

# 物理学実験報告書

慶應義塾大学理工学部物理学科

実験題目

## 宇宙電波

実験日 4月 30日 天候 室温 °C 湿度 % 気圧 hPa

実験日 5月 3日 天候 室温 °C 湿度 % 気圧 hPa

実験日 5月 7日 天候 室温 °C 湿度 % 気圧 hPa

実験日 5月 10日 天候 室温 °C 湿度 % 気圧 hPa

学籍番号	氏名	共同実験者名
61908697	佐々木良輔	

以下の欄には何も記入しないこと！

受理	再提出

提出確認1	提出確認2

評価	
----	--

## 1 目的

簡易電波望遠鏡を用いて太陽電波を観測し、その結果から太陽の表面温度と大気の電波透過率を算出する。またパラボラアンテナの感度特性及び受信システムの性能評価を行い電波利用技術の基礎を習得する。

## 2 実験原理・背景

### 2.1 宇宙電波と太陽電波

宇宙電波源には主に熱的電波源と非熱的電波源がある。熱的電波は大きな運動エネルギーをもった自由電子が陽子に接近したときの急制動による制動放射であり、プラズマから発せられる。一方で非熱的電波は磁場の周りを荷電粒子が円運動することによるシンクロトロン放射である。また熱的放射は定常的であるのに対し非熱的放射は爆発的なものである。

特に太陽は地球に最も近接した電波天体であり、輻射によって  $3.85 \times 10^{26} \text{W}$  ものエネルギーを放射し、地球の大気表面に到達する単位面積あたりのエネルギー（太陽定数）は  $1.37 \text{kW m}^{-2}$  になる。[2] そのエネルギー源は中心核での水素核融合反応である。太陽からの熱的放射は可視光領域では  $T = 5800 \text{K}$  の光球から、 $10 \text{GHz}$  以上の領域では  $T = 7000 \sim 10000 \text{K}$  の彩層から、 $1 \text{GHz}$  以下の領域では  $T \sim 10^6 \text{K}$  のコロナからの放射が支配的である。またフレアなどの爆発現象に伴い非熱的放射を行うこともあり、周波数は数  $100 \text{kHz}$  から数  $10 \text{GHz}$  に渡る。

### 2.2 熱放射と輝度温度

光線に垂直な単位面積を単位時間あたりに通過する単位立体角、単位周波数あたりのエネルギーを輻射強度  $I_\nu$  と呼ぶ。輻射強度は自由空間で光線に沿って一定になる。濃密かつ輻射と熱平衡状態にある黒体放射のスペクトルは

$$I_\nu = B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} \quad (2.1)$$

と表される。ここで  $B_\nu(T)$  は Planck 分布である。ここで  $h \sim 10^{-34}$ ,  $k \sim 10^{-23}$ ,  $\nu \sim 10^9$ ,  $T \sim 10^3$  程度とすると  $h\nu/kT \sim 10^{-5} \ll 1$  なので 1 次まで展開すると

$$\begin{aligned} B_\nu(T) &\simeq \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{1 + h\nu/kT - 1} \\ &= \frac{h\nu^2 k}{c^2} T \end{aligned} \quad (2.2)$$

となる。これは Rayleigh-Jeans 近似と呼ばれる。以上から

$$T_B = \frac{c^2}{2\nu^2 k} I_\nu \quad (2.3)$$

となる。  $T_B$  は輝度温度であり, Rayleigh-Jeans 近似のもとでは黒体の温度  $T$  に一致する。

## 2.3 輻射輸送方程式

光線が物質に入射すると吸収, 放射によってその輻射強度が変化する。物質が放射のみを行う場合を考える。単位時間あたりに単位体積の物質が放射する単位立体角, 単位周波数あたりのエネルギーを放射係数  $j_\nu$  とすると, 輻射強度の変化量  $dI_\nu$  は

$$dI_\nu = j_\nu ds \quad (2.4)$$

となる。ここで  $ds$  は物質の厚さである。また物質が吸収のみを行う場合を考える。輻射強度の変化量  $dI_\nu$  は  $I_\nu$  に比例し, その比例係数を  $\alpha_\nu$  とすると

$$dI_\nu = -\alpha_\nu I_\nu ds \quad (2.5)$$

となる。以上から放射と吸収が同時に存在する場合を考えると

$$\frac{dI_\nu}{ds} = \frac{j_\nu}{\alpha_\nu} - I_\nu \quad (2.6)$$

ここで光学的厚み  $\tau_\nu = \int_0^L \alpha_\nu ds$ , 源泉関数  $S_\nu = j_\nu / \alpha_\nu$  を用いると

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = S_\nu - I_\nu \quad (2.7)$$

となり, これを輻射輸送方程式と呼ぶ。この解は物質に入射した光線の輻射強度  $I_\nu(0)$  を用いて以下のようになる。

$$I_\nu = I_\nu(0)e^{-\tau_\nu} + S_\nu(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (2.8)$$

これは入射した輻射強度  $I_\nu(0)$  は光学的厚みに従い減衰し, また放射による寄与は光学的厚みに応じて源泉関数に近づくことを表している。すなわち  $\tau_\nu \rightarrow \infty$  の極限においては  $I_\nu = S_\nu$  となる。また熱平衡状態においては (2.1) より  $I_\nu = B_\nu(T)$  であるので,  $\tau_\nu \rightarrow \infty$  かつ熱平衡状態においては

$$S_\nu = B_\nu(T) \quad (2.9)$$

となり, これを Kirchhoff の法則と呼ぶ。これを用いて (2.8) を書き換えると

$$I_\nu = I_\nu(0)e^{-\tau_\nu} + B_\nu(T)(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (2.10)$$

さらに (2.3) 式から入射光の輝度温度を  $T_B(0)$ , 物質の温度を  $T$  とすると

$$T_B = T_B(0)e^{-\tau_\nu} + T(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (2.11)$$

となる。

## 3 実験装置

### 3.1 装置の構成

電波望遠鏡は受信部, IF 信号処理系, 検波器, DC 増幅器, A/D 変換器, 測定用計算機からなる.

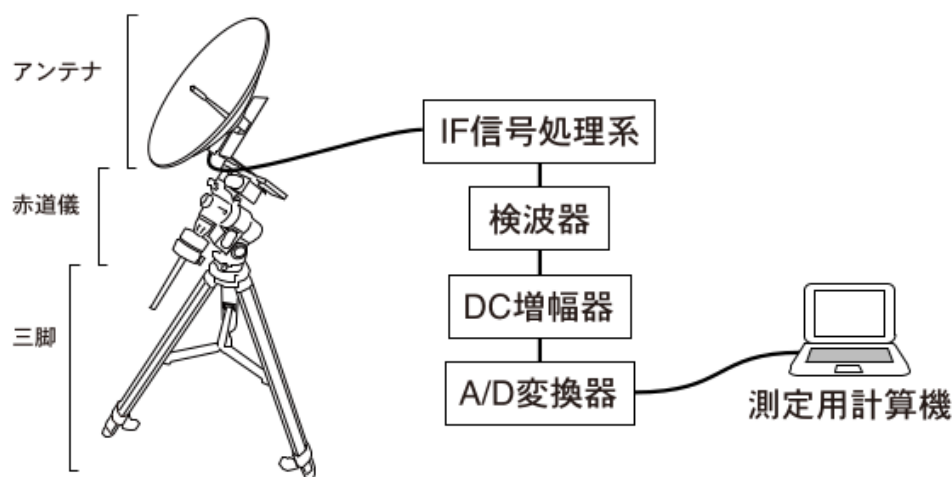


図 1 実験装置のブロック図 (実験テキストより引用)

#### 3.1.1 受信部

受信部はアンテナ, コンバーター, 赤道儀, 三脚からなる.

アンテナは BS 放送受信用の TDK BCS-45DHV を用いている. コンバーターはアンテナと一体になっており, 11.70-12.75GHz 帯の受信信号とオシレーターからの 10.678GHz 信号を加算合成し, LPF に通すことで 1022-2072MHz の中間周波数信号を生成する. このコンバーターには 54dB 利得があり, 電源は IF 信号処理系から同軸ケーブルで供給される. 室内機においてはパラボラアンテナは取り外され, 集光部とコンバーターのみで運用する.

赤道儀は Vixen GP2-399000 を用いている.

#### 3.1.2 IF 信号処理系

IF 信号処理系は主に信号増幅器から構成される. 信号増幅器は一般的に BS・CS 信号のブースターとして用いられるマスプロ電工 BCB20LS を用いている. このブースターは伝送周波数帯域 1000-2150MHz において 18dB 以上の利得が保証されている. また +15V は同軸ケーブルで供給され, 電源にはマスプロ電工 BPS5B を用いている.

### 3.1.3 検波器

検波器は交流の入力信号の包絡線を取り出し直流に変化する素子である。今回は性能が補償された検波器として Keysight 8472B Low-Barrier Schottky Diode Detector と Herotek DZR124AA Zero-Bias Schottky Diode Detector を用いる。それぞれの入力周波数範囲は DC-18GHz, 10-12.4GHz であり、入力電力に比例した負電流を出力する。

### 3.1.4 DC 増幅器

前段の検波器の出力電流から得られる電圧出力は数十-数百 mV だが、後段の ADC の測定レンジ 0-5mV であることから更に増幅する必要がある。検波器の出力は負電流であるので、反転増幅器を通すことで測定に適した正の電圧を得ることができる。ここで増幅倍率は  $(27k \times 51k)/(27k + 51k)/1k = 17.7$  倍となる。

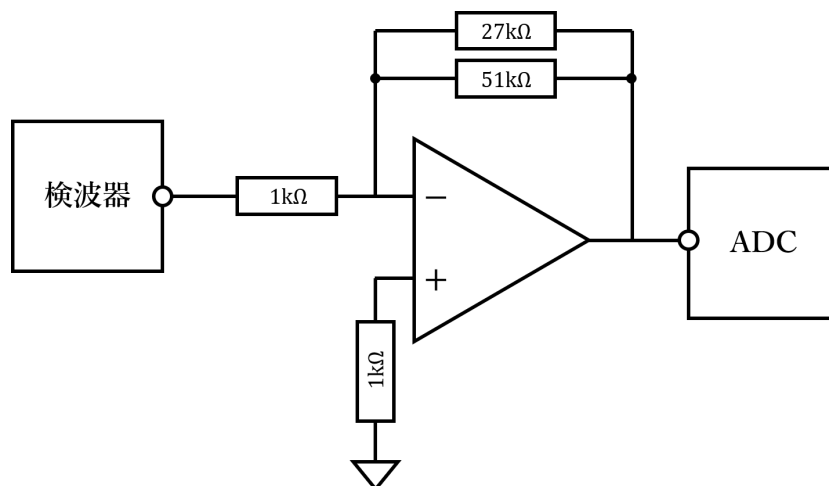


図 2 反転増幅器

### 3.1.5 AD 変換器, 測定用計算機

AD 変換器として Arduino Uno (AVR ATmega328P) 内蔵の ADC を用いる。これは測定レンジ 0-5V, 分解能 4.89mV である。AD 変換器で測定された電圧値は測定用計算機である Apple MacBook Air(室外機), Apple iMac(室内機) を用いて記録される。データの記録は Processing IDE で開発された mizutama ソフトウェアによって行われる。ADC のサンプルレートは 100Hz であり、これを 1s の時間間隔で積分したものを記録する。

## 3.2 予備実験

予備実験として室内機を用いてお湯の温度変化を電波望遠鏡を用いて測定した。

### 3.2.1 実験方法

アルミ缶に熱湯を入れ温度計を用いて初期温度を測定した。次に室内機の集光部をお湯に浸し、DC増幅器の出力電圧を記録した。

### 3.2.2 実験結果

図3に測定結果を示す。集光部への入力電力と検波器の出力電圧に完全な線形性を仮定すると、お湯の温度が低下するにしたがって黒体放射の輻射強度が低下し、信号電圧も低下すると考えられる。図3から実際に温度の低下に伴って信号電圧が低下していることがわかる。

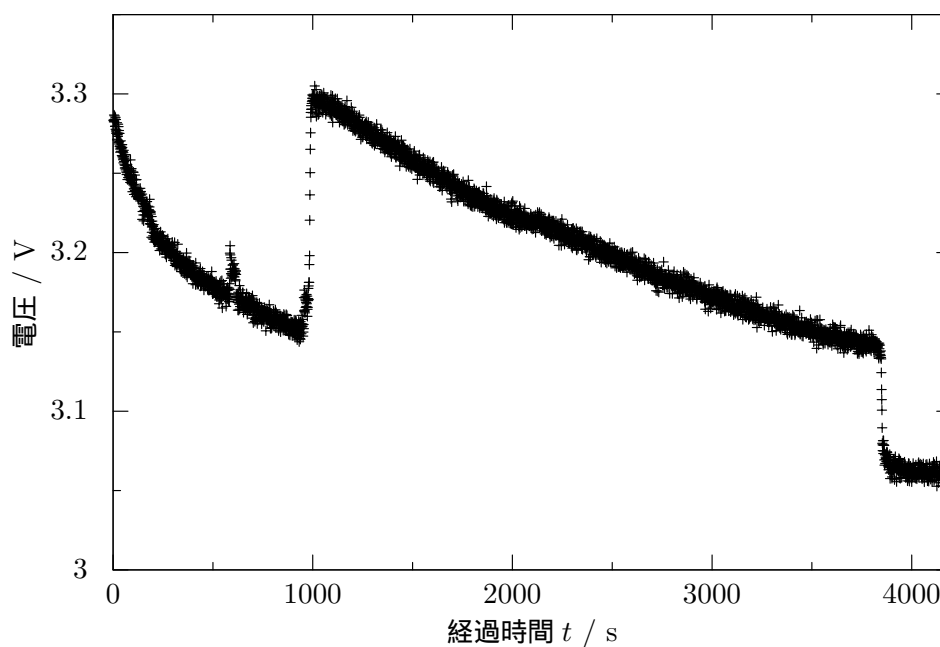


図3 お湯の温度変化に伴う信号電圧の変化

## 4 性能評価

### 4.1 受信機雑音温度

#### 4.1.1 原理

2.3節で示したように、輻射強度は温度の次元を持った輝度温度で表されたので、望遠鏡の受信した電力を温度の次元で表示することを考える。ここで

$$T_A = \frac{W_\nu}{k} \left[ \frac{\text{J s}^{-1} \text{Hz}^{-1}}{\text{J K}^{-1}} \right] \quad (4.1)$$

はアンテナ温度と呼ばれ, 温度の次元を持つ. ただし  $W_\nu$  は周波数  $\nu$  の電波の単位周波数あたりの受信電力である. これはある受信電力に相当する熱雑音を発生させるために必要な温度といえる.

受信した微弱な信号はコンバーターから ADC までの信号処理系全体で発生する雑音に埋もれるため, 受信機の感度はその雑音によって制限される. これらの雑音のアンテナ温度をまとめて受信機雑音温度  $T_{RX}$  で表す. ここで受信機を高温  $T_{hot}$ , 低温  $T_{cold}$  の黒体で覆ったとき, 受信機出力電圧は

$$V_{hot} = a(T_{hot} + T_{RX}) \quad (4.2)$$

$$V_{cold} = a(T_{cold} + T_{RX}) \quad (4.3)$$

と表される. ここで  $a$  は受信機の利得による比例定数である. 上の 2 式と  $Y =: V_{hot}/V_{cold}$  を用いて  $T_{RX}$  を表すと

$$T_{RX} = \frac{T_{hot} - YT_{cold}}{Y - 1} \quad (4.4)$$

となる.

#### 4.1.2 方法

この実験では高温物体として室温の水, 低温物体として液体窒素を用いた. まず電波吸収体で覆ったデュワー瓶に室温の水を入れ, その温度を測定した. 次に室内機の集光部をデュワー瓶の水に浸し  $V_{hot}$  を測定した. 続いて上と同様のデュワー瓶に液体窒素を入れ, 同様の手順で  $V_{cold}$  を測定した.

#### 4.1.3 結果

図 4 に測定結果を示す. 図 4 の網掛け (青) 部は  $T_{hot}$ , 網掛け (赤) 部は  $T_{cold}$  での測定である. それぞれの経過時間は  $t = 0-780$  s,  $t = 950-1230$  s である. この範囲の値を平均すると  $V_{hot} = 3.10$  V,  $V_{cold} = 2.02$  V となった. また  $T_{hot} = 298.15$  K,  $T_{cold} = 77.0$  K であった. 以上から  $T_{RX}$  は

$$T_{RX} = 3.37 \times 10^2 \text{ K} \quad (4.5)$$

となる.

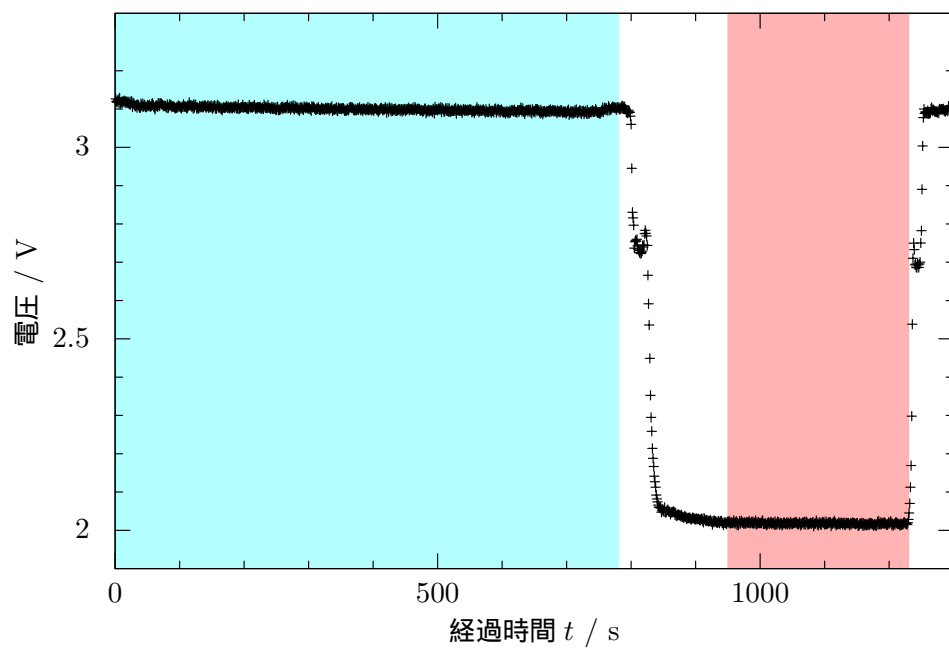


図 4  $T_{hot}$  と  $T_{cold}$  の測定



## 4.2 Allan 分散

### 4.2.1 原理

受信機の性能, 雑音が定常的であるならば信号を時間平均することで受信機の感度を高めることができる。しかし実際には受信機の性能は時間的に変動し, 雑音もまた有限時間において完全にランダムではないことがわかっている。このため有効に感度を向上できる積分時間の上限が存在する。この時間を考えるために Allan 分散が用いられる。

連続量  $s(t)$  を時間平均で測定することを考えると時刻  $t$ , 積分時間  $T$  のとき観測される量は

$$x(T, t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t s(t') dt' \quad (4.6)$$

である。ここで時刻  $t$  での観測量  $x_s = x(T, t)$  と  $T$  秒後の観測量  $x_r = x(T, t + T)$  の差を取ると

$$d = x_s - x_r \quad (4.7)$$

この  $d$  の分散  $\sigma_d^2$  は

$$\begin{aligned} \sigma_d^2(T) &= \langle (d - \langle d \rangle)^2 \rangle \\ &= \langle d^2 \rangle - \langle d \rangle^2 \end{aligned} \quad (4.8)$$

となる。ここで  $x_s$  と  $x_r$  は同じ連続量を見ているので,  $\langle d \rangle = 0$  が成り立つとすると

$$\sigma_d^2(T) = \langle d^2 \rangle \quad (4.9)$$

となる。Allan 分散はこれに  $1/2$  を掛けた値と定義される。

$$\sigma_A^2(T) =: \frac{1}{2} \langle d^2 \rangle \quad (4.10)$$

ここで  $\langle d^2 \rangle$  を考えると

$$\begin{aligned} \langle d^2 \rangle &= \langle (x_s - x_r)^2 \rangle \\ &= \langle x_s^2 \rangle - 2\langle x_s x_r \rangle + \langle x_r^2 \rangle \end{aligned}$$

ここで  $\langle x_s^2 \rangle = \langle x_r^2 \rangle$  を仮定すると

$$\langle d^2 \rangle = 2(\langle x_s^2 \rangle - \langle x_s x_r \rangle)$$

となり, ここで自己相関関数  $R(\tau) = \langle x(T, t)x(T, t + \tau) \rangle$  を用いると

$$\langle d^2 \rangle = 2(R(0) - R(T)) \quad (4.11)$$

となる。ここで  $R(0)$  は定数なので  $R(T)$  について考える。Wiener-Khinchin の定理より自己相関関数の Fourier 変換はパワースペクトル  $S(\omega)$  で表される。[4]

$$\mathcal{F}(R(T)) = S(\omega) \quad (4.12)$$

一般的に  $S(\omega) = |\omega|^{-\alpha}$  と表され, これを逆フーリエ変換すると

$$\mathcal{F}^{-1}(|\omega|^{-\alpha}) = a(\alpha)|T|^{\alpha-1} \quad (4.13)$$

となる. 以上から

$$\sigma_A^2(T) \sim -R(T) = -a(\alpha)|T|^{\alpha-1} \quad (4.14)$$

である. ここで  $-a(\alpha)$  は正である. したがって  $T$ - $\sigma_A^2$  グラフにおいて  $\alpha = 0$  の成分は負の傾き,  $\alpha = 1$  の成分は定数,  $\alpha = 2$  の成分は正の傾きを持つことになり, それぞれを white noise, flicker noise, drift noise と呼ぶ. また  $T$ - $\sigma_A^2$  グラフにおいて  $\sigma_A^2$  が最小となるのは全ノイズの影響が最小になる積分時間と言える.

#### 4.2.2 方法

室外機を屋内に設置し, アンテナ全体を電波吸収体で覆った. その状態で室温の黒体放射を 1 時間測定した. 測定中は出力結果の人為的な変動を防ぐため, 観測装置を安定に保つよう配慮した. 次に測定用計算機上の Allan 分散計算ツール allan を用いて Allan 分散を計算した. ただし Allan 分散の計算は  $t > 1000$  のデータで行った.

#### 4.2.3 結果

図 5 に常温黒体の測定結果を示す. また, 図 6 に Allan 分散の  $T$  依存性を示す. 図 6 から  $\sigma_A^2$  は  $T = 59$  で最小値を取るため,  $t_{eff} = 59$  である.

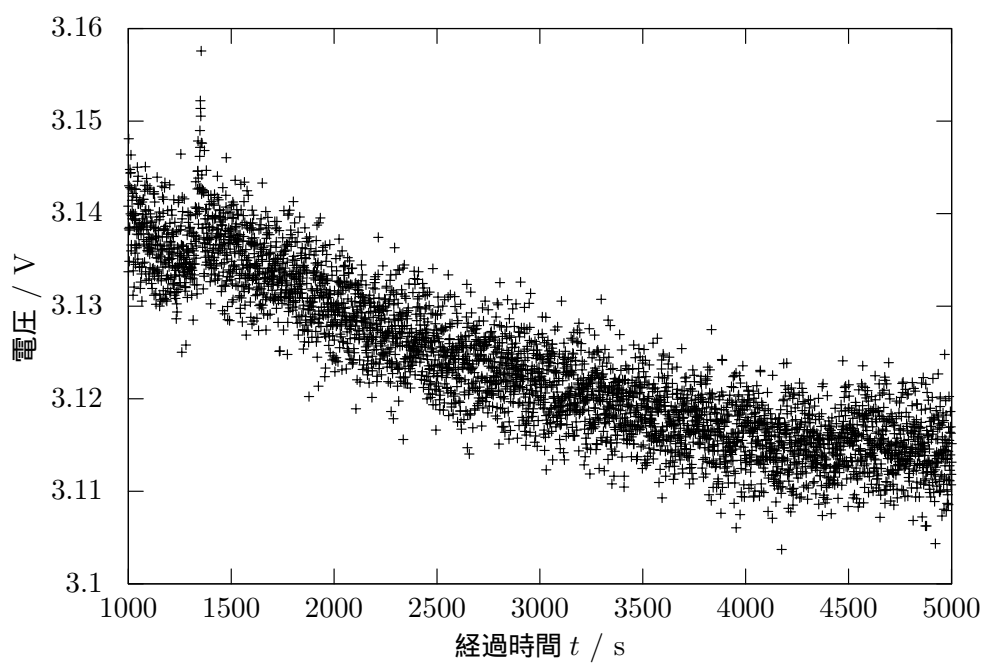


図 5 常温黒体の測定

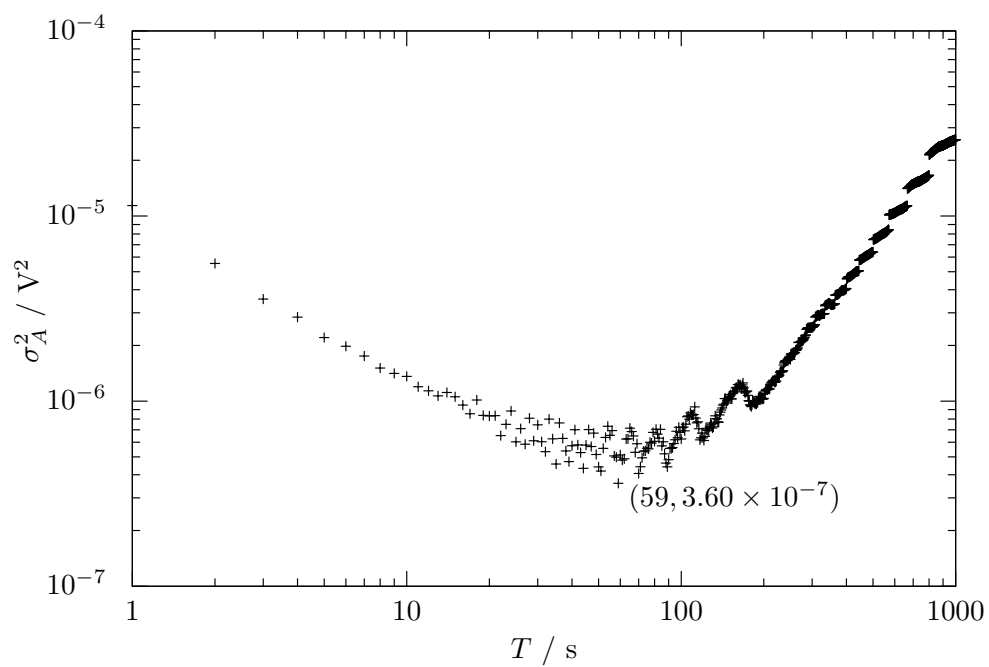


図 6  $T$ - $\sigma_A^2$  グラフ

## 5 太陽電波観測

### 5.1 原理

#### 5.1.1 chopper-wheel 法

chopper-wheel 法は電波望遠鏡の受信信号から大気の放射, 吸収の寄与を除く手法である. ここで  $V_{on}$ ,  $V_{off} = V_{sky}$ ,  $V_R$  をそれぞれ観測対象の天体, その近傍で天体を外した方向, 常温の黒体を観測したときの受信機の出力電圧とする. (2.8) からそれぞれ

$$V_{on} = a (\eta_c T_B e^{-\tau} + T_{atm}(1 - e^{-\tau}) + T_{RX}) \quad (5.1)$$

$$V_{off} = V_{sky} = a (T_{atm}(1 - e^{-\tau}) + T_{RX}) \quad (5.2)$$

$$V_R = a (T_R + T_{RX}) \quad (5.3)$$

ここで  $T_B$  は天体の輝度温度,  $T_{atm}$  は地球大気の温度,  $T_R$  は常温黒体の温度,  $T_{RX}$  は受信機雑音温度である. また  $\tau$  は大気の光学的厚み,  $\eta_c$  は電波望遠鏡の感度パターンと天体の輝度温度の結合係数である. 結合定数はアンテナの受信感度のある立体角に占める天体の視半径の割合を表す. ここで  $T_A^*$  を以下で定義する.

$$\begin{aligned} T_A^* &= \frac{V_{on} - V_{off}}{V_R - V_{sky}} T_R \\ &= \frac{\eta_c T_B e^{-\tau}}{T_R - T_{atm}(1 - e^{-\tau})} T_R \end{aligned}$$

ここで  $T_R \simeq T_{atm}$  とすると

$$T_A^* = \eta_c T_B \quad (5.4)$$

となる. この方法で得られる  $T_A^*$  は大気吸収補正済みアンテナ温度という量である.

天球の視半径がアンテナの主ビームより十分小さい場合結合定数  $\eta_c$  は

$$\eta_c = \eta_{MB} \eta_{ff} \quad (5.5)$$

と表される. ここで  $\eta_{MB}$  は主ビーム能率,  $\eta_{ff}$  は主ビーム占有率である. 主ビーム能率  $\eta_{MB}$  はアンテナの感度立体角に占める主ビームの割合である. 有限開口のパラボラアンテナは回折により主ビーム以外にも感度を持ち, それは光軸からの角度に対して sinc 関数の 2 乗で分布する. 主ビーム以外の感度域はサイドローブと呼ばれ, 全ビーム立体角に占める主ビームの割合が主ビーム能率となる. 主ビーム能率は木星や月などの視半径と表面温度が既知な天体を標準として校正される. 主ビーム占有率  $\eta_{ff}$  は主ビームに占める天体の割合であり 5.1.2 節で述べる.

### 5.1.2 主ビーム占有率 $\eta_{ff}$

観測対象の天体が一様な輝度分布を持つとき、その主ビームに占める割合が主ビーム占有率  $\eta_{ff}$  である。アンテナの光軸からの角度に対するビームの分布を  $P_\nu(\theta, \phi)$  とするとき  $\eta_{ff}$  は

$$\eta_{ff} = \frac{\int \int_{source} P_\nu(\theta, \phi) d\Omega}{\int \int_{4\pi} P_\nu(\theta, \phi) d\Omega} \quad (5.6)$$

と表される。ここで  $\int \int_{source} d\Omega$  は天体の占める領域での積分である。ここで主ビームを幅  $\sigma$  の Gauss 関数で近似すると

$$\begin{aligned} \eta_{ff} &= \frac{\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\theta_\odot} \exp(-\theta^2/2\sigma^2) \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\infty \exp(-\theta^2/2\sigma^2) \theta d\theta} \\ &= \frac{\sigma^2 (1 - \exp(-\theta_\odot^2/2\sigma^2))}{\sigma^2} \\ &= 1 - \exp\left(-\frac{\theta_\odot^2}{2\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (5.7)$$

ここで  $\theta_\odot$  は天体の視半径である。

また  $\sigma$  は観測値から求めることができる。ここで太陽の視半径は主ビームの幅より十分小さいものとする。図 7 のように固定されたアンテナの主ビーム中心を太陽が日周運動で通過するとき、ビームの分布を Gauss 関数と近似したことから受信機の実出力信号も Gauss 関数となる。すなわち出力信号  $V(t)$  は以下の  $v(t)$  で fit できる。

$$v(t) = A + B \exp\left(-\frac{(t - t_0)^2}{2\sigma_t^2}\right) \quad (5.8)$$

ここで  $A, B$  は定数、 $\sigma_t$  は時間軸での幅である。さらに観測時の日周運動の角速度  $\mu$  は太陽の赤緯  $\delta$  を用いて

$$\mu = \frac{360 \cos \delta}{24 \times 60 \times 60} [^\circ \text{s}^{-1}] \quad (5.9)$$

となる。したがって  $\sigma_t$  を  $\sigma$  に変換以下の式で変換できる。

$$\sigma = \sigma_t \mu \quad (5.10)$$

またアンテナの主ビーム幅は半値全幅 (HPBW) で表されるのでその値は

$$\text{HPBW} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma \quad (5.11)$$

で与えられる。

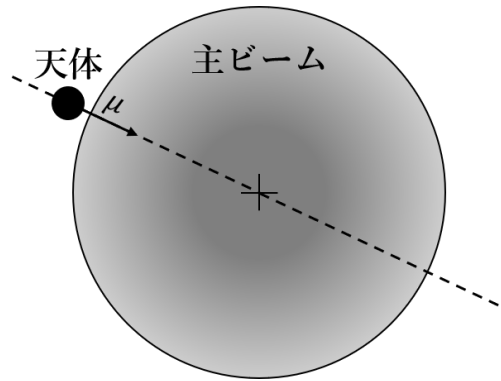


図 7 主ビームを通過する天体

## 5.2 方法

室外機を直射日光が当たる場所に設置し, 続いて気温を測定した. 次に赤道儀の極軸合わせを行った. 極軸の高度は慶應義塾大学の緯度である北緯  $35.5559^\circ$  に  $\pm 0.5^\circ$  の範囲で事前に設定済みである. その後コンパスを用いて極軸を北に向けた. 次に緯度軸と経度軸を調整し大まかにアンテナの方向を太陽に向けた. そして一方の軸を固定した状態でもう一方の軸を動かし, 受信機の出力が最大になるように調整した. 同様の手順で両方の軸をアンテナが太陽の方向を向くように調整した. 次に赤道儀の緯度軸を西方向に動かし, 太陽の動きを先回りするようにした. この状態で 1 時間程度測定を行った.

上記の測定が完了した後アンテナを電波吸収体で覆い, 常温の黒体放射を測定した.

## 5.3 結果

図 8 に測定データを示す. 図 8 の網掛け (青) 部は太陽電波, 網掛け (赤) 部は黒体放射の測定である. それぞれの経過時間は  $t = 583\text{--}3620\text{ s}$ ,  $t = 3622\text{--}4003\text{ s}$  である. また気温  $T_R = 297.7\text{K}$

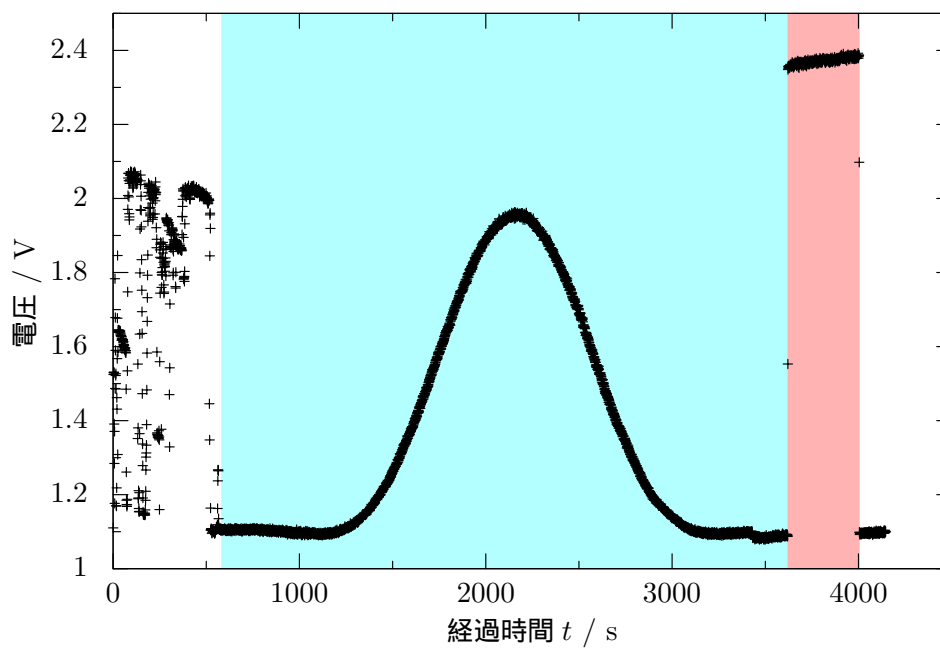


図 8 太陽電波の測定

### 5.3.1 主ビーム幅・結合定数の算出

図 9 に太陽電波の測定値を (5.8) 式の  $v(t)$  で最小自乗 fit した曲線を示す. 最小自乗 fit は gnuplot の fit 機能を用いて行った. ただしグラフの見易さのため, 測定値のプロットは 1/10 に間引いている. 最小自乗 fit の結果各定数は以下のように求まった.

$$A = 1.0858 \pm 0.0008 \text{ V} \quad (5.12)$$

$$B = 0.8858 \pm 0.0014 \text{ V} \quad (5.13)$$

$$t_0 = 2161.6 \pm 0.6 \text{ s} \quad (5.14)$$

$$\sigma_t = 372.47 \pm 0.82 \text{ s} \quad (5.15)$$

また太陽の日周運動の角速度  $\mu$  は測定日の太陽の赤緯が  $\delta = 12.025^\circ$  だったことから (5.9) 式より

$$\mu = \frac{360 \cos(12.025^\circ)}{24 \times 60 \times 60} = 4.08 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (5.16)$$

となる, したがって  $\sigma$  は

$$\sigma = 1.517 \pm 0.003^\circ \quad (5.17)$$

である. したがってアンテナの主ビーム幅は (5.11) から

$$\text{HPBW} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma = 3.574 \pm 0.8^\circ \quad (5.18)$$

である. またビーム占有率  $\eta_{ff}$  は測定日の太陽の視半径が  $\theta_\odot = 0.26283^\circ$  だったことから (5.7) 式より

$$\begin{aligned} \eta_{ff} &= 1 - \exp\left(-\frac{\theta_\odot^2}{2\sigma^2}\right) \\ &= 1.488 \times 10^{-2} \end{aligned} \quad (5.19)$$

また不確かさについては

$$\frac{\partial \eta_{ff}}{\partial \sigma} = -\frac{\theta_\odot^2}{\sigma^3} \exp\left(-\frac{\theta_\odot^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.20)$$

なので

$$\delta_{\eta_{ff}} = \left| \frac{\theta_\odot^2}{\sigma^3} \exp\left(-\frac{\theta_\odot^2}{2\sigma^2}\right) \right| \delta_\sigma \quad (5.21)$$

$$= 7 \times 10^{-5} \quad (5.22)$$

となり, 以上から  $\eta_{ff}$  は

$$\eta_{ff} = (1.488 \pm 0.007) \times 10^{-2} \quad (5.23)$$



となる. したがって主ビーム能率  $\eta_{MB} = 0.6 \pm 0.1$  とすると結合定数  $\eta_c$  は

$$\overline{\eta_c} = \overline{\eta_{MB}} \cdot \overline{\eta_{ff}} \quad (5.24)$$

$$\delta_{\eta_c} = \overline{\eta_c} \sqrt{\left(\frac{\delta_{\eta_{MB}}}{\eta_{MB}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\eta_{ff}}}{\eta_{ff}}\right)^2} \quad (5.25)$$

なので

$$\eta_c = (8.9 \pm 1.4) \times 10^{-3} \quad (5.26)$$

となる.

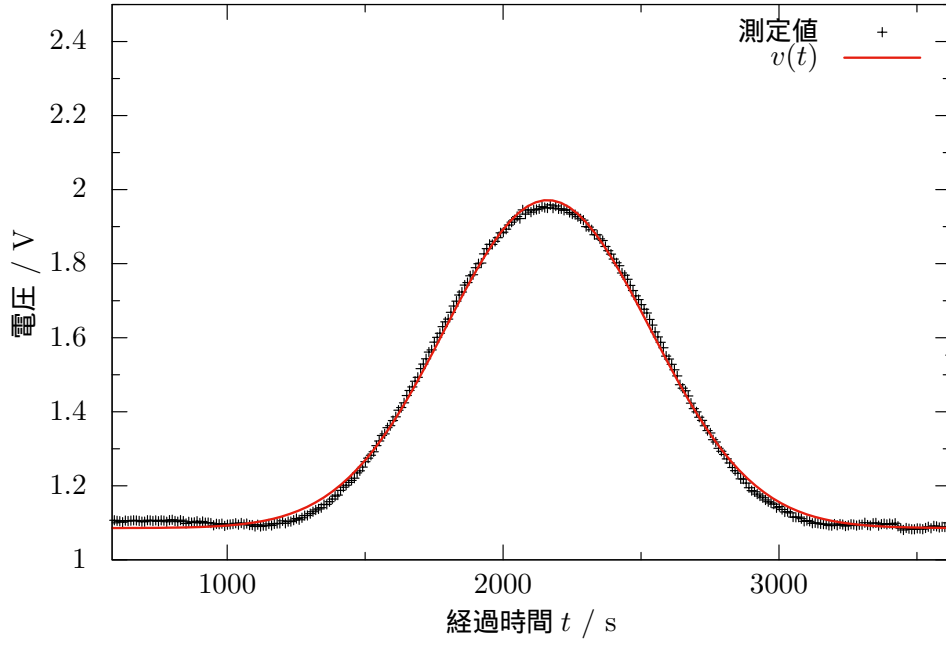


図 9 太陽電波の測定値と  $v(t)$

### 5.3.2 太陽輝度温度算出

図 10 の網掛け (赤), 網掛け (青), 網掛け (黄) 領域で  $V_{off}$ ,  $V_{on}$ ,  $V_R$  を測定すると以下のようになる.

$$V_{off} = 1.104 \pm 0.002 \text{ V} \quad (5.27)$$

$$V_{on} = 1.954 \pm 0.004 \text{ V} \quad (5.28)$$

$$V_R = 2.371 \pm 0.005 \text{ V} \quad (5.29)$$

太陽の平均の大気吸収補正済みアンテナ温度は

$$\overline{T_A^*} = \frac{\overline{V_{on}} - \overline{V_{off}}}{\overline{V_R} - \overline{V_{off}}} T_R = 1.997 \times 10^2 \text{ K} \quad (5.30)$$

$$(5.31)$$

したがって太陽の平均の輝度温度は

$$\overline{T_{sun}} = \frac{\overline{T_A^*}}{\eta_c} = 2.2 \times 10^4 \text{ K} \quad (5.32)$$

また大気吸収補正済みアンテナ温度の標準偏差は

$$\begin{aligned} \delta_{T_A^*} &= \overline{T_A^*} \sqrt{\left( \frac{\delta V_{on} - \delta V_{off}}{\overline{V_{on}} - \overline{V_{off}}} \right)^2 + \left( \frac{\delta V_R - \delta V_{off}}{\overline{V_R} - \overline{V_{off}}} \right)^2} \\ &= 1.790 \text{ K} \end{aligned}$$

したがって太陽の輝度温度の標準偏差は

$$\begin{aligned} \delta_{T_{sun}} &= \overline{T_{sun}} \sqrt{\left( \frac{\delta_{T_A^*}}{\overline{T_A^*}} \right)^2 + \left( \frac{\delta_{\eta_c}}{\eta_c} \right)^2} \\ &= 3.5 \times 10^3 \text{ K} \end{aligned} \quad (5.33)$$

以上から太陽の輝度温度は以下のように求まる.

$$T_{sun} = (2.2 \pm 0.4) \times 10^4 \text{ K} \quad (5.34)$$

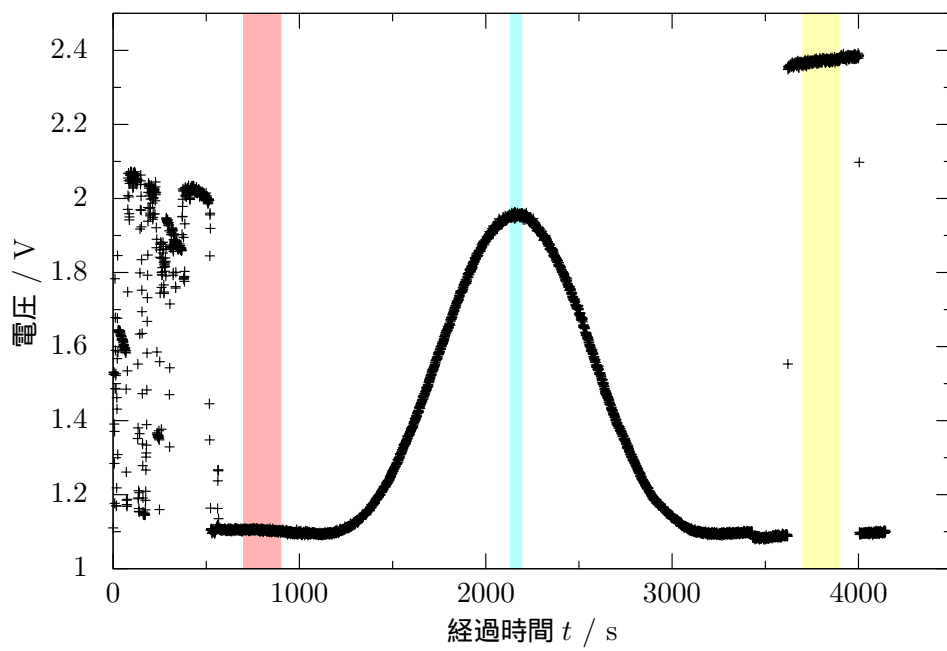


図 10 平均を計算する領域

## 5.4 考察

今回観測した 12GHz 帯は彩層からの放射が支配的であり、その温度は 4200-10000°C 程度である.[5] したがって今回得られた結果は文献値からするとオーダーは一致するが 120% 程度高いことがわかる。この原因として太陽活動の変化、人工の電波源による外乱、放射の影響などが考えられる。

まず太陽活動の変化について考える。太陽活動が活発なとき太陽電波の強度が大きくなることが知られている.[6] また太陽活動は黒点数が多いときに極大になる。しかし国立天文台の太陽活動データベースによれば当日のデータは存在しないものの、測定が行われた 2019 年 4 月 22 日付近の黒点相対数は少ないことがわかる.[1] したがって当日の太陽活動が著しく大きかったため輝度温度が大きく現れたとは考えにくい。

次に人工の電波源による外乱について考える。今回観測に用いた 12GHz 帯は電波法によって保護されている.[3] したがってアマチュア無線や移動体通信などでの外乱が起こることは考えにくい。また衛星通信の場合 12GHz 帯は BS 放送などで用いられているが、これを提供する衛星は一般に静止衛星なので定常的な雑音となることはあっても時間変化は比較的少ないと考えられる。また、アンテナも指向性のものであるので人工の電波源による外乱は起きていないと考えられる。

まず放射の影響について、文献値に比べて測定値が高く (2.11) から太陽から地球までの光路上に温度の高い物質があればその影響で算出される輝度温度が高くなると考えられる。その候補として、彩層の外側に存在するコロナが考えられる。仮にコロナにより輻射の輝度温度が高められ、大気による吸収が十分少ないと仮定した場合コロナの温度を  $T = 1.0 \times 10^6 \text{K}$ 、彩層の温度を  $T_B(0) = 1.0 \times 10^4 \text{K}$  とすると (2.11) から

$$\begin{aligned} 2.2 \times 10^4 &= 1.0 \times 10^4 e^{-\tau_\nu} + 1.0 \times 10^6 (1 - e^{-\tau_\nu}) \\ \therefore \tau_\nu &= 0.00529 \end{aligned} \tag{5.35}$$

が得られ、これがコロナの光学的厚みであると考えられる。コロナは希薄なガスであり吸収係数  $\alpha_\nu$  も小さいと考えられるので、もっともらしいと考えられる。

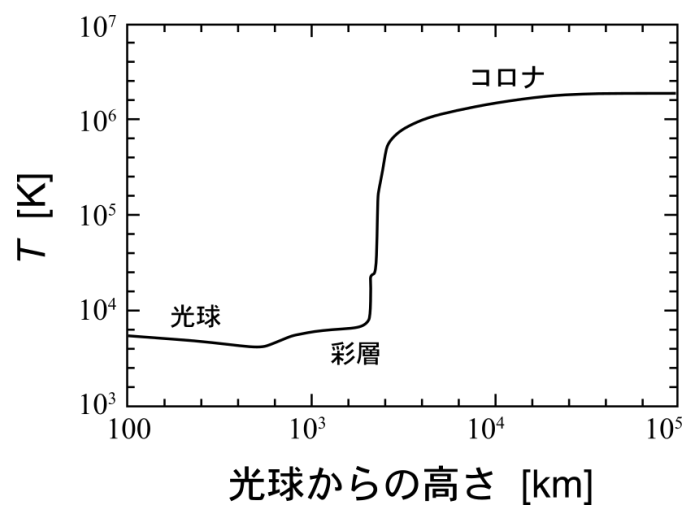


図 11 太陽の温度構造 (実験テキストより引用)

## 6 まとめ

以上の実験から電波望遠鏡の性能を評価し, 受信機雑音温度, Allan 分散, 最大有効積分時間を求めた. また太陽表面温度を算出しオーダーが一致することが確かめられた. 一方で太陽表面温度の測定値は文献値と差があり, さらなる追求が望まれる.

## 参考文献

- [1] 国立天文台. 太陽活動データベース. <https://solarwww.mtk.nao.ac.jp/jp/database.html>. (Accessed on 05/14/2021).
- [2] 国立天文台. 理科年表プレミアム. <http://www.rikanenpyo.jp.kras1.lib.keio.ac.jp/member/?module=Member&action=Login>. (Accessed on 04/30/2021).
- [3] 一般社団法人電波産業会. 検討対象の周波数帯. <https://www.arib.or.jp/service/gyoumu-shuuhasuu.html>. (Accessed on 05/14/2021).
- [4] 石川顕一東京大学工学部. 統計数理. [https://ocw.u-tokyo.ac.jp/lecture\\_files/engin\\_05/6/notes/ja/ishikawa6.pdf](https://ocw.u-tokyo.ac.jp/lecture_files/engin_05/6/notes/ja/ishikawa6.pdf). (Accessed on 05/13/2021).
- [5] 日本天文学会. 彩層 — 天文学辞典. <https://astro-dic.jp/chromosphere/>. (Accessed on 05/14/2021).
- [6] 名古屋大学. 電波 50 のなぜ. <https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/50naze/denpa/44.html>. (Accessed on 05/14/2021).