

# Magnetic fields and Sunyaev-Zel'dovich effect in galaxy clusters

名古屋大学大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻  
宇宙論研究室 (C 研)  
修士 1 年 渋谷雄希

## 概要

Sunyaev Zel'dovich (SZ) 効果とは、逆コンプトン散乱によって宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) に 2 次的な温度ゆらぎを生じさせる現象である。SZ 効果は銀河団内物質 (ICM) の密度分布に直接的に依存するため、銀河団中のガス密度分布の重要な指標となる [1]。また、ICM 中には数  $\mu\text{G}$  程度の磁場が存在することが知られており、これは銀河や銀河団内のガス密度に重要な影響を与える。従って、SZ 効果と磁場の関係について調べることは非常に重要である。そこで、本講演では SZ 効果に対する磁場の影響が議論されている Gopal & Roychowdhury (2010)[2] のレビューを行う。

磁場の効果はローレンツ力として静水圧平衡の式に取り入れられる。この時、ローレンツ力は磁気圧と磁気張力の成分に分けることができる。先行研究では磁気圧だけが考えられてきたが、これは ICM 中の磁場の形状が特殊な時のみしか実現しない。今回紹介する研究では、磁気張力も含めたより包括的なモデルを考える。具体的には典型的な磁場の強さ ( $\sim 10\mu\text{G}$ ) に対して磁気張力の効果を推定し、銀河団スケールでの 2 次的な CMB 温度ゆらぎによる角度パワースペクトルの見積もりを行った。その結果、磁場を含めない一般的な SZ 効果では説明できなかった  $l > 2000$  での角度パワースペクトルの超過 [3] を再現できることがわかった。

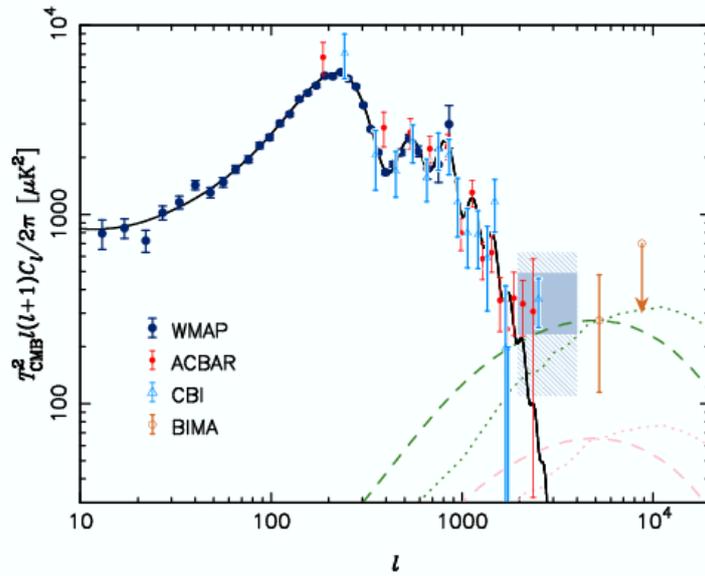


図1 temperature perturbation

## 1 Introduction

1965年、PenziasとWilsonによりBig Bangの証拠となる宇宙マイクロ波背景放射(CMB)が発見された。その後の観測により、CMBは温度2.7Kの黒体放射のスペクトルを持つことがわかった。このCMBのスペクトルにはわずかなゆらぎが存在し、このゆらぎが現在の我々の宇宙を構成する銀河や星などの構造の種になったと考えられており、そのため、このゆらぎがどのように生成されたかという研究が近年盛んに行われてきた。

CMBのゆらぎには初期宇宙で作られる量子論起源の初期ゆらぎと、CMBが我々に向かって飛んでくるまでに様々な影響を受けて作られる2次的なゆらぎが存在する。この2次的なゆらぎの代表例として、今回注目するSunyaev-Zel'dovich(SZ)効果がある。SZ効果とは、CMB光子が銀河団を通過する時に銀河団中の高温電子と逆コンプトン散乱をすることで温度ゆらぎを獲得するという現象である。

これらのゆらぎの研究では、相関を取ることが有用である。図1は、CMBの温度ゆらぎの相関を取ってパワースペクトルで表したものである。横軸はmultipole moment  $l$ であり、これは見込み角の逆数の形をしているため、 $l$ が小さい領域がlarge scaleに対応する。縦軸はゆらぎの大きさを表す。WMAPやCBIなどの観測より、large scaleのゆらぎは黒の実線で表される初期ゆらぎで説明できることがわかった。しかし、small scaleではこの初期ゆらぎでは説明できない大きさのゆらぎが存在する。このスケールではSZ効果によるSZパワースペクトルが優勢になると考えられて、Readhead et al. (2004)[4]ではシミュレーションを用いてSZパワースペクトルを計算し、small scaleでのデータ点を説明しようという試みがなされた。その結果が図中の緑とピンクの線である。緑線はバンド帯30GHz、ピンク線は150GHzであり、点線はmoving mesh hydrodynamics simulations、破線はsmooth particle hydrodynamicsというシミュレーションで計算されたものである。Readheadらは $\sigma_8 = 0.98$ であるとき、small scaleの観測データとシミュレーション結果が一致するという結論に至った。ここで、 $\sigma_8$ とは8Mpcでsmoothingしたときのゆらぎの大きさを表す値である。しかし、この $\sigma_8$ を観測から求めると、WMAP 7yrでは $\sigma_8 = 0.801 \pm 0.030$ 、同様の観測からも0.8前後の値が得られ、Readheadらの結果と矛盾することがわかった。

## 2 Magnetic fields and Sunyaev-Zel'dovich effect

今回紹介した Gopal & Roychowdhury (2010)[2] では観測から得られる  $\sigma_8 = 0.8$  という値を用いて、small scale のデータ点を SZ パワースペクトルで説明するという試みがなされた。 $\sigma_8$  はゆらぎの大きさを表すので、この値が小さくなるとパワースペクトルの大きさも小さくなってしまう。small scale のデータ点を説明するためには、SZ パワースペクトルを増大させる何らかの効果が必要である。

今回は磁場による SZ 効果への影響について考える。SZ 効果の大きさは CMB 光子が電子と何割ぶつかるか、どのくらい激しくぶつかるかによって決まり、すなわち銀河団中の電子の密度と温度に依存する。ここでは磁場によって銀河団中の密度がどのように変化するかを考える。

密度変化を考えるために、静水圧平衡の式を用いる。磁場の効果として式の左辺に角度平均したローレンツ力を加えると、

$$\frac{1}{\rho_B} \frac{dP_B(r)}{dr} = -\frac{GM(\leq r)}{r^2} + \langle F_r \rangle \quad (1)$$

となる。ここで  $\rho_B$  と  $P_B$  はそれぞれ磁場を加えた時の銀河団中の密度と圧力、 $G$  は重力定数、 $M(\leq r)$  は銀河団の半径  $r$  内の質量を表す。このような SZ 効果に磁場の影響を含めるという研究は以前から行われてきた。ローレンツ力は一般に磁気圧と磁気張力に分けられるが、先行研究 (Zhang, 2004[5]) では磁気圧だけが考えられていた。この場合、磁気圧により銀河団中のガスが外側へ押し出されてしまい、結果として SZ パワースペクトルが減少してしまう。今回は磁気圧だけでなく磁気張力も含めることで、より包括的な磁場のモデルを考える。

## 3 Magnetic field configurations and Lorentz force

ローレンツ力の向きと大きさは磁場の形に依存する。ここでは 4 つの磁場について考えられており、それぞれの磁場に対するローレンツ力を示したものが図 2 である。横軸は規格化した半径、縦軸がローレンツ力を表す。ローレンツ力が正では外向き、負では内向きに力が働くことを示す。今回はこれらの磁場の中でローレンツ力が内向きに最大となる radial という磁場を考える。この磁場を成分で表すと、 $\langle B_r \rangle = \langle B \rangle$ ,  $\langle B_\theta \rangle = \langle B_\phi \rangle = 0$  である。

## 4 Gas density profiles

磁場による密度の変化を図 3 に示した。横軸が規格化した半径、縦軸が密度変化を表し、ここでは異なる質量の 2 つの銀河団を比較する。実線と点線はそれぞれ磁場の強さが  $3\mu\text{G}$ 、 $4\mu\text{G}$  を表す。図から明らかのように、磁場の存在により銀河団内、特に中心部での密度が増加し、磁場が強くなるほどより増加することがわかる。また、2 つの図を比較すると質量の軽い銀河団の方が密度の増加が大きいことがわかる。これは質量が軽いほど重力が弱くなり、相対的に磁場の影響が強くなるためだと考えられる。

## 5 Compton y-parameter

密度変化を温度ゆらぎに焼き直すために、Compton y-parameter を用いる。Compton y-parameter とは SZ 効果の大きさを表す量で、次のように表される。

$$y = 2 \frac{\sigma_T}{m_e c^2} \int_0^R p_e(r) dl \quad (2)$$

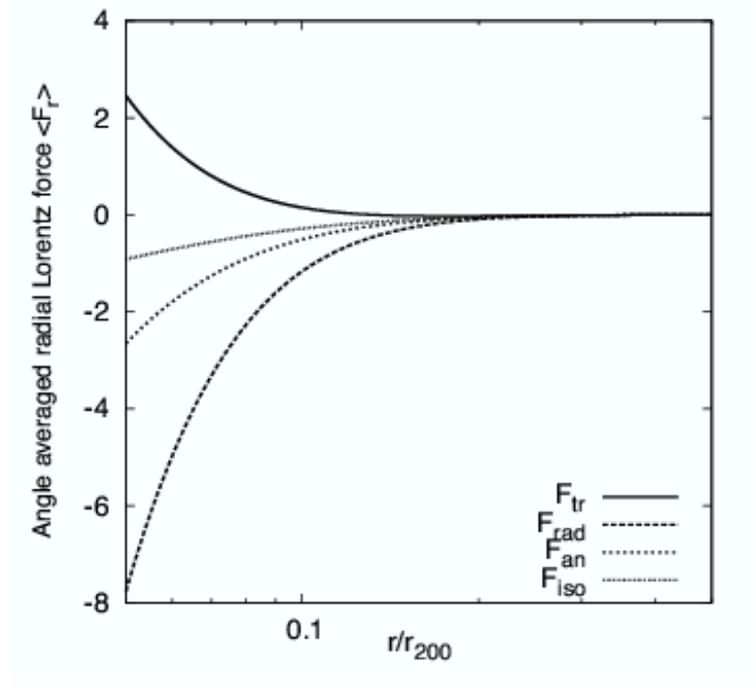


図2 Lorentz force

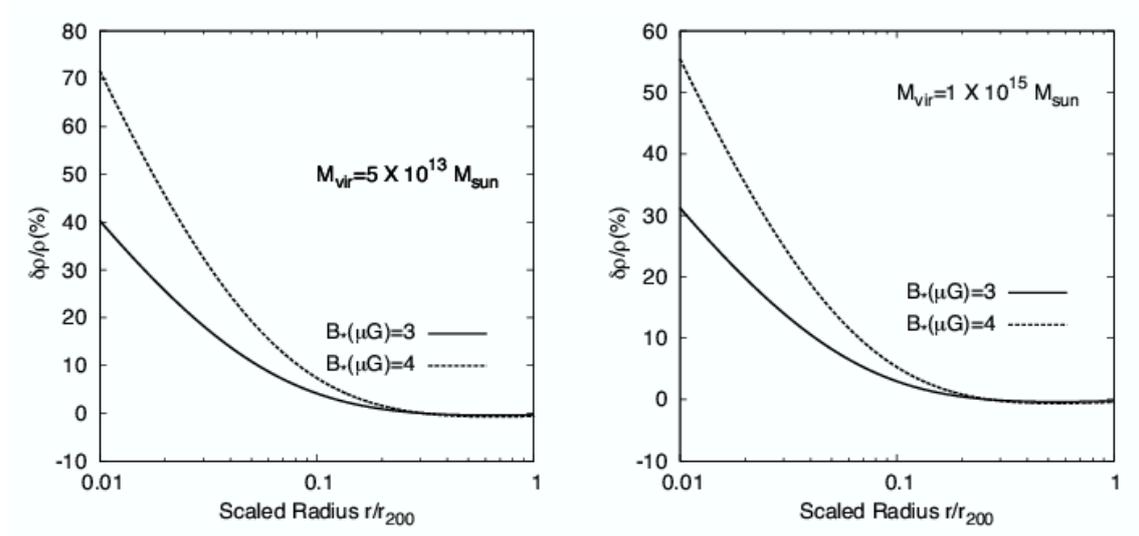


図3 Gas density profiles

ここで  $\sigma_T$  はトムソン散乱断面積、 $c$  は光速、 $m_e$  と  $p_e$  はそれぞれ電子の質量と圧力を表す。y-parameter と温度ゆらぎは次のような関係がある。

$$\frac{\Delta T(\theta)}{T_{CMB}} = g(x)y(\theta) \quad (3)$$

ここで  $g(x) \equiv x \coth(x/2) - 4$ 、 $x \equiv h\nu/k_B T_{CMB}$ 、 $T_{CMB} = 2.728$  である。Rayleigh-Jeans 近似では  $g(x) \approx -2$  となる。式 (3) の温度ゆらぎの 2 点相関をとることでパワースペクトルが求められる。

$$\left\langle \frac{\Delta T}{T_{CMB}}(\hat{n}) \frac{\Delta T}{T_{CMB}}(\hat{n} + \theta) \right\rangle = \frac{1}{4\pi} \sum_{\ell} (2\ell + 1) C_{\ell} P_{\ell}(\cos \theta) \quad (4)$$

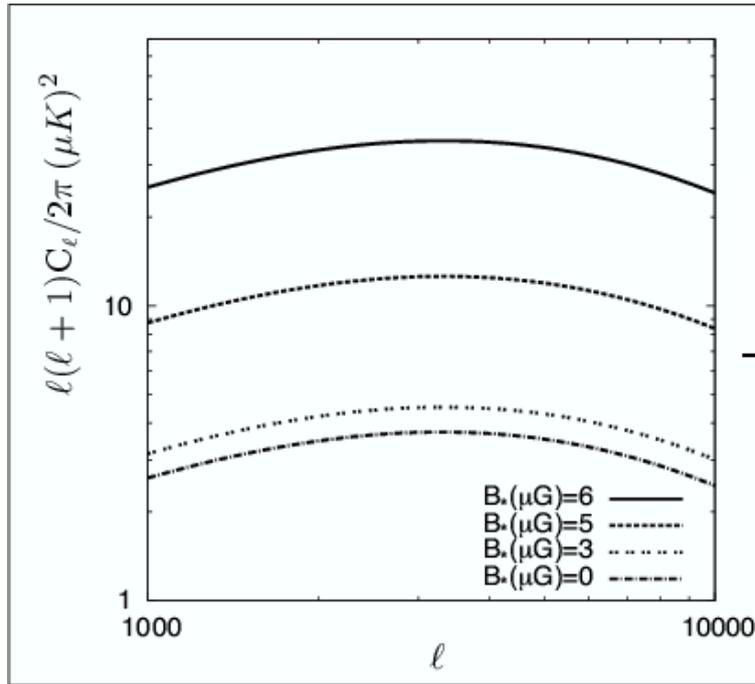


図4 SZ power spectrum

## 6 SZ power spectrum

磁場によるSZパワースペクトルの変化を示したものが図4である。横軸が multipole moment  $\ell$ 、縦軸がゆらぎの大きさを表す。密度の変化と同様に磁場の存在によりSZパワースペクトルが増加し、磁場が強くなるほどより増加することがわかる。

今回の結果を観測データと比較する。以前のCBI、BIMAによる観測では  $\ell \sim 3000$  で  $380\mu K^2$  という大きい値であったが、最近のより精度の高いAPEX-SZによる観測では  $\ell \sim 5000$  で  $33\mu K^2$  という結果が得られた。このAPEX-SZの結果と今回の磁場を含めたSZ効果を比較すると、銀河団中に  $7-8\mu G$  の磁場が必要であるということになる。今後のACT、SPT、Planckなどの観測ではより高い精度でSZパワースペクトルを測定するという計画が行われていて、これにより銀河団中の磁場により強い制限を与えることが出来ると期待されている。

SPTの観測結果が2011年に報告されていて(Keisler et al. 2011[6])、その結果が図5である。今までの観測データと比較するとかなりエラーが小さくなっていることがわかり、 $\ell \sim 3000$  でおよそ  $60\mu K^2$  であると読み取ることが出来る。詳しい解析をすることで、銀河団中の磁場を見積もることが出来るだろう。

## 7 Conclusion

CBI、BIMAなどのCMBのsmall scaleの観測では、初期ゆらぎでは説明できないパワーの超過が存在した。一般的なSZ効果では、観測からの宇宙論パラメータを用いるとパワーが足りなくなってしまうため、今回は磁場の効果を考慮することでパワースペクトルを増大させることを試みた。今までの研究では磁気圧だけが考えられていたが、これは銀河団中のガスを押し出してしまいSZパワースペクトルを減少させてしまうため、今回は磁気圧と磁気張力の両方を取り入れたより包括的なモデルを考えた。ローレンツ力が内向きに働くような磁場を考えると、銀河団内の密度が増加し、その結果SZパワースペクトルが増加することがわかった。今回の結果と観測を比較することで、銀河団中の磁場に対して制限をつけることが出来るだろう。

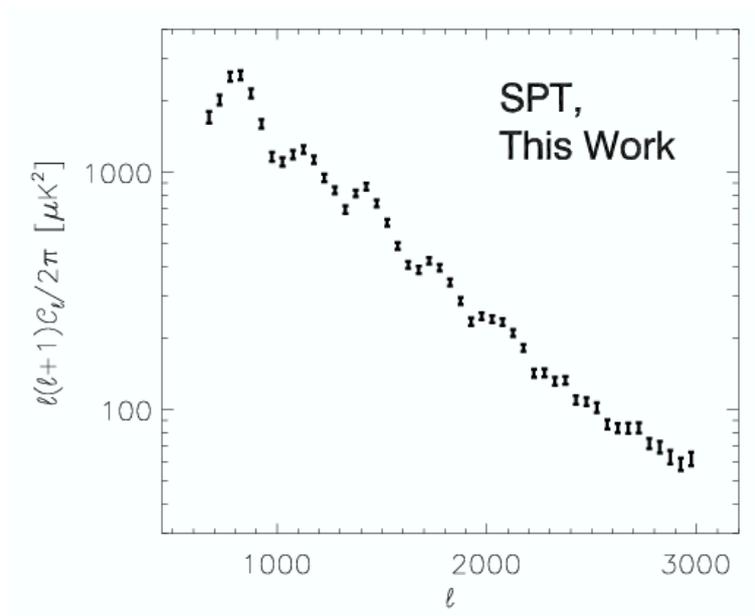


图5 SPT report

## 参考文献

- [1] Aghanim, Majumdar, Silk, *Repts. Prog. Phys.*, 71,066902, 2008
- [2] Gopal, Roychowdhury, *JCAP*, 6,11, 2010
- [3] Majumdar, *J.Phys : Conf. Ser.* 140, 01200, 2008
- [4] Readhead et al. *Astrophys. J.* 791, 498, 2004
- [5] Zhang, *Mon. Not. Royal Astr Soc*, 348, 1348, 2004
- [6] Keisler et al. arXiv:1105.3182 [astro-ph.CO]