

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
- Modélisation de $\kappa(\boldsymbol{\theta})$

3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Reconstruction des paramètres de la lentille

1 Contexte

- Mesures
- Tension

2 Méthode

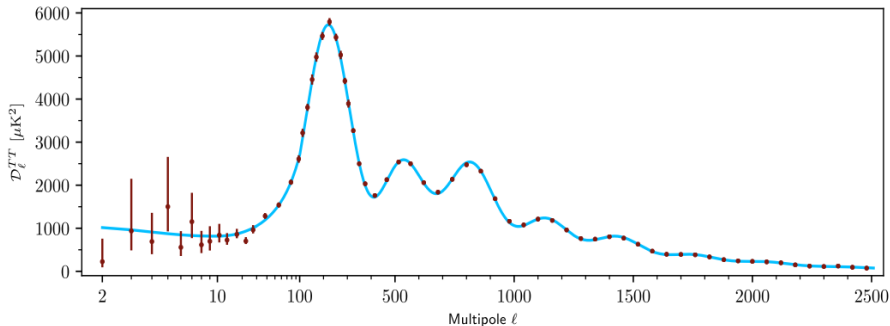
- Équation du délai temporel
- Théorie des lentilles gravitationnelles
- Modélisation de $\kappa(\boldsymbol{\theta})$

3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Reconstruction des paramètres de la lentille

Mesures

Planck (2018) + Λ CDM

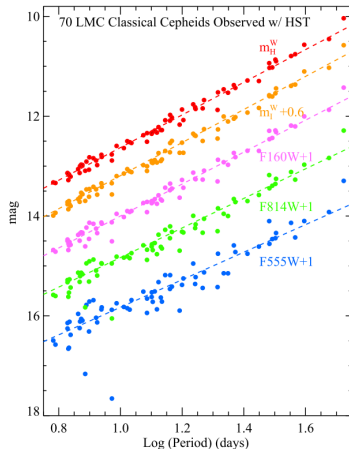


Mesure indirecte: $100h = 67.36 \pm 0.54 \text{ (0.8\%)} \text{ à } z \gtrsim 1100$ ¹

¹Planck Collaboration [2018]

Mesures

Sh0es (Riess *et al.*)

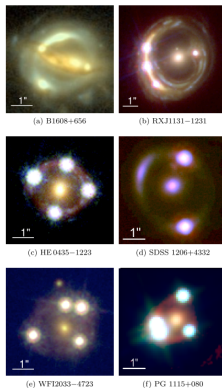


Mesure directe: $100h = 74.03 \pm 1.42 \text{ (1.9\%)} \quad \text{à } z \ll 1^2$

²Riess *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 $z_s \lesssim 2$.³

³Wong *et al.* [2020]

1 Contexte

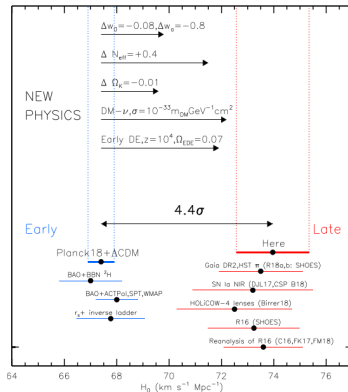
- Mesures
- Tension

2 Méthode

- Équation du délai temporel
- Théorie des lentilles gravitationnelles
- Modélisation de $\kappa(\boldsymbol{\theta})$

3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Reconstruction des paramètres de la lentille



⁴ 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)

⁴Riess et al. [2019]

1 Contexte

- Mesures
- Tension

2 Méthode

- Équation du délai temporel
- Théorie des lentilles gravitationnelles
- Modélisation de $\kappa(\theta)$

3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Reconstruction des paramètres de la lentille

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 Λ CDM plat.

1 Contexte

- Mesures
- Tension

2 Méthode

- Équation du délai temporel
- Théorie des lentilles gravitationnelles
- Modélisation de $\kappa(\theta)$

3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Reconstruction des paramètres de la lentille

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:

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

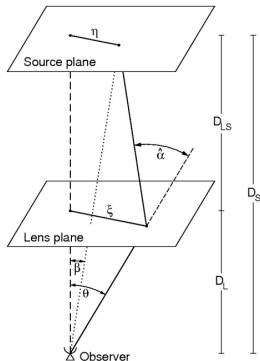
$$\psi(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathbb{R}^2} \kappa(\boldsymbol{\theta}') \ln(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}') d^2\boldsymbol{\theta}' \quad (4)$$

κ 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
- Modélisation de $\kappa(\boldsymbol{\theta})$

3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Reconstruction des paramètres de la lentille

On considère la famille de profil elliptique à puissance radial adoucie: ^{5,6,7}

$$\kappa(\theta_1, \theta_2) = \frac{3-\gamma}{2} \left(\frac{\theta_E}{\sqrt{\frac{\theta_1^2}{1-e} + \theta_2^2(1-e) + \theta_c^2}} \right)^{\gamma-1} \quad (8)$$

- θ_E : Rayon d'Einstein;
- e : Paramètre d'ellipticité;
- θ_c : Rayon de troncation du profile.

⁵Barkana [1998]

⁶Suyu et al. [2013]

⁷Keeton [2001]

1 Contexte

- Mesures
- Tension

2 Méthode

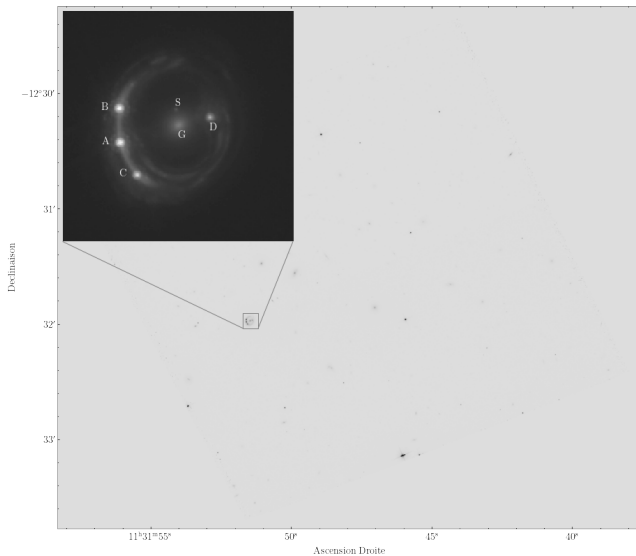
- Équation du délai temporel
- Théorie des lentilles gravitationnelles
- Modélisation de $\kappa(\boldsymbol{\theta})$

3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Reconstruction des paramètres de la lentille

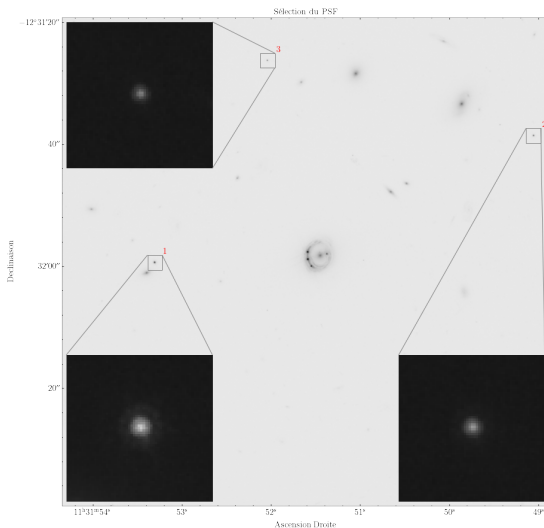
Prétraitement

HST ACS *F814w* (archive), Sluse et al. [2003]



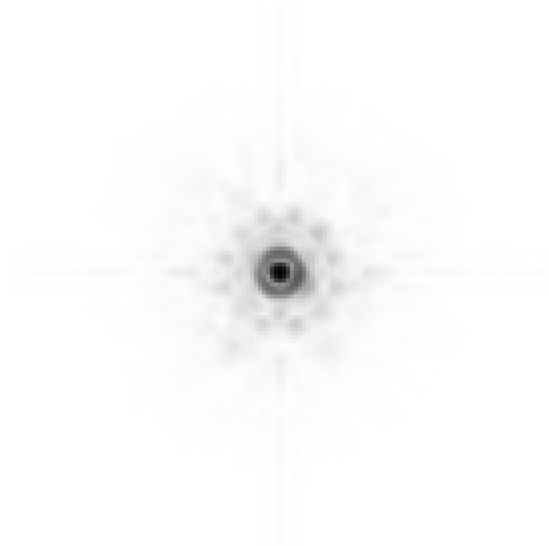
Prétraitement

PSF



Prétraitement

Alternative pour le PSF: Tiny Tim (Krist et al. [2011])



1 Contexte

- Mesures
- Tension

2 Méthode

- Équation du délai temporel
- Théorie des lentilles gravitationnelles
- Modélisation de $\kappa(\boldsymbol{\theta})$

3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Reconstruction des paramètres de la lentille

- R. Barkana. Fast Calculation of a Family of Elliptical Gravitational Lens Models. *The Astrophysical Journal*, 502(2):531–537, 1998. ISSN 0004-637X. doi: 10.1086/305950. URL www.sns.ias.edu/Dbarkana/ellip.html.
- 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).
- C. R. Keeton. A Catalog of Mass Models for Gravitational Lensing. 2001. URL <http://cfa-www.harvard.edu/castles>.<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0102341>.
- J. E. Krist, R. N. Hook, and F. Stoehr. 20 years of Hubble Space Telescope optical modeling using Tiny Tim. In *Optical Modeling and Performance Predictions V*, volume 8127, page 81270J, 2011. ISBN 9780819487377. doi: 10.1117/12.892762. URL <http://spiedl.org/terms>.

- 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% Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics beyond Λ 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.
- D. Sluse, J. Surdej, J.-F. Claeskens, D. Hutsemékers, C. Jean, F. Courbin, T. Nakos, M. Billeres, and S. V. Khmil. A quadruply imaged quasar with an optical Einstein ring candidate: 1RXS J113155.4–123155. *Astronomy & Astrophysics*, 406(2):L43–L46, aug 2003. ISSN 0004-6361. doi: 10.1051/0004-6361:20030904. URL <http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361:20030904>.
- S. H. Suyu, M. W. Auger, S. Hilbert, P. J. Marshall, M. Tewes, T. Treu, C. D. Fassnacht, L. V. E. Koopmans, D. Sluse, R. D. Blandford, F. Courbin, and G. Meylan. TWO ACCURATE TIME-DELAY DISTANCES FROM STRONG LENSING: IMPLICATIONS FOR COSMOLOGY. *The Astrophysical Journal*, 766:70, 2013. doi: 10.1088/0004-637X/766/2/70.

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 H_0 from lensed quasars: 5.3σ 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.