

Observer l'infiniment grand

Clément Leloup - Laboratoire AstroParticules et Cosmologie
CNRS / IN2P3 / Université Paris Cité

Plan

I. Contexte théorique

II. Confirmation observationnelle

III. Questions ouvertes et futures expériences

Plan

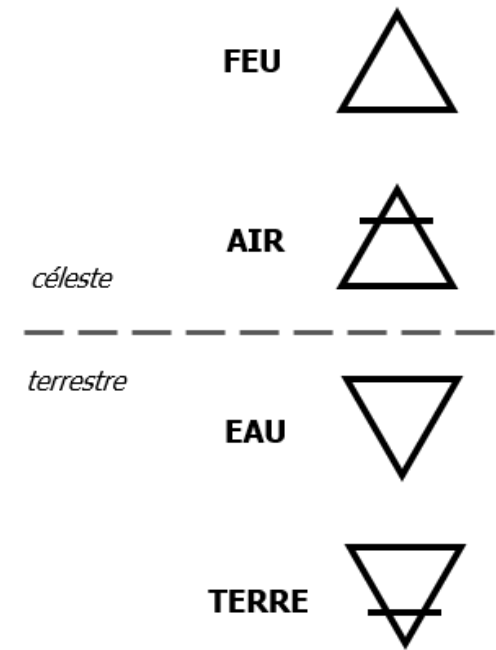
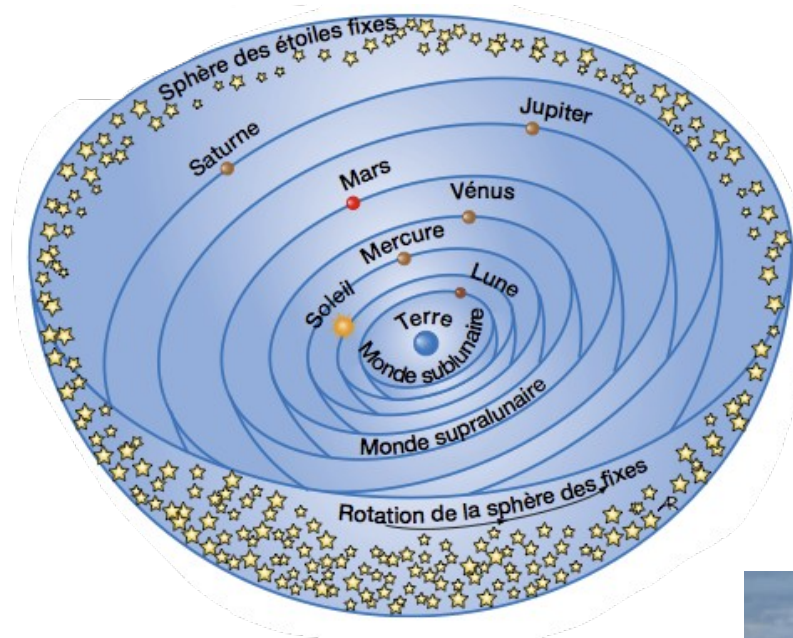
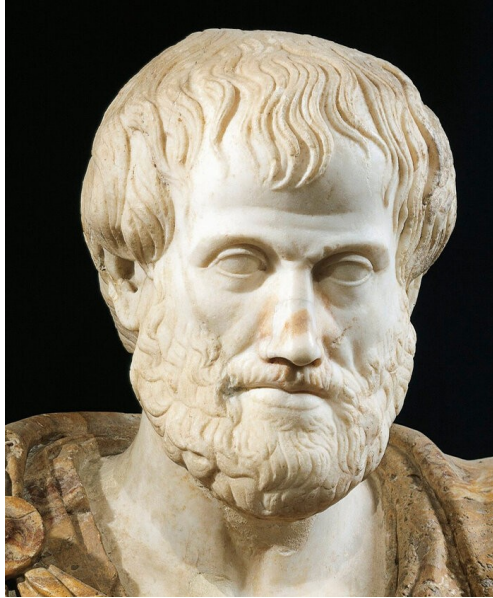
I. Contexte théorique

II. Confirmation observationnelle

III. Questions ouvertes et futures expériences

Contexte théorique

1. La cosmologie d'Aristote

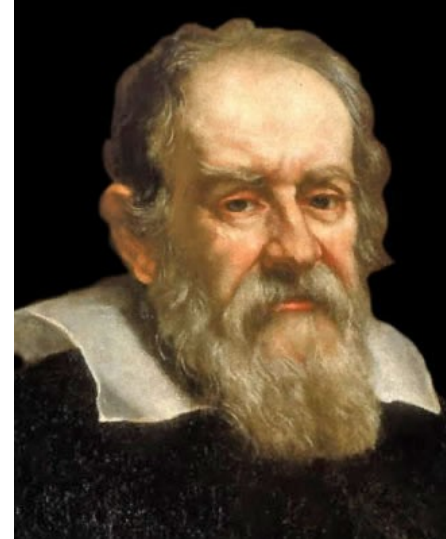
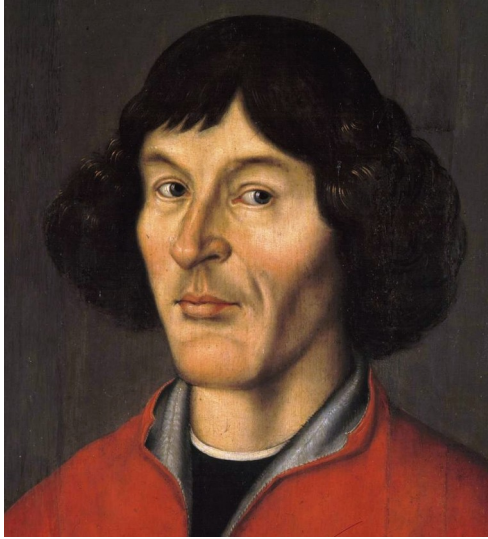


L'Univers est divisé entre le **monde supra-lunaire** et le **monde sub-lunaire**. Le monde supra-lunaire est un monde de perfection et les corps y suivent un mouvement naturel **circulaire uniforme**. Le monde sub-lunaire est imparfait et les corps suivent un **mouvement linéaire vertical** qui les ramène à leur lieu naturel. Les différences de mouvements sont expliquées par des proportions différentes dans les **4 éléments**, selon que leur lieu naturel soit en “haut” ou en “bas”. **La Terre est au centre du monde par définition.**



Contexte théorique

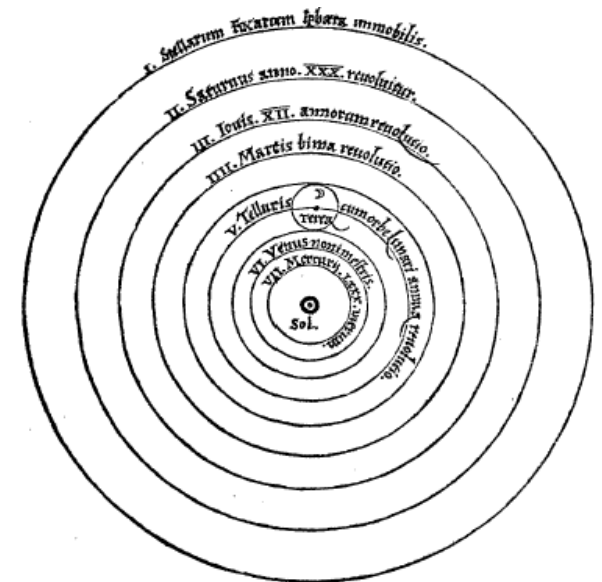
2. La révolution scientifique



Copernic: La Terre n'est pas au centre de l'Univers. Chaque corps céleste possède sa gravité propre. La gravité est la tendance des parties à rejoindre leur tout.

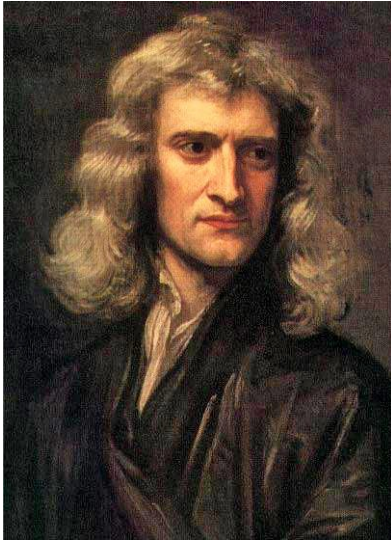
Galilée: Le mouvement est comme rien (**principe de relativité**), et les corps chutent tous de la même manière (**universalité de la chute libre**).

Kepler: Les planètes décrivent des **orbites elliptiques** dont le Soleil est un foyer. **La gravité est réciproque** et les corps célestes s'attirent les uns les autres.



Contexte théorique

3. La mécanique newtonienne

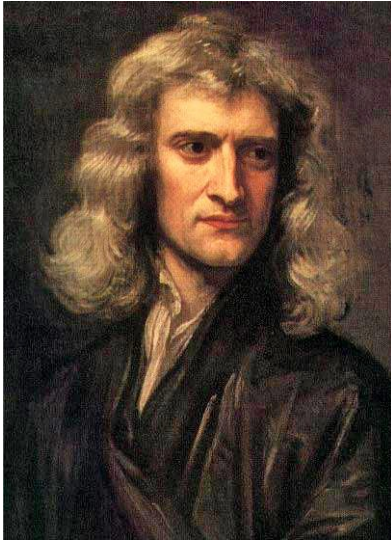


Isaac Newton implémente le principe de relativité dans ses **lois de la mécanique**:

1. Les corps au repos ont un mouvement rectiligne uniforme dans un référentiel galiléen
2. Principe Fondamental de la Dynamique
3. Principe d'Action-Réaction

Contexte théorique

3. La mécanique newtonienne



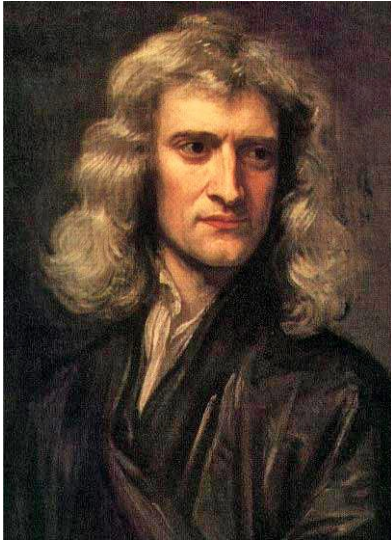
Isaac Newton implémente le principe de relativité dans ses **lois de la mécanique**:

1. Les corps au repos ont un mouvement rectiligne uniforme dans un référentiel galiléen
2. Principe Fondamental de la Dynamique
3. Principe d'Action-Réaction

$$\text{PFD : } \sum \vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \xrightarrow[\text{transformation galiléenne}]{\text{Invariant par}} \begin{array}{l} t' = t \\ x' = x - vt \end{array}$$

Contexte théorique

3. La mécanique newtonienne



Il unifie également la chute des corps et la gravité avec sa **loi universelle de la gravitation**:

$$\vec{F}_g = -G \frac{mM}{r^2} \hat{r}$$

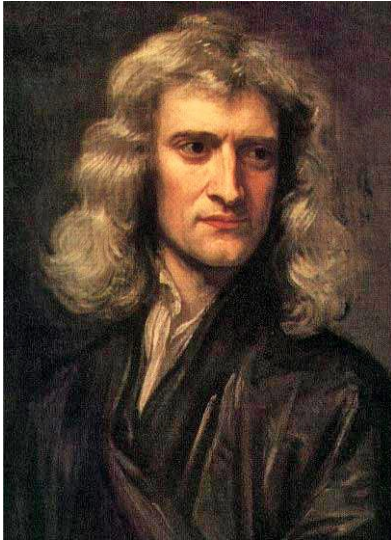
Isaac Newton implémente le principe de relativité dans ses **lois de la mécanique**:

1. Les corps au repos ont un mouvement rectiligne uniforme dans un référentiel galiléen
2. Principe Fondamental de la Dynamique
3. Principe d'Action-Réaction

$$\text{PFD : } \sum \vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \xrightarrow[\text{transformation galiléenne}]{\text{Invariant par}} \begin{array}{l} t' = t \\ x' = x - vt \end{array}$$

Contexte théorique

3. La mécanique newtonienne



Il unifie également la chute des corps et la gravité avec sa **loi universelle de la gravitation**:

$$\vec{F}_g = -G \frac{mM}{r^2} \hat{r}$$

Masse grave

Isaac Newton implémente le principe de relativité dans ses **lois de la mécanique**:

1. Les corps au repos ont un mouvement rectiligne uniforme dans un référentiel galiléen
2. Principe Fondamental de la Dynamique
3. Principe d'Action-Réaction

PFD : $\sum \vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$ Invariant par transformation galiléenne $\longrightarrow$

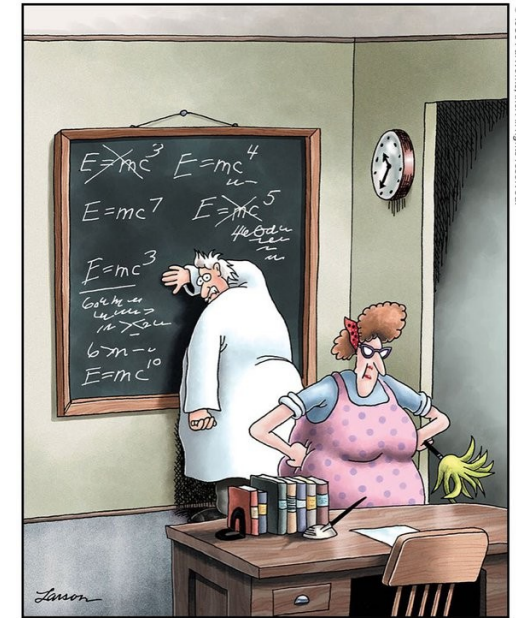
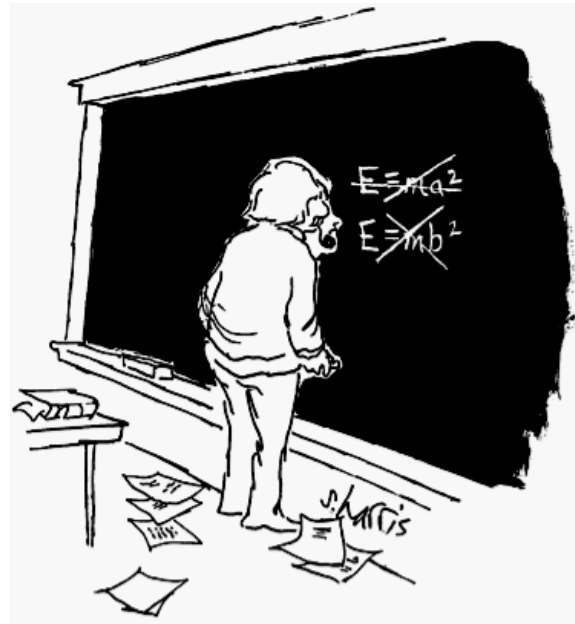
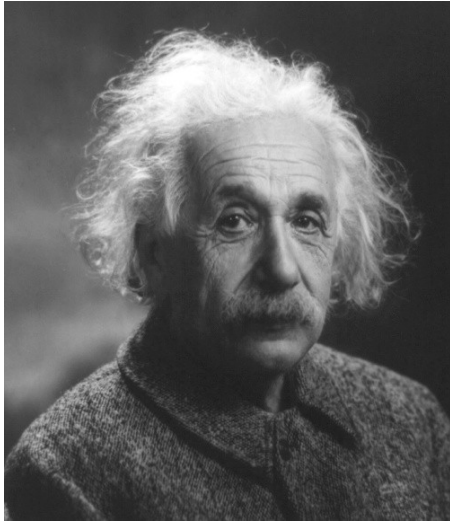
Masse inertielle

$t' = t$
 $x' = x - vt$

9

Contexte théorique

4. La relativité restreinte



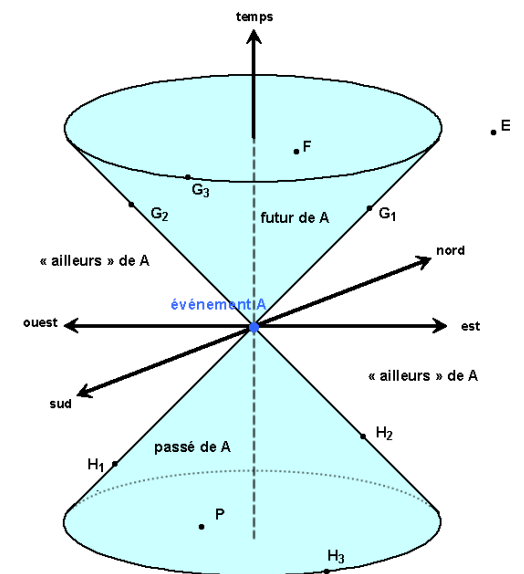
"Now that desk looks better. Everything's squared away, yessir, squaaaaaaared away."

Après la découverte de l'**électromagnétisme**, un problème se pose pour la mécanique newtonienne. En effet, les lois de l'électromagnétisme ne semblent pas invariantes par transformation galiléenne, ce qui pourrait marquer la fin du principe de relativité.

Albert Einstein (et d'autres) propose d'adopter un nouveau principe de **relativité restreinte** basé sur les **transformations de Lorentz** ainsi que l'**invariance de la vitesse de la lumière** (dans le vide):

$$t' = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right)$$

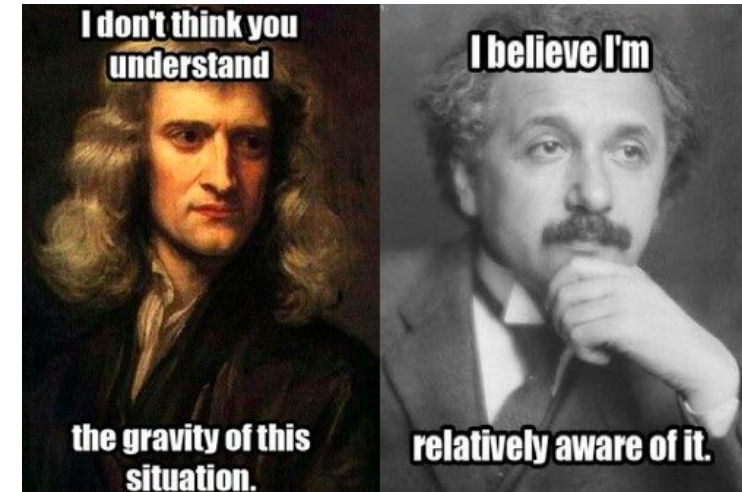
$$x' = \gamma (x - vt)$$



Contexte théorique

4. La relativité générale

La relativité restreinte permet de concilier l'électromagnétisme avec le reste de la physique. Néanmoins, elle fait apparaître un nouveau problème avec la loi universelle de la gravitation.



Il faut donc trouver une **théorie relativiste de la gravitation** qui en résout les problèmes, ce que fera **Einstein** entre 1905 et 1915. La théorie de la Relativité Générale se base sur les considérations suivantes:

- Il y a **équivalence entre masse grave et masse inertielle** (Principe d'Equivalence “faible”)
- La relativité restreinte est valide localement dans les référentiels inertiels qui sont en chute libre
- Les corps subissent l'influence de la **courbure locale** de l'espace-temps

L'espace-temps acquiert alors une géométrie, elle-même déterminée par son contenu matériel, suivant les équations d'Einstein:

Géométrie de
l'espace-temps

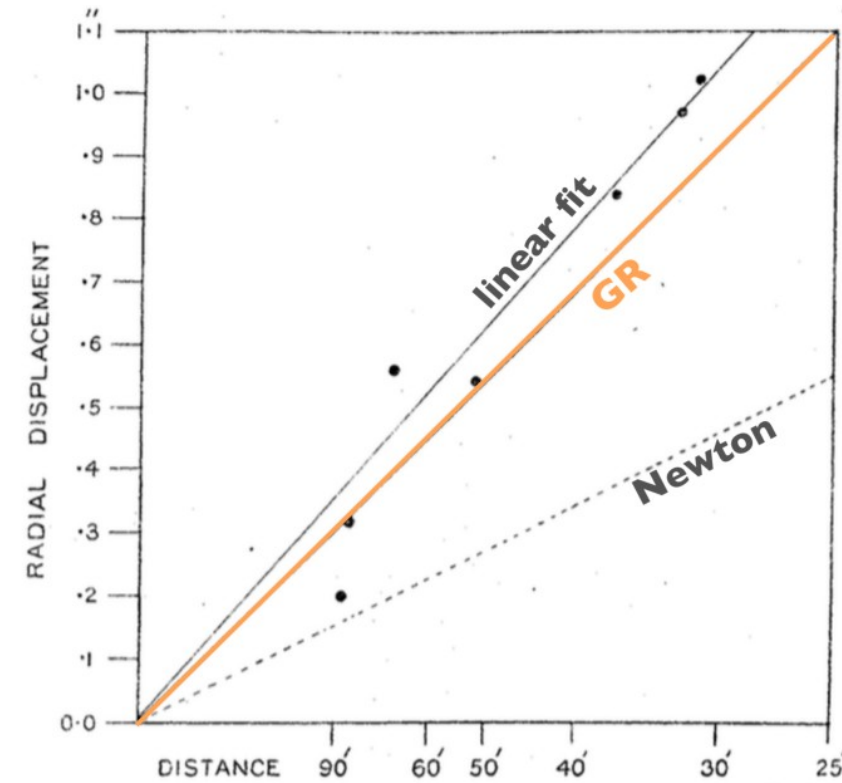
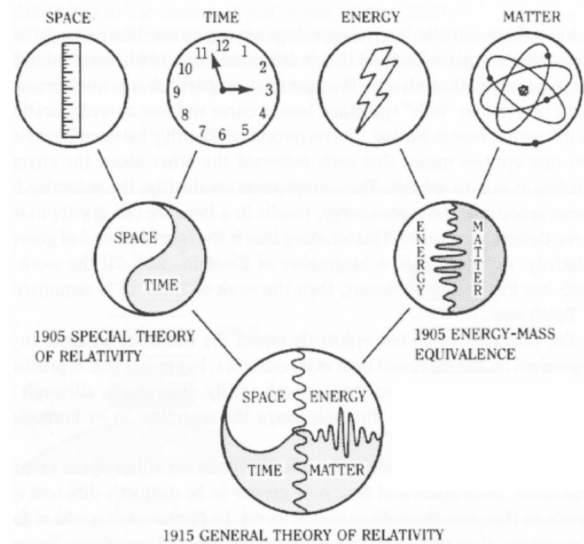
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} (+\Lambda g_{\mu\nu}) =$$

$$8\pi\mathcal{G}T_{\mu\nu}$$

Contenu
énergétique

Contexte théorique

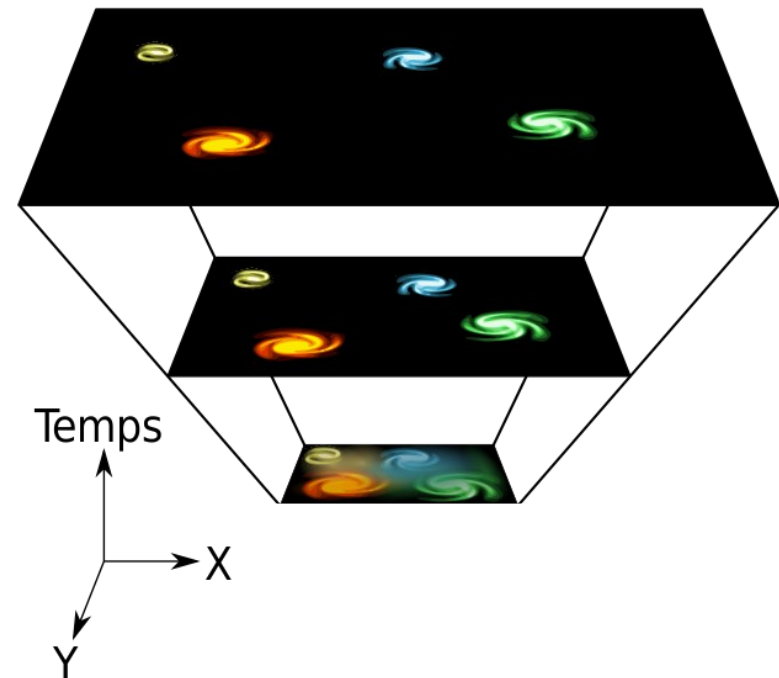
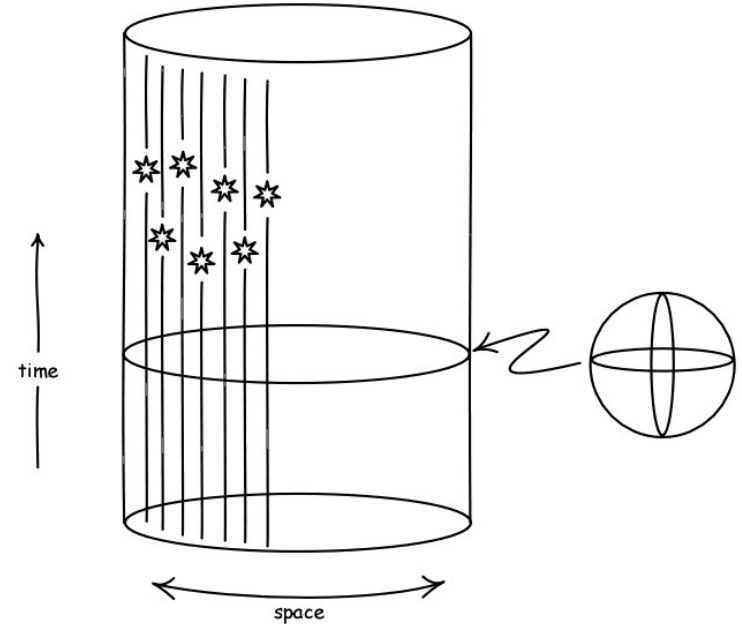
4. La relativité générale



Contexte théorique

5. La cosmologie relativiste

- Einstein (1917) développe son modèle d'Univers statique éternel en introduisant Λ
- Friedmann (1922) et Lemaître (1927) proposent un modèle d'Univers en expansion



Contexte théorique

5. La cosmologie relativiste

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} (+\Lambda g_{\mu\nu}) = 8\pi\mathcal{G}T_{\mu\nu}$$

Contexte théorique

5. La cosmologie relativiste

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} (+\Lambda g_{\mu\nu}) = 8\pi\mathcal{G}T_{\mu\nu}$$

- Besoin d'une hypothèse sur la répartition de matière
 - ➔ Principe cosmologique: l'Univers est homogène et isotrope

Contexte théorique

5. La cosmologie relativiste

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} (+\Lambda g_{\mu\nu}) = 8\pi\mathcal{G}T_{\mu\nu}$$

➤ Besoin d'une hypothèse sur la répartition de matière

➔ Principe cosmologique: l'Univers est homogène et isotrope

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a(t)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^2(t) f_K^2(\chi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a^2(t) f_K^2(\chi) \sin^2\theta \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} -\rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p \end{pmatrix}$$

Contexte théorique

5. La cosmologie relativiste

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} (+\Lambda g_{\mu\nu}) = 8\pi\mathcal{G}T_{\mu\nu}$$

➤ Besoin d'une hypothèse sur la répartition de matière

➔ Principe cosmologique: l'Univers est homogène et isotrope

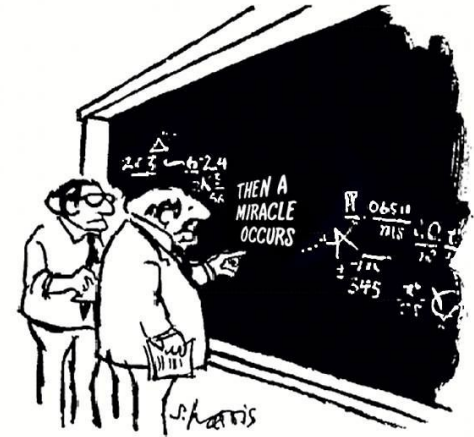
Facteur d'échelle

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a(t)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a^2(t) f_K^2(\chi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a^2(t) f_K^2(\chi) \sin^2\theta \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} -\rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p \end{pmatrix}$$

Contexte théorique

5. La cosmologie relativiste

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} (+\Lambda g_{\mu\nu}) = 8\pi\mathcal{G}T_{\mu\nu}$$



- Besoin d'une hypothèse sur la répartition de matière *"I think you should be more explicit here in step two"*
- ➔ Principe cosmologique: l'Univers est homogène et isotrope



Facteur d'échelle

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & a(t)^2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p \end{pmatrix}$$

$a^2(t) f_K^2(\chi)$ $a^2(t) f_K^2(\chi) \sin^2\theta$

Equations de Friedmann

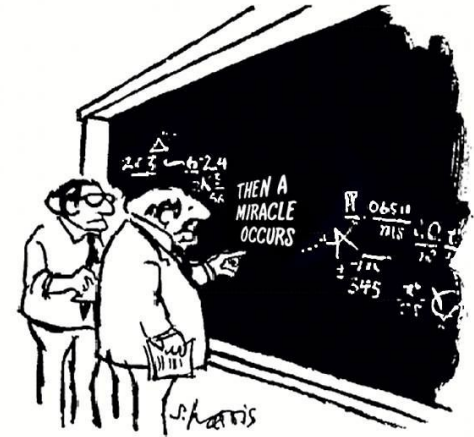
$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi\mathcal{G}}{3}\rho - \frac{K}{a^2} \left(+\frac{\Lambda}{3}\right)$$

$$\dot{H} + H^2 = \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{8\pi\mathcal{G}}{6}(\rho + 3p) \left(+\frac{\Lambda}{3}\right)$$

Contexte théorique

5. La cosmologie relativiste

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} (+\Lambda g_{\mu\nu}) = 8\pi\mathcal{G}T_{\mu\nu}$$



- Besoin d'une hypothèse sur la répartition de matière *"I think you should be more explicit here in step two"*
- ➔ Principe cosmologique: l'Univers est homogène et isotrope

Facteur d'échelle

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & a(t)^2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p \end{pmatrix}$$

Courbure spatiale

Equations de Friedmann

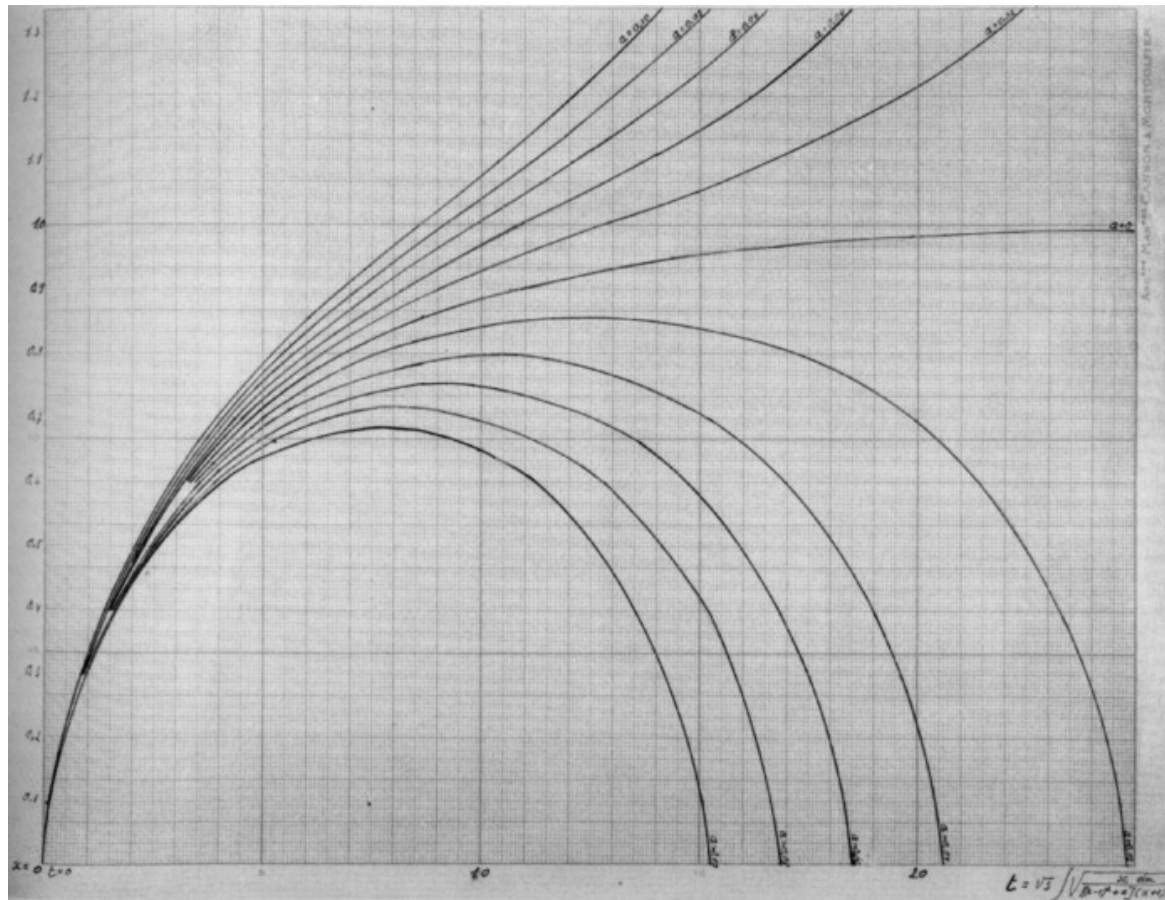
$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi\mathcal{G}}{3}\rho - \frac{K}{a^2} \left(+\frac{\Lambda}{3}\right)$$

$$\dot{H} + H^2 = \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{8\pi\mathcal{G}}{6}(\rho + 3p) \left(+\frac{\Lambda}{3}\right)$$

Contexte théorique

5. La cosmologie relativiste

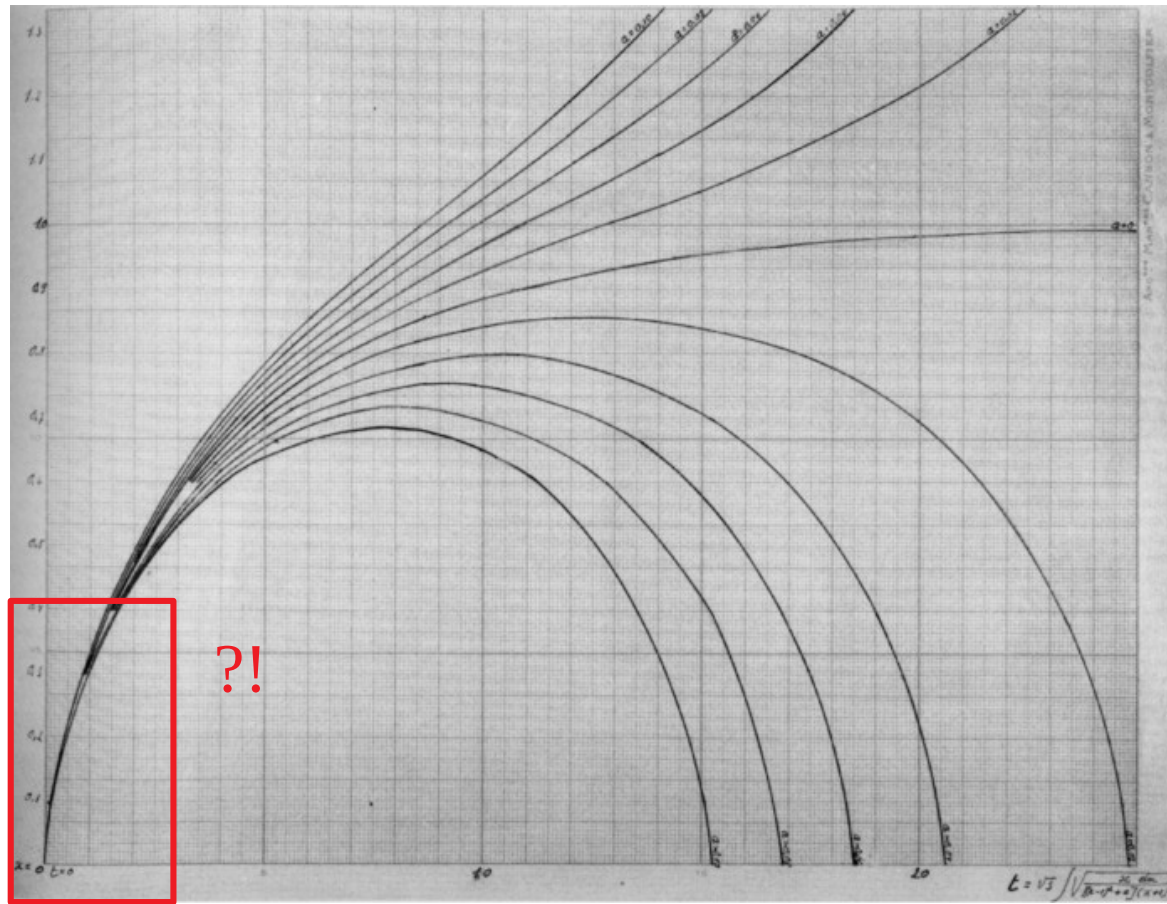
➤ Solutions des équations de Friedmann:



Contexte théorique

5. La cosmologie relativiste

➤ Solutions des équations de Friedmann:



➤ Lemaître propose l'hypothèse de l'atome primitif qui deviendra le modèle du Big Bang

Plan

I. Contexte théorique

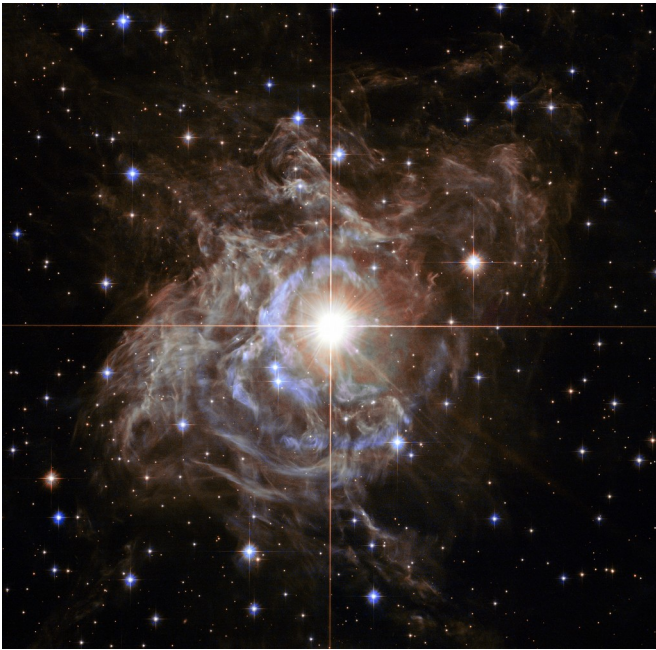
II. Confirmation observationnelle

III. Questions ouvertes et futures expériences

Confirmation observationnelle

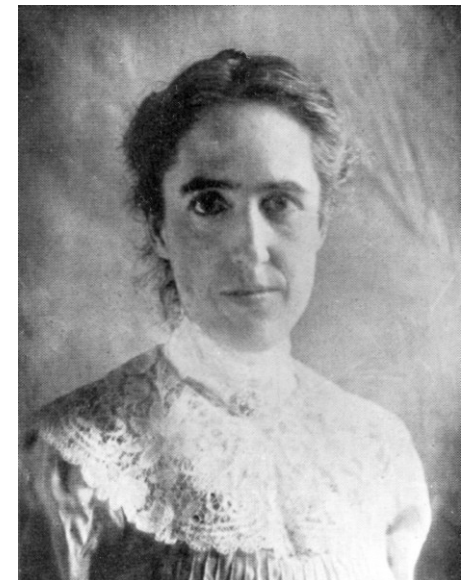
1. L'expansion de l'Univers

➤ Mesure de distance



Une **céphéide** est une **étoile variable**, géante ou supergéante jaune, de 4 à 15 fois plus massive que le Soleil et de 100 à 30000 fois plus lumineuse, dont **l'éclat varie de 0.1 à 2 magnitudes** selon une période bien définie, comprise entre 1 et 135 jours.

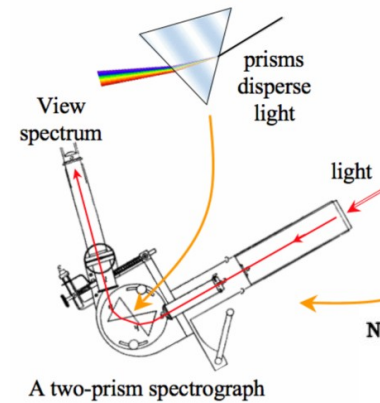
Une relation entre **période** et **luminosité intrinsèque** pour les céphéides classiques a été découverte dans les années 1910-20 par **Henrietta Swan Leavitt**, grâce à l'étude de milliers d'étoiles variables dans les Nuages de Magellan. Les céphéides peuvent donc être utilisées comme **chandelles standards**.



Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers

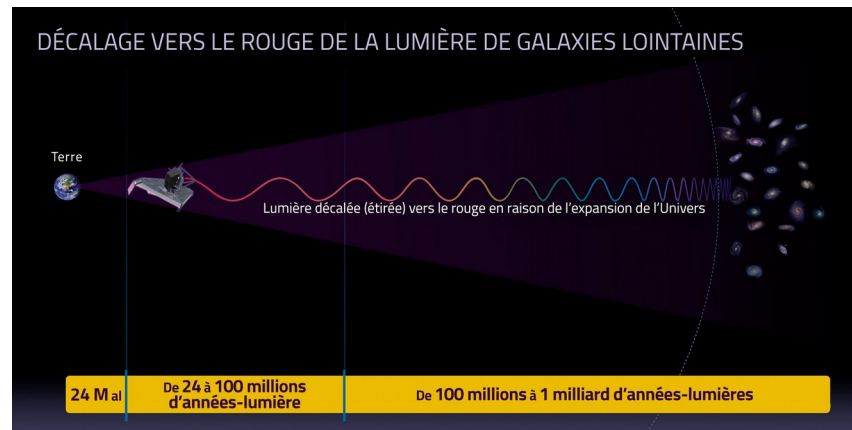
- Mesure de distance
- Mesure de vitesse



Premières mesures, par **Vesto Slipher**, de vitesse radiale de nébuleuses (galaxies) spirales par **effet Doppler** à l'aide de spectrographes de précision. Sur 15 nébuleuses, 13 ont une **vitesse radiale positive**.

N.G.C.	221	Velocity	— 300 km	These nebulae are on the south side of the Milky Way.
	224 †	—	300	
	598	—		
	1023	+ 200 roughly		
	1068	+ 1100		
	7331	+ 300 roughly		These are on the north side of the Milky Way
	3031	+ small		
	3115	+ 400 roughly		
	3627	+ 500		
	4565	+ 1000		
	4594	+ 1100		
	4736	+ 200 roughly		
	4826	+ small		
	5194	± small		
	5866	+ 600		

“It has for a long time been suggested that the spiral nebulae are stellar systems seen at great distances. This is the so-called ‘island universe’ theory, which regards our stellar system and the Milky Way as a great spiral nebula which we see from within. This theory, it seems to me, gains favor in the present observatios.”



Confirmation observationnelle

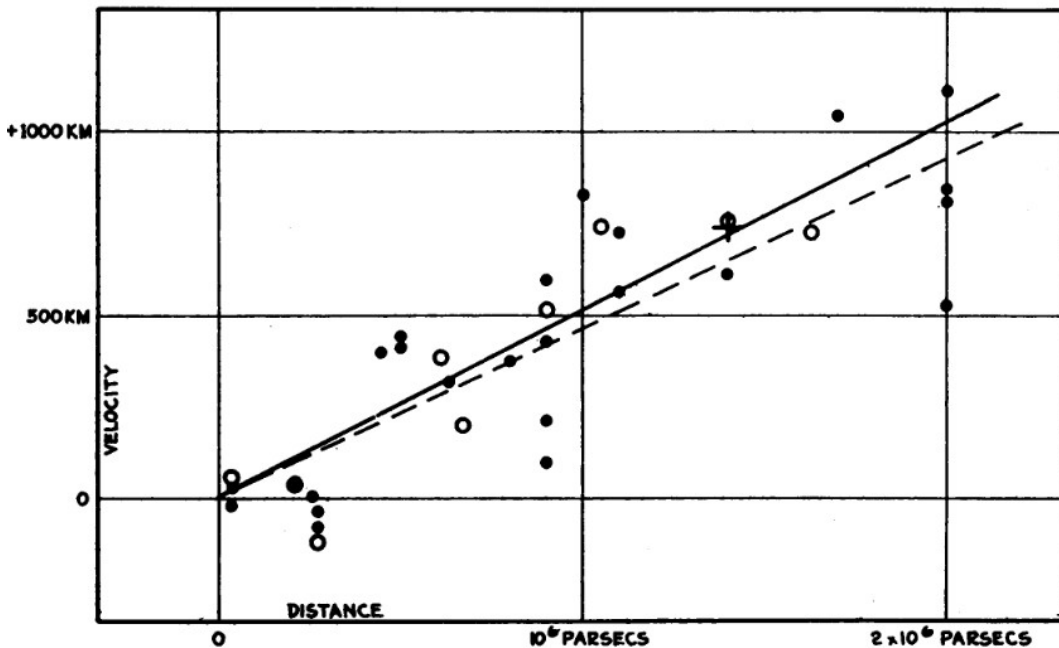
1. L'expansion de l'Univers

➤ Mesure de distance

➤ Mesure de vitesse

⇒ Loi de Hubble-Lemaître: $v = H_0 d$

“Constante” de Hubble
[km.s⁻¹.Mpc⁻¹]



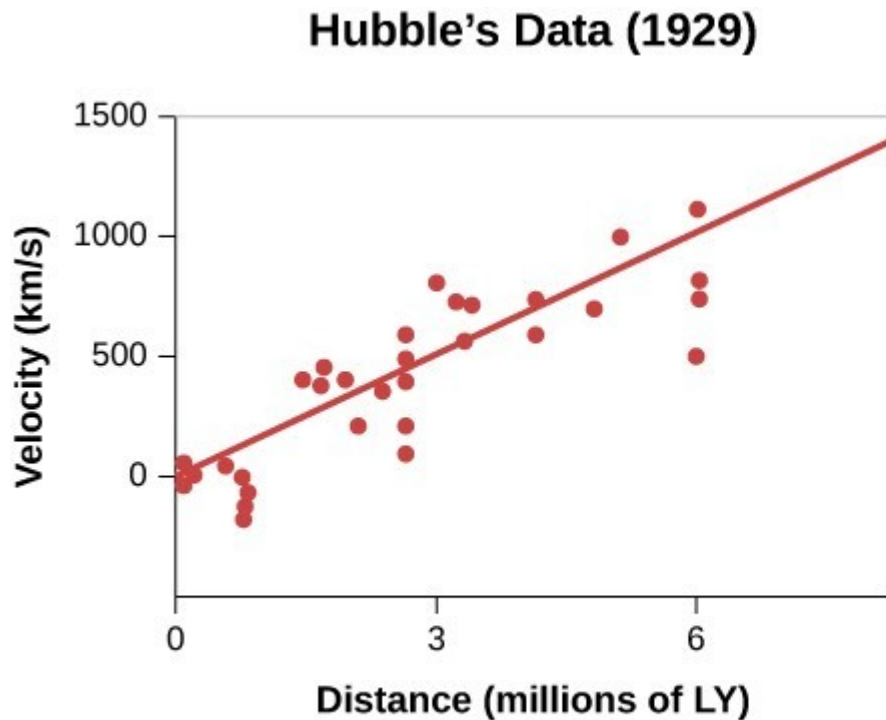
Données de Hubble en 1929



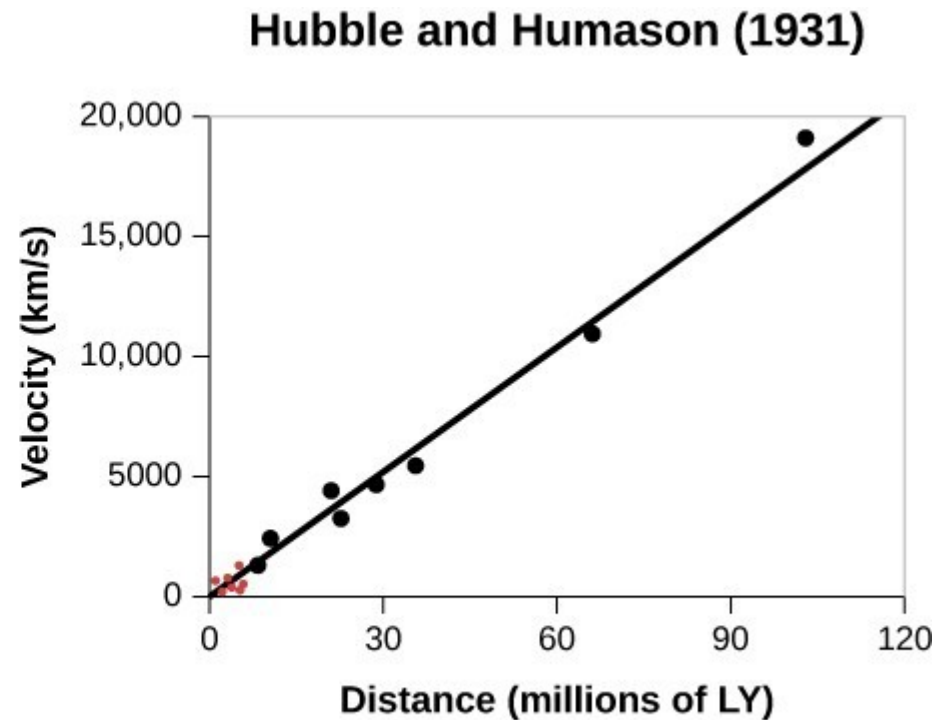
Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers

➤ Améliorations subséquentes du diagramme de Hubble



(a)



(b)

Confirmation observationnelle

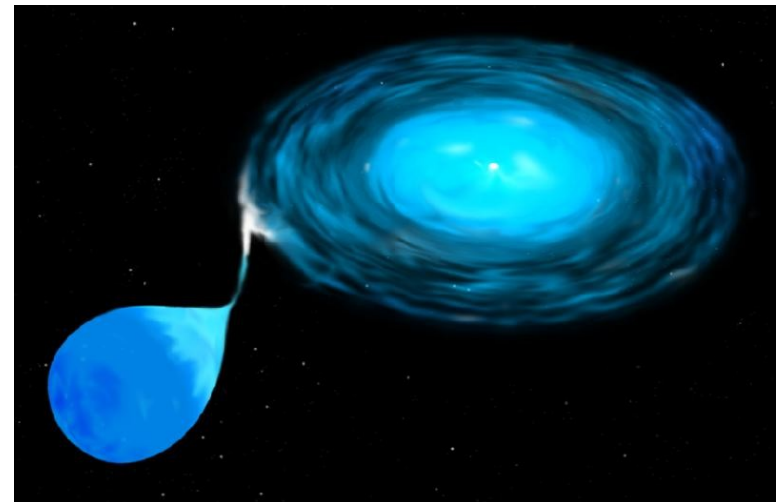
1. L'expansion de l'Univers

➤ Pour aller plus loin, il faut de nouvelles chandelles standards



Les **supernovae de type Ia** sont des supernovae thermonucléaires. Ce sont donc des **événements transitoires extrêmement brillants**. Le modèle communément accepté prédit que de telles explosions peuvent survenir dans un **système binaire** contenant une **naine blanche** qui accrète de la matière provenant de son partenaire.

Lorsque la masse de la naine blanche atteint la limite de Chandrasekhar, **1.4 masses solaires**, la pression électronique n'est plus suffisante pour la maintenir à l'équilibre. Son atteinte des conditions de fusion du carbone et, en quelques secondes, une fraction significative de sa masse subit une **fusion nucléaire**, ce qui la désintègre complètement.



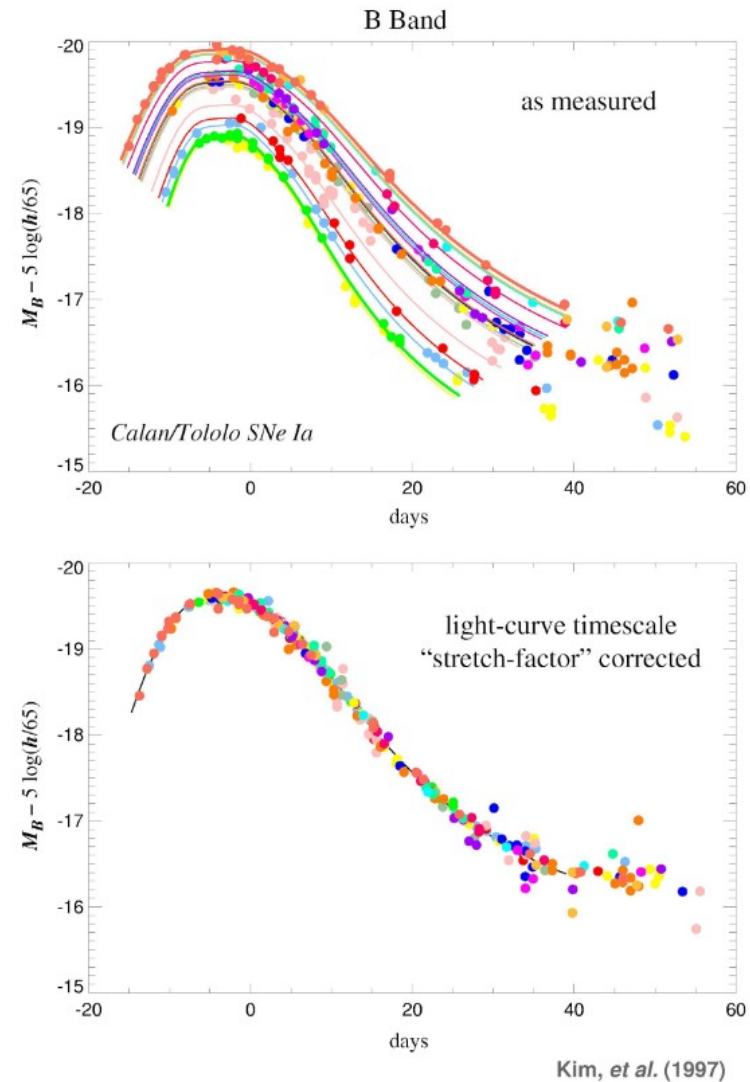
Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers

➤ Pour aller plus loin, il faut de nouvelles chandelles standards

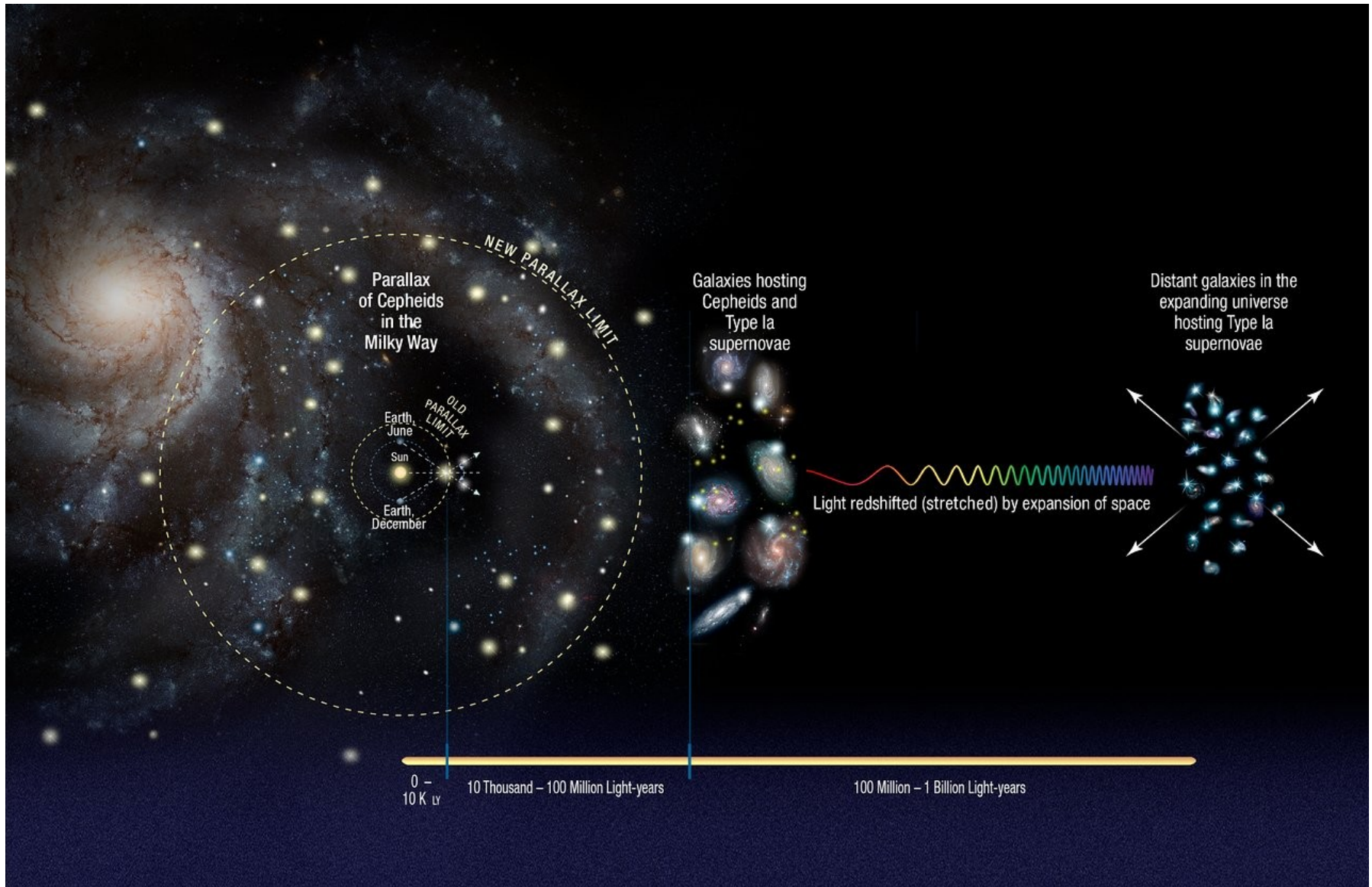
Il existe une **relation entre la luminosité intrinsèque de la SNIa et sa courbe de lumière**. Bien que pas vraiment standards, on peut les “standardiser” en corrigeant certains effets dûs à la composition de la supernova.

On calibre cette relation sur des supernovae proches grâce à des céphéides, puis on utilise les SNIa lointaines pour construire le diagramme.



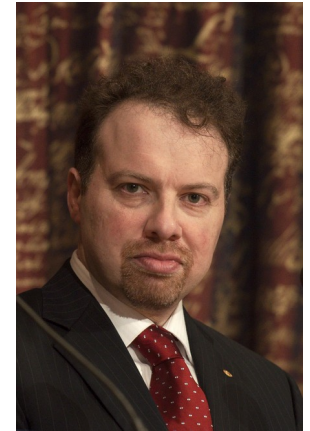
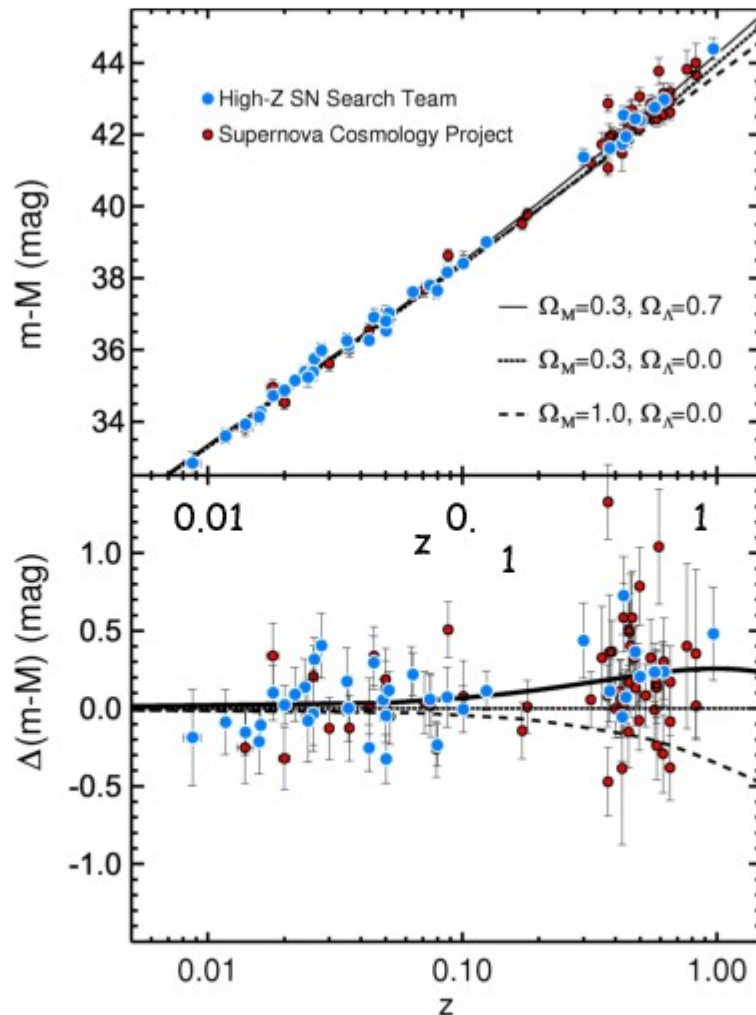
Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers



Confirmation observationnelle

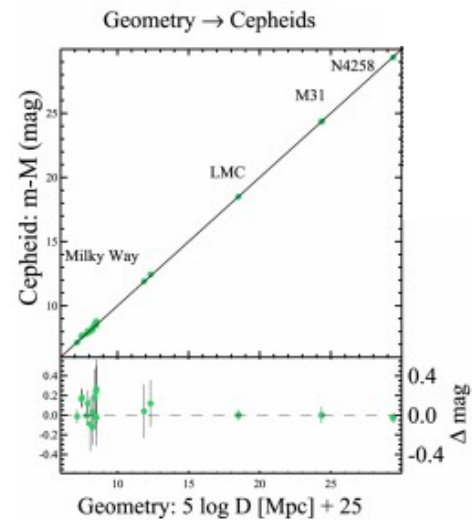
1. L'expansion de l'Univers



En 1998, deux équipes d'astrophysiciens, l'une menée par **Saul Perlmutter** et l'autre par **Brian Schmidt** et **Adam Riess**, réalisent des mesures sur des SNIa et montrent que **la vitesse d'éloignement des galaxies augmente** au cours du temps. L'expansion de l'Univers s'accélère, ce qui nécessite de **réintroduire une constante cosmologique**. Pour ces travaux, ils obtiennent le Prix Nobel de physique en 2011.

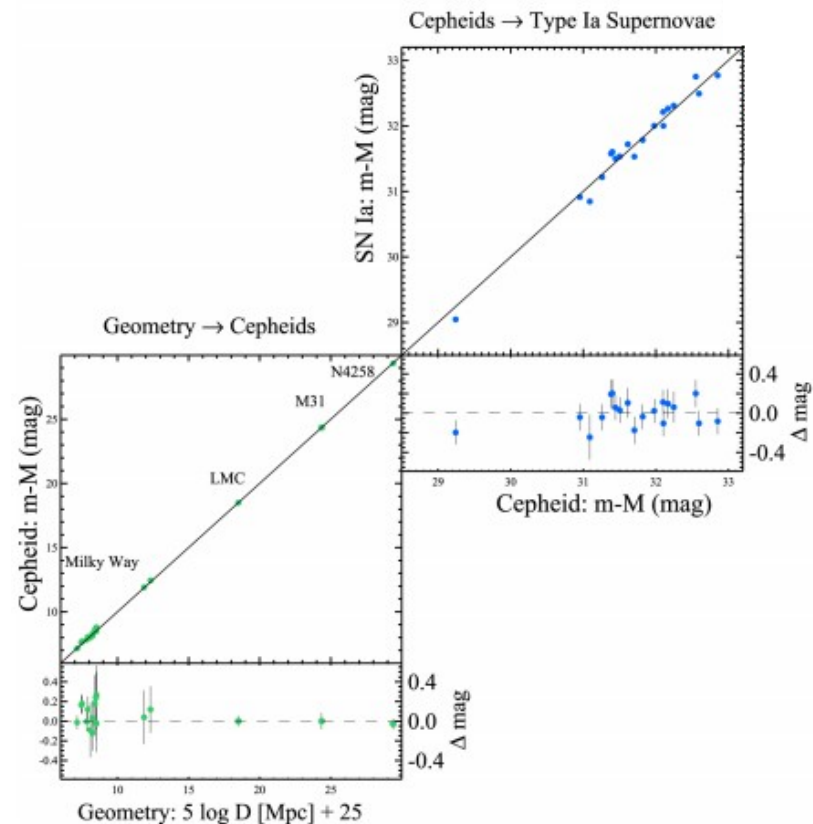
Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers



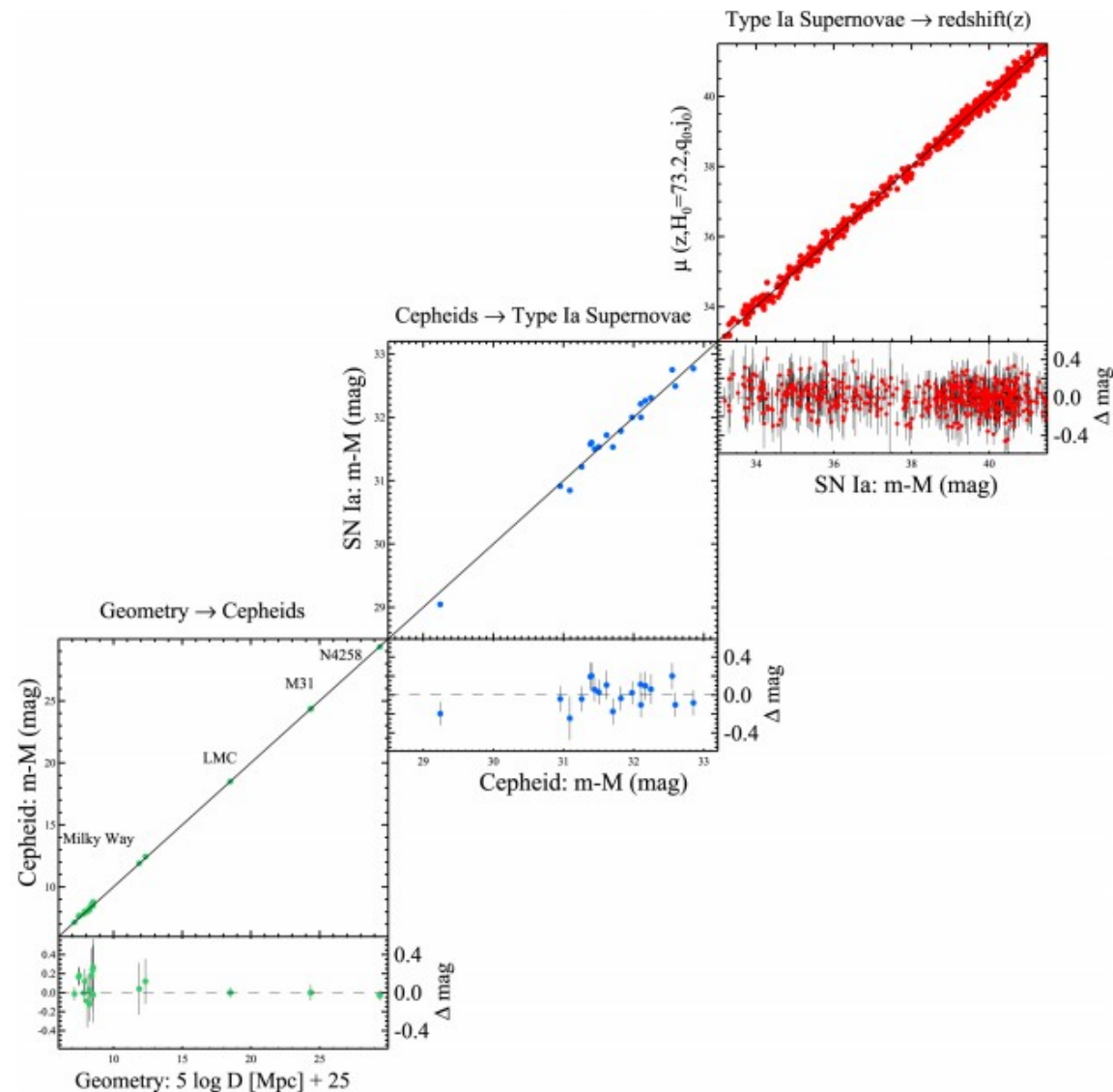
Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers



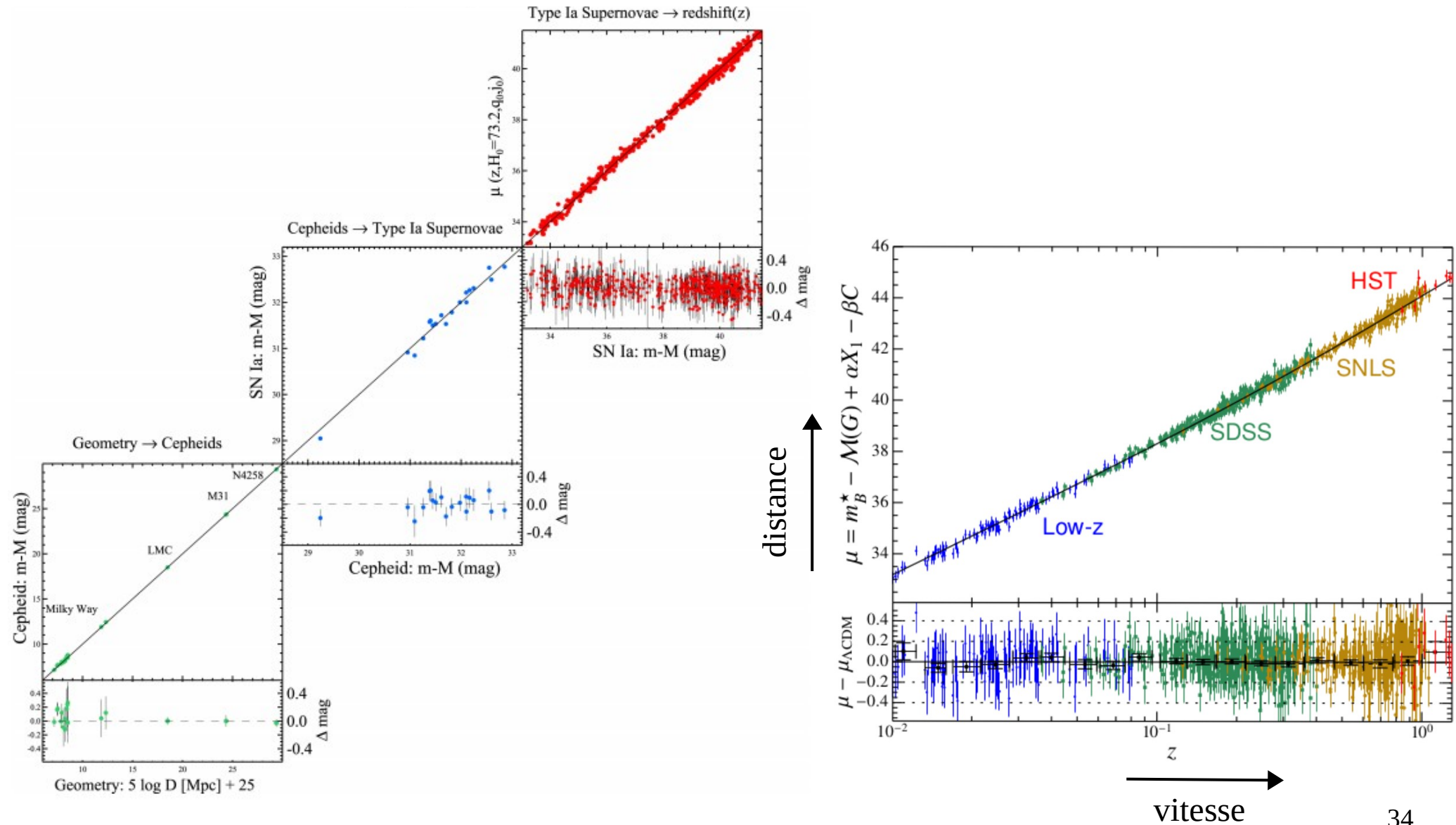
Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers



Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers

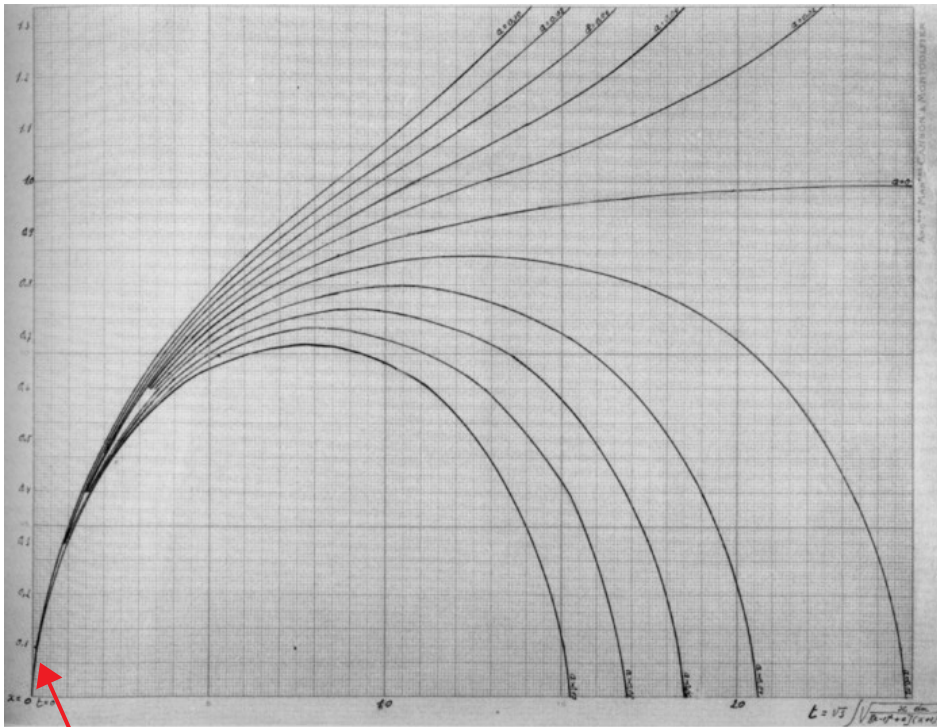


Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers

2. La nucléosynthèse primordiale

➤ La matière primordiale est sous forme de plasma



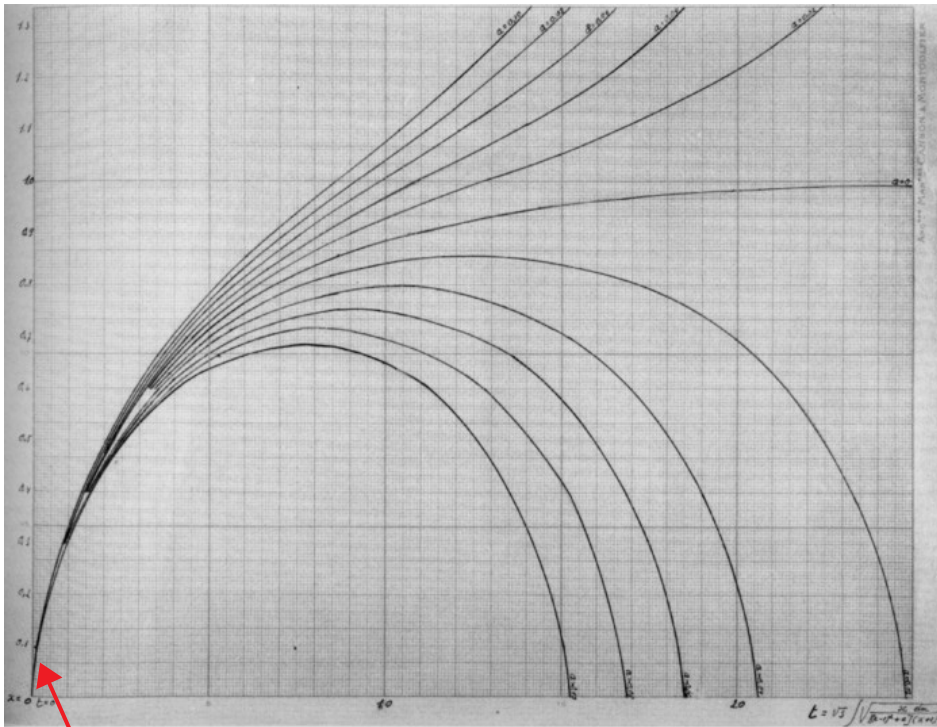
De plus en plus chaud et dense

Confirmation observationnelle

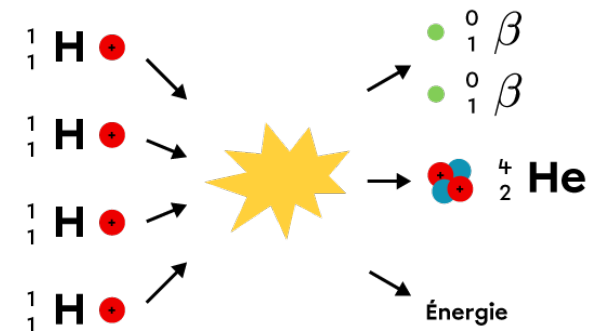
1. L'expansion de l'Univers

2. La nucléosynthèse primordiale

➤ La matière primordiale est sous forme de plasma



De plus en plus chaud et dense

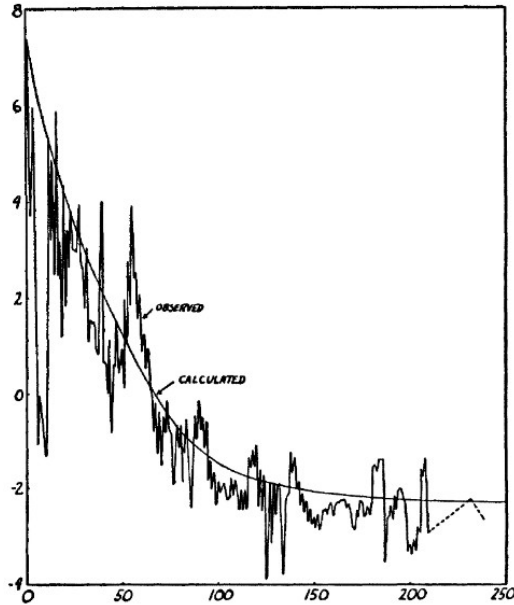


Légende ● Neutron ● Proton ● Bêta

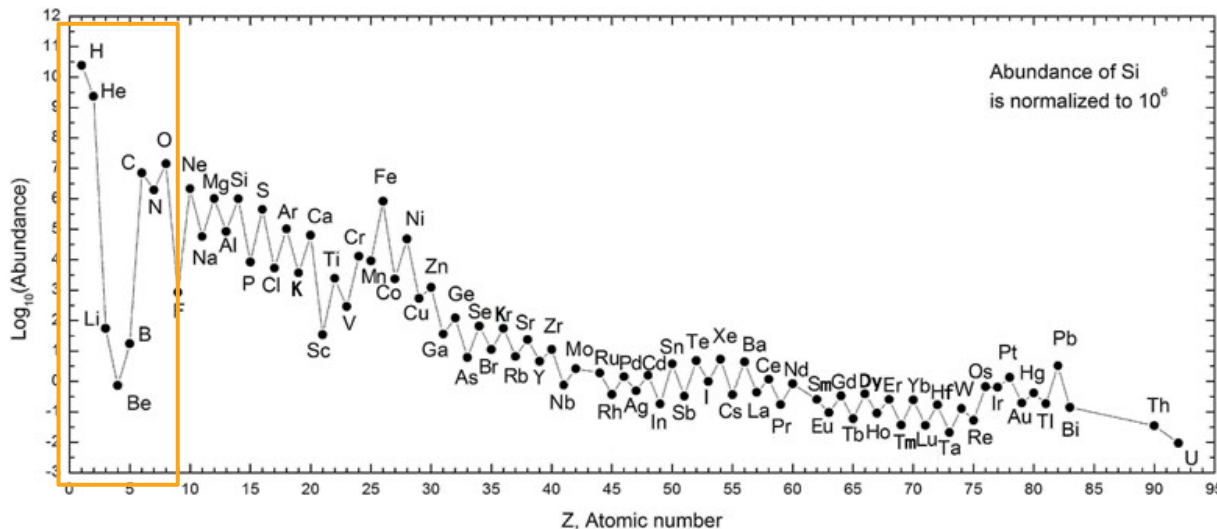
Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers

2. La nucléosynthèse primordiale



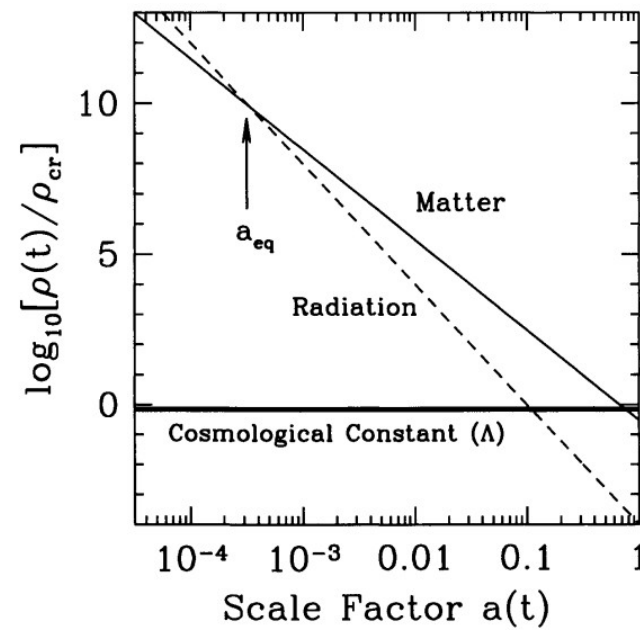
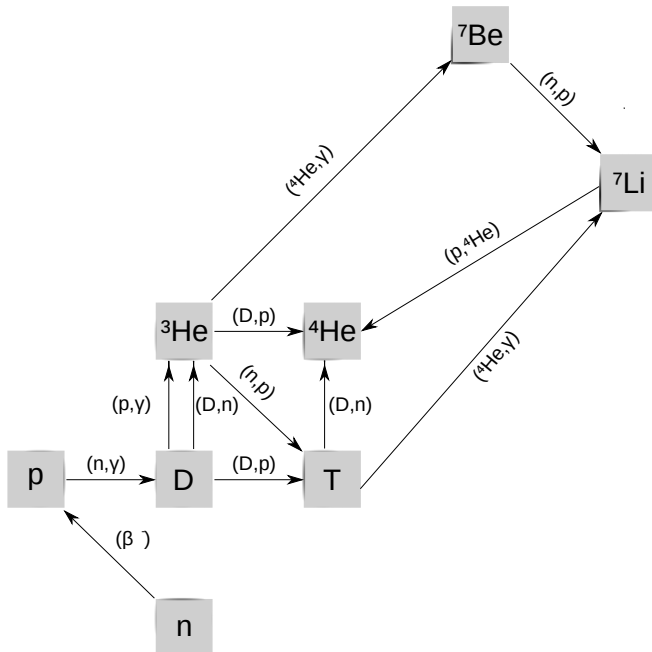
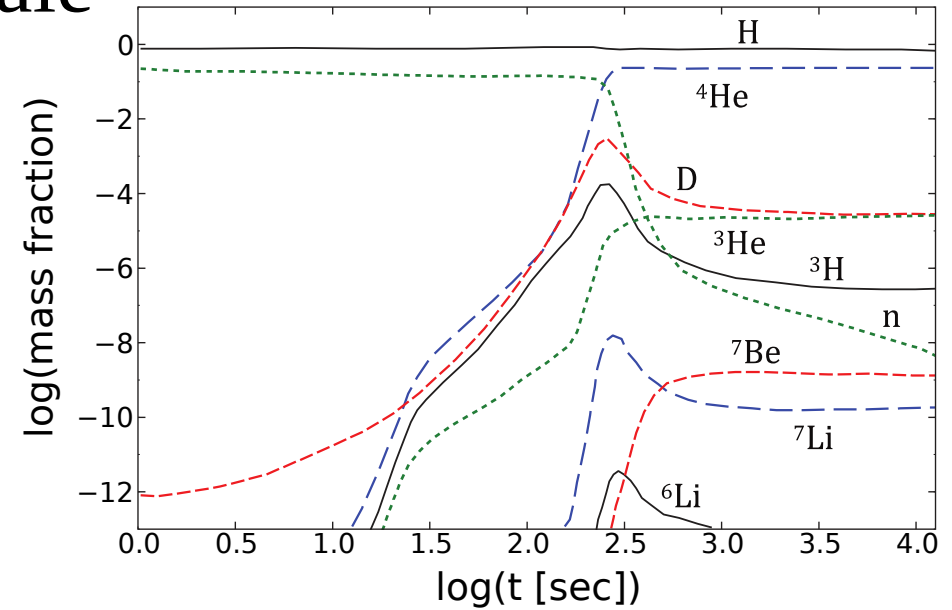
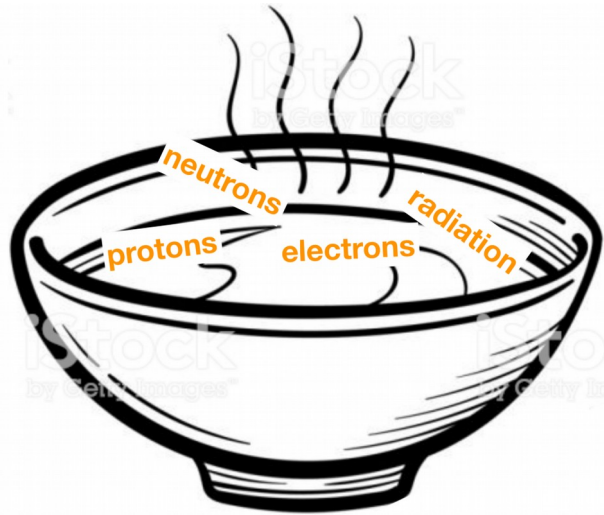
George Gamow, son élève **Ralph Alpher** et **Hans Bethe** ont montré dans le “papier alphabétique” que l’abondance observée des **éléments légers** pouvait s’expliquer par une **formation dans le plasma primordial** au cours des premières minutes après le Big-bang.



Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers

2. La nucléosynthèse primordiale

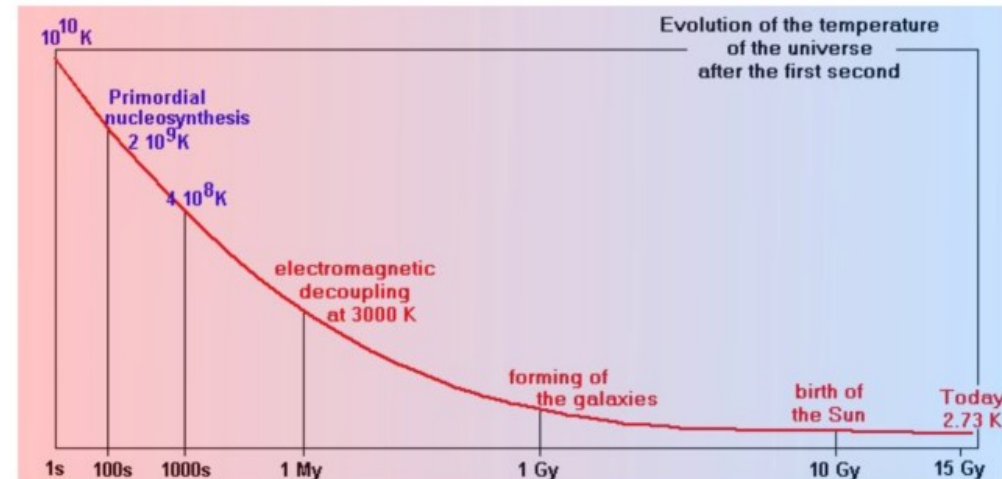
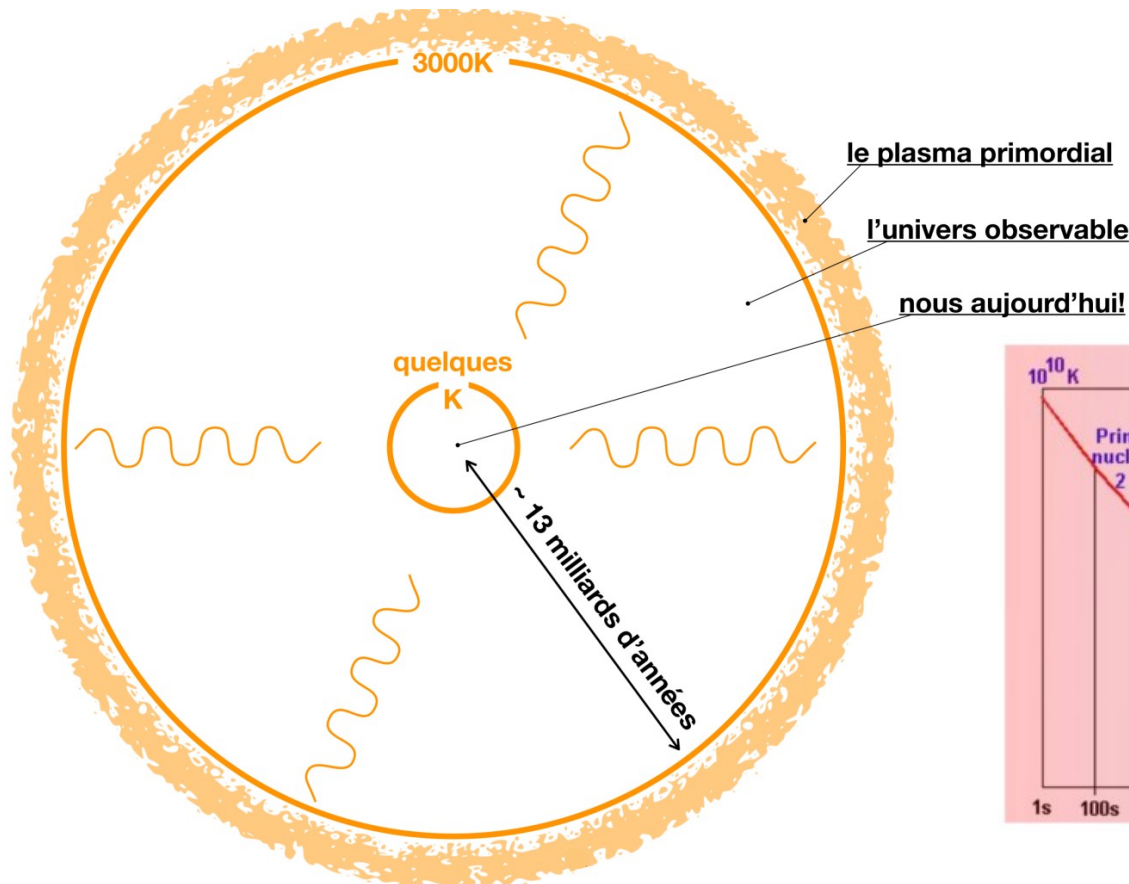


Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers

2. La nucléosynthèse primordiale

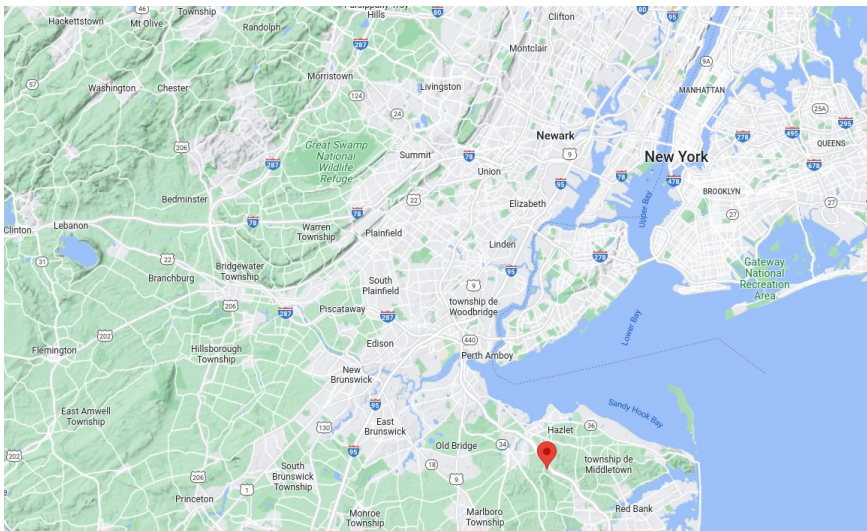
- Prédiction du modèle: on doit pouvoir observer des restes de la soupe primordiale dans l'Univers actuel



Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers
2. La nucléosynthèse primordiale
3. Le fond diffus cosmologique (CMB)

À partir de 1964, aux Bell Labs à Crawford Hill dans le New Jersey, les deux ingénieurs **Arno Penzias** et **Robert Wilson** veulent réhabiliter une **antenne radio** pour observer le signal de la voie lactée.

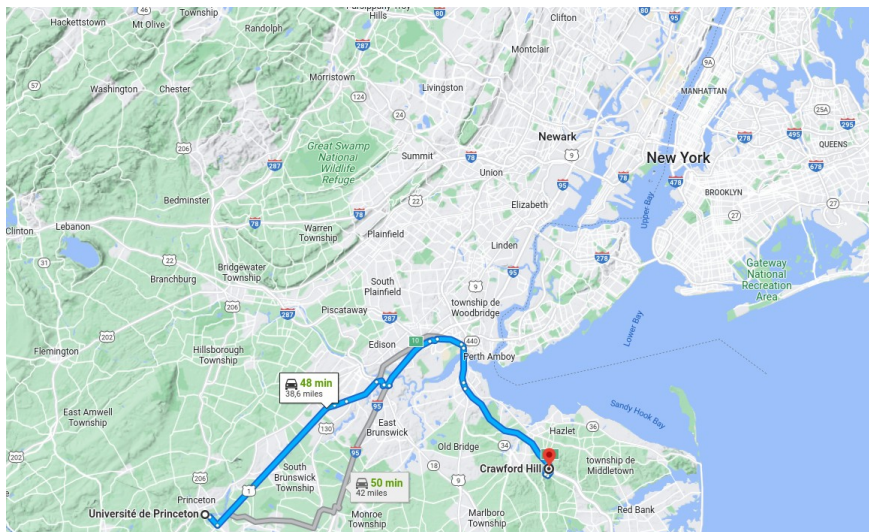


Ils sont gênés dans leurs mesures par un **bruit de fond isotrope**. Après avoir éliminé toutes les sources connues potentielles (dont des pigeons), Arno se souvient d'une prédiction cosmologique.

Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers
2. La nucléosynthèse primordiale
3. Le fond diffus cosmologique (CMB)

De l'autre côté du New Jersey, à Princeton, l'équipe de **Robert Dicke** est en train de mettre au point une expérience pour observer le **rayonnement fossile**.



“Well boys, we have been scooped” - R. Dicke

Penzias et Wilson obtiennent le prix Nobel pour la découverte du CMB en 1978.

Confirmation observationnelle

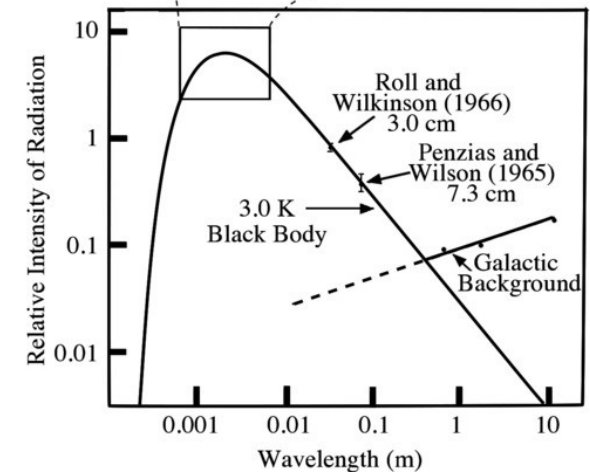
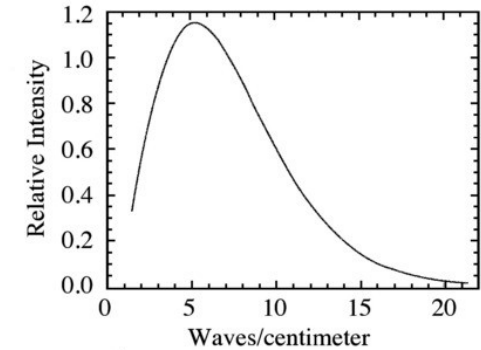
1. L'expansion de l'Univers
2. La nucléosynthèse primordiale

3. Le fond diffus cosmologique (CMB)

➤ C'est la consécration pour le modèle du Big-bang chaud

“C'est la découverte scientifique la plus importante du siècle, si ce n'est depuis toujours” - **Stephen Hawking**

“Ainsi, le bruit-radio observé par Penzias et Wilson pouvait être décrit par une « température équivalente » de 3.5K. Cette température était beaucoup plus élevée qu'on ne le prévoyait, mais encore très basse en valeur absolue ; il n'est donc pas surprenant que Penzias et Wilson ruminèrent un moment sur ce résultat avant de le publier. On ne pouvait alors certainement pas imaginer qu'il s'agissait du progrès cosmologique le plus important depuis la découverte du décalage vers le rouge.” - **Steven Weinberg**

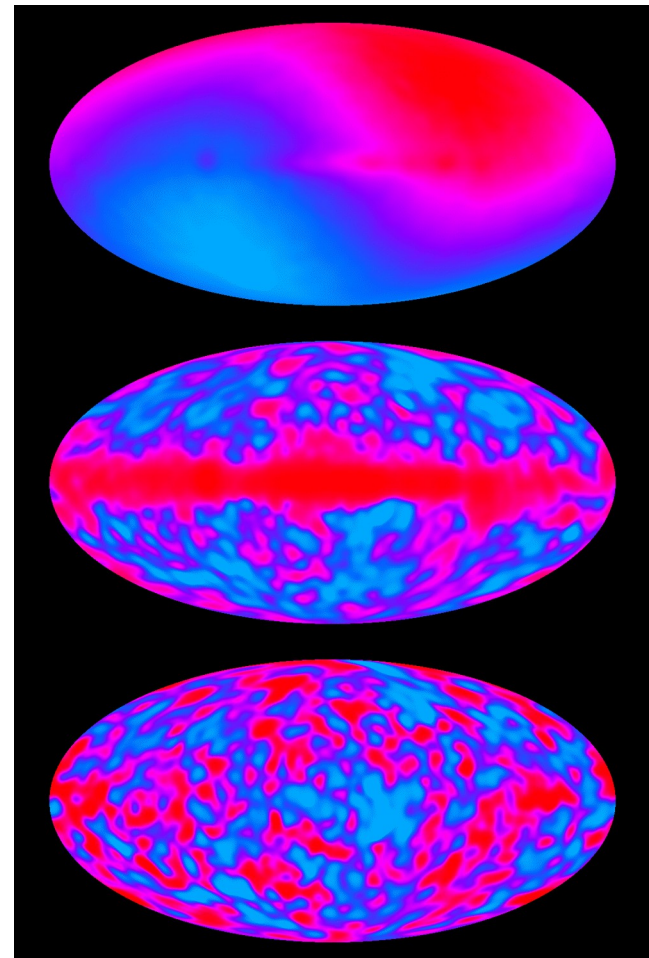
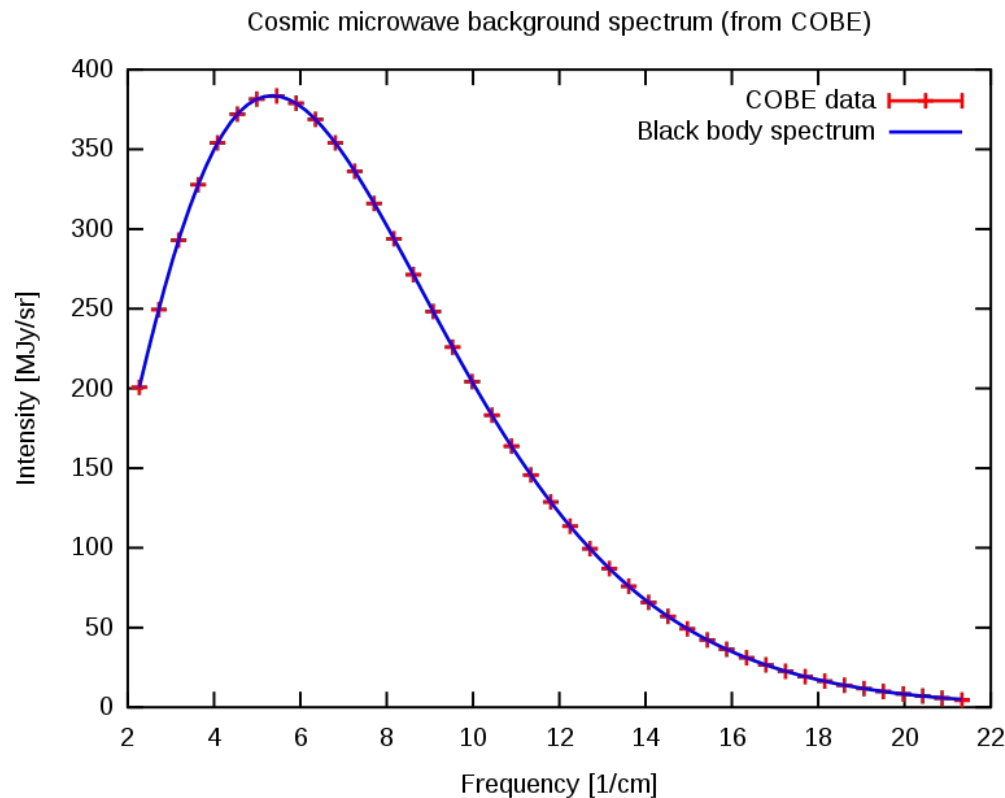


Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers
2. La nucléosynthèse primordiale

3. Le fond diffus cosmologique (CMB)

➤ Lancement du satellite COBE en 1989



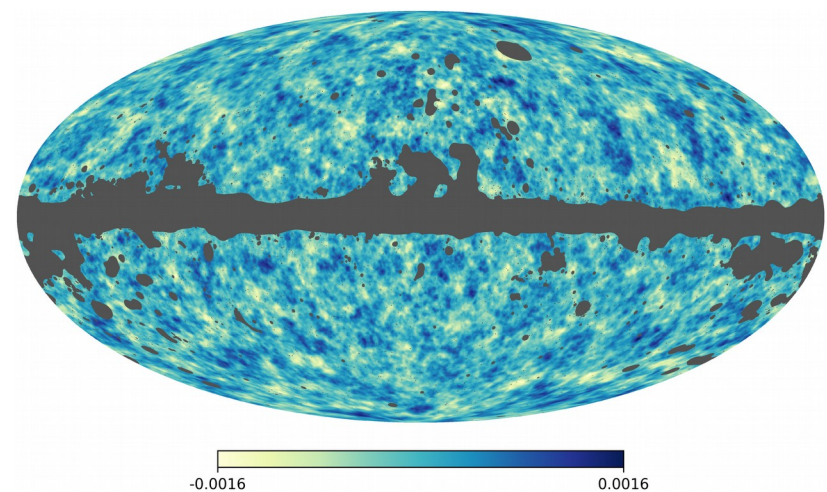
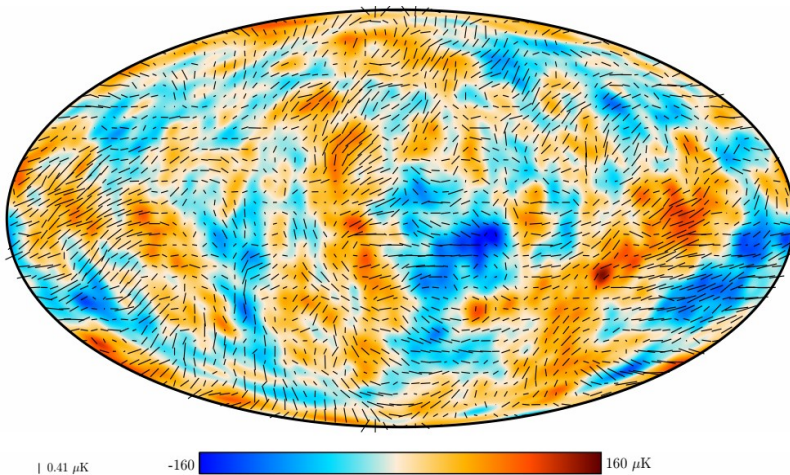
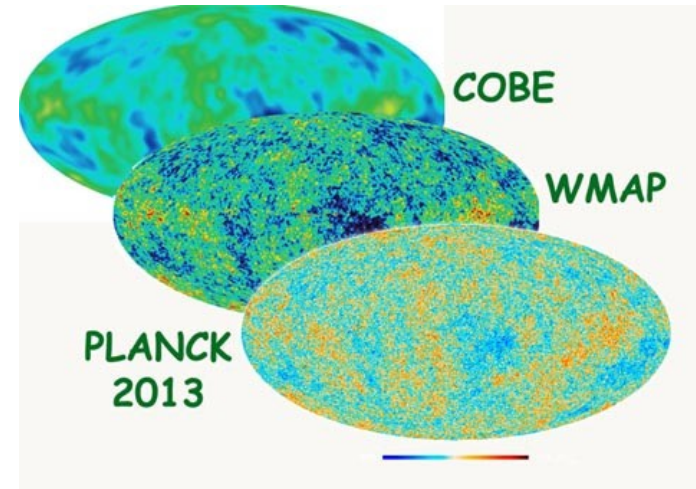
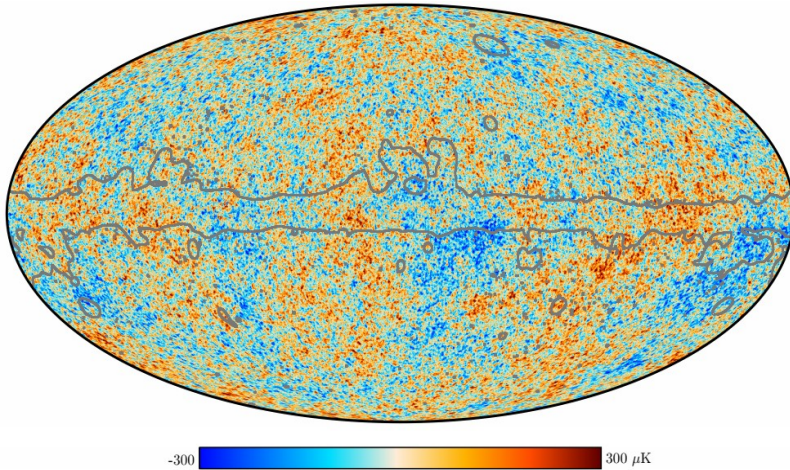
Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers

2. La nucléosynthèse primordiale

3. Le fond diffus cosmologique (CMB)

➤ Suivi de WMAP (2001) et Planck (2009)

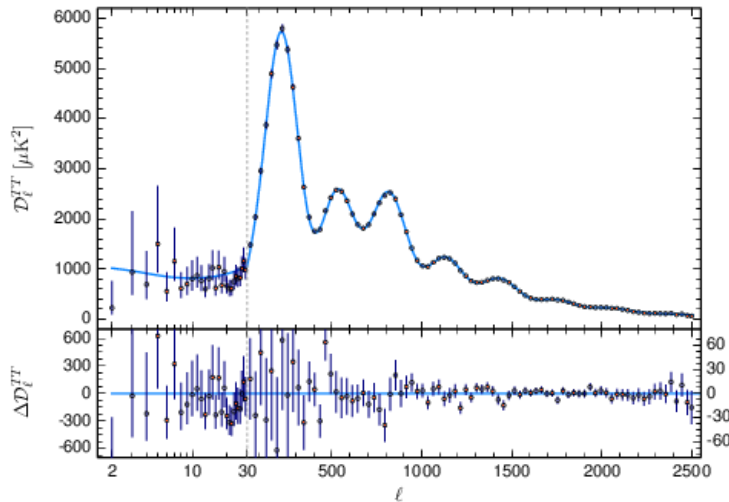


Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers

2. La nucléosynthèse primordiale

3. Le fond diffus cosmologique (CMB)

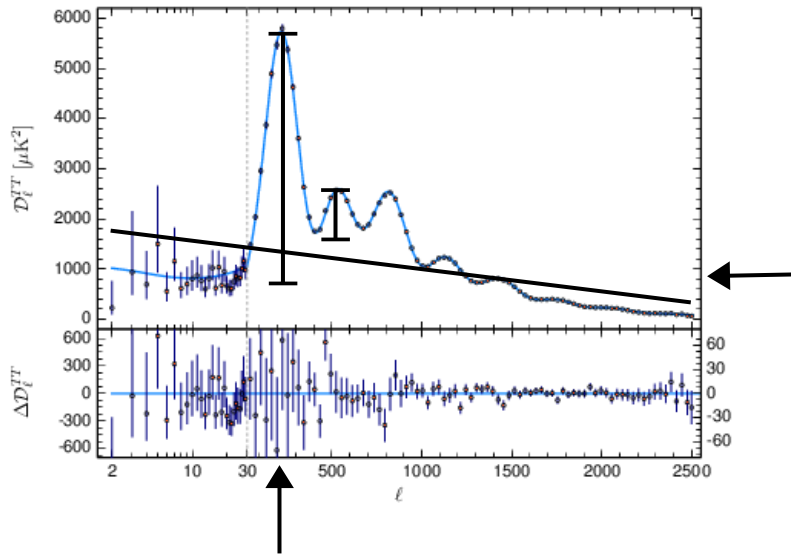


Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers

2. La nucléosynthèse primordiale

3. Le fond diffus cosmologique (CMB)



5 caractéristiques, 6 paramètres... Bof...

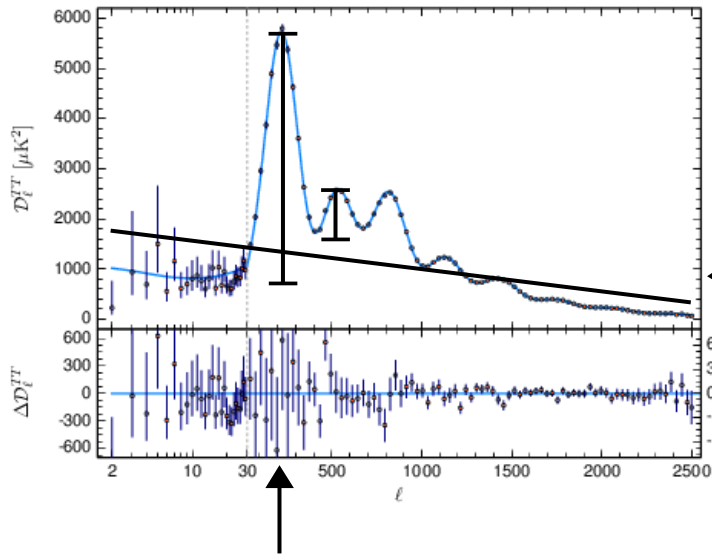
$$H_0, \Omega_b^0, \Omega_c^0, A_s, n_s, \tau$$

Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers

2. La nucléosynthèse primordiale

3. Le fond diffus cosmologique (CMB)



5 caractéristiques, 6 paramètres... Bof...

$H_0, \Omega_b^0, \Omega_c^0, A_s, n_s, \tau$

Constante de Hubble

Densité d'énergie de la matière baryonique

Densité d'énergie de la matière noire

Amplitude des fluctuations primordiales

Indice spectral des fluctuations primordiales

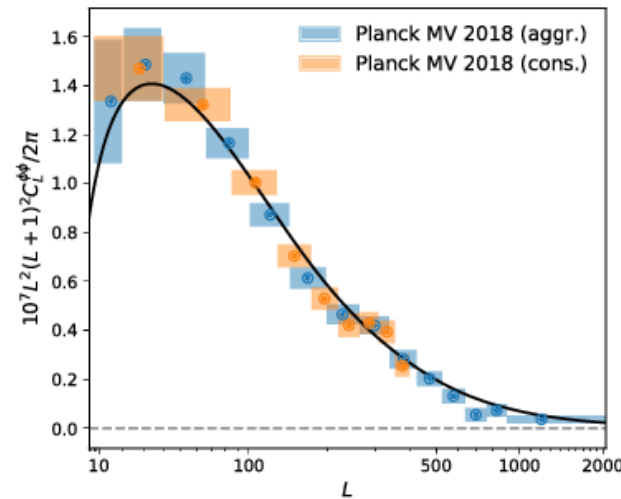
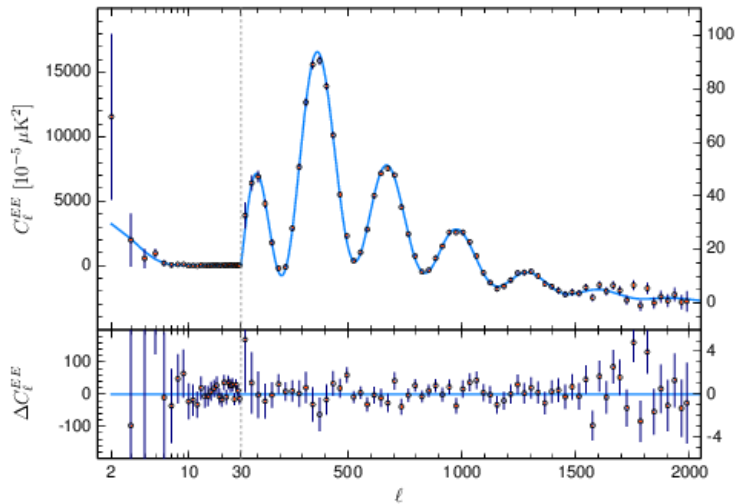
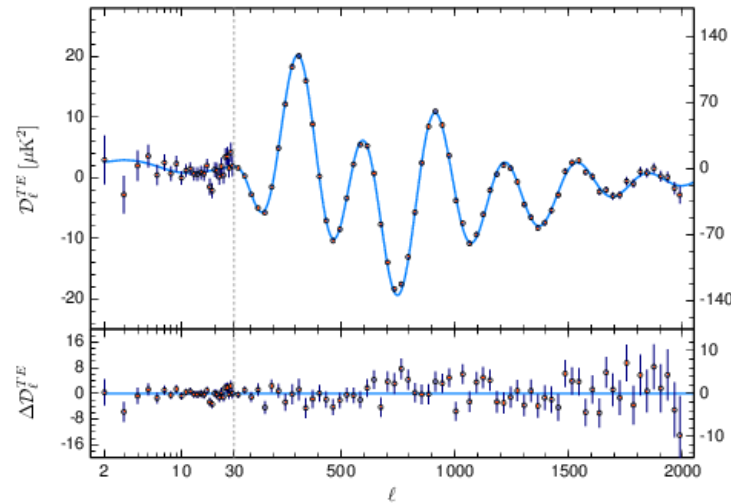
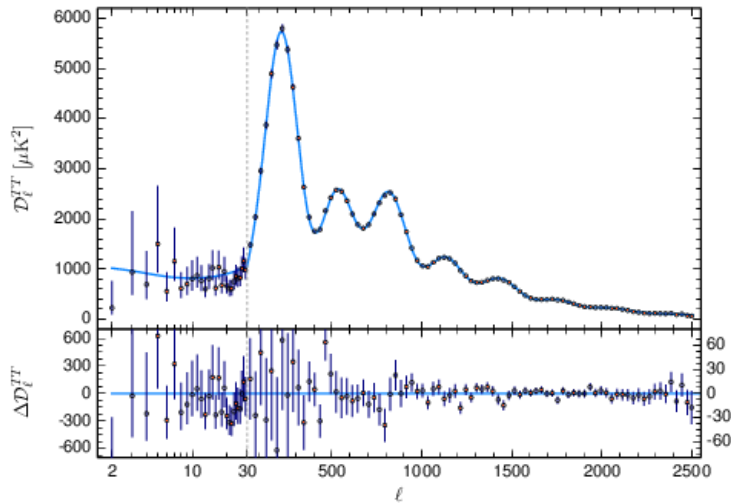
Profondeur optique de la réionisation

Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers

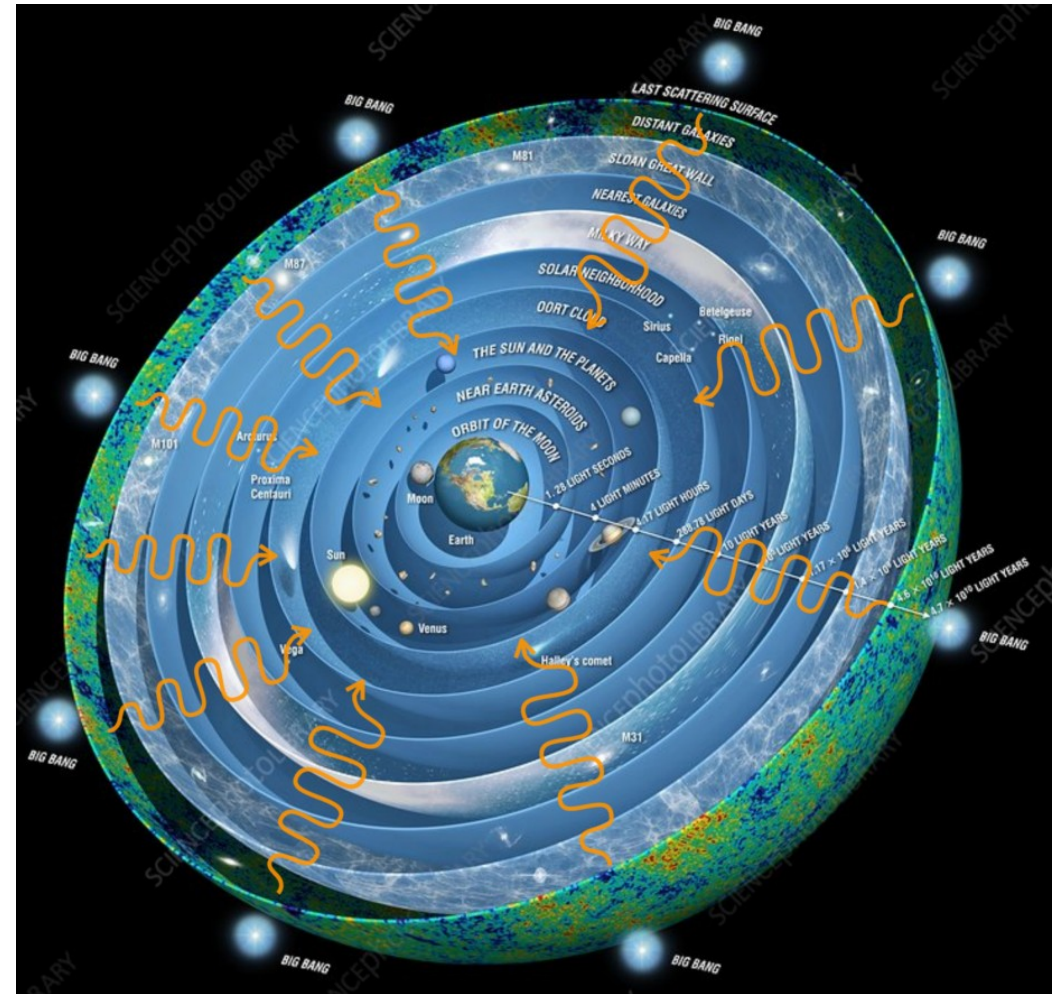
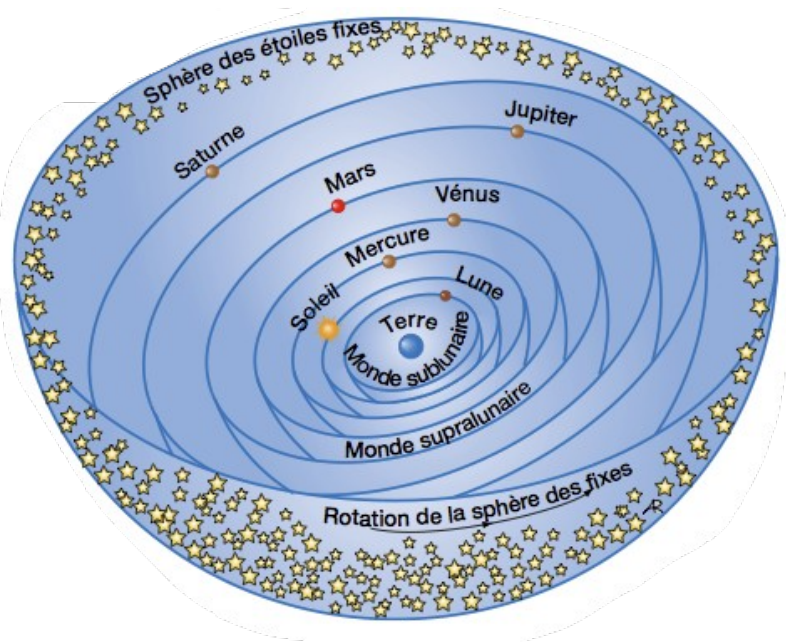
2. La nucléosynthèse primordiale

3. Le fond diffus cosmologique (CMB)



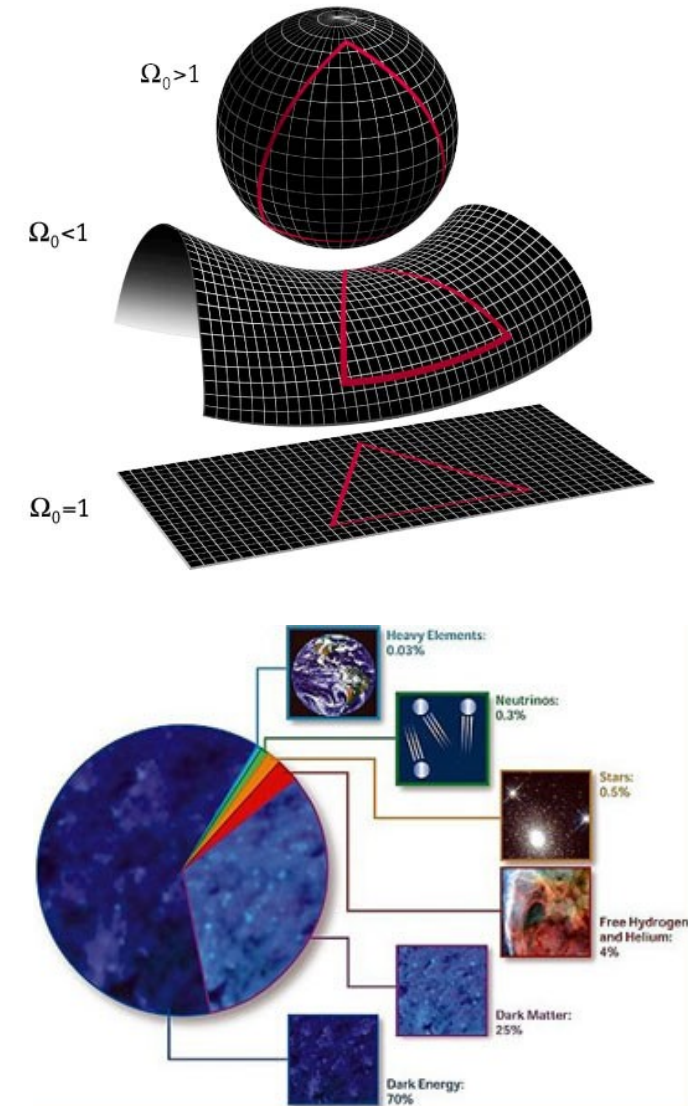
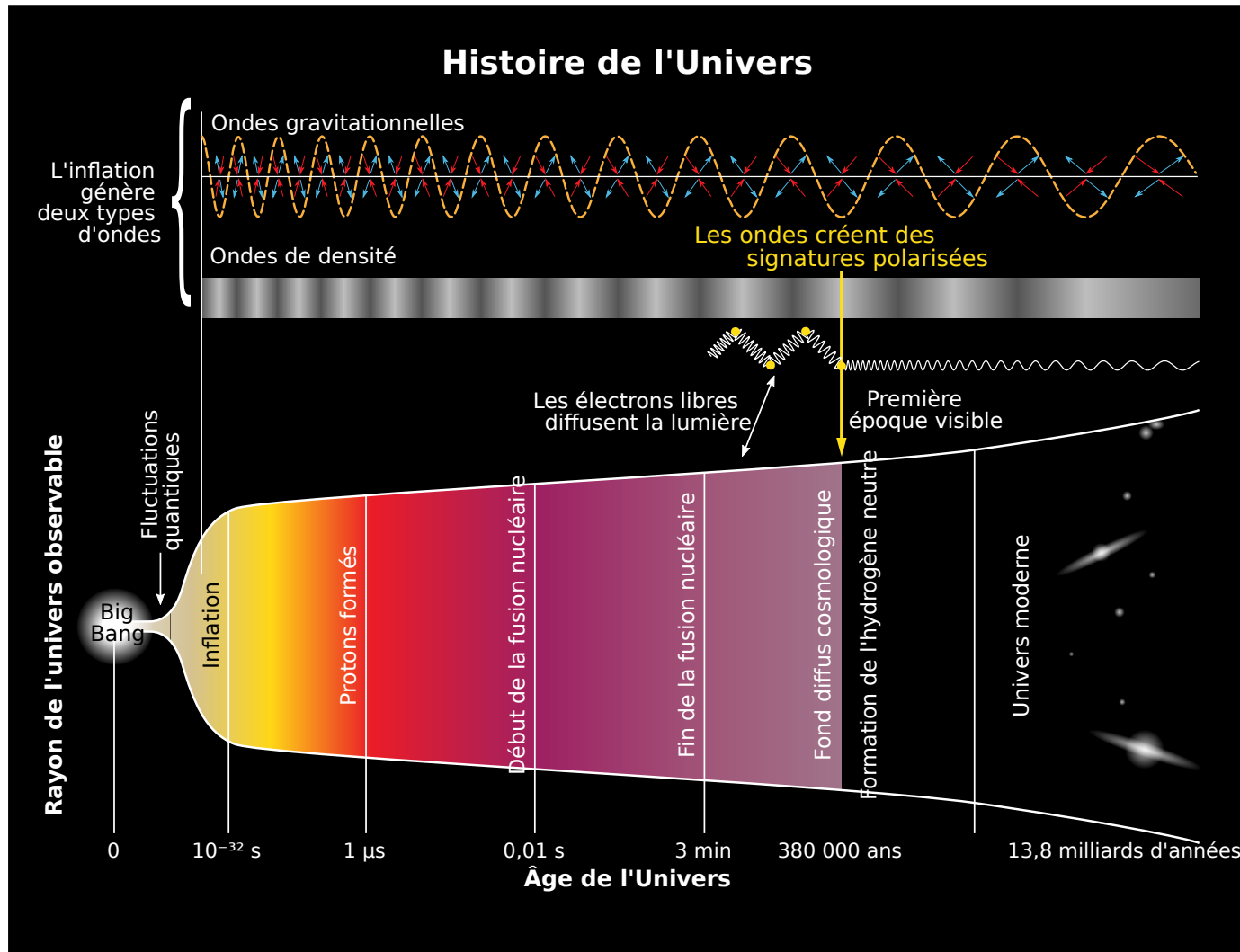
Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers
2. La nucléosynthèse primordiale → Trois piliers qui sous-tendent le modèle du Big-bang
3. Le fond diffus cosmologique



Confirmation observationnelle

1. L'expansion de l'Univers
2. La nucléosynthèse primordiale
3. Le fond diffus cosmologique



Plan

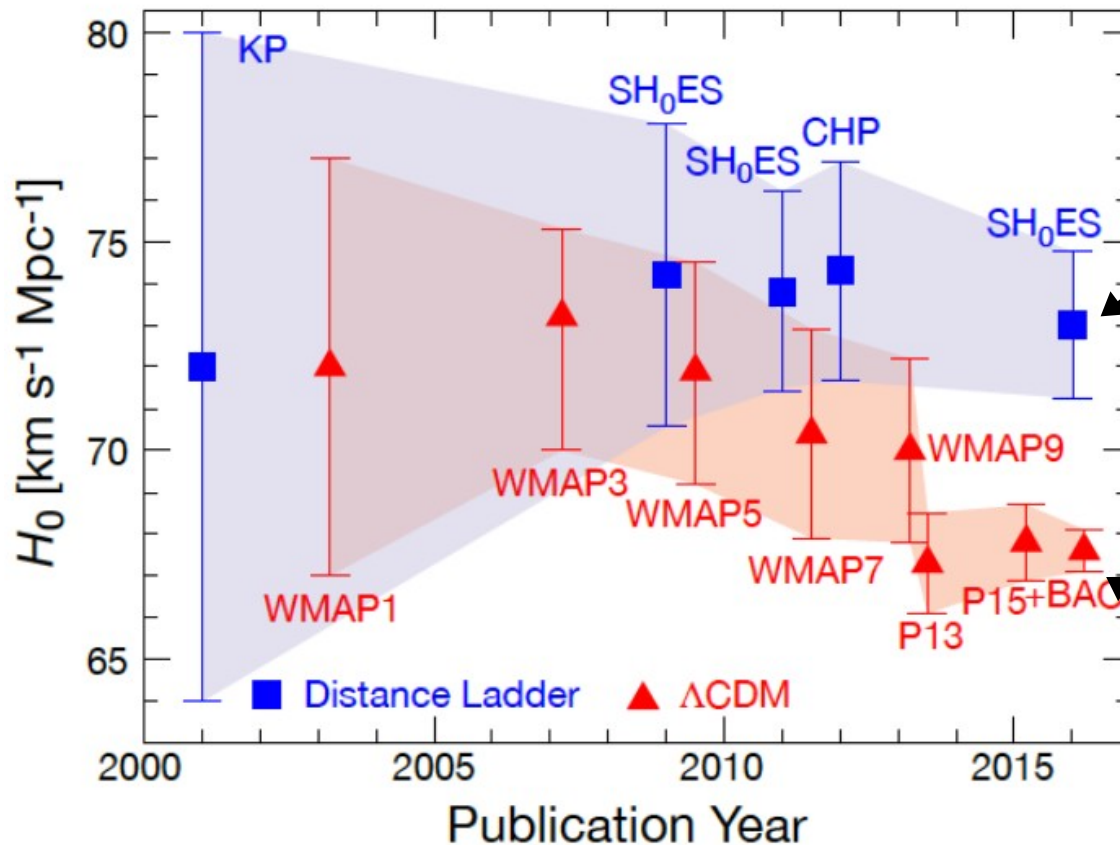
I. Contexte théorique

II. Confirmation observationnelle

III. Questions ouvertes et futures expériences

Questions ouvertes et futures expériences

1. La tension de Hubble



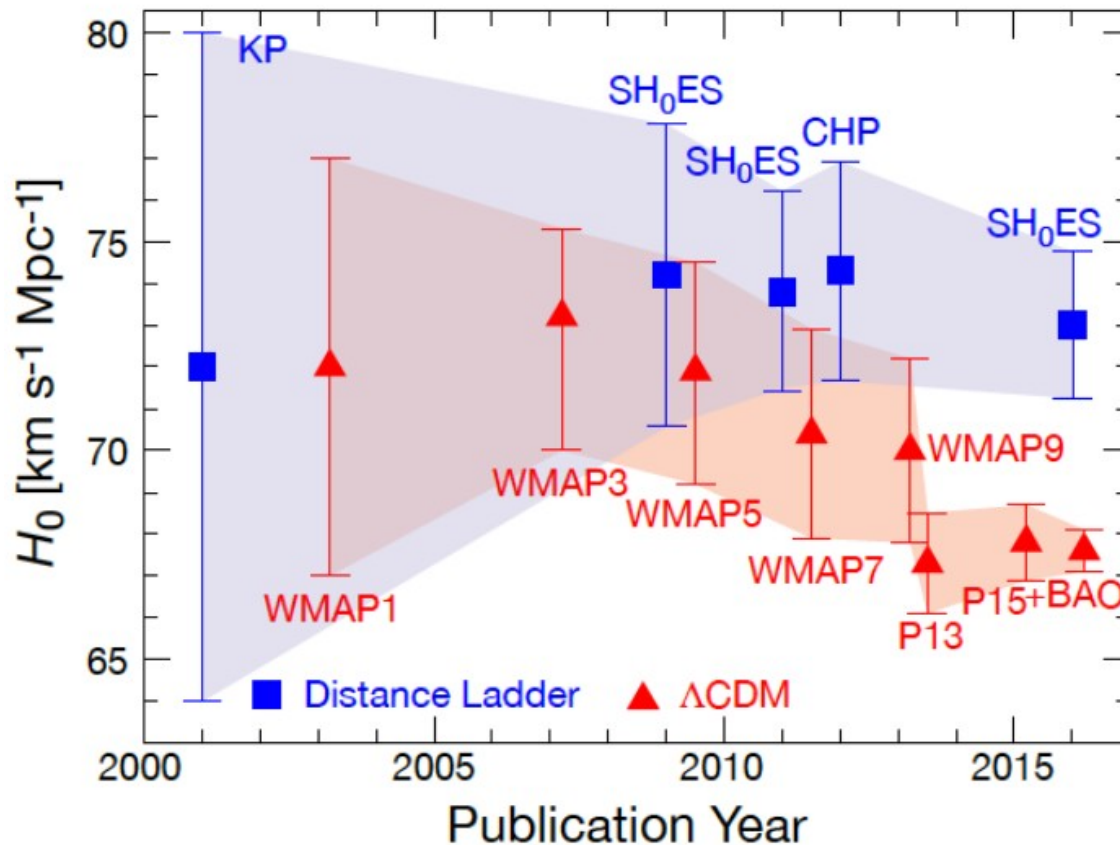
Utilise la méthode de l'échelle cosmique (céphéides+SN Ia). Cela suppose connues les propriétés des chandelles standards.

Utilise les données d'observation du CMB. Cela suppose que l'évolution de l'Univers suit celle prédite par le modèle ΛCDM .

Problème avec les mesures ou problème avec la théorie ?

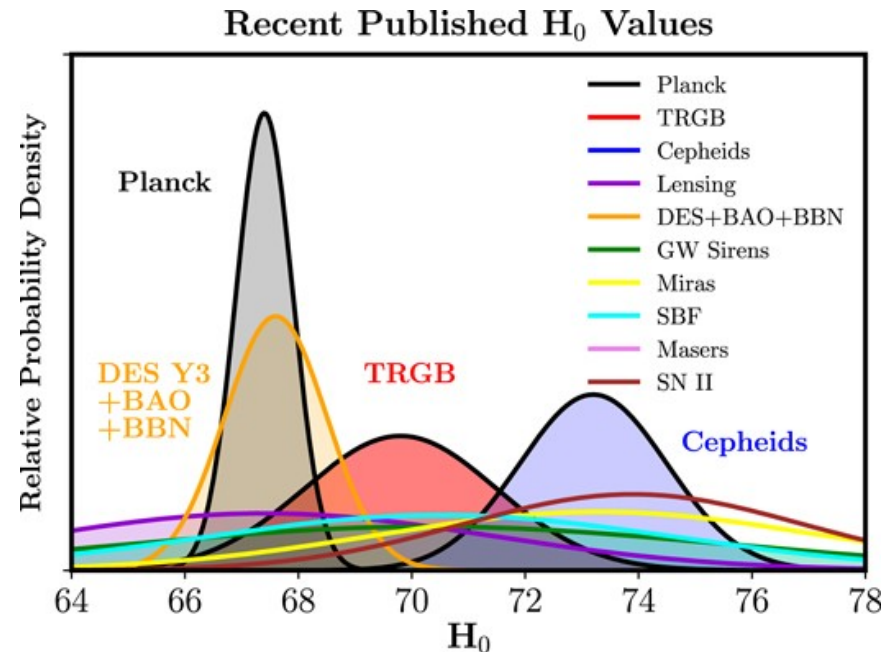
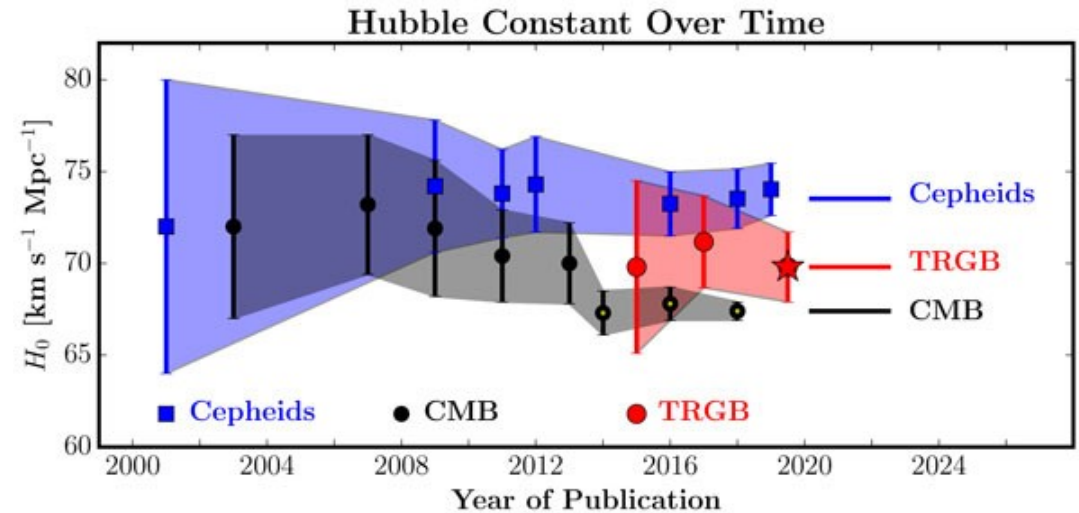
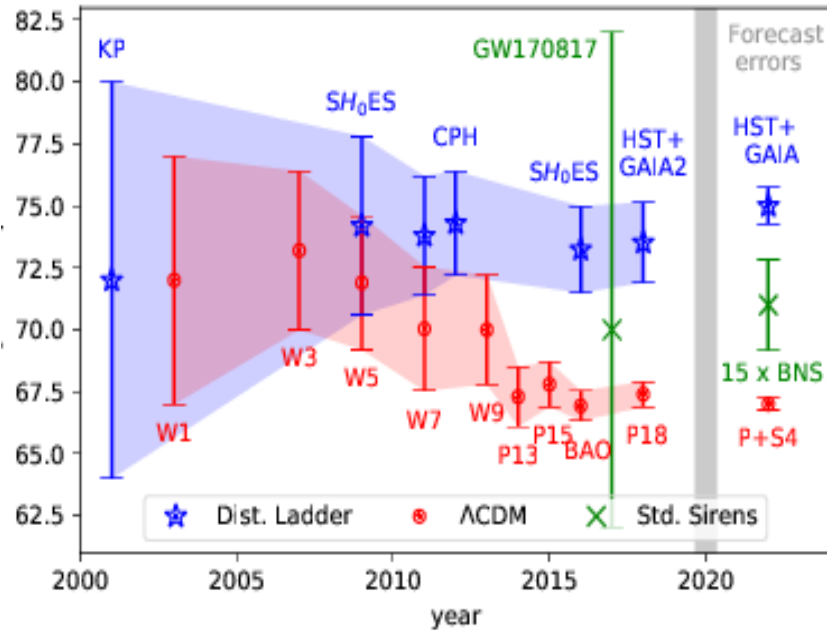
Questions ouvertes et futures expériences

1. La tension de Hubble



Questions ouvertes et futures expériences

1. La tension de Hubble



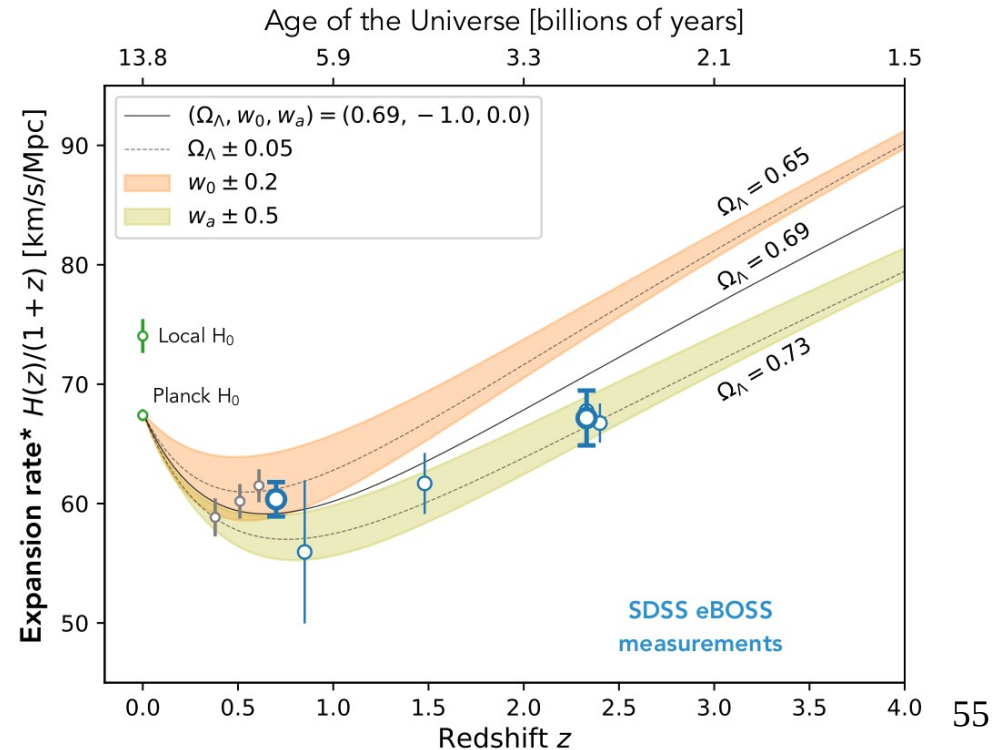
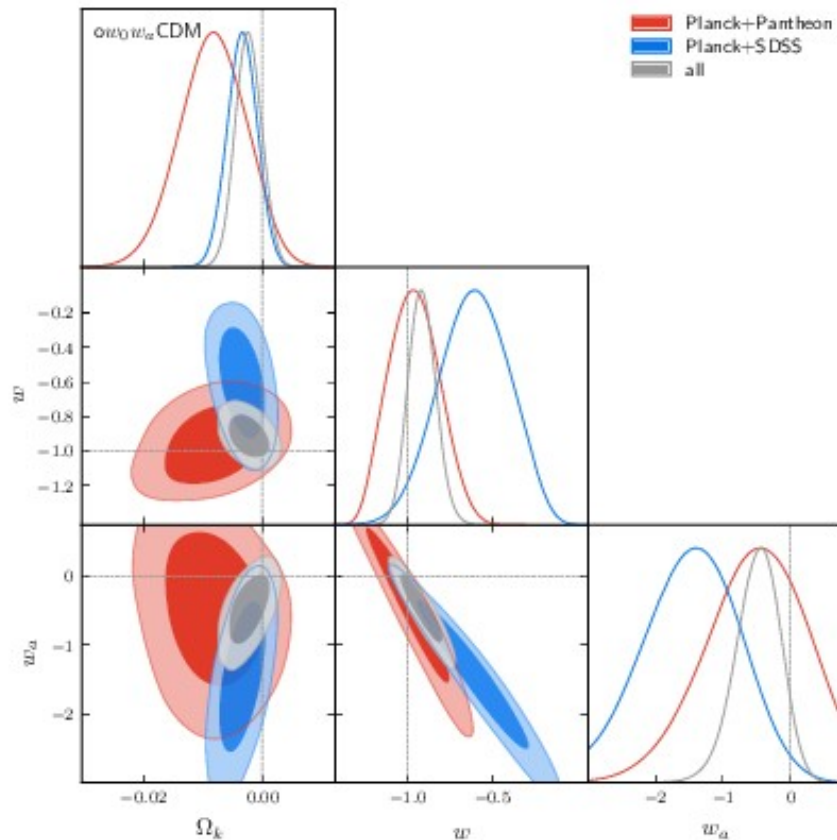
Questions ouvertes et futures expériences

2. La nature de l'énergie sombre

- Constante cosmologique ou pas constante cosmologique ?

L'énergie sombre est ici modélisée par un fluide parfait d'équation d'état:

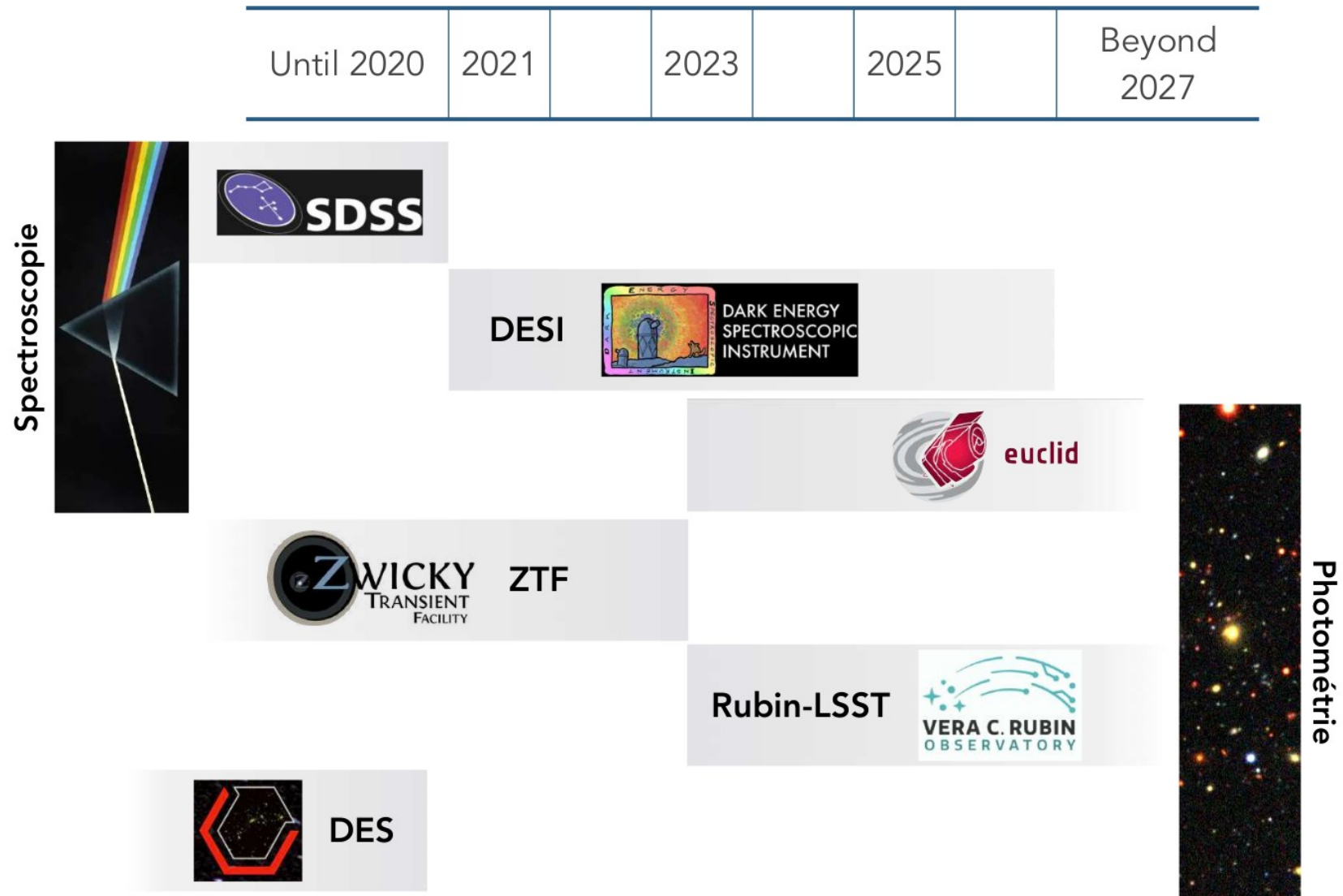
$$w(a) = w_0 + (1 - a) w_a$$



Questions ouvertes et futures expériences

2. La nature de l'énergie sombre

➤ Constante cosmologique ou pas constante cosmologique ?

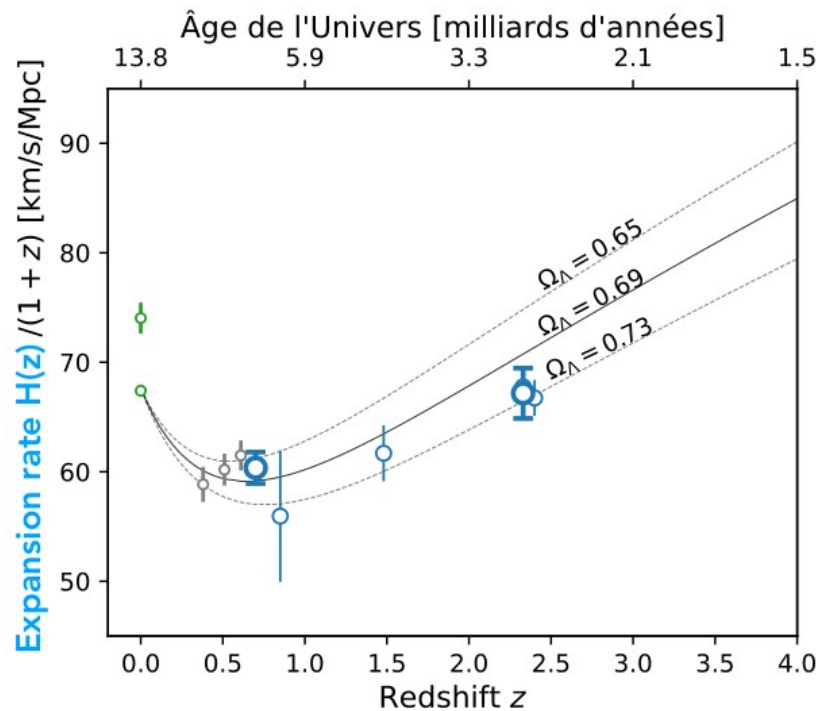


Questions ouvertes et futures expériences

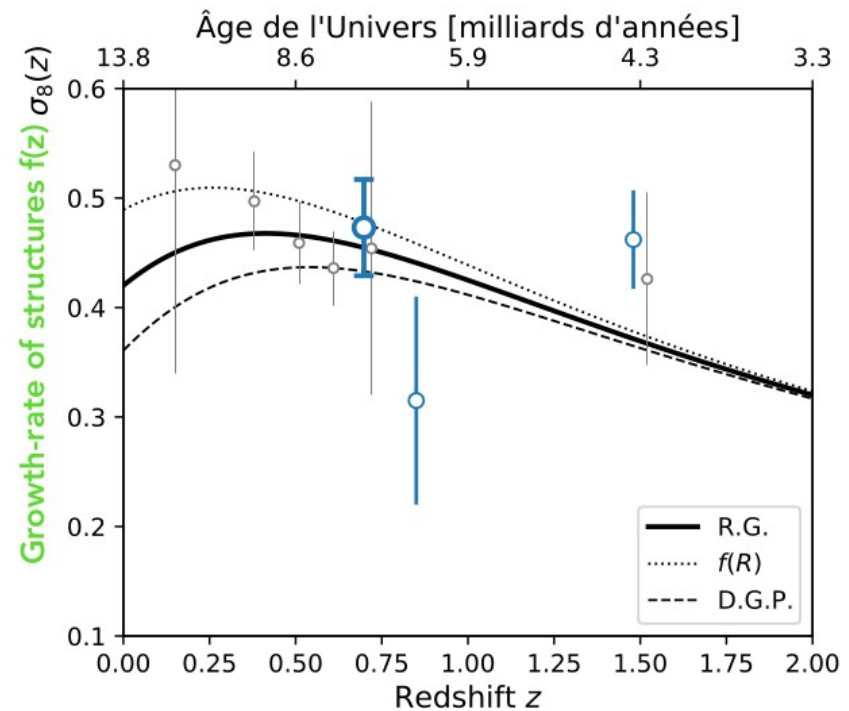
2. La nature de l'énergie sombre

- Constante cosmologique ou pas constante cosmologique ?

Expansion rate with BAO



Growth-rate of structures with RSD and peculiar velocities

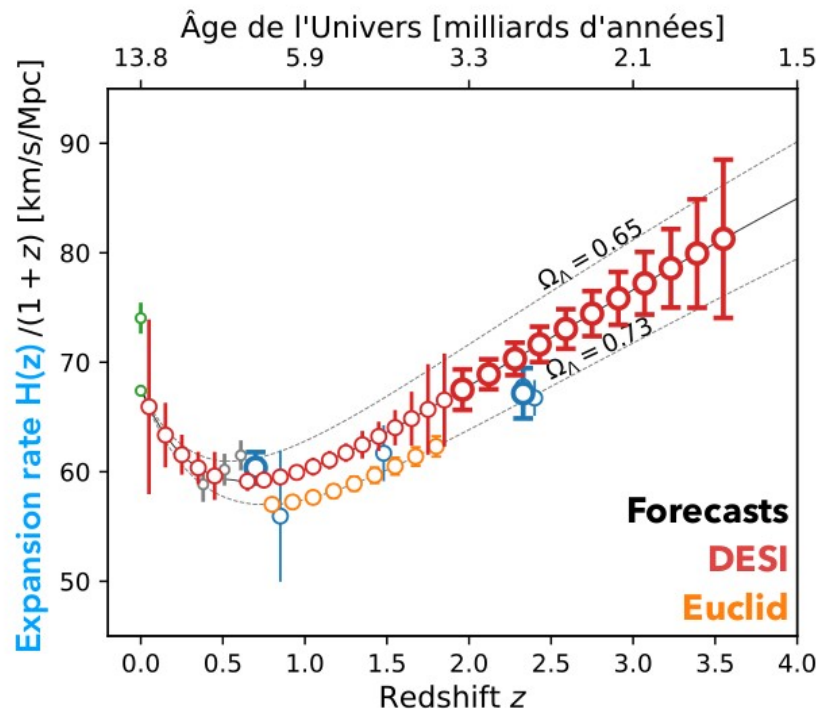


Questions ouvertes et futures expériences

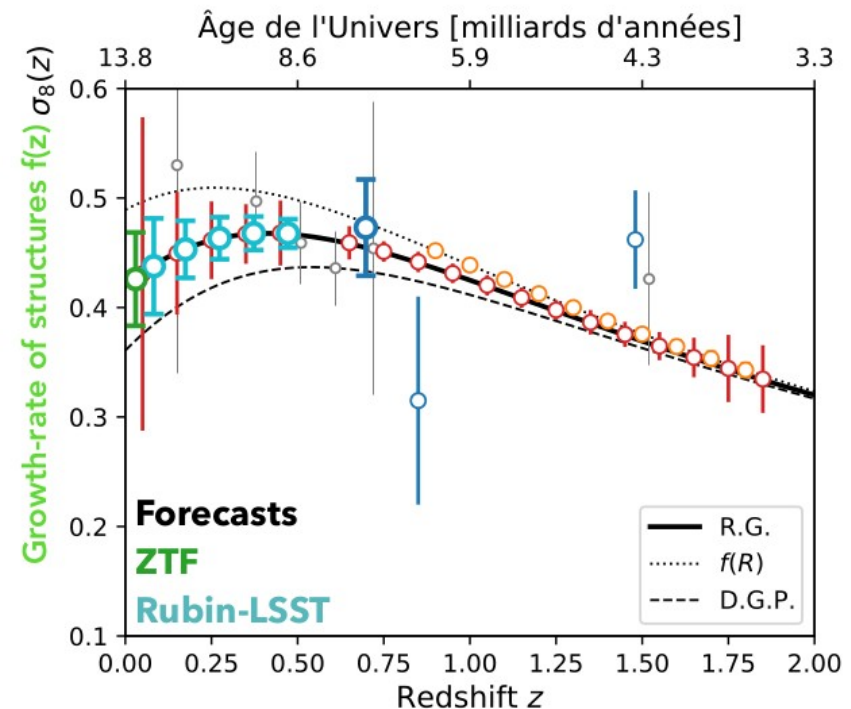
2. La nature de l'énergie sombre

- Constante cosmologique ou pas constante cosmologique ?

Expansion rate with BAO



Growth-rate of structures with RSD and peculiar velocities

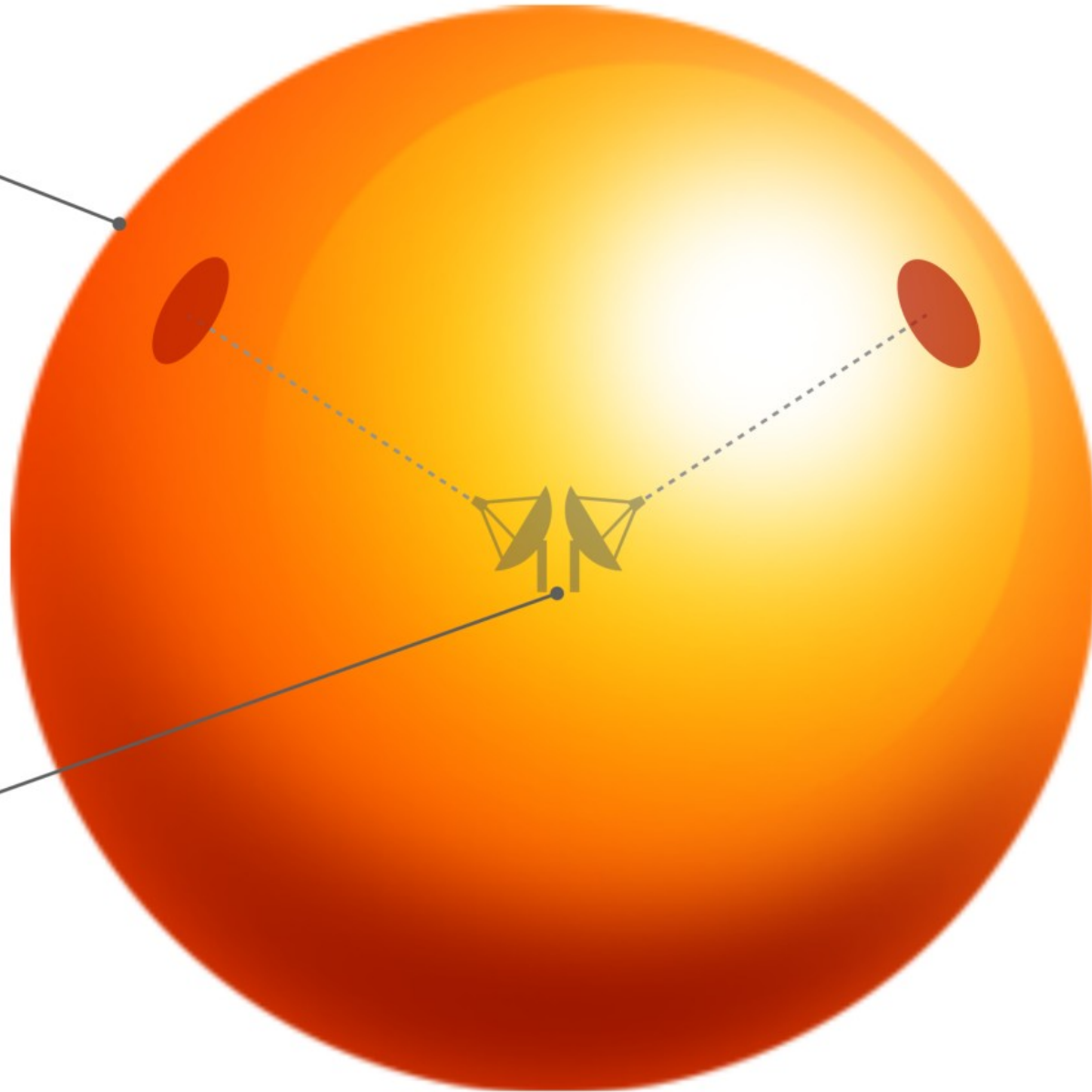


Questions ouvertes et futures expériences

3. L'inflation cosmique

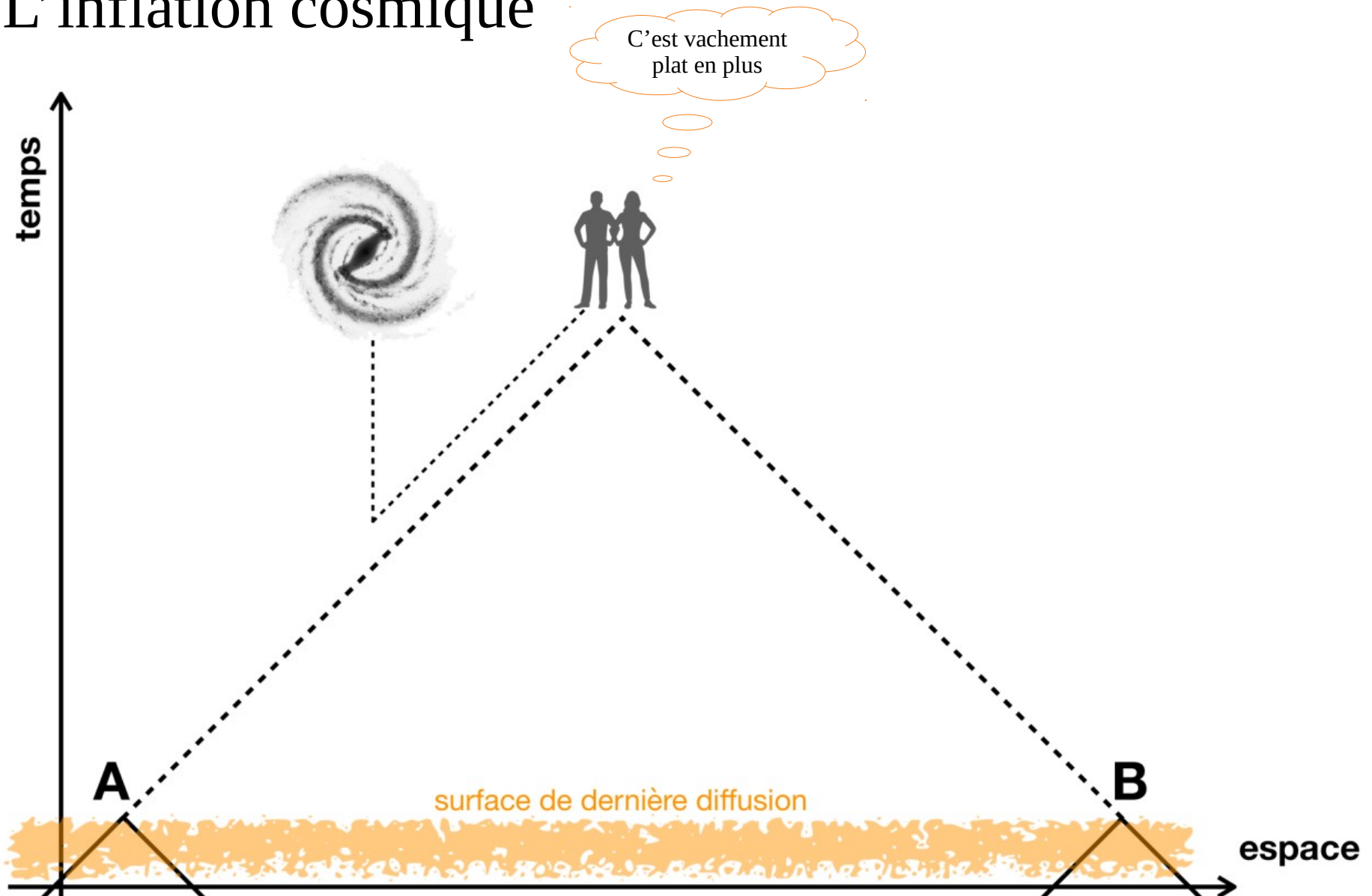
C'est pas un peu trop homogène là ?

Nous aujourd'hui



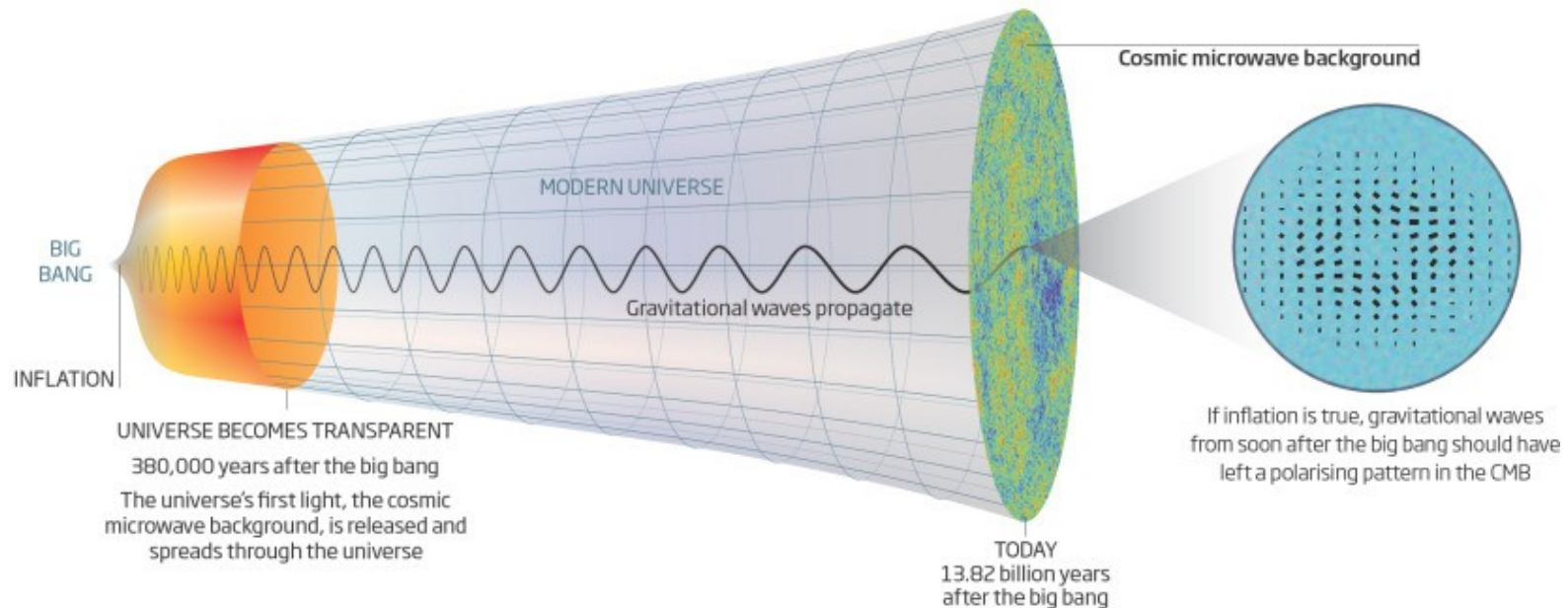
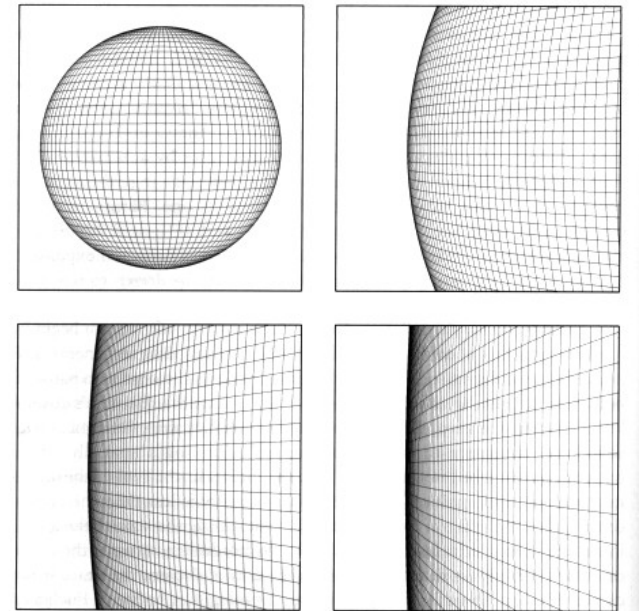
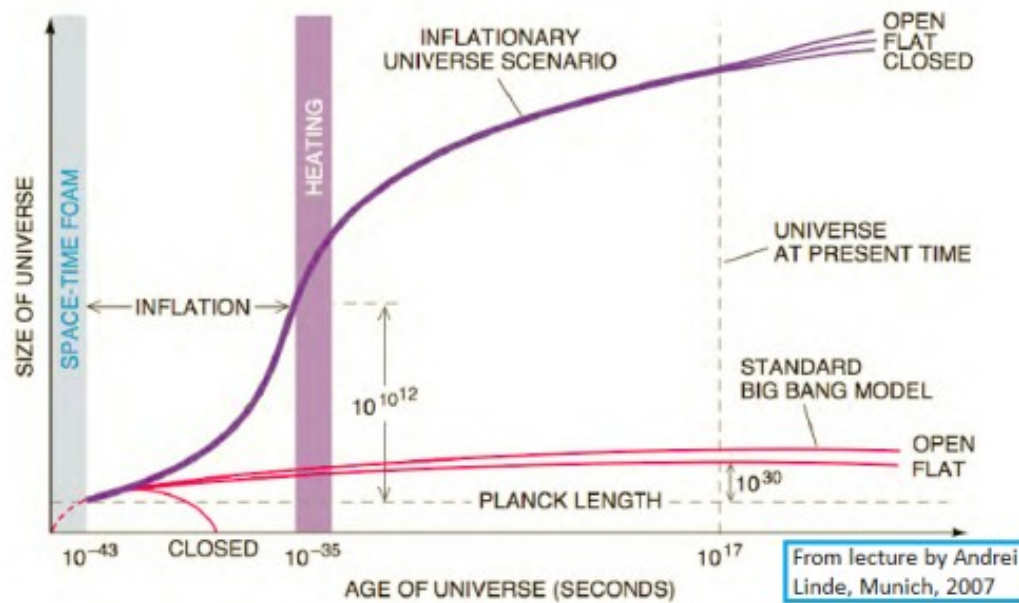
Questions ouvertes et futures expériences

3. L'inflation cosmique



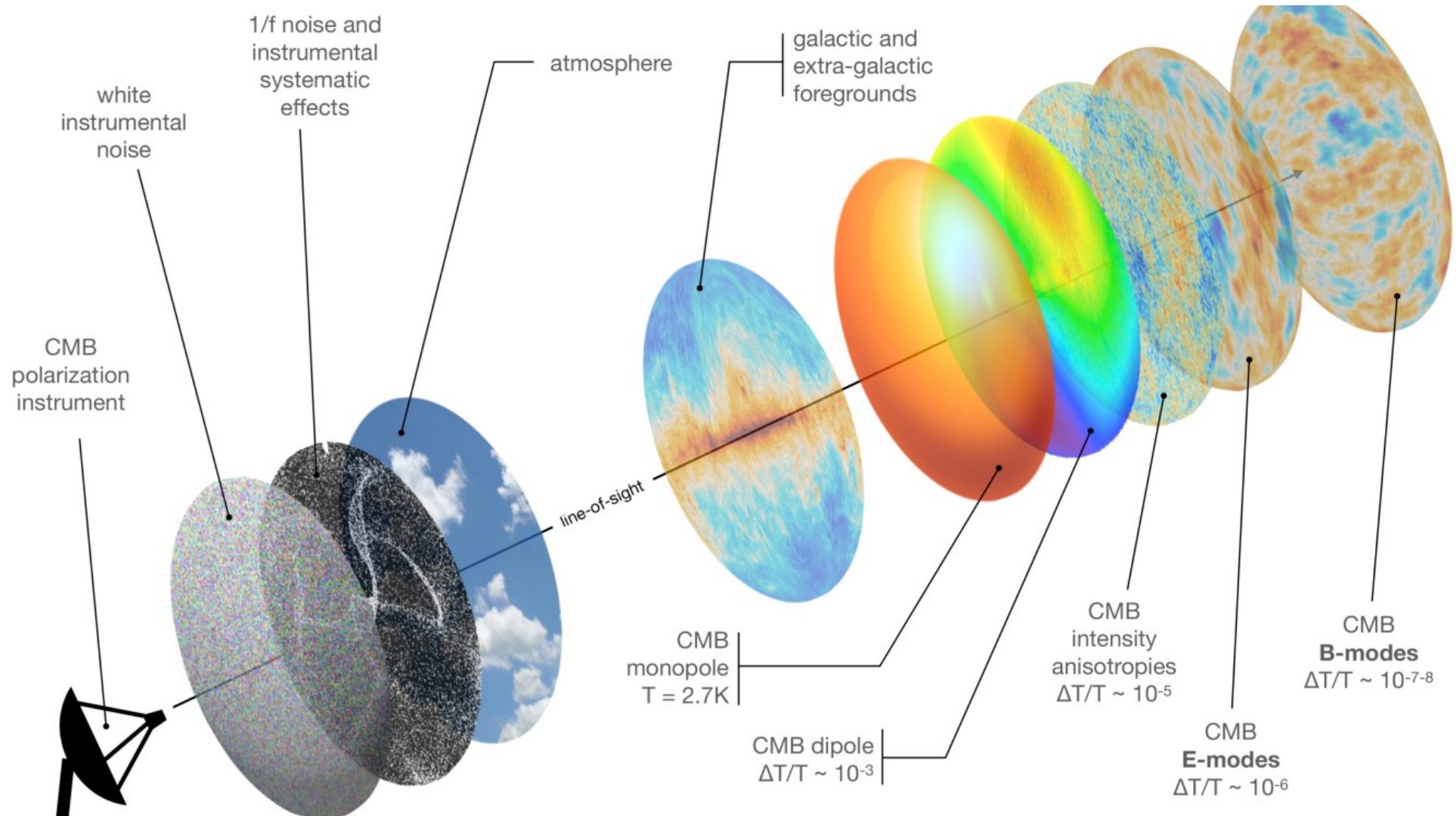
Questions ouvertes et futures expériences

3. L'inflation cosmique



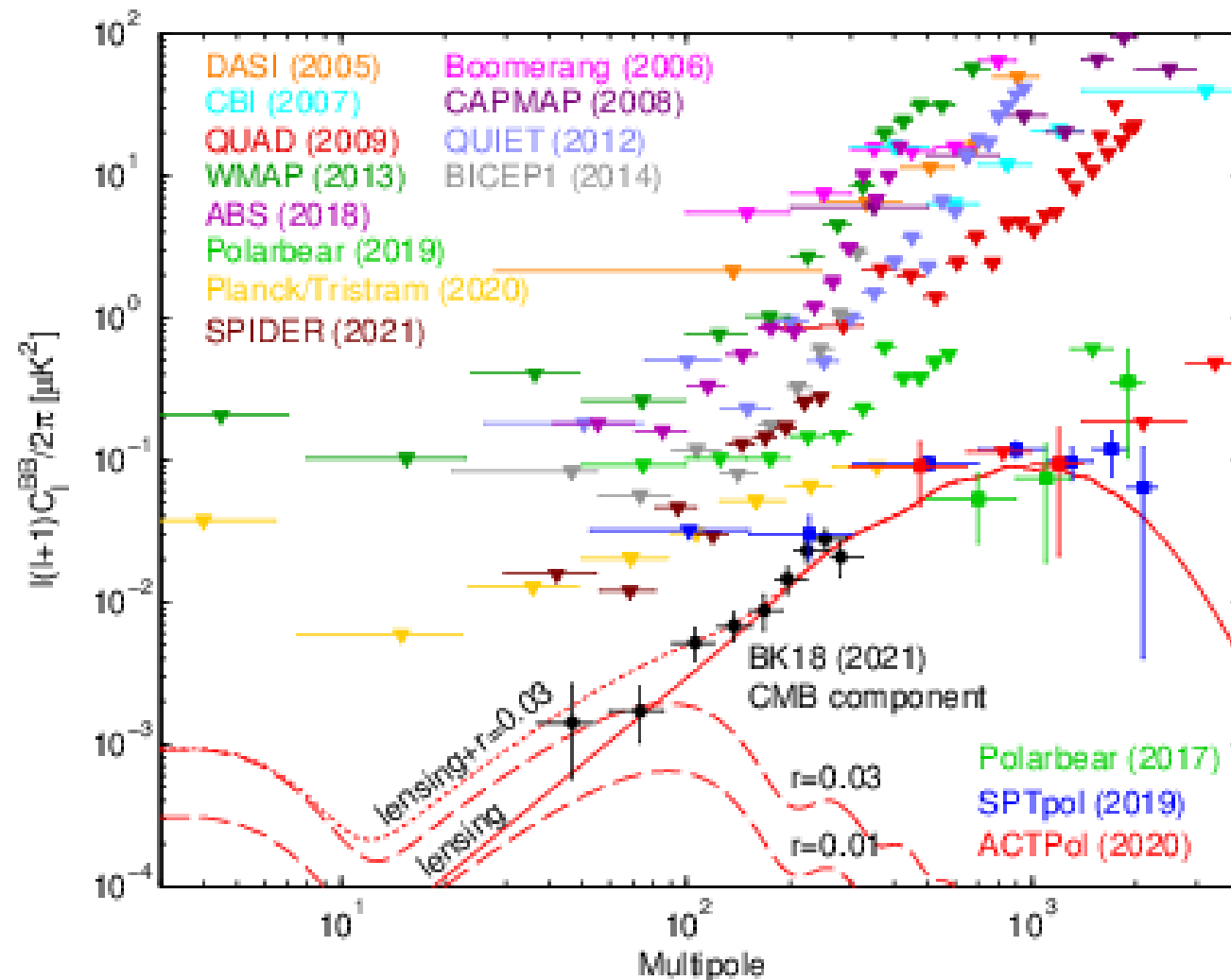
Questions ouvertes et futures expériences

3. L'inflation cosmique



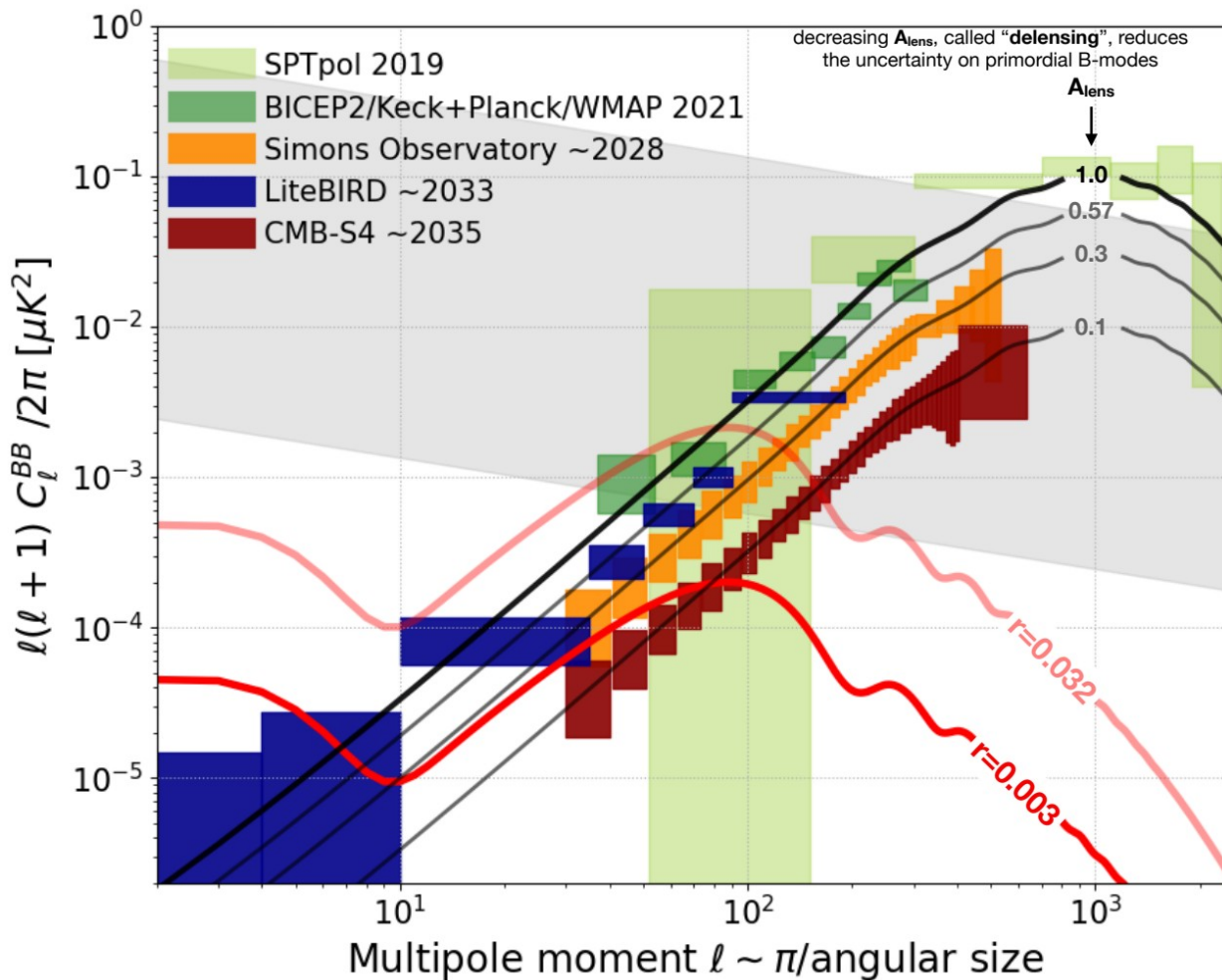
Questions ouvertes et futures expériences

3. L'inflation cosmique



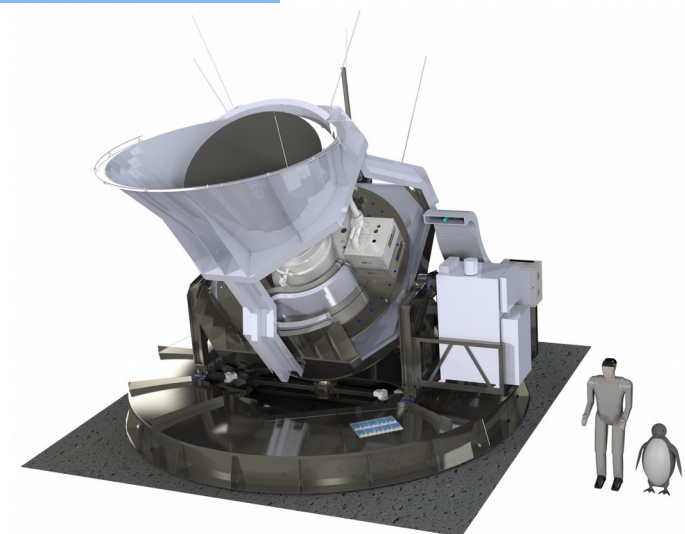
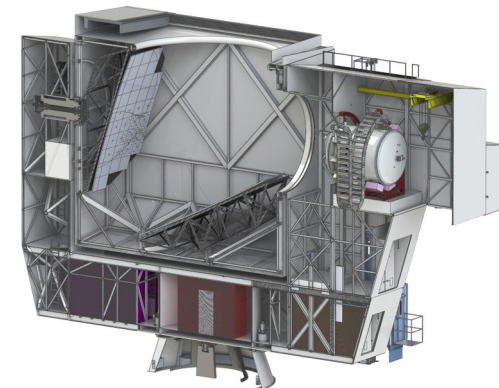
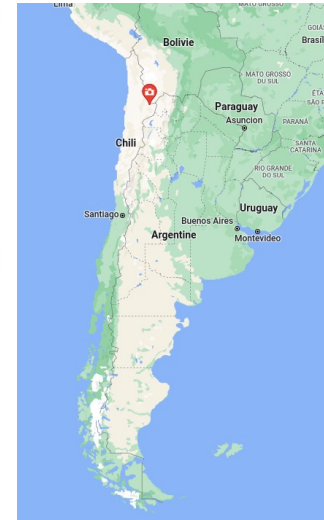
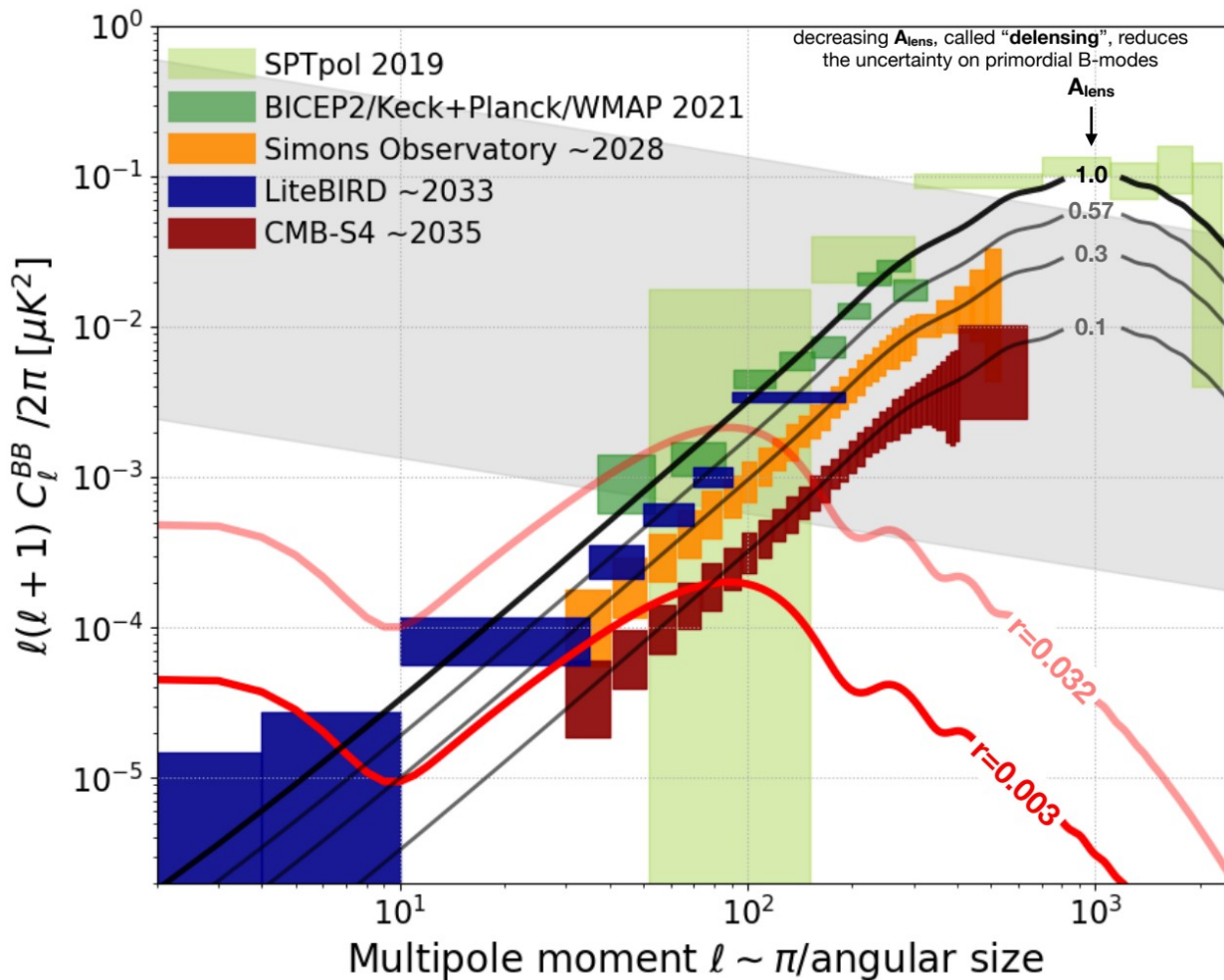
Questions ouvertes et futures expériences

3. L'inflation cosmique



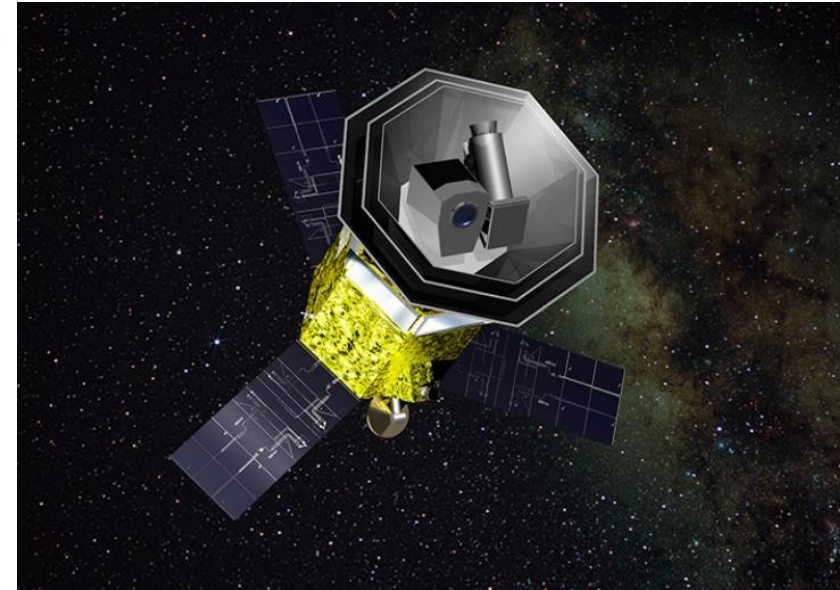
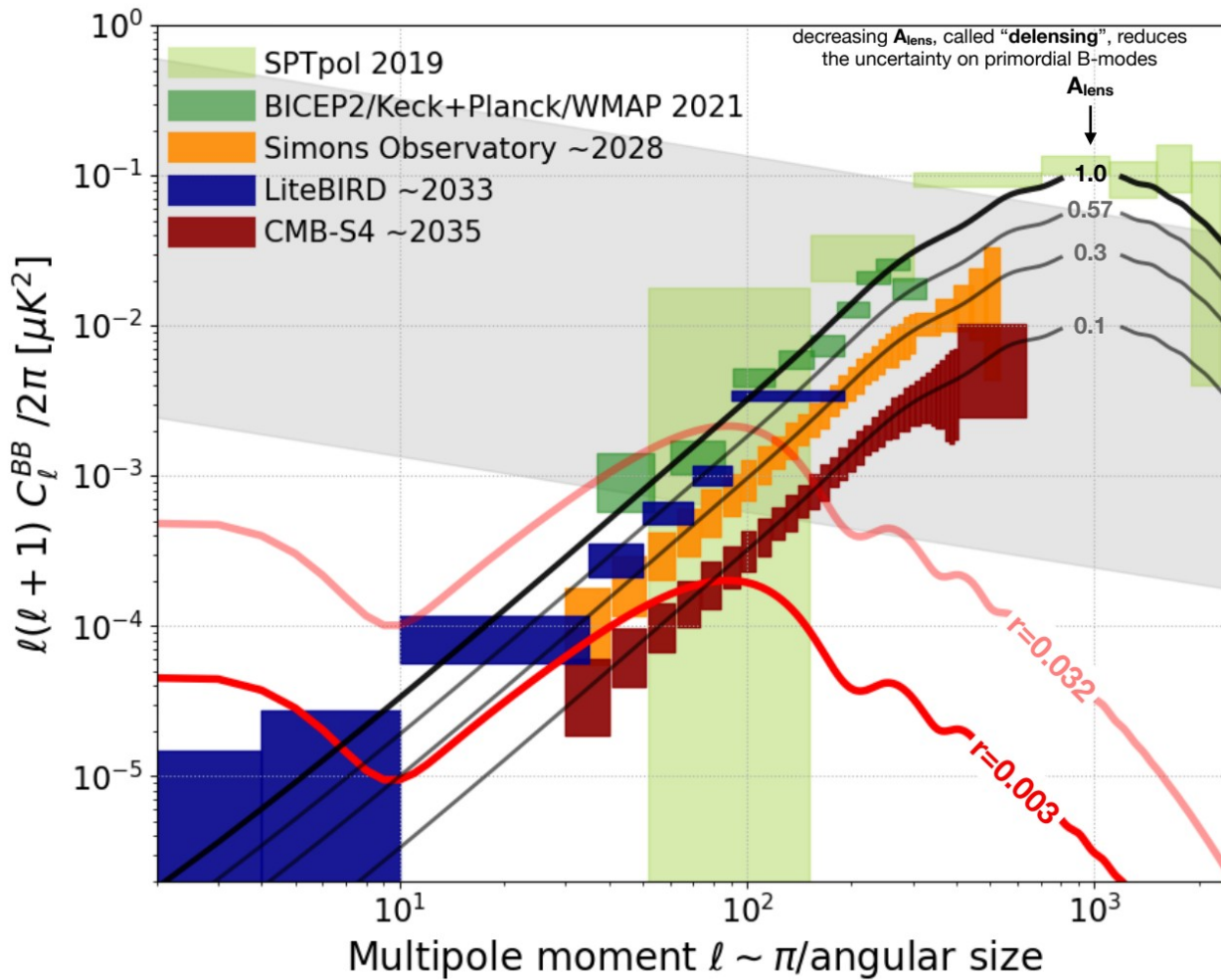
Questions ouvertes et futures expériences

3. L'inflation cosmique



Questions ouvertes et futures expériences

3. L'inflation cosmique



Merci !