

Statut du modèle cosmologique

Jean-Philippe UZAN



En 100 ans un modèle cosmologique relativiste a été construit.

La cosmologie est à la fois

- une science jeune

[30 dec. 1924 / grands relevés]

- un regard millénaire sur notre monde

[Univers observable vs univers]

Le modèle cosmologique et astrophysique

- a de nombreux succès

[Expansion de l'univers, Origine de la diversité de la matière, Formation & évolution des étoiles, des grandes structures]

- soulève de grandes questions

[secteur sombre: matière noire & constante cosmologique]

- fait face à des tensions naissantes

[« Constante » de Hubble, Courbure, Lithium, ...

grands relevés, foisonnement d'observations, amélioration des barres d'erreur]

Quelle cosmologie?

Cosmologie de précision

Modèle standard de la cosmologie

6 à 10+ paramètres, mesurés avec une précision croissante

Cadre pour la prédiction des observables

Cadre pour l'interprétation des observations

*Cadre pour adresser de nombreuses questions (formation/
évolution des galaxies, histoire chimique...)*

Cosmologie de justesse

*Ce modèle cosmologique est-il le « bon » cadre pour décrire
toutes ces observations, étant donnée la précision des mesures?*

4 grandes étapes

Cosmologie relativiste (1917-...)

Le big-bang chaud (1940-...)

Les grandes structures (1970-...)

La cosmologie primordiale (1981- ...)

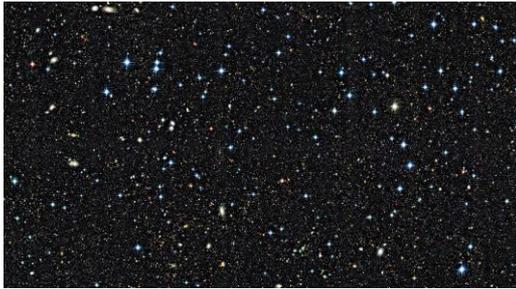
Chaque étape

- complète la précédente et étend le champ du modèle cosmologique
- repose sur un jeu d'observations
- pose de nouvelles questions

Nature inclusive de la cosmologie

Importance d'une description fine de la matière et de la géométrie

Hypothèses



Modèle mathématique et physique de notre *univers*.

$$G_{\mu\nu}[g_{\alpha\beta}] = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Sa construction repose sur 4 hypothèses principales

1. Théorie de la gravitation [[Relativité générale](#)]
 2. Matière [[Modèle standard](#) + [CDM](#) + Λ + [hyp. fluide](#)]
 3. Hypothèse de symétrie [[Principe copernicien](#)]
 4. Structure Globale [[Topologie spatiale est triviale](#)]
- New physics with simple cosmological solution
- Standard physics with more involved solutions

Nous devons:

- construire un modèle d'univers
- déterminer comment un observateur d'un tel univers l'observe
(*on ne compare pas des univers mais des observables*)

Importance du cadre

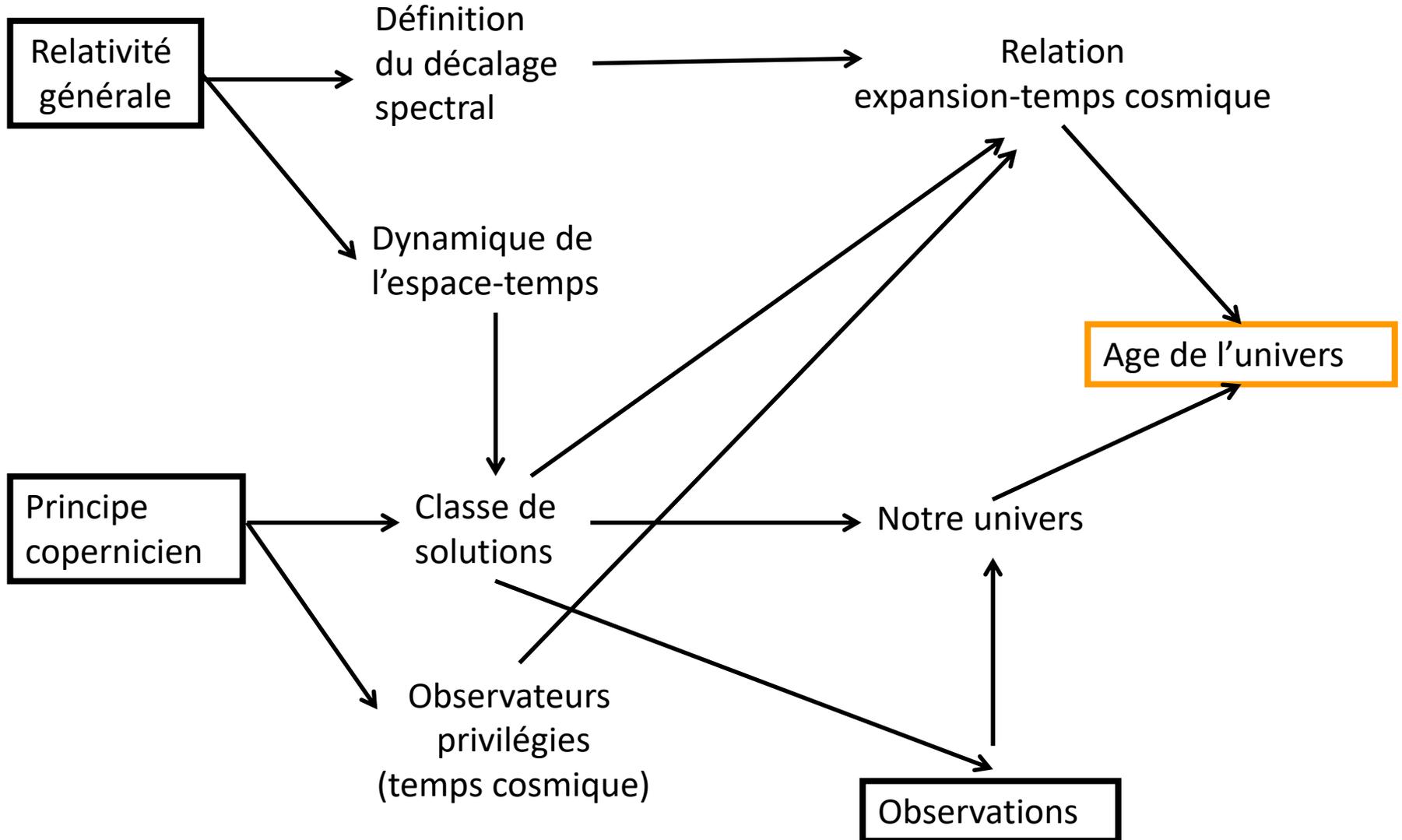
Les paramètres cosmologiques ne sont définis que dans ce cadre.

L'interprétation des observations repose sur ce cadre de diverses manières.

De nombreuses affirmations n'ont de sens que dans ce cadre.

Exemple: âge de l'univers

durée mesurée par des observateurs fondamentaux entre la singularité et aujourd'hui

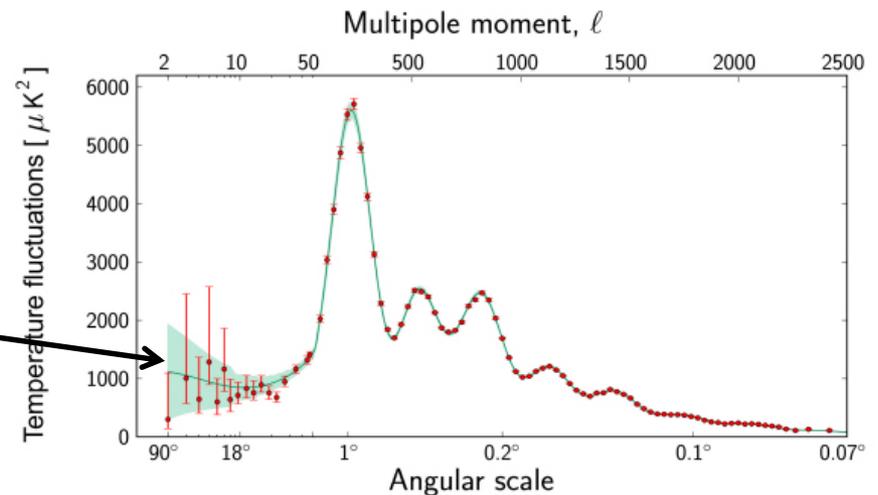


Exemple: finitude

Le conditions initiales sont de nature statistique.

On a accès à la distribution (moyenne, variance...) de ce qu'observe un observateur.

Comparer à l'observation dans une partie (univers observable) d'un unique univers



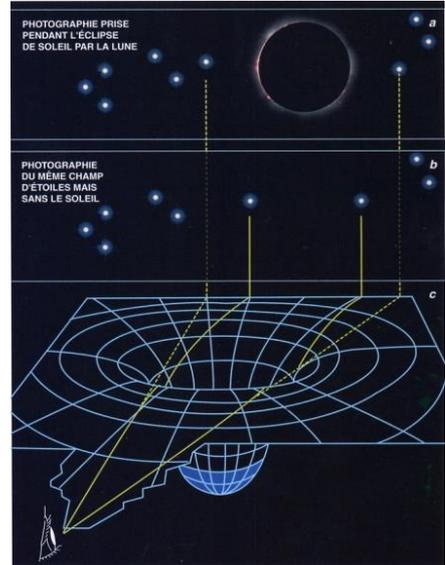
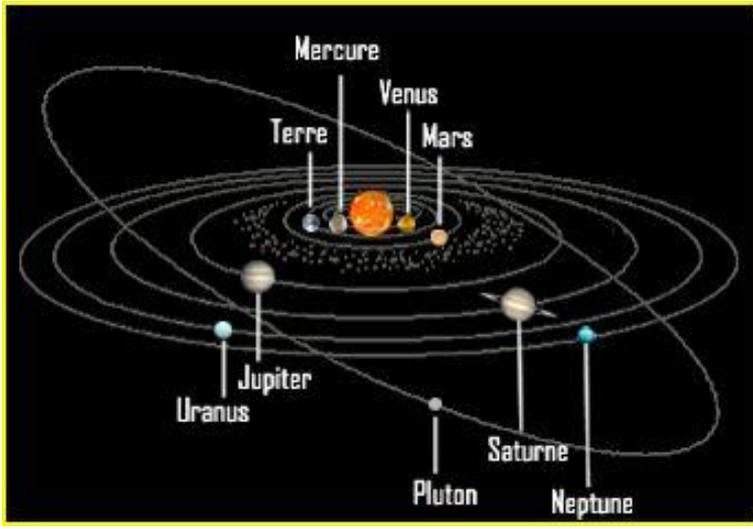
Hypothèse d'un univers (très) grand devant l'univers observable est implicite

[JPU, Kirchner, Ellis (2003), ...]

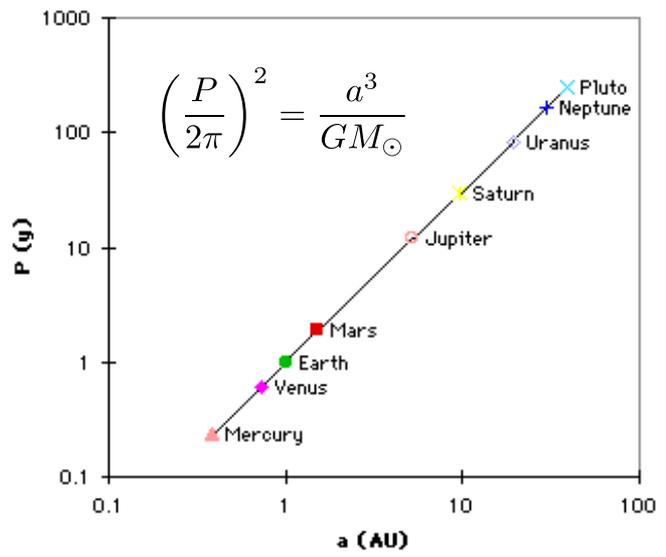
Hypothèses et leurs tests

- **Tests de la relativité générale aux échelles astrophysiques [2000]**
 - *Grandes structures / Cisaillement gravitationnel*
 - *Principe d'équivalence (constantes) [JPU (2003) (2011)...]*
 - *Ondes gravitationnelles*
- **Test du principe copernicien [2008]**
- **Test de l'isotropie de l'expansion**
- **Test de la topologie de l'univers**
- **Test de la relation de dualité de distance**

Tester la relativité générale



Orbite des planètes (loi de Kepler)



Déflexion de la lumière

$$\Delta\theta_{GR} = \frac{4GM_{\odot}}{bc^2}$$

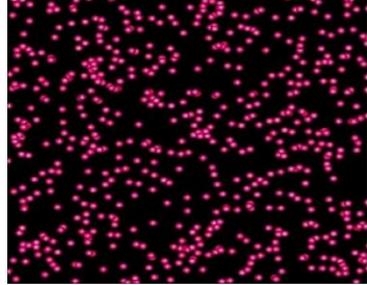
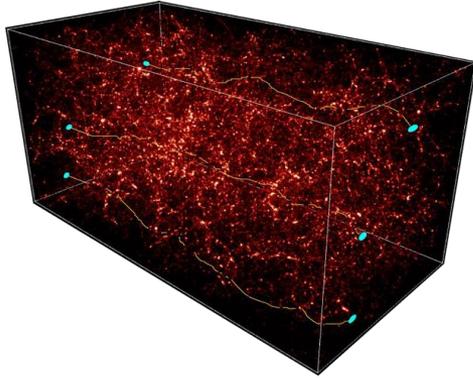


Accord nécessaire.

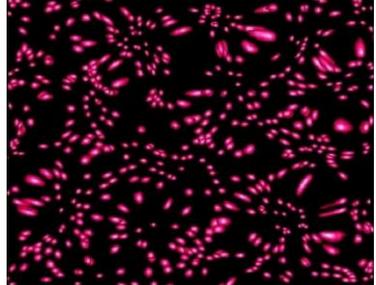
$$GM_{\odot}^{lens} = \frac{bc^2\Delta\theta}{4}, \quad GM_{\odot}^{dyn} = \frac{4\pi^2a^3}{P^2}$$



Tester la relativité à grande échelle



Mesure de la **distribution de matière**



Mesure de somme des 2 **potentiels gravitationnels**

Mesure de la **distribution de vitesse**



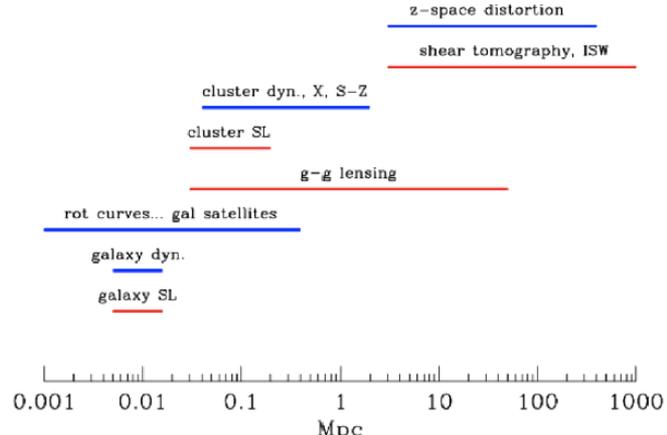
En accord?

JPU, Bernardeau (2000)
JPU (2004)

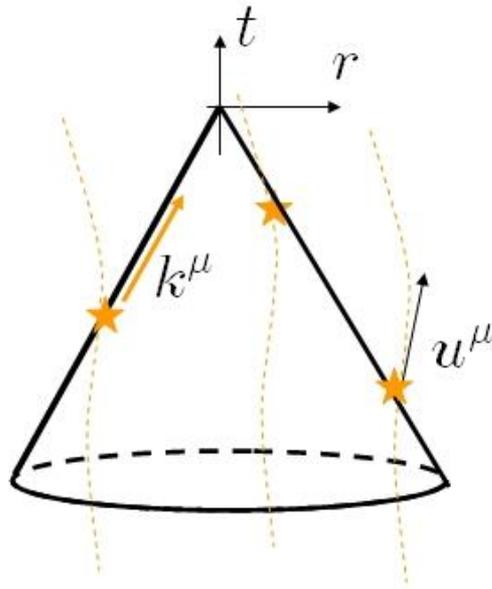
Test la relativité générale aux échelles astrophysiques

conditions initiales
matière noire / matière lumineuse

Mis en application dans nombreux relevés
Mission ESA/Euclid (+ champ de vitesses)

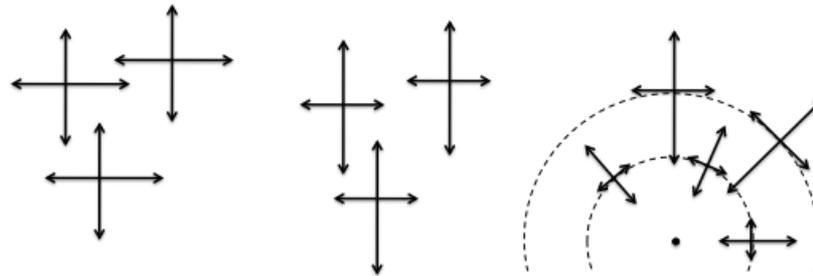


Test du principe copernicien

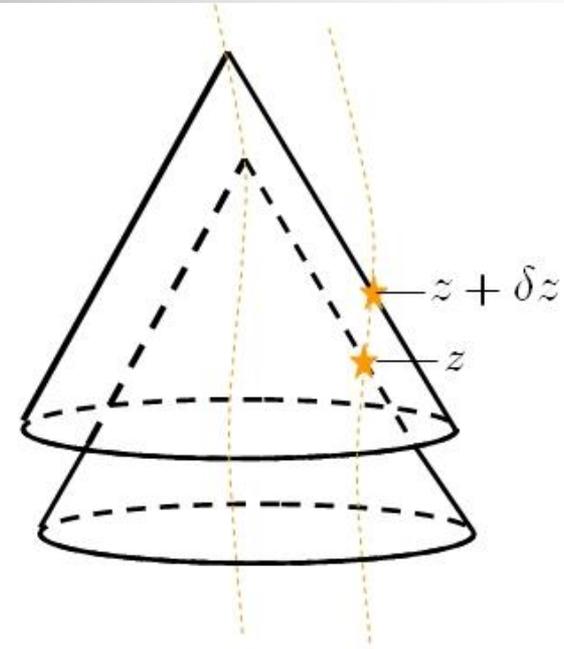
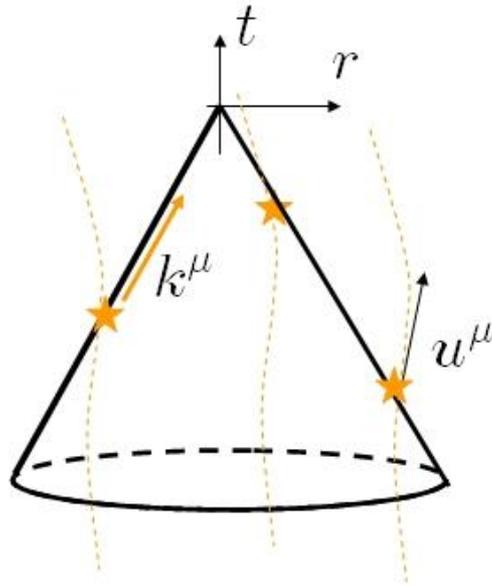


Cône de lumière – Section de l'espace-temps

Isotropie apparente autour de notre point d'observation



Test du principe copernicien



Homogeneous and isotropic universe

$$\dot{z} = H_0(1 + z) - H(z)$$

[Sandage1962, McVittie 1962]

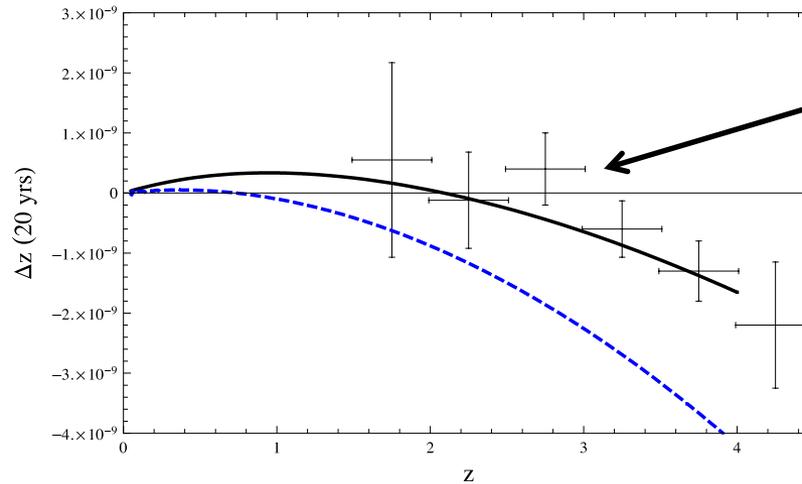
Inhomogeneous universe

$$\dot{z} = (1 + z)H_0 - H_\perp(z)$$

[JPU, Clarkson, Ellis, (2008)]

Test du principe copernicien: deux méthodes

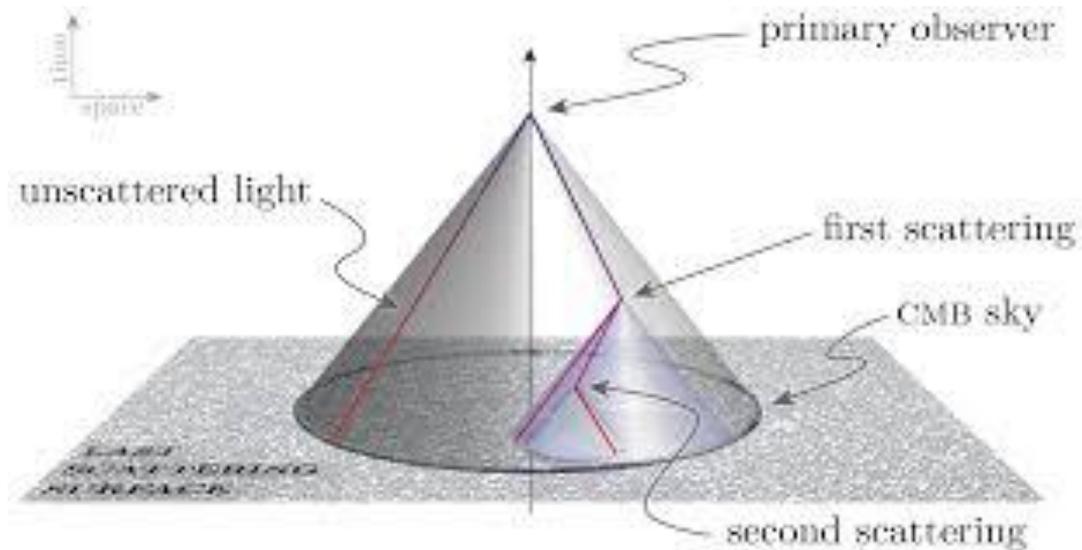
E-ELT/CODEX



E-ELT/CODEX
[Pasquini et al. (2005)]

[Dunsby, Goheer, Osano, JPU (2010)]

CMB

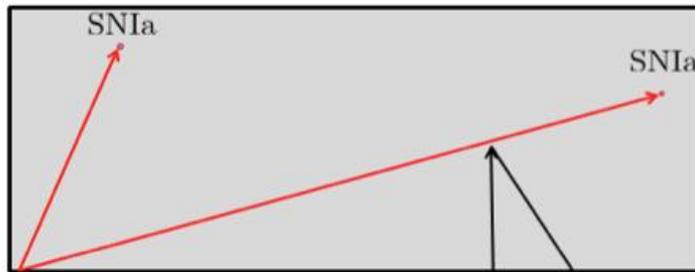


[Clarkson (2012)]

Limite fluide à petite échelle

Aux échelles cosmologiques, la matière est décrite par des fluides.
Echelle de lissage implicite (!! RG est non-linéaire !!)
Effet sur la propagation de la lumière

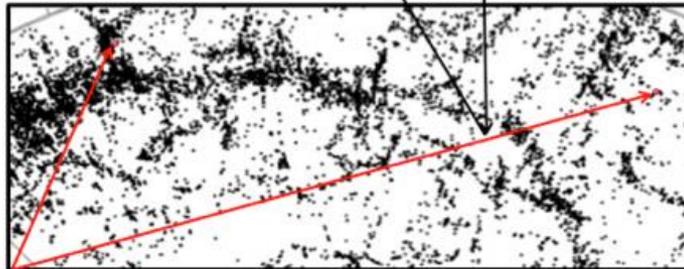
Model: Friedmann-Lemaître → isotropic and homogeneous



Observer

Ricci = 0
Weyl ≠ 0

Ricci ≠ 0
Weyl = 0

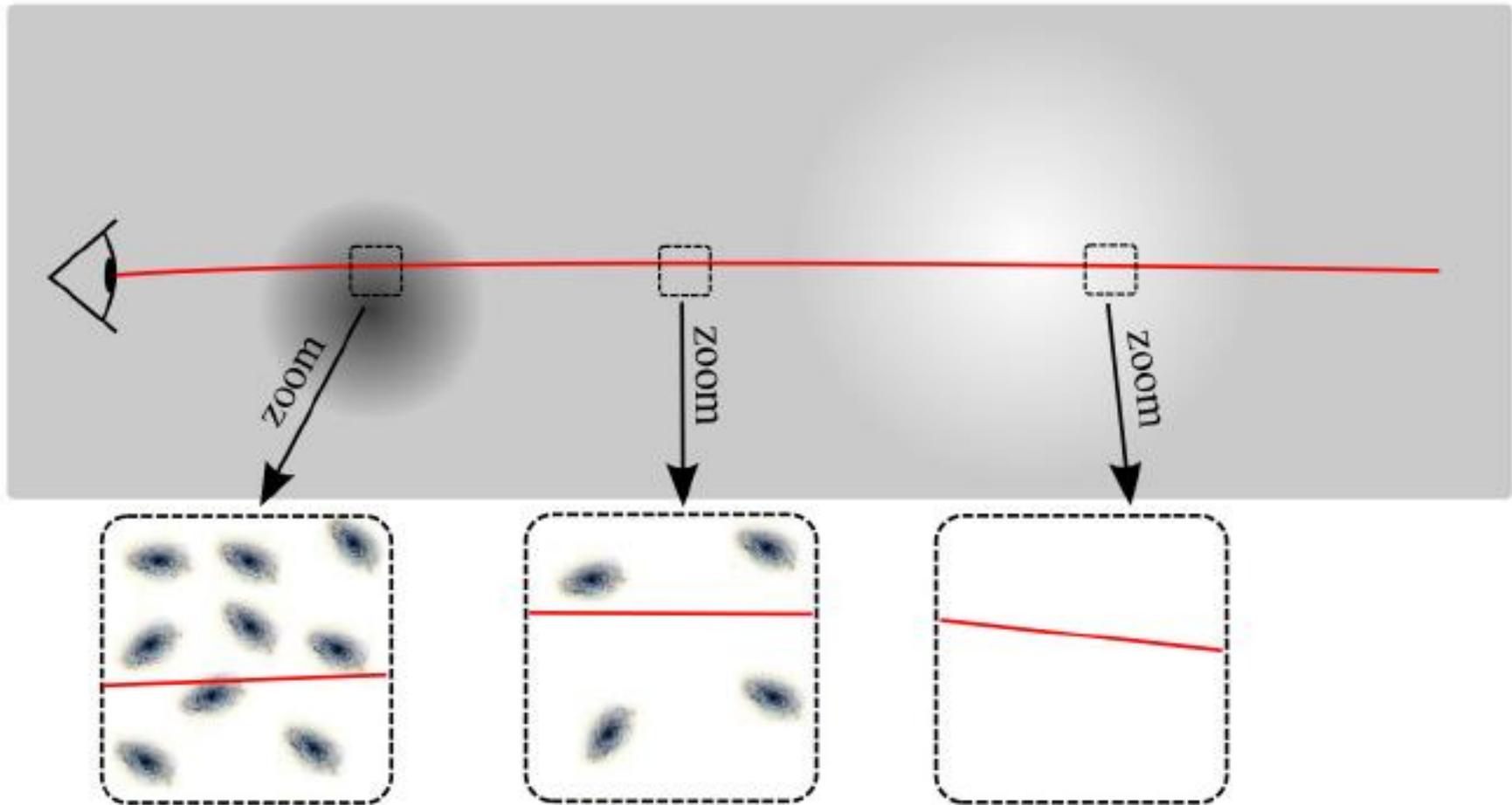


Observer

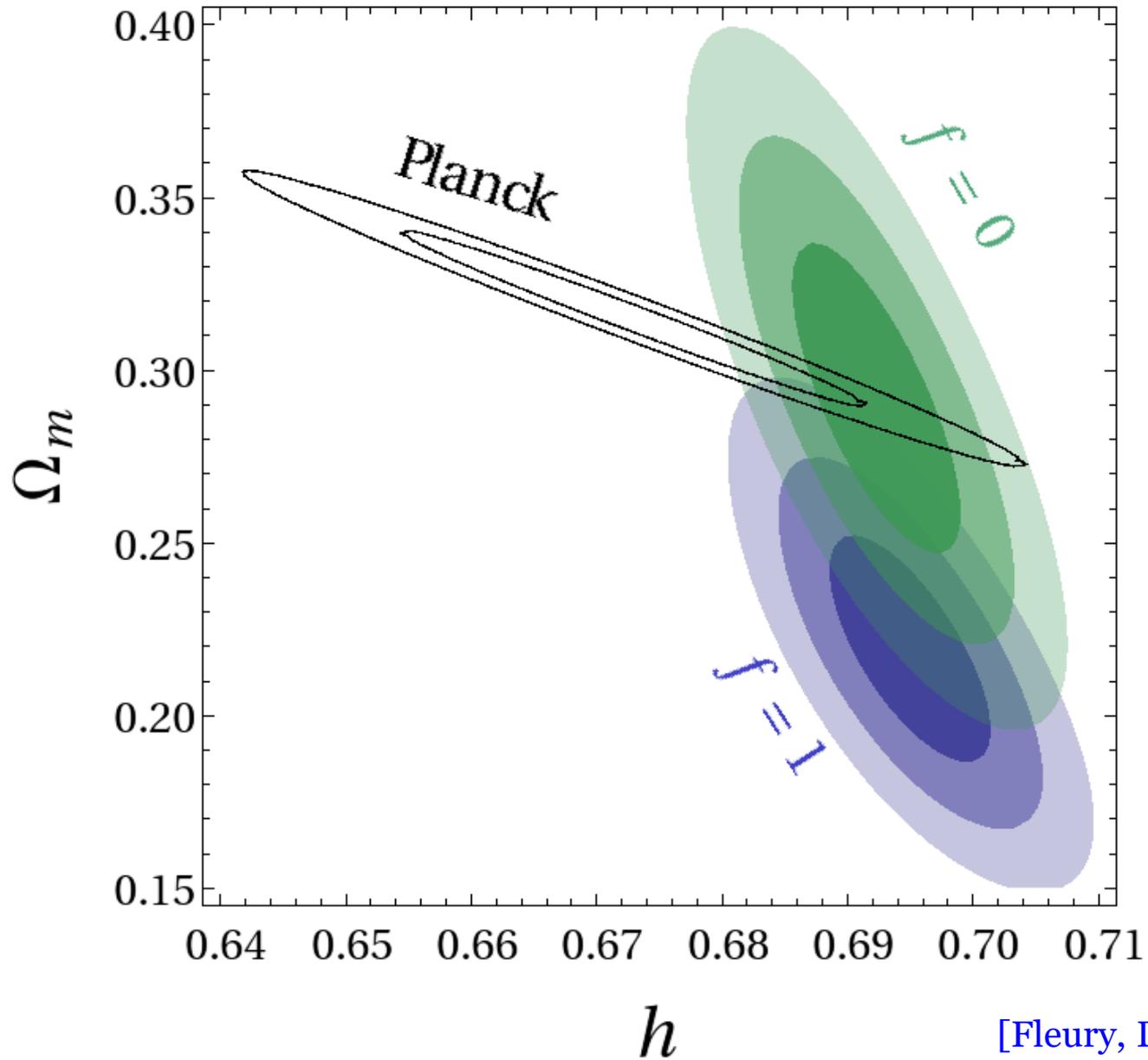
Universe: structures and voids
→ not isotropic and homogeneous

[Fleury, Dupuy, JPU (2013);
Fleury, Larena, JPU (2018)]

Is this the correct method?



A quel point est-on homogène (granularité de la matière noire)



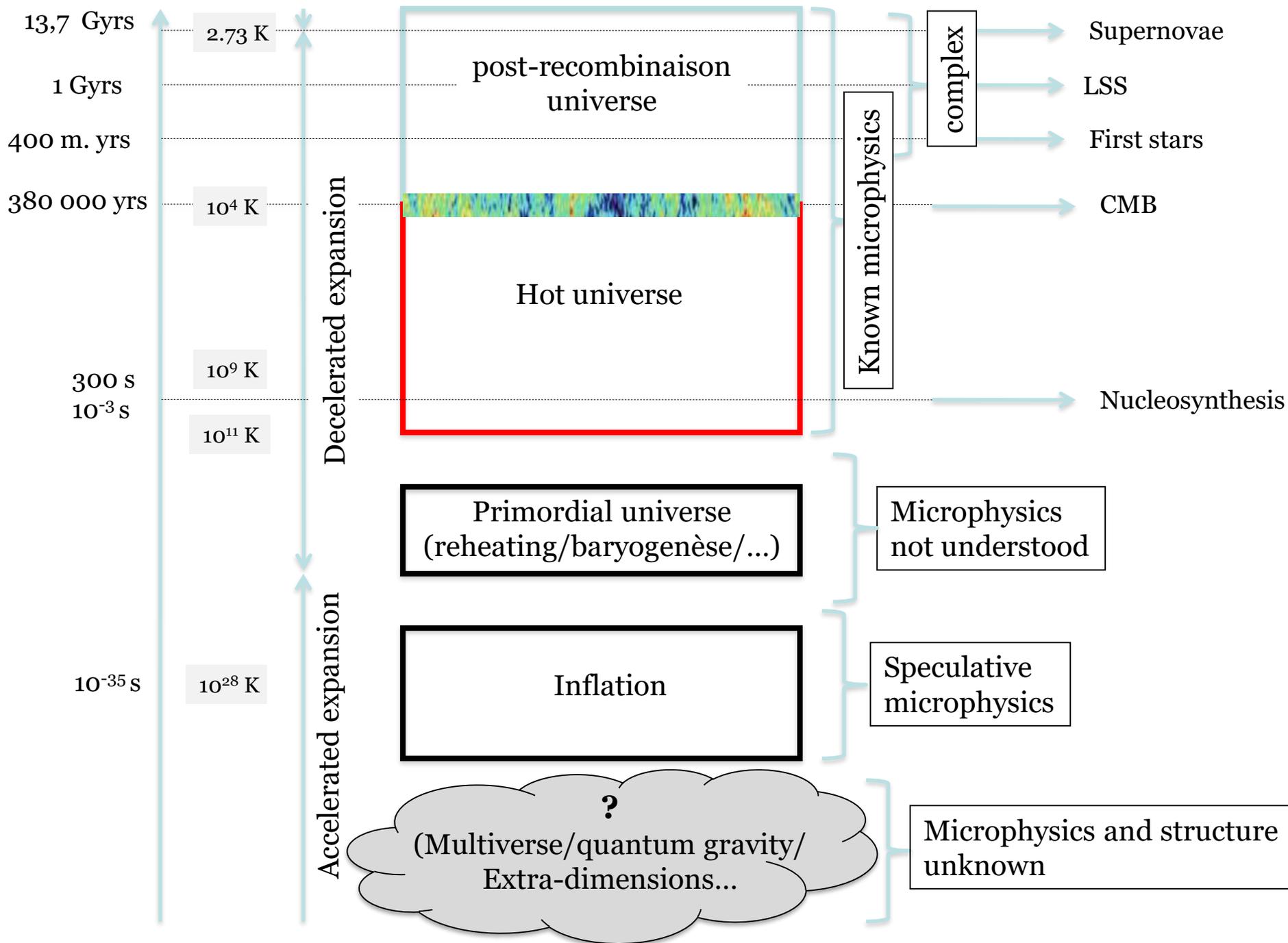
[Fleury, Dupuy, JPU (2013)]

Conclusions

Cadre standard: efficace, bien défini, cohérent

mais secteur sombre + tensions dans mesure des paramètres
cadre pour aborder de nombreuses questions astrophysiques

[formation des galaxies,...]



Conclusions

Cadre standard: efficace, bien défini, cohérent

mais secteur sombre + tensions dans mesure des paramètres
cadre pour aborder de nombreuses questions astrophysiques
[formation des galaxies,...]

Le cadre théorique est-il toujours adapté ou trop simpliste?

Age d'or:

- Nombreux relevés grandes échelles

[fond diffus, catalogues de galaxies, lentilles, 21cm, +ondes gravitationnelles,..]

- Nouveaux outils

[ondes gravitationnelles, Univers in silico, Machine learning...]

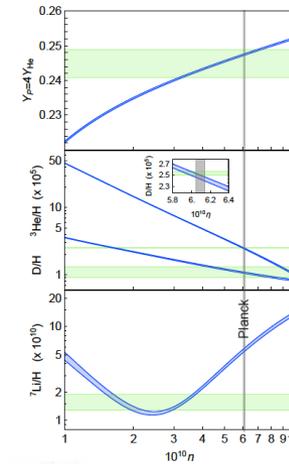
Limitations inhérentes à la discipline

[un univers / univers observable / depuis intérieur]

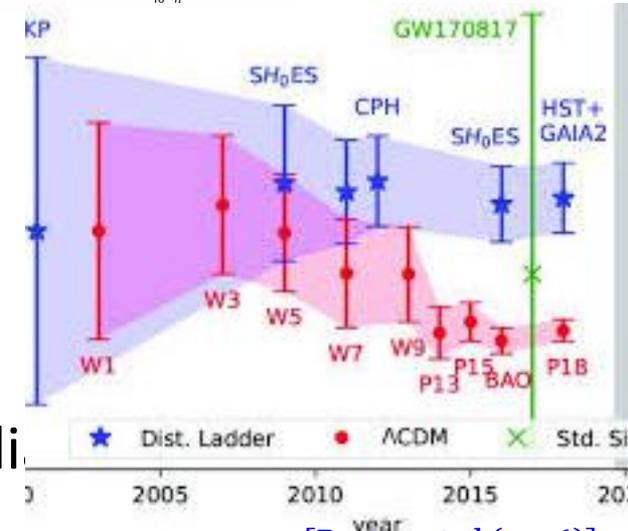
Univers primordial: rare cadre où MQ+RG+observations.

Années à venir riche MAIS...

- Problème du lithium
- Débat sur la constante de Hubble
- Nature de la matière noire
- Constante cosmologique
- Validité de la relativité générale
- Validité du principe copernicien
- Microphysique de la phase d'inflation
- Gravitation quantique et cosmologie primordiale
- Astrophysique des ondes gravitationnelles
- Formation des galaxies
- Evolution chimique
- ...



[Pitrou, Coc, Vangioni, JPU (2018)]



[Beaton et al (2016)]