

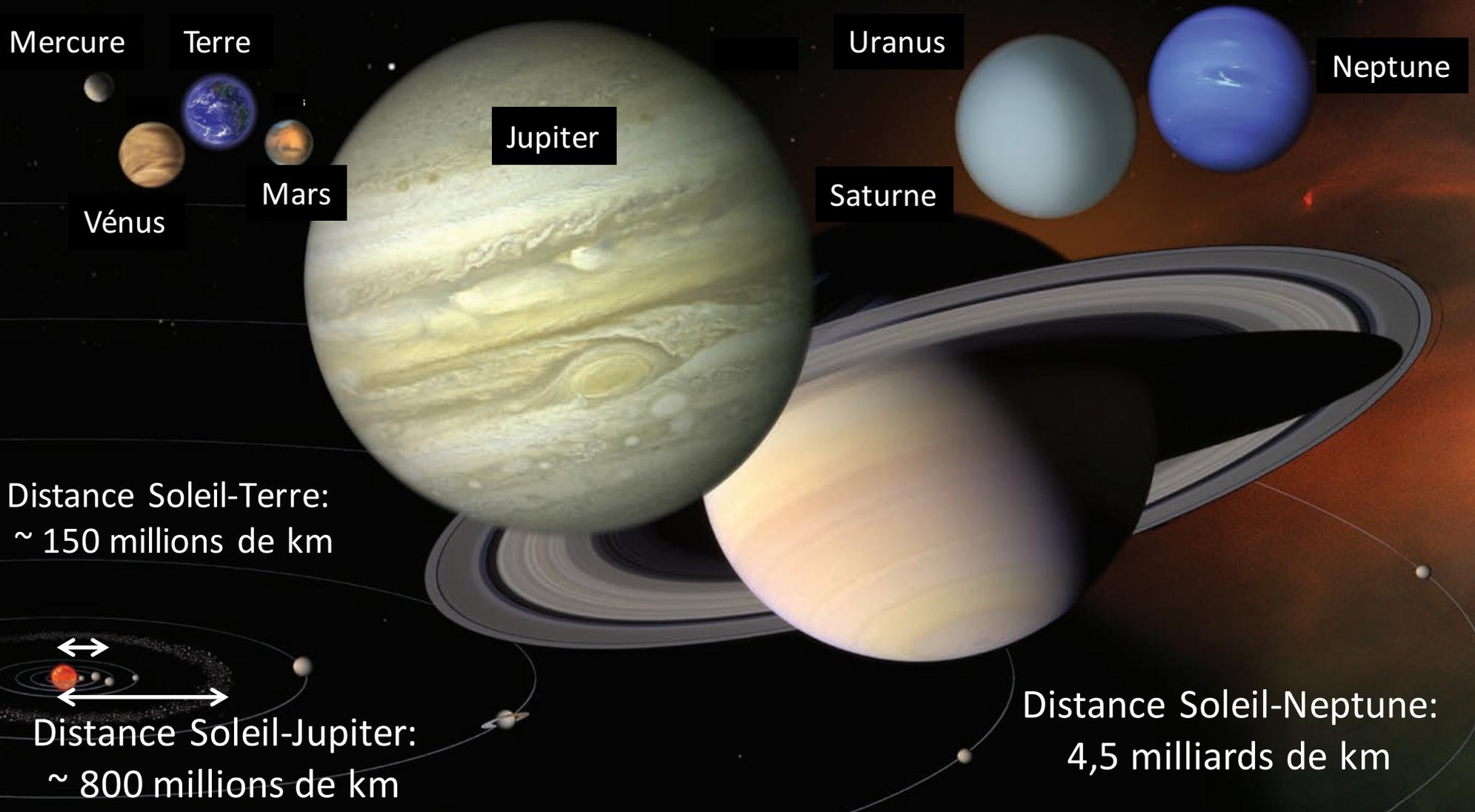
Les modèles d'Univers

André Füzfa
Université de Namur



C'est quoi "l'Univers"?

Le système solaire

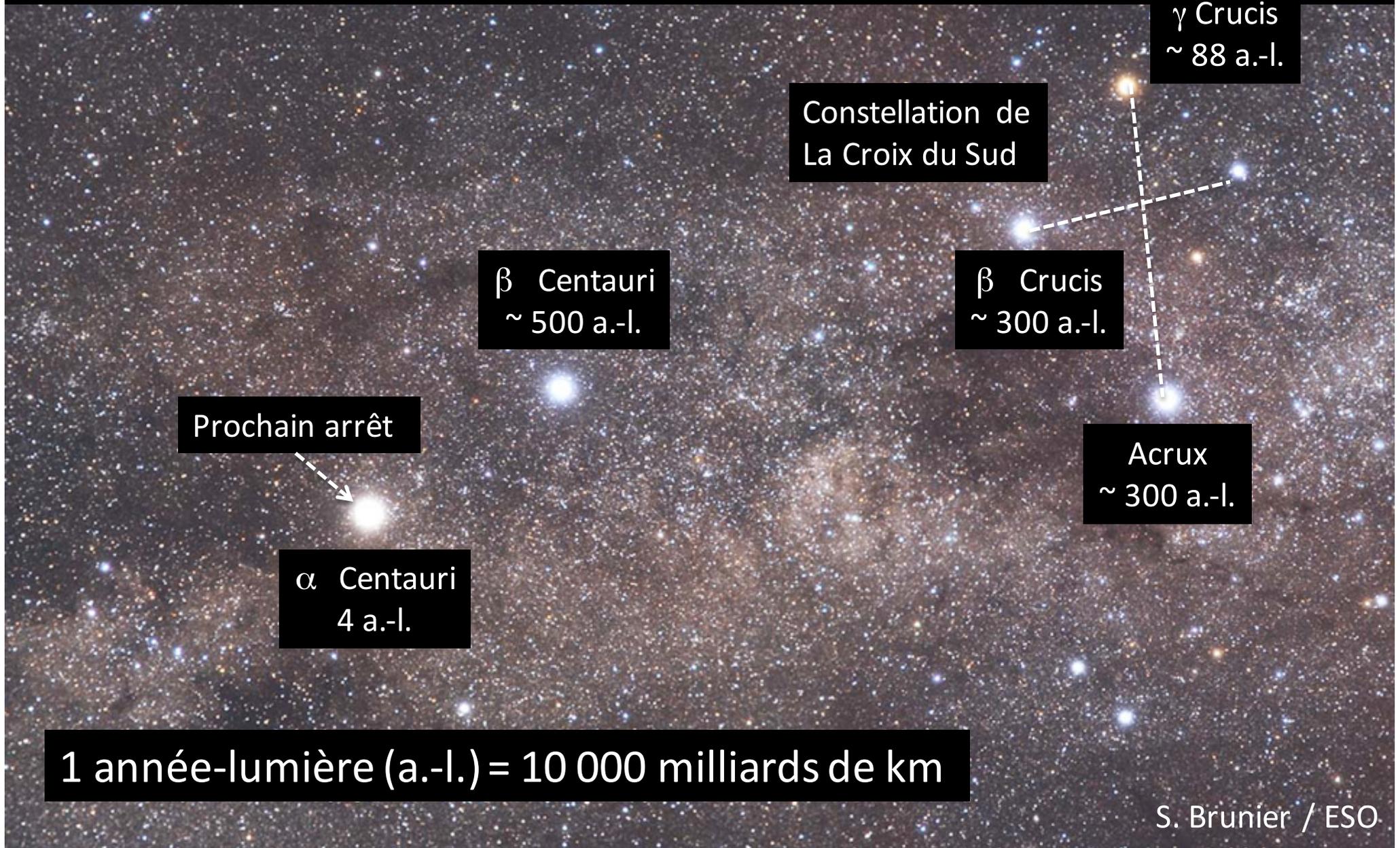


L'étoile la plus proche: le Soleil

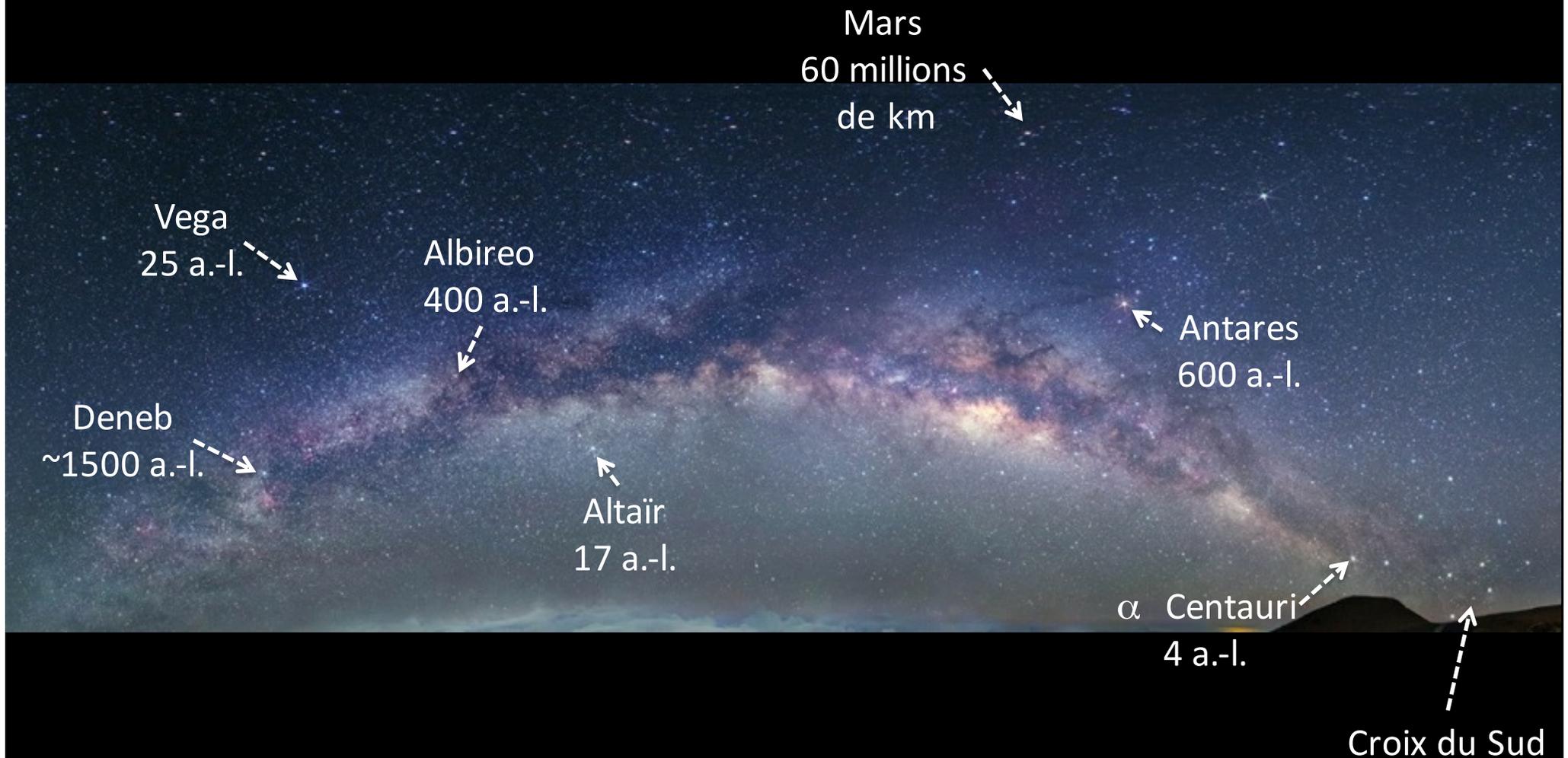


Source : A. Füzfa
<http://astrocampus.unamur.be>

Les étoiles sont aussi des soleils



Panorama sur la Voie Lactée



1 année-lumière (a.-l.) = 10 000 milliards de km

La Voie Lactée, notre galaxie

Distance Soleil- Centre de la galaxie:
~ 25 000 a.-l.

Diamètre: environ 100 000 a.-l.

Plus de 100 milliards d'étoiles...

**Vous
êtes ici!**

Nébuleuse
d'Orion



Une cousine de la Voie Lactée



NGC 1300: une spirale barrée SBb à 61 millions d'années-lumière dans la constellation de l'Eridan

Source: Hubble Space Telescope

Un amas de galaxies

M86 et M84
60 millions a.-l.

M88

M91

← M87
54 millions a.-l.

M90

L'amas de la Vierge est situé à quelques 60 millions d'a.-l.
et contient environ 2000 galaxies

Source: R.B. Andreo (sur APOD)

Un *superamas* de galaxies

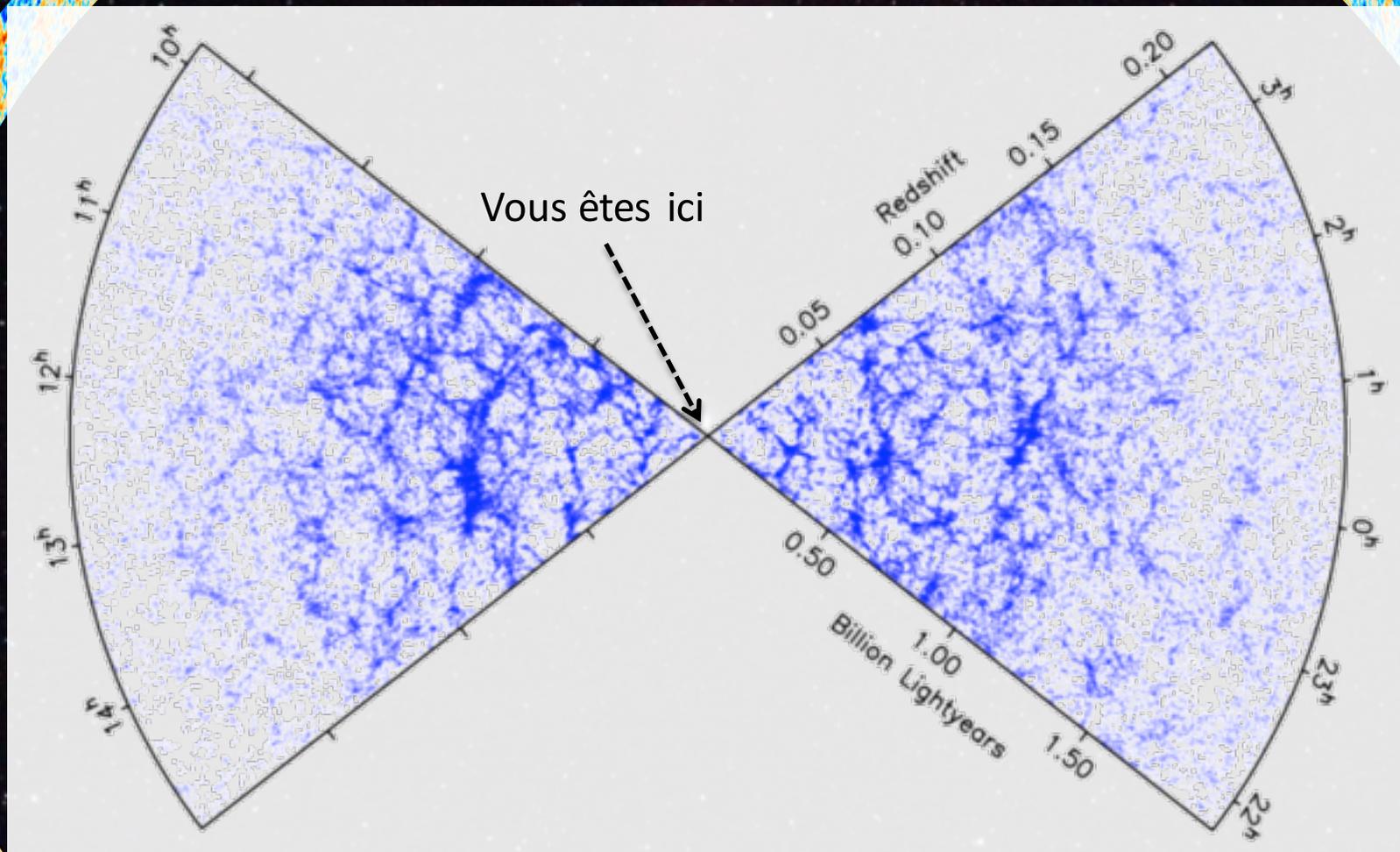


Filament de galaxies
long de 65 millions d'a.l.

Ensemble d'amas de galaxies en collision, situé à une distance de 5 milliards d'années-lumière

Source: ESA/Hubble Space Telescope

L'univers observable



Taille: environ 15 milliards d'années-lumière
soit 10^{26} m

Source: 2DF galaxy survey

The background is a deep black space filled with numerous stars of varying colors and sizes, creating a dense field of light. In the upper right corner, there is a bright yellow diagonal stripe that cuts across the frame. The text is centered in the middle of the image.

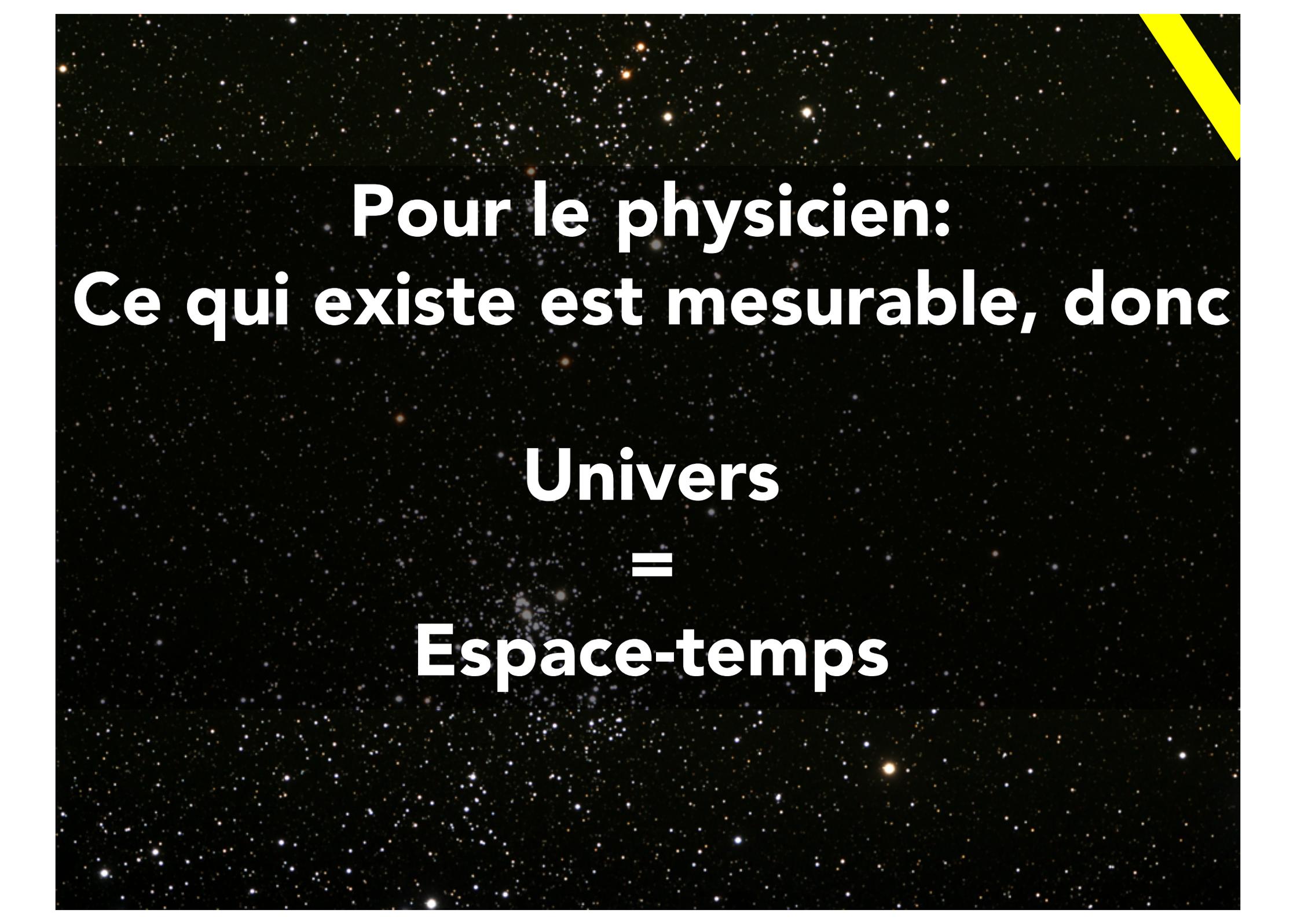
**L'univers observable
est-il tout l'Univers?**



**Larousse:
Univers**

=

ensemble de tout ce qui existe



**Pour le physicien:
Ce qui existe est mesurable, donc**

**Univers
=
Espace-temps**



C'est quoi "l'espace-temps"?

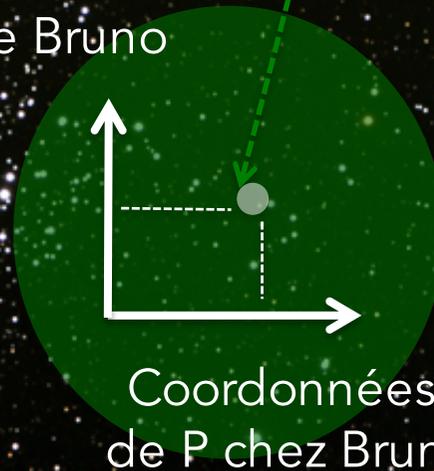
L'espace-temps est un objet mathématique!

« espace abstrait »

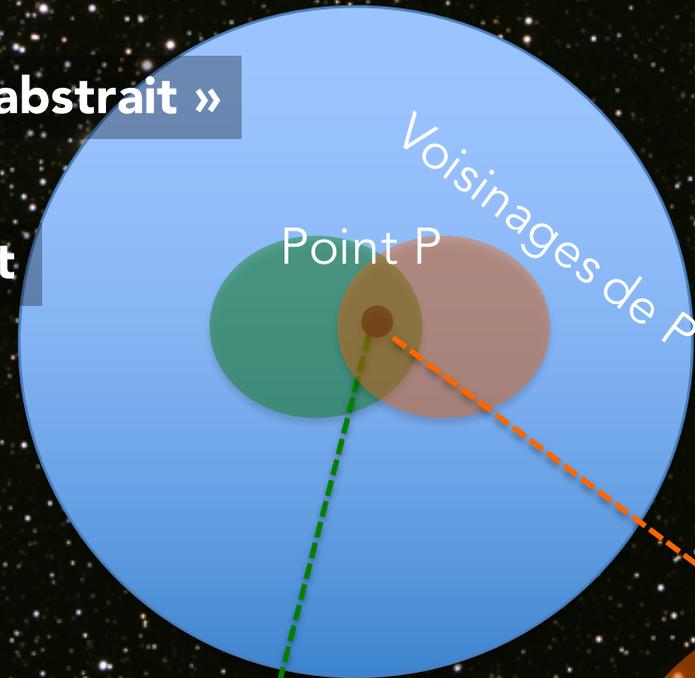
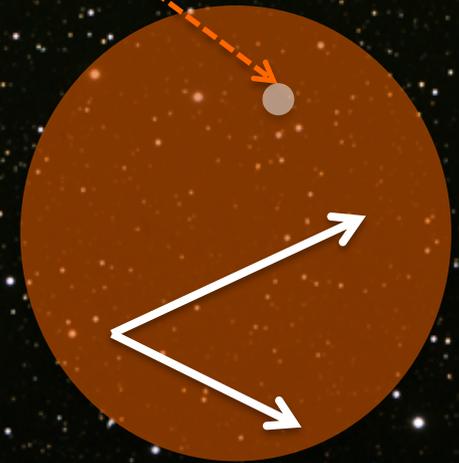
Point de l'espace-temps = évènement

Quatre coordonnées : $P \sim (ct, x, y, z)$

Carte de Bruno



Carte d'André



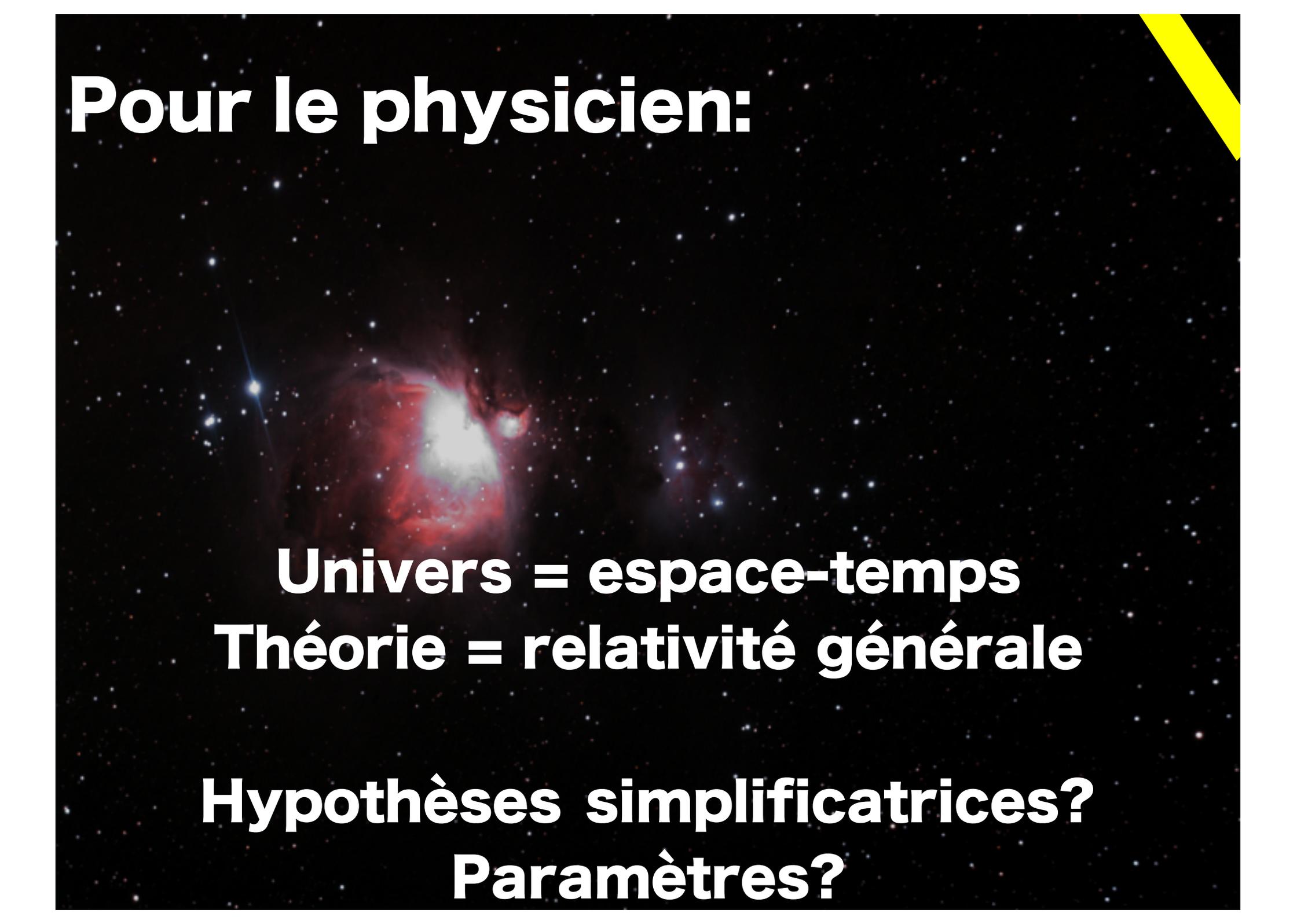
Une infinité de géométries possibles!

Solutions de l'équation d'Einstein de la Relativité Générale

GEOMETRIE = MATIERE

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$





Pour le physicien:

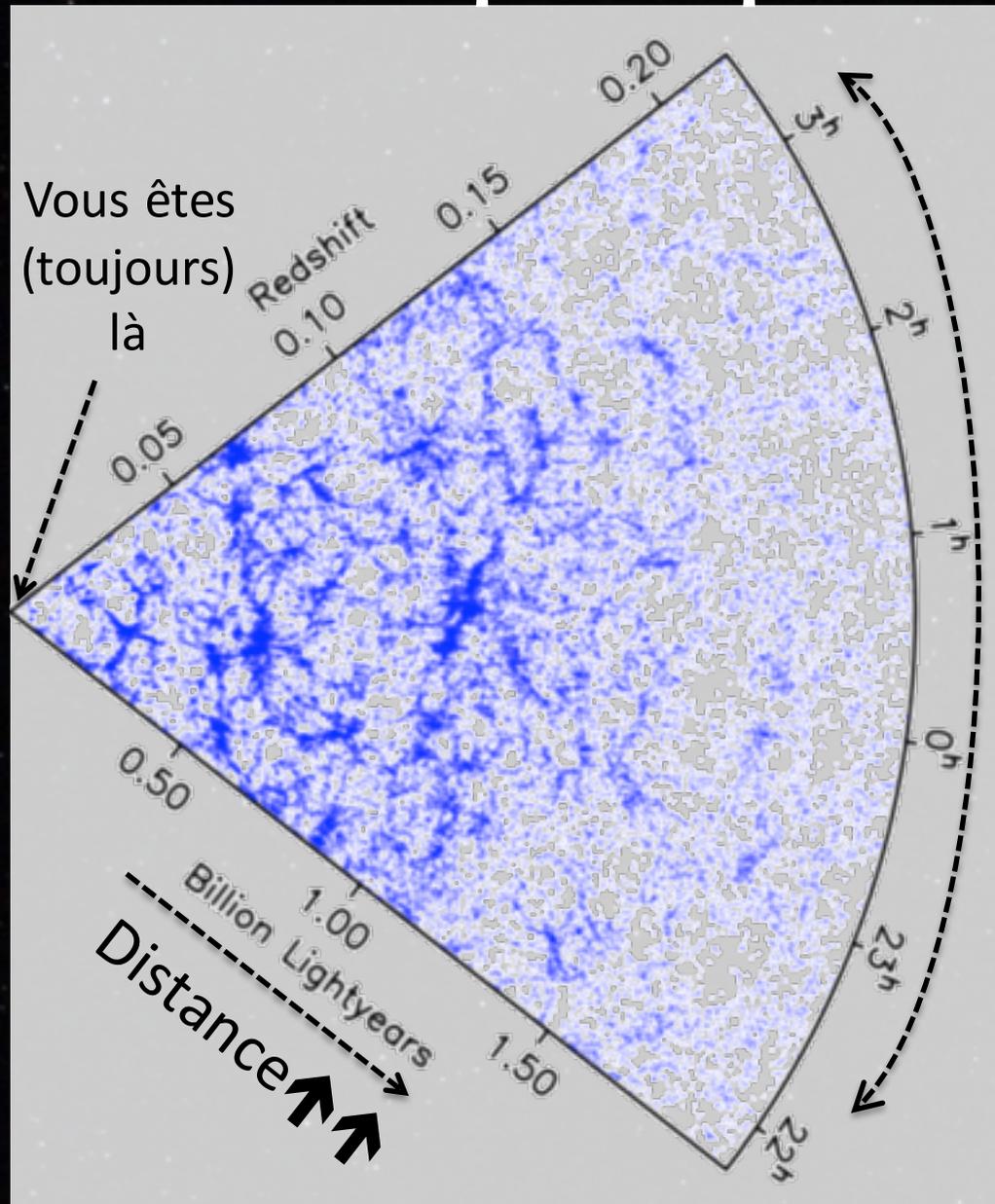
Univers = espace-temps

Théorie = relativité générale

Hypothèses simplificatrices?

Paramètres?

Hypothèse: le principe cosmologique



Source: 2DF galaxy survey

1. Isotropie:
l'Univers à grande échelle est identique dans toutes les directions

2. Principe de Copernic:
Nous n'occupons pas une place privilégiée dans le cosmos

Isotropie + Copernic
=> homogénéité

Quelle est la forme de l'Univers?



**Quelle géométrie est compatible
avec le principe cosmologique?**

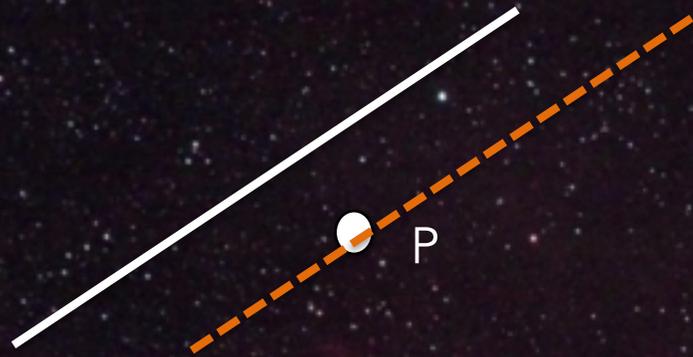
Il n'y en a que trois...



Photo: Wang Letian (APOD)

Le cinquième postulat d'Euclide

Il existe une et une seule droite passant par un point donné et parallèle à une droite donnée



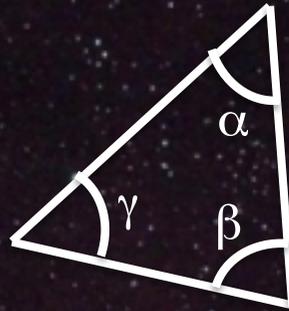
→ *Impossible à déduire comme une proposition découlant des 4 autres postulats...*

Géométries non-euclidiennes
(XIX^{ème} siècle)



Triangles euclidiens

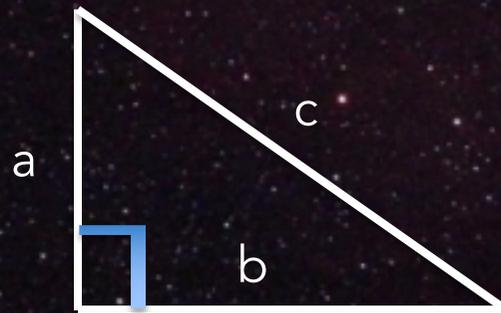
- La somme des angles intérieurs d'un triangle vaut 180°



$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$$

- Triangle rectangle:

Le carré de l'hypoténuse vaut la somme des carrés des deux autres côtés



$$c^2 = a^2 + b^2$$



Géométrie elliptique

Postulats d'Euclide

1. Deux points quelconques déterminent une seule « droite »
2. Toute « droite » est infinie
5. Il existe une seule parallèle à une « droite » donnée

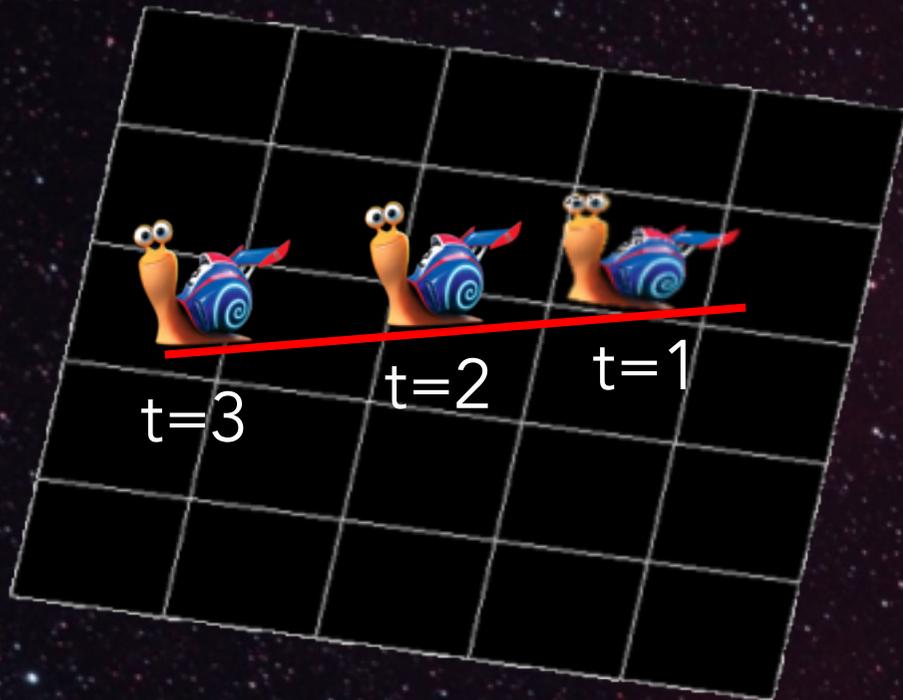
Postulats de Riemann

1. Deux points quelconques déterminent au moins une « droite »
2. Toute « droite » est sans fin, mais de longueur finie
5. Il n'existe aucune parallèle à une « droite » donnée

Modèles à 2 dimensions

Pour Euclide : le plan

Pour Riemann: la sphère



Ligne droite = plus court chemin « Ligne droite » = grand cercle

Ligne droite => Géodésique

Parallélisme en géométrie elliptique



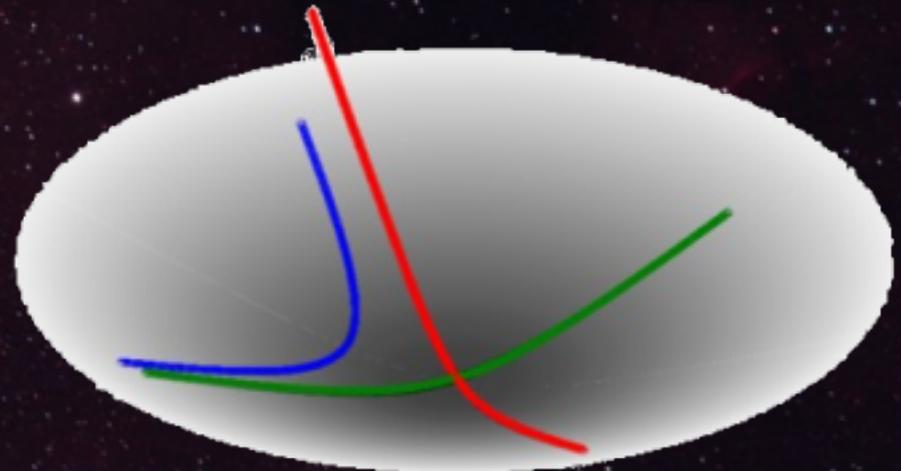
Il n'existe aucune parallèle à une « droite » donnée :

il n'existe aucun grand cercle sans intersection avec un grand cercle donné

Géométrie hyperbolique

● Variante du 5^{ème} postulat:

Pour tout point P et toute « droite » d, il existe une infinité de « droites » parallèles à d passant par P



2 « droites » parallèles
à une même troisième
au même point!!

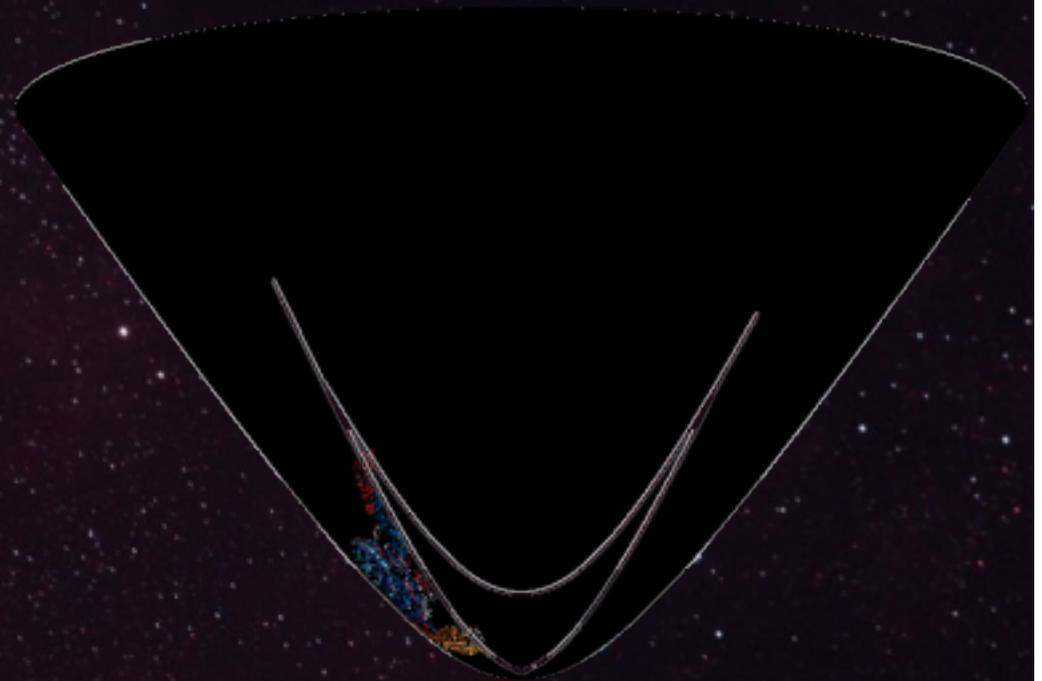
Modèle à 2 dimensions: hyperboloïde
« Droites » = hyperboles

Triangles non-euclidiens



2 angles droits

Géométrie elliptique:
somme des angles intérieurs
 $>180^\circ$



Géométrie hyperbolique:
somme des angles intérieurs
 $<180^\circ$

Quelle est la forme globale de l'Univers?

● Principe cosmologique en relativité générale:

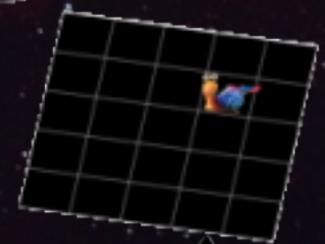
- univers à chaque instant partout identique
- propriétés géométriques variables au cours du temps

● Géométrie spatiale (3D) à un instant donné:

→ courbure constante positive : elliptique S^3



→ courbure constante nulle : euclidienne E^3



→ courbure constante négative: hyperbolique H^3



L'Univers évolue-t-il?

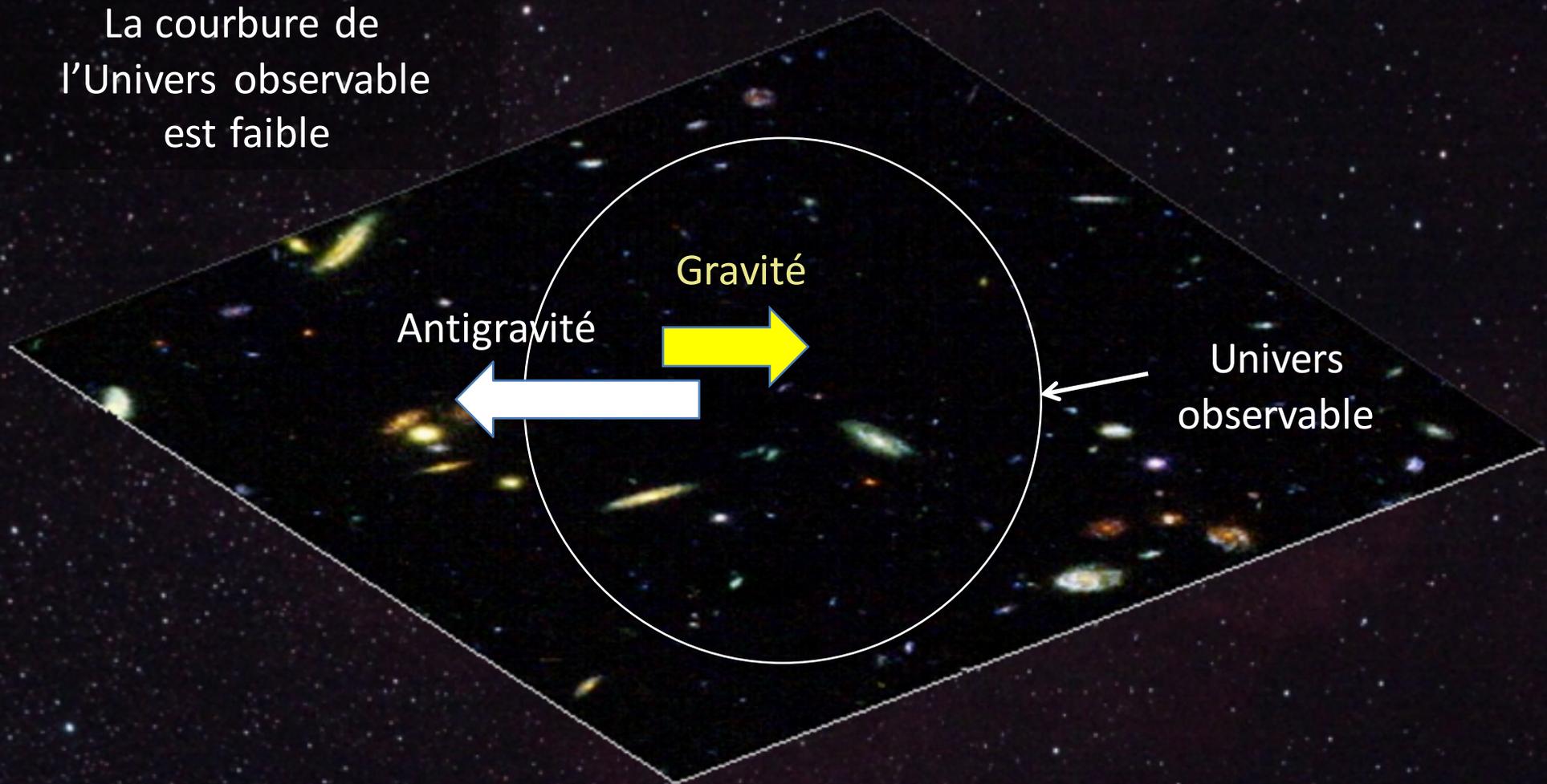
De quoi est fait l'Univers?

GEOMETRIE = MATIERE

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

l'Univers: une géométrie instable

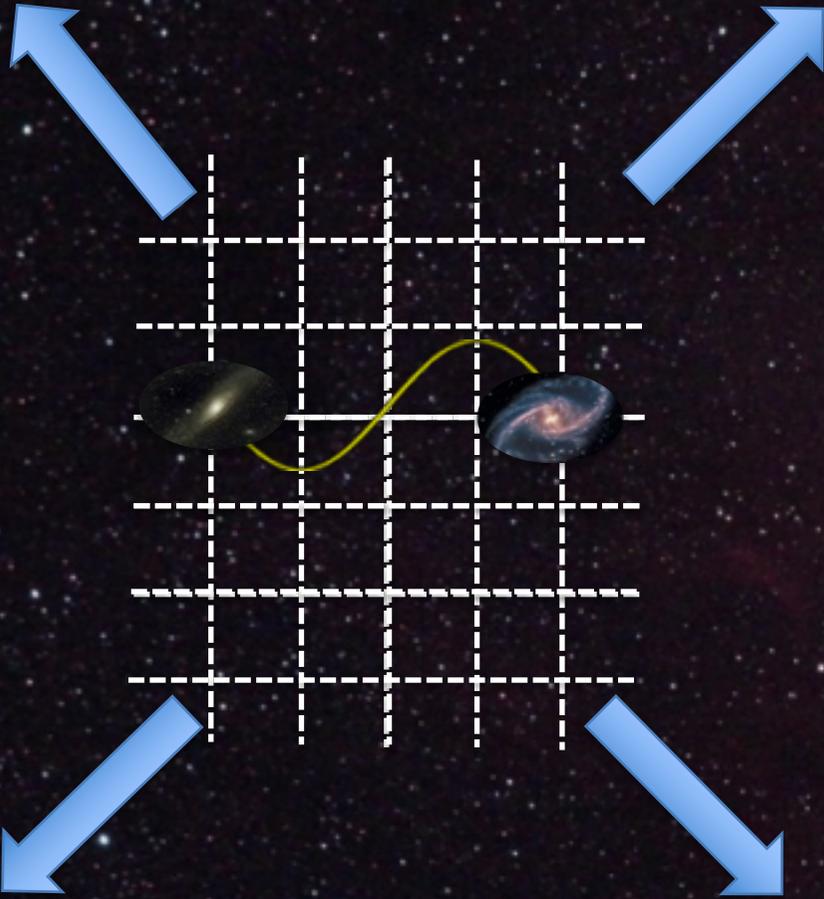
La courbure de
l'Univers observable
est faible



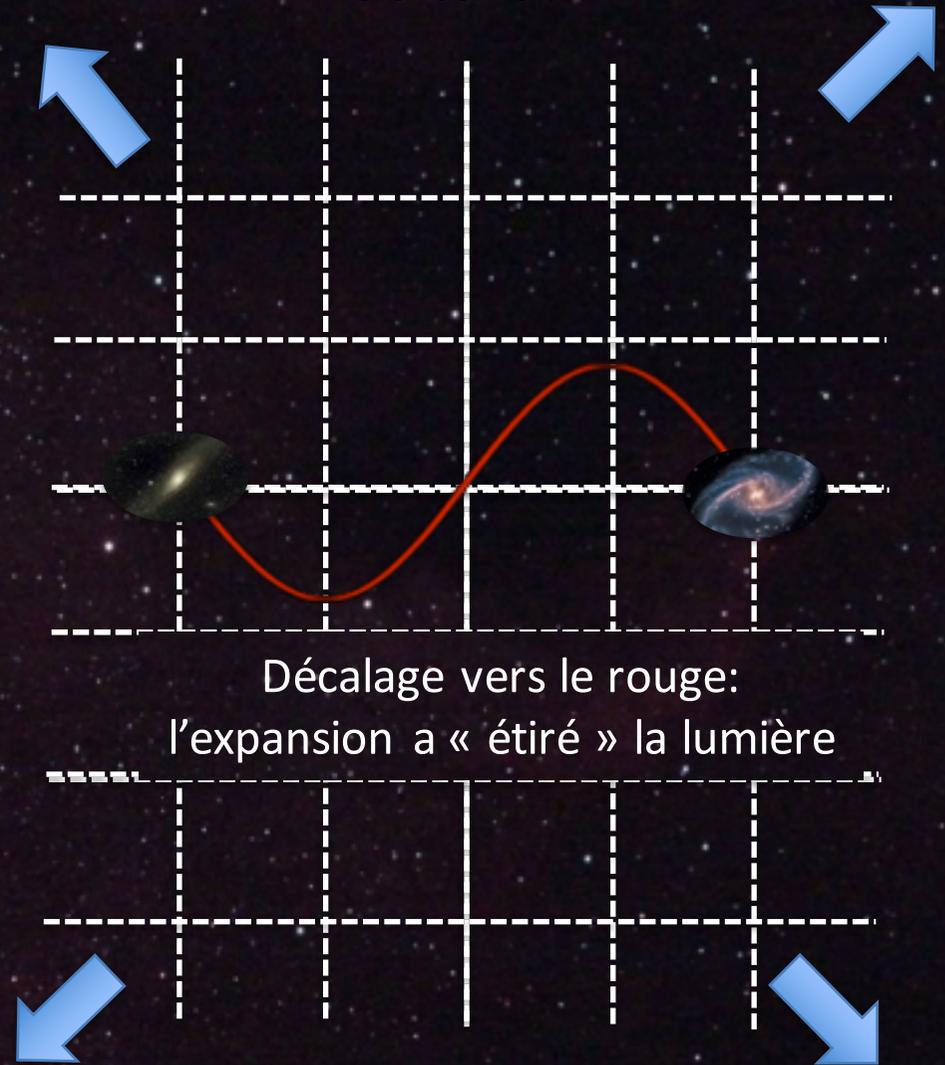
Principe cosmologique => univers en évolution:
Compétition entre la gravité attractive (matière)
et l'antigravité (constante cosmologique / énergie noire)

L'Univers en expansion

A un instant donné



Plus tard...



**L'expansion de l'Univers est avérée.
Mais comment varie-t-elle?**

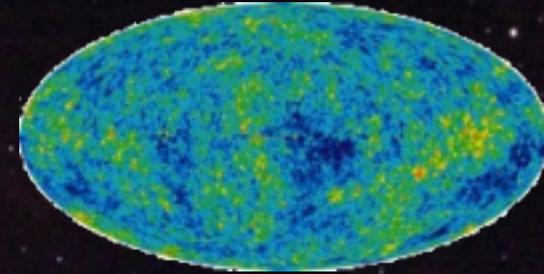
Les trois piliers du Big Bang chaud

■ Evidences en faveur d'une expansion cosmologique et d'une phase primordiale dense et chaude de l'Univers (>1960)



Fuite des galaxies:

Expansion cosmologique
Mirages gravitationnels
Grandes structures cosmiques
Mesure précise
de $H_0 < 100 \text{ km/s/Mpc}$
Age $> 10 \text{ Gyr}$



Rayonnement fossile:

formation des premiers atomes
Corps noir extrêmement isotrope
à une température de 2.7°K

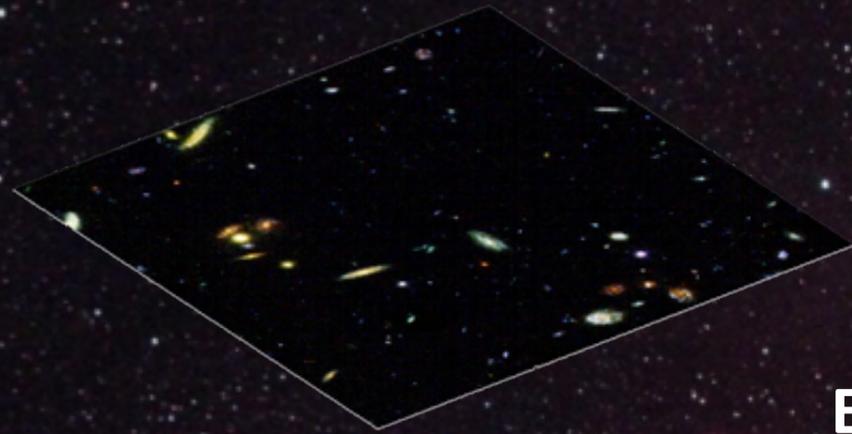
Nucléosynthèse primordiale:

cuisson des
noyaux atomiques légers
dans l'univers primordial,
conforme à l'abondance observée
dans les environnements stellaires

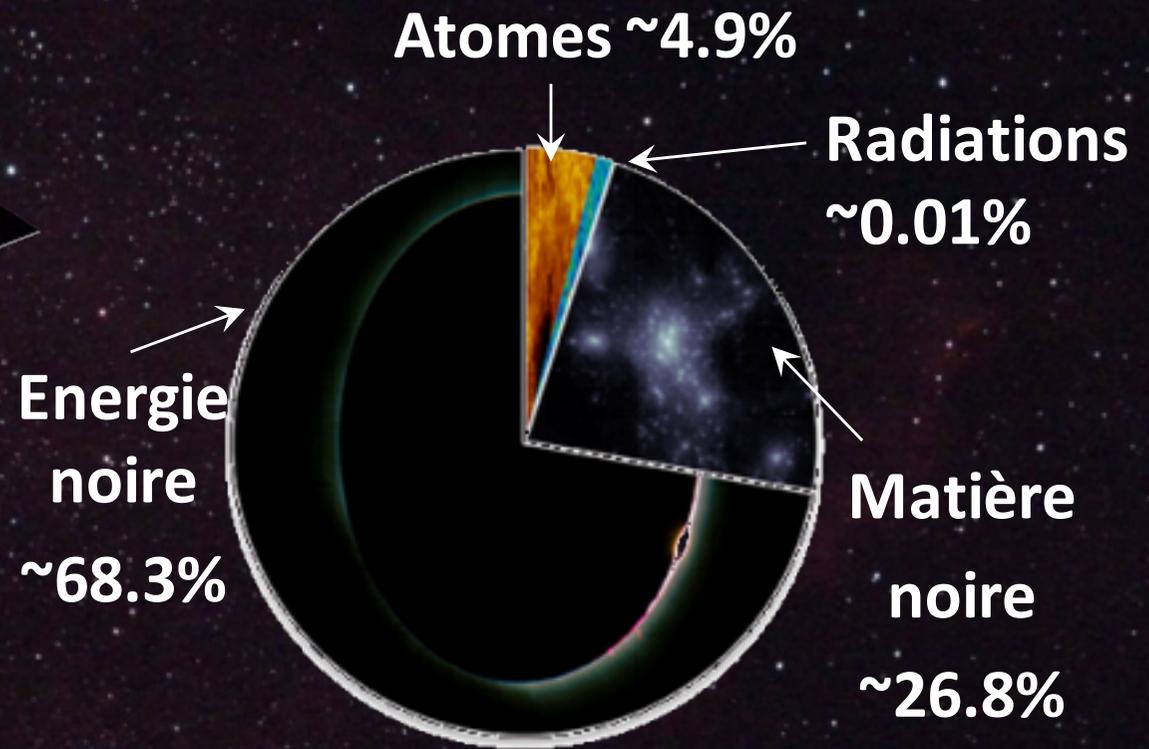


l'Univers invisible

Courbure presque nulle
de l'univers *observable*



Composition actuelle
en énergie de l'Univers



96% du contenu de l'Univers
est invisible et inconnu!

3 Prix Nobel de physique
en cosmologie:



1978, 2006, 2011

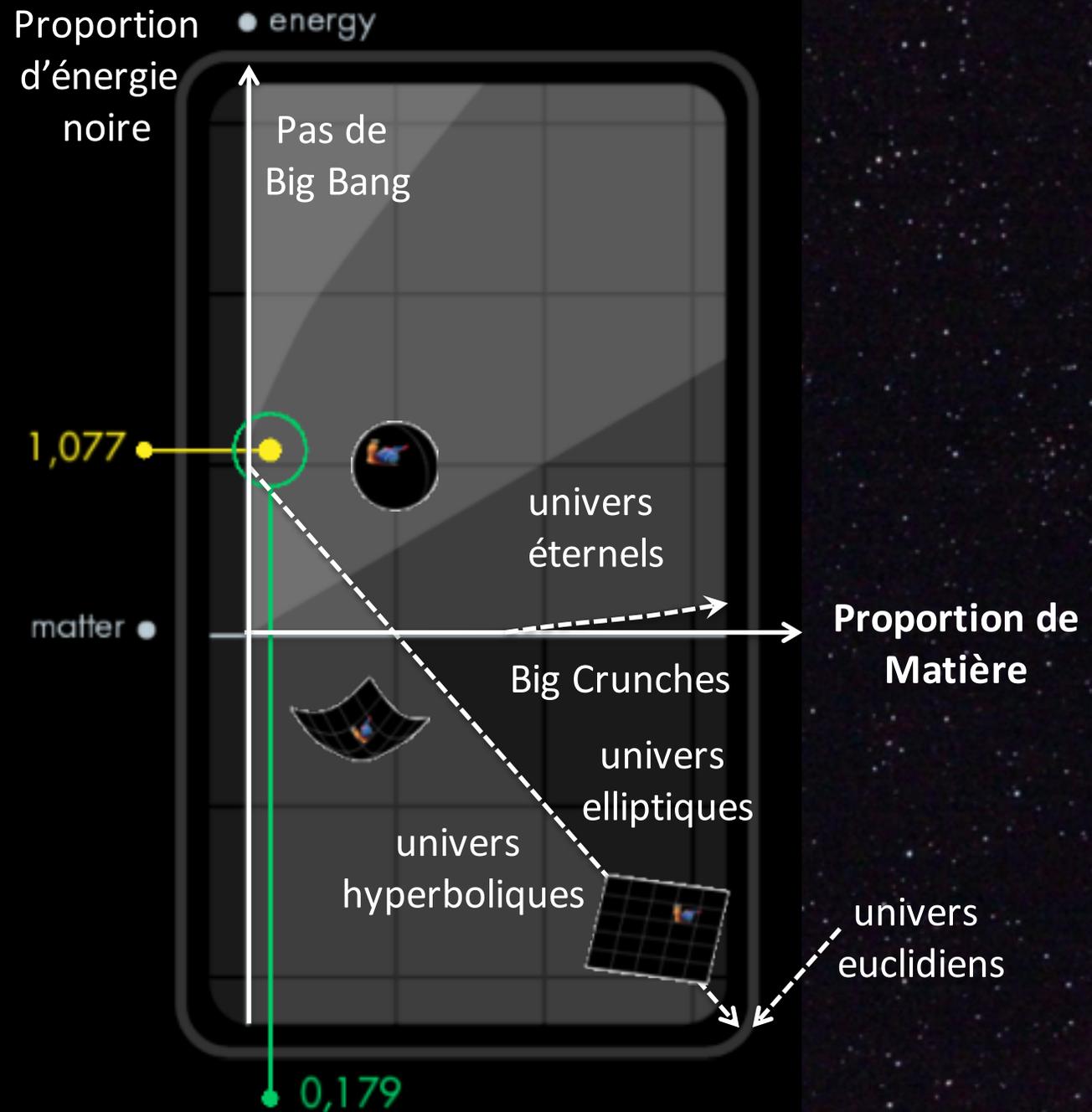


FABRIQUONS NOTRE UNIVERS...

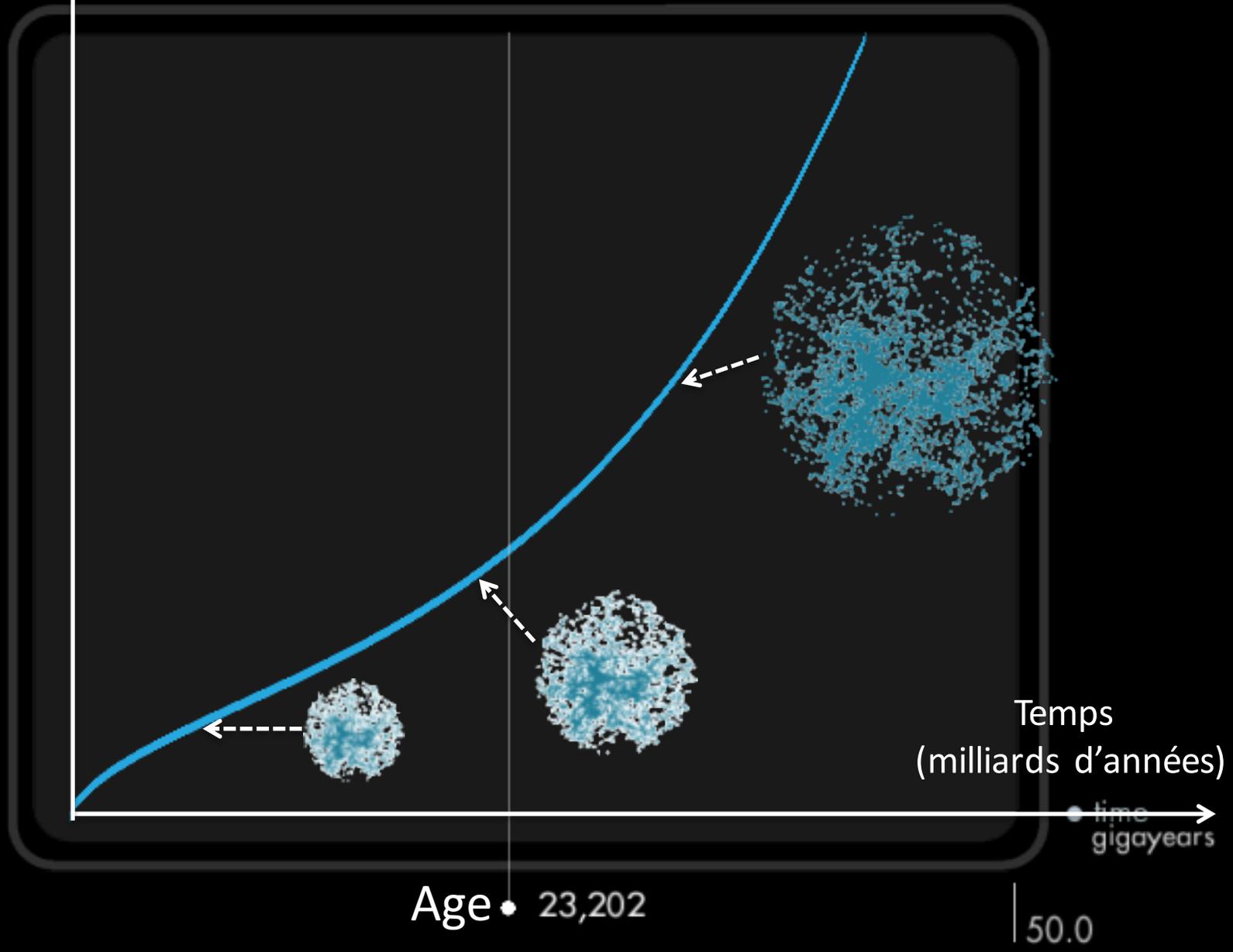
En collaboration avec Superbe
superbe-interactive.be

Carte des univers possibles, avec ses points d'intérêts

Le contenu donne sa forme au contenant!!



Taille de l'Univers observable



Temps
(milliards d'années)

Age • 23,202

50.0

time gigayears

La Foire aux Questions du Big Bang



C'est quoi le Big Bang?

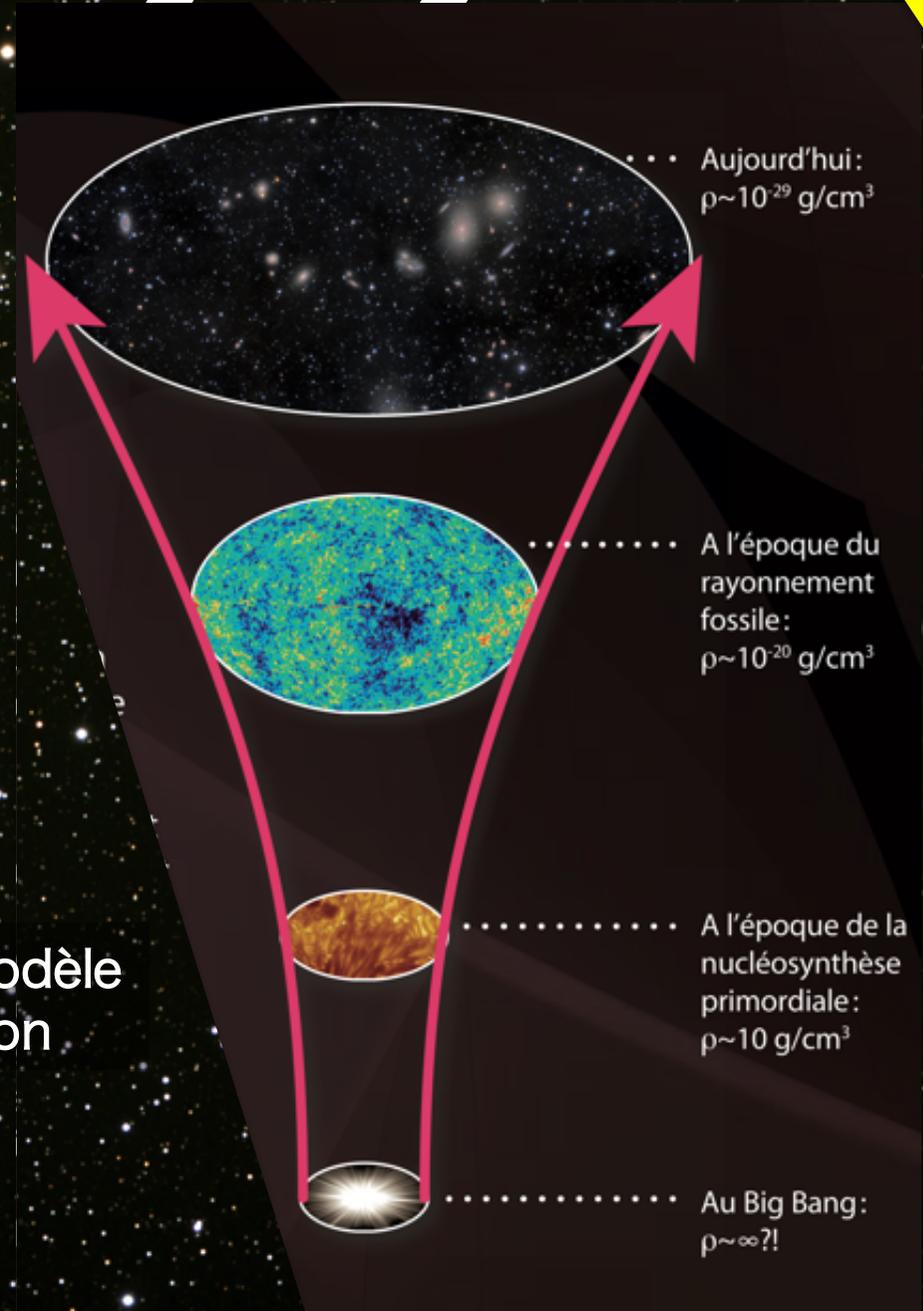
<https://youtu.be/0V-qd10JO6Q>

C'est quoi le Big Bang?

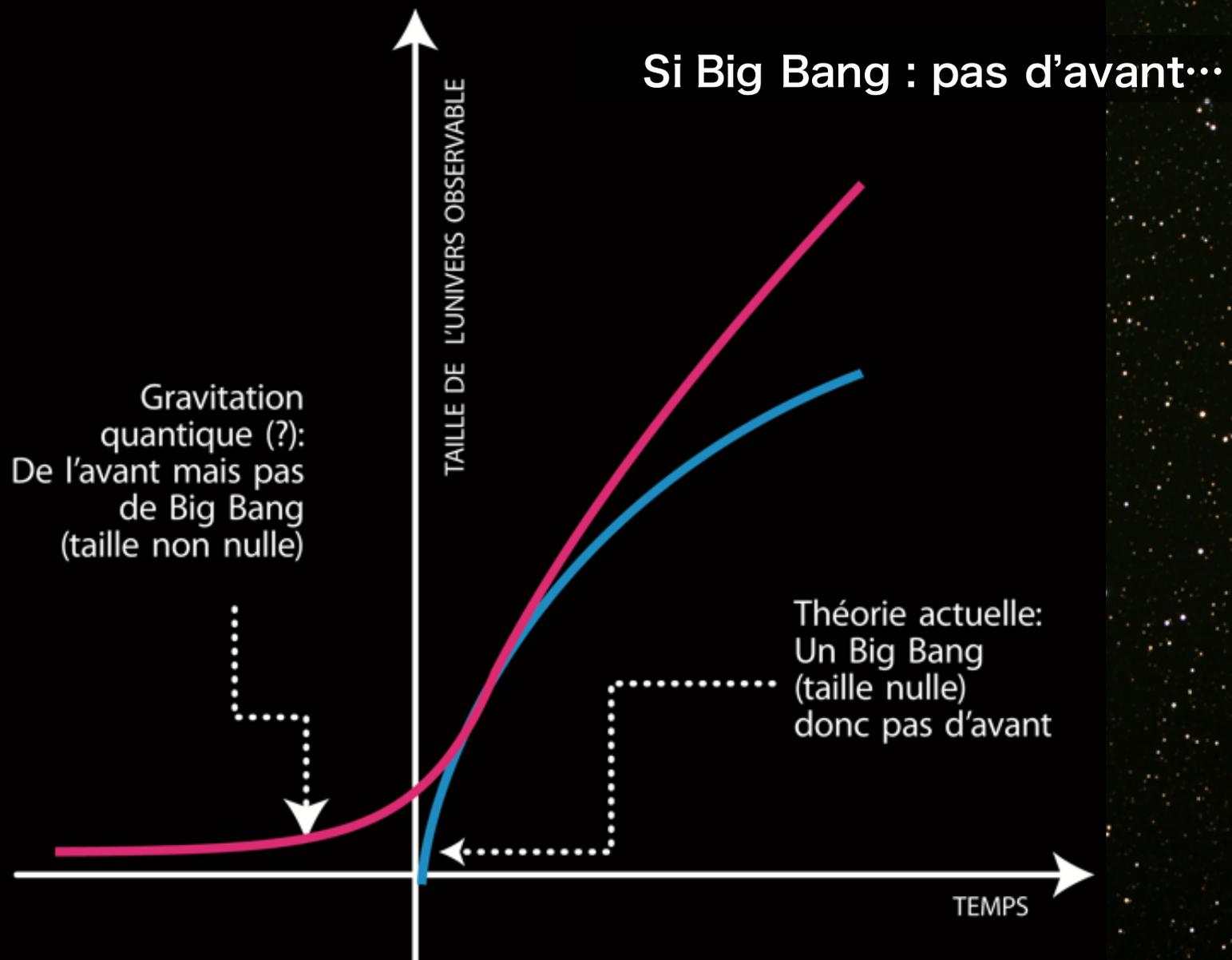
Une blague qui tourne mal...



Le Big Bang est une singularité du modèle qui trahit la limite de son application



« Qu'y avait-il avant le Big Bang? »



C'est quoi « l'échelle de Planck »?



C'est quoi « l'échelle de Planck »?

Prenez trois constantes fondamentales
(reliées à la mécanique quantique et la relativité):

$$c=299792458 \text{ m/s}$$

$$G=6.67384 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$$

$$\hbar=1.0545718 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$$

Mélangez-les pour obtenir:

$$t_{\text{Pl}} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5.3911613 \times 10^{-44} \text{ s}$$

Temps de Planck

Argument purement
dimensionnel !!

$$l_{\text{Pl}} = ct_{\text{Pl}} \approx 1.61619997 \times 10^{-35} \text{ m}$$

Longueur de Planck

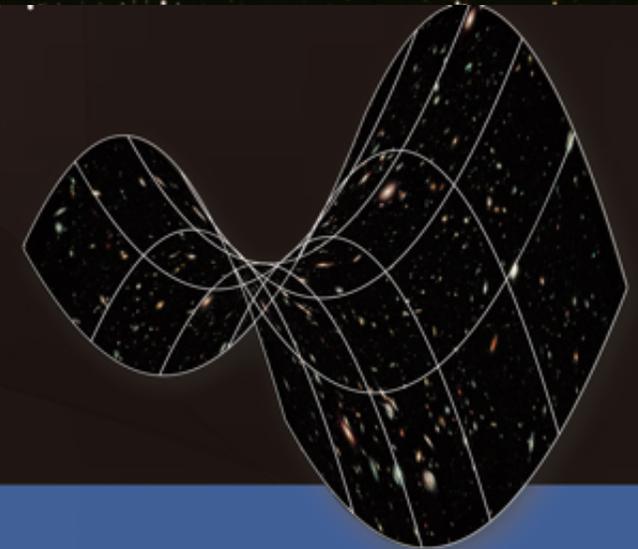
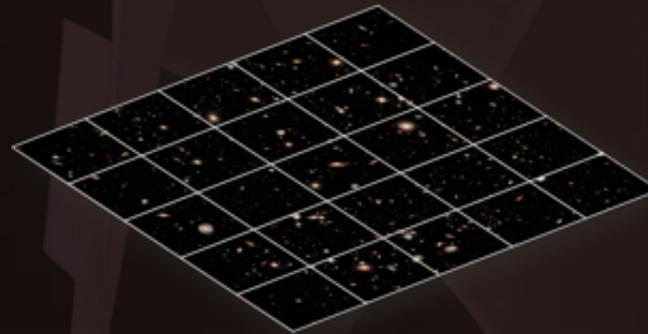
L'échelle de Planck est l'ordre de grandeur
auquel on peut s'attendre
à des effets quantiques de la gravité

L'Univers est-il infini?

Non

Oui

Oui

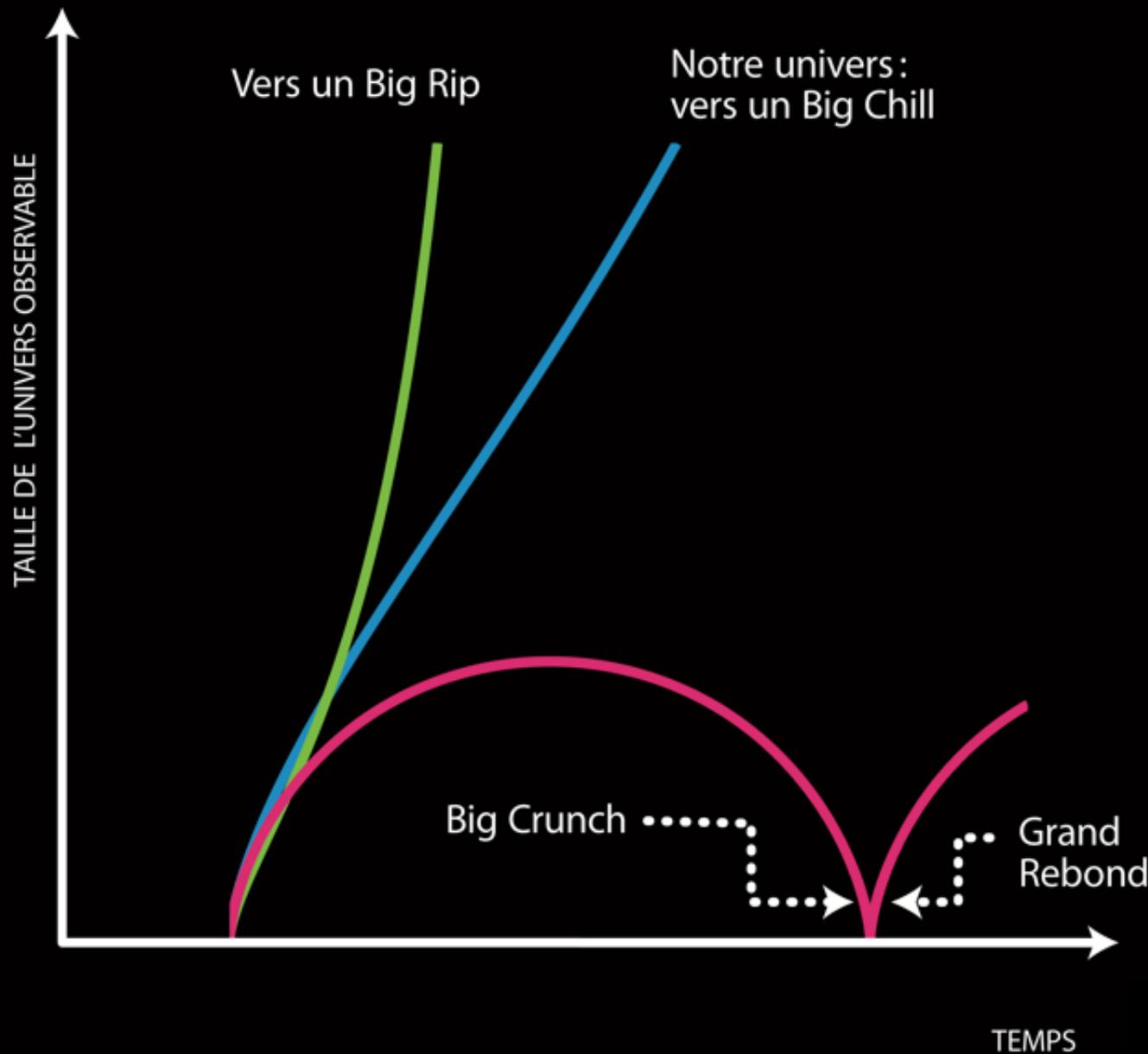


Peut-on extrapoler la géométrie locale?

Quelle topologie pour l'Univers?

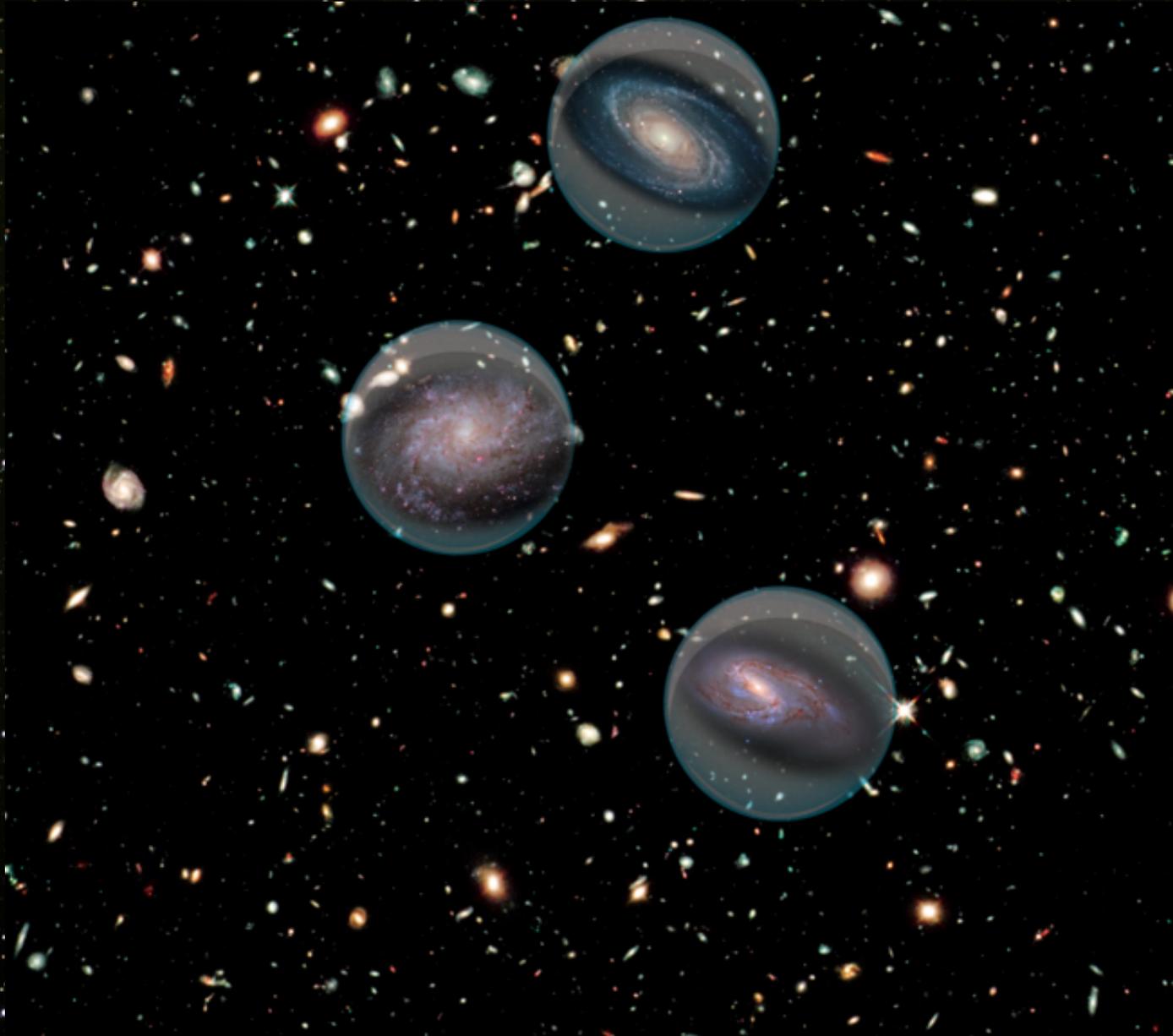
Un univers chiffonné?

L'Univers aura-t-il une fin?



Et pourquoi pas un Big Boogie?

**Les galaxies, le système solaire, les étoiles
sont-elles en expansion également?**

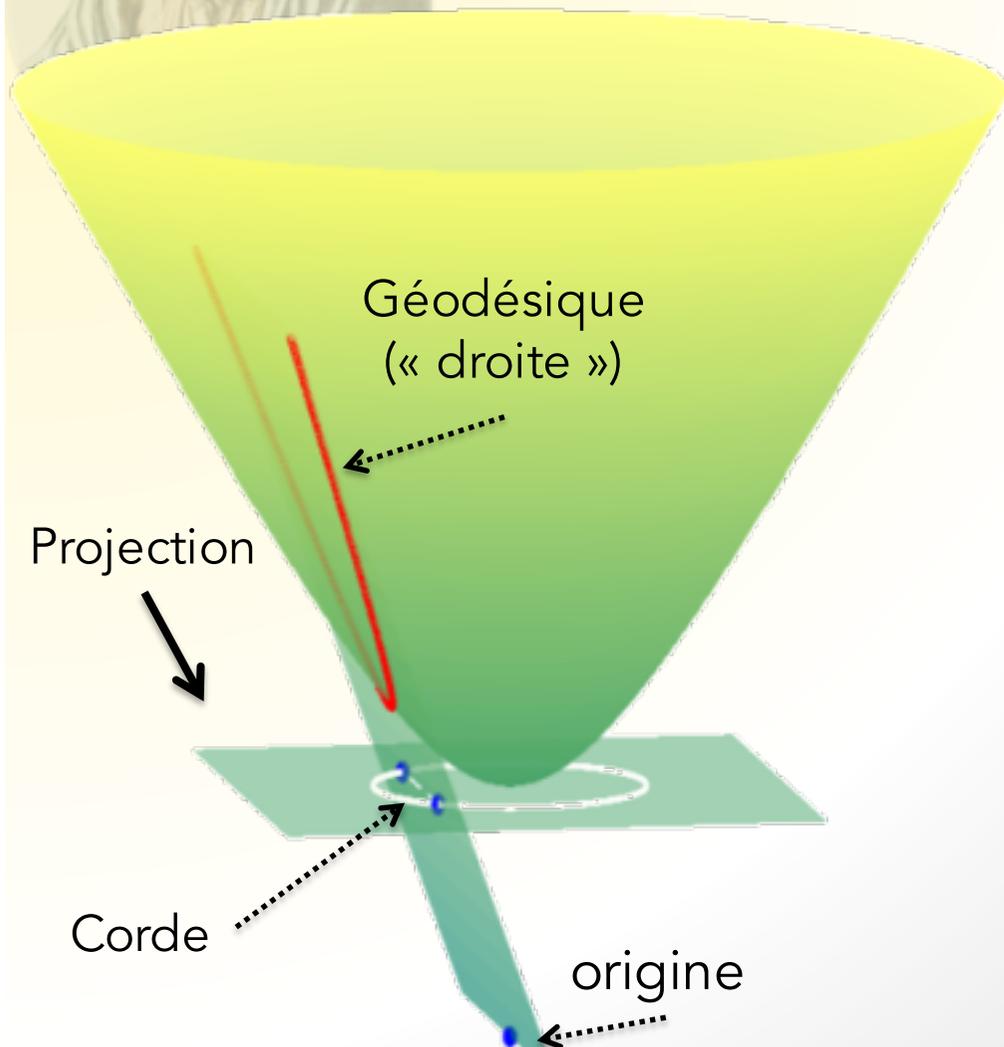


**Qui a dit que la cosmologie
c'était pour les nuls?**

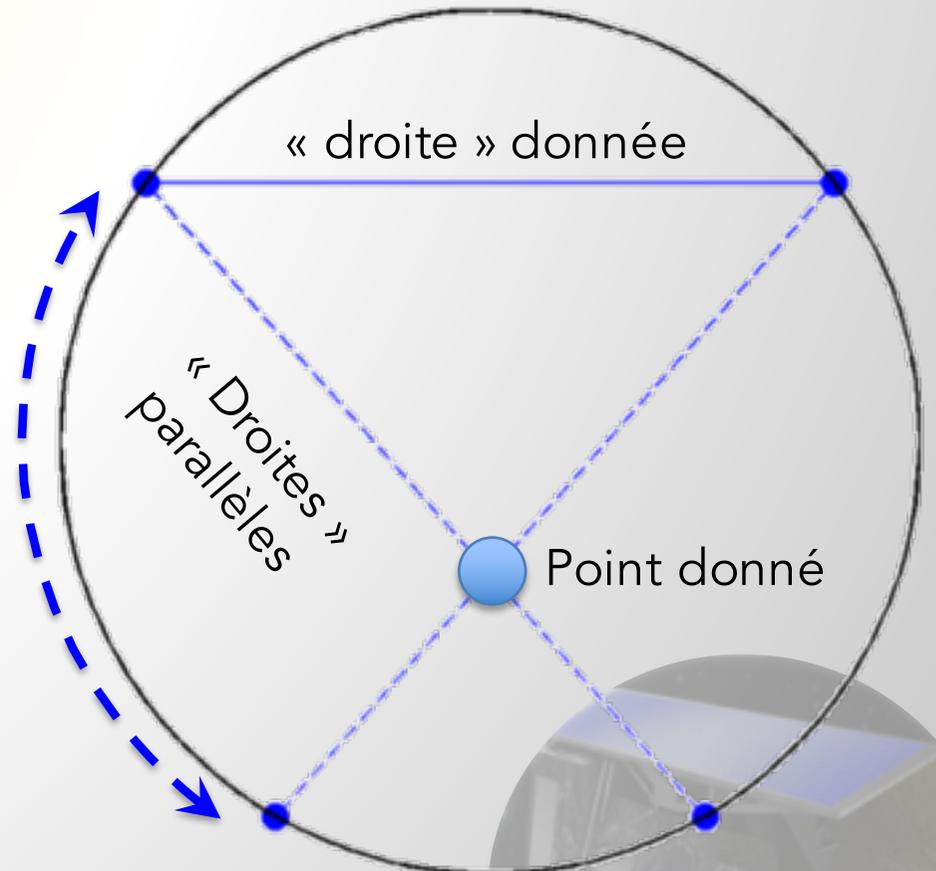




Distances en géométrie hyperbolique



Modèle de Klein-Beltrami



Les points sur le cercle sont à une distance infinie de tous les autres points!

Distance hyperbolique \neq distance euclidienne