

Energie sombre

<https://mediaserver.unige.ch/play/206919>



Camille Bonvin
Département de physique théorique

Energie sombre et gravitation modifiée



Camille Bonvin
Département de physique théorique

Résumé

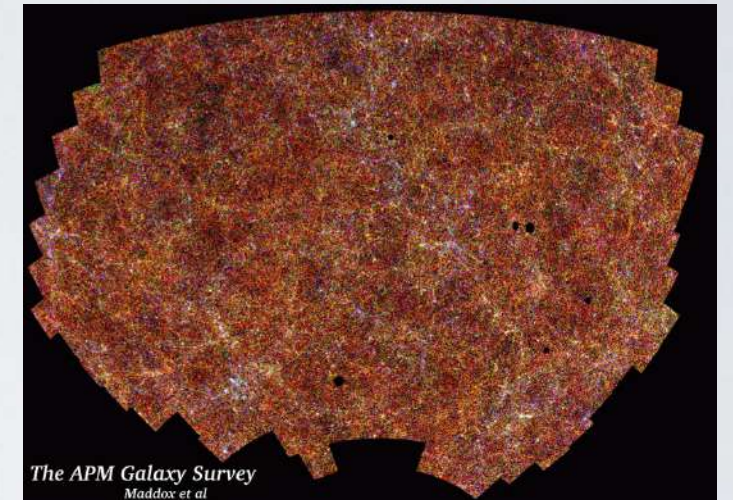
- ◆ **Dynamique** de l'univers
- ◆ Observation de l'**expansion accélérée** de l'univers
- ◆ Comment on peut l'expliquer avec l'**énergie sombre**
- ◆ Comment on peut l'expliquer en modifiant les **lois** de la **gravitation**
- ◆ Tests observationnels pour **distinguer** ces deux explications

Dynamique de l'univers (rappel)

- ◆ Les équations d'Einstein relient la **géométrie** de l'univers à son **contenu**:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

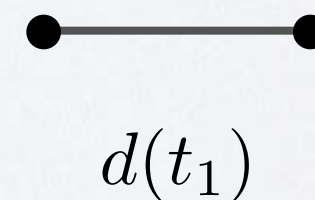
- ◆ L'univers est **homogène** et **isotrope** à grande échelle

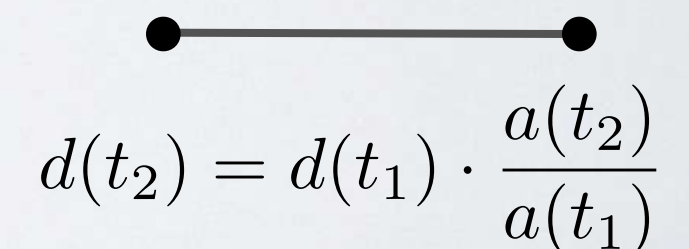


3 millions de galaxies
15% du ciel

- ◆ On peut caractériser sa géométrie avec deux quantités

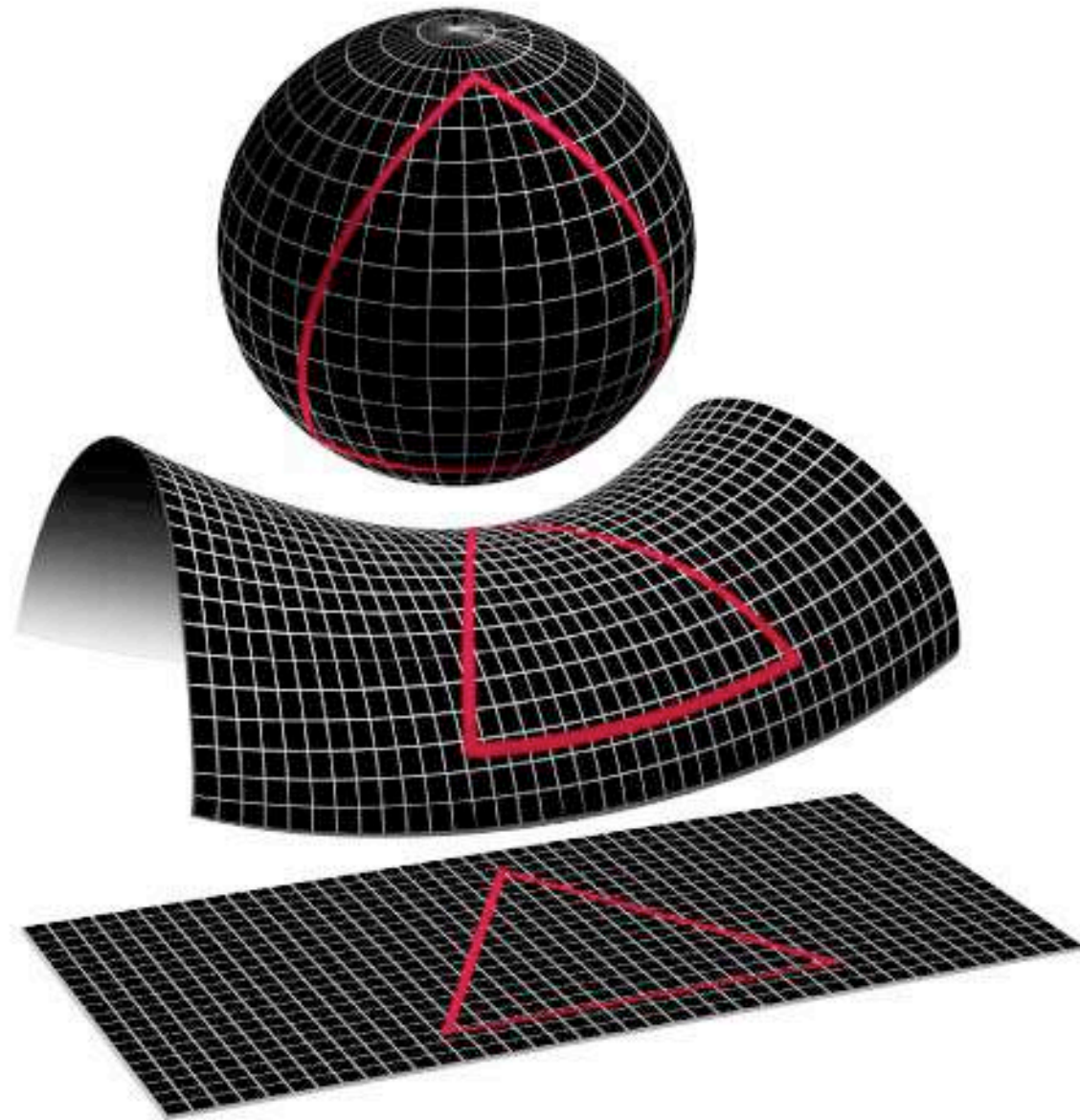
- La **facteur d'échelle** $a(t)$




$$d(t_2) = d(t_1) \cdot \frac{a(t_2)}{a(t_1)}$$

- La **courbure** de l'univers K

Courbure



MAP990006

courbure positive (sphère) $K > 0$

courbure négative (selle) $K < 0$

univers plat $K = 0$

Equations de Friedmann

dérivée temporelle \rightarrow

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho(t)$$

\leftarrow densité d'énergie = quantité d'énergie par unité de volume

- ◆ La matière fait **varier** le facteur d'échelle
- ◆ On a des solutions avec $\dot{a} < 0$ univers **décroît**
et avec $\dot{a} > 0$ univers **croît**
- ◆ L'expansion de l'univers **ralentit**: \dot{a} diminue au cours du temps
- ◆ Pour la matière: le volume évolue $V \sim a^3$
la quantité est constante $\left. \vphantom{\begin{matrix} V \sim a^3 \\ \text{la quantité est constante} \end{matrix}} \right\} \rightarrow \rho \sim \frac{1}{a^3}$

Décélération de l'univers

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 + \frac{K}{a^2} \right] = \frac{8\pi G}{3} \dot{\rho}(t) \qquad \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{a^3} \right) = -\frac{3}{a^4} \dot{a}$$

$$2 \frac{\dot{a}}{a} \left[\frac{\ddot{a}}{a} - \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 \right] - 2 \frac{K \dot{a}}{a^3} = -8\pi G \rho \frac{\dot{a}}{a}$$

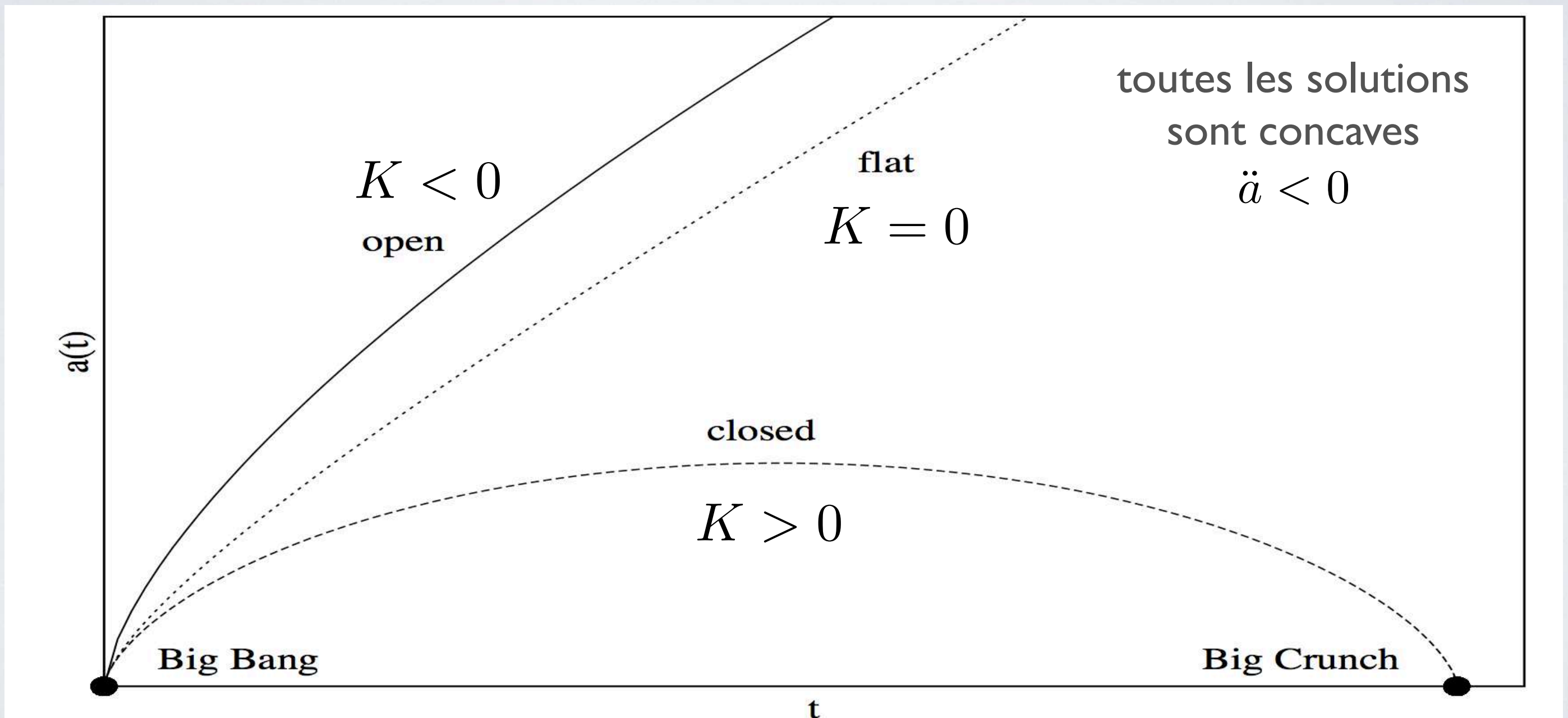
$$\frac{\ddot{a}}{a} = \underbrace{\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 + \frac{K}{a^2}}_{\frac{8\pi G}{3} \rho} - 4\pi G \rho$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{8\pi G}{3} \rho - 4\pi G \rho = -\frac{4\pi G}{3} \rho \leq 0$$

la vitesse d'expansion décroît

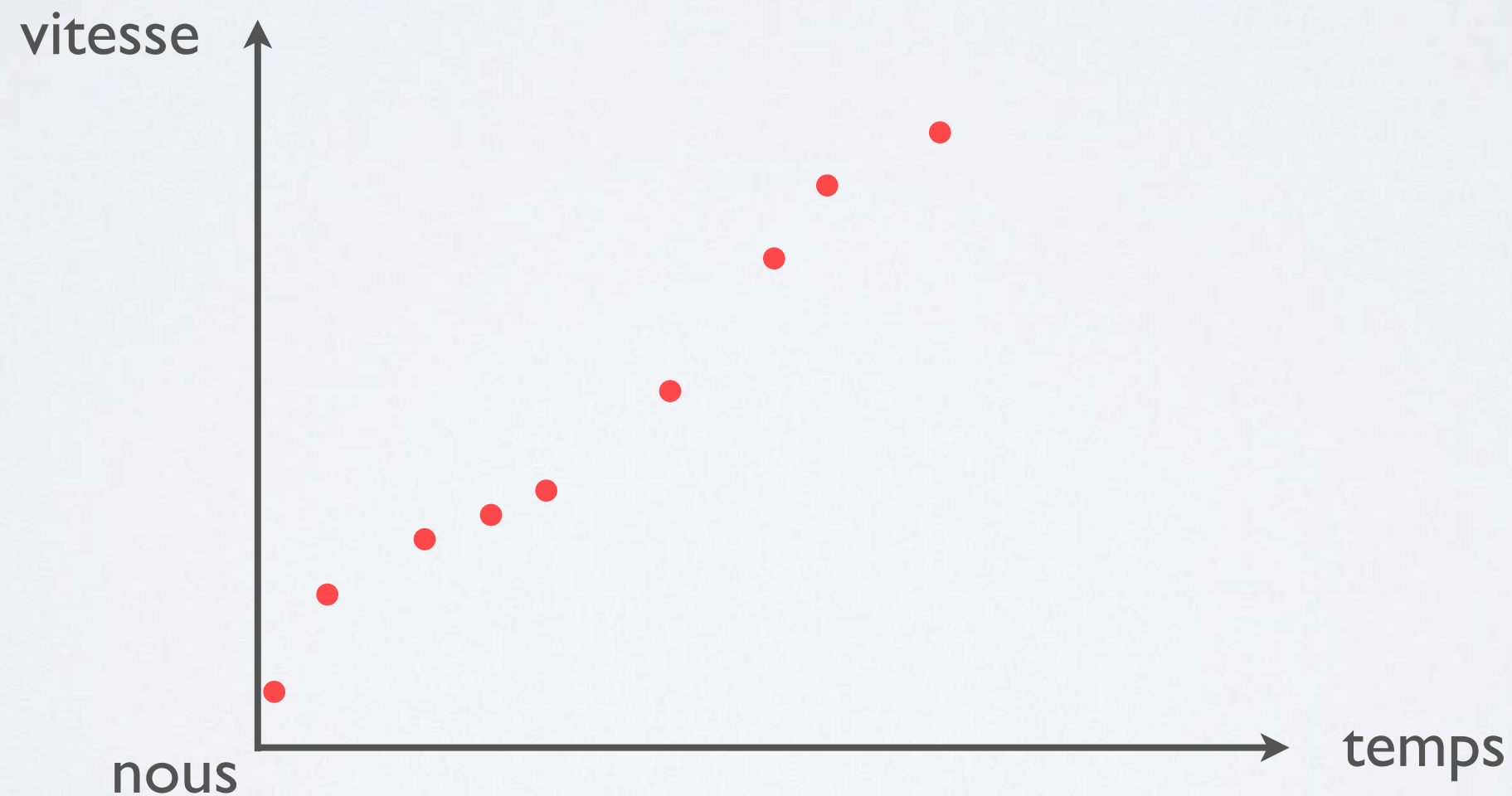
Solutions

La décélération de l'univers dépend de la **quantité** de **matière** et de la **courbure**.



Testons cette prédiction

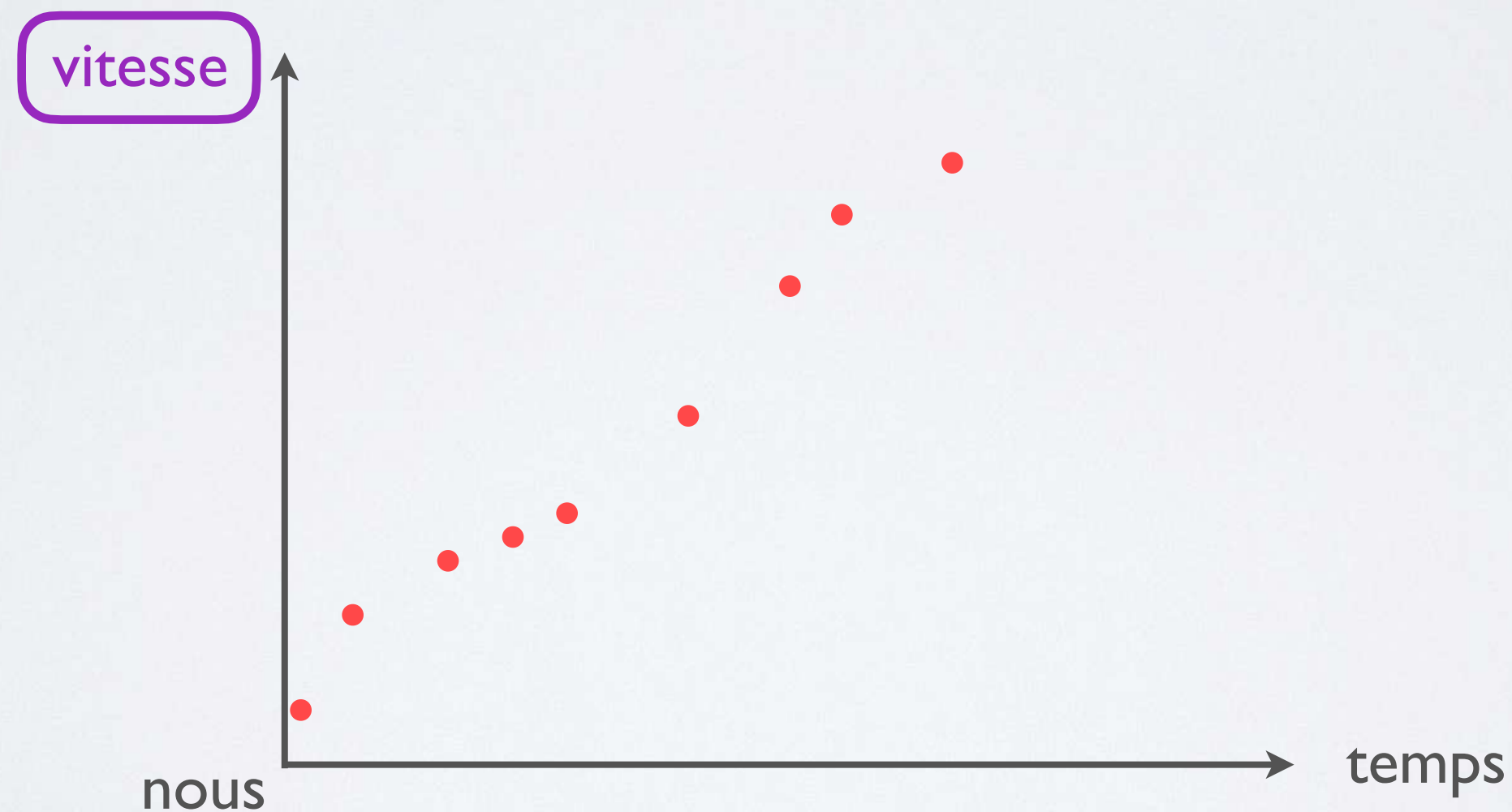
On mesure la **vitesse d'expansion** de l'univers à différents **moments** de l'histoire de l'Univers.



Testons cette prédiction

On mesure la **vitesse d'expansion** de l'univers à différents **moments** de l'histoire de l'Univers.

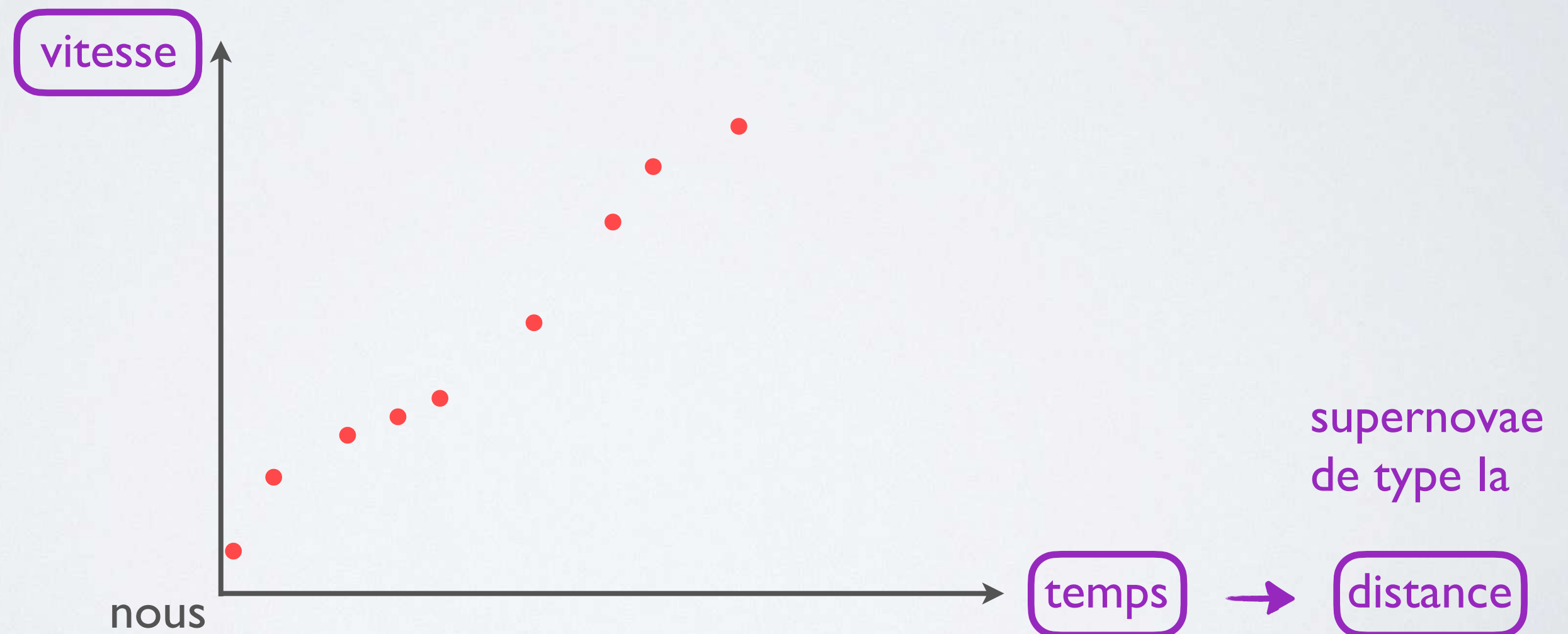
redshift: décalage du spectre vers le rouge



Testons cette prédiction

On mesure la **vitesse d'expansion** de l'univers à différents **moments** de l'histoire de l'Univers.

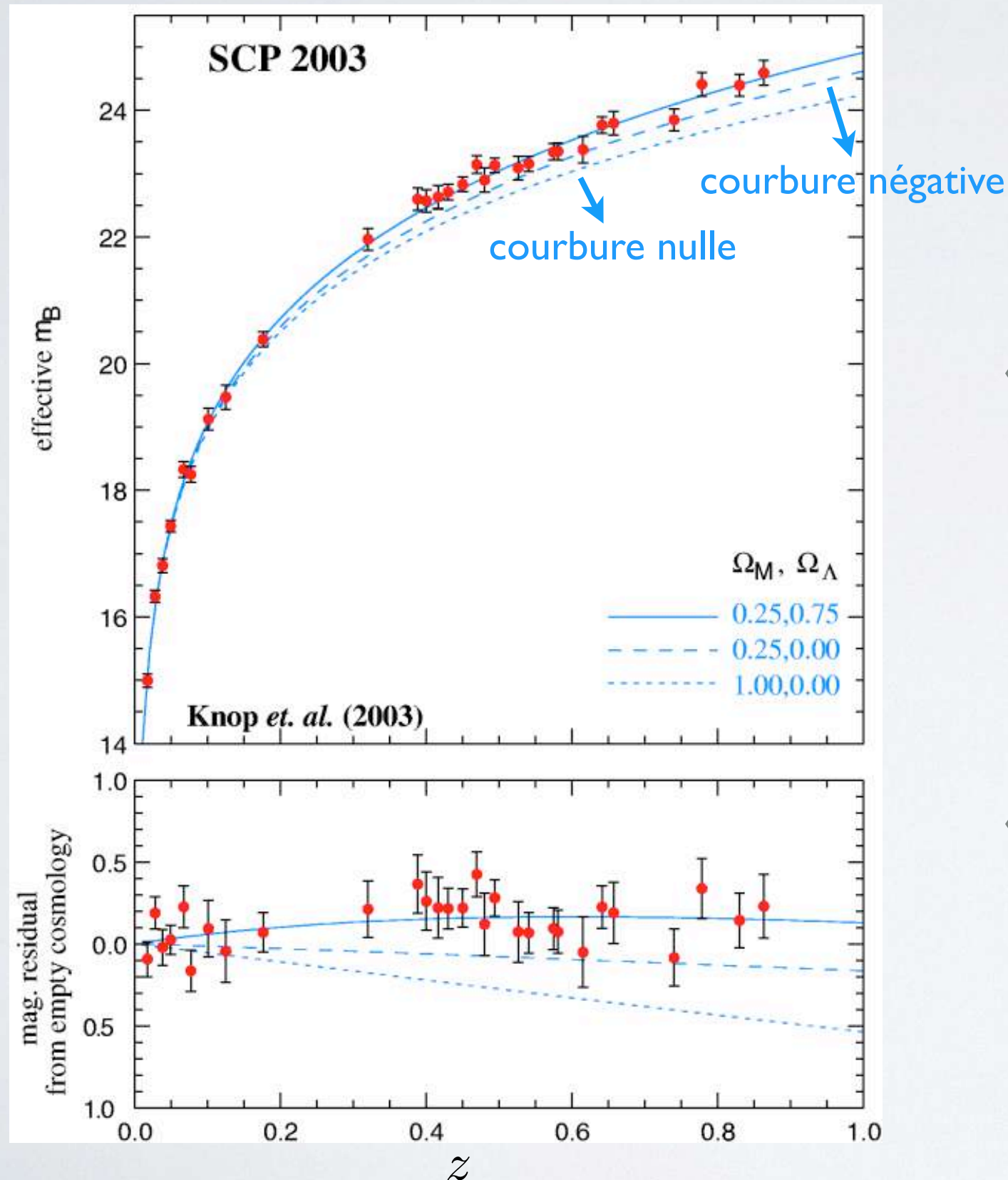
redshift: décalage du spectre vers le rouge



Résultat

distance = temps

vitesse



- ◆ **Problème**: aucune courbe théorique ne correspond aux données
- ◆ Aucune valeur de la courbure et de la densité ne marchent
- ◆ Raison: la courbe observée correspond à un univers en **accélération** $\ddot{a} > 0$

Réactions

- ◆ Erreur expérimentale. Peu probable car 2 groupes indépendants
- ◆ Les supernovae n'**explorent** pas toute de la même manière
- ◆ La lumière est absorbée par la **poussière**
- ◆ D'autres observations (CMB et distributions des galaxies) **confirment** l'accélération
- ◆ En 2011, le **prix Nobel** a été donné à Saul Perlmutter, Brian Schmidt et Adam Riess: "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae."

Conséquences

- ◆ Il faut changer quelque chose dans nos théories: **énergie sombre** ou modification des lois de la **gravitation**.

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho(t)$$

- ◆ Si la densité d'énergie est **constante** on peut avoir $\ddot{a} > 0$

$$2\frac{\dot{a}}{a} \left[\frac{\ddot{a}}{a} - \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 \right] - 2\frac{K\dot{a}}{a^3} = \frac{8\pi G}{3}\dot{\rho}(t) = 0$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho > 0 \quad \text{accélération}$$

Constante cosmologique

$$\rho(t) = \text{constante} = \frac{E(t)}{V(t)}$$

Le volume **croît** avec l'expansion: $V(t) = V(t_1) \frac{a(t)^3}{a(t_1)^3}$

$$\rightarrow E(t) = E(t_1) \frac{a^3(t)}{a^3(t_1)}$$

Création d'énergie au cours du temps

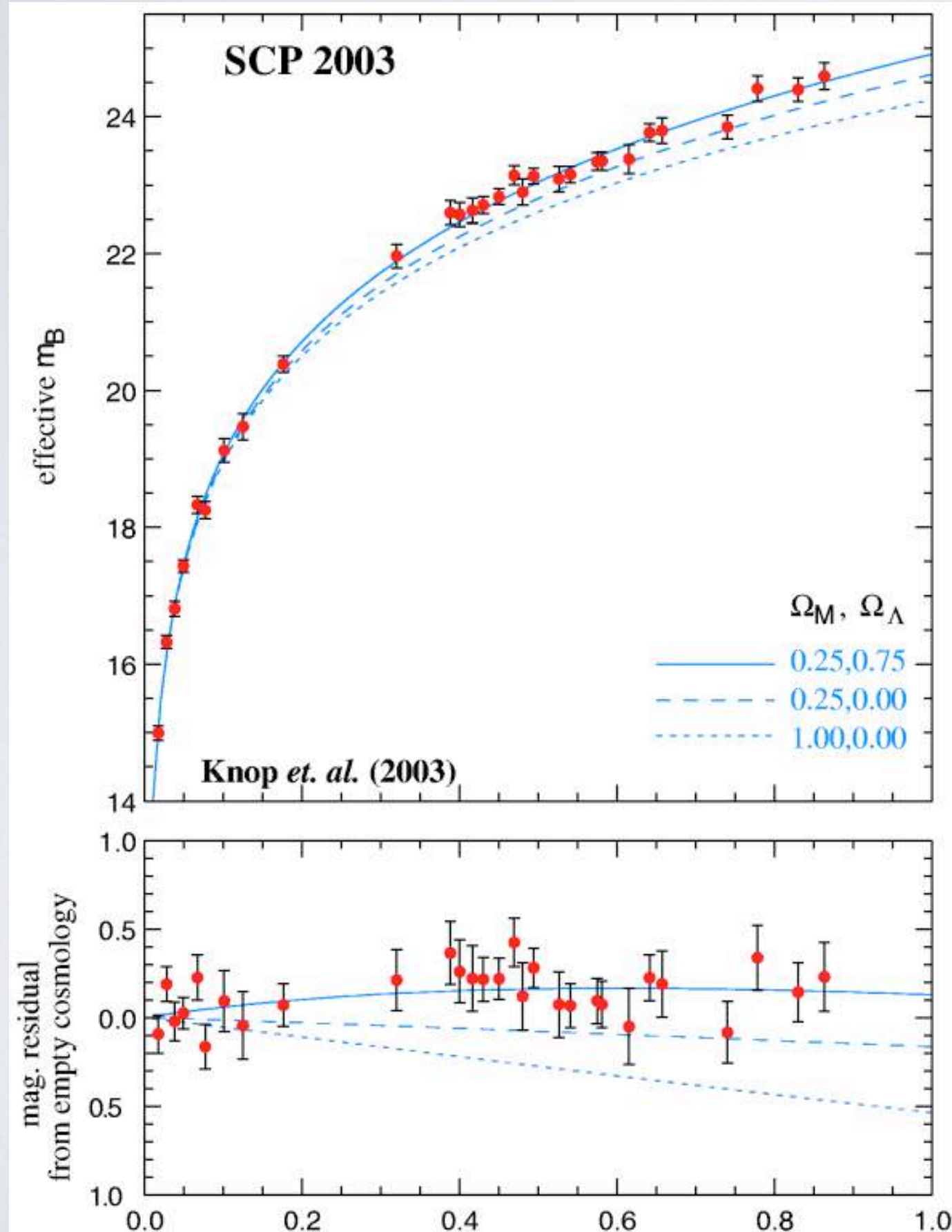
Einstein l'avait introduite dans ses équations

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho(t) + \frac{\Lambda}{3}$$

biggest blunder of my life

Constante cosmologique

→ courbure nulle
25 % matière
75 % constante cosmologique



Modèle standard de la cosmologie Λ CDM

Alternatives

- ◆ La constante cosmologique reproduit très bien les données des supernovae, mais on ne sait pas ce qu'elle est.
- ◆ **L'énergie du vide** se comporte comme une constante cosmologique. Mais sa valeur est 10^{120} trop grande!
- ◆ Pourquoi la constante cosmologique devient importante exactement **8 milliards d'années** après le Big Bang?
- ◆ **Autres possibilités:**
 - Une **énergie sombre** dynamique, qui se dilue mais très lentement.
 - Une **modification** de la théorie de la **relativité générale**.

Alternatives

- ◆ La constante cosmologique reproduit très bien les données des supernovae, mais on ne sait pas ce qu'elle est.
- ◆ **L'énergie du vide** se comporte comme une constante cosmologique. Mais sa valeur est 10^{120} trop grande!
- ◆ Pourquoi la constante cosmologique devient importante exactement **maintenant**?

- ◆ **Autres possibilités:** modifier cette partie
↓

Une **énergie sombre** $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho(t)$ dilue mais très lentement.

Une **modification** de la théorie de la **relativité générale**.

Energie sombre

◆ La constante cosmologique ne se **dilue pas**. On peut avoir une autre forme d'énergie qui se dilue plus lentement que la matière.

◆ Cas limite: $\rho \sim 1/a^2$

◆ La dilution dépend de la **pression**

• matière $P = 0$ $\rho \sim 1/a^3$

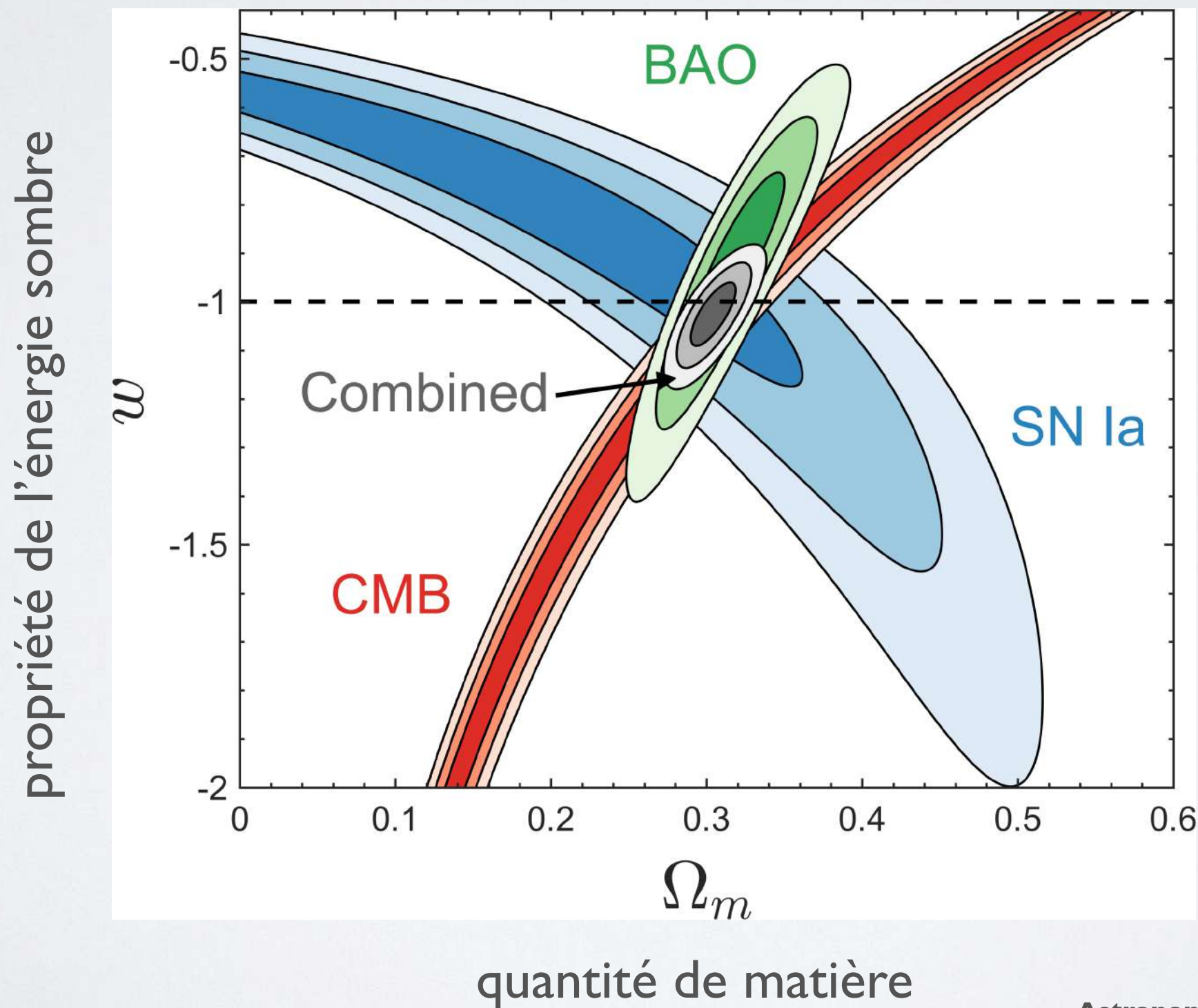
• radiation $P = \rho/3$ $\rho \sim 1/a^4$

• const. cosm. $P = -\rho$ $\rho \sim \text{constante}$

Contraintes

Equation d'état $w = \frac{P}{\rho}$

Constante cosmologique $w = -1$ Accélération si $w < -1/3$

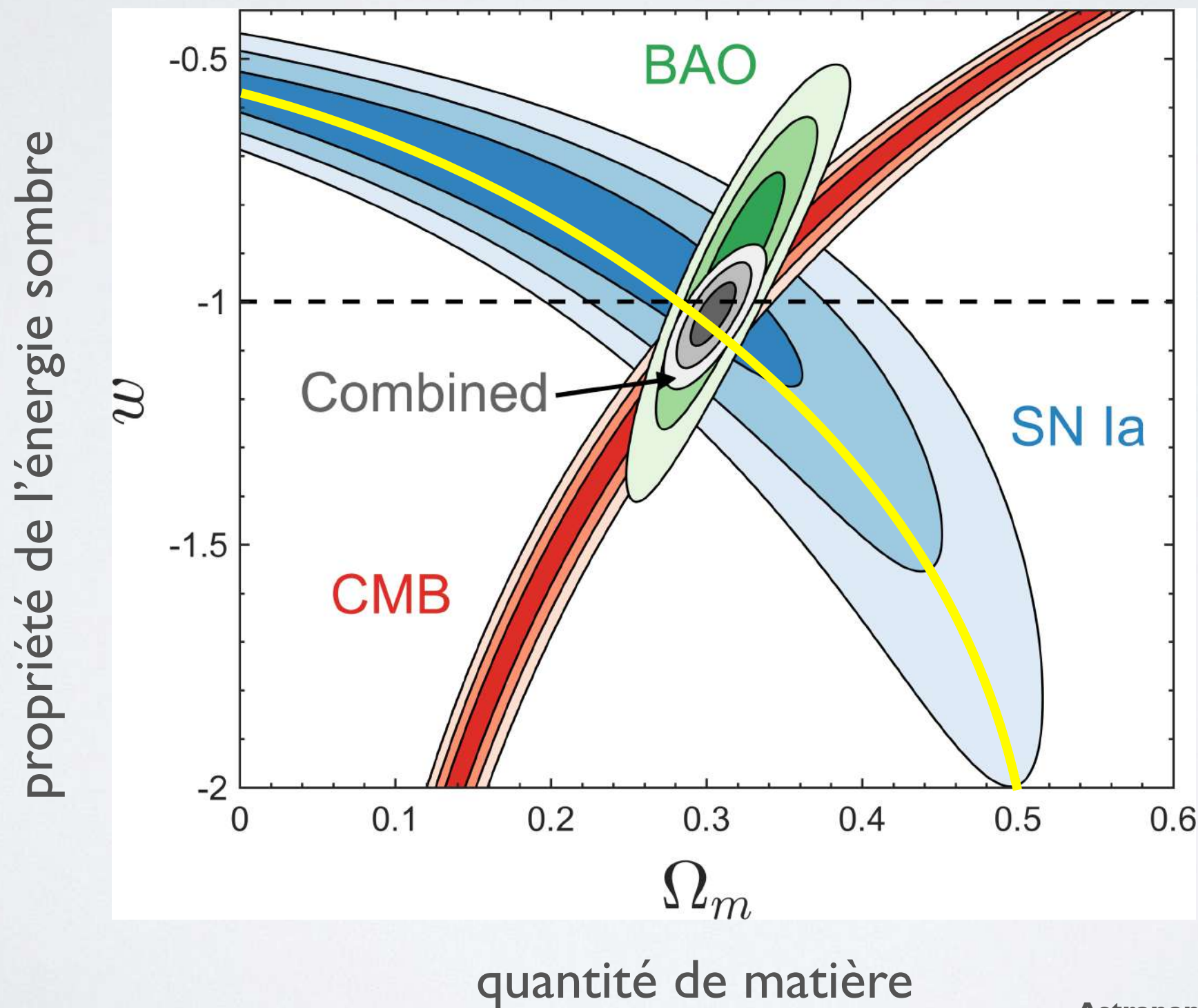


Crédit: Huter and Shafer Rep. Prog. Phys. 81 (2018)

Contraintes

Equation d'état $w = \frac{P}{\rho}$

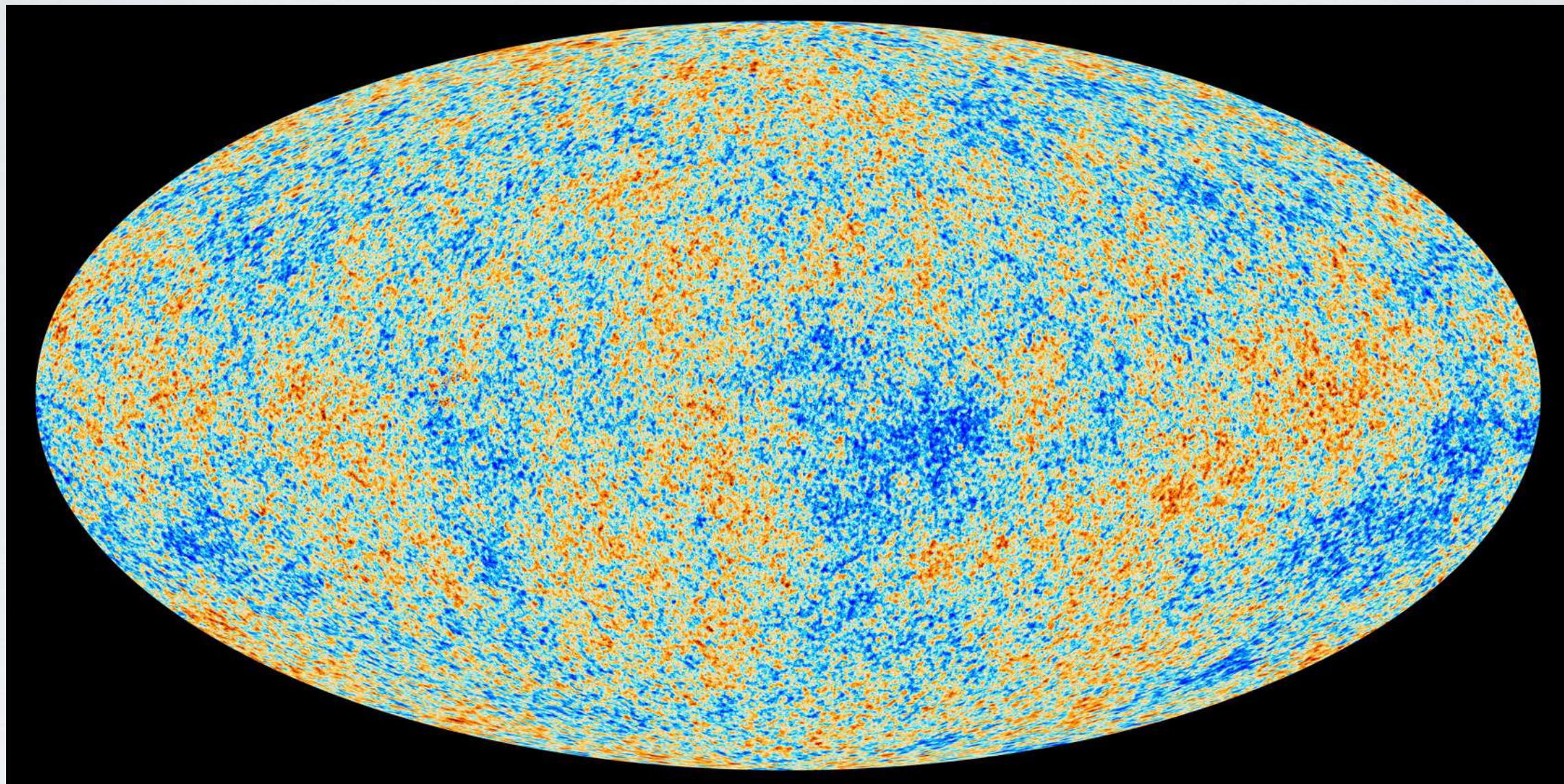
Constante cosmologique $w = -1$ Accélération si $w < -1/3$



Crédit: Huter and Shafer Rep. Prog. Phys. 81 (2018)

Observation: le fond cosmique micro-onde

Fluctuations de température de l'ordre de 10^{-5} K



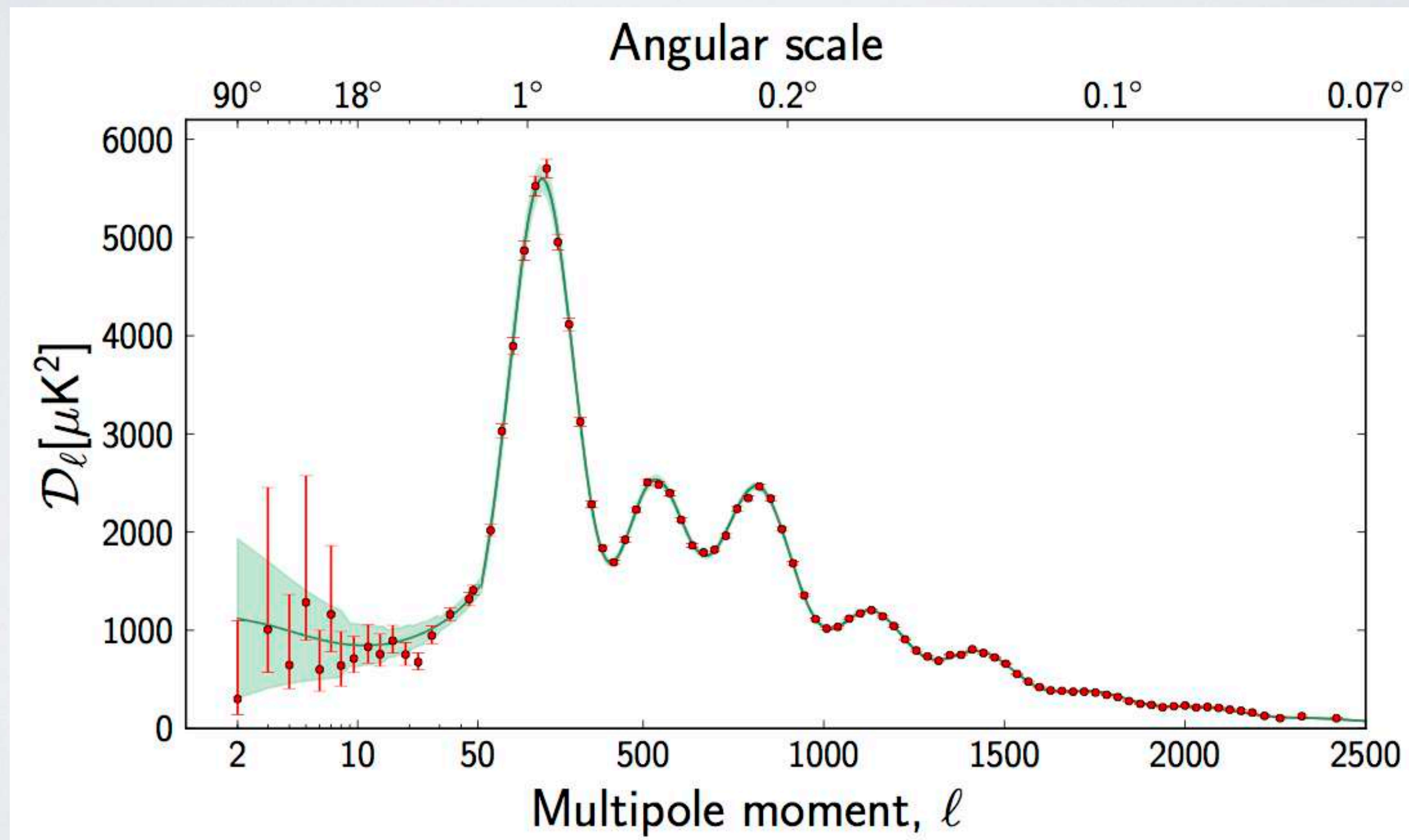
Credit: Planck

Il y a une **structure** dans les fluctuations de température due aux **oscillations** baryons-photons

Corrélations de température

La **position** du pic nous donne la taille de l'horizon acoustique

→ dépend de la quantité de matière et de photons

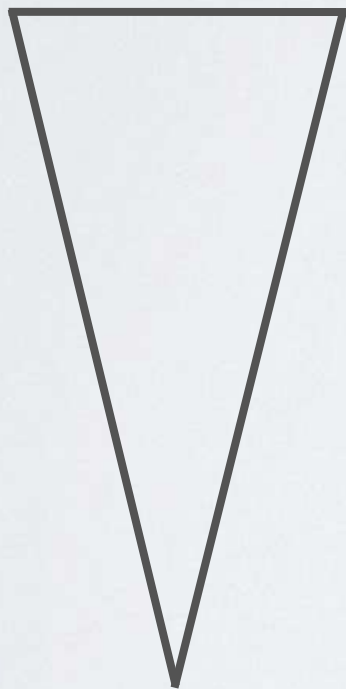


Mesure de la courbure

La **taille** observée du pic dépend de la **courbure**

$$K = 0$$

Horizon acoustique



Observateur

$$K > 0$$

Horizon acoustique



Observateur

$$K < 0$$

Horizon acoustique



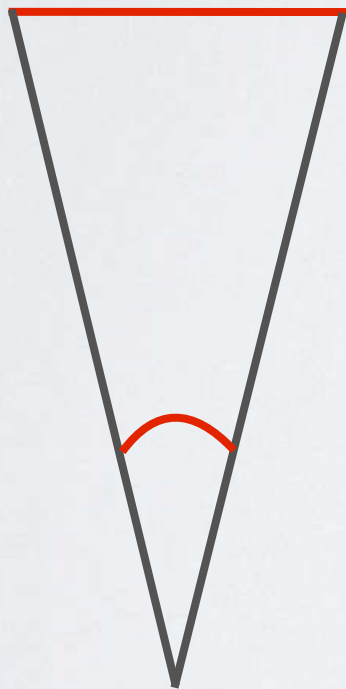
Observateur

Mesure de la courbure

La **taille** observée du pic dépend de la **courbure**

$$K = 0$$

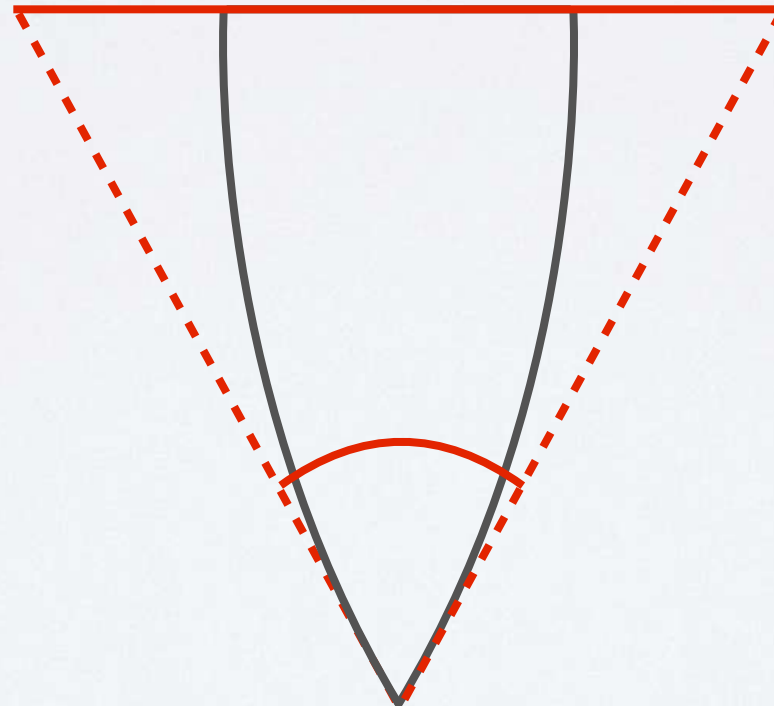
Horizon acoustique



Observateur

$$K > 0$$

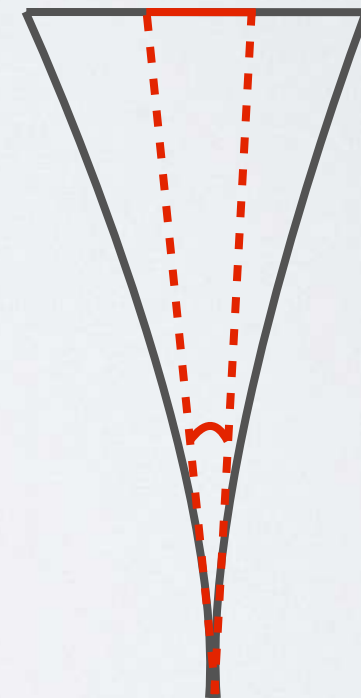
Horizon acoustique



Observateur

$$K < 0$$

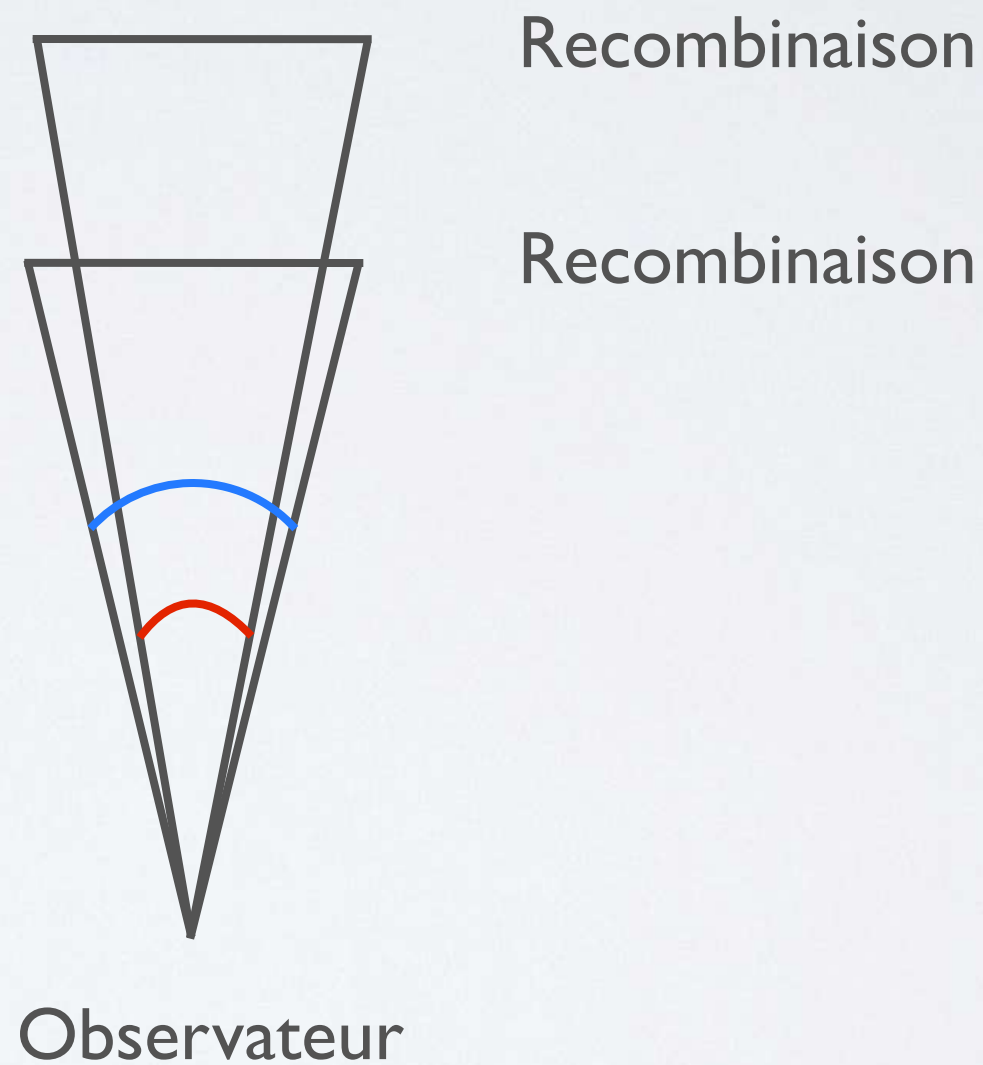
Horizon acoustique



Observateur

Energie sombre

La taille observée du pic dépend de la **distance**. Cette distance est différente dans un univers en décélération ou en **accélération**.

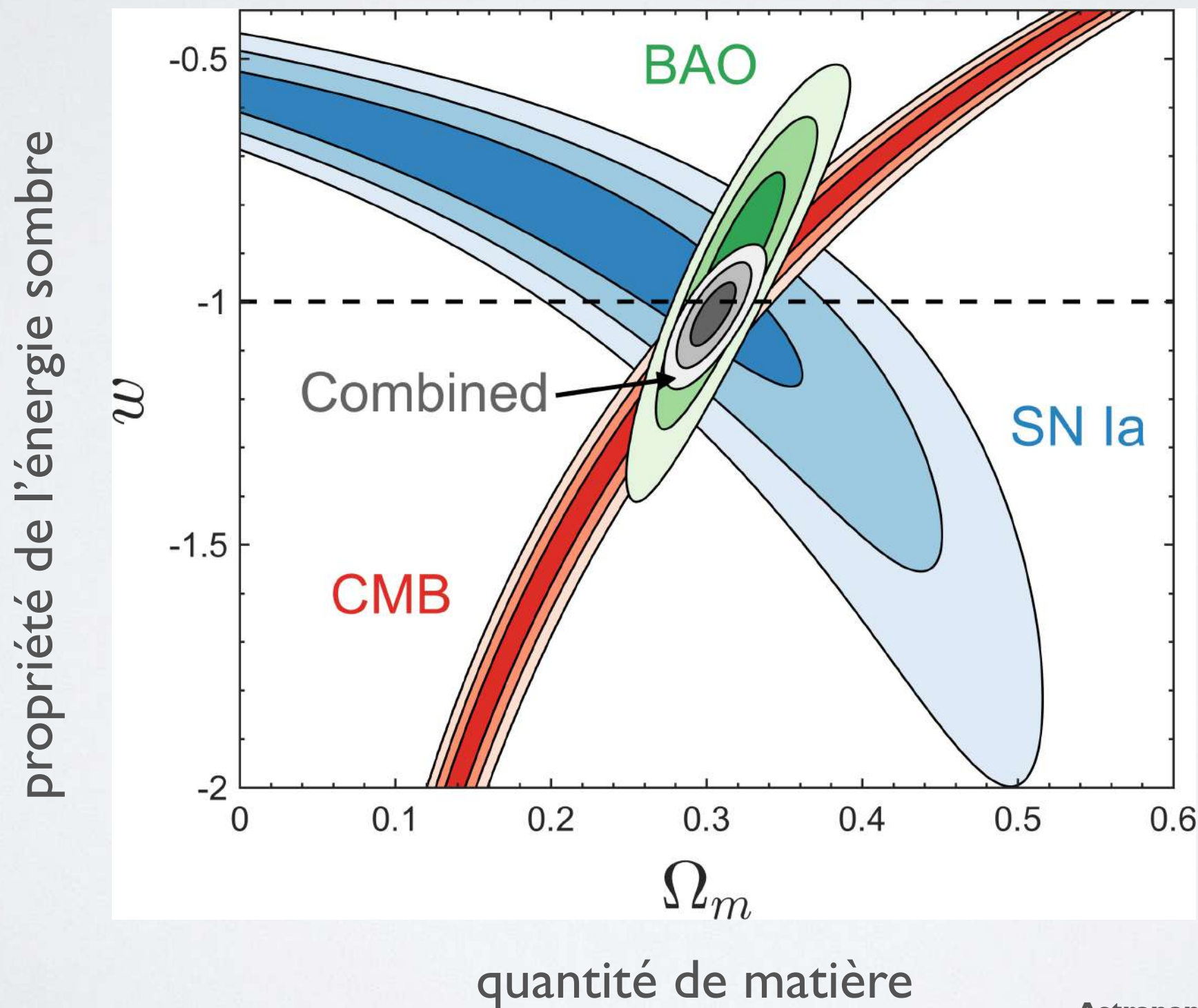


Le CMB peut contraindre l'énergie sombre.

Contraintes

Equation d'état $w = \frac{P}{\rho}$

Constante cosmologique $w = -1$ Accélération si $w < -1/3$

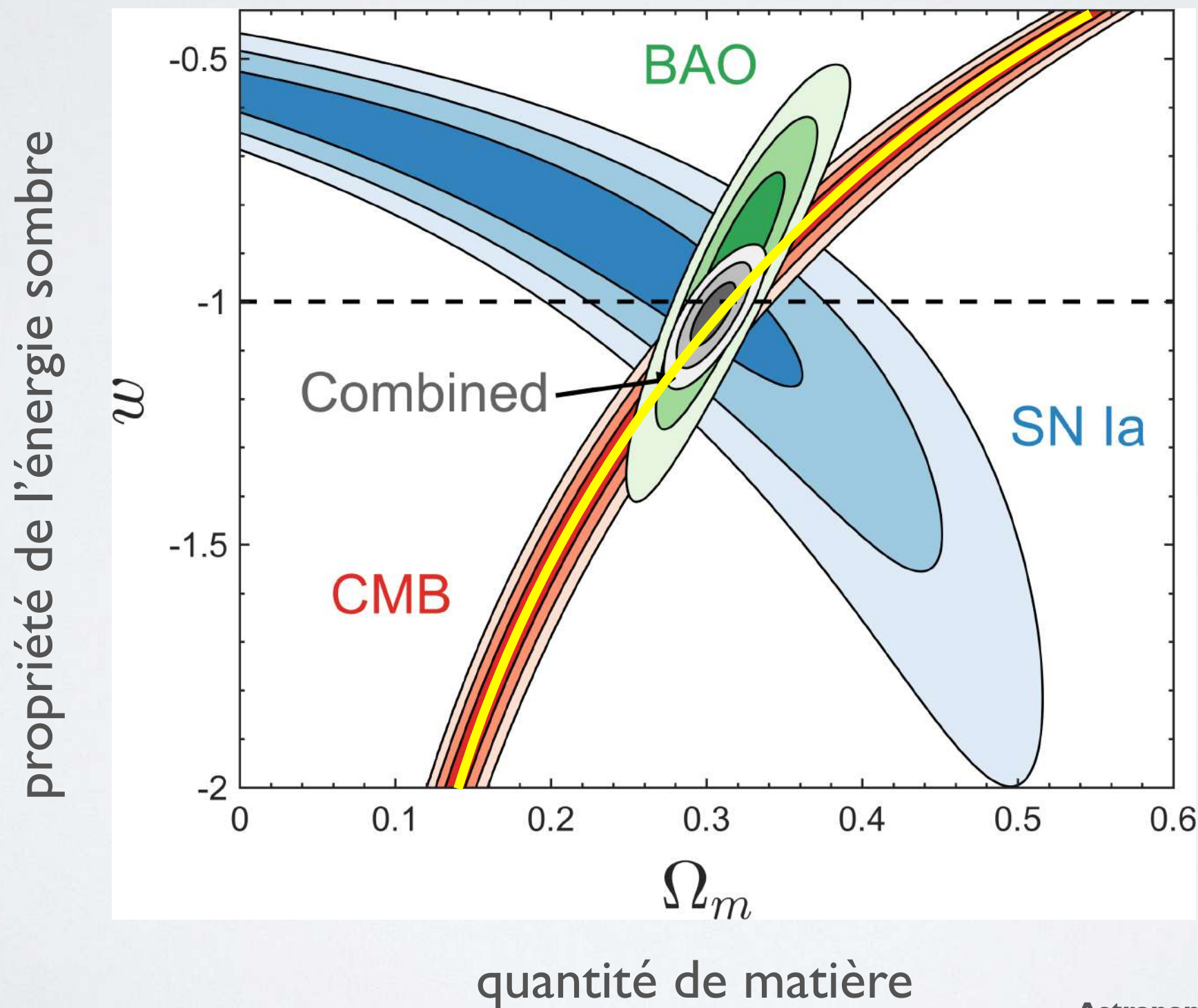


Crédit: Huter and Shafer Rep. Prog. Phys. 81 (2018)

Contraintes

Equation d'état $w = \frac{P}{\rho}$

Constante cosmologique $w = -1$ Accélération si $w < -1/3$

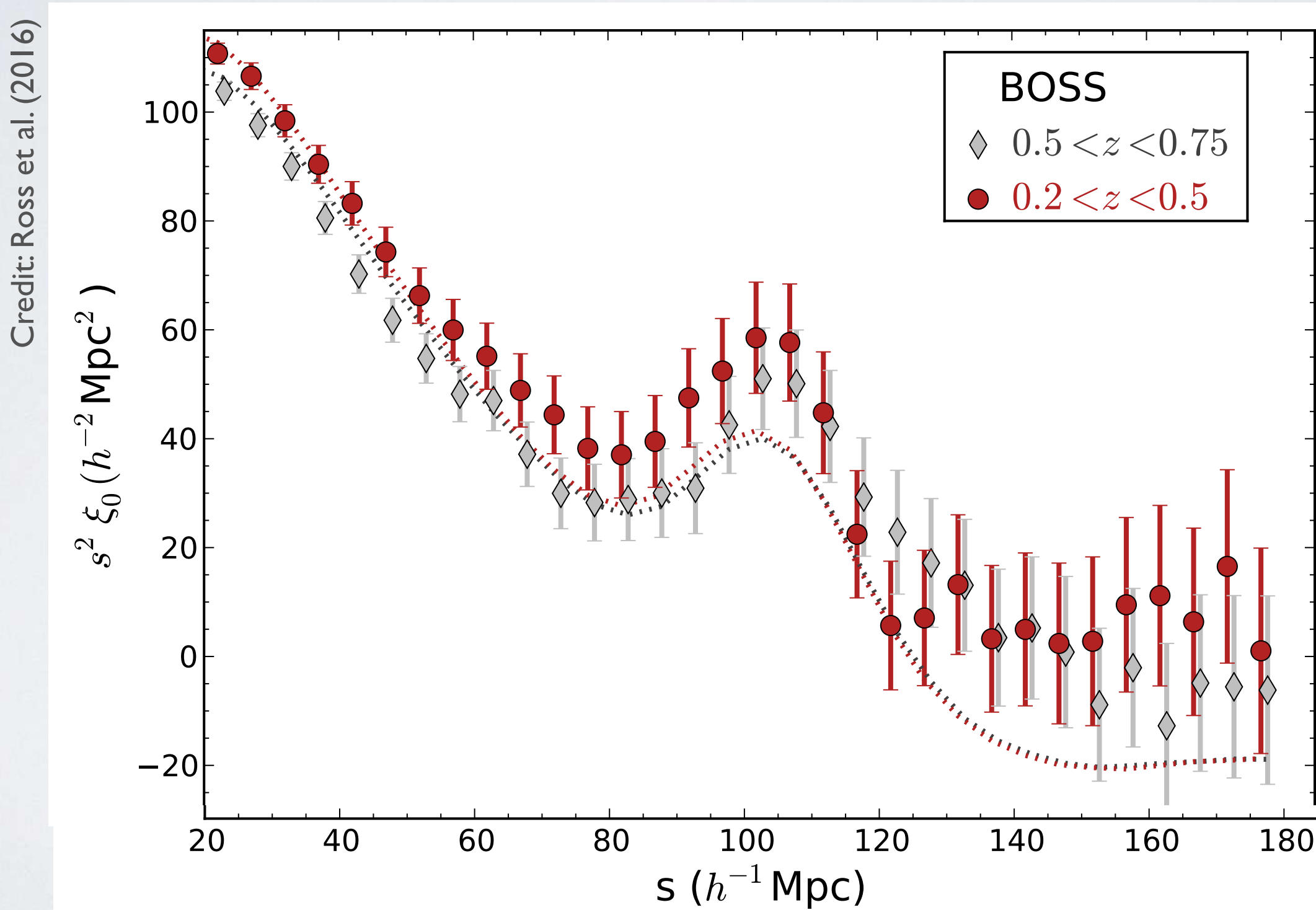


Crédit: Huter and Shafer Rep. Prog. Phys. 81 (2018)

La quantité de matière est aussi contrainte par l'amplitude des fluctuations

Oscillations baryoniques acoustiques

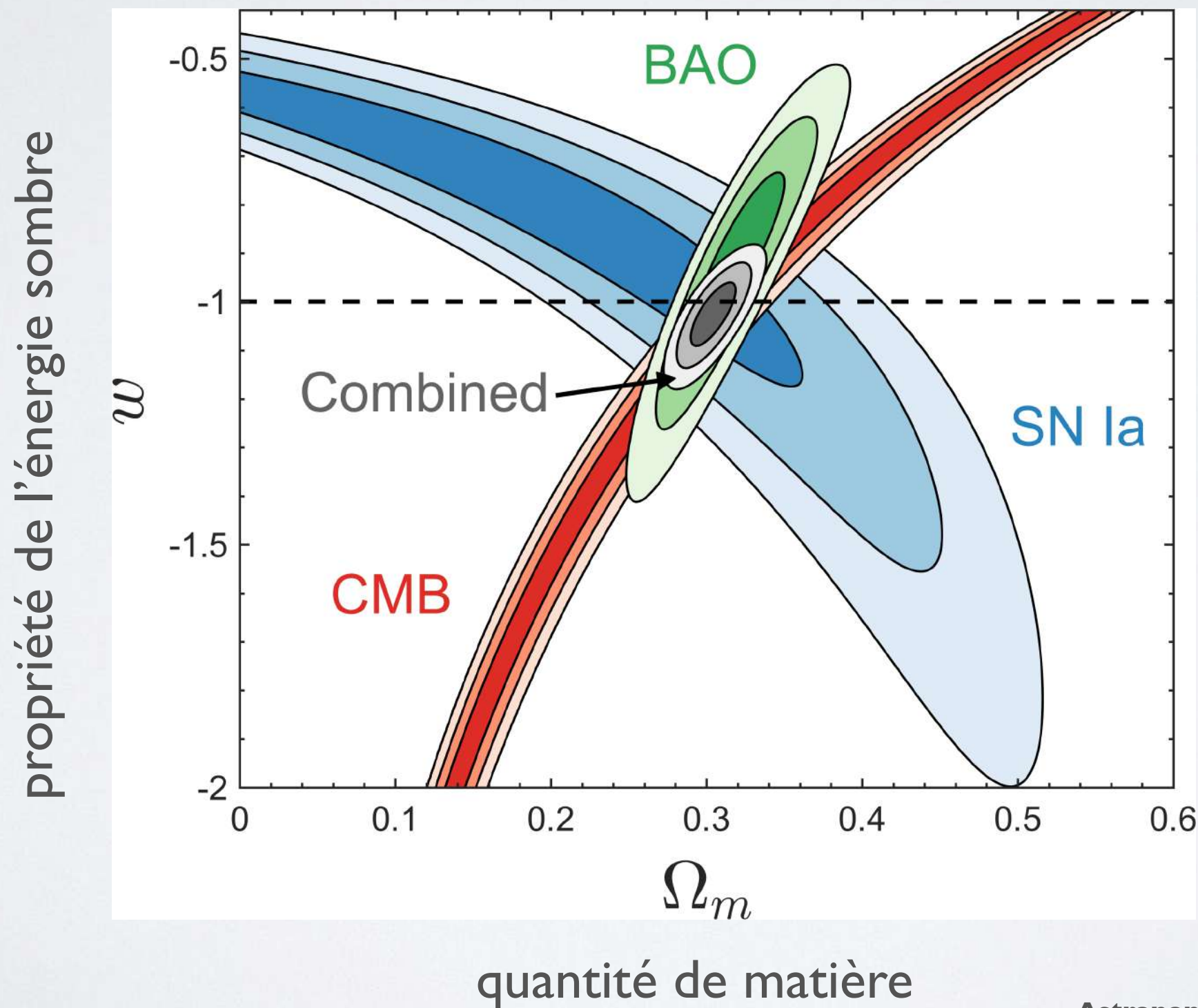
Les oscillations affectent aussi la matière.



Contraintes

Equation d'état $w = \frac{P}{\rho}$

Constante cosmologique $w = -1$ Accélération si $w < -1/3$



Crédit: Huter and Shafer Rep. Prog. Phys. 81 (2018)

Modification de la gravitation

- ◆ Au lieu d'introduire de l'énergie sombre, on peut **modifier** les lois de la **gravitation**.
- ◆ On modifie les équations d'Einstein tel que même avec seulement de la matière $\ddot{a} > 0$
- ◆ On introduit un nouvel **ingrédient** dans l'univers, qui modifie la relation entre la géométrie et le contenu: **médiateur** de la gravité

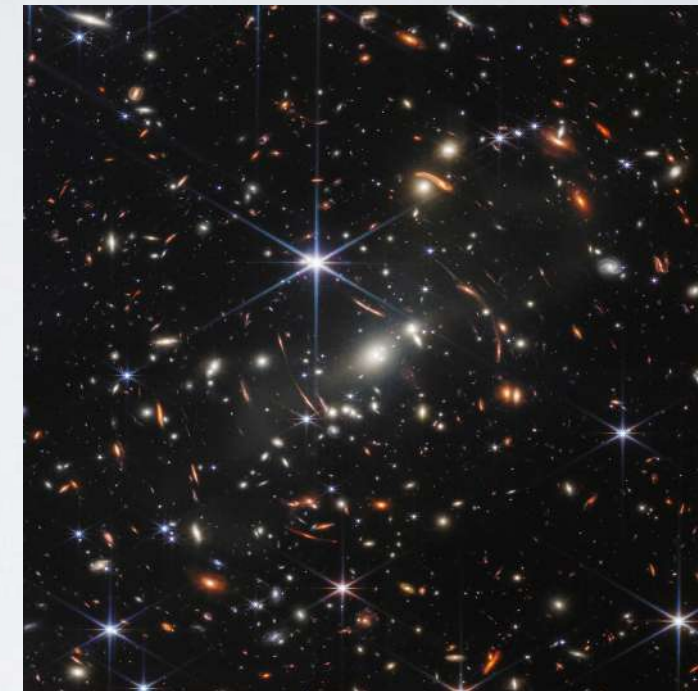
Gravitation modifiée

Difficulté: retrouver les lois correctes à **petite distance**

Comme la relativité générale



Lois différentes



The Fab Four

Einstein-Aether

Cascading gravity

Horndeski

Randall-Sundrum

Galileon

Massive gravity

$f(R)$

Bigravity

Gauss-Bonnet

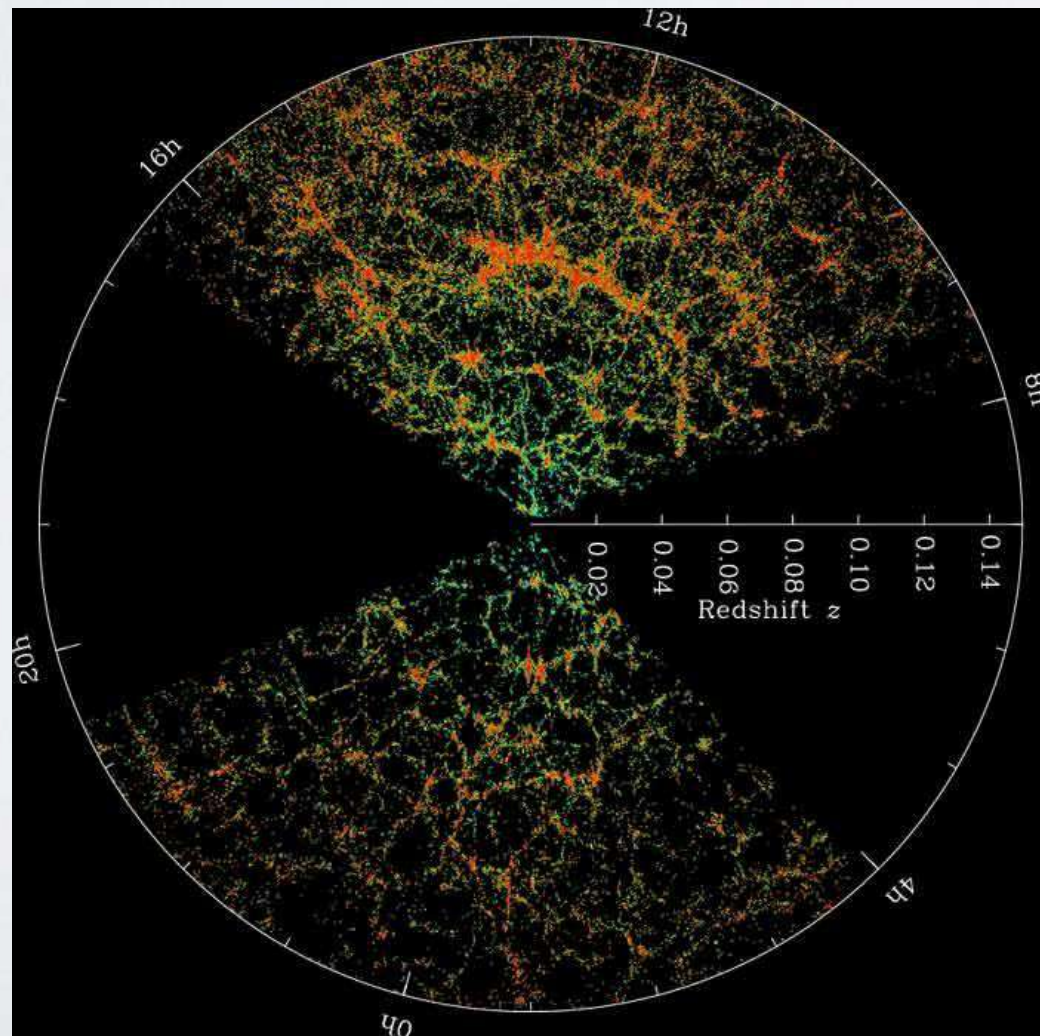
DGP

Brans-Dicke

Distinguer les deux solutions

- ◆ On a deux mécanismes **fondamentalement différents** qui expliquent l'expansion accélérée
 - Comment on les **distingue**?
- ◆ On regarde la formation des **structures**

Credit: M. Blanton, SDSS



Différentes théories de la gravité mènent à différentes **distributions** de **galaxies**

Distributions des galaxies

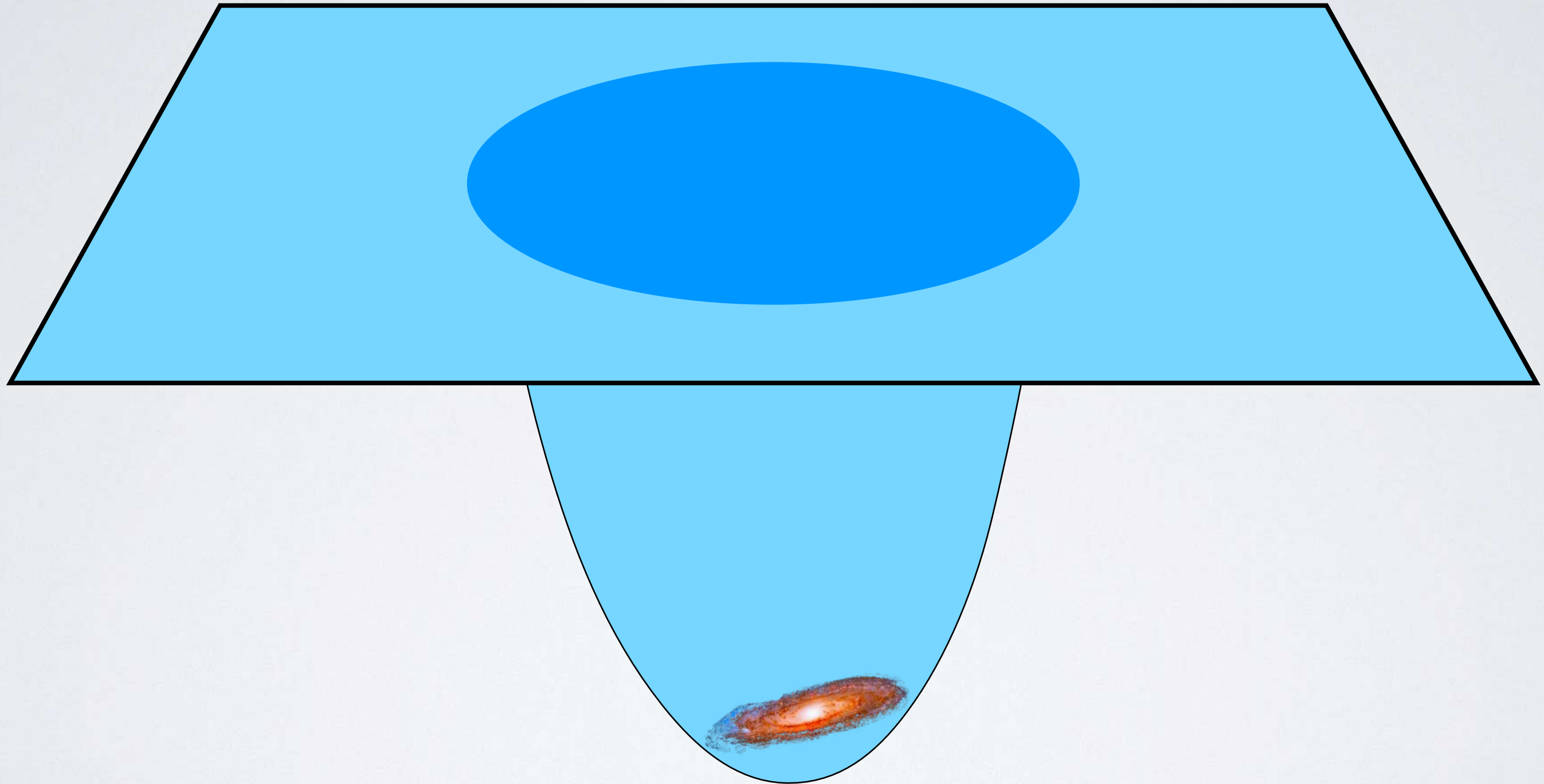
- ◆ Avec les **données actuelles**, un grand nombre de modèles d'énergie sombre et de gravitation modifiée sont **en accord** avec les observations
- ◆ Euclid, DESI, SKA vont permettre des tests beaucoup **plus précis**

Euclid observera

- un **tiers** du ciel
 - des **milliards** de galaxies
 - jusqu'à **10 milliards** d'années lumière
- **évolution** des structures à très grande échelle

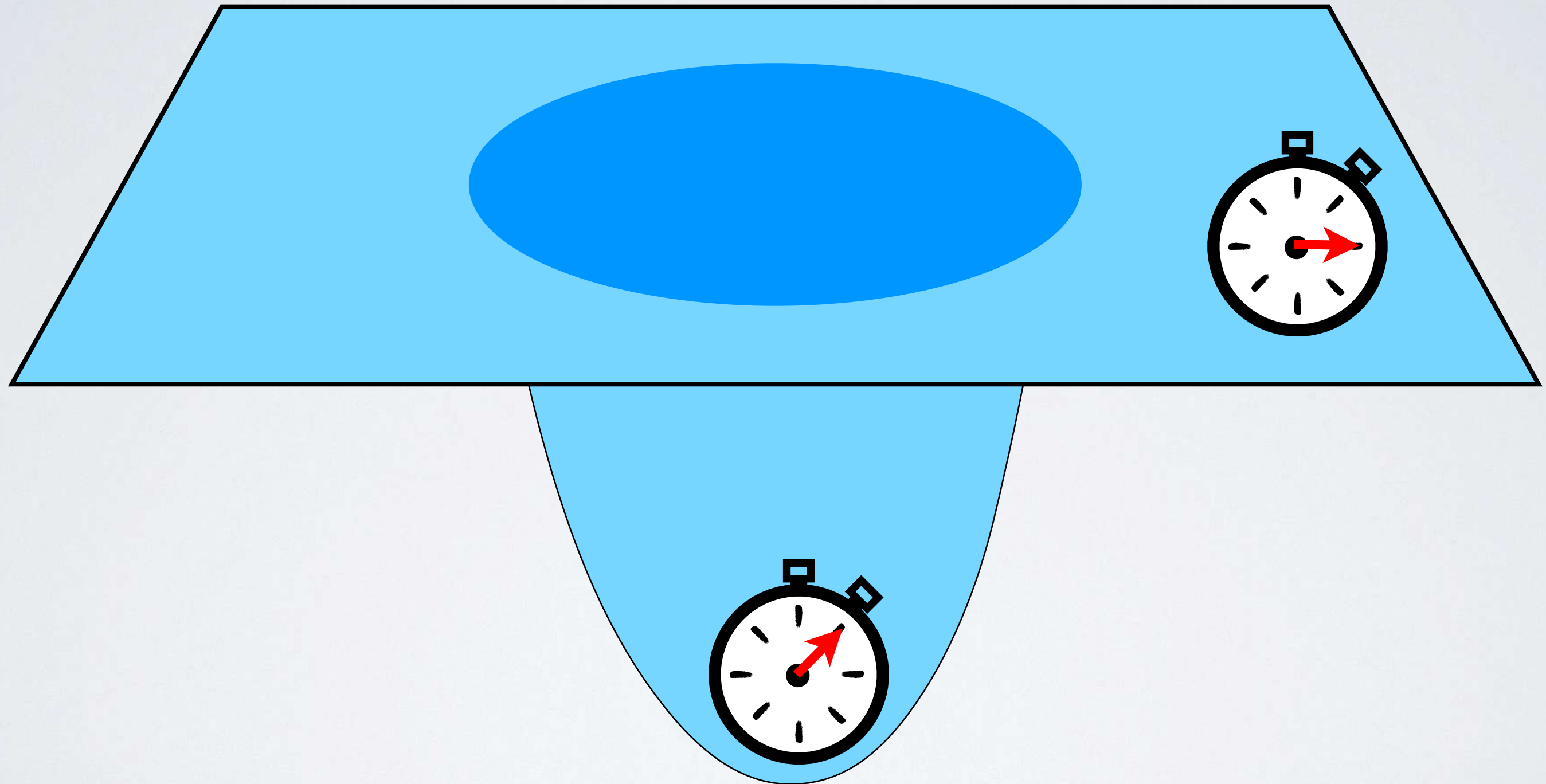
Géométrie de l'univers

La relativité générale prédit une distortion de l'**espace-temps**



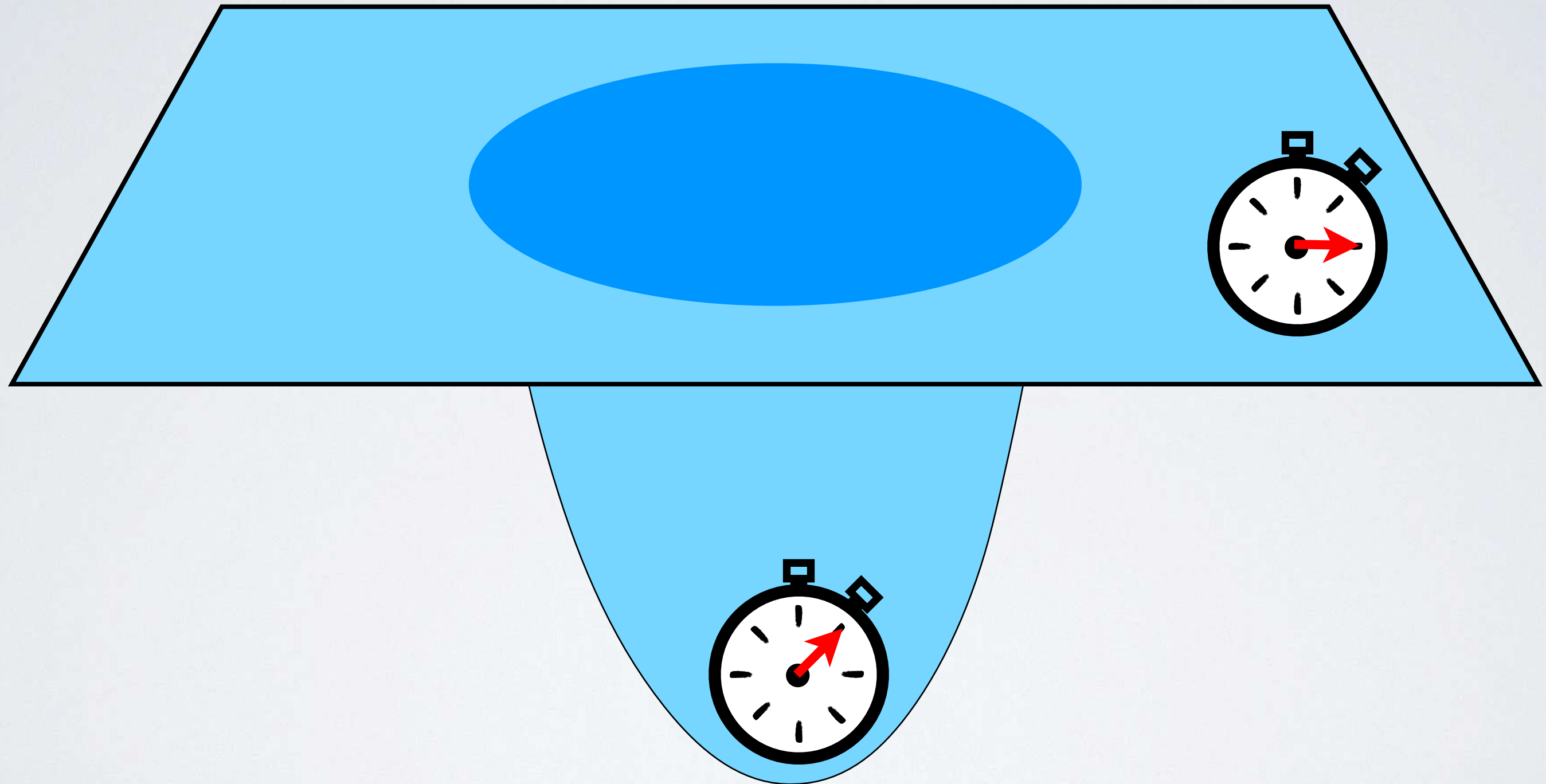
Géométrie de l'univers

La relativité générale prédit une distortion de l'**espace-temps**



Géométrie de l'univers

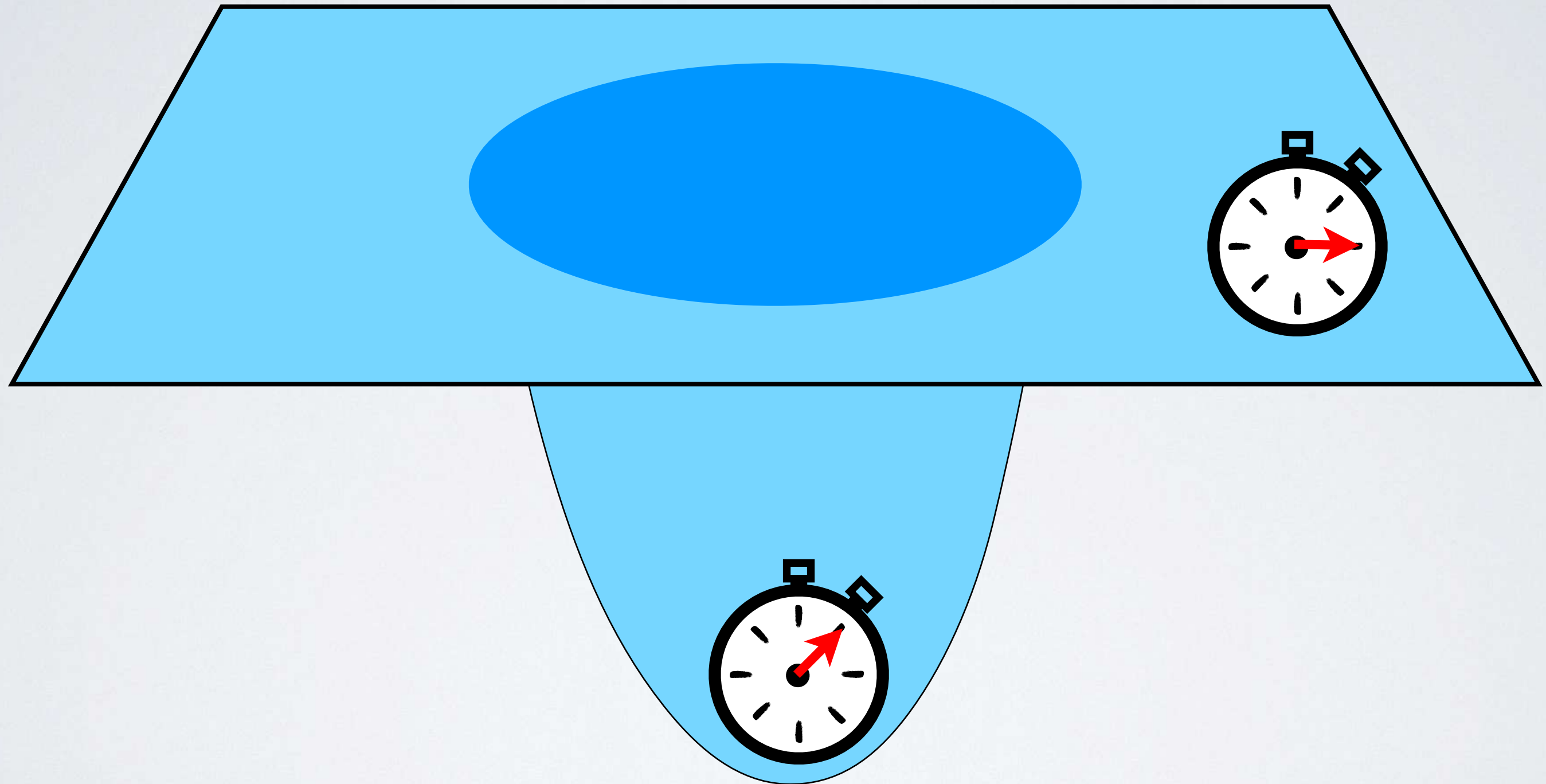
La relativité générale prédit une distortion de l'**espace-temps**



En relativité générale les **distortions** sont les **mêmes**

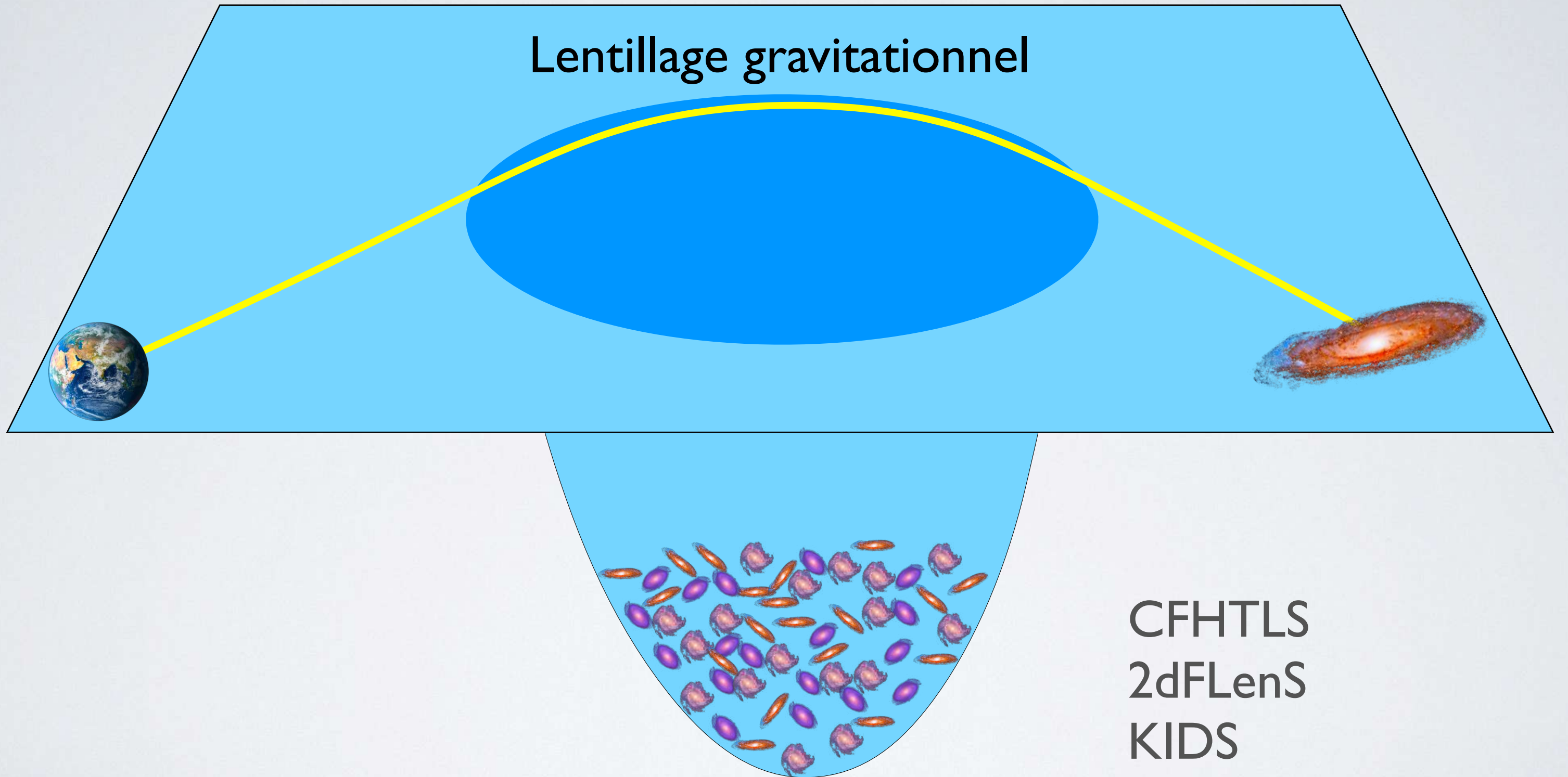
Géométrie de l'univers

La relativité générale prédit une distortion de l'**espace-temps**



Dans les autres théories les **distortions** sont en général **différentes**

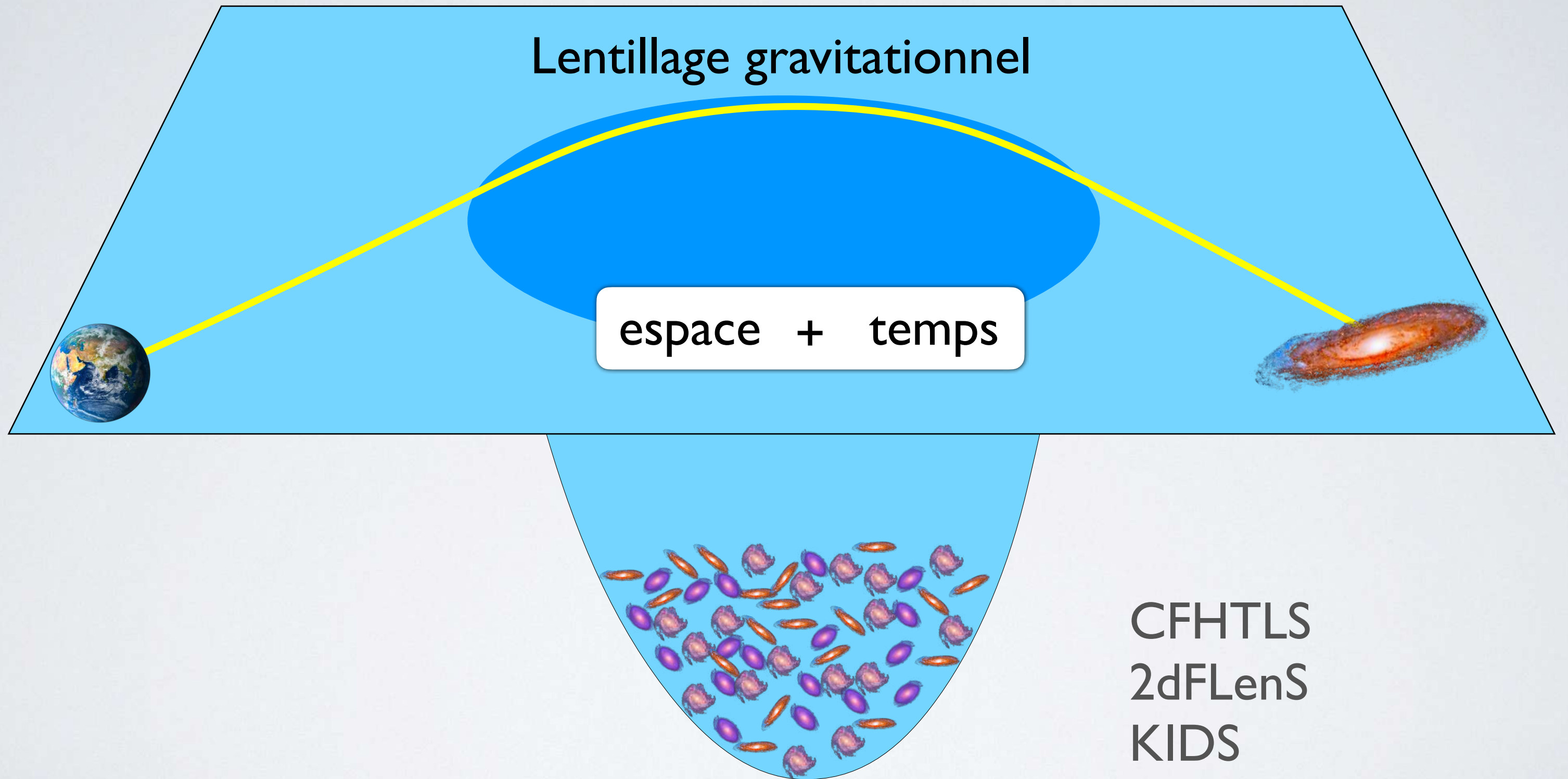
Mesurer la somme des distortions



Lentillage gravitationnel

CFHTLS
2dFLenS
KIDS
Dark Energy Survey

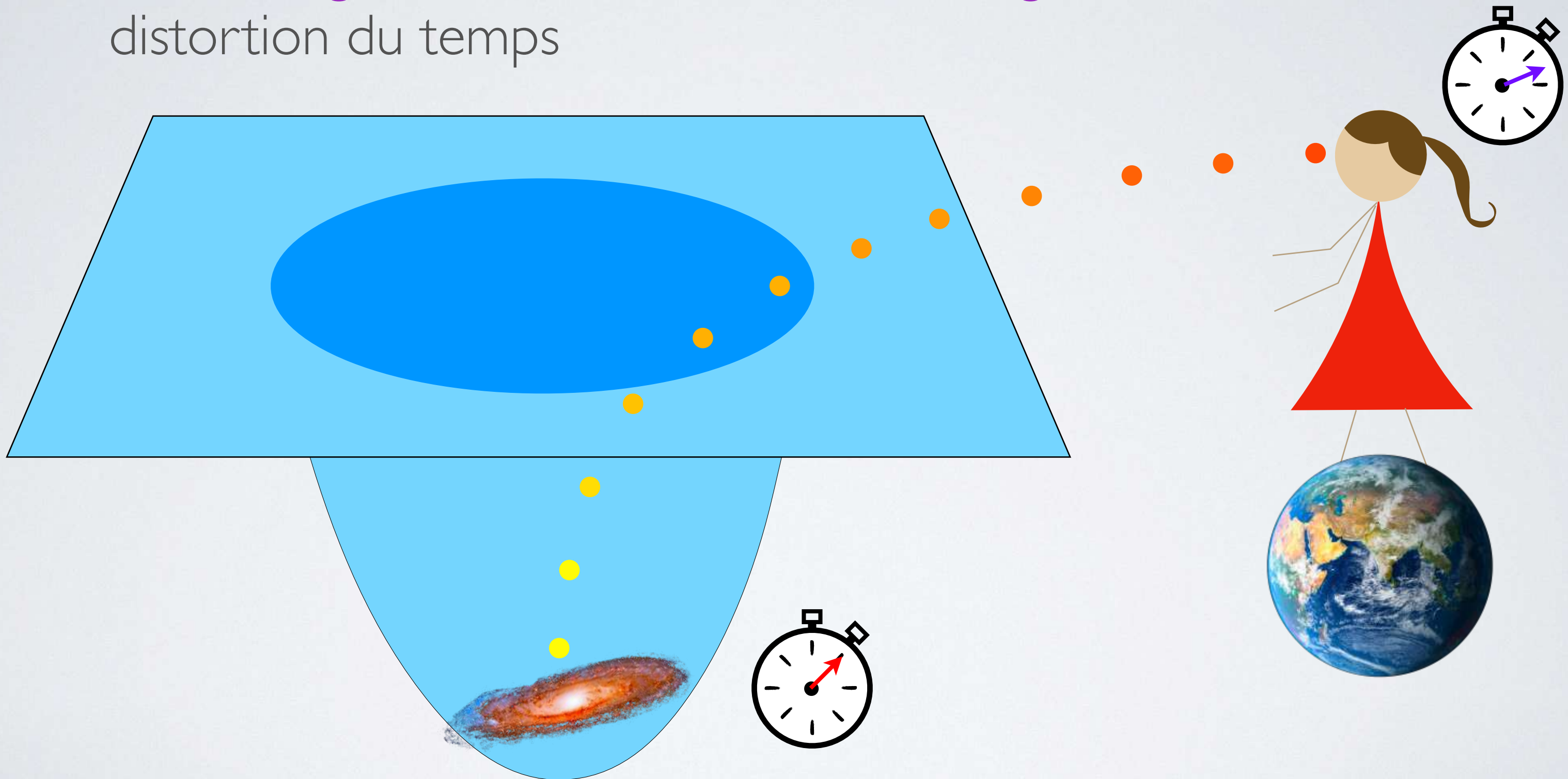
Mesurer la somme des distortions



CFHTLS
2dFLenS
KIDS
Dark Energy Survey

Mesurer la distortion du temps

- ◆ **Redshift gravitationnel**: la lumière **rougit** à cause de la distortion du temps



Mesurer la distortion du temps

- ◆ Cette distortion est trop **petite** pour être mesurée actuellement
- ◆ On a construit une **méthode** pour mesurer cette distortion, avec DESI, Euclid et le SKA
- ◆ Distortion **temps + espace** = **2 x** distortion **temps**?
 - **Oui**: la relativité générale a passé un nouveau test, et les théories qui prédisent une différence sont **exclues**
 - **Non**: la relativité générale n'est **pas valable** à très grande distance!

Conclusions

- ◆ La découverte de l'**expansion accélérée** de l'univers a bouleversé notre compréhension du cosmos
- ◆ Pour l'expliquer il y a **deux** possibilités:
 - Rajouter de l'**énergie sombre**, avec pression négative
 - Modifier les **lois** de la **gravité** à très grande distance
- ◆ Dans le future proche on veut **distinguer** ces deux possibilités en
 - Regardant la **distribution** des galaxies
 - Comparant la **distortion** du temps et de l'espace