

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 Théorie

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

3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Inférence

4 Conclusion

1 Contexte

- Mesures
- Tension

2 Théorie

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

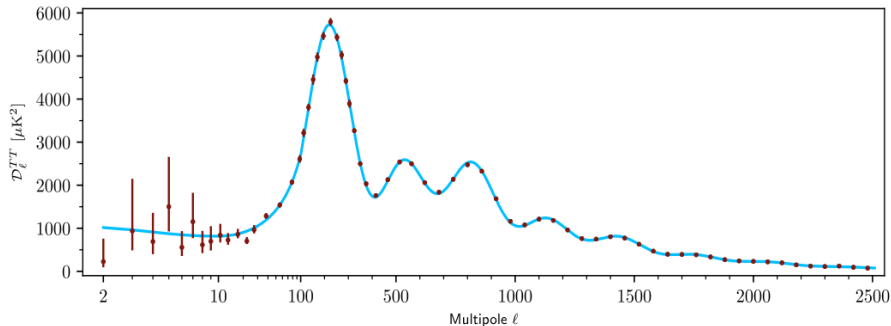
3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Inférence

4 Conclusion

Mesures

Planck (2018) + Λ CDM

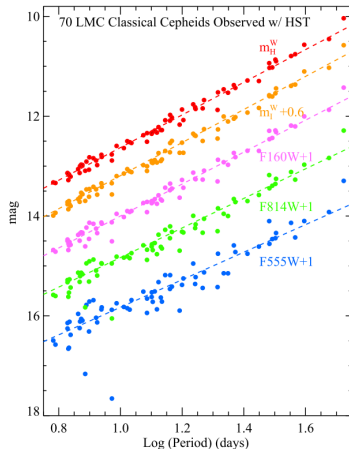


Mesure indirecte: $100h = 67.36 \pm 0.54 \text{ (0.8\%)} \text{ à } z \gtrsim 1100$ ¹

¹Planck Collaboration [2018]

Mesures

Sh0es (Riess *et al.*)

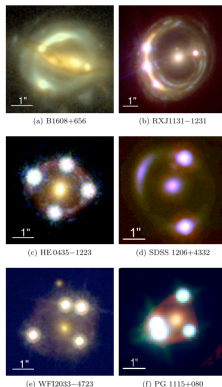


Mesure directe: $100h = 74.03 \pm 1.42 \text{ (1.9\%)} \quad \text{à } z \ll 1^2$

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

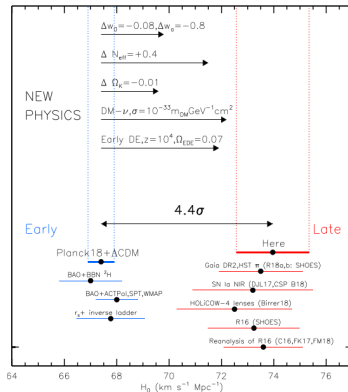
2 Théorie

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

3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Inférence

4 Conclusion



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 Théorie

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

3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Inférence

4 Conclusion

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 Théorie

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

3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Inférence

4 Conclusion

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:

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

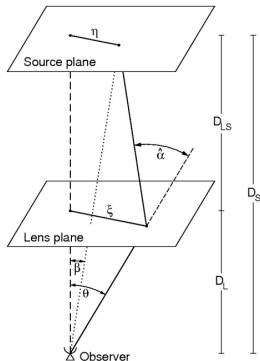
$$\psi(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathbb{R}^2} \kappa(\boldsymbol{\theta}') \ln(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}') d^2\boldsymbol{\theta}' \quad (4)$$

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 Théorie

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

3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Inférence

4 Conclusion

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

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 profil.
- γ : Pente logarithmique du profil (fixée à $\gamma = 2$; profil NIE).

⁵Barkana [1998]

⁶Suyu et al. [2013]

⁷Keeton [2001]

1 Contexte

- Mesures
- Tension

2 Théorie

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

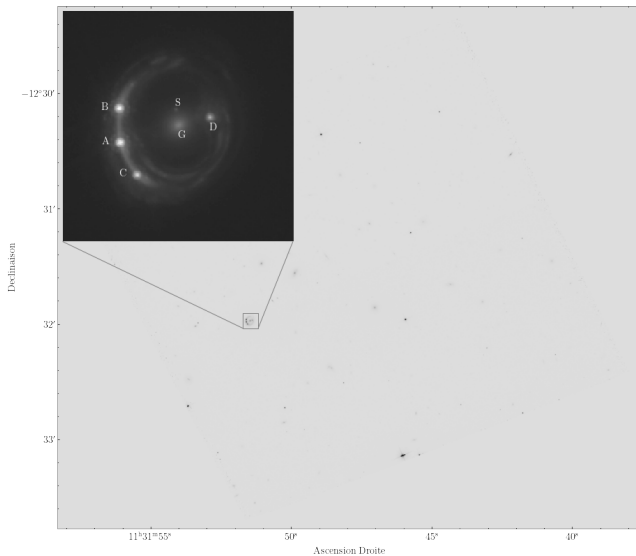
3 RXJ1131-1231

- Prétraitement
- Inférence

4 Conclusion

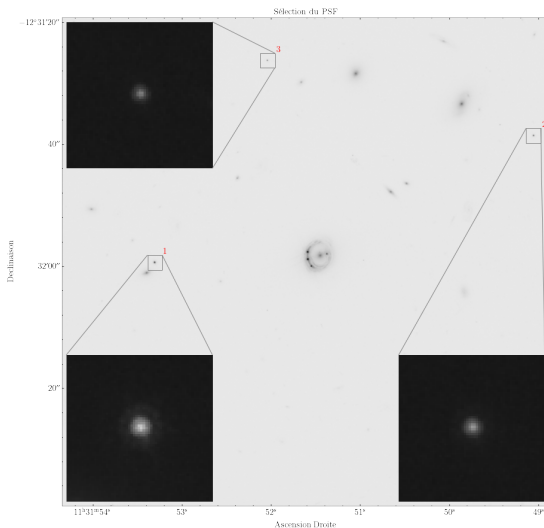
Prétraitement

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



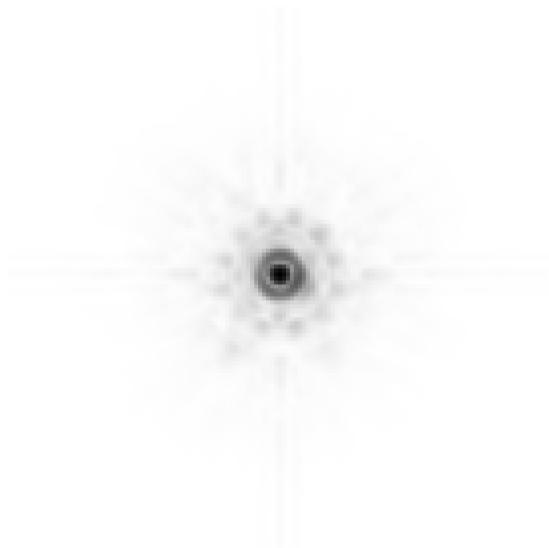
Prétraitement

PSF



Prétraitement

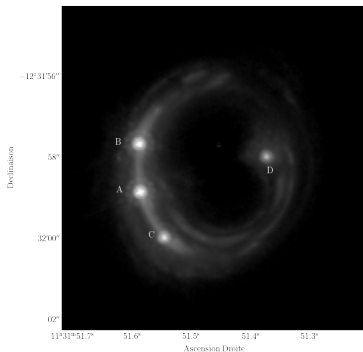
Alternative pour le PSF: Tiny Tim (Krist et al. [2011])



Prétraitement

Décomposition de la lumière

On ajuste un profil de Vaucouleur (profile de Sérsic⁸ avec $n = 4$) sur la galaxie G et on modélise S par le PSF avec Ga1Fit⁹. Finalement, on soustrait le ciel noir pour obtenir l'image résiduelle:



⁸Sérsic [1963]

⁹Peng et al. [2002]

- 1 Contexte
 - Mesures
 - Tension
- 2 Théorie
 - Équation du délai temporel
 - Théorie des lentilles gravitationnelles
 - Modélisation de $\kappa(\boldsymbol{\theta})$
- 3 RXJ1131-1231
 - Prétraitement
 - Inférence
- 4 Conclusion

On cherche la solution qui maximise la distribution postérieur. Le *likelihood* des données de lentilles est:

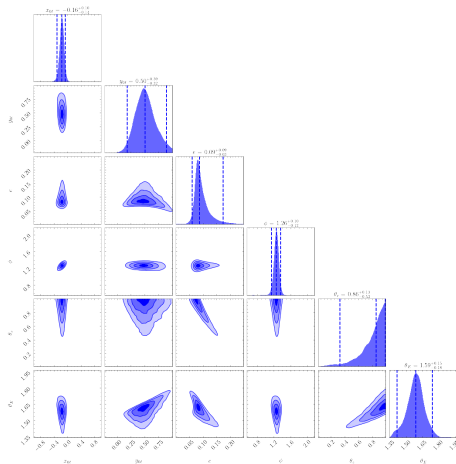
$$\log P(\underbrace{\mathbf{d}_{\text{ACS}}}_{\mathcal{D}} \mid \underbrace{\theta_E, e, \theta_c, \boldsymbol{\eta}, \mathbf{s}}_{\mathcal{M}}) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_d} \frac{(d_{\text{ACS},i} - d_{\mathcal{M},i})^2}{\sigma_i^2} \quad (9)$$
$$- \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 \frac{(\beta_i - \beta_j)^2}{(d\theta)^2} + C$$

- ① Premier terme: résiduel sur la structure étendue de la source;
- ② Deuxième terme: source ponctuelle pour les images de l'AGN.

On ne considère que le second terme pour la suite. Premier terme rend l'inférence difficile. Suyu et al. [2013] adoptent une inversion régularisée non-paramétrique pour ce terme.

Inférence

Dynamic Nested Sampling^{10,11}



¹⁰Skilling [2006]

¹¹Higson et al. [2017]

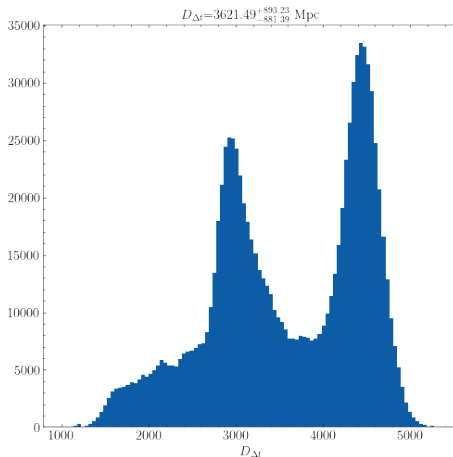
On combine l'analyse de la lentille avec le *likelihood* du délai temporel

$$\log P(\Delta \mathbf{t} \mid D_{\Delta t}, \mathcal{M}) = -\frac{1}{2} \sum_i \left(\frac{\Delta t_i - \Delta t(D_{\Delta t}, \mathcal{M})_i}{\sigma_{\Delta t}} \right)^2 \quad (10)$$
$$+ \log P(\mathbf{d}_{ACS} \mid \mathcal{M}) + C$$

On modélise la distribution postérieur par avec MCMC et une distribution *prior* uniforme. Nos chaînes sont générés à partir de la distribution postérieur des paramètres de lentilles.

Inférence

Distribution postérieure marginale



Résultat préliminaire en assumant Λ CDM plat $100h = 71^{+22}_{-14}$.

Travail à faire pour réduire l'incertitude!

- Modéliser le *cisaillage* (shear) extrinsèque γ_{ext} ;
- Modéliser la convergence extrinsèque κ_{ext} ;
- Contraindre le modèle avec \mathbf{d}_{ACS} ;
- Modéliser l'extinction avec une deuxième couleur;
- Résoudre la dégénérescence entre $D_{\Delta t}$ et κ_{ext} .

- 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).
- E. Higson, W. Handley, M. Hobson, and A. Lasenby. Dynamic nested sampling: An improved algorithm for parameter estimation and evidence calculation. Technical report, 2017. URL <https://github.com/joshspeagle/dynesty>.
- 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>.
- C. Y. Peng, L. C. Ho, C. D. Impey, and H.-W. Rix. Detailed Structural Decomposition of Galaxy Images. *The Astronomical Journal*, 124(1): 266–293, jul 2002. ISSN 00046256. doi: 10.1086/340952. URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/340952><https://iopscience.iop.org/article/10.1086/340952/meta>.
- 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 σ 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>.
- J. L. Sérsic. Influence of the atmospheric and instrumental dispersion on the brightness distribution in a galaxy. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 6:41–43, Feb. 1963.

- I. I. Shapiro. Fourth test of general relativity. *Physical Review Letters*, 13 (26):789–791, 1964. ISSN 00319007. doi: 10.1103/PhysRevLett.13.789.
- J. Skilling. Nested sampling for general Bayesian computation. *Bayesian Analysis*, 1(4):833–860, dec 2006. ISSN 19360975. doi: 10.1214/06-BA127. URL <http://projecteuclid.org/euclid.ba/1340370944>.
- 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.