

宇宙背景放射が 2.7 K であることの検証実験

2022 年度 P1

岡崎 凜太郎

壽 強佳

埴村 圭吾

2023 年 4 月 6 日

目次

1	実験の背景・目的	2
1.1	実験目的	2
1.2	実験背景	2
2	実験原理	3
2.1	実験装置の概要	3
2.2	信号の増幅	3
2.3	検波方法	3
2.4	ノイズの処理	4
3	実験	5
3.1	実験器具	5
3.2	ダイオードの特性	6
3.3	全体回路の概略図	6
3.4	実験器具の全体図	7
4	データ解析と結果	8
4.1	データ取得について: T_{CMB} の算出	8
4.2	データ取得について:誤差処理	10
4.3	データ取得について: T_{CMB} の統計処理	11
5	考察	12
5.1	予想値 3 K を大きく超える T_{CMB} 実験値	12
5.2	アンプの熱によるノイズ変化・ゆらぎ	13
5.3	サイドローブ	13
5.4	観測データに一部負の温度が存在すること	14
6	結論	14

1 実験の背景・目的

1.1 実験目的

本実験の目的は宇宙マイクロ波背景放射 (以下 CMB) の放射温度が約 2.7K の黒体放射であることを測定することである。

1.2 実験背景

初期宇宙は非常に高温であるため、存在する原子が電離している。この状態では宇宙空間を飛び交う光子が電離した電子や原子核と電磁相互作用することで散乱を繰り返してしまい、いわば陽の光に対して雲がかかっているような状態になってしまう。これでは本来の太陽の形を見ることはできない。

しかしこの状態も時間が経つことで変化していく。宇宙誕生後の約 37 万年後には宇宙自体が冷えることによって電子・原子核が電離しなくなる。それによって宇宙空間における荷電粒子の密度は格段に減り、光子が散乱せずに自由に飛び回れるようになる。これが「電子の再結合」または「宇宙の晴れ上がり」と呼ばれる現象である。

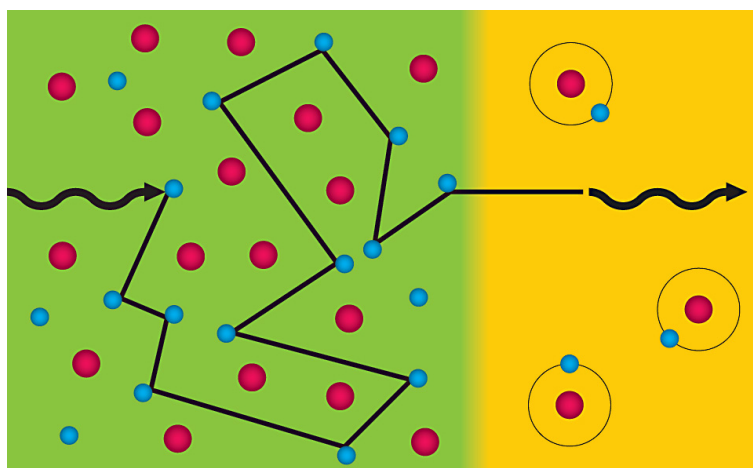


図 1: 宇宙の晴れ上がり

そして、宇宙の晴れ上がりの時の光子が CMB として宇宙を飛び交っている。CMB は宇宙の晴れ上がり以降は散乱していないため、測定することで晴れ上がり当時の宇宙について知ることが可能である。

2 実験原理

2.1 実験装置の概要

今回の実験では CMB の測定を行うために、図 2 のような構成でデータを取得する。アンテナ・信号源で受

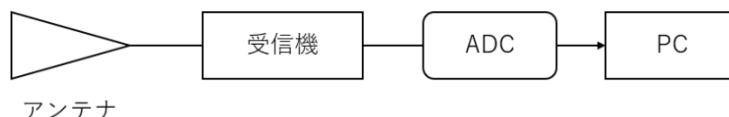


図 2: 実験装置の概略

信した電磁波は電気信号に変換され、受信機内部で増幅・検波を行い、ADC によってデジタルなデータに変換される。受信機は大きく分けて増幅器によって信号を増幅する部分と検波用ダイオードによって包絡線検波を行う部分に分けることができる。また、ADC では得られた波形を積分することによって受信波の強度を温度の定数倍という形で得ることが可能である。

2.2 信号の増幅

電気信号を増幅するには増幅器を用いるのだが、増幅器自身からもノイズが発生してしまう。それらのノイズの影響が最低限のものとなるために、多段に増幅を行う。仮に 3 段の増幅器で増幅を行った際の出力は以下の式で表される。

$$P_{out} = G_3(G_2(G_1P_{in} + N_1) + N_2) + N_3 \quad (2.1)$$

ここで G_i は i 番目の増幅器の利得、 N_i はノイズである。要するに初段の増幅器のノイズを小さいものにすれば、他の増幅器のノイズが多少大きくても増幅後の入力信号と比べて非常に小さく、無視できるほどのものとなる。

信号の増幅の際にはもう一つの問題が発生する。増幅器の利得は常に一定値ではなく、熱を持つことなどの理由によって変動するのである。この問題には信号源のスイッチングをすることで対応する。アンテナからの信号と温度がわかっている信号源を高速で入れ替え、較正を逐一かけることによって増幅率の変化に対応する方法である。

2.3 検波方法

今回の実験では CMB の放射温度を測ることが目的なので、取得した電波の強度がわかればよい。したがって、ダイオードを用いて信号の包絡線を求め、積分することで強度の情報を得る。ここで問題になるのは強度と温度の関係性についてである。CMB は黒体放射と同じスペクトルであるという前提を用いて考える。今回の測定では使えるパーツの都合上、検出される周波数は 9.75 11.25GHz に制限される。そこで $h\nu \ll kT$ となることから Rayleigh-Jeans の法則より輝度は

$$B(\nu, T) = \frac{2\nu^2 k}{c^2} T \quad (2.2)$$

となり、温度と CMB の強度の間は比例関係に近似することができる。

2.4 ノイズの処理

CMB は非常に弱い電磁波のため、検出される電磁波に占める割合は小さい。したがって、ノイズ処理が非常に重要となってくる。今回は大きく分けて大気からの放射と受信機からのノイズという 2 種類のノイズ源があると考えた。

まず初めに待機放射の処理方法について述べる。大気熱放射はアンテナの向く方向によって異なると考えられる。使用するアンテナを 2 つにして 1 つを天頂方向、もう一方を 45° 傾けることで以下の式が得られる：

$$T_{90} = T_{CMB} + T_{atml} \quad (2.3)$$

$$T_{90} = T_{CMB} + \sqrt{2}T_{atml} \quad (2.4)$$

この連立方程式を解くことで T_{CMB} を求めることが可能である。

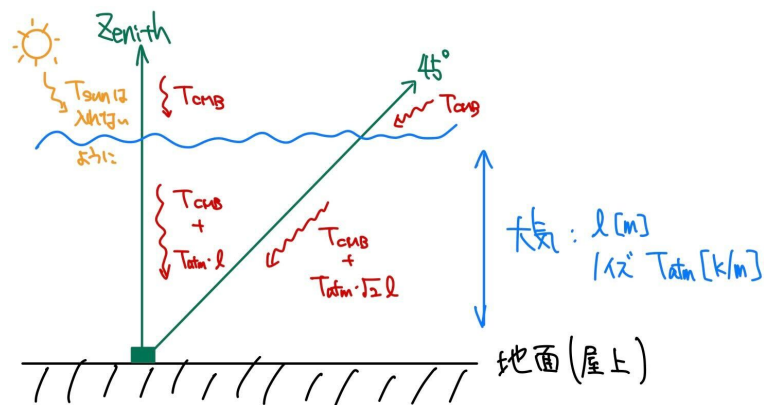


図 3: 大気によるノイズへの影響

受信機から発生するノイズについては既知温度の放射源を用いて処理する。得られる強度は

$$P = G(T_{in} + T_{RX}) \quad (2.5)$$

と表わすことができる為、2 つの既知温度の放射源があることによって受信機の利得とノイズを知ることが可能である。そうして求めた T_{RX} を差し引けばよい。

最終的に、実験装置自体はアンテナ 2 本と既知の温度の異なる黒体放射源 2 つの合計 4 チャンネルからの信号を高速でスイッチングし、それらが増幅されたものの包絡線を積分することで強度を得ることができる。そのデータを用いてノイズの処理や変動した利得の補正を行うことによって T_{CMB} の値を得る。

3 実験

この章では使用した器具の紹介や実際に用いた回路の紹介を行う

3.1 実験器具

アンテナ

型番：PE9856/SF-20

対応周波数帯：8.2-12.4 GHz



図 4: アンテナ

スイッチ

型番：P9404C

対応周波数帯：100 MHz-18 GHz

スイッチングスピード：350 ns



図 5: スイッチ

ADALM2000

オシロスコープ

スイッチへの信号送信



図 6: ADALM2000

増幅器

型番：ZX60-24A-S+ (5 V)

対応周波数帯：5-20 GHz

ゲイン：24 dB

ノイズ：6.0 dB



図 7: 増幅器

型番：ZX60-153LN-S+ (12 V)

対応周波数帯：0.5-15 GHz

ゲイン：16 dB

ノイズ：2.5 dB



図 8: バンドパスフィルタ

バンドパスフィルタ

型番：ZVBP-10R5G-S+

パスフィルター：9750 11250 MHz



図 9: ダイオード

ダイオード

型番：8471E

対応周波数帯：0.01 12 GHz

3.2 ダイオードの特性

ダイオードの内部の回路図を図 10 に示す。並列に繋がれたコンデンサ (C_B) によって、入ってきた信号が平滑化されてアナログ信号をデジタル信号のように変換することができる。これにより信号のパワーを測定することができる。ダイオードの入力信号のエネルギーと、出力信号の電圧の関係を図 11 に示す。

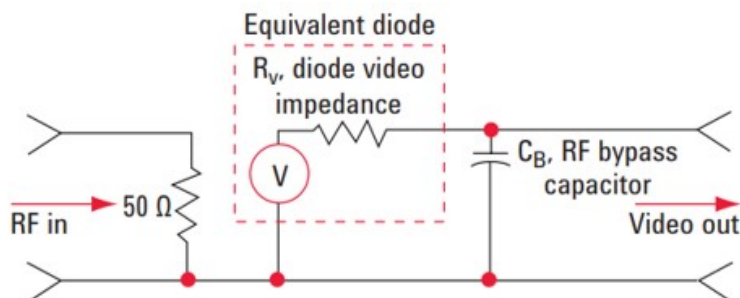


図 10: ダイオードの回路図

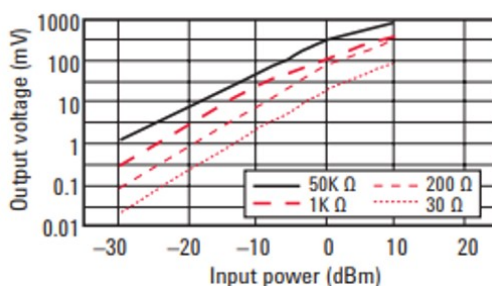


図 11: ダイオードによるエネルギーと電圧との関係

ダイオードにさらに抵抗 (R_{LOAD}) やコンデンサ (C_{LOAD}) をつなげることによって時定数を変えることができる。時定数 T_R は次のように与えられる。

$$T_R = 2.2 \cdot \frac{R_{LOAD} \cdot R_V}{R_{LOAD} + R_V} \cdot (C_B + C_{LOAD}) \quad (3.1)$$

ここで $R_V = 1.5 \text{ k}\Omega$ で $C_B = 30 \text{ pF}$ である。時定数が大きいほど出力はデジタル信号に近づくが、ほかの信号を覆い隠してしまう恐れがある。そこでサンプリングレートが $1 \mu\text{s}$ であるので、 $R_{LOAD} = 56 \text{ k}\Omega$, $C_{LOAD} = 4.7 \text{ nF}$ として $T_R \approx 15 \mu\text{s}$ とした。

3.3 全体回路の概略図

全体の回路の概略図を次に示す。

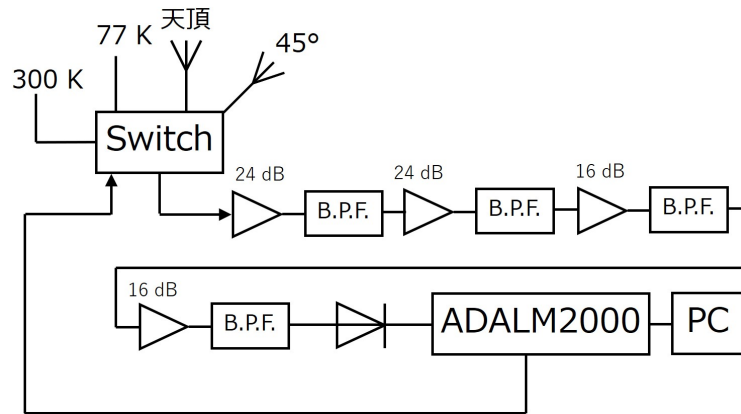


図 12: 回路の概略図

3.4 実験器具の全体図

図 13 が器具の全体図，図 14 がその器具に風よけとして暗幕を付けたもの，図 15 が 45° 方向のアンテナの確認をしたものである。

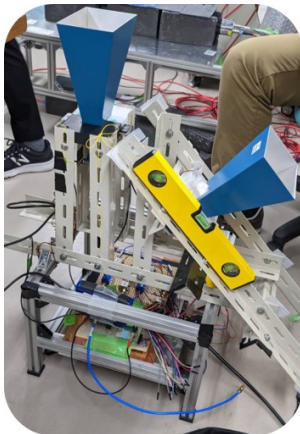


図 13: 器具の全体図



図 14: 暗幕付き



図 15: 45° 方向の確認

4 データ解析と結果

4.1 データ取得について: T_{CMB} の算出

電磁波によりオシロスコープに表示される電圧 V^{*1} は時間変化する。スイッチが i ($i = 1, 2, 3, 4$) に接続されている時間内で電圧 $V(t)$ を積分し、値 $P_i^{(m)}$ を得た。ここで m ($1 \leq m \leq N$) は第 m 週目の測定であることを表す。^{*2}

積分値と放射温度 T との間には線形関係

$$P = G^{(m)}(T + T_{\text{rx}}^{(m)}) \quad (4.1)$$

があると予想される。 $T_{\text{rx}}^{(m)}$ はノイズ温度である。このことを明らかにするために $i = 1, i = 2$ の値を Calibration に用い、(4.1) を正当化する。^{*3}

例として 1 週目 ($m = 1$) に対して Calibration を行うと次の図 16 ように比例関係を得ることができる。

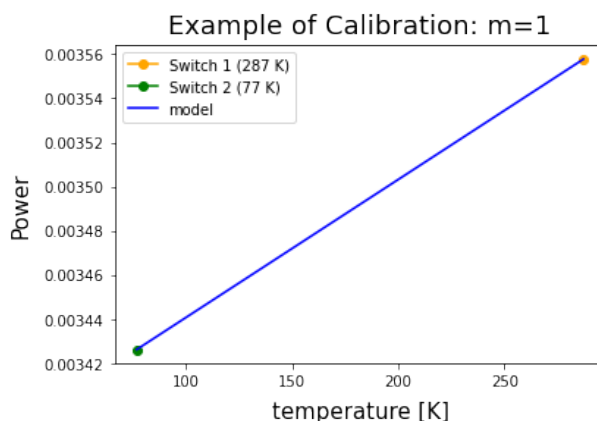


図 16: Calibration の例 (1 週目)

$$G^{(m)} = 6.25 \times 10^{-7} \quad (4.2)$$

$$T_{\text{rx}}^{(m)} = 5.40 \times 10^3 \text{ K} \quad (4.3)$$

未知数 $G^{(m)}, T_{\text{rx}}^{(m)}$ は上記の Calibration により特定できる。室温 T_{room} と液体窒素の温度 T_{LN} は既知として

$$G^{(m)} = \frac{P_1^{(m)} - P_2^{(m)}}{T_{\text{room}}^{(m)} - T_{\text{LN}}^{(m)}} \quad (4.4)$$

^{*1} ADALM2000 通過後の電圧。

^{*2} $i = 1$ は実験室温度、 $i = 2$ が液体窒素の温度、 $i = 3$ が Zenith、 $i = 4$ が Zenith から 45 度傾けた方向の放射温度になる。

^{*3} 本当は $i = 1, i = 2$ の 2 点だけでなくもう一点あることが望ましいが、switch のチャンネル数が 4 つしかなかったため今回は省略した。ADC を経由しただけなので、線形関係を仮定するのは自然であると考えてもいい。そしてこれは本質ではない。

$$T_{rx}^{(m)} = \frac{P_1^{(m)}}{P_1^{(m)} - P_2^{(m)}} (T_{room}^{(m)} - T_{LN}^{(m)}) - T_{room}^{(m)} \quad (4.5)$$

こうして、 $P-T$ の関係式が完成し、 $T_3^{(m)}, T_4^{(m)}$ を $P_3^{(m)}, P_4^{(m)}$ から求めることができる。次にこの $T_3^{(m)}, T_4^{(m)}$ から CMB の温度を算出する。図 17 を見てもらいたい。

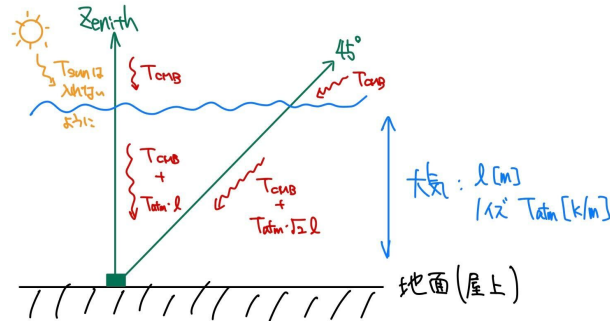


図 17: 大気によるノイズの影響

アンテナに受信される放射は、CMB 放射に大気によるノイズが加わったものとなる。すなわち、

$$T_3^{(m)} = T_{CMB}^{(m)} + T_{atm}^{(m)} l \quad (4.6)$$

$$T_4^{(m)} = T_{CMB}^{(m)} + \sqrt{2} T_{atm}^{(m)} l \quad (4.7)$$

これを考慮することにより

$$T_{CMB}^{(m)} = \frac{\sqrt{2} T_3^{(m)} - T_4^{(m)}}{\sqrt{2} - 1} \quad (4.8)$$

が求まる。これを全ての m について行くと、 N 周期分の CMB 温度が得られる。

実際に得られた $N = 4000$ データの CMB 温度をヒストグラムに表示すると次の図 18 のようになった。

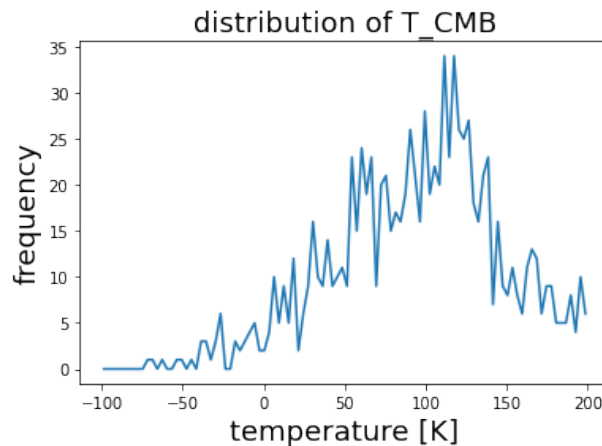


図 18: CMB 温度

4.2 データ取得について: 誤差処理

頻度の誤差と個々の T_{CMB} 値の誤差について考える。前者に対しては (Poisson 分布由来の) 正規分布に従うと仮定し $\sqrt{\text{freq.}}$ とした。後者は誤差伝播の公式により次の (4.9) と算出された。

$$\sigma_{\text{CMB}}^2 = \frac{(T_{\text{room}} - T_{\text{LN}})^2 t_{\text{switch}}^2}{(\sqrt{2} - 1)^2 (P_1 - P_2)^2} \left[(\sqrt{2} - 1)^2 P_2^2 \sigma_{V_1}^2 + \{ \sqrt{2} P_4 - P_3 + (\sqrt{2} - 1) P_1 \}^2 \sigma_{V_2}^2 + \sigma_{V_3}^2 + 2\sigma_{V_4}^2 \right] + \left[\frac{\sqrt{2} P_4 - P_3 + (\sqrt{2} - 1) P_1}{(\sqrt{2} - 1)(P_1 - P_2)} - 1 \right]^2 \sigma_{\text{room}}^2 \quad (4.9)$$

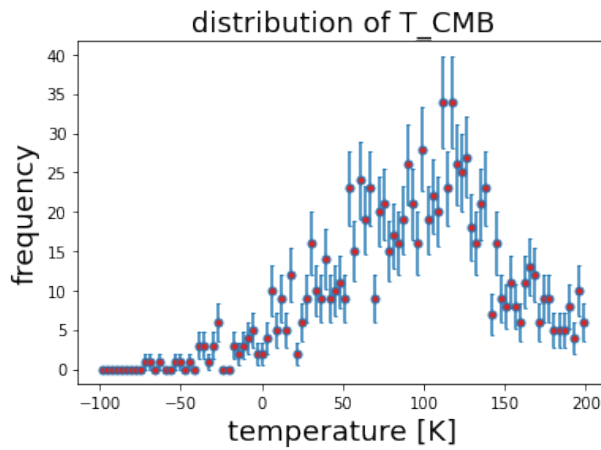


図 19: CMB 温度 (頻度誤差付き)

図 19 は頻度誤差のみとなっているが、今回の実験では横軸方向の誤差算出まで至らなかったためである。仮に電圧の誤差が任意の switch に対して均一に 0.01 mV であった場合について考える。^{*4}このときの横軸方向の誤差を計算すると、次の図 20 のようになる。

^{*4} 0.01 mV と仮定したのは、電圧計を見た時の数値変化がおおよそそのあたりであったはず、という筆者の記憶に由来する。

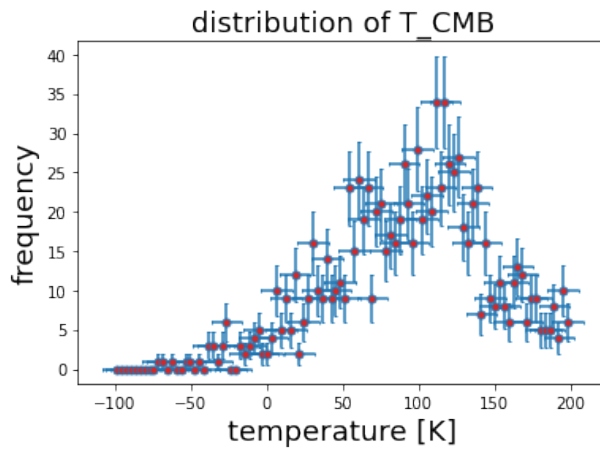


図 20: CMB 温度 (両軸方向誤差付き)

4.3 データ取得について: T_{CMB} の統計処理

データ点は正規分布に従うと仮定し、図 19 に fitting を行った。その結果が次の図 21 である。

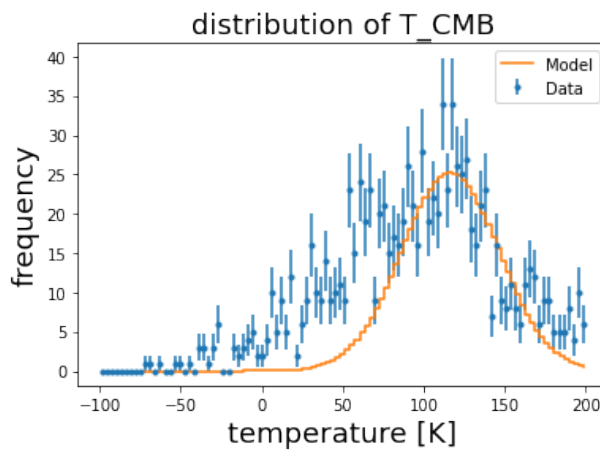


図 21: fitting

fitting した正規分布についてのデータは次の表 1 の通りである。

表 1: fitting した正規分布の性質

平均値	99.7 K
標準偏差	51.3 K
高さ	2.64×10^3

以上より本実験から CMB 放射温度は

$$T_{\text{CMB}} = (9.97 \pm 5.13) \times 10 \text{ K} \quad (4.10)$$

と求まった。

5 考察

考えるべき問題点は大きく2つ存在する。

- 予想値 3 K を大きく超える T_{CMB} 実験値
- 観測データに一部負の温度が存在すること

それらの原因として考えられるもの、及び解決案は前者については

- Zenith 側には日光が当たりやすく、それによりアンテナが熱を持った
- 月の放射の影響
- アンテナの熱によるノイズ変化、ゆらぎ
- アンテナのサイドローブが壁の反射を拾った可能性
- その他

後者に対しては

- 確率的に頻度の低いものゆえ考えなくて良い
- その他

が考えられる。

5.1 予想値 3 K を大きく超える T_{CMB} 実験値

5.1.1 太陽の影響

結論から述べると、恐らく日光の影響は少ない。観測時、装置は全体日影に入っていたからである。あるとすれば床や壁など、何らかの物体に日光が反射して、と言うケースだが、ごく僅かであろう。

ただ（考察とはあまり関係ないが）今後実験の際に注意すべき点が見つかったのでそれをここで述べる。

実際に太陽光の影響を受けたと考えられる出来事があった。本実験を開始する前にテスト実験を行った。当時 14 時頃である。14 時を開始時間としたのは、アンテナに日光が直接侵入することを防ぐためである。もしアンテナに直接日光が侵入すれば、有するエネルギーの大きさゆえダイオードを破壊しかねない。実際それはなかった。しかしそれだけで満足してはいけなかった。今回の場合、アンテナの側面が日光に当たっていた。それゆえアンテナ自身が温められて新たな熱放射源となり、観測結果に異常が生じた。 $T_3 \geq T_4$ となったのである。実際配置的に Zenith 方向のアンテナに集中して日光が当たっていたため、矛盾した結果になったと考えられる。よって装置はアンテナまで含め全体を日影に入るように置かなくてはならない。

5.1.2 月の放射の影響

本実験中（16 時頃）は太陽だけでなく月も昇っていて、そのためアンテナには月の放射光も侵入する。どの程度の影響があるのか見積もってみる。

月の表面温度は-170 °C～110 °C (103 K～383 K) である。Zenith と 45° のアンテナ両方に均一に侵入したとすると、

$$T_{\text{CMB}}^{(m)} = \frac{\sqrt{2}T_3^{(m)} - T_4^{(m)}}{\sqrt{2} - 1} - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2} - 1} T_{\text{moon}}^{(m)} \quad (5.1)$$

と改められる。実験値から $-3.41 \times T_{\text{moon}}$ することをかんがえたと月の影響はかなり大きい、実際これをそのまま実行すると観測値全てが負になる。

5.2 アンブの熱によるノイズ変化・ゆらぎ

アンブが熱を持つとそれだけ大きなノイズが発生する。ただでさえ CMB は小さいため、アンブや装置によるノイズはできる限り取り払わねばならない。実際 CMB を精密に測れる機械では極低温までアンブを冷やし、電気抵抗を下げノイズを押さえる。本実験にそのような技術を用いることは困難である。また本実験では風による装置内部の温度変化^{*5}を防ぐため暗幕で覆ったが、これが返ってアンブを温める原因になった。黒いため日光を良く吸収するし、かなりきっちり覆ったため温度は上昇する。完全に裏目に出たことになる。

実際にノイズ温度はおおよそ 5000 K という結果がでている。このノイズ中で僅か 3 K の CMB を見つけるのは精度的に厳しい。

5.3 サイドローブ

ホーン内部に直接侵入する電磁波以外にも、サイドローブが拾った電磁波による変化も考えることができる。

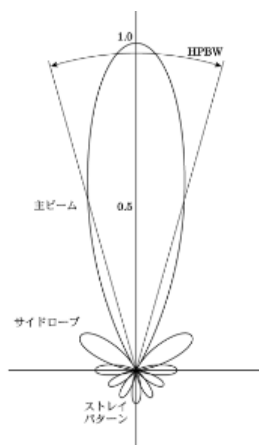


図 22: サイドローブ

サイドローブから拾われた電磁波がどの程度影響を及ぼすかであるが、手元の資料からその情報は得られなかった。送信とは異なり受信なので、どのローブに対しても均一に影響を及ぼすことから、簡単に切り捨ててもいい存在ではないと考えられる。

*5 これがアンブの温度を頻繁に変化させ、ノイズが一定にならない

少なくともアンテナがサイドローブから電波を極力受信しないようにする工夫は可能と思われる。ホーンアンテナの根元部分に金属のカバーを施すと良いのではと考えた。あるいは、アンテナの受信部本体はアルミの立方体内部に埋め込まれていたもので、既に対策はなされているとも考えた。

5.4 観測データに一部負の温度が存在すること

負温度の存在は物理学的にはあり得ないが、(4.8) をみればデータとして存在することは認められる。何らかの原因で $\sqrt{2}T_3 \leq T_4$ (殆ど $T_3 \leq T_4$ である) となる場合、観測データは負になる。これをどこまで議論するかであるが、まずそもそも負を示すデータの個数との度合いを見る必要がある。図 21 を見れば分かる通り、負の温度を示すデータ数は全体 (4000) のうち 41 であった。おおよそ全体の 1% である。また -40 K から 0 K の間を大半が占めていて、CMB 温度実験値 (4.10) の誤差範囲を考慮すれば、本質的な問題ではないと考えても問題はないのかも知れない。ただ今後精度を更に上げていくためには、邪魔なデータを極力削減することが肝要とも考える。従って少しばかり、負温度を防ぐための案を考察する。

Zenith 方向のアンテナ*6に多量のエネルギーが侵入するケースとしては、Z と 45° に温度差が生じ、Z 自身が熱源となってしまった場合がある。これは 5.1.1 章でも言及したことであるが、これは日光に限ったことではない。風の当たりやすさ*7なども一因になりうる。が、これは恐らく僅かな差しか生まない。- 20 K 以下の差は生じないだろう。他のケースとしては、Z と 45° でアンプ、その他電気系統のノイズが異なる場合である。こればかりは観測できていない事柄なので推測に頼るほかないが、おおよそノイズが 5000 K であったことを加味すれば 40 K 程度のズレは生まれても不思議ではない。他にも原因はあり得るだろうが、今回はここで終了する。

6 結論

CMB 放射温度が 2.7 K (3 K) であることは本実験にて確認できなかった。課題としては、ノイズをより減少させること、Zenith と 45° の間で電気回路などの差をできるだけ生まないこと、月や太陽、自然環境の影響を考えて装置を組み立て、配置することなどが挙げられる。

謝辞

本課題研究を遂行するにあたり、田島治教授、鈴木惇也助教、TA の中田嘉信さん、恩田直人さんには終始多大なご指導ご鞭撻を賜りました。ここに深謝の意を表します。誠にありがとうございました。

参考文献

- [1] 中井 直正・坪井 昌人・福井 康雄. シリーズ 現代の天文学 現代の天文学 16 宇宙の観測 2 電波天文学. 日本評論社, 第 2 版, 2020.
- [2] 井上 一・小山 勝二・高橋 忠幸・水本 好彦. シリーズ 現代の天文学 現代の天文学 17 宇宙の観測 3 高エネルギー天文学. 日本評論社, 第 2 版, 2019.

*6 以降 Z. 45° のアンテナは 45° と略すことにする。

*7 実際 5 階ある建物の屋上は風が強かった。