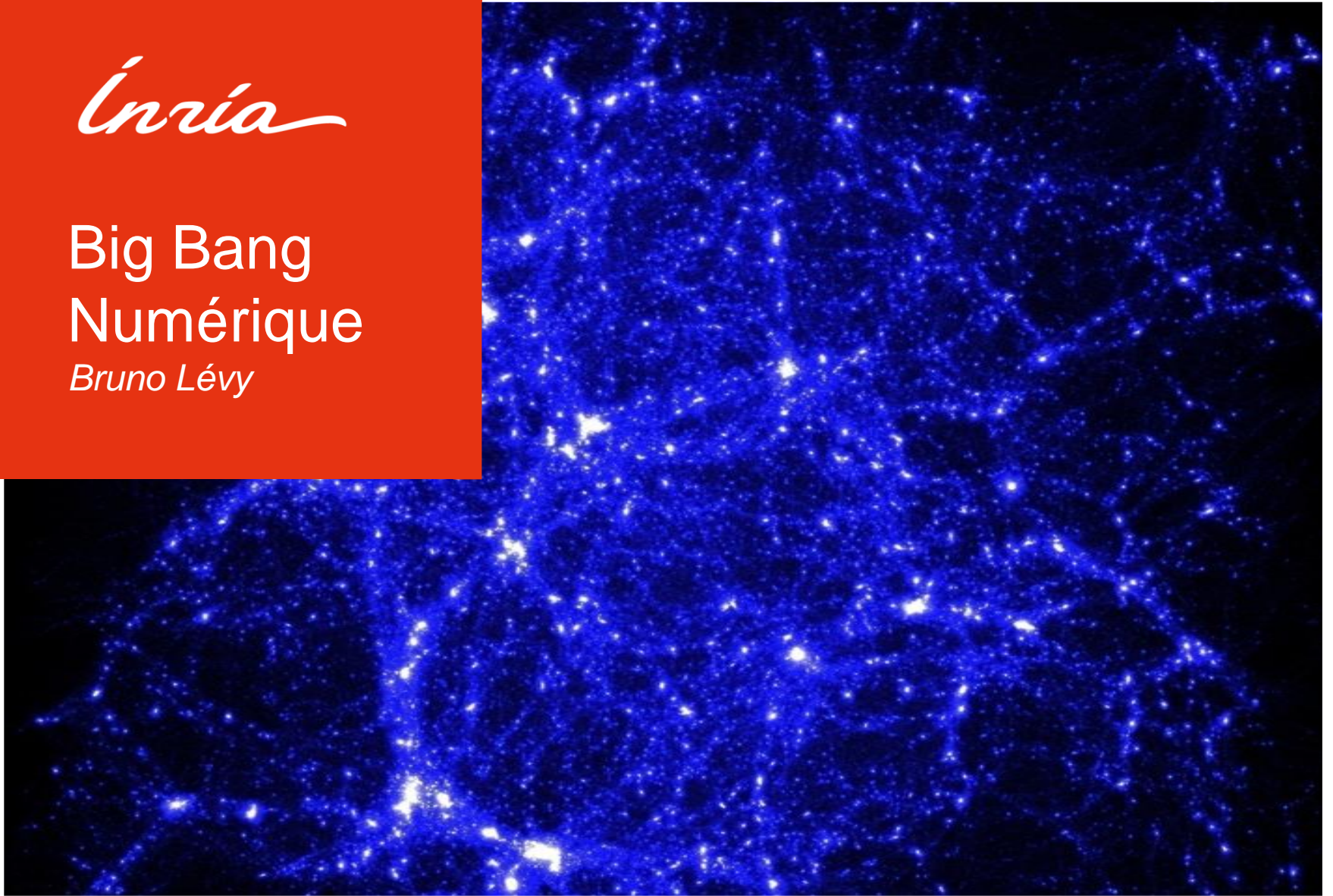


*Invia*

Big Bang  
Numérique

*Bruno Lévy*



# 01

Des forêts de symboles...

*Alti*

*Introduction.*

*Viol.*

*pia.*

*Viol.*

*pia.*

*Inria*

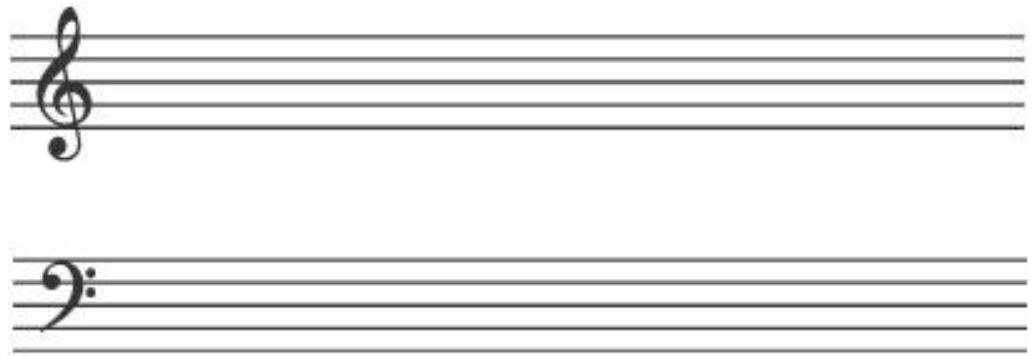


Quiz: D'où vient le nom des notes de musique ?

*Inria*



# La musique: un langage pour parler - du temps





## La musique: un langage pour parler

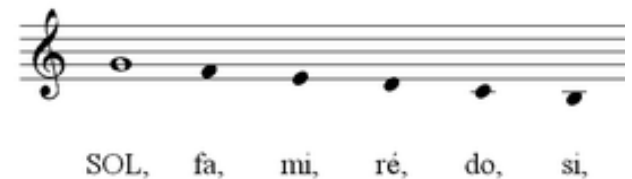
- du temps
- du rythme





## La musique: un langage pour parler

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





**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  
 $F$  +  $F'$ , then it is tangent to ellipse

$G'$  (image of  $F$ )  
 $FP + F'P = FP + G'P = FG'$   
 $FQ + F'Q = FQ + G'Q > FG'$   
 $\therefore Q$  lies outside the ellipse

vector  
 $(a) + (b)$ , then  $(c)$   
 ce toward Sun  
 Force as  $1/r^2$   
 times are  
 inversely as the

SPECIAL LECTURE THE MOTION OF PLANETS AROUND THE SUN. R.P. FEYNMAN

$\frac{3}{R^2}$       $\mathcal{L} = GM$   
 $\mathcal{L} = \frac{2E}{m}$

$\alpha = \text{Area swept/sec}$   
 $R^2 d\theta / \alpha = dt$   
 $\Delta V = \frac{3}{R^2} (\Delta t) = \frac{3}{R^2} \frac{R^2 \Delta \theta}{\alpha} = \frac{3}{\alpha} \Delta \theta = V_R \Delta \theta$

$V_R = \alpha$   
 $b = a \frac{3}{V_0 \tan \frac{\varphi}{2}}$

EQUAL ANGLES

Equal angles means areas proportional to time  
 $\therefore$  Equal changes in velocity in equal  $\Delta t$   
 $\therefore$  Equal changes in velocity in equal  $\Delta t$

SPACE DIAGRAM

$\tan \frac{\varphi}{2} = \frac{V_R}{V_0} = \frac{3}{\alpha V_0} = \frac{3}{b V_0^2}$

x-sect area for deflection  $> \varphi$   
 $\propto \pi b^2 \propto \frac{\pi \mathcal{L}^2}{V_0^4 \tan^2 \frac{\varphi}{2}}$

$\mathcal{L} = \frac{2E}{m}$

deflection =  $1\varphi$

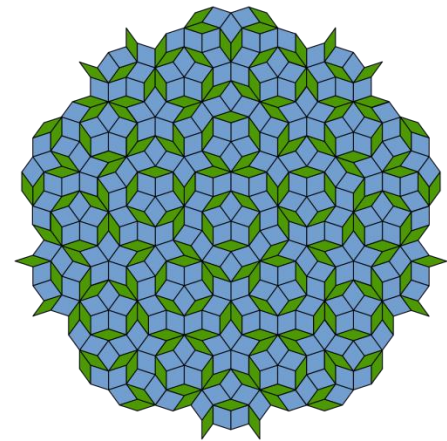


Richard Feynman – prix Nobel de physique 1965





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...

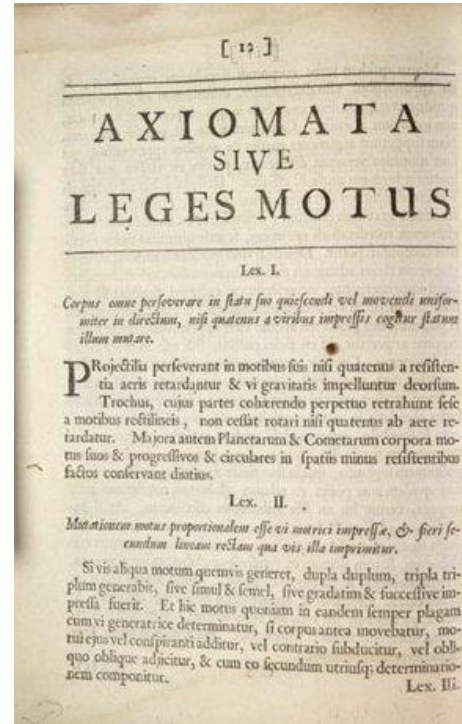
# Newton et ses trois lois

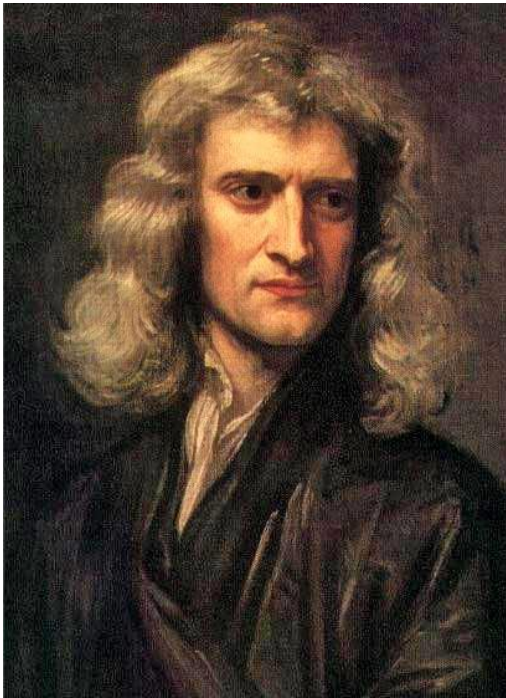


Isaac Newton  
1623-1727

1687

Principia Mathematica



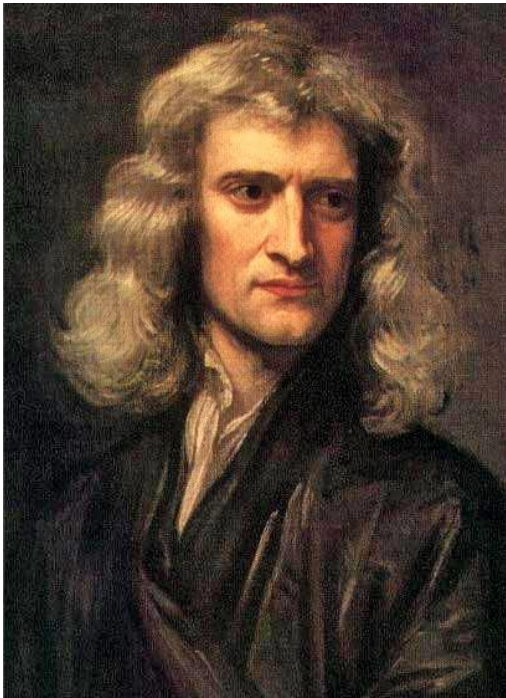


Isaac Newton  
1623-1727

1687  
Principia Mathematica

# Newton et ses trois lois

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



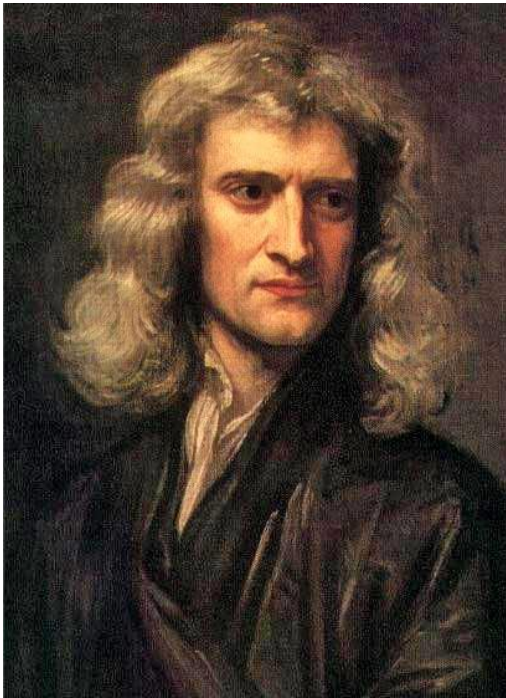
Isaac Newton  
1623-1727

1687  
Principia Mathematica

# Newton et ses trois lois

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





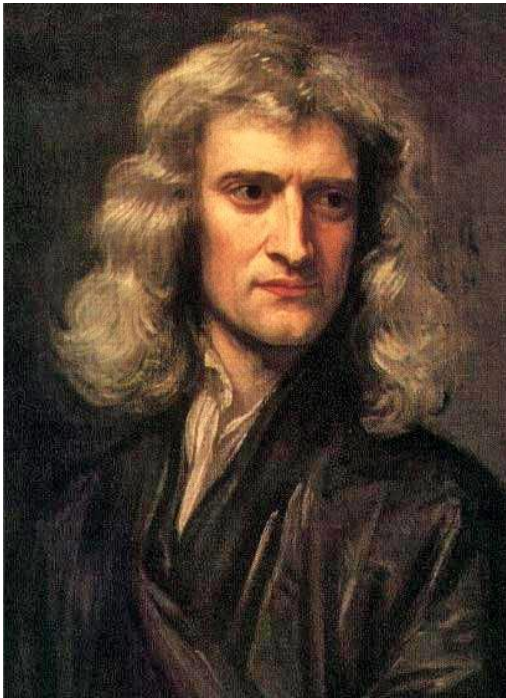
Isaac Newton  
1623-1727

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

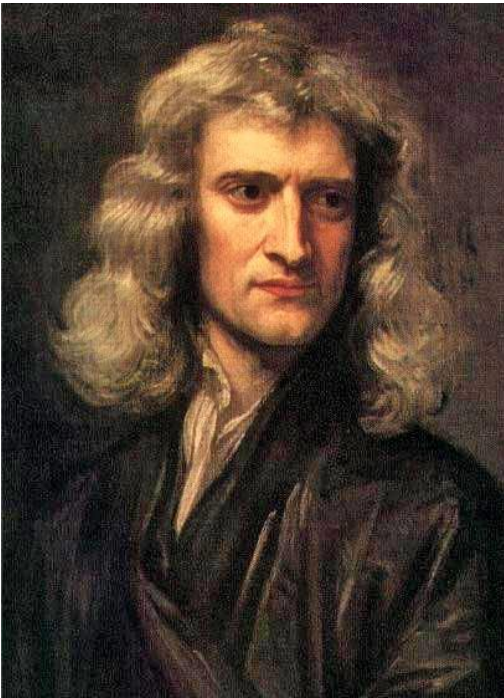
1687  
Principia Mathematica

# 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 meme vitesse

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

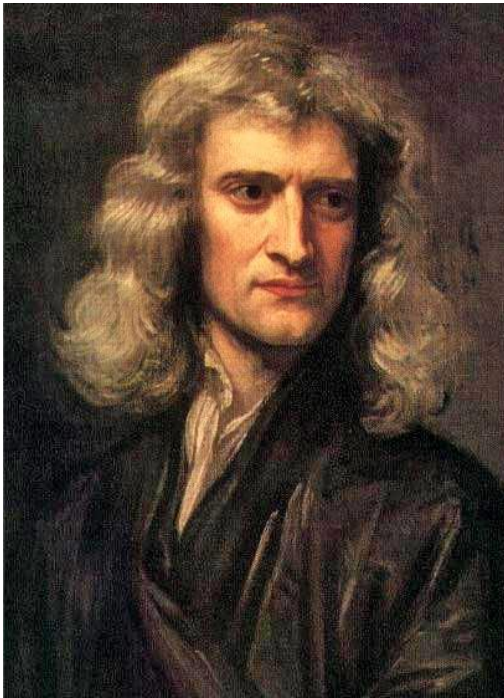
**Loi N° 3:** Si A exerce une force sur B, alors  
B exerce la meme force sur A  
(mais dans l'autre sens)

## 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:*

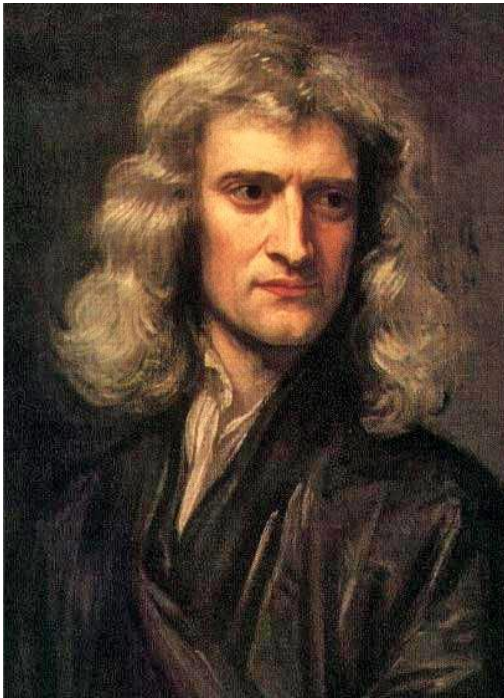
*-Dérivées par rapport au temps  
vitesse, accélération*

*-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, accélération*

*-Dérivées par rapport à l'espace  
pente*

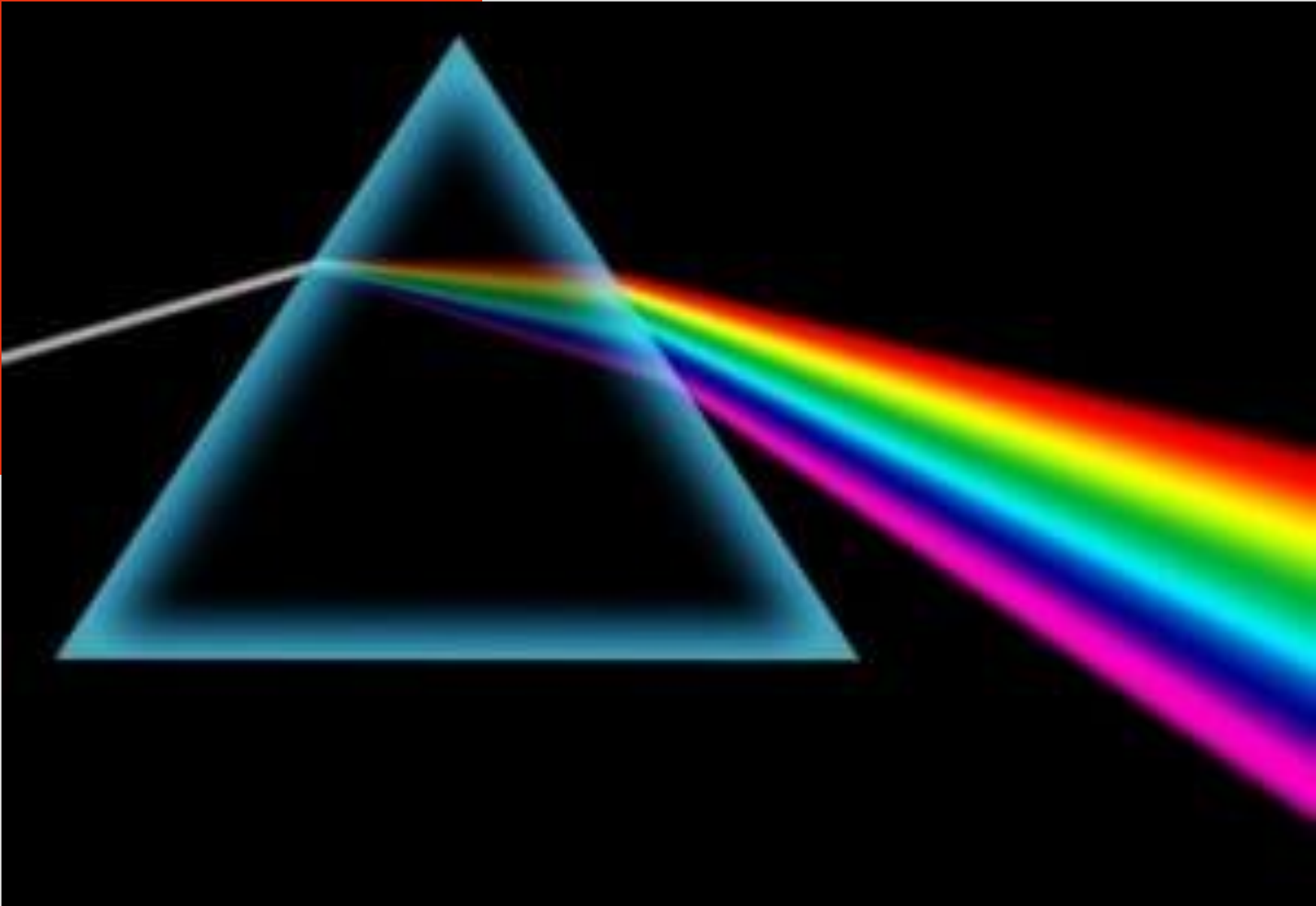
Et aussi / et **surtout**: vérifier par des **expériences** !!

Regarder, observer...

Quiz: Quelle est l'étoile la plus proche ?

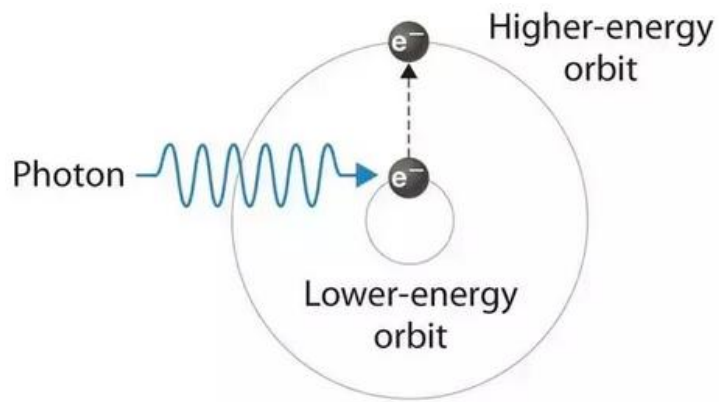
# 02

Il y a de la lumière partout !

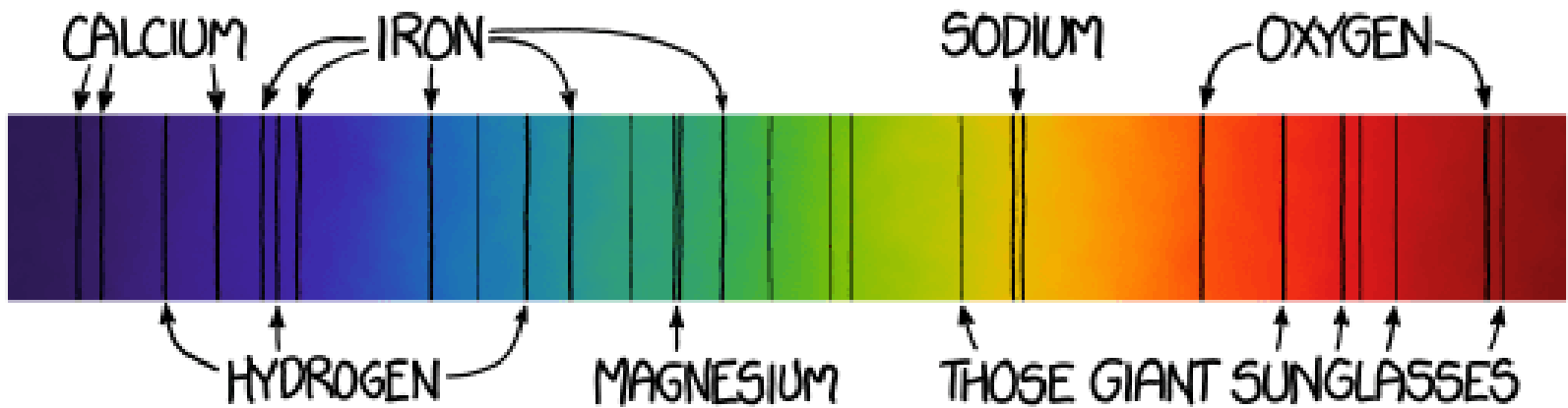


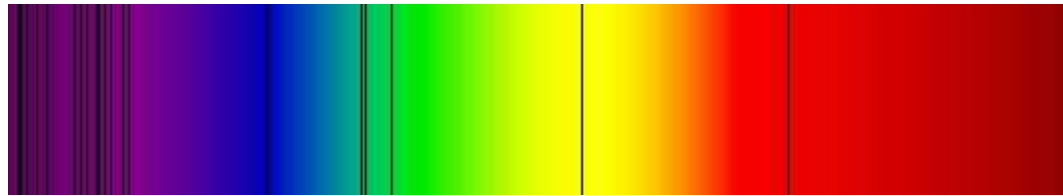


Joseph von Fraunhofer 1814

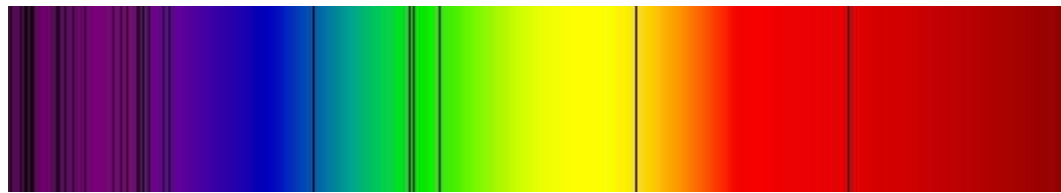


Joseph von Fraunhofer 1814





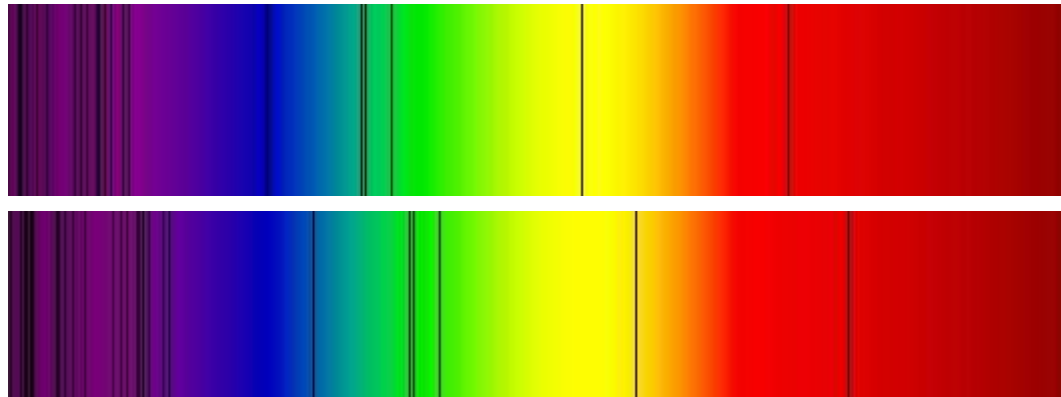
Le Soleil



Une étoile lointaine

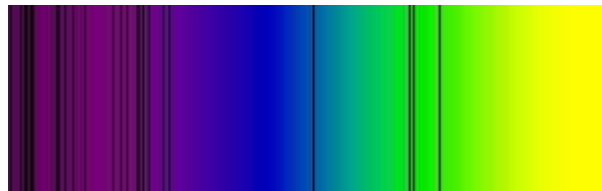
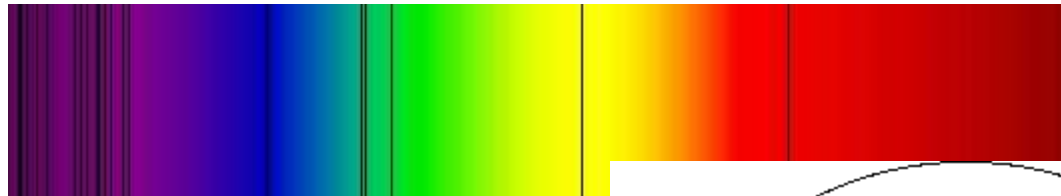


Le Soleil

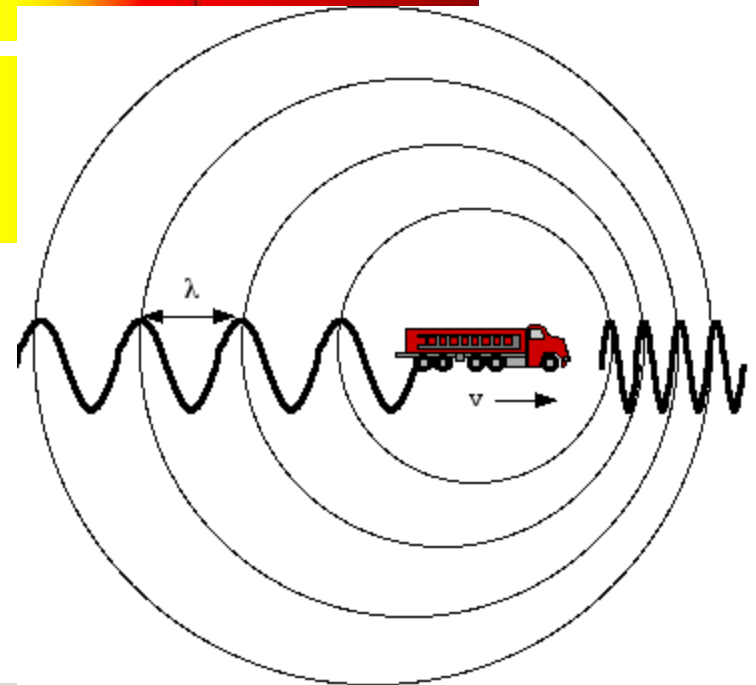


Une étoile lointaine

Le Soleil



Une étoile lointaine





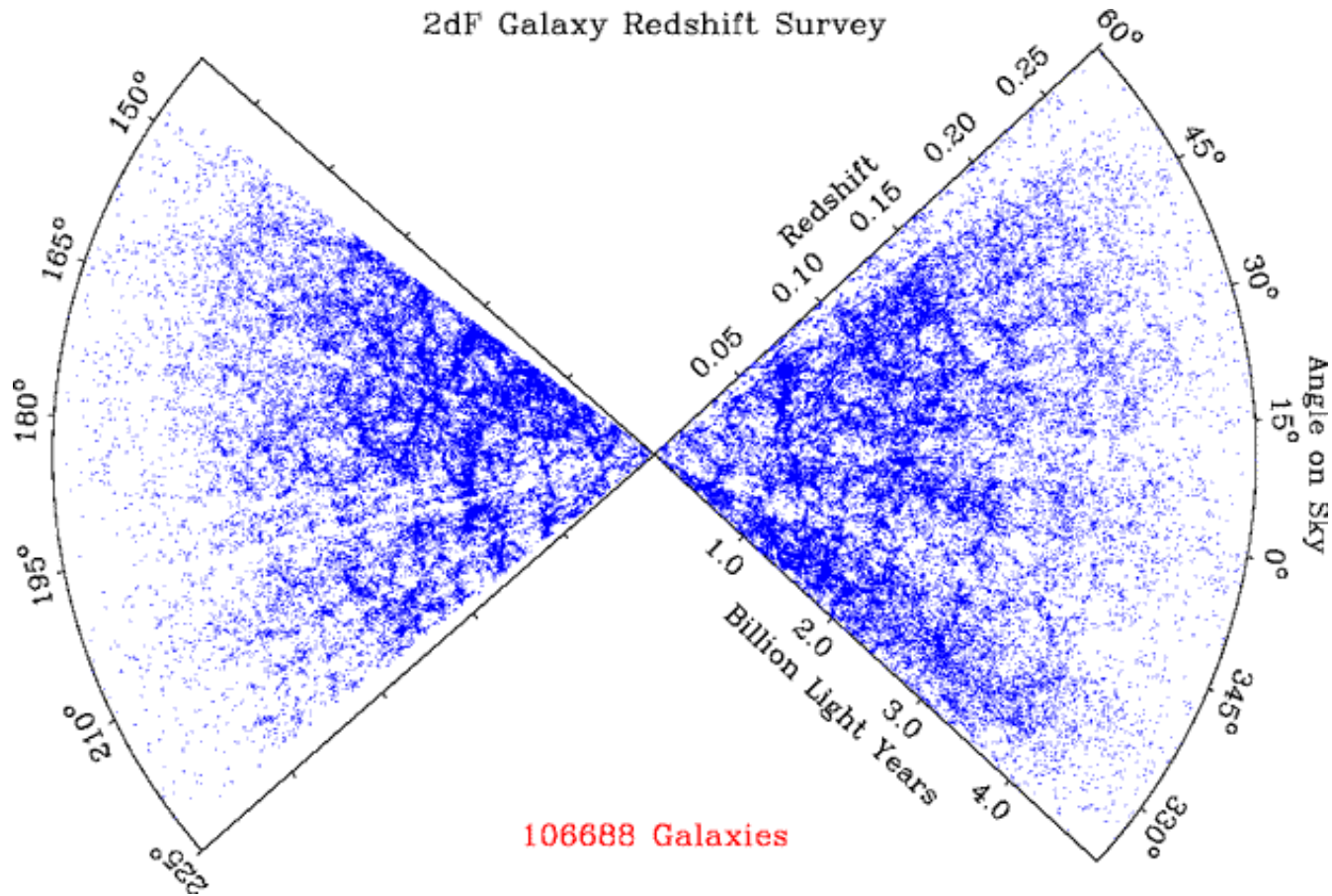
Edwin Hubble  
1889 - 1953

Toutes les galaxies s'éloignent  
Vitesse = constante  $\times$  distance



Observatoire  
du mont Wilson

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



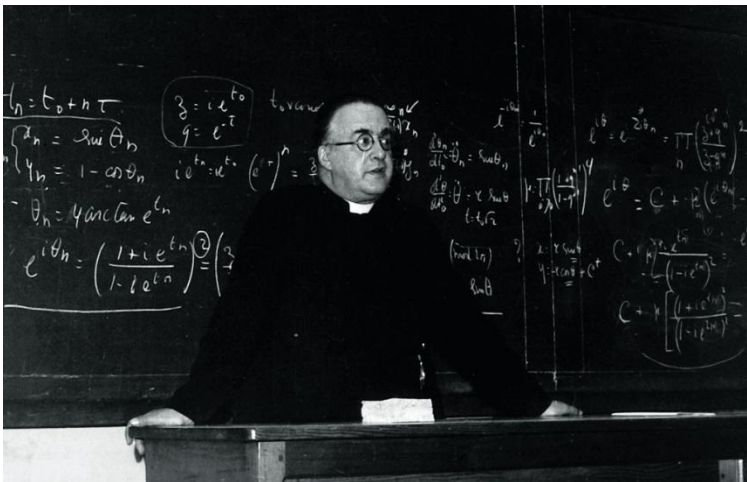


Edwin Hubble  
1889 - 1953

Toutes les galaxies s'éloignent  
Vitesse = constante x distance



Observatoire  
du mont Wilson



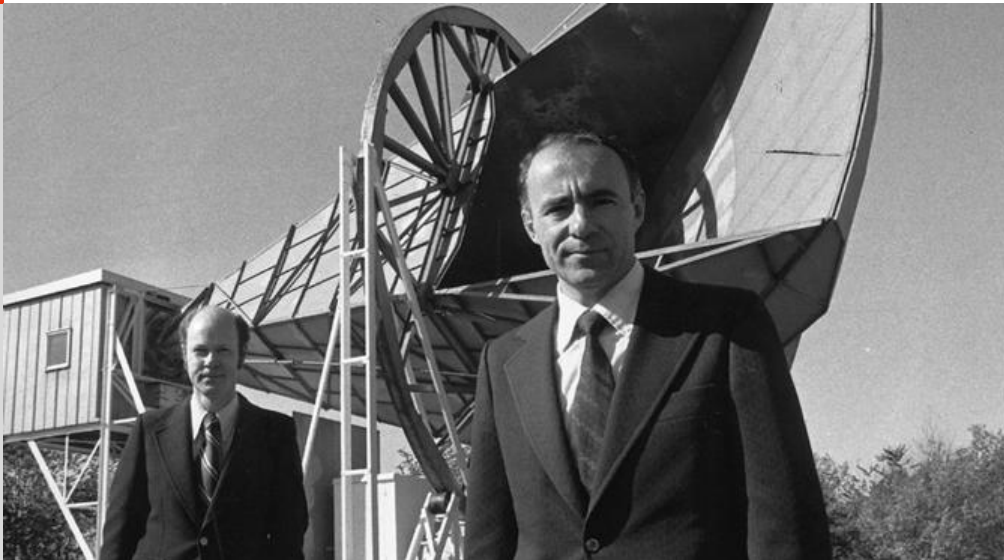
George Lemaitre  
1894 - 1966

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

Quiz: Quel est l'âge de l'Univers ?

Un peu plus tard, au début des années 60 ....

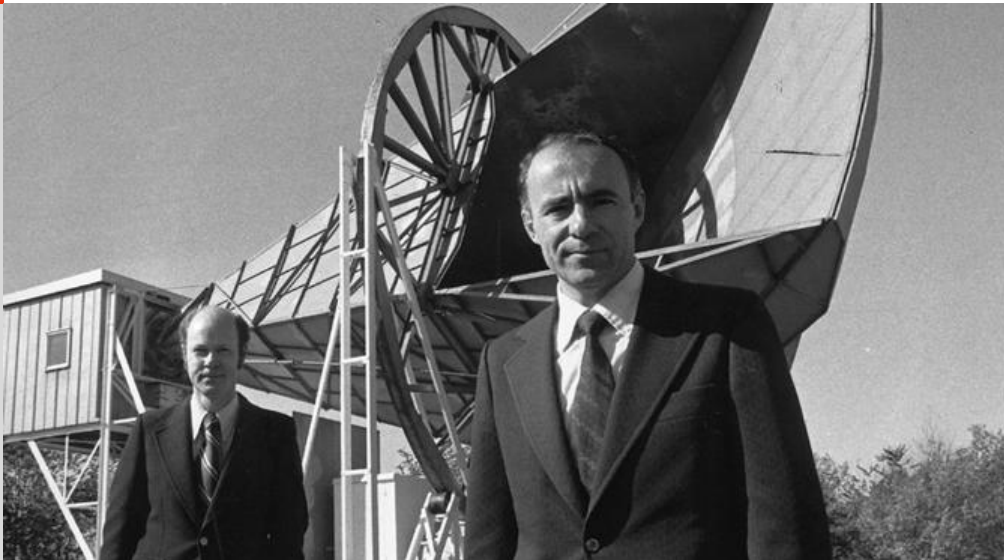
Arno Penzias et Robert Wilson  
Des parasites dans un des premiers  
systèmes de telecom. satellite.



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



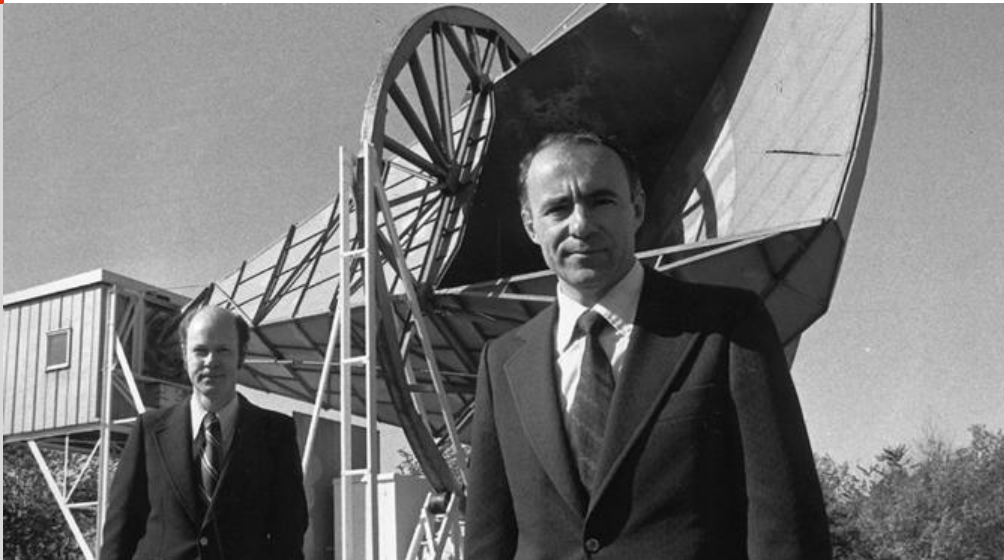
Un peu plus tard, au début des années 60 ....

*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

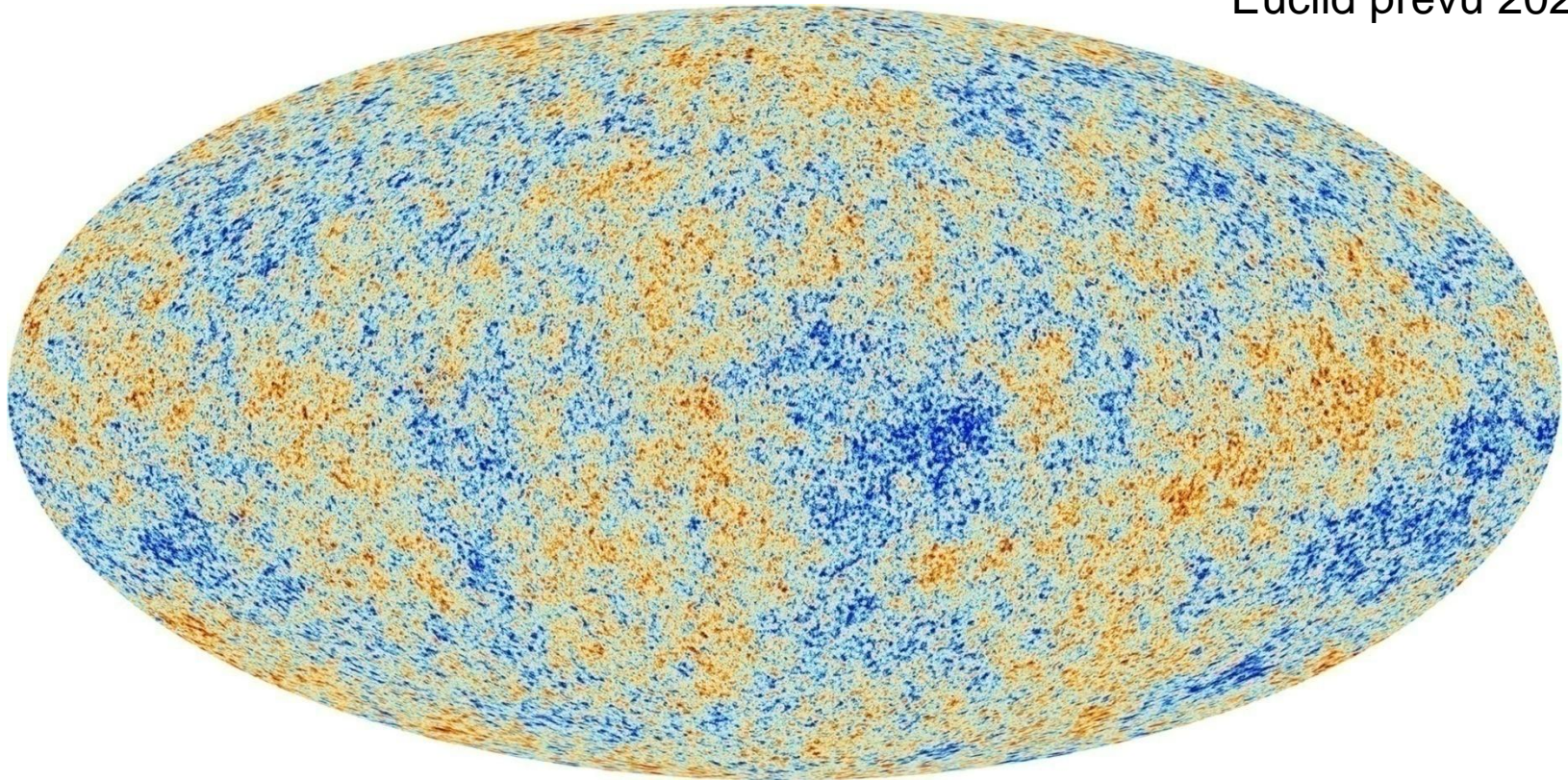
## Satellites

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

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

Changement de vitesse = force divisée par masse

$$\frac{\partial \rho'}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho' \mathbf{u}') = 0$$

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

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

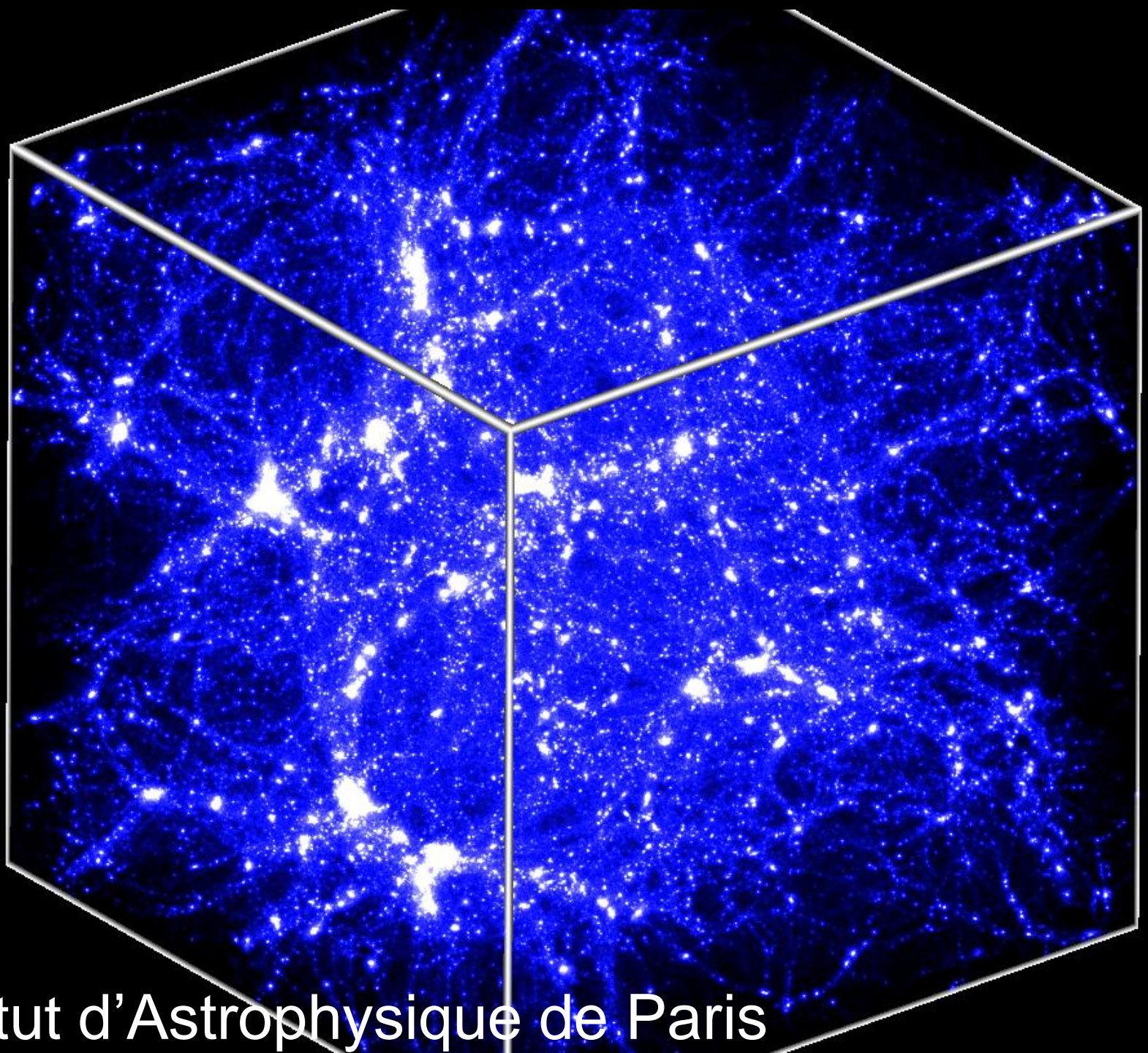
Ce qui reste = ce qui rentre moins ce qui sort

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

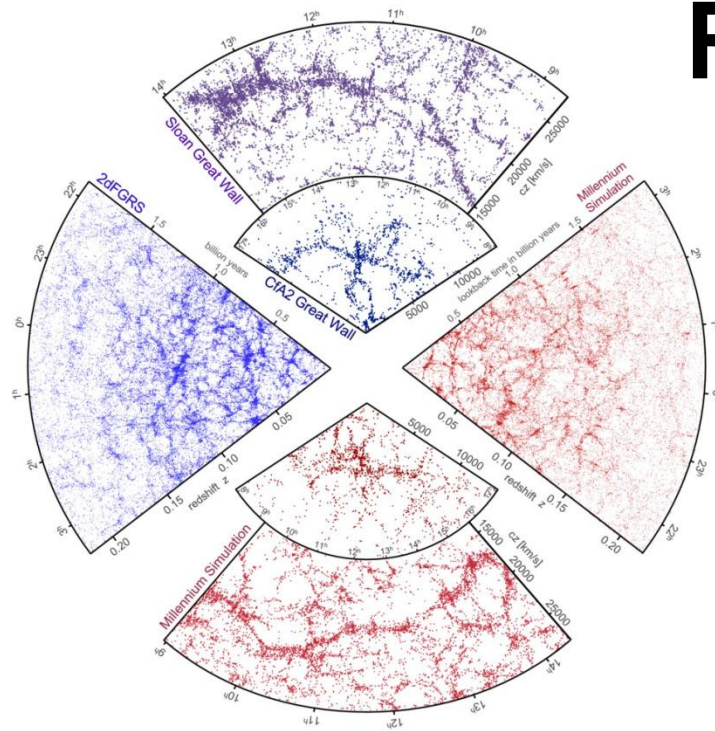
# Des grandes questions...

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

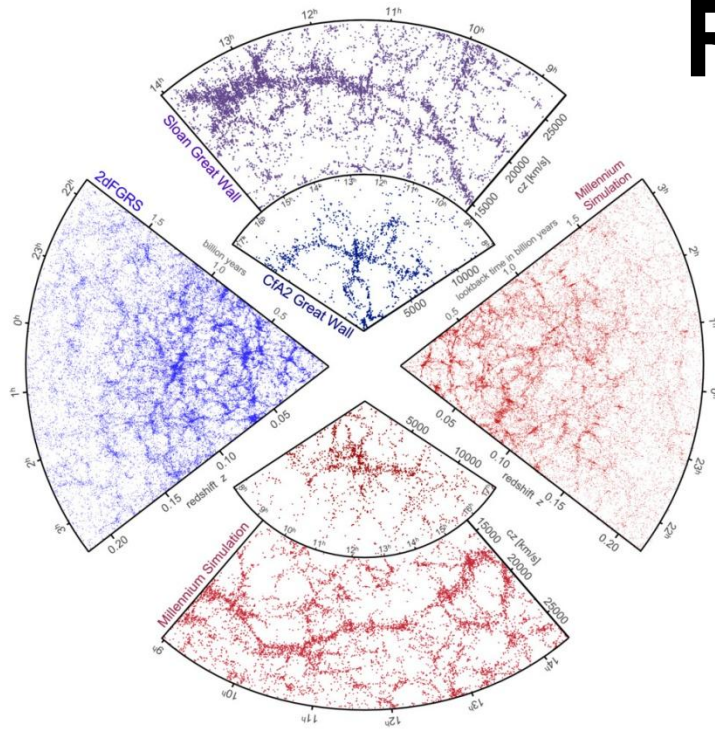
# Remonter le temps



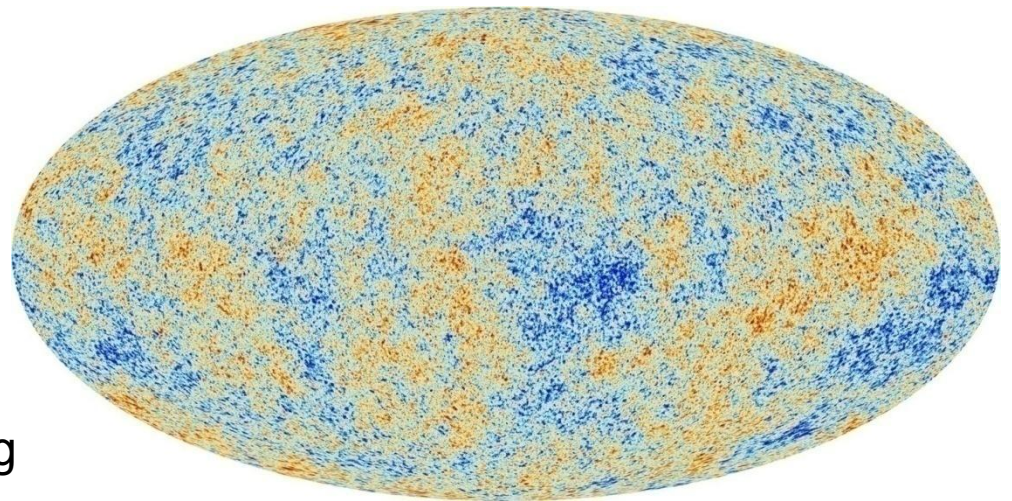
Carte 3D du cosmos  
Campagnes d'acquisition  
"décalage vers le rouge"

# 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*

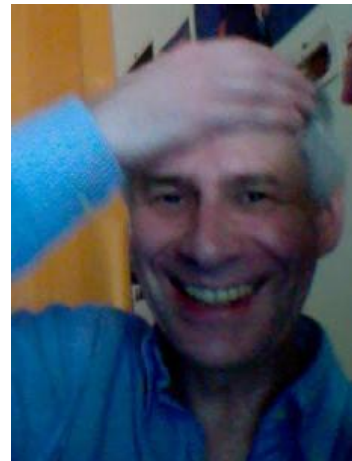
La physique, les maths et l'informatique



Roya Mohayaee



Sebastian  
von Hausegger



Yann Brenier



Quentin Mérigot

Le transport optimal

# Remonter le temps

*Le calcul impossible*

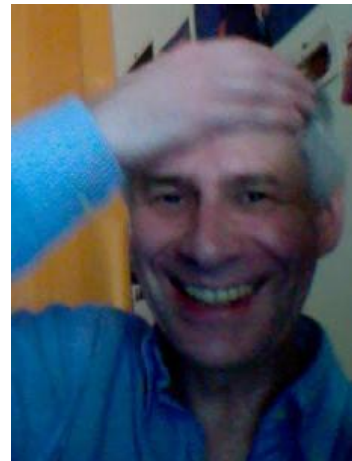
La physique, les maths et l'informatique



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 Mohayaee



Sebastian  
von Hausegger



Yann Brenier



Quentin Mérigot

Le transport optimal



Bruno L.

# Remonter le temps

L'institut d'astrophysique de Paris

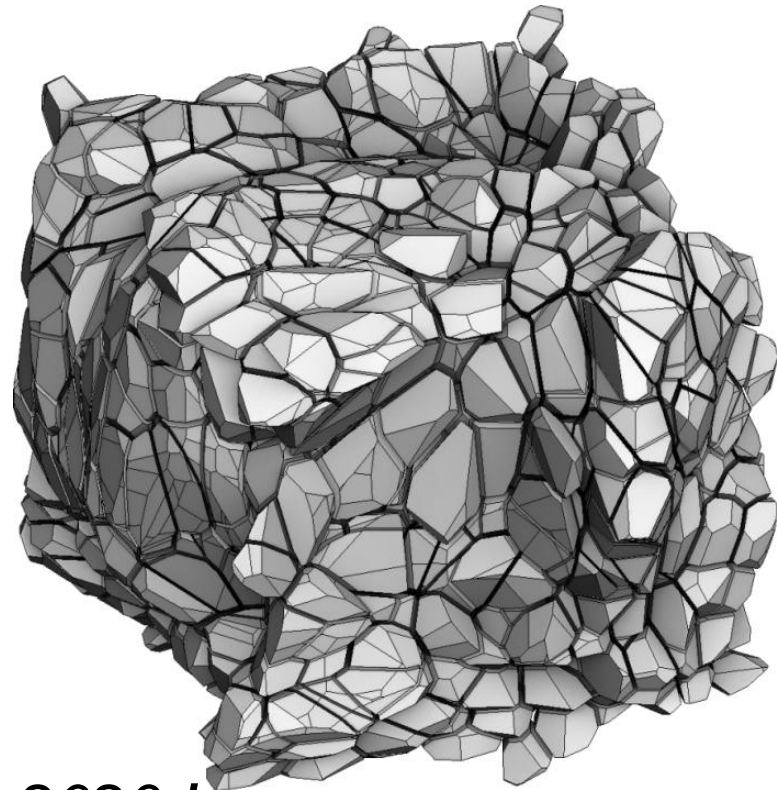
Créer un *langage commun* entre  
la **physique**,  
les **maths** et  
l'**informatique**

2015 ...

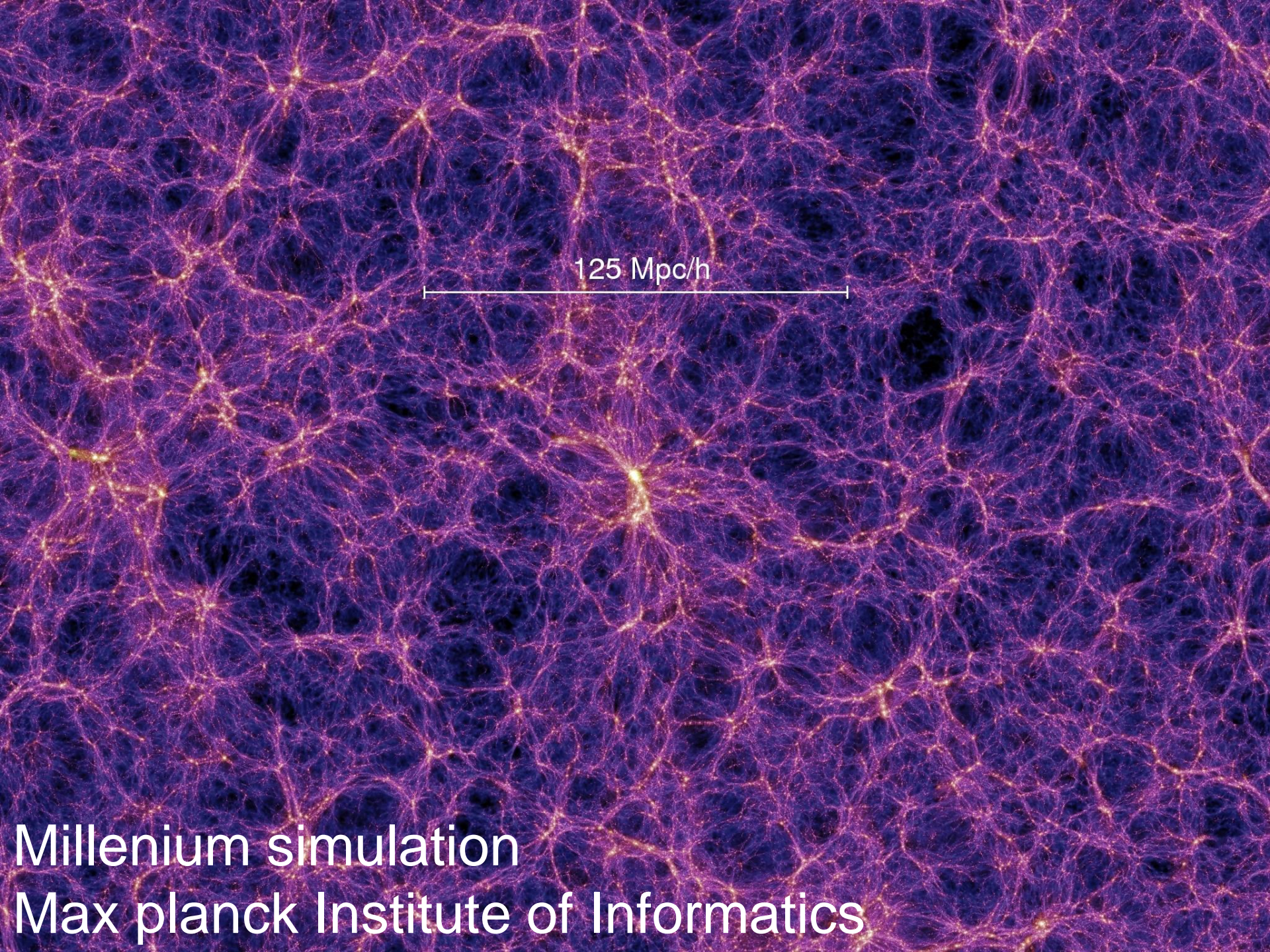


# Remonter le temps

L'institut d'astrophysique de Paris

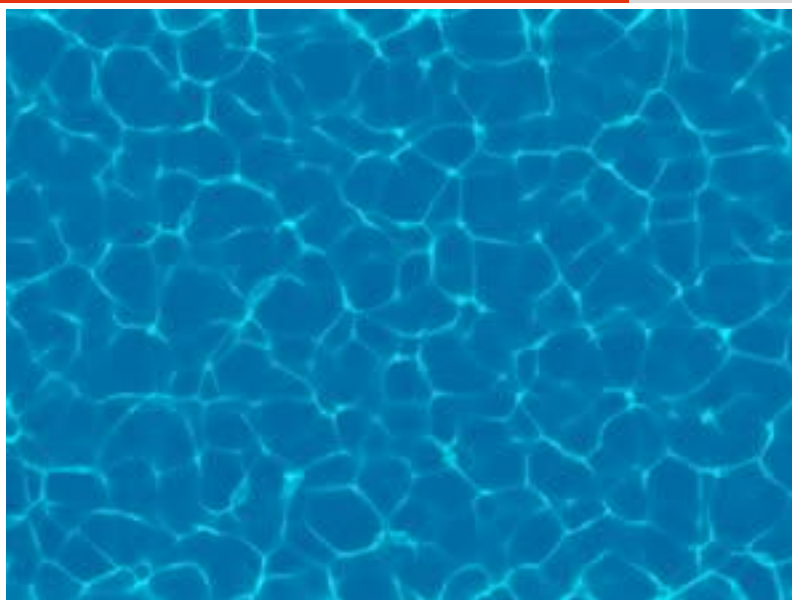


2020 !



125 Mpc/h

Millenium simulation  
Max planck Institute of Informatics




*Íria*

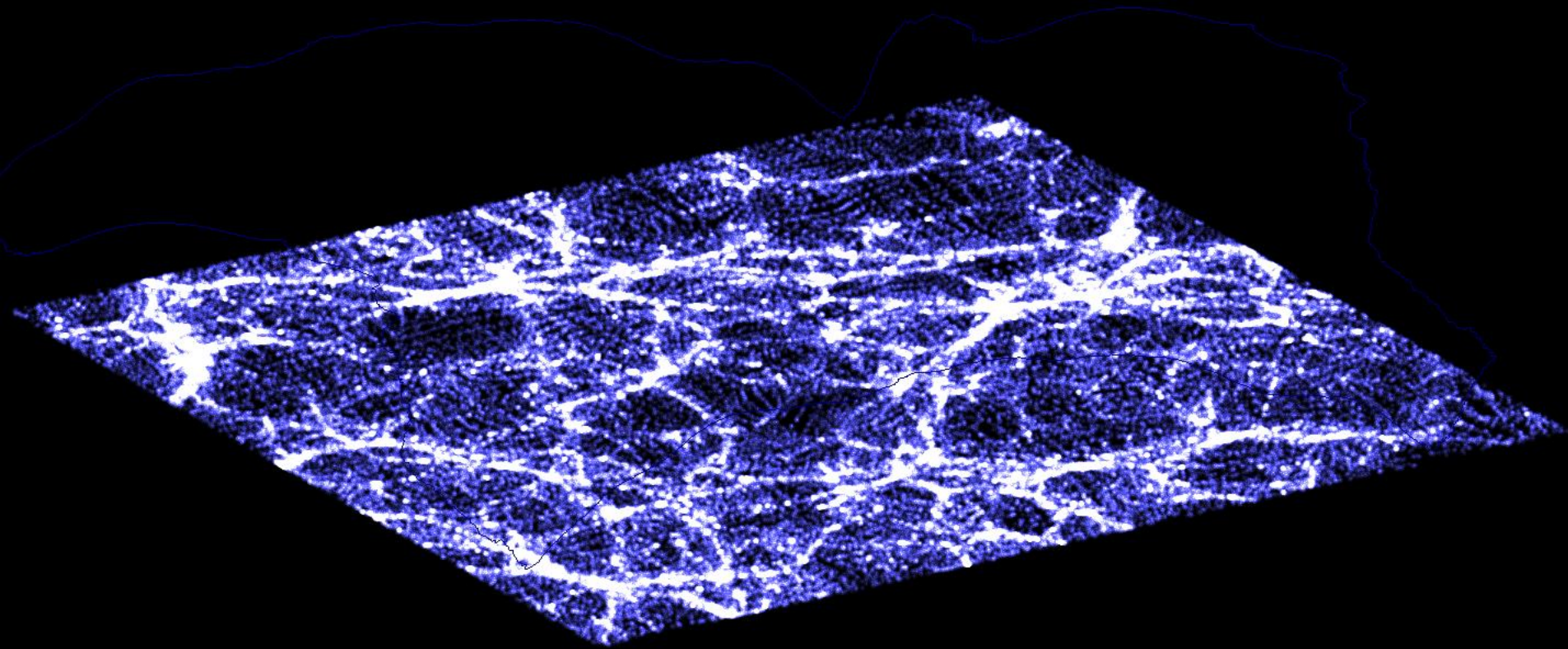


Changement de vitesse = force divisée par masse

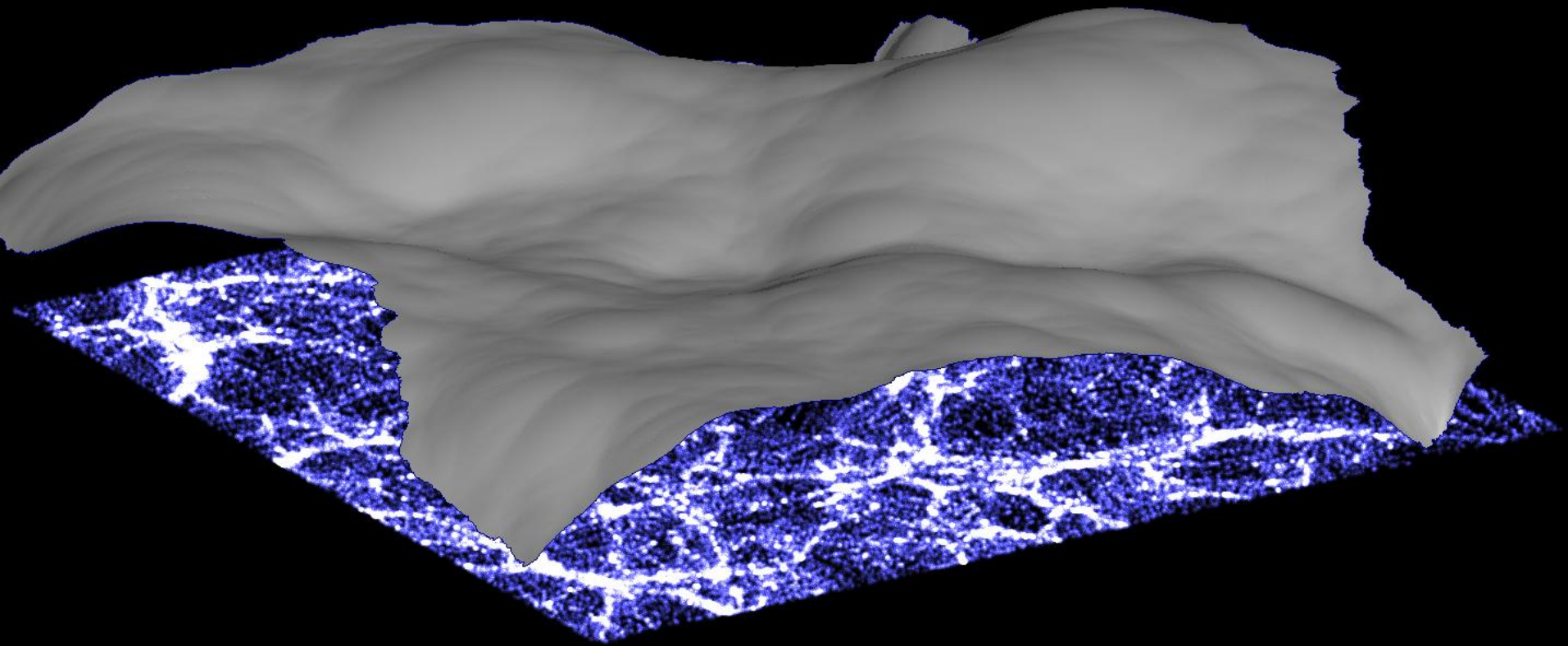
Ce qui reste = ce qui rentre moins ce qui sort

La force de gravité est la “**pente**” d’une  
“**montagne**” ( ou encore de la “surface de l’eau” )

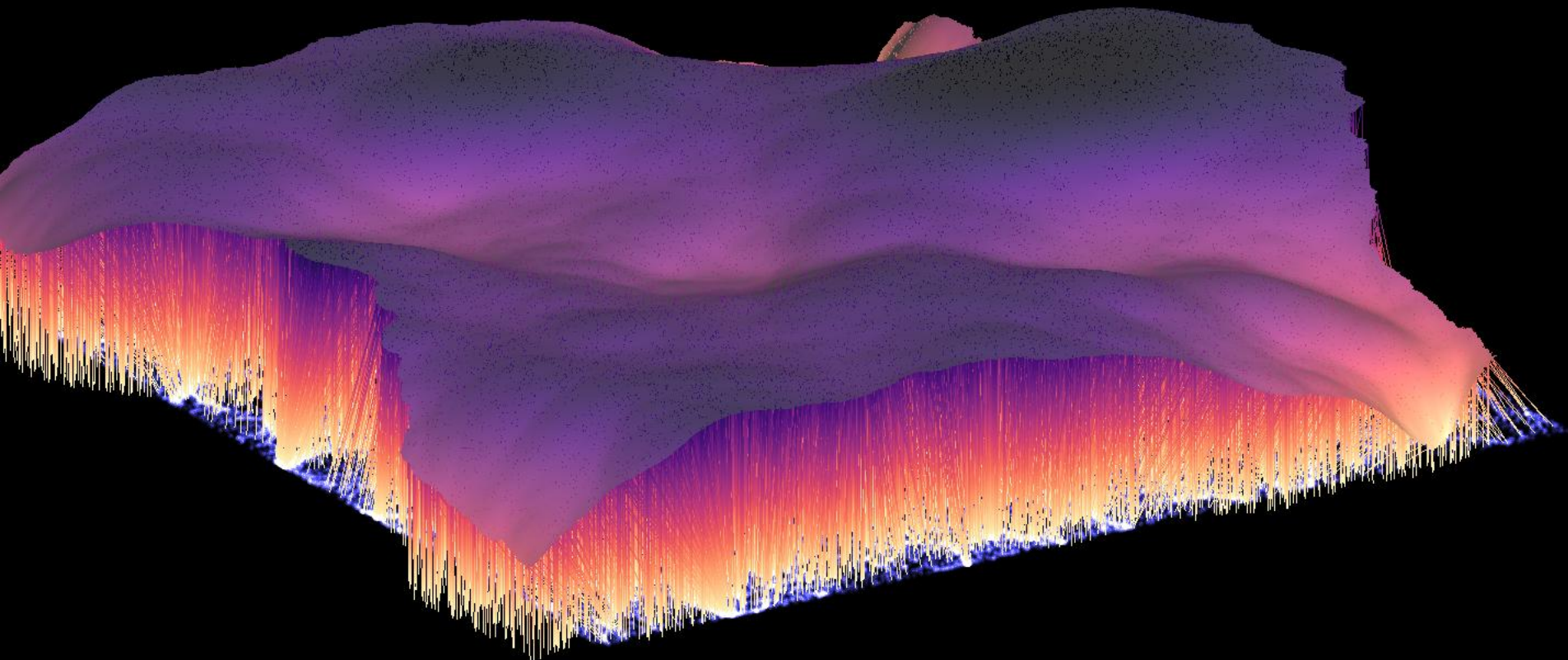
C’est ça qu’on calcule,   
(qui s’appelle le *potentiel gravitationnel*)



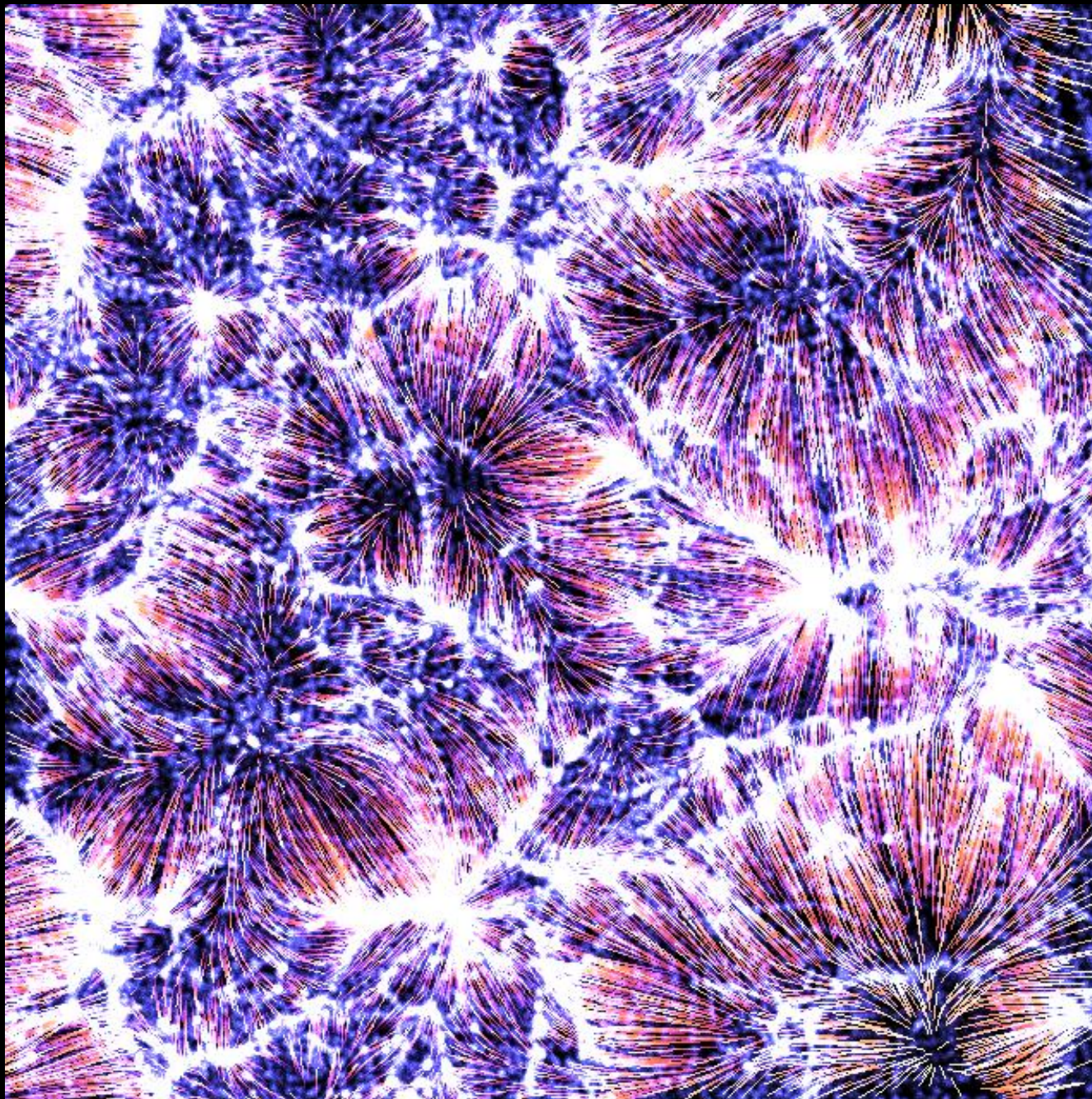
Une “piscine cosmique” en 2D



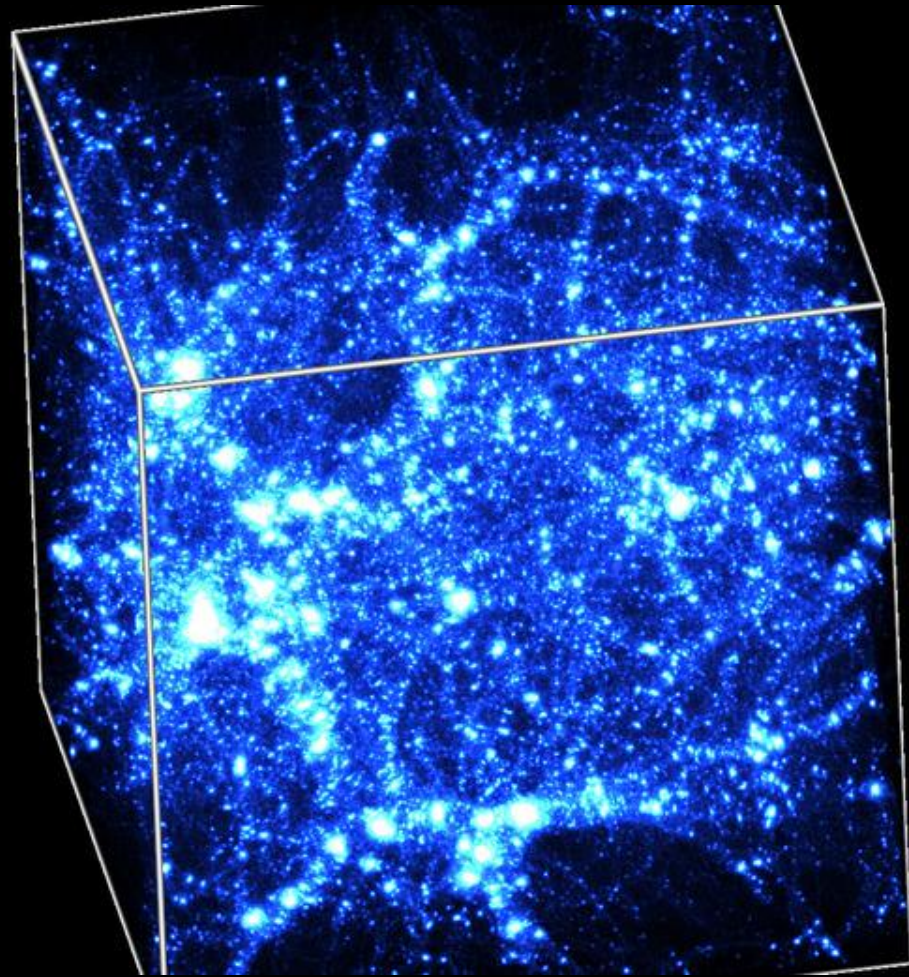
Une “piscine cosmique” en 2D



Une “piscine cosmique” en 2D

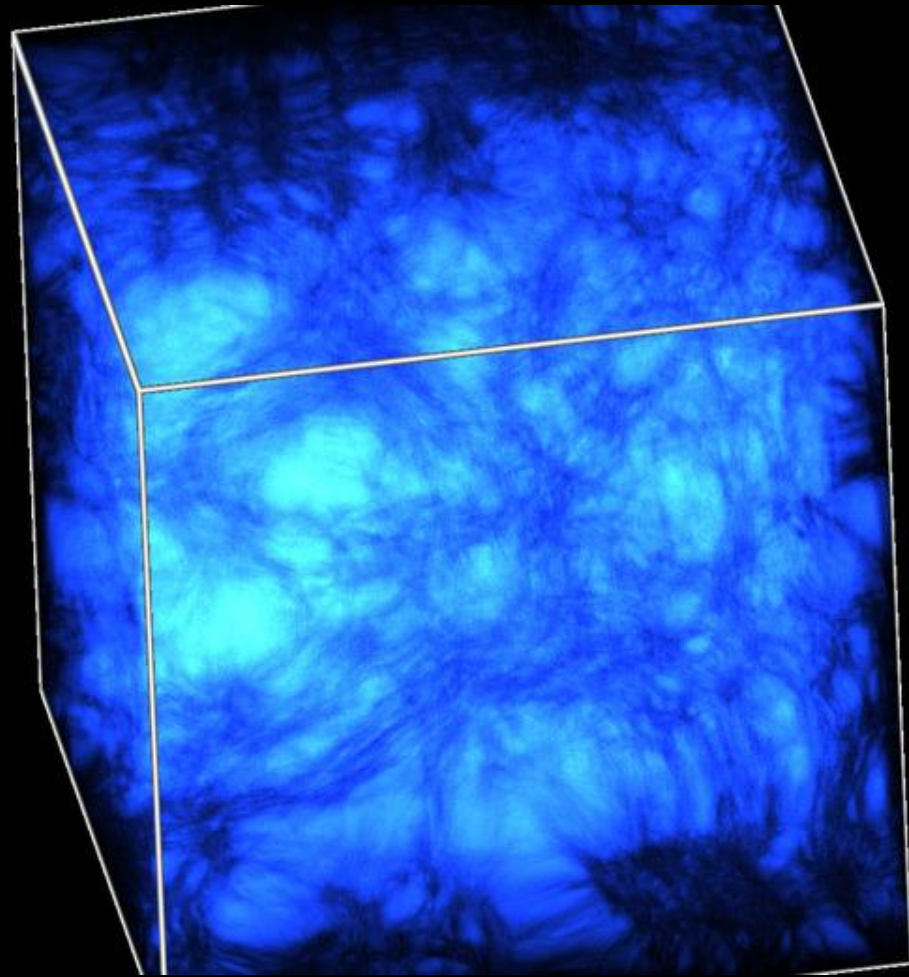


# *Simulation numérique 3D*



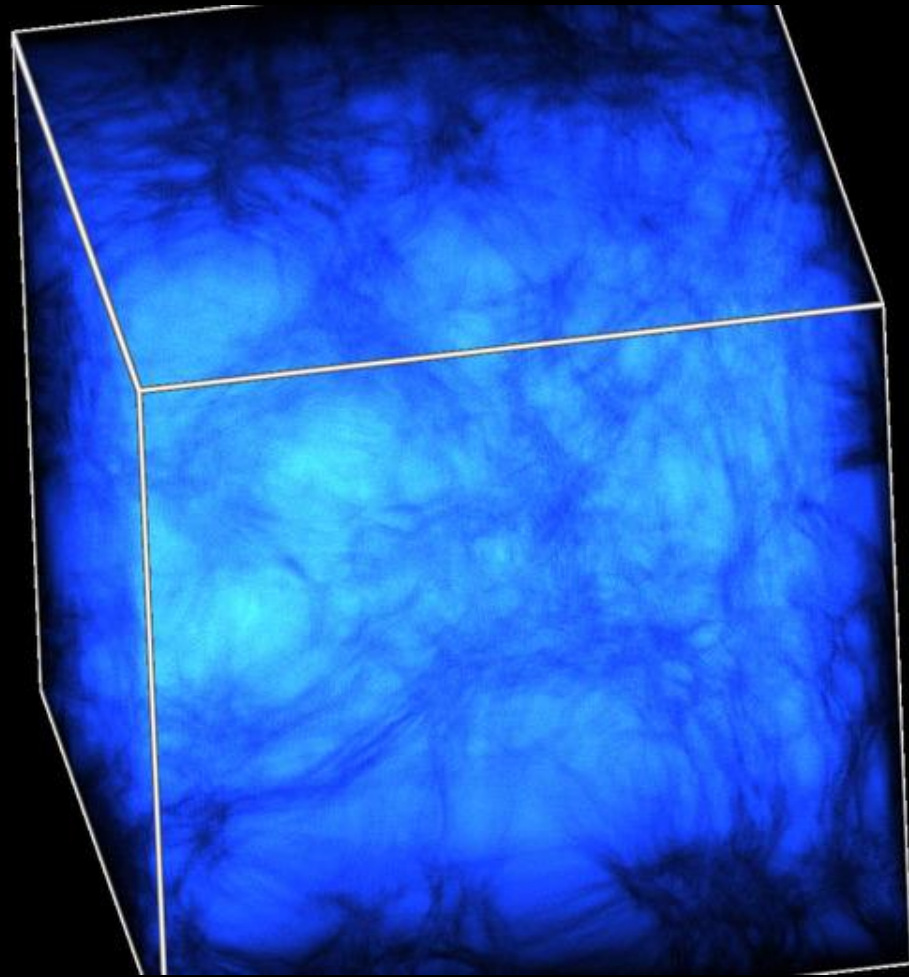
+ 13.7 milliards d'années (maintenant)

# *Simulation numérique 3D*



+ 6 milliards d'années

# *Simulation numérique 3D*



+ 380 000 ans



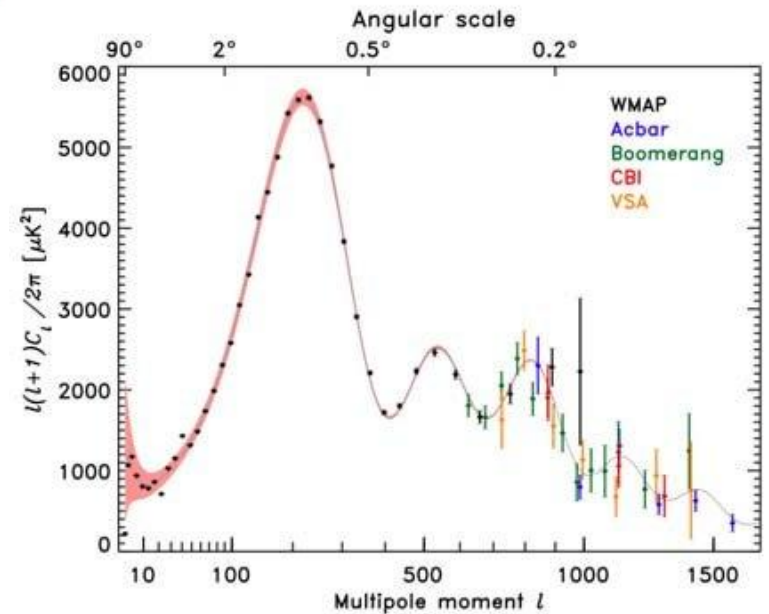
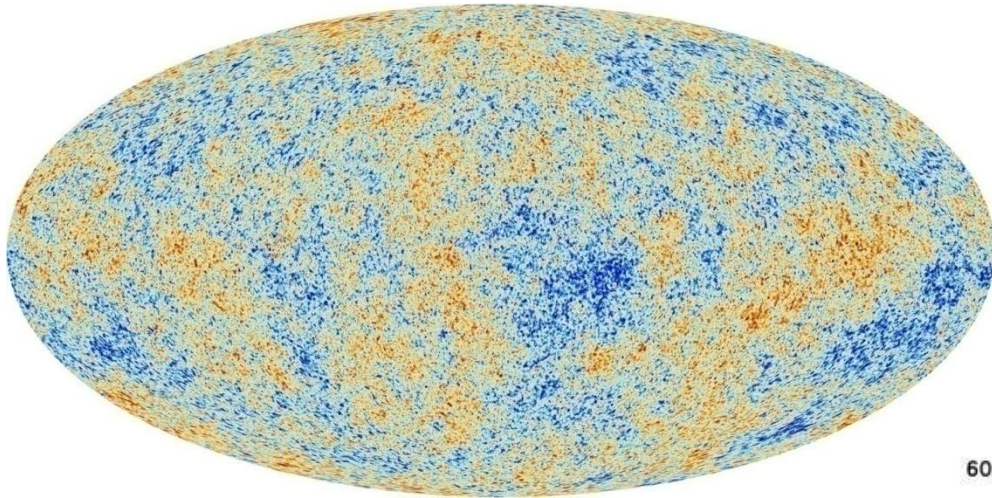
# 05

## Epilogue De la musique encore...

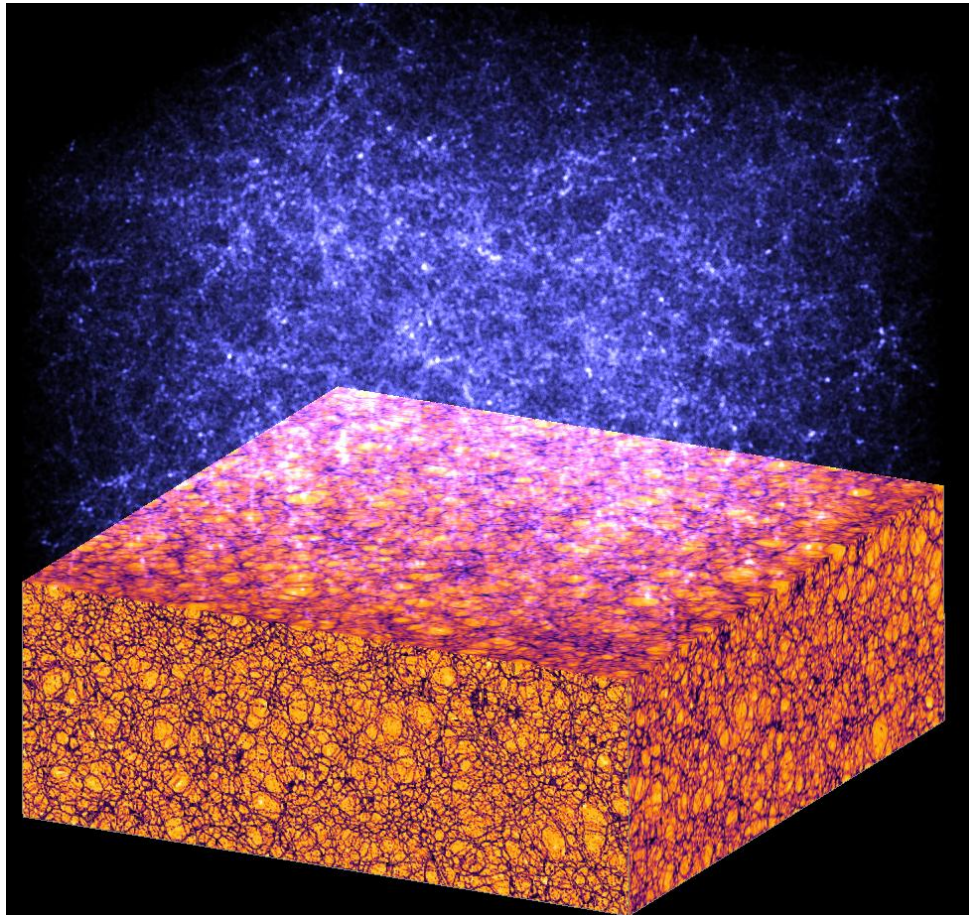
# Des vagues dans le cosmos ...

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

# Des vagues dans le cosmos ...

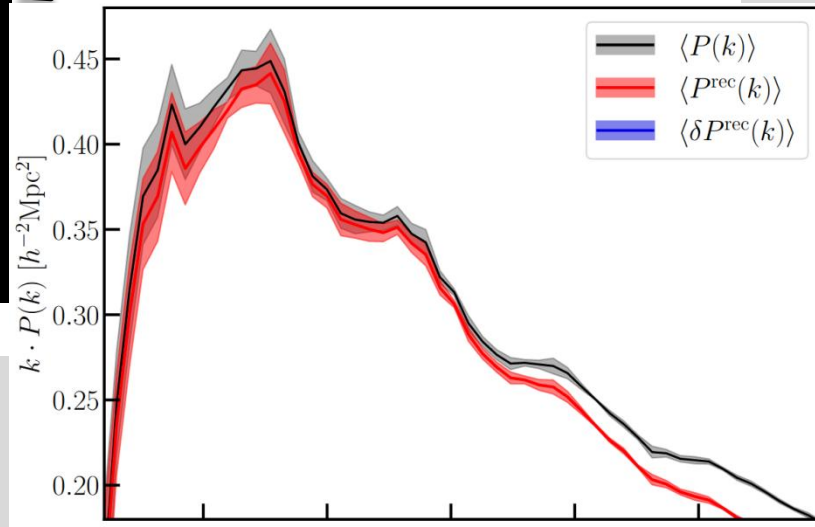


# Des vagues dans le cosmos ...



Simulation

État initial calculé





One can also obtain the momentum equation by minimizing the following action integral (Appendix D):

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

subject to mass conservation (2), to the continuity potential (3) and to the boundary conditions

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

**MERCI**

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

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

```

    compute() {
        ...
        double> pk(n_);
        double> gk(n_);
        ...
        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);
    }

```