



UNIVERSITÉ DE NICE SOPHIA ANTIPOLIS
PROJET TUTEURÉ DE LICENCE DE PHYSIQUE

ANNÉE 2016-2017

Mesure de la distribution de pression dans
les amas de galaxies à l'aube de leur
formation

Auteurs:

Coralie HAMELIN
Céline KLEIN
Rayan ABDELLAH

Encadrant:

Rémi ADAM

Projet réalisé à *L'Observatoire de la Côte d'Azur*



April 3, 2017

Sommaire

1	Introduction générale	1
2	Evolution de la distribution de matière à l'échelle cosmologique	3
2.1	Rappels historiques	3
2.2	Les amas de galaxies	4
2.2.1	Un peu d'histoire	4
2.2.2	Formation des amas	4
2.2.3	Observation des amas de galaxies	5
3	Effet Sunyaev-Zel'dovich et mesure de la masse des amas	8
3.1	L'effet Sunyaev-Zel'dovich thermique (tSZ)	8
3.2	Profil de pression universel des amas de galaxies	10
3.2.1	Relation Masse/flux	10
3.2.2	Modélisation du profil	10
4	Simulations d'observations SZ réalistes	12
4.1	Effet SZ cinétique	12
4.2	Contamination par les galaxies infrarouge et radio	12
4.3	Les effets instrumentaux	13
4.4	Le bruit	13
5	Conclusion	14

Chapitre 1

Introduction générale

Depuis plus d'un siècle la cosmologie a subi un formidable bond en avant grâce au développement de la relativité générale, où pour la première fois Albert Einstein mis en relation la dynamique de l'Univers avec son contenu. De ses travaux, il a été alors possible de construire un modèle motivé physiquement, prédictif et de le tester par le biais d'observations.

L'expansion de l'Univers qui fut principalement prédite par Georges LeMaître et Alexandre Friedmann n'a pu être confirmée que plus tard par les observations des galaxies lointaines de Edwin Hubble. Cette découverte a fait apparaître l'idée que l'Univers aurait vécu une phase extrêmement chaude et dense que l'on appelle aujourd'hui Big Bang. Si en effet notre Univers a subi une phase chaude et dense, alors les fortes densités primordiales de l'Univers ont dû engendrer un rayonnement qui est d'autant plus fort que l'Univers est dense. Ainsi, ce rayonnement que l'on appelle fond diffus cosmologique (Cosmic Microwave Background ou CMB), devrait être toujours observable mais beaucoup moins intense que par le passé.

Certains problèmes semblent apparaître à travers les observations. Au début des années 1930, Fritz Zwicky met en évidence un problème de masse manquante dans les amas de galaxies. Cette masse manquante est aujourd'hui appelée Matière Noire, car elle n'est pas observable et reste encore une énigme en cosmologie.

L'autre Grand mystère de la cosmologie est la cause de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Les observations des objets lointains montrent qu'ils s'éloignent de nous d'autant plus vite que leur distance de nous est grande. L'explication donnée il y a encore 30 ans était que l'Univers avait une courbure négative. Seulement, les observations du CMB avec le satellite COBE ont permis de mesurer pour la première fois la courbure de l'Univers et ainsi re-soulever le problème de l'expansion. Il a donc été suggéré d'ajouter une nouvelle composante à l'Univers sous la forme d'une énergie mystérieuse que l'on appelle Énergie Noire.

Avec le développement des technologies, la cosmologie est rentrée dans une ère d'observation de précision. Le but est non-seulement d'expliquer la dynamique et l'évolution de l'Univers mais aussi de trouver des moyens de le sonder afin d'en déduire ses propriétés. Les études effectuées sur le CMB et les amas de galaxies ont permis de poser des contraintes de plus en plus précises sur le contenu de l'Univers, sa courbure, ou bien sur l'Énergie Noire. Afin de bien maîtriser toutes les contraintes posées sur l'Univers, il est nécessaire de comprendre en profondeur les différents moyens de sonder l'Univers.

L'effet Sunyaev-Zel'dovich prédit par Rashid Sunyaev et Yakov Zel'dovich en 1970 est la conséquence d'un effet Compton inverse des photons du CMB sur les électrons du gaz intra-amas. Il en résulte alors une distorsion du spectre de corps noir du CMB. L'effet SZ permet de sonder l'Univers profond, notamment par la pression et est donc un puissant outil pour la

compréhension de l'évolution de notre Univers.

Notre objectif pour ce projet sera d'étudier la distribution de pression dans les amas de galaxies en effectuant une simulation de l'effet Sunyaev Zel'dovich puis de comparer nos résultats avec de réelles observations.

Dans une première partie nous étudierons la formation des amas de galaxies qui sont les plus grandes structures liées gravitationnellement, puis nous présenterons brièvement le fond diffus cosmologique.

Dans une deuxième partie nous nous intéresserons à l'effet Sunyaev-Zel'dovich que nous simulerons numériquement grâce à la modélisation d'un profil de pression.

Pour terminer, nous présenterons les différents paramètres que nous ajouterons à notre programme afin de le rendre plus proche des observations dans la seconde partie du projet.

Chapitre 2

Evolution de la distribution de matière à l'échelle cosmologique

2.1 Rappels historiques

En 1929 Hubble énonce une loi basée sur ses observations : les galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse approximativement proportionnelle à leur distance. Il s'agit du Redshift. Le Redshift peut être vu comme un décalage vers le rouge du spectre de l'objet observé dû à son éloignement par rapport à l'observateur. Dans ce cas on parle de l'effet Doppler, plus couramment observé pour des objets proches (phénomène local).

Cependant dans le context cosmologique, le Redshift peut être relié à une notion de distance. En réalisant des observations en dehors de la voie Lactée, Hubble mit en évidence cette relation, valable seulement pour les modèles prenant en compte l'expansion de l'univers. Au lieu d'être une conséquence reliée à la vitesse relative des objets respectant la loi de la relativité, les photons voient leur longueur d'onde augmenter [11]. Plus une galaxie est loin de nous, plus elle semble s'éloigner rapidement (augmentation de la valeur de la vitesse).

La distance de séparation entre deux galaxies est alors :

$$r_{12} = a(t)(x_1 - x_2) \quad (2.1)$$

Soit la vitesse :

$$\dot{r}_{12} = \frac{\dot{a}}{a} \times r_{12} \quad (2.2)$$

Avec $H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$ le paramètre de Hubble qui dépend du temps et mesure la vitesse d'expansion ($H(t=0)$ estimé à environ 70km/s/Mpc).[9].

En s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, Friedmann introduit en 1922 pour la première fois l'idée d'un univers en expansion. En se basant sur les équations d'Einstein et le tenseur énergie-impulsion il énonça la loi suivante :

$$\frac{H^2}{c^2} = \frac{k}{3}\rho - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{a^3} \quad (2.3)$$

Avec H le taux d'expansion, K la courbure spatiale et ρ le facteur d'échelle. Pour cela il nous faut paramétrer l'Univers en fonction de son contenu :

- Matière : $\Omega_m = \frac{\rho}{\rho_c}$;
- Energie noire : $\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H^2}$;
- Courbure : $\Omega_K = -\frac{Kc^2}{a^2H^2}$.

Avec $\Omega_\Lambda \approx 0.7$, $\Omega_m \approx 0.3$ et comme les observations montrent que l'univers est plat : $\Omega_K \approx 0$.

2.2 Les amas de galaxies

Les amas de galaxies sont les objets les plus massifs de l'Univers. Issus des fluctuations de densité de matière générées lors de la phase primordiale de l'Univers, leurs propriétés sont une excellente représentation du contenu de l'Univers. On peut donc sonder l'Univers à partir de leur population et ainsi obtenir des contraintes sur le contenu en matière, la nature de l'Énergie Noire ou bien même sur l'amplitude des fluctuations de densité de matière qui leur ont données naissance.

2.2.1 Un peu d'histoire

C'est en 1930 que les amas de galaxies commencent à être étudiés dans le domaine visible du spectre EM. A partir de 1960 les premières observations en rayons X offrent de nouvelles perspectives d'étude sur les amas de galaxies et permettent une meilleure compréhension de leur structure. L'étude systématique des amas de galaxies a commencé avec la mise en place de catalogues, tels que les catalogues d'Abell [3] et de Zwicky [16]. Ces catalogues contiennent respectivement 2712 amas et environ 9134 amas.

On compte 2 types de morphologies pour les amas : la morphologie régulière et la morphologie irrégulière. Les amas réguliers sont de forme symétrique et présentent une concentration importante de galaxies dans leur cœur. Ils possèdent très peu de sous-groupes de galaxies en leur sein. Les amas irréguliers sont fortement asymétriques : ils ont conservé la distribution de leurs sous structures au moment de leur formation. Ces systèmes sont généralement considérés plus récents et n'ont pas encore eu le temps d'atteindre un état « relaxé ». Le type de galaxies peuplant les amas est également dépendant de la morphologie générale de l'amas.

2.2.2 Formation des amas

Le fond diffus cosmologique (CMB) Historiquement le CMB a été mis en évidence par Penzias et Wilson en 1964 alors qu'ils faisaient des observations en onde radio sur le ciel. Afin d'étalonner au mieux leur radiotélescope, ils avaient besoin de connaître avec précision le bruit de fond. C'est donc ainsi qu'ils ont découvert un bruit supplémentaire qui semblait provenir de toutes les directions et dont les fluctuations étaient très faibles. Ce bruit ne pouvait être émis par la voie lactée et, grâce aux travaux de l'époque, fut considéré comme la preuve de l'existence du CMB. Cette découverte a valu à Penzias et Wilson le prix Nobel de physique en 1978.

Ce signal avait déjà été prédit par Gamow en 1948 [10] suivit de Alpher et Herman. Tant que la température reste grande devant l'énergie de liaison de l'hydrogène, les photons sont couplés aux électrons et la matière reste sous forme de plasma. Avec l'expansion de l'Univers, la température s'est mise à décroître et l'énergie nécessaire au couplage électron-photon ne fut plus suffisante. C'est à ce moment, environ 380 000 ans après le Big Bang, que la première lumière de l'Univers a été émise, ce que l'on appelle aujourd'hui le CMB ou fond diffus cosmologique. Au cours de son long périple vers nous, le CMB interagit avec le contenu en énergie de l'Univers, notamment avec les amas de galaxies. Cela nous offre l'opportunité d'obtenir des informations précieuses sur la formation des structures dans l'Univers, le CMB ayant vécu successivement chacune des étapes de la formation de ces structures.

Une fois l'Univers en expansion et sous l'action de la gravité, commence la formation de sous-structures ainsi que de pics de matière. Les pics dans la distribution de matière dans l'univers peuvent être classés en deux catégories :

- La matière noire;

- La matière baryonique, qui correspond à la matière ordinaire.

De grandes structures apparaissent sous forme filamentaire et on commence désormais à voir des « nœuds ». Même si nous ne sommes pas encore au stade d'amas de galaxies, ces structures massives creusent un puits de potentiel important, la matière qui l'entoure va alors avoir tendance à tomber dedans. Commence ainsi la formation d'amas. Dans le modèle hiérarchique de formation des structures ils sont les derniers objets à s'être formés après les galaxies. Sous l'effet de la gravité, la matière et les galaxies s'accrètent pour former une structure plus colossale. On considère qu'ils sont d'excellents traceurs de la distribution de matière dans l'Univers et ils offrent une sonde puissante pour tester la formation des structures de l'univers. Une fois les observables (température ou luminosité par exemple) reliées à la masse des amas, ces derniers peuvent être utilisés pour contraindre la cosmologie. En effet, étant très sensibles aux fluctuations de densité, les amas permettent de poser des contraintes sur les paramètres cosmologiques. Au-delà de l'intérêt astrophysique que les amas de galaxies peuvent nous apporter, il est nécessaire de comprendre en détail les processus physiques qu'ils abritent pour pouvoir les utiliser en tant que sonde cosmologique. Il s'agit d'une physique complexe qui affecte chacune de leurs observables, elle doit donc être maîtrisée, en particulier lorsqu'il est question de mesurer leur masse. La mesure de leur masse par le biais des différentes observables peut être précise, mais biaisée en moyenne, ou à l'inverse imprécise mais non biaisée.

Composition des amas de galaxies La masse de l'amas n'est pas assez élevée pour correspondre avec les observations du mouvement des galaxies, même si la masse totale des gaz est bien plus grande que la masse des galaxies qu'il contient : environ 12% de gaz et 4% de galaxies. Ils sont constitués majoritairement de matière noire (environ 85% de leur contenu en masse). Une preuve claire de l'existence de la matière noire a été rapportée par Fritz Zwicky qui a essayé de mesurer la masse des amas de galaxies en faisant une analyse de la vitesse des galaxies autour du centre des amas. Il en a déduit que la masse de l'amas devait être bien supérieure à la somme des masses individuelles des galaxies le composant. La différence provient donc de la présence de la matière noire, une substance qui n'émet pas de radiation mais qui produit des effets gravitationnels mesurables.

2.2.3 Observation des amas de galaxies

Il est possible de remonter à la masse totale de l'amas avec les observations en optique, grâce à la distribution de vitesse des galaxies. Les observations en X peuvent aussi donner accès à la quantité de gaz intra-amas et à sa température, il devient alors possible de reconstruire la masse totale de l'amas. L'effet de lentille gravitationnelle permet également d'obtenir une estimation de la masse.

Les amas de galaxies peuvent donc être observés à plusieurs longueurs d'onde allant du domaine radio au domaine des rayons X, chacune d'entre elles étant sensible à différents processus physiques, permettant de tracer leurs diverses composantes.

Dans le visible Historiquement, ce sont les observations les plus anciennes car les plus simples à mettre en place. Les observations dans le visible permettent de tracer la matière baryonique visible condensée sous forme d'étoiles. Sur l'image (2.1) ces galaxies ont été représentées en vert. On remarque que pour les galaxies périphériques, il n'y a que très peu de gaz comparé à celles qui se trouvent au centre. Il s'agit de galaxies elliptiques, composées de vieilles étoiles et de peu de matière interstellaire : peu d'étoiles vont pouvoir s'y former. Tandis que les galaxies contenant beaucoup de gaz sont lieu de formation d'étoiles et correspondent aux galaxies spirales.

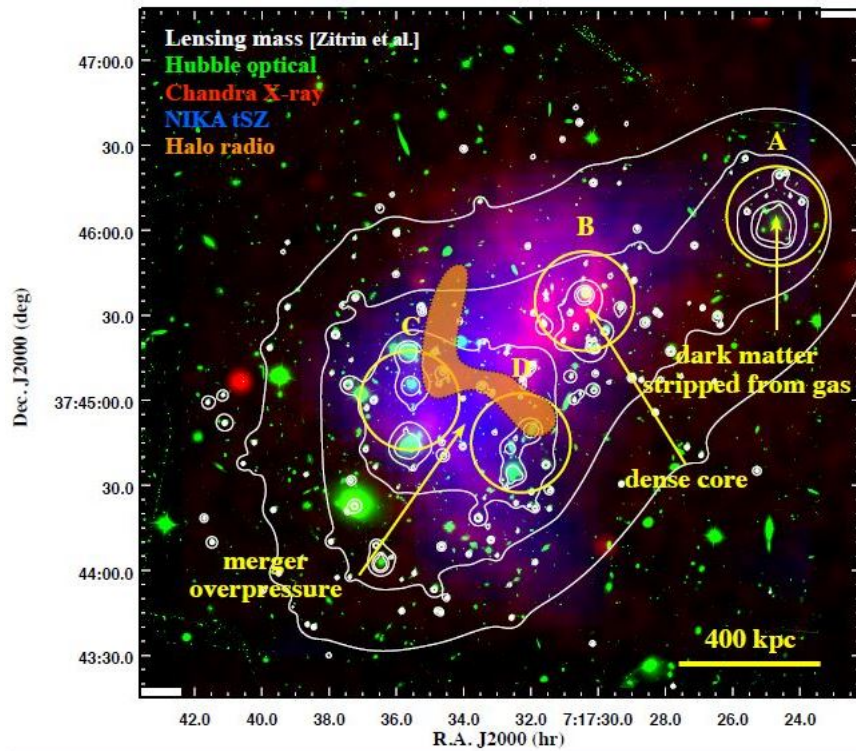


Figure 2.1: Image adaptée multi longueurs d’onde de l’amas *MACS J0717.5+3745* montrant la distribution des galaxies (en vert, données du télescope spatial Hubble), la densité électronique du gaz (en rouge, rayonnement X), la pression électronique du gaz (en bleu, NIKA). Les cercles jaunes indiquent les principaux sous-amas. Crédits : [6]

Par effet de lentille gravitationnelle Lors de son trajet jusqu’à l’observateur, la lumière peut être déviée par les structures massives situées entre l’observateur et la source, tels que les amas de galaxies. Ainsi, si un corps possède une masse très grande et est devant un objet situé en arrière plan, alors la distorsion spatio-temporelle induite par le corps permettra à la lumière émise par l’objet d’être déviée, amplifiée et déformée. Il est clair que cet effet peut être très intéressant car les masses des amas peuvent être reconstruites comme nous l’avons mentionné précédemment, mais cela est assez rare puisque pour ce faire il faudrait des images de très haute qualité.

Via l’émission X L’émission X (en rouge sur l’image 2.1) est produite par le rayonnement des électrons dans le plasma chaud d’hydrogène. Les particules à charge électrique (électrons et protons provenant des atomes d’hydrogène) se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière. Les particules interagissent entre elles et les électrons émettent une partie de leur énergie sous forme de photon X. La trajectoire de l’électron est alors freinée. On appelle ce phénomène Bremsstrahlung [1], ou émission de freinage. Cette émission permet d’avoir accès à la distribution du gaz d’hydrogène constituant la fraction majoritaire de la matière baryonique qui se trouve dans un amas de galaxies, ainsi que de remonter à la masse totale de l’amas (sous l’hypothèse où le gaz est en équilibre thermique).

Dans le domaine radio Dans le cas de la collision entre amas de galaxies, il peut arriver que les électrons du gaz chaud soient accélérés, au point de produire un rayonnement dans le domaine radio. De telles observables constituent une trace de l’activité dynamique récente entre amas de galaxies et permettent de mettre en évidence la collision et fusion des sous-amas.

La zone orange (image 2.1) correspond à une zone de forte énergie générée par l'accélération des électrons relativistes et l'action d'un champ magnétique sur une grande échelle.

Chapitre 3

Effet Sunyaev-Zel'dovich et mesure de la masse des amas

Les effets Sunyaev-Zel'dovich ont été théorisés dès le milieu des années 1960, plus particulièrement au début des années 1970 [14], [15].

Nous l'avons vu, la matière baryonique contenue dans un amas est présente principalement sous la forme d'un gaz chaud et ionisé qui émet un rayonnement X. La découverte du CMB a permis d'expliquer par la suite le rayonnement micro-onde voir millimétrique des amas. Un moyen de sonder ces amas est d'utiliser l'effet SZ. Puisque l'observable est le CMB lui-même et non pas l'amas, il ne dépend pas de la distance entre l'observateur et l'amas. Sa mesure est donc uniquement limitée par la résolution angulaire et la sensibilité de l'observation. L'effet SZ est directement proportionnel à la pression dans les amas, il apparaît donc comme une sonde privilégiée pour mesurer la masse totale de ces derniers, qui sont au premier ordre des "boules de gaz" en équilibre hydrostatique. C'est en 1970 que Rashid Sunyaev et Yakov Zel'dovich prédisent un rayonnement qui serait le produit de la distorsion des photons du CMB lorsque ces derniers passeraient à travers un amas. Cet effet fut confirmé quelques années plus tard (1983) grâce à des observations et est devenu un outil très puissant pour la cosmologie et la détection d'amas. On distingue plusieurs effets :

- L'effet SZ thermique où les photons du CMB interagissent avec les électrons des amas à cause de leur température;
- L'effet SZ cinétique, où les photons du CMB interagissent avec les électrons des amas à cause de leur déplacement (nous développerons cet effet dans le chapitre 4).

Notre travail se focalise principalement sur l'effet SZ thermique, plus facilement observable que l'effet SZ cinétique qui requiert une très grande sensibilité car son amplitude est plus faible que celle de l'effet thermique.

3.1 L'effet Sunyaev-Zel'dovich thermique (tSZ)

L'effet SZ thermique (tSZ) est dû à l'interaction Compton inverse entre un photon du fond diffus cosmologique et une distribution thermique d'électrons, avec une température du gaz importante (de l'ordre du keV en moyenne, supérieure à la dizaine de keV pour les amas très chauds et donc massifs). Dans ce cadre, on ne considère donc que l'agitation thermique des électrons et on ne considère pas la vitesse particulière des amas (donnant lieu à l'effet SZ cinétique). Cet effet crée donc une distorsion du spectre de corps noir du fond diffus cosmologique. Après l'interaction avec les électrons constituant le gaz des amas, le spectre qui suit initialement une loi de Planck subit un décalage vers les fréquences plus élevées. La différence des

deux spectres (avant et après interaction) donne une signature spectrale bien particulière que l'on peut nettement voir sur la figure (3.1). La forme caractéristique du spectre de l'effet tSZ sur la figure simplifie sa détection, on dénote clairement deux zones avant et après le point d'ordonnée nulle. Le spectre tSZ est nul à 217 GHz, négatif pour des fréquences inférieures et positif au-delà.

Actuellement, deux bandes d'observation nous sont accessibles (observations faites essentiellement par NIKA) :

150 GHz ($\lambda \approx 2mm$): ce qui correspond presque à un minimum, très caractéristique et parfait pour les observations car moins de bruit;

260 GHz ($\approx 1mm$): dans les positif mais moins favorable que la possibilité précédente. Plus de bruit parasite.

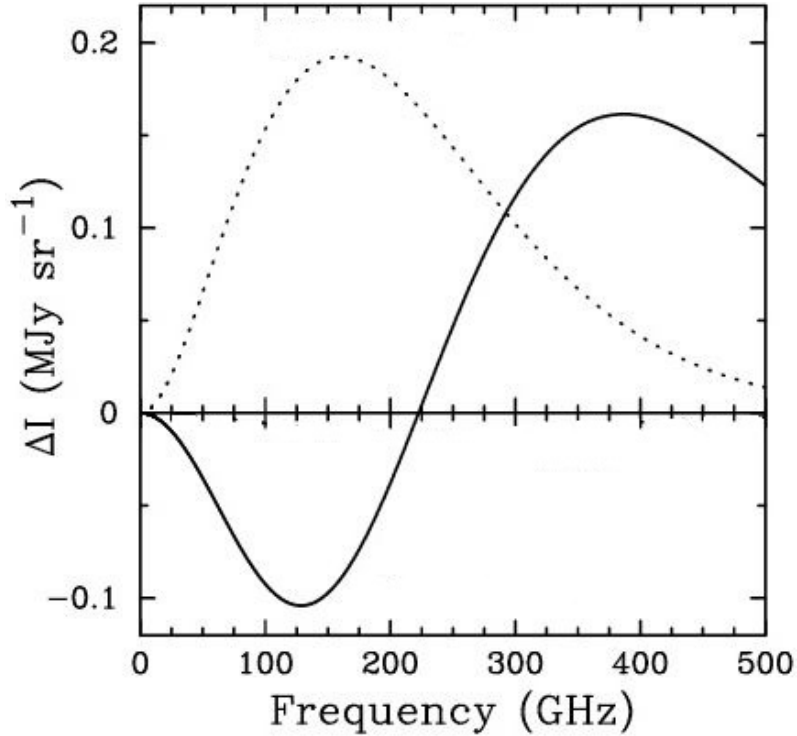


Figure 3.1: Distorsion du spectre de corps noir du CMB. En pointillé l'allure original du spectre du CMB et en traits pleins l'effet SZ thermique. Crédits : [2]

La dépendance spectrale de l'effet tSZ est donnée par :

$$f(x, T_e) = \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} \left(x \times \coth\left(\frac{x}{2}\right) - 4 \right) (1 + \delta_{tSZ}(x, T_e)) \quad (3.1)$$

Où $x = \frac{h\nu}{k_B T_{CMB}}$ est la fréquence sans dimension des photons.

Avec h la constante de Planck, k_B la constante de Boltzmann, ν la fréquence d'observation et T_{CMB} la température du CMB.

Le terme $\delta_{tSZ}(x, T_e)$ représente les corrections relativistes que l'on néglige au premier ordre.

La variation de brillance en direction d'un amas de galaxies, par rapport à celle du CMB I_0 est donnée par :

$$\frac{\Delta I_{tSZ}}{I_0} = y f(x, T_e) \quad (3.2)$$

Le paramètre y est appelé paramètre de Compton, il donne une mesure de la pression électronique intégrée sur la ligne de visée et se détermine comme suit :

$$y = \frac{\sigma_T}{m_e c^2} \int P_e dl \quad (3.3)$$

Où σ_T est la section efficace de Thomson et $m_e c^2$ l'énergie de masse de l'électron.

3.2 Profil de pression universel des amas de galaxies

L'effet SZ est avantageux dans le sens où, à priori, la pression peut nous donner une indication sur la quantité de l'énergie thermique des amas (vrai si les amas sont complètement à l'équilibre, ce qui n'est pas toujours le cas en pratique : turbulences, objets parasites, etc...).

3.2.1 Relation Masse/flux

Il existe une loi de puissance entre la masse et le flux Y , ce qui est très important étant donné que nous ne pouvons pas la mesurer directement. En effet, le flux tSZ peut être relié à la masse en utilisant des arguments purement énergétiques décrits par Mroczowski [12].

$$H(z)Y \propto [H(z)M]^{5/3} \quad (3.4)$$

$H(z)$ est la constante de Hubble au Redshift z . Nous disposons ainsi d'une relation directe entre la masse des amas et leurs observables tSZ, ce qui est requis pour leur utilisation en cosmologie.

3.2.2 Modélisation du profil

Afin de poursuivre dans la modélisation des amas de galaxies, il est nécessaire de caractériser certaines grandeurs physiques qui leur sont propre (masse, pression, densité, température) grâce à l'observation du gaz présent en leur sein.

Nous allons modéliser la distribution de pression dans les amas par le profil généralisé de Navarro Frenk et White [13] qui est donné par :

$$P_e = \frac{P_0}{\left(\frac{r}{r_p}\right)^c \times \left(1 + \left(\frac{r}{r_p}\right)^a\right)^{\frac{b-c}{a}}} \quad (3.5)$$

P_0 est une constante de normalisation,

r_p représente le rayon caractéristique,

les paramètres a , b et c représentent respectivement la pente du profil à des rayons r_p , $r \gg r_p$ et $r \ll r_p$.

L'expression du profil peut s'écrire sous sa forme universelle par :

$$P(x_r) = \frac{P_e}{P_{500}} \quad (3.6)$$

La normalisation de P_{500} est reliée à la masse M_{500} par une loi d'échelle :

$$P_{500} = 1.65 \times 10^{-3} E(z)^{8/3} \times \left[\frac{M_{500}}{3 \times 10^{14} h_{70}^{-1} M_s} \right]^{2/3} \times h_{70}^2 \text{KeV.cm}^{-3} \quad (3.7)$$

Où M_{500} représente la masse de l'amas dans lequel la densité est 500 fois la densité critique de l'Univers.

$E(z)$ représente le rapport entre le paramètre de Hubble au Redshift z et aujourd'hui.

M_s la masse solaire.

Pour les paramètres du profil de pression universel nous utiliserons ceux qui ont été mesurés en utilisant des données X et des simulation numériques : $(c_{500}, a, b, c) = (1.177, 0.3081, 1.0510, 5.4905)$ [7].

Après avoir obtenu ce profil de pression nous allons effectuer une intégration sur la ligne de visée, qui nous permettra de passer en 2 dimensions afin d'obtenir une carte.

Il faut tout de même prendre en compte le fait que la distribution de pression dans les amas ne représente pas toute l'énergie : une certaine partie n'est pas thermique et c'est ce que nous allons aborder dans la dernière partie.

Chapitre 4

Simulations d'observations SZ réalistes

Notre objectif est donc d'obtenir une carte du ciel à symétrie sphérique or nous nous doutons bien que pour des observations, le résultat ne serait pas aussi parfait. Nous consacrerons cette partie aux ajustements possibles que nous pourrions effectuer dans la seconde partie de notre stage.

Un instrument qui observerait le ciel aux longueurs d'onde millimétriques ne verrait pas directement les amas en SZ tels que présentés sur des cartes simulées pour plusieurs raisons. En effet, les amas SZ ne représentent pas la seule émission astrophysique observée dans le ciel. Il existe de nombreux contaminants de l'effet SZ, des émissions d'avant plan qui rendent difficile sa détection comme les émissions galactiques de poussière par exemple. Il faudra aussi réussir à s'affranchir des galaxies radios et infrarouges. A ces émissions astrophysiques polluantes doivent s'ajouter les effets instrumentaux. La résolution des instruments d'observation est finie. Les instruments possèdent un bruit de fond plus ou moins complexe à comprendre et à modéliser.

4.1 Effet SZ cinétique

L'effet SZ n'est pas seulement thermique, il peut être la résultante d'une composante cinétique. Cet effet provient de la modification de l'énergie des photons du CMB quand ils interagissent avec les électrons du gaz intra-amas qui se déplacent à grande vitesse [4]. Ayant une amplitude bien plus faible que celle de l'effet thermique, il est plus difficile de le détecter. En effet, l'effet SZ cinétique (kSZ) pose plusieurs problèmes en terme de détection. Tout d'abord il ne partage pas la même signature spectrale que l'effet tSZ. Cet effet ne sera pas observable pour tous les amas. Un amas ayant une vitesse radiale nulle par rapport au référentiel dans lequel le CMB est isotrope ne sera pas observable via cet effet. L'observation de l'effet kSZ sera la plus efficace à 217 GHz là où l'effet thermique sera nul.

4.2 Contamination par les galaxies infrarouge et radio

Il existe plusieurs populations de sources ponctuelles dont l'émission dépend fortement de la fréquence d'observation. On distingue cependant deux grands types de sources : les sources radios que l'on observe à basse fréquence (au-dessous de 100GHz) dont le flux diminue lorsque la fréquence d'observation augmente et les sources infrarouges que l'on observe à plus haute fréquence (au-dessus de 100GHz) dont le flux augmente avec la fréquence d'observation. On sait encore peu de choses sur ces sources radios et infrarouges et leurs comptages sont encore incertains.

4.3 Les effets instrumentaux

Un des effets non négligeables mais que nous n'aborderons pas dans ce projet est lié aux instruments d'observation. La résolution des instruments peut parfois être trop faible par rapport aux objets observés, ce qui se traduit par une perte d'information sur le signal. Certaines structures peuvent ne pas apparaître.

4.4 Le bruit

Le bruit est un autre des effets parasites que nous n'avons pas encore pris en compte lors de notre simulation informatique. Sans bruit, notre carte simulée correspondrait à une observation faite pour un temps infini.

En résumé Voici les étapes principales de notre simulation :

- Faire la relation entre la masse et le flux;
- Calculer le flux Y ;
- Trouver le profil de pression $P(x_r)$;
- Obtenir $y(\theta)$, la carte du ciel (avec θ l'angle d'observation);
- Ajouter les effets "perturbateurs" (bruit, etc...).

Chapitre 5

Conclusion

L'objectif de notre projet est de simuler numériquement l'effet Sunyaev-Zel'dovich pour pouvoir mesurer la distribution de pression dans les amas de galaxies. Afin de mieux comprendre le contexte nous nous sommes intéressés en premier lieu à l'histoire des amas de galaxies, à leur formation, ce qui nous a permis de comprendre à quel point ces objets massifs sont importants pour la compréhension de l'évolution de l'univers.

Par la suite, nous avons commencé à modéliser un profil de pression d'amas de galaxies universel en utilisant l'effet SZ thermique, notamment en suivant la loi de puissance entre la masse et le flux. Cette étape majeure du projet nous a déjà permis d'acquérir quelques connaissances en ce qui concerne la programmation en Python, car jusqu'à présent nous n'avions jamais utilisé ce langage.

Lorsque nous obtiendrons une carte de distribution de la pression en 2 dimensions, après intégration sur la ligne de visée, nous pourrons nous en servir comme test direct de la distribution dans les amas distants. Nous consacrerons la majeure partie de notre temps dans la seconde partie du projet à essayer d'inclure de nouveaux paramètres à notre programme initial (exposés au chapitre 4), le but étant bien sûr de se rapprocher le plus possible de la réalité.

Remerciements

Nous tenons particulièrement à remercier l'encadrant de notre projet, Rémi Adam, pour ses conseils et ses connaissances apportés tout au long de cette première période de stage, ainsi que pour la patience et la sympathie dont il fait preuve à notre égard.

Nous remercions également l'Observatoire de la Côte d'Azur de nous accueillir chaque semaine et de nous avoir permis de réaliser notre projet tuteuré.

Références

- [1] Rayonnement de freinage - bremsstrahlung. <http://www.laradioactivite.com/site/pages/Bremsstrahlung.htm>.
- [2] The first-ever detection of the kinematic sunyaev-zel'dovich effect. <https://astrobites.org/2012/04/02/the-first-ever-detection-of-the-kinematic-sunyaev-zeldovich-effect/>, 2012.
- [3] George O. Abell. The distribution of rich clusters of galaxies. *Astrophysical Journal Supplement*, 1958.
- [4] R. Adam, I. Bartalucci, and G.W. Pratt. Mapping the kinetic sunyaev-zel'dovic effect toward macs j0717.5+3745 with nika. http://irfu.cea.fr/Sap/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=3854, 2016.
- [5] Remi Adam. *Observatin des amas de galaxies par effet Sunyaev-Zel'dovich et de la polarisation du fond diffus cosmologique : de Planck à NIKA*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes, 2015.
- [6] Rémi Adam, Iacopo Bartalucci, and Gabriel Pratt. Image multi longueur d'onde de l'amas macs j0717.5+3745. <https://www.oca.eu/fr/actu-lagrange/evenements/441-nika-observe-la-fusion-d-amas-de-galaxies-en-flagrant-delit>, 2017.
- [7] M. Arnaud, G.W. Pratt, R. Piffaretti, H. Böhringer, J.H. Croston, and E. Pointecouteau. The universal galaxy cluster pressure profile from a representative sample of nearby systems (rexcass) and the ysz - m500 relation. *Astronomy and Astrophysics Volume 517*, 2010.
- [8] Begona Ascaso. Dans le chaudron de l'univers : les amas de galaxies. <http://www.univ-paris-diderot.fr/sc/site.php?bc=recherche&np=pageActu&ref=8670>, 2016.
- [9] Planck Collaboration. Planck 2015 results. xiii. cosmological parameters. *Astronomy Astrophysics, Volume 594*, 2016.
- [10] G. Gamow. The evolution of the universe. *Nature*, 1948.
- [11] Edward Harrison. *Cosmology : The science of the Universe*. Cambridge University Press, 2000.
- [12] Tony Mroczkowski. A new approach to obtaining cluster mass from sunyaev-zel'dovich effect observations. *The American Astronomical Society*, 2011.
- [13] Daisuke Nagai, Andrey Kravtsov, and Alexey Vikhlinin. Effects of galaxy formation on thermodynamics of the intracluster medium. *The Astrophysical Journal*, 2007.
- [14] R.A Sunyaev and Ya. B. Zeldovich. Small-scale fluctuations of relic radiation. *Astrophysics and Space Science, Volume 7*, 1970.

- [15] R.A Sunyaev and Ya. B. Zeldovich. The observations of relic radiation as a test of the nature of x-ray radiation from the clusters of galaxies. *Comments on Astrophysics and Space Physics, Volume 4*, 1972.
- [16] Fritz Zwicky, E. Herzog, and P. Wild. Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies, vol 2. 1963.