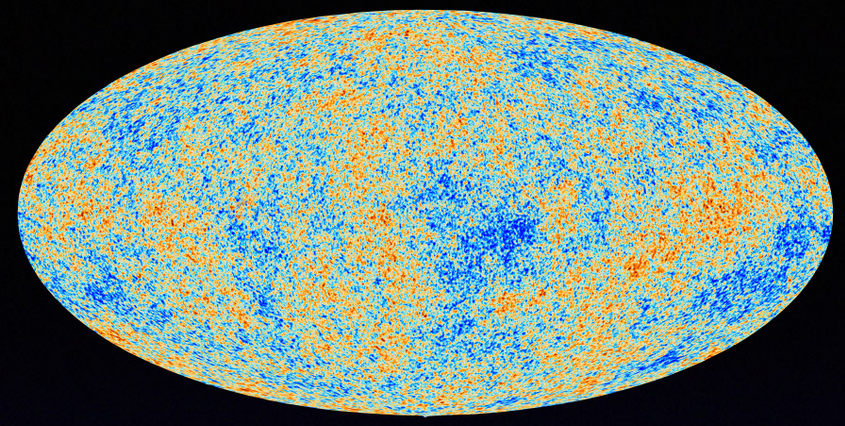
380 000 ans après le Big Bang

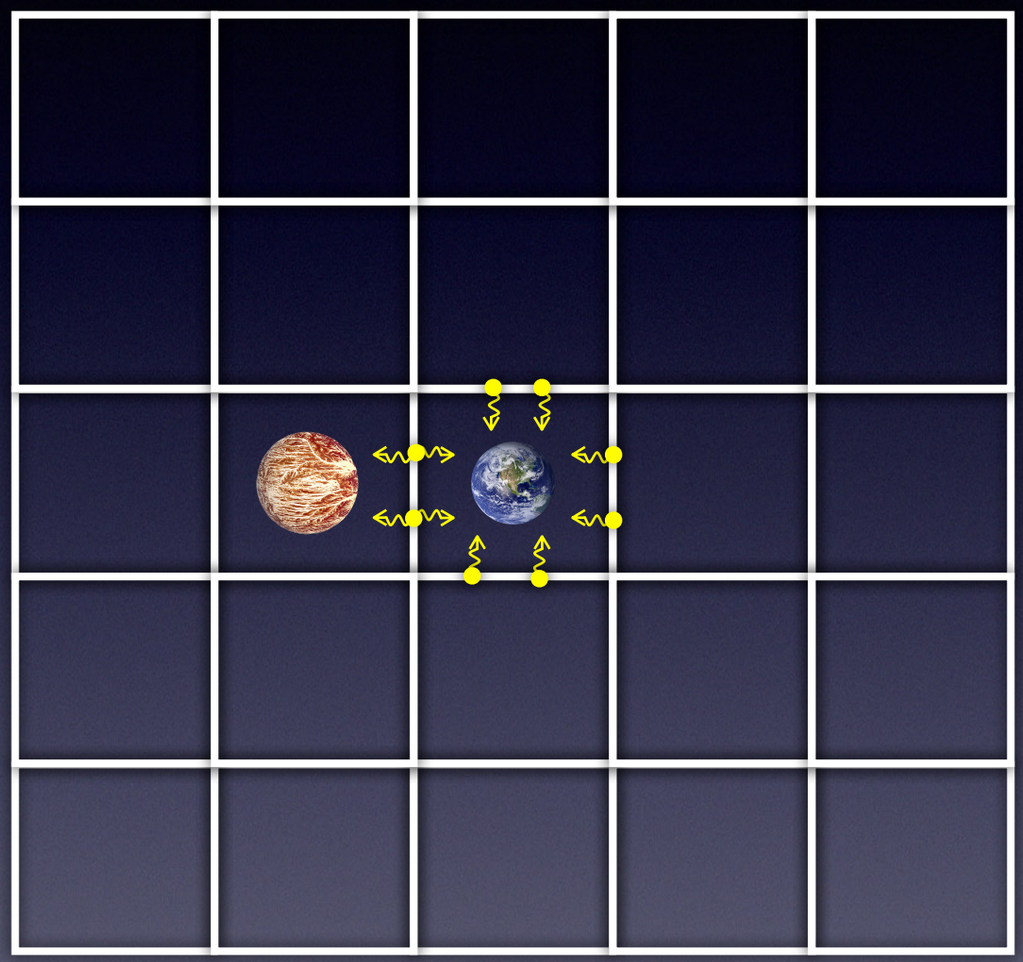


13,8 milliards d’années après le Big Bang

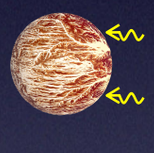


380 000 ans après le Big Bang





13,8 milliards d’années après le Big Bang





13,8 milliards d’années après le Big Bang









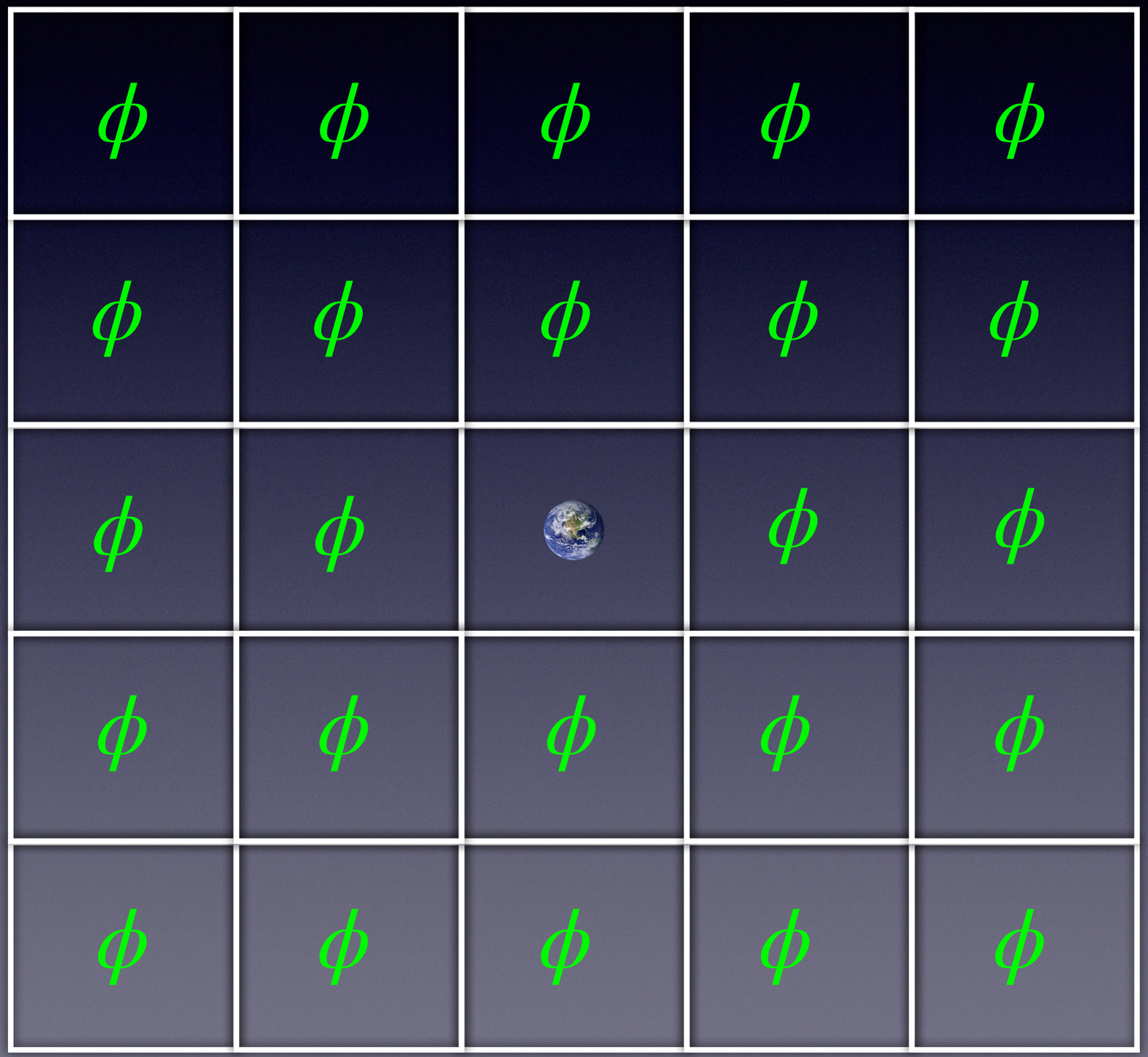




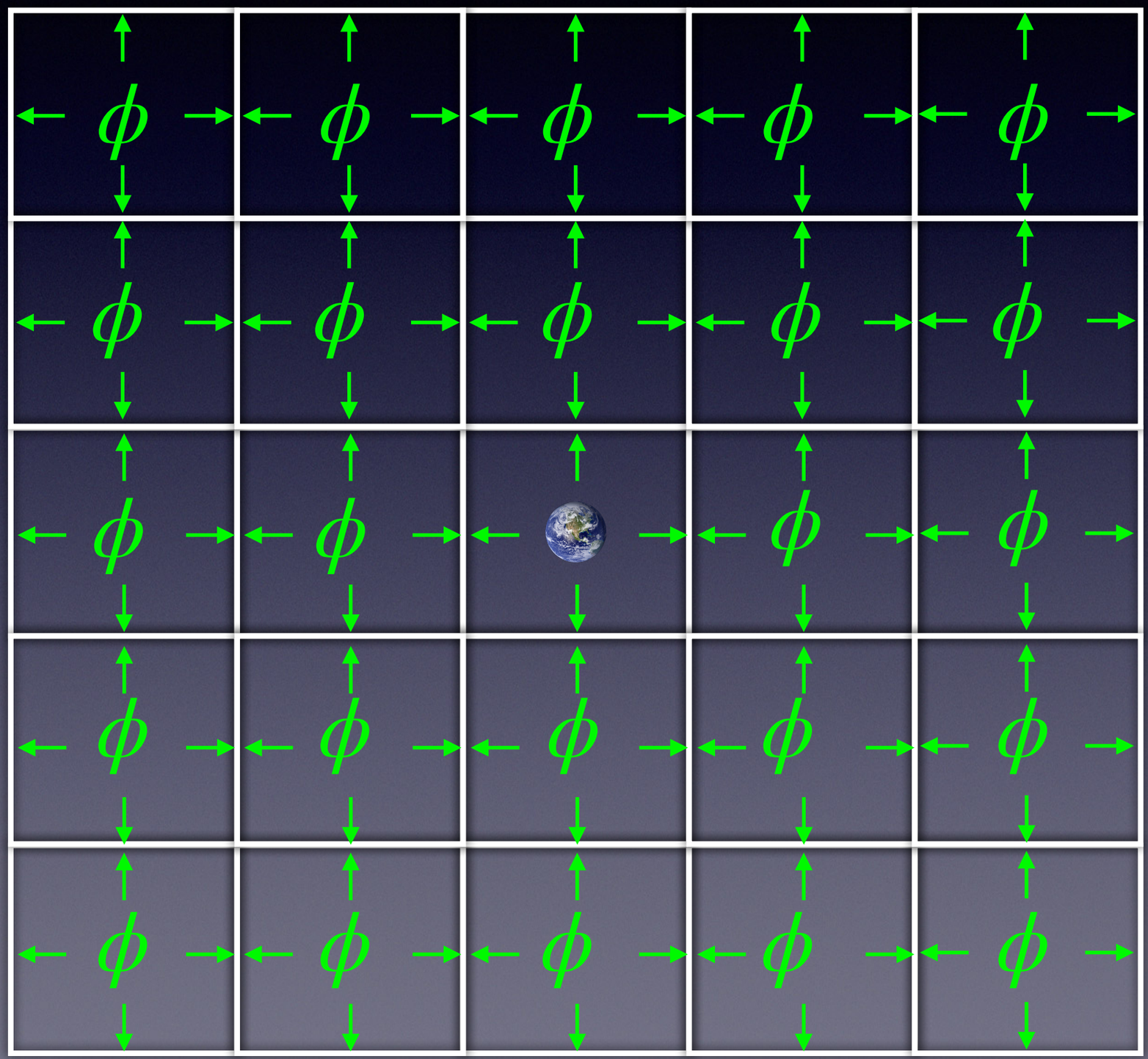




L'interprétation moderne du Big Bang :
L'Univers est plein d'un champ d'inflaton ϕ



L'interprétation moderne du Big Bang :
L'Univers est plein d'un champ d'inflaton ϕ qui génère une pression négative



L' inflaton ϕ est un champ classique et (quasi)homogène qui emplit l'Univers et suit l'équation du mouvement

$$\ddot{\phi}(t) + 3H\dot{\phi}(t) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \dot{\rho}_\phi + 3(1 + w_\phi)H\rho_\phi = 0$$

où

$$\rho_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi) \quad ; \quad P_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)$$

L' inflaton ϕ est un champ classique et (quasi)homogène qui emplit l'Univers et suit l'équation du mouvement

Constante de Hubble

$$\ddot{\phi}(t) + 3H\dot{\phi}(t) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \dot{\rho}_\phi + 3(1 + w_\phi)H\rho_\phi = 0$$

où

$$\rho_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi) \quad ; \quad P_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)$$

L' inflaton ϕ est un champ classique et (quasi)homogène qui emplit l'Univers et suit l'équation du mouvement

Constante de Hubble

$$\ddot{\phi}(t) + 3H\dot{\phi}(t) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \dot{\rho}_\phi + 3(1 + w_\phi)H\rho_\phi = 0$$

où

$$\rho_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi) \quad ; \quad P_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)$$

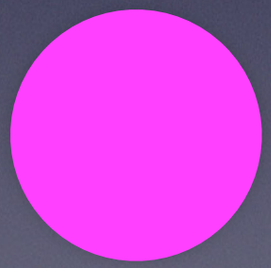
$\phi = cste$ implique equation d'état *négative* :
pression = -(densité d'énergie)

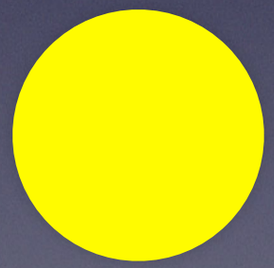
$$\frac{P_\phi}{\rho_\phi} = w_\phi = -1 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\rho_\phi = cste}$$

Champ de matière : $P_m = 0 \ (w_m = 0)$

Champ de radiation : $P_R = \frac{1}{3}\rho_R \ (w_R = \frac{1}{3})$

$$G_{\mu\nu} = \frac{T_{\mu\nu}}{M_P^2} \Rightarrow \qquad \frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{(1+3w_i)}{6M_P^2}\rho_i \boxed{< 0}$$





Champ de matière : $P_m = 0$ $(w_m = 0)$

adiation : $P_R = \frac{1}{3}\rho_R$ $(w_R = \frac{1}{3})$

$\ddot{} = -\frac{(1+3$

$G_{\mu\nu} = \frac{T_{\mu\nu}}{M_P^2} \Rightarrow$

Champ d'inflaton :

$$P_\phi = -\rho_\phi \; (w_\phi = -1)$$

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{(1+3w_\phi)}{6M_P^2}\rho_i = \frac{\rho_\phi}{3M_P^2} > 0$$

Equation du mouvement : $R(t) = R_0 e^{\frac{\dot{R}}{R}t}$

FAQ : L’univers s’étend dans quoi ?

FAQ : L'univers s'étend dans quoi ?

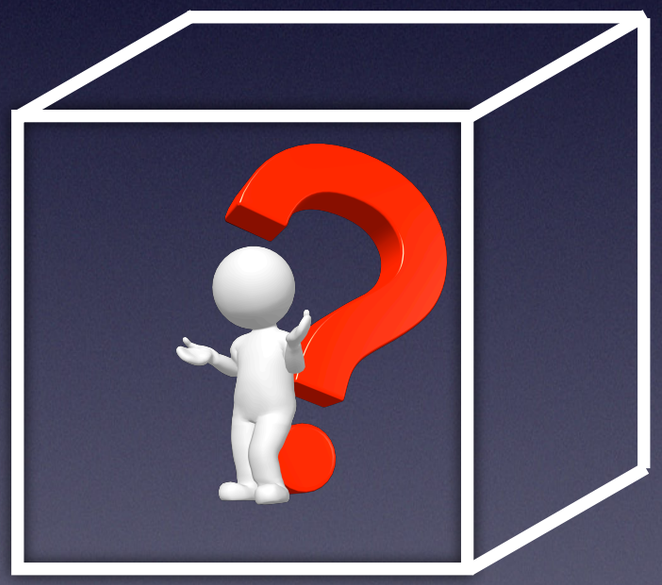
1ère réponse (physiciens) : $g_{ij} \rightarrow R(t) \times g_{ij}$

FAQ : L’univers s’étend dans quoi ?

2ème réponse : $\infty + \infty = \infty$

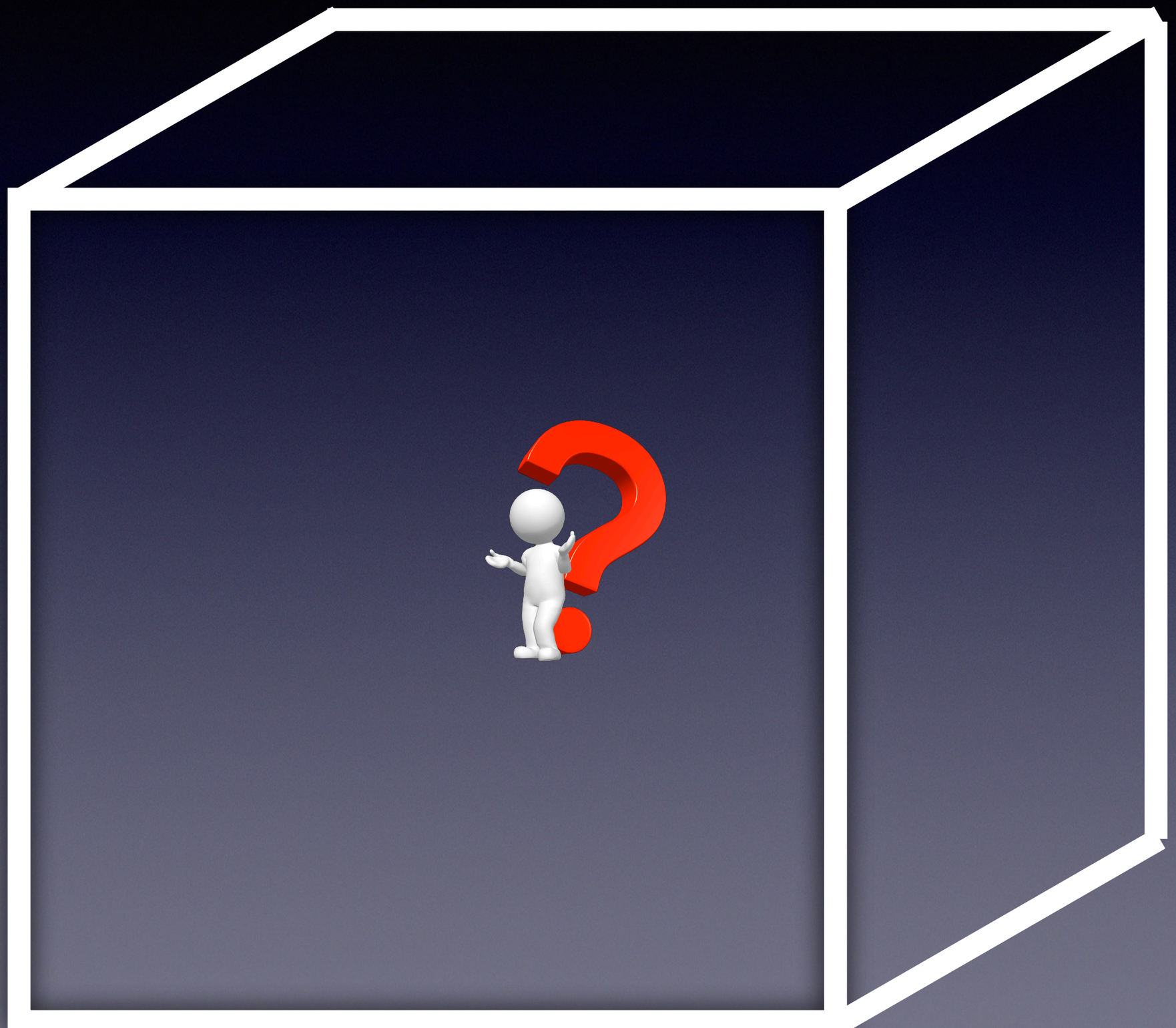
FAQ : L’univers s’étend dans quoi ?

3ème réponse : question de point de vue



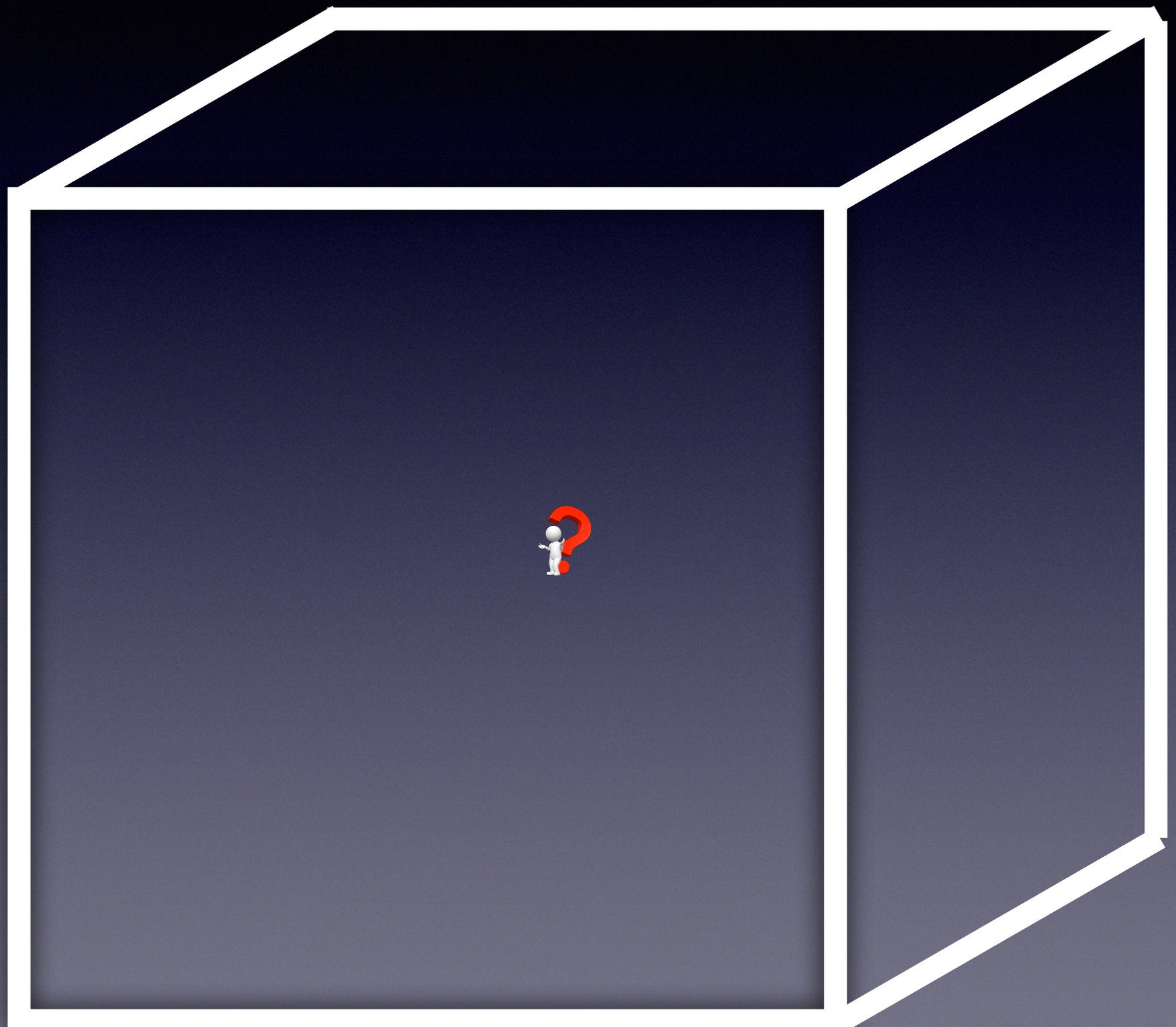
FAQ : L’univers s’étend dans quoi ?

3ème réponse : question de point de vue



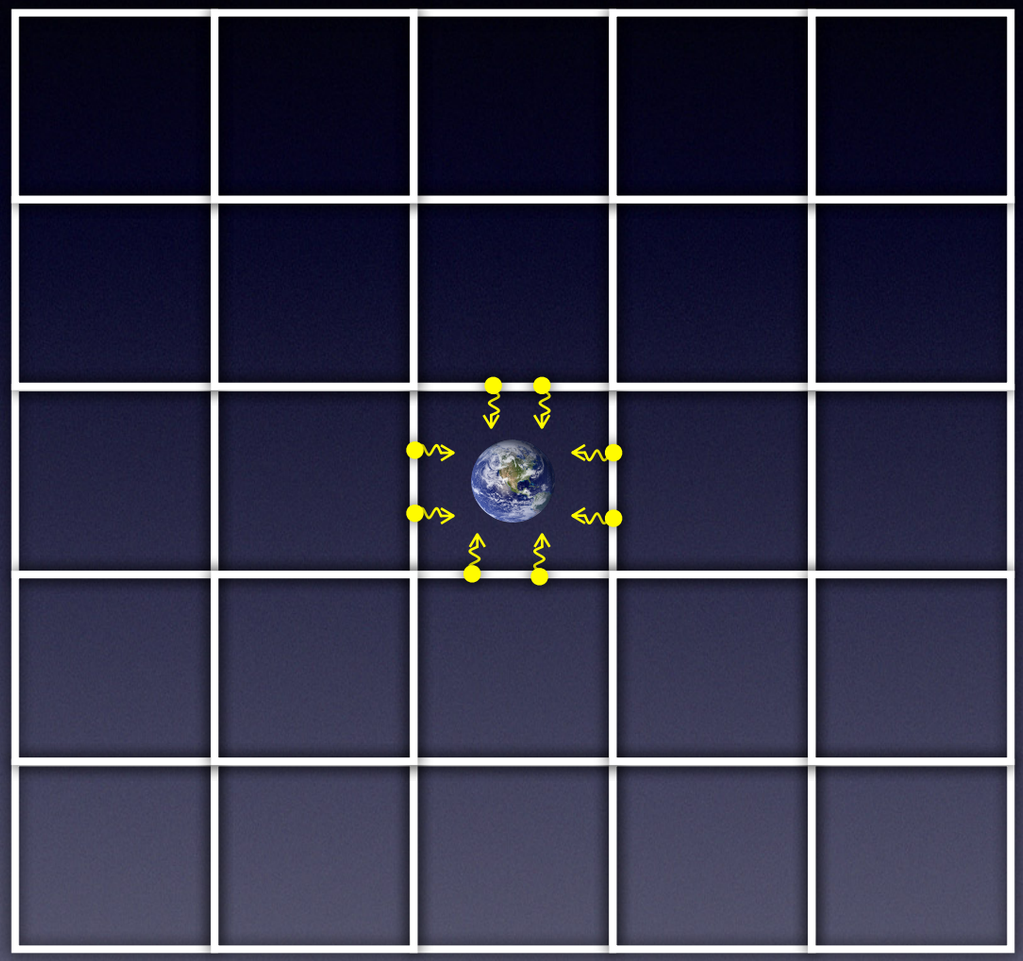
FAQ : L’univers s’étend dans quoi ?

3ème réponse : question de point de vue



FAQ :

L’énergie est-elle conservée dans un univers en expansion?



FAQ :

L’énergie est-elle conservée dans un univers en expansion?



FAQ :

L’énergie est-elle conservée dans un univers en expansion?



Indice : quel « temps » utiliser pour définir une fréquence ?

Mais ϕ est (quasi)-homogène

à cause des fluctuations quantiques

$$(\delta x \times \delta p \gtrsim \hbar \;\leftrightarrow\; \frac{\delta_x \phi}{\phi_0} \gtrsim \epsilon)$$

$$\phi(x,t) = \phi_0(t) + \delta_x\phi(x,t) \;\leftrightarrow\; \rho_0 + \delta_x\rho \;\leftrightarrow\; \ddot{R}_0 + \delta_x\ddot{R}$$

Mais ϕ est (quasi)-homogène

à cause des fluctuations quantiques

$$(\delta x \times \delta p \gtrsim \hbar \;\leftrightarrow\; \frac{\delta_x \phi}{\phi_0} \gtrsim \epsilon)$$

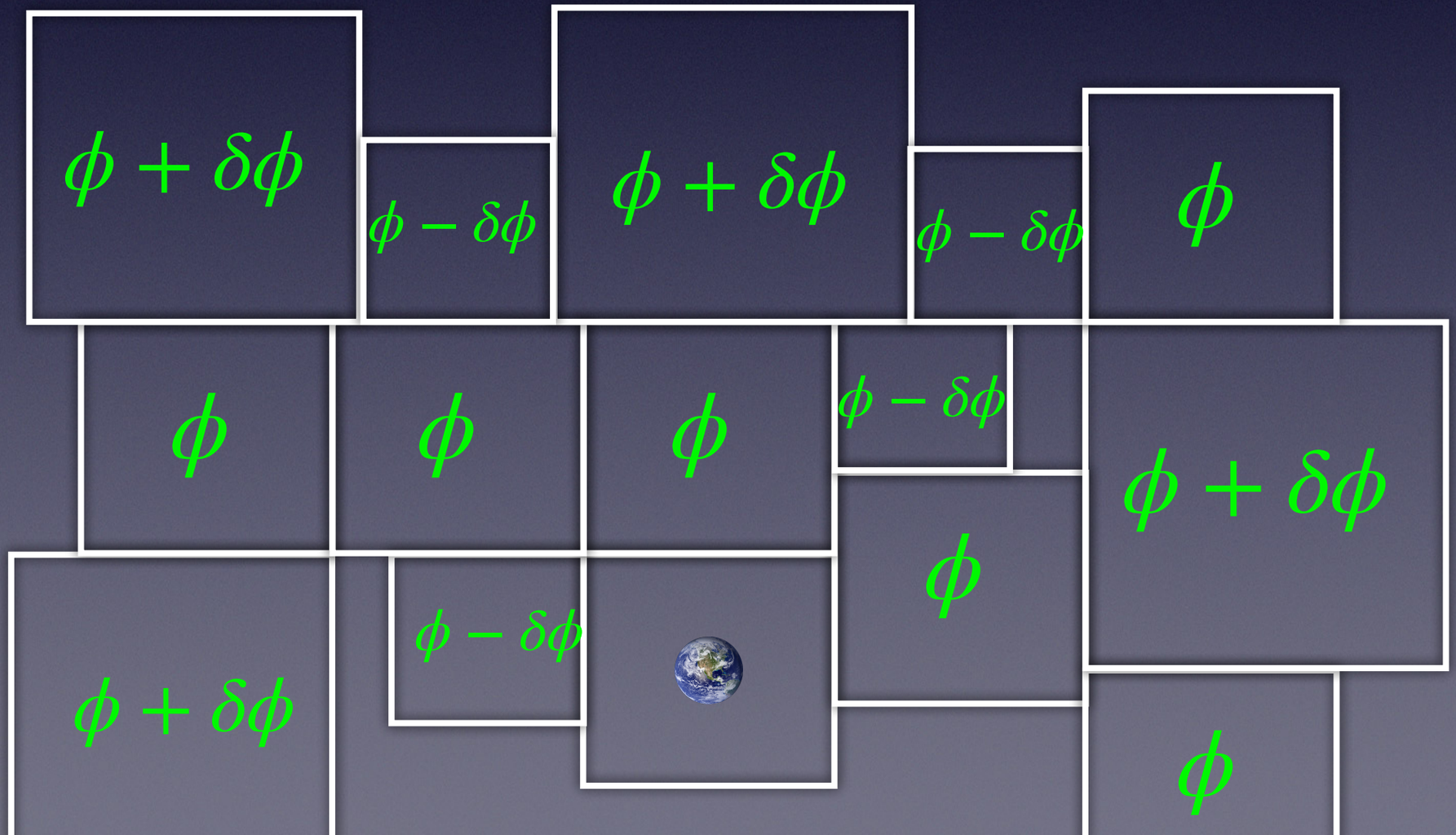
$$\phi(x,t) = \phi_0(t) + \delta_x\phi(x,t) \;\leftrightarrow\; \rho_0 + \delta_x\rho \;\leftrightarrow\; \ddot{R}_0 + \delta_x\ddot{R}$$

Mais ϕ est (quasi)-homogène

à cause des fluctuations quantiques

$$(\delta x \times \delta p \gtrsim \hbar \;\leftrightarrow\; \frac{\delta_x \phi}{\phi_0} \gtrsim \epsilon)$$

$$\phi(x,t) = \phi_0(t) + \delta_x\phi(x,t) \;\leftrightarrow\; \rho_0 + \delta_x\rho \;\leftrightarrow\; \ddot{R}_0 + \delta_x\ddot{R}$$



Mais ϕ est (quasi)-homogène

à cause des fluctuations quantiques

$$(\delta x \times \delta p \gtrsim \hbar \;\leftrightarrow\; \frac{\delta_x \phi}{\phi_0} \gtrsim \epsilon)$$

$$\phi(x,t) = \phi_0(t) + \delta_x\phi(x,t) \;\leftrightarrow\; \rho_0 + \delta_x\rho \;\leftrightarrow\; \ddot{R}_0 + \delta_x\ddot{R}$$

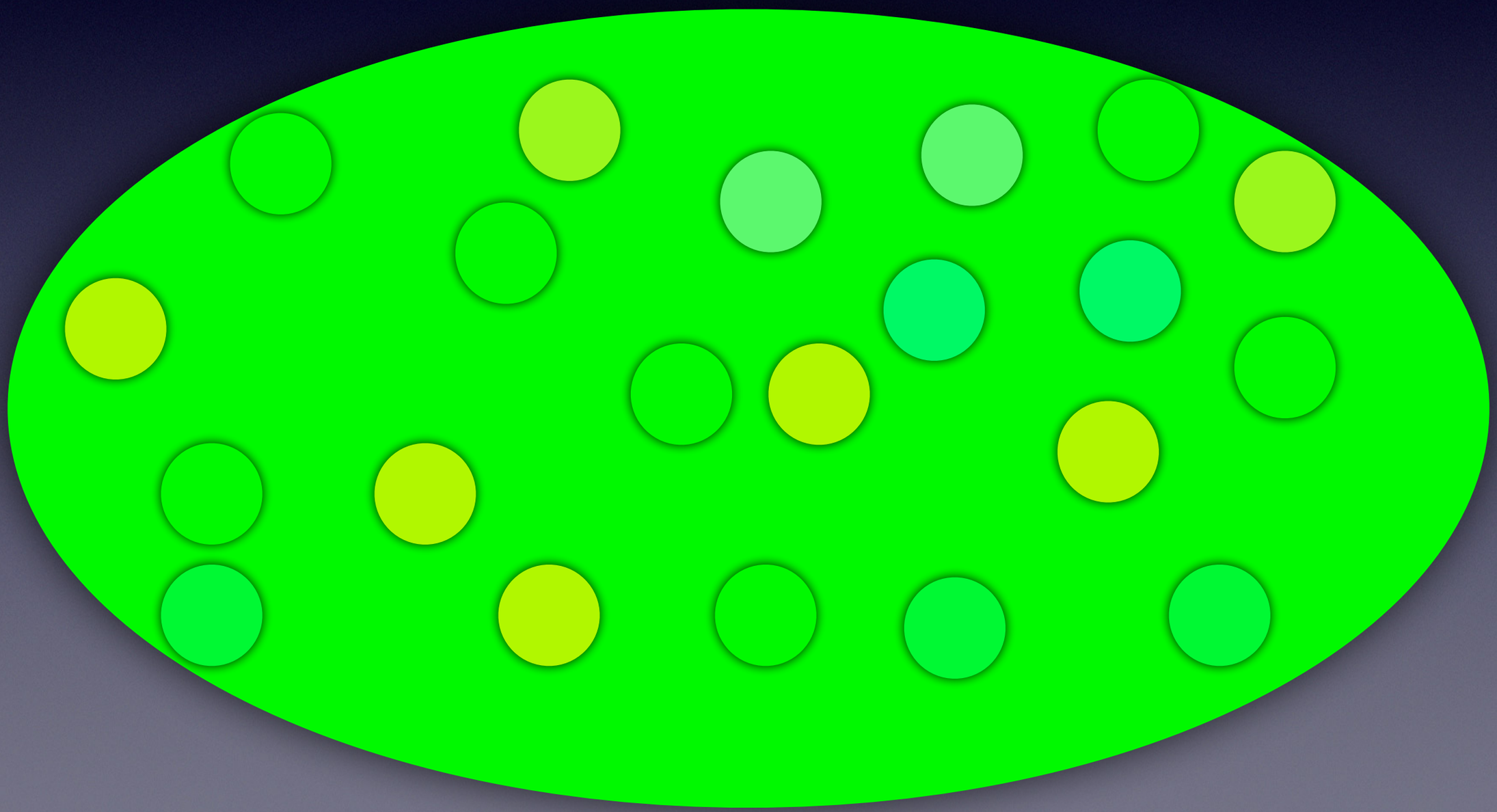


Mais ϕ est (quasi)-homogène

à cause des fluctuations quantiques

$$(\delta x \times \delta p \gtrsim \hbar \;\leftrightarrow\; \frac{\delta_x \phi}{\phi_0} \gtrsim \epsilon)$$

$$\phi(x,t) = \phi_0(t) + \delta_x\phi(x,t) \;\leftrightarrow\; \rho_0 + \delta_x\rho \;\leftrightarrow\; \ddot{R}_0 + \delta_x\ddot{R}$$

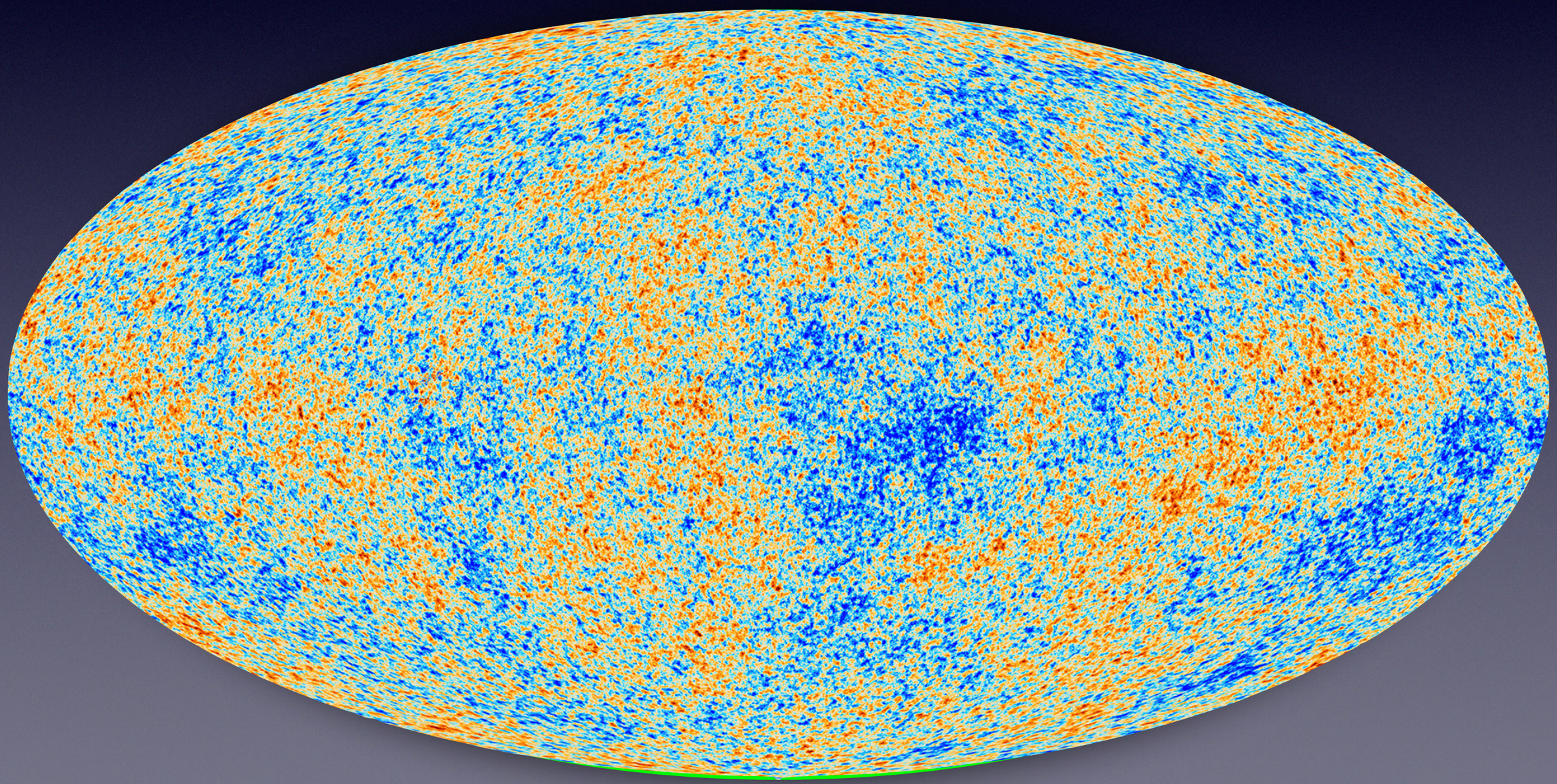


Mais ϕ est (quasi)-homogène

à cause des fluctuations quantiques

$$(\delta x \times \delta p \gtrsim \hbar \;\leftrightarrow\; \frac{\delta_x \phi}{\phi_0} \gtrsim \epsilon)$$

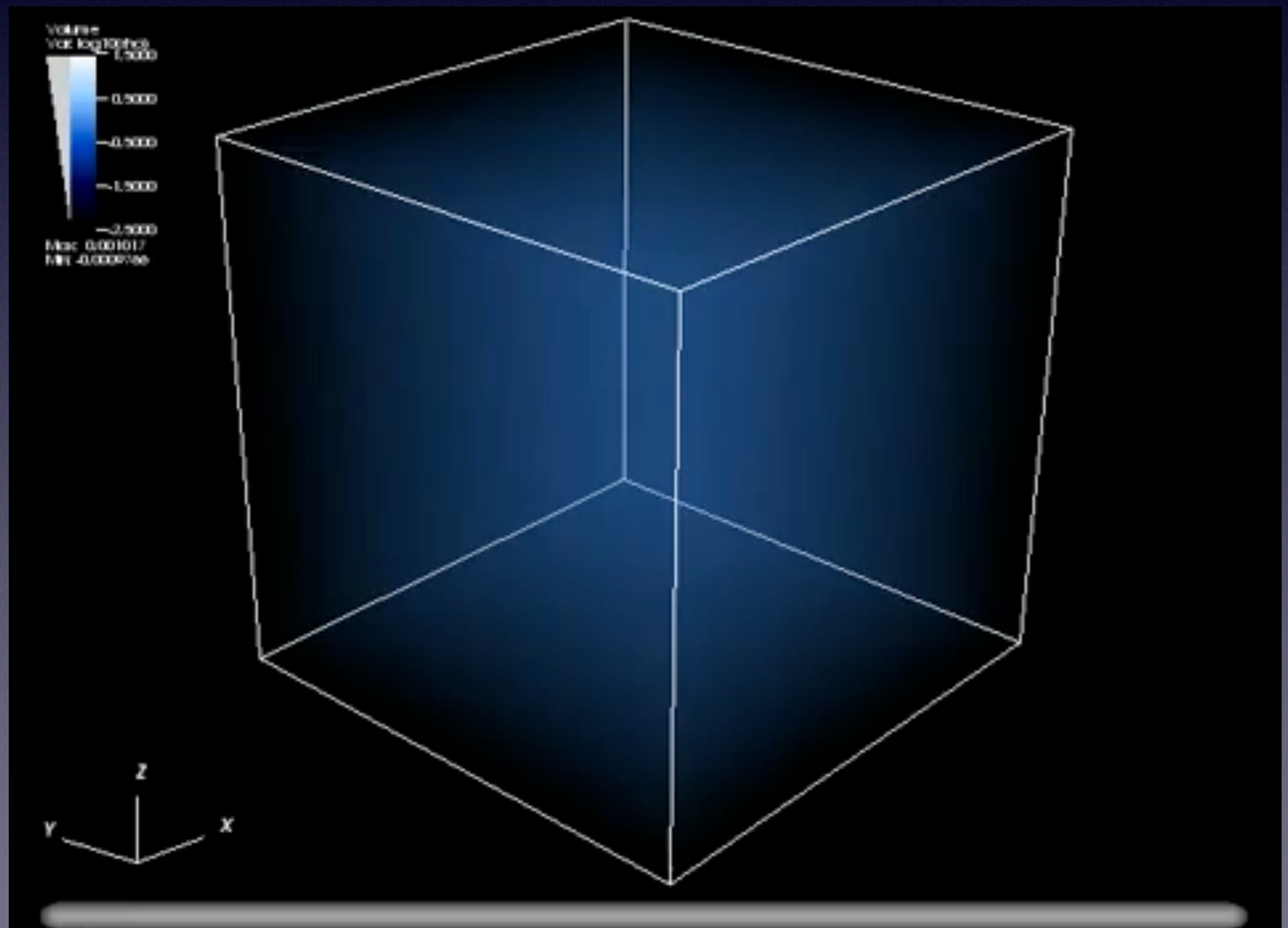
$$\phi(x,t) = \phi_0(t) + \delta_x \phi(x,t) \;\leftrightarrow\; \rho_0 + \delta_x \rho \;\leftrightarrow\; \ddot{R}_0 + \delta_x \ddot{R}$$



… (quasi)-homogène

à cause des fluctuations quantiques, $\phi(x,t) = \phi_0(t) + \delta_x\phi(x,t)$

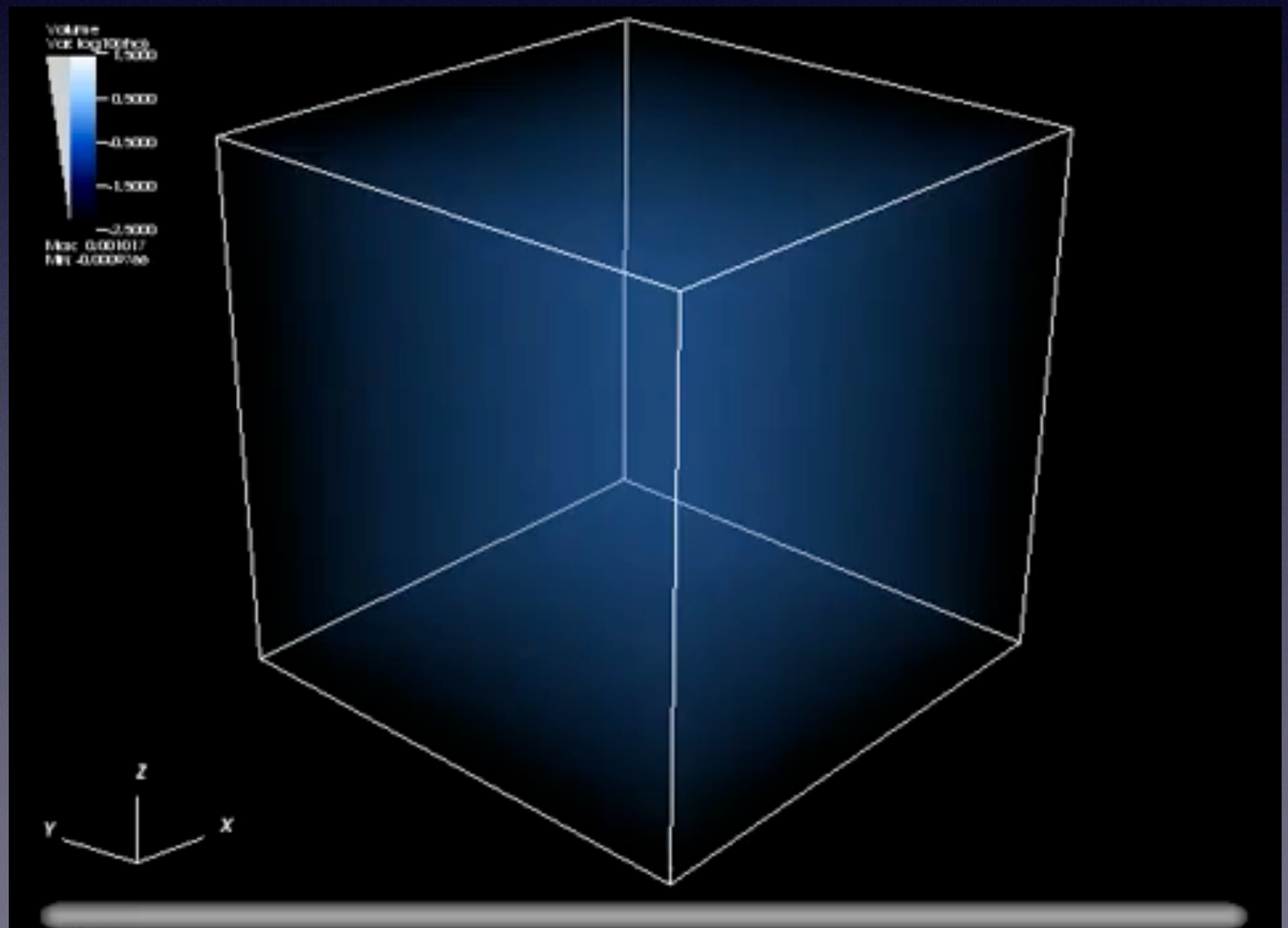
$$\rightarrow \rho_0 \; + \; \delta_x\rho \quad \rightarrow \quad \ddot{R}_0 \; + \; \delta_x\ddot{R}$$



… (quasi)-homogène

à cause des fluctuations quantiques, $\phi(x,t) = \phi_0(t) + \delta_x\phi(x,t)$

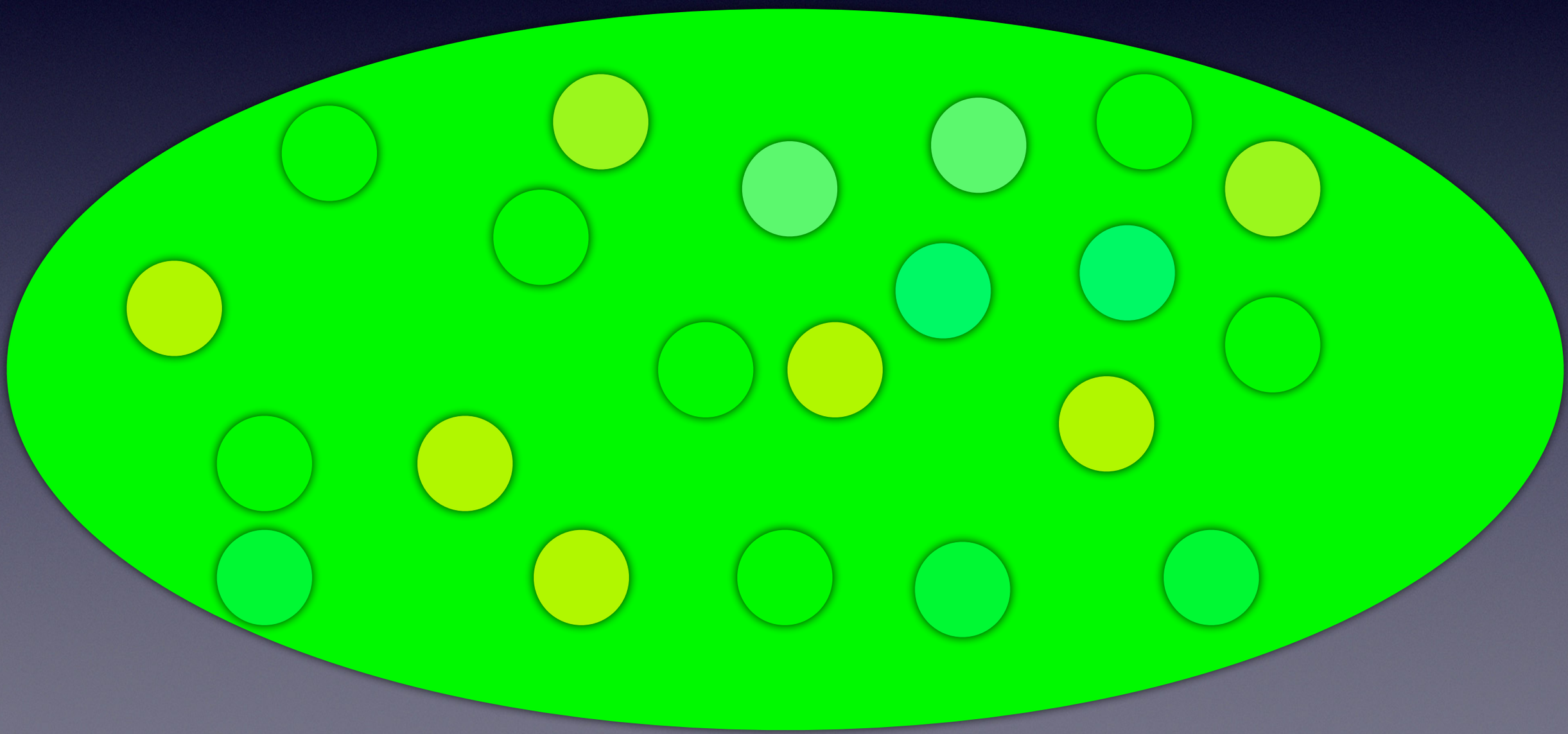
$$\rightarrow \rho_0 \; + \; \delta_x\rho \quad \rightarrow \quad \ddot{R}_0 \; + \; \delta_x\ddot{R}$$



… (quasi)-homogène

à cause des fluctuations quantiques, $\phi(x,t) = \phi_0(t) + \delta_x\phi(x,t)$

$$\rightarrow \rho_0 \; + \; \delta_x\rho \quad \rightarrow \quad \ddot{R}_0 \; + \; \delta_x\ddot{R}$$

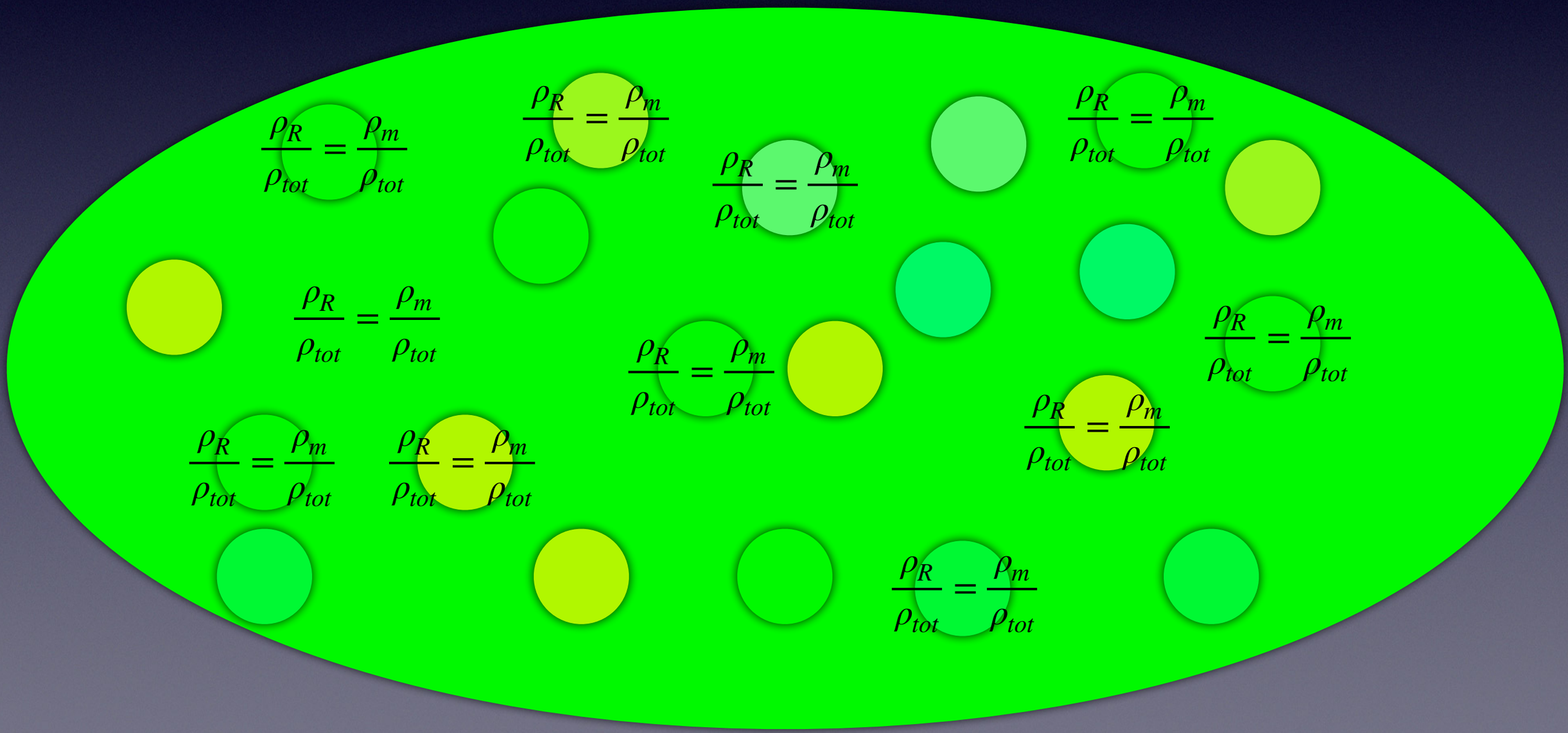


… (quasi)-homogène

à cause des fluctuations quantiques, $\phi(x,t) = \phi_0(t) + \delta_x\phi(x,t)$

$$\rightarrow \rho_0 \; + \; \delta_x\rho \quad \rightarrow \quad \ddot{R}_0 \; + \; \delta_x\ddot{R}$$

$\frac{\rho_R}{\rho_{tot}} = \frac{\rho_m}{\rho_{tot}}$ fluctuation isocourbure

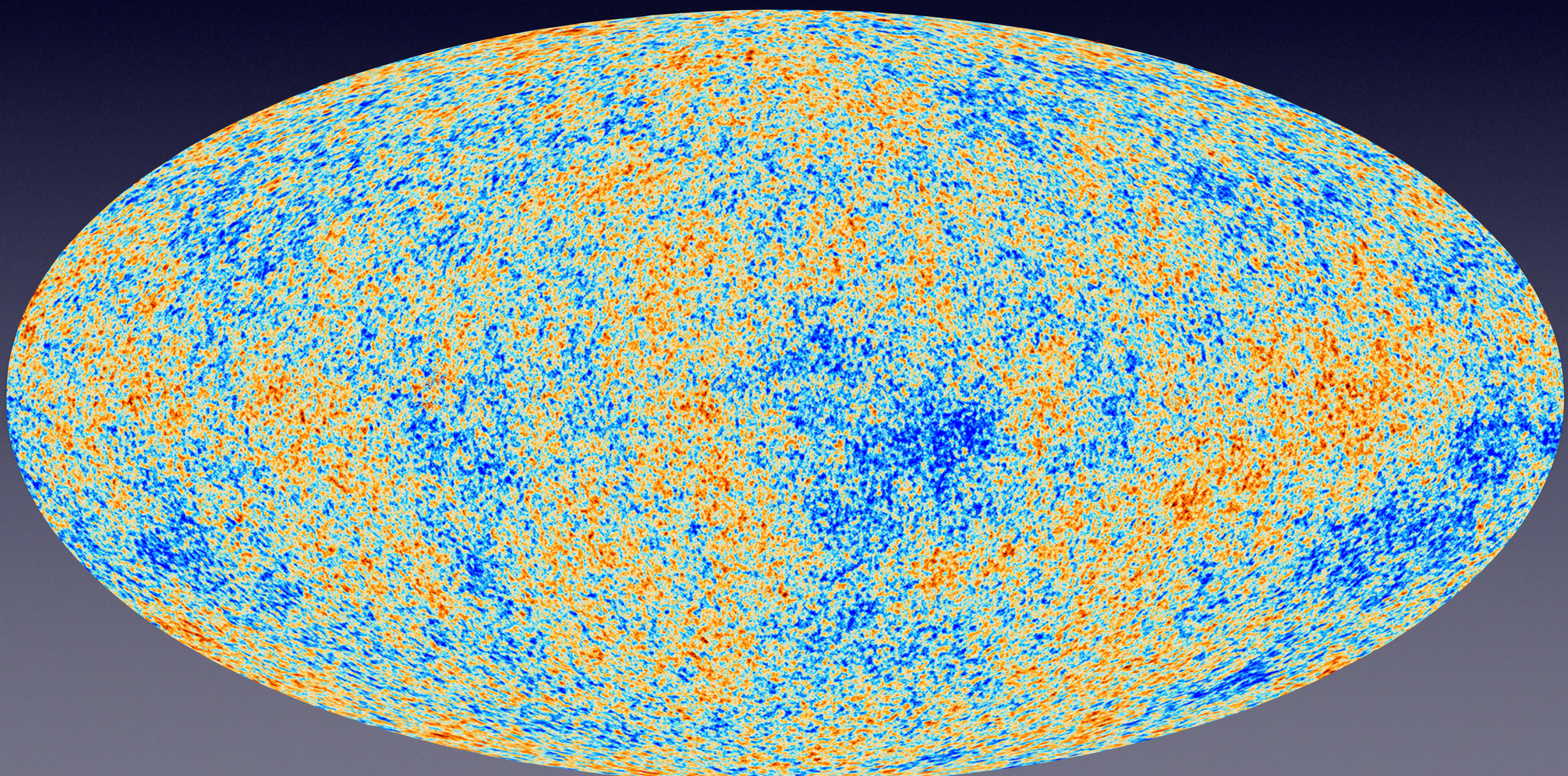


… (quasi)-homogène

à cause des fluctuations quantiques, $\phi(x,t) = \phi_0(t) + \delta_x\phi(x,t)$

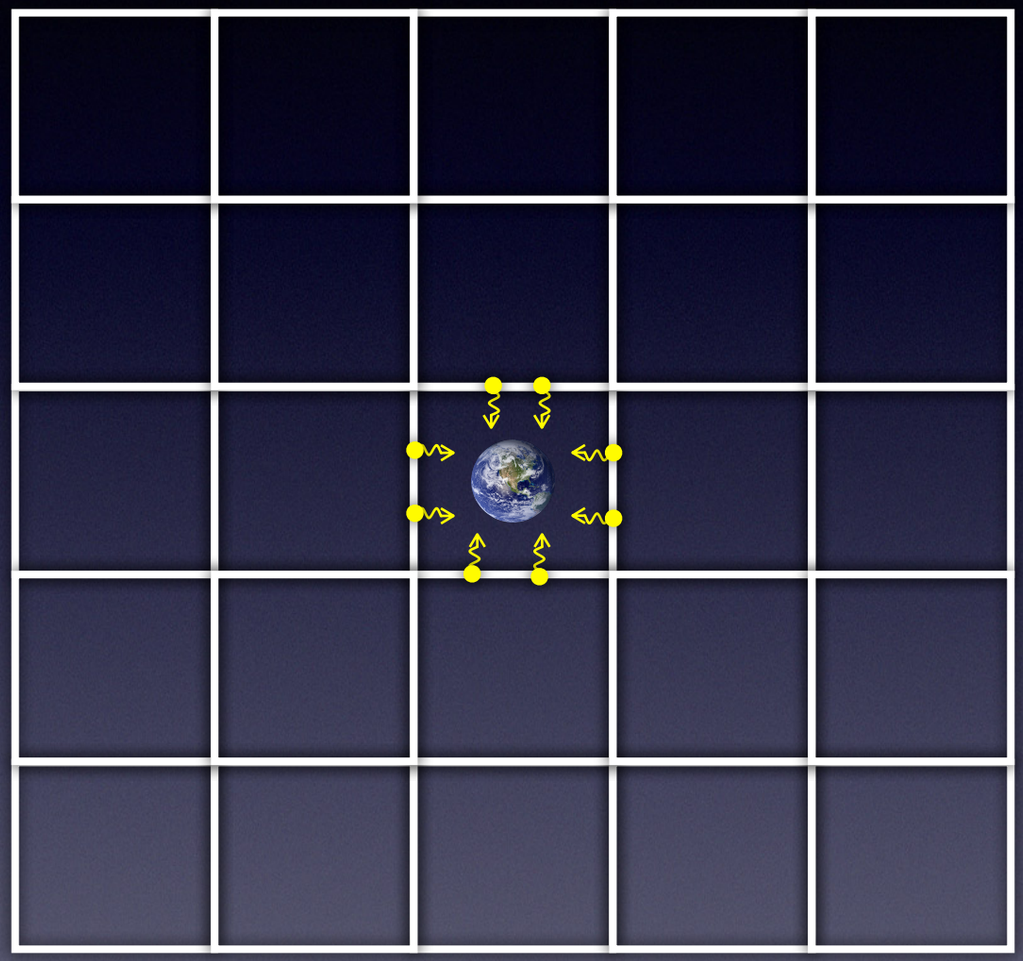
$$\rightarrow \rho_0 \; + \; \delta_x\rho \quad \rightarrow \quad \ddot{R}_0 \; + \; \delta_x\ddot{R}$$

$\frac{\rho_R}{\rho_{tot}} = \frac{\rho_m}{\rho_{tot}}$ fluctuation isocourbure



FAQ :

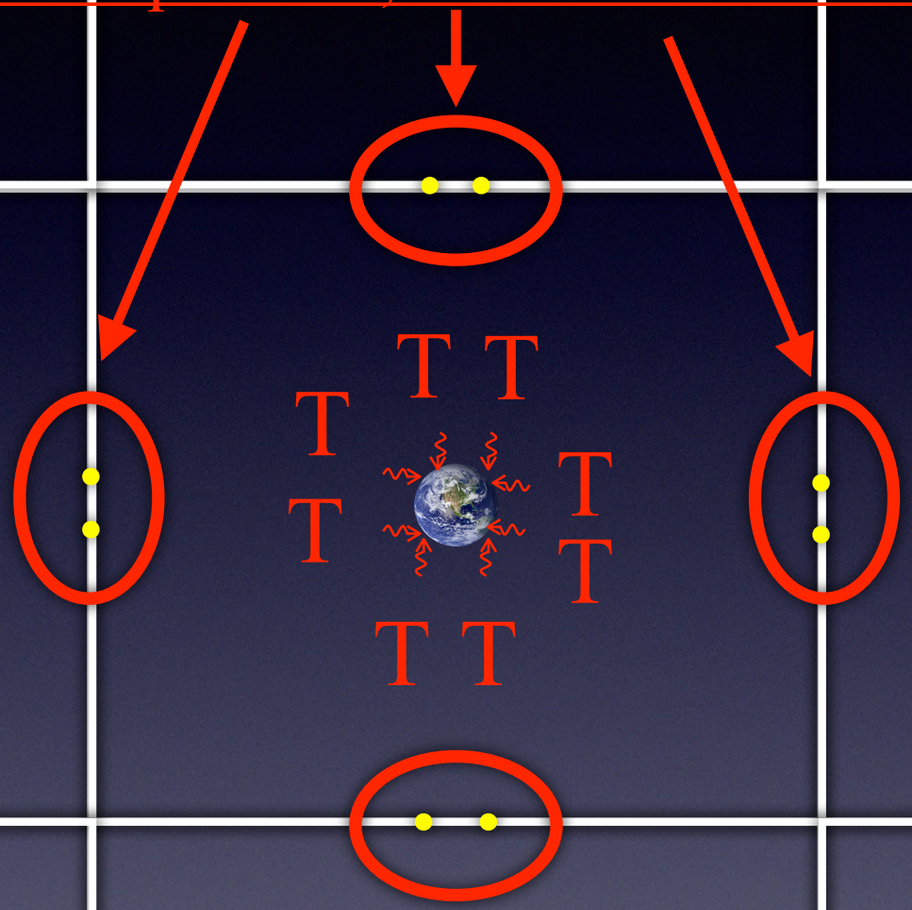
Problème de l'horizon ?



FAQ :

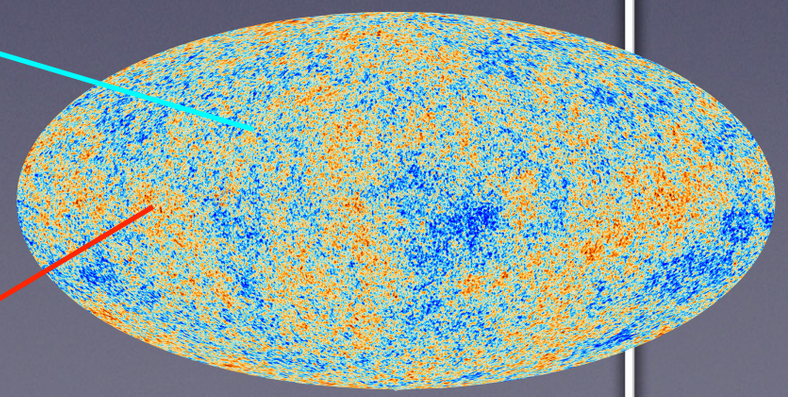
Problème de l'horizon ?

Points avec la même température, sans avoir été causalement en contact



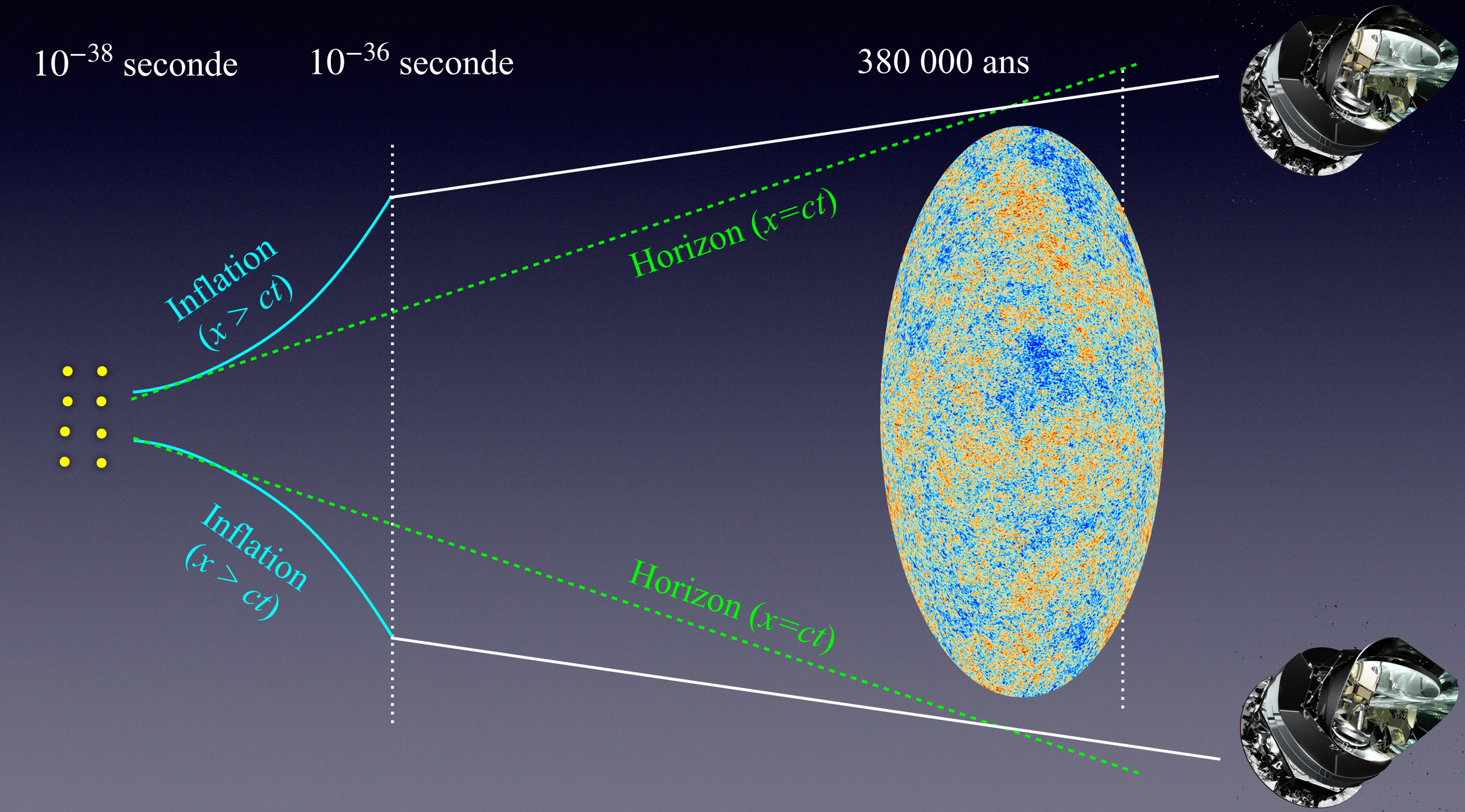
2.72548 degrés

2.72549 degrés



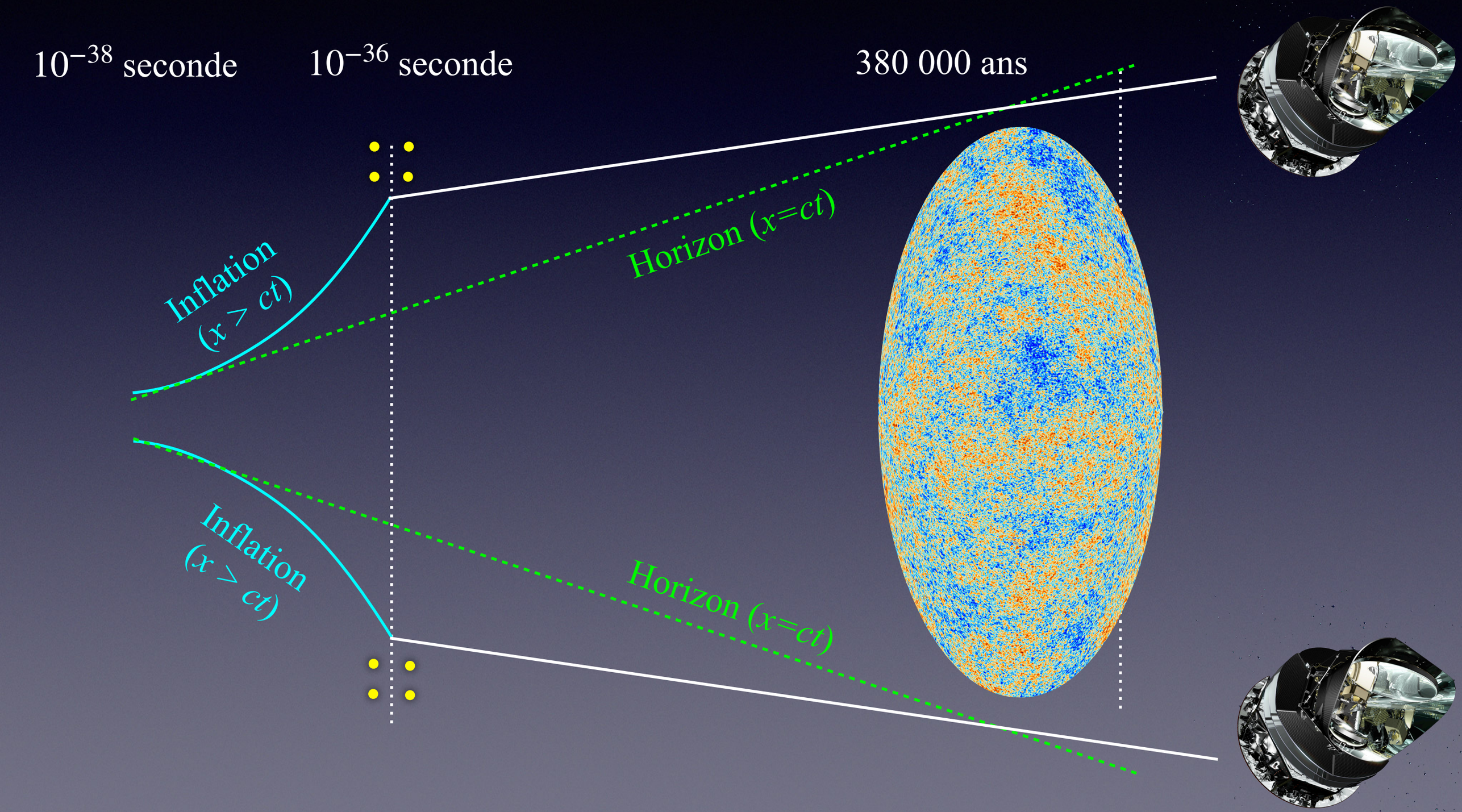
FAQ :
Problème de l'horizon ?

Les points ont été en contact, puis envoyés hors de l'horizon, et maintenant y rerentrent.



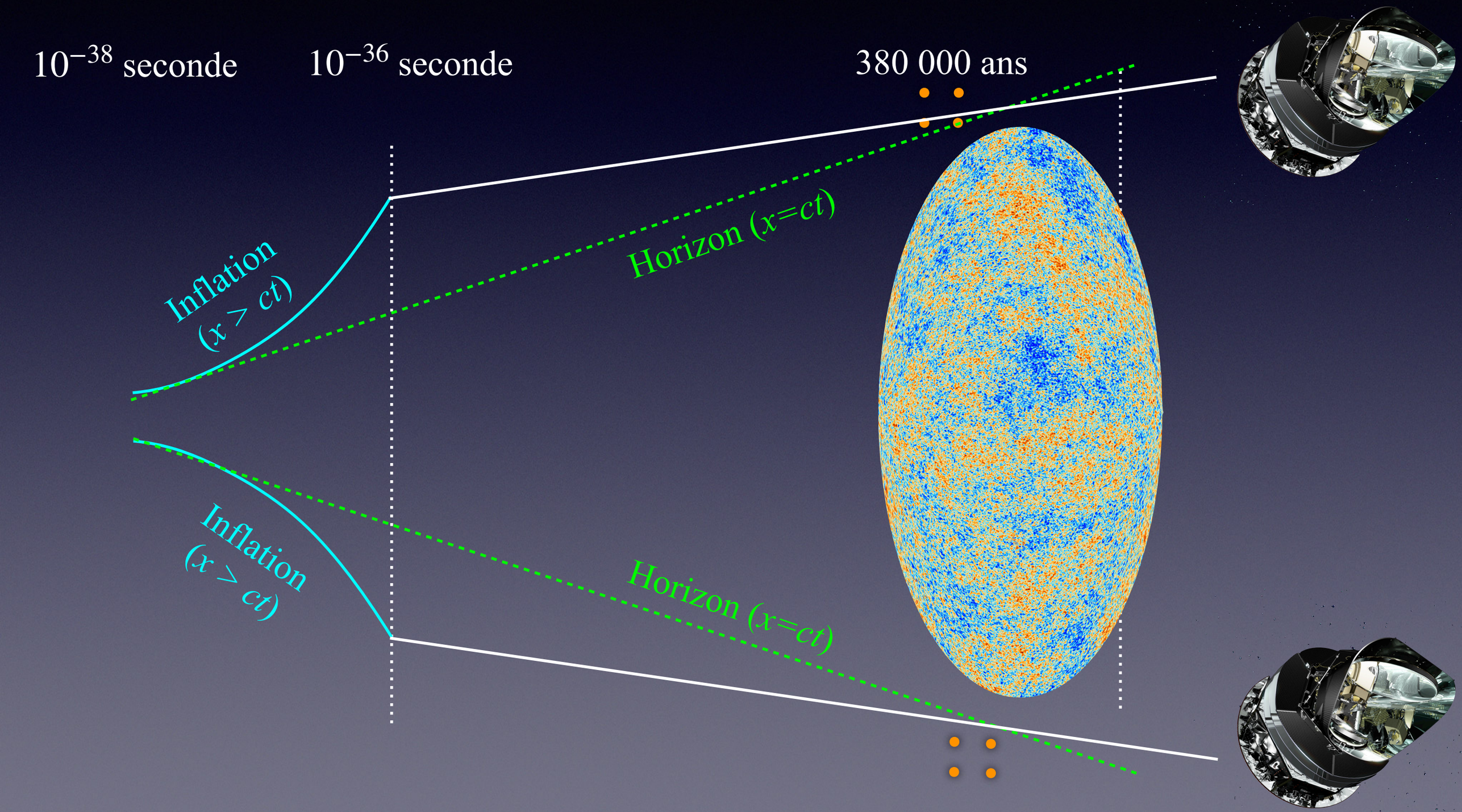
FAQ :
Problème de l'horizon ?

Les points ont été en contact, puis envoyés hors de l'horizon, et maintenant y rerentrent.



FAQ :
Problème de l'horizon ?

Les points ont été en contact, puis envoyés hors de l'horizon, et maintenant y rerentrent.



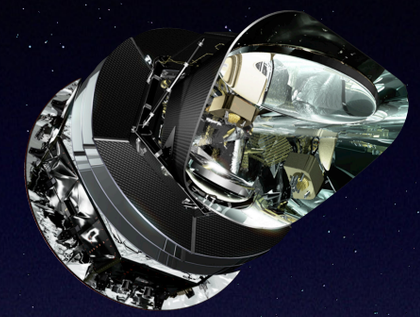
FAQ :
Problème de l'horizon ?

Les points ont été en contact, puis envoyés hors de l'horizon, et maintenant y rerentrent.

10^{-38} seconde

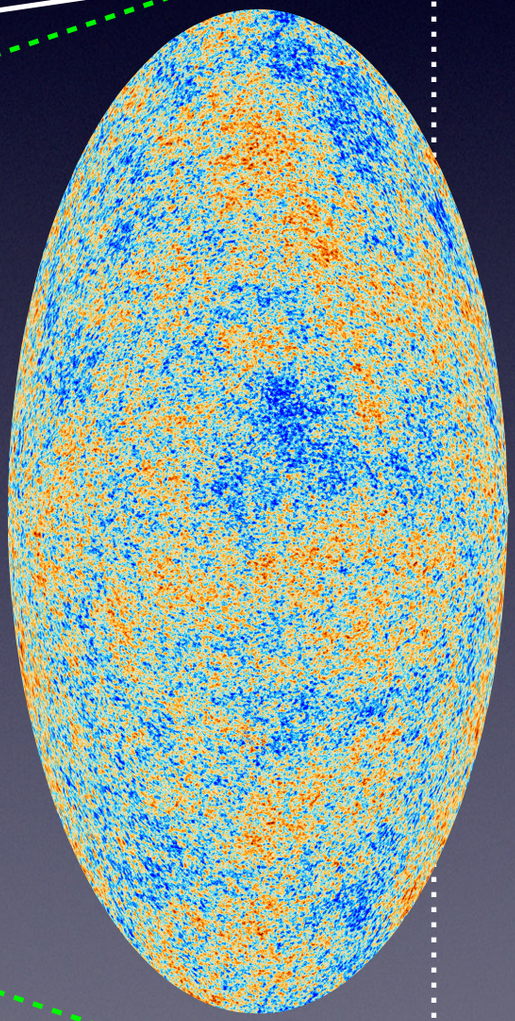
10^{-36} seconde

380 000 ans



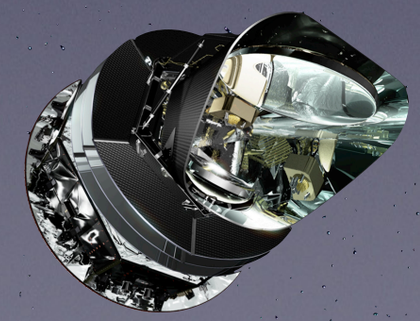
Inflation ($x > ct$)

Horizon ($x=ct$)

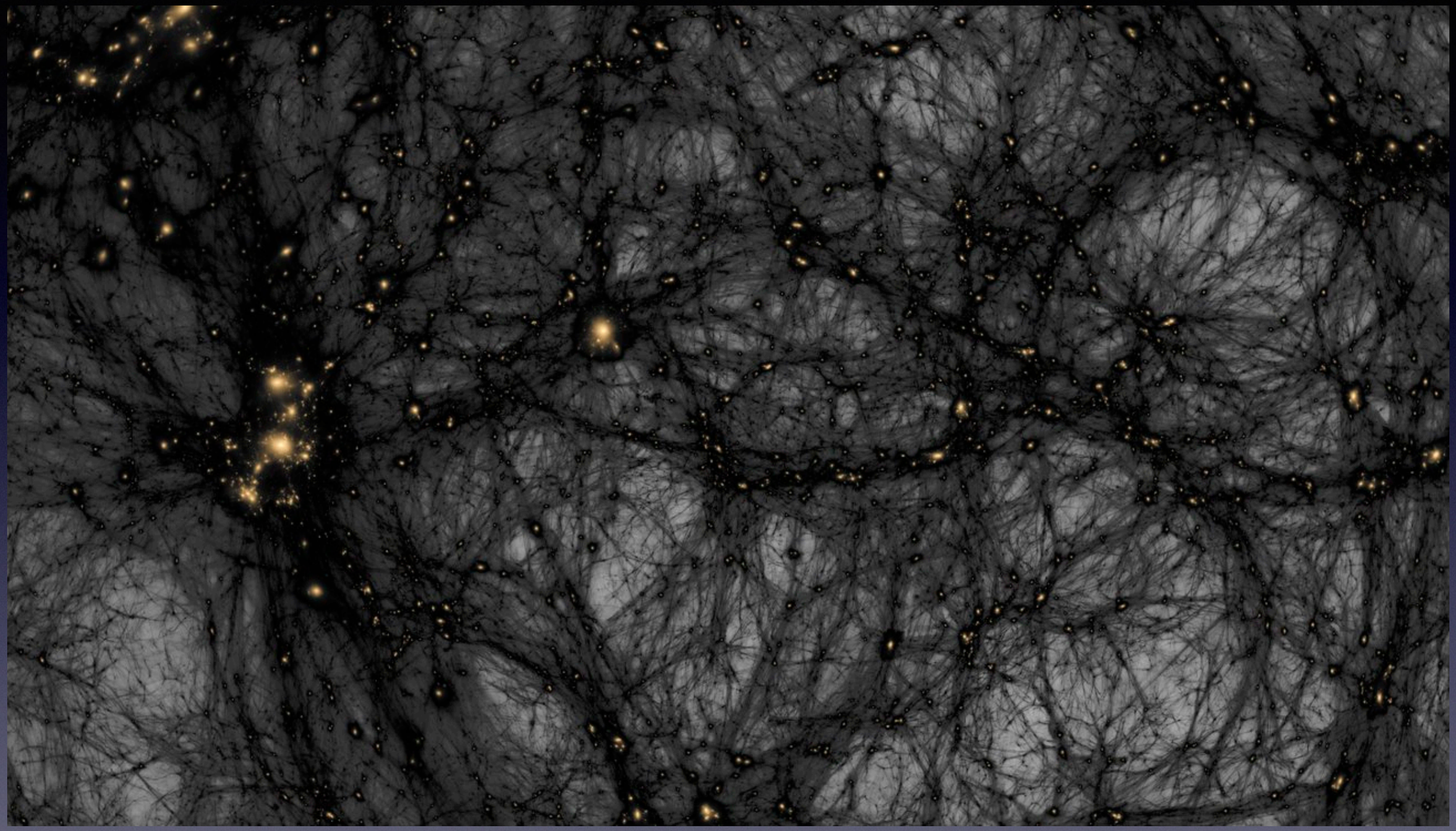


Inflation ($x > ct$)

Horizon ($x=ct$)



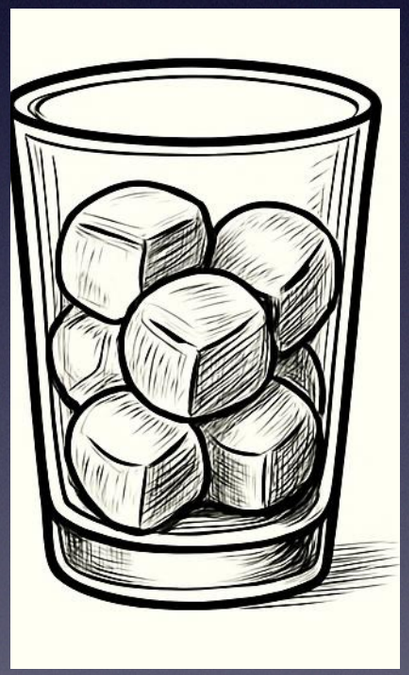
Chapitre II : Cette mystérieuse matière noire



Où l'auditeur sera convaincu de la présence de la matière noire dans l'Univers, et comprendra la chasse qui est lancée sur sa trace.

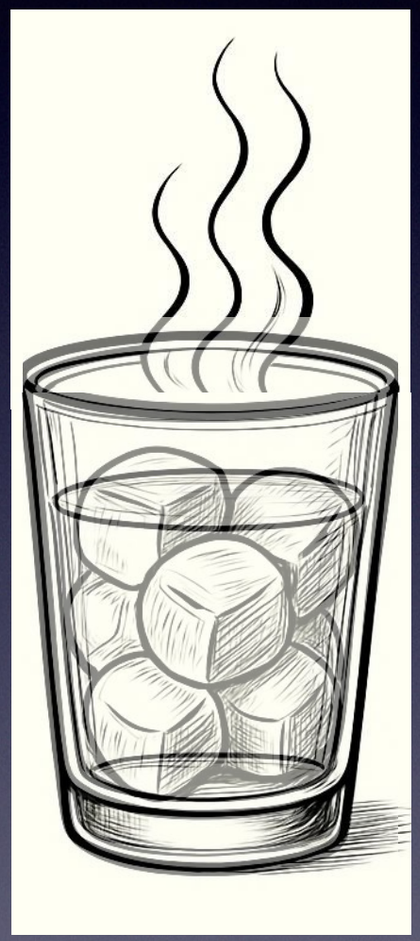
De quoi est fait l’Univers?



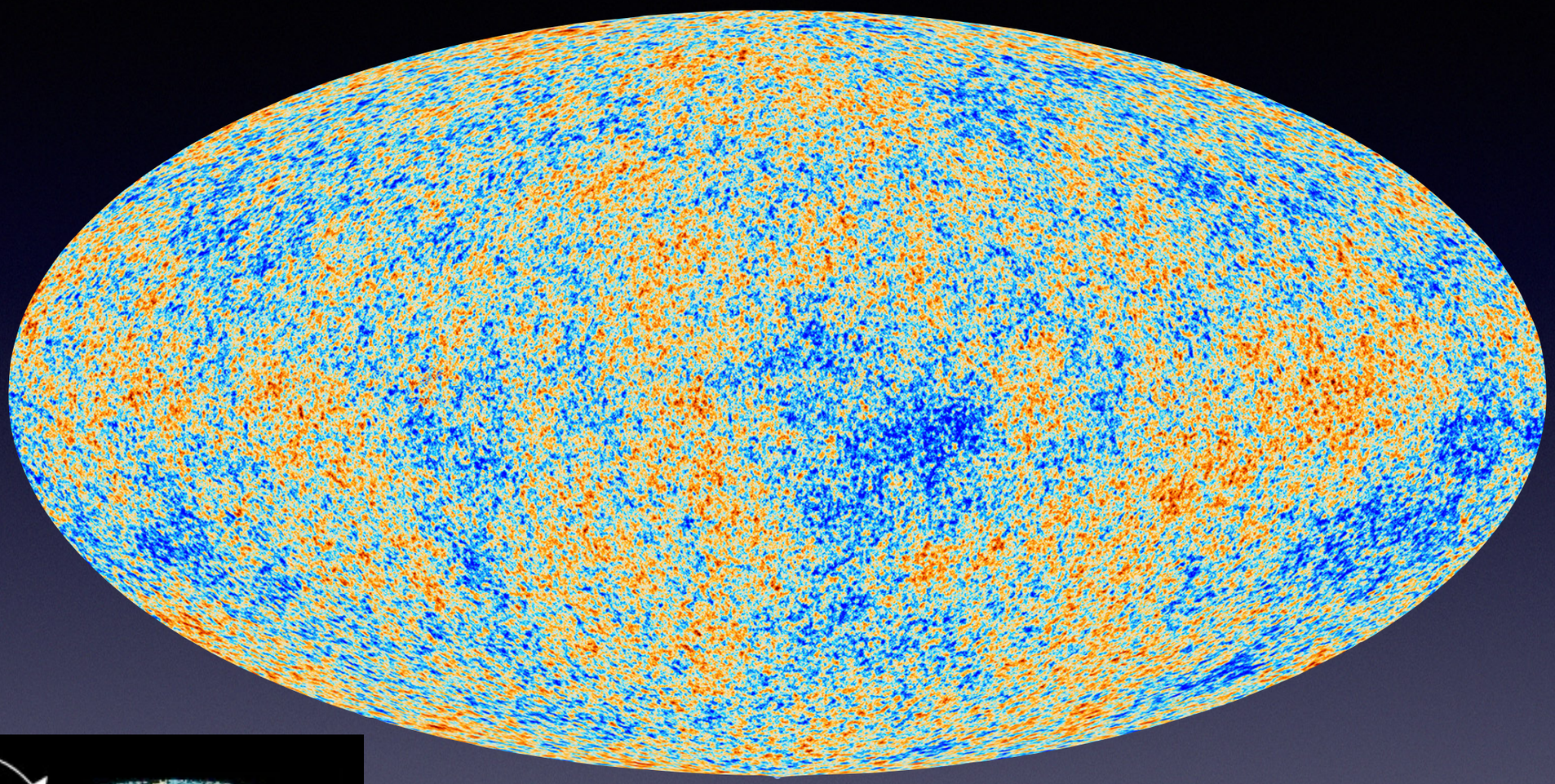


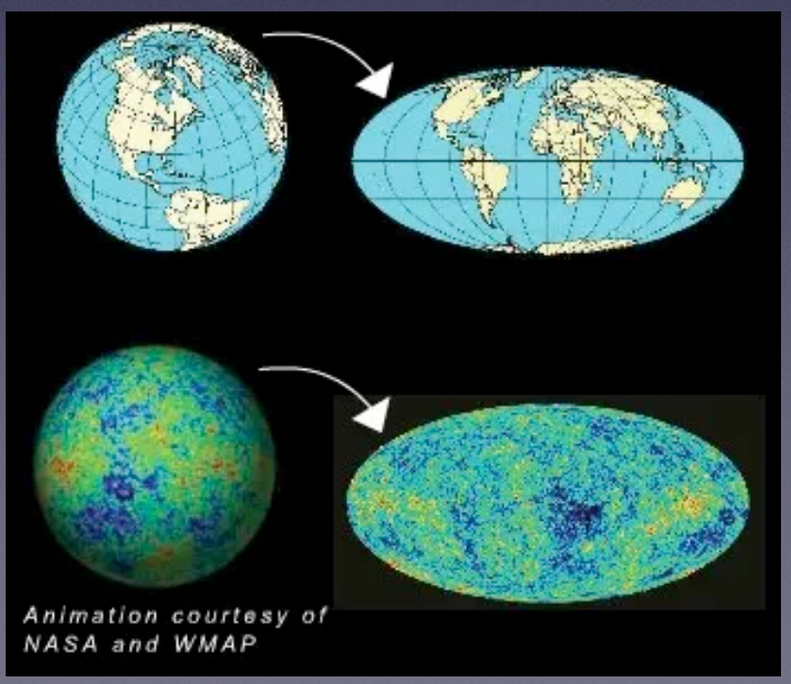


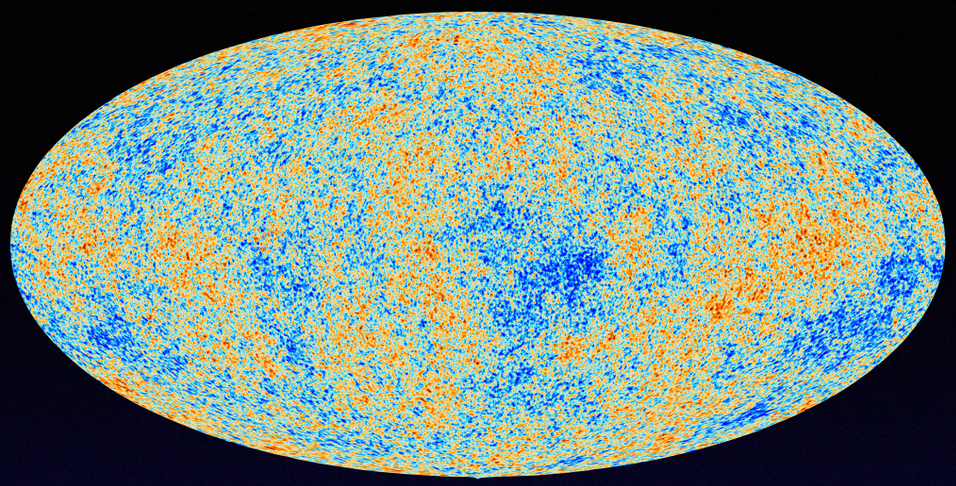
De quoi est fait l'Univers?



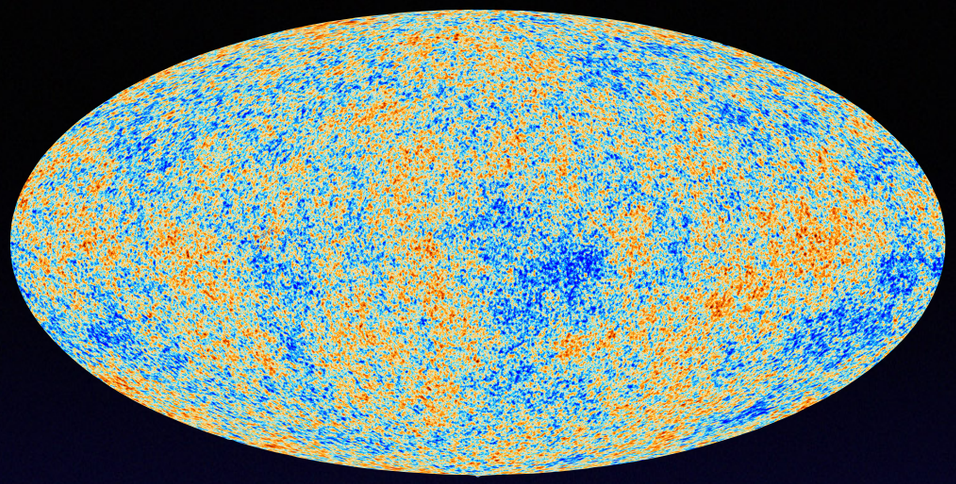
Le fond diffus cosmologique (CMB)
(Photo du satellite *Planck*, 2017)









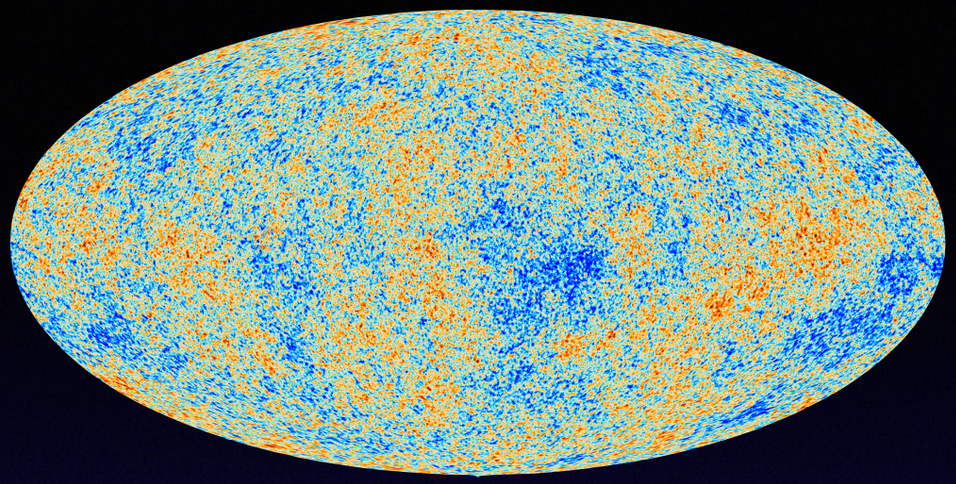


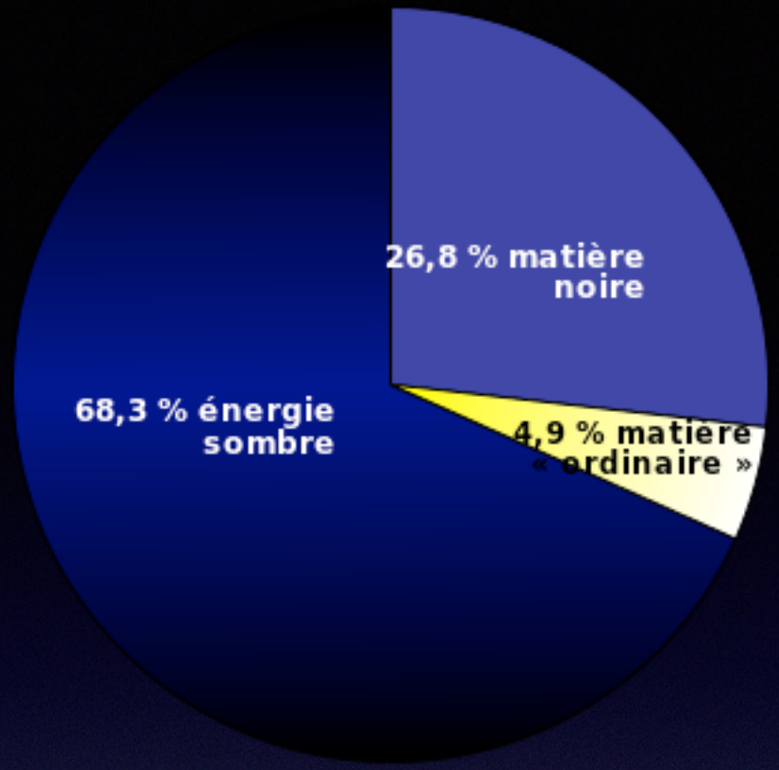




65 millions
d’années



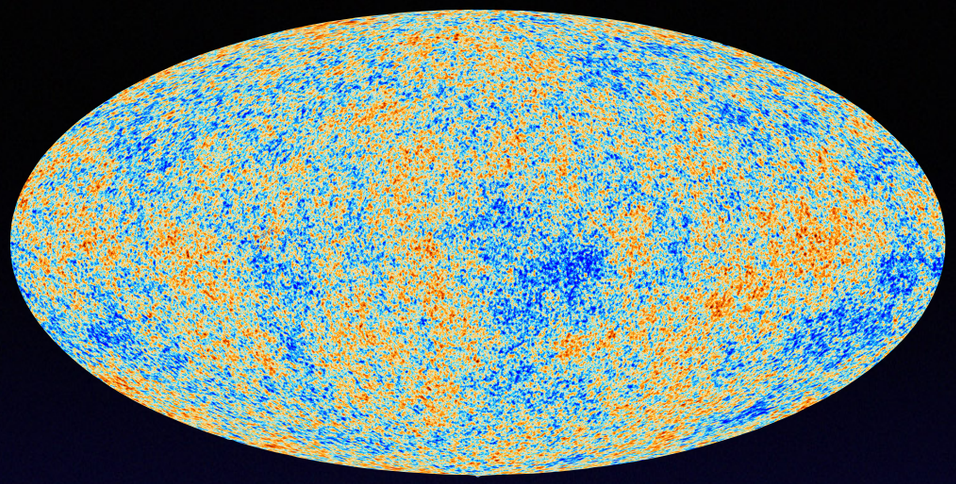




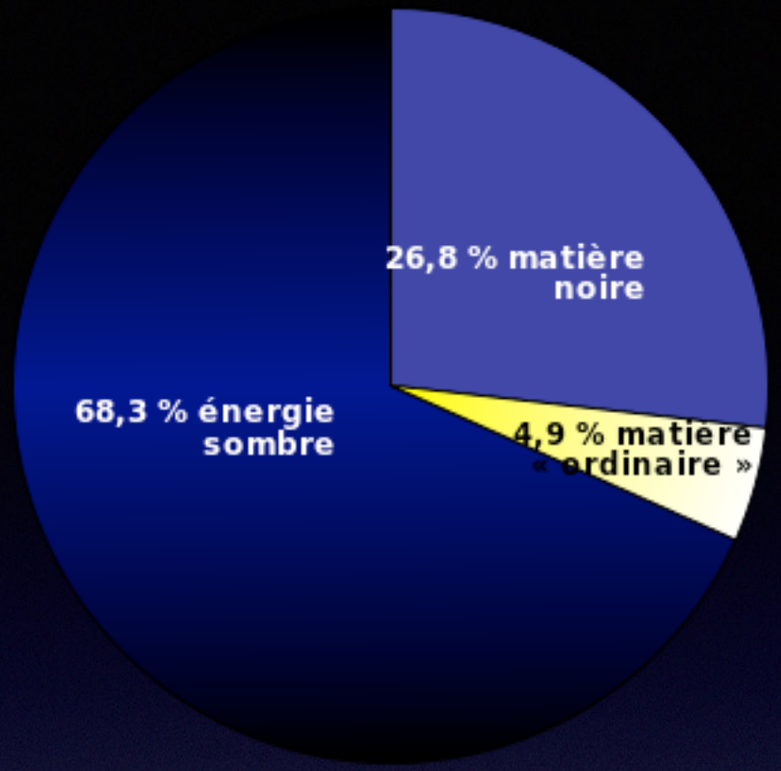


65 millions d’années

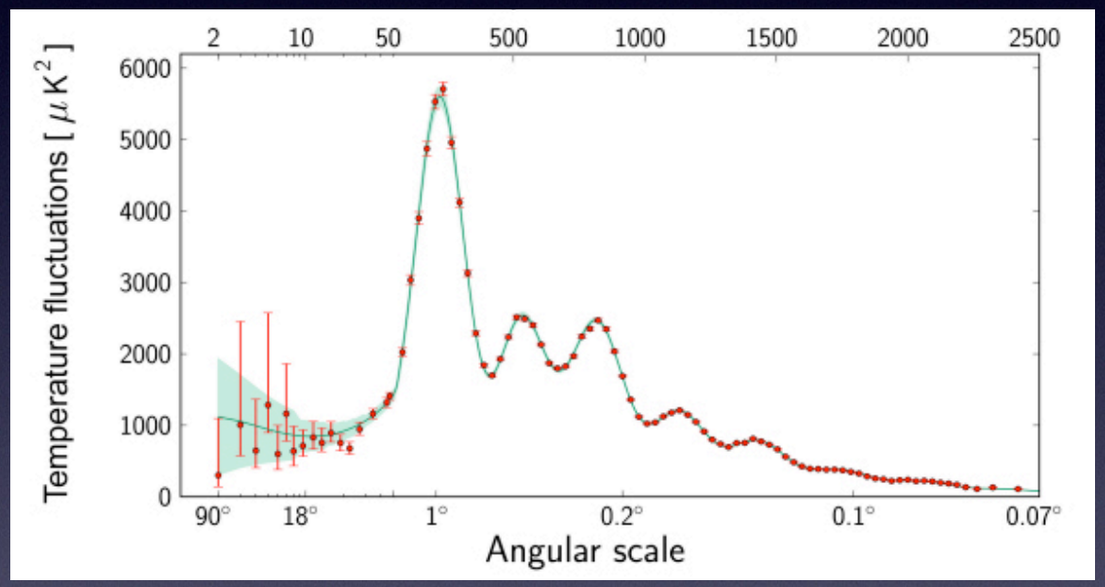




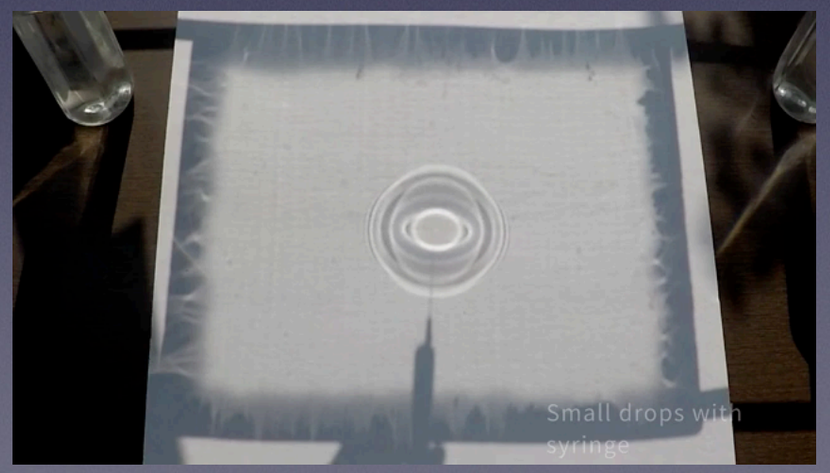




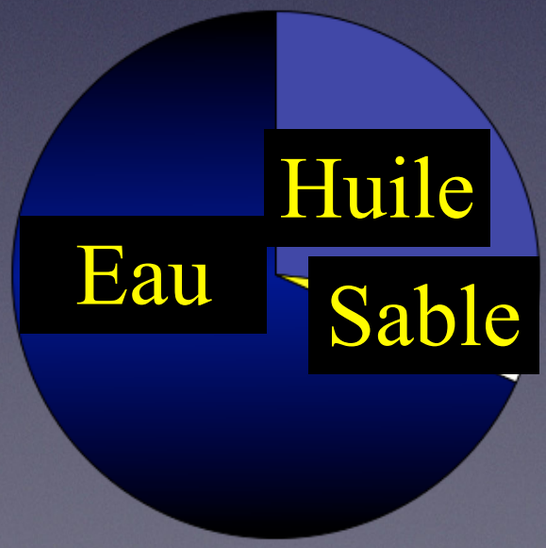
Les anisotropies du CMB

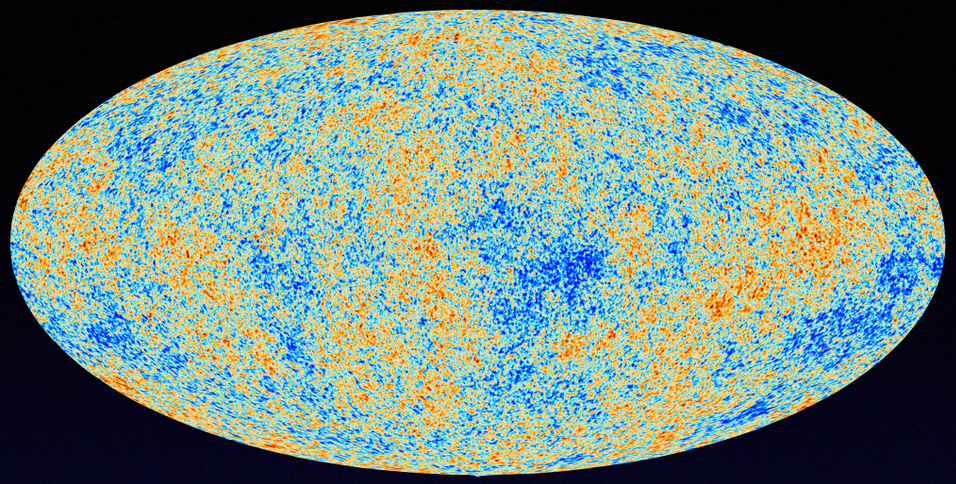




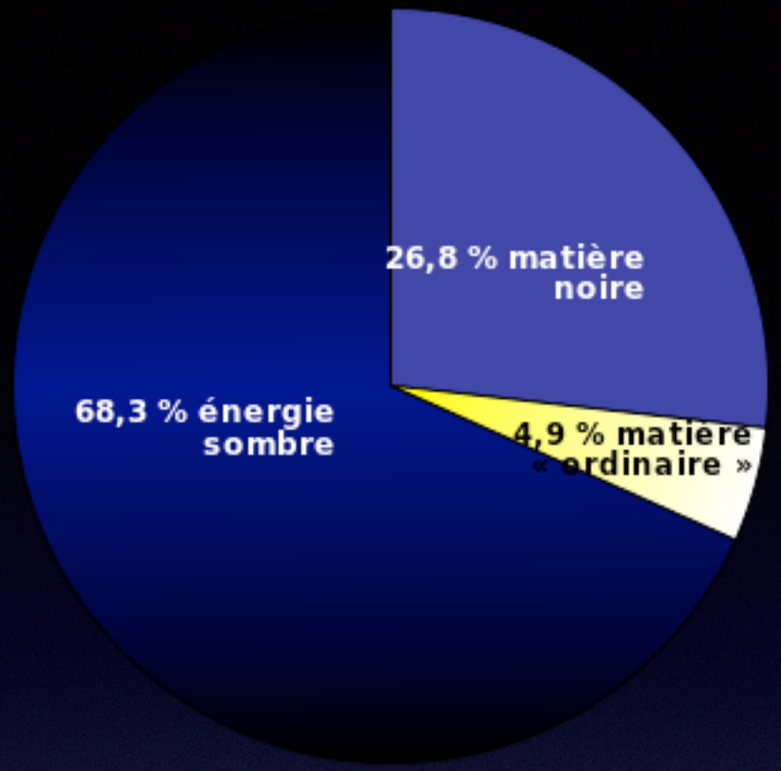




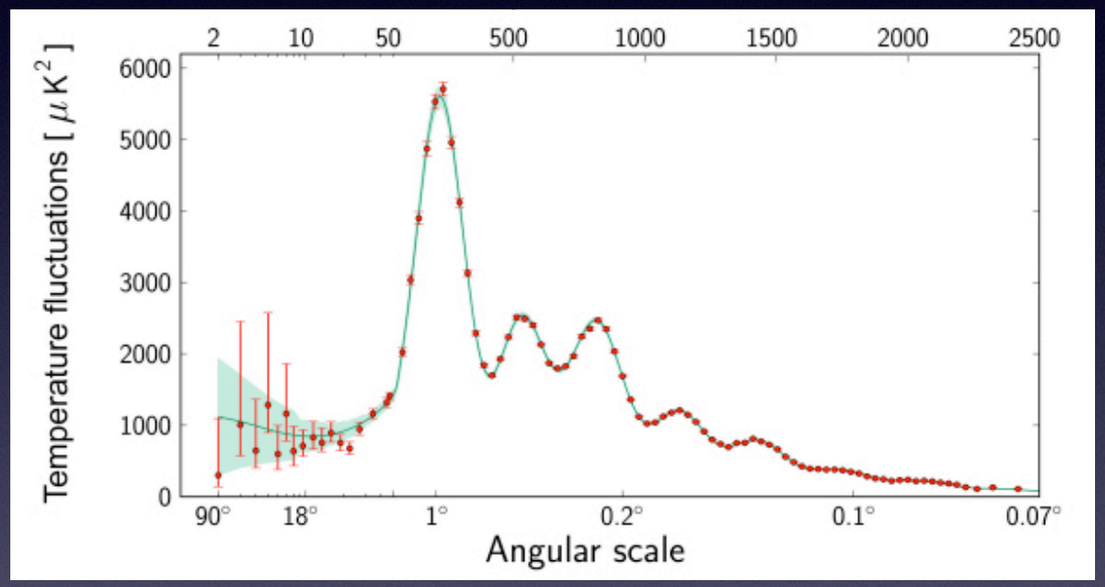




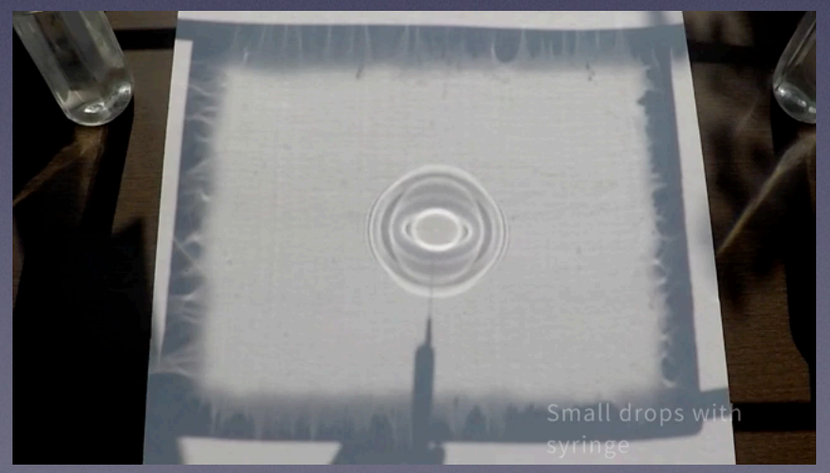




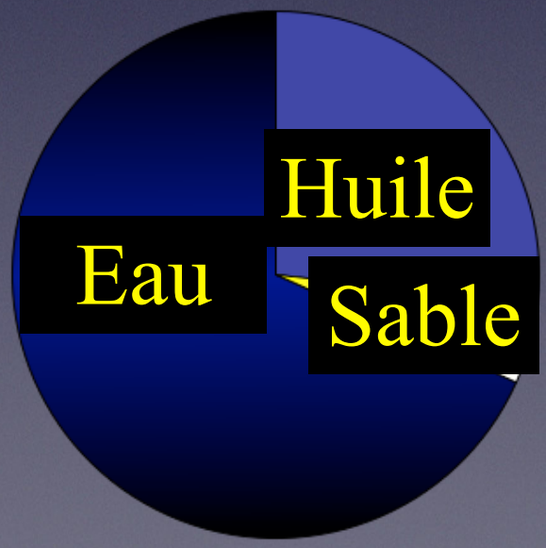
Les anisotropies du CMB

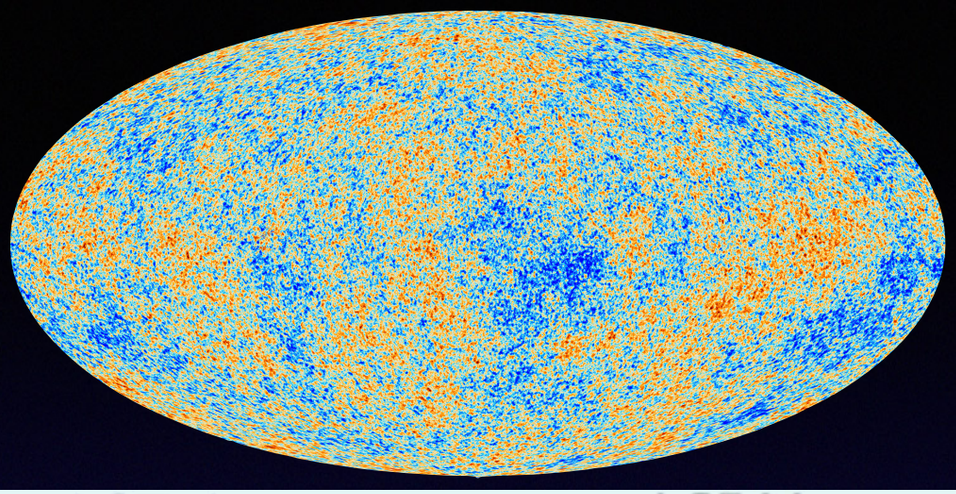


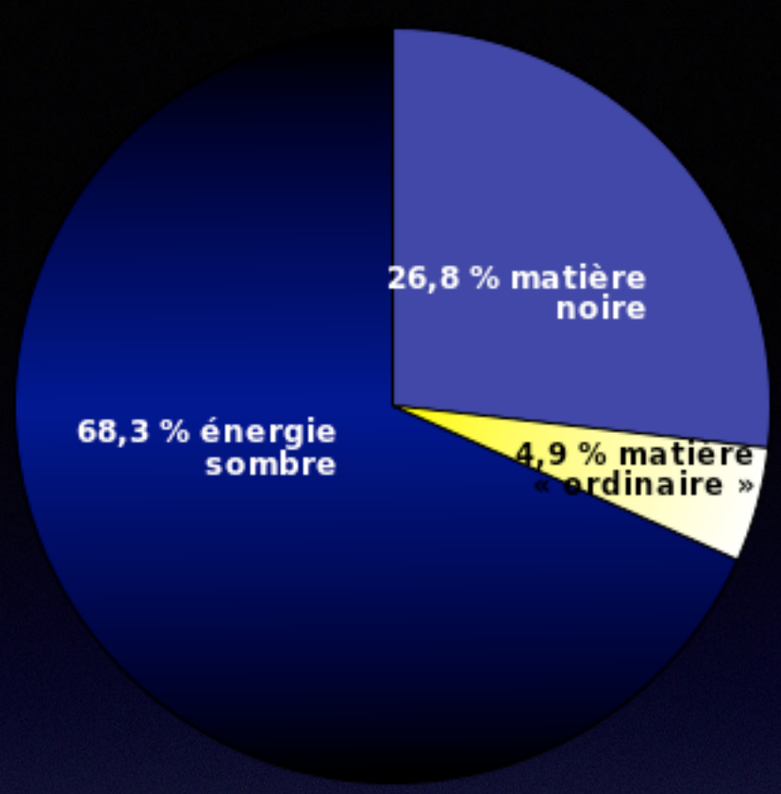


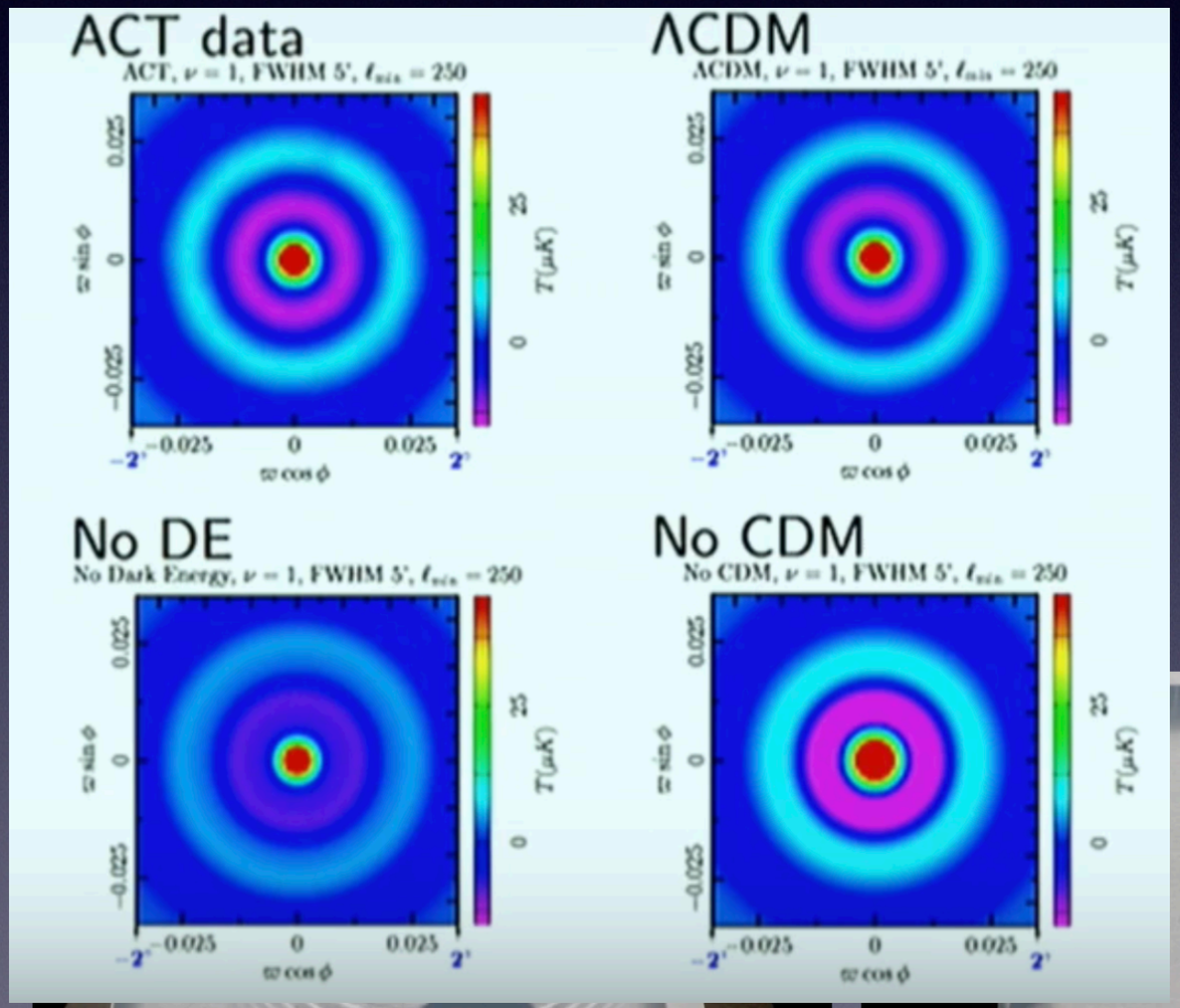




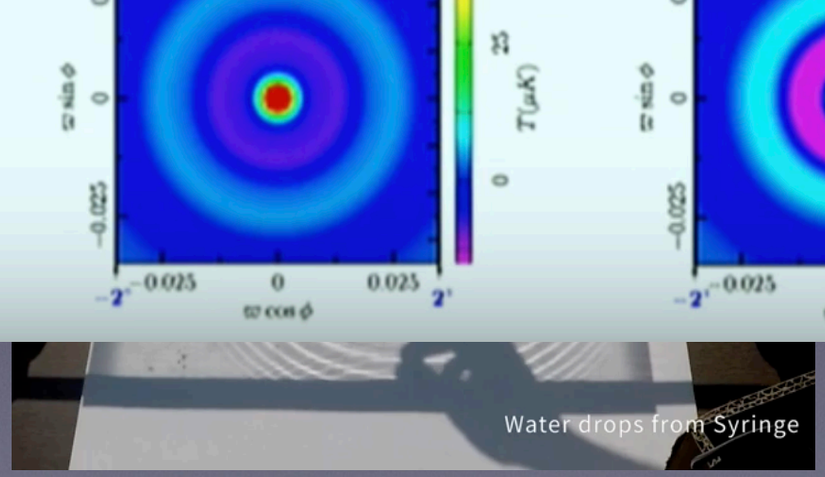


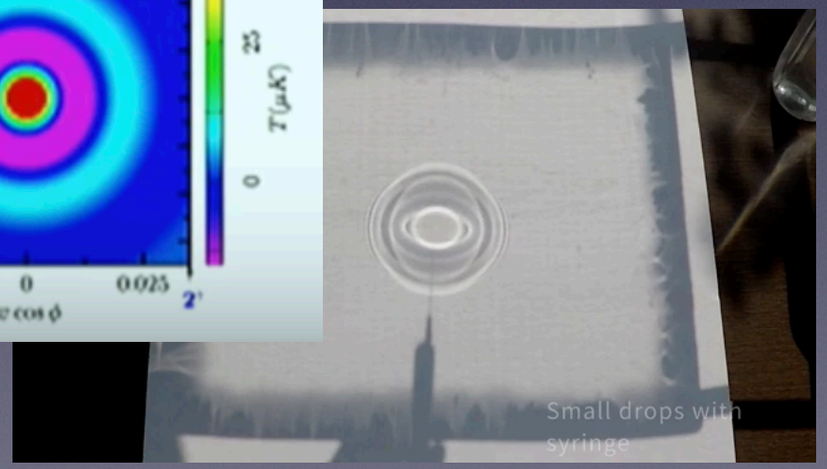


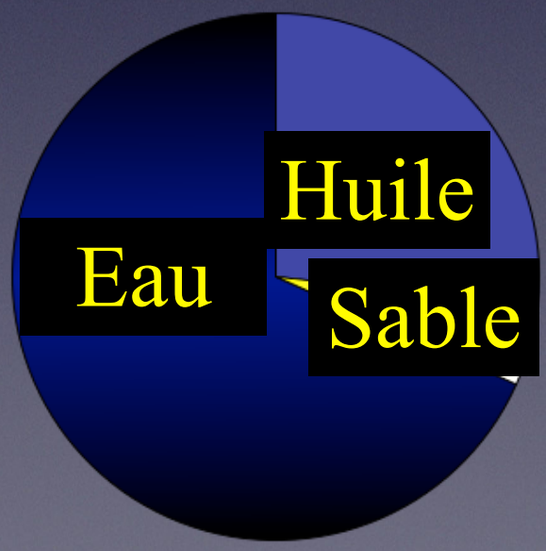


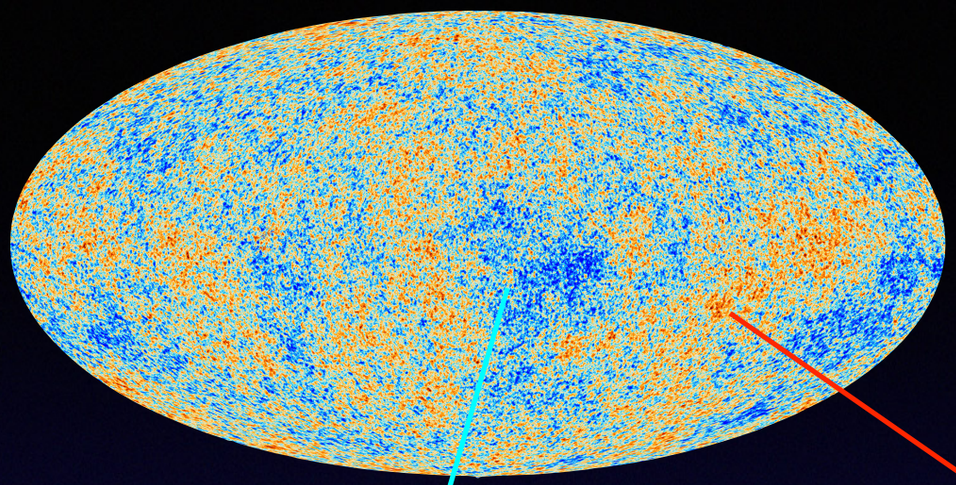


Les anisotropies du CMB

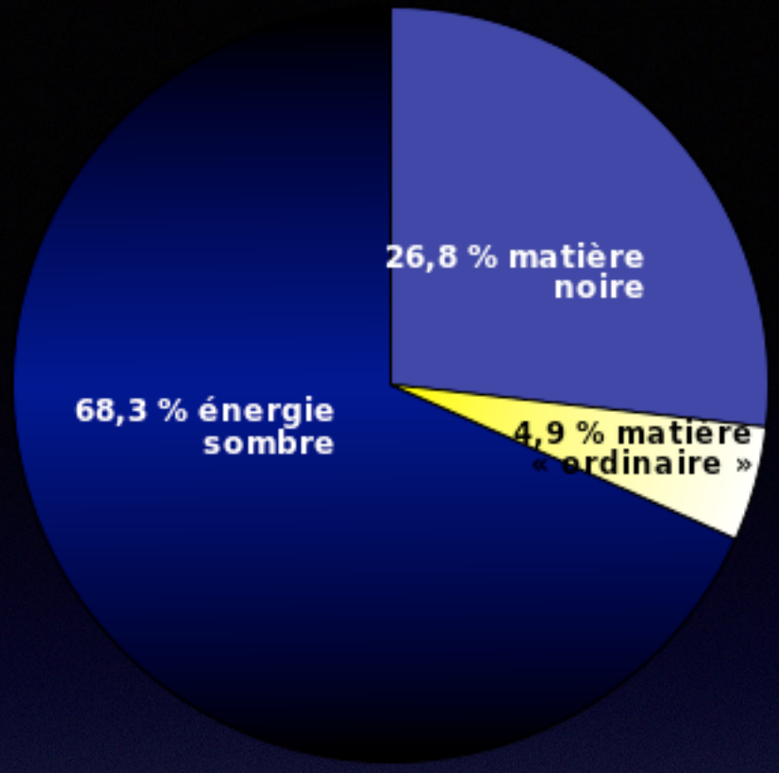








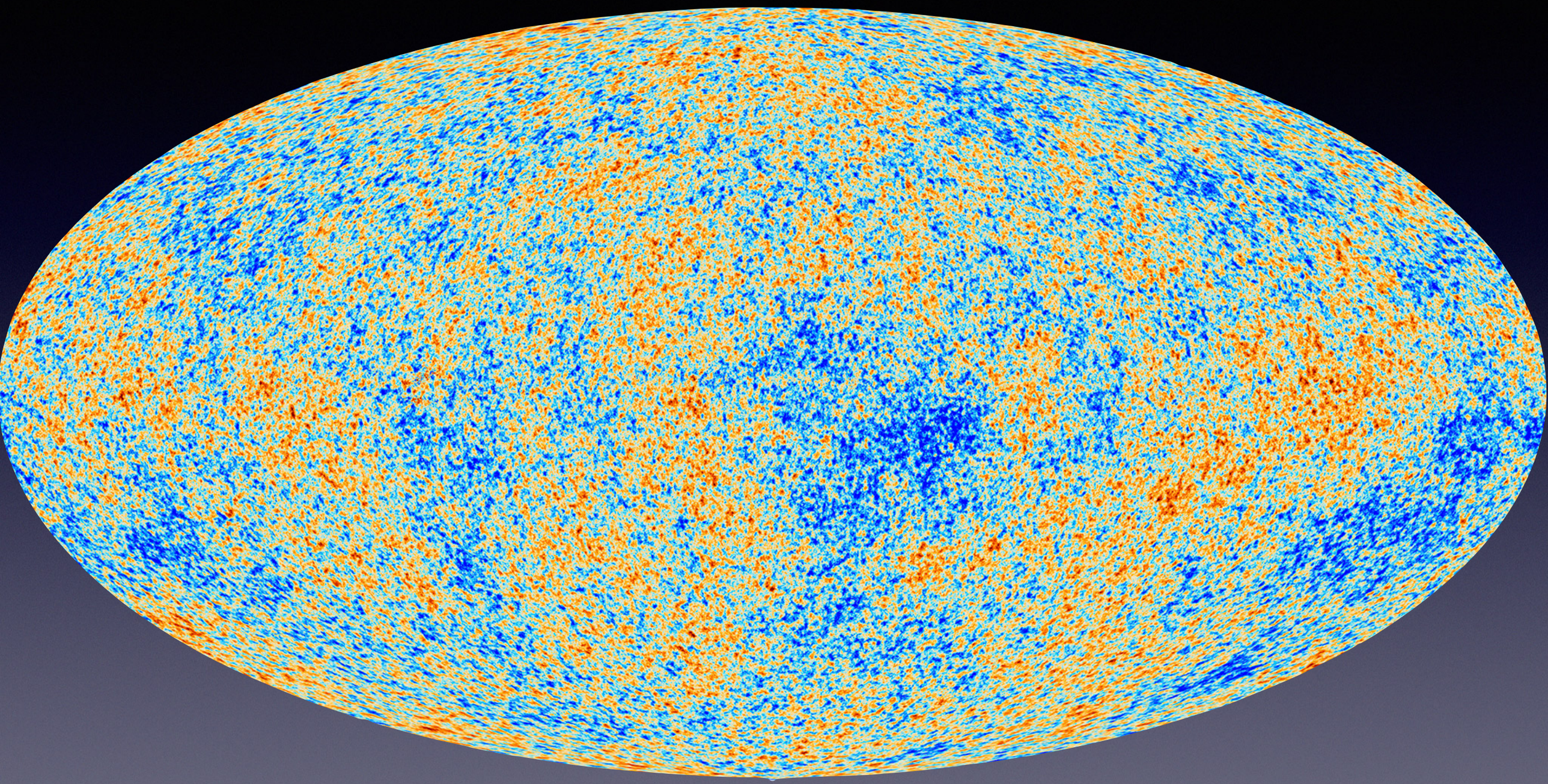




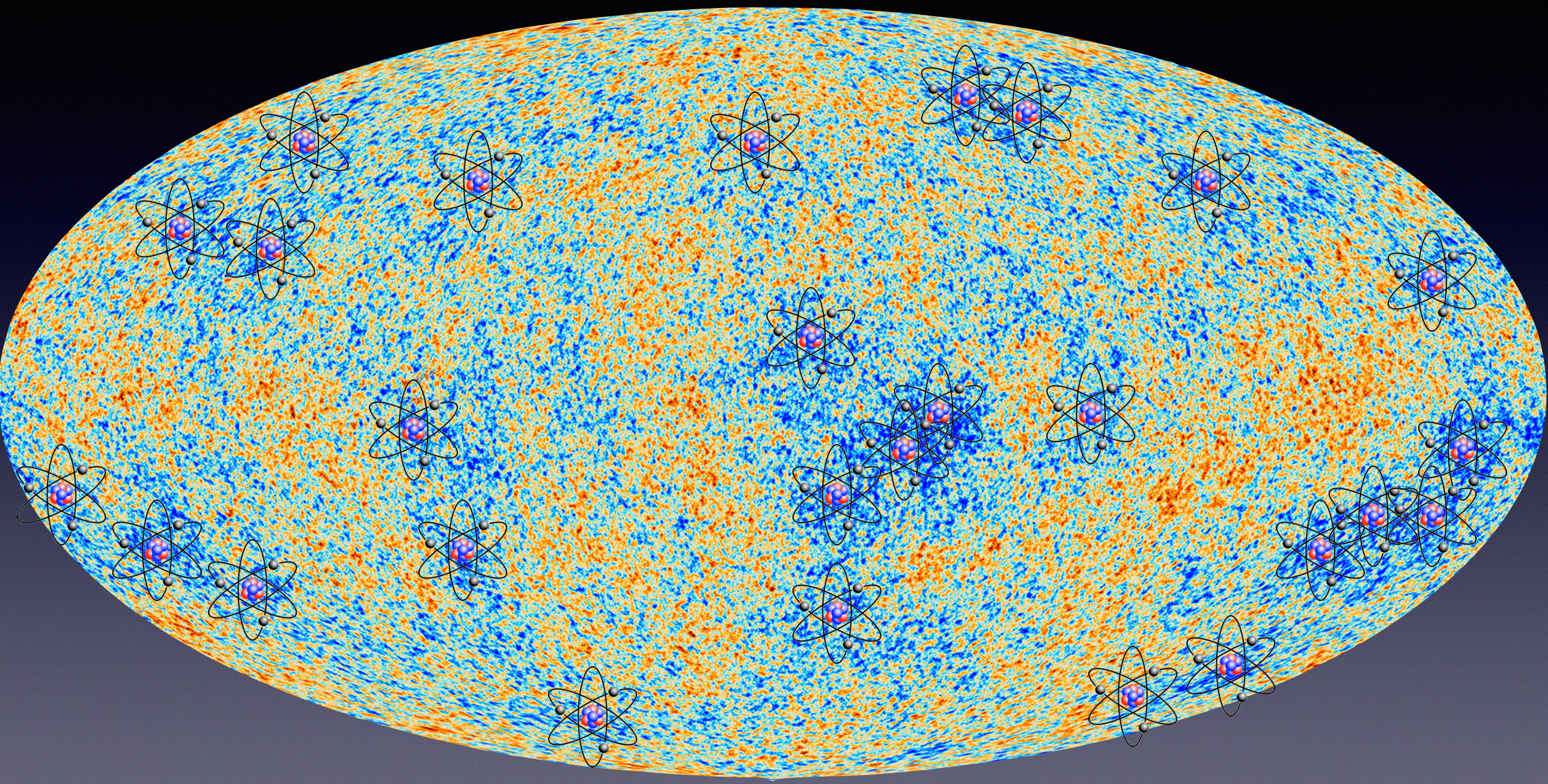
2.72548 degrés

2.72549 degrés

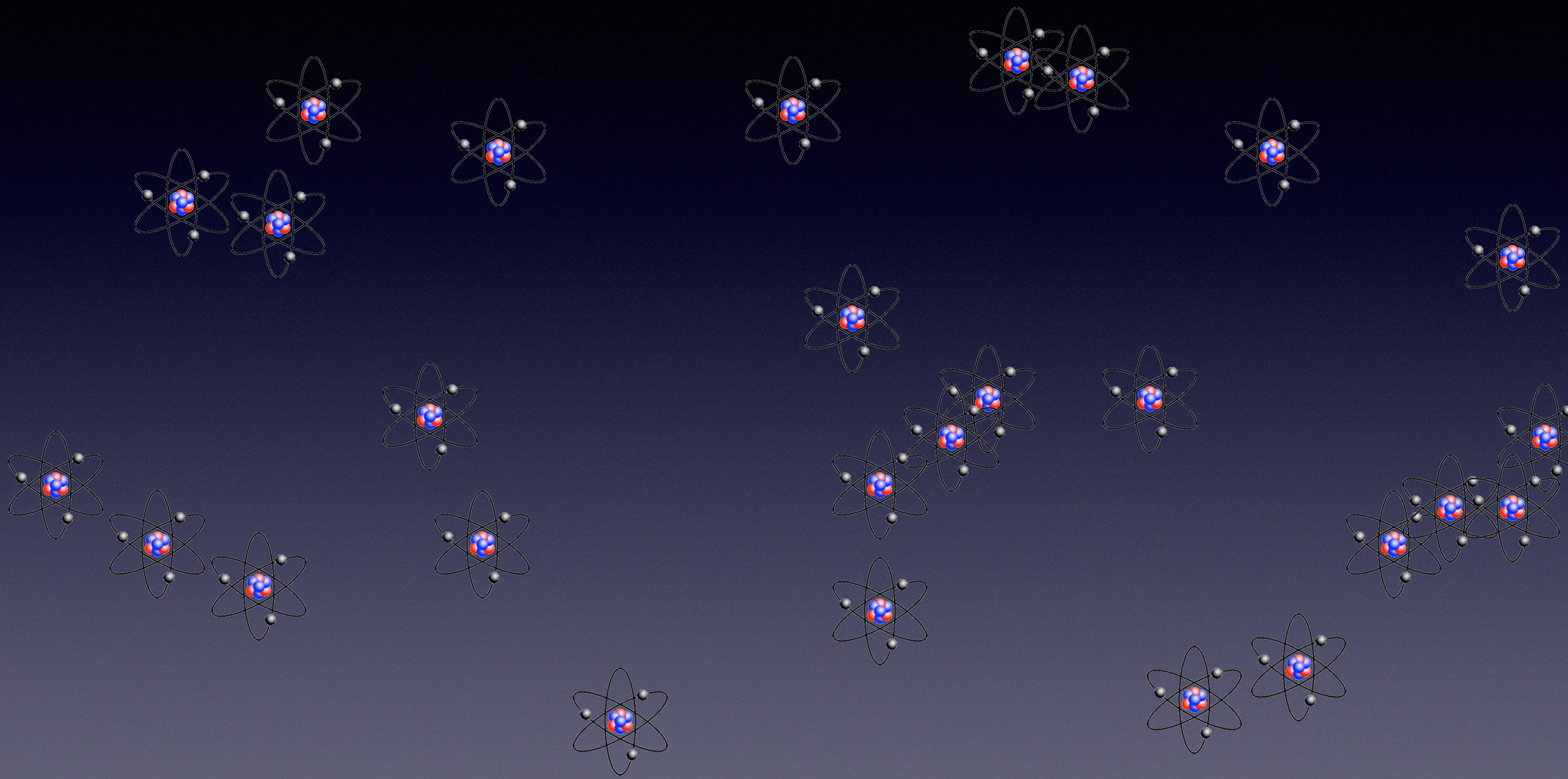
Simuler notre Univers



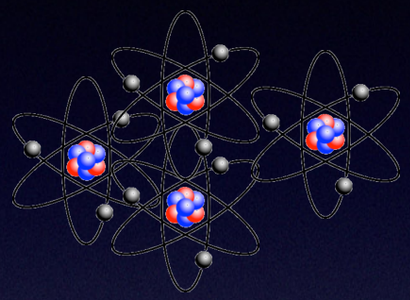
Simuler notre Univers

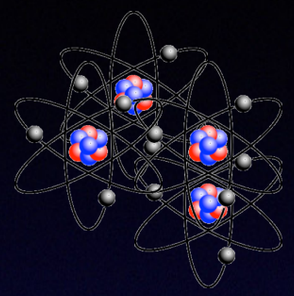


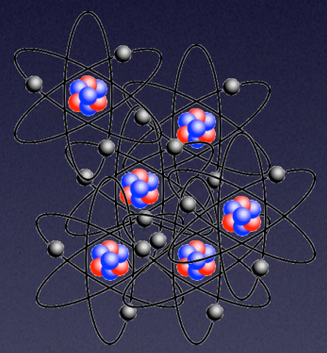
Simuler notre Univers

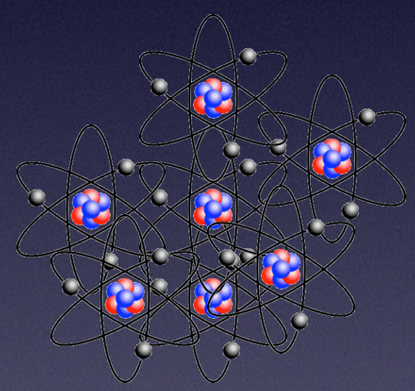


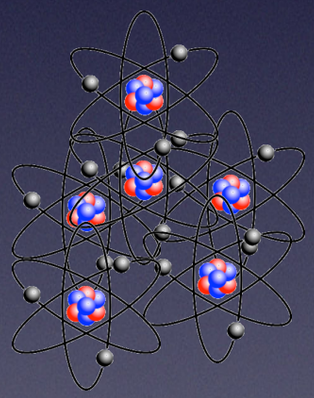
Simuler notre Univers



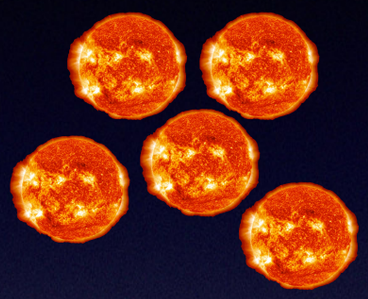


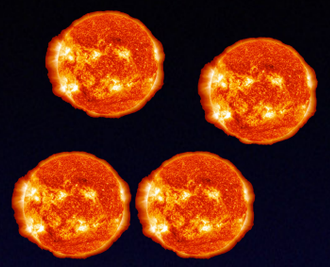


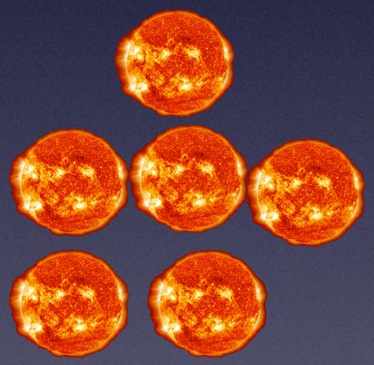


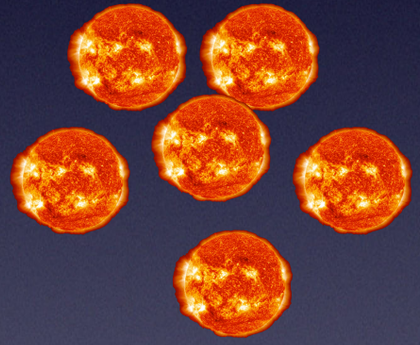


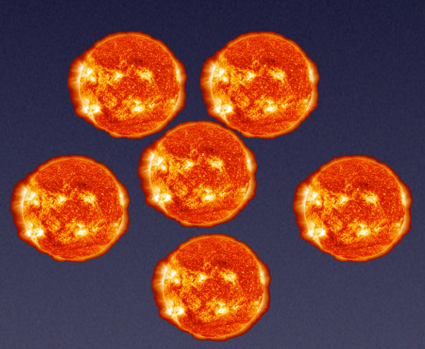
Simuler notre Univers





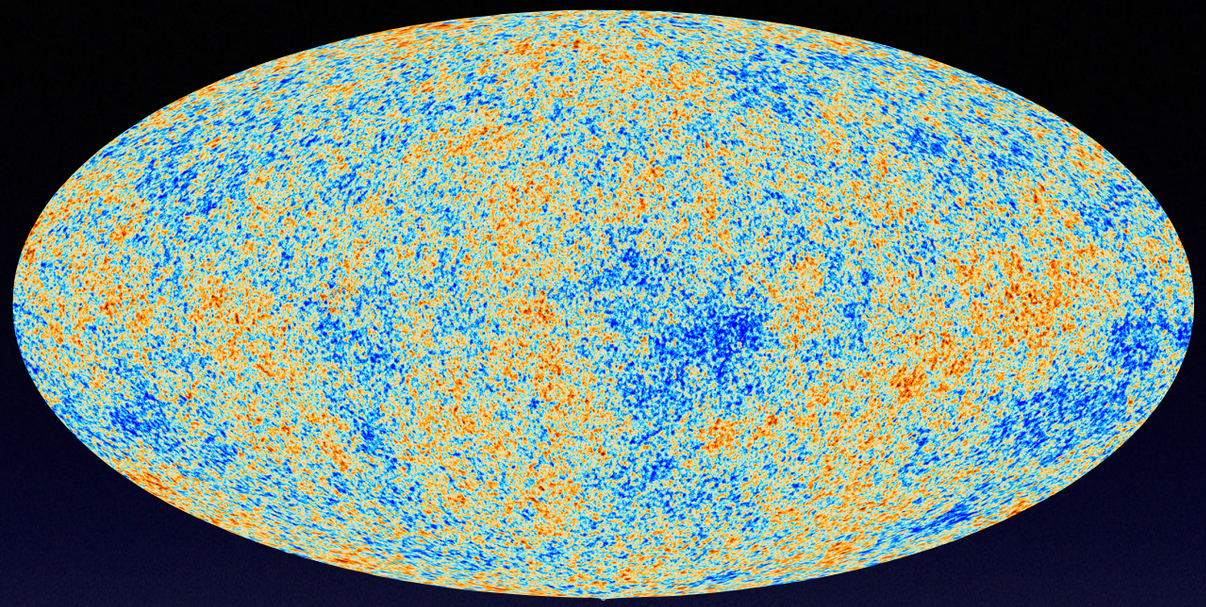




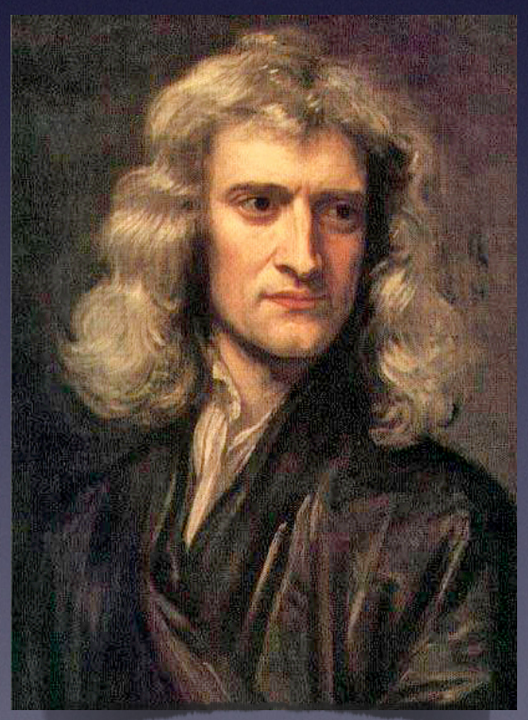


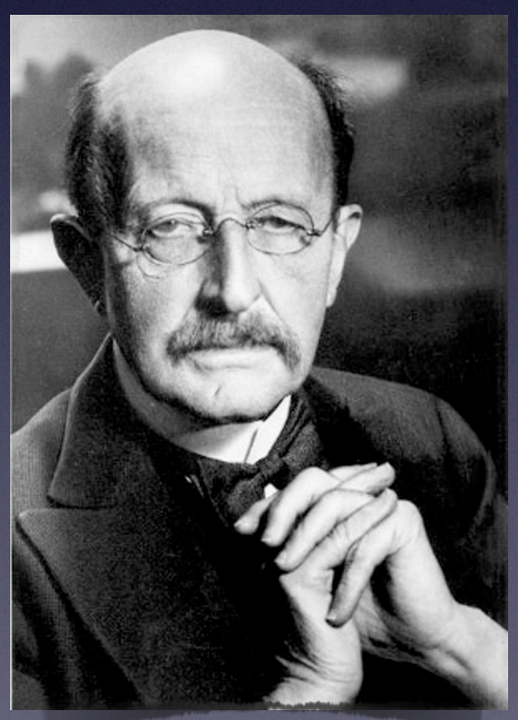
Simuler notre Univers

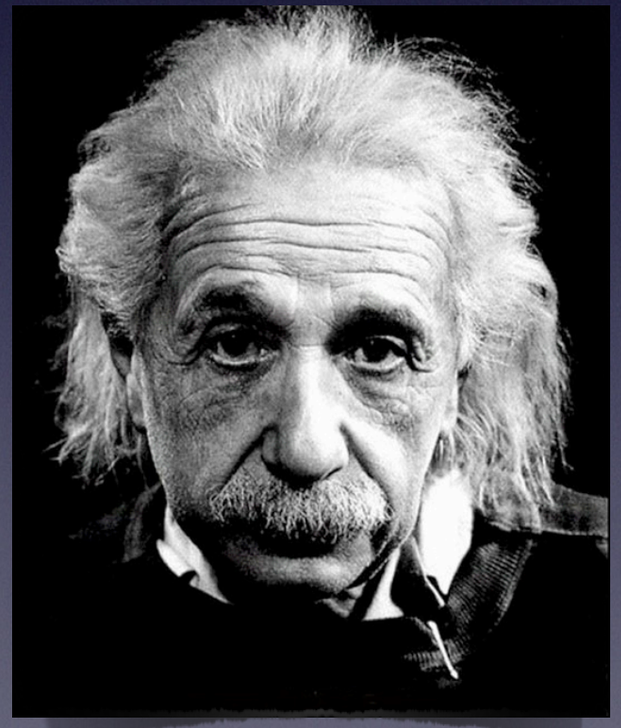
Simuler notre Univers



Newton + Planck + Einstein = ...







$$F = G\frac{mM}{r^2}$$

$$E = h\nu$$

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi}{M_P^2}T_{\mu\nu}$$

Simuler notre Univers

Simuler notre Univers

©2021 Tomoaki Ishiyama, Hirotaka Nakayama, 4D2U Project, NAOJ

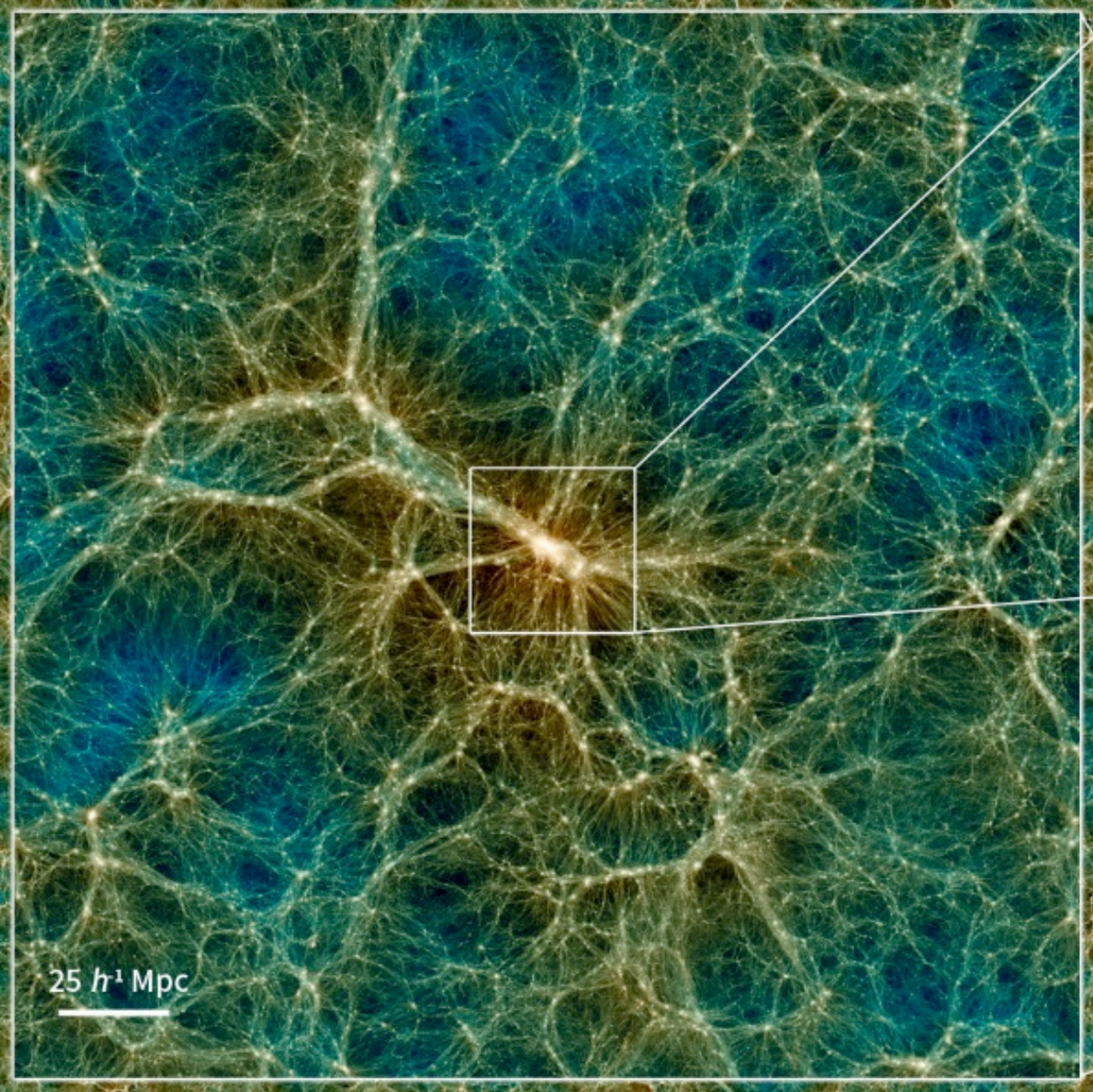
https://www.youtube.com/watch?v=R7nV6JEMGAo

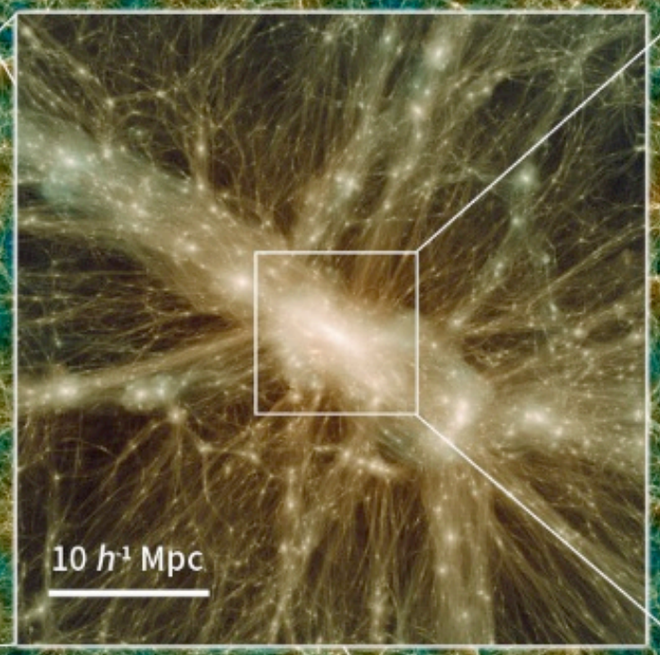
©2021 Tomoaki Ishiyama, Hirotaka Nakayama, 4D2U Project, NAOJ

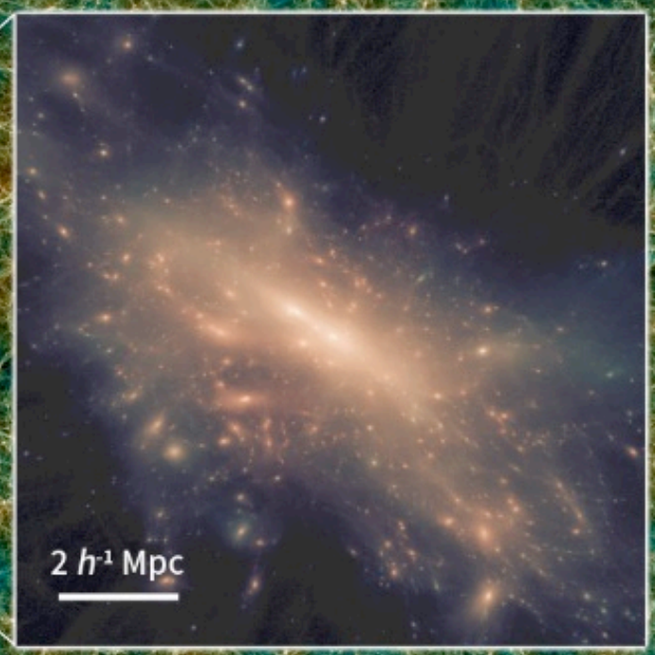
https://www.youtube.com/watch?v=R7nV6JEMGAo

Uchuu: A Suite of Large Volume and Ultra-high Resolution Cosmological *N*-body Simulations

Tomoaki Ishiyama, Francisco Prada, Anatoly A. Klypin, Manodeep Sinha, R. Benton Metcalf, Eric Jullo, Bruno Altieri, Sofía A. Cora, Darren Croton, Sylvain de la Torre, David E. Millán-Calero, Taira Oogi, José Ruedas, Cristian A. Vega-Martínez







100 h^{-1} Mpc

2.0 h^{-1} Gpc Box

3.27 x 10^8 h^{-1} $M_\odot$ particle mass

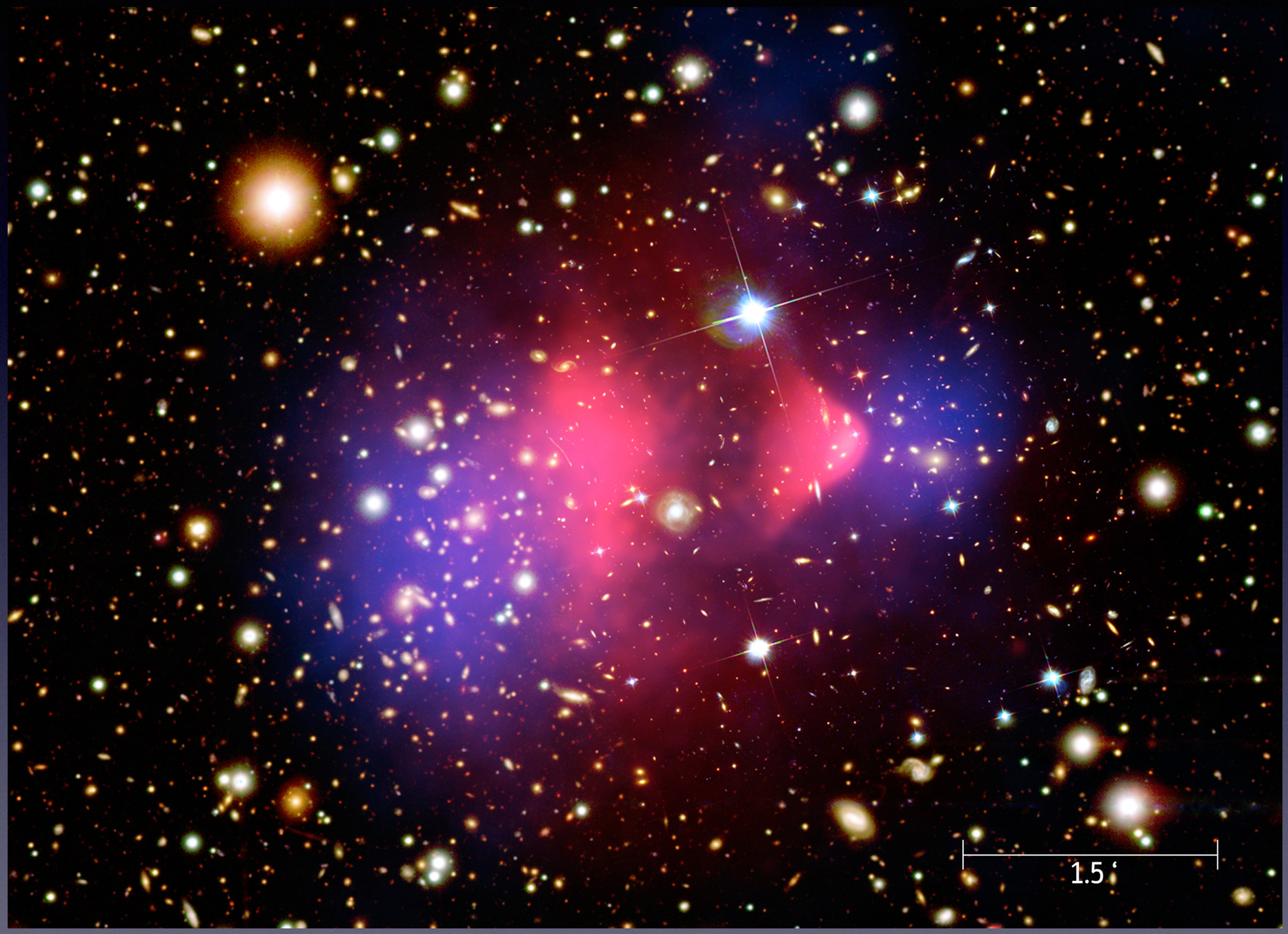
12800^3 = 2,097,152,000,000 = 2.1 trillion particles

http://skiesanduniverses.org/Simulations/Uchuu/

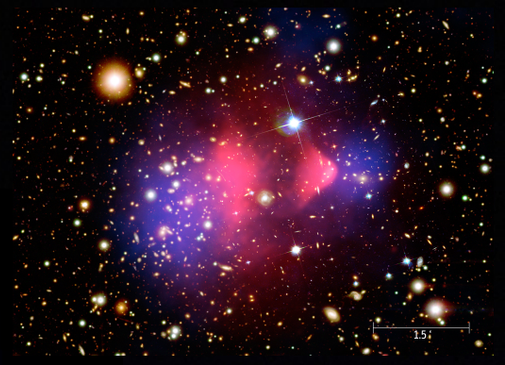
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 506, 4210

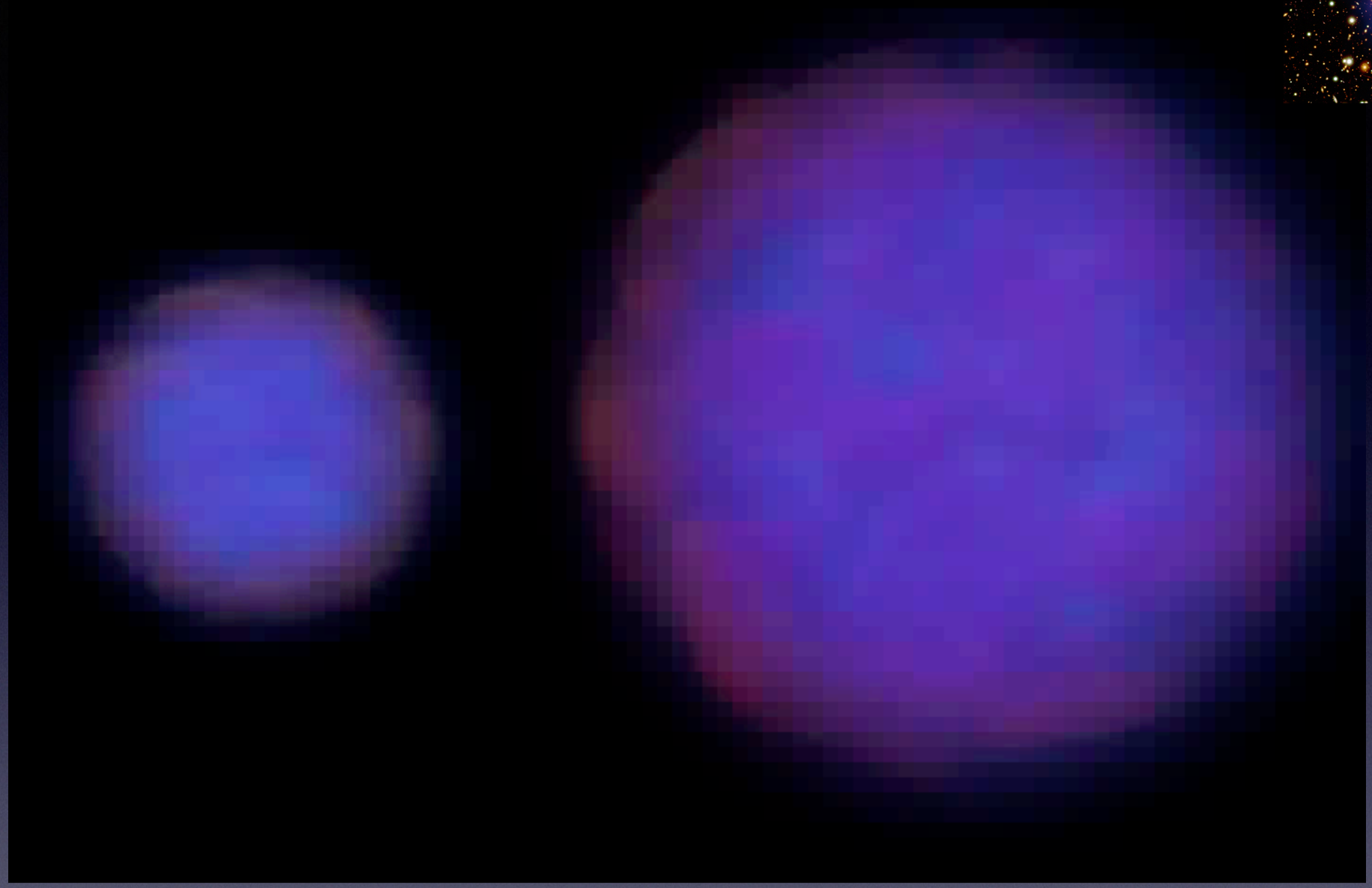
https://www.iaa.csic.es/noticias/el-iaa-participa-en-el-desarrollo-uchuu-simulacion-mas-exacta-y-completa-universo

L’amas de la balle



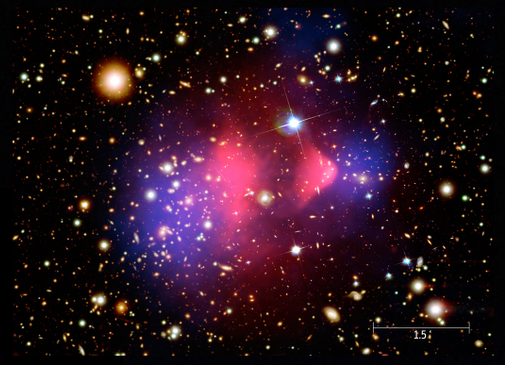
L’amas de la balle

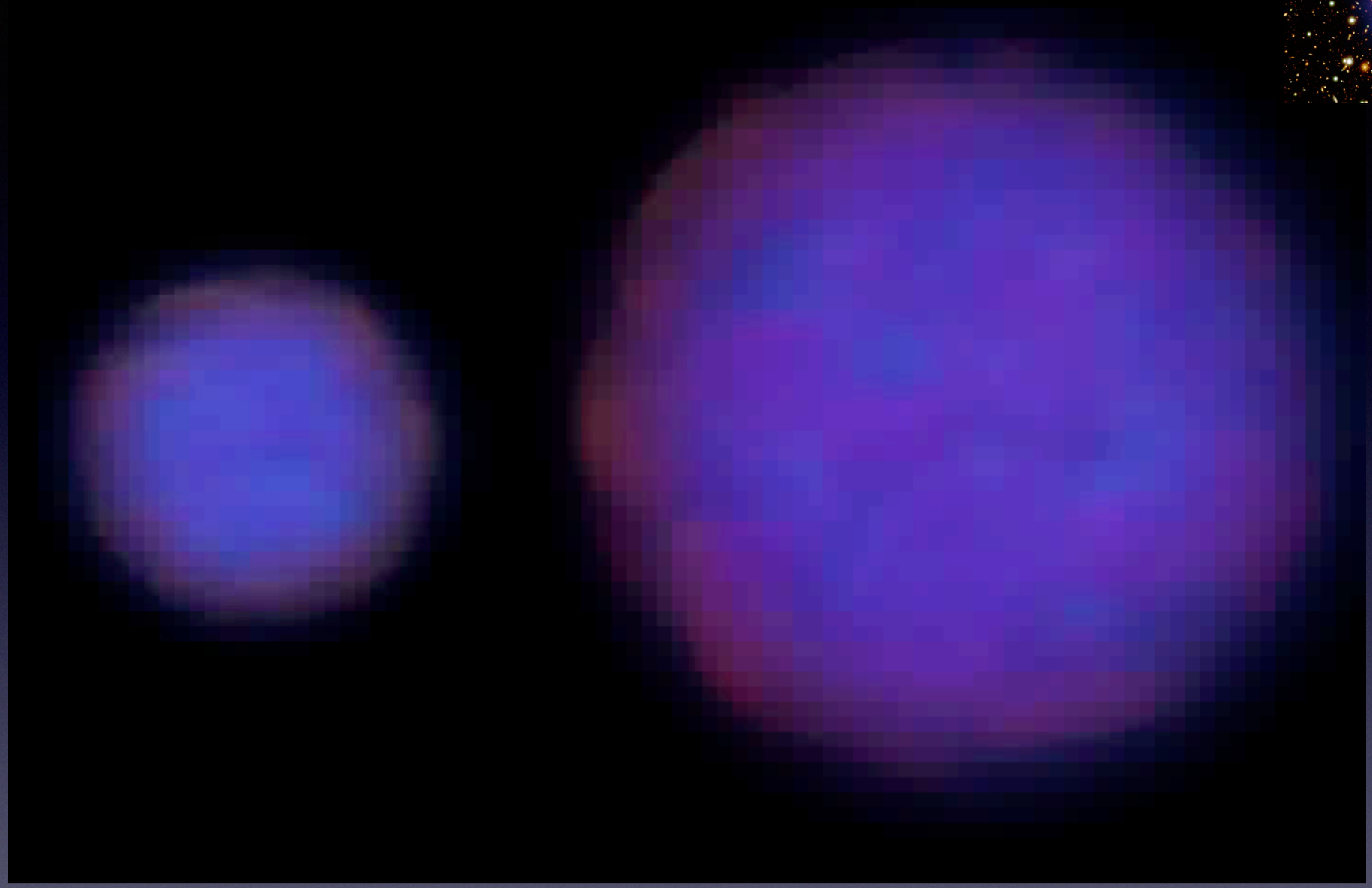




L’amas de la balle (1E 0657-558) est le résultat de la collision de deux amas de galaxies.
Cette collision a dégagé l'énergie la plus élevée de l'Univers depuis le Big Bang.
L'amas de la Balle se trouve dans la constellation australe de la Carène. Le nom se réfère au subamas le plus petit des deux qui s’éloigne de la plus grande structure. Il se trouve à une distance comouvante It de 1.141 Gpc (3.7 milliards d’années lumière) et contient près de 40 galaxies qui se déplace dont à 4500 km/s.

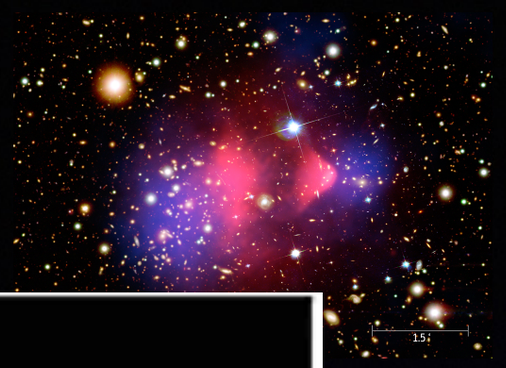
L’amas de la balle

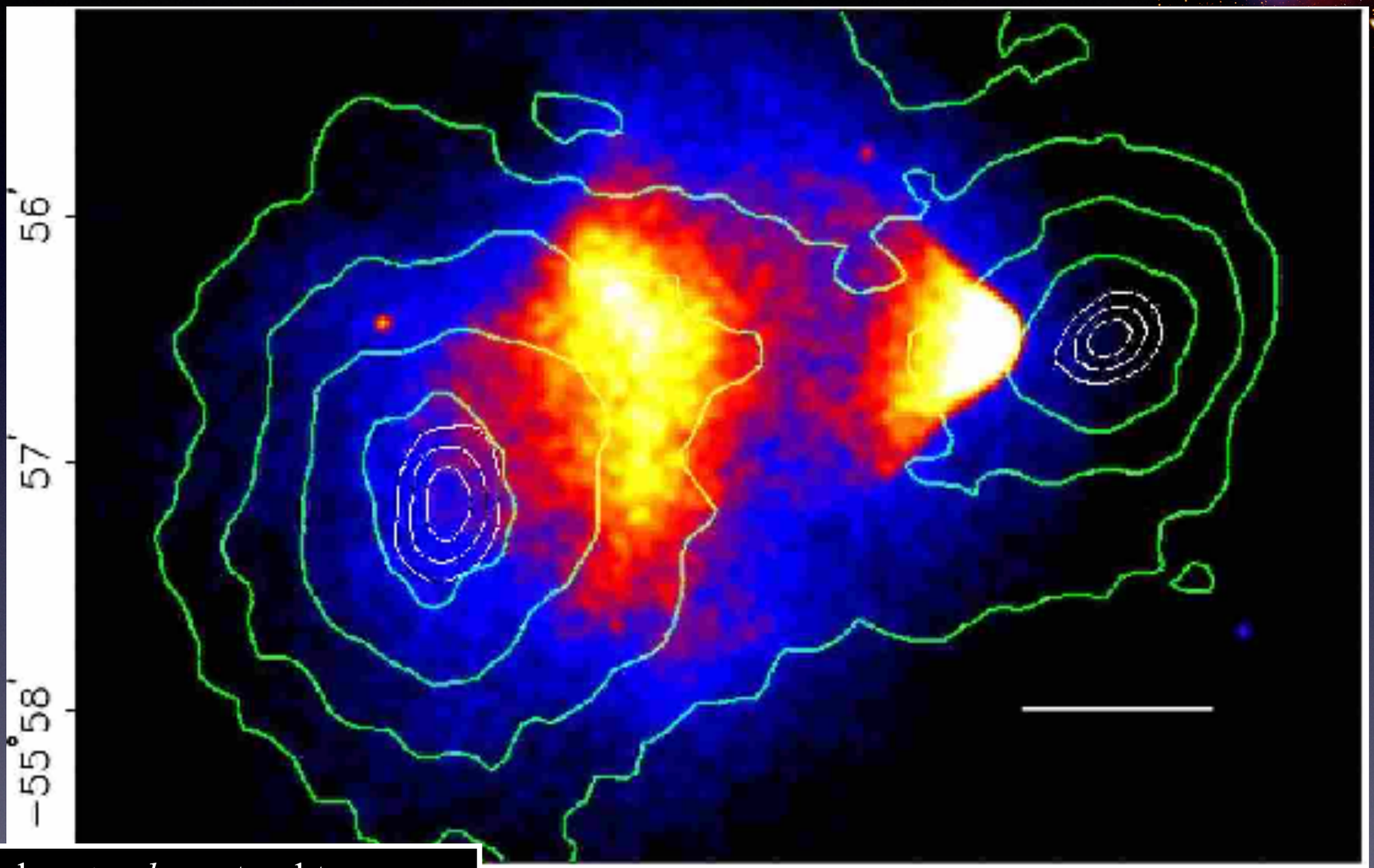




L’amas de la balle (1E 0657-558) est le résultat de la collision de deux amas de galaxies.
Cette collision a dégagé l'énergie la plus élevée de l'Univers depuis le Big Bang.
L'amas de la Balle se trouve dans la constellation australe de la Carène. Le nom se réfère au subamas le plus petit des deux qui s’éloigne de la plus grande structure. Il se trouve à une distance comouvante It de 1.141 Gpc (3.7 milliards d’années lumière) et contient près de 40 galaxies qui se déplace dont à 4500 km/s.

$$\frac{\sigma}{m} \lesssim 1 \text{ cm}^2/\text{g}$$





Markevitch *et al.* ont obtenu une *limite supérieure* parce que les deux amas n'ont PAS interagi!

$$1 \text{ cm}^2/\text{g} = 1.8 \times 10^{12} \text{pb/GeV} = 4.62 \times 10^3 \text{GeV}^{-3}$$

DIRECT CONSTRAINTS ON THE DARK MATTER SELF-INTERACTION CROSS-SECTION FROM THE MERGING GALAXY CLUSTER 1E 0657–56

M. MARKEVITCH[1], A. H. GONZALEZ[2], D. CLOWE[3,4], A. VIKHLININ[1,5], W. FORMAN[1], C. JONES[1], S. MURRAY[1], W. TUCKER[1,6]

ApJ in press; astro-ph/0309303 v2

ABSTRACT

Et si NOUS étions « dark »?

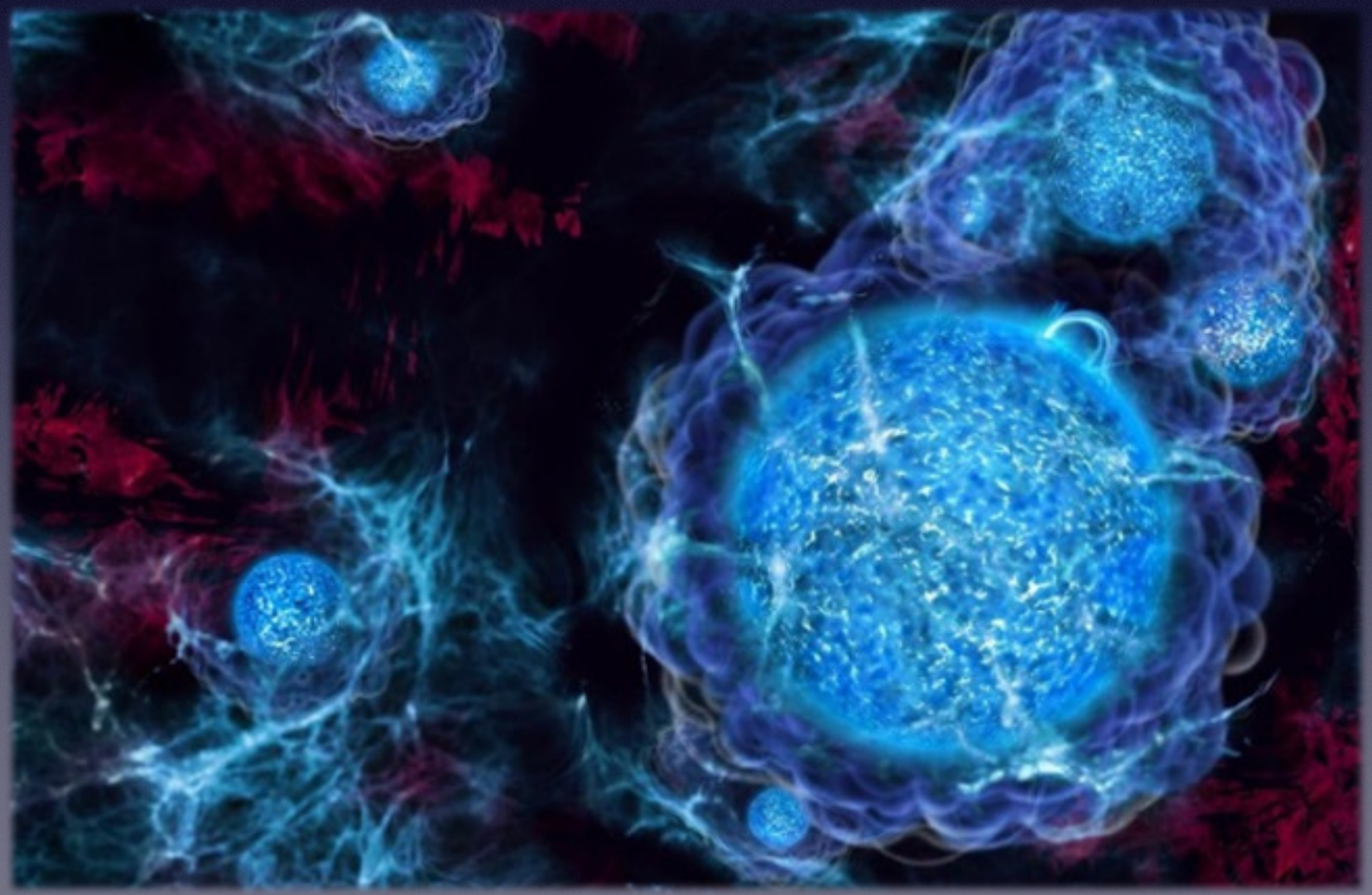
Certains chercheurs vont même plus loin, et proposent que la matière noire soit en fait composée d'un ensemble de particules « miroires » qui auraient les mêmes propriétés que celles de notre monde visible, mais sans communiquer avec nous.

Ils proposent alors des « Étoiles Noire », « Planètes Noires », et pourquoi pas.. des « Forces Noires » , ou « Dark Forces » très activement recherhées sur Terre dans nos accélérateurs de particules.

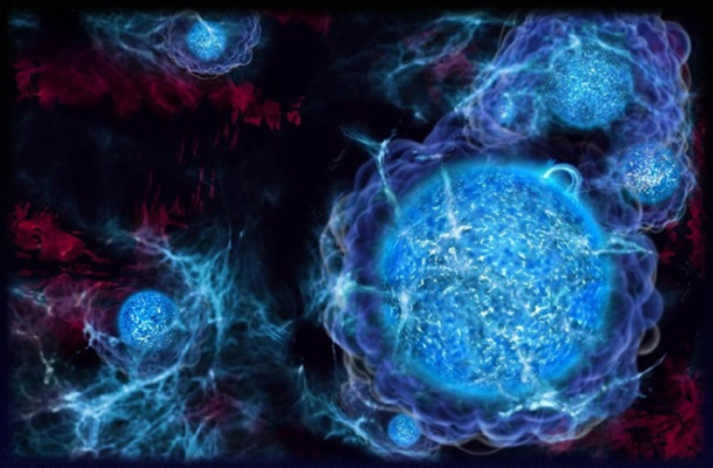
Et si NOUS étions « dark »?

Certains chercheurs vont même plus loin, et proposent que la matière noire soit en fait composée d'un ensemble de particules « miroires » qui auraient les mêmes propriétés que celles de notre monde visible, mais sans communiquer avec nous.

Ils proposent alors des « Étoiles Noire », « Planètes Noires », et pourquoi pas.. des « Forces Noires » , ou « Dark Forces » très activement recherhées sur Terre dans nos accélérateurs de particules.



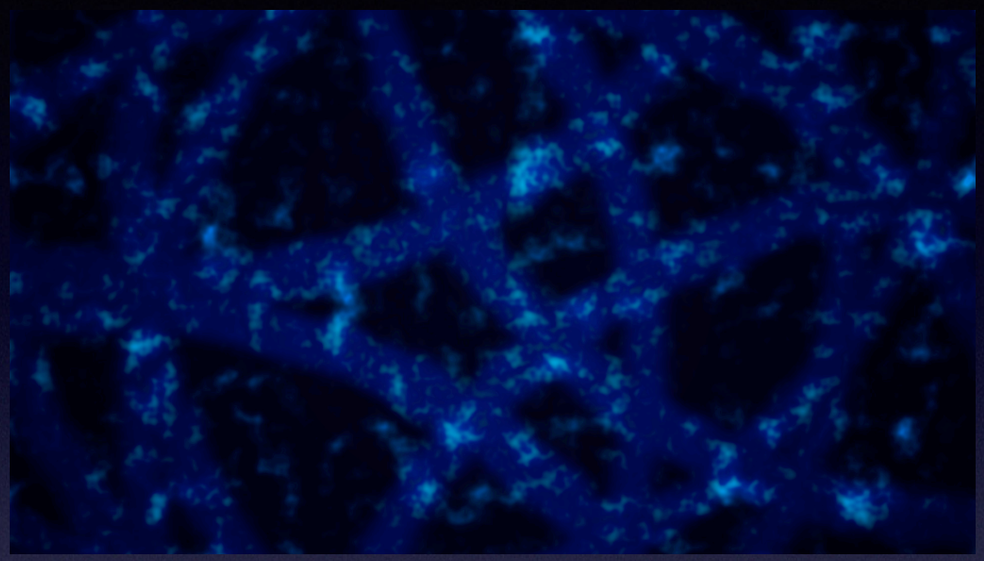
Ils proposent alors des « Étoiles Noire », « Planètes Noires », et pourquoi pas.. des « Forces Noires » , ou « Dark Forces » très activement recherhées sur Terre dans nos accélérateurs de particules.



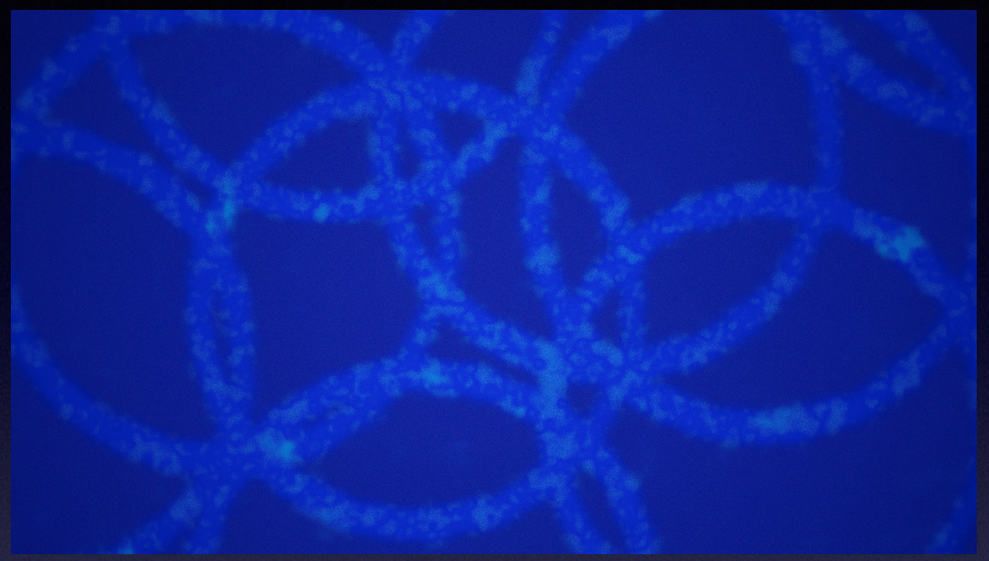
Alors?

Convaincus?

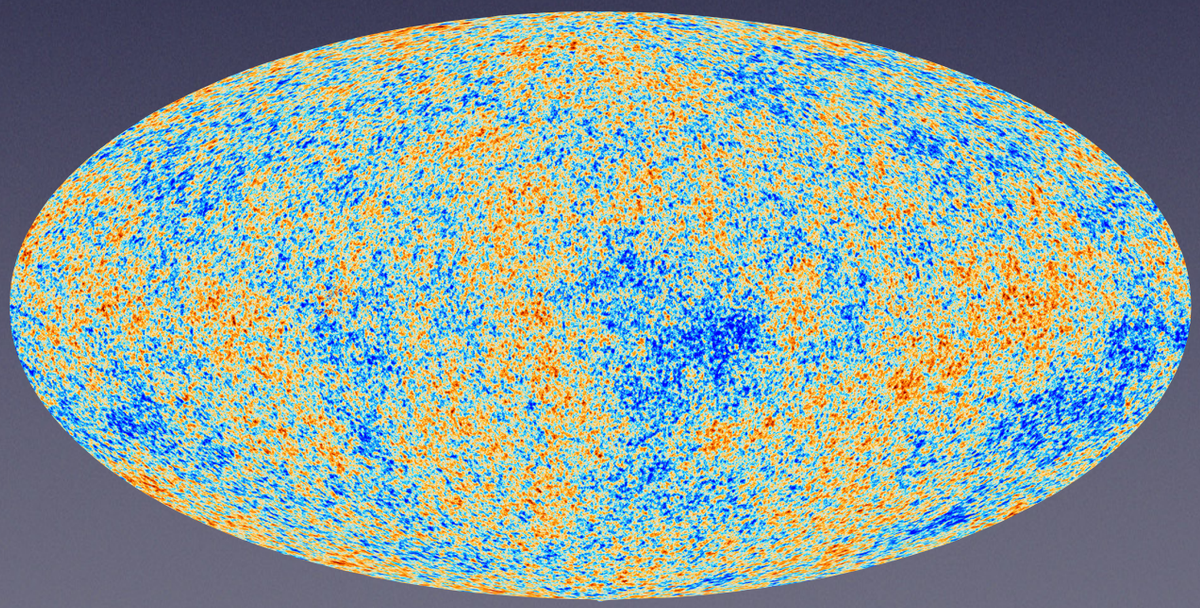
Les BAO
(Oscillations Acoustiques Baryoniques)

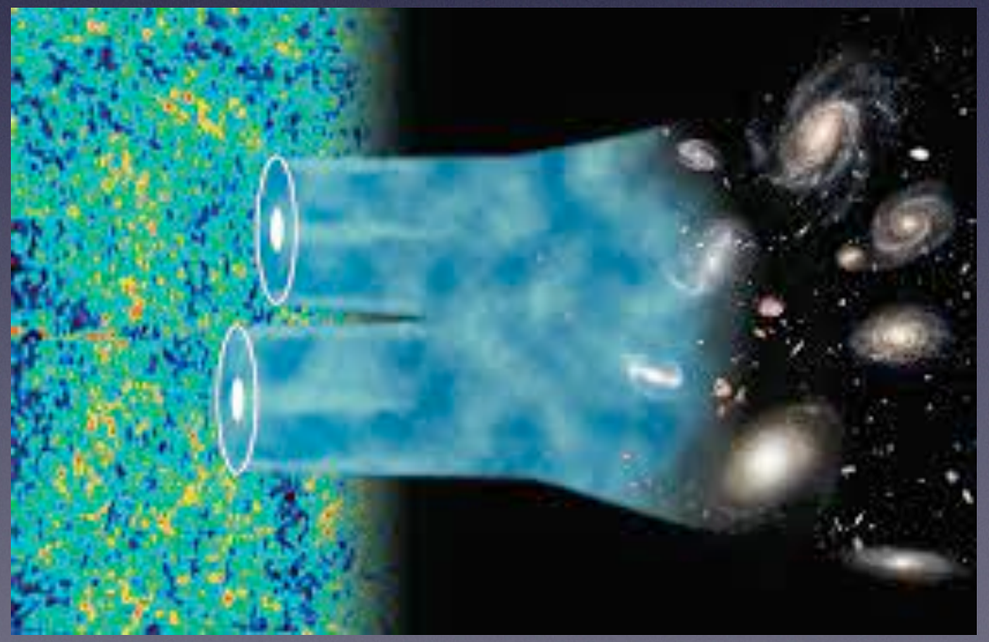


=

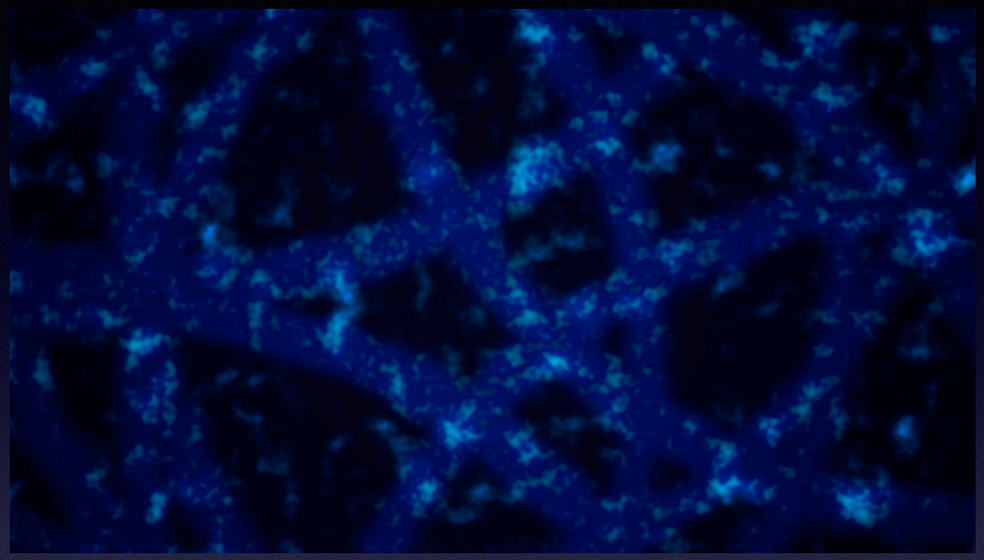


=

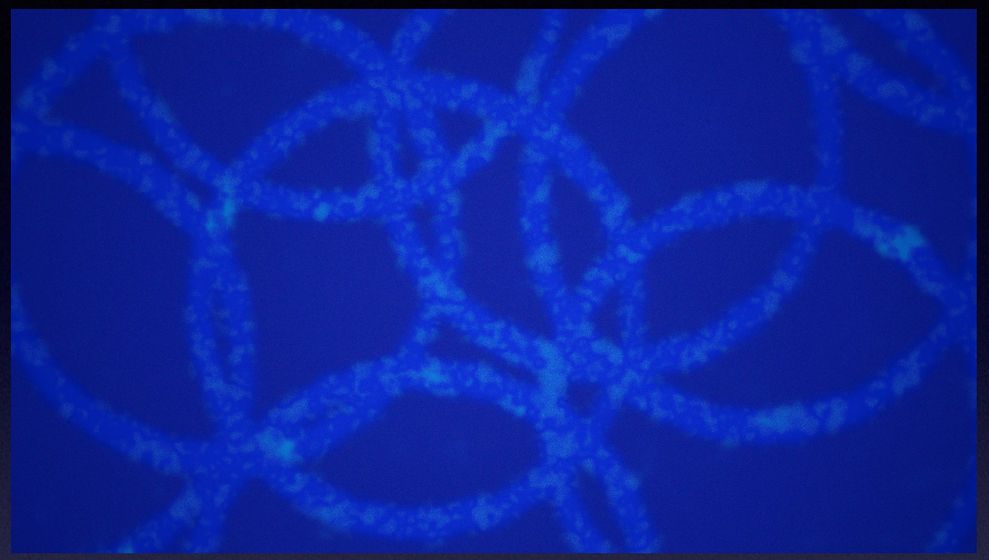




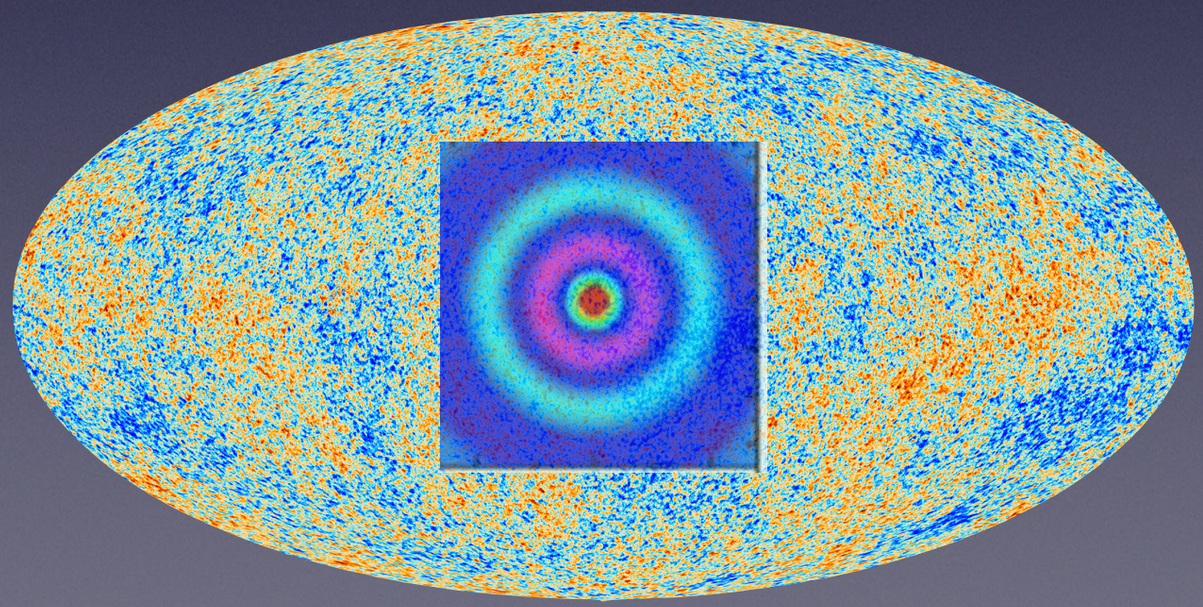
Les BAO
(Oscillations Acoustiques Baryoniques)

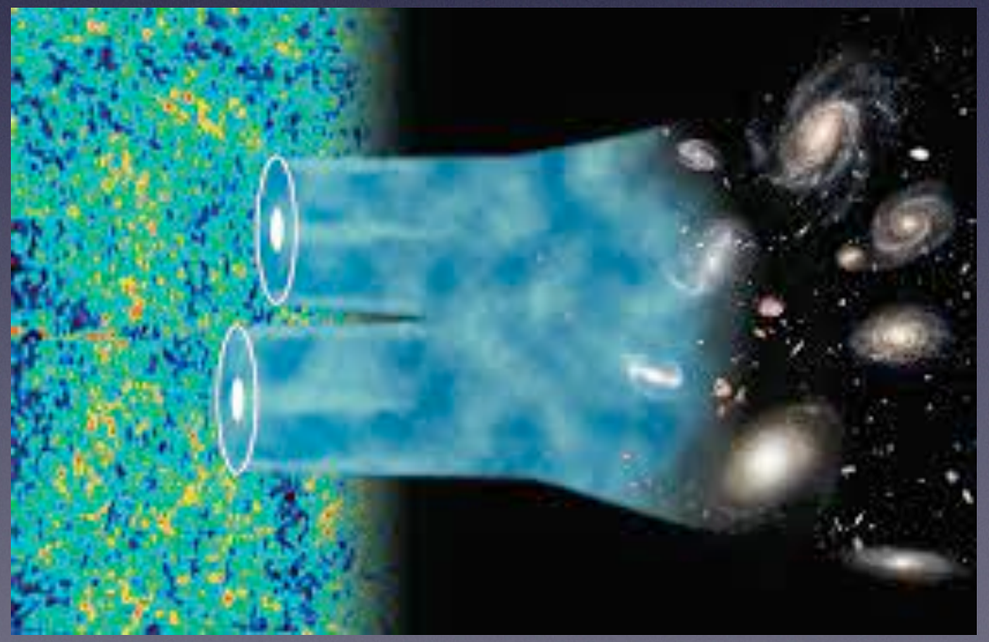


=

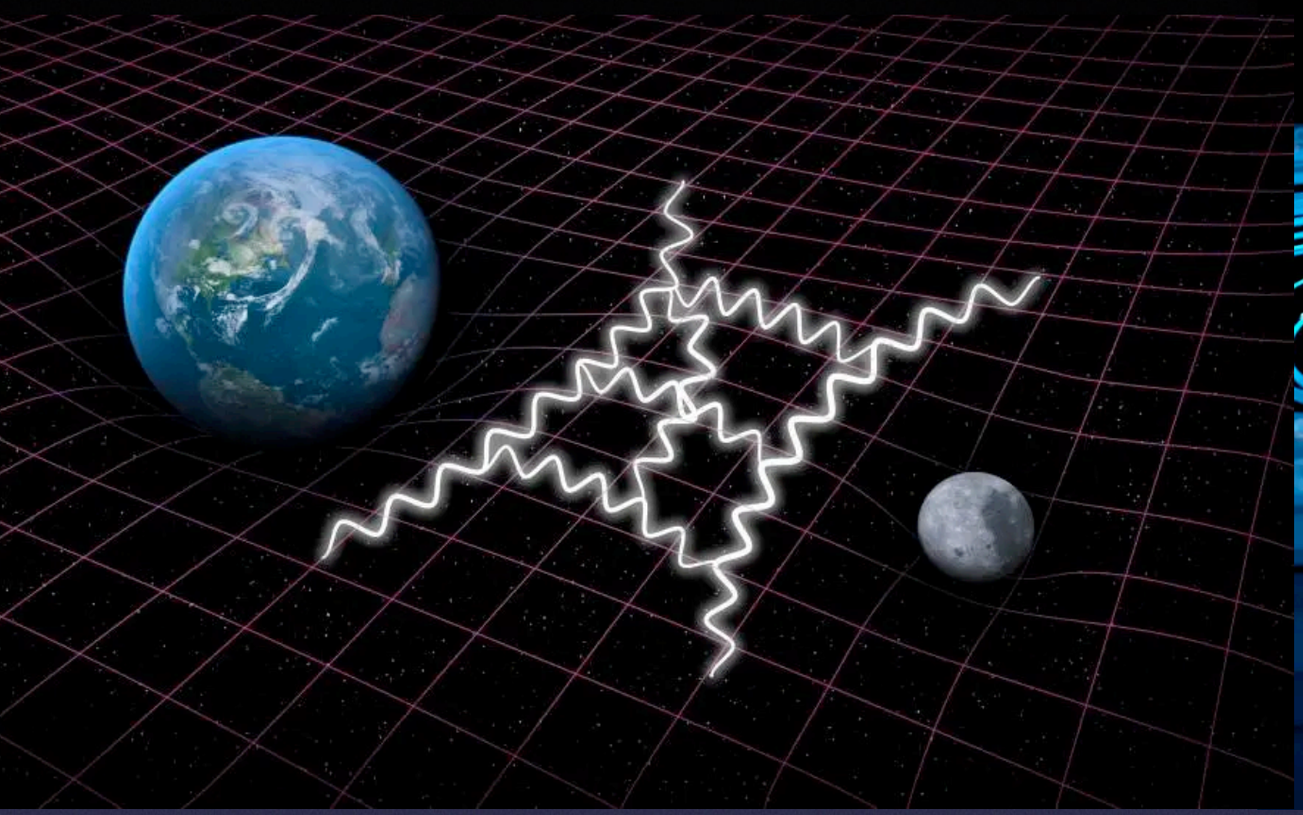


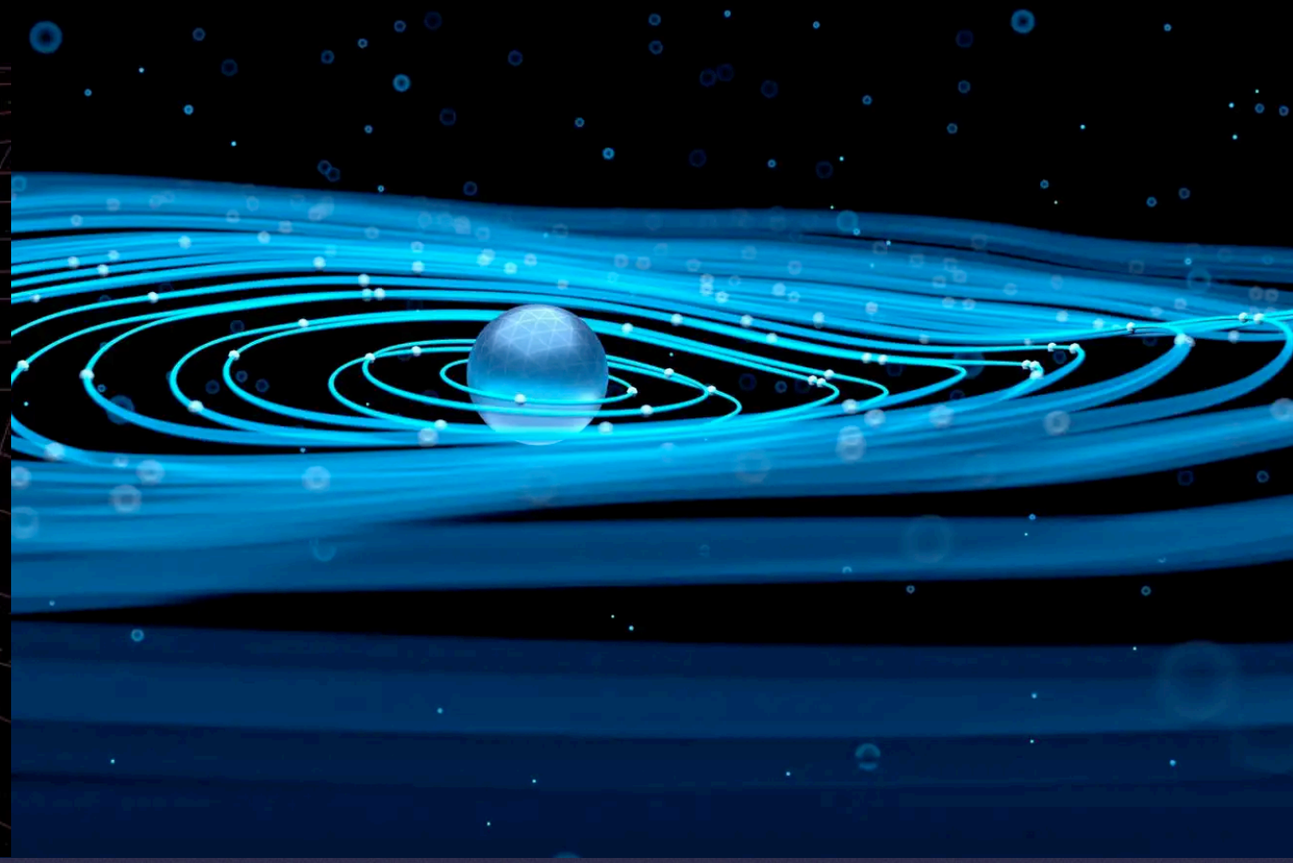
=





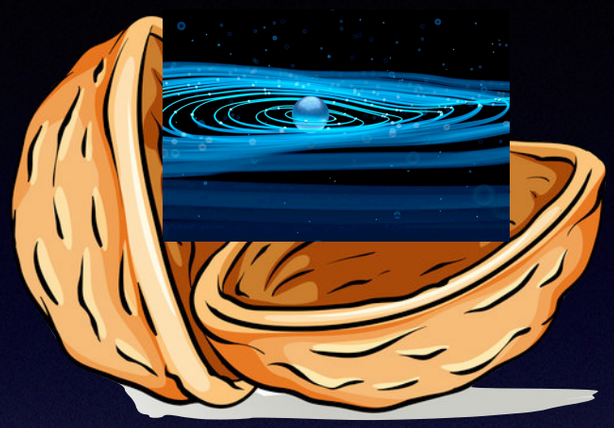
Chapitre III : La force de la gravité

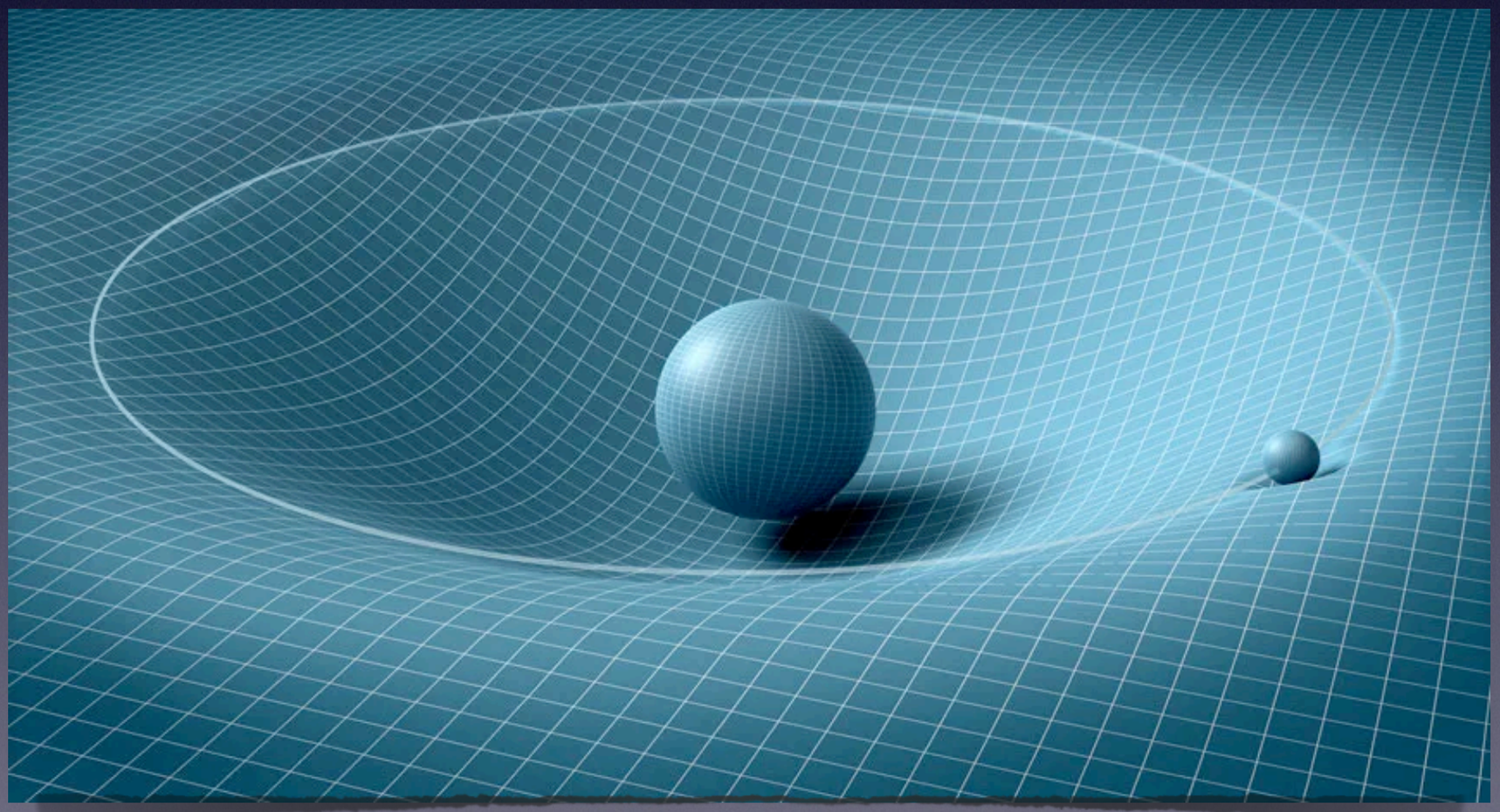




Où l'auditeur sera surpris de voir *la force de la gravité* lorsque celle-ci est combinée à la *théorie quantique des champs*.
Ou encore, *la production gravitationnelle* de quanta.
Il fera également connaissance avec le graviton.

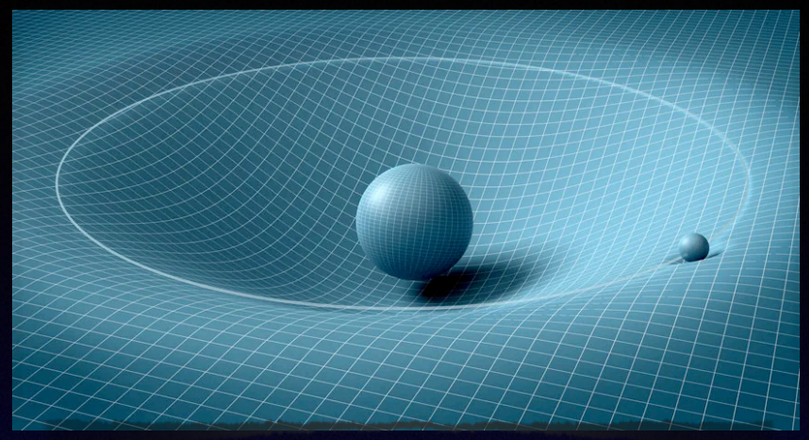
La production gravitationnelle dans une coquille de noix

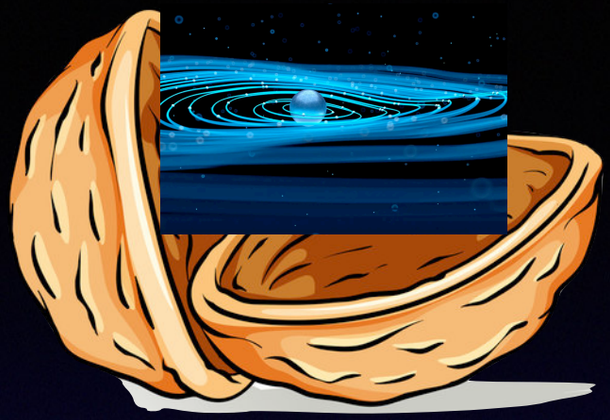




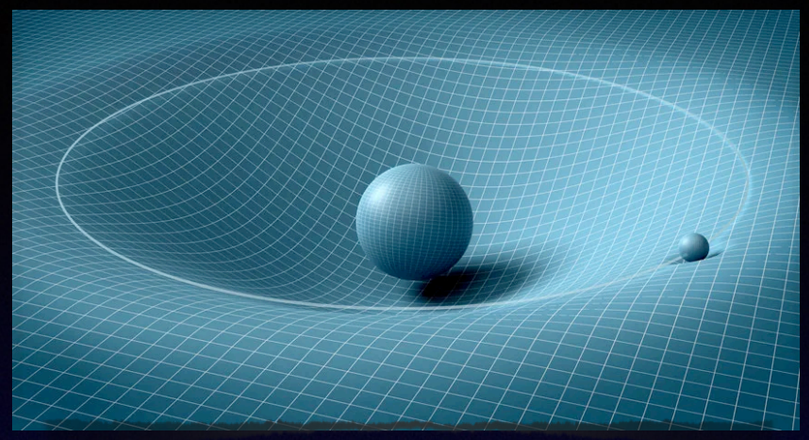
Quand l'horizon est source de matière

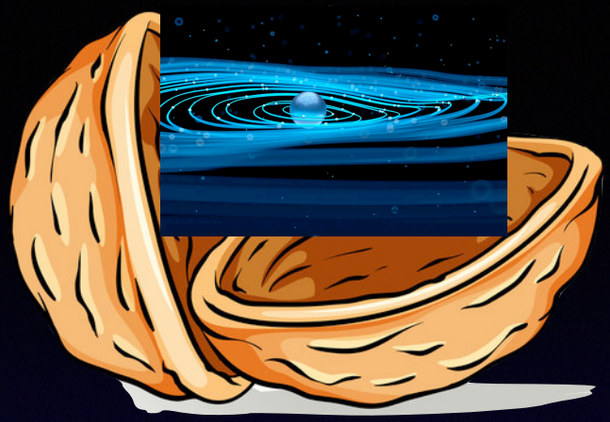
La production gravitationnelle dans une coquille de noix





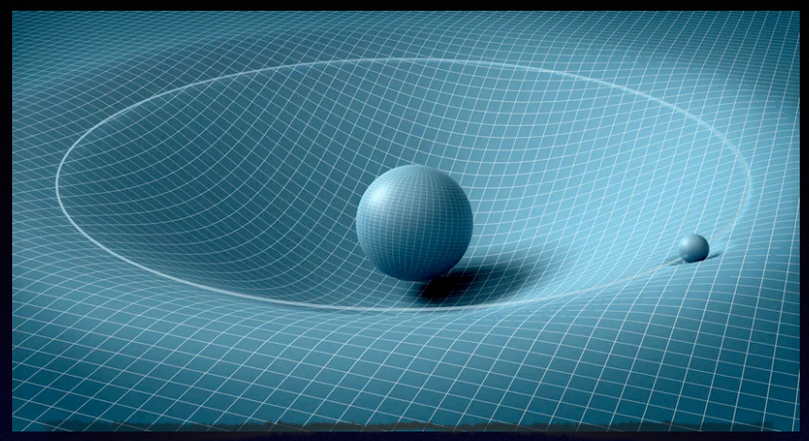
La production gravitationnelle dans une coquille de noix

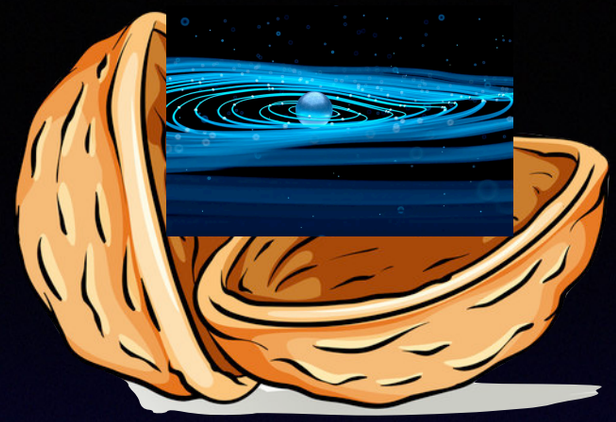




$$G_{\mu\nu} = \frac{1}{M_P^2}\, T_{\mu\nu} = \frac{1}{M_P^2} \times \frac{1}{2} \langle \rho_\chi \rangle \; g_{\mu\nu}$$

La production gravitationnelle dans une coquille de noix

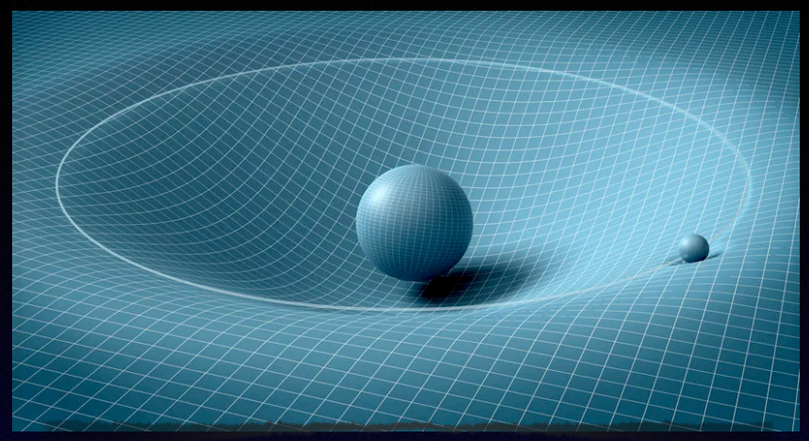


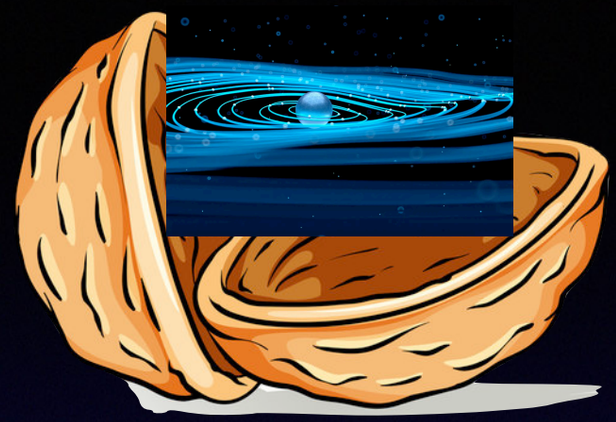


$$G_{\mu\nu} = \frac{1}{M_P^2}\, T_{\mu\nu} = \frac{1}{M_P^2} \times \frac{1}{2} \langle \rho_\chi \rangle \; g_{\mu\nu}$$

$$\Rightarrow \quad \langle \rho_\chi \rangle \sim \mathscr{R}\; M_P^2 \sim H^2 M_P^2$$

La production gravitationnelle dans une coquille de noix





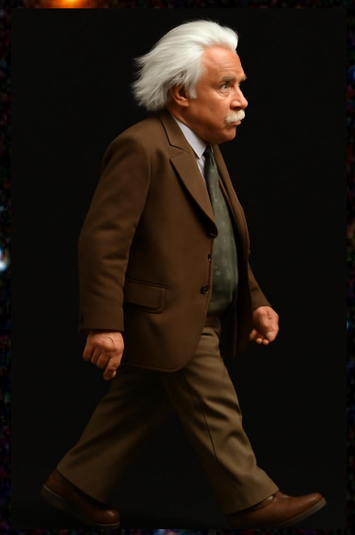
$$G_{\mu\nu} = \frac{1}{M_P^2}\, T_{\mu\nu} = \frac{1}{M_P^2} \times \frac{1}{2} \langle \rho_\chi \rangle \; g_{\mu\nu}$$

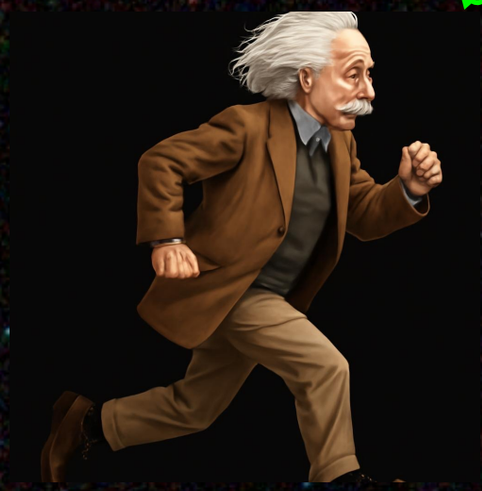
$$\Rightarrow \quad \langle \rho_\chi \rangle \sim \mathscr{R}\, M_P^2 \sim H^2 M_P^2$$

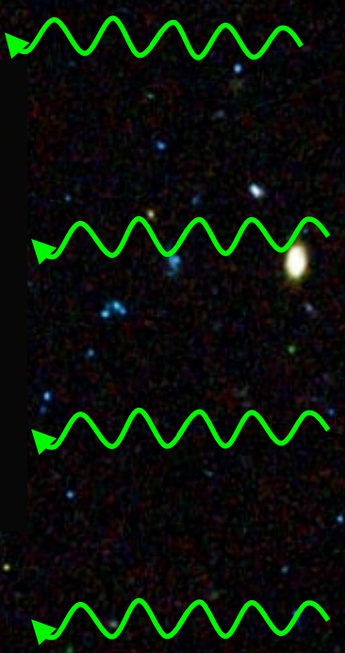
Ou accélération (Ricci $\mathscr{R}$) = quanta

Ou accélération (Ricci $\mathscr{R}$) = quanta

$$\langle \rho_\chi \rangle \sim \mathscr{R}\, M_P^2 \sim H^2 M_P^2$$

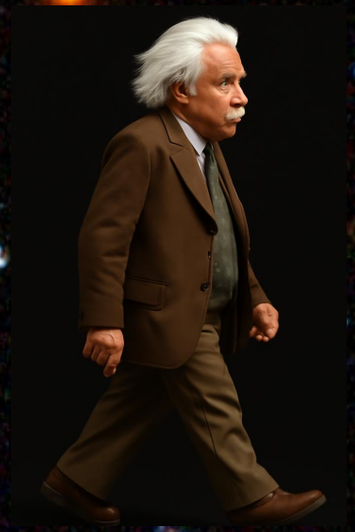






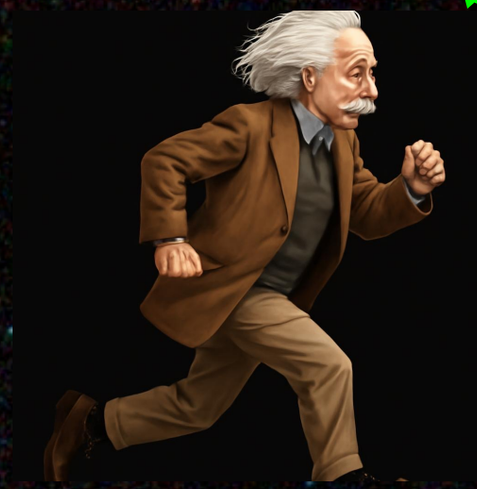
Ou accélération (Ricci $\mathscr{R}$) = quanta

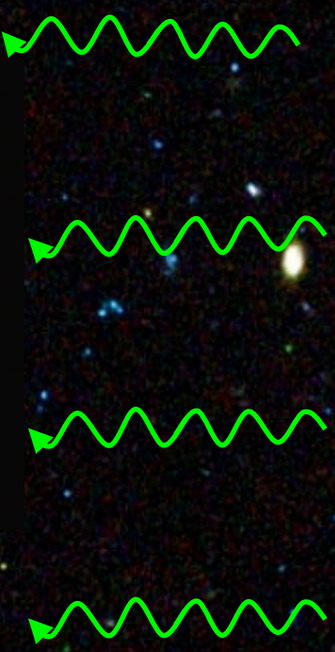
$$\langle \rho_\chi \rangle \sim \mathscr{R}\, M_P^2 \sim H^2 M_P^2$$



Toute accélération *de l'espace*,
crée un point *dans l'espace*,
qui s'éloigne de l'observateur
plus vite que la vitesse de la lumière :
c'est un ***horizon***.

Donc, tout horizon crée des quantas.



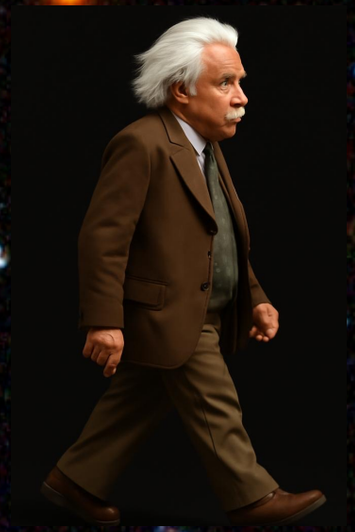


Ou accélération (Ricci $\mathscr{R}$) = quanta

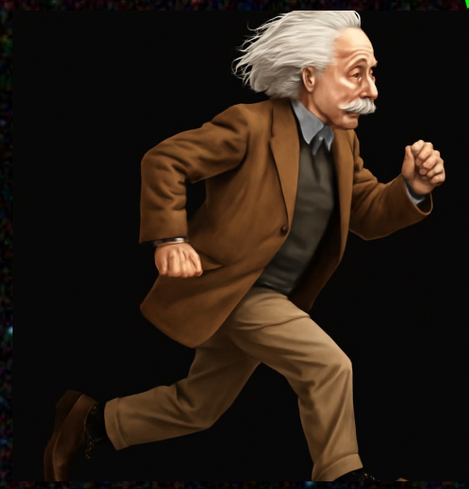
$$\langle \rho_\chi \rangle \sim \mathscr{R}\, M_P^2 \sim H^2 M_P^2$$

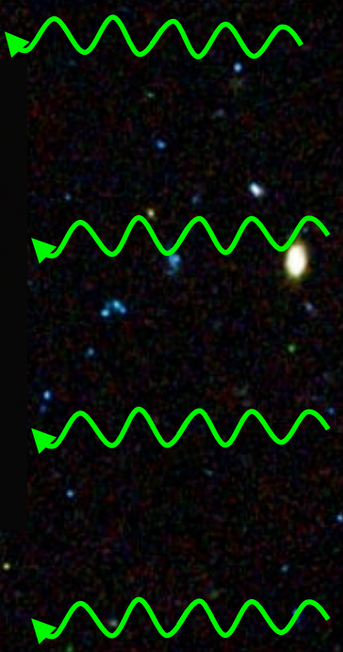
Toute accélération *de l'espace*,
crée un point *dans l'espace*,
qui s'éloigne de l'observateur
plus vite que la vitesse de la lumière :
c'est un ***horizon***.

Donc, tout horizon crée des quantas.



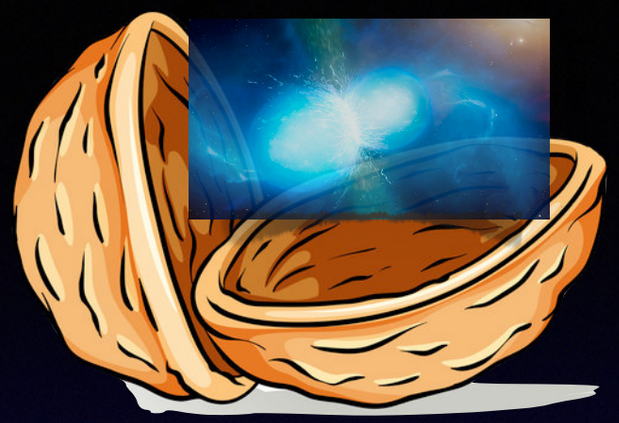
Le nombre de particules dépend de l'observateur.

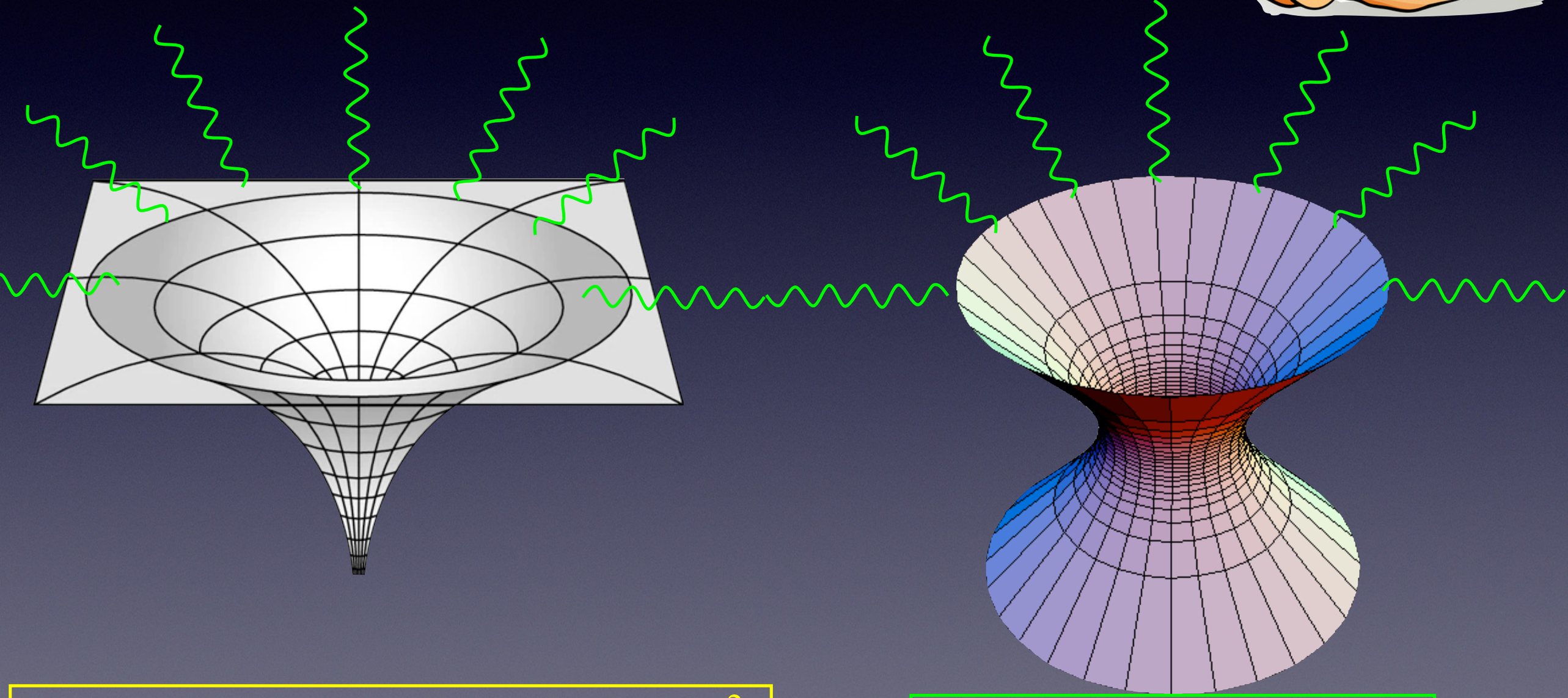




Production gravitationnelle dans une coquille de noix

$$\langle \rho_\chi \rangle \sim \mathscr{R}\ M_P^2 \sim H^2 M_P^2$$





Schwarzschild horizon, $T \sim \dfrac{1}{R_S} = \dfrac{M_P^2}{M_{BH}}$

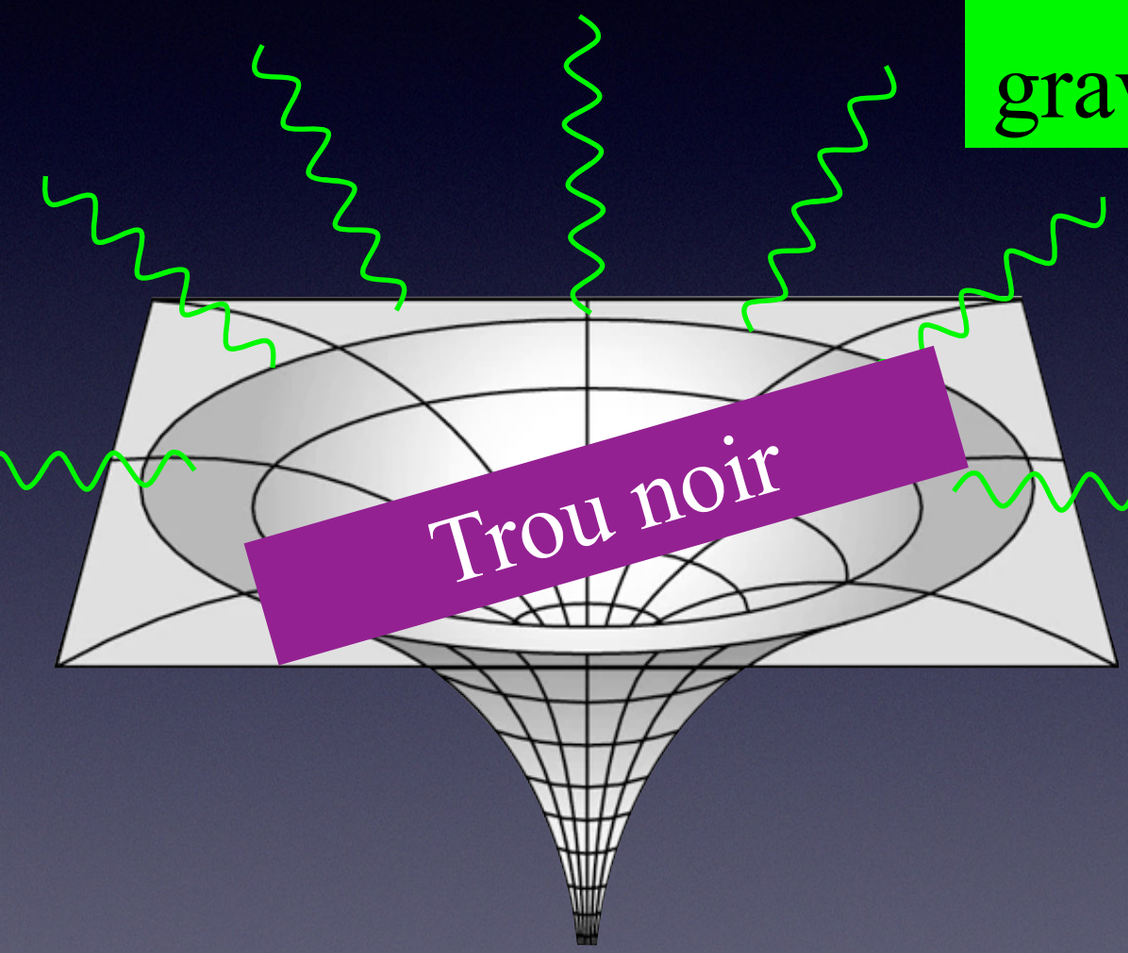
De Sitter horizon, $T = \dfrac{H_{dS}}{2\pi}$

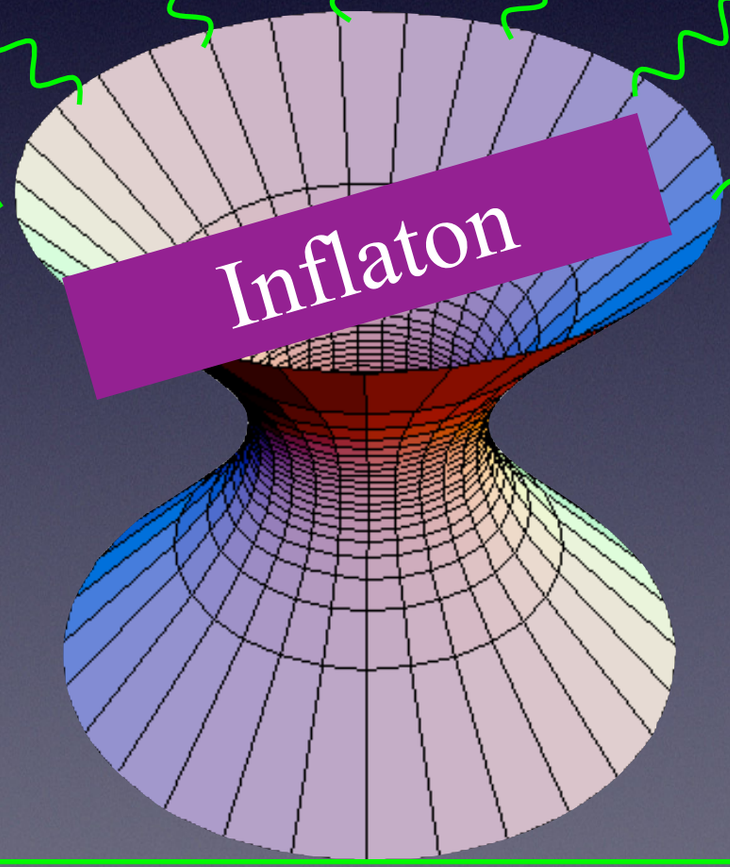
Production gravitationnelle dans une coquille de noix

$$\langle \rho_\chi \rangle \sim \mathscr{R}\, M_P^2 \sim H^2 M_P^2$$



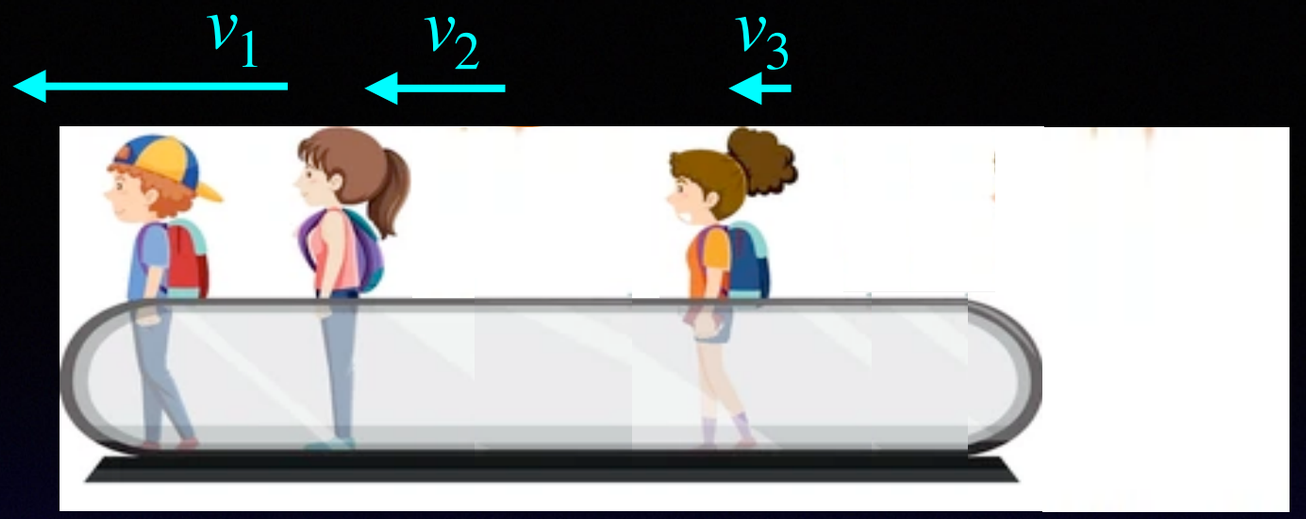
Ondes gravitationelles





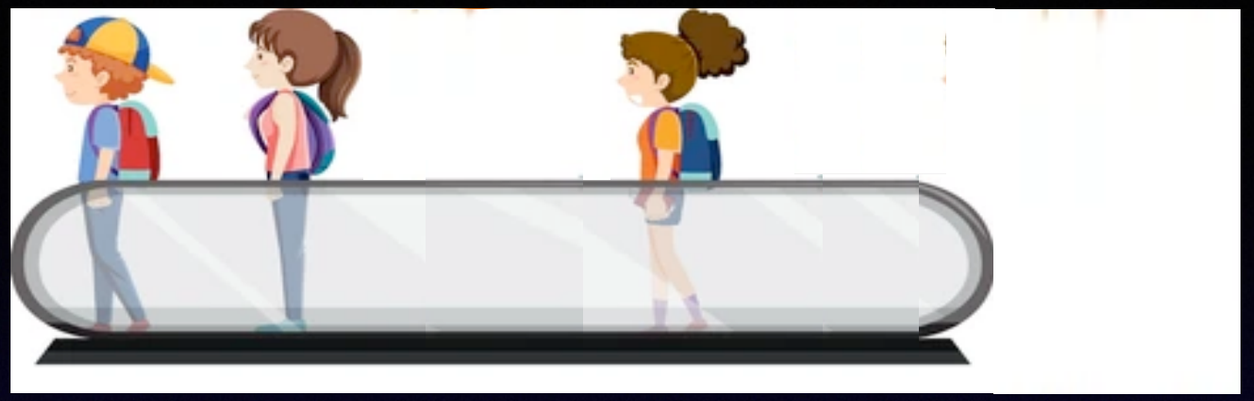
Schwarzschild horizon, $T \sim \dfrac{1}{R_S} = \dfrac{M_P^2}{M_{BH}}$

De Sitter horizon, $T = \dfrac{H_{dS}}{2\pi}$



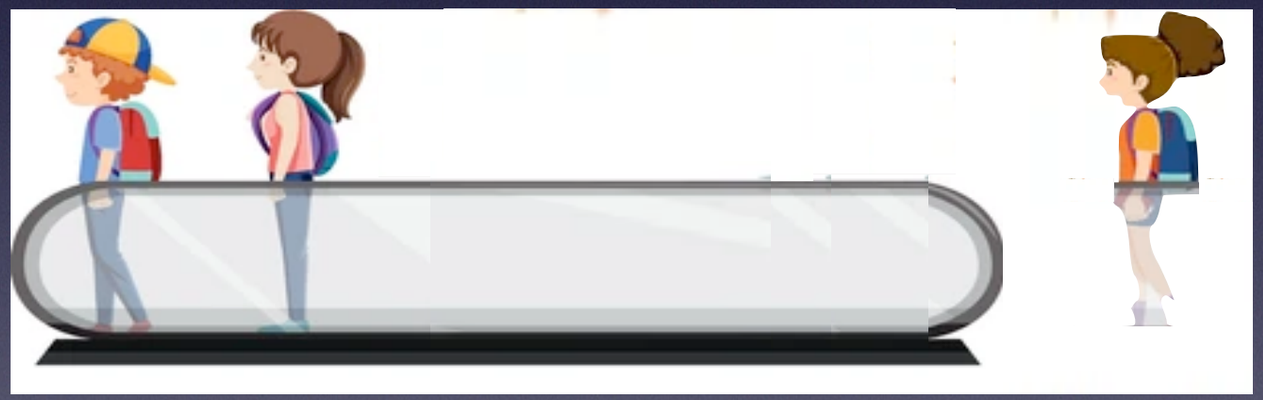
$V_{tapis\ roulant} < v_1, v_2, v_3$

v_1 v_2 v_3

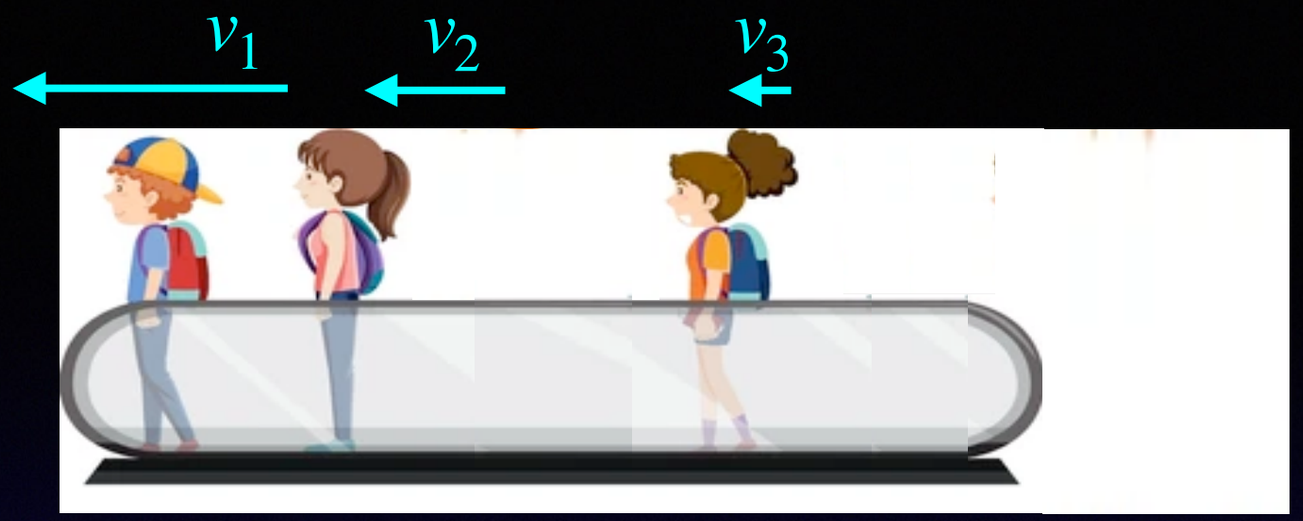


$V_{tapis\ roulant} < v_1, v_2, v_3$

v_1 v_2 v_3



$V_{tapis\ roulant} > v_3$



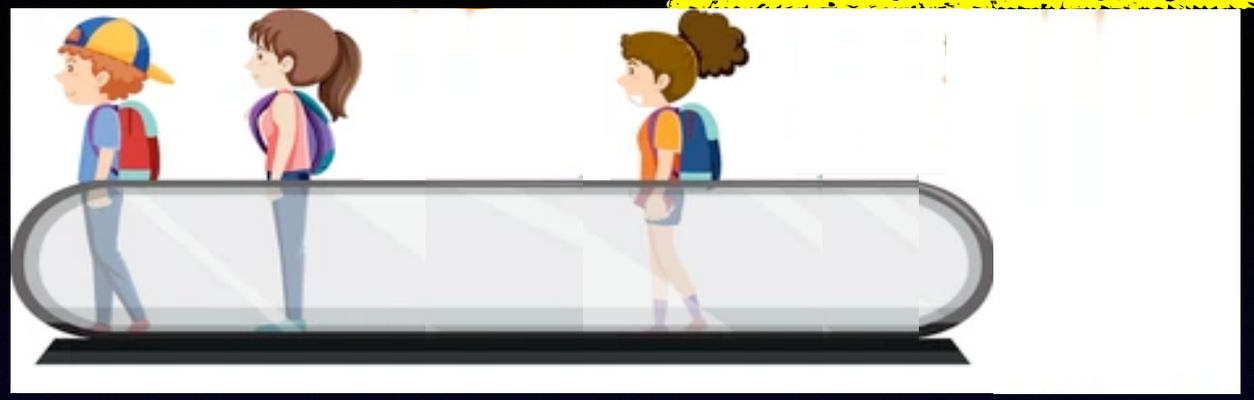
$V_{tapis\ roulant} < v_1, v_2, v_3$



$V_{tapis\ roulant} > v_3$

fréquences positives

v_1 v_2 v_3 $a_\omega^\dagger e^{-i\omega t}$

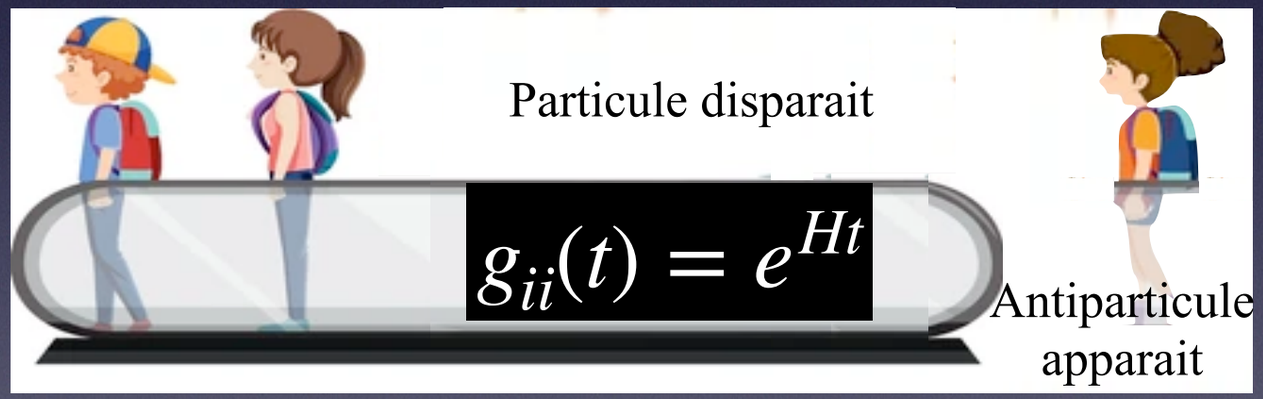


$V_{tapis\ roulant} < v_1, v_2, v_3$

fréquences pos. + neg.

$\sim a_\omega^\dagger e^{-i\omega t} + \beta\, b_\omega^\dagger e^{+i\omega t}$

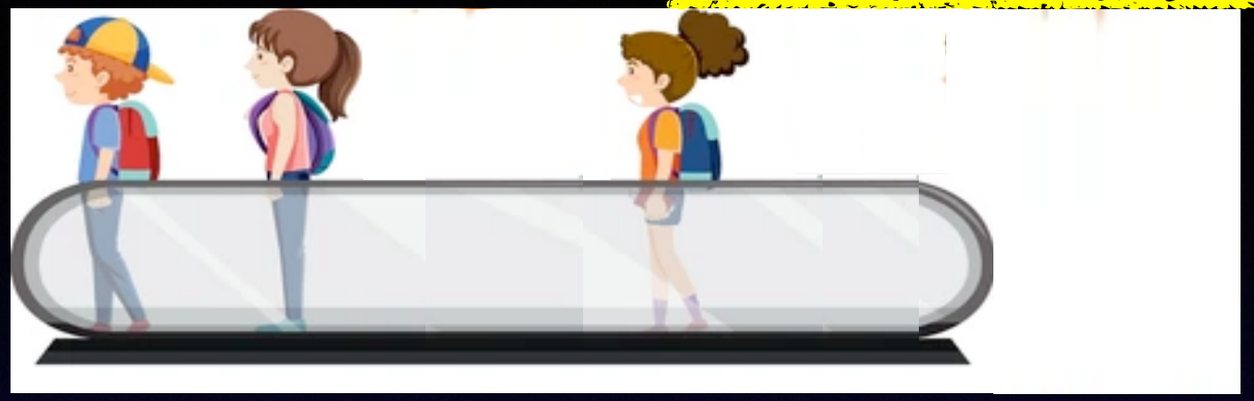
v_1 v_2 v_3



$V_{tapis\ roulant} > v_3$

fréquences positives

ν_3 $\quad a^\dagger_\omega e^{-i\omega t}$



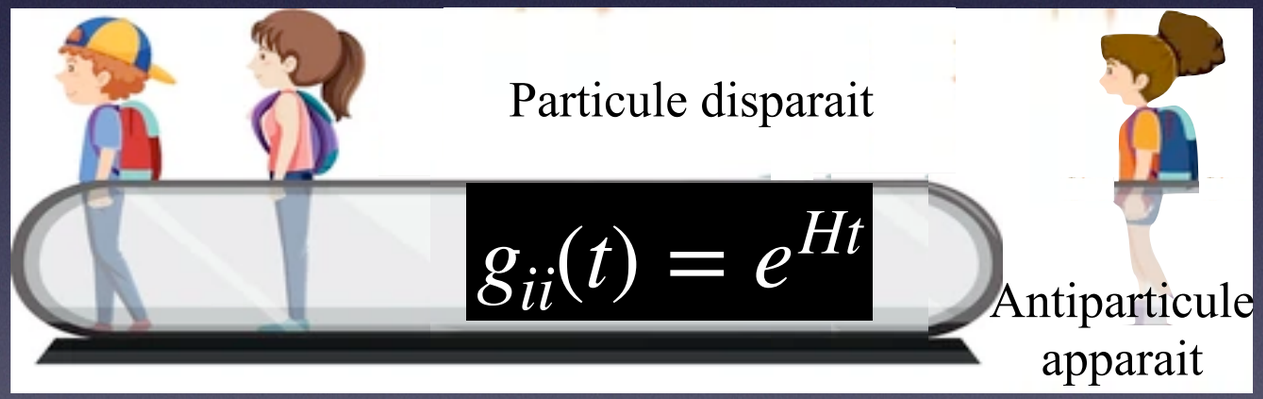
ν_1 $\quad \nu_2$

$V_{tapis\ roulant} < \nu_1, \nu_2, \nu_3$

fréquences pos. + neg.

$\sim a^\dagger_\omega e^{-i\omega t} + \beta\, b^\dagger_\omega e^{+i\omega t}$

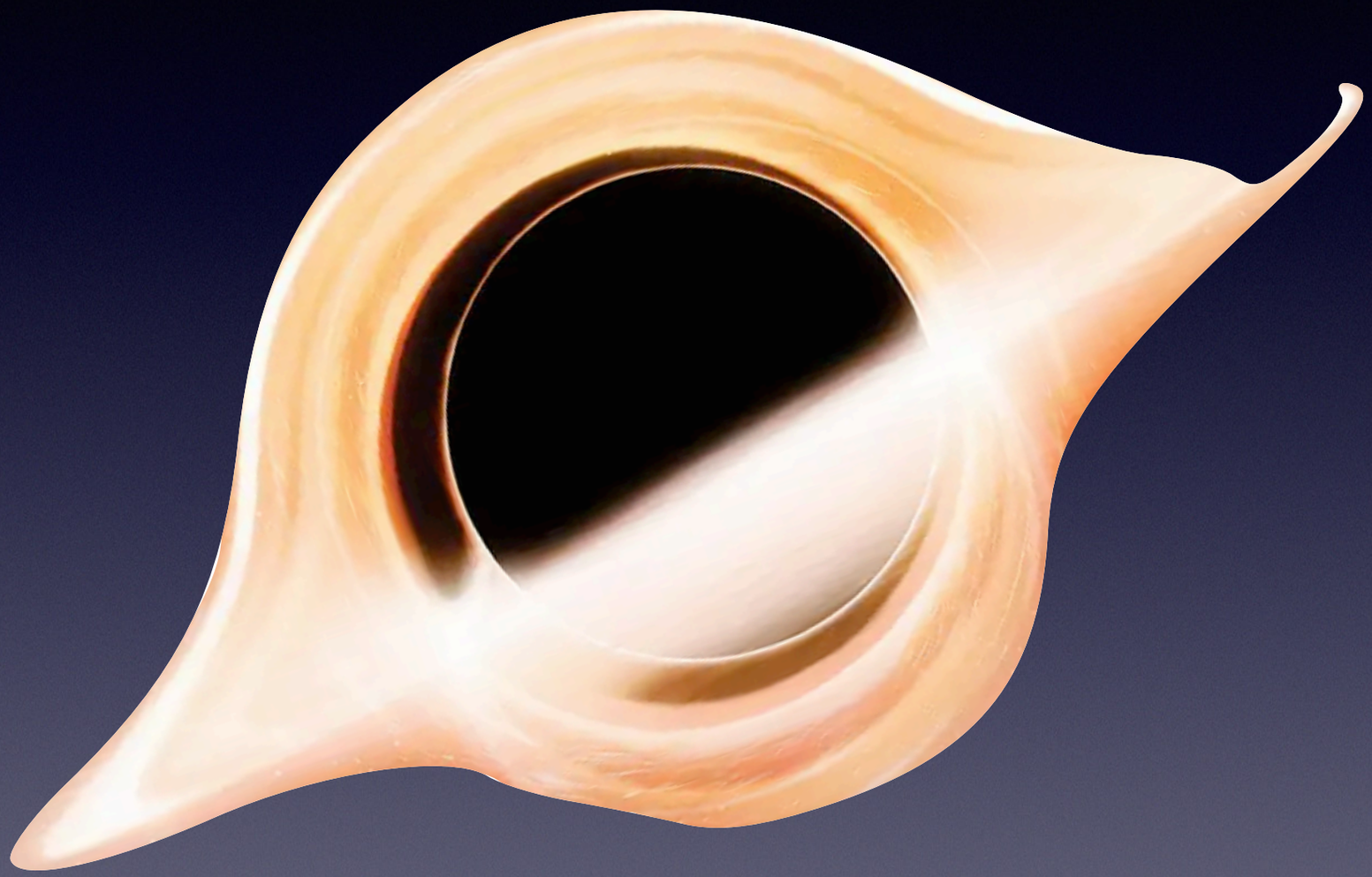
ν_1 $\quad \nu_2$ $\quad \nu_3$



$V_{tapis\ roulant} > \nu_3$

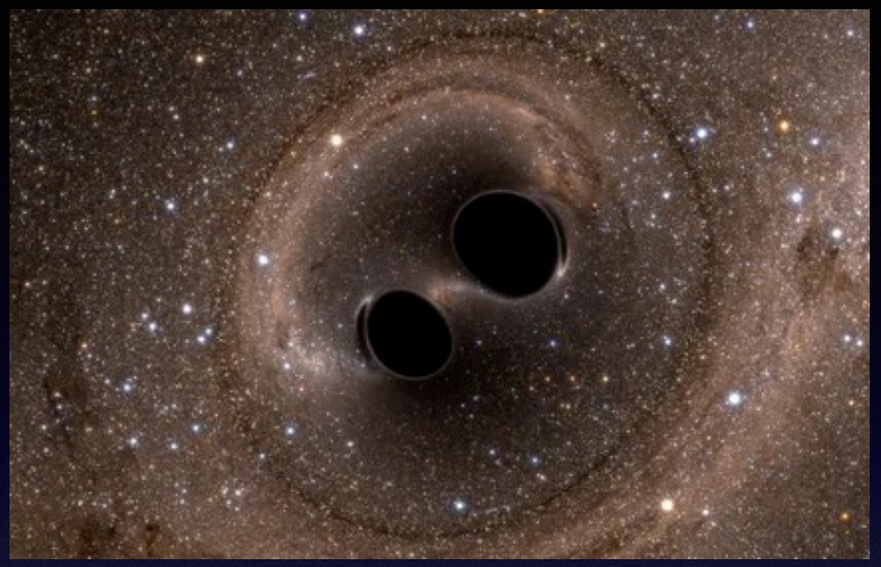
Voir aussi effet Schwinger (1951),
effet Unruh (1976)
et les travaux de Bunch, Davies, Ford, Parker…

« Et fiat gurges ater »



Etat des lieux

Etat des lieux

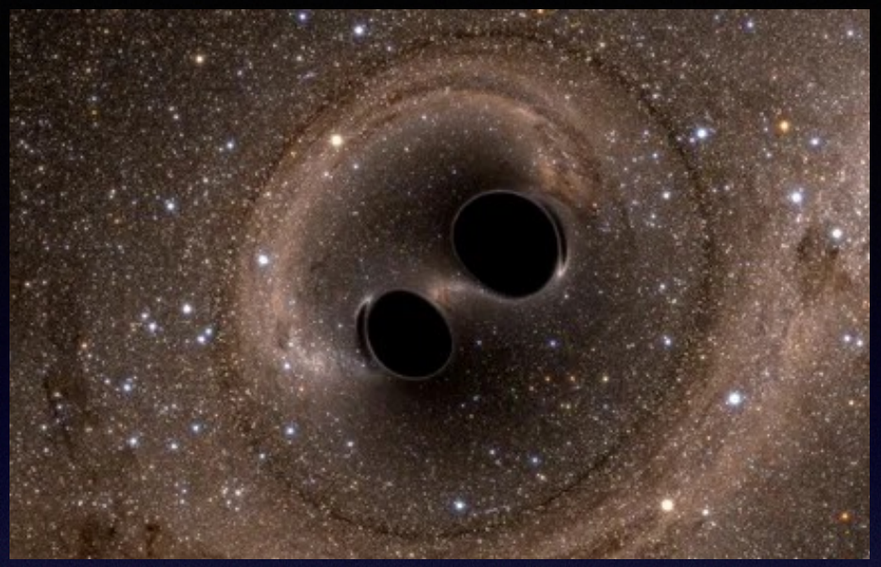


Trous noirs stellaires ($\lesssim 50 M_\odot$)

Theory ~ ok

Observation : ok

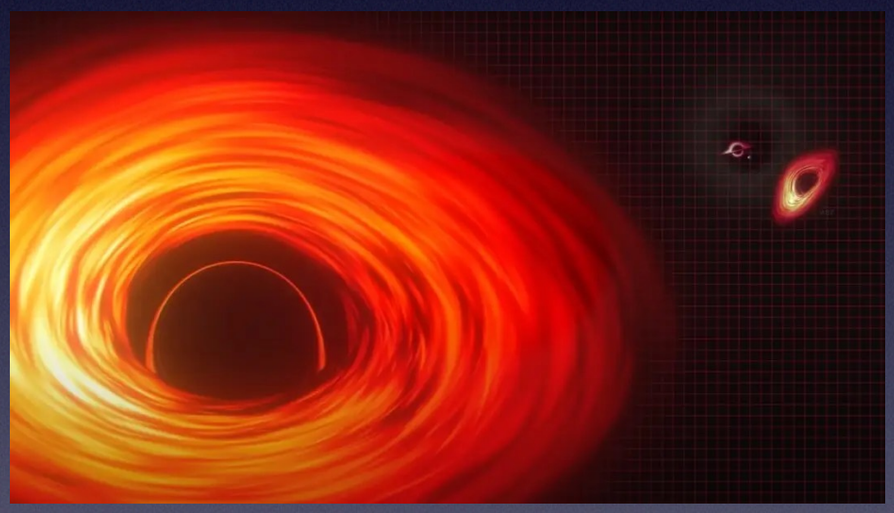
Etat des lieux



Trous noirs stellaires ($\lesssim 50 M_\odot$)

Theory ~ ok

Observation : ok

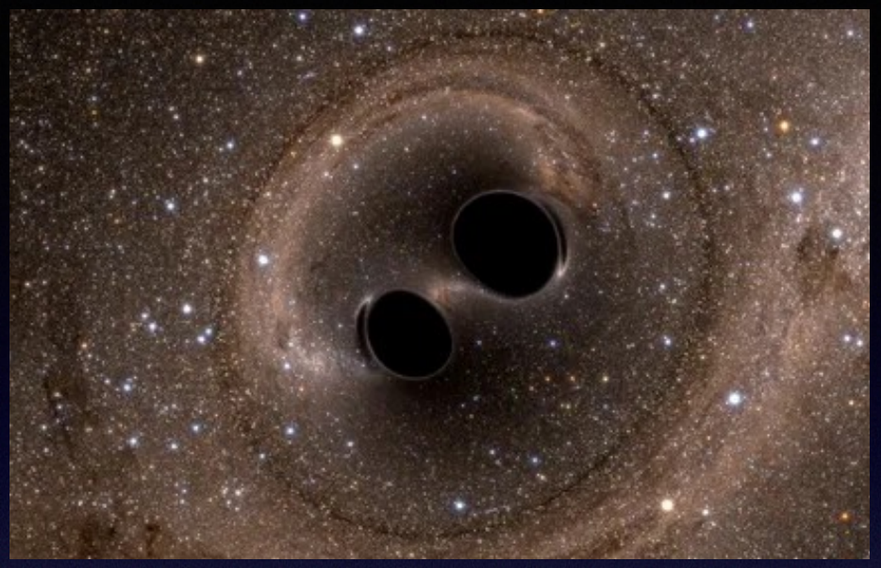


Trous noirs supermassifs ($\gtrsim 10^{10} M_\odot$)

Theory ~ not ok

Observation : ok

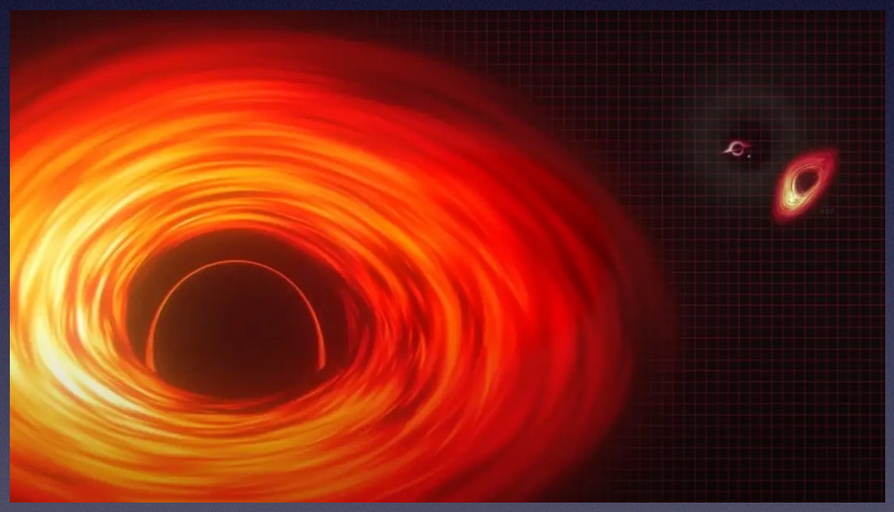
Etat des lieux



Trous noirs stellaires ($\lesssim 50 M_\odot$)

Theory ~ ok

Observation : ok



Trous noirs supermassifs ($\gtrsim 10^{10} M_\odot$)

Theory ~ not ok

Observation : ok



Trous noirs primordiaux ($\lesssim 10^{-10} M_\odot$)

Theory ~ ok

Observation : not ok

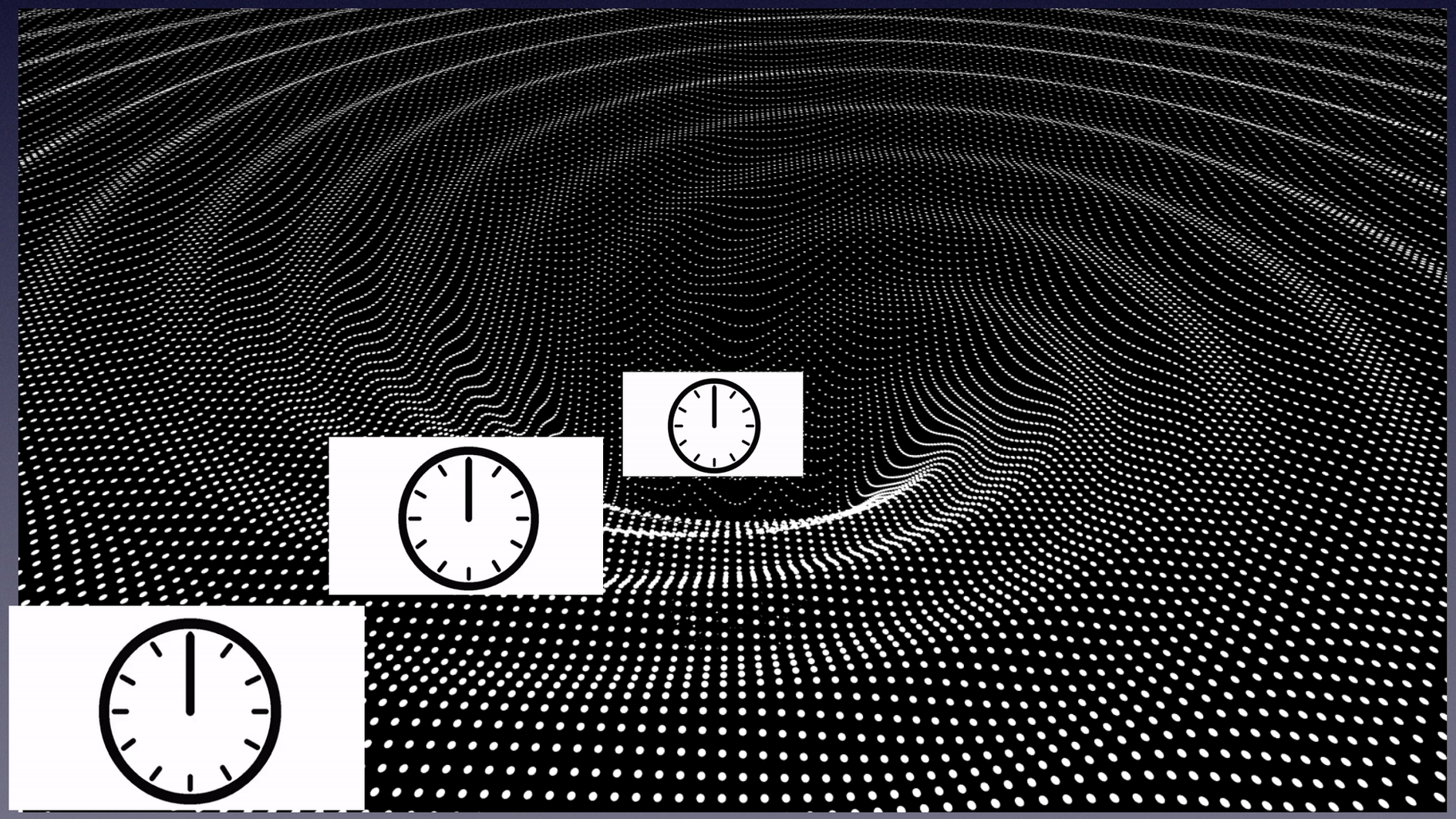


Trous noirs primordiaux ($\lesssim 10^{-10} M_\odot$)

Theory ~ ok

Observation : not ok

Petit rappel historique sur les trous noirs



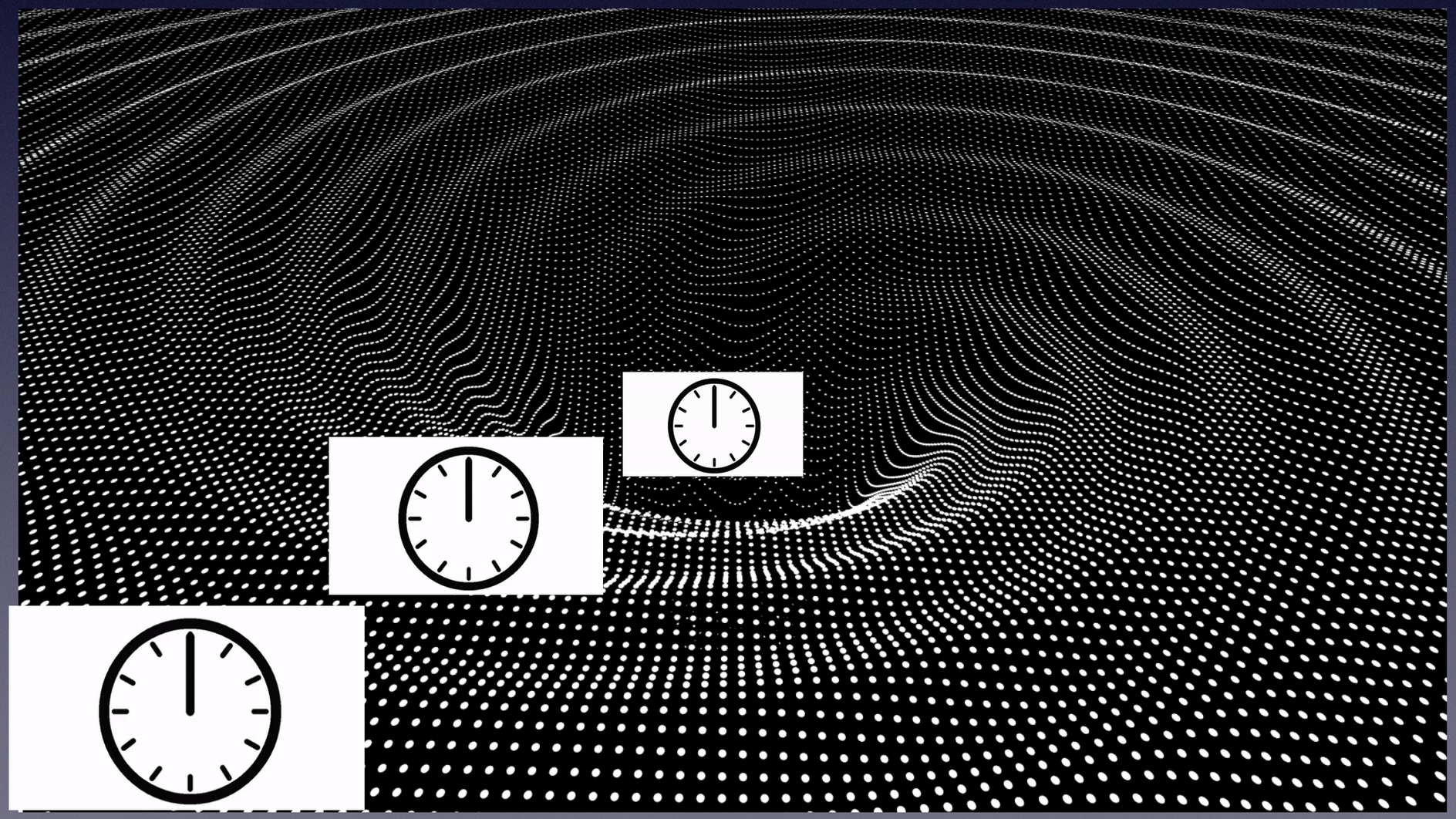


Trous noirs primordiaux ($\lesssim 10^{-10} M_\odot$)

Theory ~ ok

Observation : not ok

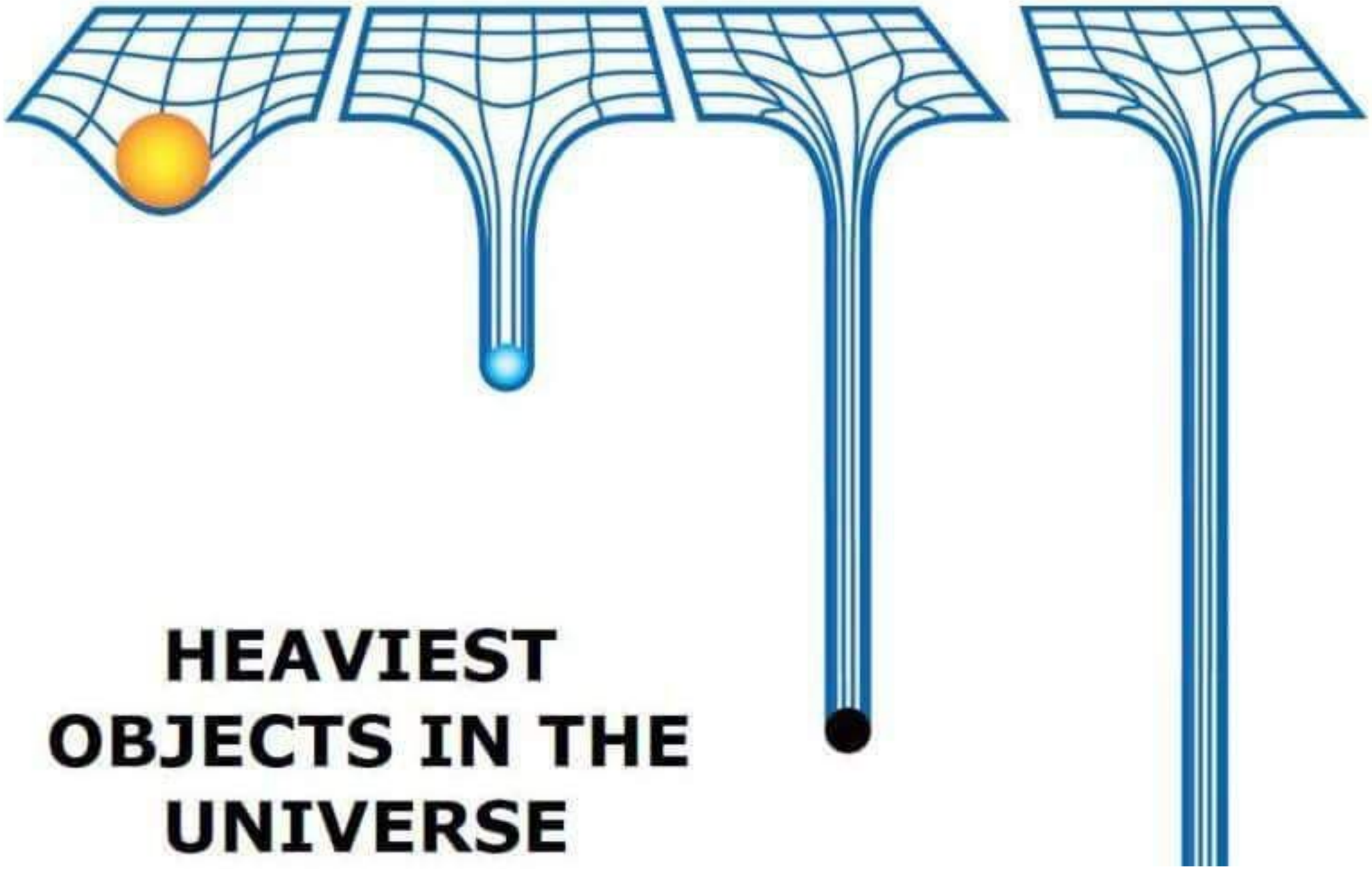
Petit rappel historique sur les trous noirs



Le Soleil

Une Etoile à Neutron

Un trou noir



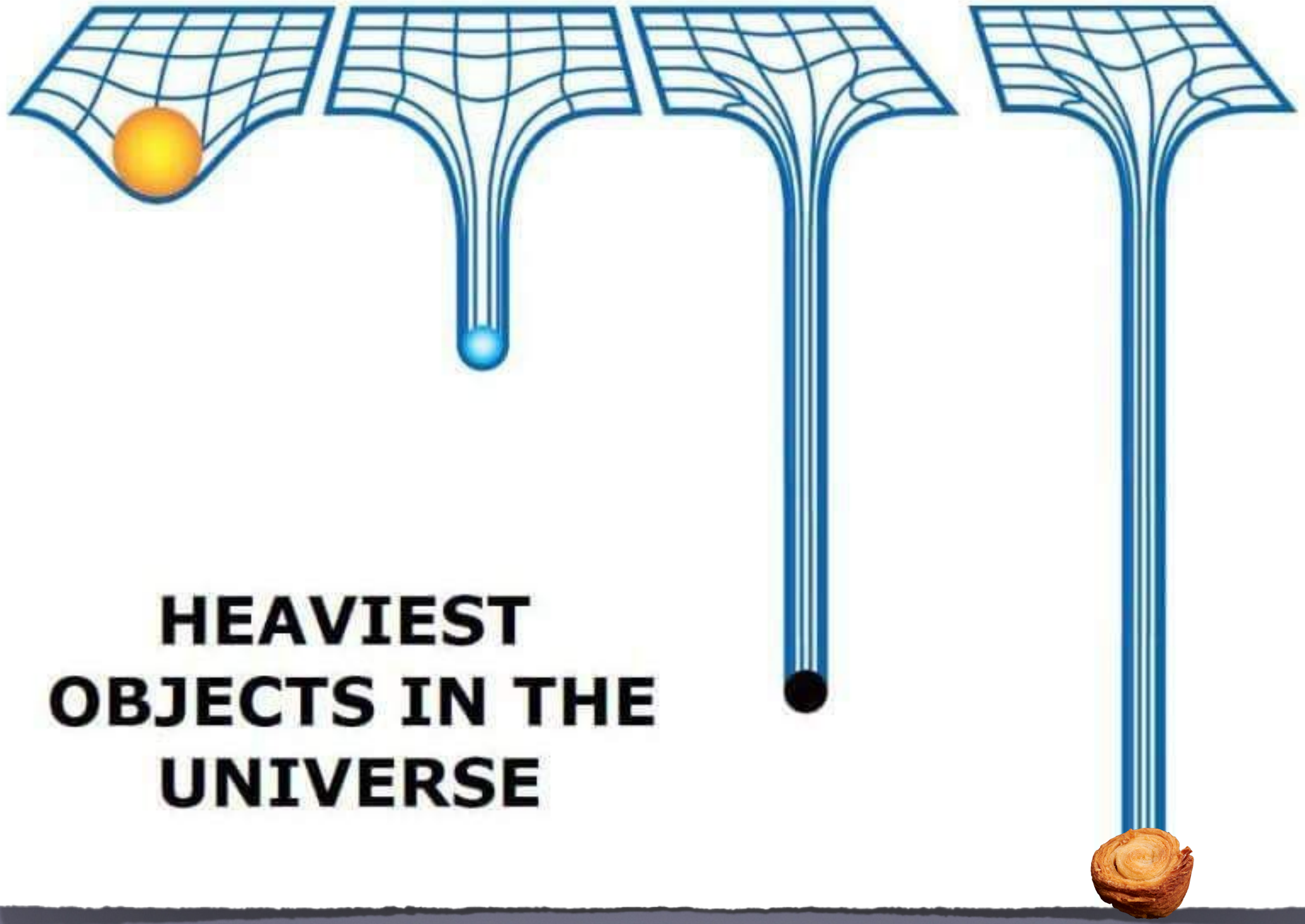
HEAVIEST OBJECTS IN THE UNIVERSE

Le Soleil

Une Etoile à Neutron

Un trou noir

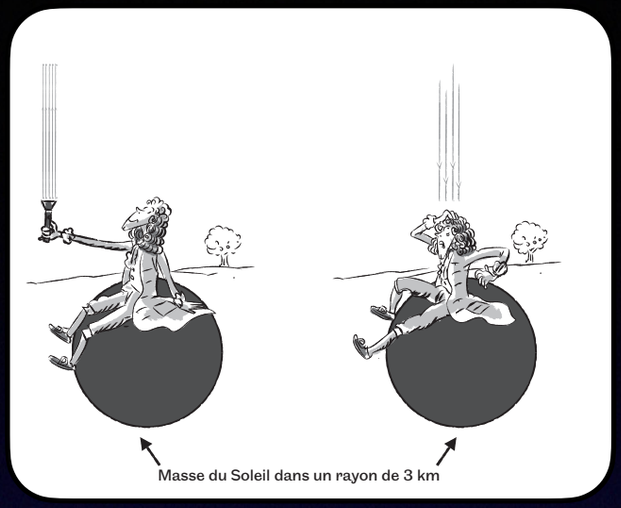
une part de Kouign-amann



HEAVIEST OBJECTS IN THE UNIVERSE

Toute « surcharge » de densité est susceptible de créer un trou noir

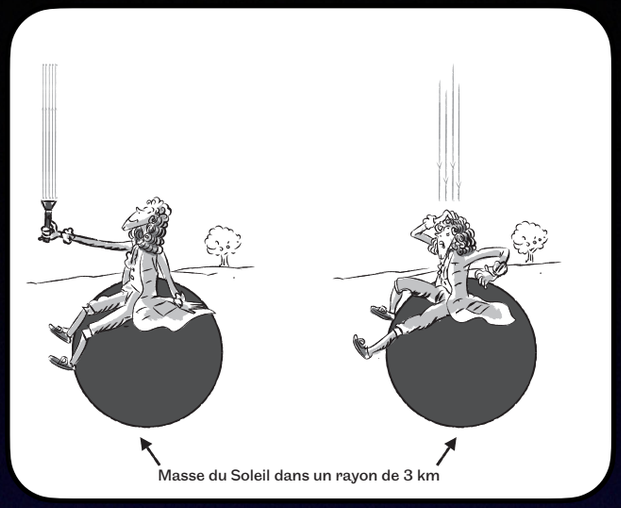
($M_\odot$ dans 3 kms)





Toute « surcharge » de densité est susceptible de créer un trou noir

($M_\odot$ dans 3 kms)

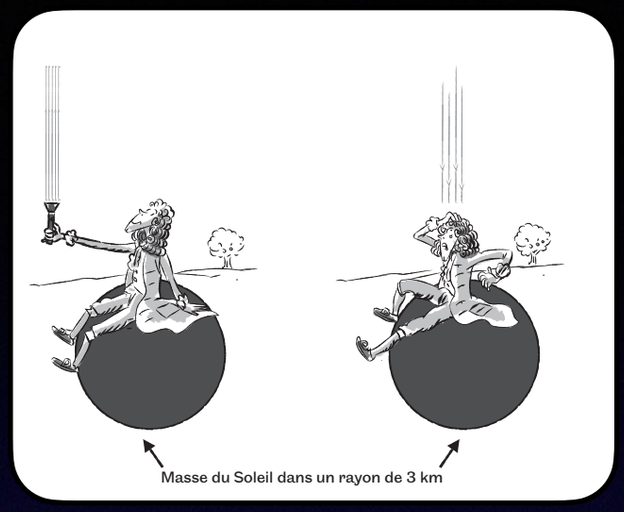




Et des surdensités, l'Univers primordial en était plein… Elles pourraient donc être la source de trous noirs primordiaux (PBH).

Toute « surcharge » de densité est susceptible de créer un trou noir

($M_\odot$ dans 3 kms)





Et des surdensités, l'Univers primordial en était plein… Elles pourraient donc être la source de trous noirs primordiaux (PBH).

Proposés en 1974 par Stephen Hawking et Bernar Carr

Black hole explosions?

QUANTUM gravitational effects are usually ignored in calculations of the formation and evolution of black holes. The justification for this is that the radius of curvature of space-time outside the event horizon is very large compared to the Planck length $(G\hbar/c^3)^{1/2} \approx 10^{-33}$ cm, the length scale on which quantum fluctuations of the metric are expected to be of order unity. This means that the energy density of particles created by the gravitational field is small compared to the space-time curvature. Even though quantum effects may be small locally, they may still, however, add up to produce a significant effect over the lifetime of the Universe $\approx 10^{17}$ s which is very long compared to the Planck time $\approx 10^{-43}$ s.

© 1974 Natu

BLACK HOLES IN THE EARLY UNIVERSE

B. J. Carr and S. W. Hawking NO REAL ACCRETION

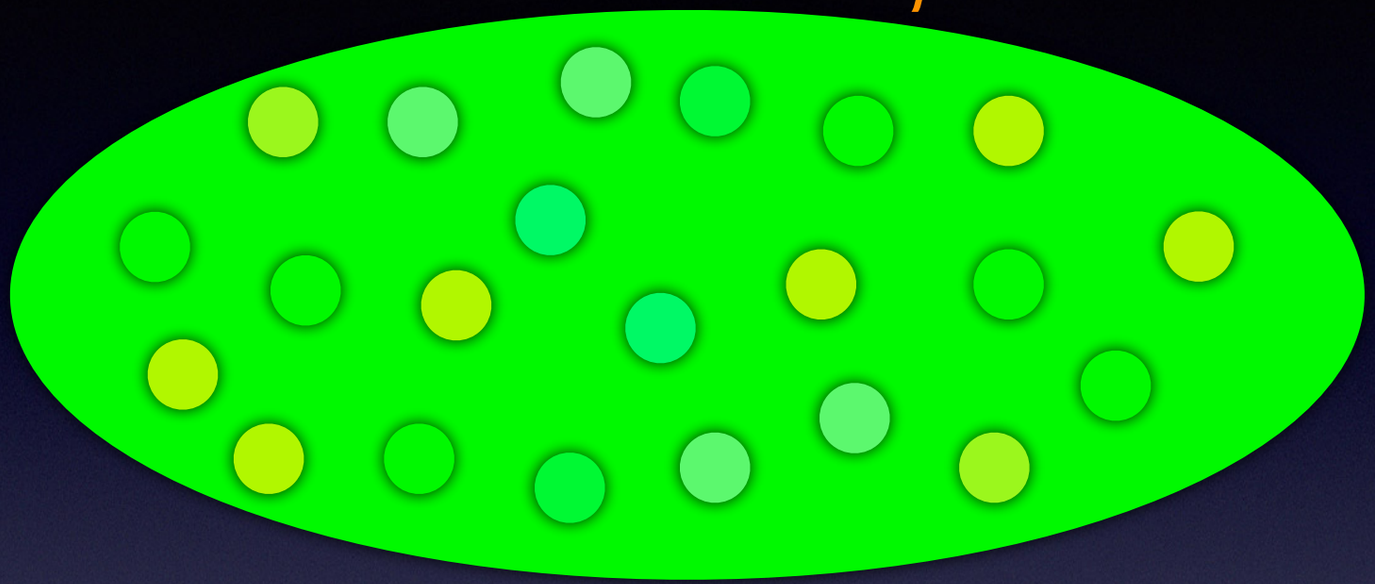
(Received 1974 February 25)

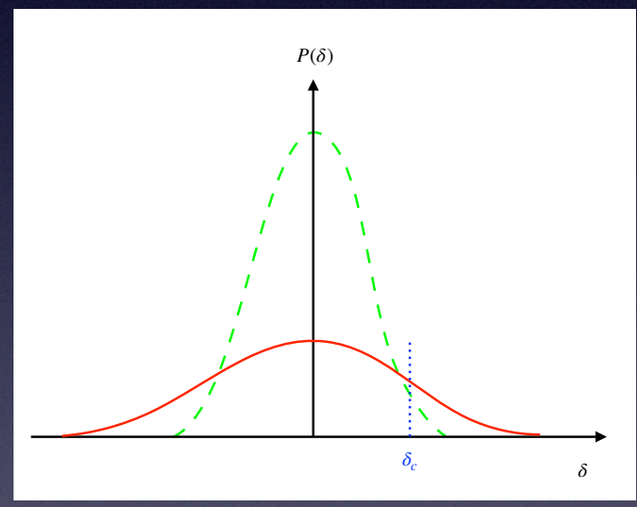
SUMMARY

The existence of galaxies today implies that the early Universe must have been inhomogeneous. Some regions might have got so compressed that they underwent gravitational collapse to produce black holes. Once formed, black holes in the early Universe would grow by accreting nearby matter. A first estimate suggests that they might grow at the same rate as the Universe during the radiation era and be of the order of 10^{15} to 10^{17} solar masses now. The observational evidence however is against the existence of such giant black holes. This motivates a more detailed study of the rate of accretion which shows that black holes will not in fact substantially increase their original mass by accretion. There could thus be primordial black holes around now with masses from 10^{-5} g upwards.

La formation suit une loi d'effondrement « classique »

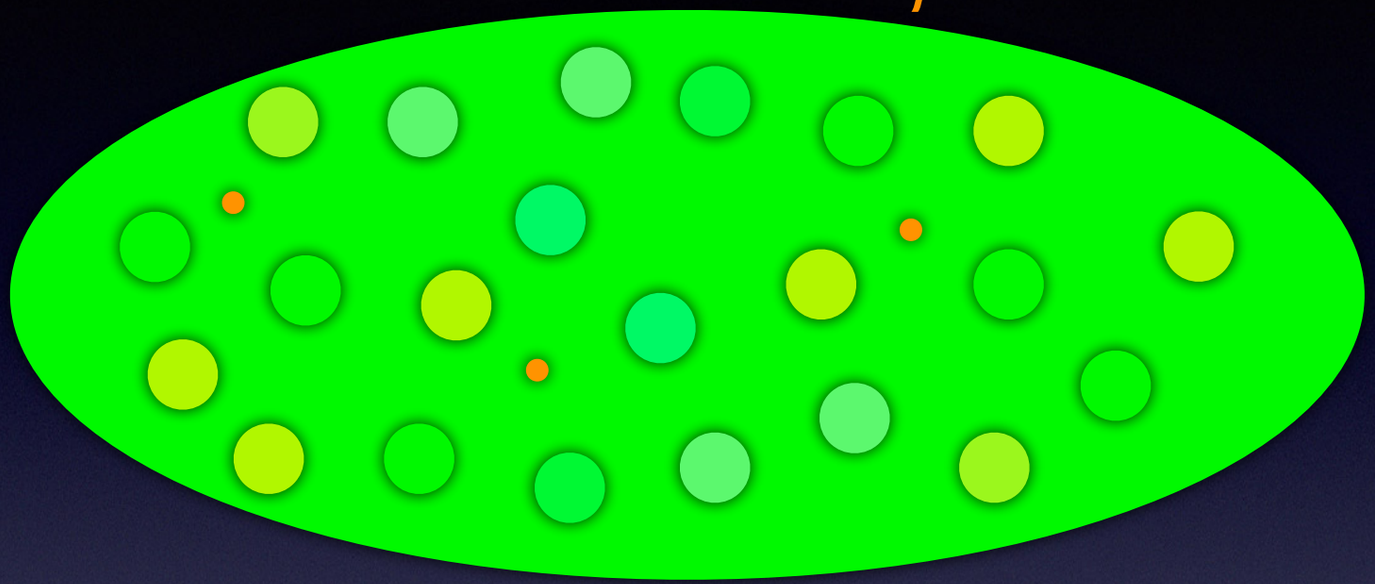
$$\frac{\delta\rho}{\rho} \gtrsim \delta_c, \text{ with } \delta_c \simeq 1.$$



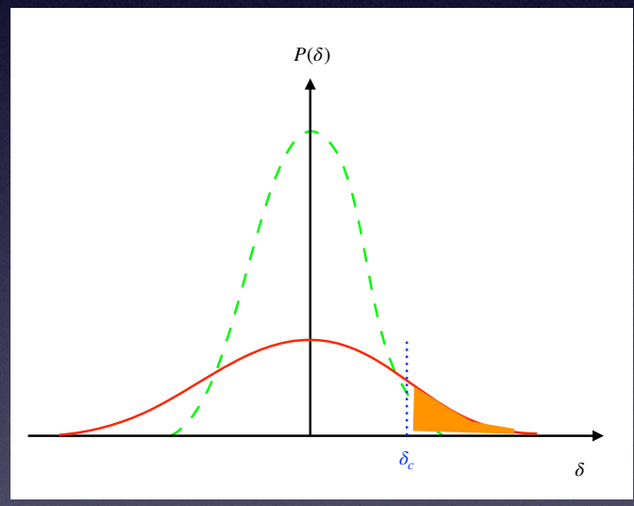


La formation suit une loi d'effondrement « classique »

$$\frac{\delta\rho}{\rho} \gtrsim \delta_c, \text{ with } \delta_c \simeq 1.$$

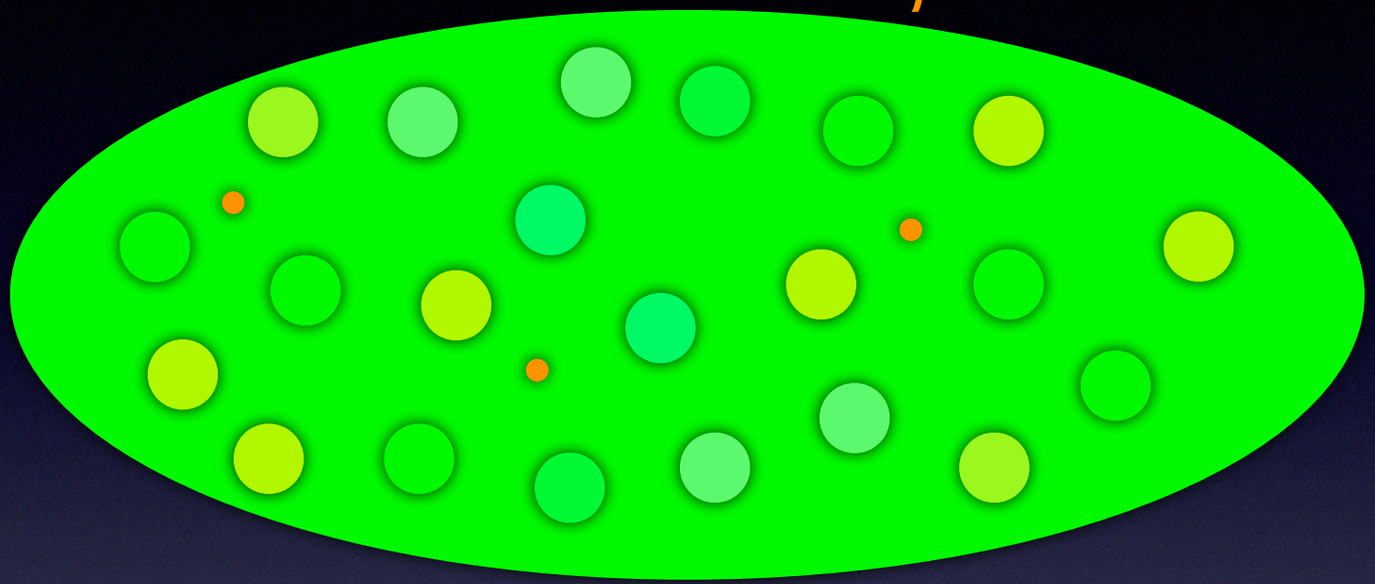


$$\text{La fraction } \beta = \frac{\rho_{\rm BH}}{\rho_{tot}} \sim \int_{\delta_c}^{\infty} P(\delta) d\delta$$

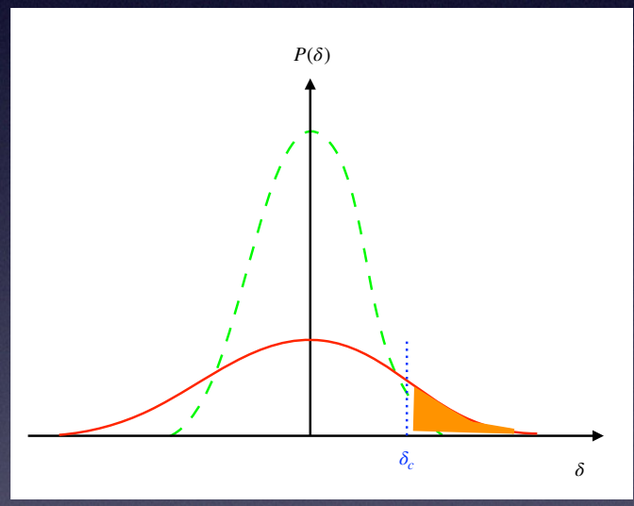


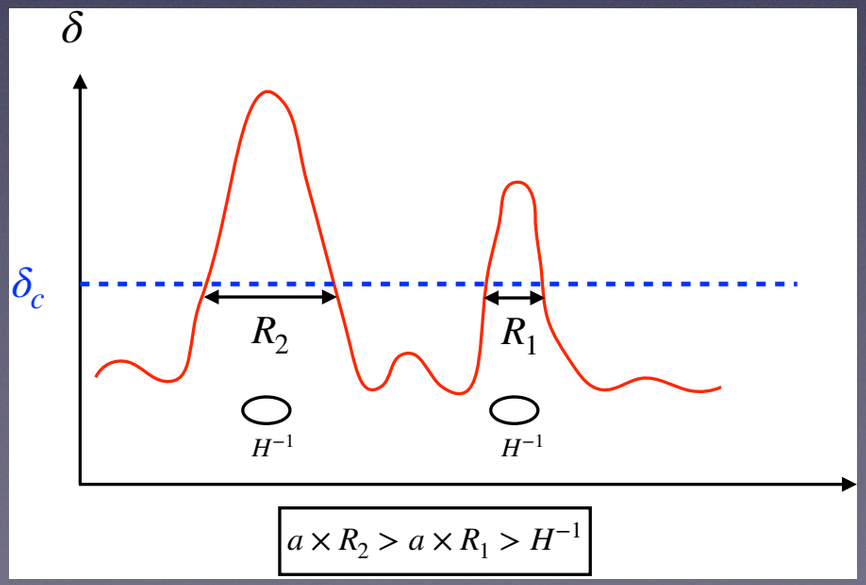
La formation suit une loi d'effondrement « classique »

$$\frac{\delta\rho}{\rho} \gtrsim \delta_c, \text{ with } \delta_c \simeq 1.$$



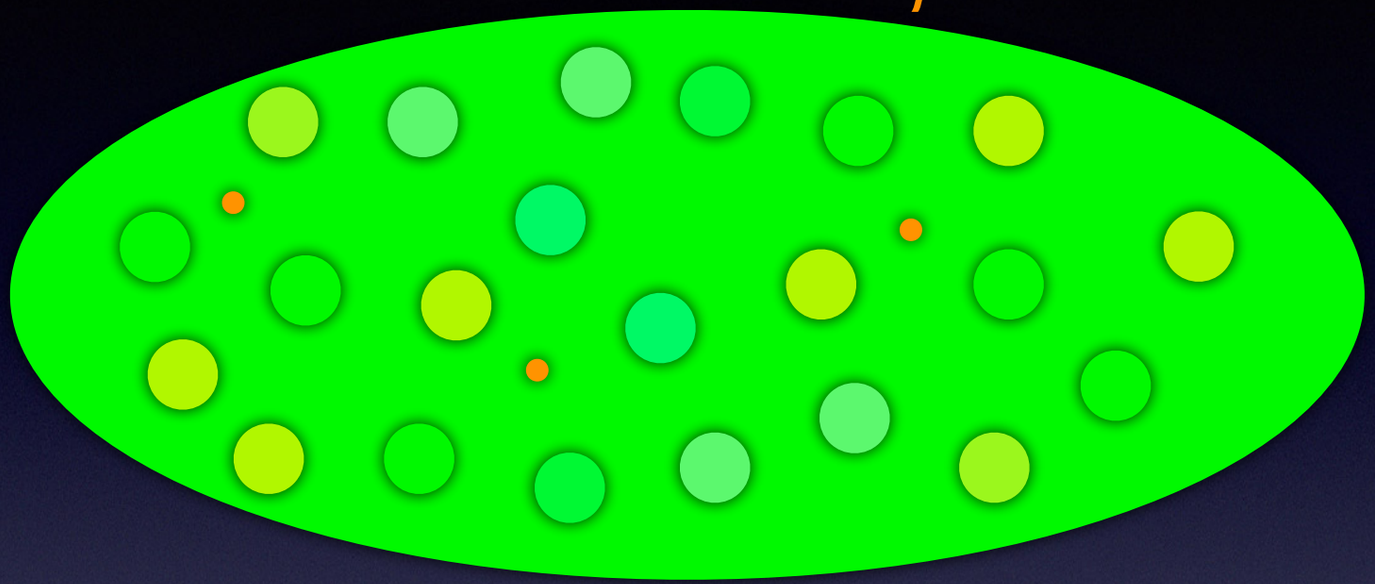
$$\text{La fraction } \beta = \frac{\rho_{\mathrm{BH}}}{\rho_{tot}} \sim \int_{\delta_c}^{\infty} P(\delta)d\delta$$



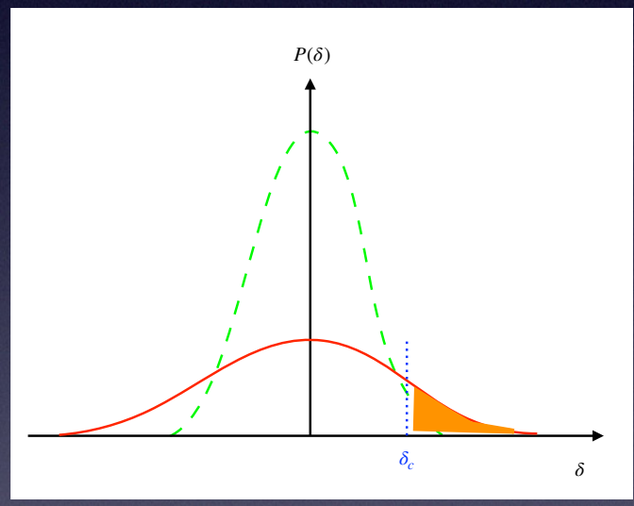


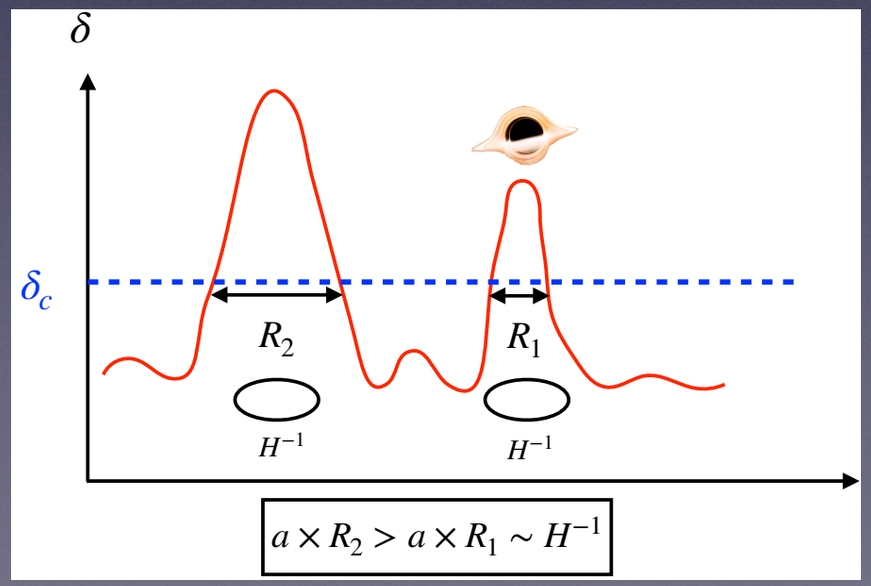
La formation suit une loi d'effondrement « classique »

$$\frac{\delta\rho}{\rho} \gtrsim \delta_c, \text{ with } \delta_c \simeq 1.$$



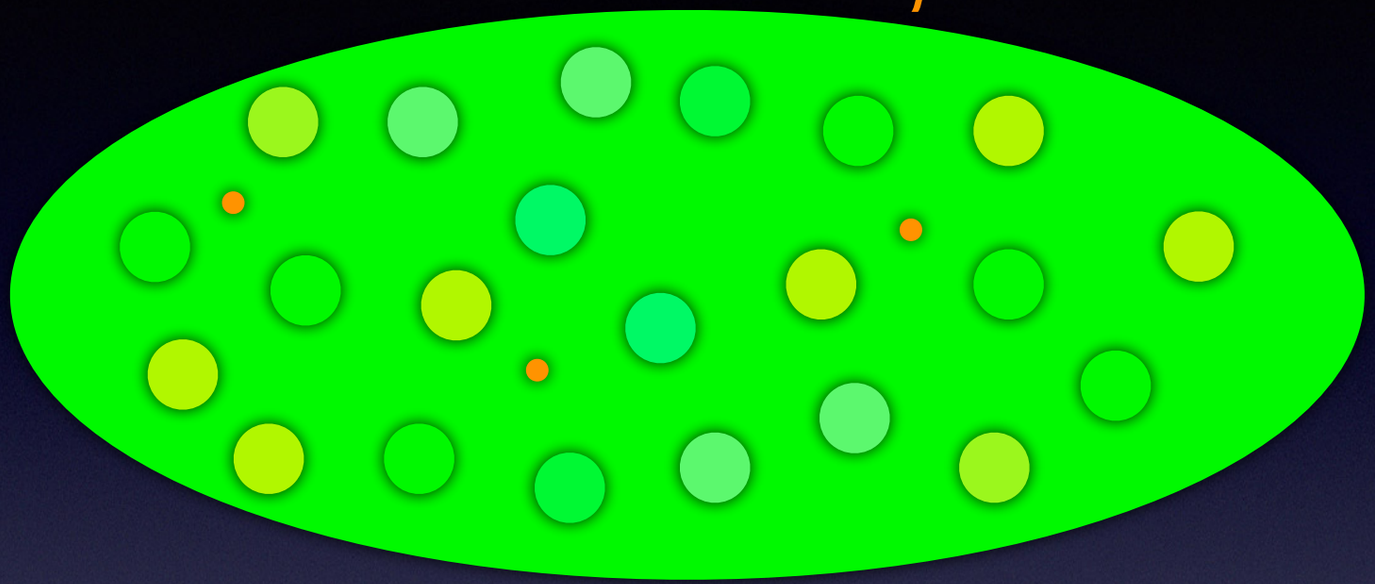
$$\text{La fraction } \beta = \frac{\rho_{\mathrm{BH}}}{\rho_{tot}} \sim \int_{\delta_c}^{\infty} P(\delta)d\delta$$

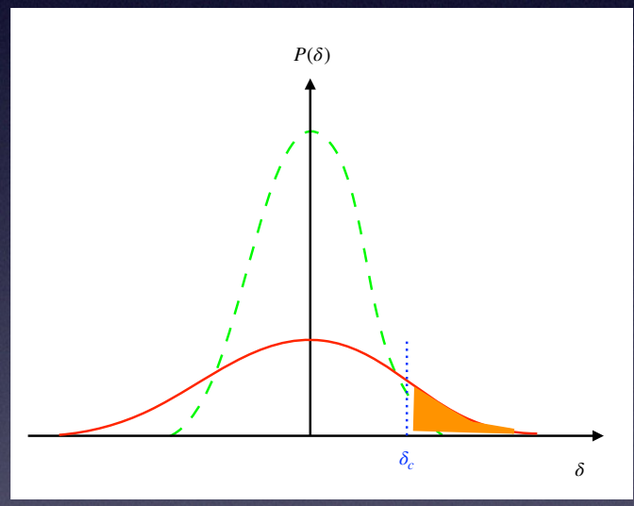




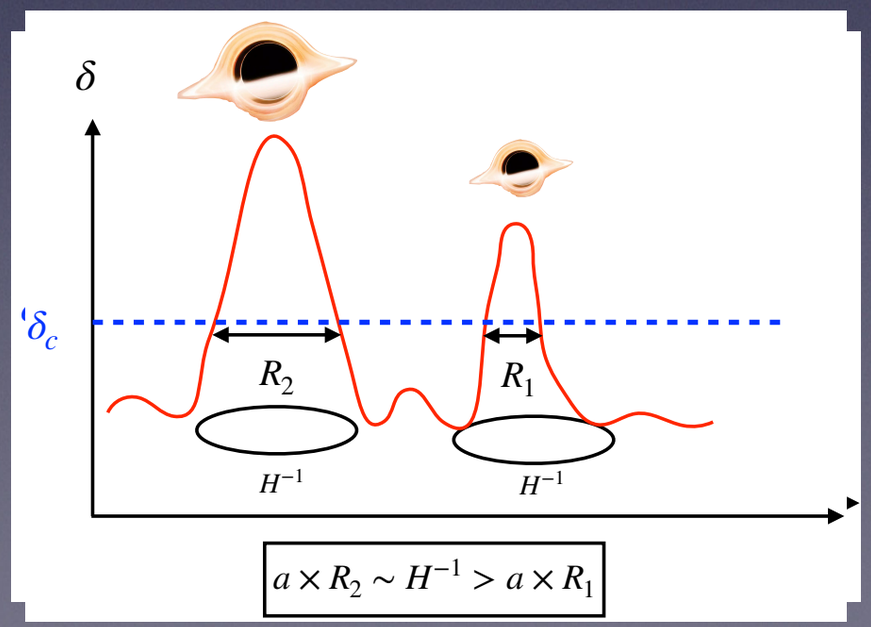
La formation suit une loi d'effondrement « classique »

$$\frac{\delta\rho}{\rho} \gtrsim \delta_c, \text{ with } \delta_c \simeq 1.$$



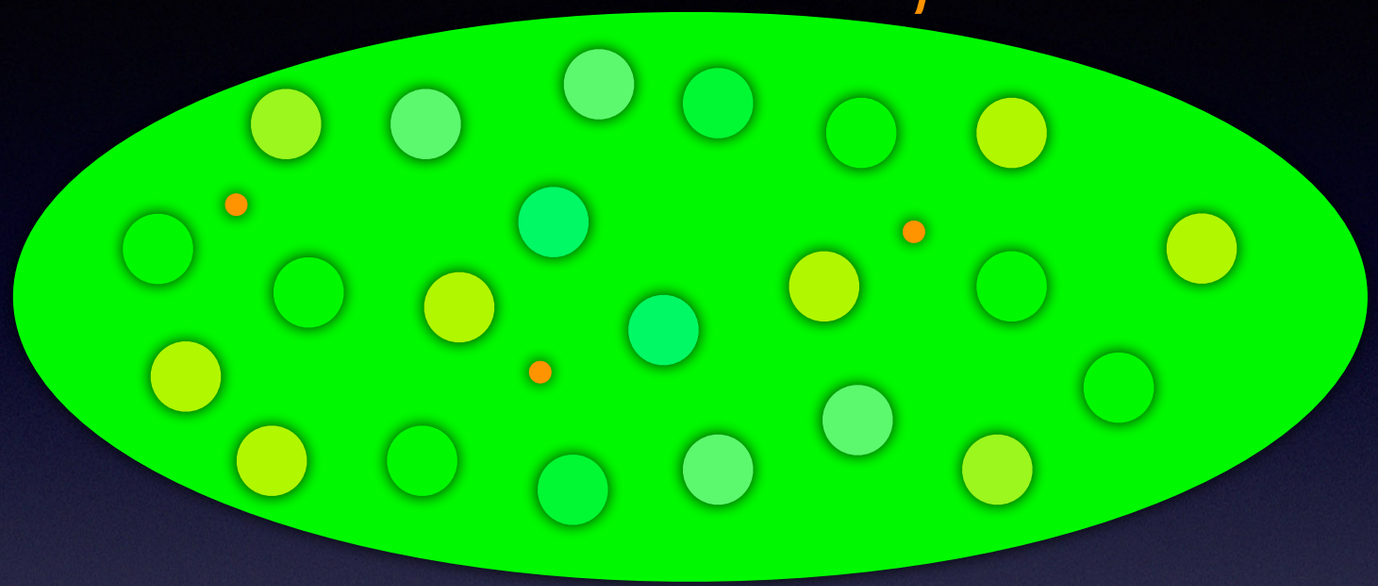


$$\text{La fraction } \beta = \frac{\rho_{\rm BH}}{\rho_{tot}} \sim \int_{\delta_c}^{\infty} P(\delta) d\delta$$

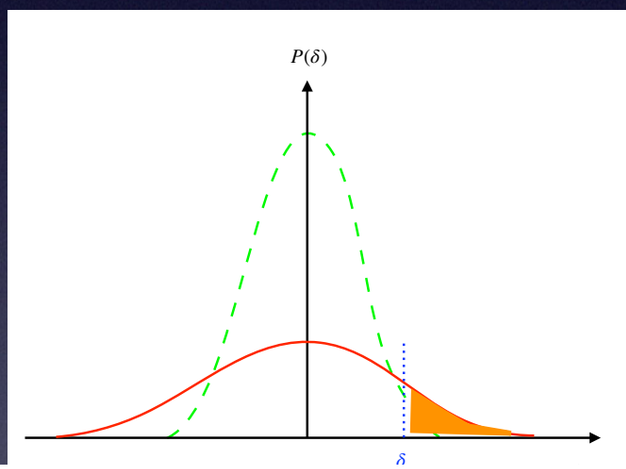


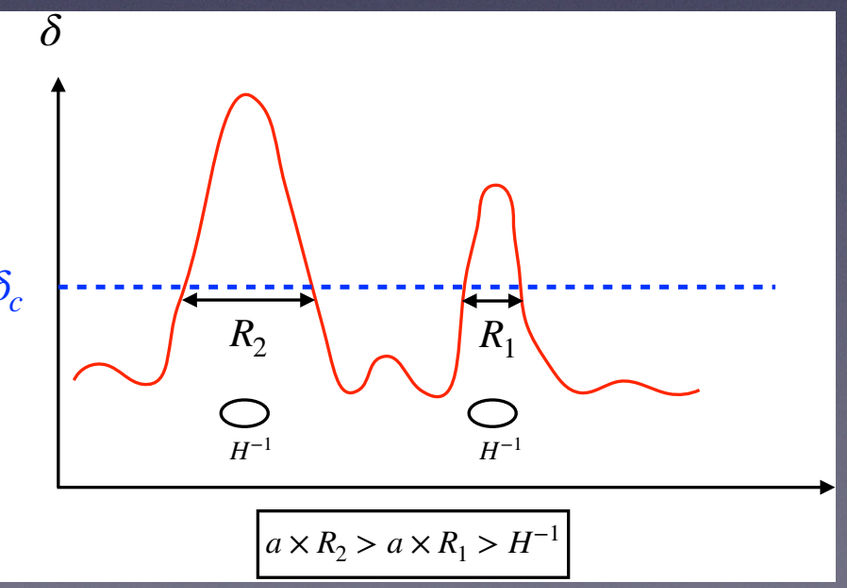
La formation suit une loi d'effondrement « classique »

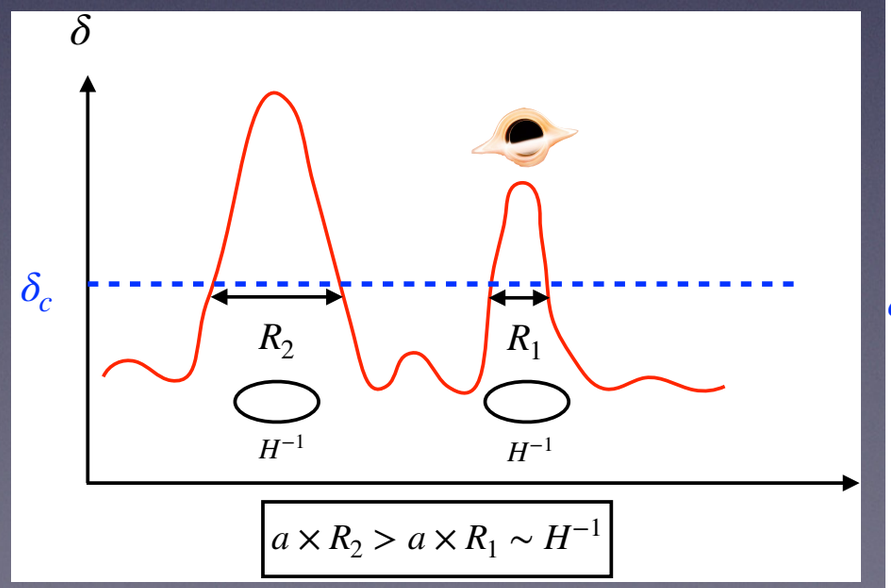
$$\frac{\delta\rho}{\rho} \gtrsim \delta_c, \text{ with } \delta_c \simeq 1.$$

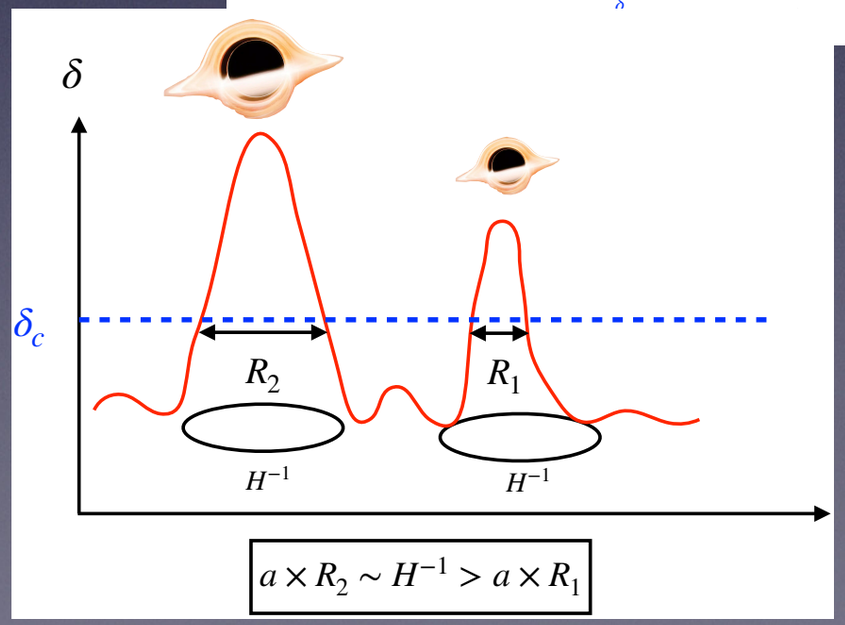


$$\text{La fraction } \beta = \frac{\rho_{\rm BH}}{\rho_{tot}} \sim \int_{\delta_c}^{\infty} P(\delta) d\delta$$









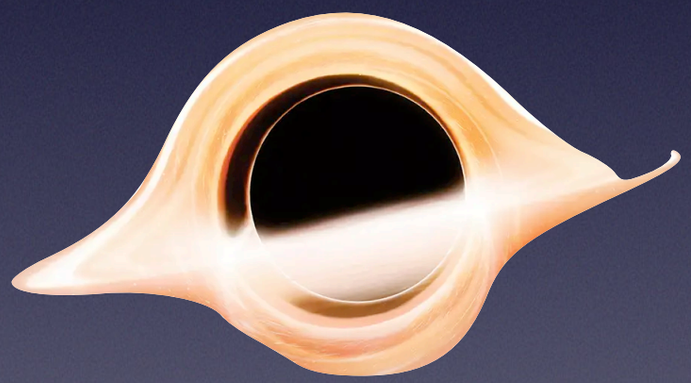
$$M_{\rm BH} \sim 3.6 \times 1\ {\rm g} \left(\frac{\rm t}{10^{-38}\ {\rm s}}\right) = 10^{16}\ {\rm g} \left(\frac{\rm t}{10^{-23}\ {\rm s}}\right) = {\rm M}_\odot \left(\frac{\rm t}{10^{-6}\ {\rm s}}\right)$$



Les PBHs sont instables : radiation de Hawking



$$T_{BH} = \frac{M_P^2}{M_{BH}} \simeq 10^{13}\ {\rm GeV} \left(\frac{1\ {\rm g}}{\rm M_{BH}}\right)$$



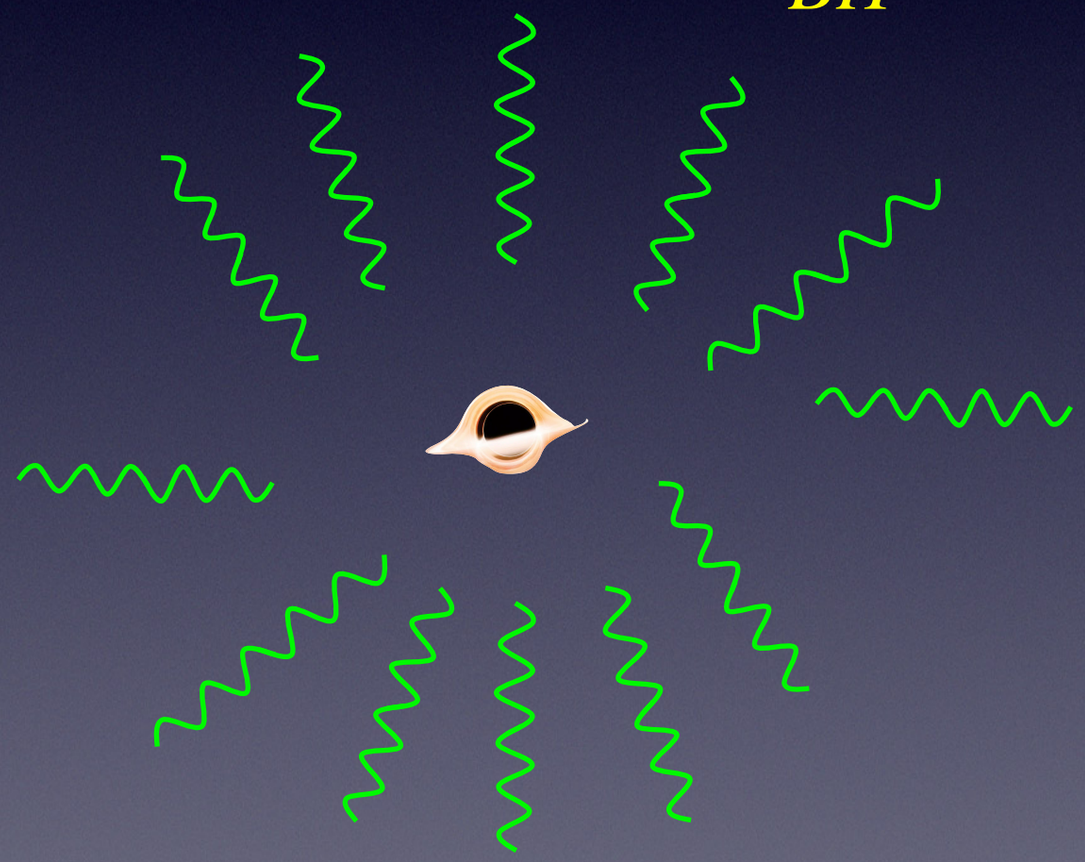
$$M_{\rm BH} \sim 3.6 \times 1\ {\rm g} \left(\frac{\rm t}{10^{-38}\ {\rm s}}\right) = 10^{16}\ {\rm g} \left(\frac{\rm t}{10^{-23}\ {\rm s}}\right) = {\rm M}_\odot \left(\frac{\rm t}{10^{-6}\ {\rm s}}\right)$$



Les PBHs sont instables : radiation de Hawking

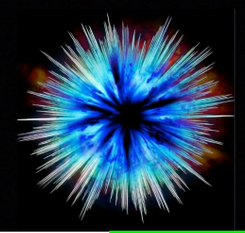


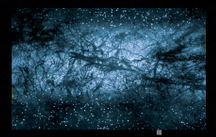
$$T_{BH} = \frac{M_P^2}{M_{BH}} \simeq 10^{13}\ {\rm GeV} \left(\frac{1\ {\rm g}}{\rm M_{BH}}\right)$$

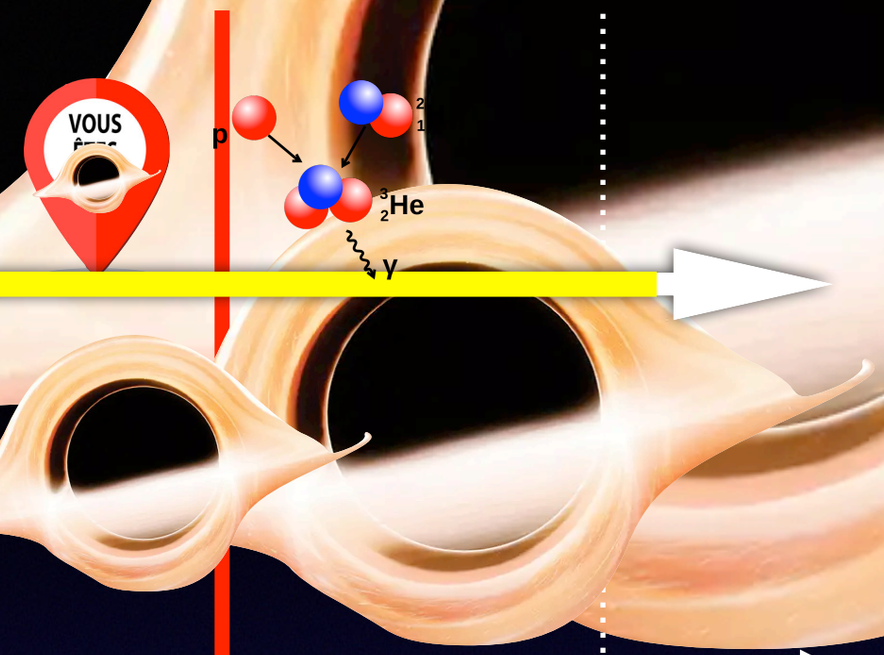


$$\frac{dM_{\rm BH}}{dt} = -\frac{g_* \pi}{480} \frac{M_P^4}{M_{\rm BH}^2}$$

Durée de vie $\tau_{\rm BH} = \dfrac{M_{\rm BH}^3}{M_P^4} \simeq 10^{17}{\rm s} \left(\dfrac{\rm M_{BH}}{10^{15}{\rm g}}\right)^3$







10^{-43} s

10^{-38} s

10^{-36} s

1 g

10^{9} g

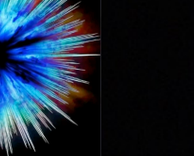
10^{15} g

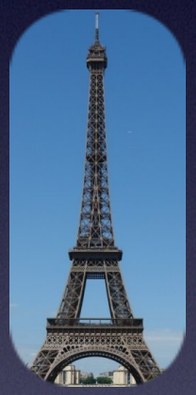
10^{30} kg

$10^{5}\ M_{\odot}$

$10^{17}\ M_{\odot}$

Mass













BBN

Formation[1]

10^{-38}s

10^{15} GeV

10^{-29}s

10^{10} GeV

10^{-23}s

10^{7} GeV

10^{-5}s

10 MeV

1 s

100 keV

t_{EQ}

0.1 eV

Evaporation

10^{-28} s

1 s

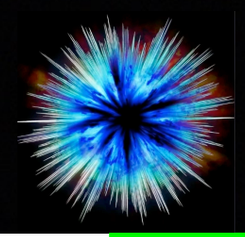
10^{17} s

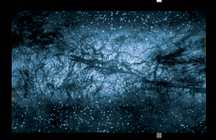
10^{63} yrs

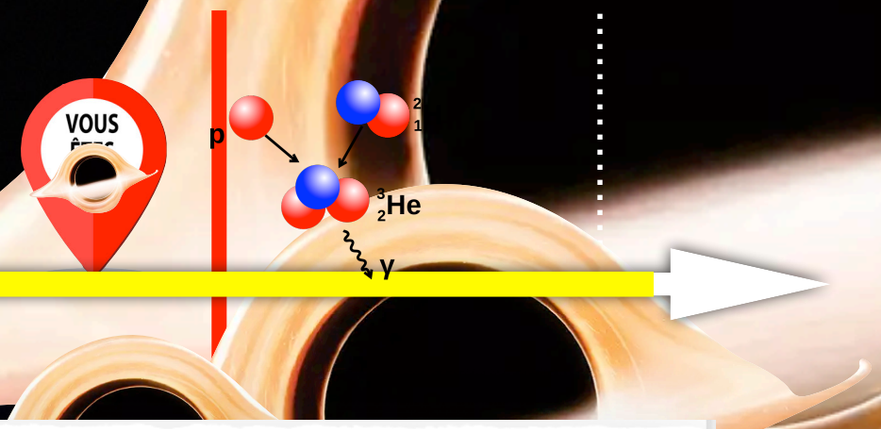
10^{79} yrs

10^{115} yrs

[1] Les températures sont données comme illustration dans le cas d'un reheating instantané.







10^{-43} s

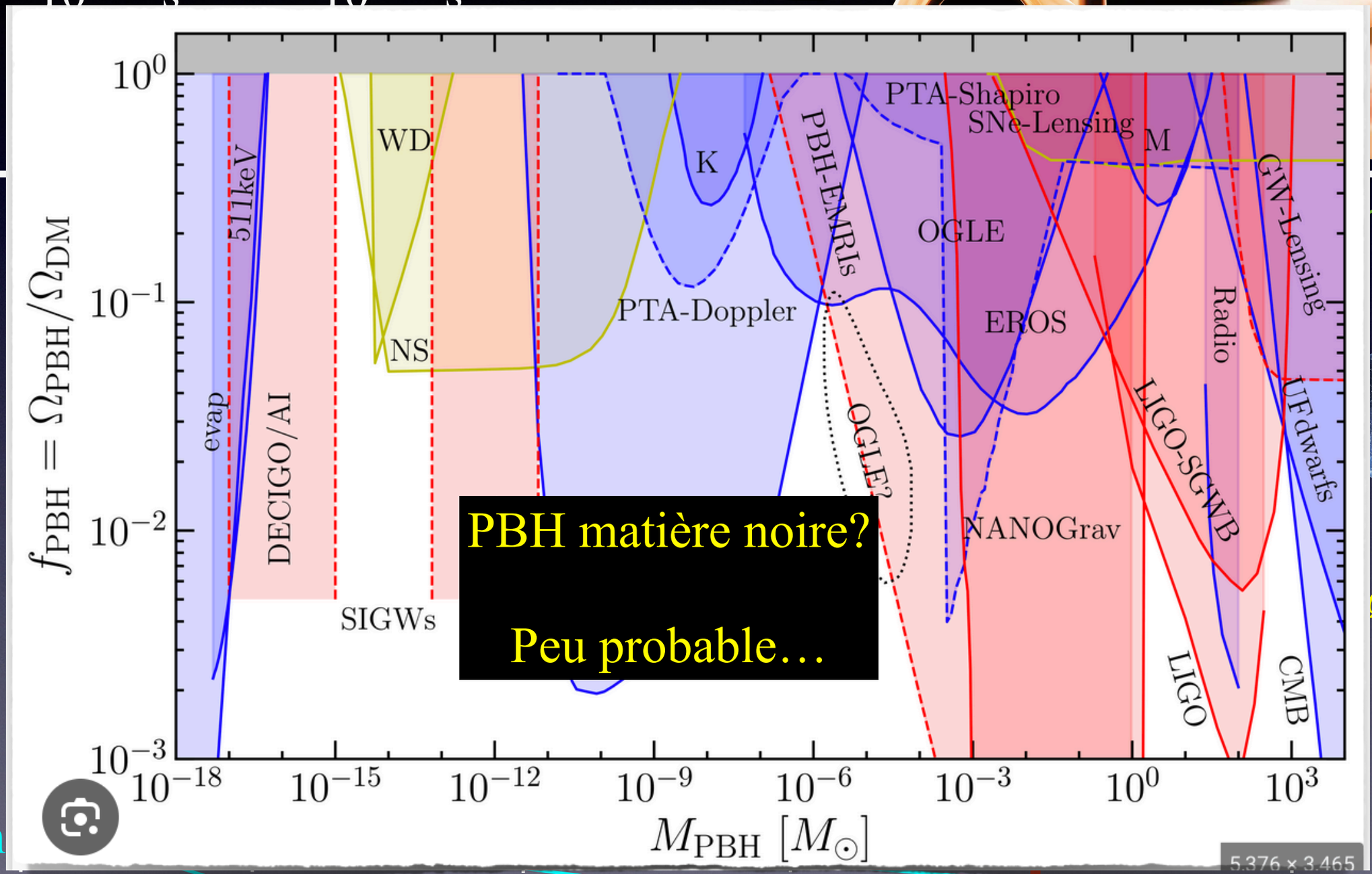
10^{-38} s

10^{-36} s

Mass

Formation[1]

Evaporation



$10^{7}\ M_\odot$

ϱ

1 eV

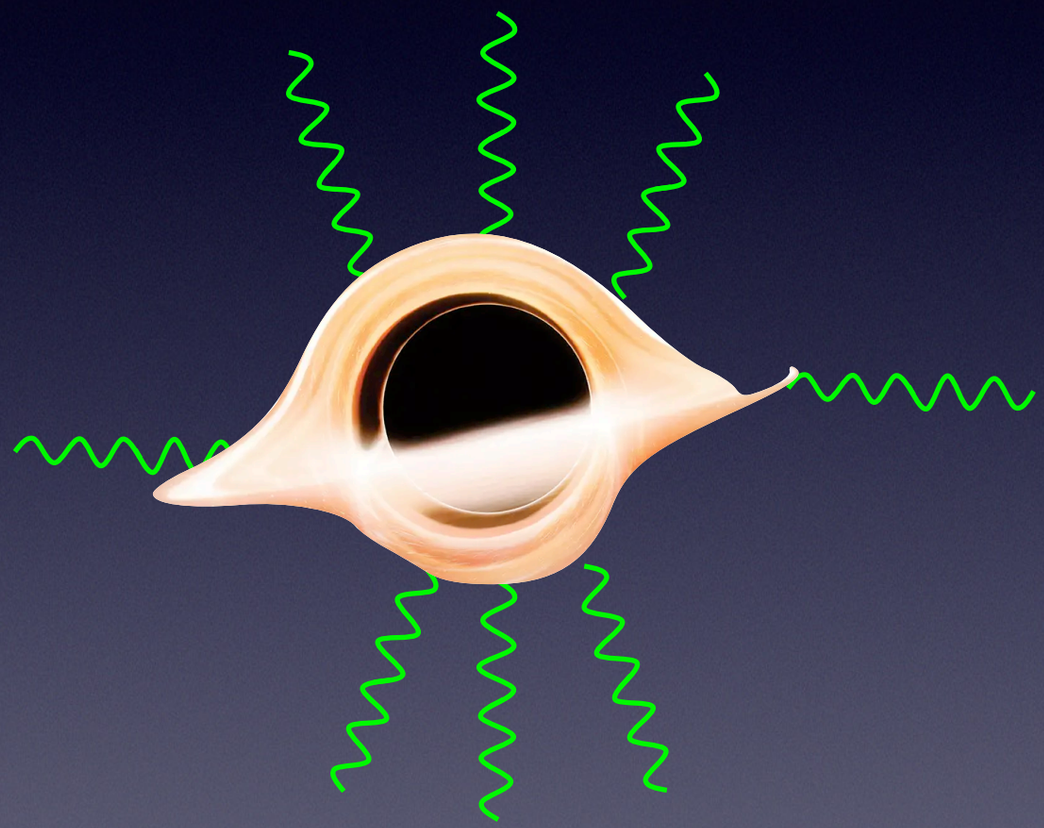
10^{15} yrs

[1] Les températures sont données comme illustration dans le cas d'un reheating instantané.

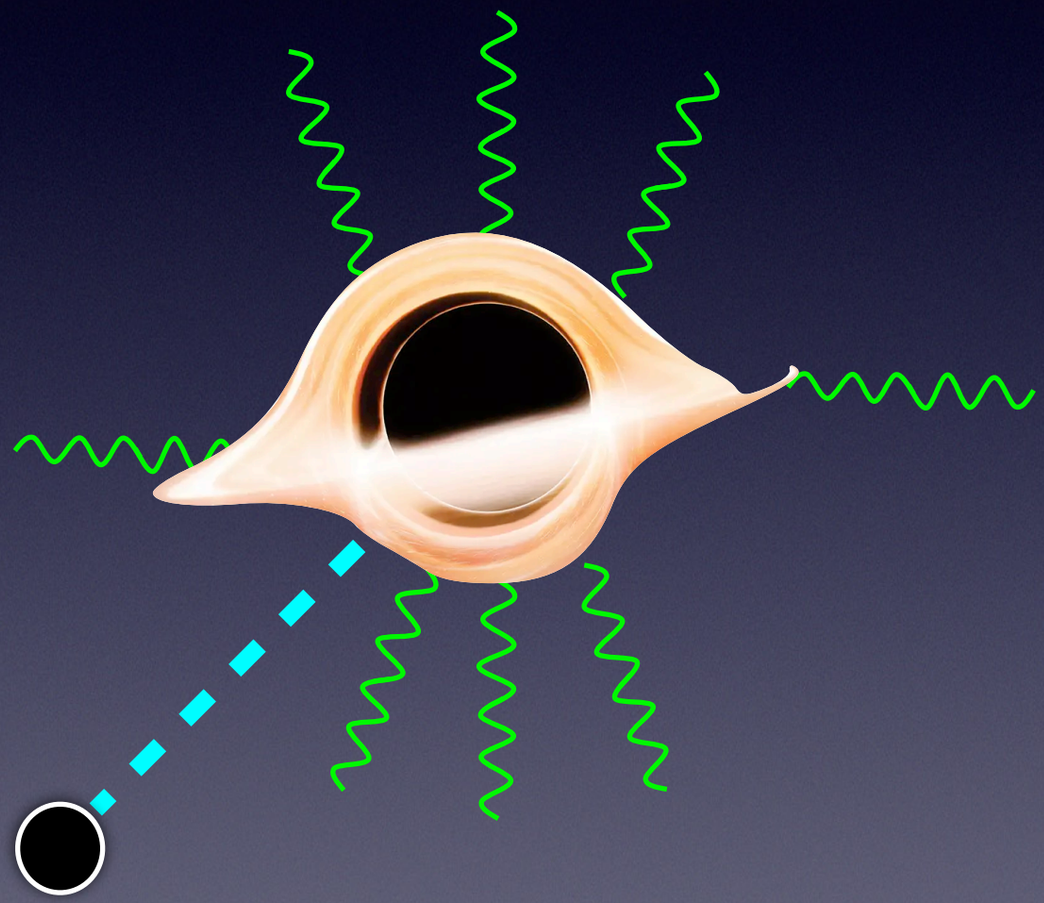


Mais un trou noir primordial aurait énormément de conséquence
s'il était présent dans l'Univers primordial





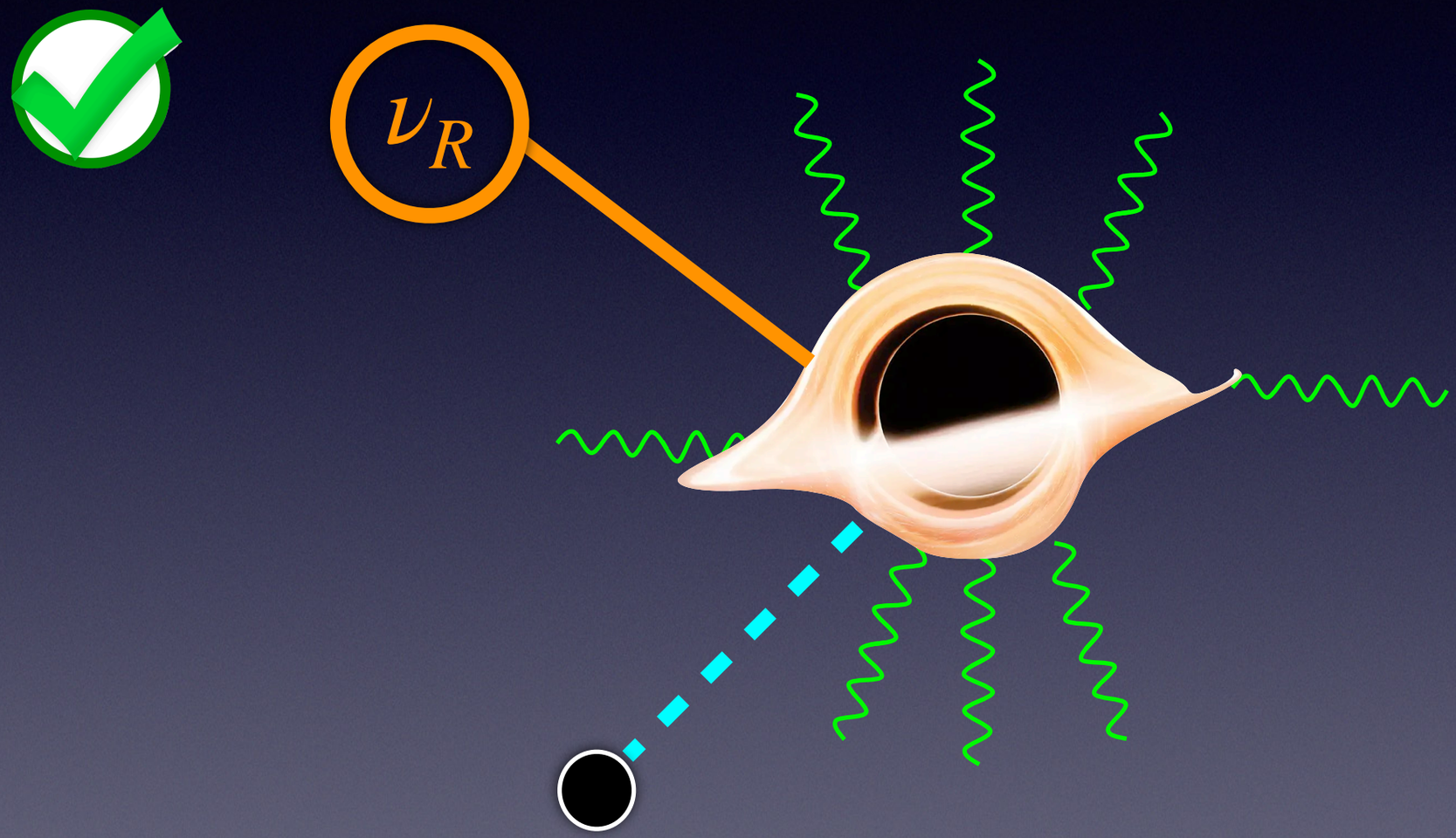
Mais un trou noir primordial aurait énormément de conséquence s'il était présent dans l'Univers primordial



Lors de sa désintégration, un PBH émet de la matière noire en abondante quantité et peut expliquer la densité observée.

Mais un trou noir primordial aurait énormément de conséquence
s'il était présent dans l'Univers primordial

Il peut aussi se désintégrer en neutrino droit,
ce qui expliquerait la baryogénèse.

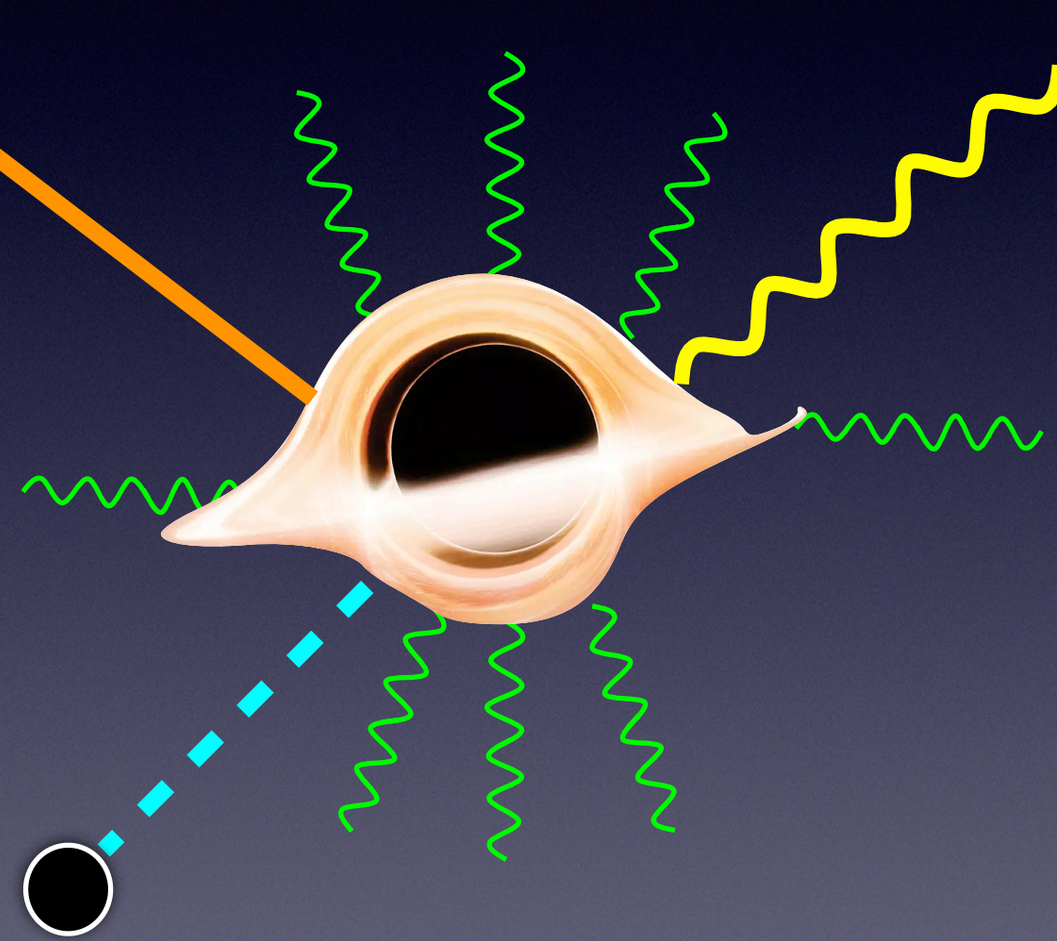


Lors de sa désintégration, un PBH
émet de la matière noire en
abondante quantité et peut expliquer
la densité observée.

Mais un trou noir primordial aurait énormément de conséquence
s'il était présent dans l'Univers primordial

Il peut aussi se désintégrer en neutrino droit,
ce qui expliquerait la baryogénèse.

Il peut aussi être responsable
du réchauffement à la place
de l'inflaton.

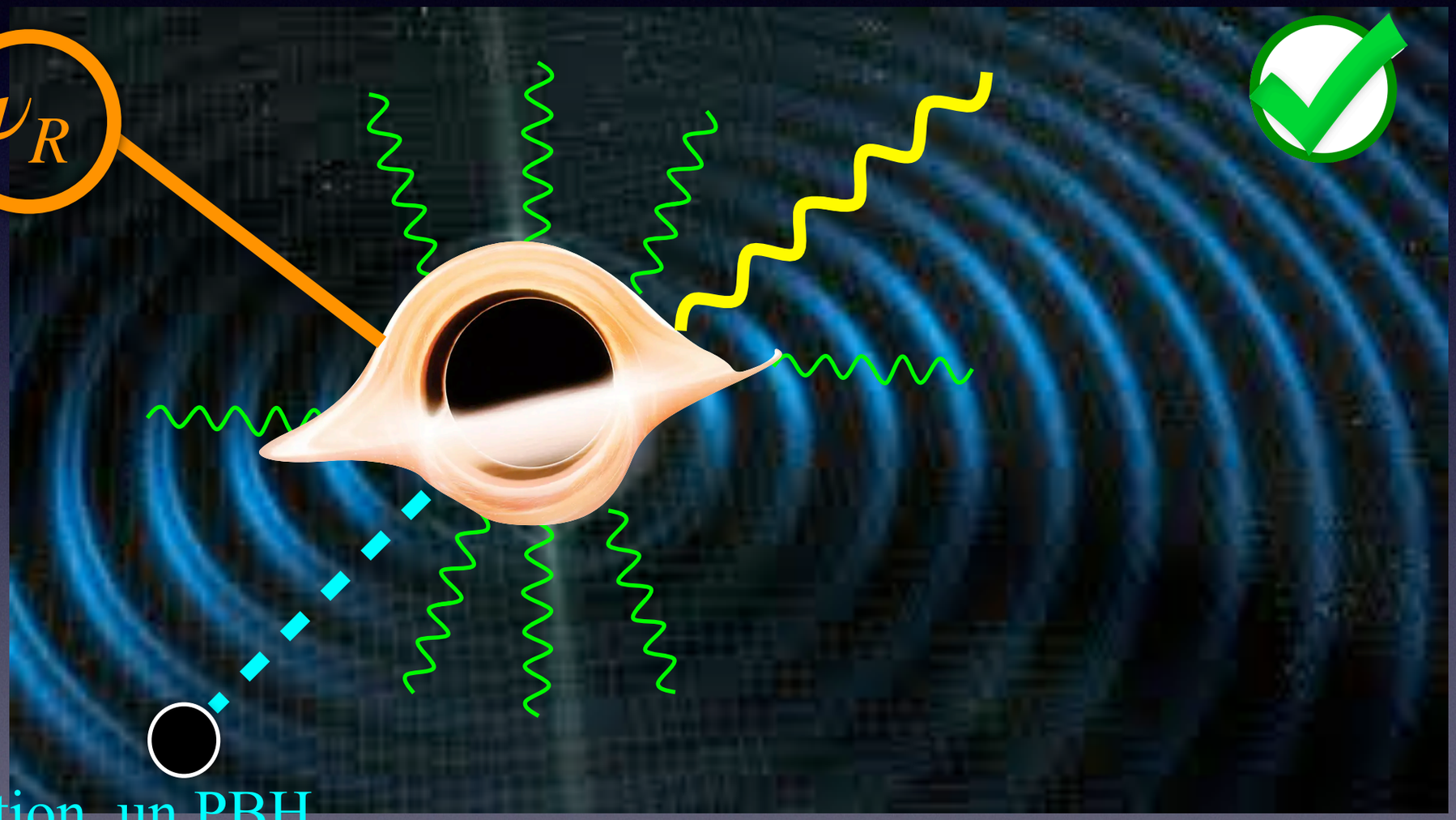


Lors de sa désintégration, un PBH
émet de la matière noire en
abondante quantité et peut expliquer
la densité observée.

Mais un trou noir primordial aurait énormément de conséquence s'il était présent dans l'Univers primordial

Il peut aussi se désintégrer en neutrino droit, ce qui expliquerait la baryogénèse.

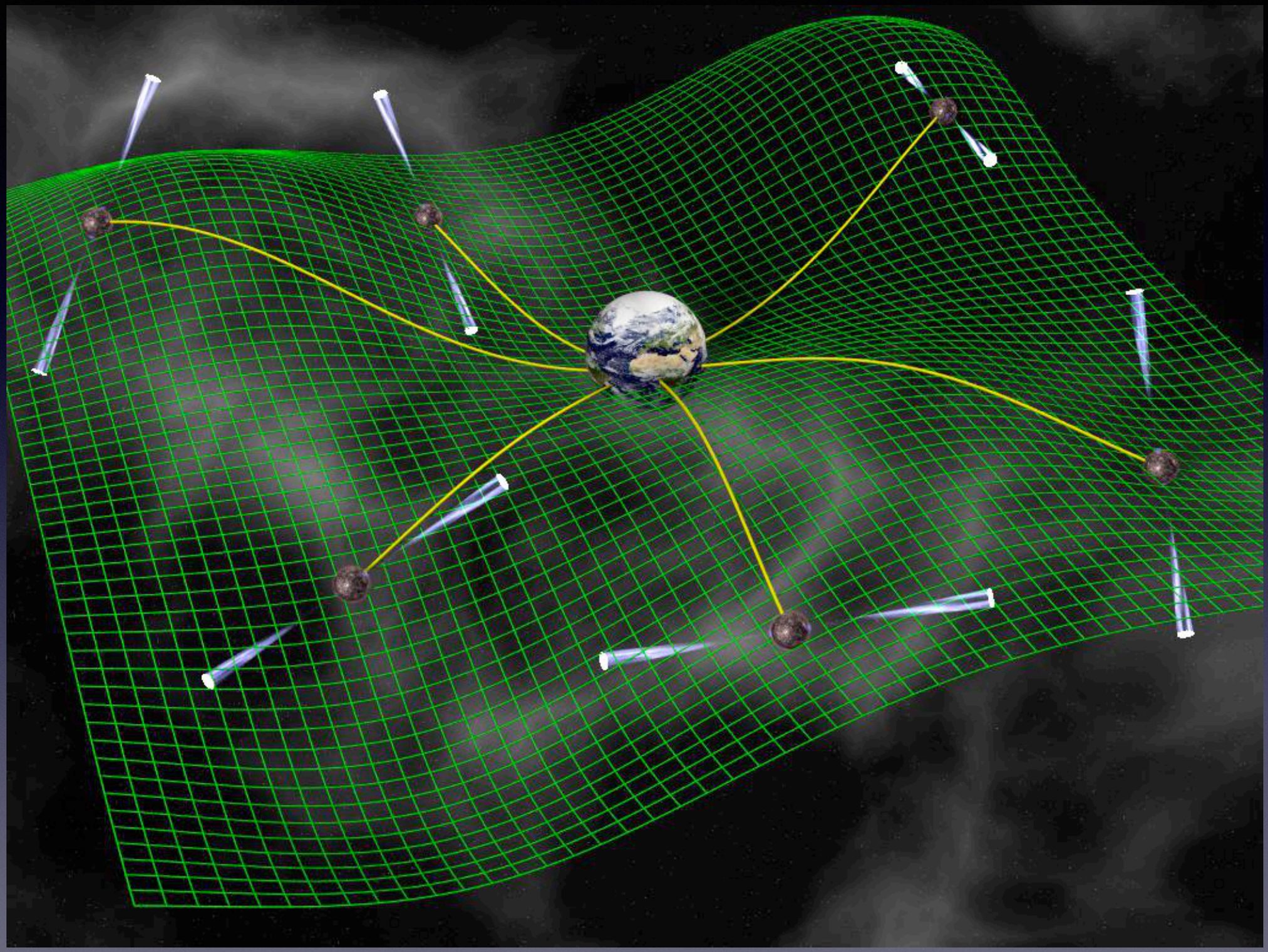
Il peut aussi être responsable du réchauffement à la place de l'inflaton.



Lors de sa désintégration, un PBH émet de la matière noire en abondante quantité et peut expliquer la densité observée.

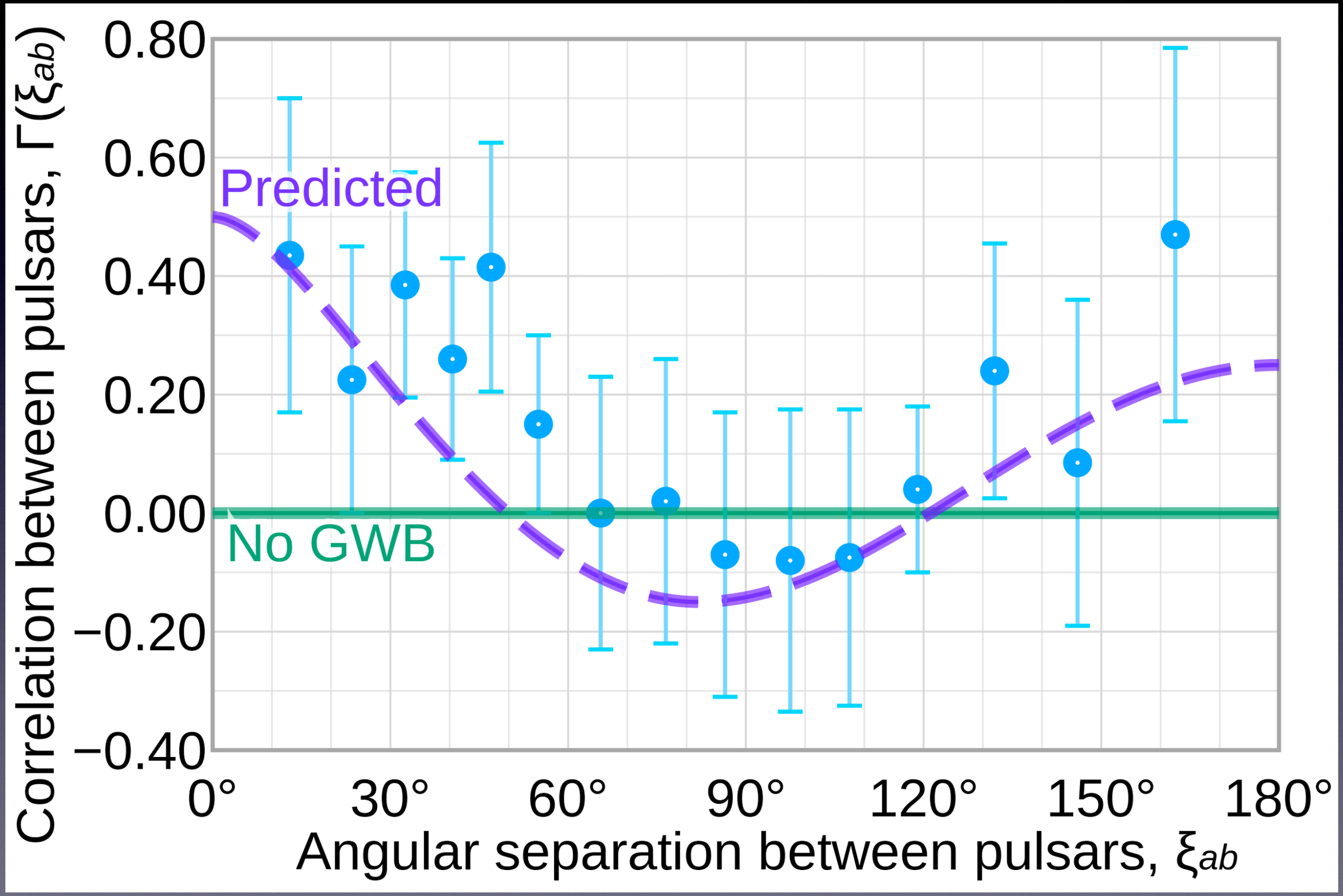
Un PBH émet des ondes gravitationnelles à très haute fréquences, avec une signature typique.

Pulsar Timing Array (PTA)



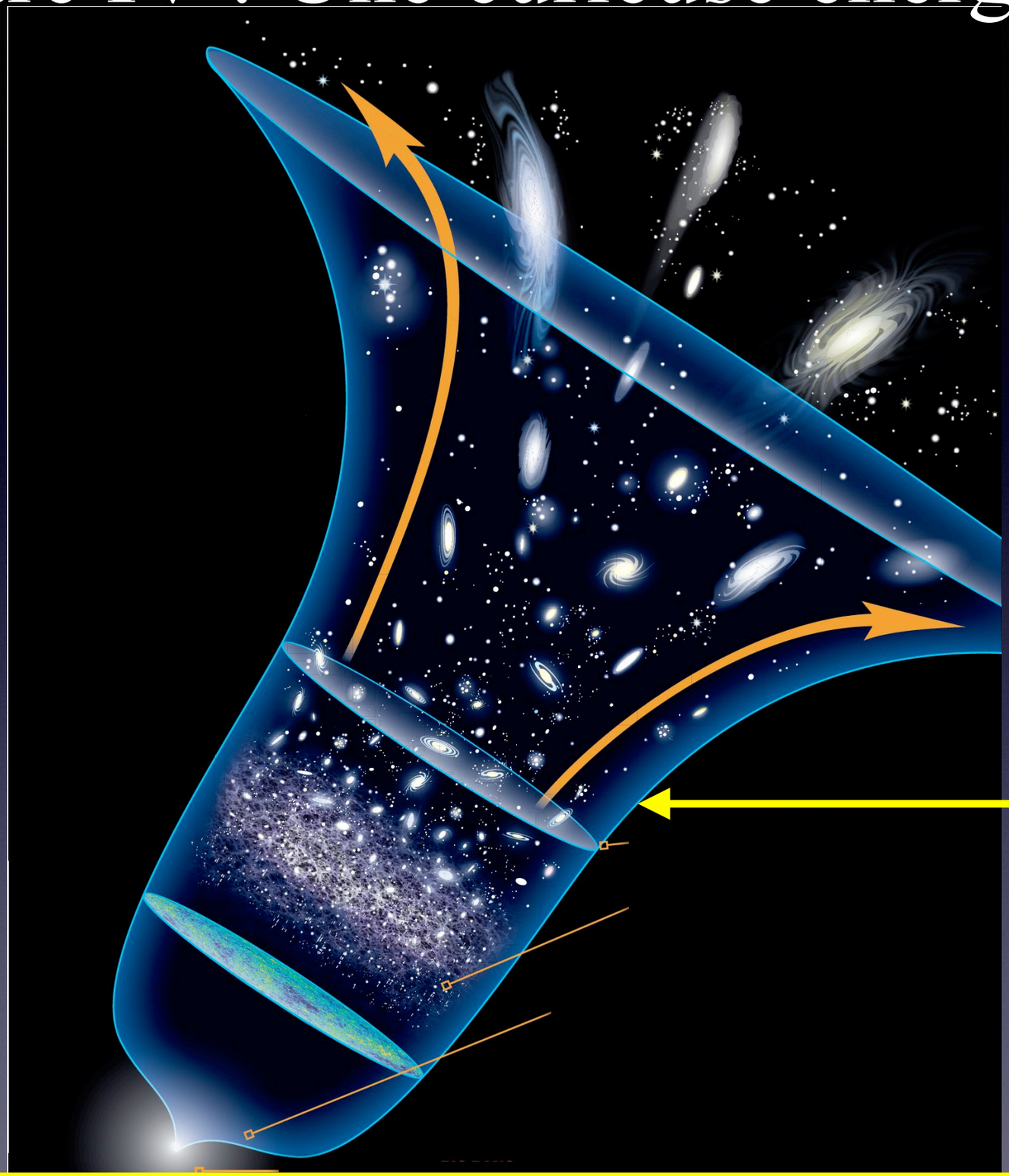
Un détecteur de la taille de la galaxie !

NANOgrav, June 2023



After 15 years of observing 68 millisecond pulsars

Chapitre IV : Une curieuse énergie noire



8 milliards
d'années

Où le spectateur verra que 8 milliards d'années après le Big Bang,
l'Univers est reparti dans une phase d'expansion accélérée

Un nouveau champ avec une densité constante : L’idée de la quintessence Λ

« Cinquième élément qui s'ajoute chez certains philosophes anciens aux quatre premiers (la terre, le feu, l'air, l'eau définis par Empédocle) »

Un nouveau champ avec une densité constante : L’idée de la quintessence Λ

« Cinquième élément qui s'ajoute chez certains philosophes anciens aux quatre premiers (la terre, le feu, l'air, l'eau définis par Empédocle) »



Un nouveau champ avec une densité constante : L'idée de la quintessence Λ

« Cinquième élément qui s'ajoute chez certains philosophes anciens aux quatre premiers (la terre, le feu, l'air, l'eau définis par Empédocle) »



En fait, avant 1998 nous ne connaissions que 2 éléments :

La matière (pas de pression) et le gaz (pression = $\frac{1}{3}$ de la densité d'énergie)



En fait, avant 1998 nous ne connaissions que 2 éléments :

La matière (pas de pression) et le gaz (pression = $\frac{1}{3}$ de la densité d'énergie)

Λ a une pression négative



En fait, avant 1998 nous ne connaissions que 2 éléments :

La matière (pas de pression) et le gaz (pression = $\frac{1}{3}$ de la densité d'énergie)

Λ a une pression négative

Introduite en 1917 par Einstein : $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\mathcal{R}g_{\mu\nu} = \frac{T^m_{\mu\nu} + T^g_{\mu\nu}}{M_P^2} + \Lambda g_{\mu\nu}$



Pour un gaz

(Pression = $\frac{1}{3}$ densité d'énergie)



Pour un gaz

(Pression = $\frac{1}{3}$ densité d'énergie)





Pour un gaz

(Pression = $\frac{1}{3}$ densité d'énergie)



Pour Λ

(Pression = – densité d'énergie)



Pour Λ

(Pression = – densité d'énergie)



Pour

(Pression

Equation du mouvement : $R(t) = R_0 e^{H_\Lambda t}$

Pour Λ

(Pression = – densité d'énergie)

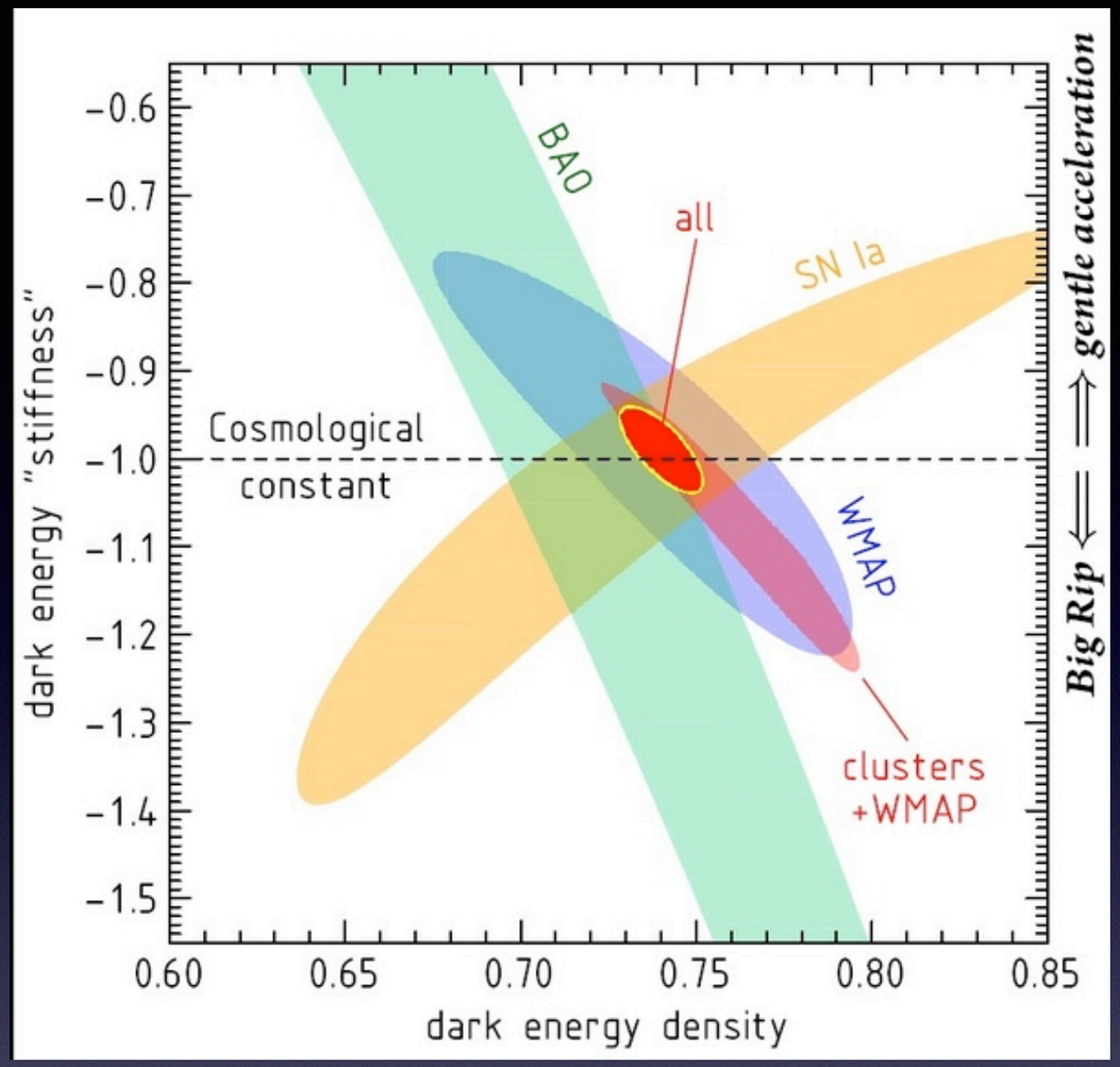


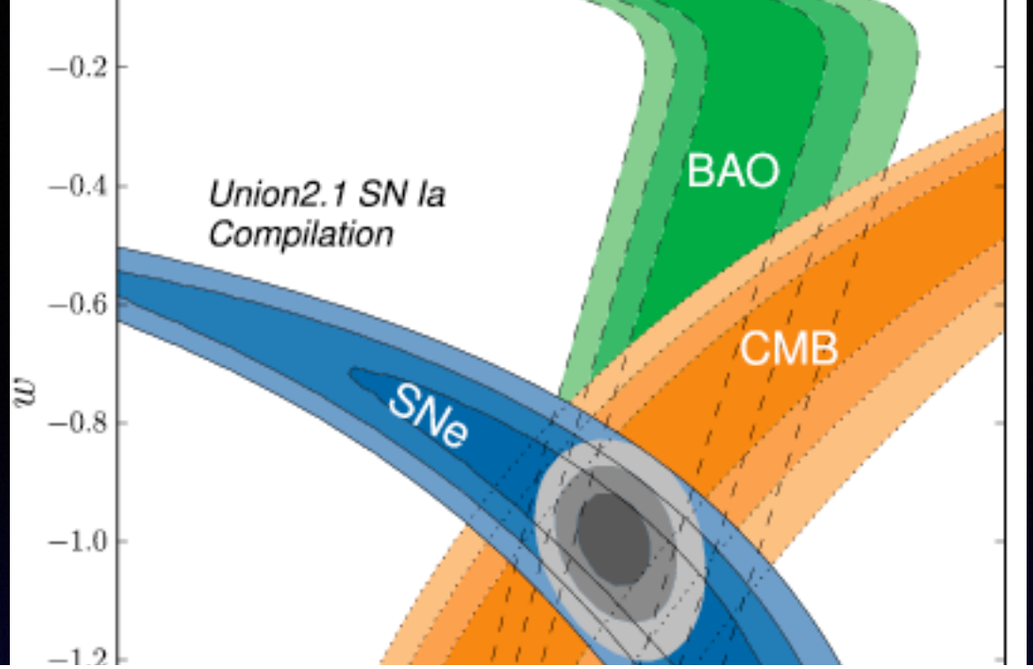


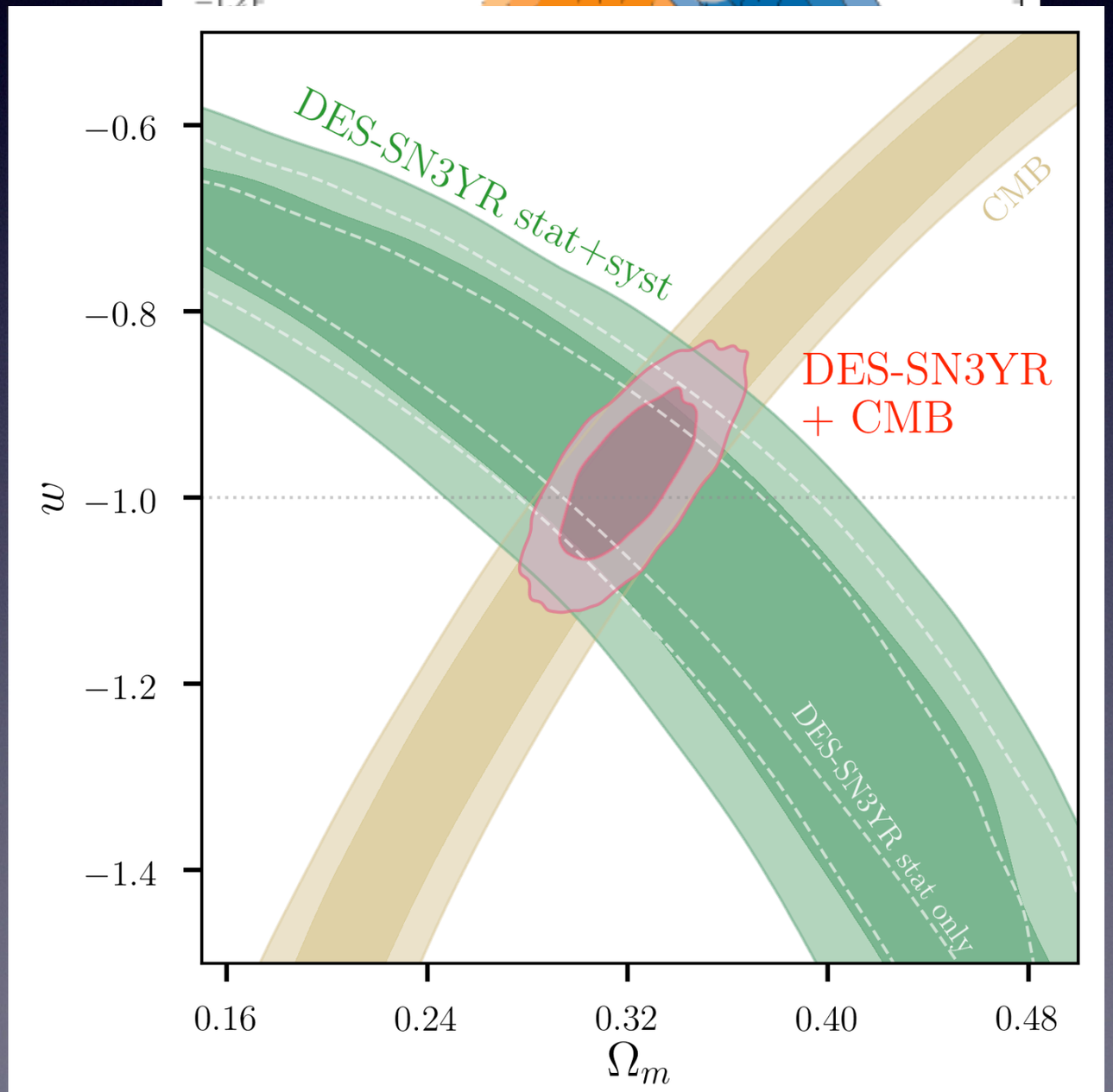
ρ_Λ = constante

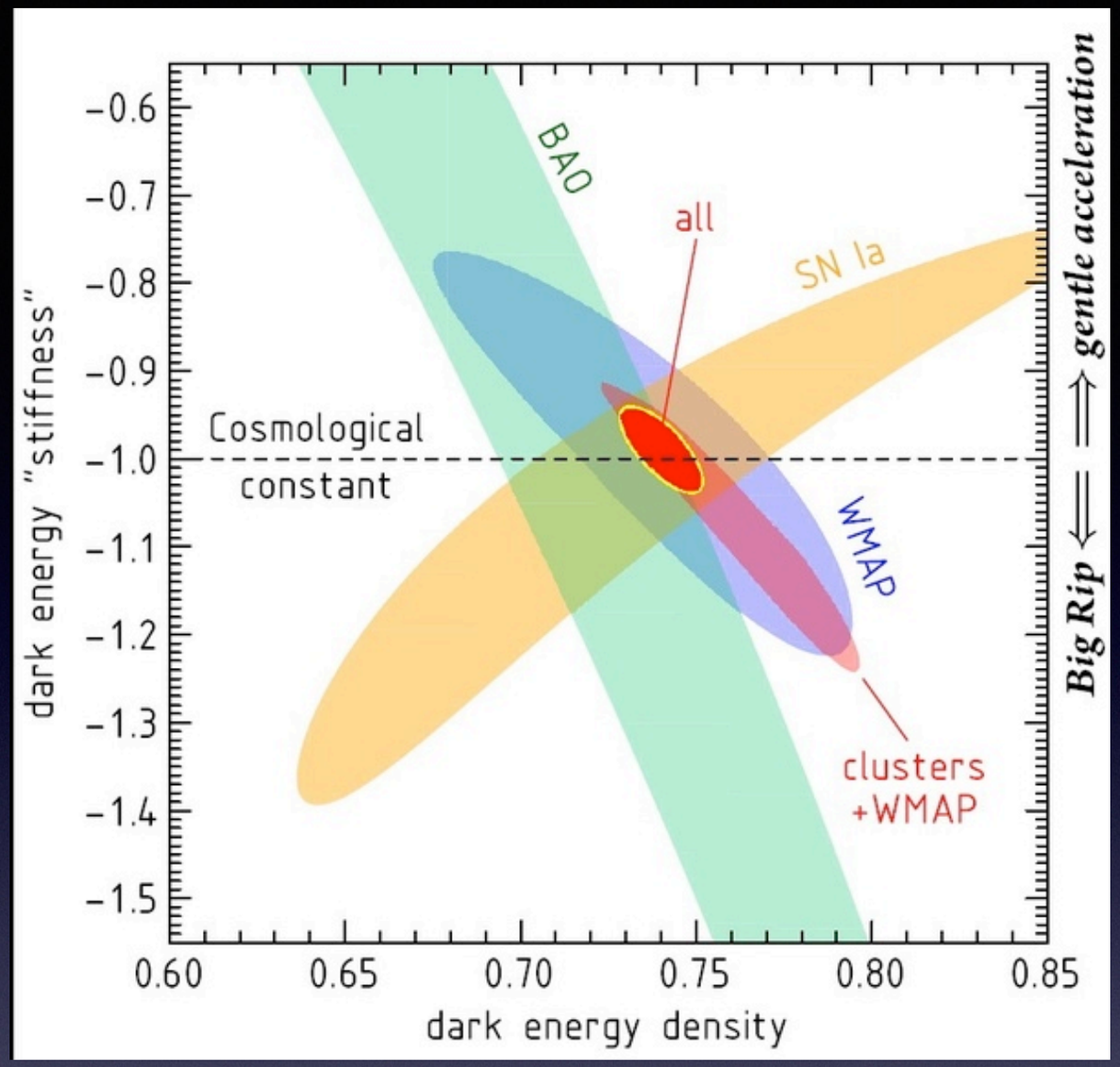
$\Rightarrow 2\times$ plus d' énergie

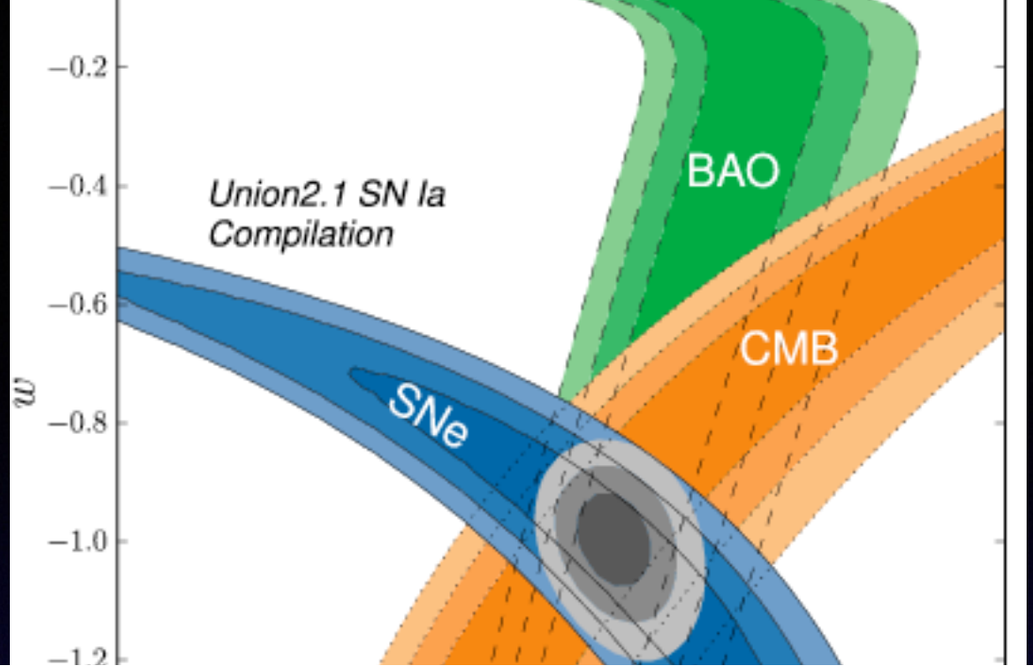
$(E_\Lambda = \rho_\Lambda \times V)$


BAO
all
SN Ia
Cosmological
constant
WMAP
clusters
+WMAP
Big Rip ⟸ ⟹ gentle acceleration
dark energy "stiffness"
dark energy density
−0.6
−0.7
−0.8
−0.9
−1.0
−1.1
−1.2
−1.3
−1.4
−1.5
0.60
0.65
0.70
0.75
0.80
0.85

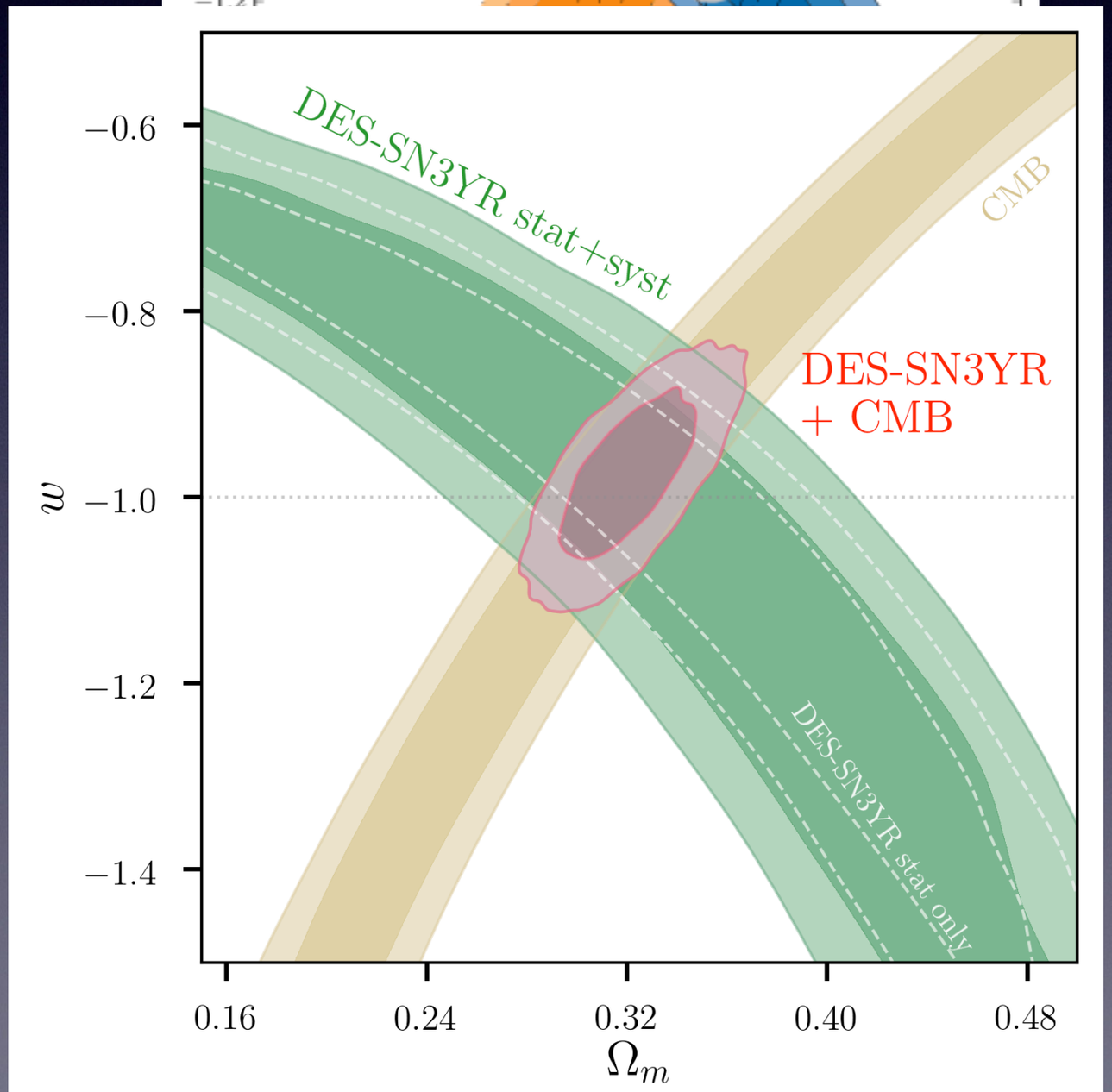

Union2.1 SN Ia
Compilation
BAO
CMB
SNe
w
−0.2
−0.4
−0.6
−0.8
−1.0
−1.2


DES-SN3YR stat+syst
CMB
DES-SN3YR
+ CMB
DES-SN3YR stat only
w
−0.6
−0.8
−1.0
−1.2
−1.4
0.16
0.24
0.32
0.40
0.48
Ω_m



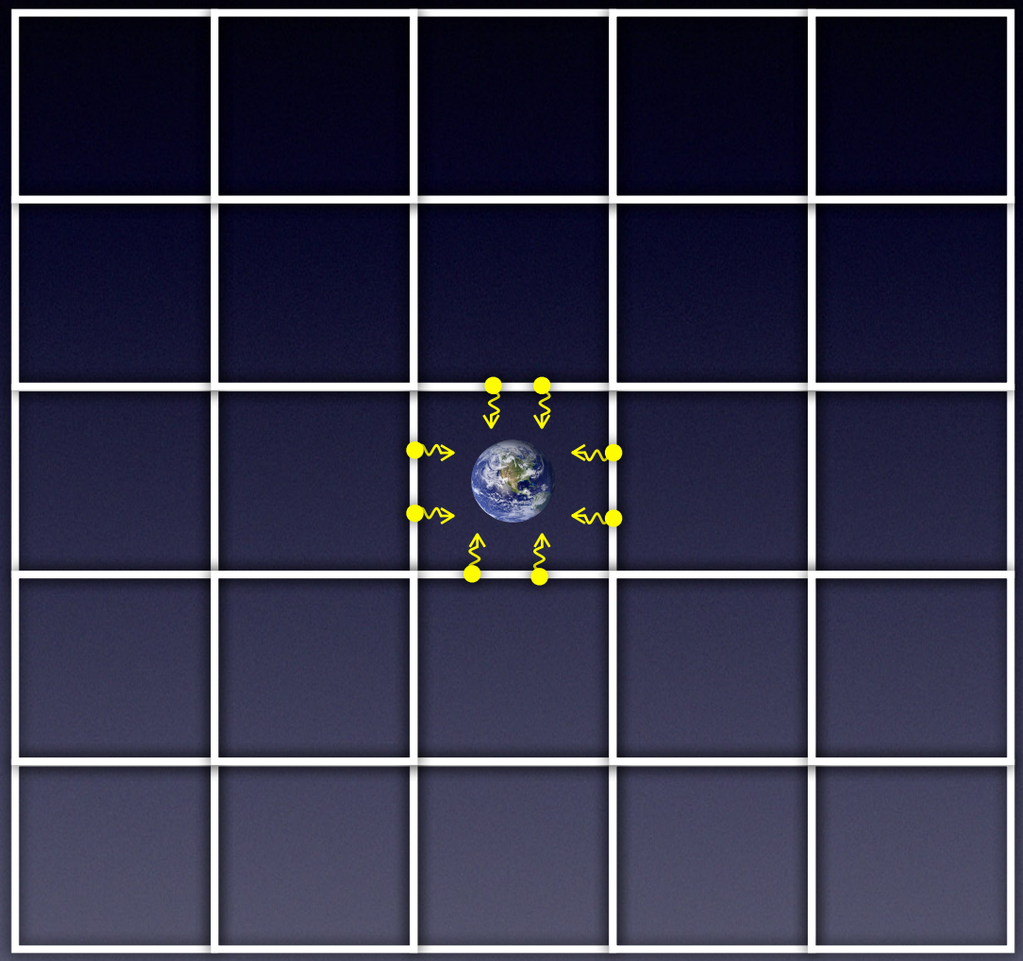


« Lunch for free »



FAQ :

L’énergie est-elle conservée dans un univers en expansion?



FAQ :

L’énergie est-elle conservée dans un univers en expansion?



FAQ :

L’énergie est-elle conservée dans un univers en expansion?



Indice : quel « temps » utiliser pour définir une fréquence ?

13,8 billion years after the Big Bang



13,8 billion years after the Big Bang

















13,8 billion years after the B

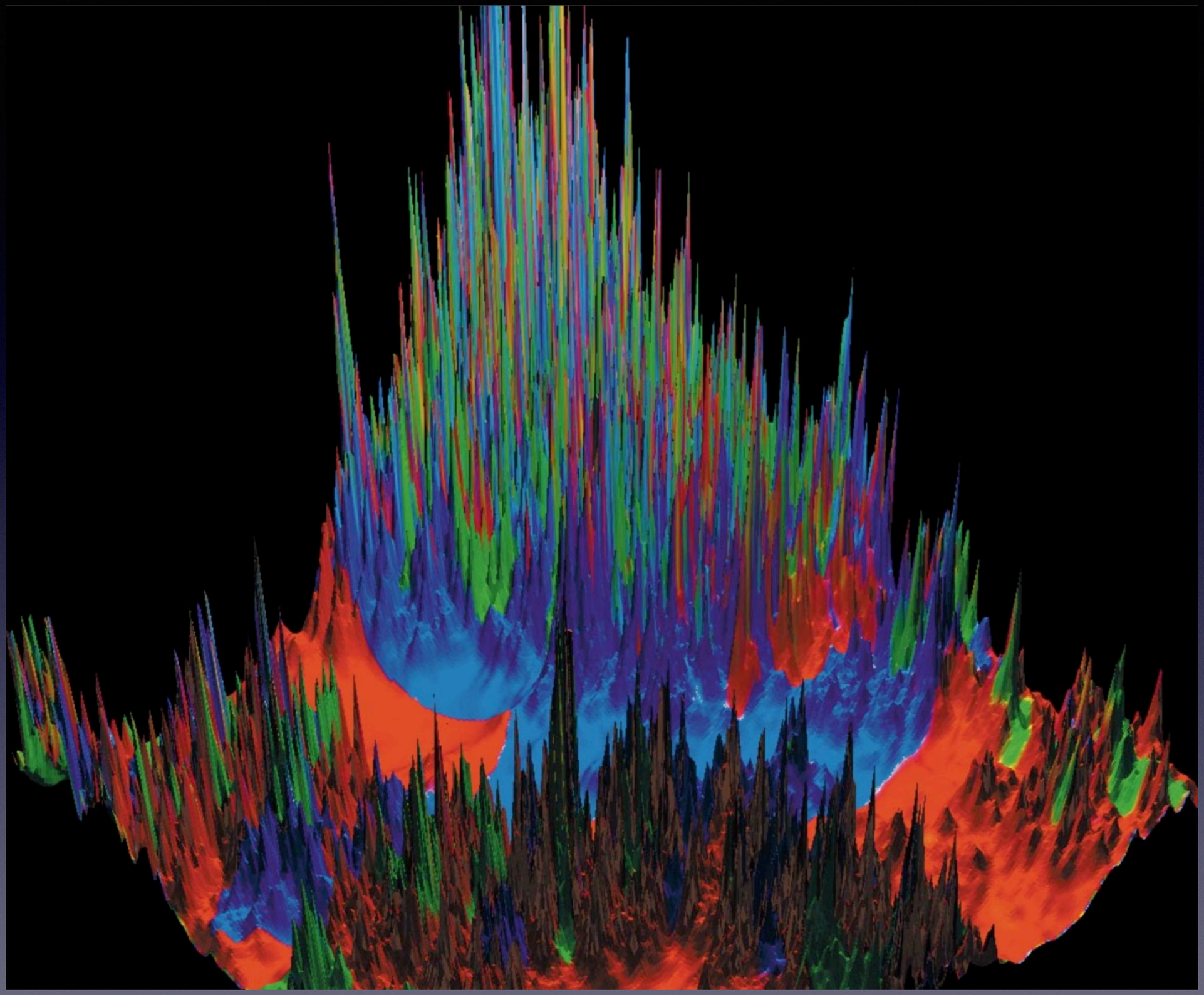




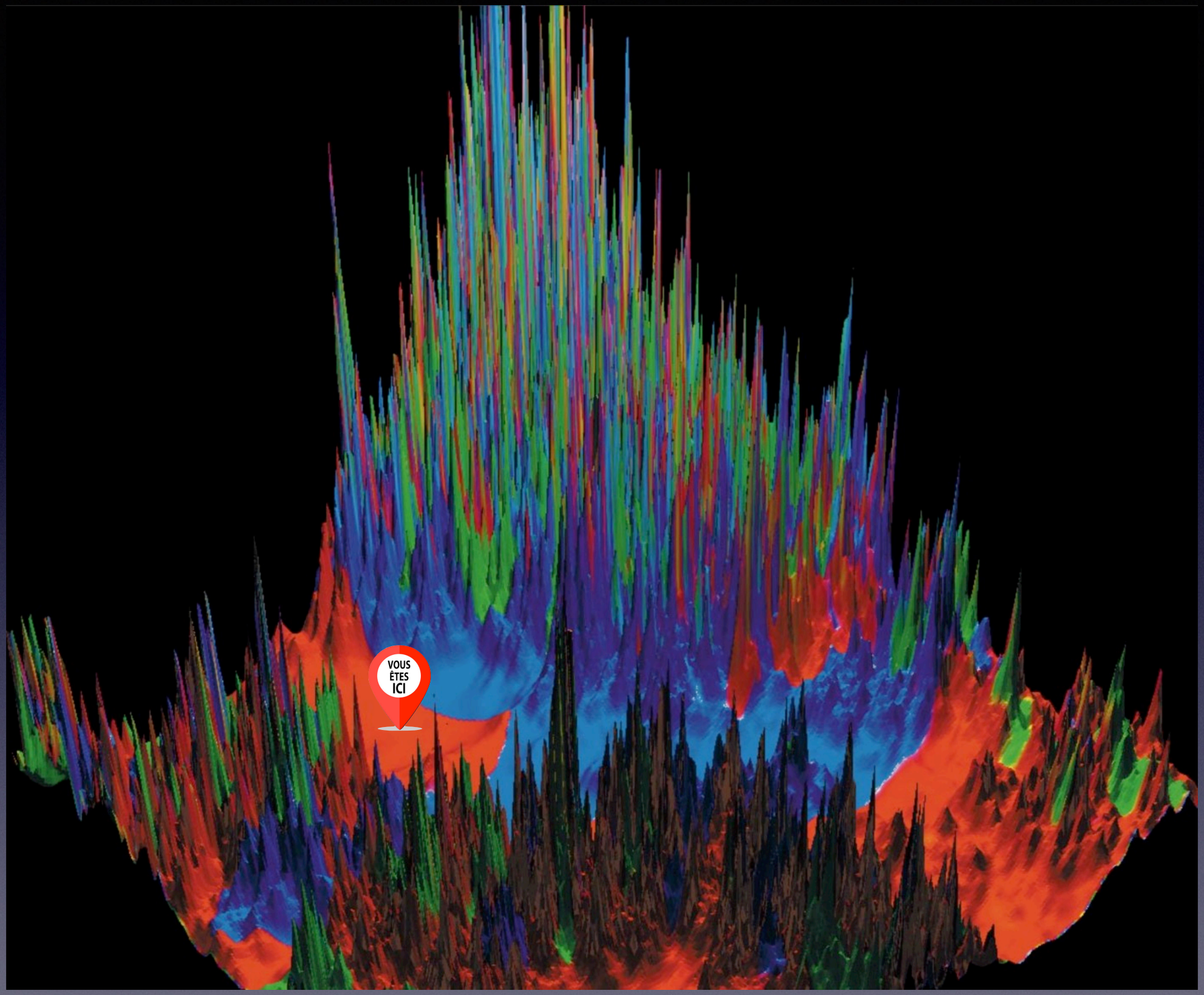
Distance parcourue par la lumière
depuis le Big Bang



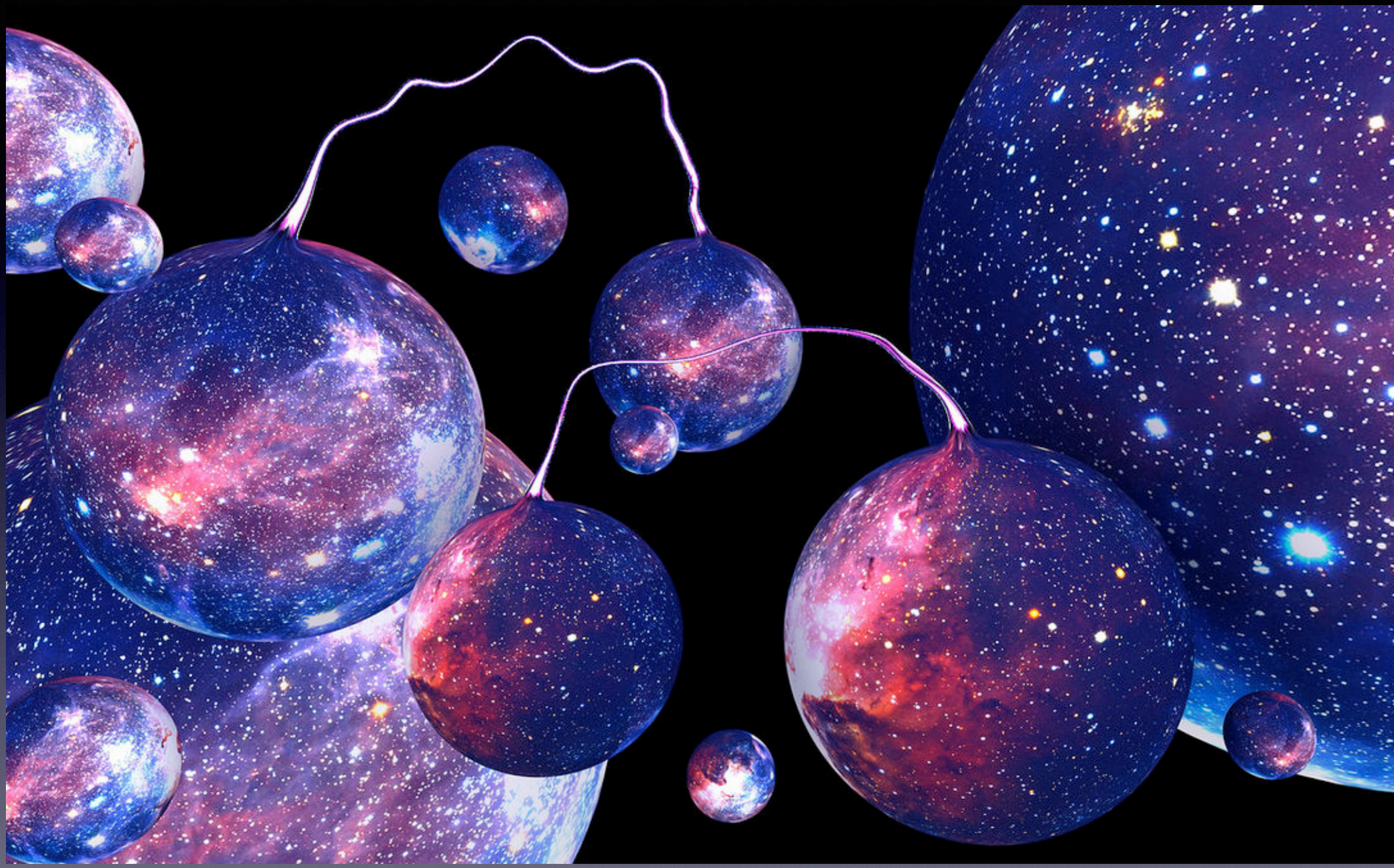




Simulation de notre multivers (A. Linde, 2019)



Simulation de notre multivers (A. Linde, 2019)



Simulation de notre multivers (A. Linde, 2019)

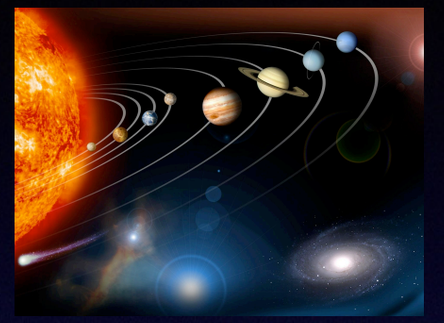
-300
Erathostène
10^4 kilomètres





1609
Galilée
10^9 kilomètres



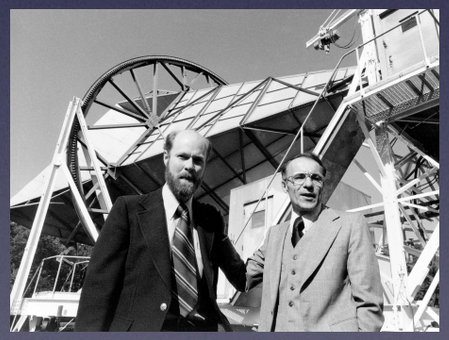


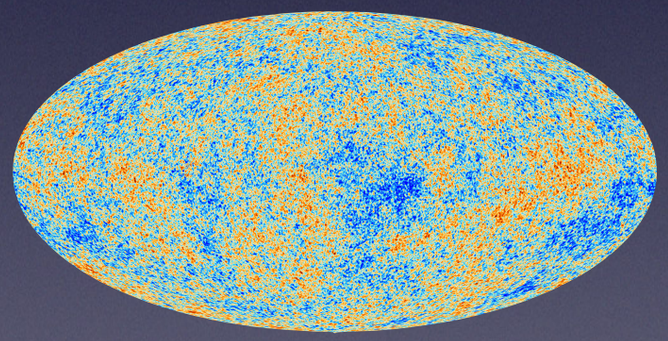
1924
Edwin Hubble
10^{19} kilomètres



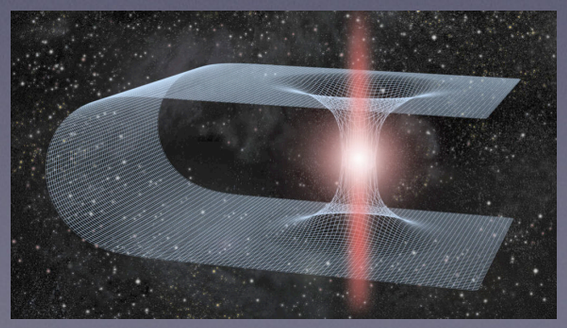


1965
Penzias et Wilson
10^{23} kilomètres

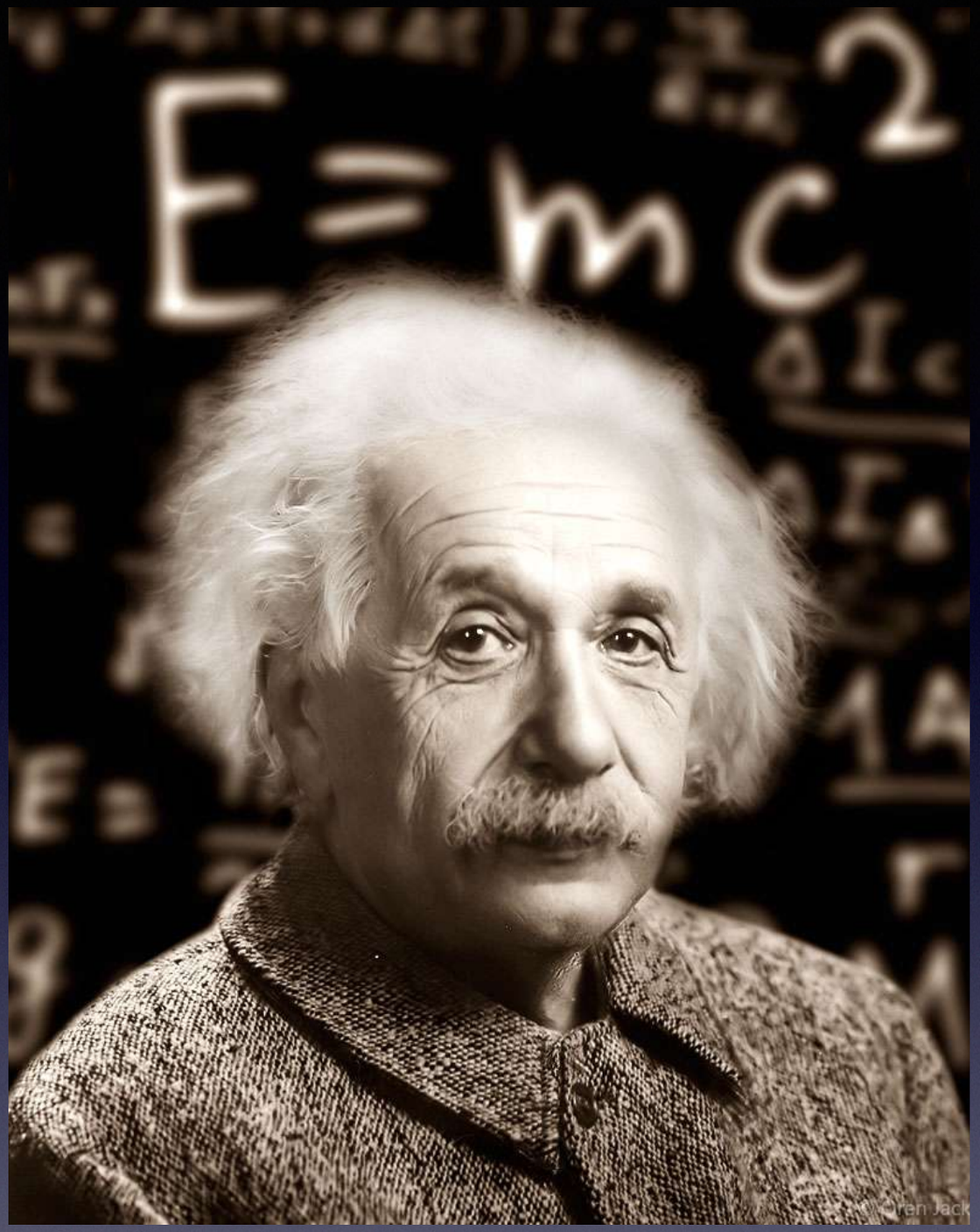




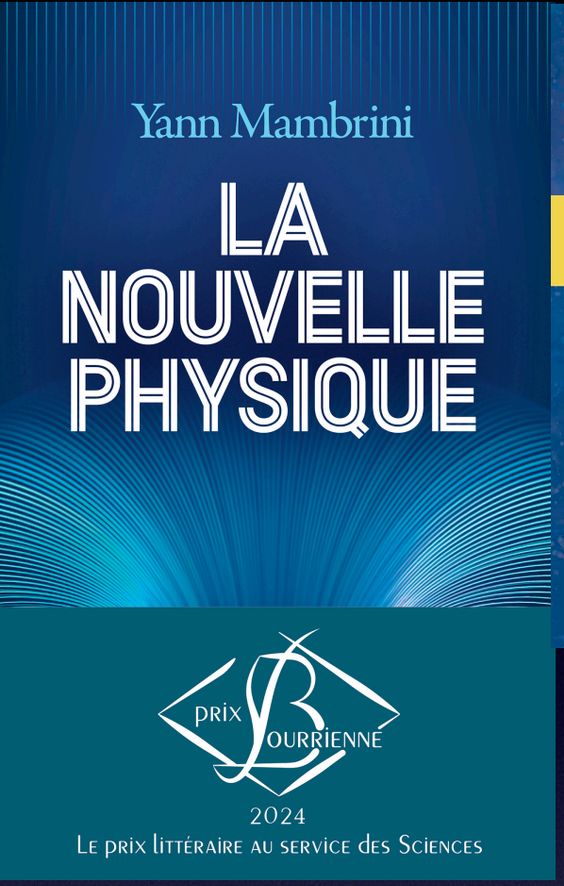
2065
???
10^{39} kilomètres

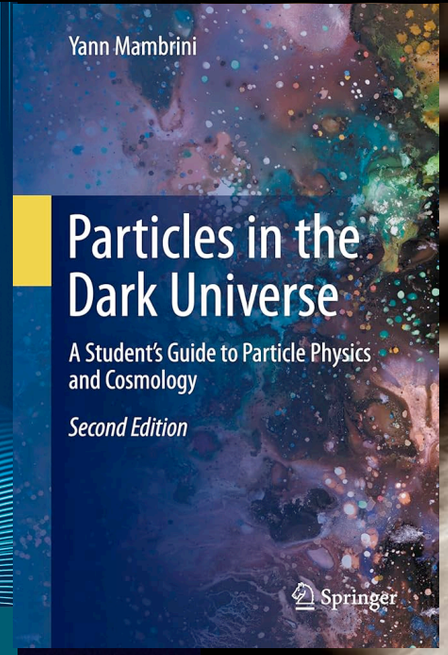


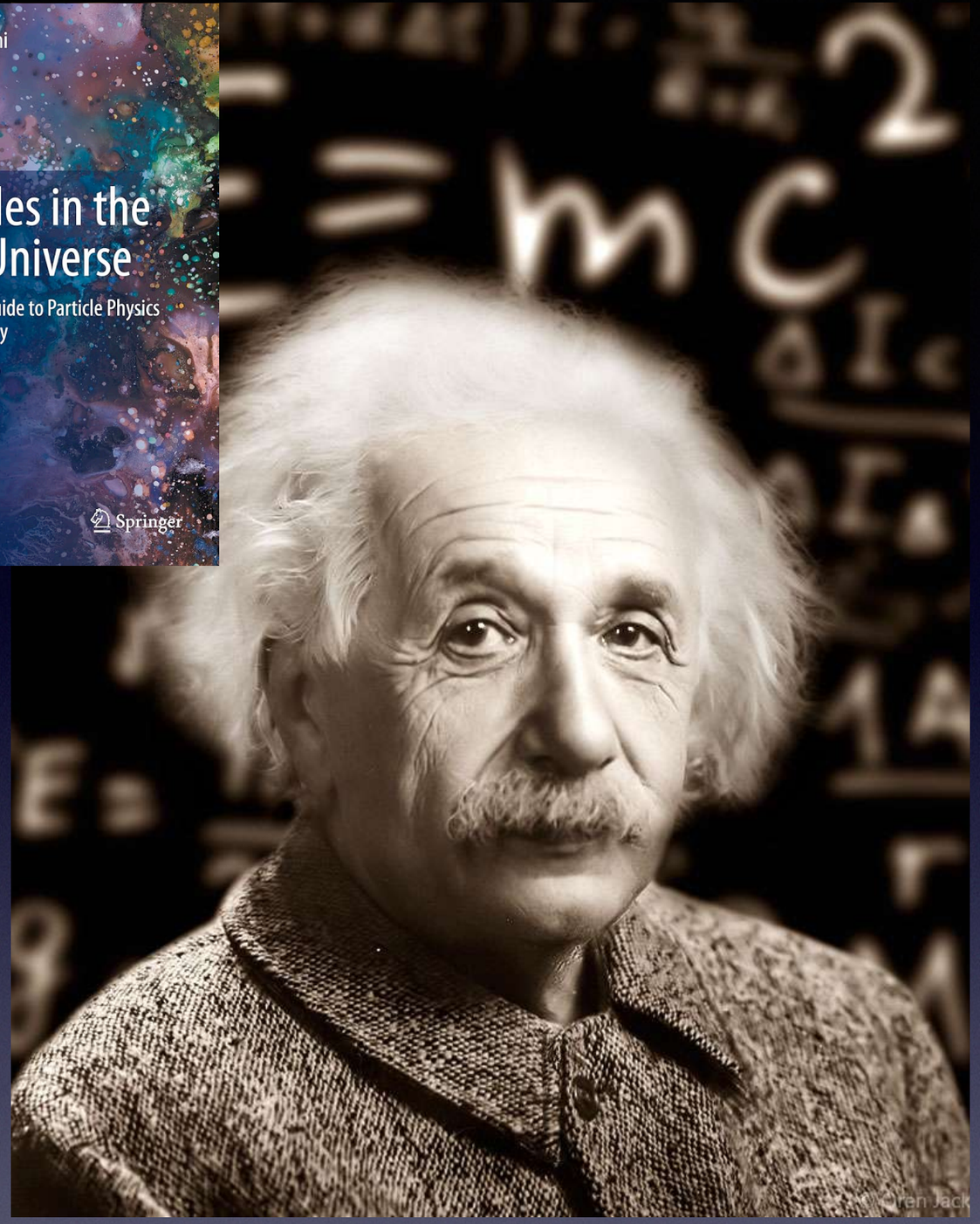


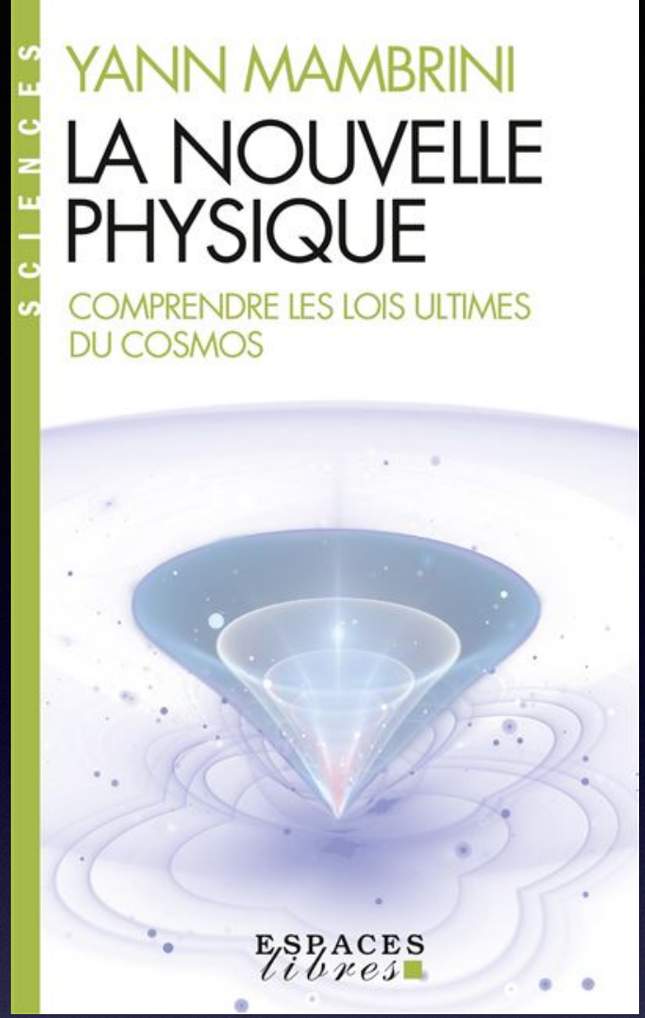


“Sans aucun doute, le plus beau miracle de l’Univers est qu’un être fragile, issu d’une infime fluctuation quantique du vide, qui a évolué suivant le second principe de la thermodynamique, est capable de comprendre ce même Univers dont il est issu. »









"Sans aucun doute, le plus beau miracle de l'Univers est qu'un être fragile, issu d'une infime fluctuation quantique du vide, qui a évolué suivant le second principe de la thermodynamique, est capable de comprendre ce même Univers dont il est issu. »