

銀河団中の非熱的電子による Sunyaev-Zel'dovich効果

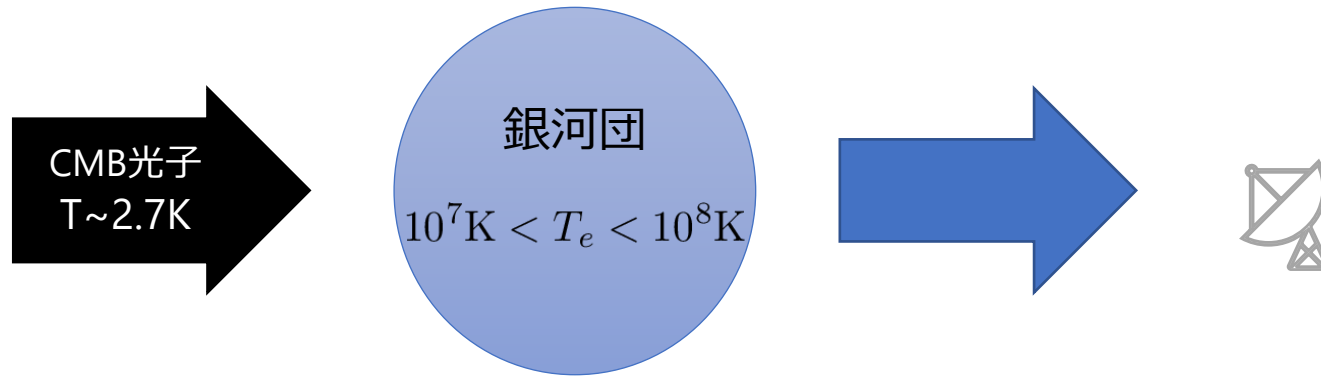
筑波大学 理工学群 物理学類 4年

宇宙理論研究室

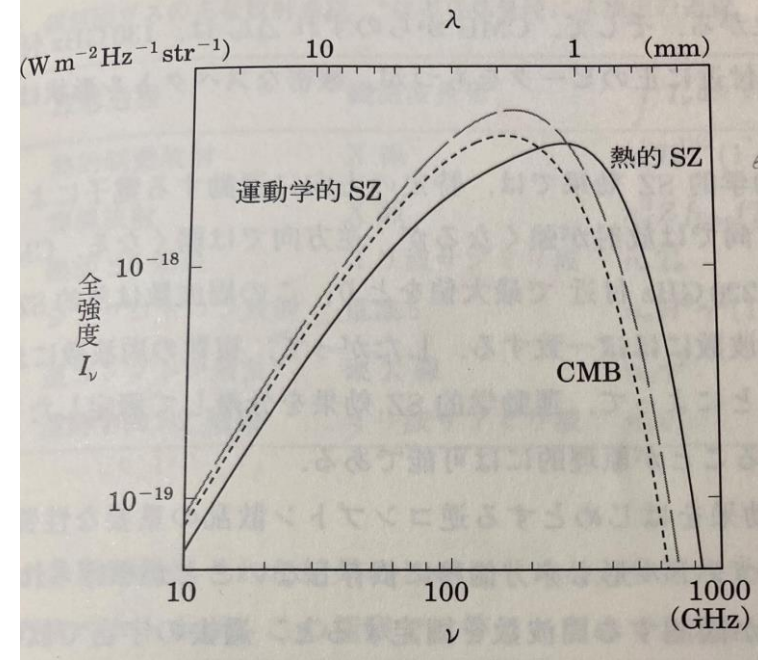
内田雄揮

共同研究者：吉川耕司（筑波大学）

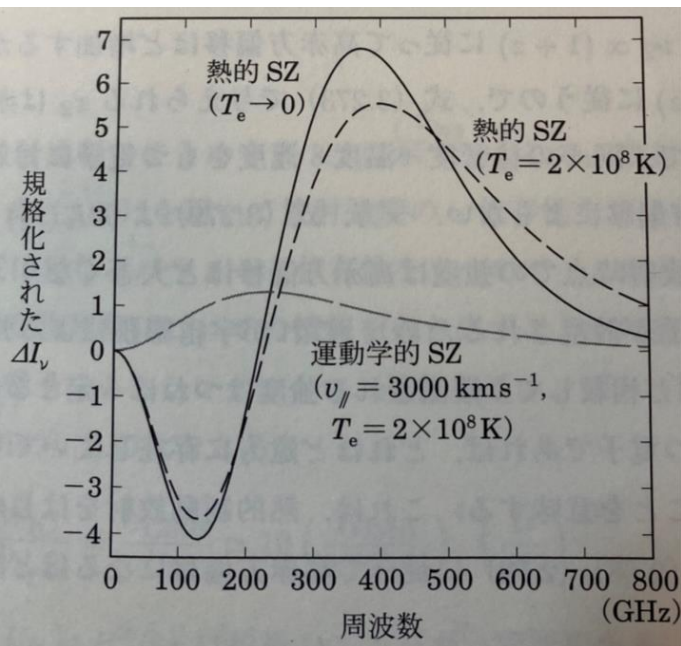
Sunyaev-Zel'dovich (SZ) 効果



銀河団中の高温ガスの電子とCMB光子の逆コンプトン散乱



CMB (点線) が熱的SZ効果 (実線) あるいは運動学的SZ効果 (破線) を受けた場合の全強度の振る舞い



CMBからのずれ

実線...非相対論的極限($T_e \rightarrow 0$)での熱的SZ効果
短破線...相対論的補正を取り入れた熱的SZ効果
長破線...運動学的SZ効果

- CMB光子のエネルギーが全体的に増加する。
- CMB光子のスペクトルが黒体放射から高エネルギー側に少しずれる

SZ効果

CMBからのずれ

実線...非相対論的極限($T_e \rightarrow 0$)での熱的SZ効果

短破線...相対論的補正を取り入れた熱的SZ効果

長破線...運動学的SZ効果

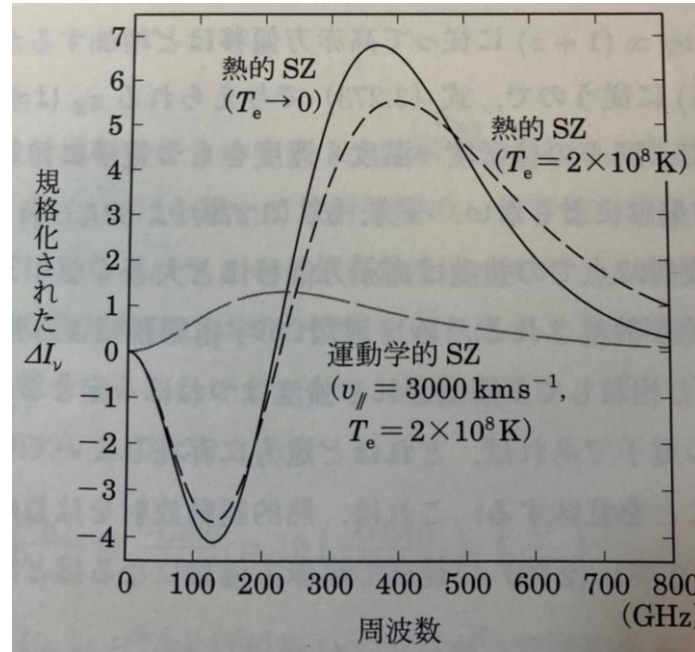
■ $\nu < 217\text{GHz}$ では強度が減少

■ $\nu > 217\text{GHz}$ では強度が増加

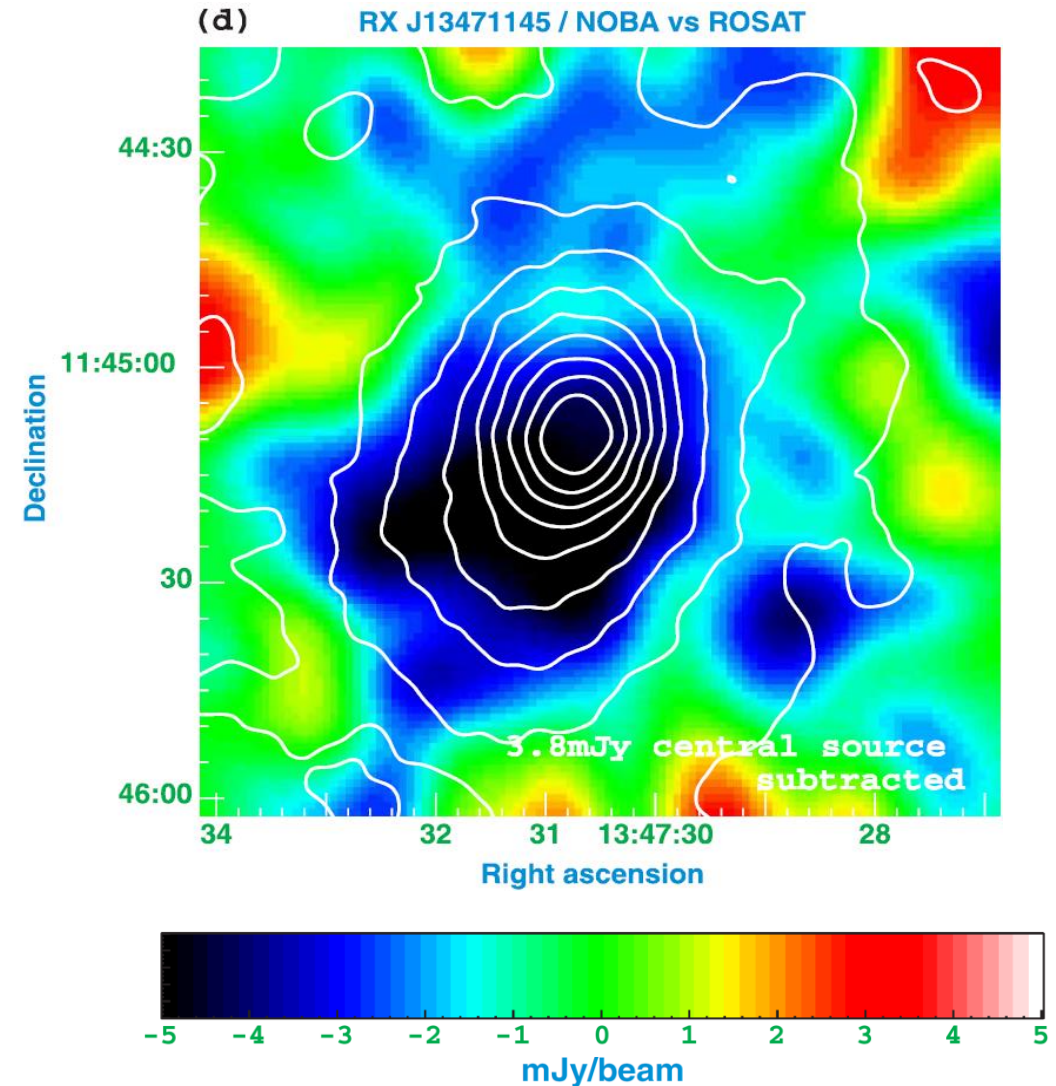
■ 放射強度や強度変化が起きる振動数が銀河団の赤方偏移到依存しない

■ 近年では銀河団ガスの重要な観測手段

(Planck, South Pole Telescope, ALMA, Green Bank Telescope)



RXJ1347-1145

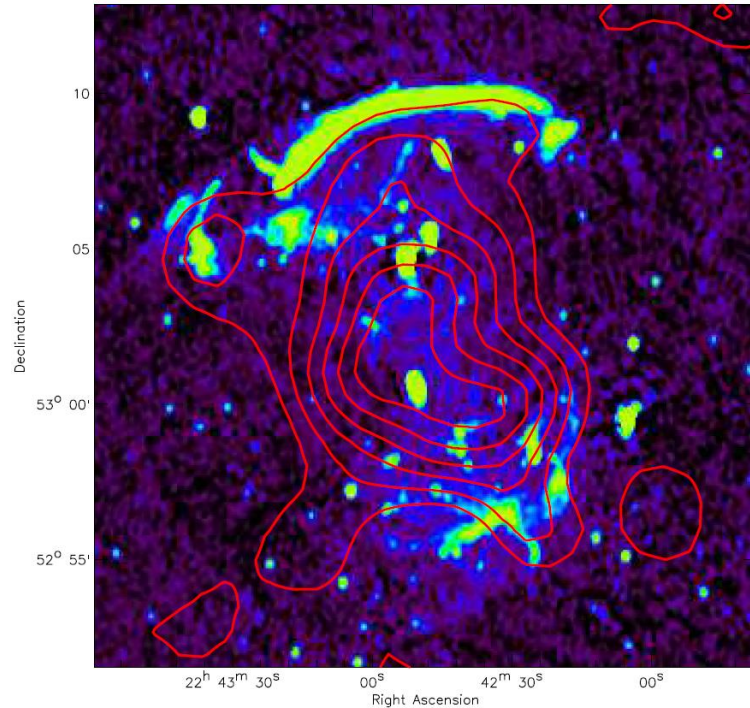


野辺山45m/NOBAによるSZ効果($\nu = 150\text{GHz}$)の観測例
等高線はROSAT/HRIで観測したX線表面輝度

Komatsu et al. (2001)

銀河団中の非熱的電子

CIZA J2242.8+5301



WSRTで観測した電波放射 ($\nu=1.4\text{GHz}$)
等高線はROSATで観測したX線放射
van Weeren, R. J., et al. (2010)

■ 電波レリック

銀河団中の衝撃波で加速された相対論的電子
(非熱的電子)によるシンクロトロン放射



非熱的電子の存在の傍証

■ 本研究の目的

- SZ効果を通じて非熱的電子の存在を確かめることができるか？
- 非熱的電子によるSZ効果とその観測可能性を調べる。

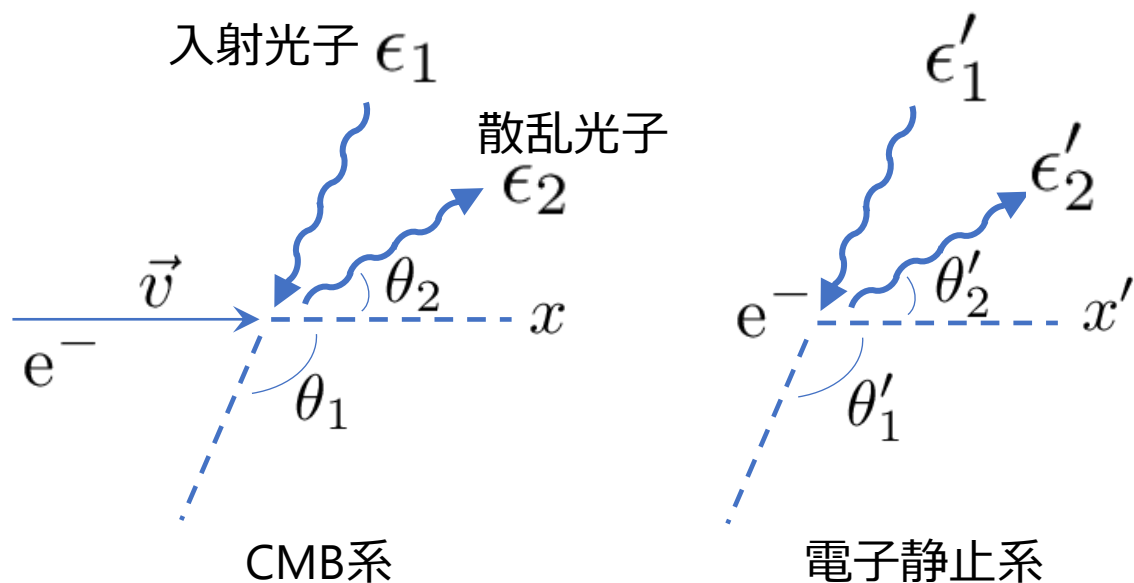
CMB光子の逆コンプトン散乱の定式化

■ 目標

非熱的電子とCMB光子の逆コンプトン散乱によるCMBのスペクトル変化を計算

■ convention:

- ' (プライム)つきの変数は電子静止系での物理量
- 添え字1 : 入射光子
- 添え字2 : 放射光子



■ CMB系と電子静止系間のローレンツ変換

$$\frac{\epsilon_j}{\epsilon'_j} = \gamma(1 + \beta \cos \theta'_j), \quad \cos \theta_j = \frac{\cos \theta'_j + \beta}{1 + \beta \cos \theta'_j}, \quad \varphi_j = \varphi'_j$$

$$\frac{\epsilon'_j}{\epsilon_j} = \gamma(1 - \beta \cos \theta_j), \quad \cos \theta'_j = \frac{\cos \theta_j - \beta}{1 - \beta \cos \theta_j}, \quad \varphi'_j = \varphi_j$$

(j = 1, 2)

■ 銀河団でのThomson散乱の典型的な光学的厚み

$$\tau_e = \int n_e \sigma_T dl = 2 \times 10^{-3} \left(\frac{n_e}{10^{-3} \text{cm}^{-3}} \right) \left(\frac{L}{\text{Mpc}} \right)$$

✓ 光学的厚みは十分小さいので多重散乱は考慮しなくてもOK

✓ 銀河団内での散乱は1回だけと仮定してよい。

CMB光子の逆コンプトン散乱の定式化

■ 電子1個の散乱によるCMB光子のスペクトル変化

- ✓ CMB系での入射光子のスペクトル

$$\frac{d^2 W_{\text{in}}}{dt d\nu_2} = 4\pi\sigma_{\text{T}} I(\nu_2)$$

- ✓ CMB系での放射光子のスペクトル

電子静止系で単位時間に散乱される光子数

$$\frac{d^4 N'_{\text{out}}}{dt' d\Omega'_2 d\Omega'_1 d\nu'_1} = \frac{d\sigma}{d\Omega'_2} \frac{I'_\nu(\nu'_1, \Omega'_1)}{h\nu'_1}$$

これをCMB系に変換して

$$\begin{aligned} \frac{d^4 N_{\text{out}}}{dt d\Omega'_2 d\Omega'_1 d\nu_1} &= \frac{d\sigma}{d\Omega'_2} \left[\frac{I_\nu(\nu_1)}{h\nu_1} \frac{\nu'_1{}^3}{\nu_1^3} \frac{h\nu_1}{h\nu'_1} \right] \frac{dN_{\text{out}}}{dN'_{\text{out}}} \frac{dt'}{dt} \frac{d\nu'_1}{d\nu_1} \\ &= \frac{d\sigma}{d\Omega'_2} \frac{I_\nu(\nu_1)}{h\nu_1} \frac{1}{\gamma^4(1 + \beta \cos \theta'_1)^3} \\ &\quad \parallel \\ \frac{d\sigma_{\text{T}}}{d\Omega'_2} &= \frac{3}{16\pi} \sigma_{\text{T}} (1 + \cos^2 \Theta'_{12}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 W_{\text{out}}}{dt d\nu_2} &= h\nu_2 \int d\Omega'_2 \int d\Omega'_1 \underbrace{\frac{d^4 N_{\text{out}}}{dt d\Omega'_2 d\Omega'_1 d\nu_1}}_{\text{orange wavy}} \frac{d\nu_1}{d\nu_2} \Big|_{\nu_1=\nu_2/\xi} \\ &= \int d\Omega'_2 \int d\Omega'_1 4\pi\sigma_{\text{T}} I_\nu(\nu_1) \frac{P_{\text{T}}(\theta'_1, \theta'_2)}{2\gamma^4(1 + \beta \cos \theta'_1)^3} \Big|_{\nu_1=\nu_2/\xi} \\ &= \int d\xi 4\pi\sigma_{\text{T}} I_\nu \left(\frac{\nu_2}{\xi} \right) \Big|_{\nu_1=\nu_2/\xi} P_{\text{IC}}(\xi, \beta) \end{aligned}$$

各光子の周波数がξ倍に変化する遷移確率

- ✓ 正味のスペクトル

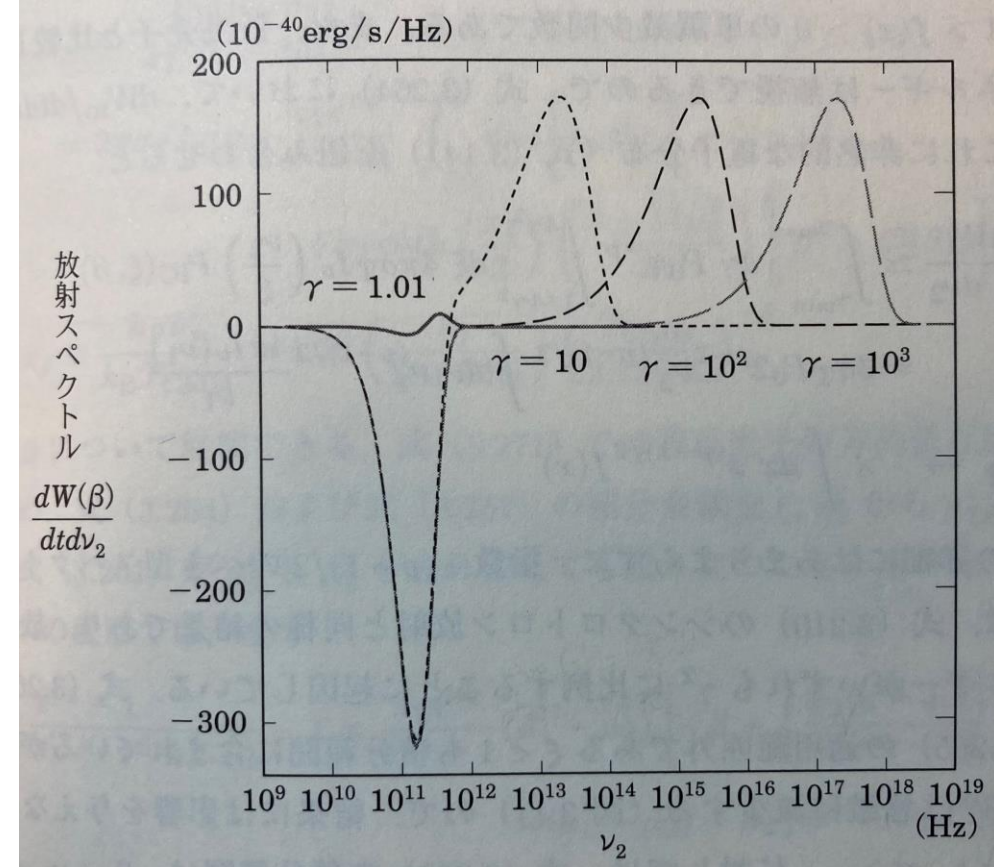
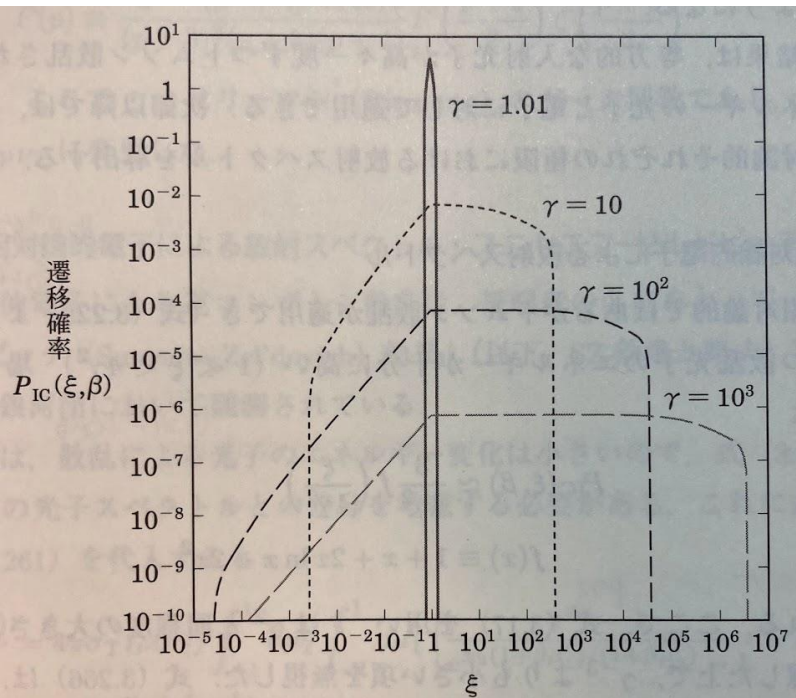
$$\int d\xi P_{\text{IC}}(\xi, \beta) = \int d\Omega'_2 \int d\Omega'_1 \frac{P_{\text{T}}(\theta'_1, \theta'_2)}{2\gamma^4(1 + \beta \cos \theta'_1)^3} = 1$$

$$\begin{aligned} \longrightarrow \frac{d^2 W_{\text{IC}}}{dt d\nu_2} &= \frac{d^2 W_{\text{out}}}{dt d\nu_2} - \frac{d^2 W_{\text{in}}}{dt d\nu_2} \\ &= 4\pi\sigma_{\text{T}} \int d\xi [I(\nu_2/\xi) - I(\nu_2)] P_{\text{IC}}(\xi, \beta) \end{aligned}$$

逆コンプトン散乱のスペクトル

- 正のピークは γ が大きいほど右へ移る
- 負のピークは γ に依らない
- γ が大きな非熱的電子によるスペクトルの方が大きい

1つの電子による逆コンプトン散乱の遷移確率



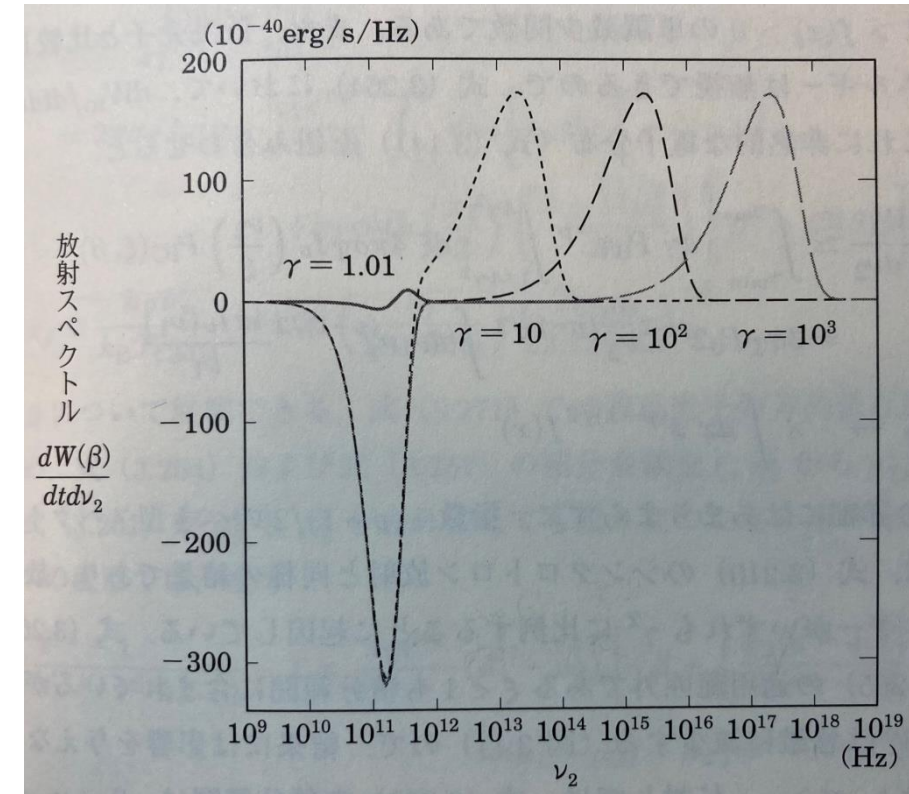
1つの電子による逆コンプトン散乱の放射スペクトル

□ 実際に銀河団を観測した際に得られるスペクトルとして推測されること

- 正のピークは現れず、高周波数側ではなだらか
- 負のピークは非常に大きなものになる

非熱的電子によるSZ効果の観測可能性

- 正のピークは観測するのは困難
 - なめらかなスペクトル形状
 - background放射
 - foreground放射
- 負のピークを手掛かりにする



- 具体的にどれくらいの強さで非熱的SZ効果が観測できるのかを計算
 - マクスウェル分布（熱的分布） + ベキ乗分布（非熱的分布）の分布関数

1つの電子による逆コンプトン散乱の放射スペクトル

まとめと展望

■ 熱的電子 + 非熱的電子によるSZ効果がどう観測されるのか

■ 理論的な予測として

- 銀河団のどこを観測すれば良いのか
- それはどのように観測されるのか

■ その観測可能性

■ 電波レリック領域をSZ効果について観測した場合のスペクトル計算

- マクスウェル分布（熱的分布） + ベキ乗分布（非熱的分布）の分布関数を用いてSZ効果のスペクトルの算出を行い、非熱的成分の寄与について調べる。

参考文献

- 日本評論社 新天文学ライブラリー7 北山哲 「銀河団」