

# Mesure de $H_0$

Détermination du potentiel de Fermat de la lentille RXJ1131-1231

Alexandre Adam,  
Charles Wilson

Département de Physique  
Université de Montréal

PHY6669 – Cosmologie

## 1 Contexte

- Mesures
- Tension

## 2 Méthode

- Équation du délai temporel
- Théorie des lentilles gravitationnelles
- Modèle pour le potentiel de Fermat

## 3 RXJ1131-1231

## 1 Contexte

- Mesures
- Tension

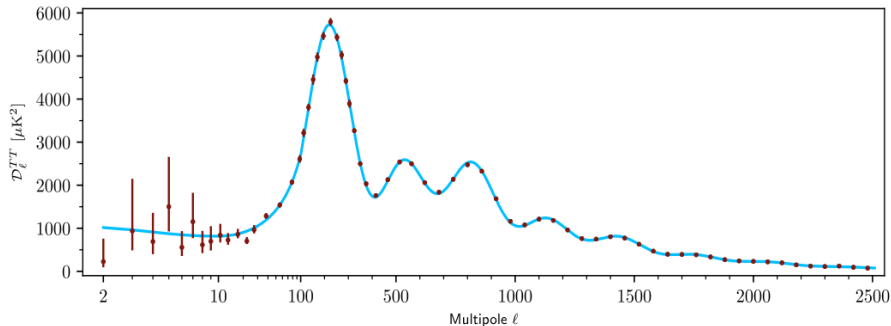
## 2 Méthode

- Équation du délai temporel
- Théorie des lentilles gravitationnelles
- Modèle pour le potentiel de Fermat

## 3 RXJ1131-1231

# Mesures

Planck (2018) +  $\Lambda$ CDM

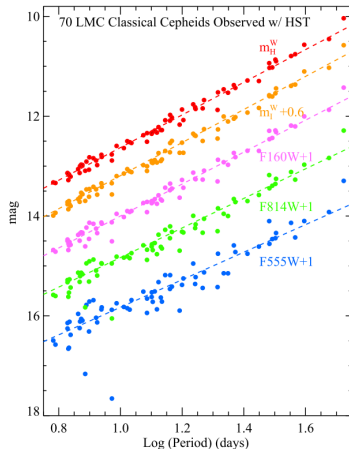


Mesure indirecte:  $100h = 67.36 \pm 0.54 \text{ (0.8\%)} \text{ à } z \gtrsim 1100$ <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Planck Collaboration [2018]

# Mesures

Sh0es (Riess *et al.*)

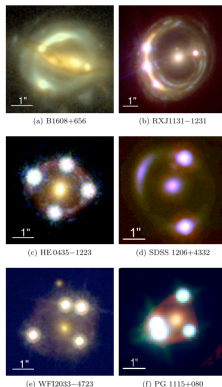


Mesure directe:  $100h = 74.03 \pm 1.42 \text{ (1.9\%)} \quad \text{à } z \ll 1^2$

<sup>2</sup>Riess *et al.* [2019]

# Mesures

H0LiCOW (Suyu *et al.*)



Mesure semi-directe:  $100h = 73.3^{+1.7}_{-1.8} (2.4\%)$  avec  $z_\ell \sim 0.5$  et  $z_s \lesssim 2$ .<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Wong *et al.* [2020]

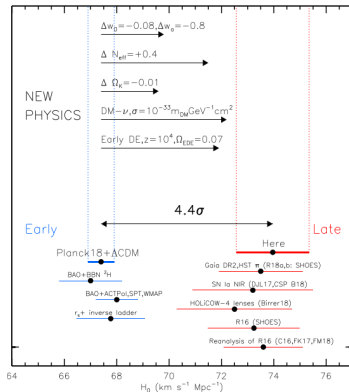
## 1 Contexte

- Mesures
- Tension

## 2 Méthode

- Équation du délai temporel
- Théorie des lentilles gravitationnelles
- Modèle pour le potentiel de Fermat

## 3 RXJ1131-1231



<sup>4</sup> Les mesures locales sont en conflit avec  $H_0$  dérivée du CMB, des oscillations acoustiques baryoniques (BAO) et de la nucléosynthèse du Big Bang (BBN)

<sup>4</sup>Riess et al. [2019]



## 1 Contexte

- Mesures
- Tension

## 2 Méthode

- Équation du délai temporel
- Théorie des lentilles gravitationnelles
- Modèle pour le potentiel de Fermat

## 3 RXJ1131-1231

# Équation du délai temporel

$$\Delta t_{ij} = (1 + z_\ell) \frac{D_\ell D_s}{D_{\ell s} c} \left[ \underbrace{\frac{(\theta_i - \beta)^2}{2} - \frac{(\theta_j - \beta)^2}{2}}_{\text{Refsdal and Bondi [1964]}} - \underbrace{\psi(\theta_i) + \psi(\theta_j)}_{\text{Shapiro [1964]}} \right] \quad (1)$$

La mesure de  $H_0$  se fait via la *distance caractéristique du délai temporel*

$$D_{\Delta t} \equiv (1 + z_\ell) \frac{D_\ell D_s}{D_{\ell s}} \propto \frac{c}{H_0} \quad (2)$$

On assume  $\Lambda$ CDM plat.

## 1 Contexte

- Mesures
- Tension

## 2 Méthode

- Équation du délai temporel
- Théorie des lentilles gravitationnelles
- Modèle pour le potentiel de Fermat

## 3 RXJ1131-1231

# Théorie des lentilles gravitationnelles

## Potentiel de Fermat

Le potentiel a comme source la densité (baryonique) projeté sur le plan de la lentille. On doit donc résoudre une équation de Poisson:

$$\nabla_{\boldsymbol{\theta}}^2 \psi = 2\kappa(\boldsymbol{\theta}) \quad (3)$$

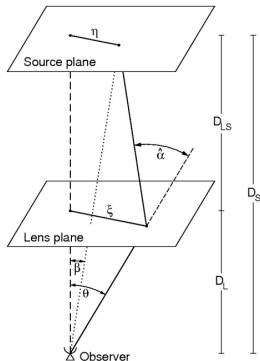
$$\psi(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathbb{R}^2} \kappa(\boldsymbol{\theta}') \ln(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}') d^2\boldsymbol{\theta}' \quad (4)$$

$\kappa$  est la *convergence*, soit une mesure adimensionnelle de la densité de surface projeté sur le plan de la lentille

$$\kappa \equiv \frac{\Sigma}{\Sigma_{\text{cr}}}, \quad \Sigma_{\text{cr}} \equiv \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_s}{D_\ell D_{\ell s}} \quad (5)$$

# Théorie des lentilles gravitationnelles

## Équation de la lentille



L'image lentillée est obtenu via l'équation de la lentille:

$$\beta = \theta - \alpha(\theta) \quad (6)$$

Les angles de déflexions sont obtenus en prenant le gradient du potentiel:

$$\alpha(\theta) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathbb{R}^2} \kappa(\theta') \frac{\theta - \theta'}{|\theta - \theta'|} d^2\theta' \quad (7)$$

Sketch d'une lentille gravitationnelle  
Bartelmann and Schneider [2001]

## 1 Contexte

- Mesures
- Tension

## 2 Méthode

- Équation du délai temporel
- Théorie des lentilles gravitationnelles
- **Modèle pour le potentiel de Fermat**

## 3 RXJ1131-1231



- M. Bartelmann and P. Schneider. Weak gravitational lensing. Technical Report 4-5, dec 2001. URL <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9912508>[http://dx.doi.org/10.1016/S0370-1573\(00\)00082-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0370-1573(00)00082-X).
- Planck Collaboration. Planck 2018 results. I. Overview and the cosmological legacy of Planck. 2018. URL <http://www.esa.int/Planck><http://arxiv.org/abs/1807.06205>.
- S. Refsdal and H. Bondi. The Gravitational Lens Effect. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 128(4):295–306, 1964. ISSN 0035-8711. doi: 10.1093/mnras/128.4.295. URL <https://academic.oup.com/mnras/article-abstract/128/4/295/2601704>.



- A. G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, L. M. Macri, and D. Scolnic. Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1 $\sigma$  Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics beyond  $\Lambda$ CDM. *The Astrophysical Journal*, 876:85, 2019. doi: 10.3847/1538-4357/ab1422. URL <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1422>.
- I. I. Shapiro. Fourth test of general relativity. *Physical Review Letters*, 13 (26):789–791, 1964. ISSN 00319007. doi: 10.1103/PhysRevLett.13.789.
- K. C. Wong, S. H. Suyu, G. C. Chen, C. E. Rusu, M. Millon, D. Sluse, V. Bonvin, C. D. Fassnacht, S. Taubenberger, M. W. Auger, S. Birrer, J. H. Chan, F. Courbin, S. Hilbert, O. Tihhonova, T. Treu, A.-a. Agnello, X. Ding, I. Jee, E. Komatsu, A. J. Shajib, A. Sonnenfeld, R. D. Blandford, L. V. Koopmans, P. J. Marshall, and G. Meylan. H0LiCOW-XIII. A 2.4 per cent measurement of H0 from lensed quasars:

$5.3\sigma$  tension between early-and late-Universe probes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 498(1):1420–1439, 2020. ISSN 13652966. doi: 10.1093/mnras/stz3094.