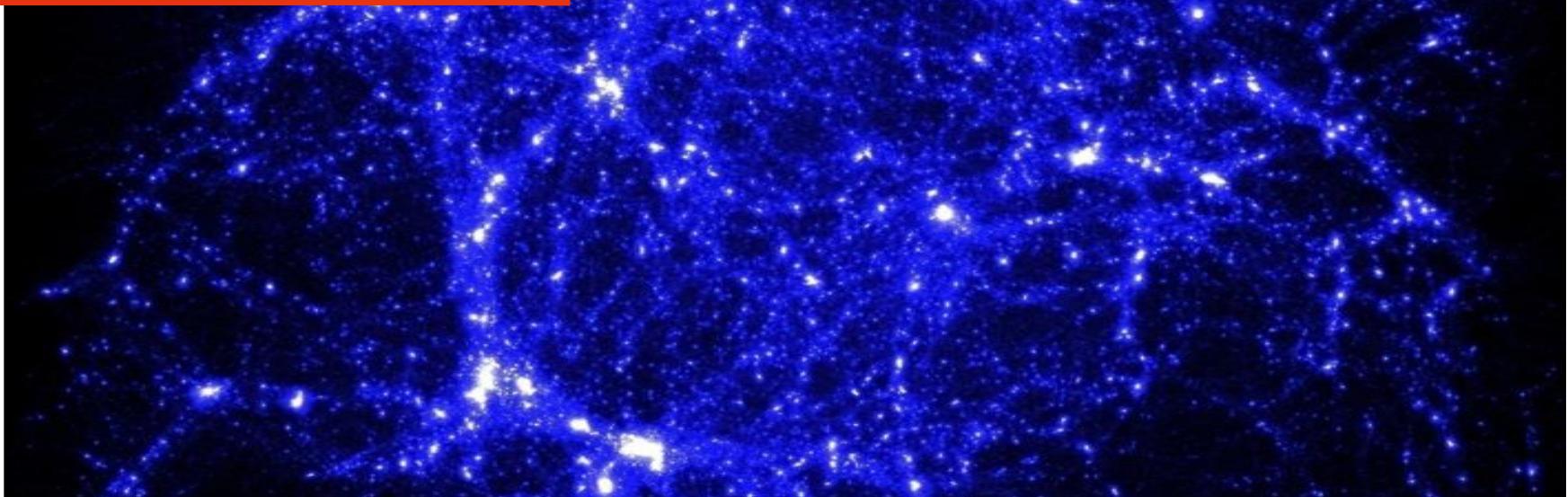


Inria

Big Bang Numérique

Bruno Lévy



01

Des forêts de symboles...



inria

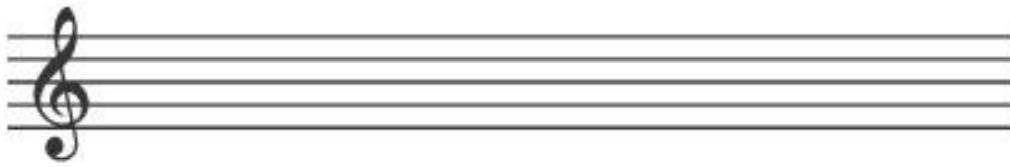


Quiz: D'où vient le nom des notes de musique ?

inria



La musique: un langage pour parler - du temps





La musique: un langage pour parler

- du temps
- du rythme

A musical score titled "Var. III" in 12/32 time. It features three staves, each consisting of two measures of 32nd notes. The notes are grouped by vertical bar lines. Below each measure, there are three groups of three, indicating a triplets grouping. The notes are mostly eighth-note equivalents, though some are smaller. The first measure starts with a single eighth note, followed by two pairs of eighth-note triplets. The second measure starts with a pair of eighth-note triplets, followed by two pairs of eighth-note triplets.



La musique: un langage pour parler

- du temps
- du rythme
- de la hauteur des sons



SOL, fa, mi, ré, do, si,



**Ut queant laxi,
Resonare fibris,
Mira gestorum,
Famuli tuorum,
Solve polluti,
Labii reatum.**



**Ut queant laxi,
Resonare fibris,
Mira gestorum,
Famuli tuorum,
Solve polluti,
Labii reatum.**

Afin que tes serviteurs
Puissent chanter
à gorge déployée
Tes accomplissements merveilleux
Ote le péché
De leurs lèvres souillées
Saint Jean.

light F to F' :

line at P makes equal \angle s to
 $F + FP$, then it is tangent to
ellipse
 $\therefore Q$ lies outside
(or on, or P) the ellipse

$$FP + F'P = FP + GP = FG'$$

$$FQ + F'Q = FQ + G'Q > FG'$$

$\therefore Q$ lies outside
(or on, or P) the ellipse

center

(a) + (b), then (c)

ce toward Sun

\therefore Force as $1/r^2$

l times are
inversely as the

SPECIAL LECTURE

THE MOTION OF PLANETS AROUND THE SUN

R.P.FEYNMAN

$$\frac{3}{R^2}$$

$$\beta = GM$$

$$\beta = \frac{2e^2}{m}$$



$\alpha = \text{Area swept}/\text{sec}$

$$R^2 \Delta \theta / \alpha = \Delta t$$

$$\Delta V = \frac{\beta}{R^2} (\Delta t) = \frac{\beta}{R^2} R^2 \frac{\Delta \theta}{\alpha} = \frac{\beta}{\alpha} \Delta \theta = V_\infty \Delta \theta$$

$$V_R = \alpha$$

$$b = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha} \tan \frac{\theta}{2}}$$

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{V_R}{V_\infty} = \frac{\beta}{\alpha V_\infty} = \frac{\beta}{b V_\infty}$$

X-sect area for deflection $> \theta$

$$\omega \pi b^2 \text{ or } \frac{\pi \beta^2}{V_\infty^2 \tan^2 \frac{\theta}{2}}$$



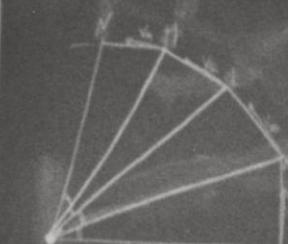
$$\beta = \frac{2e^2}{m}$$



EQUAL ANGLES

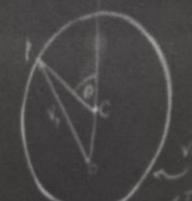
Equal angles mean areas proportional
" " time

Equal changes in velocity in time proportional
to equal changes in velocity is equal $\frac{1}{2}$

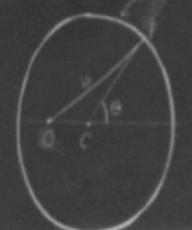


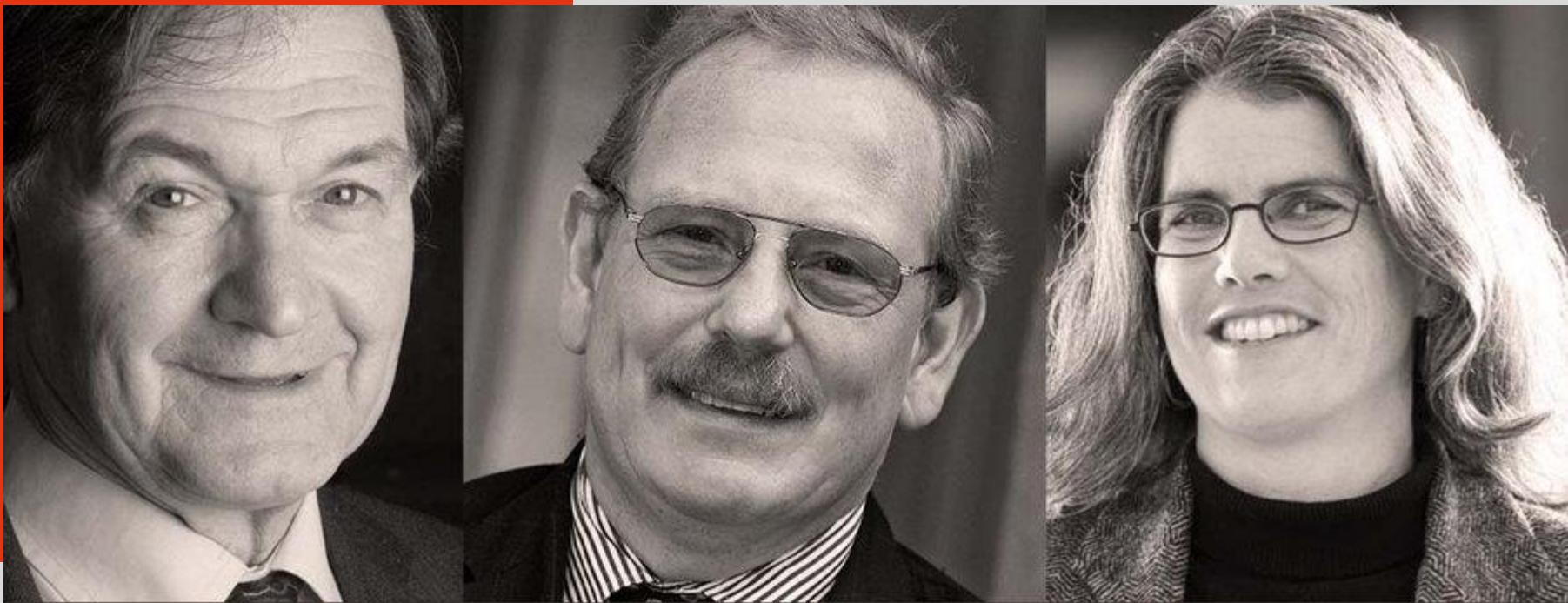
SPACE DIAGRAM

VELOCITY

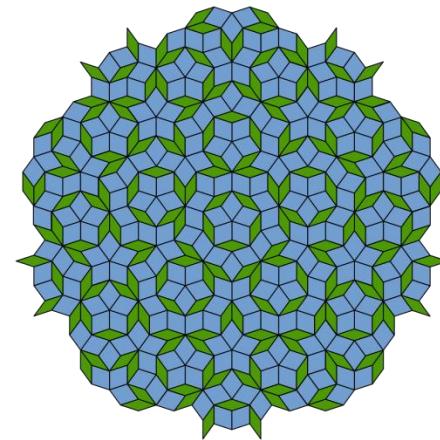


$d\theta$
deflection
in dP





Prix Nobel de physique 2020
Roger Penrose
Andrea Ghez
Reinhard Genzel



Quiz: Quelle est la plus haute distinction sci. française ?
C'est quoi le petit dessin à droite (et qu'est-ce qu'il fait là)?

inria



La physique: un langage pour parler ...

Quiz: Qui a inventé le langage de la physique ?

inria



La physique: un langage pour parler - du temps



La physique: un langage pour parler

- du temps
- de la matière



La physique: un langage pour parler

- du temps
 - de la matière
 - de l'énergie



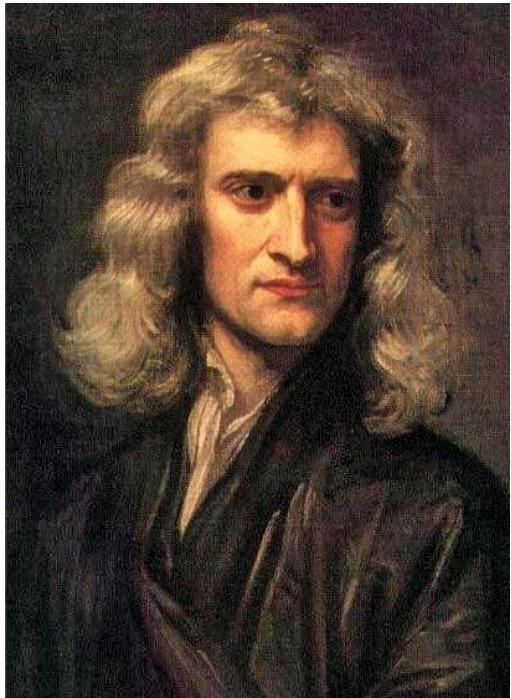
La physique: un langage pour parler

- du temps
- de la matière
- de l'énergie
- de la lumière



La physique: un langage pour parler

- du temps
- de la matière
- de l'énergie
- de la lumière
- des forces...

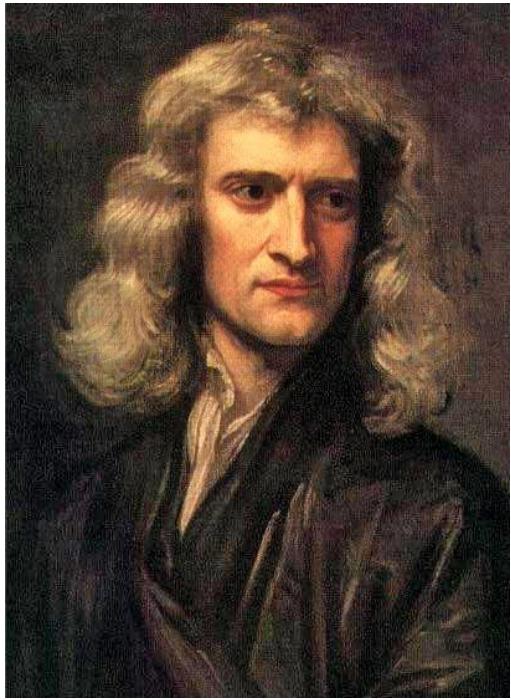


Isaac Newton
1623-1727

1687
Principia Mathematica

Newton et ses trois lois



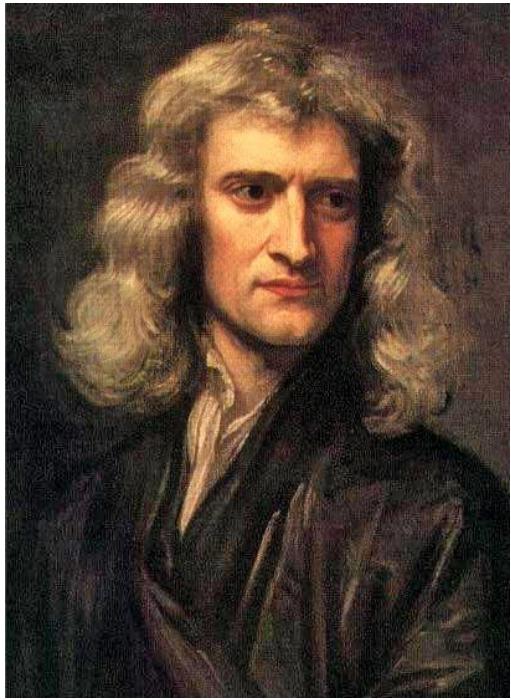


Isaac Newton
1623-1727

1687
Principia Mathematica

Newton et ses trois lois

Loi N° 1: Si on fait rien, on continue tout droit avec la même vitesse



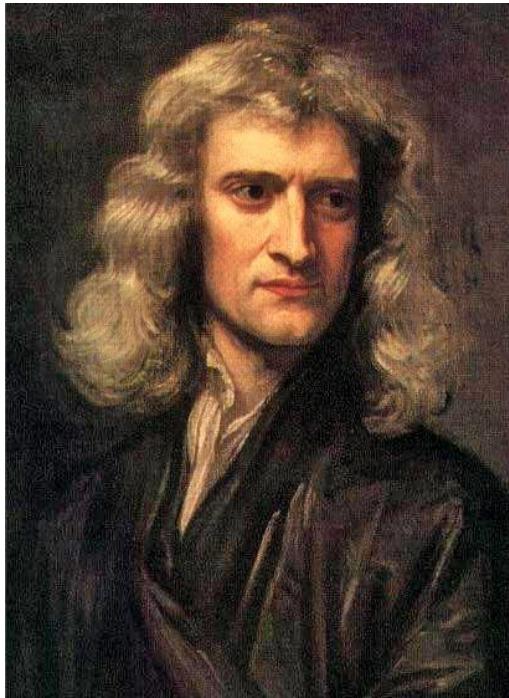
Isaac Newton
1623-1727

1687
Principia Mathematica

Newton et ses trois lois

Loi N° 1: Si on fait rien, on continue tout droit avec la même vitesse





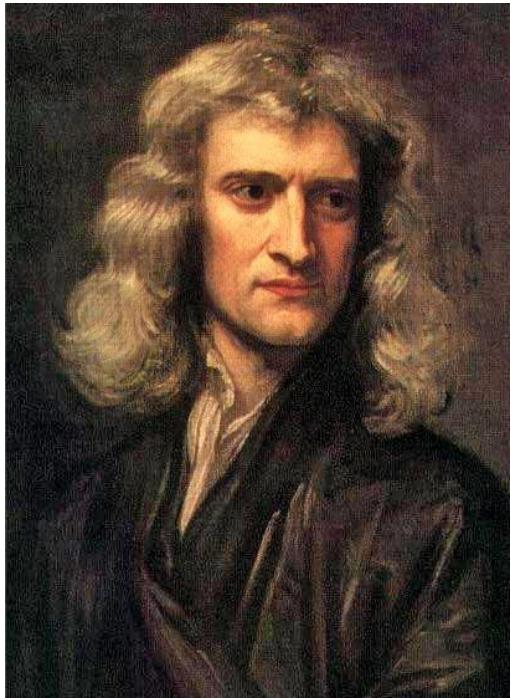
Isaac Newton
1623-1727

1687
Principia Mathematica

Newton et ses trois lois

Loi N° 1: Si on fait rien, on continue tout droit avec la même vitesse

Loi N° 2: Changement de vitesse = Force / Masse



Isaac Newton
1623-1727

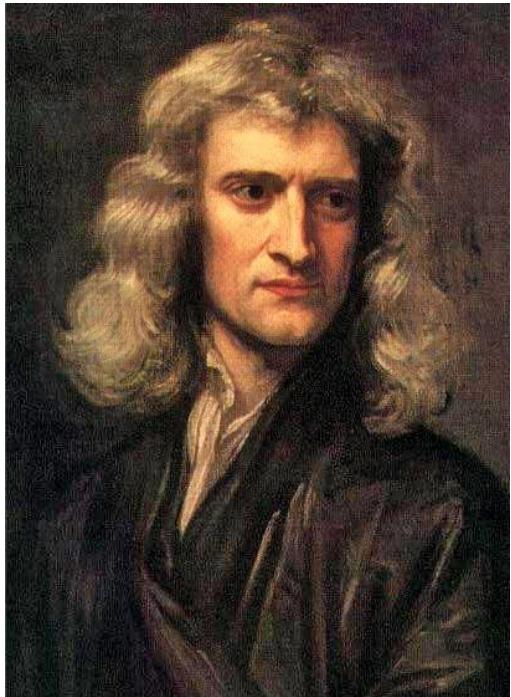
1687
Principia Mathematica

Newton et ses trois lois

Loi N° 1: Si on fait rien, on continue tout droit avec la même vitesse

Loi N° 2: Changement de vitesse = Force / Masse

Loi N° 3: Si A exerce une force sur B, alors B exerce la même force sur A (mais dans l'autre sens)



Isaac Newton
1623-1727

1687
Principia Mathematica

Newton et ses trois lois

Loi N° 1: Si on fait rien, on continue tout droit avec la même vitesse

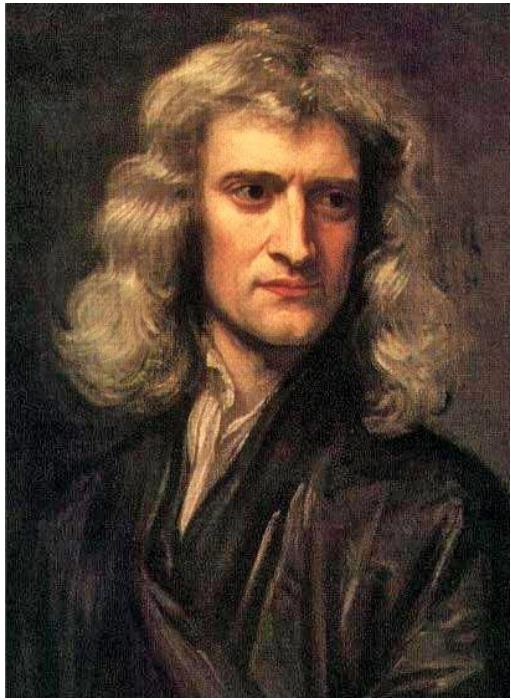
Loi N° 2: Changement de vitesse = Force / Masse

Loi N° 3: Si A exerce une force sur B, alors B exerce la même force sur A (mais dans l'autre sens)

Et surtout:

Le langage mathématique pour dire tout ça:

- Dérivées par rapport au temps
vitesse, accélération
- Dérivées par rapport à l'espace
pente



Isaac Newton
1623-1727

1687
Principia Mathematica

Newton et ses trois lois

Loi N° 1: Si on fait rien, on continue tout droit avec la même vitesse

Loi N° 2: Changement de vitesse = Force / Masse

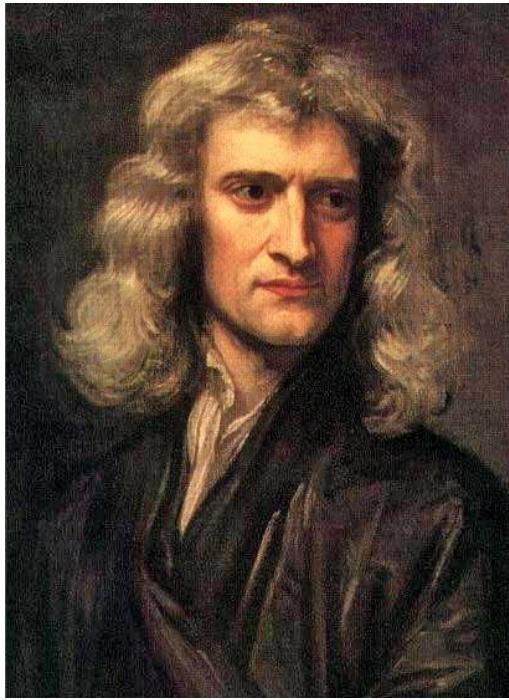
Loi N° 3: Si A exerce une force sur B, alors B exerce la même force sur A (mais dans l'autre sens)

Et surtout:

Le langage mathématique pour dire tout ça:

- Dérivées par rapport au temps
vitesse, acceleration
- Dérivées par rapport à l'espace
pente

Et aussi / et **surtout:** vérifier par des **expériences !!**
Regarder, observer...



Isaac Newton
1623-1727

1687
Principia Mathematica

Newton et ses trois lois

Loi N° 1: Si on fait rien, on continue tout droit avec la même vitesse

Loi N° 2: Changement de vitesse = Force / Masse

Loi N° 3: Si A exerce une force sur B, alors B exerce la même force sur A (mais dans l'autre sens)

Et surtout:

Le langage mathématique pour dire tout ça:

- Dérivées par rapport au temps
vitesse, acceleration
- Dérivées par rapport à l'espace
pente

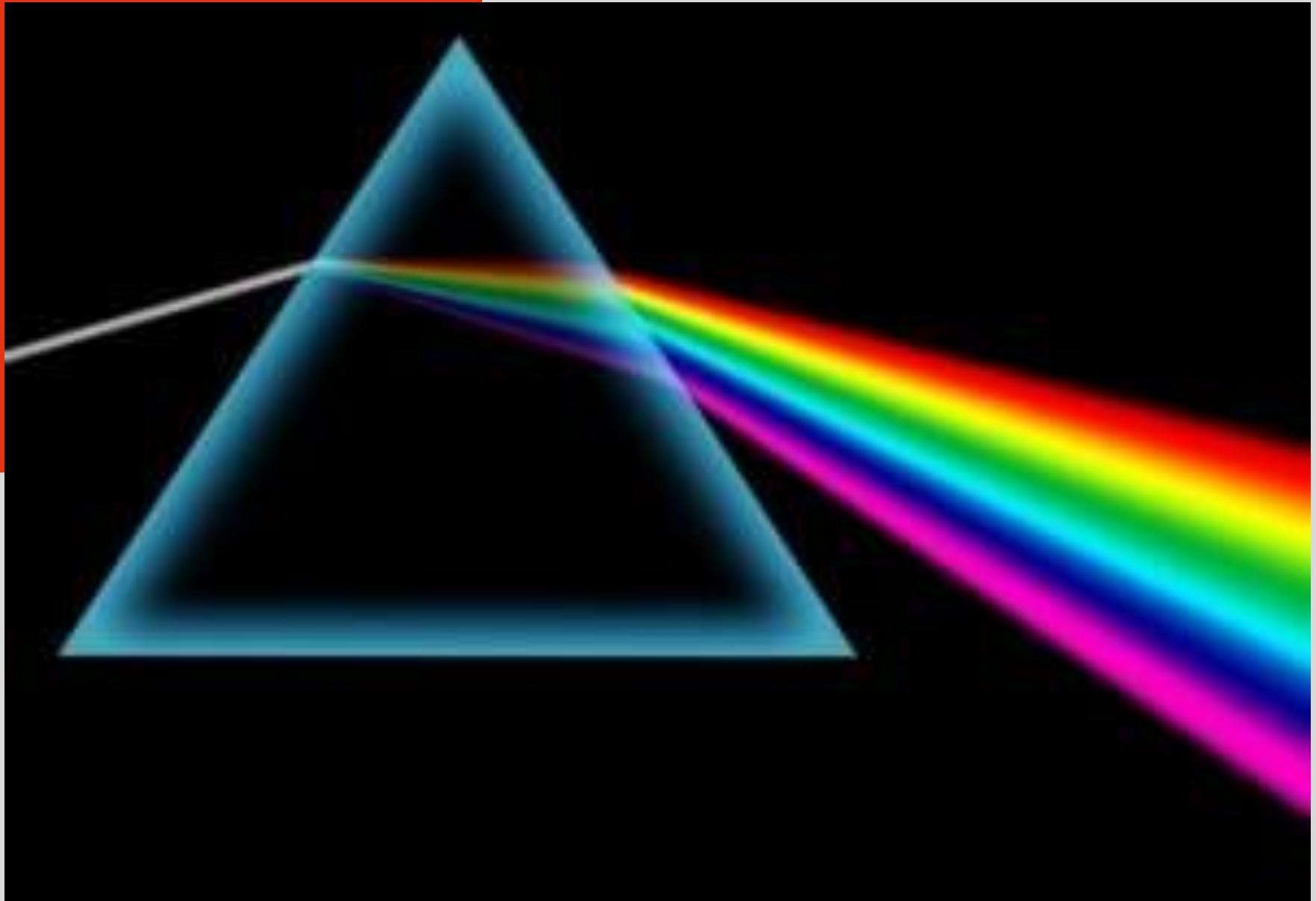
Et aussi / et **surtout**: vérifier par des **expériences** !!

Regarder, observer...

Quiz: Quelle est l'étoile la plus proche ?

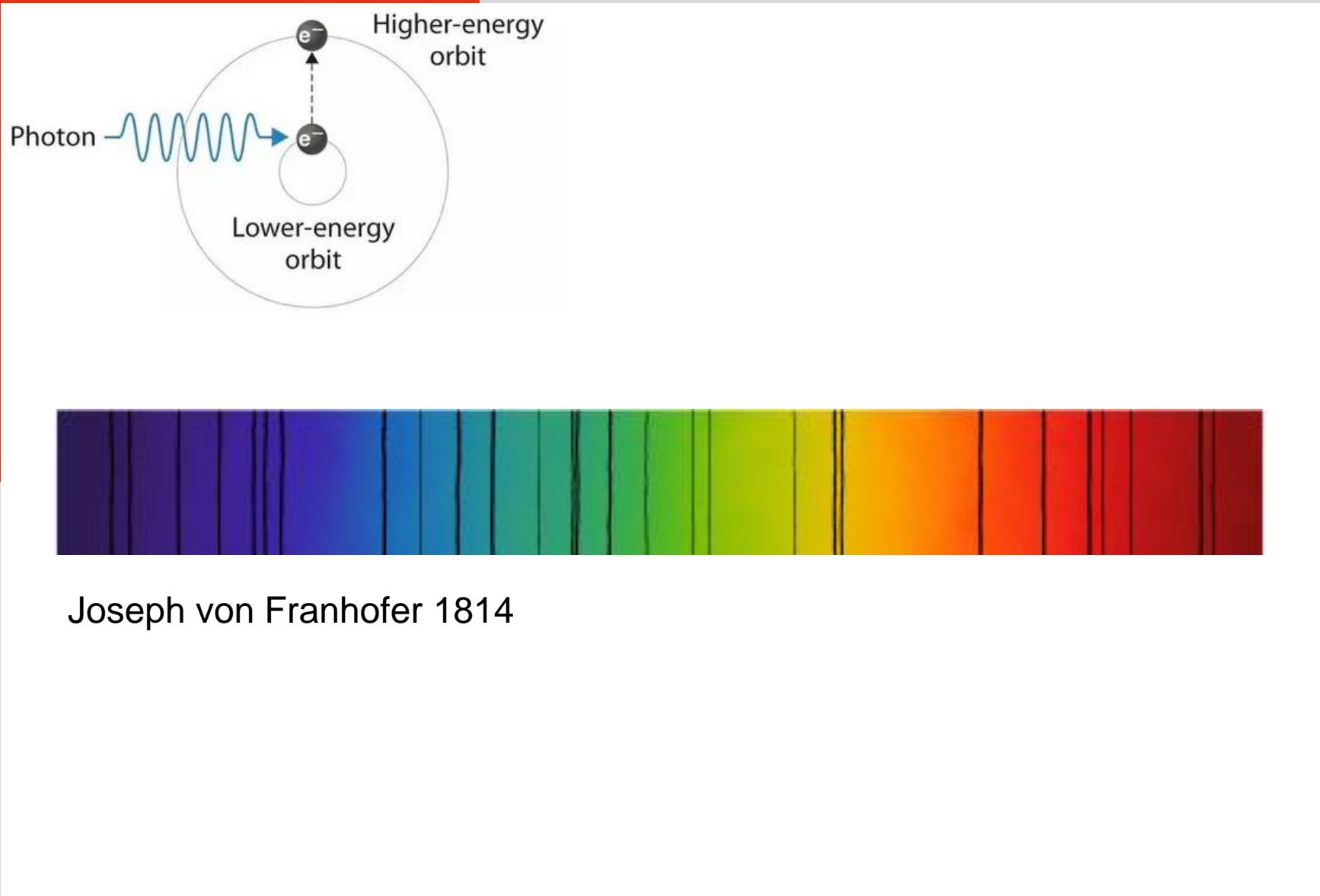
02

Il y a de la lumière partout !

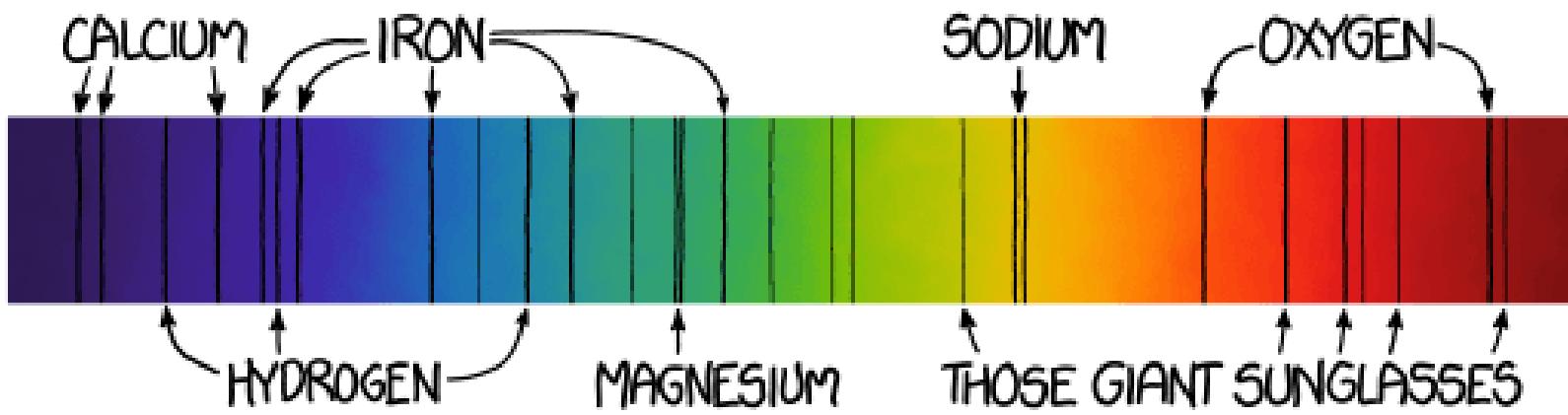


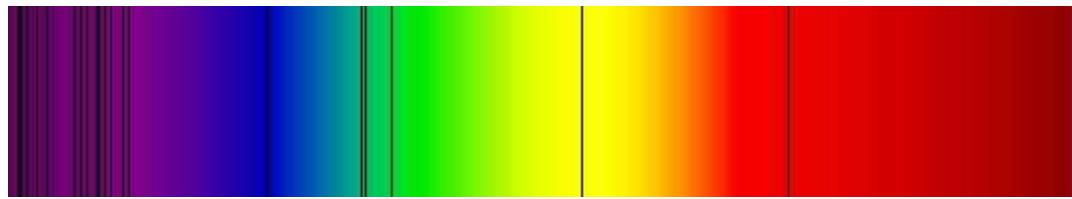


Joseph von Fraunhofer 1814

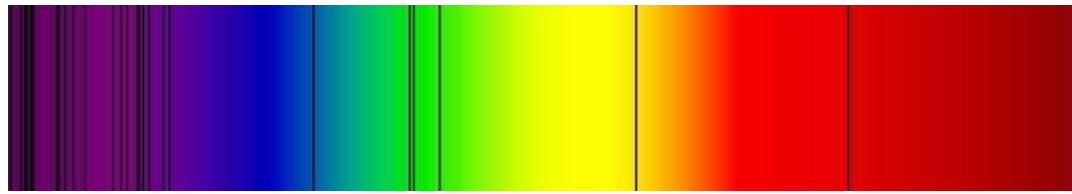


Joseph von Fraunhofer 1814



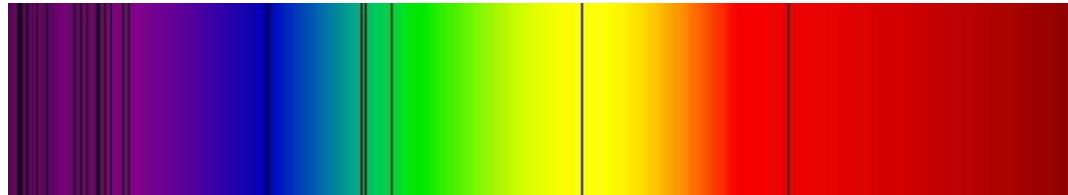


Le Soleil

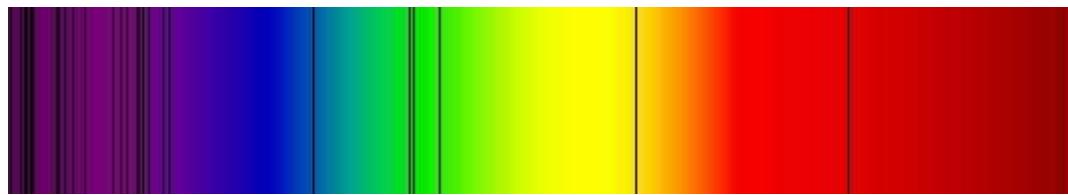


Une étoile lointaine

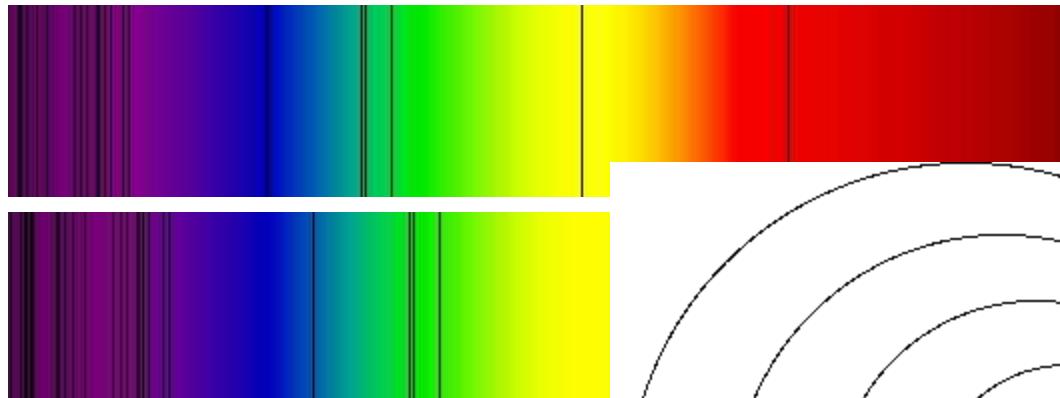
Le Soleil



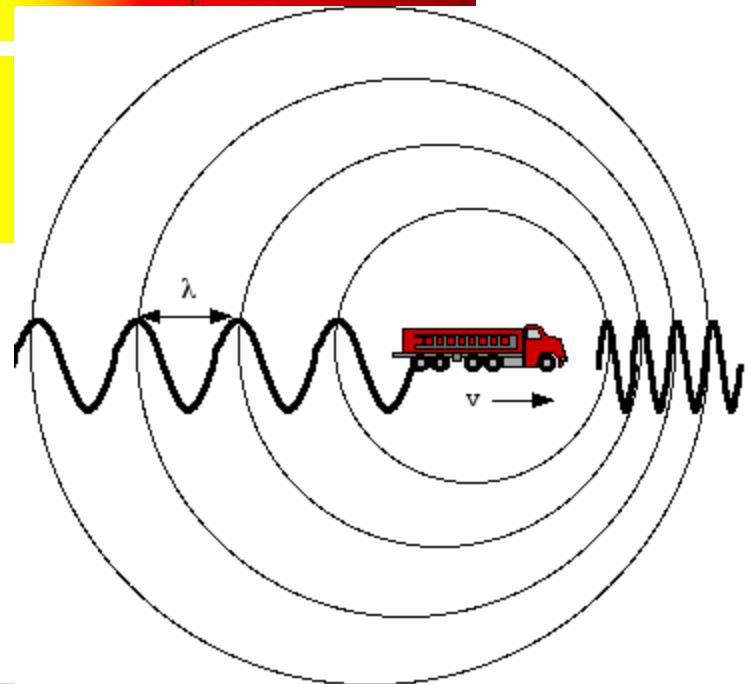
Une étoile lointaine



Le Soleil



Une étoile lointaine





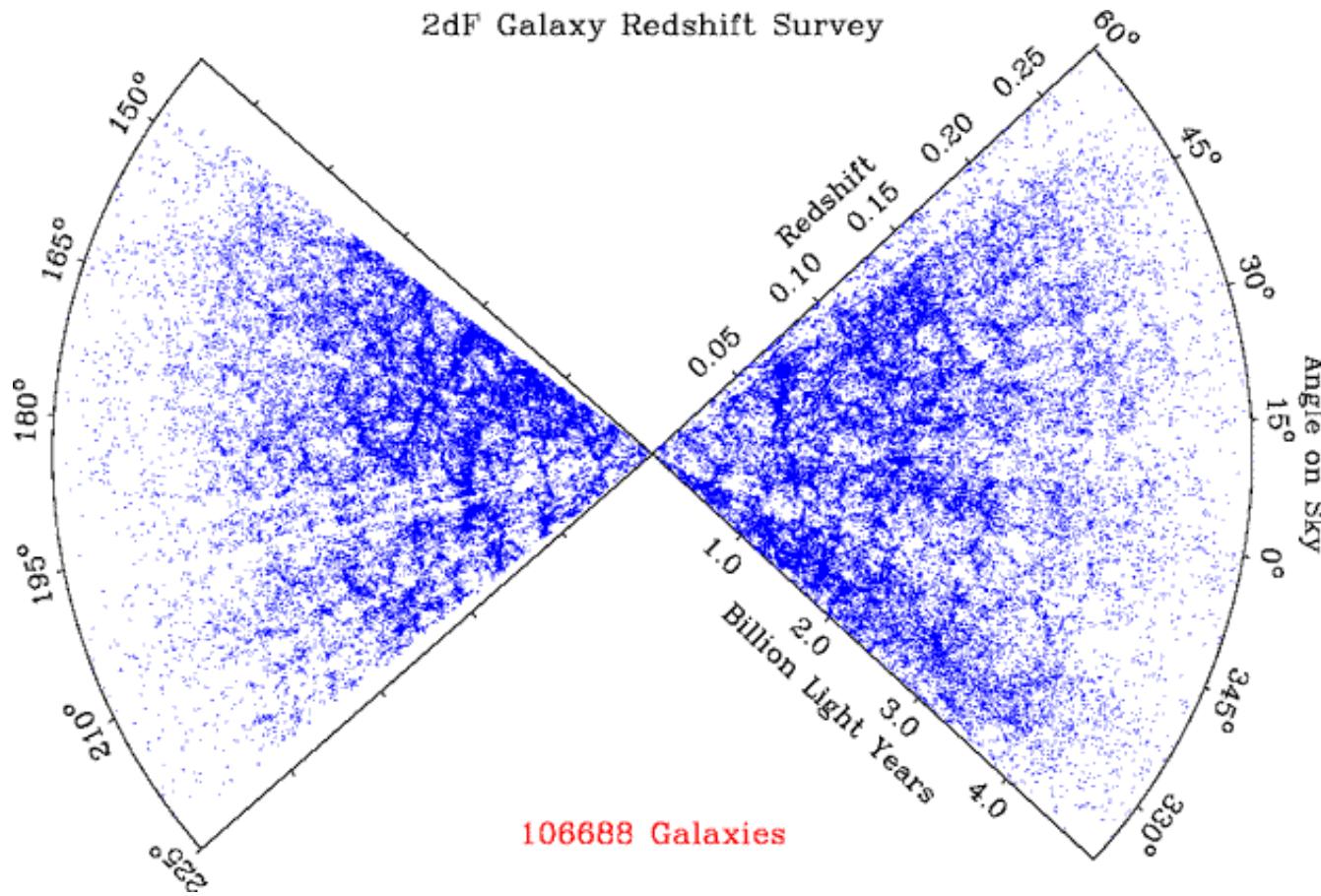
Edwin Hubble
1889 - 1953

Toutes les galaxies s'éloignent
Vitesse = constante x distance



Observatoire
du mont Wilson

Une carte du cosmos en 3D (bien plus tard)



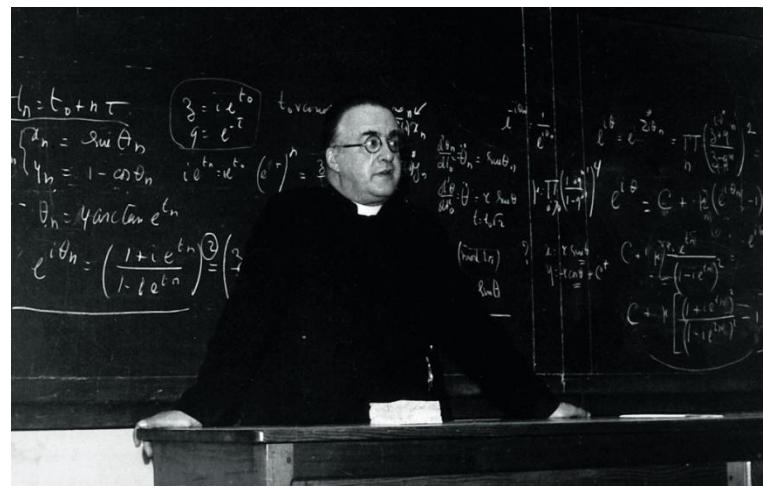


Edwin Hubble
1889 - 1953

Toutes les galaxies s'éloignent
Vitesse = constante x distance



Observatoire
du mont Wilson



George Lemaître
1894 -1966

Un modèle mathématique
Si on remonte dans le temps, tout était
au même endroit

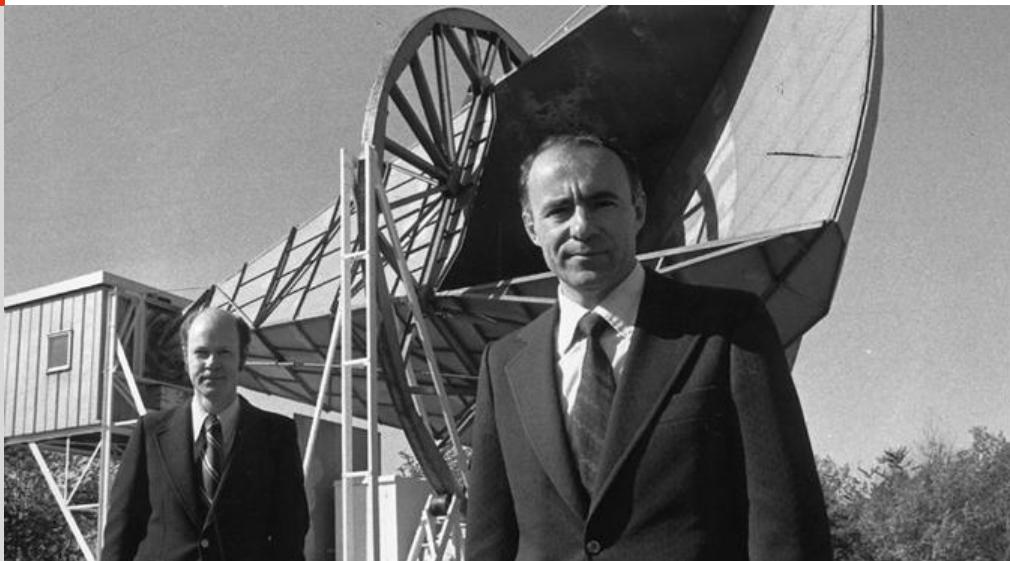
Quiz: Quel est l'âge de l'Univers ?

08/10/2020

inria

Un peu plus tard, au début des années 60

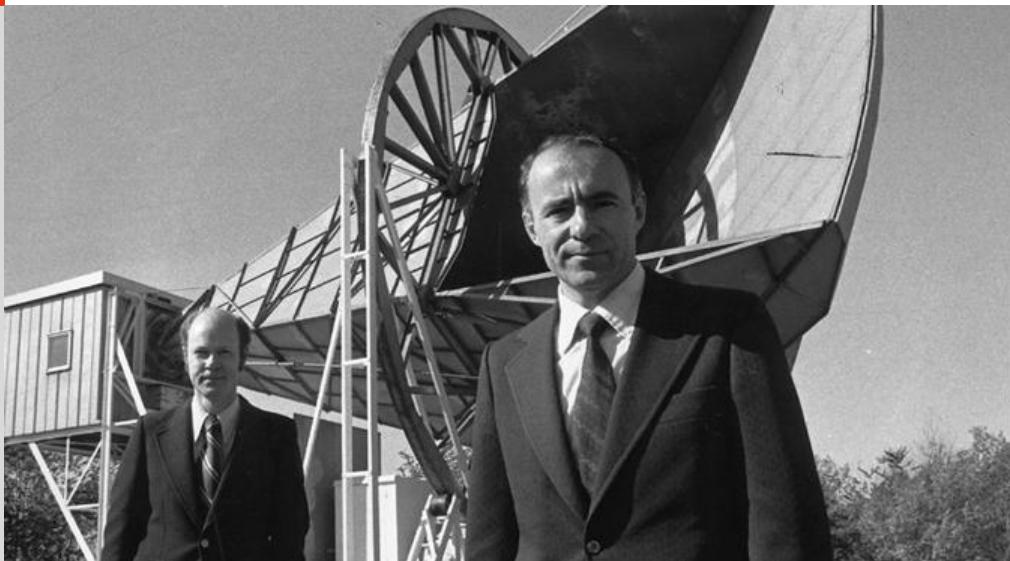
Arno Penzias et Robert Wilson
Des parasites dans un des premiers
systèmes de telecom. satellite.



Un peu plus tard, au début des années 60

Arno Penzias et Robert Wilson
Des parasites dans un des premiers
systèmes de telecom. satellite.

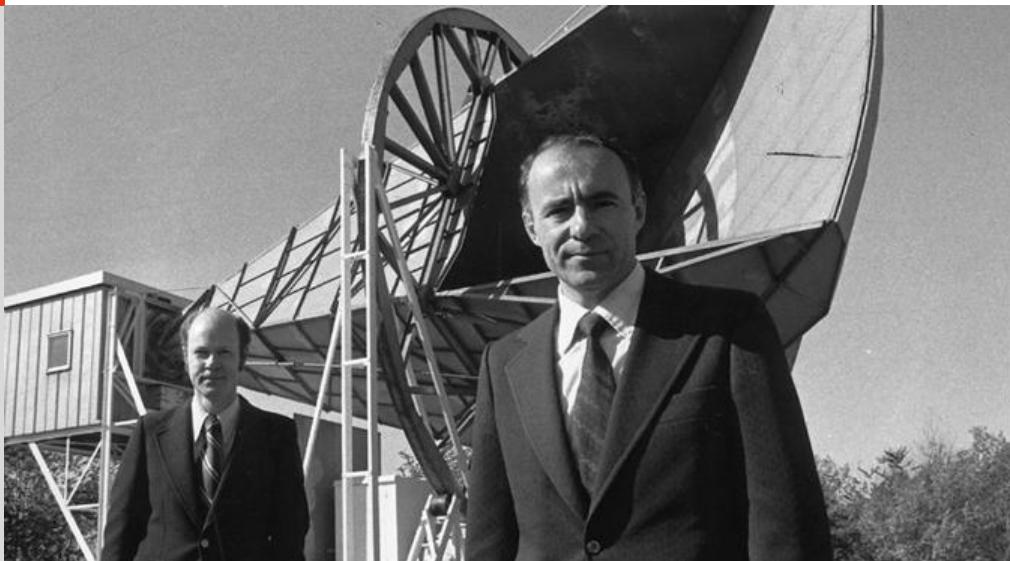
Alpher Bethe Gamow 01/04/1948



Un peu plus tard, au début des années 60

*Prix Nobel de
Arno Penzias et Robert Wilson physique 1978
Des parasites dans un des premiers
systèmes de telecom. satellite.*

Alpher Bethe Gamow 01/04/1948



Le fond de rayonnement cosmologique

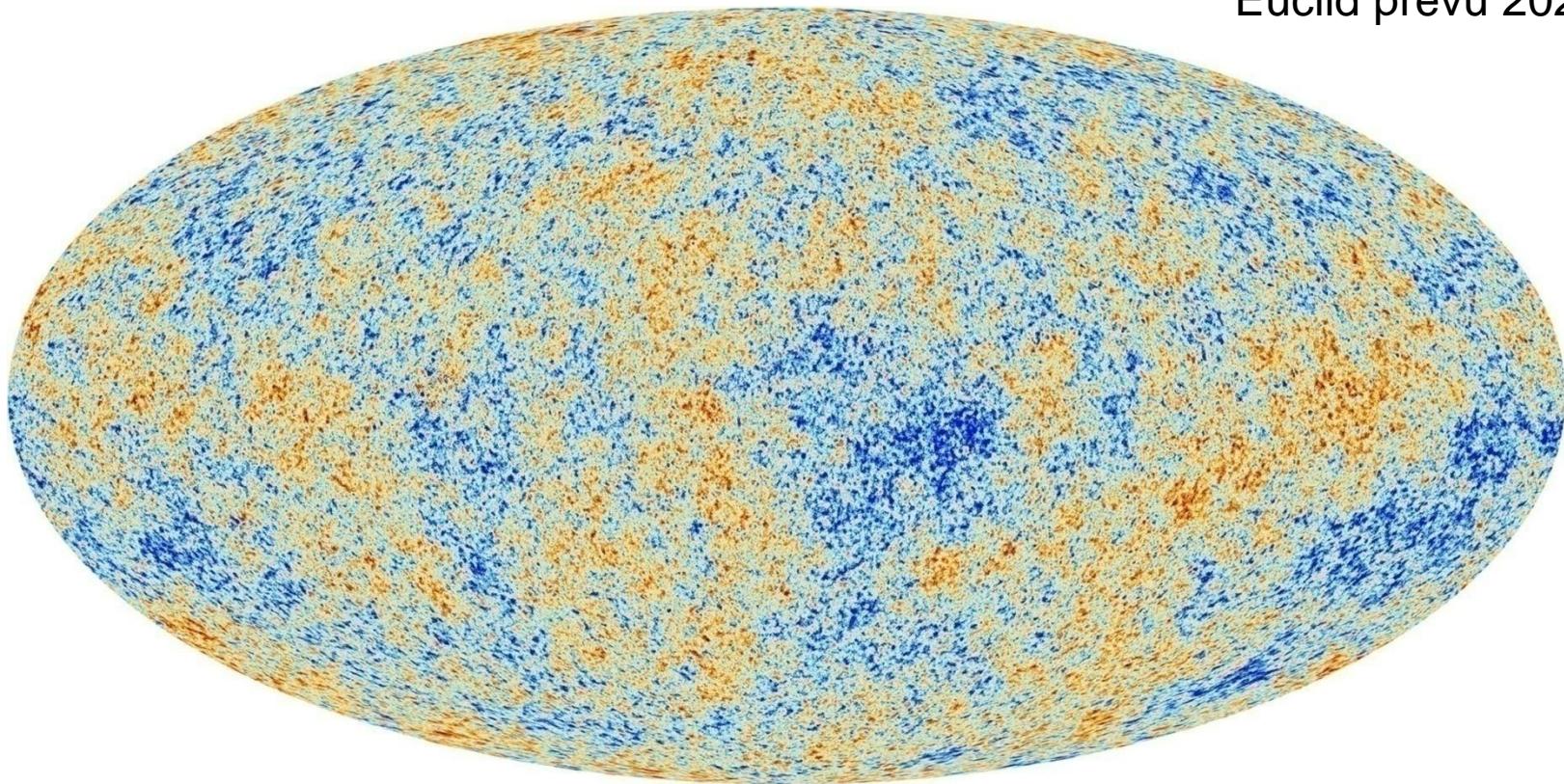
Satellites

Kobe 1992

WMAP 2003-2010

Planck 2009-2013

Euclid prévu 2022



Quiz: *Cette lumière a été émise il y a 13.7 milliards d'année
On ne la capte que maintenant. Y'a rien qui vous choque ?*

inria

03

Tout l'Univers dans un
ordinateur ...

La recette de cuisine pour une expérience numérique de cosmologie

- 1. Coder les équations de Newton dans un ordinateur**
- 2. Laisser tourner pendant 13,7 milliards d'années**
- 3. Regarder ce que ça donne**

$$\left\{ \begin{array}{lcl} \frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial \tau} + (\mathbf{u}' \cdot \nabla) \mathbf{u}' & = & -\frac{3}{2\tau} (\mathbf{u}' + \nabla \varphi) \\ \\ \frac{\partial \rho'}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho' \mathbf{u}') & = & 0 \\ \\ \Delta \varphi & = & \frac{\rho' - 1}{\tau} \end{array} \right.$$

Changement de vitesse = force divisée par masse

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho'}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho' \mathbf{u}') = 0 \\ \Delta \varphi = \frac{\rho' - 1}{\tau} \end{array} \right.$$



Changement de vitesse = force divisée par masse

Ce qui reste = ce qui rentre moins ce qui sort

$$\Delta\varphi = \frac{\rho' - 1}{\tau}$$



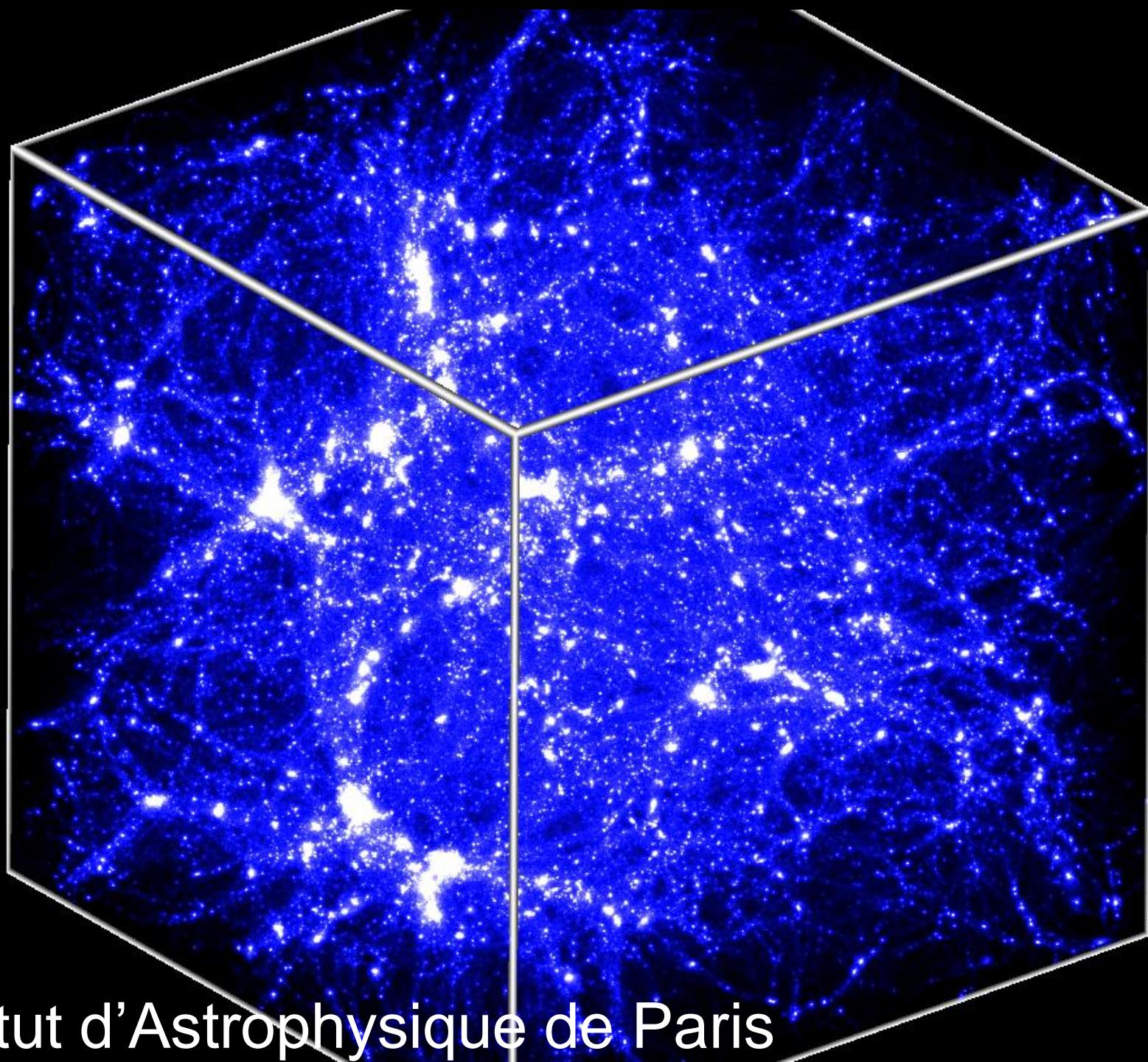
Changement de vitesse = force divisée par masse

Ce qui reste = ce qui rentre moins ce qui sort

La force de gravité est la “pente” d’une “montagne”

La recette de cuisine pour une expérience numérique de cosmologie

- 1. Coder ces équations dans
un ordinateur**
- 2. Laisser tourner pendant 13,7
milliards d'années**
- 3. Regarder ce que ça donne**



Institut d'Astrophysique de Paris

Des grandes questions...

1. Il y a plus de matière que ce qu'on voit

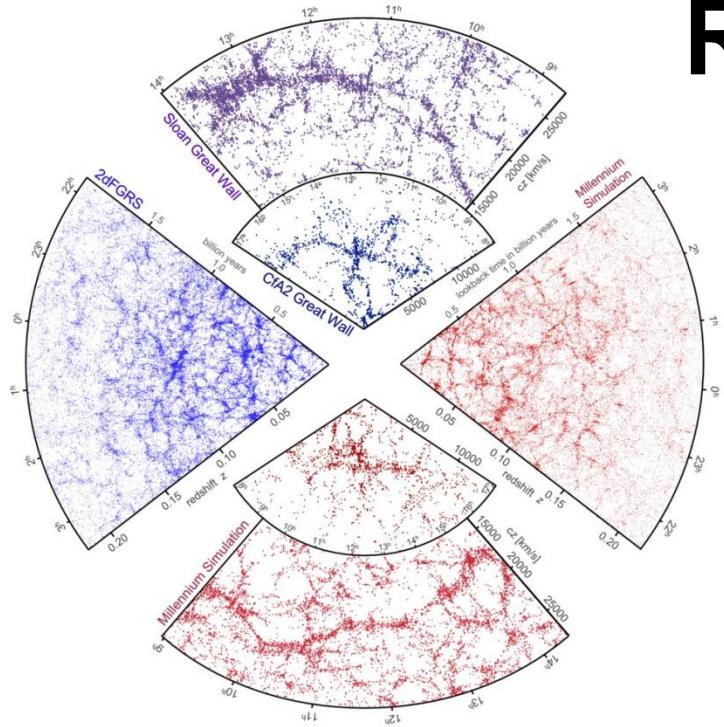
Des grandes questions...

1. Il y a plus de matière que ce qu'on voit
2. Le big-bang “big-bang-ise” plus vite que ce qu'on croyait

04

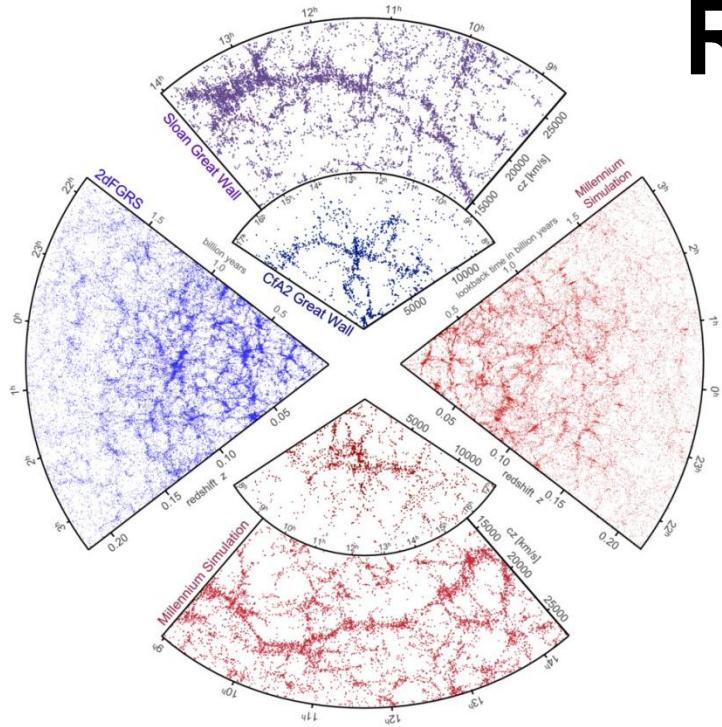
Marche arrière toute !
... le calcul impossible

Remonter le temps



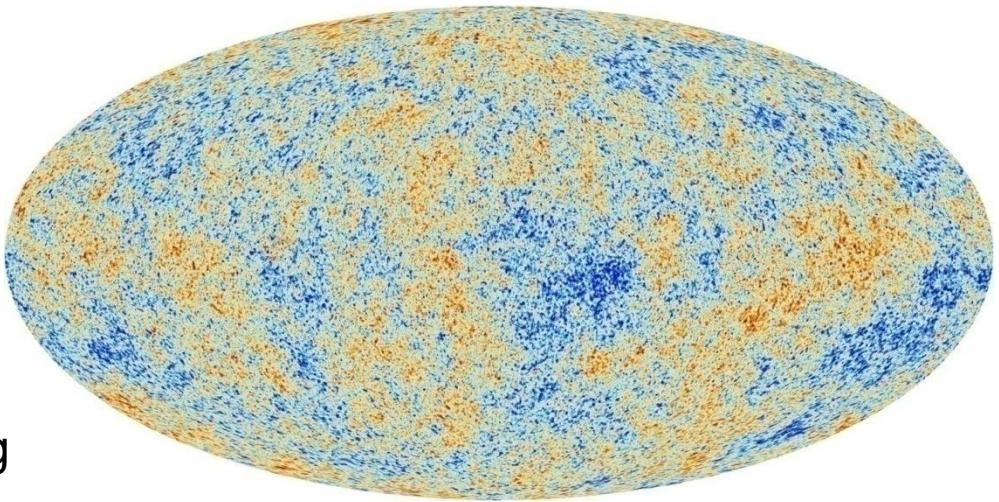
Carte 3D du cosmos
Campagnes d'acquisition
“décalage vers le rouge”

Remonter le temps



Carte 3D du cosmos
Campagnes d'acquisition
“décalage vers le rouge”

Fond de rayonnement
cosmologique:
380 000 ans après le bigbang



Remonter le temps

Le calcul impossible

En 2002, on savait le faire pour quelques milliers d'amas de galaxies

On doit le faire pour des **centaines de millions** d'amas de galaxies

Remonter le temps

Le calcul impossible

En 2002, on savait le faire pour quelques milliers d'amas de galaxies

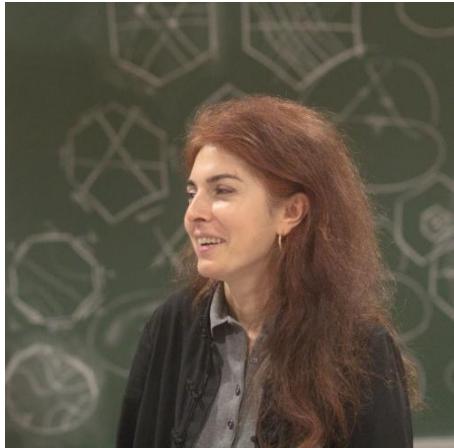
On doit le faire pour des **centaines de millions** d'amas de galaxies

La physique, les maths et l'informatique doivent travailler ensemble !

Remonter le temps

Le calcul impossible

La physique, les maths et l'informatique



Roya Mohayaee



Sebastian
von Hausegger

Remonter le temps

Le calcul impossible

La physique, les maths et l'informatique



Roya Mohayaee



Sebastian
von Hausegger



Yann Brenier

Le transport optimal



Quentin Mérigot

Remonter le temps

Le calcul impossible

La physique, les maths et l'informatique



Roya Mohayaee



Sebastian
von Hausegger



Yann Brenier



Quentin Mérigot
Le transport optimal



Remonter le temps

Le calcul impossible

La physique, les maths et l'informatique



Roya Mohayee



Sebastian
von Hausegger



Yann Brenier



Quentin Mérigot
Le transport optimal



Bruno L.



Remonter le temps

L'institut d'astrophysique de Paris

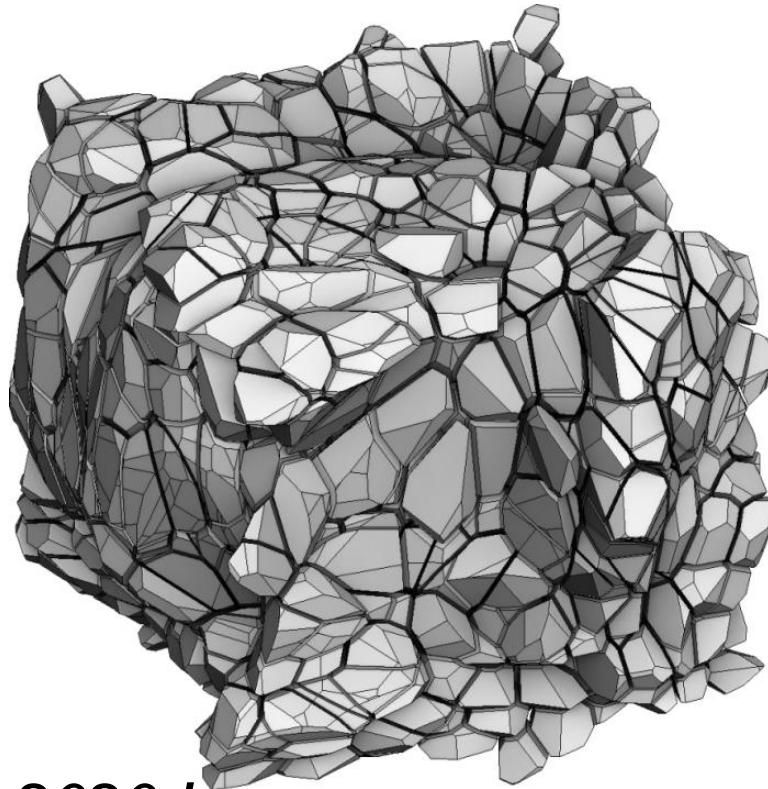
Créer un *langage commun* entre
la physique,
les maths et
l'informatique

2015 ...

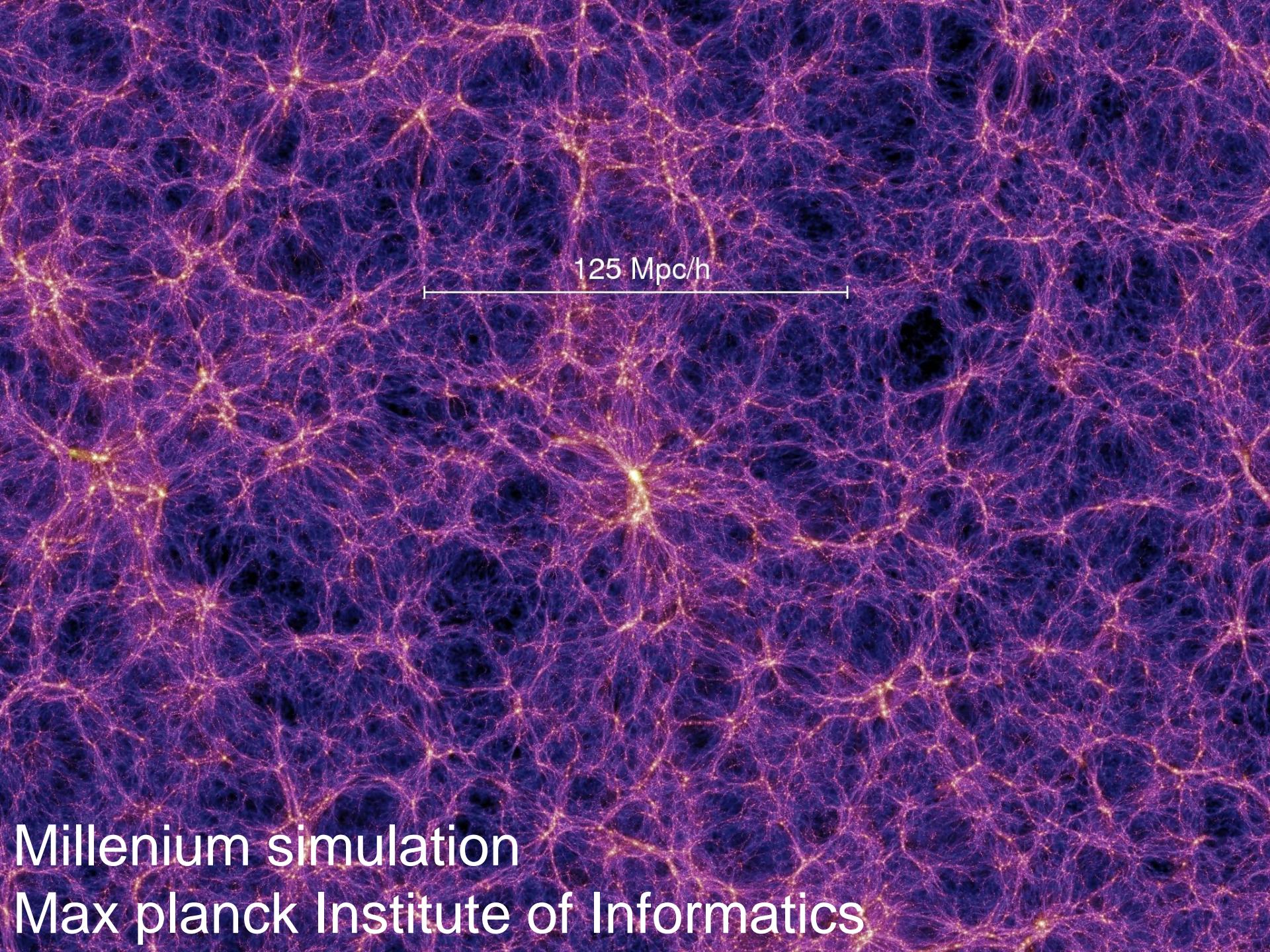


Remonter le temps

L'institut d'astrophysique de Paris

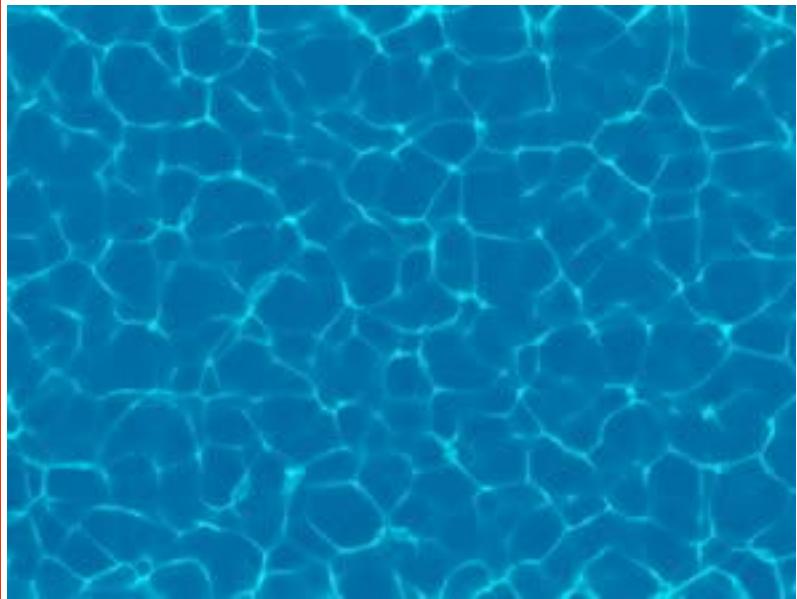


2020 !



125 Mpc/h

Millenium simulation
Max planck Institute of Informatics

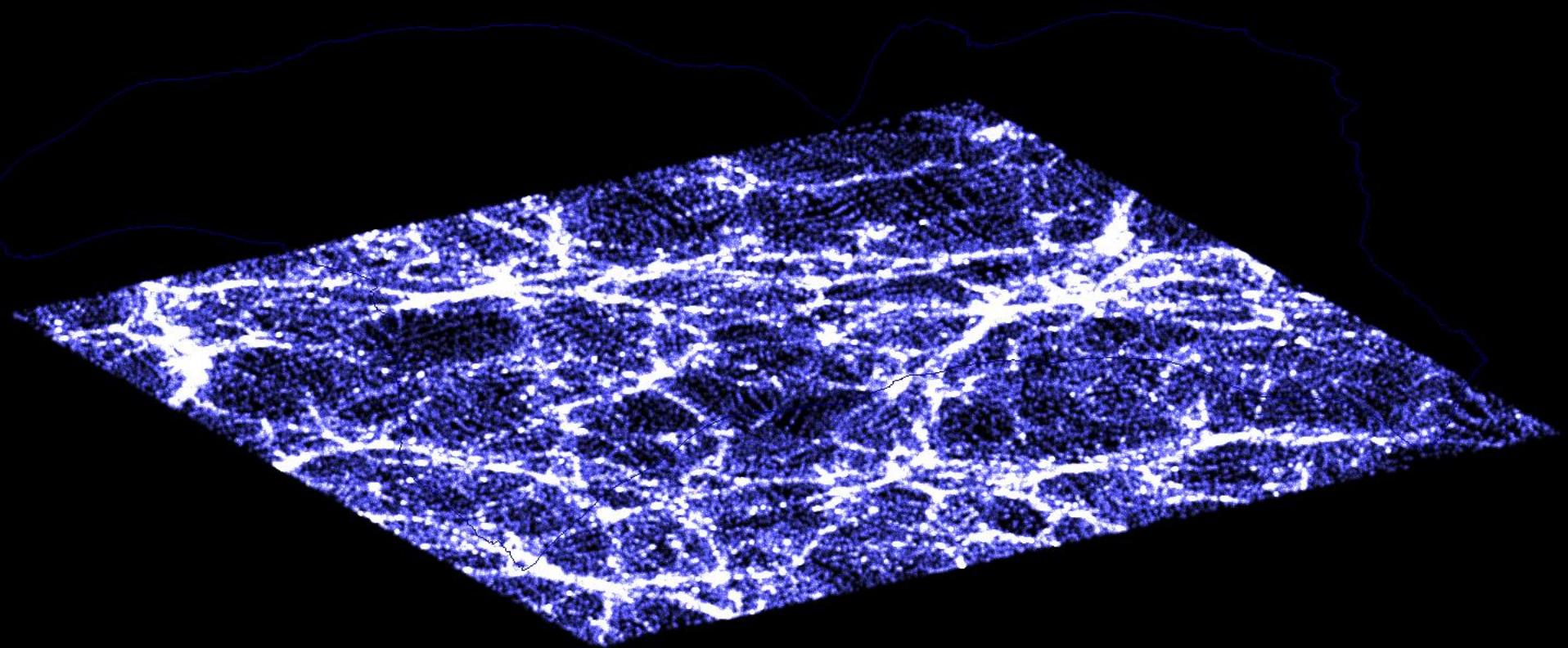


Inria

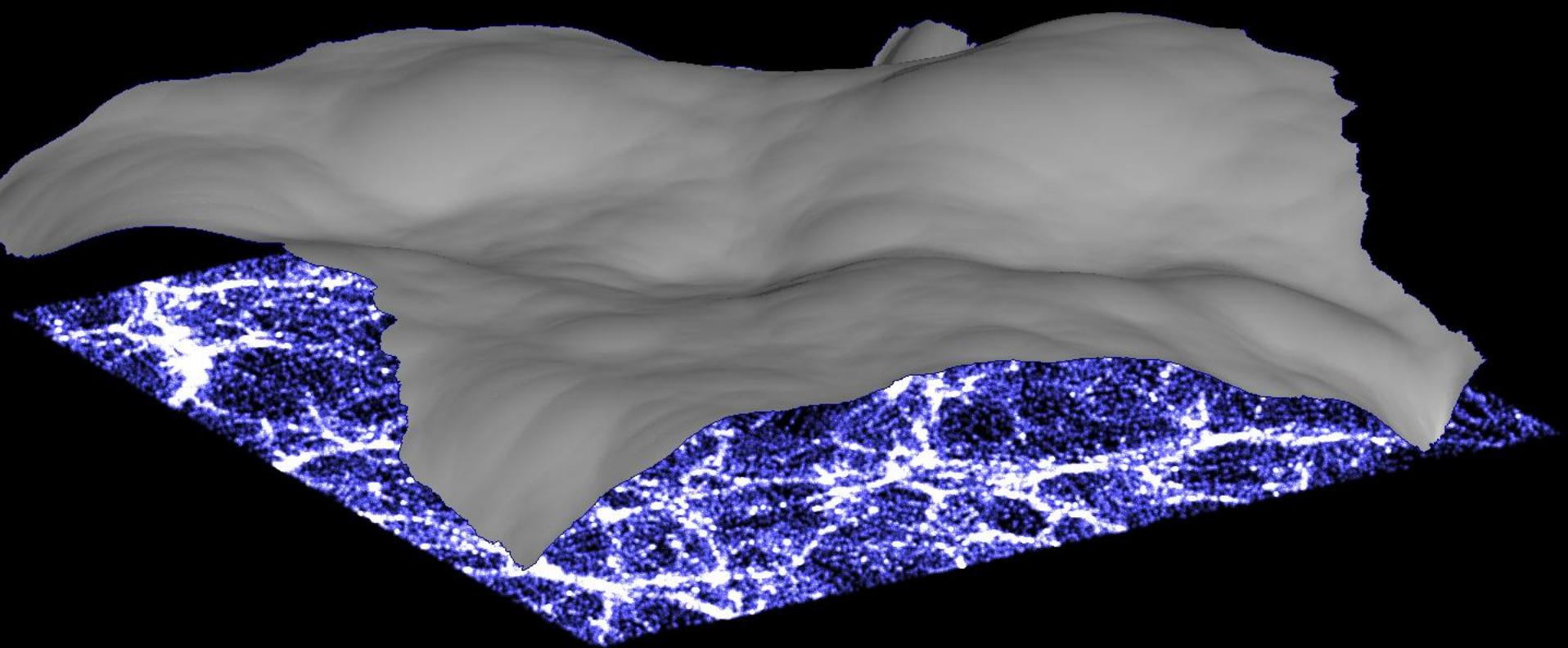
- {
- Changement de vitesse = force divisée par masse
 - Ce qui reste = ce qui rentre moins ce qui sort
 - La force de gravité est la “**pente**” d’une
“**montagne**” (ou encore de la “surface de l’eau”)

C'est ça qu'on calcule,
(qui s'appelle le *potentiel gravitationel*)

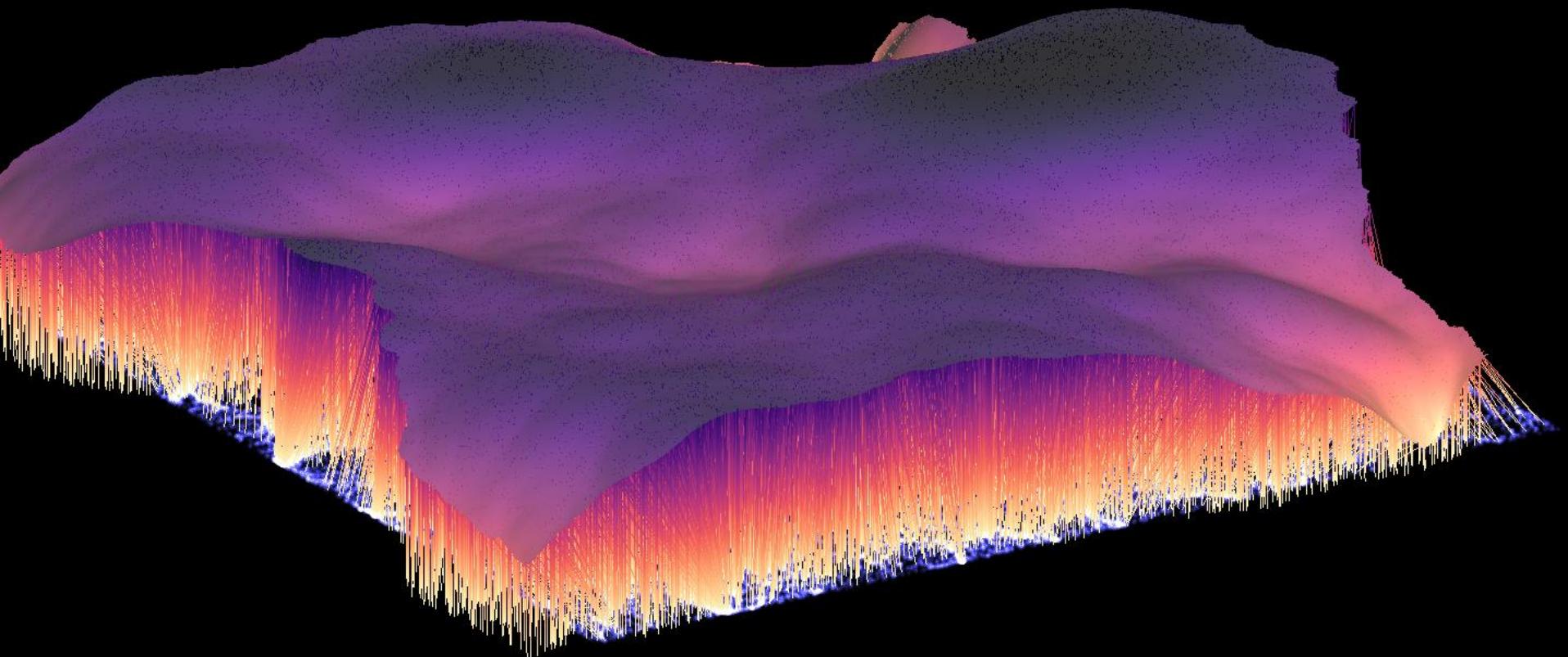




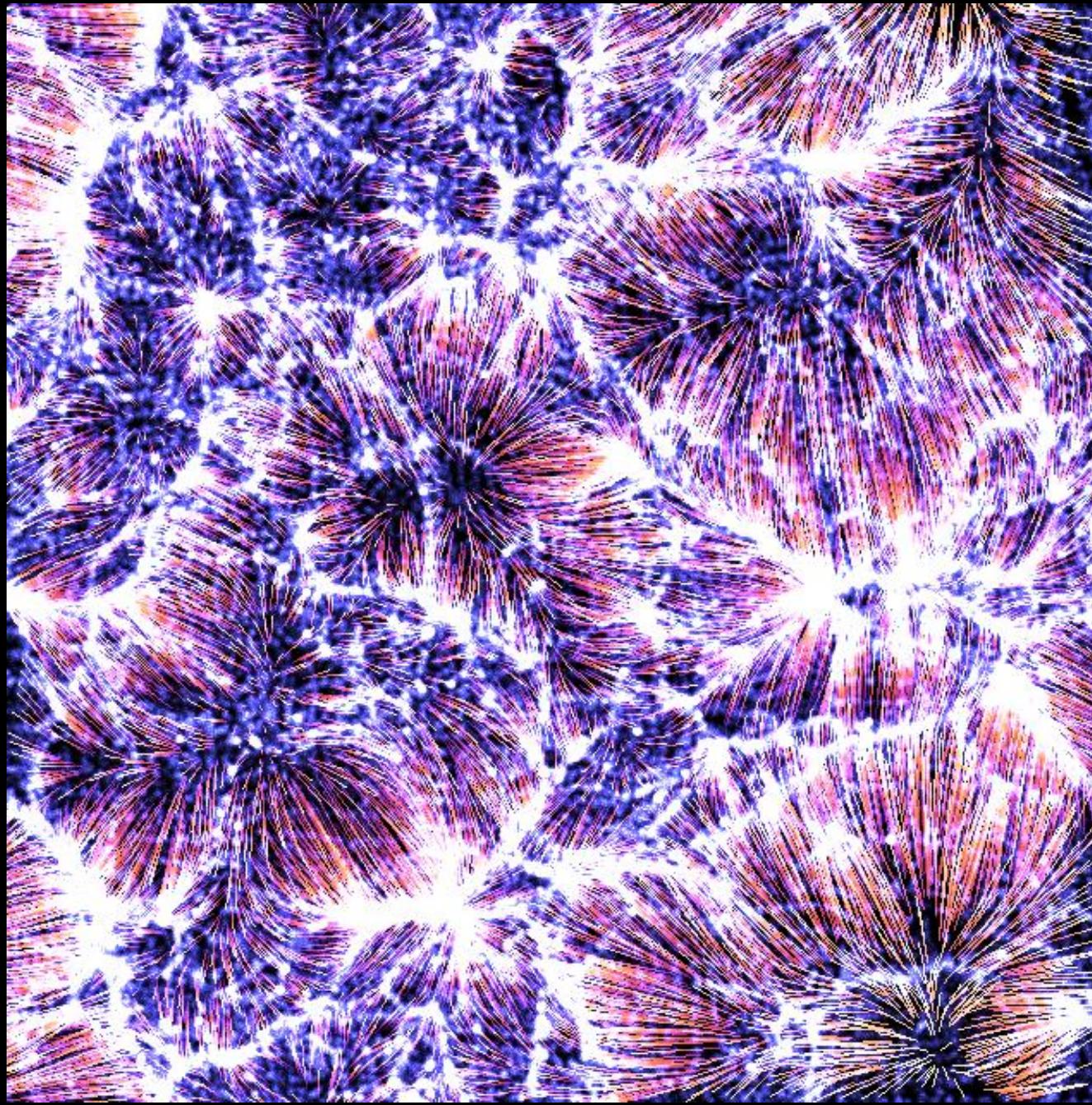
Une “piscine cosmique” en 2D



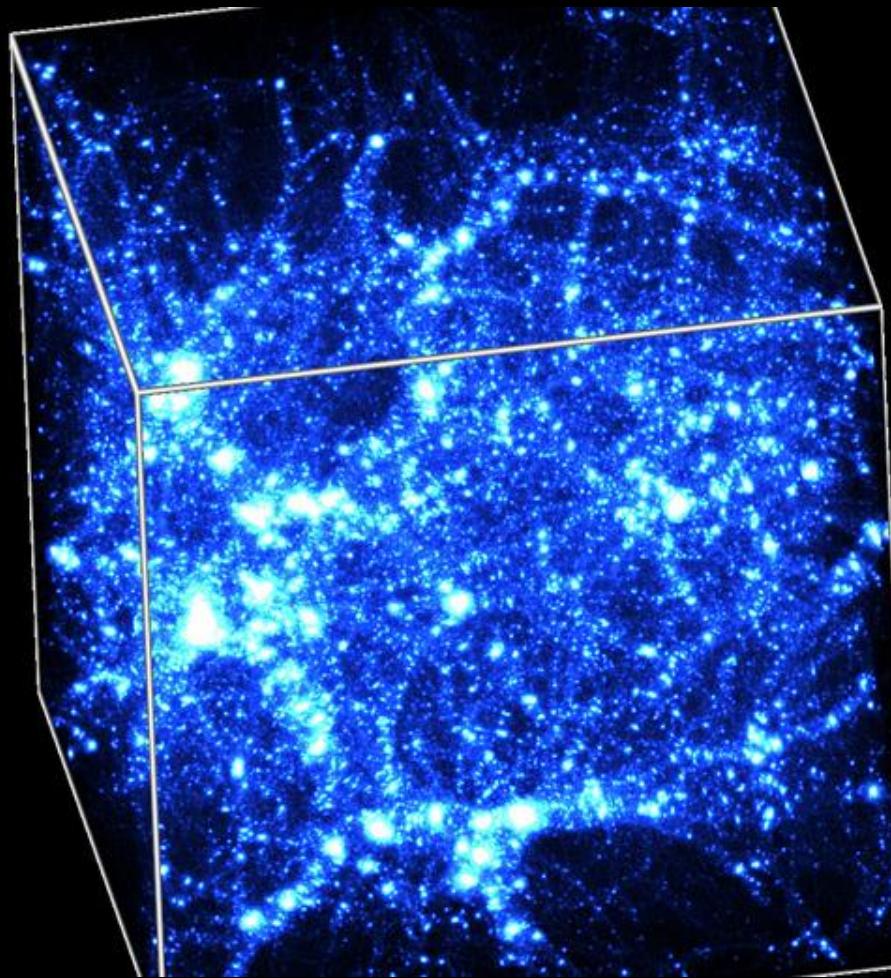
Une “piscine cosmique” en 2D



Une “piscine cosmique” en 2D

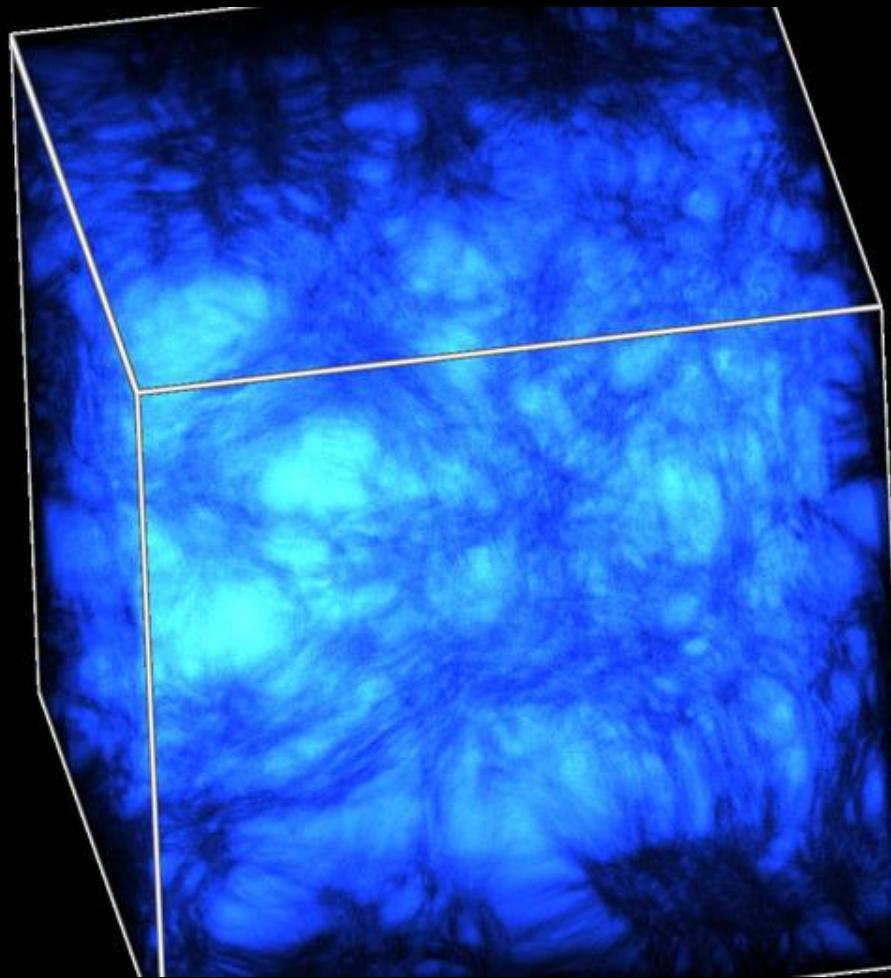


Simulation numérique 3D



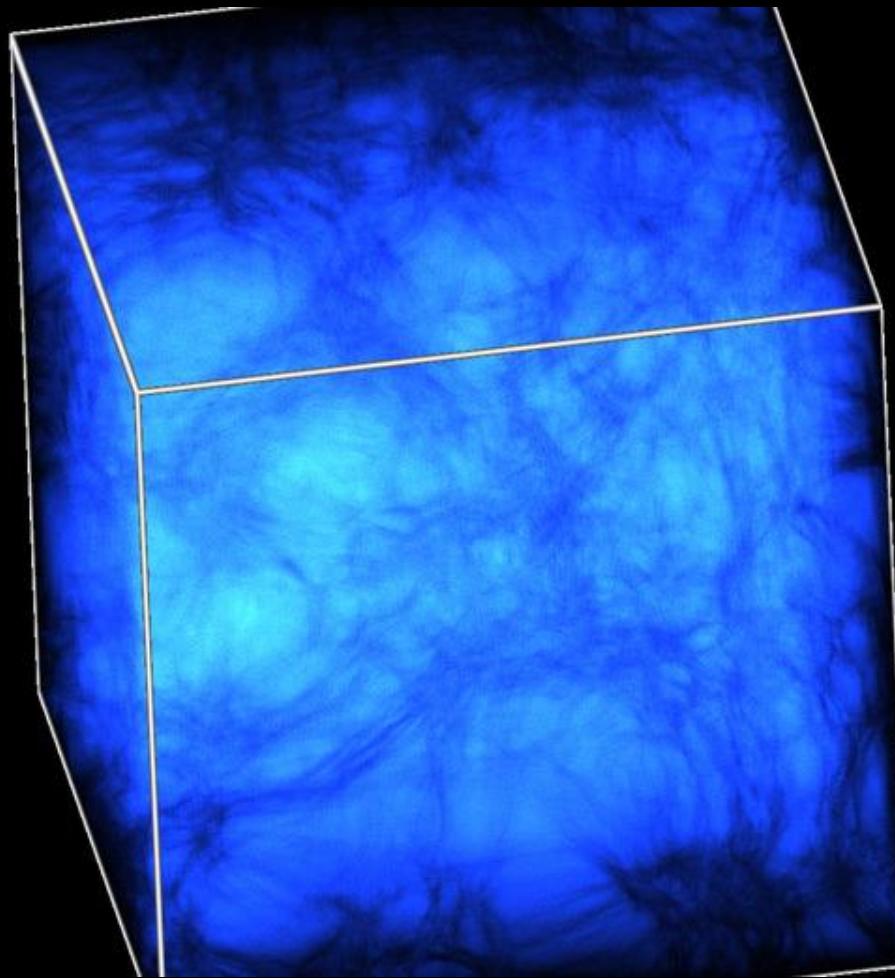
+ 13.7 milliards d'années (maintenant)

Simulation numérique 3D



+ 6 milliards d'années

Simulation numérique 3D



+ 380 000 ans

05

Epilogue
De la musique encore...

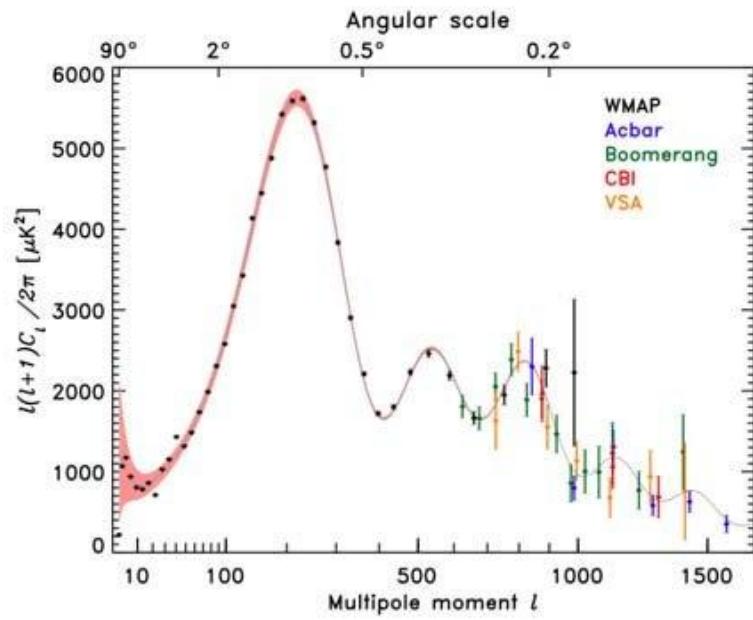
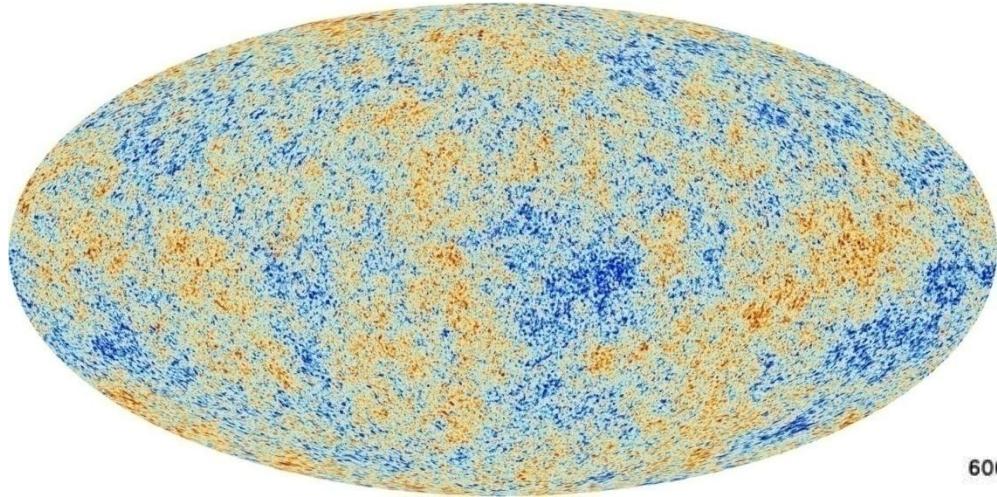
Des vagues dans le cosmos ...

Pendant les 380 000 premières années,
lumière et matière en interaction...

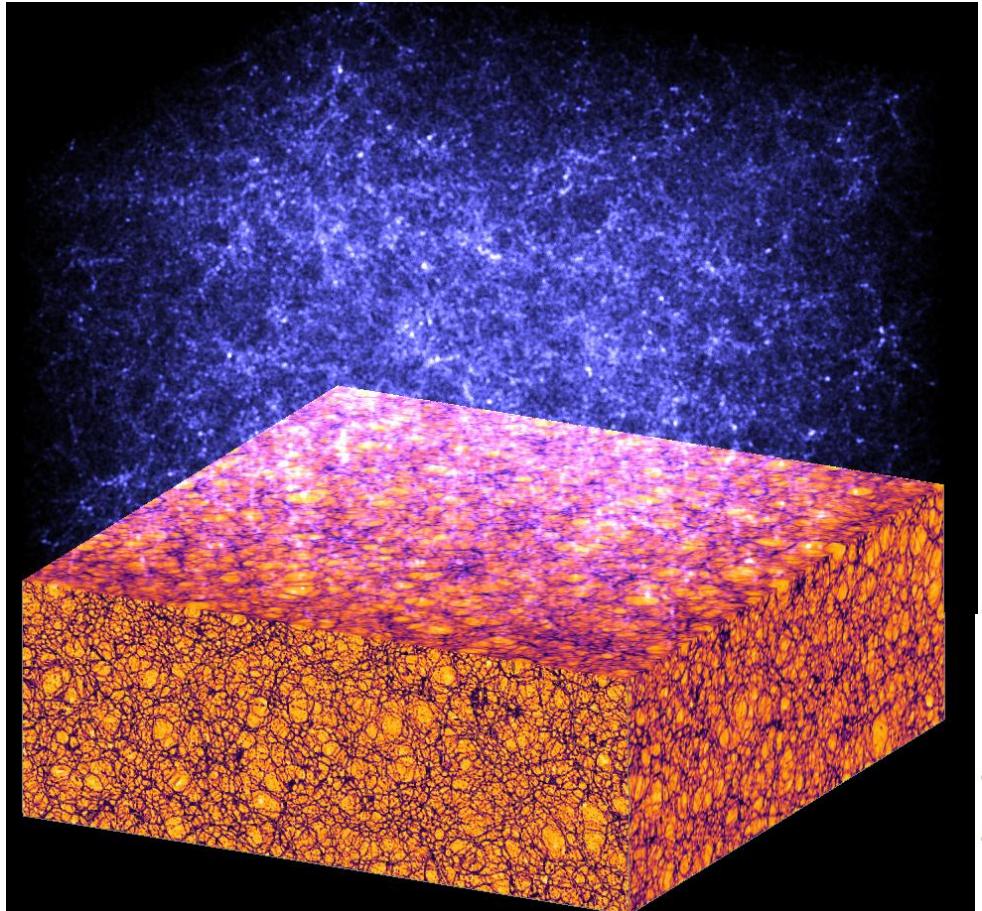
c.f. conférence FDS Hélène Barucq

inria

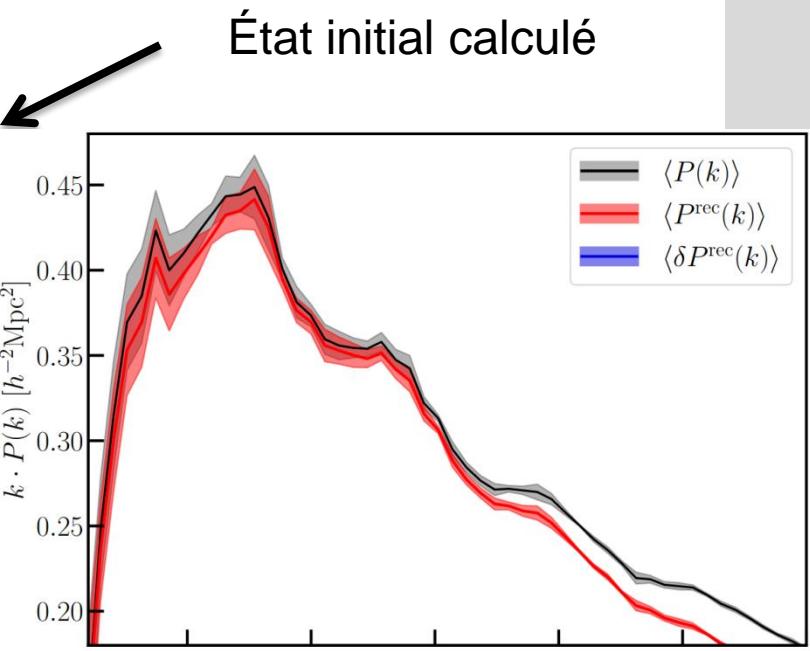
Des vagues dans le cosmos ...



Des vagues dans le cosmos ...



Simulation





the constraint (10), and using the identity $\mathbf{x}_F(\mathbf{q})^2 - 2\mathbf{q} \cdot \mathbf{x}_F(\mathbf{q}) + \mathbf{q}^2$, the optimal transport problem can be written as the following saddle point problem:

$$\begin{aligned} \text{Sup}_{\mathbf{x}_F} \text{Inf}_{\Psi} \left[J(\mathbf{x}_F) = \int_V \rho_I(\mathbf{q}) \mathbf{x}_F(\mathbf{q}) \cdot \mathbf{q} d^3 \mathbf{q} \right. \\ \left. - \int_V \Psi(\mathbf{x}_F(\mathbf{q})) \rho(\mathbf{q}) d^3 \mathbf{q} + \int_V \Psi(\mathbf{x}) \rho_F(\mathbf{x}) d^3 \mathbf{x} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

One can also obtain the momentum equation by equating the following action integral (Bresch-Desjardins and Grenier, 2000, Appendix D):

$$I = \frac{1}{2} \int_{\tau_I}^{\tau_F} \int_V (\rho |\mathbf{v}|^2 + \frac{3}{2} |\nabla_x \phi|^2) \tau^{3/2}$$

subject to mass conservation (2), to the momentum constraint (3) and to the boundary condition (4):

$$(\cdot) = 1 \quad ; \quad \rho(\cdot, \tau_F) = \rho_F(\cdot)$$

MERCI

```
t::compute() {
    ts();

    double> pk(n_);
    double> gk(n_);
    assign(n_, 0.0);
    n_.assign(n_, 0.0);
    bool converged = false;

    // Threshold for linesearch (Kitagawa-Merigot-Thibert)
    double epsilon0 = 0.0;

    // Inner iteration control for linesearch
    unsigned int first_inner_iter = linesearch_init_iter_;
    unsigned int inner_iter = first_inner_iter;
    bool use inner iter prediction = (first inner iter != 0);
```