

CMB温度の測定

課題研究P1 CMB班

伊藤優希 奥寺隆彦 竹下颯馬 佐藤充伎

お品書き©

1.イントロダクション

2.実験原理

3.実験装置

4.実験方法

5.解析

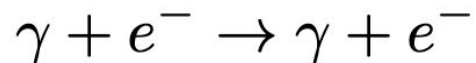
6.考察

7.結論

1. イントロダクション

CMBについて

初期宇宙 (big bangから38万年後 ($z=1100$) 以前) では次のような反応



Thomson散乱



Double Compton散乱

によって、photonが熱平衡状態の分布になっていた。

1. イントロダクション

$z=1100$ の時点で、photonは自由に飛行できるようになり、
温度 $T_{\text{early}}(\sim 3000[\text{K}])$ の黒体輻射として放射されるようになった

観測する際、赤方偏移によって波長 λ はスケール因子 $a(t)$ 倍されるので、
伴ってエネルギー E は $1/a(t)$ 倍される

黒体輻射の式 $I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$ から観測される温度は $a(t)T_{\text{early}}$

宇宙論の関係式 $1 + z = \frac{1}{a}$ を用いると

$$T = \frac{T_{\text{early}}}{1 + z} \approx 2.7$$

1. イントロダクション

実験の目的

CMB温度を測定し、 2.7[K] となっているのか調べる

2.実験原理

2-1 CMBについて

・1自由度当たりのエネルギー: $\sim k_B T$

・エネルギー等分配則から

$$P_{cmb}(\nu) = G_{gain} k_B T d\nu$$

2. 実験原理

2-2 装置内の回路によるノイズ

回路内で発生した熱ノイズが最終的に観測されるパワー強度に影響を与える

$$P_{rx} = G(\nu)T_{rx}$$

T_{rx} はノイズ温度という

2. 実験原理

i : G、Trxについて

異なる2つの温度 T_1 、 T_2 を持つ黒体から二つのPを測定する

$$P_1 = G(\nu)(T_1 + T_{rx})$$

$$P_2 = G(\nu)(T_2 + T_{rx})$$

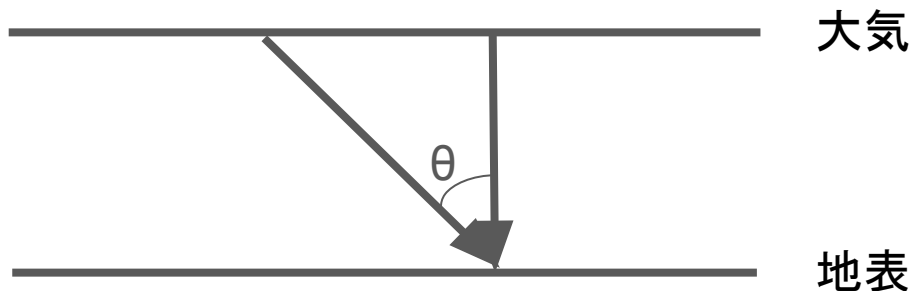
これより、各周波数ごとに

$$G = \frac{P_1 - P_2}{T_1 - T_2}$$

$$T_{rx} = \frac{P_2 T_1 - P_1 T_2}{P_1 - P_2}$$

2. 実験原理

2-3 大気からの放射によるノイズ



$\theta=0$ を基準 ($P_{atm}=GT_{atm}$) として一般の θ では

$$P_{atm} = G(\nu) \frac{T_{atm}}{\cos \theta}$$

2. 実験原理

結局、得られるデータ P_{obs} はこれらの合計

$$P(\nu, \theta) = G(\nu) \left[\frac{T_{atm}}{\cos \theta} + T_{cmb} + T_{rx} \right]$$

ここからどのようにして、 m 、 T_{cmb} 、 T_{atm} 、 T_{rx} を求めるか？

2. 実験原理

ii : T_{cmb} 、 T_{atm} について

i で求めた G 、 T_{rx} から

$$T_{sum} := \frac{P_{obs}}{G(\nu)} - T_{rx} = \frac{T_{atm}}{\cos \theta} + T_{cmb}$$

を計算して(※この時点で右辺の ν 依存性は消えている)、
各 $1/\cos\theta$ ごとに T_{sum} をプロットして回帰直線を求める。

→ y 切片として T_{cmb} 、傾きとして T_{atm} が求まる。

3.実験装置

使用した器具

- ・自作アンテナ(後で説明)
- ・スペクトルアナライザ
- ・携帯電源
- ・直流安定化電源
- ・発泡スチロール箱
- ・液体窒素、ドライアイス
- ・記録用pc



実際の測定の様子
(写っているのは協力してくださったTAの笠井さん)

3.実験装置：自作アンテナ

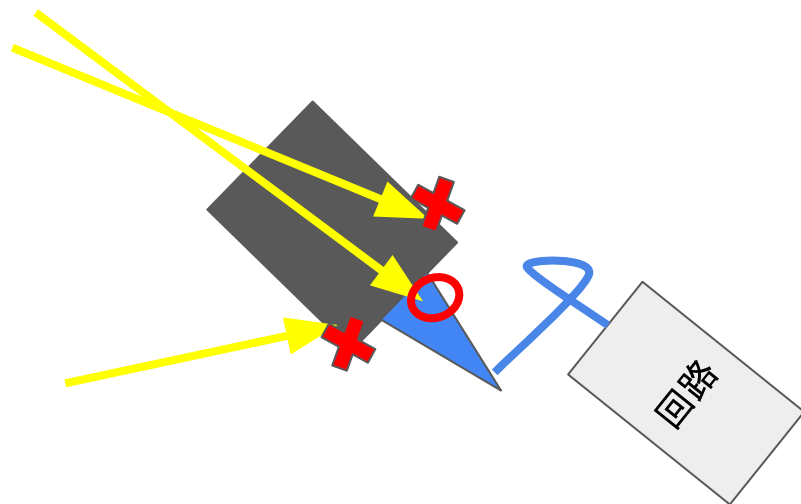
主に使用したもの

- ・ミスミのアルミフレーム一式
- ・電波吸収体
- ・アンテナ
- ・増幅回路(後で説明)

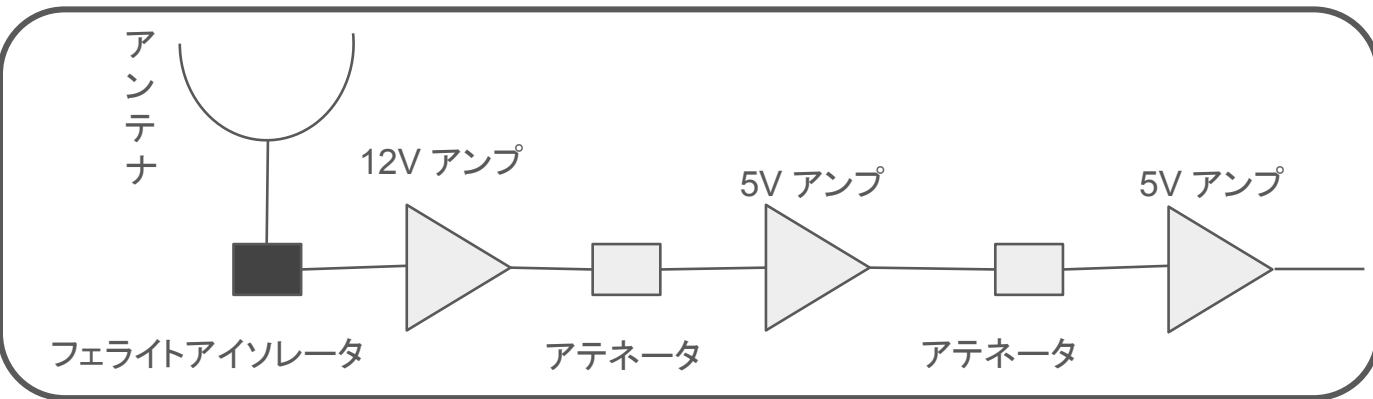


3.実験装置：自作アンテナ

- ・電波吸収体で覆うことで指向性をあげ、地面からの反射なども抑える
- ・アンテナ-回路間のケーブルを变形させずに角度を変えられるので、角度をかえることによるスタンディング変化を抑える
- ・角度をある程度正確に測れる



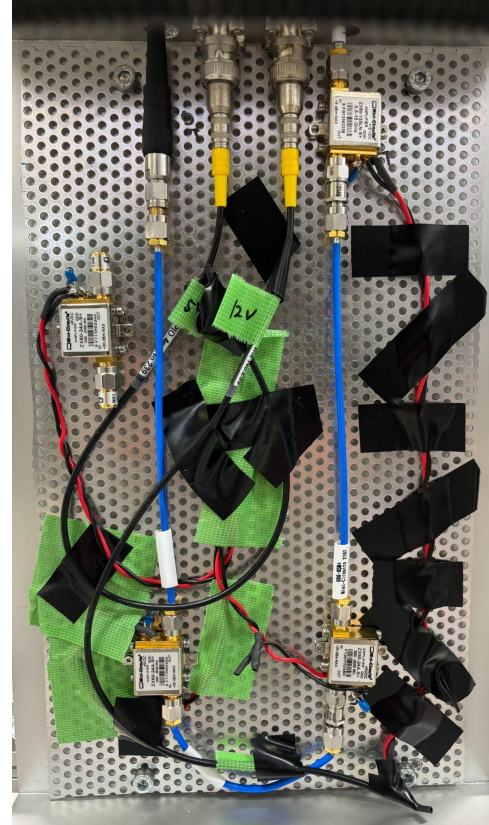
3.実験装置：増幅回路



フェライトアイソレータやアテネータは反射した電波を減衰させるため

- ・測定振動数範囲 8~18 GHz
- ・合計ゲイン 60 dB
- ・ノイズ温度 234K(10GHzだと。高周波になるほど大きくなる)

実際のノイズ温度はコードによる減衰により2倍され、さらにバツフルにつかた電波吸収体により約300Kされおおよそ800Kが理論値となる



3.実験装置：回路箱

- ・アルミ箱

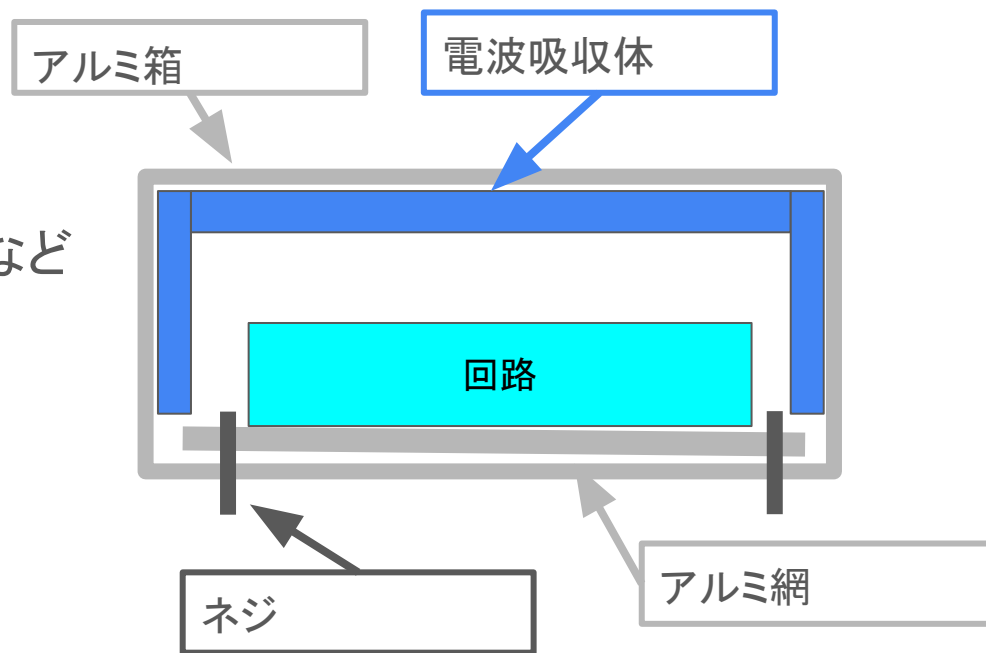
回路からアンテナ、外部から回路へなどノイズが入らないように

- ・アルミ網、ネジ

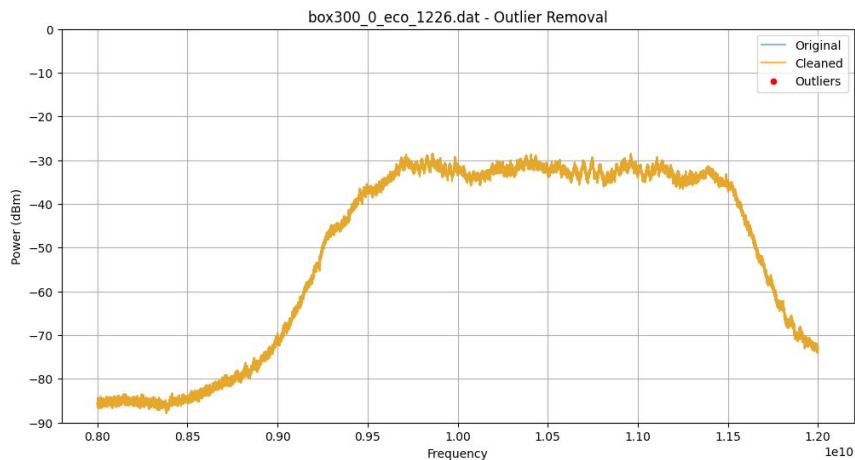
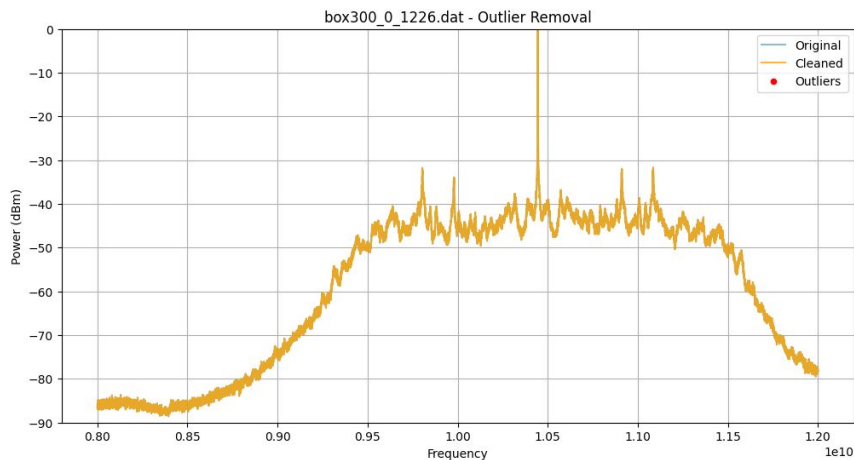
回路のグラウンドをアルミ箱にする

- ・電波吸収体

回路から漏れた電波がアルミ箱内で反射、増幅などしないように



3.実験装置：回路箱の電波吸収体の効果



左が電波吸収体なし、右があり(縦軸 電力(dBm)、横軸 振動数)

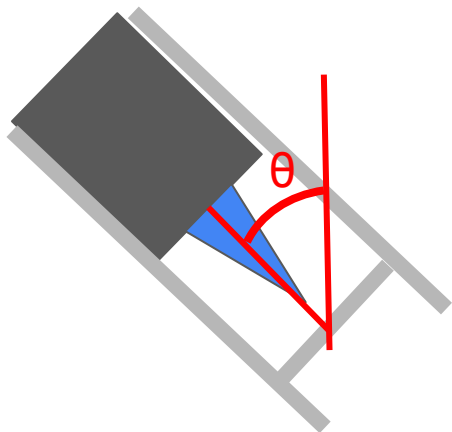
左であった鋭いスタンディングがなくなり、出力も大幅(Wで一桁くらい)にあがった

アルミ箱内部で回路から漏れた電波が激しく反射し、回路にノイズとして入ったりアンプのエネルギーを散逸させていたと考えられる

3.実験装置：アンテナの使い方

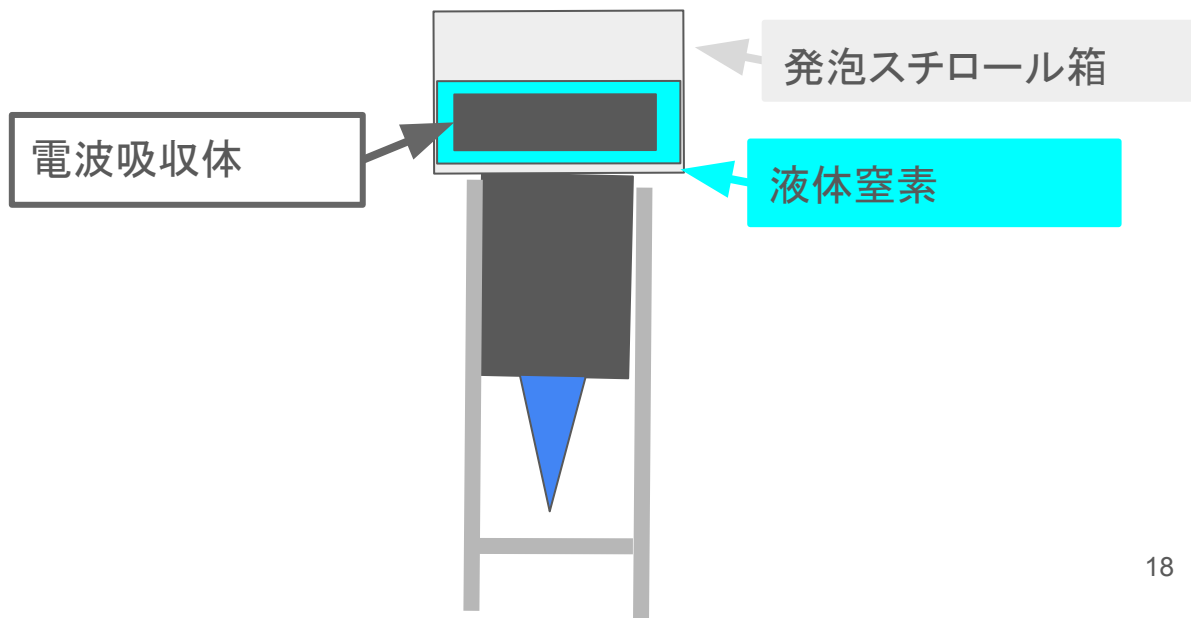
空を測定するとき

図のような角 θ を測り(スマホアプリを使った)測定



温度校正をするとき

図のように電波吸収体を底に詰めた発泡スチロール箱に液体窒素を入れるor入れない、またはドライアイスを敷き詰めるなどして図のようにして測定



4. 実験方法

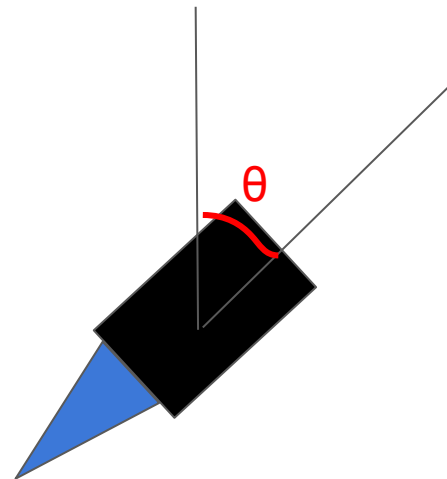
測定した条件は以下の通り

場所: 理学部4号館屋上

- ・外気温(以下"out"): 8.0 ± 0.3 °C
- ・液体窒素("N2"): -195.9 °C
- ・天空("sky"): 上空の大気の温度

skyは $\theta=0^\circ$ 、 20° 、 35° 、 50° 、 60°

out, N2は $\theta=0^\circ$ のみ 2セットとった(データA、データB)

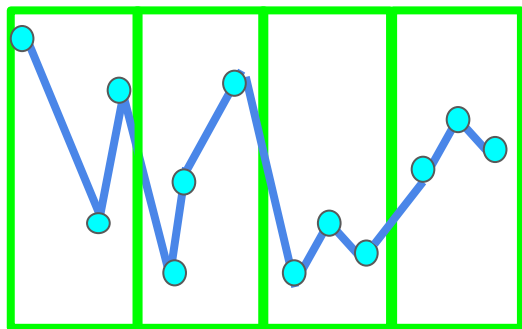


5.解析

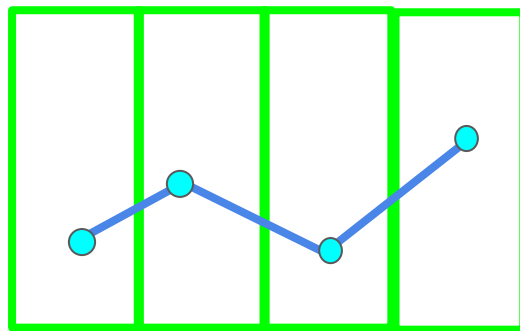
さまざまなchunkサイズで生データをブロック的にわけ、各ブロックの中央値をとることでデータを粗視化(外れ値に囚われなくなる)

※Tsumは周波数方向の加重平均をとる。

例 chunkサイズ 3



生データ

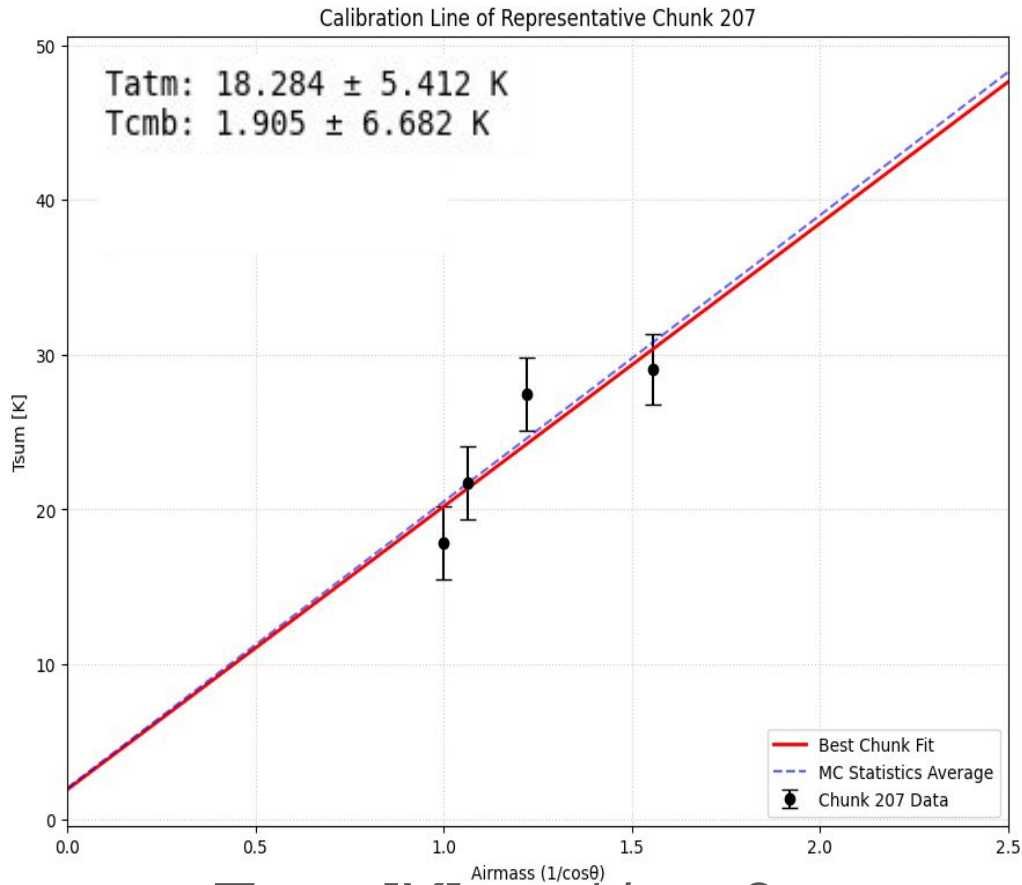


粗視化データ

5.解析: データA

$$T_{sum} = \frac{T_{atm}}{\cos \theta} + T_{cmb}$$

$$T_{atm} = 18.3 \pm 5.4 \text{ [K]}$$
$$T_{cmb} = 1.9 \pm 6.7 \text{ [K]}$$

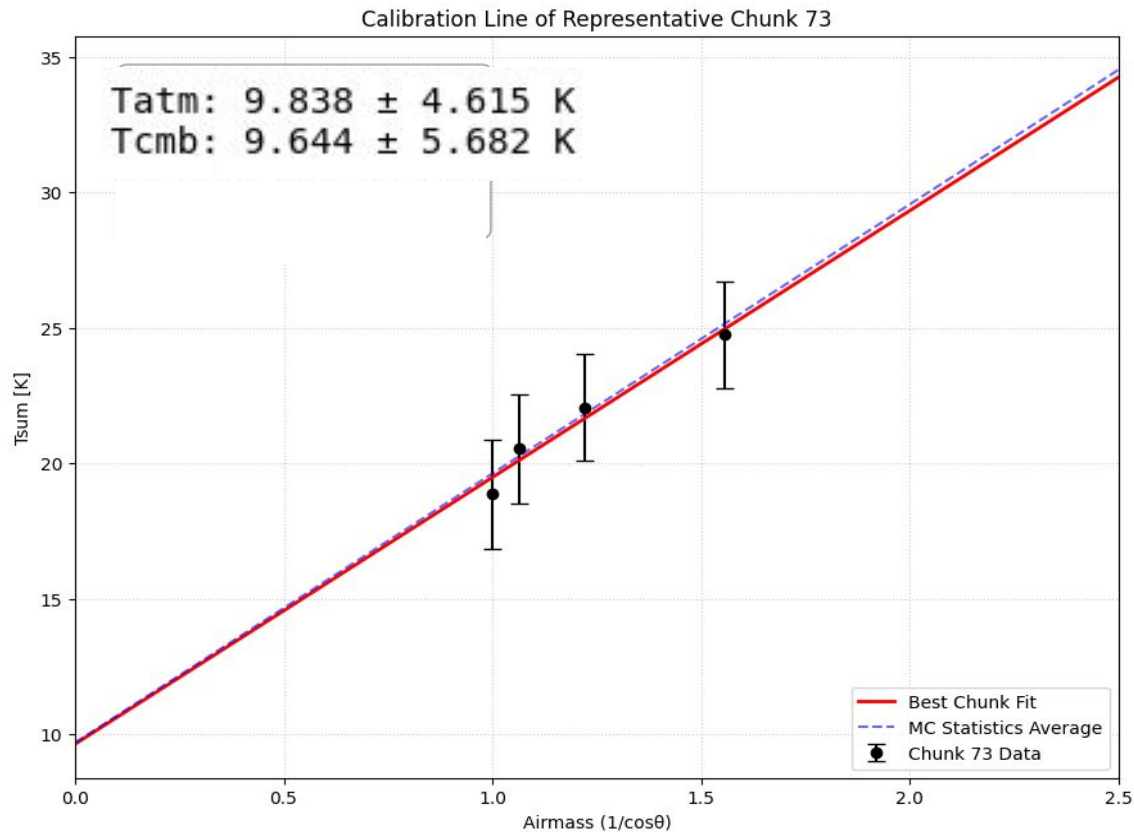


Tsum[K] vs 1/cosθ

5.解析: データB

$$T_{sum} = \frac{T_{atm}}{\cos \theta} + T_{cmb}$$

$$T_{atm} = 9.8 \pm 4.6 \text{ [K]}$$
$$T_{cmb} = 9.6 \pm 5.7 \text{ [K]}$$



$T_{sum} \text{ [K]} \text{ vs } 1/\cos\theta$

5.解析:T_{atm}、T_{cmb}の決定

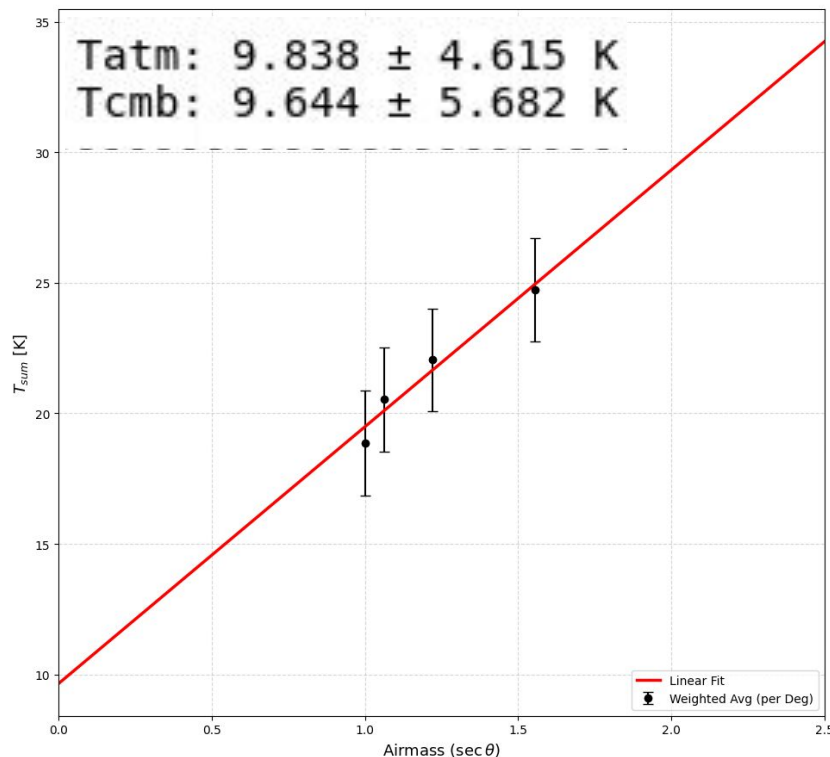
★最終的な解析結果:A、Bで加重平均

$$T_{atm} = 13.4 \pm 3.5 \text{ [K]}$$

$$T_{cmb} = 6.4 \pm 4.3 \text{ [K]}$$

しかし、理論値は

$$T_{cmb} = 2.72548 \pm 0.00057 \text{ [K]}$$



データBにおけるchunkサイズ73の
T_{sum}[K] vs 1/cosθ

6. 考察: 理想値との差、AB間の差の原因

- ・アンテナの回転による測定機器の精度の変化(ケーブルの形状変化など)

★同じ50°のskyを異なる
タイミングで測定したときの
Power[mW] vs ν [1e10Hz]
(粗視化後)



7.結論

- ・2回の測定の加重平均値： $T_{\text{cmb}} = 6.4 \pm 4.3$ [K]
- ・COBE実験(D.J Fixsen et al.)の測定値： $T_{\text{cmb}} = 2.72548 \pm 0.00057$ [K]
- ・本測定の誤差の大きさや、加重平均値とCOBE実験値との差は、測定に伴うアンテナの回転操作による測定機器の精度のずれから生じたと考えられる。

謝辞

本実験を進めるにあたり、1年間にわたりご指導いただいた田島先生、鈴木先生、TAの笠井さん、藤本さんには、実験ゼミおよび実験準備の段階から多くの有益なご助言をいただきました。

また、実験装置の準備および測定・解析において多大なご協力をいただきました。特に寒冷な環境の中での測定作業にもご尽力いただきましたこと、この場をお借りして深く感謝申し上げます。

参考文献

1. T. Tyson, B. Barnett, and S. Hilbrand,
“Measurement of the Cosmic Microwave Background Radiation at 19 GHz,”
PHY 122 Laboratory Manual, Version 1.8 (April 2019).
2. 岡崎 凜太郎, 壽 強佳, 埴村 圭吾, “宇宙背景放射が2.7 Kであることの検証実験,”
京都大学 2022年度 P1実験レポート.
3. Fixsen, D., The Temperature of the Cosmic Microwave Background. The
Astrophysical Journal 707, no. 2 (2009): 916-920. arXiv:0911.1955

物置

R^2	データ数		
0.1	151	0.5	147
0.2	151	0.6	112
0.3	150	0.7	39
0.4	150	0.8	6
		0.9	0

R^2	データ数		
0.1	151	0.5	138
0.2	150	0.6	132
0.3	149	0.7	123
0.4	144	0.8	103
		0.9	73

2.実験原理

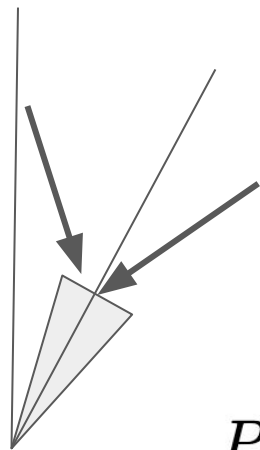
2-1 CMBについて

T[K]の黒体放射のスペクトル分布

$$I(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

低振動数領域:

$$I(\nu) \approx \frac{2kT\nu^2}{c^2}$$



$$dP_{cmb} = G_{gain} I(\nu) A_e d\Omega d\nu$$

A_e :アンテナの実効面積

全領域積分をして、ある周波数におけるパワー強度
は $A_e = \frac{G_{ant} c^2}{4\pi \nu^2}$

$$P_{cmb} = \int_{S^2} dP_{cmb} = G_{gain}(\nu) \frac{kT}{4\pi} \left(\int_{S^2} G_{ant}(\theta, \phi) d\Omega \right) d\nu$$

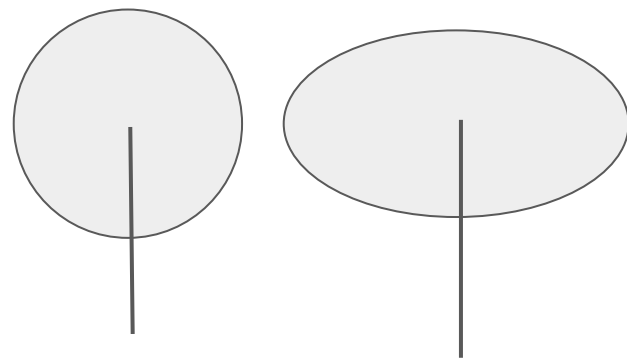
2. 実験原理

2-1 CMBについて

アンテナ利得 G_{ant} は $\int_{S^2} G_{ant}(\theta, \phi) d\Omega = 4\pi$ となるので

CMBを装置で受け取った際の最終的なパワー強度

$$P_{cmb}(\nu) = G_{gain} kT d\nu$$



5.解析:手法

粗視化したデータで2. 実験原理 にあるように角周波数でG、Trxを求め、

$$T_{sum}(v, \theta) = (T_{atm}/\cos\theta + T_{cmb}) \text{を求める(①)}$$

→以下の条件でデータが信用できる周波数の $T_{sum}(v, \theta)$ のみとって、誤差を重みに加重平均して $T_{sum}(\theta)$ に(②)

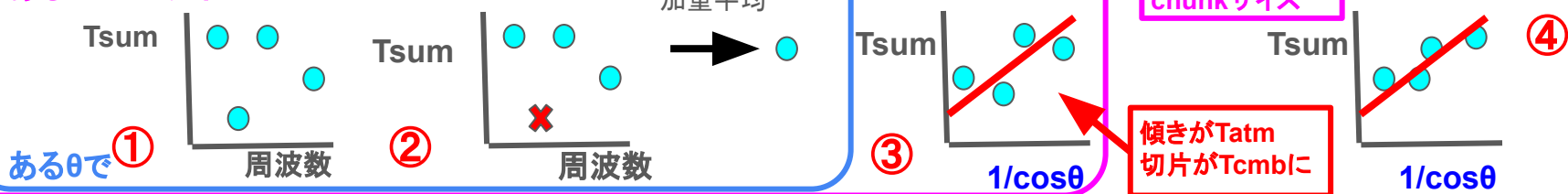
・ノイズ温度 <1000 K

・ T_{sum} のうち平均から 3σ 以内

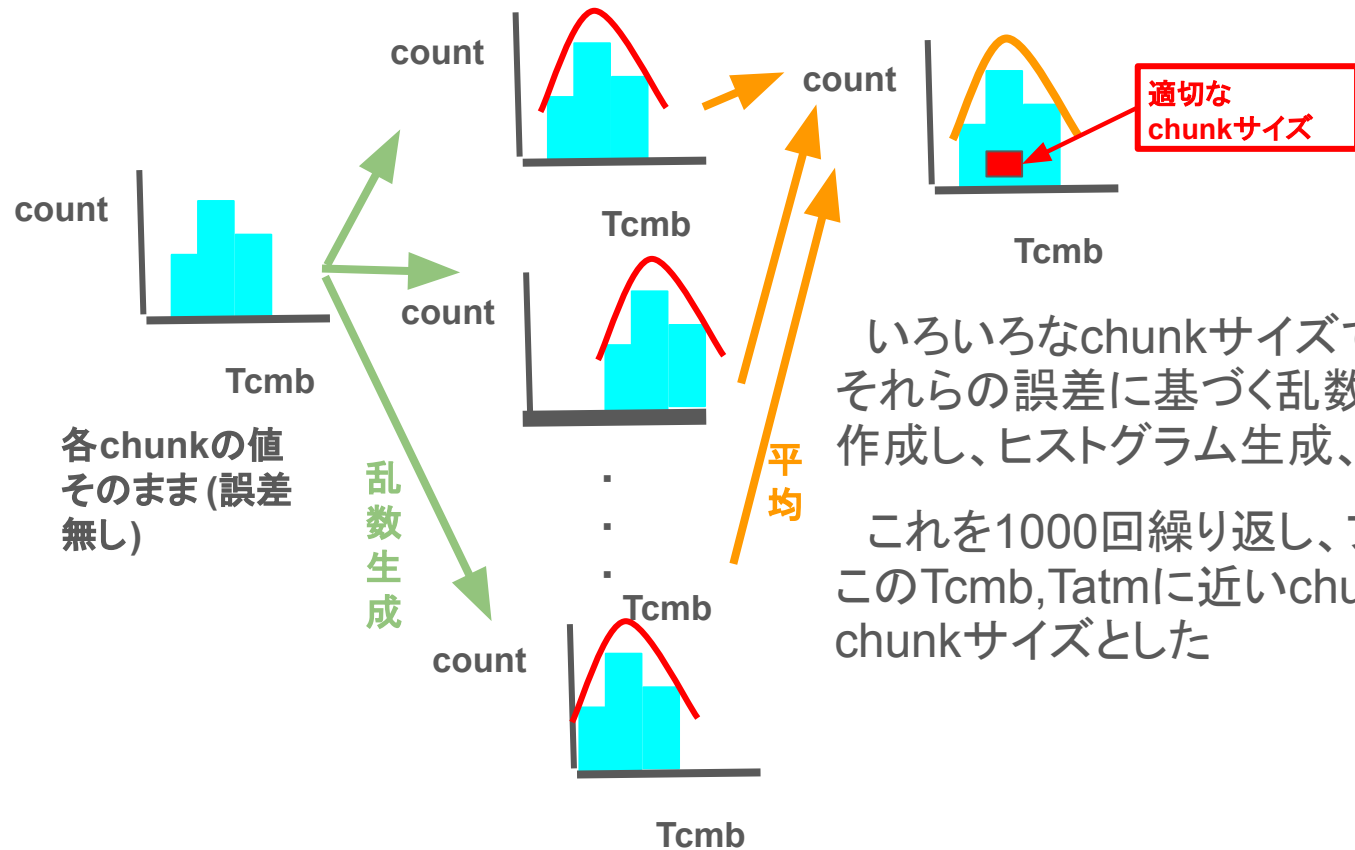
→すべての θ でそれを行い、直線近似して T_{atm} 、 T_{cmb} を求める(③)

→いろいろなchunkサイズでこれを行い、ある方法(後述)で適切なchunkサイズを求めて、その T_{cmb} 、 T_{atm} を最終結果とする(④)

あるchunkサイズで



5.解析:適切なchunkサイズの選び方



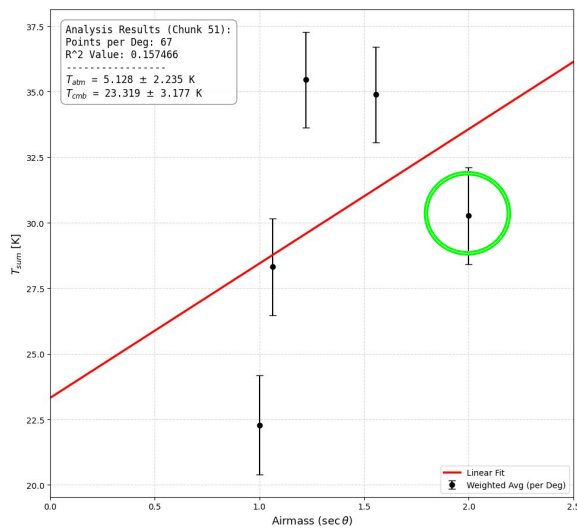
いろいろなchunkサイズで求めた T_{atm} , T_{cmb} に、それらの誤差に基づく乱数を足した仮想データを作成し、ヒストグラム生成、ガウスフィット

これを1000回繰り返し、フィット値の平均を求め、この T_{cmb} , T_{atm} に近いchunkサイズを適切なchunkサイズとした

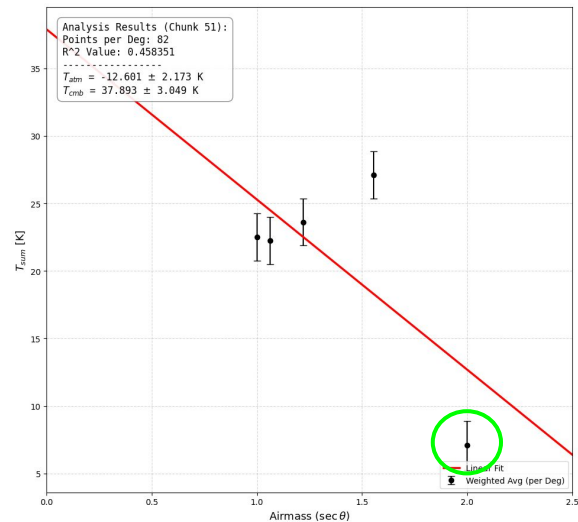
5.解析：注意など

- ・TsumのデータはR^2値(直線近似精度のよさ)でフィルタリングする。
- ・ $\theta = 60^\circ$ では、地面からの放射など、目的外の電波を拾ってしまう可能性があったので、解析から除外する。

★ $\theta = 60^\circ$ でTsumが
大幅低下のおかしなグラフ→
データA、B両方で見られた。



データA



データB

6. 考察: 理想値との差、AB間の差の原因

★ 比較用

sky4の0°と50°



6. 考察：理想値との差、AB間の差の原因

・細かい波立つノイズを抑えられなかったことも大きい

★先のデータの粗視化なしバージョン

