

Cosmologie avec des amas de galaxies avec l'expérience NIKA2

Masse hydrostatique et biais hydrostatique

Miren Muñoz Echeverría

Sous la direction de Juan Francisco Macías Pérez
dans l'équipe COSMO-ML

Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie
Séminaire doctorant.es, 21 mars 2022

Plan

- Cosmologie avec des amas de galaxies
- Reconstruction de la pression avec NIKA2
- Masse hydrostatique
- Biais de la masse hydrostatique
- Conclusions et perspectives

Cosmologie avec des amas de galaxies

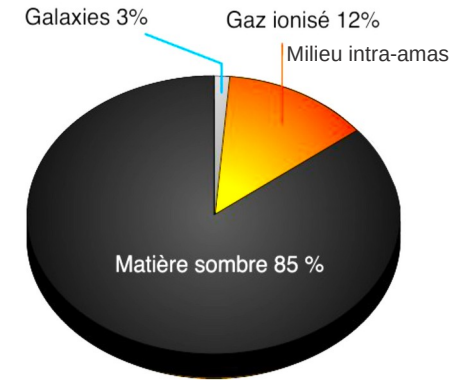
Cosmologie avec des amas de galaxies

Amas de galaxies :

Plus grands objets gravitationnellement liés de l'univers
Créés par effondrement gravitationnel dans les pics de densité de matière

Masse $\sim 10^{13} - 10^{16} M_{\odot}$

Température $\geq 10^7$ K (~ 1 keV)



[Borgani & Luzzo 2001]

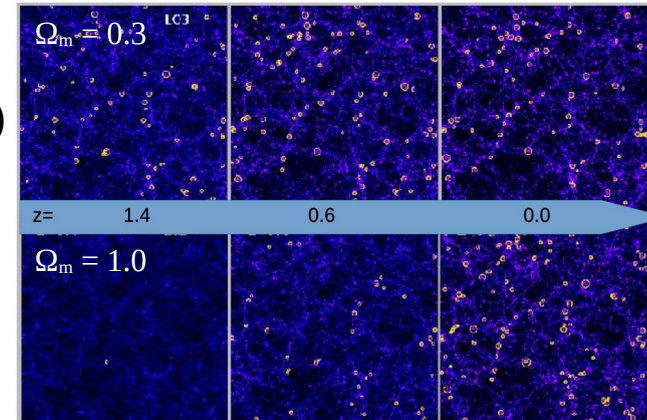
Des amas de galaxies comme **sondes cosmologiques** :

- comptage d'amas par intervalle de **masse** et **décalage vers le rouge (redshift)**

$$\frac{d^2 N}{dM dz} \propto \int d\Omega \frac{d^2 V_c}{d\Omega dz} \frac{dn}{dM}$$

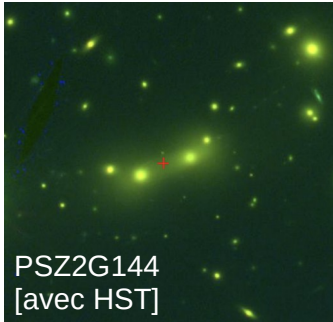
Dépend de l'évolution de l'univers et du taux de formation des structures

Point clé : estimer la **masse** et le redshift des amas



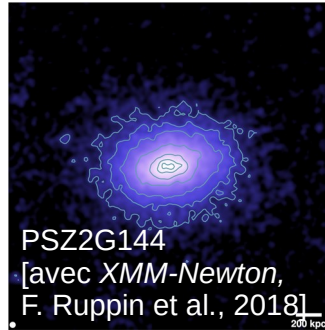
Observables et masses des amas de galaxies

Optique / Infrarouge :
Lumière des étoiles dans
les galaxies



→ Différentes estimations de **masse**

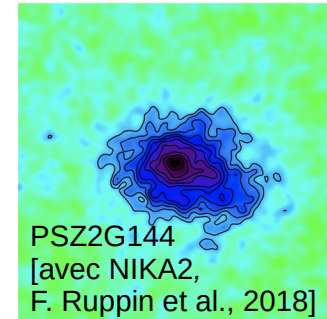
Rayons X :
émission en X du gaz du
milieu intra-amas



- Température, T_e
- Densité électronique, n_e

→ Estimation de la **masse hydrostatique**

Millimétrique :
effet Sunyaev-Zel'dovich (SZ)
des électrons du milieu intra-amas



→ Pression thermique du milieu
intra-amas, P_e

$$M_{\text{HSE}}(< r) = -\frac{1}{\mu m_p G} \frac{r^2}{n_e(r)} \frac{dP_e(r)}{dr}$$

Différentes estimations de la **masse**, différents effets systématiques
Combiner des observables pour gagner en **précision**

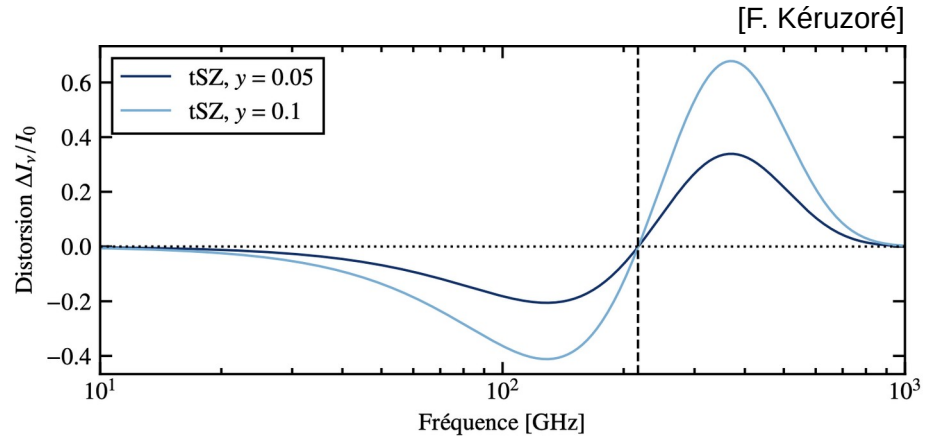
L'effet Sunyaev-Zel'dovich (SZ)

L'effet Sunyaev Zel'dovich thermique (tSZ) : distorsion du Fond Diffus Cosmologique (CMB) par l'énergie thermique du milieu intra-amas

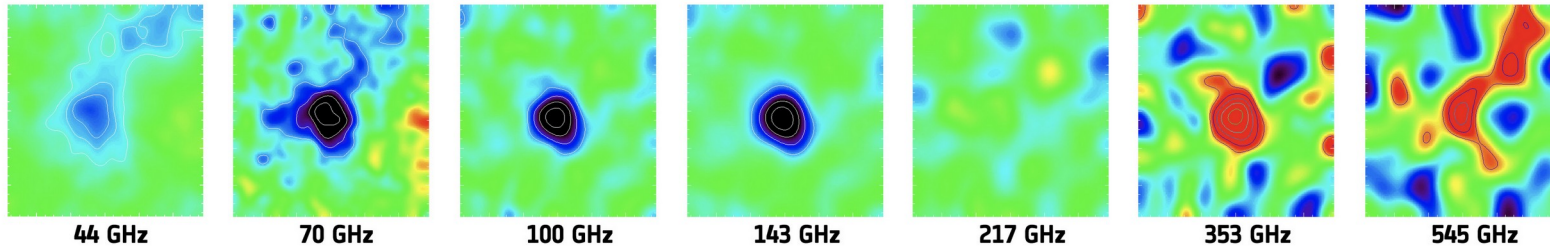
Variation relative de l'intensité du CMB :

$$\left[\frac{\Delta I}{I_0} \right]_{\text{SZ}} = y f(\nu, T_e)$$

L'amplitude de l'effet tSZ:
$$y = \frac{\sigma_T}{m_e c^2} \int P_e dl$$



Abel 2319 [Planck]



Cosmologie avec des amas de galaxies en SZ

Relation d'échelle :
observable - masse

$$\frac{d^2 N}{dM dz}(\xi > \xi_{\text{cat}}) = \int d\Omega \int d\mathcal{O} \int_{\xi_{\text{cat}}}^{\infty} d\xi \times \boxed{S(\xi|\mathcal{O})} \times \boxed{RE(\mathcal{O}|M)} \times \boxed{\frac{d^2 V_c}{d\Omega dz} \frac{dn}{dM}}$$

Fonction de sélection :

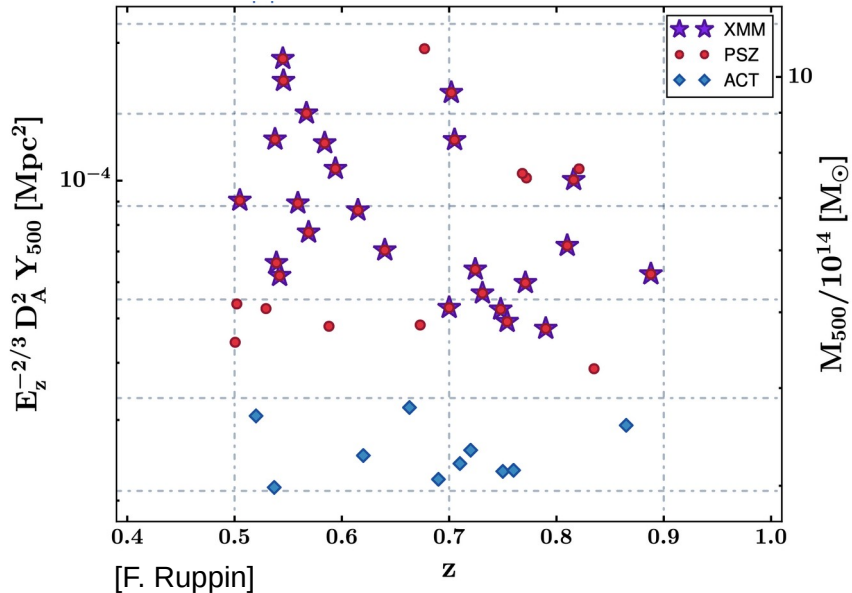
Dépend de la capacité
de l'instrument à
détecter un observable

Dépend de l'évolution de
l'univers et du taux de
formation des structures

Besoin d'une relation d'échelle observable SZ - masse hydrostatique, $RE(Y | M^{HSE})$ très bien connue

Le Large Programme SZ de NIKA2

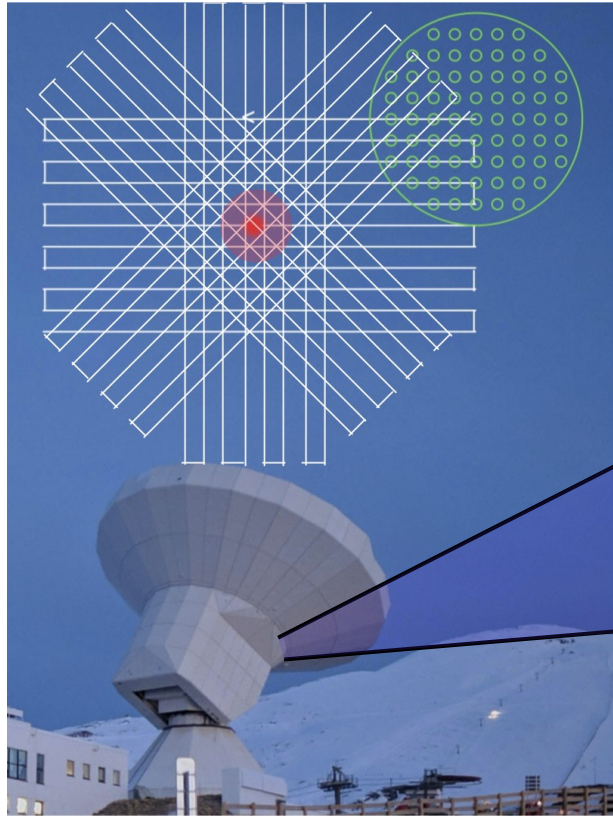
Étude de 45 amas à haute résolution et haute sensibilité



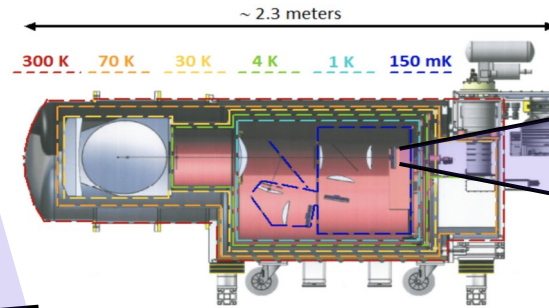
Caractérisation précise de la **relation d'échelle SZ – masse hydrostatique** :

- **Effets systématiques** qui affectent le signal **SZ** ?
Contaminants, morphologies complexes, chocs
- Estimation **précise** des **masses hydrostatiques**

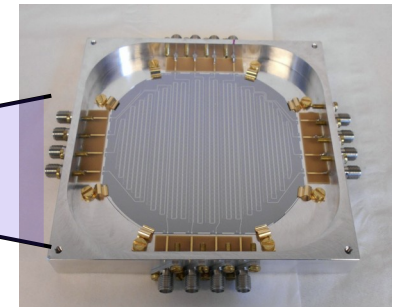
Reconstruction de la pression avec NIKA2



Caméra bi-bande millimétrique de détecteurs à inductance cinétique (KIDs)
Au télescope de 30 m à Pico Veleta (Grenade)



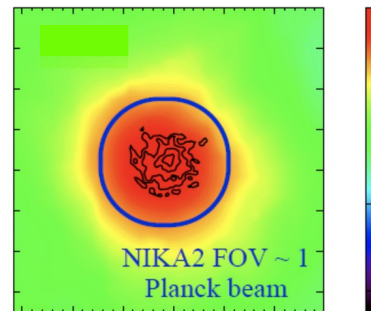
NIKA2



Une matrice de KIDs

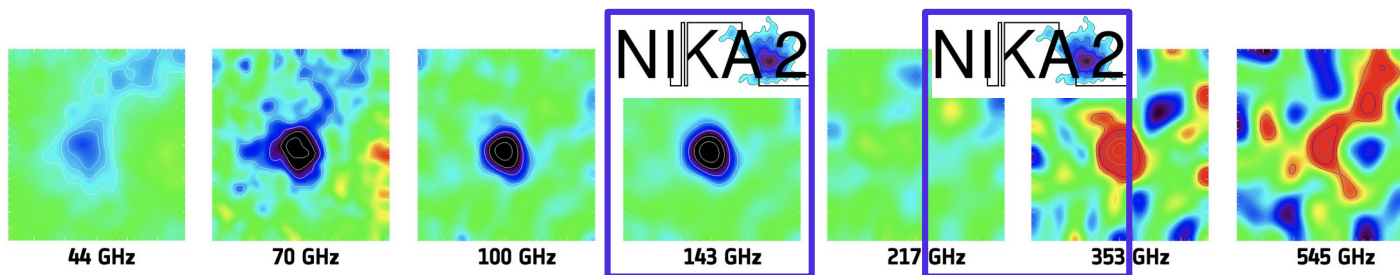
Adaptée au signal de l'effet SZ des amas :

	Résolution angulaire	Champ de vue	Sensibilité
260 GHz	11,2''	6,5'	$30 \pm 3 \text{ mJy.s}^{1/2}$
150 GHz	17,7''	6,5'	$9 \pm 1 \text{ mJy.s}^{1/2}$

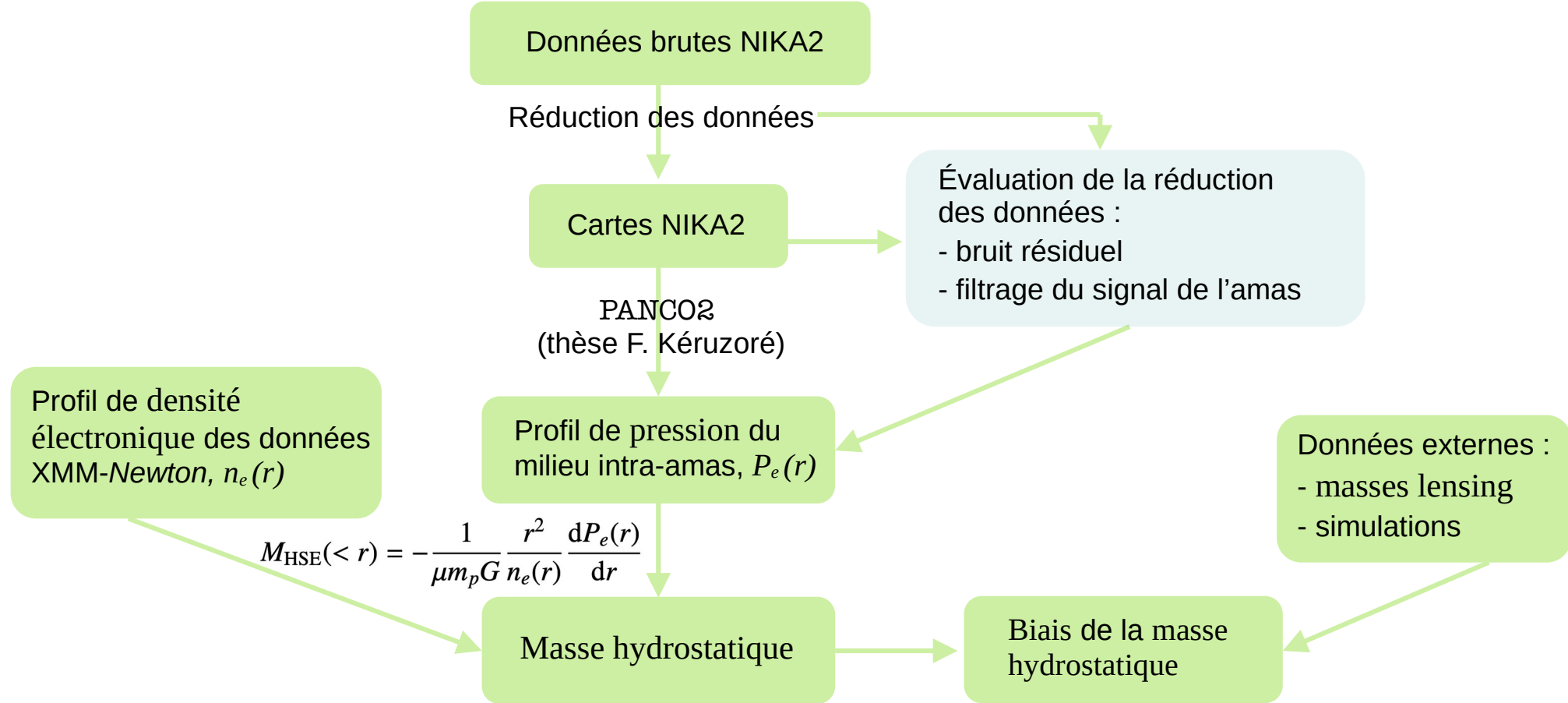


- Haute résolution angulaire : cartographie des amas
- Champ de vue : l'intégralité de l'amas
- Haute sensibilité : signal faible des amas

- Bandes de fréquences : adaptées au signal SZ



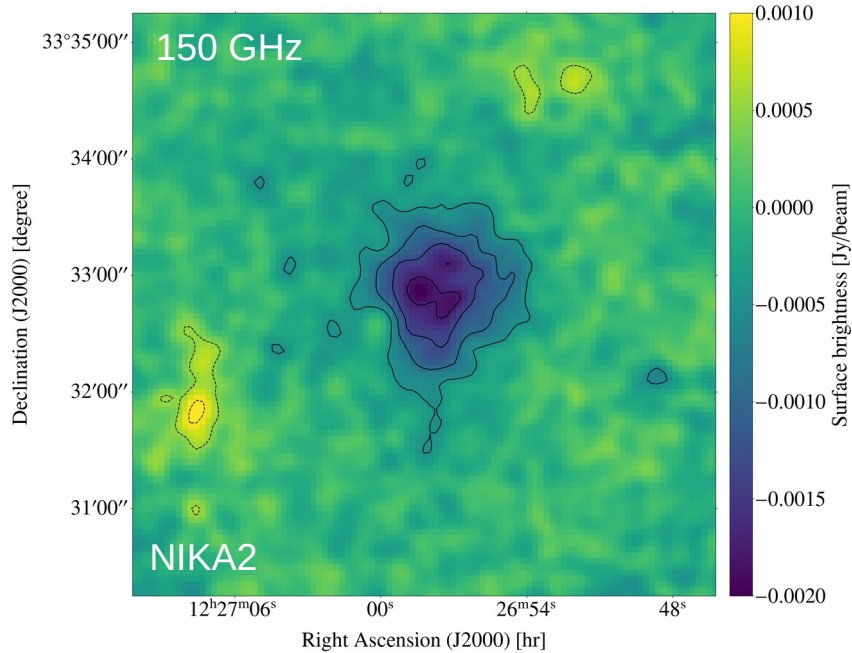
L'analyse des données dans le LPSZ



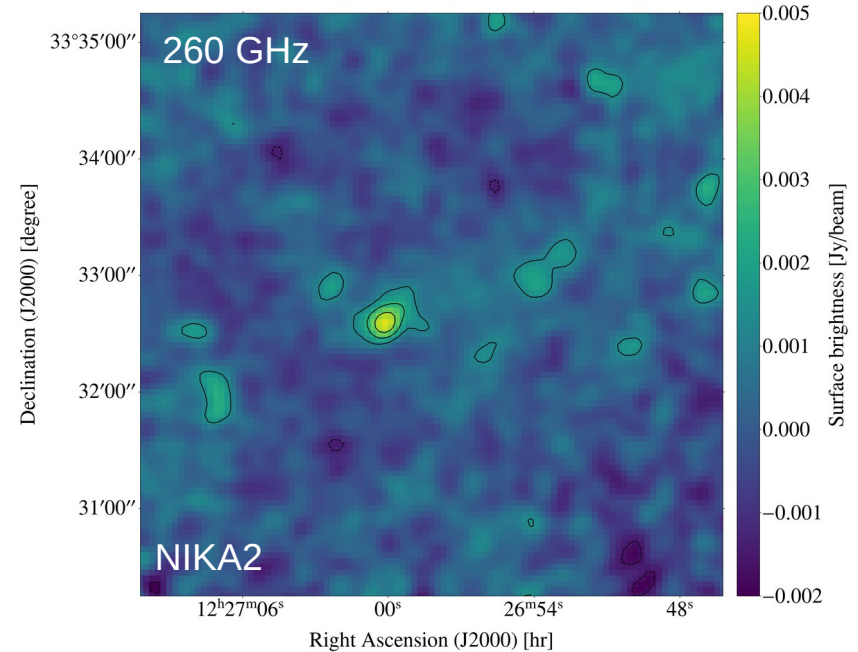
L'amas CL J1226.9+3332

L'amas le plus lointain du Large Programme SZ de NIKA2, $z = 0.89$
Masse hydrostatique $\sim 5 - 8 \times 10^{14} M_{\odot}$

Le signal tSZ négatif de l'amas et signal positif des contaminants



Le signal positif des contaminants



Cartes de 5', avec filtrage Gaussien (FWHM = 10"). Contours multiples de 3σ .

[Muñoz-Echeverría et al., arXiv:2111.01685]

Filtrage du signal de l'amas dû au traitement de données

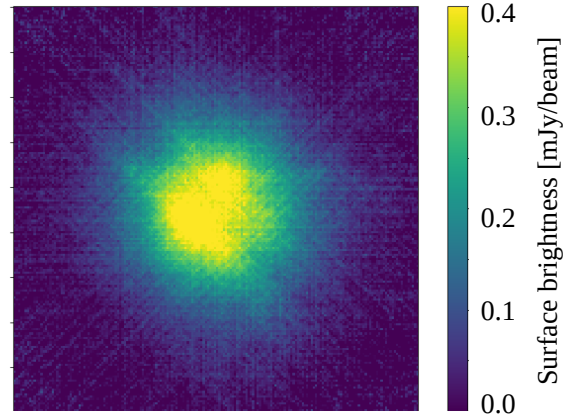
Évalué sur des simulations :

Map_{in} : carte simulée d'amas

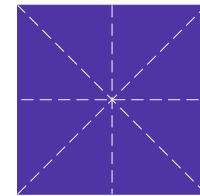
Map_{out} : carte après traitement de données

Filtrage du signal de l'amas dans l'espace réel :

Vrai filtrage : $Map_{in} - Map_{out}$



Le filtrage est plus important dans la direction des scans

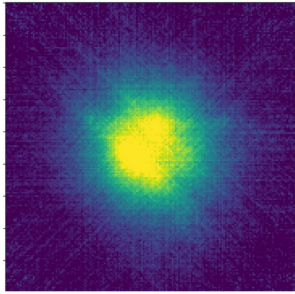


Filtrage du signal de l'amas dû au traitement de données

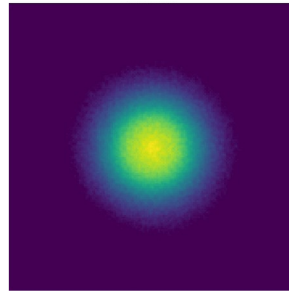
TF , Fonction de transfert = filtrage dans l'espace de Fourier :

$$\hat{M\hat{a}p}_{out}(\vec{k}) = TF(\vec{k}) \times \hat{M\hat{a}p}_{in}(\vec{k})$$

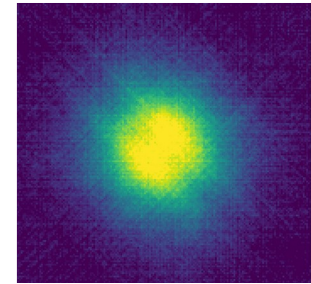
Vrai filtrage :
 $M\hat{a}p_{in} - M\hat{a}p_{out}$



Approche classique :
Filtrage avec 1D TF

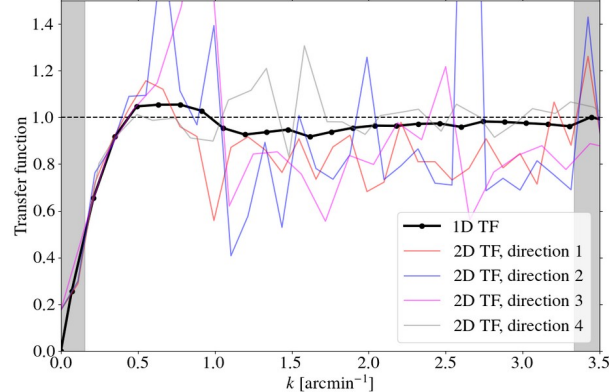


Nouvelle approche :
Filtrage avec 2D TF

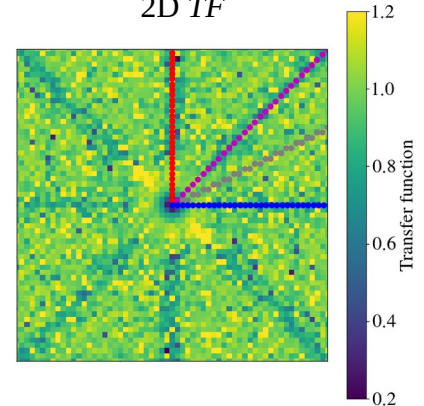


Vraie
 TF ?

1D TF , assumant un filtrage isotrope



2D TF



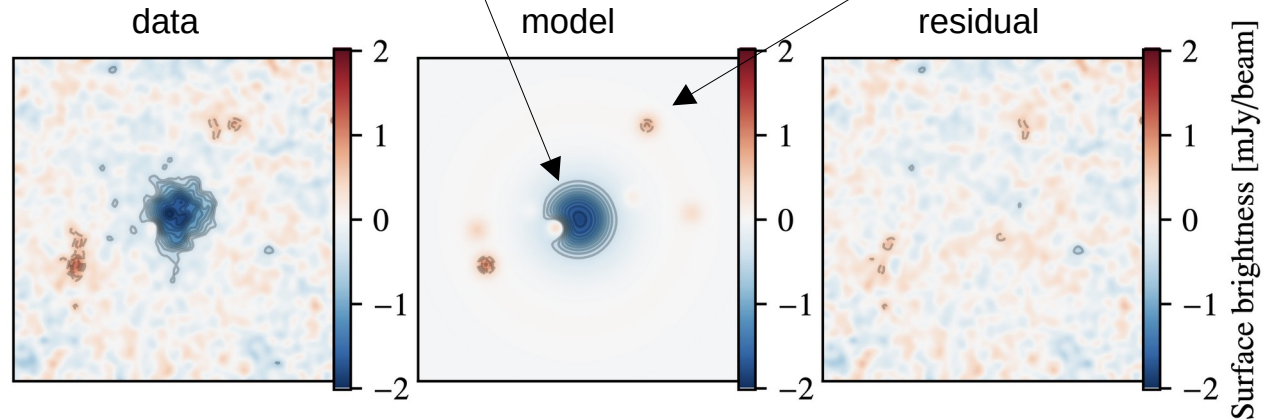
L'amas CL J1226.9+3332 : reconstruction de la pression

Ajustement d'un modèle à la carte 150 GHz de NIKA2 avec PANCOS [F. Kéruzoré]

$$\text{MODEL}_{150\text{GHz}}^{(x,y)} = C_{150\text{GHz}}^{(x,y)} \left(\frac{\sigma_T}{m_e c^2} \int P_e dl \right)_{\text{cluster}} + \sum_{\text{Sources}} \mathfrak{g}_{2D}(F_{150\text{GHz}}, 17,7'') + \text{Zero}$$

signal tSZ modèle de pression
Contribution des sources positives

Filtrage instrumental et du traitement des données (fonction de transfert, TF)



- Modèle de pression en loi de puissance : sans *a priori* $P_e(r_i < r < r_{i+1}) = P_i \left(\frac{r}{r_i} \right)^{-\alpha_i}$

L'amas CL J1226.9+3332 : reconstruction de la pression

Ajustement d'un modèle à la carte 150 GHz de NIKA2 avec PANC02 [F. Kéruzoré]

$$\text{MODEL}_{150\text{GHz}}^{(x,y)} = C_{150\text{GHz}}^{(x,y)} \left(\frac{\sigma_T}{m_e c^2} \int P_e dl \right)_{\text{cluster}} + \sum_{\text{Sources}} \mathfrak{g}_{2D}(F_{150\text{GHz}}, 17,7'') + \text{Zero}$$

signal tSZ modèle de pression
Contribution des sources positives

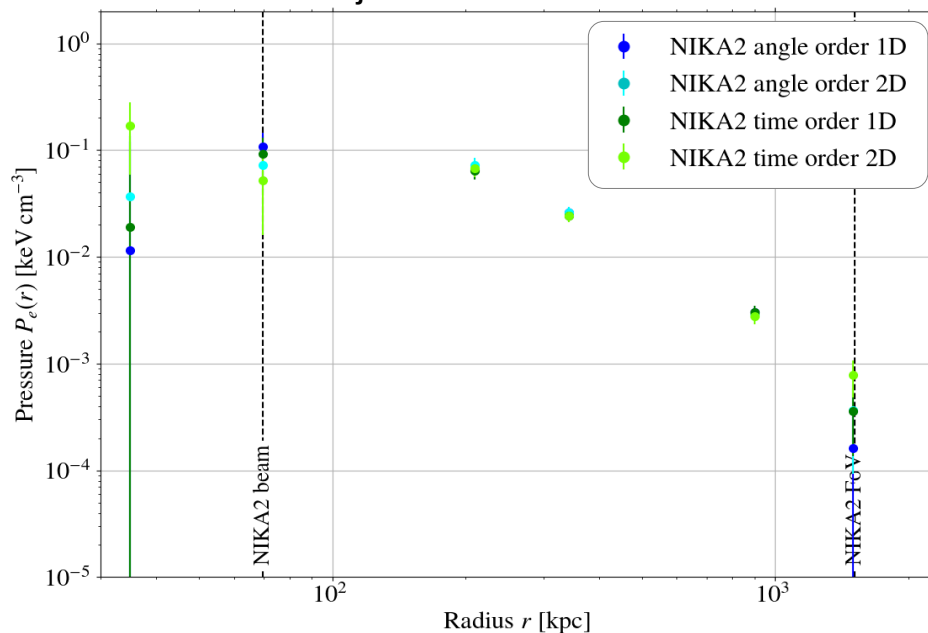
Filtrage instrumental et du traitement des données (fonction de transfert, TF)

- Modèle de pression en loi de puissance :

$$P_e(r_i < r < r_{i+1}) = P_i \left(\frac{r}{r_i} \right)^{-\alpha_i}$$

- Le filtrage isotrope (1D) et anisotrope (2D) donnent des résultats compatibles

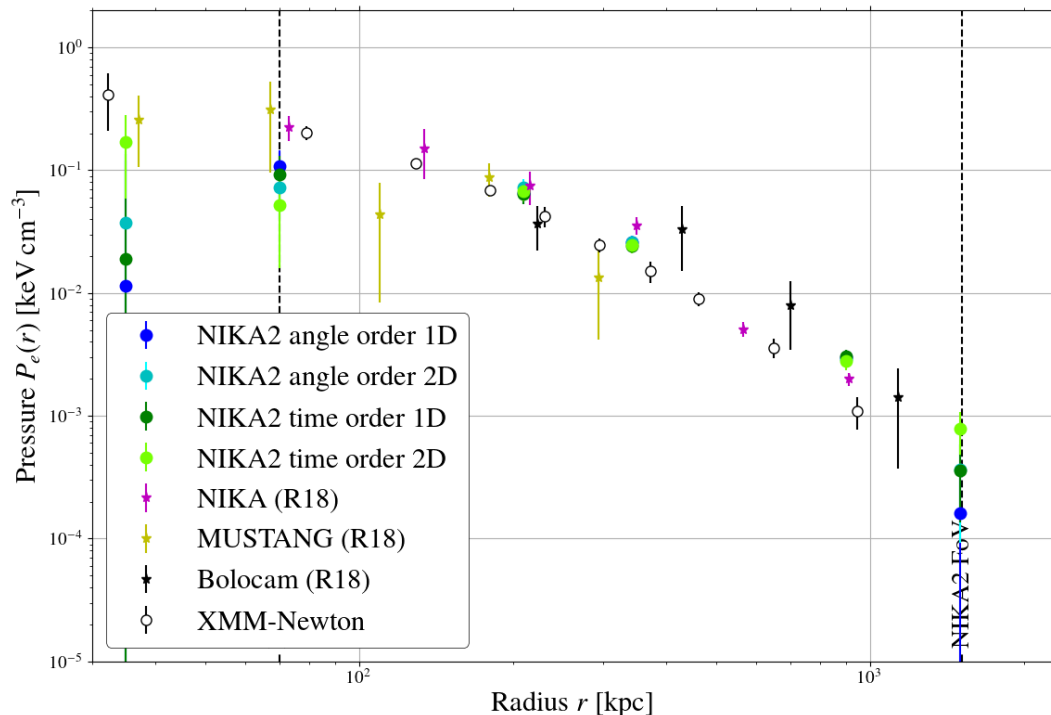
Résultats de l'ajustement



L'amas CL J1226.9+3332 : reconstruction de la pression

Ajustement d'un modèle à la carte 150 GHz de NIKA2 avec PANCO2 [F. Kéruzoré]

Résultats de l'ajustement + autres résultats



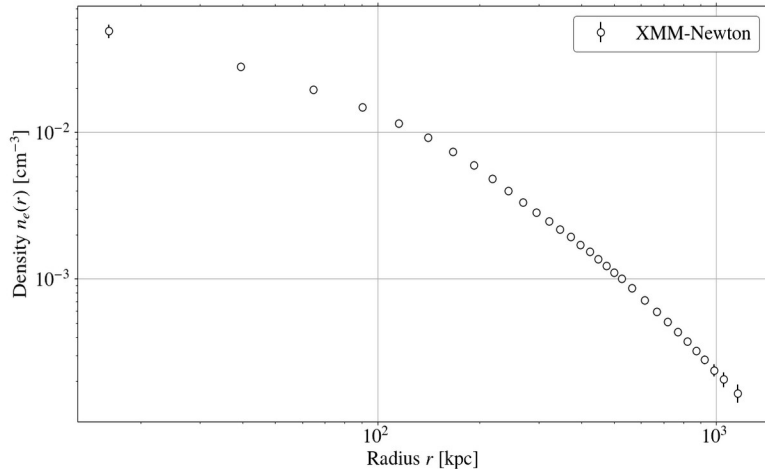
Cohérence dans les résultats : on utilisera tous les résultats SZ pour une meilleure précision

Masse hydrostatique

Masse hydrostatique d'un amas sphérique

$$M_{\text{HSE}}(< r) = -\frac{1}{\mu m_p G} \frac{r^2}{n_e(r)} \frac{dP_e(r)}{dr}$$

Densité électronique à partir des rayons X



Pression à partir du SZ :

$$y = \frac{\sigma_T}{m_e c^2} \int P_e dl$$



ou des rayons X :

$$P_e \propto n_e T_e$$

XMM-Newton



De la pression à la masse hydrostatique

Approche classique

- À partir d'un profil de **pression** continu (gNFW)

$$P_e(r) = \frac{P_0}{\left(\frac{r}{r_p}\right)^c \left(1 + \left(\frac{r}{r_p}\right)^a\right)^{(b-c)/a}}$$

paramètres à ajuster : P_0, r_p, a, b, c

- Profil de masse hydrostatique :

$$M_{\text{HSE}}(< r) = -\frac{1}{\mu m_p G} \frac{r^2}{n_e(r)} \frac{dP_e(r)}{dr}$$

Nouvelle approche

- Inversant l'équation d'équilibre hydrostatique

$$P(r_b) - P(r_a) = \int_{r_a}^{r_b} \frac{dP(r)}{dr} dr = \int_{r_a}^{r_b} -\mu m_p G n_e(r) \frac{M_{\text{HSE}}(< r)}{r^2} dr$$

- À partir d'un profil de **densité** de matière, ρ (NFW) :

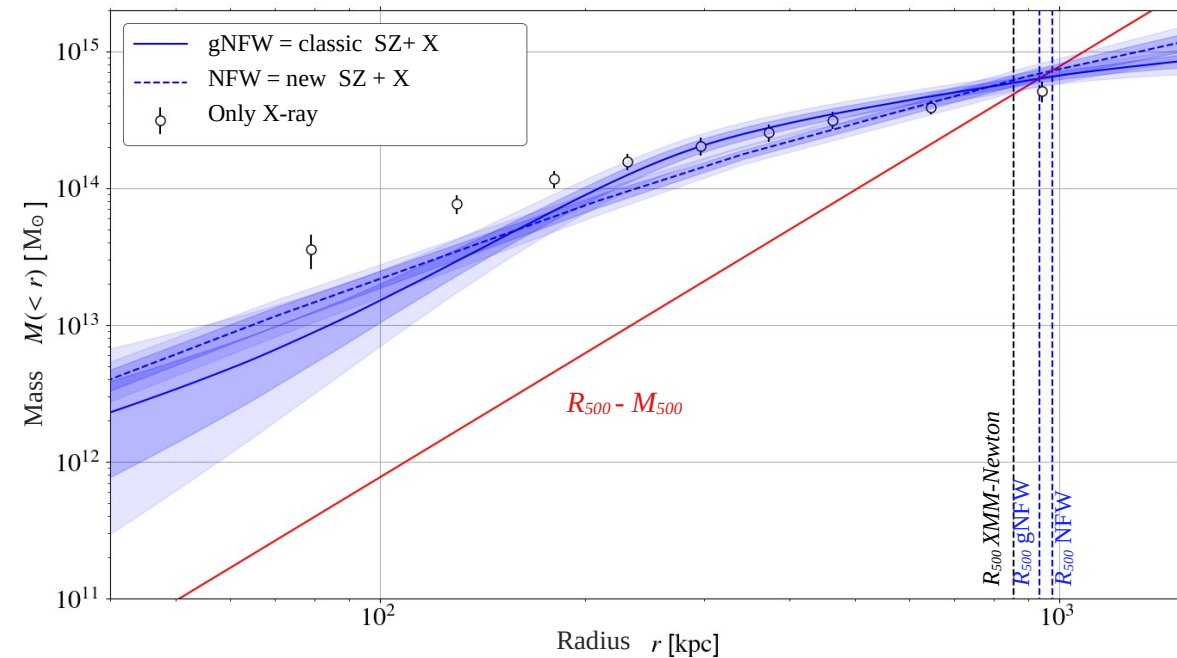
$$\rho_{\text{NFW}}(R) = \frac{\rho_c \delta_c (c_{200})}{R/r_s (1 + R/r_s)^2}$$

paramètres à ajuster : r_s, c_{200}

- Masse directement définie avec le profil de densité NFW

La masse hydrostatique de l'amas CL J1226.9+3332 :

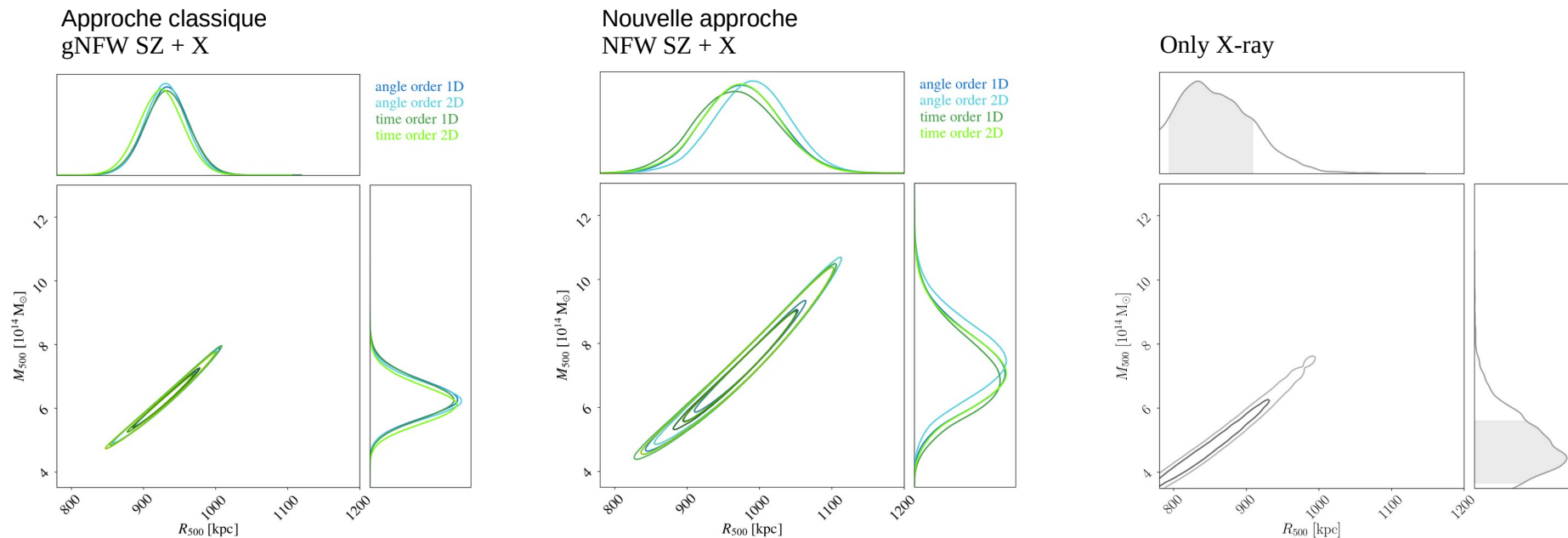
Cas de référence « angle order 1D »



- Les deux approches (pression gNFW et densité NFW) donnent des profils de masse hydrostatique compatibles
- Profils de masse X et SZ+X compatibles entre ~ 300 and 1000 kpc
- Pour les relations d'échelle en cosmologie on utilise M_{500} , la masse au rayon R_{500}

$$\langle \rho(r < R_{500}) \rangle = 500 \times \rho_c(z)$$

La masse hydrostatique de l'amas CL J1226.9+3332 : $R_{500}-M_{500}$



M_{500} dépend du modèle de pression beaucoup plus que des effets systématiques des données SZ

Légères différences dans le profil cruciales pour $R_{500}-M_{500}$!

Biais de la masse hydrostatique

Le biais hydrostatique

Différence entre la masse hydrostatique et la masse totale de l'amas :

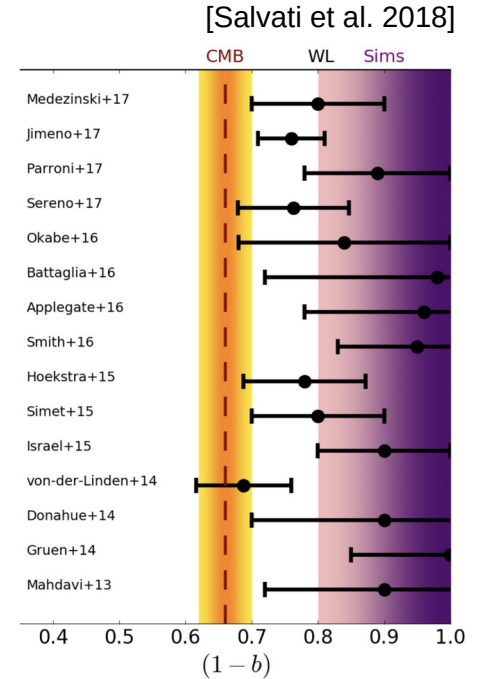
$$1 - b = M_{\text{HSE}} / M_{\text{tot}}$$

Dans la pratique...quelle est la **masse totale des amas** ?

Impossible à savoir !

On utilise des **masses** qui ne **dépendent pas de l'hypothèse d'équilibre hydrostatique**, par exemple, à partir de l'effet de lentille gravitationnelle, M_{lens}

$$1 - b_{\text{HSE/lens}} = M_{\text{HSE}} / M_{\text{lens}}$$

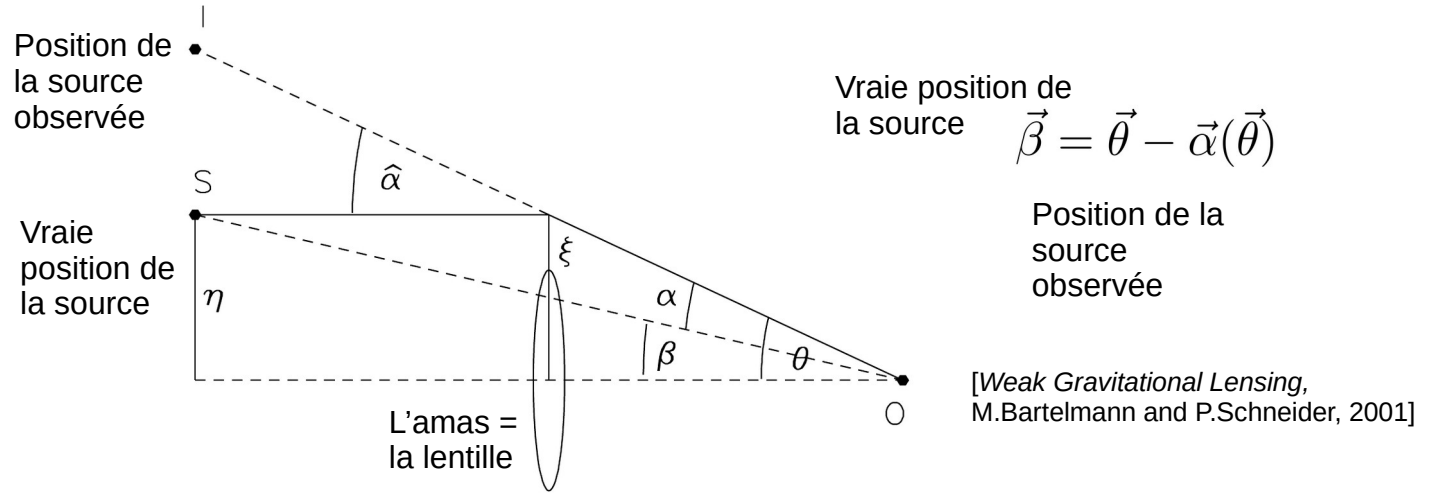
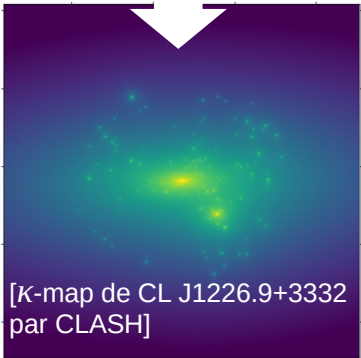


L'effet de lentille gravitationnelle

Une distribution de densité de masse projetée κ dévie la lumière d'un angle α



$$\nabla \cdot \vec{\alpha} = 2\kappa$$



$$\kappa = \Sigma / \Sigma_{crit}$$

Σ : densité de masse surfacique

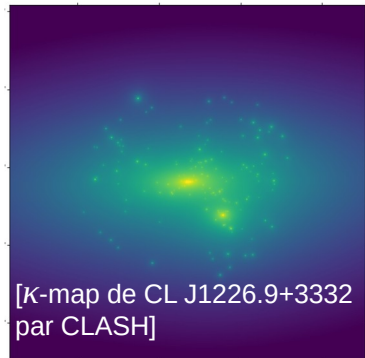
κ : Σ en unités de Σ_{crit}

Σ_{crit} : la densité critique, dépend des distances entre la source, l'amas (la lentille) et l'observateur

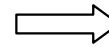
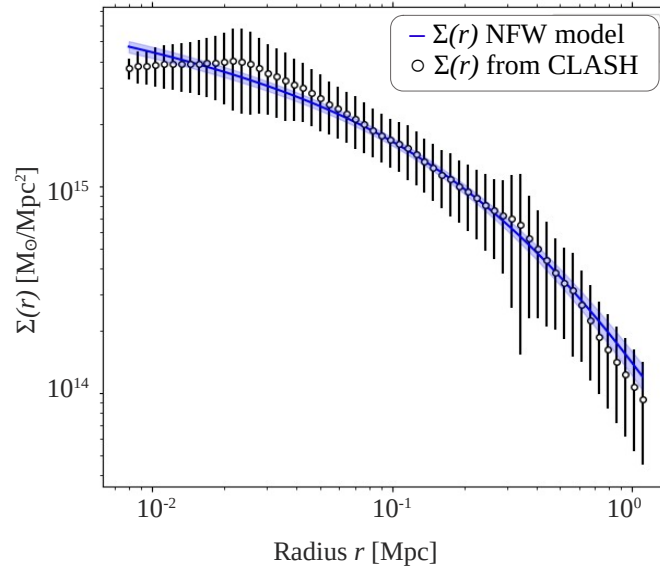
La masse avec l'effet de lentille gravitationnelle

Ajustement d'un modèle de densité de masse aux κ -maps fournies par CLASH

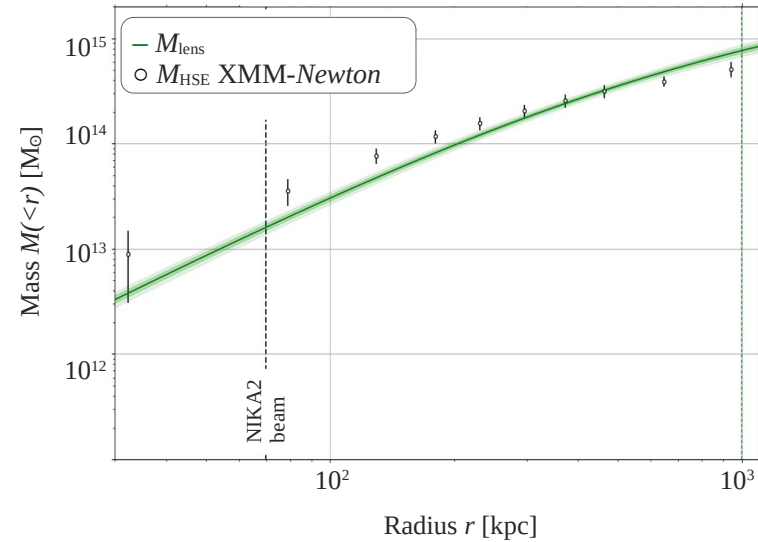
CLASH (Cluster Lensing And Supernova survey with Hubble): étude de l'effet de lentille gravitationnelle de 25 amas massifs [Zitrin et al. 2015]



Ajustement de la densité par un modèle NFW

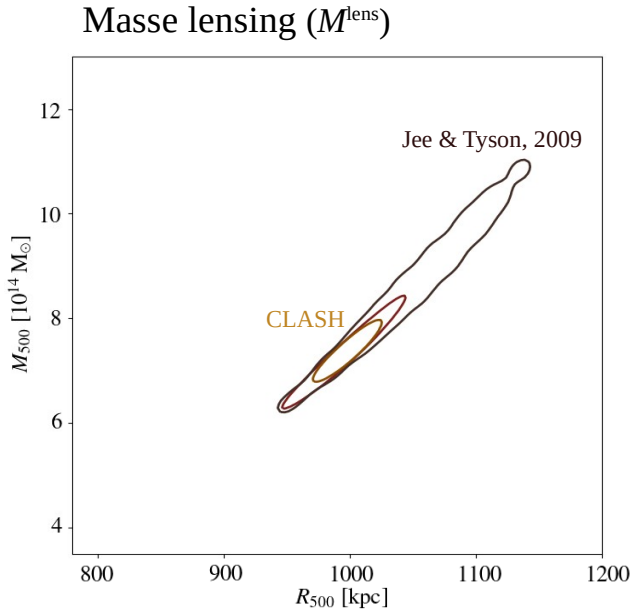
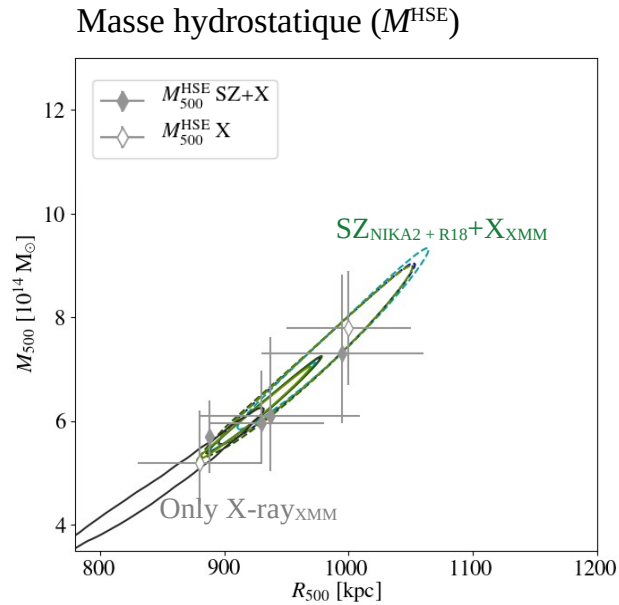


Reconstruction du profil de masse lensing

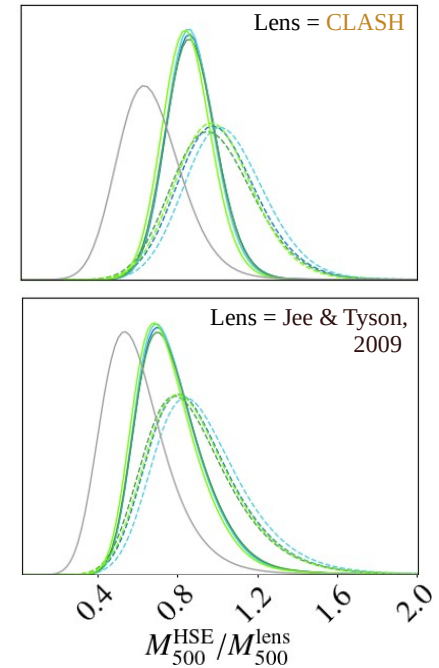


[Ferragamo et al. 2022]

La masse M_{500} et le biais hydrostatique-lensing de CL J1226.9+3332



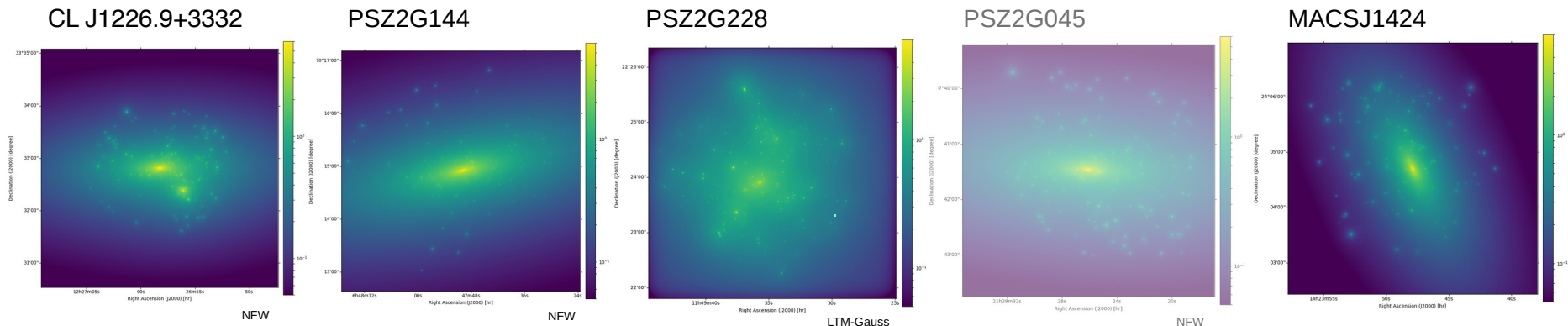
Biais hydrostatique-lensing
 $1 - b^{\text{HSE/lens}} = M^{\text{HSE}}/M^{\text{lens}}$



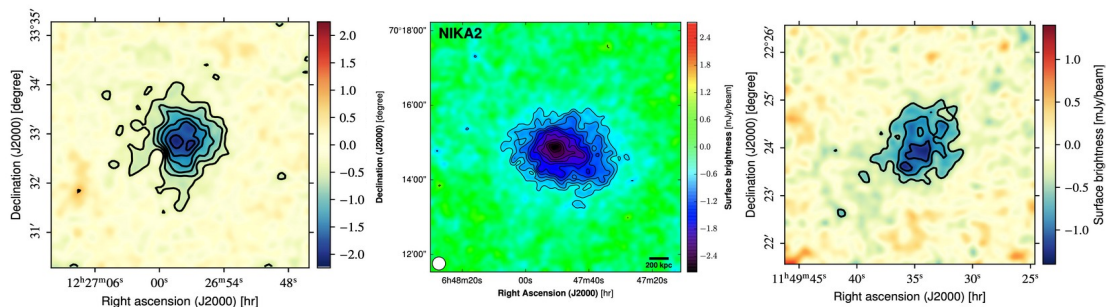
Il est possible de mesurer le biais hydrostatique-lensing amas par amas, mais il nous faudrait de la statistique pour les études cosmologiques

Masse hydrostatique et lensing des amas

Échantillon NIKA-NIKA2-CLASH

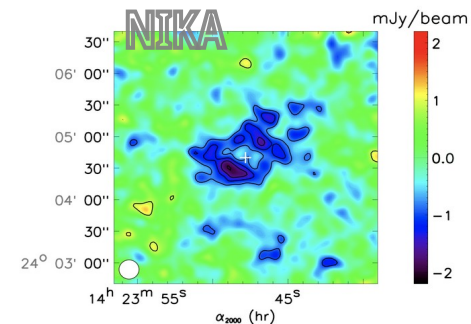


[Ferragamo et al. 2022]



[Ruppin et al. 2018]

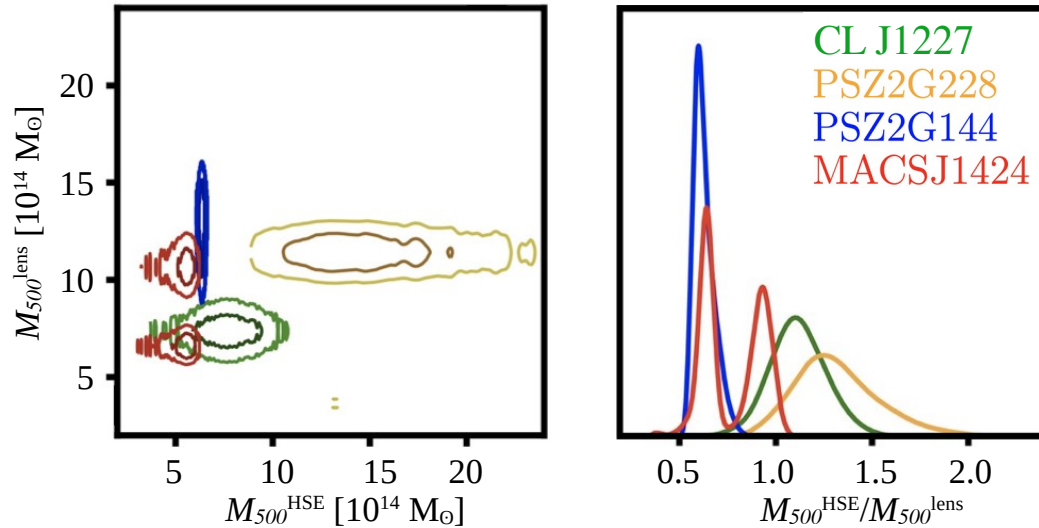
À réobserver



[Adam et al. 2018]

Masse hydrostatique et lensing des amas Échantillon NIKA-NIKA2-CLASH

Masse hydrostatique et lensing à R_{500} pour chaque amas



- Avec cet échantillon : relation $M_{500}^{\text{HSE}} - M_{500}^{\text{lens}}$ non-linéaire
- Propriétés des amas affectent différemment les estimations de masse
- Les résultats semblent complexes : un échantillon d'amas plus large et des simulations sont nécessaires
 - Étude des effets dans des amas simulés THE300

[Muñoz-Echeverría et al., arXiv:2111.01691]

Conclusions et perspectives

- Cosmologie avec le LPSZ : estimation précise de la relation SZ - masse hydrostatique
- Étude des effets systématiques avec NIKA2 : des observations à l'estimation de la masse hydrostatique
 - Effets systématiques liés à l'analyse pas dominants dans la reconstruction de la pression
 - Effet systématique dominant pour M_{500} : modélisation dans la partie externe
- Méthode pour estimer le biais hydrostatique-lensing : mesure pour l'échantillon NIKA-NIKA2-CLASH
- Études similaires sur des simulations
- Étendre la mesure du biais hydrostatique-lensing à l'ensemble des amas du LPSZ