

PHY 6669 - Cosmologie Moderne

Mesure de H_0 avec délais temporels d'un quasar quadruplement lentillé

Charles Wilson, Alexandre Adam

Université
de Montréal

9 mars 2021

Table des matières

1 Mise en contexte

- 1.1 Deux classes de mesures de H_0
- 1.2 Tensions dans les mesures de H_0

2 Cosmographie par délais temporels

- 2.1 Motivations de la méthode
- 2.2 Lentilles gravitationnelles
- 2.3 Théorie
- 2.4 Deux ingrédients vers H_0

3 RX J1131-1231

- 3.1 Système à l'étude
- 3.2 Courbes de lumière

4 Méthodologie

- 4.1 *Curve-shifting* : deux algorithmes
- 4.2 Spline à noeuds libres
- 4.3 Processus gaussien

5 Travail à venir

6 Bibliographie

Mise en contexte

Deux classes de mesures de H_0

- Mesures *early-universe* (indirectes)
 - dépendantes de plusieurs paramètres de Λ CDM à $z > 1000$, généralement obtenus par les données du FDC¹.
- Mesures *late-universe* (~directes)
 - méthodes empiriques indépendantes de modèles astrophysiques, e.g. échelle de distance cosmique par la relation distance-redshift de SNIa et céphéides variables².
 - méthodes dépendantes de modèles, e.g. par mesure des délais temporels entre images d'objets fortement lentillés³.

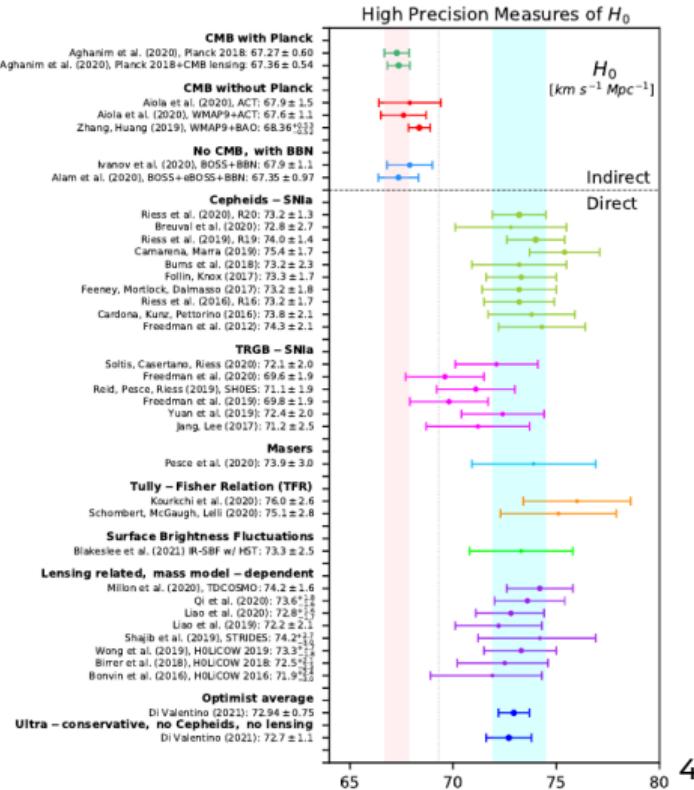
1. PLANCK COLLABORATION et al. 2020

2. SHOES COLLABORATION et al. 2021

3. HOLICOW COLLABORATION, WONG et al. 2020

Mise en contexte

Tensions dans les mesures de H_0



4

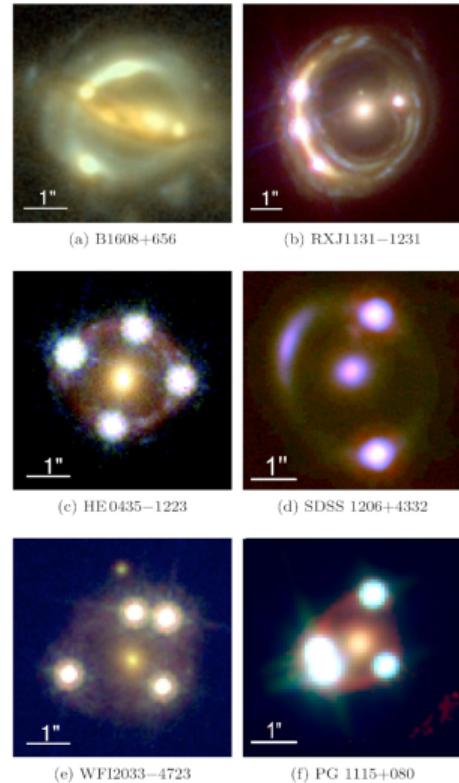
Désaccords de 4σ à 6σ entre les mesures de H_0 directes et indirectes, persistants entre des dizaines d'expériences différentes.

Cette tension pourrait indiquer un échec de Λ CDM aux époques jeunes ou tardives de l'univers.

Cosmographie par délais temporels

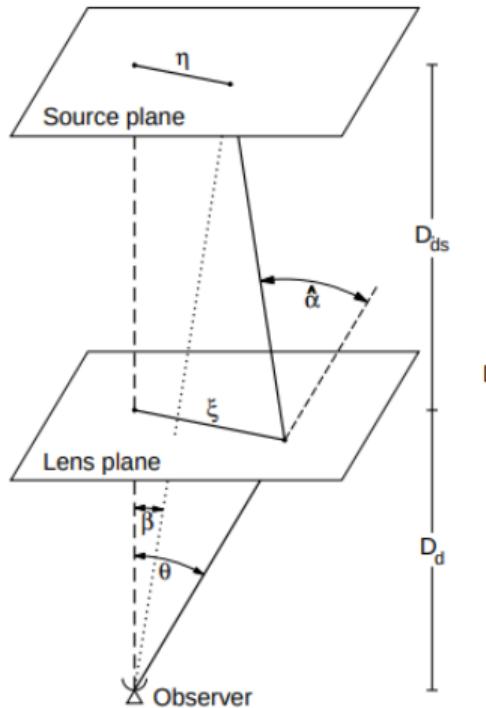
Motivations de la méthode

- Méthode à la fois indépendante des observations du FDC ainsi que des *standard candles* de l'échelle de distance cosmique - méthode compétitive de mesurer H_0 .
- Ne s'appuie donc pas sur la classification de supernovae, est indépendante des effets du médium intergalactique.
- Mesures de magnitudes relatives sont requises plutôt que magnitudes absolues



Cosmographie par délais temporels

Lentilles gravitationnelles



Distances de diamètre angulaire :

- D_d : observateur à lentille
- D_s : observateur à source
- D_{ds} : lentille à source

Vecteurs angulaires :

- θ : position des images, plan de la lentille
- β : position de la source, plan de la source

Cosmographie par délais temporels

Théorie

Délai temporel entre l'arrivée de photons de deux images distinctes dans un système lentillé :

$$\Delta t_{ij} = \frac{D_{\Delta t}}{c} \left[\frac{(\theta_i - \beta)^2}{2} - \frac{(\theta_j - \beta)^2}{2} - \psi(\theta_i) + \psi(\theta_j) \right] \quad (1)$$

où $\psi(\theta)$ est le potentiel de la lentille, projeté dans son plan.

On définit la quantité

$$D_{\Delta t} \equiv (1 + z_d) \frac{D_d D_s}{D_{ds}} \quad (2)$$

qui permet l'inférence d'une mesure de H_0 en supposant une cosmologie et d'après $D_{\Delta t} \propto H_0^{-1}$

Cosmographie par délais temporels

Deux ingrédients vers H_0

- $\psi(\theta)$: reconstruction du potentiel de la lentille par optimisation d'un modèle afin de pouvoir l'évaluer aux positions des images
- Δt_{ij} : mesures précises des délais temporels entre des paires d'images à partir des données de campagnes d'observation du système de longues durées, avec des méthodes de régression et d'optimisation

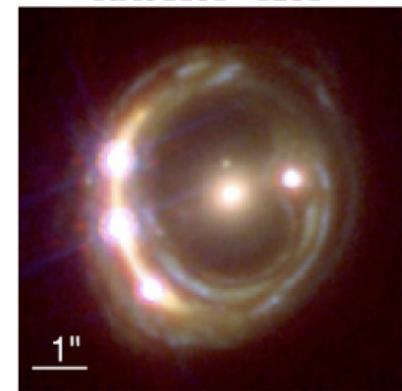
Spécifications :

- Quasar quadruplement lentillé par une galaxie elliptique géante
- $z_d = 0.295$, $z_{QSO} = 0.658$
- Anneau d'Einstein entier résolu par HST

Données COSMOGRAIL⁷ :

- 9 ans de photométrie (2004-2012) à haute cadence (moy. 2.9 d)
- 3 télescopes (Euler, SMARTS, Mercator) prenant de l'imagerie en bande R

RXJ1131-1231



8

FIGURE – Image du système lentillé RX J1131-1231, compositions de 3 bandes d'imagerie du HST dans l'optique et proche-infrarouge

7. TEWES, COURBIN, MEYLAN et al. 2013

8. HOLICOW COLLABORATION, SUYU et al. 2017

RX J1131-1231

Courbes de lumière I

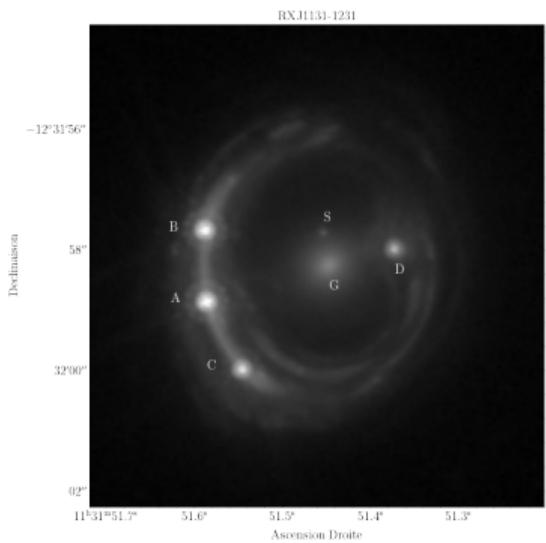
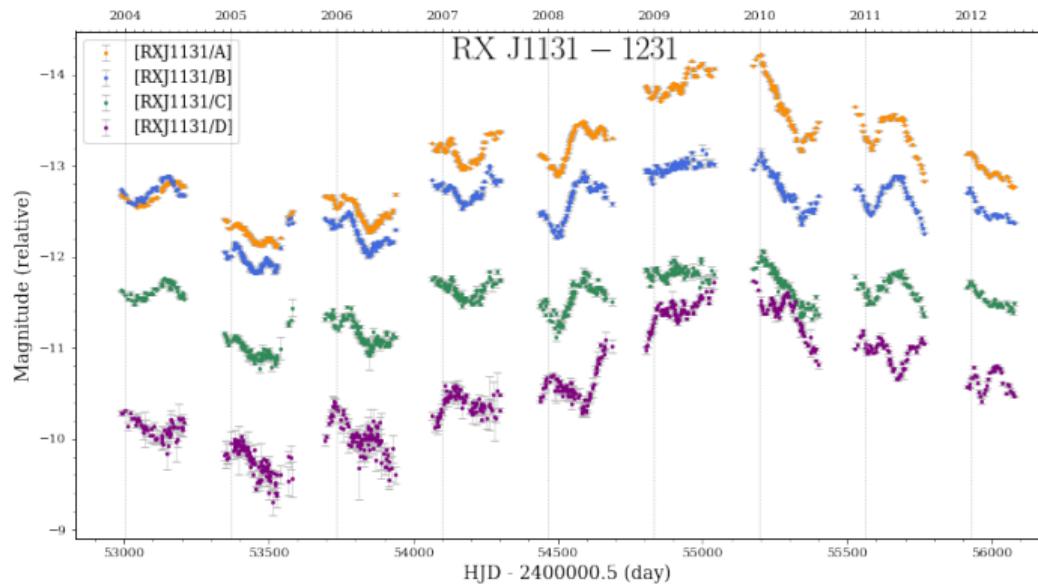


FIGURE – Image du système lentillé RX J1131-1231, compositions de 3 bandes d'imagerie du HST dans l'optique et proche-infrarouge

RX J1131-1231

Courbes de lumière II

Deux types de signatures lumineuses à noter dans les courbes de lumières :

- Variabilité intrinsèque : fluctuations de luminosité du quasar lentillé qui sont détectées à différents moments entre les images dû au phénomène de délai temporel
- Variabilité extrinsèque, ou microlentillage : vacillement indépendant des images provoqué par le passage d'étoiles ou de structures dans la galaxie lentille

Le microlentillage est nuisible à la mesure de délais temporels précis, peut rendre l'analyse impossible s'il a lieu sur des échelles temporelles équivalentes ou plus courte que celles de variabilité intrinsèque.

Pas le cas de RX J1131-1231!

Objectif : obtenir les délais temporels qui *shift* les quatre courbes de lumières afin qu'elles soient alignées, tout en prenant compte du microlentillage.

Méthodologie

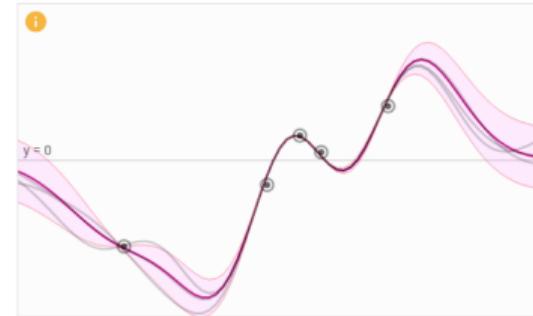
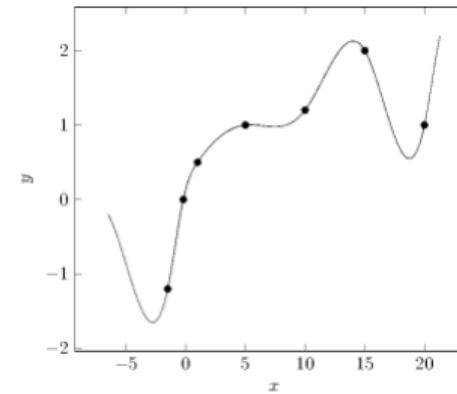
Curve-shifting : deux algorithmes

Splines à noeuds libres

- Composition de polynômes de 3e degré
- Connectés aux noeuds, dont positions sont variées lors de l'optimisation

Processus Gaussien

- Processus stochastique, points sont variables aléatoires distribuées normalement
- Distribution jointe est gaussienne multivariée
- Observations contraintent covariance de cette distribution



Méthodologie

Splines à noeuds libres

Un seul spline de variabilité intrinsèque va être ajusté aux séquences temporelles, qui seront *time-shifted* afin d'être alignées et que le χ^2 soit minimisé pour chaque courbes de lumière et le spline simultanément.

Splines de microlentillage peuvent être associées à des lightcurves individuelles, sont également optimisées.

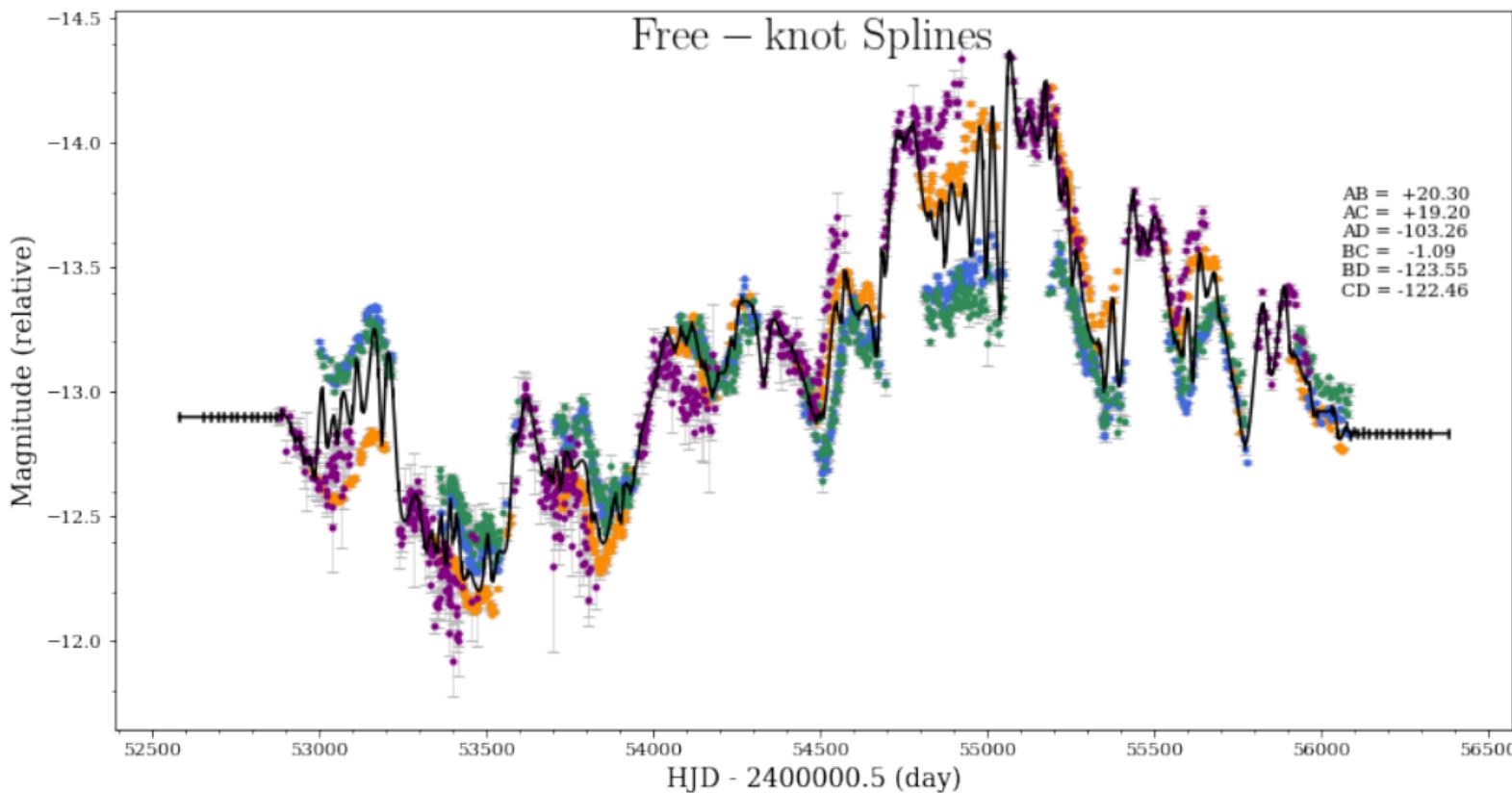
Procédure d'optimisation : recherche itérative du minimum global de

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \frac{[m_{ij} - s(t_{ij} + \tau_i) - \mu_i(t_{ij})]^2}{\sigma_{ij}^2} \quad (3)$$

- n : nombre de courbes de lumière
- $(t_{ij}, m_{ij} \pm \sigma_{ij})$: données photométriques des N_i points des courbes
- τ_i : *time-shifts*
- s, μ_i : spline intrinsèque et splines extrinsèques

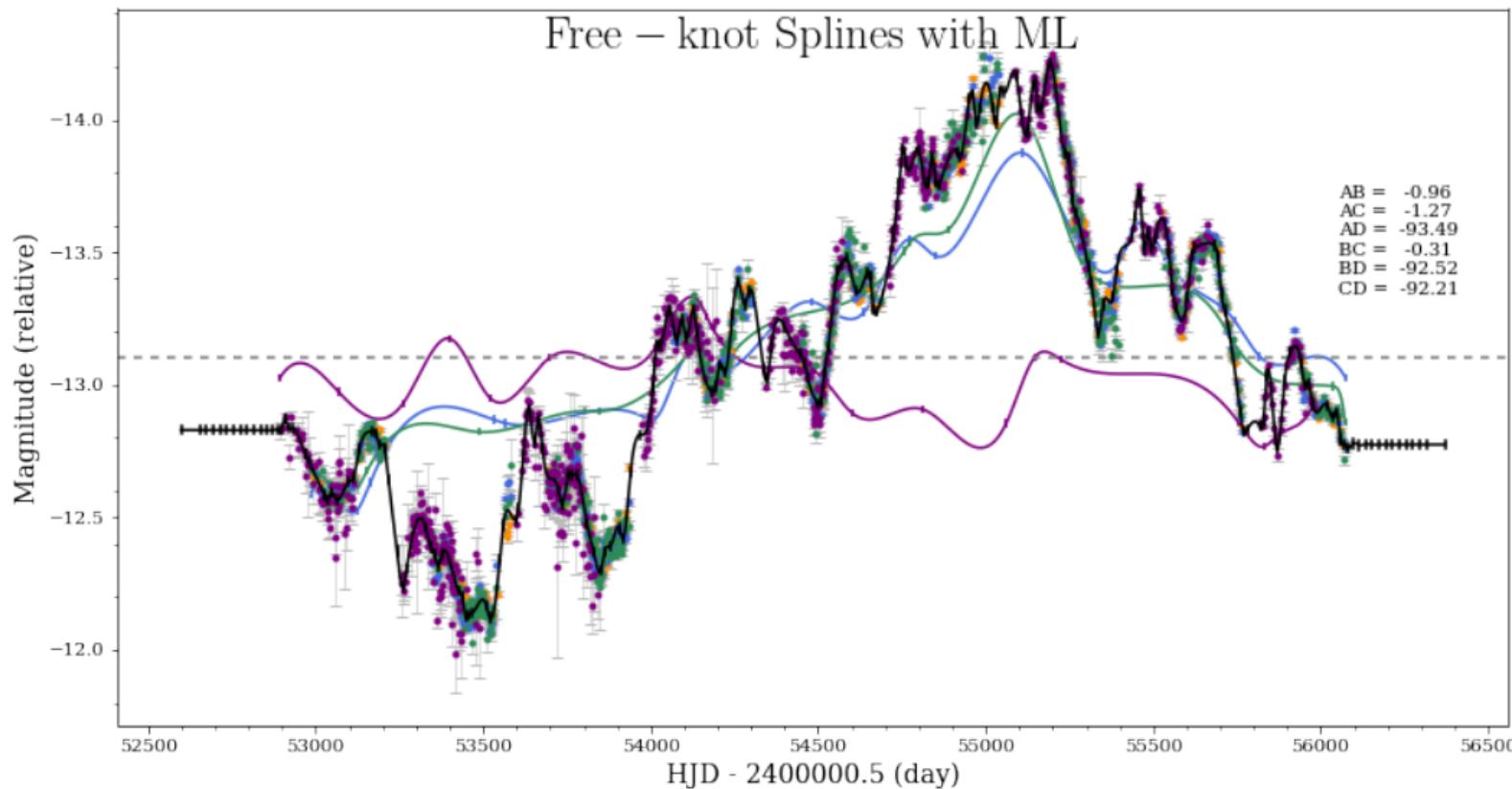
Méthodologie

Splines à noeuds libres - sans microlentillage



Méthodologie

Splines à noeuds libres - avec microlentillage



Concepts :

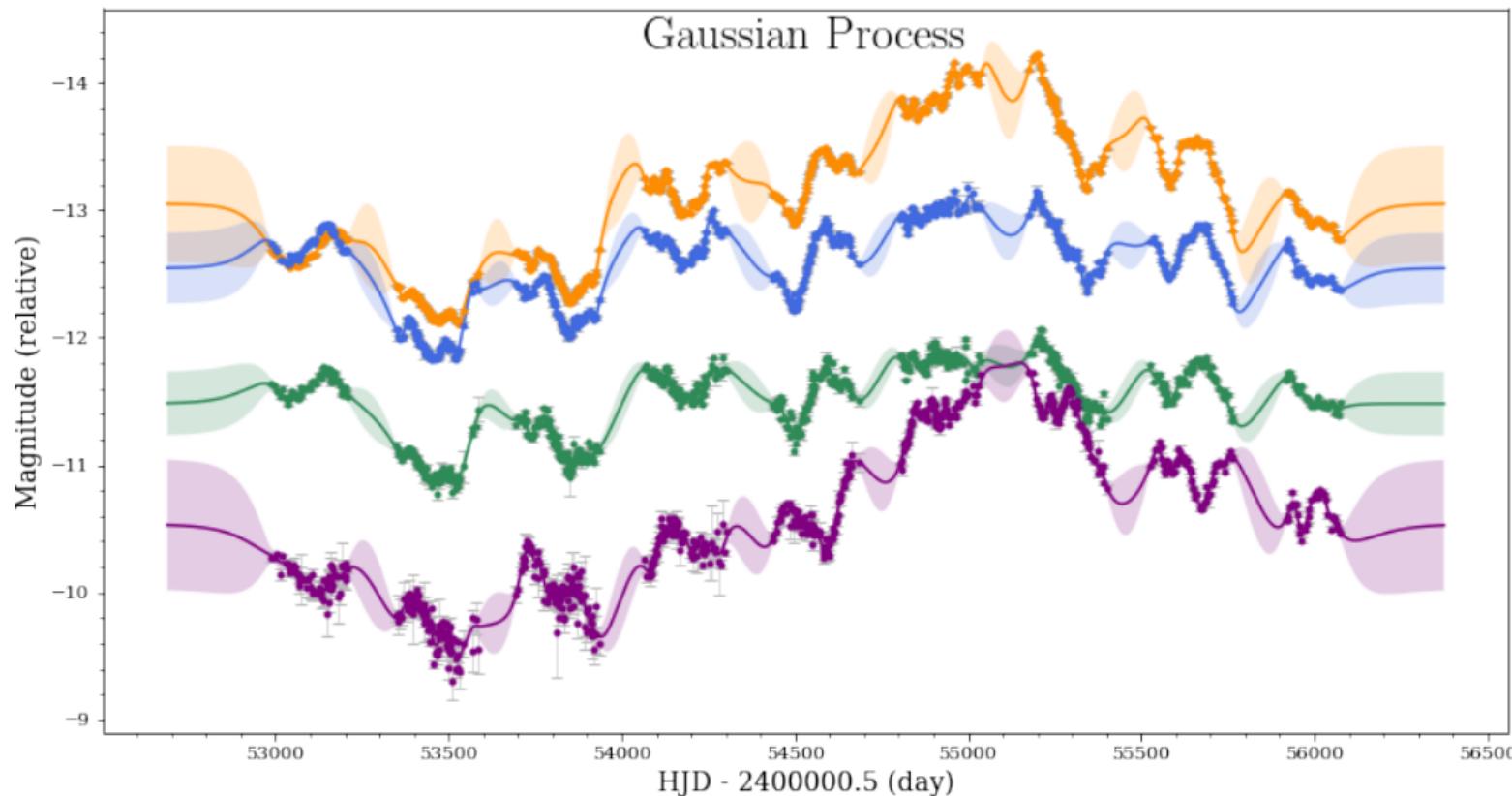
- Points tests X : uniformément distribués (à fréquence variable) le long de l'intervalle temporel entier
- Points d'entraînement Y : données photométriques
- *Kernel* : permet d'obtenir la matrice de covariance qui déterminera les caractéristiques de la régression

Distribution jointe $P_{X,Y}$ obtenue par évaluation du kernel choisi sur chaque paires de points, avec une prior pour la moyenne correspondant à la moyenne des données d'une courbe de lumière (lc) : $P_{X,Y} \sim N(\mu_{lc}, \Sigma)$.

On conditionne sur les données afin d'obtenir $P_{X|Y}$, contraignant la courbe à passer par ces points. Des échantillons aléatoires sont alors tirés de cette distribution, pour obtenir une régression moyenne et une déviation standard à chaque point.

Méthodologie

Processus Gaussien - Régression



Méthodologie

Processus Gaussien - Optimisation de la différence de régressions

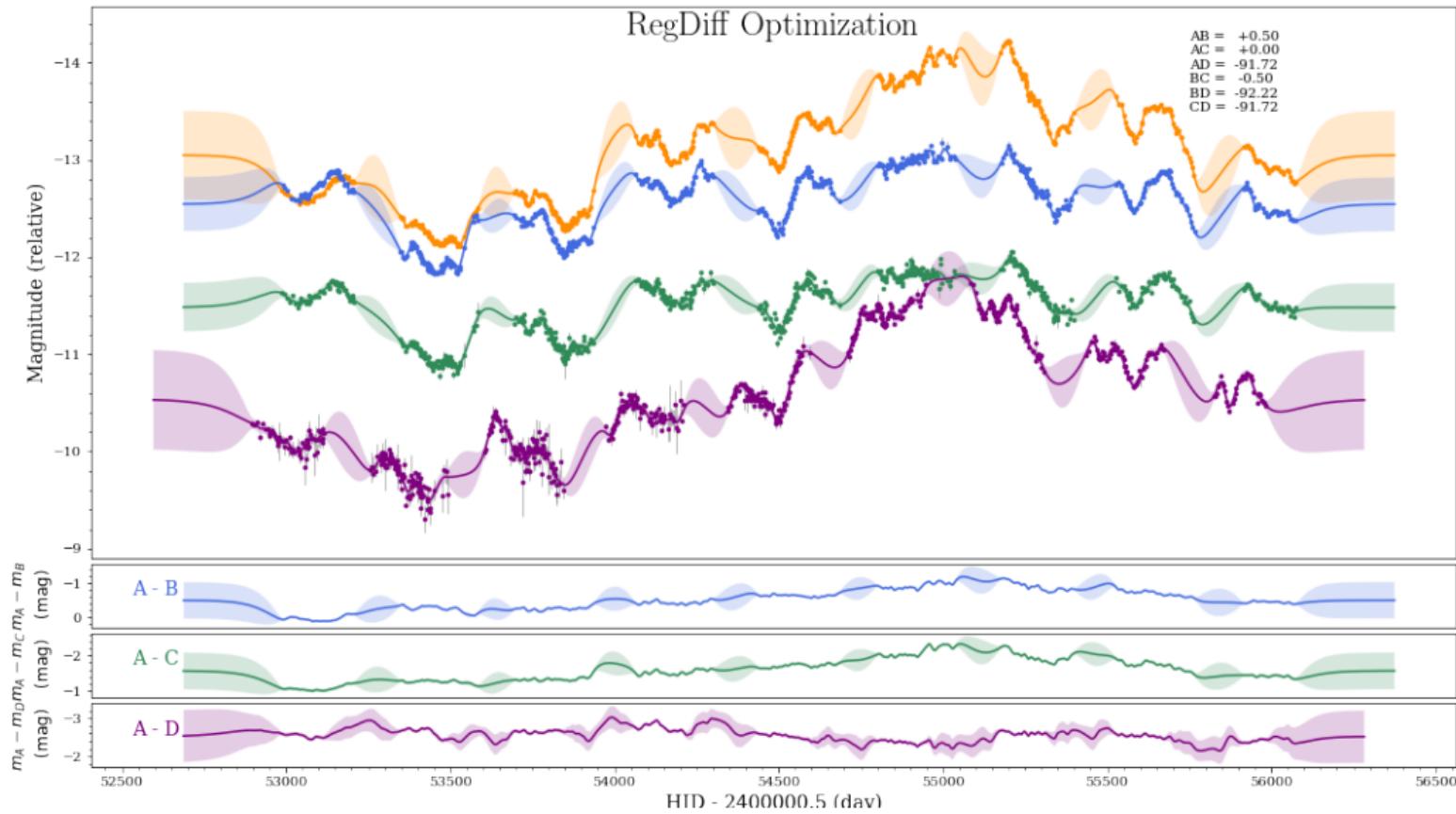
Cette méthode ne comporte pas de représentation directe du microlentillage, mais permet quand même d'obtenir des Δt_{ij} précis.

Courbes de régression interpolées par processus Gaussien sont soustraîtes, permettant d'obtenir des courbes résiduelles.

Procédure d'optimisation : courbes sont *shift* de sorte que tout signal de variation intrinsèque soit absent des résiduelles, par une minimisation de leur variabilité. Représentée par la *weighted average variation* (WAV), qui pondère les dérivées premières à chaque t_j .

Méthodologie

Processus Gaussien - Optimisation de la différence de régressions



Travail à venir

Les analyses précédentes ont été faites grâce au package PyCS3¹⁰.

Étapes à suivre :

- Estimations des incertitudes sur les résultats des deux méthodes avec une population de courbes synthétiques issues d'un modèle génératif
- Inférence jointe des contraintes sur $D_{\Delta t}$ et H_0 par l'estimation du *posterior PDF* des paramètres du modèle, à partir des *likelihoods* des délais temporels ainsi que de la modélisation de lentille

Bibliographie I

- M. BARTELmann et P. SCHNEIDER (jan. 2001). "Weak gravitational lensing". In : 340.4-5, p. 291-472. DOI : 10.1016/S0370-1573(00)00082-X. arXiv : astro-ph/9912508 [astro-ph].
- Eleonora Di VALENTINO et al. (mar. 2021). "In the Realm of the Hubble tension – a Review of Solutions". In : *arXiv e-prints*, arXiv :2103.01183, arXiv :2103.01183. arXiv : 2103.01183 [astro-ph.CO].
- Jochen GÖRTLER, Rebecca KEHLBECK et Oliver DEUSSEN (2019). "A Visual Exploration of Gaussian Processes". In : *Distill*.
<https://distill.pub/2019/visual-exploration-gaussian-processes>. DOI : 10.23915/distill.00017.
- HOLICOW COLLABORATION, Sherry H. Suyu et al. (juil. 2017). "HOLICOW - I. H_0 Lenses in COSMOGRAIL's Wellspring : program overview". In : 468.3, p. 2590-2604. DOI : 10.1093/mnras/stx483. arXiv : 1607.00017 [astro-ph.CO].

Bibliographie II

- H0LiCOW COLLABORATION, Kenneth WONG et al. (oct. 2020). "H0LiCOW – XIII. A 2.4 per cent measurement of H_0 from lensed quasars : 5.3σ tension between early- and late-Universe probes". In : 498.1, p. 1420-1439. DOI : 10.1093/mnras/stz3094. arXiv : 1907.04869 [astro-ph.CO].
- PLANCK COLLABORATION et al. (sept. 2020). "Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters". In : 641, A6, A6. DOI : 10.1051/0004-6361/201833910. arXiv : 1807.06209 [astro-ph.CO].
- S. REFSDAL (jan. 1964a). "On the possibility of determining Hubble's parameter and the masses of galaxies from the gravitational lens effect". In : 128, p. 307. DOI : 10.1093/mnras/128.4.307.
- (jan. 1964b). "The gravitational lens effect". In : 128, p. 295. DOI : 10.1093/mnras/128.4.295.
- SHOES COLLABORATION et al. (fév. 2021). "Cosmic Distances Calibrated to 1% Precision with Gaia EDR3 Parallaxes and Hubble Space Telescope Photometry of 75 Milky Way Cepheids Confirm Tension with Λ CDM". In : 908.1, L6, p. L6. DOI : 10.3847/2041-8213/abdbaf. arXiv : 2012.08534 [astro-ph.CO].

Bibliographie III

- Irwin I. SHAPIRO (déc. 1964). "Fourth Test of General Relativity". In : 13.26, p. 789-791. DOI : 10.1103/PhysRevLett.13.789.
- M. TEWES, F. COURBIN et G. MEYLAN (mai 2013). "COSMOGRAIL : the COSmological MOnitoring of GRAVitational Lenses. XI. Techniques for time delay measurement in presence of microlensing". In : 553, A120, A120. DOI : 10.1051/0004-6361/201220123. arXiv : 1208.5598 [astro-ph.CO].
- M. TEWES, F. COURBIN, G. MEYLAN et al. (août 2013). "COSMOGRAIL : the COSmological MOnitoring of GRAVitational Lenses. XIII. Time delays and 9-yr optical monitoring of the lensed quasar RX J1131-1231". In : 556, A22, A22. DOI : 10.1051/0004-6361/201220352. arXiv : 1208.6009 [astro-ph.CO].